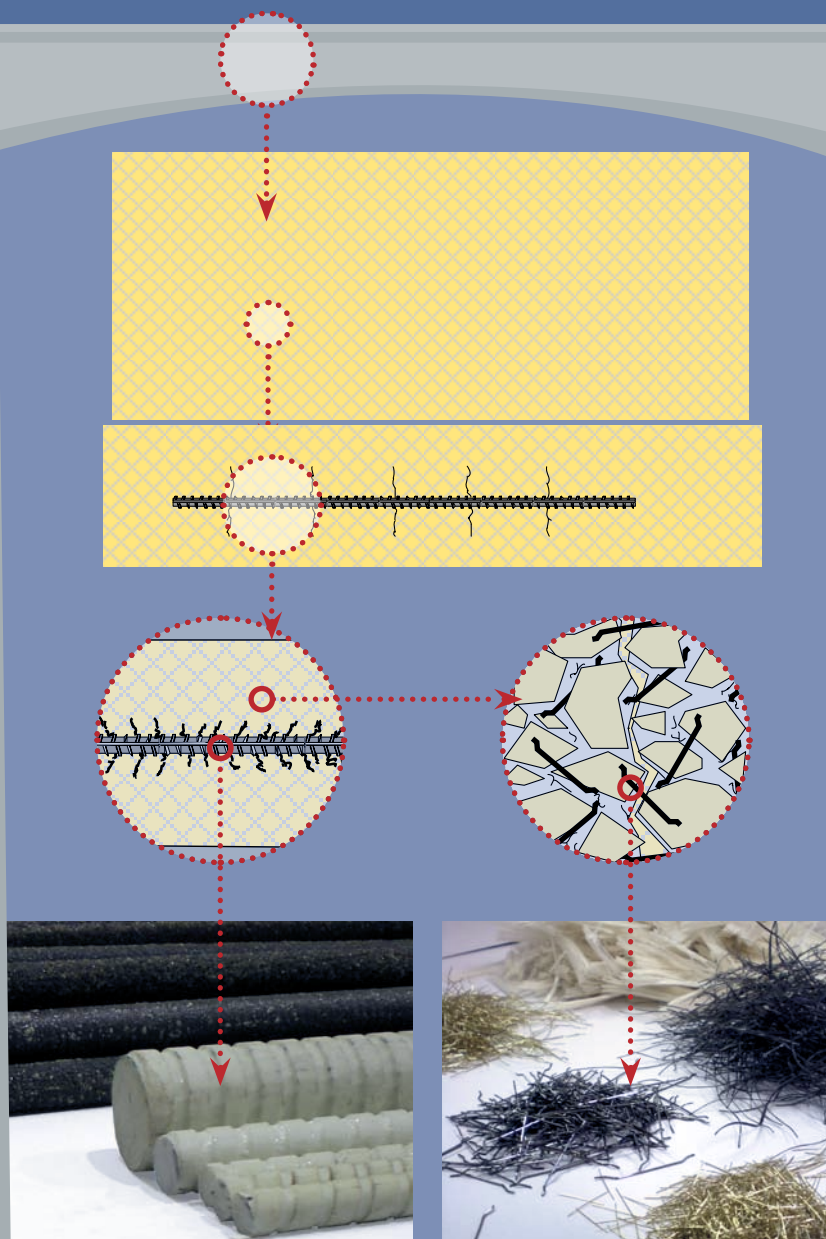


KOMPOZITAIS ARMUOTOS BETONINĖS KONSTRUKCIJOS

VADOVĖLIS



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Gintaris KAKLAUSKAS, Darius BAČINSKAS, Viktor GRIBNIAK,
Ronaldas JAKUBOVSKIS, Darius ULBINAS, Eugenijus GUDONIS,
Adas MEŠKĖNAS, Edgaras TIMINSKAS, Aleksandr SOKOLOV

KOMPOZITAIS ARMUOTOS BETONINĖS KONSTRUKCIJOS

VADOVĖLIS

UDK 624.01(075.8)

Ko-166

G. Kaklauskas, D. Bačinskas, V. Gribniak, R. Jakubovskis, D. Ulbinas, E. Gudonis, A. Meškėnas, E. Timinskas, A. Sokolov. Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos: vadovėlis. Vilnius: Technika, 2012. 300 p.

Vadovėlis parengtas vadovaujantis statybinių konstrukcijų projektavimo standartais ir remiantis naujausiais mokslo pasiekimais. Knygoje nagrinėjami inovatyvūs betoninių konstrukcijų armavimo būdai: dispersiniu plaušu ir kompozitiniais strypais. Nagrinėjamosios medžiagos plačiai naudojamos statyboje vos kelis dešimtmečius, todėl projektuotojai ir konstruktoriai dažnai nežino šių medžiagų naudojimo ypatumų bei projektavimo principų. Vadovėlyje aptariamos plaušo ir kompozitinės armatūros konstrukcinės savybės, jų naudojimo sritys, atsparumas aplinkos poveikiams, pateikiami bendrieji projektavimo principai. Vadovėlyje dėstomą medžiagą papildė skaičiavimo uždaviniai ir jų sprendimo pavyzdžiai.

Vadovėlis skirtas visų pakopų statybos specialybių studentams. Knyga gali būti naudinga visiems, kurie domisi inovatyvių medžiagų naudojimu statyboje.

Leidinį rekomendavo VGTU Statybos fakulteto studijų komitetas

Recenzavo: prof. dr. R. Kliukas, VGTU Medžiagų atsparumo katedra
prof. habil. dr. J. Atkočiūnas, VGTU Statybinės mechanikos katedra

Leidinyi parengtas ir išleistas už Europos socialinio fondo lėšas vykdant projektą „Transporto ir civilinės inžinerijos sektorių mokslo, verslo ir studijų integralumo didinimas (TRANCIV)“, VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-008

VGTU leidyklos TECHNIKA 1411-S
mokomosios metodinės literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-349-1
doi:10.3846/1411-S

© Gintaris Kaklauskas, Darius Bačinskas, Viktor Gribniak, Ronaldas Jakubovskis, Darius Ulbinas, Eugenijus Gudonis, Adas Meškėnas, Edgaras Timinskas, Aleksandr Sokolov, 2012
© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2012

TURINYS

Pratarmė.....	6
Įvadas	8
I. Dispersiškai armuotos betoninės konstrukcijos.....	11
1. Bendrosios žinios apie betoninių konstrukcijų dispersinį armavimą.....	11
1.1. Įžanga.....	11
1.2. Dispersinio armavimo tikslas ir esmė. Armavimo plaušine armatūra pranašumai ir trūkumai	11
1.3. Plaušinė armatūra	14
1.4. Dispersiškai armuoto betono raida.....	20
1.5. Plaušu armuoto betono naudojimo sritys	21
1.6. Skyriaus apibendrinimas.....	25
2. Plieno plaušu armuoto betono gamybos technologija	27
2.1. Įžanga.....	27
2.2. Plieno plaušo gamyba	27
2.3. Dispersiškai armuoto betono mišinio gamyba	30
2.4. Plaušo parametrų įtaka betono mechaninėms savybėms	33
2.5. Skyriaus apibendrinimas.....	36
3. Plieno plaušu armuoto betono fizikinės ir mechaninės savybės.....	38
3.1. Įžanga.....	38
3.2. Gniuždomojo betono diagrama.....	39
3.3. Tamprumo modulis	43
3.4. Tempiamojo betono diagrama.....	44
3.5. Tempiamojo stiprio ir liekamojo stiprio nustatymas	47
3.6. Tempiamojo sustandėjimo efektas	53
3.7. Kerpamasis ir sukamasis stipriai	58
3.8. Savybės veikiant dinaminei apkrovai	59
3.9. Kiti poveikiai.....	60
3.10. Skyriaus apibendrinimas.....	62
4. Plieno plaušo ir betono sąveika	65
4.1. Įžanga.....	65
4.2. Tyrimo lygmenys ir metodai	65
4.3. Plieno plaušo ir betono sukibimas	68
4.4. Fibrų ištraukimo bandymai	70
4.5. Fibrų ištraukimo mechanika	72
4.6. Skyriaus apibendrinimas.....	83
5. Plieno plaušu armuotų konstrukcijų laikomosios galios ir pleišėjimo analizė.....	87
5.1. Įžanga.....	87
5.2. Empirinis pleišėjimo nustatymo būdas	88

5.3. Supaprastintasis metodas	95
5.4. Skerspjūvio sluoksnių modelis	104
5.5. Diskretaus pleišėjimo modelis	110
5.6. Skyriaus apibendrinimas	120
II. Kompozitiniais strypais armuotos betoninės konstrukcijos	124
6. Bendrosios žinios apie kompozitinio polimero armatūrą	124
6.1. Įžanga	124
6.2. Kompozitinės armatūros naudojimo tikslai ir sritys	125
6.3. Kompozitinės armatūros raidos istorinė apžvalga	129
6.4. Kompozitinės armatūros struktūra	132
6.5. Skyriaus apibendrinimas	141
7. Kompozitinės armatūros gamybos technologija	143
7.1. Įžanga	143
7.2. Pultruzija	143
7.3. Dengimas rankomis	145
7.4. Kiti polimerinių kompozitų gamybos būdai	149
7.5. Kompozitinės armatūros gaminiai	150
7.6. Skyriaus apibendrinimas	152
8. Kompozitinės armatūros savybės	154
8.1. Įžanga	154
8.2. Fizikinės savybės	154
8.3. Mechaninės savybės veikiant trumpalaikiams poveikiams	158
8.4. Mechaninės savybės, veikiant ilgalaikiams ir cikliniams poveikiams	163
8.5. Skyriaus apibendrinimas	169
9. Polimerinės armatūros ilgaamžiškumas ir senėjimas	171
9.1. Įžanga	171
9.2. Aplinkos veiksniai, lemiantys polimerinės armatūros senėjimą	175
9.3. Kompozitinių polimerų senėjimas	177
9.4. Senėjimo prevencijos priemonės	183
9.5. Skyriaus apibendrinimas	190
10. Kompozitinės armatūros ir betono sąveika	196
10.1. Įžanga	196
10.2. Armatūros ir betono sukibimo sąvoka	197
10.3. Įtempių perdavimo reiškiny	198
10.4. Eksperimentiniai sukibimo tyrimai	202
10.5. Sukibimo įtempių perdavimo stadijos	207
10.6. Armatūros ir betono sąveiką apibūdinantys veiksniai	212
10.7. Kompozitinės armatūros sukibimo ypatumai	216
10.8. Armatūros inkaravimo ilgio apskaičiavimas	222
10.9. Skyriaus apibendrinimas	230

11. Kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų projektavimas:	
pagrindai ir saugos ribinis būvis	235
11.1. Įžanga	235
11.2. Projektavimo pagrindai	236
11.3. Kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų normalinio pjūvio stiprumas	241
11.4. Kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų įstrižojo pjūvio stiprumas ...	248
11.5. Plastiškumo ir deformatyvumo indeksų sąvokos.....	252
11.6. Skaičiavimo pavyzdžiai.....	254
11.7. Skyriaus apibendrinimas	263
12. Kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų projektavimas:	
tinkamumo ribinis būvis	266
12.1. Įžanga	266
12.2. Įtempių, plyšio pločio ir įlinkių ribojimas.....	267
12.3. Įlinkių ir normalinių plyšių pločio nustatymas	270
12.4. Skyriaus apibendrinimas	295
Baigiamasis žodis	298

PRATARMĖ

Pastaraisiais metais vietoj *tradicinio gelžbetonio* vis dažniau vartojama platesnė *armuotojo betono* sąvoka, nusakanti įvairių armatūros rūšių ir betono kompozitą. Be įprastos strypinės plieninės armatūros, vis plačiau taikomas dispersinis armavimas, konstrukcijoms armuoti naudojami ir įvairūs polimerinio kompozito (anglies, stiklo, aramido, bazalto pluoštų) strypai.

Armuotasis betonas yra kompozitinė medžiaga, pasižyminti ypač sudėtinga fizikine ir mechanine elgsena. Plastiškumas, armatūros ir betono sąveikos aprašymas, ilgalaikiai efektai (susitraukimas, valksnumas, relaksacija), pleišėjimas, medžiagos senėjimas ir mastelio faktorius yra tik dalis iššūkių, su kuriais susiduria armuotojo betono konstrukcijų projektuotojai, statytojai ir eksploatuotojai.

Vilniaus Gedimino technikos universitete (VGTU) jau kelis dešimtmečius atliekami išsamūs gelžbetoninių konstrukcijų tyrimai. Pastaraisiais metais pradėta tirti ir naujomis medžiagomis armuotų konstrukcijų elgsena: įvairių tipų dispersine armatūra ir polimerinio kompozito strypais. Šiuo metu tokius tyrimus atlieka Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų bei Tiltų ir specialiųjų statinių katedrų mokslininkai.

Vadovėlių paskatino parašyti ne tik tyrimų ir mokslinio darbo metu sukaupta patirtis, be ir šiai temai nagrinėti skirtų vadovėlių lietuvių kalba stoka. Autoriai tikisi iš dalies užpildyti šią spragą, apibendrindami tiek pasaulyje, tiek savo tyrimų metu gautus rezultatus.

Vadovėlis parengtas pagal paskaitų ciklo „Dispersiškai armuoto betono statinių konstrukcijos“ ir „Nemetaline armatūra ir pluoštu armuotų konstrukcijų statiniai“ dėstomą medžiagą, skaitomą VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedros magistrantams. Bendra knygos mokslinė redakcija buvo atlikta VGTU profesoriaus, Tiltų ir specialiųjų statinių katedros vedėjo G. Kaklauskos. Pirmąjį knygos skyrių parašė G. Kaklauskas, V. Gribniak ir D. Ulbinas. Antrąjį skyrių – D. Ulbinas, G. Kaklauskas, ir A. Sokolov. Trečiąjį – V. Gribniak, D. Ulbinas ir A. Meškėnas. Ketvirtąjį – R. Jakubovskis, G. Kaklauskas ir A. Sokolov. Penktąjį – G. Kaklauskas, V. Gribniak ir A. Meškėnas. Šeštąjį – D. Bačinskas, R. Jakubovskis ir E. Timinskas. Septintąjį ir aštuntąjį – R. Jakubovskis, D. Bačinskas. Devintąjį – E. Timinskas, V. Gribniak ir E. Gudonis. Dešimtąjį – R. Jakubovskis, G. Kaklauskas ir V. Gribniak. Vienuoliktąjį – R. Jakubovskis ir D. Bačinskas. Dvyliktąjį – D. Bačinskas ir E. Gudonis.

Autoriai reiškia padėką Statybos fakulteto prodekanui doc. dr. Linui Juknevičiui už pagalbą rengiant vadovėlį. Ypatingą padėką reiškia recenzentams – Vilniaus Gedimino technikos universiteto studijų prorektoriumi prof. dr. Romualdui Kliukui ir Statybinės mechanikos katedros vedėjui prof. habil. dr. Juozui Atkočiūnui už vertingas pastabas rengiant vadovėlį.

Autoriai taip pat reiškia padėką statybos inžinieriui projektuotojui Ryčiui Mušauskui, prisidėjusiam prie vadovėlio rengimo, dr. Mykolui Daugevičiui, pateikusiam vertingų pastabų rengiant septintąjį skyrių. Autoriai dėkoja Tiltų ir specialiųjų statinių katedros magistrantams, dalyvavusiems diskusijose rengiant vadovėlį.

Vienas iš autorių – Viktor Gribniak nuoširdžiai dėkoja Lietuvos mokslo tarybai už galimybę 2011–2012 m. atlikti podoktorantūros stažuotę, vykdomą pagal Europos Sąjungos struktūrinių fondų Žmogiškųjų išteklių plėtros veiksmų programos Mokslininkų ir kitų tyrėjų mobilumo ir studentų mokslinių darbų skatinimo priemonę (VP1-3.1-ŠMM-01), įgyvendinant projektą „Podoktorantūros (*post doc*) stažuočių įgyvendinimas Lietuvoje“.

Autoriai

IVADAS

Šiuolaikiniai statiniai turi atitikti griežtus eksploatacinius reikalavimus: saugumo, ilgaamžiškumo, funkcionalumo, ekologiškumo, optimalių priežiūros išlaidų ir kt. Svarbūs inžineriniai infrastruktūros statiniai, tokie kaip tiltai ir viadukai, projektuojami mažiausiai 100 metų eksploatacijos laikotarpiui, todėl statinio ilgaamžiškumo užtikrinimo klausimas ypač aktualus.

Pastarąjį penkiasdešimtmetį visame pasaulyje betonas ir armuotasis betonas vis plačiau naudojamas tiek civiliniams, tiek pramonės ir infrastruktūros statiniams statyti. Skirtingai nuo plieninių ar medinių konstrukcijų, betono gamyboje dažniausiai naudojamos vietinės žaliavos, todėl betoninių konstrukcijų kaina yra gerokai mažesnė. Be to, rūpestingai prižiūrimi gelžbetoniniai statiniai išsiskiria ilgaamžiškumu ir neribota architektūrinės formos įvairove. Dėl šių priežasčių gelžbetonis šiuolaikinėje visuomenėje tapo antra (po vandens) žmonijos naudojama medžiaga. Dabar statyboje kasmet sunaudojama daugiau nei 4 mlrd. kub. m betono.

Gera suprojektuotos ir tinkamai pastatytos gelžbetoninės konstrukcijos turėtų būti naudojamos šimtmečius, deja, šiuo metu Europoje statinių remontui ir rekonstrukcijai išleidžiama beveik pusė statybos pramonės biudžeto. Taip yra todėl, kad dėl mažo betono tempiamojo stiprio ir jo trapumo eksploatuojamose konstrukcijose neretai atsiveria neleistino pločio plyšių: plieninė armatūra intensyviai rūdija, susidarę korozijos produktai toliau ardo betono struktūrą. Nesiimant apsaugos ar stiprinimo veiksmų, statinys greitai praranda eksploatacines savybes.

Nenuostabu, kad pasaulyje didžiulės finansinės investicijos, mokslininkų ir inžinierių pastangos skiriamos konstrukciniams ir technologiniams sprendimams tobulinti bei naujoms, efektyvioms medžiagoms kurti. Galima išskirti dvi pagrindines tyrimų kryptis: 1) betono pleišėjimui suvaržyti taikomas dispersinis armavimas; 2) kuriamos atsparios korozijai kompozitinės armatūros rūšys. Knygoje apžvelgiamos abi kryptys – detalai nagrinėjamas tiek dispersinis armavimas, tiek polimerinių kompozitų strypai, naudojami šiuolaikinėse betoninėse konstrukcijose.

Pagal nagrinėjamą tematiką knygoje atitinkamai išskirtos dvi pagrindinės dalys ir dvylika skyrių. Kiekvieno skyriaus pabaigoje pateikiama trumpa santrauka, kurioje pabrėžiamos svarbiausios mintys, pateikiami kontroliniai klausimai ir skaičiavimo uždaviniai.

Pirmoji knygos dalis skirta dispersiniam betoninių konstrukcijų armavimui. *Pirmame* skyriuje pristatoma dispersinio armavimo idėja, pateikiama istorinė plaušu armuotų konstrukcijų raidos apžvalga, aptariami plaušinės armatūros tipai, galimos šios medžiagos ateities taikymo sritys. Nagrinėjamas dispersinio armavimo efektyvumas varžant plyšių vystymąsi. Parodyta, kad iš visų plaušinės armatūros tipų vienas efektyviausių ir plačiausiai betono gamyboje naudojamų yra plieno plaušas, todėl

knygoje pagrindinis dėmesys skiriamas būtent plieno plaušu armuotoms konstrukcijoms. *Antrame* skyriuje pristatoma plieno plaušo gamybos technologija, aptariami plieno plaušo tipai ir betono mišinio paruošimo būdai. *Trečias* skyrius skirtas plieno plaušu armuoto betono fizikinėmis ir mechaninėms savybėms aprašyti.

Svarbu paminėti, kad plieno plaušu armuotam betonui dažnai negalioja bendrieji kompozitų mechanikos dėsniai, kai kompozitinės medžiagos fizikinės savybės vertinamos pagal sudedamųjų komponentų (šiuo atveju plieno ir betono) tūrio ar masės dalis bendrame mišinyje. Tokie prieštaravimai bendrajai kompozitų teorijai gali būti paaiškinti betono ir plaušo sąveikos ypatumais, kurie pasireiškia mezo- ir mikrolygmenimis. Šie sąveikos ypatumai aprašomi *ketvirtame* knygos skyriuje, kuriame parodoma, kad net atskiros plieno fibros sąveika su betonu yra gana sudėtingas ir įvairiapusis procesas. Dispersinio armavimo aptarimas baigiamas *penktu* skyriumi, kuriame pristatomi pagrindiniai plieno plaušu armuotų konstrukcijų saugos ir tinkamumo ribinių būvių nustatymo metodai.

Antroji knygos dalis skirta kompozitiniais strypais armuotoms konstrukcijoms. Šiuo metu kompozitinė armatūra statyboje naudojama dviejose pagrindinėse srityse: gaminant konstrukcinius elementus arba stiprinant esamus statinius. Pagal paskirtį skiriasi kompozitinio gaminio tipas (strypai arba lakštai), o nuo konstrukcinio sprendinio priklauso armatūros padėtis statinio elemento skerspjūvyje (vidinis arba išorinis armavimas). Išvardyti kompozitinių medžiagų naudojimo variantai turi savo ypatumų ir naudojimo sritis, tačiau dėl ribotos vadovėlio apimties nenagrinėjamas statinių stiprinimas kompozitiniais lakštais ir išorinis armavimas. Antrojoje knygos dalyje apsiribojama plačiausiai naudojamų konstrukcijų vidiniam armavimui taikomais polimerų kompozito strypais. Aptariami kompozitinės armatūros naudojimo pranašumai ir trūkumai, lyginant ją su tradicine plienine armatūra, pristatoma kompozitinės armatūros struktūra ir dažniausiai jos gamybai naudojamos medžiagos – tam skirtas *šeštas* knygos skyrius.

Septintame skyriuje pristatoma kompozitinių strypų gamybos technologija. Fizikinės ir mechaninės kompozitinės armatūros savybės aptariamos *aštuntame* knygos skyriuje. Vienas iš akivaizdžių kompozitinės armatūros pranašumų – jos atsparumas korozijai, tačiau ilgaamžiškumo požiūriu atsiranda kitų pavojingų veiksnių: cheminių medžiagų, ultravioletinės spinduliuotės, temperatūros ir kiti poveikiai, turintys neigiamą įtaką kompozitinės armatūros struktūrai ir fizikinėmis savybėms. Kompozitinės armatūros senėjimo įvertinimo bei ilgaamžiškumo užtikrinimo klausimai aptariami *devintame* knygos skyriuje.

Dėl fizikinių ir mechaninių kompozitinės ir plieninės armatūrų skirtumų atsiranda specifinių problemų taikant tradicinius gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo metodus. Dėl gamybos technologijos ir naudojamų medžiagų skiriasi kompozitinės armatūros paviršiaus apdirbimo būdai. Šiuo metu statyboje taikomi įvairūs kompo-

zitinės armatūros paviršiaus formavimo metodai (dengimas smėliu, plastikų, skirtingų formų rumbelių sudarymas, spiralinio pluošto klijavimas ir kt.). Šie veiksniai turi didelę įtaką strypo sukibimui su betonu. Armatūros ir betono sąveikai įvertinti skirtas *dešimtas* knygos skyrius. Kompozitiniais strypais armuotų elementų saugos (stiprumo) ir tinkamumo (įlinkių ir plyšio pločio) ribinių būvių nustatymo klausimai nagrinėjami *vienuoliktame* ir *dvyliktame* knygos skyriuose.

Pirmoji ir antroji knygos dalys gali būti skaitomos atskirai, skaitytojas tekste ras nuorodų į susijusias dalis. Autoriai rekomenduoja šią knygą skaityti nuosekliai, pradedant pirmu ir baigiant dvyliktu skyriais.

I. DISPERSIŠKAI ARMUOTOS BETONINĖS KONSTRUKCIJOS

1. BENDROSIOS ŽINIOS APIE BETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ DISPERSINĮ ARMAVIMĄ

1.1. Įžanga

Jau kelis dešimtmečius dispersinė (plaušinė) armatūra visame pasaulyje plačiai naudojama kaip betono ir cementinio skiedinio mišinių priedas statybinių konstrukcijų gamyboje. Lietuvoje dispersinis armavimas dažniausiai apsiriboja įvairios paskirties pastatų grindų betonavimu, tačiau kitose pasaulio šalyse (JAV, Japonijoje, Vokietijoje ir kt.) plaušinė armatūra naudojama daug platesnėje statybinių konstrukcijų srityje, pvz., tiltų perdangoms, plonasienėms, tunelių, rezervuarų ir kitoms konstrukcijoms, automobilių kelių dangoms, oro uostų kilimo ir tūpimo takams, vamzdynamics bei poliniams pamatams. Yra įrengta nemažai didelio tarpatramio besijų perdangų, kuriose plieno plaušu armuotas betonas derinamas su išankstiniu armatūrinių lynų įtempimu. Betoninių elementų armavimas plaušu visame pasaulyje laikomas viena prioritetinių statybinių konstrukcijų vystymosi sričių, yra atlikta daug mokslinių tyrimų analizuojant dispersinio armavimo veiksmingumą.

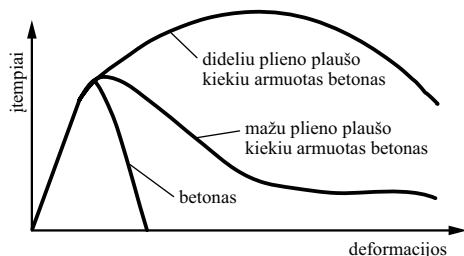
1.2. Dispersinio armavimo tikslas ir esmė.

Armavimo plaušine armatūra pranašumai ir trūkumai

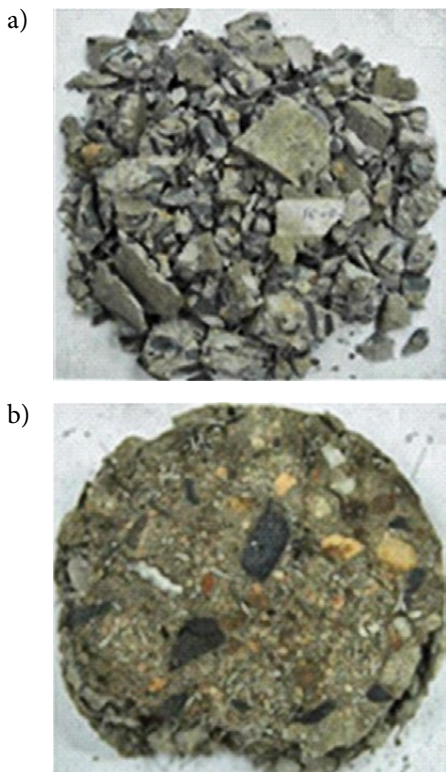
Dispersinis armavimas labai pagerina eksploatacines betono savybes. Jis neturi didesnės įtakos gniuždomojo betono stipriui ir deformacijų moduliui, tačiau visiškai pakeičia tempiamojo betono suirimo pobūdį. Dispersiškai armuotas betonas tampa izotropiškai atsparus pleišėjimui, sumažėja lokalių struktūros defektų įtaka mechaninėms jo savybėms.

Tipinės betono ir dispersiškai armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybės pateiktos 1.1 pav.

Betoninis elementas, veikiamas apkrovos, suyra trapiai, o dispersiškai armuoto betoninio elemento suirimas yra plastiškas. Skirtingas tokių elementų suirimo pobūdis pateiktas 1.2 pav., Apkrautas betoninis elementas suirdamas visiškai sutrupa (1.2 pav., a). Plaušu



1.1 pav. Tipinės betono ir dispersiškai armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybės



1.2 pav. Elementų suirimas: a – betoninio; b – dispersiškai armuoto betono

armuotas bandinys dėl dispersiškai pasiskirsčiusio plaušo sukeliamų tempimo deformacijų suvaržymo suyra plastiškai (1.2 pav., b).

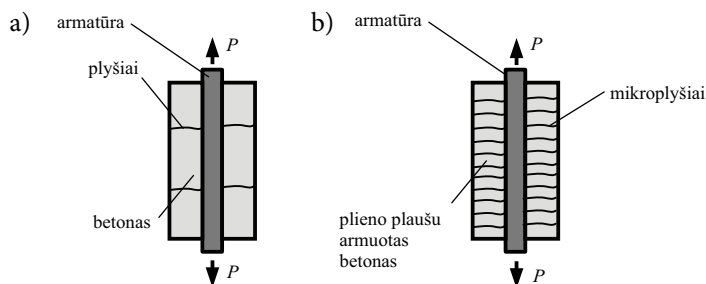
Plastiškas suirimas pagerina betono naudojimo galimybes statyboje, nes pleišėjant dispersiškai armuotam betonui, plaušas suvaržo atsiveriančius plyšius ir perima elemento tempiamos zonoje veikiančius tempimo įtempus. Dispersiškai armuojant betoną taip pat padidinamas elementų ilgaamžiškumas ir atsparumas dėvėjimuisi bei nuovargiui. Dėl plaušo įtakos gaunami du pagrindiniai efektai: pirma, suvaržomas plyšys ir padidėja betoninio elemento plastiškumas; antra, padidėja pasipriešinimas tempimo jėgoms.

Lėtesnis plyšių vystymasis, didesnis tempiamasis stipris, atsparumas smūgiams ir nuovargiui bei plastinis suirimas yra pagrindiniai veiksniai, lemiantys dispersiškai armuotų betoninių konstrukcijų pranašumą, lyginant su įprastomis betoninėmis konstrukcijomis. Dispersiškai ar-

muojant konstrukcinius elementus, galima gaminti plonesnes konstrukcijas.

Išnagrinėjus lėktuvų kilimo ir tūpimo takų tiesybai naudojamą dispersiškai armuoto betono elgseną, nustatyta, kad betonines dangas armuojant nuo 1 iki 2 % mišinio, galima perpus sumažinti jų storį. Be to, plieno plaušu armuojamų dangų standumas ir laikomoji galia yra didesni. Sumažėjus dangos storiui, sumažėja konstrukcijos svoris ir žmogiškųjų bei medžiagų išteklių sąnaudos. Todėl, naudojant dispersiškai armuotus elementus betoninėms konstrukcijoms armuoti, gerokai sumažėja elemento kaina.

Plaušinė armatūra gali būti naudojama statant sproginams ar smūgiams atsparias konstrukcijas. Siekiant pagerinti smūgio energijos absorbciją, plaušas naudojamas pagrindiniam armavimui arba kartu su strypine armatūra. Pažymėtina, kad chaotiškas plieno plaušo išsidėstymas geba suvaržyti plyšių vystymąsi skirtingomis kryptimis. Dėl plaušo ir betono sudaromo kompozito mikroplyšiai, atsiradę dėl statinės ar ciklinės apkrovų, toliau nebesivysto. Kaip matyti iš 1.3 pav., a, apkrovus elementą tempimo jėga P (pridedant ją prie strypinės armatūros galų), iki elemento suirimo



1.3 pav. Tempiamojo elemento pleišėjimo pobūdis: a – įprastojo; b – dispersiškai armuoto

susidaro tik keletas plyšių, tarp kurių atstumas gana didelis, o naudojant dispersiškai armuotą elementą (1.3 pav., b) plaušinės armatūros varžomi plyšiai toliau nebesivysto.

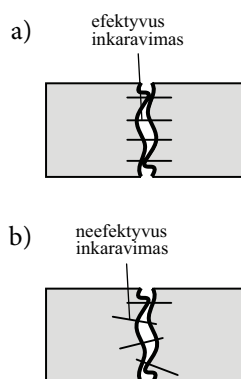
Dėl plaušo chaotiško išsidėstymo konstrukcijos tūryje galima veiksmingai naudoti plaušinę armatūrą dėl betono traukimosi atsirandančiam plyšių vystymuisi suvaržyti. Toks dispersinio armavimo taikymas vyrauja šiuolaikinių konstrukcijų gamyboje.

Dėl visų minėtų pranašumų dispersinis armavimas turėtų būti ypač racionalus ir dažnas betoninių konstrukcijų gamyboje, tačiau toks armavimas turi ir trūkumų.

Kaip vieną pagrindinių dispersinio armavimo trūkumų galima įvardyti problemas, kylančias maišant ir liejant betoną. Standartinė maišymo metodika leidžia pagaminti betono mišinį su gana mažu plieno plaušo kiekiu (skirtingų šaltinių duomenimis, nuo 1 iki 1,5 % pagal tūrį). Be to, plaušo kiekio ribojimų atsiranda, jeigu betono mišinys tiekiamas siurbliu. Taip pumpuojant dispersiškai armuotą betoną plaušas gali sukibtį į gniūžulus, o šie – užkimšti pumpavimo sistemą. Todėl siurbliu galima tiekti tik betoną, armuotą ne didesniu kaip 1 % plaušo kiekiu. Ši problema aktuali ne tik sunkiajam betonui, bet ir lengvajam, armuotam nemetaliniu plaušu.

Dispersiškai armuojant betoninius elementus, plaušas visada pasiskirsto visame elemento skerspjūvyje, todėl dėl netolygaus tempimo įtempių susidarymo betoniniame elemente didelė plaušo dalis yra neveiksminga. Kai kurie plaušai plyšių atžvilgiu išsidėsto netinkamai (inkaravimo ilgis nepakankamas), kad būtų užtikrintas tinkamas plaušo sukibimas su betono mišiniu (1.4 pav.). Veiksmingiausias plaušo išsidėstymas pateiktas 1.4 pav., a. Kaip parodyta 1.4 pav., b, nemaža plaušo dalis pasiskirsto ne statmenai atsivėrusiam plyšiui, todėl tik dalis plaušo yra veiksminga suvaržant pleišėjimo deformacijas.

Be šių trūkumų, galima įvardyti dar vieną trūkumą, būdingą dispersiniam armavimui naudojant plieno plauš-



1.4 pav. Plaušo išsidėstymas plyšyje: a – idealus pasiskirstymas; b – esamas pasiskirstymas

šą, tai – korozija. Šis procesas dažniausiai vyksta tada, kai elementas eksploatuojamas labai agresyvioje aplinkoje. Pleišėjant konstrukciniams elementams, drėgmė pasiekia plieninius plaušus, per tam tikrą laiką sumažindama jų veiksmingumą, kartu ir viso elemento laikomąją galią. Kaip jau buvo minėta, šis trūkumas būdingas tik vienai iš dispersiniam armavimui naudojamų medžiagų – plienui. Labai agresyvioje aplinkoje gali būti naudojamas nerūdijančiojo plieno plaušas.

1.3. Plaušinė armatūra

Plaušinė armatūra jau ilgą laiką naudojama įvairių formų betoninėms ir gelžbetoninėms konstrukcijoms gaminti. Dispersinė armatūra naudojama betoninių statinių konstrukcinių elementų trapiojo suirimo pobūdį paversti plastiškesniu ir suvaržyti plyšių vystymąsi. Yra žinoma daugybė skirtingų plaušų tipų. Vystantis mokslui ir technologijoms, pagerėjo kompozitinės medžiagos ir jų savybės. Dėl skirtingų gamybos technologijų ypatumų skiriasi plaušinės armatūros geometriniai parametrai ir mechaninės savybės. Dispersinei armatūrai dažniausiai naudojamos tokios medžiagos: plienas, stiklas, polimerai ir organinės kilmės plaušas. Toliau plaušinės armatūros grupės aptariamos pagal naudojamas medžiagas.

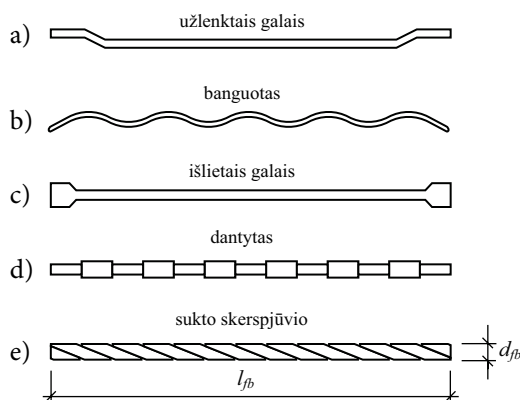
Plieno plaušas. Plieno plaušas (1.5 pav.) turi didelį tempiamąjį stiprį (0,5–2 GPa) ir tamprumo modulį (apie 200 GPa). Šiuo metu tai viena dažniausiai naudojamų kompozitinių statybinių medžiagų. Pirmą kartą metalinė armatūra (plieno plaušas ir armatūros strypai) buvo panaudotas 1848 m. Prancūzijoje, gaminant sodo inventorių (vazonus, tvoras ir pan.). Kiek vėliau, šimtmečio pabaigoje, Kalifornijoje, o dar vėliau Vokietijoje gelžbetonio gamybai buvo naudota strypinė armatūra. Gelžbetoniui paplitus po pasaulį, Prancūzijoje pradėtas gaminti betonas su plaušine armatūra. Šiandienis plieno plaušas buvo užpatentuotas A. Bernardo Kalifornijoje 1874 m. Po 10 metų toks plieno plaušas buvo pradėtas naudoti Europoje – Vokietijoje ir Prancūzijoje.

Pirmieji betono armavimo plieno plaušu moksliniai tyrimai buvo atlikti XX a. 6-ajame dešimtmetyje. Pradedant nuo 8-ojo dešimtmečio plieno plaušas buvo naudojamas eksperimentiškai tiriant betoninius grindinius.

Šiuolaikinėms konstrukcijoms armuoti naudojamas kelių tipų plieno plaušas, kuris gali būti gaminamas pjaustant vielą, karpant skardos lakštus arba frezuojant. Seniausiai taikomos apskritojo skerspjūvio formos plieno plaušas gaminamas pjaustant vielą. Tam dažniausiai naudojama 0,25–0,75 mm skersmens viela. Stačiakampio skerspjūvio formos plaušas gaminamas pjaustant 0,25 mm storio lakštus. Plieno plaušo gamybos būdai plačiau aprašomi antrame vadovėlio skyriuje.

Siekiant pagerinti sukibimą tarp plaušo ir betono mišinio, buvo pasiūlytos skirtingos plieno plaušo formos (1.5 pav.). Šiuo metu labiausiai paplitę užlenktais galais (1.5 pav., a), banguotas (1.5 pav., b), dantytas (1.5 pav., d) ir sukto skerspjūvio

1.5 pav. Dažniausiai naudojamos plieno plaušo formos

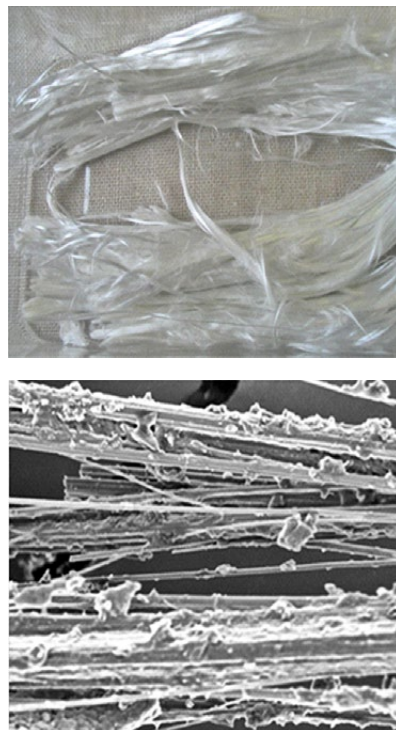


(1.5 pav., e) plieno plaušas. Plaušo formos veiksmingumui įvertinti naudojamas jo ilgio ir skersmens santykis, kuris kinta nuo 20 iki 100.

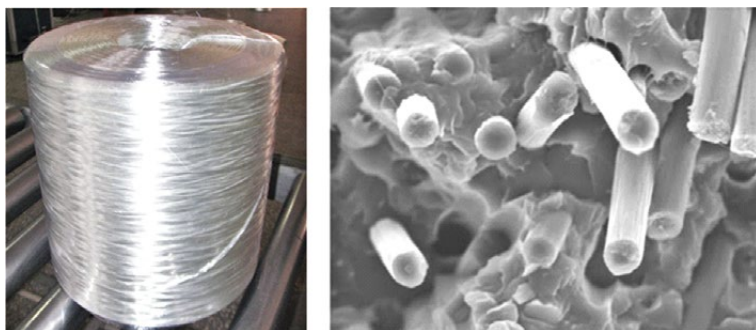
Asbesto plaušas (1.6 pav.) gaminamas iš natūralių kristalinių plaušinių medžiagų, sudarytų iš $0,1 \mu\text{m}$ storio ar dar plonesnių plaušų, kartais dar vadinamų skaidulomis. Šis plaušas turi didelį tempiamąjį stiprį ($3,5 \text{ GPa}$) ir panašų į plieno tamprumo modulį ($164\text{--}196 \text{ GPa}$). Asbesto plaušas išsiskiria geru sukibimu su cementiniu akmeniu. Neseniai jis buvo plačiai naudojamas statyboje, gaminant perdangas, stogų konstrukcijas, sienas ir net nuotekų vamzdžius. Deja, asbesto plaušas kelia grėsmę sveikatai, todėl daugelyje šalių šios medžiagos buvo atsisakyta, dažniausiai jis pakeistas *celiuliozės plaušu*. Lietuvoje nuo 1991 m. asbestą naudoti statyboje uždrausta.

Nors asbesto kompozitas jau praktiškai nenaudojamas, tačiau atlikti tyrimai ir įgyta patirtis turi didelę mokslinę ir inžinerinę vertę. Sukaupta mokslinė informacija leidžia kurti kitus kompozitus, kurių gamybai taikomi panašūs metodai, ir kompozitų sistemas, kuriose naudojamas mikroplaušas, savo dydžiu panašus į asbesto plaušą.

Stiklo plaušas (1.7 pav.) turi didelį tempiamąjį stiprį ($2\text{--}4 \text{ GPa}$) ir mažą, palyginti su plieniu, tamprumo modulį ($70\text{--}80 \text{ GPa}$). Stiklo plaušas gaminamas siūlelių formos, valcuojant išlydytą stiklą per specialias įvares. Keli šimtai



1.6 pav. Asbesto plaušas



1.7 pav. Stiklo plaušas

siūlelių vienu metu lydomi, o sukietėję suformuojami į vientisą pluoštą, prieš tai tepami kljais, apsaugančiais nuo oro poveikio ir dilimo. Kljais siūleliai taip pat sujungiami į vientisą viją. Kelias vijas suvyniojus tarpusavyje, suformuojamas stiklo plaušas. Pažymėtina, kad toks plaušas nėra tvirtas šarminėje aplinkoje, todėl gaminant betoną reikia naudoti šiai aplinkai atsparų stiklo plaušą, kurio sudėtyje yra apie 16–20 % cirkonio. Stiklo plaušas gaminamas skirtingo ilgio. Dispersiniam konstrukcinio betono mišinio armavimui naudojamas 25 mm ilgio plaušas, o armuojant torkretuoti naudojamus mišinius – iki 35 mm.

Polimerinis (sintetinis plaušas). Mechaninės polimerinio plaušo savybės panašios į stiklo plaušo, tačiau jo skersmuo yra palyginti mažas ir dažnai matuojamas mikronais. Šis plaušas buvo sukurtas ir plėtotas chemijos bei tekstilės pramonės. Yra dvi skirtingos sintetinio plaušo rūšys: vienos gijos plaušas ir plaušas, pagamintas iš pluoštinės juostelės. Šio plaušo gamybai pritaikyta nemažai polimerinių medžiagų. Kaip matyti iš 1.1 lentelės, charakteristiniai plaušo parametrai kinta labai plačiai. Kaip ir stiklo plaušas, polimerinis plaušas turi mažą tankį, tačiau yra atsparus šarminės aplinkos poveikiui, tad puikiai tinka lengvojo betono konstrukcijų gamybai. Dažniausiai polimerinis plaušas naudojamas ankstyvojo betono traukimosi metu atsivėrusiems plyšiams suvaržyti.

Atsižvelgiant į polimerinio plaušo geometrinius parametrus, išskiriamos dvi šio plaušo grupės: mikroplaušas ir makroplaušas. Mikroplaušas yra 12–25 mm ilgio ir 1–18 μm skersmens. Iš polimerinių plaušų labiausiai paplitęs polipropileno plaušas (1.8 pav.) arba polipropileno ir polietileno plaušų mišiniai. Makroplaušas paprastai būna 40–60 mm ilgio ir 0,5–1,5 mm skersmens, pagamintas iš atrinktų polimerų. Gaminant betono mišinius, jis naudojamas kur kas didesniais (0,25–0,75 %) kiekiais nei mikroplaušas, kurio maišoma 0,1–0,25 % pagal tūrį.

Neseniai pradėti gaminti anglies, aramido, akrilo ir polivinilo alkoholio (PVA) plaušai pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis (1.1 lentelė), tačiau dėl didelės kainos nėra plačiai naudojami.

1.1 lentelė Pagrindinės sintetinio plaušo savybės

Plaušo tipas	Plaušo ilgis, mm	Plaušo skersmuo, μm	Tamprumo modulis, GPa	Tempiamasis stipris, GPa	Ribinė deformacija, %	Naudojimo sritys
Akrilo	15–35	13–104	14–19	0,2–1,0	7,5–50	Plokščių, tinko ir torkretbetonio armavimas
Aramido	1–6	10–12	63–120	2,3–3,5	2,0–4,5	Tinko ir torkretbetonio armavimas
Anglies	20–40	8–9	230–380	2,5–3,0	0,5–1,5	Plokščių, tinko ir torkretbetonio armavimas
Nailono	38–120	23–400	4,1–5,2	0,75–1,0	16–20	Dekoratyvinio betono ir torkretbetonio armavimas
Poliesterio	32–102	10–200	10–18	0,23–1,2	10–50	Surenkamųjų betoninių konstrukcijų ir betoninių pėsčiųjų takų armavimas
Polietileno	5–100	25–1000	5,0	0,075–0,60	3,0–100	Grindinio plokščių, torkretbetonio, vamzdžių ir pėsčiųjų takų armavimas
Polipropi- leno	6–24	20–400	3,5–10	0,14–0,76	15–25	Plokščių, tinko ir torkretbetonio dispersinis armavimas

1.8 pav. Polipropileno plaušas

Organinės kilmės plaušas. Organinės kilmės plaušas (1.9 pav.), kaip ir visos kitos nemetalinių plaušų rūšys, pasižymi nedideliu tamprumo moduliui. Tai riboja jo naudojimą laikančiųjų konstrukcijų elementuose. Dažniausiai jis naudojamas siekiant suvaržyti pastatų technologinių elementų (pertvarų, lubų, grindų ir pan.) pleišėjimą bei padidinti jų atsparumą smūginei apkrovai.



1.9 pav. Organinės kilmės plaušas (sizalio ir kokoso plaušas)

Organinės kilmės plaušas gali būti gaminamas nebrangiai ir neišeikvojant daug energijos, naudojant tik vietines medžiagas. Pagrindiniai organinės kilmės plaušo tipai ir jų charakteristiniai parametrai pateikti 1.2 lentelėje.

Plaušai, pagaminti iš *sizalio*, *džiuto*, *koiro*, *drambliažolės* ir *cukranendrių išspaudų*, genda drėgnoje ar šarminėje aplinkoje, todėl jie turi būti specialiai apdorojami prieš maišant į betono mišinį. *Celiuliozės plaušas*, pagamintas iš medienos, yra kietesnis ir stipresnis nei kiti organinės kilmės plaušai, todėl šiuo metu jis naudojamas plačiausiai.

Pagal morfologiją organinės kilmės plaušai gali būti skirstomi į keturias klases: kamieniniai (arba plaušiniai), lapiniai, paviršiniai ir medienos.

1. Kamieniniai arba plaušiniai pluoštai išgaunami iš augalų stiebų ir atskiriami nuo juos supančių medžiagų mirkant. Tuo metu naikinamos bakterijos ir kartu drėkinamas plaušas. Geriausi plaušai surišami per visą ilgį arba susukami. Šiai klasei priklauso džiuo ir linų plaušai.
2. Lapiniai plaušai išgaunami iš augalų lapų. Lapas išdžiovinamas, susmulkinamas ir iš jo skutelių išimami plaušai. Lapiniai plaušai dažniausiai yra stipresni, kietesni ir stambesnės tekstūros nei kamieniniai.
3. Paviršiniai plaušai randami kaip vienlaščiai plaušai ant stiebų, vaisių ir augalų sėklų paviršiaus. Į šią grupę įtraukti medvilnė ir koiras (kokoso palmės plaušas). Tokie plaušai plaunami, valomi ir džiovinami, vėliau iš jų formuojamos plaušų sruogos.

1.2 lentelė. Pagrindinės natūralaus plaušo savybės

Plaušo tipas	Plaušo ilgis, mm	Plaušo skersmuo, μm	Tamprumo modulis, GPa	Tempiamasis stipris, GPa	Ribinė deformacija, %	Naudojimo sritys
Celiuliozės	N/S	N/S	10	0,3–0,5	N/S*	Cemento ir drožlių plokščių gamyba
Sizalio	N/S	10–50	13–26	0,276–0,57	3–5	Sizalio plaušu armuoto betono čerpių ir gofruotų lakštų gamyba bei silosų ir rezervuarų statyba
Džiuto	178–305	100–200	26–32	0,25–0,35	1,5–1,9	Asfaltbetonių dangų armavimas, betoninių konstrukcijų armavimas
Cukranendrių išspaudos	N/S	200–400	15–19	0,18–0,29	N/S	Gyvenamųjų namų statyba
Bambuko	N/S	10–400	33–40	0,35–0,50	N/S	Gyvenamųjų namų statyba, statybose naudojamo gipso armavimas
Kokoso	51–102	100–410	19–26	0,12–0,20	10–25	Cemento ir kokoso plaušų plokščių gamyba, trisluoksnių kokoso plaušo plokščių gamyba
Vandens nendrės	N/S	N/S	5,2	0,07	1,2	Gyvenamųjų namų statyba

* N/S – nenustatytos savybės.

4. Medienos (celiuliozės) plaušai yra palyginti nedidelio ilgio ir nelankstūs, bet dažniausiai tvirti ir ilgai išlaiko savo savybes cemento mišinyje. Medienos skiedros perdirbamos į plonus lakštus.

Apžvelgiant šiuos skirtingus plaušus, dėmesys atkreiptinas į tai, kad jų mikrostuktūra yra gana sudėtinga, ir į tai, kad šie plaušai sudaryti iš daugybės pluoštinių ląstelių. Organinės kilmės neperdirbtu plaušu armuoto betono savybės priklauso nuo daugelio veiksnių ir armuoti naudojamo plaušo rūšies, ilgio ir masės dalies betone.

1.4. Dispersiškai armuoto betono raida

Šiais laikais betonas – viena svarbiausių statybinių medžiagų, o jo naudojimo apimtys didėja visose pasaulio šalyse. Nuo senų laikų statybinių medžiagų mišiniai buvo stiprinami armuojant juos plaušine armatūra, taip padidinant pastato eksploataavimo trukmę ir atsparumą smūgiams. Pirmieji namai, statyti iš molio ir purvo, jau prieš 3500 metų buvo armuojami ašutais, šiaudais ir kitomis natūraliomis plaušinėmis medžiagomis.

Kaip minėta, gelžbetoniui paplitus po pasaulį, Prancūzijoje pradėtas gaminti plaušu armuotas betonas. XX a. pirmoje pusėje, 1936 m., Vokietijoje buvo bandoma gaminti medžio drožlėmis armuotus laivus iš ledo. Pažymėtina, kad plaušu armuotas ledas buvo atsparus smūgiams ir savo mechaninėmis savybėmis prilygo betonui. XX a. pabaigoje nemetaliniu plaušu armuoto betono tyrimus atliko Šach ir Rangan (1971), Swamy (1975) ir kiti mokslininkai iš Jungtinių Amerikos Valstijų, Jungtinės Karalystės, Japonijos ir Rusijos.

Iki septintojo dešimtmečio dispersiškai armuotas betonas buvo naudojamas tik grindinių dangoms. Pirmieji dispersiškai armuoto betono eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti XX a. 7-ajame dešimtmetyje (Romualdi *et al.* 1963, 1964). Eksperimentuojant buvo naudojamas tik tiesus plieninis plaušas. Analizuojant bandymų rezultatus tapo aišku, kad betoną armuojant plieno plaušu gaunama kompozitinė medžiaga turi didesnę tempiamąją stiprį, yra atsparesnė pleišėjimui ir plastiškiau suyra, palyginti su įprastu betonu.

Būtent nuo to ir prasidėjo naujos kompozitinės medžiagos era. Plieno plaušu armuotas betonas Europos rinkai buvo pasiūlytas 8-ojo dešimtmečio antroje pusėje. Jokių standartų ir rekomendacijų, reglamentuojančių dispersiškai armuotų konstrukcijų projektavimą, nebuvo, tai ir tapo pagrindine kliūtimi pripažinti naują betono armavimo technologiją. Iš pradžių plieno plaušas dažniausiai buvo naudojamas papildomam armavimui, plyšių suvaržymui ir mažiau deformuojamiems konstrukciniams elementams.

Pastaruosius kelis dešimtmečius dispersiškai armuotas betonas naudojamas vis dažniau. Atsiradusios vandens sugertį mažinančios aukštos rūšies priemonės (superplastikliai) tapo puikia priemone dispersiškai armuoto betono mechaninėms savybėms pagerinti. Siekiant pagerinti plaušo sukibimą su betonu, buvo pradėtas gaminti įvairių formų plieno plaušas (suplotais galais, banguotas, išlietais galais, užlenktais galais ir t. t.) (1.5 pav.). Įtempiai tarp plieno plaušo ir betono mišinio buvo perduodami geriau, o plaušo sunaudojama mažiau.

Dispersinis armavimas – viena svarbiausių statybinių konstrukcijų vystymo sričių pasaulyje, ir per pastaruosius dešimtmečius buvo atlikta daugybė dispersiškai armuoto betono tyrimų. Moksliniai komitetai (Europos – RILEM, JAV – ACI), kuriantys projektavimo normas, išleido dispersiškai armuoto betono rekomendacijas

(RILEM TC 162 TDF, ACI 544). Tačiau iki šiol pasaulyje nėra išvystytų bendrų ir visiems priimtinių rekomendacijų, skirtų dispersiškai armuotoms betoninėms ir gelžbetoninėms konstrukcijoms projektuoti.

1.5. Plaušu armuoto betono naudojimo sritys

Šiuo metu dispersiškai armuotas betonas naudojamas įvairiose srityse. Plieno plaušu armuoti mišiniai dažniausiai naudojami klojant lėktuvų kilimo ir tūpimo takus, betonuojant pramoninių pastatų grindis, tiesiant tunelius (1.10 pav.), perdengiant susisiekimo statinių angas (1.11 pav.), klojant jų paklotą, gaminant surenkamąsias betonines konstrukcijas, betonuojant perdangas, remontuojant tiltų perdangų plokštes, torkretuojant uolų šlaitus, įrengiant automobilių stovėjimo aikšteles. Jis taip pat naudojamas konstrukciniais tikslais, visiškai pakeičiant skersinę armatūrą iš anksto įtemptose konstrukcijose ir armatūros strypynus, tunelių segmentuose bei pamatų plokštėse.

Dispersiškai armuotas betonas pastaruosius trisdešimt metų buvo naudotas labai plačiai ir įvairiai, naudojimo būdus sunku suskirstyti į grupes. Neseniai buvo atlikti volais tankintų, plieno plaušu armuotų betonų eksperimentiniai tyrimai. Dispersiškai



1.10 pav. Plieno ir polipropileno plaušu armuoti segmentai, naudojami tiesiant tunelius



1.11 pav. Dispersinės armatūros naudojimas armuojant tiltų perdangų segmentus

armuoto betono naudojimo sritis – nesibaigianti ir apribota tik inžinierių išradingu. Tačiau pats plaušas, deja, yra palyginti brangus ir 1 % (pagal elemento tūrį) betono mišinio armavimas juo apytiksliai dvigubai padidina betoninio elemento kainą ir taip apriboja ypatingą plieno plaušu armuoto betono pritaikymą.

Pastaruosius keletą metų dispersinis armavimas plieno plaušu sėkmingai naudojamas gaminant įtemptojo gelžbetonio tiltų sijas, kuriose plaušas pakeičia skersinę armatūrą.

1.12 pav. pavaizduotas Bourg-lès-Valence (Prancūzija) tilto pakloto skerspjūvis, kurio konstrukciją sudaro dešimt įtemptųjų sijų. Papildomos plokštės betonuojamos vietoje, jas armuojant strypine armatūra. Įtemptos sijos ir plokštės pagamintos naudojant *Ductal* didelio stiprio betono mišinį. Dėl 3 % dispersinio armavimo mikroplaušu *Ductal* mišinyje nereikalingos nei armatūros apkabos, nei kita armatūra, naudojama kirpimui ir vietiniams įtempiams sijose atlaikyti. Dėl šios priežasties sumažinamos laiko ir darbo sąnaudos.

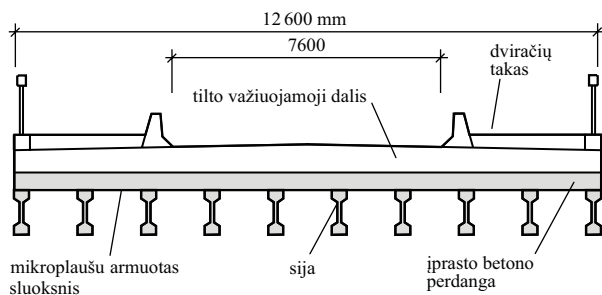
Plieno plaušu armuotas betonas gali būti naudojamas:

- kelių dangoms;
- hidrotechniniams statiniams;
- torkretavimui;
- ugniai atsparaus betono konstrukcijoms;
- surenkamojo betono konstrukcijoms;
- statybinėms konstrukcijoms ir jų stiprinimui.

Dispersinis armavimas dėl skirtingų elementų apkrovimo tipų, poveikių, eksploatacijos sąlygų ir konstrukcinių sprendimų įvairovės turi savų ypatybių, kurios aptariamoms toliau.

Plieno plaušu armuoto betono dangos. Dispersinis betoninių dangų armavimas tapo vienu geriausių sprendimų vykdant svarbius ir didelius projektus dėl keturių pagrindinių priežasčių:

- Didelis atsparumas lenkimui (palyginti su įprastuoju betonu) leidžia sumažinti pakloto dangos storį nustatytai eksploataavimo trukmei arba didesnę tokio pat storio dangų ilgaamžiškumą. Jeigu plieno plaušu armuoto betono atsparumas



1.12 pav. Bourg-lès-Valence (Prancūzija) tilto perdangos skerspjūvis, armuotas 3 % plaušu

lenkimui yra dvigubai didesnis negu įprastojo betono, tuomet dispersiškai armuoto betono dangos storis turėtų būti apie 70 % įprastojo betono dangos storio.

- Gali būti padidintas skersinės armatūros žingsnis. Sumažinto susitraukimo sąlygomis, esant didesnėms plieno plaušu armuoto betono tempimo deformacijoms, maksimalus plyšio plotis yra mažesnis, palyginti su įprastuoju betonu.
- Didesnis atsparumas smūgiams ir kintamoms apkrovoms.
- Plaušine armatūra armuoto betono maišymas, liejimas ir kietėjimas yra panašūs kaip ir įprastojo betono.

Hidrotechniniai statiniai. Pagrindinė plieno plaušu armuoto betono naudojimo priežastis įgyvendinant hidrotechninių statinių projektus – jo atsparumas erozijai / kavitacijai, kai statinio sienelės veikia dideli vandens srautai. Šis atsparumas patvirtintas laboratoriniais bandymais, kai dispersiškai armuotas betonas buvo naudojamas tris kartus ilgiau nei įprastasis, jo paviršių veikiant vandens tėkmei, kurios greitis – 37 m/s.

Torkretavimas – paviršiaus padengimas betono mišiniu naudojant slėginę pompą (1.13 pav.). Plaušinis torkretavimo būdas taikomas uoliniams šlaitams stabilizuoti, vidiniams tunelių paviršiams (1.13 pav.) ir tiltų perdangoms remontuoti. Plona įprastojo torkretbetonio danga, užpurkšta ant plaušu armuoto torkretbetonio, gali būti naudojama siekiant apsaugoti plieno plaušą nuo korozijos.

Kadangi torkretuotas betonas yra trapus, norint užtikrinti tinkamą plastiškumą ir plyšių suvaržymą, reikia armuoti papildomai. Anksčiau, siekiant užtikrinti reikiamą torkretbetonio plastiškumą, buvo naudojami armatūros tinklai. Pagrindinis šio stiprinimo metodo trūkumas buvo tas, kad dažnai sunku ir pavojinga įrengti armatūros tinklus, nes torkretbetonis naudojamas nestabiliuose aplinkose – torkretuojant tunelius, atramines sienutes ir t. t. Sustiprinimo būtinumas padidina darbų kainas ir kelia potencialų sužeidimų ar mirties pavojų, jeigu įrengiamas tunelis įgriūtų ar torkretuojamas žemės šlaitas nušliuotų.



1.13 pav. Šlaitų ir tunelio sienų torkretavimas dispersiškai armuotu betonu

Tam tikrais atvejais torkretuojamo betono armavimas plaušine armatūra gali būti pateisinamas ir kaip ekonominė tradicinės statybos alternatyva dėl šių priežasčių:

- išvengiama armatūros kirpimo, lenkimo ir tvirtinimo, dėl to kyla sunkumų įprastai armuojant kreivus ir šiurkščius paviršius;
- neapsaugotą uolos paviršių reikia greitai užsandarinti. Be to, taip sutaupomas laikas, reikalingas klojiniams sumontuoti;
- medžiaga klojama plonu sluoksniu, pagal paviršiaus kontūrą, taip sutaupant nemažą torkretbetonio kiekį.

Torkretuojant plieno plaušu armuotu betonu, armavimo efektas gali būti ne mažiau veiksmingas, nei naudojant įprastą plaušo išdėstymo techniką. Taip yra todėl, kad plieno plaušas lengvai pasiskirsto palyginti ploname torkretbetonio sluoksnyje. Taikant šį torkretavimo būdą, mažas vandens ir cemento santykis gali padidinti betono stiprį.

Atsparusis betonas. Atsparusis betonas, armuotas plienų plaušu, yra ilgalaikiškesnis, veikiant aukštam terminiam poveikiui, šiluminiais ciklais, greitiems temperatūros pasikeitimams ar mechaniniams poveikiams, nei nesustiprintas jo analogas. Betonas tampa ilgalaikiškesnis todėl, kad plieno plaušas veiksmingiau suvaržo plyšius, padidina elemento kietumą, atsparumą skeliant ir dilinant. Plienų plaušu armuotas atsparusis betonas leidžia sumažinti betoninių elementų gamybos išlaidas ir prailginti jų eksploatacijos trukmę.

Konstrukciniai plieno plaušo naudojimo sprendiniai. Atvejai, kai konstrukcijos armuojamos tik plaušine armatūra, yra gana reti. Šio armavimo taikymo pavyzdys – automobilių stovėjimo aikštelė Londono oro uoste (1.14 pav.), sukonstruota iš



1.14 pav. Pagrindinis Londono (Didžioji Britanija) oro uostas

surenkamųjų kvadratinų plokščių, kurių apytikslis kraštinių ilgis siekia apie 1,1 m, o storis – 65 mm.

Dispersiškai armuotos plokštės buvo sumontuotos ant erdvinio rėmo, sudaryto iš apskritojo skerspjūvio plieninių profiliuotųjų. 3 % elemento masės sudarė plieno plaušas, kurio ilgis – 25 mm, o skersmuo – 0,25 mm. Apžvelgiant dispersinio armavimo taikymą betoninių konstrukcijų gamyboje, pažymėtina tai, kad armavimas plieno plaušu gali suvaržyti plyšius. Tam dispersinio plaušo gamybai geriausiai tinka didelio stiprio klasės plienas, kuris neleidžia plėstis plyšiams, atsirandantiems dėl naudojimo apkrovų sukeltų deformacijų. Armavimas plaušu taip pat gali pakeisti armavimą skersine armatūra. Šiuo atveju gali padidėti dispersiškai armuotų elementų atsparumas kirpimui. Taip armuojant staigi elemento kerpamoji suirtis pereina į lėtą ir plastišką. Dispersinis armavimas gali padidinti įprastinių gelžbetoninių konstrukcijų pastovumą ir vientisumą, vykstant žemės drebėjimams, sprogimams ir t. t.

1.6. Skyriaus apibendrinimas

Dispersiniu būdu visame pasaulyje plačiai armuojamos betoninės konstrukcijos. Pagrindinis armavimo plaušine armatūra pranašumas – tempimo deformacijų suvaržymas elemento skerspjūvyje. Jis lemia mažesnę plyšių plotį, tolygesnę jų išsidėstymą, plastiškesnę elemento suirimo pobūdį ir didesnę atsparumą dinaminėms apkrovoms (smūgiams, sprogimams, žemės drebėjimams ir t. t.). Dėl statinių ar dinaminių apkrovų poveikio dispersiškai armuotame elemente atsivėrę mikroplyšiai toliau nebesivysto.

Dispersinis armavimas turi ir trūkumų: plaušui pasiskirsčius visame elemento skerspjūvyje, dalis jo yra neveiksminga; kyla sunkumų išmaišant didesniu plaušo kiekiu (>1,5 %) armuoto betono mišinį ir jį tiekiant pumpavimo sistemomis. Neigiamą įtaką gali turėti ir betoninių konstrukcijų eksploatavimas agresyviojoje aplinkoje.

Dispersiniam armavimui dažniausiai naudojami: plieno, stiklo, polimero ir organiniai plaušai. Dėl didelio tempiamojo stiprio (0,5–2 GPa) ir tamprumo modulio (apie 200 GPa) veiksmingiausias ir plačiausiai naudojamas plieno plaušas. Jis naudojamas susisiekimo statiniams armuoti, pramoninių ir gyvenamųjų statinių grindims betonuoti, uolų šlaitams torkretuoti ir t. t.

Kontroliniai klausimai

1. Koks pagrindinis dispersinio armavimo tikslas?
2. Kokie armavimo plaušine armatūra pranašumai ir trūkumai?
3. Kuo dispersinis betoninių konstrukcijų armavimas pranašesnis už armavimą strypine armatūra?
4. Kokios pagrindinės medžiagos naudojamos dispersinės armatūros gamybai?
5. Kokios plieno plaušo formos dažniausiai naudojamos dispersiniam armavimui?

6. Kuri plaušinė armatūra pasižymi geriausiomis mechaninėmis savybėmis?
7. Kokios yra dispersinio armavimo naudojimo sritys?
8. Koks yra plaušinės armatūros pasiskirstymas betone?
9. Kokie yra plieno plaušo gamybos būdai?
10. Koks pagrindinis asbesto plaušų trūkumas?

Rekomenduojamoji literatūra

- ACI 544.1R-96 *Report on Fiber Reinforced Concrete*. 1996. Michigan: American Concrete Institute. 66 p. ISBN 9780870315282.
- ACI 544.4R-88 *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*. 1988. Michigan: American Concrete Institute. 18 p. ISBN 9780870315305.
- Balaguru, P. N.; Shah, S. P. 1992. *Fiber Reinforced Cement Composites*. New York, USA: McGraw Hill. 531 p. ISBN 0070564000.
- Beaudoin, J. J. 1990. *Handbook of Fiber-Reinforced Concrete: Principles, Properties, Developments and Applications*. Park Ridge, New Jersey, USA: Noyes Publications. 332 p. ISBN 0815512368.
- Bentur, A.; Mindess, S. 2006. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. London and New York: CRC Press. 624 p. ISBN 9780415250481.
- Foster, S. J. 2009. The application of steel-fibres as concrete reinforcement in Australia: from material to structure, *Materials and Structures (RILEM)* 42(9): 1209–1220.
- LST EN 14889-1:2007 *Betono pluoštai. 1 dalis. Plieniniai pluoštai. Apibrėžtys, techniniai reikalavimai ir atitiktis* [Fibres for concrete - Part 1: Steel fibres – Definitions, specifications and conformity]. Vilnius, 2007. 26 p.
- LST EN 14889-2:2007 *Betono pluoštai. 2 dalis. Polimeriniai pluoštai. Apibrėžtys, techniniai reikalavimai ir atitiktis* [Fibres for concrete – Part 2: Polymer fibres - Definitions, specifications and conformity]. Vilnius, 2007. 27 p.
- Maidl, B. R. 1995. *Steel Fibre Reinforced Concrete*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Manolis, G.; Gareis, P.; Tsonos, A.; Neal, J. 1997. Dynamic properties of polypropylene fibre-reinforced concrete slabs, *Cement and Concrete Composites* 19(4): 341–349.
- Mortensen, A. 2007. *Concise Encyclopedia of Composite Materials*. Elsevier Science Ltd. 1019 p. ISBN 9780080451268.
- Nemegeer, D. 1996. Design guidelines for Dramix steel wire fibre reinforced Concrete, *Indian Concrete Journal* 70(10): 575-584.
- Ulbinas, D.; Kaklauskas, G. 2009. Plieno pluoštu armuotų gelžbetoninių elementų pleišetumo analizė, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 1(5): 56–62.
- Zheng, Z.; Feldman, D. 1995. Synthetic Fibre-Reinforced Concrete, *Progress in Polymer Science* 20(2): 185–210.
- Zollo, R. F. 1997. Fiber – reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development, *Cement and Concrete Composites* 19(2): 107–122.

2. PLIENO PLAUSŲ ARMUOTO BETONO GAMYBOS TECHNOLOGIJA

2.1. Įžanga

Pirmasis plieno plaušas buvo gaminamas karpant apskritojo skerspjūvio vielą. Tiesus ir lygus plaušas statyboje dabar beveik nebenaudojamas. Dabartinio plaušo paviršius šiurkštus, jo galai užlenkiami arba jam suteikiama banguota forma (1.5 pav.). Šiuolaikinis plieno plaušas gaminamas iš plieninės vielos, skardos arba kitokių metalo ruošinių, juos atitinkamai apdirbant (karpant, pjaustant, frezuojant). Standartinis plieno plaušo skersmuo (arba skerspjūvio pločio atitikmuo), būna nuo 0,5 iki 2 mm, o ilgis – nuo 7 iki 75 mm. Pagrindinis plaušo efektyvumo rodiklis – jo ilgio ir skersmens santykis, kuris dažniausiai siekia nuo 20 iki 100.

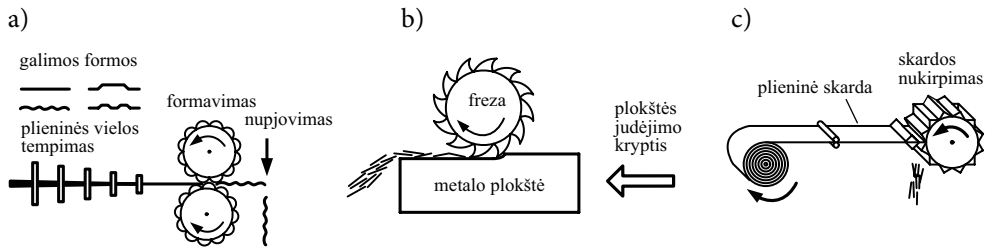
Plaušas dažnai gaminamas iš anglinio plieno, tačiau galima rasti plaušo, pagaminto iš korozijai atsparaus metalo. Nerūdijančiojo plieno plaušu armuojamos agresyviosios aplinkos veikiamos konstrukcijos.

Dažniausiai plieno plaušo kiekis betone siekia nuo 0,25 iki 1,5 % jo tūrio. Taikant tradicinius betono gamybos būdus, neįmanoma kokybiškai išmaišyti (paskirstyti mišinyje) daugiau nei 1,5 % plaušo. Taip yra todėl, kad didesnis plaušo kiekis maišant suformuoja gniūžulus ir netolygiai pasiskirsto betono mišinyje. Visgi, esant didesniam rišamosios medžiagos kiekiui arba smulkiagrūdžiam betonui (užpildo dalelių dydis neviršija 10 mm), galimas ir didesnis nei 1,5 % plieno plaušo tūris, tačiau mišinio gamybai turi būti naudojamos specialios technologijos (specialios maišyklės, plaušo paskirstymo įranga ir pan.).

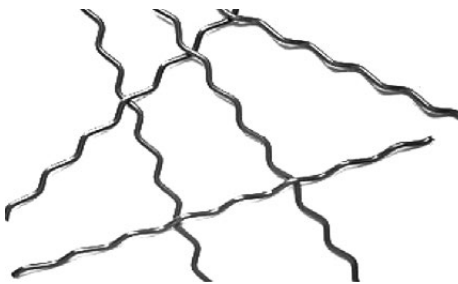
2.2. Plieno plaušo gamyba

Šiuo metu rinkoje gausu įvairių plieno plaušo rūšių, kurios viena nuo kitos skiriasi fizikinėmis savybėmis, matmenimis ir forma. Visa tai lemia skirtingą plaušo kainą. Dispersiniam armavimui skirto plaušo forma priklauso nuo gamybos būdo ir naudojamos žaliavos. 2.1 pav. pateikiami plieno plaušo gamybos būdai.

Dažniausiai dispersiniam armavimui naudojamas plieno plaušas, kirptas iš šaltaitemptos vielos, kuri gaminama iš įvairių plieno atliekų. Toks plaušas gaminamas vielą leidžiant tarp dviejų skirtingomis kryptimis besisukančių volų (2.1 pav., a). Atsižvelgiant į volų paviršiaus profilių formuojamas lygus arba deformuotas plieno plaušas, kuris gali būti papildomai apdorojamas, užlenkiant jo galus, darant įspau-



2.1 pav. Plieno plaušo rūšys ir jų gamybos technologija: a – plaušas iš plieninės vielos; b – plaušas iš plieno drožlių; c – plaušas iš plieninės skardos

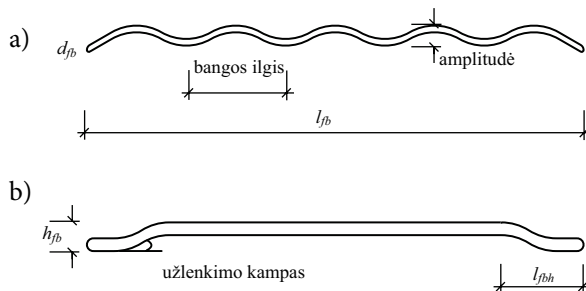


2.2 pav. Banguotas plieno plaušas iš plieninės vielos

dus ir pan. Plaušo, pagaminto iš plieninės vielos (2.2 pav.), tempiamasis stipris kinta nuo 1 iki 1,5 GPa. Dispersiškai armuojant didelio stiprio betoną, gali būti naudojamas plaušas, kurio stipris viršija 2 GPa. Plaušas gali būti gaminamas iš cinkuotosios arba nerūdijančiojo plieno vielos. Tokios dispersinės armatūros skersmuo (d_{fb}) yra 0,1–1,3 mm, o ilgis (l_{fb}) siekia 6–100 mm.

Pagrindiniai geometriniai parametrai, kuriais apibūdinamas iš vielos pagamintas plieno plaušas ir kurie turi įtakos dispersinio armavimo veiksmingumui, pateikti 2.3 pav., a. Šiuo metu labiausiai paplitusio plieno plaušo su užlenktais galais (angl. *hooked*) elgsena priklauso nuo jo skersmens, ilgio, užlenkimo kampo bei užlenkimo ilgio ir aukščio santykio (l_{fbh}/h_{fb}) (2.3 pav., b).

Dažnai naudojamas ir plieno plaušas, pagamintas frezuojant plieno plokštės (2.1 pav., b). Tokio plaušo (2.4 pav.) tempiamasis stipris siekia 0,8 GPa. Frezuota dispersinė armatūra yra nevienodos struktūros, o jos matmenys kinta: ilgis – 15–60 mm, plotis – 1–6 mm. Dėl gamybos metu tarp frezavimo disko ir metalo plokštės susidarančios aukštos temperatūros plieno plaušas pasidengia melsva oksidacine plėvele, kuri apsaugo jį nuo korozijos.

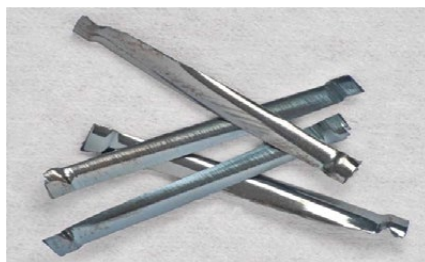


2.3 pav. Banguotos formos plaušo ir plaušo su užlenktais galais geometriniai parametrai

Rečiausiai naudojamas plaušas, pagamintas karpant plieno lakštus (2.1 pav., c). Tokio plaušo (2.5 pav.) tempiamasis stipris siekia 0,4–0,8 GPa. Iš plieno lakštų iškarpytos dispersinės armatūros ilgis siekia 20–60 mm, o plotis – 1,5–2,5 mm. Sukarpytas plaušas gali būti apdorojamas papildomai, užlenkiant jo galus ar pan. Šio tipo plieno plaušas naudojamas grindų išlyginamajam sluoksniui armuoti.

Gaminant dispersinę armatūrą, taikoma skirtinga plieno plaušo gamybos technologija. Kuo sudėtingesnė plaušo forma, tuo sudėtingesnė ir jo gamybos technologija. Kita vertus, sudėtingesnės formos plieno plaušas geriau sukimba su betonu. Pagrindinės savybės, susijusios su plaušo forma, pateiktos 2.1 lentelėje.

Reikia pabrėžti, kad ir kokia būtų plieno plaušo forma ir gamybos technologija, betoniniams elementams armuoti skirtas plaušas turi būti pakankamai stiprus. Labai svarbu, kad, maišant betoną, plieno plaušas nebūtų deformuojamas (lankstomas, laužomas ir pan.), t. y. jis turi būti standus. Šios sąlygos užtikrina, kad plaušas gerai sukibs su betonu ir varžys jame atsiveriančius plyšius.



2.4 pav. Plieno plaušas iš plieno drožlių

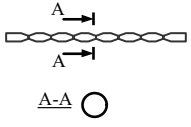
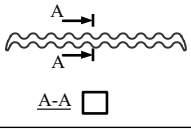
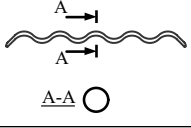
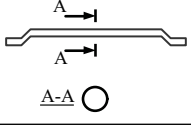


2.5 pav. Banguotas plieno plaušas iš plieninės skardos

2.1 lentelė. Plieno plaušo formos ir savybės

Plaušo forma	Eskizas	Savybės
Tiesi – lygi (viela)		Nesudėtinga gamyba, tačiau nepakankamas sukibimas su betonu
Tiesi – lygi, su užplotais galais		Plaušas gerai sukimba su betonu, tačiau sudėtinga gamybos technologija
Tiesi – lygi, su išlietais galais		Geras sukibimas su betonu, tačiau sudėtinga gamybos technologija

2.1 lentelės pabaiga

Plaušo forma	Eskizas	Savybės
Tiesi – su įspaudais		Plaušas gerai sukimba su betonu. Gaminant tokį plaušą, yra tikimybė jį perspausti
Banguota (lakštas)		Geras sukibimas, tačiau didesnės plieno sąnaudos nei kitų formų plaušų
Banguota (iš naudotų lynų gijų vielos)		Geras sukibimas ir nedidelės medžiagų sąnaudos. Nuo tokio plaušo paviršiaus būtina nuvalyti tepalines medžiagas
Su užlenktais galais		Plaušas gerai susimaišo su betonu, tačiau jis veiksmingas tik su aukštos klasės betonu

2.3. Dispersiškai armuoto betono mišinio gamyba

Vienas didžiausių betono trūkumų – mažas tempiamasis stipris, sudarantis tik apie 5–10 % gniuždomojo stiprio. Todėl betoninis elementas tempiamojoje zonoje armuojamas strypine arba (ir) dispersine armatūra, kuri ir perima tempimo įrąžas. Kitas taip pat svarbus trūkumas – trapumas.

Laikui bėgant betonas traukiasi, o veikiant ilgalaikėms apkrovoms pasireiškia valkšniosios betono deformacijos. Varžant betono traukimąsi, jame gali atsiverti plyšių.

Norint pasirinkti tinkamą betono mišinį tam tikrai konstrukcijai, reikia gerai suprasti statybos procesą, turėti žinių apie statybines medžiagas ir jų savybes, taip pat išmanyti statybinės mechanikos principus. Betonas dažniausiai gaminamas iš vietinių iškasenų, todėl labai svarbu, kad betono tiekėjas glaudžiai bendradarbiautų su statybos inžinieriumi bei rangovu ir nuspręstų, kurios betono savybės svarbiausios. Tik bendradarbiaujant galima užtikrinti produkto kokybę ir reikiamas eksploatacines savybes. Racionaliai parenkant konstrukcinį sprendimą ir statybines medžiagas, galima gerokai sumažinti statybos sąnaudas.

Dispersiškai armuoto cemento mišiniai dažniausiai naudojami plonasienių elementų gamybai arba kaip dengiamasis sluoksnis (torkretavimui). Šiuose mišiniuose plaušinė armatūra naudojama kaip pagrindinė ir jos kiekis gali svyruoti net nuo 1 iki 15 % mišinio tūrio.

Dispersiškai armuotame betone plaušo tūris yra kur kas mažesnis ($\leq 1,5\%$), ir plaušas dažniausiai naudojamas tik kaip papildoma armavimo priemonė, kurios paskirtis – suvaržyti plyšių vystymąsi.

Plaušo tipas ir kiekis mišinyje lemia betono gamybos proceso ypatumus. Kalbant apie santykinai mažus plaušo kiekius (mažiau nei $1,5\%$ tūrio), dispersiškai armuoto betono gamybos procesas yra panašus į įprastojo betono. Tačiau gaminant dispersiškai armuotą betono mišinį turi būti atsižvelgta į kelis veiksnius: įsitikinta, kad maišant plaušas tolygiai pasiskirstė betone ir bus išvengta jo susisluoksniavimo bei sukibimo į gniužulus; betono mišinys turi būti paruoštas taip, kad jį būtų galima lengvai išpilti, formuoti ir apdirbti jo paviršių.

Paprastai plaušu armuotas betonas turi didesnę kiekį cementinių medžiagų bei didesnę smulkaus ir stambaus užpildo santykį nei įprastas betonas. Siekiant sumažinti cemento sąnaudas, iki 35% cemento kiekio mišinyje gali būti pakeista lakiaisiais pelenais. Taip pat siekiant pagerinti dispersinio armavimo veiksmingumą, betono mišiniuose naudojami superplastikliai, kurie leidžia sumažinti vandens kiekį mišinyje. Priedų kiekis ir jų proporcijos normalaus svorio plieno plaušu armuotame betone pateiktos 2.2. lentelėje. Kaip matyti, priklausomai nuo plaušo tipo (lygus arba deformuotas plaušas) dispersiniam armavimui naudojami skirtingi jo kiekiai.

2.2 lentelė. Normalaus svorio dispersiškai armuoto betono sudedamųjų dalių proporcijos

Sudedamoji dalis	Cemento mišinys	9,5 mm maksimalus užpildo dydis	19,0 mm maksimalus užpildo dydis
Cementas, kg/m^3	415–710	355–590	300–535
Vandens ir cemento santykis	0,3–0,45	0,35–0,45	0,4–0,5
Smulkusis ir stambusis užpildas, %	45	45–60	45–55
Prisotinimas oru, %	7–10	4–7	4–6
Plaušo kiekis, % tūryje:			
lygus plaušas	1–2	0,9–1,5	0,8–1,5
deformuotas plaušas	0,5–1,0	0,4–0,9	0,3–0,8

Kai smėlio kiekis betono mišinyje yra $45\text{--}60\%$, optimalus stambiojo užpildo dalelių dydis yra iki $9,5\text{ mm}$. Naudojant didesnę užpildą arba didinant smėlio kiekį mišinyje, prastėja eksploatacinės betono savybės. Tačiau visiškai atsisakyti stambiojo užpildo betone būtų neekonomiška ir neracionalu konstrukciniu požiūriu, nes pasireikštų didesnis betono susitraukimas jam kietėjant. Dideliu slėgiu purškiamo plieno plaušu armuoto betono komponentai pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Dideliu slėgiu purškiamo dispersiškai armuoto betono sudedamųjų dalių kiekis

Sudedamoji dalis	Smulkiojo užpildo mišinys	9,5 mm maksimalaus užpildo mišinys, kg/m ³
Cementas, kg/m ³	446–559	455
Smulkus smėlis* (<6,35 mm), kg/m ³	1438–1679	697–880
9,5 mm dydžio užpildas, kg/m ³		700–875
Plaušo kiekis**, kg/m ³	35–157	39–150
Plastiklis	Įvairus	Įvairus
Vandens ir cemento santykis	0,40–0,45	0,40–0,45

*Smėlio drėgnumas apie 5 %; **1 % plieno plaušo tūris $\approx 80 \text{ kg/m}^3$. Į dideliu slėgiu purškiamą dispersiškai armuotą betoną dedamas mažesnis plaušo kiekis, nes paprastai plaušo atšokimas yra didesnis negu užpildo.

Sudėtinga užtikrinti plaušo išsidėstymo vientisumą mišinyje, išlaikyti pakankamą mišinio veiksmingumą jį gaminant, transportuojant ir naudojant. Plaušai, kurių ilgio ir skersmens santykis yra didesnis, sudaro tvirtesnius ryšius su betonu ir veiksmingiau varžo jo pleišėjimą. Kita vertus, didelis plaušo ilgio ir skersmens santykis apsunkina betono maišymą. Būtent šie prieštaračiai ir tapo pagrindine priežastimi, lėmusia deformuotų plaušo formų vystymąsi. Sukibimas tarp deformuotų formų plieno plaušo ir betono yra daug geresnis nei mišinio sukibimas su lygiu plieno plaušu. Pavyzdžiui, sukibimo koeficientas, kai betono mišinys armuojamas plaušu su užlenktais galais, yra apie 0,09 ir tik apie 0,04, kai dispersiniam armavimui naudojamas lygios formos plieno plaušas.

Dispersinis armavimas gali turėti ir neigiamą poveikį mechaninėms mišinio savybėms, nes, plaušui sukibus į gniužulus, betone susidaro struktūros defektų, todėl gaminant dispersiškai armuoto betono mišinius ribojamas plaušo kiekis. Vienas iš pagrindinių sunkumų siekiant, kad plaušas vienodai pasiskirstytų mišinyje, yra tas, kad:

- plaušas gali būti sulipęs prieš dedant jį į mišinį, o maišant šie plaušo gniužulai nebus išskirstyti;
- didelis plaušo kiekis, vienu metu sudėtas į maišyklę, gali nespėti joje išsiskirstyti;
- plaušo kiekis mišinyje viršija 1,5 % jo tūrio;
- maišyklė nepajėgi veiksmingai išskirstyti plaušo;
- nesilaikoma gamybos technologijos – plaušas į maišyklę gali būti sudėtas prieš sudedant kitus betono komponentus.

Atsižvelgiant į tai, maišymo metu reikia imtis atsargumo priemonių. Dažniausiai, maišant betonvežėje ar būgninėje maišyklėje, plaušas į drėgną betoną turi būti sudedamas paskutinis iš visų mišinio komponentų. Plaušas į mišinį turėtų būti dedamas nesulipęs, prieš tai jį išsijojus pro specialų sietą. Kai visas plaušas sudėtas į mišinį, tinkamas jo pasiskirstymas turi būti užtikrintas betono maišyklei apsiskus 30–40

kartų. Gaminant dispersiškai armuotą mišinį, būtina naudoti specialią maišymo įrangą – priverstinio maišymo maišyklę (užtikrinančias ne mažiau kaip 40 aps./min), ir plaušo paskirstymo mechanizmus. Plieno plaušu armuotas betonas gali būti tiekiamas kaip ir įprastas betonas. Dispersiškai armuotas betonas lengvai klojamas į formas, kai tiekiant mišinį vibruojama. Pažymėtina tai, kad vanduo į plieno plaušu armuotą betoną turi būti pilamas labai atsargiai. Kai vandens ir cemento santykis (V/C) didesnis nei 0,5, gali padidėti plieno plaušu armuoto betono susisluoksniavimo tikimybė, kuri sumažina dispersinio armavimo veiksmingumą.

2.4. Plaušo parametrų įtaka betono mechaninėms savybėms

Dispersiškai armuoto betono tiek gniuždomojo, tiek tempiamojo stiprio nustatymas yra svarbus uždavinys, norint įvertinti plieno plaušo įtaką elemento standumui bei apskaičiuoti atsiveriančių plyšių plotį ir elemento laikomąją galią. Supleišėjusių plieno plaušu armuotų elementų elgsenai bei stipriui įtakos turi šie parametrai:

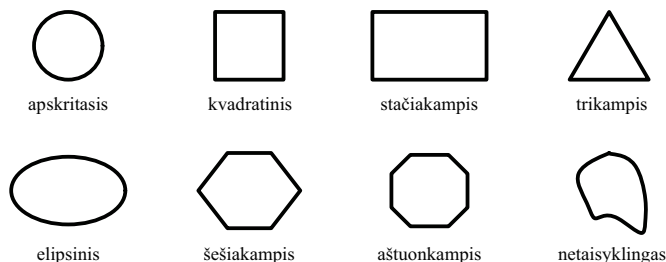
- betono stipris;
- plaušo kiekis;
- plaušo stipris;
- plaušo ilgio ir skersmens santykis (l_{fb}/d_{fb});
- plaušo pasiskirstymas elemente;
- plaušo orientacija elemente;
- elemento apkrovimo greitis ir trukmė.

Kaip minėta, betoninių konstrukcijų armavimas plieno plaušu suvaržo plyšių vystymąsi ir keičia įrimo pobūdį. Tam, kad dispersinis armavimas būtų veiksmingas, plaušas turi atitikti tokius reikalavimus:

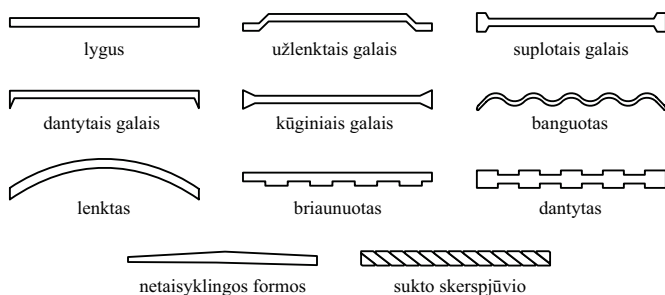
- tempiamasis plaušo stipris turi būti gerokai didesnis nei betono;
- plaušo tamprumo modulis turi būti didesnis už betono tamprumo modulį;
- plaušas turi būti standus, kad maišymo metu neprarastų savo formos;
- plaušas turi būti atsparus korozijai, kad juo armuotas betonines konstrukcijas būtų galima eksploatuoti agresyviojoje aplinkoje.

2.4.1. Plaušo geometrija

Dispersiniam armavimui dažniausiai naudojamos plieno plaušo skerspjuvio formos pavaizduotos 2.6 pav. Pagrindinės formos (apskrita ir stačiakampė) buvo pateiktos ir 2.1 lentelėje. Siekiant pagerinti plaušo sukibimo su betonu savybes, plaušo paviršius gali būti modifikuotas jį šurkštinant arba kitaip deformuojant (užlenkiant arba užplojant galus, įspaudžiant ir t. t.). Kaip parodyta 2.7 pav., plaušas gali būti lygus, dantytas, sukto skerspjuvio, spiralinis, su užlenktais, išlietais galais ir t. t. Pagrindinių plaušo geometrinių formų savybės buvo pateiktos 2.1 lentelėje.



2.6 pav. Plieno plaušo skerspjūviai



2.7 pav. Plieno plaušo geometrinės formos

Didžiausias skirtumas tarp skerspjūvio formų, pavaizduotų 2.6 pav., yra santykis tarp plaušo perimetro ir ploto. Pavyzdžiui, tokio paties skerspjūvio ploto trikampis plaušas turi 28 % didesnę perimetrą nei apskritojo skerspjūvio plaušas.

2.4.2. Plaušo kiekis betone

Dispersiškai armuoto betono mechaninės savybės labai priklauso nuo plaušo kiekio mišinyje.

Procentinis plaušo kiekis D_{fb} , nustatomas pagal šią formulę:

$$D_{fb} = \frac{V_{fb}}{100} \cdot \rho_{fb}, \quad (2.1)$$

čia V_{fb} – plaušo dalis nuo elemento tūrio, %; ρ_{fb} – plieno plaušo tankis, $\rho_{fb} \approx 7820\text{--}7880 \text{ kg/m}^3$.

Kai yra žinomas plaušo kiekis, kg, jo procentinę tūrį dispersiškai armuotame elemente galima nustatyti taip:

$$V_{fb} = \frac{D_{fb}}{\rho_{fb} + D_{fb}} \cdot 100 \%, \quad (2.2)$$

čia D_{fb} – plieno plaušo kiekis elemente; ρ_{fb} – plieno plaušo tankis.

Paprastai 1 % plieno plaušo kiekis normalaus svorio betone siekia apie 80 kg/m^3 . Padidinus plaušo kiekį gali padidėti ir cemento mišinio klampumas, apsunkinamas jo klojimas. Dėl šios priežasties dispersiškai armuoto betono gamyboje naudojant įprastą mišinio maišymo technologiją, rekomenduojamas plieno plaušo kiekis yra iki 1,5 %.

Varijuojant plaušo kiekiu, dispersiškai armuoto betono savybės keičiasi. Svarbu žinoti minimalų plaušo kiekį, užtikrinantį dispersinio armavimo veiksmingumą. Nustatant minimalų plaušo kiekį turi būti užtikrintas reikiamas vidutinis atstumas tarp plaušų:

$$l_{cr,m} = \left(\frac{\pi \cdot d_{fb}^2}{4 \cdot V_{fb}} \right)^{0,33} \geq 0,45 l_{fb}, \quad (2.3)$$

čia $l_{cr,m}$ – vidutinis atstumas tarp plaušų; d_{fb} – plaušo skersmuo; l_{fb} – plaušo ilgis; V_{fb} – plaušo kiekio dalis ($0,01 \approx 80 \text{ kg/m}^3$ plieno plaušo).

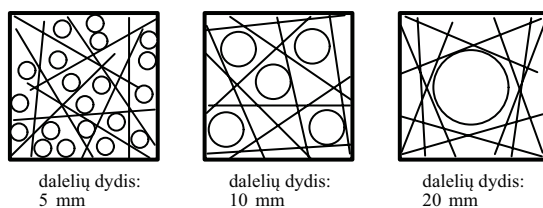
Visais atvejais plaušo kiekis betone negali būti mažesnis už 0,2 % (arba mažiau nei 16 kg/m^3).

2.4.3. Plaušo pasiskirstymas

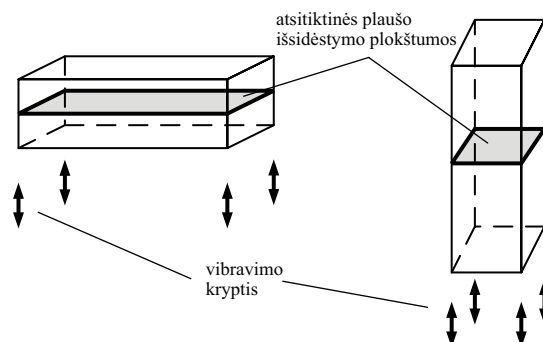
Plaušo efektyvumas labai priklauso nuo pasiskirstymo mišinyje – kuo tolygiau plaušas pasiskirsto betone, tuo efektyviau jis varžo pleišėjimą. Plaušo pasiskirstymas mišinyje taip pat priklauso nuo mišinio užpildų dydžio (2.8 pav.). Betone su labai smulkiais užpildais plieno plaušas išskaidomas – plieno plaušas gali laisvai pasiskirstyti tarp užpildo dalelių. Mišinyje, kuriame užpildo dalelės didesnės už 10 mm, yra varžomas plaušo pasiskirstymas elemente. Šis efektas (2.8 pav.) ryškėja didėjant užpildo dalelėms.

Technologiniai ir konstrukciniai sprendimai taip pat turi įtakos plaušo pasiskirstymui mišinyje. Vienu pagrindinių technologijos veiksnių galima įvardyti mišinio vibravimo kryptį (2.9 pav.). Vibravimas gali sukelti nepageidaujamą plaušo susi-

2.8 pav. Užpildo dalelių dydžio įtaka plieno plaušo pasiskirstymui

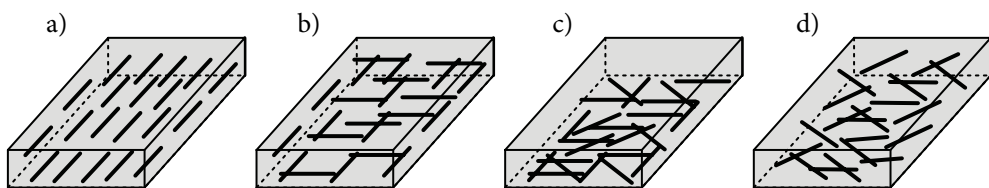


2.9 pav. Betono mišinio vibravimo įtaka plaušo orientavimui



sluoksniavimą. Vidinio vibravimo prietaisai daro mažesnę įtaką plaušo pasiskirstymui. Plaušas taip pat gali išsidėstyti arti klojinio sienelių. Toks plaušo pasiskirstymas vadinamas pakraščio efektu. Jis didėja augant plaušo koncentracijai, plaušo ilgiui ir mažėjant elemento skerspjūvio matmenims.

Plieno plaušo orientavimas turi didelę įtaką mechaninėms dispersiškai armuotų elementų savybėms. Taikant dispersinio armavimo būdą, plieno plaušas betoniniame elemente pasiskirsto kryptingai (2.10 pav., a ir b) arba atsitiktinai (laisvai) (2.10 pav., c ir d).



2.10 pav. Dispersinis armavimas: a – vienos krypties; b – dviejų kryptų; c – su atsitiktiniu plokštumi plaušo išsidėstymu; d – su atsitiktiniu erdviu plaušo išsidėstymu

Kryptingai armuojant betoninius elementus dažniausiai naudojamos ištisinės plaušo gijos, pynės ir iš jų suformuoti tinklai. Plaušo orientavimas, atsižvelgiant į pagrindinių tempimo įtempių kryptį, nusako, kaip efektyviai plaušas varžys plyšių vystymąsi betone. Tarus, kad plaušas mišinyje pasiskirsto atsitiktinai, jo veiksmingumo koeficientas būtų lygus $0,41l_{fb}$ (l_{fb} – plaušo ilgis), tačiau šis koeficientas gali svyruoti nuo $0,33l_{fb}$ iki $0,65l_{fb}$.

Atsitiktiniam plaušo orientavimui plokštumoje būdingas tolygus ir laisvas pasiskirstymas elemento tūryje. Toks armavimo būdas dažniausiai taikomas plonasieniems elementams, kai betoninio elemento storis yra mažesnis už naudojamo plaušo ilgį, pavyzdžiui, plokštėms ar pan. Kuo mažesni elemento skerspjūvio matmenys, tuo mažesnės plaušo laisvo pasiskirstymo galimybės.

2.5. Skyriaus apibendrinimas

Dispersiniam statybinių konstrukcijų armavimui naudojamas įvairių formų plieno plaušas. Plaušo forma priklauso nuo gamybos būdo ir gamybai naudojamų medžiagų. Pagrindiniai plieno plaušo gamybos būdai yra: kirpimas iš vielos arba skardos lakšto ir frezavimas iš plieno plokštės. Nuo plaušo gamybos būdo priklauso jo forma ir savybės, tokios kaip tempiamasis stipris, atsparumas korozijai ir t. t.

Nepriklausomai nuo plieno plaušo formos ir gamybos technologijos, labai svarbu, kad gaminant betono mišinį plaušas nesideformuotų (t. y. būtų pakankamai standus). Sudėtingesnės formos dispersinė armatūra dažniausiai geriau sukimba su betono mišiniu, taip padidina plaušo veiksmingumą varžant plyšius. Siekiant pagerinti

plaušo sukibimą su betonu, plaušas gali būti papildomai apdorojamas (užlenkiamai galai, padaromi įspaudai ir t. t.).

Dispersiniam armavimui dažniausiai naudojamas plieno plaušo kiekis $\leq 1,5\%$. Gaminant tokiu plaušo kiekiu armuotą betono mišinį, jo gamybos procesas beveik nesiskiria nuo įprastojo betono, tačiau maišant dispersiškai armuotą betono mišinį turi būti įsitikinta, kad maišant plaušas pasiskirstys mišinyje ir bus išvengta jo susiluksniavimo bei sukibimo į gniužulus.

Mechaninėms dispersiškai armuotų elementų savybėms didelę įtaką gali turėti plaušo orientavimas. Armuojant plaušas gali pasiskirstyti kryptingai arba atsitiktinai (laisvai). Kryptingo armavimo būdas taikomas tada, kai yra apriboti bent du geometriniai elemento parametrai (pvz., aukštis ir plotis) ir netinka atsitiktinis plaušo pasiskirstymas.

Kontroliniai klausimai

1. Kokie pagrindiniai žinomi plieno plaušo gamybos būdai?
2. Koks pagrindinis plaušo efektyvumo rodiklis?
3. Kaip padidinamas plaušo sukibimas su betono mišiniu?
4. Koks plaušo, gaminamo iš plieninės vielos, tempiamasis stipris?
5. Kokie pagrindiniai skirtumai tarp įprastojo ir dispersiškai armuoto betono mišinių gamybos?
6. Nuo ko priklauso dispersinio armavimo veiksmingumas?
7. Dėl kokių pagrindinių priežasčių plaušas betono mišinyje gali sulipti į gniužulus?
8. Kokią įtaką dispersiniam armavimui turi betono mišinio užpildo dalelių dydis?
9. Kaip taikomas kryptingo betoninių elementų armavimo plieno plaušu būdas?

Rekomenduojamoji literatūra

- Dupont, D.; Vandewalle, L. 2005. Distribution of steel fibres in rectangular sections, *Cement and Concrete Composites* 27(3): 391–398.
- Strack, M. 2007. *Modellbildung zum rissbreitenabhängigen Tragverhalten von Stahlfaserbeton unter Biegebeanspruchung*: Doktor Dissertation. Lehrstuhl und Institut für Stahlbeton- und Spannbetonbau, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruh-Universität Bochum. Germany: Shaker. 156 S. ISBN 9783832265496.
- Рабинович, Ф. Н. 2004. *Композиты на основе дисперсно армированных бетонов*. Москва. 646 с. ISBN 9785930938548.

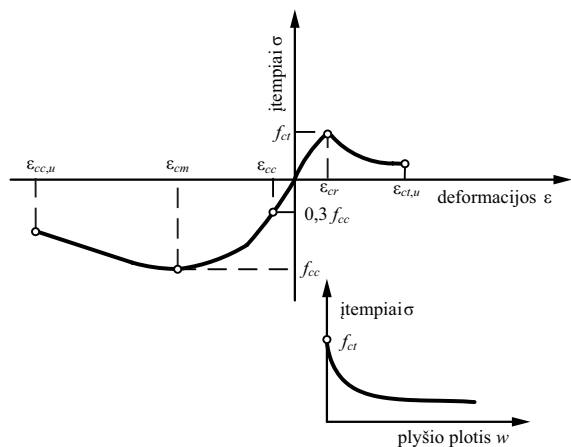
3. PLIENO PLAUSŲ ARMUOTO BETONO FIZIKINĖS IR MECHANINĖS SAVYBĖS

3.1. Įžanga

Projektuojant statybines konstrukcijas iš bet kokios medžiagos, reikia gerai suprasti konstrukcinės medžiagos fizikinę prigimtį, reakciją į apkrovą ir galimus suirimo pobūdžius. Dėl savo sudėtingos fizikinės elgsenos betonas ir armuotasis betonas užima ypatingą vietą tarp kitų statyboje naudojamų medžiagų (plieno, aliuminio, medienos).

Šiame skyriuje pateikiami medžiagų modeliai skirti ne tam tikrai konstrukcijai projektuoti, o plieno plaušu armuoto betono elgsenai suprasti. Žinant medžiagoje vykstančius fizikinius procesus, galima numatyti armavimo plieno plaušu efektą tiek gelžbetoninių konstrukcijų stiprumui (*saugos ribinis būvis*), tiek standumui bei pleišetumui (*tinkamumo ribinis būvis*).

Pažymėtina, kad betono armavimas plieno plaušu pasižymi itin didele veiksnių, nuo kurių priklauso fizikinės ir mechaninės betono savybės, gausa. Dėl sudėtingos betono elgsenos, įvairiapusės betono ir plaušo sąveikos dar nėra pasiūlyta visiems priimtino plieno plaušu armuoto gniuždomojo ir tempiamojo betono medžiagų modelio. Tempiamojo betono elgsena iki pleišėjimo gali būti modeliuojama kaip ir gniuždomojo betono – netiesine įtempių ir deformacijų diagrama (3.1 pav.). Diagramos posvyrio kampą bei įtempių ir deformacijų santykį esant tampriajai stadijai apibūdina vienas pagrindinių medžiagų modelio parametrų – tamprumo modulis,



3.1 pav. Plieno plaušu armuoto betono σ - ε ir σ - w diagrama

išsamiau nagrinėjamas 3.3 poskyryje. Supleišėjusio tempiamojo betono elgsena gali būti aprašoma dviem skirtingais būdais: įtempių ir deformacijų arba įtempių ir plyšio pločio diagrama (3.1 pav.). Taikyti įtempių ir deformacijų diagramą patogiau, nes tokiu pat būdu apibūdinamas ir supleišėjęs gniuždomasis betonas. Tačiau, aprašant supleišėjusio tempiamojo betono elgseną įtempių ir plyšio pločio diagrama, aiškiau suprantama fizikinė plieno plaušo įtaka tempiamajam betonui (išsamiau aprašoma 3.4 poskyryje).

Adekvatūs medžiagų modeliai yra esminė ir būtina bet kokio skaičiavimo metodo sąlyga. Šiame skyriuje aprašomi skaitiniam konstrukcijų modeliavimui reikalingi plieno plaušu armuoto betono medžiagų modeliai ir savybės. Išsamiai aptariamos gniuždomojo ir tempiamojo betono diagramos, nagrinėjama tik dispersiškai armuotam betonui būdinga liekamojo stiprio savybė, aprašomas tempiamojo sustandėjimo efektas, savybės veikiant dinaminei apkrovai ir ilgalaikiams poveikiams.

3.2. Gniuždomojo betono diagrama

Gniuždomasis stipris – viena svarbiausių ir gerai ištirtų betono mechaninių savybių. Plieno plaušu armuoto betono gniuždomasis stipris nustatomas tokiu pačiu būdu kaip ir įprastojo betono. Bandymo metu matuojama apkrovimo jėga ir dispersiškai armuoto bandinio deformacijos. Nustatyta, kad plieno plaušas beveik neturi įtakos gniuždomojo betono stipriui. Geriausiu atveju gniuždomasis stipris gali padidėti iki 15 %, kai elementas armuojamas apie 1,5 % plieno plaušo kiekiu. Šis padidėjimas gali būti siejamas su plieno plaušo savybe varžyti plyšių vystymąsi betono mikrosruktūros lygmeniu.

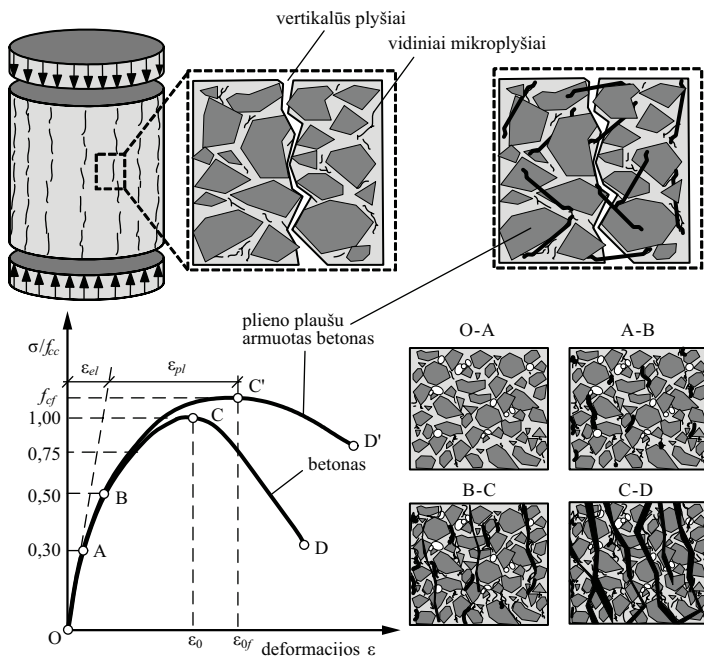
Gniuždant tiek įprastąjį, tiek plieno plaušu armuotą betoną, galima išskirti keiturius charakteringas deformavimosi stadijas, susijusias su medžiagos struktūroje vykstančiais pokyčiais. Tipinė betono, veikiamo vienašio gniuždymo, įtempių ir deformacijų diagrama parodyta 3.2 pav.

Kiekvienoje apkrovimo stadijoje bendra gniuždomoji betono deformacija aprašoma taip:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} - \varepsilon_{cs}, \quad (3.1)$$

čia ε_{el} – tamprioji deformacijų dalis; ε_{pl} – plastinė deformacijų dalis (kartais dar vadinama deformacija dėl greitai pasireiškiančio valksnumo); ε_{cs} – betono laisvojo susitraukimo deformacija.

Esant nedidelėms įtempių reikšmėms ($\sigma < 0,3f_{cc}$, čia f_{cc} – betono gniuždomasis stipris), įtempių ir deformacijų diagrama yra tiesinė (dalis OA). Šioje apkrovos stadijoje vidiniai mikroplyšiai, esantys betone iki apkrovimo, lieka nepakitę. Energija, susidaranti deformuojantis betonui, yra nepakankama, kad atsivertų naujų mikroplyšių. Įtempių reikšmė, sudaranti apie 30 % betono stiprio f_{cc} , vadinama *žemutine mikropleišėjimo riba* (angl. *onset of localized cracking*) ir žymi tampriosios betono deformacijos pabaigą.



3.2 pav. Gniuždomojo betono deformavimosi stadijos

Įtempiams σ viršijus $0,3f_{cc}$, dėl įtempių koncentracijos ties užpildų briaunomis ir struktūros defektų pradeda plėstis vidiniai mikroplyšiai. Pirmiausia pažeidžiama silpniausia betono grandis – užpildo ir cemento matricos sąlyčio zona. Šioje apkrovos stadijoje ($0,3f_{cc} \leq \sigma < 0,5f_{cc}$, diagramos dalis AB) deformavimo metu sukaupiamą vidinę energiją sudaro pusiausvyrą su vidiniams plyšiams atsiverti reikalingu energijos kiekiu. Todėl naujų mikroplyšių susidarymas yra stabilus – plyšiai betone greitai nustoja didėti, kai apkrovos reikšmė nebedidinama. Dėl betono struktūros pažeidimo įtempių ir deformacijų diagramos dalyje AB pradeda ryškėti plastinė betono deformacijų dalis ε_{pl} .

Trečiojoje apkrovos stadijoje ($0,5f_{cc} \leq \sigma < f_{cc}$, diagramos dalis BC) pasiekiami maksimalūs betono gniuždymo įtempiai. Šią apkrovos stadiją tikslinga nagrinėti įtempių intervalais $0,5f_{cc} \leq \sigma < 0,75f_{cc}$ ir $0,75f_{cc} \leq \sigma < 1,0f_{cc}$. Kai įtempiams betone sudaro nuo 50 iki 75 % trumpalaikio stiprio f_{cc} , pradeda jungtis gana plačiai išplitę mikroplyšiai. Pažeidžiama ne tik užpildo ir matricos sąlyčio zona, bet ir visa cemento matrica. Jei apkrova nebedidinama, plyšių plitimas lėtėja ir po kiek laiko stabilizuojasi. Įtempiams viršijus 75 % stiprio f_{cc} reikšmę, didžiausi atsivėrę mikroplyšiai pasiekia kritinį plotį. Tai reiškia, kad deformavimo metu sukaupta vidinė energija tampa didesnė už energiją, reikalingą plyšiams plėstis. Plyšiai plečiasi net ir nebedidinant apkrovos, ir sistema tampa nestabili, kol konstrukcija suyra. Įtempių reikšmė, atitin-

kanti 75 % betono gniuždomojo stiprio f_{cc} , vadinama *viršutine mikroleišėjimo riba* (angl. *onset of unstable fracture propagation*) ir žymi betono ilgalaikį stiprį. Įtempių reikšmės nuo 75 iki 100 % betono gniuždomojo stiprio f_{cc} pasiekiamos tik atliekant trumpalaikius bandymus laboratorinėmis sąlygomis, todėl realiose konstrukcijose neleistina pasiekti viršutinės mikroleišėjimo ribos. Kaip parodyta 3.2 pav., betono įtempiams pasiekus maksimumo tašką C, plastinių deformacijų dalis gali viršyti tampriųjų deformacijų dalį.

Ketvirtoji apkrovos stadija žymi betono irimą. Pažymėtina, kad krintančiąją diagramos dalį CD įmanoma užfiksuoti tik bandymą atliekant deformacijų kontrolės metodu – pastoviu greičiu didinant deformaciją ir matuojant elemento reakciją (jėgą). Išplitę ir tarpusavyje susijungę mikroplyšiai pasiekia betono paviršių ir suskaido betono struktūrą. Šie plyšiai lengvai įžiūrimi betono paviršiuje ir vadinami makroplyšiais. Gniuždomą bandinį makroplyšiai suskaldo į vertikalius blokus, kurie palaipsniui netenka pastovumo ir suklumpa. Vertikalūs blokai susidaro dėl skersinių betono deformacijų – skersai gniuždymo krypties veikia svarbiausieji tempimo įtempiai. Šioje stadijoje, augant deformacijoms, įtempiai betone pradeda mažėti – įtempių ir deformacijų diagrama pereina į krintančiąją dalį CD.

Krintančiosios diagramos dalies forma priklauso nuo dviejų pagrindinių parametrų: betono stiprio ir bandinio ilgio. Kuo stipresnis betonas, tuo trapesnis jo suirimas – krintančioji diagramos dalis artėja prie vertikalės. Priklausomybė nuo bandinio ilgio apibūdinama taip: kuo trumpesnis bandinys, tuo plastiškiau jis suyra. Tai galima paaiškinti tuo, kad ilguose bandiniuose susiformuoja liauni betono blokai, kurie labai greitai netenka pastovumo.

Yra pasiūlyta įvairių matematinių išraiškų vienašio betono gniuždymo įtempių ir deformacijų diagramai aprašyti. Dažniausiai taikoma kvadratinės parabolės išraiška (tokia išraiška siūloma ir Europos normose), kurioje parenkami diagramos formą apibūdinantys parametrai: gniuždomasis betono stipris f_{cc} ir jį atitinkanti deformacija ϵ_c . Normaliajam betonui įtempių maksimumą f_{cc} atitinka $(2000-2500) \cdot 10^{-6}$ deformacijos reikšmė. Diagramos posvyrio kampą esant tampriajai stadijai apibūdina betono tamprumo modulis E_c , o krintančiosios dalies pobūdį esant irimo stadijai – ribinė deformacija ϵ_{cu} , įprastojo betono sudaranti apie $3500 \cdot 10^{-6}$.

Apžvelgus gniuždomojo betono deformavimosi stadijas, galima įvertinti plieno plaušo įtaką kiekvienoje iš jų. 3.2 pav. parodyta, kad pirmosios trys tiek įprastojo, tiek plieno plaušu armuoto betono apkrovos stadijos praktiškai sutampa – plieno plaušu armuoto betono tamprumo modulis ir gniuždomasis stipris f_{bc} gali padidėti nedaug. Tai galima paaiškinti tuo, kad plieno plaušas negali suvaržyti elemento tūryje besiplečiančių mikroplyšių ir elemento deformavimasis vyksta kaip ir įprastojo betono. Plaušas esant šioms trimis apkrovos stadijoms nėra veiksmingas.

Dispersinis armavimas tampa efektyvus, kai pasiekama ketvirtoji – irimo stadija ir pradeda vertis makroplyšiai. Betono struktūroje atsiktinai išsidėstęs plieno plau-

čia ε_{0fb} – plieno plaušu armuoto betono stiprį atitinkanti deformacija; ε_0 – įprastojo betono stiprį atitinkanti deformacija.

Panagrinėkime tokį pavyzdį. Turime įprastąjį betoną, kurio stipris $f_{cc} = 30$ MPa, o jį atitinkanti deformacija $\varepsilon_0 = 2,0 \cdot 10^{-3}$. Šis betonas papildomai armuojamas 1 % tūrio dalies plieno plaušu užlenktais galais ($l_{fb} / d_{fb} = 60$; $\beta = 1$). Pagal (3.2) formulę apskaičiuojamas plieno plaušo faktorius:

$$RI = V_{fb} \cdot \frac{l_{fb}}{d_{fb}} \cdot \beta = 0,01 \cdot 60 \cdot 1 = 0,6.$$

Atitinkamai plieno plaušu armuoto betono stipris ir jį atitinkanti deformacija padidėtų:

$$f_{fbc} = f_{cc} + 6,913 \cdot RI = 30 + 6,913 \cdot 0,6 = 34,1 \text{ MPa},$$

$$\varepsilon_{0fb} = \varepsilon_0 + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot RI = 2,0 \cdot 10^{-3} + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 = 3,152 \cdot 10^{-3}.$$

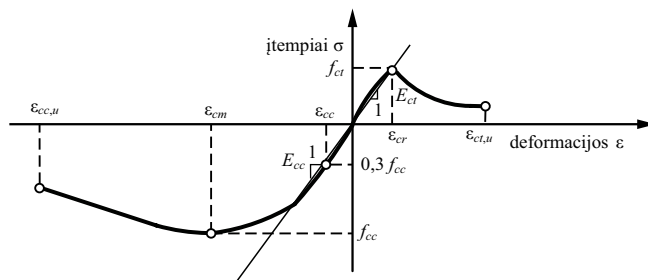
Šis paprastas pavyzdys aiškiai parodo plieno plaušo įtaką gniuždomajam betonui: betono stipris pasikeičia nedaug, tačiau irimas tampa daug plastiškesnis.

3.3. Tamprumo modulis

Betono tamprumo modulis apibūdinamas kaip normalinių įtempių σ_c ir gniuždomojo betono deformacijų ε_c santykis elastingoje diagramos dalyje (3.4 pav.). Laikoma, kad tempiamojo betono tamprumo modulis E_{ct} mažai skiriasi nuo gniuždomojo betono E_c , t. y. $E_{ct} \approx E_c$. Būtina pažymėti, kad tamprumo modulis reglamentuojamas LST EN 1992-1-1:2005. Dažniausiai taikomas vadinamasis *kirstinis* (vidutinis) betono tamprumo modulis, kuriam apibrėžti apytiksliai taikoma $0,3\text{--}0,4 f_{cc}$ reikšmė. Betono įtempių ir deformacijų priklausomybė, esant nedideliems (iki $0,4 f_{cc}$) įtempiams, apytiksliai gali būti aprašyta Huko dėsnio:

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c. \quad (3.5)$$

Nustatyta, kad dispersinis armavimas neturi didesnės teigiamos įtakos betono tamprumo moduliui. Dera paminėti, kad dėl netobulos dispersiškai armuoto betono



3.4 pav. Betono įtempių ir deformacijų priklausomybė

mišinio gamybos technologijos (blogo išmaišymo ir dėl betono struktūroje atsiradusių defektų) tamprumo modulis gali ir sumažėti. Ši nuomonė artima vadovėlio autorių nuomonei, kurių manymu, betono armavimas plieno plaušu neturės įtakos betono tamprumo moduliui.

Literatūroje galima rasti siūlymų plieno plaušu armuoto betono tamprumo modulį skaičiuoti pagal kompozitinės medžiagos dėsnį:

$$E_{fb} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot E_{fb} \cdot V_{fb} + E_c \cdot V_c, \quad (3.6)$$

čia E_{fb} – plieno plaušo tamprumo modulis; V_{fb} – plieno plaušo tūrio dalis; E_c – betono tamprumo modulis; V_c – betono tūrio dalis; η_1 ir η_2 – veiksmingumo koeficientai, atitinkamai priklausantys nuo plaušo išsidėstymo ir jo ilgio. Plaušo, išdėstyto veikiančiųjų įrašų kryptimi, $\eta_1 = \eta_2 = 1$. Plokščiaame elemente atsitiktinai orientuoto plaušo $\eta_1 \approx 1/3$, tūrinio elemento $\eta_1 \approx 1/6$.

Nustatant tamprumo modulį pagal 3.5 išraišką, galima pastebėti, kad elemento standumas nebus labai padidintas, lyginant su įprastuoju betonu, nes V_{fb} yra mažas dydis, lyginant su V_c .

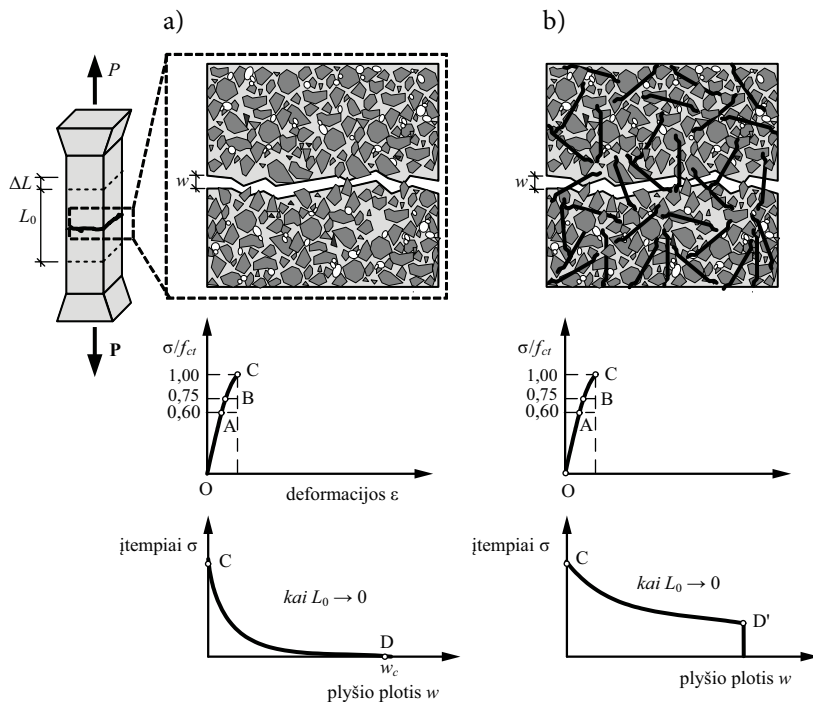
3.4. Tempiamojo betono diagrama

Tempiamasis betonas dažnai laikomas idealiai tampria medžiaga, kuri trapiai suyra pasiekus tempiamąjį stiprį. Ši prielaida nėra visiškai tiksli, nes, kaip ir gniuždymo atveju, pasireiškia tiek netiesinė medžiagos elgsena (plastinės deformacijos), tiek laipsniškas įtempių mažėjimas didėjant deformacijoms (krintančioji įtempių ir deformacijų diagramos dalis).

3.5 pav. parodytas vienašio tempimo bandymas. Kaip ir gniuždymo atveju, tempiamojo betono deformavimosi procesą suskirstysime į keturias charakteringas stadijas. Kai tempimo įtempiai sudaro iki 60 % tempiamojo stiprio f_{ct} , naujų mikroplyšių betone nesusidaro, ir deformavimosi procesas praktiškai yra tiesinis (OA diagramos dalis). Analogiškai gniuždymui, diagramos taškas A žymi *žemutinę mikroplyšėjimo ribą*.

Įtempiams viršijus $0,6f_{ct}$ ribą, pasiekiamas deformavimo energijos kiekis, pakankamas naujų mikroplyšių plitimui. Tempiant mikroplyšių plitimas nėra varžomas, todėl greitai pasiekiamas nestabilaus plyšių plitimo stadija (diagramos dalis BC). Ši stadija prasideda iš karto, kai viršijama *viršutinė mikroplyšėjimo riba*, kaip ir gniuždymo atveju sudaranti apie 75 % tempimo (stiprio diagramos taškas B).

Plyšiai betone formuojasi statmenai tempimo įtempių veikimo kryptčiai. Kiekvienas naujai susiformavęs mikroplyšys sumažina įrašą atlaikančio betono plotą, kartu padidėja įtempiai dar nepažeistoje medžiagoje. Skirtingai nei gniuždymo atveju, suirimas įvyksta staigiai, susijungus keliems mikroplyšiams. Dėl tokio staigaus suirimo sunku nustatyti tempimo įtempių ir deformacijų diagramos krintančiąją dalį (CD,



3.5 pav. Tempiamojo betono deformavimosi stadijos: a – be plieno plaušo; b – su plieno plaušu

angl. *tension softening*) ir dažnai ji apskritai ignoruojama. Iš tiesų krintančiosios diagramos dalies egzistavimas paaiškinamas tuo, kad stambesnės užpildo frakcijos kerta atsiveriantį plyšį ir gali perduoti įtempius tarp dviejų besiformuojančių plokštumų. Eksperimentiškai nustatyti šią krintančiąją diagramos dalį yra sudėtinga. Sakykime, fiksuojame tempiamojo elemento pailgėjimą ΔL imdami matavimo bazę L_0 , kaip parodyta 3.5 pav. Jeigu atsiveriantis makroplyšys patenka į pasirinktąją matavimo bazę, išmatuojamas ir tempiamojo betono pailgėjimas, ir plyšio plotis:

$$\Delta L = \frac{\sigma_{ct}}{E_c} L_0 + w, \quad (3.7)$$

čia σ_{ct} – vidutiniai tempiamojo betono įtempiai; E_c – betono tamprumo modulis; w – atsiveriančio plyšio plotis.

Jeigu išmatuotą dydį ΔL dalytume iš bazės ilgio L_0 , gautume tam tikrą vidutinę deformaciją ϵ_m , kuri būtų ne visai tiksli, nes į skaičiavimus buvo įtrauktas ir plyšio plotis w :

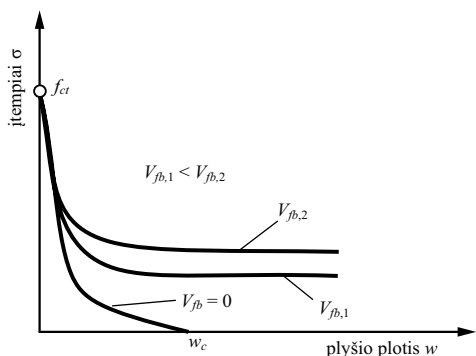
$$\epsilon_m = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\sigma_{ct}}{E_c} + \frac{w}{L_0}. \quad (3.8)$$

Dėl šios priežasties tempiamojo betono elgseną tikslinga skaidyti į dvi dalis: iki makroplyšio atsiradimo taikoma įtempių ir deformacijų diagrama (σ – ε), o atsivėrus makroplyšiui – įtempių ir plyšio pločio priklausomybė (σ – w). Ši priklausomybė gali būti nustatyta mažinant matavimų bazės ilgį $L_0 \rightarrow 0$, tokiu atveju fiksuojamas pailgėjimas ΔL praktiškai atitiktų atsiveriančio plyšio plotį (3.8 formulė). Pažymėtina, kad σ – w diagramos nustatymas tempiamajam betonui yra sudėtingas uždavinys, reikalaujantis specialios ir ypač tikslios matavimo įrangos (bandymas turi būti atliekamas deformacijų kontrolės metodu).

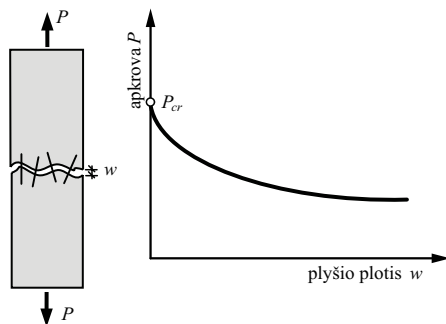
Plieno plaušo įtaka pirmosiose trijose apkrovos stadijose tempiamiesiems elementams yra nedidelė – keliais procentais gali padidėti betono tamprumo modulis ir tempiamasis stipris. Kaip minėta, plieno plaušas pradeda efektyviai veikti tuomet, kai veriasi makroplyšiai. Kaip ir gniuždymo atveju, plieno plaušas kerta atsiveriančius plyšius, suvaržo jų plitimą ir perima tempimo įtempius. 3.5 pav. parodyta plyšio pločio ir įtempių plyšyje priklausomybė įprastame ir plieno plaušu armuotame betone. Plyšio pločiui pasiekus ribinę reikšmę w_c , tempiamas įprastasis betonas iki galo suyra. Kai betono mišinyje yra plieno plaušo, irimas tampa gerokai plastiškesnis.

Įtempių ir plyšio pločio diagramos (σ – w) plotas išreiškia tempiamajam elementui suardyti reikiamą energijos kiekį. Didėjant energijos kiekiui (atitinkamai ir plotui, apibrėžtam krantinčiąja diagramos (σ – w) dalimi), medžiagos irimas tampa plastiškesnis. Kaip parodyta 3.6 pav., betono plastiškumas išauga, padidinus plaušo kiekį mišinyje.

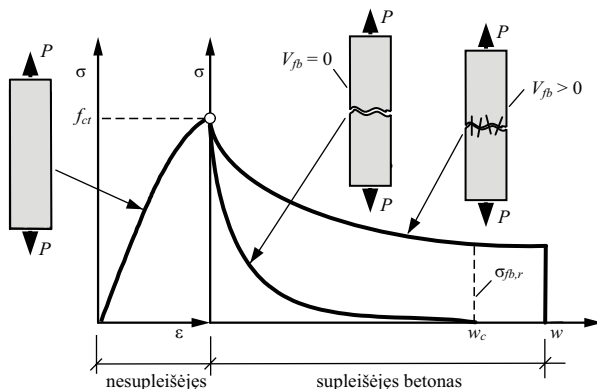
Supleišėjusio betono atlaikomi įtempiai vadinami *liekamaisiais*. Liekamuosius įtempius galima įvertinti pagal eksperimentinę plyšio pločio w nuo apkrovos P priklausomybę (3.7 pav.), kuri dažniausiai pateikiama įtempių ir plyšio pločio diagrama, parodyta 3.8 pav. Nagrinėjant dispersiškai armuotą betoną kaip vienalytę medžiagą, jos gebėjimas atlaikyti liekamuosius įtempius charakterizuojamas *liekamuuoju stipriu* $f_{fb,r}$. Norint apskaičiuoti dispersiškai armuoto elemento laikomąją galią, plyšio plotį ar deformacijas, būtina žinoti liekamojo stiprio reikšmę.



3.6 pav. Tempiamojo betono įtempių ir plyšio pločio priklausomybė nuo plieno plaušo kiekio



3.7 pav. Tempiamojo betono apkrovos ir plyšio pločio diagrama



3.8 pav. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų bei įtempių ir plyšio pločio diagrama

3.5. Tempiamojo stiprio ir liekamojo stiprio nustatymas

Statybinių konstrukcijų analizei dažnai taikomos kompiuterinės baigtinių elementų programos, kuriomis galima įvertinti netiesines medžiagų savybes. Reikia pažymėti, kad skaitiniai rezultatai priklauso nuo naudojamų medžiagų modelių. Dispersiškai armuoto tempiamojo betono modeliai turi nemažą įtaką skaičiuojant elementų standumą, pleišetumą ir laikomąją galią. Šiame poskyryje aptariami eksperimentiniai metodai plieno plaušu armuoto betono tempiamajam ir liekamajam stipriams nustatyti.

3.5.1. Tempiamasis stipris

Tempiamasis plieno plaušu armuoto betono stipris gali būti nustatomas kaip ir įprastojo betono: tiesioginiu būdu, atliekant ašinio tempimo bandymą, arba netiesioginiu būdu – bandinius lenkiant arba skeliant. Ašinio tempimo bandymui atlikti reikalinga ypač tiksli ir brangi matavimo įranga su deformacijų kontrole. Taip pat yra labai sudėtinga užtikrinti ašinį tempimą, nes dėl betono struktūros nevienalytiškumo plyšys veriasi ne visame skerspjūvio plote, o tik tam tikroje dalyje. Dėl to tempimas tampa ekscentrinis. Dėl šios priežasties ašinio tempimo metodas praktiškai nėra taikomas. Būtina pažymėti, kad atliekant ašinio tempimo bandymą, dispersinis armavimas neturi įtakos tempiamajam betono stipriui.

Vienas iš netiesioginių būdų nustatyti dispersiškai armuoto betono tempiamąjį stiprį – skėlimo bandymas. Bandymui naudojami standartinio dydžio cilindrai. Eksperimentas atliekamas greitai, nesudėtingas pasiruošimo procesas. Pažymėtina, kad tempiamasis stipris nustatomas netiesiogiai, taikant empiriškai nustatytą matematinę išraišką.

Tempiamasis stipris dažniausiai nustatomas lenkimo bandymu. Šis eksperimentas yra kur kas paprastesnis nei ašinio tempimo bandymas. Prizminis bandinys veikiamas lenkimo momento, apkraunant jį apkrova per viršutinius ir apatinius ritinius (3.9 pav.). Užrašoma didžiausia bandinio atlaikoma apkrova. Tempiamasis betono

stipris lenkiant $f_{ct,fl}$ (angl. *modulus of rupture*) apskaičiuojamas pagal išraišką:

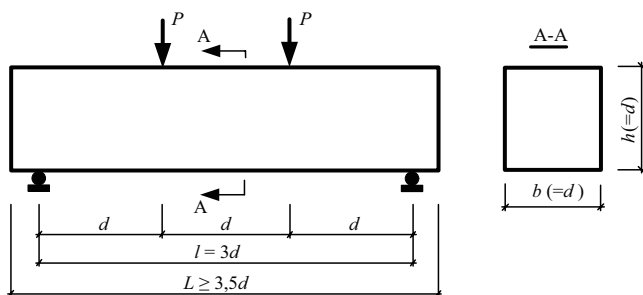
$$f_{ct,fl} = \frac{M_u}{W} = \frac{1/6 \cdot P_u \cdot l}{1/6 \cdot b \cdot h^2} = \frac{P_u \cdot l}{b \cdot h^2}, \quad (3.9)$$

čia M_u – ardomasio lenkimo momentas; W – elastinis skerspjūvio atsparumo momentas; P_u – ardomoji apkrova; l – atstumas tarp apatinių atraminių ritinių, lygus $l = 3d$; b – bandinio plotis; h – bandinio aukštis.

Ašinis tempiamasis betono stipris siejamas su tempiamuoju betono stipriu lenkiant:

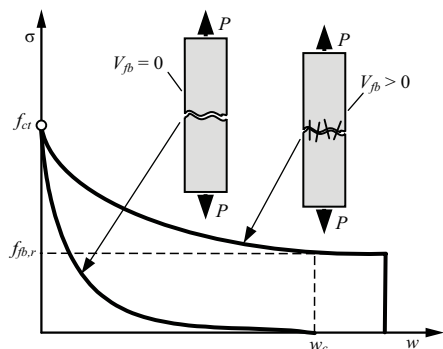
$$f_{ct} = \min \left\{ f_{ct,fl} / (1,6 - h/1000); f_{ct,fl} \right\}, \quad (3.10)$$

čia h – bendras skerspjūvio aukštis, mm.



3.9 pav. Lenkimo bandymo apkrovimo schema

Kaip minėta, tempiamajam stipriui, nustatytam ašiniu tempimu, dispersinis aravimas neturi įtakos. Pabrėžtina, kad tempiamojo stiprio lenkiant reikšmė priklauso nuo plieno plaušo kiekio betone. Todėl, atliekant lenkimo bandymą, gali būti gaunama didesnė tempiamojo stiprio reikšmė.



3.10 pav. Liekamojo stiprio nustatymas iš tempiamojo betono įtempių ir plyšio pločio diagramos

3.5.2. Liekamojo stiprio nustatymo būdai

Nustatyti tikslų liekamojo stiprio dėsnį supleišėjusiam tempiamajam plieno plaušu armuotam betonui yra sudėtingas uždavinys. Pasiūlyta nemažai skaičiavimo metodų, skirtų liekamajam stipriui įvertinti. Paprasčiausias būdas – liekamuoju stipriu $f_{fb,r}$ laikyti tempimo įtempių reikšmę $\sigma_{fb,r}$, atitinkančią ribinį plyšio plotį w_c . Tokia idealizacija pavaizduota 3.10 pav.

A. E. Naaman 2003 m. pasiūlė empirinį būdą liekamajam stipriui įvertinti.

Atsargumo dėlei imama pastovi liekamojo stiprio reikšmė $f_{fb,r}$ susiejama su plieno plaušo faktoriumi RI (žr. 3.2 formulę), plaušo ir betono vidutiniais sukibimo įtempiais τ bei trimis papildomais koeficientais:

$$f_{fb,r} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot RI. \quad (3.11)$$

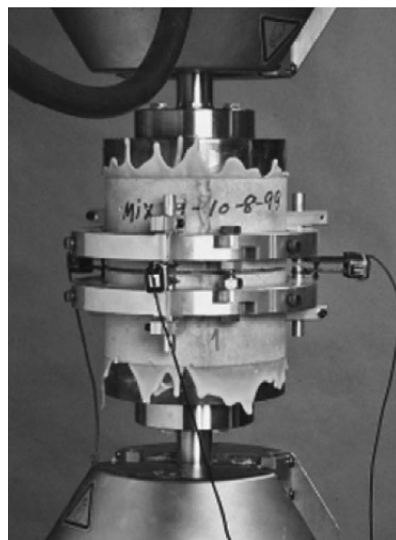
Šioje formulėje koeficientas λ_1 įvertina plaušo inkaravimo ilgį, λ_2 – plaušo orientaciją plyšyje, λ_3 – plaušo tarpusavio sąveiką. Siūlomos šių koeficientų reikšmės plaušui lenktais galais yra: $\lambda_1 = 0,25$; $\lambda_2 = 1,2$; $\lambda_3 = 1,0$. Tariaama, kad vidutiniai sukibimo įtempiai (žr. 10 skyrių) yra du kartus didesni už betono tempiamąjį stiprį: $\tau = 2f_{ct}$.

Šio empirinio būdo taikymas liekamajam stipriui nustatyti nėra tikslus. Norint tiksliai nustatyti dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamąjį stiprį, būtina taikyti eksperimentinius metodus. Tiesiogiai liekamąjį stiprį galima nustatyti atliekant ašinį tempimo bandymą, kurio metu gaunamos eksperimentinės įtempių ir plyšio pločio diagramos.

Tarptautinės betono ir gelžbetonio mokslo asociacijos RILEM darbo grupė TC 162-TDF pasiūlė vieną iš plieno plaušu armuoto betono ašinio tempimo bandymo būdų (3.11 pav.). Eksperimentui atlikti naudojami cilindro formos bandiniai su įpjova viduryje, skirta pleišėjimo procesui lokalizuoti. Bandymo metu nustatomi tempimo įtempiai betone, poslinkio davikliais matuojamas atsiveriančio plyšio plotis. Kaip minėta 3.5.1 poskyryje, tokio tipo bandymui atlikti reikalinga ypač tiksli matavimo įranga, bandiniai paruošiami sudėtingai, todėl ašinio tempimo bandymas praktiškai nėra atliekamas.

Pagrindinis metodas, kuriuo remiantis galima nustatyti tempiamojo plieno plaušu armuoto betono liekamąjį stiprį, yra prizmės lenkimo bandymas. Praktikoje dažniausiai taikomi du metodai: RILEM TC162-TDF grupės pasiūlytas bandymas viena koncentruota apkrova ir DBV Merklblatt lenkimo bandymas dviem koncentruotomis apkrovomis. Abu šie metodai leidžia sudaryti liekamojo stiprio nuo vidutinių betono deformacijų priklausomybę. Šis modeliavimo būdas parinktas todėl, kad įtempių ir deformacijų modeliai yra plačiausiai taikomi kompiuterinio modeliavimo programose.

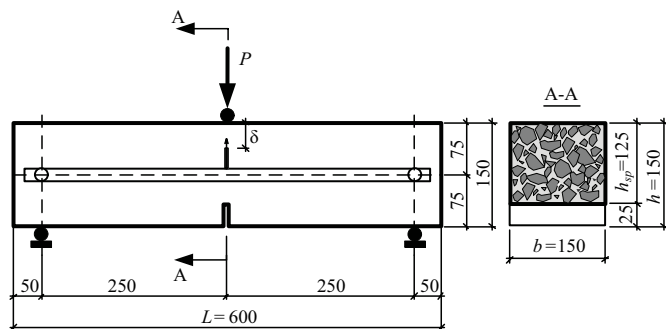
Atliekant lenkimo bandymą pagal RILEM TC162-TDF grupės pasiūlytą metodą, esant tam tikram sijos įlinkiui arba plyšio pločiui, fiksuojama apkrova, kuri taikoma nustatant



3.11 pav. Dispersiškai armuoto betoninio elemento ašinio tempimo bandymas

plieno plaušu armuoto betono liekamąjį tempimo stiprį. Taikant DBV Merkblatt metodą, liekamasis tempimo stipris nustatomas pagal lenkimo bandymais gautas apkrovos ir įlinkio diagramas. Tempiamojo betono liekamojo stiprio ir deformacijų diagramos sudaromos pagal tam tikrus charakteringuosius taškus.

Taikant RILEM TC162-TDF grupės pasiūlytą metodą, lenkimo bandymas atliekamas viena koncentruota apkrova veikiant laisvai atremtą, plieno plaušu armuotą betoninę siją ($600 \times 150 \times 150$ mm). Apatinės bandinio dalies viduryje padaroma 25 mm ilgio įpjova (3.12 pav.). Taip lokalizuojamas elemento pleišėjimas ir užtikrinama, kad elementas suirs būtent susilpnintame skerspjūvyje.

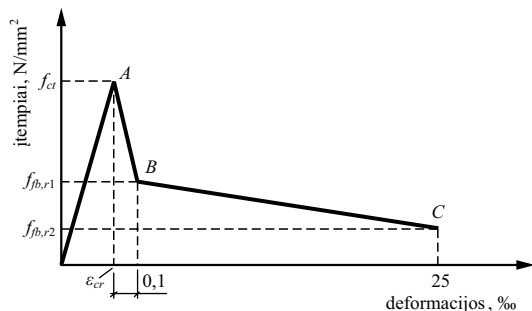


3.12 pav. Lenkimo bandymo, veikiant viena koncentruota apkrova, schema

Bandymui naudojamas presas su deformacijų kontrole, apkraunant siją 0,2 mm/min greičiu. Naudojant poslinkio daviklius, fiksuojamos apkrovos ir elemento vidurio taško įlinkio arba plyšio pločio ties įpjova reikšmės. Eksperimentas atliekamas, kol elemento įlinkis pasiekia 3,0 mm, arba plyšio plotis – 3,5 mm.

Plieno plaušu armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagrama (3.13 pav.) sudaroma pagal tris charakteringuosius taškus (A, B, C):

- Tašką A apibūdina tempiamasis betono stipris f_{ct} , nustatomas pagal 3.5.1 poskyryje aprašytus metodus, ir jį atitinkanti betono pleišėjimo deformacija ε_{cr} .



3.13 pav. RILEM įtempių ir deformacijų diagrama

- Taškas *B* aprašomas liekamojo stiprio reikšmė $f_{fb,r1}$ ir ją atitinkančia deformacija. Pagal eksperimentiškai gautas apkrovos ir plyšio pločio ($P-\delta$) arba apkrovos ir įlinkių ($P-w$) diagramas (3.14 pav.), atitinkamai esant elemento įlinkiui $\delta_1 = 0,46$ mm arba plyšio pločiui $w_1 = 0,5$ mm, nustatoma liekamojo stiprio reikšmė $f_{fb,r1}$:

$$f_{fb,r1} = 0,675k \frac{P_1 \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2}, \quad (3.12)$$

čia P_1 – apkrova, kai elemento įlinkis $\delta_1 = 0,46$ mm arba plyšio plotis $w_1 = 0,5$ mm; L – bandinio tarpatramio ilgis; b – elemento plotis; h_{sp} – bandinio aukštis ties įpjova; k – mastelio faktorius, priklausantis nuo analizuojamo bandinio matmenų ir nustatomas pagal 3.15 pav.

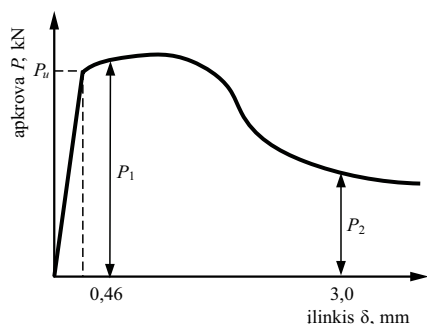
Sudarant įtempių ir deformacijų diagramą, liekamojo stiprio reikšmę $f_{fb,r1}$ atitinkanti betono deformacija imama lygi $\varepsilon_{cr} + 0,1 \cdot 10^{-3}$.

- Taškas *C* aprašomas analogiškai kaip ir taškas *B*, tik liekamojo stiprio reikšmė $f_{fb,r2}$ nustatoma, kai elemento įlinkis $\delta_2 = 3,0$ mm arba plyšio plotis $w_2 = 3,5$ mm (3.14 pav.), taikant išraišką:

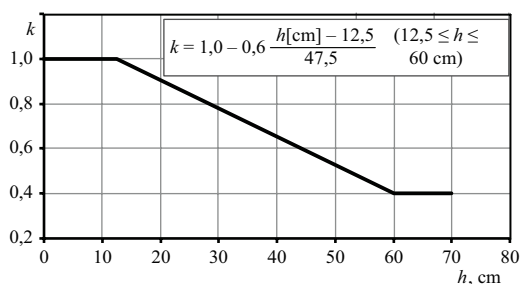
$$f_{fb,r2} = 0,555k \frac{P_2 \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2}. \quad (3.13)$$

Šią liekamojo stiprio reikšmę atitinka ribinė betono deformacijos reikšmė $\varepsilon_{cu} = 25 \cdot 10^{-3}$.

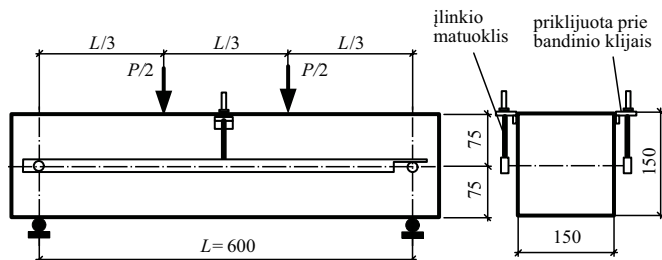
Tempiamojo plieno plaušu armuoto betono liekamąjį stiprį galima nustatyti taikant alternatyvų metodą, pasiūlytą Vokietijos betono ir statybos technikos sąjungos (DBV Merkblatt). Bandymo metu dviem koncentruotomis apkrovomis apkraunama laisvai atremta plieno plaušu armuota betoninė sija ($700 \times 150 \times 150$ mm) (3.16 pav.). Sijos tarpatramio ilgis $L = 600$ mm. Bandymui naudojamas presas su deformacijų matuokliu, apkraunant siją $0,2$ mm/min greičiu.



3.14 pav. Eksperimentiškai nustatyta apkrovos ir įlinkio priklausomybė



3.15 pav. Mastelio faktoriaus k nustatymas RILEM įtempių ir deformacijų diagramai



3.16 pav. Lenkimo bandymo dviem koncentruotomis apkrovomis schema

Analogiškai RILEM TC162-TDF grupės metodui, tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagrama (3.17 pav.) sudaroma pagal tris charakteringuosius taškus (A, B, C):

- Tašką A apibūdina tempiamasis betono stipris f_{ct} ir jį atitinkanti pleišėjimo deformacija ε_{cr} .
- Taškas B aprašomas supleišėjusio tempiamojo betono liekamojo stiprio reikšme $f_{fb,r1}$ ir ją atitinkančia deformacija. Liekamasis stipris $f_{fb,r1}$ nustatomas pagal eksperimentinę apkrovos ir įlinkio ($P-\delta$) diagramą (3.18 pav., a), taikant (3.14) išraišką:

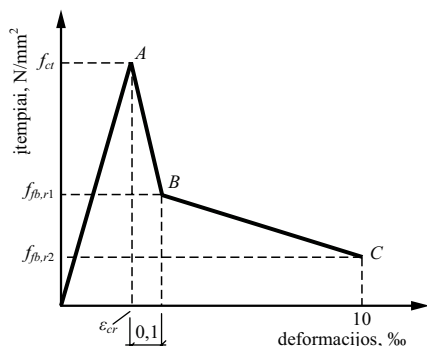
$$f_{fb,r1} = 540k \frac{W_I}{b \cdot h^2}, \quad (3.14)$$

čia W_I – plotas, apibrėžtas apkrovos ir įlinkių diagrama (pažymėtas pilka spalva 3.18 pav., a); k – mastelio faktorius, priklausantis nuo analizuojamo bandinio matmenų ir nustatomas pagal 3.19 pav.

Sudarant įtempių ir deformacijų diagramą, liekamojo stiprio reikšmę $f_{fb,r1}$ atitinkanti betono deformacija imama lygi $\varepsilon_{cr} + 0,1 \cdot 10^{-3}$.

- Taškas C aprašomas analogiškai kaip ir taškas B, tik liekamojo stiprio reikšmę $f_{fb,r2}$ nustatoma pagal eksperimentinę apkrovos ir įlinkio ($P-\delta$) diagramą (3.18 pav., b), taikant (3.15) išraišką:

$$f_{fb,r2} = 74k \frac{W_{II}}{b \cdot h^2}, \quad (3.15)$$

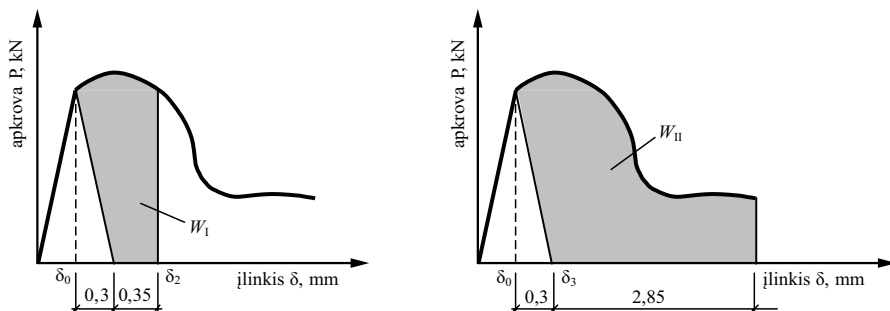


3.17 pav. Įtempių ir deformacijų diagrama

čia W_{II} – plotas, apibrėžtas apkrovos ir įlinkių diagrama (pažymėtas pilka spalva 3.18 pav., a).

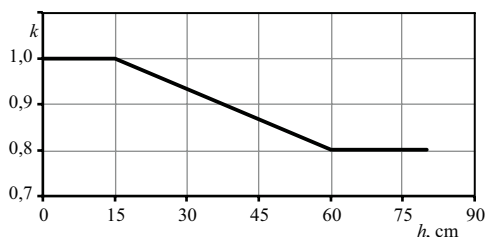
Sudarant įtempių ir deformacijų diagramą, liekamojo stiprio reikšmę $f_{fb,r2}$ atitinka ribinė betono deformacija $\varepsilon_{cu} = 10 \cdot 10^{-3}$.

Kaip pagrindinį skirtumą tarp šių metodų galima įvardyti tai, kad taikant RILEM TC162-TDF pasiūlytą metodą, padarius



3.18 pav. Apkrovos ir įlinkių priklausomybės

3.19 pav. Mastelio faktoriaus k nustatymas DBV Merkblatt įtempių ir deformacijų diagramai



įpjovą dirbtinai lokalizuojamas irimo procesas. DBV Merkblatt siūloma metodika užtikrina, kad suirimas vyks natūraliai silpniausiam elemento skerspjūvyje. Šis skirtumas gali lemti tai, kad tempiamojo betono liekamasis stipris, nustatytas pagal RILEM metodiką, bus didesnis už nustatytą remiantis DBV Merkblatt metodika.

Apibendrinant aptartus liekamojo tempiamojo stiprio nustatymo metodus, galima pažymėti, kad pagal RILEM TC162-TDF pasiūlytą metodą, tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos nustatomos taikant eksperimentinius įlinkio arba plyšio pločio duomenis. Pagal DBV Merkblatt metodą taikomos tik bandymo metu nustatytos įlinkio reikšmės. Todėl galima teigti, kad RILEM metodas yra patikimesnis, nes įtempių ir deformacijų diagramos gali būti sudaromos dviem būdais (kilus abejonių dėl matavimų tikslumo, eksperimentiniai rezultatai gali būti tarpusavyje palyginti).

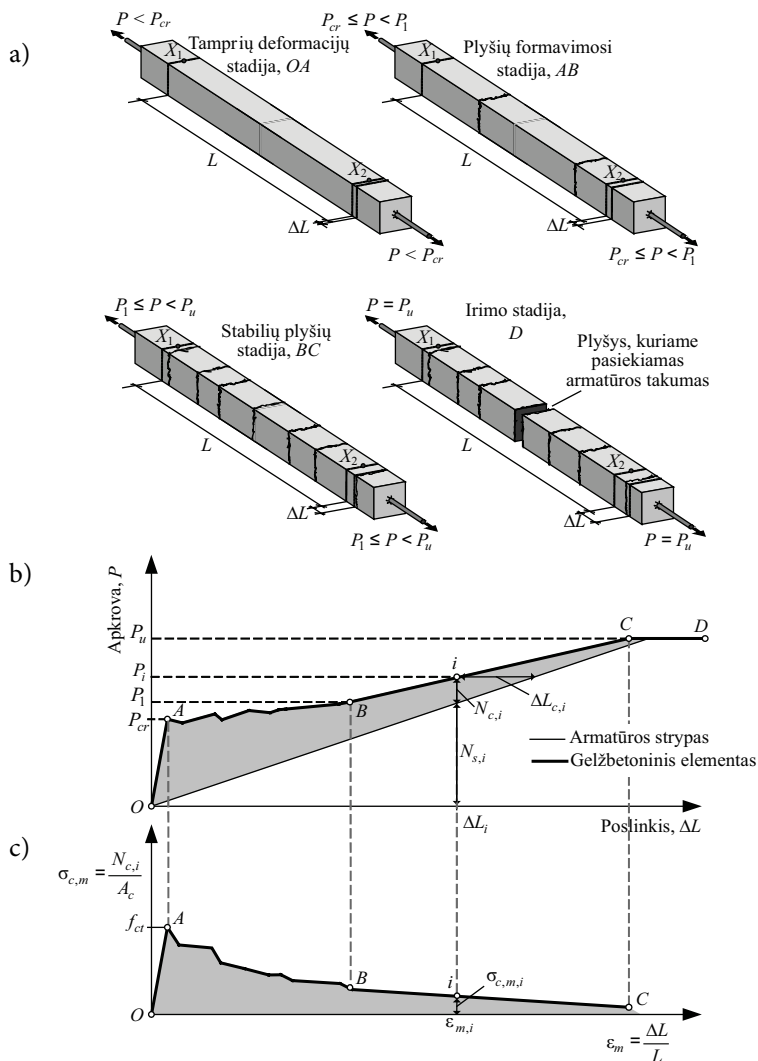
Taikant DBV Merkblatt metodą, ribinė tempiamojo dispersiškai armuoto betono deformacija imama lygi 10 %, o pagal RILEM TC162-TDF metodą ši reikšmė siekia 25 %. Tai riboja DBV Merkblatt metodo taikymą skaitinio modeliavimo uždaviniuose.

3.6. Tempiamojo sustandėjimo efektas

Statybose naudojamų įprastų medžiagų (plieno, aliuminio, medžio, nearmuotojo betono) deformavimosi procesui aprašyti pakanka turėti įtempių ir deformacijų diagramas gniuždymo ir tempimo atveju. Situacija pasikeičia, kai norime aprašyti armuoto

betono elgseną – dėl sąveikos su armatūros strypais iš esmės pakinta tempiamojo betono fizikinis įtempių ir deformacijų būvis. Armuotajam betonui dažnai taikomos vadinamosios *tempiamojo sustandėjimo* (angl. *tension stiffening*) įtempių ir deformacijų diagramos. Kuo jos skiriasi nuo nearmuotojo tempiamojo betono diagramų, bus parodyta toliau.

Panagrinėkime tempiamąjį gelžbetoninį elementą, parodytą 3.20 pav. Jį sudaro stačiakampė betono prizmė, kurios skerspjūvio plotas lygus A_c ir tamprumo modulis



3.20 pav. Gelžbetoninio elemento tempiamojo sustandėjimo efektas: a – elemento deformavimosi stadijos; b – elemento apkrovos ir poslinkių diagrama; c – betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagrama

E_s , armuota vienu strypu, kurio skerspjūvio plotas lygus A_s , tamprumo modulis E_s . Gelžbetoninis elementas apkraunamas tempimo jėga iki suirimo. Skirtingose apkrovos pakopose matavimų bazėje L tarp taškų X_1 ir X_2 elementas pailgėja dydžiu ΔL .

Nagrinėjamo gelžbetoninio elemento deformavimosi procesą suskirstysime į keturias charakteringas stadijas. Kol apkrovos reikšmė yra palyginti maža, betonas ir armatūra yra visiškai sukibę ir deformuojasi kaip kompozitinė medžiaga. Šioje stadijoje išmatuojamas poslinkis ΔL yra proporcingas veikiančiai jėgai P ir gelžbetoninė prizmė deformuojasi tampriai (3.20 pav., b, diagramos dalis OA). Apkrovai padidėjus iki P_{cr} , įtempiai betone pasiekia tempiamąjį stiprį ir atsiveria pirmasis makroplyšys. Toliau net mažas apkrovos prieaugis sukelia naujų plyšių atsiradimą. Atsiveriant kiekvienam naujam plyšiui, pastebimas staigus elemento pailgėjimas (diagramos dalis AB).

Pasiekus tam tikrą apkrovą P_1 , naujų plyšių elemente nebesusidaro ir elementas pereina į stabilaus pleišėjimo stadiją (diagramos dalis BC). Ši stadija trunka tol, kol viename iš plyšių pasiekiamą armatūros takumo riba (diagramos dalis CD).

Bandymo metu fiksuotą apkrovos reikšmę P ir išmatuotą poslinkį ΔL tarp taškų X_1 ir X_2 galime atidėti grafiškai, kaip parodyta 3.20 pav., b. Šioje diagramoje atidėkime ir tariamą armatūros strypo apkrovos ir poslinkio grafiką. Iš medžiagų mechanikos kurso prisiminkime, kad vienalytės tampriosios medžiagos (šiuo atveju armatūros strypo) tempiamojo elemento poslinkis apskaičiuojamas taip:

$$\Delta L = \frac{NL}{E_s A_s}, \quad (3.16)$$

čia L – poslinkių matavimo bazės ilgis; N – ašinė jėga elemente (pagal nagrinėjamą apkrovos schemą $N = P$).

Dabar panagrinėkime elemento apkrovos ir poslinkio diagramos tašką i (3.20 pav., b). Šis taškas atitinka poslinkį ΔL_i ir jėgą P_i . Išmatuotas gelžbetoninio elemento pailgėjimas ΔL_i , veikiant šiai apkrovai, yra mažesnis nei armatūros strypo – diagramoje šis skirtumas pažymėtas $\Delta L_{c,i}$. Tai galima paaiškinti tuo, kad tarp plyšių esantis betonas perima tempimo įtempius ir, nukraudamas armatūrą, sustandina strypo deformavimąsi. Šis efektas ir vadinamas supleišėjusio gelžbetonio *tempiamuoju sustandėjimu*.

Tempiamojo sustandėjimo reiškiniui įvertinti sudaromos betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos. Tokią diagramą galima nesunkiai gauti transformavus aptartąją gelžbetoninio elemento apkrovos ir išmatuoto poslinkio priklausomybę. Tą patį diagramos tašką i panagrinėkime vertikaliu pjūviu: tašką i atitinka išmatuotas gelžbetoninio elemento poslinkis ΔL_i . Pertvarę 3.16 formulę galime apskaičiuoti, kokią reakciją (ašinę jėgą) armatūros strype sukelia toks poslinkis:

$$N_{s,i} = \frac{\Delta L_i A_s E_s}{L}. \quad (3.17)$$

Ši įrašos dalis grafiškai parodyta 3.20 pav., b. Remiantis jėgų pusiausvyra galima rasti vidutinę jėgą, tenkančią tempiamajam betonui:

$$N_{c,i} = P_i - N_{s,i}. \quad (3.18)$$

Reikia atkreipti dėmesį, kad augant apkrovai įraša supleišėjusiame betone $N_{c,i}$ mažėja palaipsniui (skirtingai nei nearmuotojo betono atveju). Žinant vidutinę tempiamojo betono įrašą, galima apskaičiuoti vidutinius betono įtempius:

$$\sigma_{c,m,i} = \frac{N_{c,i}}{A_c}. \quad (3.19)$$

Horizontaliojoje ašyje išmatuotą elemento pailgėjimą ΔL padaliję iš matavimų bazės L , gauname *vidutinę* elemento deformaciją tarp taškų X_1 ir X_2 . Taip gauname tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų priklausomybę (3.20 pav., c). Ji parodo vidutinius betono tempimo įtempius supleišėjusiame tempiamajame gelžbetoniniame elemente.

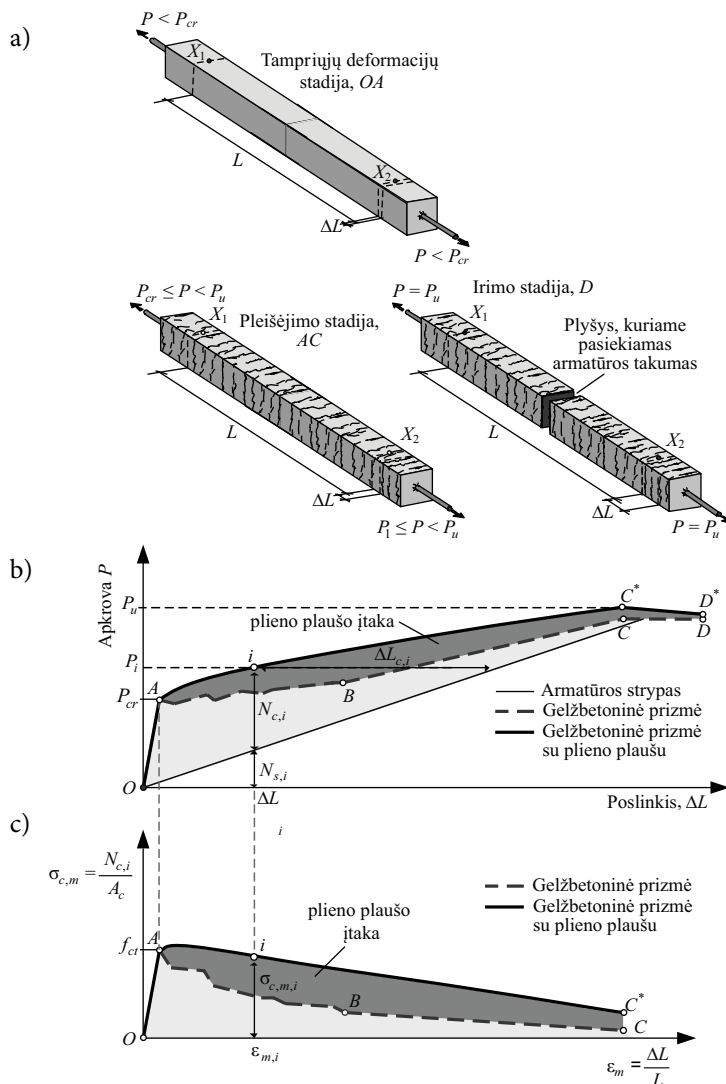
Nagrinėjant tempiamojo sustandėjimo įtempių ir deformacijų diagramas, ypatiną dėmesį reikia atkreipti į du aspektus:

1. Horizontaliojoje ašyje atidedama ne tempiamojo betono, o viso gelžbetoninio elemento vidutinė deformacija. Išilginės tempiamojo betono deformacijos, nagrinėjant betoninį bloką tarp dviejų gretimų plyšių, kinta gerokai siauresniame intervale: nuo nulio iki pleišėjimo deformacijos ε_{cr} . Šis kitimas vyksta betoniniame bloke tarp plyšių ir bus vėliau parodytas nagrinėjant diskretaus elementų pleišėjimo koncepciją.
2. Tempiamojo sustandėjimo diagrama iš esmės skirta supleišėjusio gelžbetoninio elemento deformacijų analizei. Ji parodo, kurią tempimo įtempių dalį perima tempiamasis betonas ruožuose tarp plyšių.

Aptartas tempiamojo sustandėjimo reiškinys vyksta dėl betono ir strypinės armatūros sąveikos. Neabejotinai šis reiškinys pastebimas ir tuo atveju, kai gelžbetoniniai elementai vienu metu yra armuoti ir strypine, ir dispersine armatūra. Tokiu atveju betonas ruožuose tarp plyšių tempimo įtempius perima ne tik dėl sąveikos su armatūros strypais, bet ir dėl liekamųjų įtempių plyšyje. Norėdami išsiaiškinti plieno plaušo įtaką tempiamojo sustandėjimo efektui, panagrinėkime analogišką tempiamąją gelžbetoninę prizmę, papildomai armuotą plieno plaušu. Nagrinėjamas tempiamasis elementas parodytas 3.21 pav.

Galime išskirti tokius tempiamojo elemento deformavimosi ypatumus, pasireiškiančius dėl plieno plaušo sąveikos su betonu:

1. Iki pleišėjimo apkrovos tiek įprastojo, tiek dispersiškai armuoto gelžbetoninio elemento deformacijos praktiškai sutampa ir yra proporcingos veikiančiai jėgai (diagramos dalis OA). Tai gali būti paaiškinama tuo, kad plieno plaušas neturi didesnės įtakos betono tamprumo moduliui ir tempiamajam stipriui.



3.21 pav. Tempiamojo sustandėjimo efektas tempiamajame gelžbetoniniame elemente, armuotame plieno plaušu: a – pleišėjimo ir deformavimosi stadijos; b – elemento apkrovos ir poslinkių diagrama; c – betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagrama

2. Pirmojo plyšio susidarymo apkrova taip pat yra beveik vienoda tiek įprastojo, tiek plieno plaušu armuoto gelžbetoninio elemento atveju. Tolesnis deformavimosi procesas įgyja aiškių skirtumų. Plieno plaušu armuotame elemente nėra staigaus deformacijų pokyčio, prasidėjus pleišėjimo procesui (diagramos dalies AB). Taip pat nepastebima aiškos plyšių stabilizavimosi stadijos, nauji plyšiai atsiveria iki pat elemento irimo. Iš esmės pasikeičia plyšių išsidėstymo pobūdis:

kelis didelio pločio plyšius pakeičia daugybė nedidelių, atsitiktinai išsidėsčiusių plyšelių. Pleišėjimo stadija tęsiasi iki pat elemento irimo pradžios (diagramos dalis AC^{*}).

3. Elementas, kaip ir gelžbetoninis elementas, ima irti viename iš plyšių, kuriame armatūra pasiekia takumo ribą. Irimo apkrovos reikšmė P_u gaunama didesnė, nes pasiekus armatūros takumą (diagramos taškas C^{*}), plieno plaušas ir toliau perduoda tempimo įtempius plyšyje, prisidedamas prie elemento laikomosios galios. Strypinei armatūrai tekant ir greitai didėjant plyšio pločiui, plaušas perduoda vis mažesnę jėgą (žr. 4 skyrių).

Aptarti gelžbetoninių elementų deformavimosi skirtumai gali būti paaiškinti tuo, kad plieno plaušas tampa efektyvus atsiveriant makroplyšiams. Plieno plaušas kerta atsiveriančius plyšius ir ne tik suvaržo jų plitimą, bet ir perduoda tempimo įtempius per plyšio plokštumą. Tokiu būdu tempiamasis betonas daug efektyviau įsitraukia į deformavimosi procesą, todėl išmatuotas elemento poslinkis, veikiant tai pačiai apkrovai, tampa daug mažesnis (3.21 pav., b). Šis reiškinys aiškiai matomas panauginėjus plieno plaušu armuoto betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramą, parodytą 3.21 pav., c. Ši diagrama gaunama analogiškai įprastam gelžbetoniniam elementui. Esant tam tikrai vidutinei elemento deformacijai $\epsilon_{m,p}$ vidutiniai plieno plaušu armuoto betono įtempiai gaunami didesni nei įprastajam betonui.

Šiame poskyryje aptartas tempiamojo sustandėjimo reiškinys yra labai svarbus skaičiuojant gelžbetoninių elementų įlinkius ir deformacijas. Netinkamai įvertinus šį reiškinį, gali būti daroma didesnė nei 100 % įlinkių apskaičiavimo paklaida, todėl projektuojant plieno plaušu armuotas konstrukcijas ypatingą dėmesį reikia atkreipti į adekvatų tempiamojo sustandėjimo efekto modeliavimą.

3.7. Kerpamasis ir sukamasis stipriai

Kirpimo įtempių perdavimas armuotojo elemento plyšyje dažnai aiškinamas užpildo sukibimu ir trintimi tarp plyšio paviršių. Gelžbetoniniame elemente armatūros kiekis, esantis kirpimo plokštumoje, taip pat turi įtakos kerpamajam stipriui. Tai pastebima ir dispersiškai armuotuose elementuose. Plieno plaušas suvaržo atsiveriančius plyšius ir taip išlaiko betono vientisumą, o tai padidina ir elemento kerpamąją galią.

Dispersinis armavimas gali iš dalies arba visiškai pakeisti skersinę armatūrą. Didinant plieno plaušo kiekį, didėja ir elemento kerpamasis stipris. Nustatyta, kad elementui be skersinės strypinės armatūros armuoti naudojant apie 1,5 % tiesaus ir lygaus plieno plaušo, jo kerpamasis stipris padidėja apie 45 %, lyginant su nearmuotaisiais elementais. Naudojant tik 1 % plieno plaušo su užlenktais galais, elemento kerpamasis stipris padidėja iki 67 %, o esant banguotajam plieno plaušui – net iki 100 %. Tai parodo, kad elemento kerpamasis stipris priklauso ne tik nuo plaušo kiekio, bet ir nuo plaušo geometrijos. Norint pagerinti konstrukcinių elementų atsparumą kirpimui, plieno plaušą rekomenduojama naudoti kartu su strypine armatūra.

Kalbant apie elementų, armuotų plieno plaušu, sukamąjį stiprį paminėtina, kad toks armavimo būdas efektyviau nei strypinis skersinis armavimas suvaržo plyšius elemente, kurie atsiranda dėl sukamojo išorinio poveikio. Efektyvumas pasireiškia tuo, kad plieno plaušas elemento tūryje išsidėsto įvairiomis kryptimis, tai elementui leidžia atlaikyti įvairių krypčių įtempius. Rezultatai rodo, kad dispersiškai armuotų elementų sukamasis stipris gali padidėti iki 100 %.

3.8. Savybės veikiant dinaminei apkrovai

3.8.1. Atsparumas smūginei apkrovai

Kaip minėta, veikiant statinei apkrovai dispersinis armavimas mažesniu nei 1,5 % plieno plaušo kiekiu beveik nepadidina betono stiprio, tačiau, veikiant dinaminei apkrovai, plaušas gali padidinti tiek gniuždomąjį, tiek tempiamąjį ir lenkiamąjį stiprius. Dispersiškai armuotas betonas gali atlaikyti 3–10 kartų didesnę dinaminę apkrovą, lyginant su įprastu betonu. Taip yra dėl reikiamos didesnės energijos kiekio ištraukiant plaušą iš rišamosios medžiagos, tai ir lemia didesnį elemento stiprį. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad plieno plaušu armuoto betono irimo energijos reikšmė smūginės apkrovos atveju yra apie 70–80 % didesnė, lyginant su statine apkrova. Pastebėtina tai, kad plieno plaušu armuoto betono irimo energijos skaitinė reikšmė gali padidėti 40–100 kartų, palyginti su įprasto betono irimo energijos reikšme.

Plieno plaušo ištraukimo iš elemento jėga ir plaušo slinkties betono atžvilgiu reikšmė taip pat priklauso ir nuo apkrovos pridėjimo greičio. Esant didesniam apkrovimo greičiui veikia didesnė plieno plaušo ištraukimo jėga. Esant per dideliame apkrovos pridėjimo greičiui sumažėja irimo energija, dėl to plieno plaušas dažnai ne ištraukiamas, o nutraukiamas.

Plieno plaušu armuotas betonas pasižymi geresnėmis stiprumo savybėmis, veikiant dinaminei apkrovai, nei įprastas betonas. Siekiant nustatyti plieno plaušu armuoto betono dinamines savybes atliekami krintančio svorio, smūginės ir sprogo apkrovos bandymai. Ganėtinai sudėtingas uždavinys – palyginti tokiais skirtingais bandymų būdais gautus rezultatus. Taip yra todėl, kad plieno plaušu armuoto betono dinaminės savybės labai priklauso nuo bandinių formos ir bandymo metodų tam tikrų aspektų, pvz., bandinio formos ir jo įtvirtinimo sąlygų, krintančio kūno masės ir kritimo aukščio, sprogo užtaiso formos ir dydžio.

3.8.2. Nuovargis

Nuovargiu vadinamas reiškinys, kai dėl pasikartojančių apkrovos ciklų pažeidžiama vidinė medžiagos struktūra. Medžiagos pažeidimo matas dažniausiai yra tam tikros dalies trumpalaikio stiprio netekimas arba tamprumo modulio sumažėjimas. Dėl nuovargio reiškinio medžiaga gali suirti įtempiams esant daug mažesniems negu jos trumpalaikis stipris.

Plieno plaušas padidina tempiamųjų, gniuždomųjų ir lenkiamųjų elementų atsparumą nuovargiui. Svarbu tai, kad padidinus konstrukcijų atsparumą nuovargiui galima padidinti elemento naudojimo laiką.

Nuovargį labai svarbu įvertinti projektuojant tipines plaušu armuotas betonines konstrukcijas – grindinius ir perdangas. Armavimas plieno plaušu yra perspektyvus būdas didinti betoninių konstrukcijų atsparumą nuovargiui, nes dispersinis armavimas visomis kryptimis išsklaido dinaminės apkrovos perduodamą energiją ir labai sumažina ciklinės apkrovos poveikį betoniniam elementui. Nustatyta, kad 0,5 % plieno plaušo kiekis po 2 milijonų apkrovimo ciklų padidina atsparumą nuovargiui 70–90 %.

Dispersinis armavimas yra perspektyvus betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų atsparumo didinimo nuovargiui būdas, nes plieno plaušas ir statinio apkrovimo atveju, ir veikiant dinaminėms apkrovoms suvaržo elemente atsiveriančius plyšius.

3.9. Kiti poveikiai

3.9.1. Daugiaašis apkrovimas

Veikiant daugiaašei apkrovai dispersiškai armuotas betonas yra stipresnis nei įprastas betonas. Tai patvirtina ir atliktų bandymų rezultatai, kurie parodo, kad maksimalūs plieno plaušu armuoto betono gniuždymo įtempiai ir deformacijos didėja, didėjant skersiniam elemento suvaržymui.

3.9.2. Susitraukimas ir valkšnumas

Betono susitraukimo ir valkšnumo veiksniai turi didelę įtaką ilgalaikę apkrova veikiamų betoninių konstrukcijų įtempių ir deformacijų būviui. Ilgalaikės betono deformacijos gali keletą kartų viršyti pradines (trumpalaikes). Tokių didelių deformacijų augimą sukelia ilgalaikiai fizikiniai procesai: betono susitraukimas, valkšnumas ir pleišėjimas, atsivėrusių plyšių vystymasis ir naujų susidarymas. Šie fizikiniai procesai lemia deformacijų ir įtempių persiskirstymą betone.

Betono susitraukimu vadinamas laisvas jo tūrio mažėjimas dėl kietėjant vykstančios cemento hidratacijos ir drėgnumo kaitos. Betonas laikui bėgant traukiasi arba plečiasi neveikiant jokioms išorinėms apkrovoms, o jo susitraukimo deformacijos didėja palaipsniui ir trunka ilgą laiką.

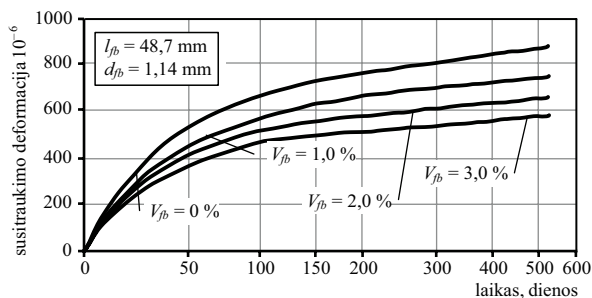
Atlikta gausybė eksperimentinių tyrimų, nagrinėjant įprastojo betono susitraukimą ir valkšnumą, tačiau tokie rezultatai negali būti tiesiogiai taikomi, analizuojant plieno plaušu armuoto betono savybes.

Nors dar nėra pakankamai daug duomenų apie plieno plaušu armuotą betoną, yra nustatyta, kad betono susitraukimo efektui įtakos turi plieno plaušo geometriniai parametrai. Didėjant plaušo ilgio ir skersmens santykiui (l_{fb} / d_{fb}) mažėja betonui kietėjant pasireiškiantis susitraukimas. Įdomu tai, kad deformuotos formos plieno plaušas daug veiksmingesnis už tiesų ir lygų plaušą. Dispersiniam armavimui naudo-

jamas deformuotos formos plieno plaušas gali sumažinti susitraukimo deformacijas iki 40 %. Susitraukimo deformacijos mažėja didėjant plaušo kiekiui elemente. Tai galima pamatyti iš 3.22 pav.

Pažymėtina tai, kad betono valksnumui plieno plaušas turės mažesnę įtaką nei susitraukimui, nes valksnumo efektas nėra susijęs su elemento makropleišėjimu.

3.22 pav. Armavimo banguotu plieno plaušu ir savaiminio susitraukimo priklausomybė

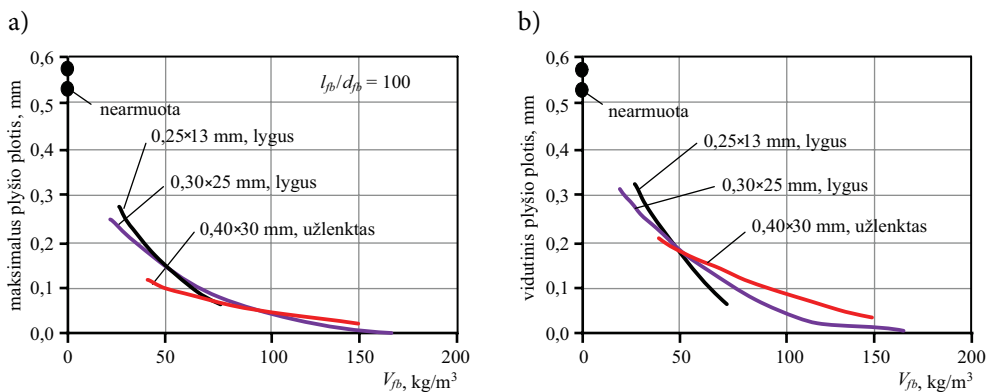


Siekiant nustatyti dispersiškai armuoto betono susitraukimo deformacijas, yra pasiūlyta išraiška, susieta su nearmuotojo betono susitraukimu:

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{sh} \left(1 - 2,45 \cdot \mu \cdot V_{fb} \cdot l_{fb} / d_{fb} \right), \quad (3.20)$$

čia ε_{fs} – plieno plaušu armuoto betono laisvojo susitraukimo deformacija; ε_{sh} – įprasto betono laisvojo susitraukimo deformacija; μ – trinties koeficientas tarp plaušo ir betono ($\mu = 0,04$ – tiesaus ir lygaus plaušo; $\mu = 0,12$ – deformuoto plaušo); V_{fb} – plaušo kiekis, kg/m^3 ; l_{fb} – plaušo ilgis; d_{fb} – plaušo skersmuo.

Susitraukimo deformacijų sumažėjimas, panaudojus plieno plaušą, visgi nėra esminis dalykas, rodantis plaušo veiksmingumą. Tikslas – suvaržyti ne laisvąjį susitraukimą, bet plyšių atsivėrimą elementui traukiantis. 3.23 pav. aiškiai matomas plieno plaušo poveikis tiek maksimaliam plyšio pločiui, tiek vidutiniam plyšių plo-



3.23 pav. Plaušo įtaka: a – maksimaliam plyšio pločiui; b – vidutiniam plyšio pločiui

čiui. Taip pat eksperimentiškai įrodyta, kad betoną armuojant 0,5 % plieno plaušu, maksimalus susitraukimo metu atsivėrusio plyšio plotis sumažėja iki 80 %, o vidutinis plyšio plotis – iki 90 %.

3.10. Skyriaus apibendrinimas

Statybinių konstrukcijų analizei dažniausiai taikomos baigtinių elementų principu veikiančios programos, įvertinančios netiesines medžiagų savybes. Tačiau šių programų skaičiavimo tikslumas priklauso nuo analizei naudojamų medžiagų modelių. Betono armavimas plieno plaušu pasižymi itin didele veiksmi, nuo kurių priklauso fizikinės ir mechaninės betono savybės, gausa. Dėl sudėtingos dispersiškai armuoto betono elgsenos dar nėra pasiūlyta visiems priimtino plieno plaušu armuoto betono medžiagų modelio. Gniuždomojo plieno plaušu armuoto ir įprastojo betono įtempių ir deformacijų ryšys skiriasi labai nedaug. Dispersiškai armuotame betone pastebimas tik labai nedidelis betono gniuždomojo stiprio padidėjimas (iki 15 %). Didėjant plieno plaušo kiekiui, pastebimos didesnės elemento deformacijos prie jo stiprumo ribos, tai susiję su plastiškesnėmis elemento savybėmis elementui supleišėjus.

Dažniausiai nesupleišėjusiam tempiamajam betonui modeliuoti naudojama įtempių ir deformacijų diagrama. Supleišėjusio tempiamojo betono elgsena gali būti aprašoma įtempių ir deformacijų arba įtempių ir plyšio pločio diagramomis. Aprašant dispersiškai armuoto tempiamojo betono elgseną šia diagrama, galima aiškiau suprasti fizikinę plieno plaušo įtaką tempiamajam betonui. Ši diagrama rodo, kokią dalį tempimo įtempių po pleišėjimo atlaiko dispersiškai armuotas betonas. Dispersiškai armuoto betono savybė atlaikyti tempimo įtempius plyšyje vadinama liekamuoju stipriu. Stiprio nustatymas – sudėtingas uždavinys. Liekamasis stipris plyšyje gali būti nustatomas taikant empirinius būdus, tačiau tokio taikymo rezultatai yra labai apytiksliai. Todėl dažniausiai liekamasis stipris nustatomas atliekant eksperimentinius lenkimo bandymus. Praktikoje dažniausiai taikomi du metodai: RILEM TC162-TDF grupės pasiūlytas bandymas viena koncentruota apkrova ir DBV Merkblatt lenkimo bandymas dviem koncentruotomis apkrovomis. Abu metodai skirti liekamojo stiprio nuo vidutinių deformacijų priklausomybei sudaryti.

Dispersinis betono armavimas turi įtakos ir kerpamajam betonui stipriui. Betoną armuojant iki 1,5 % plieno plaušo, jo kerpamasis stipris, atsižvelgiant į plaušo tipą, gali padidėti iki 100 %. Tai paaiškinama plaušo gebėjimu suvaržyti atsiveriančius plyšius įstrižajame pjūvyje. Todėl dažnai skersinė armatūra pakeičiama plieno plaušu.

Lyginant su įprastu betonu, plieno plaušu armuotas betonas gali atlaikyti 3–10 kartų didesnę dinaminę apkrovą ir pastebimas 70–90 % didesnis atsparumas nuovargiui. Tai paaiškinama tuo, kad dispersiškai pasiskirstęs plaušas visomis kryptimis elemente išsklaido dinaminės apkrovos sukiamą energiją.

Šiame skyriuje pateikti medžiagų modeliai yra taikomi skaitinio modeliavimo metoduose, aprašytuose penktajame vadovėlio skyriuje.

Kontroliniai klausimai

1. Kokiais būdais gali būti aprašoma supleišėjusio tempiamojo betono elgsena? Kuo jie skiriasi?
2. Kokią įtaką betono tamprumo moduliui turi dispersinis armavimas?
3. Apibūdinkite gniuždomojo betono deformavimosi stadijas. Kokie procesai vyksta betone kiekvienoje iš stadijų? Kokią įtaką šiems procesams turi plieno plaušas?
4. Apibūdinkite tempiamojo betono deformavimosi stadijas. Kokius panašumus ir skirtumus galima išvelgti, lyginant šias stadijas su gniuždomojo betono?
5. Kokius žinote dispersiškai armuoto betono tempiamojo stiprio nustatymo būdus? Kokie jų pranašumai ir trūkumai?
6. Kaip nustatomi supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamieji įtempiai plyšyje? Kada pasiekiami tikroji jų reikšmė?
7. Kaip galima paaiškinti liekamųjų įtempių plyšyje susidarymą įprastam ir plieno plaušu armuotam betonui? Kuriuo atveju liekamieji įtempiai gaunami didesni?
8. Ką vadiname liekamuoju tempimo stipriu?
9. Kokie eksperimentiniai metodai liekamajam tempimo stipriui nustatyti dažniausiai taikomi praktikoje? Kuo jie skiriasi?
10. Kas tai yra tempiamojo sustandėjimo efektas? Ar jis vyksta betoninėse konstrukcijose be išilginės armatūros?
11. Kokią įtaką dispersinis armavimas turi betono kerpamajam stipriui?
12. Ar betoninių elementų armavimas padidina atsparumą nuovargiui?

Rekomenduojamoji literatūra

- Bischoff, P. H. 2003. Tension stiffening and cracking of steel fiber-reinforced concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* 15(2): 174–182.
- Cachim, P.; Figueiras, J.; Pereira, P. 2002. Fatigue behaviour of fibre-reinforced concrete in compression, *Cement and Concrete Composites* 24(2): 211–217.
- Campione, G.; Mangiavillano, M. L. 2008. Fibrous reinforced concrete beams in flexure: Experimental investigation, analytical modelling and design considerations, *Engineering Structures* 30(11): 2970–2980.
- Dupont, D. 2003. *Modeling and Experimental Validation of the Constitutive Law (σ - ϵ) and Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete*: Doctoral dissertation. Catholic University of Leuven, Belgium.
- Gribniak, V.; Holschemacher, K.; Kaklauskas, G.; Bačinskas, D.; Ulbinas, D.; Sokolov, A.; Meškėnas, A. 2011. Experimental analysis of reinforced fibre-concrete beam, in *Mechanika-2011: Proceedings of the 16th International Conference*. Kaunas: Technologija, 93–97.
- Naaman, A. E. 2003. Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites, in *RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, 95–113.
- Nataraja, M. C.; Dhang, N.; Gupta, A. P. 1999. Stress-strain curves for steel fiber reinforced concrete under compression, *Cement & Concrete Composites* 21: 383–390.
- RILEM TC 162-TDF. 2000. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending tests, *Materials and Structures* V33: 3–5.
- Vandewalle, L. 2000. Cracking behaviour of concrete beams reinforced with a combination of ordinary reinforcement and steel fibers, *Materials and Structures* 33(3): 164–170.
- LST EN 1992-1-1:2005. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės* [Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings]. Vilnius, 2007. 232 p.

4. PLIENO PLAUSO IR BETONO SĄVEIKA

4.1. Įžanga

Dispersinis armavimas iš esmės pakeičia betono suirimo pobūdį: trapioji irtis tampa artima plastiškai veikiant tiek gniuždymo, tiek tempimo įtempiams. Kai plieno plaušas derinamas kartu su įprasta strypine armatūra, gerokai sumažėja konstrukcijų deformacijos ir atsiveriančių plyšių pločiai. Tiek padidėjęs betono plastiškumas, tiek gelžbetoninių konstrukcijų deformacijų ir pleišėjimo suvaržymas yra susijęs su plieno plaušo ir betono sąveika, kuri pasireiškia mikro- ir mezostruktūros lygmenimis.

Vadovėlio autorių atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad, atsižvelgiant į naudojamo plaušo tipą ir kiekį, vidutinis gelžbetoninių sijų plyšio plotis vidutiniškai sumažėja 40–70 %, taip pat labai padidėja sijų standumas. Tik suprantant plaušo ir betono sąveikos mechanizmą, galima prognozuoti dispersiškai armuoto betono konstrukcijų eksploatacines savybes, projektuojamoms konstrukcijoms parinkti optimalią plaušo ir betono sudėtį.

4.2. Tyrimo lygmenys ir metodai

Plieno plaušo ir betono tarpusavio sąveika gali būti tiriama trimis skirtingais lygmenimis (4.1 pav.).

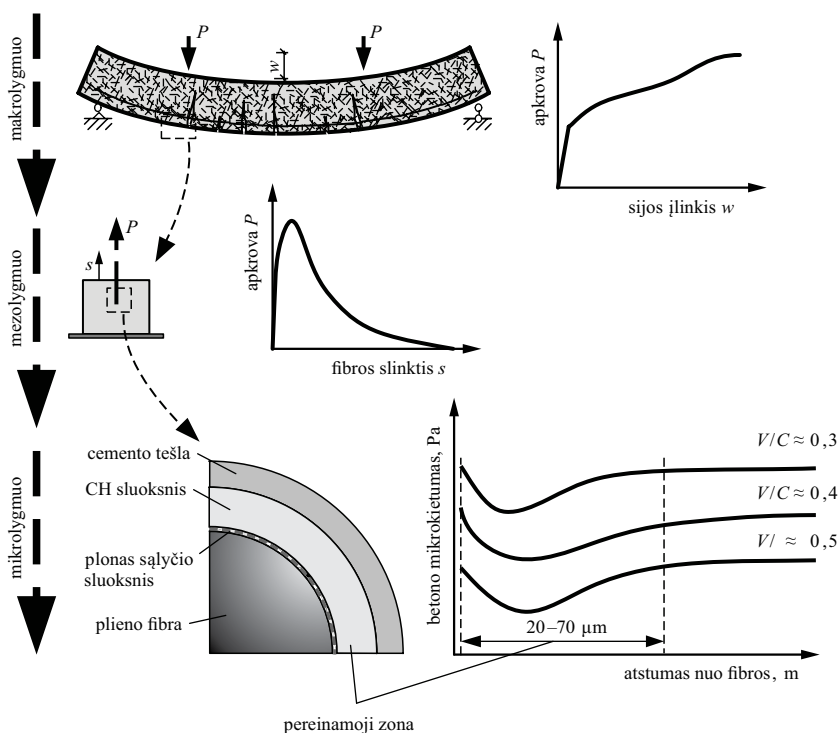
Makrolygmeniu nagrinėjami konstrukciniai elementai – dažniausiai tai yra lenkiamosios sijos, tempiamosios ir gniuždomosios priзмės. Plaušo poveikis įvertinamas imant visą konstrukcinio elemento tūrį, su tam tikromis *vidutinėmis* fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis (4.1 pav., a). Eksperimentiniais arba analitiniais metodais nustatomas plieno plaušo efektas visos konstrukcijos elgsenai, taip pat apibrėžiami medžiagų modeliai: įtempių ir deformacijų bei liekamųjų įtempių ir plyšio pločio diagramos. Ši priklausomybė parodo plaušo gebėjimą varžyti atsiveriančius plyšius ir perduoti įtempius plyšyje. Iš esmės būtent dėl liekamųjų įtempių reiškinių, plieno plaušu armuotos konstrukcijos įgyja didesnę plastiškumą, tampa standesnės ir atsparesnės aplinkos poveikiams.

Keičiant betono sudėtį, plieno plaušo kiekį ir formą, galima optimizuoti plieno plaušu armuotų elementų pleišėjimo, deformavimosi ir irimo procesus. Makrolygmeniu atliekamų tyrimų pranašumas tas, kad gaunama informacija apie visos konstrukcijos elgseną, atsižvelgiant į betono sudėtį, plieno plaušo tipą ir kiekį. Kita

vertus, atliekant konstrukcinių elementų bandymus, nenustatomi plaušo ir betono tarpusavio sąveikos procesai, vykstantys konstrukcijos viduje. Tokiu atveju naudingi tampa mezolygmens bandymai.

Mezolygmeniu tiriama vienos fibros (rečiau kelių fibrų) sąveika su betonu (4.1 pav., b). Skirtingai nuo tyrimų makrolygmeniu, nustatomas dviejų skirtingas fizikines ir mechanines savybes turinčių medžiagų – plaušo ir betono – sąveikos modelis. Plačiausiai paplitęs fibros ištraukimo iš betoninio kubelio bandymas, matuojant ištraukimo jėgą ir fibros poslinkį betono atžvilgiu. Šis poslinkis yra labai svarbus plieno plaušu armuotų konstrukcijų elgsenai: būtent dėl fibros ir betono poslinkių skirtumo (kurį toliau vadinsime *slinktimi*) susidaro *sukibimo* įtempiai, kuriais fibra perduoda įtempius betonui ir atvirkščiai. Slinktis – būtina sąlyga, kad plaušo ir betono sąlyčio zonoje susidarytų sukibimo įtempiai. Slinkties ir sukibimo įtempių susidarymas supleišėjusiame betone yra esminė dispersiškai armuotų konstrukcijų savybė, lemianti efektyvią tokių konstrukcijų eksploataciją. Detaliai slinkties ir sukibimo įtempių susidarymo cheminis, fizikinis ir mechaninis procesas bus aptartas vėliau.

Nors fibrų ištraukimo bandymai dažnai kritikuojami dėl to, kad neatspindi realios fibros elgsenos konstrukcijoje, jie yra ypač naudingi optimizuojant fibrų formą



4.1 pav. Plieno plaušo ir betono sąveikos tyrimo lygmenys

ir betono sudėtį. Skirtingai nuo bandymų makrolygmeniu, gaunama tiesioginė informacija apie fibros ir betono sąveikos zonos parametrus. Be to, ištraukimo bandymams atlikti reikia kur kas mažiau medžiagų ir darbo sąnaudų, lyginant su viso konstrukcinio elemento gamyba ir bandymu. Dėl šio pranašumo galima paruošti kelias dešimtis ar net šimtus skirtingų bandinių.

Mikrolygmens analizė apima nedidelį plaušo ir betono sąveikos zonos tūrį (4.1 pav., c). Šiuo atveju tiriamos betono savybės, ypač pabrėžiant plaušo ir cemento matricos *sąlyčio zonos* (angl. *interfacial transition zone*) savybių svarbą. Prisiminime, kad normalusis betonas yra kompozitinė medžiaga, kurioje išskiriami trys skirtingas mechanines savybes turintys komponentai: cemento matrica, užpildas ir jų sąlyčio zona. Sąlyčio zona taip pat sudaryta iš cemento matricos, tačiau dėl vandens kaupimosi ant užpildų paviršiaus (angl. *bleeding*) bei kai kurių kitų cheminių procesų ji yra labiau porėta ir mechaniškai silpnesnė nei cemento matrica. Betoninėse konstrukcijose irimas visada prasideda ties šia sąlyčio zona. Ties fibrų paviršiumi, kaip ir ties užpildais, susidaro silpnesnis sąlyčio zonos sluoksnis, kurio storis yra apie 20–70 μm (4.1 pav., c). Kartais ši sąlyčio zona vadinama CH sluoksniu, nes hidratuojantis cementui jame susidaro daugiau silpnesnių kalcio hidroksido kristalų.

Sąlyčio zonos savybės turi tiesioginę įtaką plieno plaušu armuotų konstrukcijų elgsenai, nes fibros medžiaga suyra būtent per šią silpnesnę vietą. Eksperimentiškai tiriant sąlyčio zonos savybes mikrolygmeniu, paprastai nustatomas jos mikrokietumas ir porėtumas. Optimizuojant betono sudėtį, siekiama sumažinti sąlyčio zonos porėtumą ir padidinti jos stiprį (mikrokietumą). Tam paprastai naudojami vadina-mieji mikroužpildai – ypač smulkios frakcijos medžiagos, turinčios silicio dioksido SiO_2 , pavyzdžiui, silicio dulkės (angl. *silica fume*), arba lakieji pelenai (angl. *fly ash*). Mikroužpildų naudojimas betono mišiniuose, kartu su cheminiais vandens ir cemento santykį V/C mažinančiais priedais leido gaminti stiprius ir ypač stiprius betonus, kurių gniuždomasis stipris yra 50–100 MPa (angl. *high strength concrete*) ir net 100–150 MPa (angl. *ultra high strength concrete*).

Betono ir plieno plaušo savybių tyrimas mikrolygmeniu yra ypač efektyvus parenkant reikiamą betono sudėtį. Kita vertus, šiems bandymams atlikti reikia specialios įrangos, o gaunamus rezultatus nėra lengva pritaikyti prognozuojant makroskopinę konstrukcijos elgseną.

Tam tikras tyrimo metodas parenkamas atsižvelgiant į norimus gauti rezultatus. Efektyvus tyrimo būdas apima visus tris lygmenis: pirmiausia nustatomos betono savybės sąlyčio su fibra zonoje, šios apibendrintos savybės pritaikomos vienai fibrai ir, naudojantis tikimybiniais fibrų pasiskirstymo modeliais, gaunami visos konstrukcijos elgseną apibūdinantys dėsniai (apkrovos ir įlinkių, plyšio pločio ir liekamųjų įtempių diagramos). Šis tyrimo būdas turi tam tikrų matematinių sunkumų vertinant atsitiktinį fibrų pasiskirstymą, kuris retai būna idealiai atsitiktinis. Fibrų pasiskirstymui betono mišinyje įtakos turi betonavimo kryptis, klojinių ir fibrų forma,

tankinimo būdas, laikas ir kiti veiksniai. Inžineriniu požiūriu priimtinausias yra makrolygmuo, kai nagrinėjamas visas konstrukcinis elementas. Makrolygmens bandymai visada atliekami nustačius fibrų ir betono sąveikos dėsnius žemesniais tyrimo lygmenimis.

4.3. Plieno plaušo ir betono sukibimas

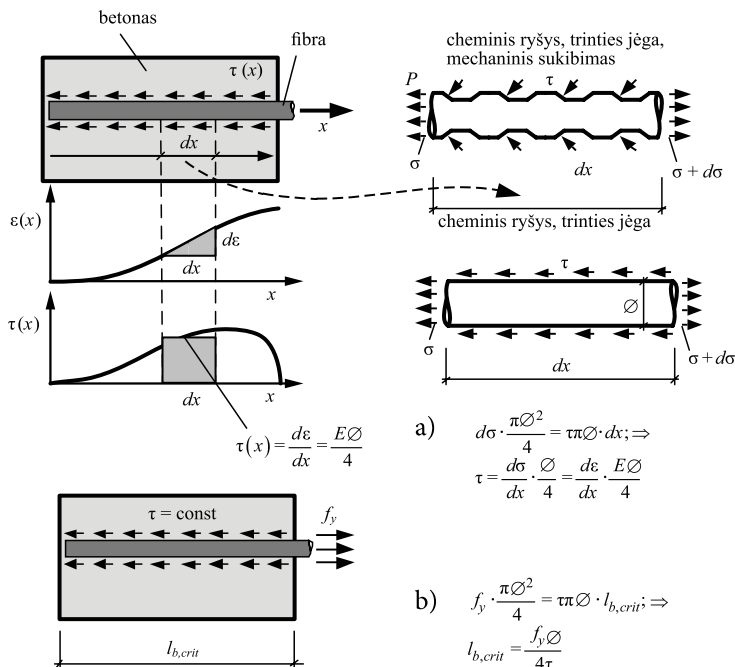
Plieno plaušo ir betono sukibimo mechanikos parametrai iš esmės apibrėžia dispersiškai armuotų konstrukcijų eksploatacijos efektyvumą. Sukibimas yra sudėtingas reiškinys, apimantis cheminius, fizikinius ir mechaninius procesus. Paprastai išskiriamos trys sukibimo dedamosios: adhezija, trintis ir mechaninis inkaravimas.

Adhezija (arba cheminis sukibimas) vadinama dviejų skirtingų medžiagų paviršinė cheminė trauka. Plieno plaušu armuotame betone cemento matrica sudaro cheminį ryšį su plieninėmis fibromis. Kaip minėta, šio ryšio stiprumas daugiausia priklauso nuo sąlyčio zonos savybių. Adhezija yra sukibimo dedamoji, veikianti esant mažiausioms slinkties reikšmėms. Mažų įtempių ir slinkties stadijoje sąlyčio zona dar nepažeidžiama, o deformuojasi tampriai. Pasiekus tam tikrą slinkties dydį (paprastai tai yra kelios šimtosios milimetro dalys), įvyksta trapijojo cheminio kontakto suirtis ir adhezijos dedamoji staigiai pranyksta. Kaip bus parodyta vėliau, adhezija didžiausią įtaką turi tiesių fibrų sąveikos su betonu procese.

Trinties dedamoji pradeda veikti suirus cheminiam ryšiui tarp fibros ir cemento matricos. Cheminiam ryšiui suirus (suirtis įvyksta silpniausioje sąlyčio zonos dalyje), gaunamas šiurkštus fibros ir betono sąlyčio paviršius, kuriame gali susidaryti gana didelės trinties jėgos. Slinkčiai didėjant, vyksta šio paviršiaus pažeidimas ir nugludinimas, todėl trintis palaipsniui mažėja.

Mechaninis inkaravimas – pati efektyviausia bendro fibros ir betono sukibimo dedamoji, susidaranti, kai fibros mechaniškai deformuojamos: įspaudžiami rumbeliai, užlenkiami galai, fibros susukamos ir pan. Tokiu būdu gaunama mechaninio sukibimo dedamoji, galinti sudaryti apie 70–80 % fibros ištraukimo jėgos. Todėl cheminis ryšys, mechaniškai deformuotose fibrose sudarantis 10–20 %, dažnai nėra vertinamas. Fibros gali mechaniškai inkaruotis tarpusavyje, tačiau šis reiškinys vyksta tik ypač intensyviai plieno plaušu armuotame betone, kai fibrų yra daugiau nei 10 % tūrio. Toks betonas (angl. *slurry infiltrated concrete* – *SIFCON*) gaminamas pagal specialią gamybos technologiją ir naudojamas ypatingais atvejais. Įprastame plieno plaušu armuotame betone, kai fibrų yra ne daugiau kaip 1,5–2 % tūrio, mechaninis fibrų tarpusavio inkaravimasis nevertinamas.

Bendruoju atveju sukibimo įtempius sudaro šių trijų dedamųjų suma į išilginę fibros ašį. Kai fibra tiesi, sukibimo įtempius sudaro adhezija ir trinties jėga. Kai fibra yra mechaniškai deformuota, susidaro papildomos pasvirusių jėgų dedamosios (4.2 pav., a). Šių jėgų projekciją į horizontaliąją ašį galima laikyti papildoma sukibimo įtempių dedamąja.



4.2 pav. Fibros sukibimo įtempių ir deformacijų priklausomybė (a); ribinio inkaravimo ilgio apskaičiavimas (b)

Kaip parodyta 4.2 pav., a, sukibimo įtempiai $\tau(x)$ per fibros inkaravimo ilgį x pasiskirsto netiesiškai. Dėl sukibimo įtempių $\tau(x)$ kinta ašinė jėga P fibroje, kartu ir jos deformacijos – deformacijų kitimo funkciją pažymėkime $\varepsilon(x)$. Išpjovę iš betono nykstantai mažą fibros ruožą dx ir užrašę horizontaliųjų jėgų pusiausvyros lygtį, galime rasti ryšį tarp funkcijų $\tau(x)$ ir $\varepsilon(x)$:

$$\begin{aligned} \sigma \frac{\pi \varnothing^2}{4} + \tau \pi \varnothing \cdot dx - (\sigma + d\sigma) \frac{\pi \varnothing^2}{4} &= 0, \\ \tau \pi \varnothing \cdot dx + \frac{\pi \varnothing^2}{4} d\sigma &= 0, \\ \tau &= \frac{d\sigma}{dx} \cdot \frac{\varnothing}{4}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Padarę prielaidą, kad plieninės fibros deformacijoms galioja Huko dėsnis, elementarų įtempių pokytį galime išreikšti taip:

$$d\sigma = E \cdot d\varepsilon. \quad (4.2)$$

Įstatę $d\sigma$ išraišką į (4.1) lygtį, gauname:

$$\tau = \frac{d\varepsilon}{dx} \cdot \frac{E\varnothing}{4}. \quad (4.3)$$

Gauta nesudėtinga išraiška, rodanti, kad sukibimo įtempiai, veikiantys ruože dx , yra tiesiogiai proporcingi fibros deformacijų pirmajai išvestinei. Fizikinė šio dėsnio prasmė gali būti paaiškinta taip: kuo didesni sukibimo įtempiai veikia tam tikrame plieninės fibros ruože, tuo didesnę deformacijų pokytį jie sukelia. Žinoma, kai $\tau(x) = 0$, tai ir $\varepsilon(x) = \text{const}$. Diferencialinė sukibimo įtempių ir fibros deformacijų priklausomybė (4.3) dažnai taikoma ir armatūros sąveikai su betonu modeliuoti – nustčius deformacijų pasiskirstymą armatūros strype (tai yra išmatuojamas dydis) galima nesunkiai apskaičiuoti atitinkamus sukibimo įtempius.

Trumpose fibrose išmatuoti deformacijų pasiskirstymą yra techniškai labai sunkiai įgyvendinama užduotis, be to, dėl mažo fibros inkaravimo ilgio, sukibimo įtempiai dažnai imami pastovūs. Padarę šias prielaidas, galime nustatyti tam tikrą ribinį fibros inkaravimo ilgį betone, apibrėžiantį fibros ir betono sąveikos mechanizmą (4.2 pav., b):

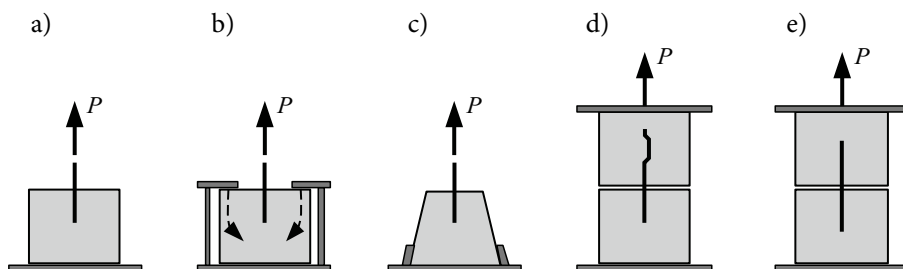
$$f_y \cdot \frac{\pi d_{fb}^2}{4} = \tau \pi d_{fb} \cdot l_{b,\text{lim}}, \Rightarrow l_{b,\text{lim}} = \frac{f_y d_{fb}}{4\tau}, \quad (4.4)$$

čia f_y – fibros takumo riba; d_{fb} – fibros skersmuo; τ – vidutiniai sukibimo įtempiai; $l_{b,\text{lim}}$ – ribinis inkaravimo ilgis.

Gauta (4.4) išraiška yra plaušo ir betono sąveikos modeliavimo pagrindas. Ji apibrėžia du galimus dispersiškai armuoto betono suirimo atvejus: kai inkaravimo ilgis $l_b < l_{b,\text{lim}}$ – fibra yra ištraukiama iš betono, kai $l_b \geq l_{b,\text{lim}}$ – fibra nutrūksta. Nors (4.4) formulė išvesta remiantis tam tikromis prielaidomis (tiesi fibra, tolygus sukibimo įtempių pasiskirstymas), tačiau gali būti pritaikoma bet kokios formos fibroms, nes apibrėžia galimus irimo atvejus. Realioje konstrukcijoje fibros retai yra idealiai statmenos atsiveriančiam plyšiui, be to, dažniausiai yra tam tikru būdu mechaniskai paveiktos. Analitiškai nustatyti inkaravimo ilgį tokiu atveju yra sudėtinga ir ne visada tikslinga, todėl atliekami fibrų ištraukimo bandymai.

4.4. Fibrų ištraukimo bandymai

Ištraukimo bandymų tikslas – imituoti fibros elgseną plyšyje, sudarant kuo realistiškesnį įtempių ir deformacijų būvį. Bandymų metu matuojama fibros ištraukimo jėga ir slinktis, sudarant įvairias fibros inkaravimo ilgio ir posvyrio kampo reikšmes. Pasiūlyta įvairių būdų atlikti tokius bandymus (4.3 pav.), tačiau iki šiol nėra visuotinai pripažinto ir standartizuoto metodo. Iš gausių tyrimų nustatyta, kad bandymo metodas turi didelę reikšmę gaunamiems fibros ir betono sąveikos rezultatams. Ypačingą reikšmę gaunamam ištraukimo jėgos ir slinkties dėsniui turi normaliniai įtempiai, susidarantys statmenai fibros ištraukimo kryptčiai (4.3 pav., b). Dėl šių įtempių padidėja trinties dedamoji, taip pat suvaržomas betono mikropleišėjimas sąlyčio su fibra zonoje. Atliekant ištraukimo bandymus siekiama išvengti nerealistinių įtempių koncentracijų ir bandymus atlikti taip, kad rezultatai turėtų kuo mažesnę sklaidą.



4.3 pav. Fibrų ištraukimo bandymai: a–c – vienpusiai bandiniai; d ir e – dvipusiai bandiniai

Pagal įrangos išdėstymą ištraukimo bandymai gali būti suskirstyti į dvi pagrindines grupes: fibra gali būti traukiama tiesiogiai iš kubelio (4.3 pav., a–c) arba fibra (neretai ir keletas fibrų) inkaruojama dviejuose kubeliuose (4.3 pav., d ir e). Vienpusius bandinius lengviau pagaminti, tačiau reikalingi specialūs ir ypač standūs griebtai, kad fibros slinktis vyktų tik sąlyčio zonoje su betonu. Be to, dėl atraminių reakcijų susidaro papildomi gniuždymo įtempiai kubelyje, kurie gali nerealistiskai padidinti fibros ištraukimo jėgą (4.3 pav., b). Vienas iš būdų sumažinti jų įtaką gaunamam betono ir fibros sąveikos dėsniai yra kubelio atraminę reakciją perkelti toliau nuo fibros, kaip parodyta 4.3 pav., c.

Fibrą įbetonavus abiejuose galuose, galima eliminuoti nerealistiškas atramines reakcijas, tačiau tokiu atveju kyla sunkumų matuojant slinktį. Būtina užtikrinti, kad fibros slinktis pasireikštų tik kurioje nors vienoje kubelio pusėje. Tai galima pasiekti, pavyzdžiui, naudojant skirtingų savybių betoną, vieną fibros pusę mechaniškai užinkaravus (4.3 pav., d) arba tiesiog parinkus skirtingus inkaravimo ilgius. Vis dėlto kyla klausimas – ar slinktis vyksta tik vienoje kubelio pusėje, ar gaunama tam tikra tiksliai neapibrėžta slinkčių suma, ypač pradinėse apkrovimo stadijose, kai dar pasireiškia cheminis sukibimas. Kita vertus, kai inkaravimo ilgis abiejose kubelio pusėse parinktas vienodas (4.3 pav., e), abiejose pusėse dėl simetrijos turėtų susidaryti vienoda slinktis. Tačiau ši užduotis yra dar sunkiau įgyvendinama dėl nepastovių medžiagų savybių ir atsitiktinių paklaidų inkaruojant fibras. Sunkumai tiksliai apibrėžiant fibros slinktį yra pagrindiniai trūkumai, dėl kurių kritikuojami dvipusio betonavimo bandiniai.

Apibendrinant galima pasakyti, kad nepriklausomai nuo bandymo metodo turi būti tiksliai nustatyta fibros ištraukimo jėgos ir slinkties priklausomybė. Techninius bandymo įgyvendinimo sunkumus palikę tyrėjams, toliau panagrinėsime skirtingos formos fibrų ištraukimo iš betono mechaniką.

4.5. Fibrų ištraukimo mechanika

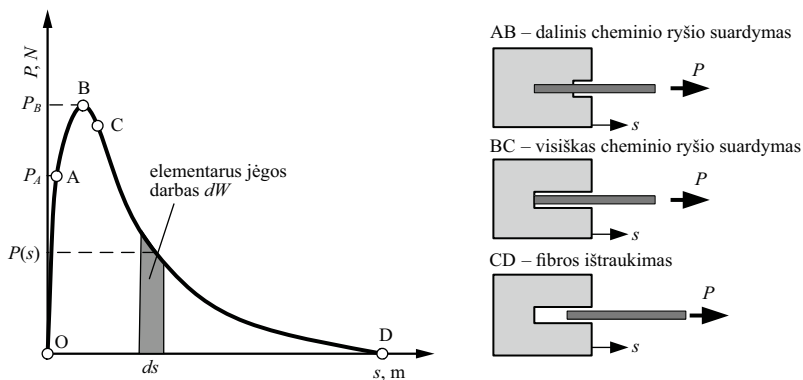
Ištraukimo bandymai paprastai atliekami nustatyti tam tikrų veiksnių įtaką jėgos ir slinkties priklausomybei. Šie veiksniai gali būti fibros posvyrio kampas, inkaravimo ilgis, paviršiaus apdirbimas, mechaninių inkarų įtaka, betono sudėtis ar kiti. Šiame poskyryje toliau nagrinėjami svarbiausi veiksniai, turintys įtakos fibros sąveikai su betonu.

4.5.1. Tiesių fibrų ištraukimas

Pirmiausia panagrinėkime tiesios fibros ištraukimo iš betono stadijas. Kaip minėta, tokių fibrų sukibimo įtempius sudaro adhezija (cheminis sukibimas) ir trintis. Esant nedidelei slinkčiai, sąlyčio zonoje, pradedant nuo apkrauto fibros galo, palaipsniui suardomas cheminis ryšys. Visiškai suardžius cheminį ryšį, veikiančiai apkrovai priešinasi tik trinties jėgos.

Fibros ištraukimo iš betoninio masyvo stadijos parodytos 4.4 pav. Kylančioje grafiko dalyje galima išskirti du ruožus: tiesinį OA ir netiesinį AB. Pirmojoje apkrovos stadijoje sąlyčio zona deformuojasi tampriai, ši stadija tęsiasi iki tam tikros apkrovos reikšmės P_A . Didėjant apkrovai vis labiau pastebimos plastinės deformacijos, ši deformavimosi proceso dalis 4.4 pav. pažymėta sritimi AB. Netiesinis deformavimosi pobūdis ir plastinės deformacijos susijusios su laipsniniu sąlyčio zonos cheminio ryšio ardymu ir cemento matricos mikropleišėjimu. Šio ruožo pabaigoje mikroplyšiai apima visą sąlyčio zoną ir pasiekama didžiausia apkrova P_B . Mikroplyšiams jungiantis ir apimant vis didesnę sąlyčio zonos plotą, apkrova pradeda mažėti – ši stadija grafike pažymėta BC ir atitinka visišką cheminio ryšio suardymą. Krintančiojoje grafiko dalyje CD apkrovai priešinasi tik trinties jėgos. Toliau augant slinkčiai apkrova mažėja vis greičiau, kol pasiekiamas taškas D, žymintis, kad fibra ištraukta.

Aprašytosios tiesios fibros sąveikos su betonu stadijos pasireiškia, kai inkaravimo ilgis $l_b < l_{b,lim}$. Tuo atveju, kai fibros inkaravimo ilgis yra didesnis už ribinį



4.4 pav. Ištraukimo jėgos ir slinkties priklausomybė tiesioje fibroje

($l_b \geq l_{b,lim}$), kylančioje dalyje pasiekama fibros suirtis, ir apkrovos bei slinkties grafikas staigiai nutrūksta.

Plotas, apibrėžtas apkrovos ir slinkties kreive, turi svarbią reikšmę atliekant inžinerinius konstrukcijų skaičiavimus. Prisiminkime, kad fizikoje mechaniniu darbu vadinamas energijos kiekis, kurį atlieka jėga, veikdama kūną poslinkio kryptimi:

$$W = P \cdot s \cdot \cos \Theta,$$

čia P – ištraukimo jėga; s – jėgos sukeltas kūno poslinkis; $\cos \Theta$ – kampas tarp jėgos ir poslinkio vektorių.

Darbo matavimo vienetas yra džaulis, $N \cdot m$, rodantis, kokią darbą atlieka 1 niutono jėga, perkeldama kūną 1 metro atstumu. Tas pats mechaninio darbo apibrėžimas taikomas ir traukiant fibrą iš betono kubelio: jėgos ir poslinkio sandauga apibūdina atliekamą darbą (fibrą traukiant iš betono, kampas tarp jėgos ir slinkties vektorių $\Theta = 0^\circ$ ir $\cos \Theta = 1$). Kai veikianti jėga yra nepastovi, elementarus jėgos $P(s)$ darbas yra (4.4 pav.):

$$dW = P(s)ds. \quad (4.5)$$

Integruodami abi lygties puses, nustatome ištraukimo jėgos atliekamą darbą:

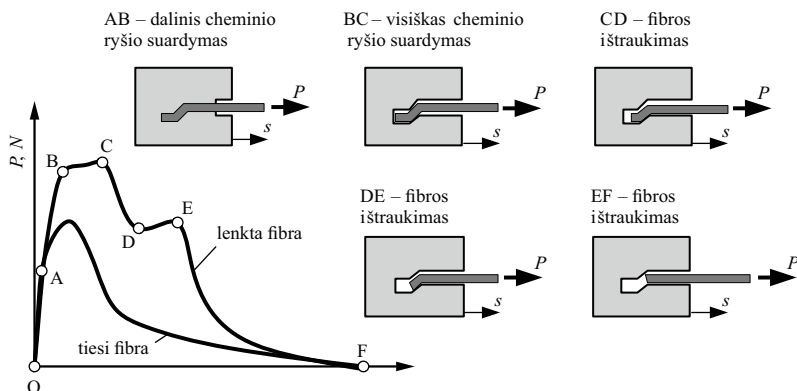
$$W = \int_0^s P(s)ds. \quad (4.6)$$

Kuo didesnė gaunama šio integralo reikšmė, tuo didesnis energijos kiekis išsklaidomas traukiant fibrą. Konstrukcijų saugos ribinio būvio požiūriu didesnis išsklaidytos energijos kiekis užtikrina patikimesnę konstrukcijos eksploataciją. Prisiminkime, kad projektuojant gelžbetonines konstrukcijas reikalaujama, jog suirtis prasidėtų armatūrai pasiekus takumo ribą – tokiu būdu užtikrinamas pakankamas konstrukcijos tįsumas (deformatyvumas) prieš suirimą. Atitinkamai gaunama ir kur kas didesnė išorinių jėgų atlikto darbo reikšmė (arba konstrukcijos išsklaidytos energijos kiekis), lyginant su perarmuotais gelžbetoniniais elementais, kurie suyra staiga, gniuždomajam betonui pasiekus ribines deformacijas. Tokie patys reikalavimai keliama ir plieno plaušu armuotoms konstrukcijoms: visada siekiama kuo didesnio konstrukcijos tįsumo prieš suirimą. Fibrai ar strypinei armatūrai nutrūkstiant didėjančios apkrovos stadijoje, vyksta staigus suirimasis. Atitinkamai gaunamas daug mažesnis (kartais net keliomis eilėmis) išsklaidytos energijos kiekis, lyginant su palaipsniniu fibros ištraukimu ar plieninės armatūros takumu. Todėl, tiriant plienines fibras mezolygmeniu, siekiama gauti kuo didesnę apkrovos ir slinkties diagramos plotą, dažniausiai parenkant įvairios geometrijos mechaniškai deformuotas fibras. Nustačius vienos fibros ištraukimo metu atliekamą darbą, galima spręsti apie visos konstrukcijos elgseną ir eksploatacines savybes.

4.5.2. Fibrų užlenktais galais ištraukimas

Siekiant pagerinti fibrų inkaravimą betone, tiesių fibrų galai dažnai užlenkiami. Toliau panagrinėsime tokios fibros apkrovos ir slinkties elgseną. Kaip ir tiesiose fibrose, kylančioje diagramos dalyje galima išskirti du charakteringus ruožus, nes vykta analogiškas sąlyčio zonos ardymo procesas. Skirtumai išryškėja perėjus į trinties fazę – fibrose užlenktais galais ištraukimą papildomai varžo mechaninio inkaravimo dedamoji.

4.5 pav. parodytos tiesios ir lenktos fibros apkrovos ir slinkties diagramos. Abiejų fibrų tipų kylančioji tiesinė diagramos dalis OA praktiškai sutampa, nes sąlyčio zona deformuojasi tampriai. Suirus cheminiams sukibimo ryšiams, dėl lenktojo galo susidaro papildoma sustiprėjimo aikštelė BC. Augant slinkčiai, apkrovos reikšmė mažėja (dalis CD), nes prasideda mechaninio inkaravimo ardymas. Lenktajam fibros galui pradėjus tiesintis, susidaro lokalus apkrovos maksimumas, atitinkantis diagramos tašką E. Ištiesinus fibrą apkrova staigiai krinta, panašiai kaip ir tiesiose fibrose. Diagramos dalis EF žymi tik trinties jėgos pasipriešinimą apkrovai, kuri palaipsniui mažėja dėl mažėjančio sąlyčio paviršiaus ploto, palaipsniui ištraukiant fibrą. Pažymėtina, kad ištraukiant lenktas fibras, jų galas dažnai nėra visiškai ištiesinamas, o tai didina trinties jėgas.



4.5 pav. Ištraukimo jėgos ir slinkties priklausomybė fibroje užlenktais galais

Lygindami tiesios ir lenktos fibros apkrovos ir slinkties diagramų plotus (4.5 pav.) galime pastebėti, kad reikalingas kur kas didesnis energijos kiekis norint ištraukti lenktą fibrą iš betono. Todėl lenktos fibros ypač efektyviai padidina dispersiškai armuotų konstrukcijų tįsumą ir praktikoje yra plačiai naudojamos.

4.5.3. Pasvirusių fibrų ištraukimas

Pabrėžtina, kad dispersiškai armuoto betono tūryje fibros pasiskirsto atsitiktiniu būdu – tai lemia betono sudėtis, betonavimo kryptis, klojinių forma ir kiti veiksniai. Atsitiktinis plieno plaušo pasiskirstymas betono mišinyje parodytas 4.6 pav. Betonui

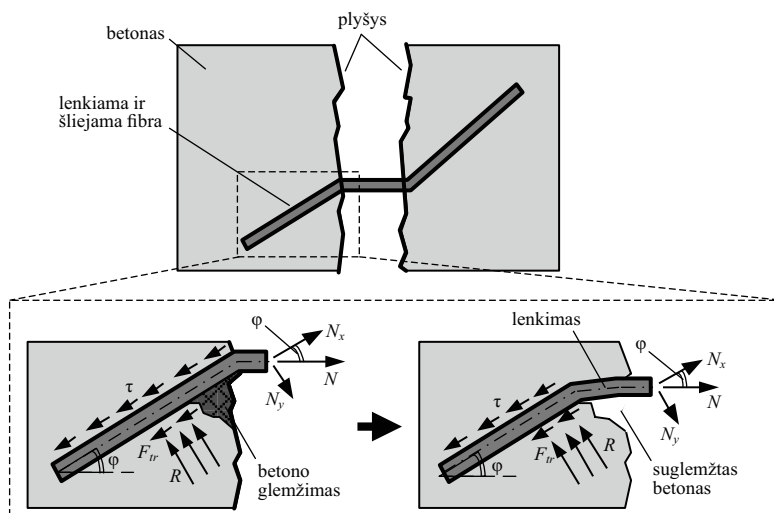
4.6 pav. Netaisyklingas
fibrų išsidėstymas betone



pradėjus pleišėti, fibros įvairiais posvyrio kampais kerta atsiveriančio plyšio plokštumą. Todėl, atliekant ištraukimo bandymus, stengiamasi modeliuoti šią situaciją: fibros į kubelius įbetonuojamos ne statmenai betono paviršiui, o tam tikru kampu.

Traukiant iš betono tiek pasvirusias, tiek tiesias fibras, vyksta tie patys fizikiniai ir mechaniniai procesai: tamprus sąlyčio zonos deformavimas, cheminio ryšio ardymas ir trinties jėgų pasipriešinimas baigiamąjoje bandymo stadijoje. Naudojant pasvirusias fibras atsiranda papildomi slinktį lydintys procesai: fibros lenkimas plyšio (ar bandomojo kubelio) paviršiaus atžvilgiu ir betono kontakto zonos su fibra glemžimas.

Kai fibra įbetonuota kapu φ ištraukimo jėgos veikimo atžvilgiu, fibros ašinė jėga N gali būti išskaidyta į dvi dedamąsias: $N_x = N \times \cos \varphi$ ir $N_y = N \times \sin \varphi$, kaip parodyta 4.7 pav. Iš šių dedamųjų tik N_x veikia kaip ištraukimo jėga, sukelti fibros



4.7 pav. Jėgos, veikiančios pasvirusią fibrą plyšyje

slinktį. Tyrimais nustatyta, kad, fibros posvyrio kampui esant $\varphi \leq 45^\circ$, dažniausiai gaunama didesnė ištraukimo jėgos reikšmė. Šis reiškinytis siejamas su dedamosios N_y poveikiu, sukeliančiu fibros lenkimą ir papildomas įtempių koncentracijas ties plyšio plokštuma (4.7 pav.). Dedamąją N_y galima traktuoti kaip skersinę jėgą gembinėje sijoje, dėl kurios fibroje susidaro lenkiamasis momentas. Nedideliame tūryje ties plyšio plokštuma dėl šios jėgos poveikio betonas yra glemžiamas ir pažeidžiamas. Dėl glemžiamojo irimo padidėja fibros slinktis jau pradinėje apkrovos stadijoje (lyginant su tiesia fibra, kurioje pradinėje apkrovos stadijoje pasireiškia tik tampriosios deformacijos). Norint padidinti betono atsparumą lokaliajam glemžimui, gali būti naudojami stipresni ir tankesni betonai.

Dar vienas efektas, kurį sukelia skersine kryptimi veikianti dedamoji N_y , yra trinties jėgos padidėjimas. Prisiminkime, kad fizikoje trinties jėga apibūdinama kaip jėga, kuri priešinasi dviejų kietųjų kūnų santykiniam poslinkiui ir yra apskaičiuojama taip:

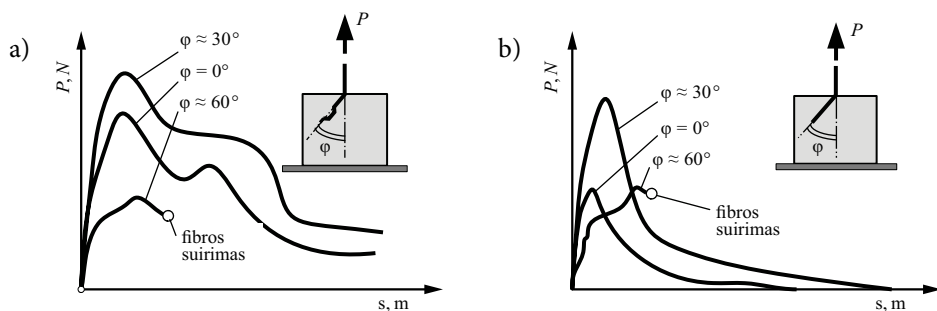
$$F_{tr} = F_n \cdot \mu,$$

čia F_{tr} – trinties jėga, veikianti lygiagrečiai su kūnų paviršiumi; F_n – normalinė jėga, veikianti statmenai; μ – trinties koeficientas.

Trinties jėga skirstoma į statinę ir kinematinę trintį (atitinkamai tarp nejudančių ir judančių paviršių). 4.7 pav. parodyta atraminė reakcija betone R , susidaranti dėl jėgos N_y poveikio. Reakcija R šiuo atveju yra statmenai veikianti normalinė jėga, dėl kurios poveikio padidėja trintis tarp fibros ir betono. Ši papildoma dėl fibrų posvyrio atsirandanti trinties jėga pasireiškia esant didesnėms slinkties reikšmėms dėl kinematinės trinties poveikio.

Atliekant pasvirusių fibrų ištraukimo bandymus, kampas tarp fibros ašies ir jėgos veikimo krypties paprastai yra $0 \leq \varphi \leq 60$. Tipinės gaunamos apkrovos ir slinkties diagramos iš kubelio traukiant lenktas ir tiesias fibras parodytos 4.8 pav., a ir b.

Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad fibros posvyrio kampui φ didėjant nuo 0 iki 30° , gaunama vis didesnė ištraukimo jėgos reikšmė. Kaip matyti iš 4.8 pav., šis



4.8 pav. Pasvirusios fibros apkrovos ir slinkties diagramos: a – su užlenktais galais; b – tiesios

efektas yra pastebimesnis traukiant tiesias fibras. Tai galima paaiškinti keliais fibros ir betono kontakto zonoje vykstančiais procesais. Kai tiesi fibra iš betono kubelio traukiama nedideliu kampu, pasviręs fibros galas veikia kaip mechaninis inkaras (panašiai kaip traukiant nepasvirusias lenktas fibras). Lenktose fibrose ištraukimo jėgos padidėjimas mažiau pastebimas. Kai posvyrio kampas nėra didelis ($\varphi \leq 30^\circ$), efektyviai pradeda veikti papildomos trinties jėgos (4.7 pav.), ypač esant didesnėms slinkties reikšmėms. Šie du efektai lemia tai, kad fibrų užlenktais galais didžiausia ištraukimo jėga gali padidėti nuo 20 iki 40 % ir tiesių fibrų – net iki 120 % (lyginant su atveju, kai $\varphi = 0^\circ$).

Ištraukimo kampui didėjant nuo 30° iki 60° , gaunama mažesnė didžiausia ištraukimo jėga ir daug didesnės slinkties reikšmės jau ankstyvose apkrovos stadijose. Jėgos sumažėjimas paaiškinamas tuo, kad ties betono briauna susidaro didelis lenkiamasis momentas ir plastinis lankstas, dėl to dažniausiai fibra suyra anksčiau, nei yra ištraukiama. Slinkties padidėjimas ankstyvose apkrovos stadijose susijęs su betono glemžimu ir ardymu ties briauna.

Traukiant fibras iš betono dideliu kampu ($45^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$), gaunamos panašios tiek tiesių, tiek fibrų lenktais galais apkrovos ir poslinkio diagramos. Tokiu atveju lenktas galas visiškai neištiesina, o fibra nutrūksta, susidarius įtempių koncentracijai ties kubelio briauna.

Kaip matome iš 4.7 pav. pateiktos schemos, dėl fibros posvyrio kampo susidaro papildomi sąveikos efektai: fibros lenkimas, betono glemžimas ties plyšio briauna ir papildomos trinties jėgos. Šių jėgų bendrą poveikį atspindi ir eksperimentiniai pasvirusių fibrų ištraukimo bandymai: kontroliuojant fibrų posvyrio kampą jėgos veikimo atžvilgiu, gaunamos specifinės apkrovos ir slinkties diagramos (4.8 pav.). Tiesioms fibroms posvyrio kampas turi teigiamą poveikį, nes labai pagerėja fibros inkaravimas betone. Dėl didelių posvyrio kampų atsirandantis betono glemžimas ir ardymas efektyviausiai gali būti kontroliuojamas parenkant atitinkamą betono sudėtį.

Apibendrinant pažymėtina, kad traukiant iš betono pasvirusias fibras, kaip ir tiesias, pirmiausia pradeda veikti cheminis sukibimas ir trinties jėgos. Kita vertus, pasvirusių fibrų atveju susidaro keli papildomi efektai: lokalus betono glemžimas ties plyšio (arba kubelio) paviršiumi, fibros lenkimas ir padidėjusi trinties dedamoji.

4.5.4. Inkaravimo ilgio įtaka

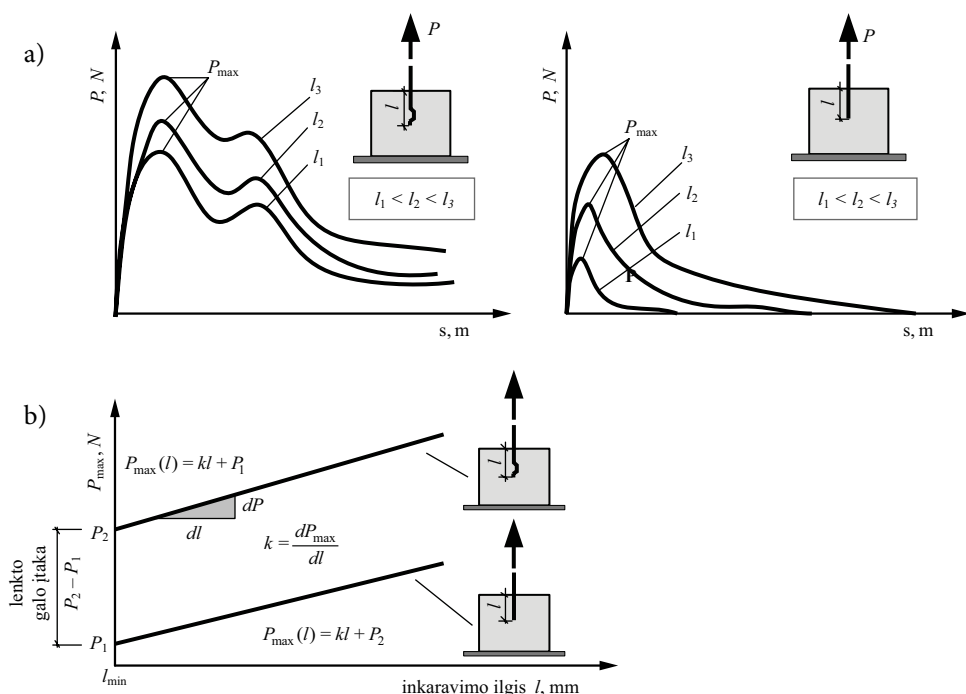
Kitas svarbus parametras, apibūdinantis fibrų elgseną plyšyje, yra jų inkaravimo ilgis betone. Iš bendrų mechanikos dėsnių galima numatyti, kad, esant didesniam inkaravimo ilgiui, didesnė bus ištraukimo jėga. Šis paprastas dėsnis labai gerai tinka tiesių fibrų apkrovos ir slinkties diagramoms aprašyti, nes, didėjant inkaravimo ilgiui, didėja betono ir fibros sąlyčio plotas, o tai lemia didesnę ištraukimo jėgą. Žinoma, ištraukimo jėga didės tol, kol fibros inkaravimo ilgis pasieks ribinę reikšmę $l_{b,lim}$ (žr. 4.4 formulę), kuriam esant fibra jau yra ne ištraukiama iš betono, o nutrūksta.

Be to, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad esant tam tikro ilgio l fibroms, maksimalus jų inkaravimo ilgis sudarys $l_{b,\max} = l / 2$ (nes fibra inkaruojasi dviuose plyšio plokštumose).

4.9 pav. parodytos tiesių ir lenktų fibrų ištraukimo jėgos ir slinkties priklausomybės. Tiesiose fibrose didžiausia ištraukimo jėga proporcingai auga didėjant inkaravimo ilgiui l . Lenktose fibrose šis efektas taip pat egzistuoja, skiriasi tik jo santykinė įtaka maksimaliai ištraukimo jėgai. Tiesių fibrų maksimalios ištraukimo jėgos $P_{\max}$ priklausomybę nuo inkaravimo ilgio l galima aprašyti tiesės lygtimi:

$$P_{\max}(l) = k_1 \cdot l + P_1,$$

čia k_1 – koeficientas, apibūdinantis tiesės posvyrio kampą; P_1 – ištraukimo jėgos reikšmė, esant tam tikram minimaliam inkaravimo ilgiui.



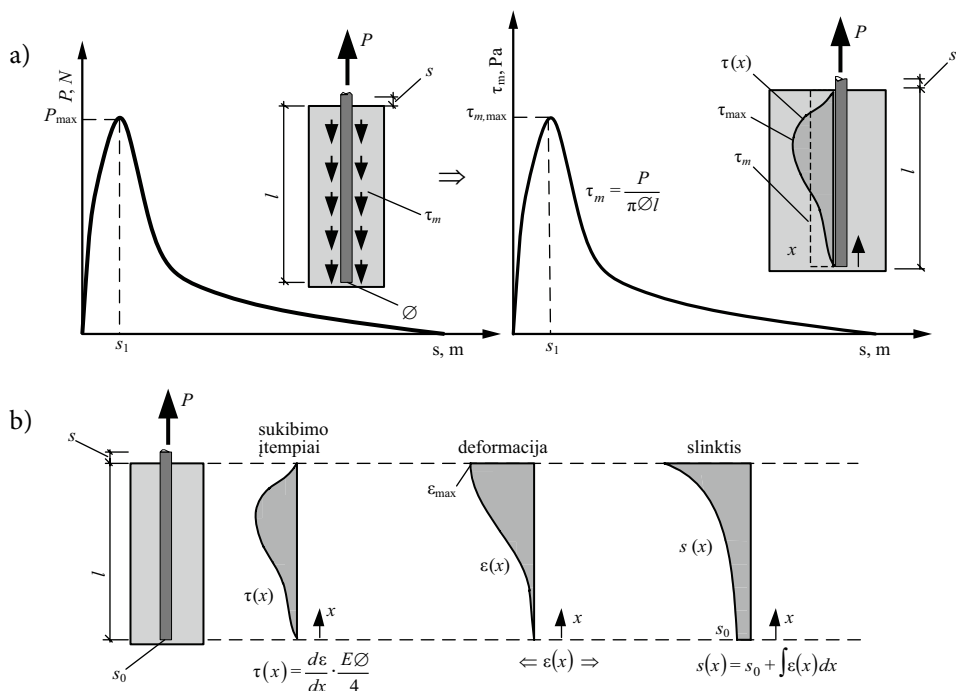
4.9 pav. Inkavavimo ilgio įtaka tiesioms ir lenktoms fibroms

Tiesės lygtį galima pritaikyti ir fibroms užlenktais galais – šiuo atveju padidėja pradinė ištraukimo jėgos reikšmė P_2 (4.9 pav., b). Skirtumas tarp pradinių maksimalių ištraukimo jėgų ($P_2 - P_1$) išlieka maždaug pastovus didinant inkaravimo ilgį l ir gali būti traktuojamas kaip užlenkto galo įtaka. Šiuo atveju svarbu, kad minimalus inkaravimo ilgis $l_{\min}$ būtų didesnis už lenkto fibros galo ilgį.

4.5.5. Sukibimo įtempių pasiskirstymas

4.3 poskyryje buvo parodyta, kad egzistuoja tam tikras ribinis fibros inkaravimo ilgis $l_{b,lim}$. Kai inkaravimo ilgis $l_b < l_{b,lim}$, fibra ištraukiama iš betono, kai $l_b \geq l_{b,lim}$, fibra nutrūksta. Čia galima padaryti svarbią išvadą, kad inkaravimo ilgio įtakos tyrimas turi prasmę tik tada, kai $l_b < l_{b,lim}$, kitu atveju didinant inkaravimo ilgį, didžiausiai ištraukimo jėga nebedidėja ir yra lygi fibros stipriui. Kritinis inkaravimo ilgis (4.4 formulė) priklauso nuo fibros takumo įtempių f_y , skersmens d_{fb} ir vidutinių sukibimo įtempių τ_m . Pirmieji du veiksniai yra aiškiai apibrėžti, o vidutiniai sukibimo įtempiai yra daug sudėtingesnis dydis.

Kaip parodyta 4.10 pav., a, tangentinį įtempių pasiskirstymą $\tau(x)$ fibroje yra aiškaus netiesinio pobūdžio. 4.1 poskyryje buvo parodyta, kad kontaktiniai sukibimo įtempiai susidaro tuomet, kai fibra praslysta betone, o ši reiškinį vadinome slinktimi. Slinktis fibroje taip pat pasiskirsto netiesiškai – didžiausia reikšmė pasiekama ties apkrautuoju fibros galu, o mažiausia – ties laisvuoju (4.10 pav., b). Tiksliai įvertinti slinkties ir sukibimo įtempių pasiskirstymą fibroje praktiškai yra labai sudėtinga, todėl dažnai sudaromos daug paprastesnės vidutinių sukibimo įtempių ir apkrauto galo slinkties diagramos $\tau_m - s$.



4.10 pav. Fibros sukibimo įtempių pasiskirstymas (a), ryšys tarp sukibimo įtempių, deformacijų ir slinkties (b)

Vidutinių sukibimo įtempių priklausomybė nuo slinkties dydžio aiškiai matoma panagrinėjus fibros ištraukimo iš betono apkrovos ir slinkties diagramą: apkrovos reikšmę padaliję iš fibros paviršiaus ploto gauname vidutinius sukibimo įtempius (4.10 pav., a):

$$\tau_m = \frac{P}{\pi d_{fb} l}, \quad (4.7)$$

čia P – fibrą veikianti jėga; d_{fb} – fibros skersmuo; l – fibros inkaravimo ilgis.

Kadangi apkrova P dalijama iš pastovios sandaugos $\pi D l$, gaunama lygiai tokios pačios formos kreivė, tačiau šiuo atveju ji išreiškia vidutinių tangentinių įtempių – slinkties priklausomybę. Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad tikrasis sukibimo įtempių pasiskirstymas $\tau(x)$ lieka nežinomas.

Kuo didesnė fibros slinktis, tuo didesni sukibimo įtempiai – šis dėsnis galioja tol, kol pasiekiami tam tikri maksimalūs vidutiniai sukibimo įtempiai $\tau_{m,max}$, esant slinkčiai s_1 (4.10 pav., a). Vėliau sukibimo įtempiai pradeda mažėti dėl sąlyčio zonos pleišėjimo ir pažeidimo.

Fibros deformacija ε , sukibimo įtempiai τ ir slinktis s yra tarpusavyje vienareikšmiškai susiję. 4.3 poskyryje buvo parodyta, kad sukibimo įtempius su deformacija sieja diferencialinis ryšys: $\tau = d\varepsilon / dx \cdot ED / 4$ (žr. 4.1–4.3 formules). Iš konstrukcinių elementų mechanikos kurso prisiminkime, kad poslinkis apskaičiuojamas integruojant deformacijų pasiskirstymą tam tikrame elemento ilgyje:

$$\varepsilon = \frac{\Delta(dx)}{dx} \Rightarrow \Delta = \int \varepsilon(x) dx. \quad (4.8)$$

Traukiant plieno fibrą iš betono, slinktį galima nustatyti pagal tampriąsias fibros deformacijas ir laisvojo galo poslinkį. Betono deformacijos gali būti ignoruojamos, nes jos yra keliomis eilėmis mažesnis dydis. Padarę tokias prielaidas, galime užrašyti analitinę fibros slinkties išraišką:

$$s(x) = s_0 + \int \varepsilon(x) dx, \quad (4.9)$$

čia s_0 – fibros laisvojo galo slinktis.

Gautos (4.3) ir (4.9) formulės rodo vienareikšmį ryšį tarp trijų fibros ir betono sąveiką apibūdinančių dydžių: slinkties, sukibimo įtempių ir deformacijų. Nustačius bent vieno iš šių dydžių pasiskirstymą, likę du gali būti nesunkiai apskaičiuoti, kaip schemiškai parodyta 4.10 pav., b.

Dar kartą panagrinėkime sukibimo įtempių, deformacijų ir slinkties pasiskirstymą fibroje (4.10 pav., b). Ties laisvuuoju fibros galu deformacija lygi nuliui, atitinkamai nepasireiškia ir sukibimo įtempiai. Tolstant nuo laisvojo galo, deformacijos palaipsniui didėja, kol pasiekia maksimalią reikšmę:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{P}{E_{fb} A_{fb}}, \quad (4.10)$$

čia E_{fb} ir A_{fb} – fibros tamprumo modulis ir skerspjūvio plotas.

Sukibimo įtempiai maksimalią reikšmę pasiekia tam tikru nedideliu atstumu nuo apkrautojo galo. Ties apkrautuoju galu sukibimo reikšmė yra lygi nuliui, nes betonas ir fibra neturi kontakto. Nedideliu atstumu nuo apkrauto fibros galo suardomas betonas, todėl susidaro tik nedideli sukibimo įtempiai, kurie palaipsniui pasiekia maksimalią reikšmę. Slinkties reikšmė palaipsniui didėja nuo laisvojo fibros galo ir pasiekia maksimalią reikšmę ties apkrautuoju galu.

Iš šių trijų aptartų dydžių (slinkties, sukibimo įtempių ir deformacijos) tik deformacijų reikšmę įmanoma eksperimentiškai išmatuoti. Matavimai paprastai atliekami ne trumpose fibrose, o armatūros strypuose. Gavus deformacijų pasiskirstymą armatūroje, likę du dydžiai gali būti nesunkiai apskaičiuoti. Fibrose deformacijų pasiskirstymas yra artimas armatūros strypams dėl unikalaus sukibimo įtempių, deformacijų ir slinkties ryšio.

Pažymėtina, kad atliekant ištraukimo bandymus dažnai fiksuojama tik didžiausia fibros ištraukimo jėga. Šią jėgą padalijus iš fibros paviršiaus ploto, gaunami vidutiniai sukibimo įtempiai τ_m . Tokiu atveju tikrasis sukibimo įtempių pasiskirstymas $\tau(x)$ lieka nežinomas. Praktiniams tikslams svarbi maksimalių vidutinių sukibimo įtempių reikšmė, nes iš jos galima spręsti apie kritinį fibros inkaravimo ilgį $l_{b,crit}$, kartu ir apie bendrą fibros ir betono sąveiką.

4.5.6. Fibrų formos įtaka

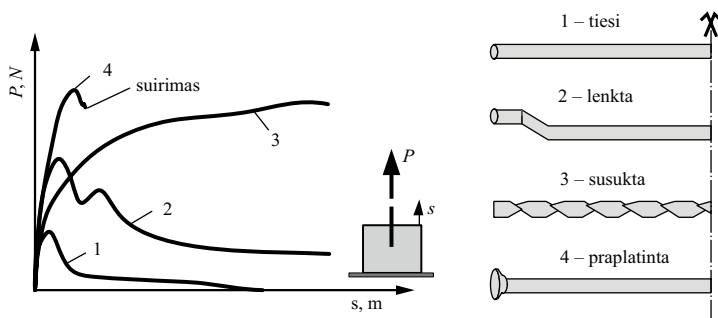
Plienines fibras gaminančios įmonės siūlo įvairių rūšių fibrų, besiskiriančių dydžiu, forma ir medžiagos savybėmis. Dėl skirtingų medžiagų savybių ir gamybos technologijos mechaninės fibrų savybės, iš kurių svarbiausios yra tempiamasis stipris f_y ir kritinis inkaravimo ilgis $l_{b,crit}$, stipriai skiriasi. Šie skirtumai turi didelę įtaką fibrų ištraukimo mechanikai ir bendrai visos konstrukcijos elgsenai.

Ankstesniuose skyriuose buvo parodyta, kad tiesių fibrų ištraukimui priešinasi cheminis sukibimas, vėliau aktyvios tampa ir trinties jėgos. Kai tiesios fibros traukiamos tam tikru kampu, pasireiškia papildomi mechaniniai procesai: fibros lenkimas ir šlytis, padidėja trinties jėgos, glemžiamas ir pažeidžiamas betonas. Abiem atvejais gaunamas palyginti nedidelis fibros ištraukimo darbas (apkrovos ir slinkties diagramos plotas). Ši trūkumą galima spręsti dviem būdais: stiprinti cheminį sukibimo komponentą, parenkant betono mišinį, arba mechaniškai deformuoti fibras. Iš ilgametės fibrų gamybos ir bandymų praktikos mechaninis deformavimas pripažintas kaip efektyviausias būdas gerinant fibrų inkaravimą betone. Šiuo požiūriu plieninės fibros turi didelį pranašumą, lyginant su kitų medžiagų fibromis (pavyzdžiui, stiklo ar anglies pluošto), nes plienas yra lengvai mechaniškai paveikiamas: užlenkiami galai, skerspjuvis susukamas, suformuojami rumbeliai, padaromos negilios įspaudos.

Mičigano universiteto profesorius A. E. Naamanas (2003) pristatė naujos kartos, ypač efektyviai su betonu sąveikaujančias plienines fibras. Šios fibros gaminamos iš didelio stiprio, kvadratinio arba trikampio skerspjuvio plieninės vielos

($f_y \approx 2000$ MPa), o inkaravimosi savybėms pagerinti jos susukamos apie išilginę ašį. Fibroms suteiktas „Torex“ prekės ženklas. Pagal atliktus eksperimentinius tyrimus šių fibrų naudojimas betoninėse ir gelžbetoninėse konstrukcijose yra ypač efektyvus ir ekonomiškas. Ateityje „Torex“ fibros gali būti naudojamos daug plačiau dėl akivaizdžių mechaninių pranašumų, lyginant su kitomis plieninių fibrų rūšimis. Pagrindinis jų trūkumas – sudėtingesnė gamybos technologija, atitinkamai ir didesnė kaina.

4.11 pav. schemiškai palyginti skirtingos formos plieninių fibrų ištraukimo jėgos – slinkties grafikai. Pirmoji ir antroji kreivės atitinka tiesias fibras ir fibras užlenktais galais – jos šiuo metu yra labiausiai paplitusios ir buvo aptartos ankstesniuose skyriuose. Kaip matome iš pateikto grafiko, mechaninis galų užlenkimas gerokai padidina ištraukimo jėgą, ypač didesnės slinkties stadijose, kartu padidėja ir ištraukimo metu atliekamas darbas. Labai geras inkaravimosi betone savybes turi fibros praplatintais galais (4 kreivė) – jos pasiekia didžiausias ištraukimo jėgos reikšmes, tačiau ištraukiant atliekamas darbas nėra didelis dėl staigaus fibrų suirimo. Susuktų „Torex“ tipo fibrų pagrindinis pranašumas tas, kad, didėjant slinkties reikšmėms, didėja ir ištraukimo jėga. Šis reiškinys daugiausia susijęs su tuo, kad ištraukimo metu susuktos fibros elgiasi panašiai kaip medsraigis – reikalinga papildoma energija fibrai atsukti. Be to, dėl kampuoto skerspjūvio padidėja fibros paviršiaus plotas (kai skerspjūvis kvadratinis – apie 12 %, kai trikampis – apie 28 %, lyginant su apvaliu), kartu pagerėja ir cheminė bei trinties sukibimo dedamosios. Šios dvi priežastys lemia kelis kartus didesnę fibrai ištraukti reikalingą energijos kiekį, kartu ir puikias jomis armuotų konstrukcijų eksploatacines savybes. Remiantis A. E. Naamano atliktais tyrimais, naudojant „Torex“ tipo plienines fibras, tą patį konstrukcijos elgsenos rezultatą galima pasiekti su perpus mažesniu fibrų kiekiu, lyginant su fibromis lenktais galais.



4.11 pav. Skirtingos formos fibrų ištraukimo jėgos ir slinkties grafikų palyginimas

4.6. Skyriaus apibendrinimas

Plieno plaušu armuotų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų elgsena priklauso nuo fibrų tipo, kiekio ir jų sąveikos su betonu. Plieninių fibrų paskirtis – suvaržyti konstrukcijoje atsiveriančius plyšius, konstrukcijos deformavimosi bei irimo procesus padaryti plastiškesnius, o atskirais atvejais ir visiškai pakeisti strypinę armatūrą. Praėjusiame skirsnyje buvo parodyta, kad, atsižvelgiant į fibrų tipą, konstrukcijos elgsena gali stipriai skirtis net ir esant tam pačiam fibrų skaičiui.

Norint padidinti plieno plaušu armuotų konstrukcijų efektyvumą, atliekami įvairius lygmenis apimančios eksperimentiniai tyrimai:

Mikrolygmeniu tirinama plieno ir betono sąveika, apimanti labai nedidelę – nuo 20 iki 100 μm – skersmens zoną. Šis kontaktinis tūris vadinamas *sąlyčio zona* (angl. *interfacial transition zone*) ir turi tiesioginę įtaką plieno plaušu armuotų konstrukcijų elgsenai, nes per ją vyksta cheminis fibros ir betono ryšio suirimas. Mikrolygmens tyrimai padeda nustatyti reikiamus betono sudėties parametrus.

Mezolygmuo apima vienos fibros sąveikos su betonu tyrimus. Šis lygmuo yra tinkamiausias optimizuojant fibrų formą ir mechanines savybes. Svarbiausias nagrinėjamas parametras mezolygmeniu yra fibros apkrovos ir slinkties priklausomybė. Tokiai priklausomybei keliami du pagrindiniai reikalavimai. Pirma, siekiama, kad fibra kuo geriau užsiinkaruotų betone ir atlaikytų maksimalias ištraukimo jėgas. Antra, norima gauti kuo didesnę mechaninį darbą, reikalingą fibrai ištraukti. Šis dydis išreiškiamas kaip apkrovos ir slinkties sandaugų suma (žr. 4.6 formulę). Kuo didesnė gaunama mechaninio darbo reikšmė, tuo didesnis energijos kiekis yra išsklaidomas traukiant fibrą. Tai reiškia, kad ir visos konstrukcijos suirtis nebus staigi ir ją galima bus saugiai eksploatuoti.

Makrolygmuo apima viso konstrukcinio elemento bandymus. Iš šių tyrimų rezultatų sunku spręsti apie fibrų ir betono tarpusavio sąveiką, tačiau gaunama informacija apie visos konstrukcijos elgseną, atsižvelgiant į betono ir fibrų sudėtį.

Knygos ketvirtajame skyriuje plačiausiai nagrinėtas mezolygmuo. Šiuo lygmeniu galima gauti daugiausia informacijos apie veiksnius, turinčius įtakos fibros ir betono sąveikai. Vienas svarbiausiųjų veiksnių, lemiančių plieno plaušu armuotų konstrukcijų efektyvumą, yra fibros betonui (ir atvirkščiai) perduodamų sukibimo įtempių dydis. Išskirti trys principiniai įtempių perdavimo mechanizmai: cheminis sukibimas (adhezija), mechaninis inkaravimas ir trintis. Tiesiose fibrose sukibimo įtempiai, perduodami per cheminį ryšį, o jam suirus – trintimi. Ypač efektyvi yra mechaninio inkaravimo dedamoji, atsirandanti fibrą iš anksto deformavus: užlenkus galus, padarius įspaudas, susukus skerspjūvį ar kitaip paveikus. Tarp mechanškai deformuotų fibrų populiariausios praktikoje yra fibros užlenktais galais – jų gamybos technologija yra gana nesudėtinga, o užlenktas galas labai pagerina inkaravimosi kokybę.

Plieno plaušu armuotame betone fibros netaisyklingai pasiskirsto po visą tūrį. Konstrukcijoje atsiveriant plyšiui, kiekviena fibra turės skirtingą inkaravimo ilgį ir posūkio kampą. Atliekant ištraukimo bandymus, stengiamasi modeliuoti šią situaciją – fibros iš kubelio traukiamos skirtingais kampais ir kintamu inkaravimo ilgiu. Kai iš betono traukiama pasvirusi fibra (paprastai posvyrio kampas yra $0 \leq \varphi \leq 60^\circ$), papildomai pradeda veikti kiti mechaniniai procesai: fibros lenkimas, betono glemžimas ties kubelio (arba plyšio) briauna, taip pat atsiranda papildoma skersinė jėga, dėl kurios padidėja trintis tarp fibros ir betono. Dėl bendro šių veiksmų poveikio ištraukimo jėga iš pradžių didėja (kai $0 \leq \varphi \leq 30^\circ$), vėliau pradeda mažėti (kai $30 \leq \varphi \leq 60^\circ$), lyginant su tiesios fibros ištraukimu.

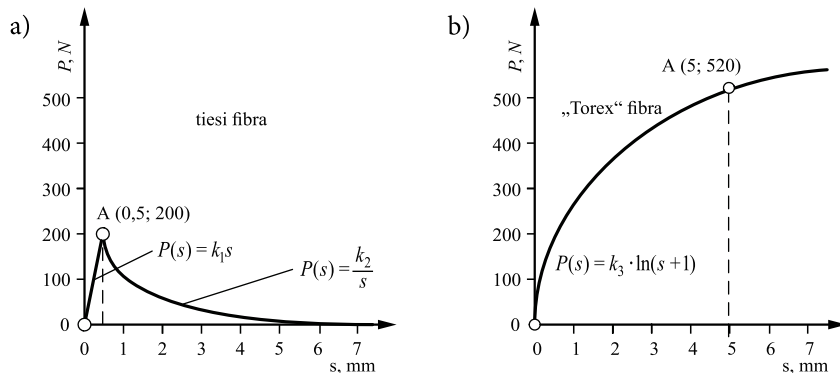
Tiriant inkaravimo ilgio įtaką, išskiriami du galimi atvejai: kai inkaravimo ilgis yra mažesnis už ribinį ($l_b < l_{b,\text{lim}}$), fibra ištraukiama iš betono, kai $l_b \geq l_{b,\text{lim}}$ – fibra nutrūksta. Ribinis inkaravimo ilgis $l_{b,\text{lim}}$ priklauso nuo fibros takumo įtempių f_y , skersmens d_{fb} ir vidutinių sukibimo įtempių τ_m . Pastarieji fibros ilgyje pasiskirsto netolygiai, tačiau tikslų sukibimo įtempių pasiskirstymą net ir eksperimentiškai nustatyti sudėtinga. Dažniausiai iš eksperimentinių bandymų nustatomi tam tikri vidutiniai maksimalūs sukibimo įtempiai $\tau_{m,\text{max}}$, iš kurių sprendžiama apie ribinį inkaravimo ilgį. Ribinio inkaravimo ilgio duomenys naudojami parenkant fibros ilgio ir skersmens santykį.

Kontroliniai klausimai

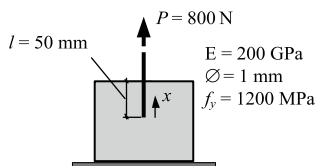
1. Kaip įtempiai iš fibros perduodami betonui?
2. Kokiu tikslu fibros mechaniškai deformuojamos?
3. Ką reiškia kritinis fibros inkaravimo ilgis? Kaip jis nustatomas?
4. Kokiu tikslu atliekami fibrų ištraukimo bandymai?
5. Kas yra slinktis?
6. Kokia yra fizikinė mechaninio darbo prasmė? Kaip apskaičiuojamas mechaninis darbas fibrą ištraukiant iš betono?
7. Kuo skiriasi tiesių fibrų ir fibrų lenktais galais ištraukimas iš betono?
8. Kuo ypatingas pasvirusių fibrų ištraukimas?
9. Koks unikalus ryšys sieja deformacijų, slinkties ir sukibimo įtempių pasiskirstymą fibroje?
10. Kodėl siekiama maksimizuoti apkrovos ir slinkties grafiko plotą atliekant ištraukimo bandymus? Kaip šis plotas siejasi su visos konstrukcijos eksploatacija?

Uždaviniai

1. Iš kubelio ištrauktos tiesi ir „Torex“ tipo fibros. Gauti rezultatai aproksimuoti funkcijomis, parodytomis schemoje a ir b.



- 1.1. Parinkite funkcijoms koeficientus k_1, k_2, k_3 , kad jos kirstų charakteringą tašką A.
 1.2. Koks darbas atliekamas kylančiose diagramos dalyse tiesiai ir „Torex“ fibroms (kai slinktis abiem atvejais kinta intervale $0 \leq s \leq 0,5 \text{ mm}$)?
 1.3. Kiek kartų didesnis darbas atliekamas traukiant „Torex“ tipo fibrą, lyginant su tiesia, kai slinkties reikšmė yra iki 7 mm?
 2. Iš kubelio 800 N jėga traukiama tiesi, apskritojo skerspjūvio fibra, kaip parodyta schemoje.



- 2.1. Apskaičiuokite fibros nutraukimo jėgą $P_{\max}$, kai plieno tempiamasis stipris $f_y = 1200 \text{ MPa}$.
 2.2. Apskaičiuokite vidutinius sukibimo įtempius τ_m .
 2.3. Padarę prielaidą, kad sukibimo įtempiai per visą fibros ilgį pasiskirstę tolygiai ir yra lygūs τ_m , gaukite analitines deformacijų $\varepsilon(x)$ ir slinkties $s(x)$ funkcijų priklausomybes.
 2.4. Apskaičiuokite apkrauto fibros galo deformaciją ir slinktį ($x = 50 \text{ mm}$).

Atsakymai

- 1.1. $k_1 = 400; k_2 = 100; k_3 = 290,2$.
 1.2. Tiesiai fibrai $W = 50 \text{ mJ}$, „Torex“ fibrai $W = 31,4 \text{ mJ}$.
 1.3. 8,9 karto.

2.1. $P_{\max} = 942 \text{ N}$.

2.2. $\tau_m = 5,096 \text{ MPa}$.

2.3. $\varepsilon(x) = 4/ED \cdot 5,096 \cdot 10^6 x$ (čia x [m]). $s(x) = 4/ED \cdot 2,548 \cdot 10^6 x^2$.

2.4. $\varepsilon = 5,096 \cdot 10^{-3}$; $s = 0,127 \text{ mm}$.

Rekomenduojamoji literatūra

- Chan, Y. W.; Li, V.C. 1997. Effects of transition zone densification on fiber/cement paste bond strength improvement, *Advanced Cement Based Materials* 5(1): 8–17.
- Cunha, V. M. C. F.; Barros, J. A. O.; Sena-Cruz, J. M. 2007. *Pullout Behaviour of Hooked-end Steels Fibers in Self-Compacting Concrete*: Report 07-DEC/E06. 90 p.
- Lin, Z.; Kanda, T.; Li, V.C. 1999. On interface property characterization and performance of fiber-reinforced cementitious composites, *Concrete Science and Engineering* 1: 173–185.
- Naaman, A.E. 2003. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites, *Journal of Advanced Concrete Technology* 3: 241–252.

5. PLIENO PLAUSŲ ARMUOTŲ KONSTRUKCIJŲ LAIKOMOSIOS GALIOS IR PLEIŠĖJIMO ANALIZĖ

5.1. Įžanga

Gelžbetoninės konstrukcijos projektuojamos, statomos ir eksploatuojamos jau antrą šimtmetį. Per tą laiką sukaupta patirtis buvo pritaikyta rengiant įvairius gelžbetoninių konstrukcijų projektavimą reglamentuojančius dokumentus. Plieno plaušas betoninėms ir gelžbetoninėms konstrukcijoms armuoti plačiai naudojamas tik kelis dešimtmečius, todėl sukaupta nepalyginti mažesnė praktinė tokių konstrukcijų eksploatacijos patirtis. Europoje iki šiol nėra dispersiškai armuotų betoninių konstrukcijų projektavimą reglamentuojančių nuostatų. Pagrindiniai sunkumai, su kuriais susiduria projektavimo normų kūrėjai, yra didelė dispersinės armatūros įvairovė ir sudėtinga dispersiškai armuotų konstrukcijų elgsena.

Plyšio pločio apribojimas – viena pagrindinių sąlygų, užtikrinančių saugos ribinį būvį. Didelis plyšių plotis neleistinas ne tik estetiniu požiūriu, bet ir todėl, kad tai gali sukelti ilgalaikių neigiamų pasekmių ar net konstrukcijos suirtį. Agresyvosios aplinkos veikiamų konstrukcijų ilgaamžiškumą gali padidinti papildomas jų armavimas plieno plaušu. Todėl reikalingi adekvatūs plyšio pločio skaičiavimo metodai, leidžiantys projektuoti optimalias statybines konstrukcijas.

Šiuo metu pasaulyje nėra universalaus metodo, taikomo plyšių pločiui apskaičiuoti dispersiškai armuotuose elementuose. Literatūroje galima rasti pusiau empirinių plyšio pločio skaičiavimo metodų, tačiau dėl didelio parametrų, lemiančių plyšių susidarymą skaičiaus, jų pritaikymas ribojamas.

Šiame knygos skyriuje daug dėmesio skiriama fizikinei plieno plaušu armuotų konstrukcijų elgsenai aprašyti, bet ne konkretiems projektavimo nurodymams. Pateikiamas empirinis plyšio pločio skaičiavimo metodas, pritaikytas dispersiškai armuotų elementų analizei, ir trys alternatyvūs plieno plaušu armuotų elementų laikomosios galios ir pleišėjimo skaičiavimo metodai: supaprastintas, sluoksnių ir diskretaus pleišėjimo. Kiekvienas iš šių metodų turi savo taikymo sritį, atsižvelgiant į norimą apskaičiuoti konstrukcijos parametą. Supaprastintas metodas gerai tinka plieno plaušu armuotų konstrukcijų stiprumui įvertinti, juo taip pat apytikriai galima įvertinti ir elemento įlinkius. Sluoksnių metodas tinka plieno plaušu armuotų konstrukcijų tiksliai deformacijų (įlinkių) analizei. Sluoksnių metodo trūkumas tas, kad jis neatskleidžia elemento pleišėjimo pobūdžio (atstumo tarp plyšių, plyšių plo-

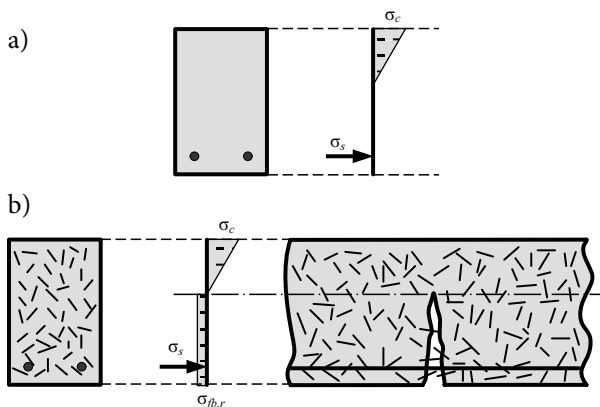
čio). Tokiais atvejais gali būti taikomas diskretaus pleišėjimo modelis. Konkretaus skaičiavimo metodo pasirinkimas priklauso nuo projektuojamos konstrukcijos tipo ir tikrinamo parametro (stiprumo, įlinkio, plyšio pločio).

Šiuo metu statybinių konstrukcijų analizei dažniausiai naudojamos kompiuterinės baigtinių elementų programos, kuriomis galima įvertinti netiesines medžiagų savybes, sudėtingą konstrukcijos geometriją ar apkrovimo schemą. Pažymėtina, kad kompiuterinės analizės metu gaunamų rezultatų tikslumas priklauso nuo skaičiuoti naudojamų medžiagų modelių. Netinkamai aprašius medžiagų elgseną, kompiuterinės analizės rezultatai gali būti mažiau tikslūs nei gauti supaprastintais metodais. Taikant sluoksnių metodą bus parodyta, kaip iš eksperimentinių duomenų, sprendžiant plieno plaušu armuoto betono deformavimo atvirkštinį uždavinį, galima gauti supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas, tinkamas taikyti baigtinių elementų programose.

5.2. Empirinis pleišėjimo nustatymo būdas

Plieno plaušu armuotuose gelžbetoniniuose elementuose plyšio plotis priklauso nuo daugelio parametrų, tokių kaip betono stipris, plieno plaušo kiekis ir forma, strypinės armatūros skersmuo, jos išdėstymas elemento skerspjūvyje ir pan. Šiuo metu plieno plaušo forma ir jo gamybos procesas nėra standartizuoti, o tai apsunkina universalus metodo, taikomo plyšio pločiui apskaičiuoti, sukūrimą. Pasaulyje sukurta nemažai skirtingų, pusiau empirinių plyšio pločio skaičiavimo metodų, tačiau jie tinkami tik tam tikroms plieno plaušo rūšims. Projektuojant statybines konstrukcijas būtina mokėti tiksliai įvertinti plieno plaušo įtaką pleišėjimui.

Betoną armuojant strypine armatūra, atsiradus plyšių, tempimo įtempius plyšyje perima armatūra (5.1 pav., a), o dispersiškai armuotame gelžbetoniniame elemente dalį įtempių perima plieno plaušas (5.1 pav., b).



5.1 pav. Įtempių pasiskirstymas supleišėjusiame elemente: a – gelžbetoniniame elemente; b – plieno plaušu armuotame gelžbetoniniame elemente

5.2.1. Europos normų metodo taikymas dispersiškai armuotų konstrukcijų plyšių pločiui skaičiuoti

Europos normose plyšio plotis apskaičiuojamas pagal tokią išraišką:

$$w = l_{cr,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (5.1)$$

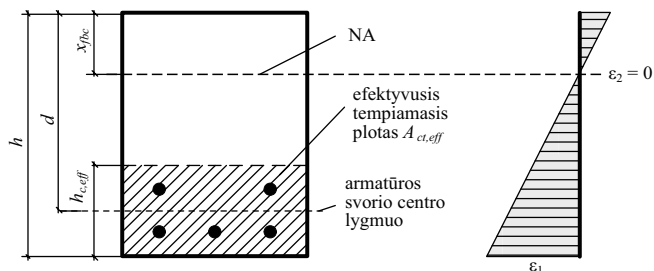
čia $l_{cr,max}$ – didžiausias atstumas tarp plyšių; ε_{sm} – vidutinės tempiamosios armatūros deformacijos; ε_{cm} – vidutinė betono deformacija.

Deformacijų skirtumas $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ gali būti apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}(1 + n_e \rho_{eff})}{\rho_{eff}}}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (5.2)$$

čia σ_s – tempiamosios armatūros įtempiai plyšyje; k_t – koeficientas, įvertinantis apkrovimo trukmę ($k_t = 0,6$, veikiant trumpalaikiai apkrovai; $k_t = 0,4$, veikiant ilgalaikiai apkrovai); n_e – armatūros ir efektyviojo betono tamprumo modulių santykis ($n_e = E_s / E_{c,eff}$); E_s – plieninės armatūros tamprumo modulis; $E_{c,eff}$ – efektyvusis betono tamprumo modulis, apskaičiuojamas atsižvelgiant į išorinio poveikio veikimo trukmę (kai išorinis poveikis trumpalaikis $E_{c,eff} = E_c$); ρ_{eff} – efektyvusis armavimo koeficientas ($\rho_{eff} = A_s / A_{ct,eff}$), čia A_s – armatūros skerspjūvio plotas tempiamojoje elemento zonoje; $A_{ct,eff}$ – efektyvusis tempiamojo betono plotas, priklausantis nuo aukščio $h_{ct,eff} = 2,5(h - d)$ (5.2 pav.).

5.2 pav. Efektyvusis tempiamasis gelžbetoninės sijos betono zonos plotas



Kai atstumas tarp armatūros strypų (5.3 pav.) neviršija $5 \cdot (c + 0,5 \cdot \varnothing)$, tai atstumas tarp plyšių lenkiamuosiuose arba tempiamuosiuose gelžbetoniniuose elementuose apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$l_{cr,max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \varnothing}{\rho_{eff}}, \quad (5.3)$$

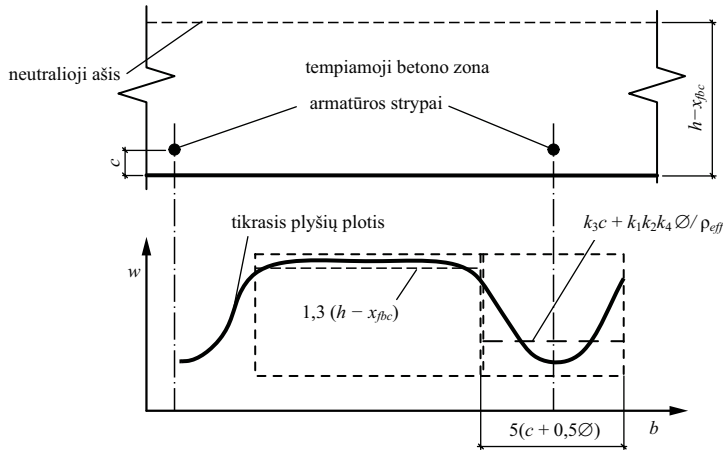
čia c – betono apsauginio sluoksnio storis; $\varnothing$ – armatūros strypo skersmuo; k_1 – koeficientas, kuriuo įvertinama armatūros sukibimo su betonu kokybė: $k_1 = 0,8$ – rumbuotųjų strypų ir $k_1 = 1,6$ – lygiųjų strypų; k_2 – koeficientas, kuriuo įvertinama deformacijų pasiskirstymo skerspjūvyje forma: $k_2 = 0,5$ – lenkiamųjų elementų ir

$k_2 = 1,0$ – tempiamųjų elementų; šalyje taikytinos k_3 ir k_4 reikšmės gali būti nurodytos jos nacionaliniame priede. Europos normų rekomenduojamos reikšmės atitinkamai lygios 3,4 ir 0,425.

Kai atstumas tarp armatūros strypų didesnis kaip $5 \cdot (c + \varnothing/2)$ (5.3 pav.), tai didžiausias atstumas tarp plyšių nustatomas pagal išraišką:

$$l_{cr, \max} = 1,3(h - x_{fbc}), \quad (5.4)$$

čia x_{fbc} – nesupleišėjusio skerspjūvio gniuždomosios zonos aukštis.



5.3 pav. Lenkiamojo elemento plyšio pločio betono paviršiuje priklausomybė nuo atstumo iki armatūros strypo

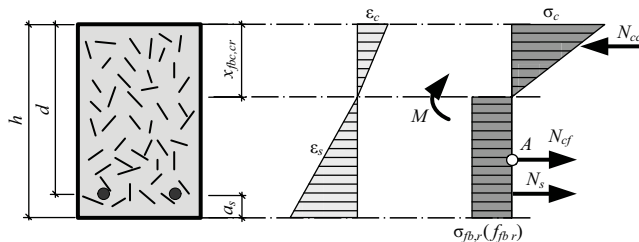
Europos normų plyšio pločio skaičiavimo metode nėra tiesiogiai atsižvelgiama į plieno plaušo įtaką gelžbetoniniams elementams. Dėl šios priežasties RILEM grupė TC162-TDF patobulino Europos normų pasiūlytą metodą. Taikant šiuos pakeitimus gaunamos mažesnės vidutinės armatūros deformacijos ε_{sm} , todėl gaunama ir mažesnė plyšio pločio reikšmė.

Atstumui tarp plyšių nustatyti siūloma taikyti tokią išraišką:

$$l_{cr, \max} = \left(k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \varnothing}{\rho_{eff}} \right) \cdot \left(50 \cdot \left(\frac{d_{fb}}{l_{fb}} \right) \right), \quad (5.5)$$

čia l_{fb} – plieno plaušo ilgis; d_{fb} – plieno plaušo skersmuo.

Skaičiuojant plieno plaušu armuoto gelžbetoninio elemento plyšių plotį, atsižvelgiama į tai, kad plieno plaušas plyšyje perima dalį tempimo įtempių (5.1 pav., b). Įtempiai σ_s arba σ_{sr} skaičiuojami panašiai kaip ir įprastiems gelžbetoniniams elementams – naudojant išorinių ir vidinių jėgų pusiausvyros sąlygas (5.4 pav.), imant supaprastintą stačiakampę plieno plaušo atlaikomųjų įtempių $\sigma_{fb,r}$ diagramą (5.4 pav.).



5.4 pav. Plieno plaušu armuoto gelžbetoninio elemento deformacijų ir įtempių pasiskirstymas bei elementą veikiančios išorinės ir vidinės jėgos

Pagal veikiančias išorines jėgas ir vidines įrašas (5.4 pav.) sudaroma pusiausvyros sąlygas atitinkanti ašinių jėgų ir momentų lygčių sistema (5.6).

$$\begin{cases} \sum N = N_{cc} - N_{cf} - N_s, \\ \sum M = M_{cc} + M_s - M, \end{cases} \quad (5.6)$$

čia

$$\begin{cases} N_{cc} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot b \cdot x_{fb,c,cr}, \\ N_{cf} = \sigma_{fb,r} \cdot b \cdot (h - x_{fb,c,cr}), \\ N_s = E_s \cdot \epsilon_s \cdot A_s \end{cases} \quad (5.7)$$

ir

$$\begin{cases} M_{cc} = N_{cc} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot x_{fb,c,cr} + \frac{h - x_{fb,c,cr}}{2} \right), \\ M_s = N_s \cdot \left(d - x_{fb,c,cr} - \frac{h - x_{fb,c,cr}}{2} \right). \end{cases} \quad (5.8)$$

Detalizuojama pusiausvyros sąlygas atitinkanti lygčių sistema:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c \cdot \sigma_s}{E_s} \cdot \frac{x_{fb,c,cr}}{d - x_{fb,c,cr}} \cdot b \cdot x_{fb,c,cr} - \sigma_s \cdot A_s - \sigma_{fb,r} \cdot b \cdot (h - x_{fb,c,cr}) = 0, \\ \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{E_c \cdot \sigma_s}{E_s} \cdot \frac{x_{fb,c,cr}}{d - x_{fb,c,cr}} \cdot b \cdot x_{fb,c,cr} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot x_{fb,c,cr} + \frac{(h - x_{fb,c,cr})}{2} \right) \right) + \\ + \sigma_s \cdot A_s \cdot \left(d - x_{fb,c,cr} - \frac{(h - x_{fb,c,cr})}{2} \right) - M = 0, \end{cases} \quad (5.9)$$

čia E_c – betono tamprumo modulis; E_s – armatūros tamprumo modulis; $x_{fb,c,cr}$ – supleišėjusio skerspjūvio gniuždomosios zonos aukštis; d – naudingasis elemento aukštis; A_s – armatūros skerspjūvio plotas tempiamojoje elemento zonoje; h – sijos aukštis; b – sijos plotis; M – siją veikiantis išorinis lenkiamasis momentas; $\sigma_{fb,r}$ – lie-

kamieji įtempiai plyšyje; σ_s – strypinės armatūros tempimo įtempiai, kai $M > M_{cr}$, čia M_{cr} – pleišėjimo momentas. Kai $M = M_{cr}$, tai $\sigma_s = \sigma_{sr}$.

Nustatoma plieno plaušo tūrio dalis (plačiau apie tai kalbama trečiajame knygos skyriuje) betono mišinyje:

$$V_{fb} = \frac{D_{fb}}{\rho_{fb} + D_{fb}}, \quad (5.10)$$

čia D_{fb} – plieno plaušo kiekis elemente; ρ_{fb} – plieno plaušo tankis.

Apskaičiuojamas plieno plaušo faktorius, reikalingas liekamiesiems įtempiams skaičiuoti:

$$RI = V_{fb} \cdot \frac{l_{fb}}{d_{fb}} \cdot \beta, \quad (5.11)$$

čia l_{fb} – plieno plaušo ilgis; d_{fb} – plieno plaušo skersmuo; β – plaušo ir betono sukibtį apibūdinantis koeficientas, imamas $\beta = 0,5$ tiesiam plaušui, $\beta = 0,75$ – lankstytam, $\beta = 1,0$ – plaušui užlenktais galais.

Liekamieji įtempiai plyšyje įvertinami skaičiuojant liekamąjį elemento stiprį:

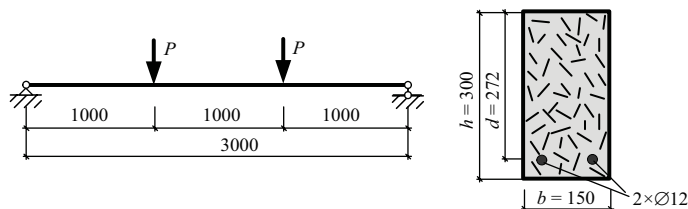
$$f_{fb,r} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot RI, \quad (5.12)$$

čia λ_1 – koeficientas, įvertinantis plaušo inkaravimo ilgį; λ_2 – koeficientas, įvertinantis plaušo orientaciją plyšyje; λ_3 – koeficientas, įvertinantis plaušo tarpusavio sąveiką; Siūlomos šių koeficientų reikšmės plaušui lenktais galais yra: $\lambda_1 = 0,25$; $\lambda_2 = 1,2$; $\lambda_3 = 1,0$; τ – vidutiniai sukibimo įtempiai (tariama, kad $\tau = 2f_{ct}$).

5.2.2. Europos normų metodo taikymo pavyzdys

Analizuojama laisvai atremta dispersiškai armuota gelžbetoninė sija, apkrauta dviem koncentruotomis jėgomis (trumpalaikė apkrova), išdėstytomis tarpatramio trečdaliuose. Skaičiuotinis sijos tarpatramio ilgis $L_0 = 3,0$ m. Sijos apkrovimo schema ir pagrindinės geometrinės charakteristikos pateiktos 5.5 pav.

Nagrinėjamoji sija tempiamojoje zonoje armuota dviem plieniniais $\varnothing 12$ strypais. Dispersiniam sijos armavimui ($V_{fb} \approx 1\%$) naudojamas 55 mm ilgio ir 1 mm skersmens plieno plaušas su užlenktais galais (5.6 pav.).



5.5 pav. Sijos skaičiuojamoji schema ir skerspjūvis



5.6 pav. Dispersiniam sijos armavimui naudojamas plaušas

Sijos gamybai naudojamo betono tempiamasis stipris $f_{ct} = 3,39 \cdot 10^3$ kPa, tamprumo modulis $E_c = 35 \cdot 10^6$ kPa, armatūros tamprumo modulis $E_s = 2,0 \cdot 10^8$ kPa. Dispersiškai armuotos gelžbetoninės sijos plotis $b = 0,15$ m, aukštis $h = 0,30$ m, naujingasis skerspjūvio aukštis $d = 0,272$ m.

Taikant RILEM TC162-TDF metodiką skaičiuojamas nagrinėjamos dispersiškai armuotos gelžbetoninės sijos betone atsiveriančių plyšių plotis.

1 žingsnis. Nustatomas armatūros ir betono tamprumo modulių santykis:

$$n_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2,0 \cdot 10^8}{35 \cdot 10^6} = 5,714.$$

2 žingsnis. Apskaičiuojamas elemento pleišėjimo momentas:

$$M_{cr} = f_{ct} \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} = 3,39 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,15 \cdot 0,30^2}{6} = 7,62 \text{ kNm}.$$

3 žingsnis. Nustatoma plieno plaušo tūrio dalis betono mišinyje:

$$V_{fb} = \frac{D_{fb}}{\rho_{fb} + D_{fb}} = \frac{79,24}{7850 + 79,24} = 0,01.$$

4 žingsnis. Apskaičiuojamas plieno plaušo faktorius:

$$RI = V_{fb} \cdot \frac{l_{fb}}{d_{fb}} \cdot \beta = 0,01 \cdot \frac{0,055}{0,001} \cdot 1,0 = 0,55.$$

5 žingsnis. Nustatomas liekamasis dispersiškai armuoto tempiamojo betono stipris:

$$f_{fb,r} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot RI = 0,25 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 6,78 \cdot 10^3 \cdot 0,55 = 1,12 \text{ MPA}.$$

6 žingsnis. Gniuždomosios zonos aukštis $x_{fb,cr}$ ir įtempiai armatūroje σ_s supleišėjusiame pjūvyje nustatomi sprendžiant 5.9 lygčių sistemą, kai $M = M_{cr}$ ir kai $M > M_{cr}$.

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c \cdot \sigma_s}{E_s} \cdot \frac{x_{fb,cr}}{d - x_{fb,cr}} \cdot b \cdot x_{fb,cr} - \sigma_s \cdot A_s - \sigma_{fb,r} \cdot b \cdot (h - x_{fb,cr}) = 0, \\ \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{E_c \cdot \sigma_s}{E_s} \cdot \frac{x_{fb,cr}}{d - x_{fb,cr}} \cdot b \cdot x_{fb,cr} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot x_{fb,cr} + \frac{(h - x_{fb,cr})}{2} \right) \right) + \\ + \sigma_s \cdot A_s \cdot \left(d - x_{fb,cr} - \frac{(h - x_{fb,cr})}{2} \right) - M = 0. \end{cases}$$

5.1 lentelėje pateiktos plieno plaušu armuoto supleišėjusio gelžbetoninio elemento gniuždomosios zonos $x_{fb,cr}$ ir įtempių armatūroje σ_s reikšmės, esant pleišėjimo momentui ($M = M_{cr}$) ir atsitiktinai pasirinktoms kitų išorinio momento reikšmėms ($M > M_{cr}$).

Tolesni plyšio pločio skaičiavimai bus atliekami, kai siją veikiantis momentas yra $M = 25$ kNm. Šiuo atveju supleišėjusios sijos gniuždomosios zonos aukštis bus $x_{fb,cr} = 0,072$ m, o įtempiai armatūroje $\sigma_s = 335,198$ MPa (5.1 lentelė).

5.1 lentelė. Gniuždomosios zonos aukščio ir armatūros įtempių nustatymas esant tam tikrai apkrovai

M , kNm	$x_{fb,cr}$, m	σ_s , MPa
7,62	0,11	42,25
10	0,0947	78,77
20	0,0753	248,334
25	0,072	335,198

7 žingsnis. Efektyvusis tempiamojo betono aukštis:

$$h_{ct,eff} = 2,5(h - d) = 2,5(0,30 - 0,272) = 0,07 \text{ m}.$$

8 žingsnis. Nustatomas efektyvusis tempiamojo betono plotas:

$$A_{ct,eff} = b \cdot h_{ct,eff} = 0,15 \cdot 0,07 = 0,0105 \text{ m}^2.$$

9 žingsnis. Apskaičiuojamas armavimo koeficientas:

$$\rho_{eff} = \frac{A_s}{A_{ct,eff}} = \frac{2,261 \cdot 10^{-4}}{0,0105} = 0,0215.$$

10 žingsnis. Nustatomas deformacijų skirtumas $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{eff}} (1 + n_e \rho_{eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s},$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{335,198 \cdot 10^3 - 0,6 \cdot \frac{3,39 \cdot 10^3 \cdot (1 + 5,714 \cdot 0,0215)}{0,0215}}{2,0 \cdot 10^8} \geq 0,6 \cdot \frac{335,198 \cdot 10^3}{2,0 \cdot 10^8},$$

$$\Delta \varepsilon = 11,449 \cdot 10^{-4} > 10,056 \cdot 10^{-4}.$$

11 žingsnis. Nustatomas didžiausias atstumas tarp plyšių:

$$l_{cr,max} = \left(k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \emptyset}{\rho_{eff}} \right) \cdot \left(\frac{50 \cdot d_{fb}}{l_{fb}} \right) =$$

$$l_{cr,max} = \left(3,4 \cdot 0,022 + \frac{0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 0,012}{0,0215} \right) \cdot \left(\frac{50 \cdot 0,001}{0,055} \right) = 0,1543 \text{ m}.$$

12 žingsnis. Apskaičiuojamas didžiausias plyšio plotis:

$$w_{max} = l_{cr,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 0,1543 \cdot 11,449 \cdot 10^{-4} = 17,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}.$$

5.3. Supaprastintasis metodas

Šiame skyriuje pateikiamas supaprastintasis metodas, skirtas plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų laikomajai galiai ir įlinkiams nustatyti. Skaičiuojant remiamasi tokiomis prielaidomis:

1. Deformacijų pasiskirstymas elemento skerspjūvyje yra tiesinis – galioja plokščiųjų pjūvių hipotezė.
2. Plieno plaušu armuotas betonas laikomas vienalyte medžiaga.
3. Liekamieji įtempiai plyšyje atsiranda tempiamajam betonui pasiekus pleišėjimo deformaciją ε_{cr} . Liekamieji įtempiai yra pastovūs, nepriklauso nuo atsiveriančio plyšio pločio (arba pleišėjimo deformacijos).
4. Plieno plaušu armuoto betono ribinė irimo deformacija ε_{cu} lygi įprastojo betono ribinei deformacijai.

Supaprastintasis metodas pagrįstas deformacijų ir įtempių būvio nustatymu elemento skerspjūvyje (5.7 pav.). NAGRINĖJAMI trys charakteringieji momentų ir kreivių diagramos taškai: plyšių atsivėrimo pradžia (taškas A), armatūros takumo pradžia (taškas B) ir elemento irimas (taškas C). Kiekviename iš šių taškų, nustačius deformacijų ir įtempių pasiskirstymą skerspjūvyje, apskaičiuojamas lenkimo momentas (M_{cr} , M_y , M_u) ir jį atitinkantis kreivis.

Statiškai išsprendžiamų lenkiamųjų elementų kreivį κ ir įlinkį δ sieja ryšys:

$$\delta = k \cdot \kappa \cdot l^2, \quad (5.13)$$

čia k – apkrovimo ir atrėmimo sąlygas įvertinantis koeficientas (5.8 pav.); κ – elemento kreivis pavojingajame (viduriniame) pjūvyje; l – skaičiuotinis elemento ilgis.

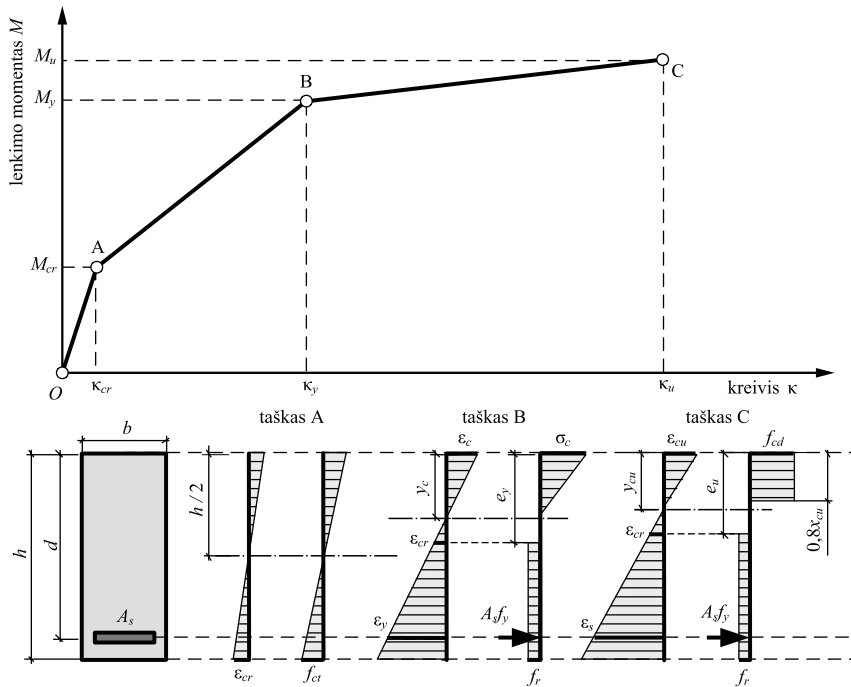
Taikant supaprastintąjį metodą, tarpinės momentų ir juos atitinkančių kreivių reikšmės gaunamos tiesiškai interpoliuojant tarp charakteringųjų momentų ir kreivių diagramos taškų (5.7 pav.). Toliau pateikiamos formulės šiems taškams rasti.

5.3.1. Elemento pleišėjimo charakteringasis taškas

Nesupleišėjusio elemento kreivis apskaičiuojamas pagal klasikines medžiagų mechanikos formules. Apskaičiuojant pleišėjimo momentą, plieno plaušo ir išilginės armatūros įtaka nevertinami. Pleišėjimo momentas nustatomas taip:

$$M_{cr} = \frac{bh^2}{6} \cdot f_{ct}, \quad (5.14)$$

čia b – skerspjūvio plotis; h – bendras skerspjūvio aukštis; f_{ct} – betono tempiamasis stipris.



5.7 pav. Supaprastintasis plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų laikomosios galios ir įlinkių apskaičiavimo metodas

Apkrova	k
	0,125
	$\frac{3-4a^2}{48(1-a)}$
	$\frac{1}{8} - \frac{a^2}{6 \cdot l^2}$
	$\frac{5}{48}$

5.8 pav. Apkrovos tipų įvertinantys koeficientai, taikomi dvitramėms sijoms

Elemento kreivis, veikiant pleišėjimo momentui, apskaičiuojamas taip:

$$\kappa_{cr} = \frac{M_{cr}}{E_c \cdot I_c}, \quad (5.15)$$

čia E_c – betono tamprumo modulis; $I_c = bh^3 / 12$ betoninio skerspjūvio inercijos momentas.

5.3.2. Armatūros takumo pradžios charakteringasis taškas

Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas supleišėjusiam skerspjūvyje, kai pasiekama armatūros takumo riba, parodytas 5.7 pav. (taškas B). Šioje stadijoje gniuždomasis betonas dar nėra pasiekęs irimo deformacijos, todėl taikome trikampę gniuždomojo betono įtempių diagramą. Remdamiesi trečiąja prielaida tariame, kad liekamieji tempiamojo betono įtempiai plyšyje yra pastovūs. Pagal priimtą schemą žinomais dydžiais laikomi armatūros deformacija ε_y , betono pleišėjimo deformacija ε_{cr} ir liekamieji įtempiai plyšyje $\sigma_{fb,r}$. Nežinomaisiais laikomi betono gniuždomosios zonos aukštis y_c , atstumas nuo gniuždomosios zonos viršaus iki plyšio viršūnės e_y ir betono įtempiai σ_c . Toliau eliminuosime du nežinomuosius (e_y ir σ_c), juos išreikšdami gniuždomosios zonos aukščiu y_c ir žinomaisiais dydžiais (ε_y , ε_{cr}).

Remdamiesi prielaida apie tiesinį deformacijų pasiskirstymą skerspjūvyje ir iš to gaunamu trikampių panašumu, nežinomąjį e_y galime išreikšti taip (5.7 pav.):

$$\frac{\varepsilon_{cr}}{e_y - y_c} = \frac{\varepsilon_y}{d - y_c} \Rightarrow e_y = \frac{\varepsilon_{cr}(d - y_c) + \varepsilon_y \cdot y_c}{\varepsilon_y}, \quad (5.16)$$

čia ε_{cr} – betono pleišėjimo deformacija ($\varepsilon_{cr} = f_{ct} / E_c$); ε_y – armatūros takumo deformacija ($\varepsilon_y = f_y / E_s$); d – naudingasis skerspjūvio aukštis.

Įtempiai betone σ_c taip pat išreiškiami žinomu dydžiu ε_y ir gniuždomosios zonos aukščiu y_c (vėl pasinaudosime 5.7 pav. parodyto charakteringojo B taško deformacijų pasiskirstymu ir trikampių panašumu):

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_c}{y_c} &= \frac{\varepsilon_y}{d - y_c} \Rightarrow \varepsilon_c = \varepsilon_y \frac{y_c}{d - y_c}, \\ \sigma_c &= E_c \cdot \varepsilon_c \Rightarrow \sigma_c = E_c \cdot \left(\varepsilon_y \frac{y_c}{d - y_c} \right). \end{aligned} \quad (5.17)$$

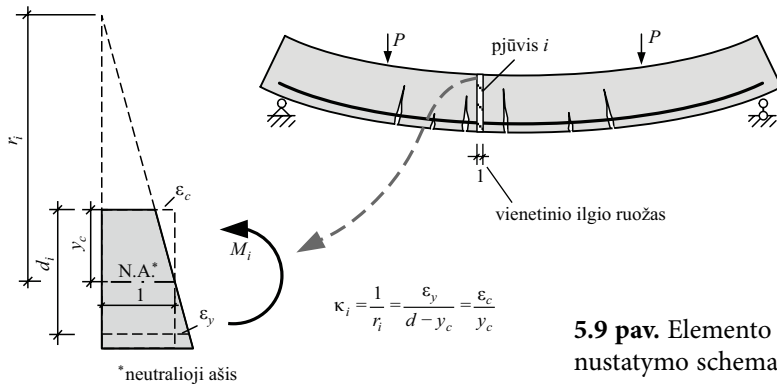
Gautose 5.16 ir 5.17 formulėse lieka vienas nežinomas dydis – y_c . Jį rasime išsprendę horizontaliųjų jėgų pusiausvyros lygtį:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} b \cdot y_c \cdot \sigma_c - f_{fb,r} \cdot b \cdot (h - e_y) - A_s \cdot f_y &= 0, \\ \frac{1}{2} b \cdot y_c \cdot E_c \cdot \left(\varepsilon_y \frac{y_c}{d - y_c} \right) - f_{fb,r} \cdot b \left[h - \frac{\varepsilon_{cr}(d - y_c) + \varepsilon_y \cdot y_c}{\varepsilon_y} \right] - A_s \cdot f_y &= 0. \end{aligned} \quad (5.18)$$

Skerspjūvyje veikiantis lenkimo momentas randamas gniuždomojo betono įtempių atstojamosios atžvilgiu:

$$M_y = A_s f_y \left(d - \frac{y_c}{3} \right) + f_{fb,r} \cdot b \cdot (h - e_y) \left(\frac{h - e_y}{2} + \frac{2}{3} y_c + e_y - y_c \right). \quad (5.19)$$

Elemento pjūvio kreivį apskaičiuosime remdamiesi 5.9 pav. pateikta schema. Iš lenkiamojo elemento išpjaunamas vienetinio ilgio ruožas ir nagrinėjama jo deformuota schema.



5.9 pav. Elemento pjūvio kreivio nustatymo schema

Dėl parinkto ruožo vienetinio ilgio bet kurio skerspjūvio sluoksnio deformaciją galima traktuoti kaip to ilgio pokytį (nes $\Delta u = u \times \epsilon = 1 \times \epsilon = \epsilon$). Pagal priimtą plokščiųjų pjūvių hipotezę deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje yra tiesinis. Toliau nagrinėdami deformuotą pjūvio schemą, galime pastebėti du panašius trikampius: didesniojo trikampio pagrindas yra ties neutraliąja skerspjūvio ašimi (todėl jo ilgis yra nepakitęs), o jo statinį pažymėkime r_i . Mažesniojo trikampio pagrindas yra tempiamojo sluoksnio ties armatūra pailgėjimas ϵ_y , o statinis yra atitinkamai $(d - y_c)$ aukščio. Tokiu būdu galime sudaryti daugybę panašių trikampių, pavyzdžiui, gniuždomojo betono deformacijos ϵ_c ir atitinkamai statinio y_c (5.9 pav.). Remdamiesi panašių trikampių savybėmis, galime parašyti:

$$\kappa_i = \frac{1}{r_i} = \frac{\epsilon_y}{d - y_c} = \frac{\epsilon_c}{y_c}. \quad (5.20)$$

Tokiu būdu skerspjūvio kreivį galime apskaičiuoti žinodami bet kurio sluoksnio deformaciją ir neutraliosios ašies padėtį. Toliau skaičiuodami šia formule dažnai remsimės.

5.3.3. Elemento irimo charakteringasis taškas

Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje irimo etape parodytas 5.7 pav. (taškas C). Irimo metu betono deformacija ϵ_{cu} pasiekia ribinę reikšmę. Remdamiesi ketvirtąja prielaida laikome, kad plieno plaušu armuoto betono ribinė irimo deformacija ϵ_{cu} tokia pati kaip ir įprastojo betono (atsižvelgiant į betono klasę $\epsilon_{cu} = 3000 - 3500 \cdot 10^{-6}$). Armatūros deformacija irimo etape neribojama (nes jau pasiekta takumo riba). Tariama, kad betono gniuždomojoje zonoje veikia pastovūs įtempiai f_{cd} (skaičiuotinis betono stipris). Įtempių diagrama imama stačiakampė, jos aukštis sudaro 80 % gniuždomosios zonos aukščio. Nežinomaisiais laikomi betono gniuždomosios zonos aukštis y_{cu} ir atstumas nuo gniuždomosios zonos viršaus iki plyšio viršūnės e_u . Analogiškai kaip ir ankstesniajame poskyryje, remdamiesi trikampių panašumu, galime eliminuoti nežinomąjį e_u :

$$\frac{\varepsilon_{cr}}{e_u - y_{cu}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{y_{cu}} \Rightarrow e_u = \frac{y_{cu}(\varepsilon_{cr} + \varepsilon_{cu})}{\varepsilon_{cu}}. \quad (5.21)$$

Nežinomas dydis y_{cu} randamas išsprendus horizontaliųjų jėgų pusiausvyros lygtį:

$$\begin{aligned} b \cdot 0,8 y_{cu} \cdot f_{cd} - f_{fb,r} \cdot b \left[h - e_u \right] - A_s \cdot f_y &= 0, \\ b \cdot 0,8 y_{cu} \cdot f_{cd} - f_{fb,r} \cdot b \left[h - \frac{y_{cu}(\varepsilon_{cr} + \varepsilon_u)}{\varepsilon_u} \right] - A_s \cdot f_y &= 0. \end{aligned} \quad (5.22)$$

Skerspjūvyje veikiantis lenkimo momentas gali būti nustatytas gniuždomojo betono įtempių atstojamosios atžvilgiu:

$$M_u = A_s f_y \left(d - \frac{0,8 y_{cu}}{2} \right) + f_{fb,r} \cdot b \cdot (h - e_u) \left(\frac{h - e_u}{2} + \frac{0,8 y_{cu}}{2} + e_u - 0,8 y_{cu} \right). \quad (5.23)$$

Remdamiesi 5.9 pav. parodyta deformuota skerspjūvio schema ir 5.20 formule, galime apskaičiuoti skerspjūvio kreivę:

$$\kappa_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{y_{cu}}. \quad (5.24)$$

5.3.4. Supaprastintojo metodo taikymo pavyzdys

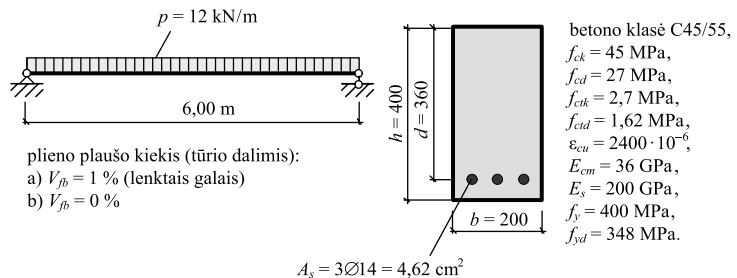
Plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų laikomosios galios ir įlinkių apskaičiavimo metodą pritaikysime dvitramei tolygiai apkrautai sijai (5.10 pav.). Nagrinėjami du atvejai: a) plieno plaušo kiekis sudaro 1 % betono mišinio tūrio dalies (plaušo ilgio ir skersmens santykis $l_{fb}/d_{fb} = 60$); b) sija yra pagaminta iš įprastojo betono ($f_{fb,r} = 0$). Reikia nustatyti sijos laikomąją galią ir apskaičiuoti įlinkį, veikiant tolygiai išskirstytai apkrovai $p = 12 \text{ kN/m}$.

Elemento pleišėjimo charakteringojo taško analizė

Pagal 5.14 ir 5.15 formules randame sijos pleišėjimo momentą ir kreivę:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= \frac{bh^2}{6} \cdot f_{ctk} = \frac{0,2 \cdot 0,4^2}{6} \cdot 2,7 \cdot 10^6 = 14,4 \text{ kNm}, \\ \kappa_{cr} &= \frac{M_{cr}}{E_c I_c} = \frac{14,4 \cdot 10^3}{36 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,2 \cdot 0,4^3}{12}} = 0,375 \text{ km}^{-1}. \end{aligned}$$

5.10 pav. Skaičiuojamos sijos geometrija ir medžiagų rodikliai



Armatūros takumo pradžios charakteringojo taško analizė

Apskaičiuojame armatūros takumo pradžią atitinkančią deformaciją:

$$\varepsilon_y = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{348 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^9} = 1740 \cdot 10^{-6}.$$

Apskaičiuojame betono pleišėjimą atitinkančią deformaciją:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f_{ctk}}{E_{cm}} = \frac{2,7 \cdot 10^6}{36 \cdot 10^9} = 75 \cdot 10^{-6}.$$

Pagal anksčiau pateiktą 5.11 formulę apskaičiuojame plieno plaušo faktorių, reikalingą liekamiesiems įtempiams skaičiuoti:

$$RI = V_{fb} \cdot \frac{l_{fb}}{d_{fb}} \cdot \beta = 0,01 \cdot 60 \cdot 1 = 0,6.$$

Pagal 5.12 formulę įvertiname liekamuosius įtempius plyšyje:

$$f_{fb,r} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot RI = 0,25 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 3,24 \cdot 10^6 \cdot 0,6 = 0,6 \text{ MPa},$$

čia $\tau = 2f_{ctd}$.

Liekamiesiems įtempiams skaičiuoti armatūros takumo pradžios ir elemento irimo etapuose taikomas *skaičiuotinis* betono tempiamasis stipris f_{ctd} .

Pagal 5.18 lygtį randame gniuždomosios zonos aukštį:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} b \cdot y_c \cdot E_{cm} \cdot \left(\varepsilon_y \frac{y_c}{d - y_c} \right) - f_{fb,r} \cdot b \left[h - \frac{\varepsilon_{cr} (d - y_c) + \varepsilon_y \cdot y_c}{\varepsilon_y} \right] - A_s \cdot f_y = \\ & = \frac{1}{2} \cdot 0,2 \cdot y_c \cdot 36 \cdot 10^9 \cdot \left(1740 \cdot 10^{-6} \frac{y_c}{0,36 - y_c} \right) - \\ & - 0,6 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \left[0,4 - \frac{75 \cdot 10^{-6} (0,36 - y_c) + 1740 \cdot 10^{-6} \cdot y_c}{1740 \cdot 10^{-6}} \right] - 4,62 \cdot 10^{-4} \cdot 348 \cdot 10^6 = 0, \\ & \Rightarrow y_c = 92 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Apskaičiuojamas atstumas nuo gniuždomosios zonos viršaus iki plyšio viršūnės e_y :

$$e_y = \frac{\varepsilon_{cr} (d - y_c) + \varepsilon_y \cdot y_c}{\varepsilon_y} = \frac{75 \cdot 10^{-6} (0,36 - 0,092) + 1740 \cdot 10^{-6} \cdot 0,092}{1740 \cdot 10^{-6}} = 103 \text{ mm}.$$

Pagal 5.19 formulę apskaičiuojamas armatūros takumo pradžią atitinkantis lenkimo momentas:

$$\begin{aligned} M_y &= A_s f_y \left(d - \frac{y_c}{3} \right) + f_{fb,r} \cdot b \cdot (h - e_y) \left(\frac{h - e_y}{2} + \frac{2}{3} y_c + e_y - y_c \right) = \\ &= 4,62 \cdot 10^{-4} \cdot 348 \cdot 10^6 \left(0,36 - \frac{0,092}{3} \right) + \end{aligned}$$

$$+0,6 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \cdot (0,4 - 0,103) \left(\frac{0,4 - 0,103}{2} + \frac{2}{3} \cdot 0,092 + 0,103 - 0,092 \right) = 60,8 \text{ kNm}.$$

Pagal 5.20 formulę apskaičiuojamas armatūros takumo pradžią atitinkantis elemento kreivis viduriniame pjūvyje:

$$\kappa_y = \frac{\varepsilon_y}{d - y_c} = \frac{1740 \cdot 10^{-6}}{0,36 - 0,092} = 6,49 \text{ km}^{-1}.$$

Apskaičiuotos armatūros takumo pradžios charakteringąją tašką atitinkančios lenkimo momento ir skerspjūvio kreivio reikšmės parodytos 5.11 pav. (taškas B). Kartu parodytos lenkimo momento ir kreivio reikšmės, kai liekamieji įtempiai lygūs nuliui.

Elemento irimo charakteringojo taško analizė

Išsprendus 5.22 lygtį, randamas betono gniuždomosios zonos aukštis:

$$\begin{aligned} b \cdot 0,8 y_{cu} \cdot f_{cd} - f_{fb,r} \cdot b \left[h - \frac{y_{cu} (\varepsilon_{cr} + \varepsilon_u)}{\varepsilon_u} \right] - A_s \cdot f_y = \\ = 0,2 \cdot 0,8 y_{cu} \cdot 27 \cdot 10^6 - 0,6 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \left[0,4 - \frac{y_{cu} (75 \cdot 10^{-6} + 2400 \cdot 10^{-6})}{2400 \cdot 10^{-6}} \right] - \\ - 4,62 \cdot 10^{-4} \cdot 348 \cdot 10^6 = 0, \\ \Rightarrow y_{cu} = 47 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Pagal 5.21 formulę apskaičiuojamas atstumas nuo gniuždomosios zonos viršaus iki plyšio viršūnės e_u :

$$e_u = \frac{y_{cu} (\varepsilon_{cr} + \varepsilon_u)}{\varepsilon_{cu}} = \frac{0,047 \cdot (75 \cdot 10^{-6} + 3500 \cdot 10^{-6})}{3500 \cdot 10^{-6}} = 48 \text{ mm}.$$

Pagal 5.23 formulę apskaičiuojamas elemento irimą atitinkantis lenkimo momentas:

$$\begin{aligned} M_u = A_s f_y \left(d - \frac{0,8 y_{cu}}{2} \right) + f_{fb,r} \cdot b \cdot (h - e_u) \left(\frac{h - e_u}{2} + \frac{0,8 y_{cu}}{2} + e_u - 0,8 y_{cu} \right) = \\ = 4,62 \cdot 10^{-4} \cdot 348 \cdot 10^6 \cdot \left(0,36 - \frac{0,8 \cdot 0,047}{2} \right) + 0,6 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \cdot (0,4 - 0,048) \cdot \\ \cdot \left(\frac{0,4 - 0,048}{2} + \frac{0,8 \cdot 0,047}{2} + 0,048 - 0,8 \cdot 0,047 \right) = 63,5 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

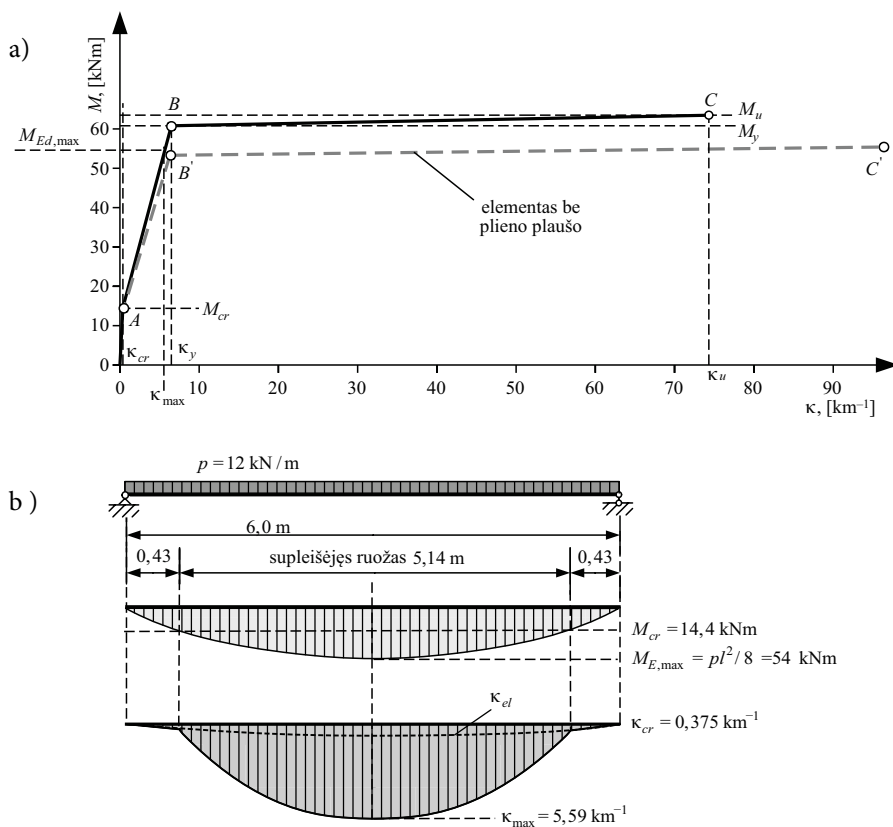
Pagal 5.24 formulę apskaičiuojamas elemento irimą atitinkantis skerspjūvio kreivis:

$$\kappa_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{y_{cu}} = \frac{3500 \cdot 10^{-6}}{0,047} = 74,5 \text{ km}^{-1}.$$

Apskaičiuotos elemento lenkimo momento ir skerspjūvio kreivio reikšmės parodytos 5.12 pav. (taškas C). Kartu parodytos lenkimo momento ir kreivio reikšmės, kai liekamieji įtempiai lygūs nuliui (taškas C).

Pagal apskaičiuotas lenkimo momento ir kreivio reikšmes charakteringuosiuose taškuose nubraižoma elemento lenkimo momento ir kreivio diagrama (5.12 pav., a). Pagal šią diagramą galima nustatyti kiekvieno skerspjūvio kreivį. Atsižvelgiant į išorinio lenkimo momentą, toks kreivių pasiskirstymas per visą sijos ilgį parodytas 5.12 pav., b.

Pažymėtina, kad kreivis yra palyginti nedidelis sijos ruožuose be plyšių (šiuose ruožuose veikiantis lenkimo momentas yra mažesnis už apskaičiuotąjį pleišėjimo lenkimo momentą M_{cr}). Skerspjūviui pradėjus pleišėti, kreivis greitai auga – momentų ir kreivių diagramoje tai yra lūžio taškas A. Jeigu skaičiuotume supleišėjusios sijos įlinkį pagal klasikines medžiagų mechanikos formules (t. y. imant tampriąsias medžiagų charakteristikas), paklaida galėtų sudaryti apie kelis šimtus procentų.



5.12 pav. Elemento kreivio skaičiavimas: a – kreivio ir lenkimo momento diagrama; b – kreivio kitimas, atsižvelgiant į išorinio lenkimo momentą

Pagal apskaičiuotąjį kreivių pasiskirstymą rasime maksimalų sijos įlinkį. Tuo tikslu taikysime 5.13 formulę ir 5.8 pav. pateiktas dvitramių sijų apkrovimo schemas. Maksimalus išorinis siją veikiantis lenkimo momentas sudaro $M_{Ed,max} = 54 \text{ kNm}$. Tiesiškai interpoliuodami tarp lenkiamųjų momentų ir kreivių diagramos taškų A ir B, gauname šį momentą atitinkantį kreivį $\kappa_{max} = 5,59 \text{ km}^{-1}$. Pagal 5.13 formulę randame nagrinėjamos plieno plaušu armuotos sijos įlinkį viduriniame pjūvyje:

$$\delta = k \cdot \kappa \cdot l^2 = \frac{5}{48} \cdot 5,59 \cdot 10^{-3} \cdot 6^2 = 21,0 \text{ mm},$$

čia κ – koeficientas, įvertinantis apkrovimo tipą (5.8 pav.).

Apibendrinę pateiktąją medžiagą, galime padaryti tokias išvadas:

1. Plieno plaušu armuotų elementų laikomosios galios ir įlinkių skaičiavimas skiriasi nuo įprastųjų gelžbetoninių tuo, kad vertinami liekamieji įtempiai plyšyje. Norint atlikti tikslius skaičiavimus, būtina turėti konkretaus betono mišinio eksperimentiškai nustatytą liekamųjų įtempių reikšmę.
2. Tais atvejais, kai supleišėjusių elementų deformacijos skaičiuojamos įvertinant tik tamprią medžiagos elgseną, įlinkių nustatymo paklaida gali siekti kelis šimtus procentų.

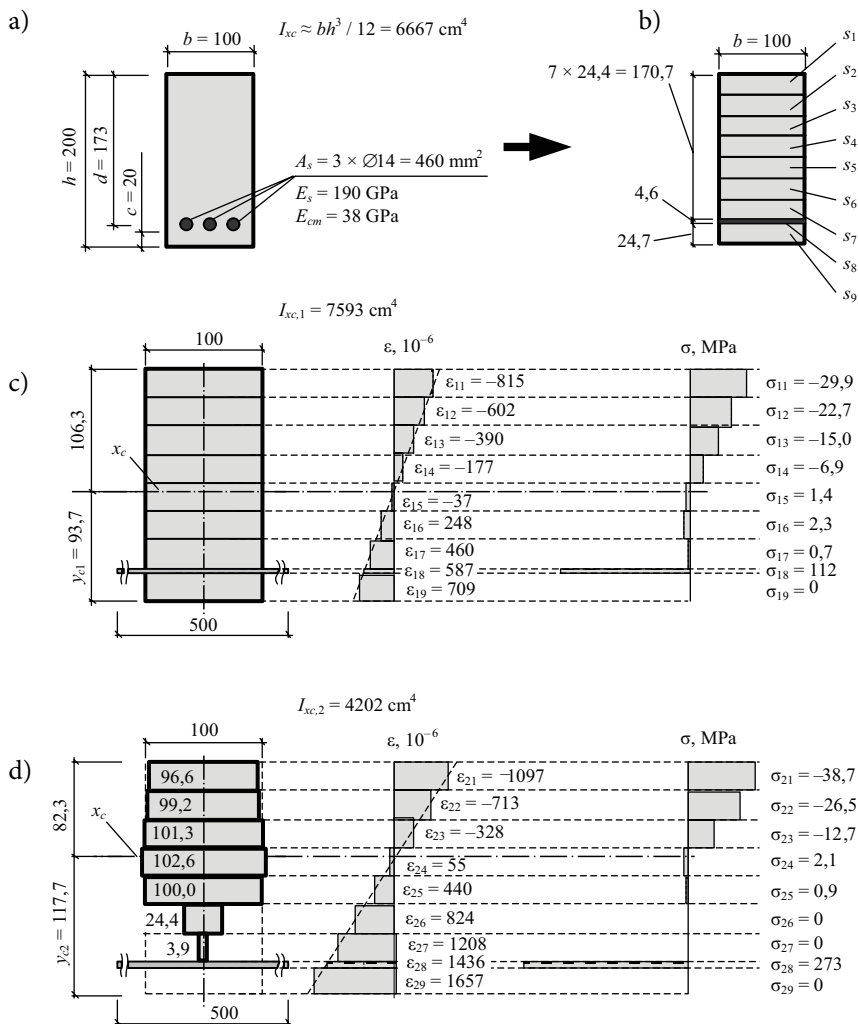
5.4. Skerspjūvio sluoksnių modelis

Sluoksnių modelis yra paprastas ir universalus gelžbetoninių ir plieno plaušu armuotų elementų įtempių ir deformacijų apskaičiavimo metodas. Jei taikomi patikimi medžiagų modeliai, sluoksnių metodu galima tiksliai (su kelių procentų paklaida) apskaičiuoti elemento deformacijas, esant bet kokiai apkrovai. Sluoksnių modelyje taikomas prielaidas ir skaičiavimo algoritmą aptarsime nagrinėdami skaičiavimo pavyzdį.

Imkime gelžbetoninį elementą, kuriame armatūra išdėstyta tik tempiamąjoje zonoje. Elemento betono klasė C55/67, kirstinis tamprumo modulis $E_{cm} = 38 \text{ GPa}$. Armatūros tamprumo modulis $E_s = 190 \text{ GPa}$. Elemento skerspjūvis parodytas 5.13 pav., a. Reikia apskaičiuoti skerspjūvio kreivį, veikiant lenkimo momentui $M = 25 \text{ kN}$.

Skerspjūvį sudalinkime į devynis sluoksnius taip, kad armatūros sluoksnio plotas būtų lygus armatūros strypų skerspjūvio plotui. Skerspjūvio sluoksnių modelis parodytas 5.13 pav., b. Armatūros strypų skerspjūvių plotą $A_s = 460 \text{ mm}^2$ paverčiame sluoksniu, kurio plotis lygus elemento skerspjūvio pločiui (100 mm), o storis – 4,6 mm.

Skaičiavimai atliekami iteracijomis. Pirmuoju priartėjimu apskaičiuojamas *redukuotas* inercijos momentas skerspjūvio svorio centro atžvilgiu. Redukuotasis skerspjūvis sudaromas taip, kad jo standumas būtų lygus pradiniam, bet jį sudarytų vienaalytė medžiaga. Šiame uždavinyje plieno sluoksni redukuosime į ekvivalentinio standumo



5.13 pav. Skerspjūvio kreivio skaičiavimas sluoksnių metodu: a – gelžbetoninis skerspjūvis; b – skerspjūvio dalijimas į sluoksnius; c – įtempių ir deformacijų pasiskirstymas sluoksniuose pirmosios iteracijos metu; d – įtempių ir deformacijų pasiskirstymas sluoksniuose antrosios iteracijos metu

betono sluoksnį – tam plieno sluoksnio plotį padidinsime tiek kartų, kiek kartų plieno tamprumo modulis yra didesnis nei betono (šiuo atveju penkis kartus). Plieno sluoksnio storis išlieka nepakitęs. Redukavę skerspjūvį, galime taikyti klasikinės medžiagų mechanikos formules. Apskaičiuojame tokio skerspjūvio svorio centrą ir inercijos momentą svorio centro atžvilgiu: $y_{c,i} = 93,7 \text{ mm}$ ir $I_{red,i} = 7593 \text{ cm}^4$ (čia $i = 1$ žymime pirmąją iteraciją). Sluoksnių deformacijas ir įtempius žymėsime ϵ_{ik} ir σ_{kj} . Indeksas i parodo iteracijos numerį, o indeksas k – sluoksnio numerį.

Norėdami skaičiuoti toliau, remiamės pirmosiomis dviem prielaidomis.

1. Sluoksnių sukibimas skerspjuvyje yra idealus ir slinktis nepasireiškia.
2. Galioja plokščiųjų pjūvių hipotezė – deformacijų pasiskirstymas skerspjuvyje yra tiesinis.

Remdamiesi šiomis prielaidomis, pagal klasikinės medžiagų mechanikos formules apskaičiuojame skerspjuvio kreivę ir deformacijas kiekviename sluoksnyje:

$$\kappa_i = \frac{M}{E_{cm} \cdot I_{red,i}}, \quad (5.25)$$

$$\varepsilon_{ik} = \kappa_i \cdot y_{ik}, \quad (5.26)$$

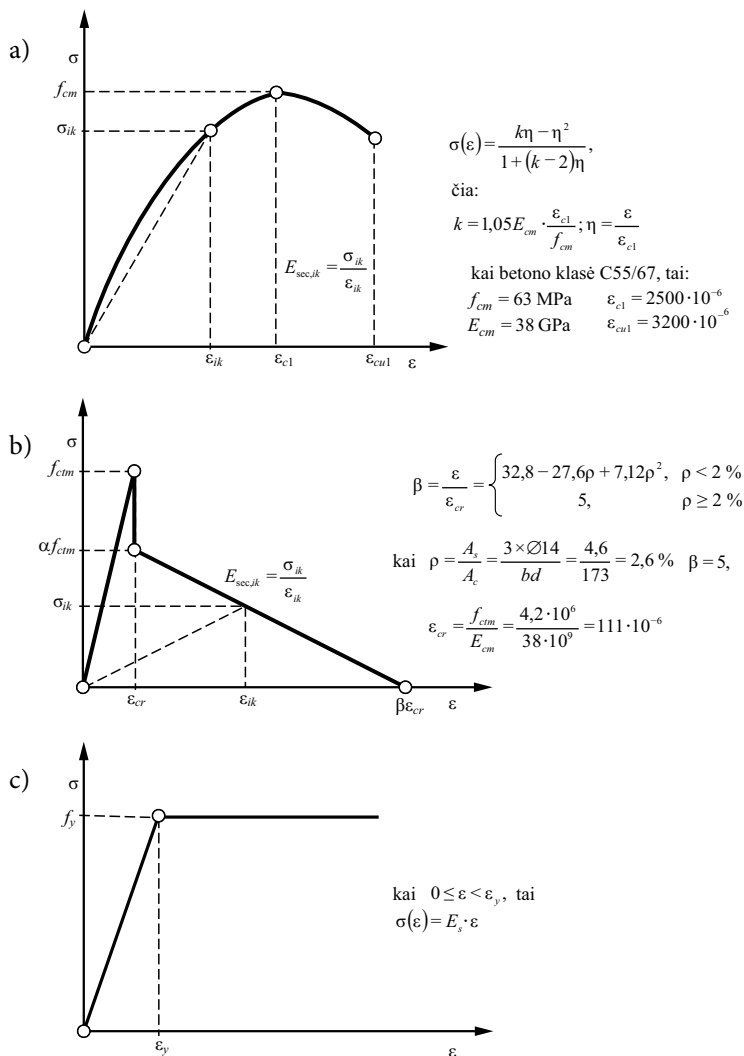
čia κ_i – skerspjuvio kreivis i -tosios iteracijos metu; M – veikiantis lenkimo momentas; E_{cm} – kirstinis (vidutinis) betono tamprumo modulis; $I_{red,i}$ – redukuoto skerspjuvio inercijos momentas i -tosios iteracijos metu; ε_{ik} – deformacija k -tajame sluoksnyje i -tosios iteracijos metu; y_{ik} – k -tojo sluoksnio atstumas nuo svorio centro i -tosios iteracijos metu.

Pirmosios iteracijos metu apskaičiuotas deformacijų pasiskirstymas skerspjuvyje parodytas 5.13 pav., c. Tam, kad apskaičiuotume įtempių pasiskirstymą, turime žinoti įtempių ir deformacijų ryšį medžiagoje. Tempiamoji armatūra iki takumo ribos gali būti modeliuojama, taikant Huko dėsnį (5.14 pav., c). Gniuždomajam betonui pritaikysime Europos normų siūlomą įtempių ir deformacijų priklausomybę. Ji išreiškia netiesinę gniuždomojo betono elgseną ir aprašoma parabolės lygtimi (5.14 pav., a). Tempiamajam betonui pritaikysime Kaklauskio (2001) pasiūlytą įtempių ir deformacijų priklausomybę (5.14 pav., b). Tai yra tempiamojo sustandėjimo diagrama lenkiamiesiems gelžbetoniniams elementams. Norėdami ją taikyti, turime pasinaudoti trečiąja prielaida.

3. Skaičiavimams taikome vidutinio pleišėjimo koncepciją.

Prisiminkime, kaip 3.6 poskyryje buvo gautos tempiamojo sustandėjimo diagramos. Elemento pailgėjimas buvo matuojamas bazėje L tarp taškų X_1 ir X_2 . Ši bazė apėmė tam tikrą supleišėjusio elemento ruožą. Todėl tempiamojo sustandėjimo diagrama rodo tam tikrus vidutinius tempiamojo betono įtempius ruožuose tarp plyšių. Kitame šios knygos poskyryje bus nagrinėjama *diskretaus pleišėjimo* samprata, leidžianti įvertinti kiekvieno atskiرو plyšio susidarymą.

Kai žinomos armatūros, tempiamojo sustandėjimo ir gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų diagramos, galima nustatyti kiekviename skerspjuvio sluoksnyje susidarančius įtempius: apskaičiuotos deformacijos reikšmę ε_{ik} atitinka įtempiai σ_{ik} . Gautas įtempių pasiskirstymas skerspjuvyje, atlikus pirmąją iteraciją, parodytas 5.13 pav., c. Tempiamajam sluoksniui pasiekus ribinę deformaciją $\beta \varepsilon_{cr}$, sluoksnis laikomas visiškai supleišėjusiu, t. y. įtempiai sluoksnyje lygūs 0.



5.14 pav. Sluoksnių modelyje taikomos medžiagų įtempių ir deformacijų diagramos: a – gniuždomojo betono; b – tempiamojo sustandėjimo; c – armatūros

Atliekant kitas iteracijas, įvertinamos netiesinės medžiagų savybės ir plyšių įtaka elemento standumui. Tuo tikslu perskaičiuojamas kiekvieno sluoksnio standumas, taikant i -tosios iteracijos k -tojo sluoksnio tamprumo modulį $E_{sec,ik}$ (5.14 pav., a ir b):

$$E_{sec,21} = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} = \frac{-29,9 \cdot 10^6}{-815 \cdot 10^{-6}} = 36,7 \text{ GPa}; \quad E_{sec,22} = \frac{\sigma_{12}}{\varepsilon_{12}} = \frac{-22,7 \cdot 10^6}{-602 \cdot 10^{-6}} = 37,7 \text{ GPa};$$

$$E_{sec,23} = \frac{\sigma_{13}}{\varepsilon_{13}} = \frac{-15,0 \cdot 10^6}{-390 \cdot 10^{-6}} = 38,5 \text{ GPa}; \quad E_{sec,24} = \frac{\sigma_{14}}{\varepsilon_{14}} = \frac{-6,9 \cdot 10^6}{-177 \cdot 10^{-6}} = 39,0 \text{ GPa};$$

$$E_{\text{sec},25} = \frac{\sigma_{15}}{\varepsilon_{15}} = \frac{1,4 \cdot 10^6}{37 \cdot 10^{-6}} = 38,0 \text{ GPa}; \quad E_{\text{sec},26} = \frac{\sigma_{16}}{\varepsilon_{16}} = \frac{2,3 \cdot 10^6}{248 \cdot 10^{-6}} = 9,27 \text{ GPa};$$

$$E_{\text{sec},27} = \frac{\sigma_{17}}{\varepsilon_{17}} = \frac{0,7 \cdot 10^6}{460 \cdot 10^{-6}} = 1,5 \text{ GPa}; \quad E_{\text{sec},28} = \frac{\sigma_{18}}{\varepsilon_{18}} = \frac{112 \cdot 10^6}{587 \cdot 10^{-6}} = 190 \text{ GPa};$$

$$E_{\text{sec},29} = \frac{\sigma_{19}}{\varepsilon_{19}} = \frac{0}{709 \cdot 10^{-6}} = 0 \text{ GPa}.$$

Remdamiesi pasikeitusiu kiekvieno sluoksnio standumu, vėl gauname redukuotą vienalytį skerspįvį, kurio kirstinis (vidutinis) tamprumo modulis $E_{cm} = 38 \text{ GPa}$. Sluoksnių pločiai pasikeičia proporcingai deformacijos modulių $E_{\text{sec},ik}/E_{cm}$ santykiui:

$$b_{21} = b_{11} \cdot \frac{E_{\text{sec},21}}{E_{cm}} = 100 \cdot \frac{36,7}{38} = 96,6 \text{ mm}; \quad b_{22} = b_{12} \cdot \frac{E_{\text{sec},22}}{E_{cm}} = 100 \cdot \frac{37,7}{38} = 99,2 \text{ mm};$$

$$b_{23} = b_{13} \cdot \frac{E_{\text{sec},23}}{E_{cm}} = 100 \cdot \frac{38,5}{38} = 101,3 \text{ mm}; \quad b_{24} = b_{14} \cdot \frac{E_{\text{sec},24}}{E_{cm}} = 100 \cdot \frac{39}{38} = 102,6 \text{ mm};$$

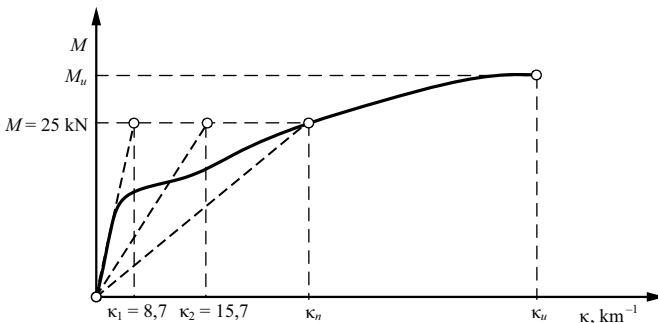
$$b_{25} = b_{15} \cdot \frac{E_{\text{sec},25}}{E_{cm}} = 100 \cdot \frac{38}{38} = 100 \text{ mm}; \quad b_{26} = b_{16} \cdot \frac{E_{\text{sec},26}}{E_{cm}} = 100 \cdot \frac{9,27}{38} = 24,4 \text{ mm};$$

$$b_{27} = b_{17} \cdot \frac{E_{\text{sec},27}}{E_{cm}} = 100 \cdot \frac{1,5}{38} = 3,9 \text{ mm}; \quad b_{28} = b_{18} \cdot \frac{E_{\text{sec},28}}{E_{cm}} = 100 \cdot \frac{190}{38} = 500 \text{ mm};$$

$$b_{29} = b_{19} \cdot \frac{E_{\text{sec},29}}{E_{cm}} = 100 \cdot \frac{0}{38} = 0 \text{ mm}.$$

Redukavus skerspįvį, vėl apskaičiuojamas svorio centras ir inercijos momentas svorio centro atžvilgiu: $y_{c2} = 117,7 \text{ mm}$ ir $I_{\text{red},2} = 4202 \text{ cm}^4$ (5.13 pav., d). Toliau skaičiavimai kartojami analogiškai pirmajam žingsniui.

Schemiškai pirmosios dvi iteracijos parodytos 5.15 pav. Toliau skaičiuojant kreivis artėja prie tam tikros reikšmės κ_n . Sluoksnių metodo algoritmą pritaikius visoms nustatytoms apkrovos pakopoms, galima gauti elemento momentų ir kreivių diagramą. Reikėtų pažymėti, kad, didinant sluoksnių skaičių, kreivis nustatomas su mažesne



5.15 pav. Sluoksnių metodo gauti rezultatai

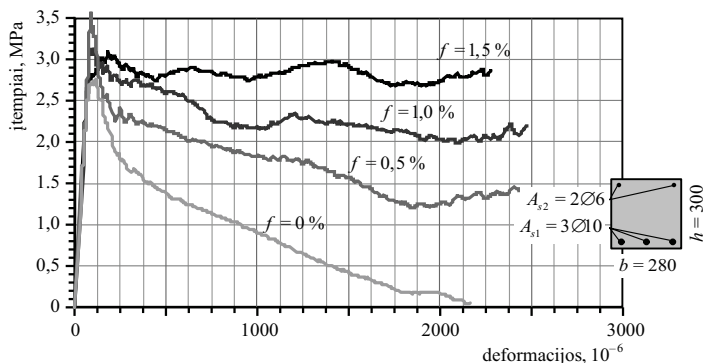
paklaida. Skaičiavimo praktika rodo, kad dažniausiai skerspjūvį užtenka padalyti į 20–30 sluoksnių, žinoma, tokiu atveju skaičiavimai vykdomi kompiuterinėmis programomis.

Sluoksnių modelis gali būti taikomas ir plieno plaušu armuotiems elementams, šiuo atveju taip pat reikia turėti patikimus medžiagų modelius. 3.2 poskyryje buvo parodyta, kad armuojant betoną plieno plaušu, gniuždomoji įtempių ir deformacijų diagramos dalis pakinta nedaug. Kita vertus, tempiamojo sustandėjimo diagrama dėl plieno plaušo įtakos pakinta iš esmės. Iš trijų medžiagoms taikytų diagramų (5.14 pav.) tempiamojo sustandėjimo diagrama yra sunkiausiai eksperimentiškai nustatoma. Jos formai didelę įtaką daro gelžbetoninio elemento armavimo procentas, betono tempiamasis stipris, armatūros ir betono sukibimo kokybė, betono susitraukimo reiškiny, naudingasis skerspjūvio aukštis ir armatūros tamprumo modulis, o betoną papildomai armavus plieno plaušu – ir plaušo kiekis bei tipas. Visų šių veiksnių poveikis yra kompleksinis, todėl nustatyti tempiamojo sustandėjimo priklausomybę eksperimentiškai yra sudėtinga. Dažniausiai atliekami tempiamųjų gelžbetoninių prizmių bandymai, aptarti 3.6 poskyryje, tačiau šių bandymų metu gautų tempiamojo sustandėjimo diagramų taikymas lenkiamiems gelžbetoniniams elementams ne visada yra adekvatus.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto profesorius G. Kaklauskas pasiūlė originalų ir naują pasaulyje metodą, kuriuo remiantis tempiamojo sustandėjimo diagramas galima gauti išbandžius lenkiamuosius gelžbetoninius elementus. Šis metodas grindžiamas gelžbetonio deformavimosi *atvirkštinio* uždavinio samprata, kai pagal eksperimentines elemento momentų ir kreivių diagramas gaunama ieškomoji (iš anksto nežinoma) medžiagos įtempių ir deformacijų priklausomybė. *Tiesioginis* uždavinys yra įprastas statybinių konstrukcijų projektavimo praktikoje: turint medžiagų modelius (įtempių ir deformacijų diagramas), nustatomas konstrukcijos įtempių ir deformacijų būvis. *Atvirkštinio* uždavinio sprendimo tikslas – gauti patikimas medžiagų įtempių ir deformacijų diagramas, kurias vėliau galima pritaikyti projektuojant konstrukcijas.

Atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmas remiasi sluoksnių modeliu. Sprędami tiesioginį uždavinį, nežinomuojau laikėme skerspjūvio kreivį, veikiant tam tikrai apkrovai. Sprendžiant atvirkštinį uždavinį, momentų ir kreivių priklausomybė yra žinoma (nustatoma eksperimentiškai), o nežinomu dydžiu laikoma tempiamojo sustandėjimo diagrama. Taip pat žinomos yra gniuždomojo betono bei armatūros įtempių ir deformacijų priklausomybės. Skaičiavimas atliekamas pakopomis didinant apkrovą. Kiekvienoje apkrovos pakopoje tiesioginis uždavinys sprendžiamas (iteracijomis) tol, kol randama nežinoma tempiamojo sustandėjimo diagramos taško reikšmė. Nustatyta diagramos dalis taikoma kitoje, t. y. aukštesnėje, apkrovos pakopoje. Tokiu būdu randami visi tempiamojo sustandėjimo diagramos taškai. Gautąją diagramą pritaikius sluoksnių modelyje (t. y. sprendžiant tiesioginį uždavinį), gaunama momentų ir kreivių diagrama, kuri sutampa su eksperimentine.

Atvirkštiniu būdu gautos tempiamojo sustandėjimo diagramos taikomos netiesinėse baigtinių elementų programose, analizuojant dispersiškai armuotų konstrukcijų laikomąją galią ir deformacijas. 5.16 pav. parodytos tipinės atvirkštiniu būdu gautos tempiamojo sustandėjimo diagramos. Jos gautos eksperimentinėms gelžbetoninėms sijoms, armuotoms skirtingu plieno plaušo kiekiu. Gautosios tempiamojo sustandėjimo diagramos aiškiai parodo plieno plaušo įtaką gelžbetoninių konstrukcijų deformacinėms savybėms.



5.16 pav. Tempiamojo sustandėjimo diagramos, gautos sprendžiant atvirkštinį uždavinį

Sluoksnių metodu galima tiksliai apskaičiuoti konstrukcijos deformacijas (kreivius ir įlinkius), tačiau juo neįmanoma numatyti konstrukcijos pleišėjimo pobūdžio (atstumo tarp plyšių ir plyšių pločio). Kitame knygos poskyryje bus pristatytas *diskretaus pleišėjimo* metodas, skirtas gelžbetoninių konstrukcijų pleišėjimo analizei.

5.5. Diskretaus pleišėjimo modelis

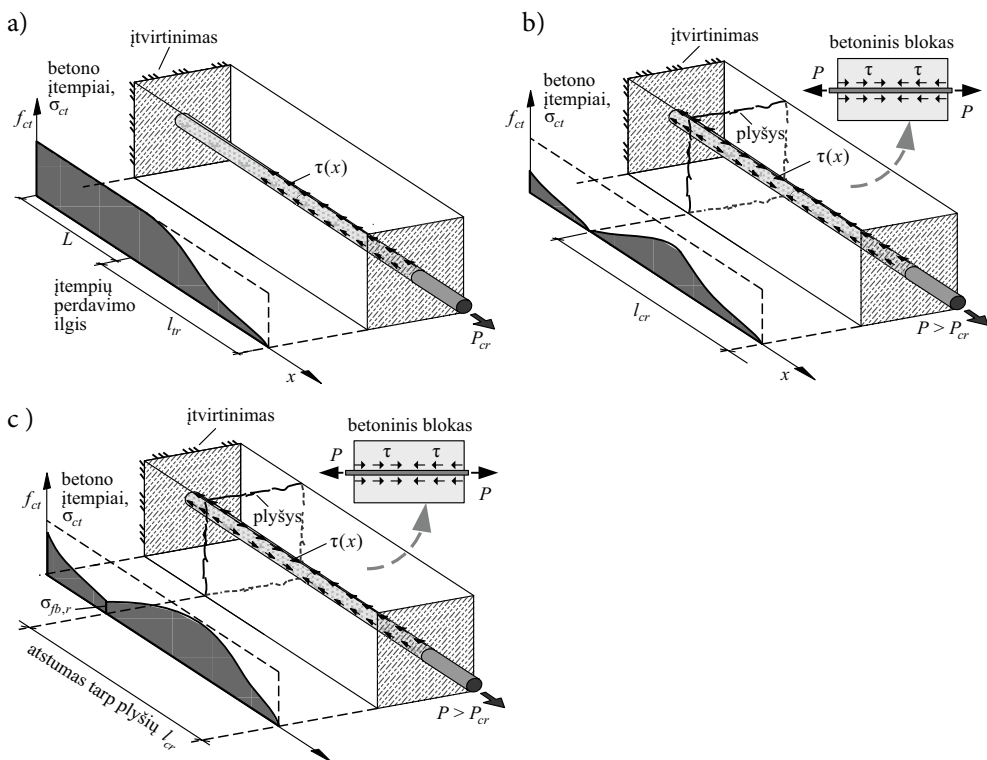
Pleišėjimas yra vienas didžiausių betoninių ir armuoto betono konstrukcijų trūkumų. Susidarant plyšiams, pažeidžiama betono struktūra, gali prasidėti armatūros korozija – šie reiškiniai ypač žalingi konstrukcijų eksploatacijos ir ilgaamžiškumo požiūriu. Plyšiai betone dažnai atsiveria ne tik nuo išorinės apkrovos, bet ir dėl susitraukimo ar temperatūros poveikių. Projektavimo normos riboja maksimalų atsi-veriančių plyšių plotį, atsižvelgiant į konstrukcijos tipą ir aplinkos agresyvumo klasę.

Šiame poskyryje aptariamas diskretaus pleišėjimo modelis realiai atspindi armuoto betono pleišėjimo procesą ir gali būti taikomas tiek konstrukcijos deformacijų, tiek pleišėjimo analizei. Šio poskyrio pabaigoje pateikiamas supaprastintasis modelis, kuriuo nesunkiai galima įvertinti tiek gelžbetoninių, tiek plieno plaušu armuotų konstrukcijų pleišėjimo procesą.

5.5.1. Strypinės armatūros sukibimas su betonu

Armutojo betono diskretaus pleišėjimo proceso analizė yra pagrįsta armatūros ir betono sąveikos modeliu. Gelžbetoninėse konstrukcijose tempiamojoje zonoje betonas pleišėja, o tempimo įtempius perima armatūra. Armatūros ir betono sąlyčio zonoje pasireiškia *įtempių perdavimo* reiškinys, kurį galima pademonstruoti paprastu pavyzdžiu. Panagrinėkime viename gale standžiai įtvirtintą gelžbetoninę prizmę (5.17 pav.). Laisvajame gale iš prizmės jėga P traukiamas armatūros strypas.

Dėl sukibimo reiškinio strypas tempimo jėgą perduoda aplinkui esančiam betonui. Detaliai armatūros ir betono sukibimas nagrinėjamas 10 skyriuje. Kaip parodyta 5.17 pav., a, tolstant nuo laisvojo prizmės krašto, tempimo įtempiai betone palaipsniui didėja. Didinant jėgą P , galima pasiekti tempimo įtempius betone, lygius betono tempiamajam stipriui $\sigma_{ct} = f_{ct}$ (atitinkamai jėgą pažymėsime $P = P_{cr}$). Atstumas nuo laisvojo elemento galo iki pjūvio, kuriame pasiekiami tokie įtempiai, dažnai vadinamas *įtempių perdavimo ilgiu* (angl. *transfer length*). Įtempių perdavimo ilgis 5.17 pav., a, pažymėtas l_{tr} .



5.17 pav. Įtempių perdavimo samprata ir tempiamojo elemento pleišėjimas: a – įtempių betone pasiskirstymas prieš susidarant plyšiui; b – įtempių betone persiskirstymas atsivėrus plyšiui elemente be plieno plaušo; c – įtempių betone persiskirstymas atsivėrus plyšiui elemente su plieno plaušu

Prizmės ruožas L , kuriame pasiektas betono tempiamasis stipris, yra ribinės pusiausvyros būsenos, t. y. bet kuriame šio ruožo pjūvyje gali atsiverti plyšys. Nedaug padidinus jėgą P , silpniausiam ruožo L pjūvyje atsiveria plyšys ir įvyksta betono įtempių persiskirstymas: gelžbetoninio elemento plyšio vietoje betono įtempiai tampa artimi nuliui (prisiminkime betono plyšio pločio ir įtempių plyšyje diagramas), o dispersiškai armuoto elemento atveju plyšio vietoje įtempiai tampa lygūs liekamųjų įtempių $\sigma_{fb,r}$ reikšmei (5.17 pav., b ir c). Gretimuose pjūviuose betonas taip pat nusikrauna. Kaip parodyta 5.17 pav., b ir c, greta atsivėrusio plyšio pasikeičia sukibimo įtempių veikimo kryptis, kartu ir tempimo įtempių pasiskirstymas betone.

Iš nagrinėto pavyzdžio galime pastebėti, kad įtempių pasiskirstymas betone (ir armatūroje) priklauso nuo liekamųjų įtempių plyšyje $\sigma_{fb,r}$ ir sąlyčio zonoje su armatūra susidarančių sukibimo įtempių τ . Kaip parodyta 5.18 pav., supleišėjusią gelžbetoninę prizmę veikianti išorinė tempimo jėga P sukelia tris įrašų komponentes: įrašą, kurią perima armatūros strypas (N_s), įrašą, perduodamą per plyšį ($N_{c,fb}$), ir įrašą, perduodamą per sukibimo įtempius nuo armatūros betonui ($N_{c,\tau}$). Žinoma, bendra šių įrašų suma kiekviename pjūvyje yra lygi išorinei apkrovai:

$$N_{c,fb} + N_{c,\tau}(x) + N_s(x) = P. \quad (5.27)$$

Įrašą $N_{c,fb}$ galima apskaičiuoti žinant liekamųjų įtempių plyšyje reikšmę:

$$N_{c,fb} = \sigma_{fb,r} \cdot A_c, \quad (5.28)$$

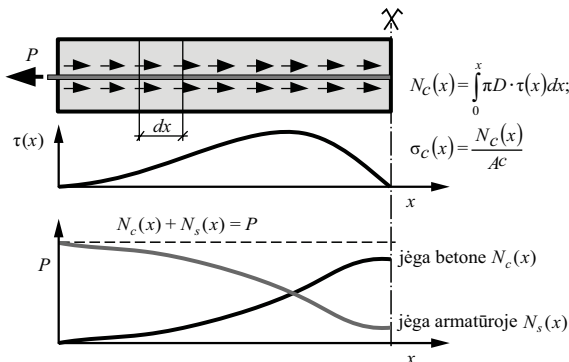
čia A_c – betono skerspjūvio plotas.

Įrašą $N_{c,\tau}$ apskaičiuojama dauginant sukibimo įtempių reikšmę iš strypo paviršiaus ploto. Bendruoju atveju, kai sukibimo įtempiai per strypo ilgį x yra pasiskirstę netolygiai, galima parašyti:

$$N_{c,\tau}(x) = \int_0^x \pi D \cdot \tau(x) dx. \quad (5.29)$$

Įrašą armatūroje apskaičiuojama iš pusiausvyros sąlygos:

$$N_s(x) = P - N_{c,fb} - N_{c,\tau}(x). \quad (5.30)$$



5.18 pav. Ašinių įrašų pasiskirstymas gelžbetoniniame bloke

Žinant įrašas armatūroje ir betone, galima apskaičiuoti armatūros ir betono įtempius bei deformacijas bet kuriame elemento pjūvyje. Remiantis 5.28 ir 5.29 formulėmis galima sudaryti lygtį ir rasti koordinatę x (arba įtempių perdavimo ilgį), kurioje pasiekiamas betono tempiamasis stipris:

$$\frac{N_{c,fb} + N_{c,\tau}(x)}{A_c} = f_{ct}, \quad (5.31)$$

čia A_c – betono skerspjūvio plotas; f_{ct} – betono tempiamasis stipris.

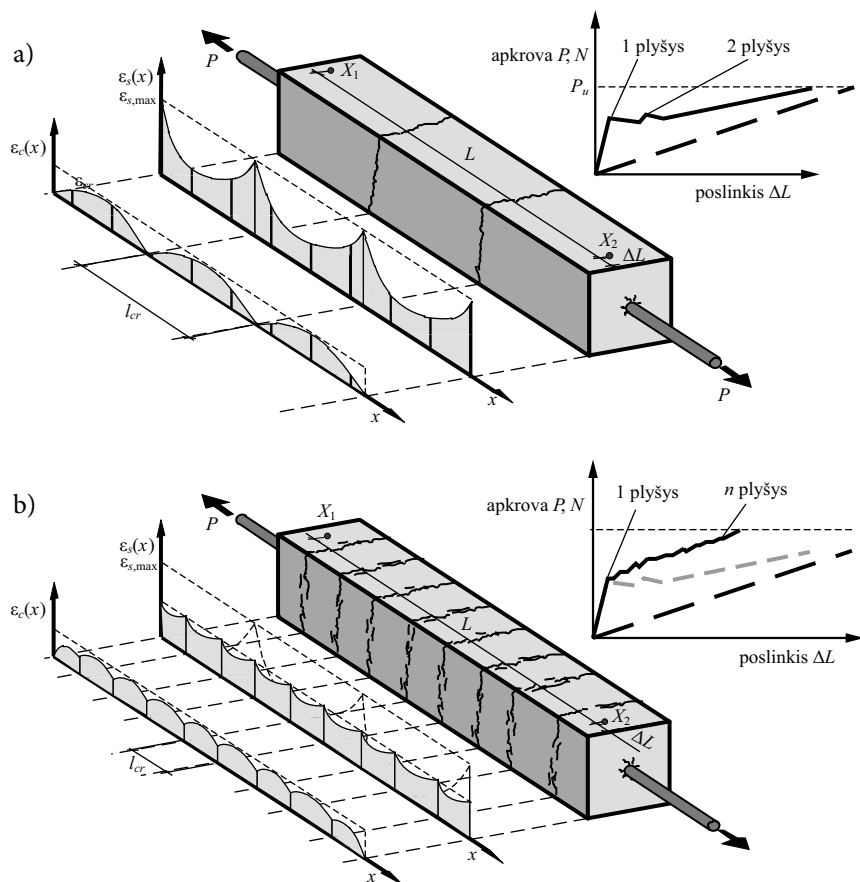
Pažymėtina, kad, norint taikyti šį modelį, būtina žinoti plieno plaušu armuoto betono liekamųjų įtempių plyšyje (liekamojo stiprio) reikšmę bei sukibimo įtempių funkciją. Detaliai šie parametrai aptariami trečiame ir dešimtame knygos skyriuose.

5.5.2. Diskretusis elementų pleišėjimas

Trečiajame knygos skyriuje, nagrinėjant gelžbetoninio elemento pleišėjimą, buvo vertinamos tam tikros *vidutinės* supleišėjusio elemento deformacijos. Taikydami diskretaus pleišėjimo modelį galime nustatyti deformacijų pasiskirstymą šiuose elementuose, atsiveriant kiekvienam plyšiui.

Imkime dvi vienodas tempiamas gelžbetonines prizmes, kurių viena papildomai armuota plieno plaušu. Matuojame elementų pailgėjimą ΔL tarp dviejų fiksuotų taškų X_1 ir X_2 (5.19 pav.). Palaipsniui didindami apkrovą pastebėsime, kad gelžbetoniniame elemente atsiveriant kiekvienam plyšiui staiga padidėja poslinkis ΔL . Šis staigus pailgėjimas susijęs su deformacijų persiskirstymu atsiveriant plyšiui. Sakykime, kad bandomas elementas yra gana trumpas ir jame atsiveria tik du plyšiai – jų susidarymą galime aiškiai pamatyti jėgos ir poslinkio grafike. Kartu galima įvertinti armatūros ir betono deformacijų pasiskirstymą elemente: betono deformacija plyšyje yra artima nuliui, o armatūroje pasiekia maksimalią reikšmę (5.19 pav., a).

Nagrinėjant armatūros sukibimą su betonu, 5.17 pav. buvo parodyta, kad egzistuoja tam tikras įtempių perdavimo ilgis l_{tr} , reikalingas betono tempiamajam stipriui pasiekti. Galime padaryti išvadą, kad plyšys gelžbetoniniame elemente negali atsiverti mažesniu nei l_{tr} atstumu nuo apkrauto armatūros galo. Kai pasiekiamas betono tempiamasis stipris, gelžbetoniniame elemente gali atsiverti plyšys, dalydamas šį elementą į atskirus blokus. Kiekvieno bloko ilgis būtų ne mažesnis kaip l_{tr} . Remdamiesi tokiais samprotavimais galime padaryti kitą svarbią išvadą, kad gelžbetoniniame elemente atstumas tarp plyšių l_{cr} yra neapibrėžtas, tačiau turi patekti į tam tikrą specifinį intervalą: $l_{tr} \leq l_{cr} \leq 2l_{tr}$. Kai bloko ilgis yra mažesnis nei $2l_{tr}$, blokas į dvi dalis neskyla, kai bloko ilgis, nors ir nedaug, viršija $2l_{tr}$, atsiveriant plyšiui blokas skyla į dvi dalis. Pasiekus stabilių plyšių stadiją, didinant apkrovą auga tik armatūros deformacija, nes betonas jau būna suskilęs į tokio dydžio blokus, kurių ilgis yra mažesnis už du įtempių perdavimo ilgius.



5.19 pav. Prizmių pleišėjimas ir deformacijų pasiskirstymas tarp plyšių: a – gelžbetoninė prizmė; b – plieno plaušu armuota gelžbetoninė prizmė

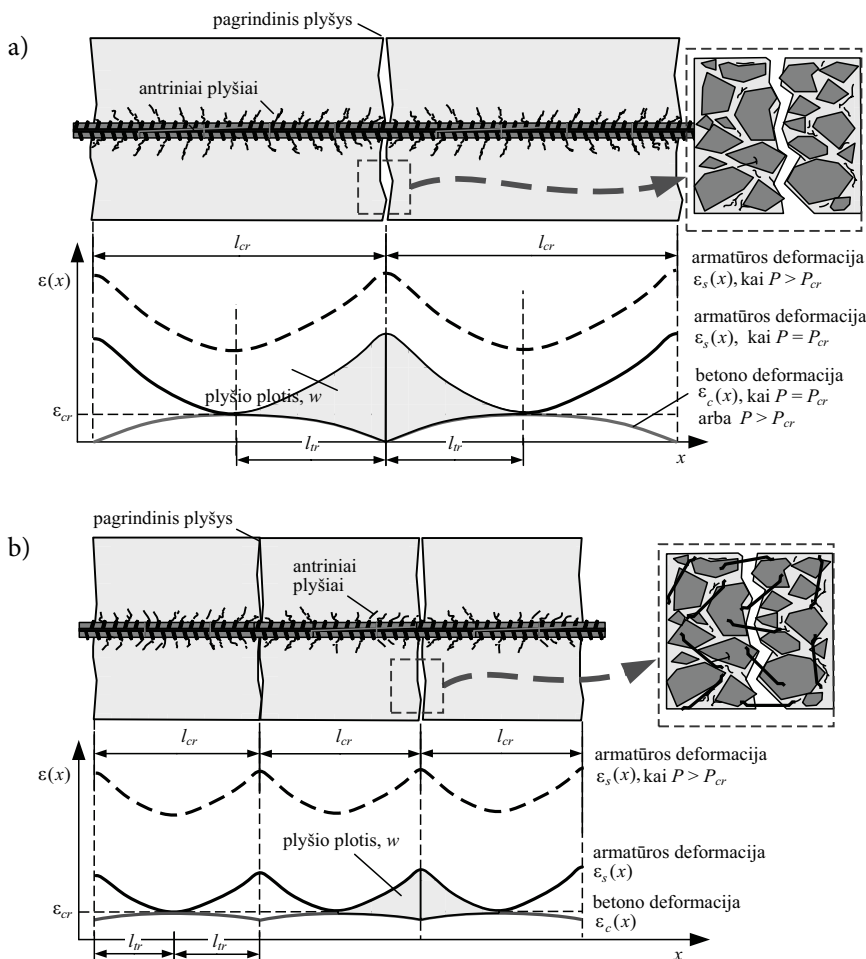
Kai gelžbetoninis elementas papildomai armuotas plieno plaušu, pirmojo plyšio atsiradimo apkrova praktiškai sutampa su įprastojo gelžbetonio prizme, nes plieno plaušu armuoto betono tempiamasis stipris pakinta labai nedaug (žr. trečiąjį skyrių). Toliau augant apkrovai, gelžbetoninėje prizmėje pastebimas staigus poslinkio padidėjimas, tačiau to nėra plieno plaušu armuotame elemente. Tai galima paaiškinti tuo, kad dėl plieno plaušo poveikio atsiveriančių plyšių plotis yra kur kas mažesnis. Be to, plieno plaušas perima tempimo įtempius plyšyje ir armatūros deformacijos tampa mažesnės (5.19 pav., b). Kitas su plieno plaušu susijęs efektas yra tas, kad labai sumažėja atstumai tarp plyšių – taip vyksta todėl, kad, plyšyje veikiant liekamiesiems įtempiams $\sigma_{fb,r}$ reikalingas daug mažesnis įtempių perdavimo ilgis betono tempiamajam stipriui pasiekti.

Kai žinomas atstumas tarp plyšių bei armatūros ir betono deformacijų pasiskirstymas supleišėjusiame elemente, galima apskaičiuoti ir atsiveriančių plyšių plotį.

Plyšio plotis apibrėžiamas kaip armatūros ir betono poslinkių skirtumas tarp dviejų gretimų plyšių:

$$w = \int_0^{l_{cr}} [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] dx. \quad (5.32)$$

Maksimaliam plyšio pločiui apskaičiuoti nagrinėjamas didžiausio ilgio betoninis blokas, arba $l_{cr} = 2l_{tr}$. Grafinė plyšio pločio išraiška parodyta 5.20 pav. – tai yra plotas, kurį riboja armatūros ir betono deformacijų pasiskirstymo funkcijos. Kaip matyti iš 5.20 pav., kai gelžbetoninis elementas papildomai armuotas plieno plaušu, gaunamos daug mažesnės plyšio pločio reikšmės – daugiausia tam įtakos turi sumažėjęs atstumas tarp plyšių.



5.20 pav. Deformacijų pasiskirstymas ruožuose tarp plyšių: a – gelžbetoninėje prizmėje; b – plieno plaušu armuotoje gelžbetoninėje prizmėje

Kai žinomas armatūros ir betono deformacijų pasiskirstymas supleišėjusiame elemente, galima apskaičiuoti ir bendrą elemento pailgėjimą:

$$\Delta L = \int_0^L \varepsilon_s(x) dx, \quad (5.33)$$

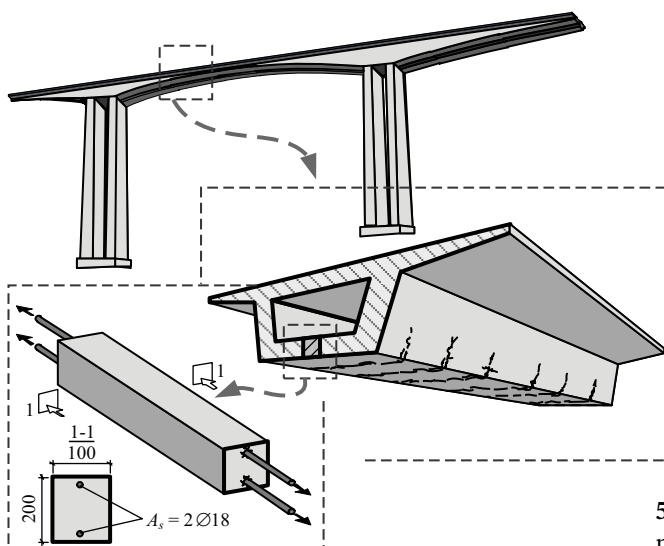
čia L – gelžbetoninio elemento ilgis.

Norint apskaičiuoti šį integralą, pirmiausia reikia nustatyti įrašų pasiskirstymą elemente (5.27–5.31 formulės). Kaip minėta, tam būtina žinoti plieno plaušu armuoto betono liekamųjų įtempių plyšyje (liekamojo stiprio) reikšmę bei sukibimo įtempių funkciją. Tikslus šių funkcijų nustatymas – gana sudėtingas uždavinys, todėl praktiniams skaičiavimams dažnai taikomi tam tikri supaprastinimai. Toliau pateikiamas nesudėtingas diskrečiųjų plyšių metodas, kuriame sukibimo įtempių pasiskirstymas aprašomas paprasta funkcija: $\tau(x) = \text{const}$, o liekamieji įtempiai apskaičiuojami kaip ir 5.3 poskyryje pateiktu supaprastintuoju metodu.

5.5.3. Supaprastintasis diskretaus pleišėjimo modelis

Diskretaus pleišėjimo modelį pritaikysime gelžbetoninės, dėžinio skerspjūvio tilto sijos pleišėjimui apskaičiuoti: rasime vidutinius atstumus tarp plyšių, maksimalų atstumą tarp plyšių ir maksimalų plyšio plotį. Nagrinėjama sija parodyta 5.21 pav. Skerspjūvio tempiamojoje lentynoje deformacijos skerspjūvio aukštyje pasiskirsto beveik tolygiai, todėl lentyną galima laikyti tempiamuoju elementu. Iš jos išpjovę armatūros žingsnio ilgio ruožą, gauname centriškai tempiamą gelžbetoninę prizmę (5.21 pav.).

Nagrinėsime du atvejus: kai tilto sija yra įprastojo gelžbetonio ir kai į betono mišinį įdėta 1 % plieno plaušo. Naudojamas plaušas užlenktais galais, kurio ilgio



5.21 pav. Tilto sijos skaičiavimas diskrečiųjų plyšių metodu

ir skersmens santykis sudaro $l_f / d_f = 60$. Abiem atvejais naudojama betono klasė C55/67. Betono tempiamasis stipris $f_{ctm} = 4,2$ MPa, kirstinis tamprumo modulis $E_{cm} = 38$ GPa, skerspjūvio plotas $A_c = 195$ cm². Armatūros skerspjūvio plotas $A_s = 5,09$ cm², tamprumo modulis $E_s = 190$ GPa. Reikia apskaičiuoti maksimalų atstumą tarp plyšių ir maksimalų atsiveriančių plyšių plotį, kai gelžbetoninei prizmei tenkanti apkrova sudaro $P = 150$ kN.

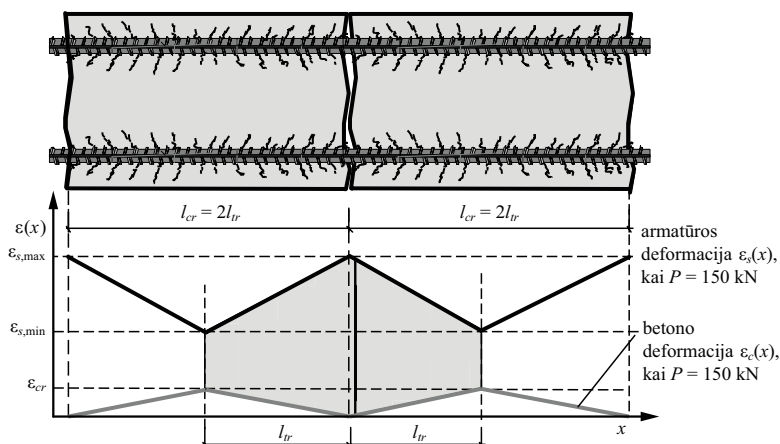
Kaip minėta, diskrečių plyšių metodu gaunamų rezultatų adekvatumas daugiausia priklauso nuo armatūros ir betono sąveikos idealizavimo. Apskaičiuojant plyšio plotį ir nustatant strypų inkaravimo ilgį, dažnai galima taikyti tam tikrus pastovius sukibimo įtempius. Tikslūs skaičiavimo rezultatai gaunami sukibimo įtempius susiejus su betono tempiamuoju stipriu. Skaičiavimo pavyzdyje tarsime, kad vidutiniai sukibimo įtempiai yra du kartus didesni už betono tempiamąjį stiprį: $\tau(x) = \text{const} = 2f_{ct}$. Tą pačią reikšmę taikysime tiek įprastajam, tiek plieno plaušu armuotam betonui (10 skyriuje $\tau(x) = 2f_{ct}$ reikšmė yra pagrindžiama).

Skaičiuoti pradedame įprastojo betono tilto sijai. Pirmiausia nustatysime gelžbetoninės prizmės (5.21 pav.) pleišėjimo apkrovą:

$$P_{cr} = f_{ctm} \cdot A_c + \frac{E_s}{E_{cm}} f_{ctm} \cdot A_s =$$

$$= 4,2 \cdot 10^6 \cdot 195 \cdot 10^{-4} + \frac{190}{38} \cdot 4,2 \cdot 10^6 \cdot 5,09 \cdot 10^{-4} = 92,6 \text{ kN}.$$

Gauta pleišėjimo apkrova yra mažesnė už veikiančią išorinę jėgą, $P > P_{cr}$, todėl gelžbetoniniame elemente atsiveria plyšiai. Pleišėjimo pobūdžiui įvertinti nustatysime įtempių perdavimo ilgį l_{tr} . Tariame, kad plyšiai elementą padalija į $2l_{tr}$ ilgio blokus, kurie yra ribinės pusiausvyros būsenos, t. y. blokų centre tempimo įtempiai betone pasiekia betono tempiamąjį stiprį (ir pleišėjimo deformaciją, 5.22 pav.).



5.22 pav. Deformacijų pasiskirstymas supleišėjusioje gelžbetoninėje prizmėje, veikiant išorinei apkrovai $P = 150$ kN

Įtempių perdavimo ilgis l_{tr} išreiškia tokį atstumą, per kurį įtempiai betone nuo nulio (plyšyje liekamųjų įtempių įprastajam betonui nevertiname) pasiekia tempiamąjį stiprį. Betone veikiančius įtempius galima rasti ašinę jėgą padalijus iš betono skerspjūvio ploto. Norėdami apskaičiuoti šią jėgą taikysime 5.29 formulę. Tarsime, kad elementas armuotas n strypų ir jų sąlyčio su betonu ruože veikia pastovūs sukibimo įtempiai $\tau(x) = \text{const} = 2f_{ct}$. Remdamiesi tokia prielaida, 5.29 formulę per-tvarkome taip:

$$N_c(x) = \int_0^x \pi D \cdot \tau(x) dx = n \cdot \pi D \cdot 2f_{ct} \cdot \int_0^x dx = n \cdot \pi D \cdot 2f_{ct} \cdot x \Big|_0^x = n \cdot \pi D \cdot 2f_{ct} \cdot x.$$

Gavome tiesės lygtį, rodančią, kaip tolstant nuo plyšio auga ašinė įrąža betone. Žinome, kad bloko centre pasiekiamas betono tempiamasis stipris, todėl:

$$\begin{aligned} N_c(x=l_{tr}) &= f_{ctm} \cdot A_c, \\ n \cdot \pi D \cdot 2f_{ct} \cdot l_{tr} &= f_{ctm} \cdot A_c. \end{aligned}$$

Išreiškiamas įtempių perdavimo ilgis:

$$l_{tr} = \frac{f_{ctm} \cdot A_c}{n \cdot \pi D \cdot 2f_{ctm}} = \frac{A_c}{n \cdot \pi D \cdot 2} = \frac{195 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,018 \cdot 2} = 0,086 \text{ m}. \quad (5.34)$$

Remiantis sąlyga $l_{tr} \leq l_{cr} \leq 2l_{tr}$, maksimalus atstumas tarp plyšių yra $l_{cr,\max} = 2l_{tr} = 17,2 \text{ cm}$, o minimalus – $l_{cr,\min} = l_{tr} = 8,6 \text{ cm}$. Vidutinis atstumas tarp plyšių sudarytų $l_{cr,m} = 1,5l_{tr} = 12,9 \text{ cm}$.

Tam, kad apskaičiuotume maksimalų atsiveriančių plyšių plotį, turime nustatyti armatūros ir betono deformacijų kitimą betoniniame bloke (žr. 5.32 formulę). Kai žinoma ašinė įrąža betone (plyšyje $N_c(x=0) = 0$; ties bloko viduriu $N_c(x=l_{tr}) = f_{ctm} \times A_c$), įrąža armatūroje galima rasti iš horizontaliųjų jėgų pusiausvyros lygties. Ašinė įrąža betone ir armatūroje kinta tiesiškai, todėl betono ir armatūros deformacijų pasiskirstymo funkcijoms nustatyti pakanka turėti po dvi įrąžos reikšmes plyšyje ir bloko viduryje.

Laikant, kad betono deformacija plyšyje $\varepsilon_c(x=0) = 0$, o bloko viduryje $\varepsilon_c(x=l_{tr}) = \varepsilon_{cr}$, galima sudaryti betono deformacijų kitimo tiesės lygtį:

$$\varepsilon_c(x) = \frac{\varepsilon_{cr}}{l_{tr}} \cdot x. \quad (5.35)$$

Armatūros ašinė įrąža plyšyje $N_s(x=0) = P$, o ties bloko viduriu $N_s(x=l_{tr}) = P - N_c = P - f_{ctm} \times A_c$. Atitinkamai galime apskaičiuoti armatūros deformaciją plyšyje ir bloko viduryje: $\varepsilon_s(x=0) = N_s(x=0) / A_s E_s = \varepsilon_{s,\max}$ ir $\varepsilon_s(x=l_{tr}) = N_s(x=l_{tr}) / A_s E_s = \varepsilon_{s,\min}$. Pagal šiuos du charakteringuosius taškus sudarome armatūros deformacijų kitimo tiesės lygtį (5.22 pav.):

$$\varepsilon_s(x) = \varepsilon_{s,\max} - \frac{\varepsilon_{s,\max} - \varepsilon_{s,\min}}{l_{tr}} \cdot x. \quad (5.36)$$

Pagal 5.32 formulę apskaičiuojame maksimalų plyšio plotį (tarę, kad $l_{cr} = 2l_{tr}$):

$$\begin{aligned}
 w &= 2 \int_0^{l_{tr}} [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] dx = 2 \int_0^{l_{tr}} \left[\varepsilon_{s,\max} - \frac{\varepsilon_{s,\max} - \varepsilon_{s,\min}}{l_{tr}} \cdot x - \frac{\varepsilon_{cr}}{l_{tr}} \cdot x \right] dx = \\
 &= 2 \left[\varepsilon_{s,\max} x - \frac{\varepsilon_{s,\max} - \varepsilon_{s,\min}}{2l_{tr}} \cdot x^2 - \frac{\varepsilon_{cr}}{2l_{tr}} \cdot x^2 \right]_0^{l_{tr}} = \\
 &= 2 \left[\varepsilon_{s,\max} l_{tr} - \frac{\varepsilon_{s,\max} - \varepsilon_{s,\min}}{2l_{tr}} \cdot l_{tr}^2 - \frac{\varepsilon_{cr}}{2l_{tr}} \cdot l_{tr}^2 \right] = \\
 &= 2 \left[l_{tr} \left(\frac{\varepsilon_{s,\max} + \varepsilon_{s,\min} - \varepsilon_{cr}}{2} \right) \right] = 2 \left[0,086 \left(\frac{(1551 + 704 - 111) \cdot 10^{-6}}{2} \right) \right] = 0,18 \text{ mm},
 \end{aligned}$$

čia

$$\varepsilon_s(x=0) = \varepsilon_{s,\max} = \frac{P}{E_s A_s} = \frac{150 \cdot 10^3}{190 \cdot 10^9 \cdot 5,09 \cdot 10^{-4}} = 1551 \cdot 10^{-6},$$

$$\varepsilon_s(x=l_{tr}) = \varepsilon_{s,\min} = \frac{P - f_{ctm} \cdot A_c}{E_s A_s} = \frac{150 \cdot 10^3 - 4,2 \cdot 10^6 \cdot 195 \cdot 10^{-4}}{190 \cdot 10^9 \cdot 5,09 \cdot 10^{-4}} = 704 \cdot 10^{-6},$$

$$\varepsilon_c(x=l_{tr}) = \varepsilon_{cr} = \frac{f_{ctm}}{E_{cm}} = \frac{4,2 \cdot 10^6}{38 \cdot 10^9} = 111 \cdot 10^{-6}.$$

Taikant diskretaus pleišėjimo modelį, galima įvertinti ir plieno plaušo įtaką atstumui tarp plyšių ir plyšio pločiui. Pagal (5.11) formulę apskaičiuojame plieno plaušo faktorių:

$$RI = V_{fb} \cdot \frac{l_{fb}}{d_{fb}} \cdot \beta = 0,01 \cdot 60 \cdot 1 = 0,6.$$

Pagal (5.12) formulę nustatome dispersiškai armuoto betono liekamąjį stiprį:

$$f_{fb,r} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot RI = 0,25 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 8,4 \cdot 10^6 \cdot 0,6 = 1,51 \text{ MPa},$$

čia $\lambda_1 = 0,25$ – koeficientas, įvertinantis plaušo inkaravimo ilgį; $\lambda_2 = 1,2$ – koeficientas, įvertinantis plaušo išsidėstymą plyšyje; $\lambda_3 = 1,0$ – koeficientas, įvertinantis plaušo tarpusavio sąveiką; $\tau = 2f_{ct}$ – vidutiniai plieno plaušo ir betono sukibimo įtempiai.

Įtempių perdavimo ilgiui l_{tr} apskaičiuoti pritaikysime modifikuotą 5.34 formulę. Dėl liekamųjų įtempių plyšyje efekto reikės mažesnio atstumo (tolstant nuo plyšio) betono tempiamajam stipriui pasiekti, todėl 5.34 formulę modifikuojame taip:

$$l_{tr} = \frac{(f_{ctm} - f_{fb,r}) \cdot A_c}{n \cdot \pi D \cdot 2 f_{ctm}} = \frac{(4,2 \cdot 10^6 - 1,51 \cdot 10^6) \cdot 195 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,018 \cdot 2 \cdot 4,2 \cdot 10^6} = 0,055 \text{ m}.$$

Vadinasi, kai betonas papildomai armuotas plieno plaušu, maksimalus galimas atstumas tarp plyšių yra $l_{cr,\max} = 2l_{tr} = 11,0 \text{ cm}$; minimalus atstumas tarp plyšių yra $l_{cr,\min} = l_{tr} = 5,5 \text{ cm}$. Vidutinis atstumas tarp plyšių sudarytų $l_{cr,m} = 1,5l_{tr} = 8,3 \text{ cm}$.

Plyšio pločiui skaičiuoti taikysime tas pačias deformacijų pasiskirstymo išraiškas (5.35 ir 5.36), tik įvertinsime tai, kad dėl liekamųjų įtempių plyšyje betono deformacija pradeda augti ne nuo nulio, o nuo tam tikros reikšmės $\varepsilon_{fb,r}$. Atitinkamai sumažėja ir tempiamosios kompozitinės armatūros deformacija plyšyje:

$$\varepsilon_c(x=0) = \varepsilon_{fb,r} = \frac{f_{fb,r}}{E_{cm}} = \frac{1,51 \cdot 10^6}{38 \cdot 10^9} = 39,7 \cdot 10^{-6},$$

$$\varepsilon_s(x=0) = \varepsilon_{s,max} = -\frac{P - f_{fb,r} \cdot A_c}{E_s A_s} = \frac{150 \cdot 10^3 - 1,51 \cdot 10^6 \cdot 195 \cdot 10^{-4}}{190 \cdot 10^9 \cdot 5,09 \cdot 10^{-4}} = 1247 \cdot 10^{-6}.$$

Betono pleišėjimo deformacija ε_{cr} ir armatūros deformacija bloko viduryje $\varepsilon_{s,min}$ sutampa su įprastojo betono atveju. Maksimalų atsiveriančių plyšių plotį galima skaičiuoti kaip ir pirmuoju atveju – integruojant armatūros ir betono deformacijų pasiskirstymo funkcijas. Kita vertus, kai deformacijų pasiskirstymas yra tiesinis, galime tiesiog apskaičiuoti 5.22 pav. tamsiai nuspalvintos trapecijos plotą. Tokiu atveju plyšio pločio skaičiavimo išraiška tampa paprastesnė:

$$w = 2 \left[l_{tr} \left(\frac{\varepsilon_{s,max} - \varepsilon_{fb,r} + \varepsilon_{s,min} - \varepsilon_{cr}}{2} \right) \right] =$$

$$= 2 \left[0,055 \left(\frac{(1247 - 39,7 + 704 - 111) \cdot 10^{-6}}{2} \right) \right] = 0,10 \text{ mm}.$$

Nagrinėtas pavyzdys parodo, kad dispersinis armavimas efektyviai sumažina vidutinį atstumą tarp plyšių (36 %) ir maksimalų plyšio plotį (44 %).

5.6. Skyriaus apibendrinimas

Plieno plaušu armuotų konstrukcijų stiprumo, standumo ir pleišėtumo skaičiavimas nėra paprastas uždavinys. Dėl sudėtingos gelžbetonio elgsenos, įvairiapusės betono ir plaušo sąveikos sunku tiksliai įvertinti plieno plaušu armuotų konstrukcijų elgseną. Problemos sudėtingumą rodo ir tai, kad Europoje iki šiol nėra dispersiškai armuotų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimą reglamentuojančių nuostatų.

Plieno plaušu armuoto betono elgseną geriausiai galima suprasti jį palyginus su įprastuoju betonu. Buvo parodyta, kad dispersinio armavimo efektyvumas pasireiškia, kai betone pradeda vertis plyšiai: plieno plaušas suvaržo plyšius ir perima dalį tempimo įtempių plyšyje. Betono irimas tampa daug plastiškesnis.

Plieno plaušu armuotų konstrukcijų stiprumo ir tinkamumo ribinių būvių analizei buvo nagrinėjami empirinis ir trys alternatyvūs skaičiavimo metodai. Kiekvienas iš jų turi savo taikymo sritį, bet visų metodų skaičiavimo rezultatai priklauso nuo taikomų medžiagų modelių tikslumo:

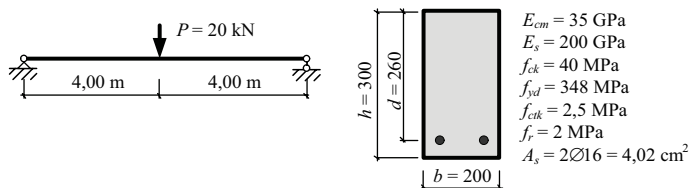
1. Empirinis, dispersiškai armuotų elementų plyšių pločio nustatymo metodas remiasi patobulinta Europos normų metodika. Atliekant plyšių pločio skaičiavimus, dėl plaušo įtakos sumažėja vidutinė armatūros deformacija ε_{sm} , lyginant su įprastai armuotais elementais, todėl gaunamas mažesnis plyšio plotis.
2. Supaprastintas metodas gerai tinka plieno plaušu armuotų gelžbetoninių konstrukcijų stiprumui skaičiuoti. Supaprastintu metodu galima apytiksliai įvertinti ir elementų įlinkius.
3. Sluoksnių metodu galima įvertinti tiek netiesinę gniuždomojo betono elgseną, tiek tempiamojo sustandėjimo efektą. Šiuo metodu galima įvertinti ir konstrukcijų deformacijas bei laikomąją galią, tačiau skaičiavimai yra daug sudėtingesni, nei taikant supaprastintą metodą.
4. Nei supaprastintu, nei sluoksnių metodu neįmanoma analizuoti plieno plaušu armuotos konstrukcijos pleišėjimo pobūdžio. Atstumams tarp plyšių nustatyti ir plyšio pločiui skaičiuoti galima taikyti diskretaus pleišėjimo modelį.

Kontroliniai klausimai

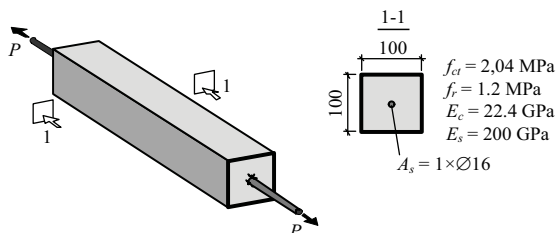
1. Kas yra skerspjuvio kreivis? Kaip jis siejasi su elemento įlinkiu?
2. Apibūdinkite supaprastintajame modelyje taikomus charakteringuosius taškus: kokie dydžiai laikomi žinomais, kokių ieškoma?
3. Kokios trys pagrindinės prielaidos taikomos sluoksnių modelyje?
4. Ką vadiname redukuotu skerspjuviu?
5. Kas yra tiesioginis ir atvirkštinis konstrukcijų analizės uždaviniai? Kokiu tikslu taikomas atvirkštinis uždavinys?
6. Kaip galima apibūdinti diskrečiųjų plyšių sampratą?
7. Ką vadiname įtempių perdavimo ilgiu?
8. Kuo skiriasi įprastojo gelžbetoninio ir papildomai plieno plaušu armuoto elemento pleišėjimas?
9. Kaip vadinami plieno plaušo plyšyje perduodami įtempiai?
10. Kokią įtaką plyšio pločiui turi atstumas tarp plyšių?
11. Koks pagrindinis plieno plaušo parametras turi įtakos atstumui tarp plyšių?

Uždaviniai

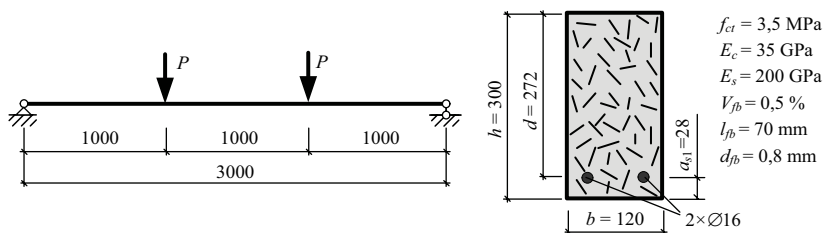
1. Pateikta plieno plaušu armuotos gelžbetoninės sijos skaičiavimo schema, skerspjuvis ir medžiagų rodikliai.
 - 1.1. Supaprastintuoju metodu apskaičiuokite sijos pleišėjimo momentą M_{cr} ir jį atitinkantį kreivį κ_{cr} .
 - 1.2. Supaprastintuoju metodu apskaičiuokite armatūros takumo pradžią atitinkantį momentą M_y ir jį atitinkantį kreivį κ_y .



- 1.3. Apskaičiuokite viduriniame sijos pjūvyje veikiančią lenkimo momentą $M_{\max}$ ir šį lenkimo momentą atitinkantį skerspjūvio kreivę $\kappa_{\max}$.
2. Schemoje parodyta tempiamoji plieno plaušu armuota gelžbetoninė prizmė.



- 2.1. Teigdami, kad vidutiniai betono ir armatūros sukibimo įtempiai $\tau = 2f_{ct}$, apskaičiuokite įtempių perdavimo ilgį l_{tr} ir maksimalų atstumą tarp plyšių $l_{cr,\max}$.
- 2.2. Apskaičiuokite maksimalų plyšio plotį $w_{\max}$, veikiant $P = 50$ kN apkrovai.
3. Duota dviem koncentruotosiomis apkrovomis veikiamą, laisvai atremtą plieno plaušu armuota gelžbetoninė sija. Sijos apkrovimo schema ir skerspjūvis parodyti paveiksle.



- 3.1. Apskaičiuokite dispersiškai armuotos gelžbetoninės sijos pleišėjimo momentą M_{cr} .
- 3.2. Nustatykite supleišėjusio elemento liekamąjį stiprį $f_{fb,r}$ laikydami, kad elementas armuotas plieno plaušu su užlenktais galais.
- 3.3. Apskaičiuokite strypinės armatūros įtempius σ_s , kai $M = M_{cr}$.
- 3.4. Apskaičiuokite maksimalų plyšio plotį $w_{\max}$, kai siją veikia išorinis lenkiamasis momentas $M = 30$ kNm.

Atsakymai

- 1.1. $M_{cr} = 7,5 \text{ kN}$; $\kappa_{cr} = 0,476 \text{ km}^{-1}$.
- 1.2. $M_y = 46,7 \text{ kN}$; $\kappa_y = 9,73 \text{ km}^{-1}$.
- 1.3. $M_{\max} = 40,0 \text{ kN}$; $\kappa_{\max} = 8,15 \text{ km}^{-1}$.
- 2.1. $l_{tr} = 4,0 \text{ cm}$; $l_{cr,\max} = 8,0 \text{ cm}$.
- 2.2. $w_{\max} = 0,066 \text{ mm}$.
- 3.1. $M_{cr} = 6,3 \text{ kNm}$.
- 3.2. $f_{fb,r} = 0,919 \text{ MPa}$.
- 3.3. $\sigma_s = 31,646 \text{ MPa}$.
- 3.4. $w_{\max} = 17,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}$.

Rekomenduojamoji literatūra

- Campione, G. 2008. Simplified flexural response of steel fiber reinforced concrete beams, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* 20(4): 283–293.
- Kaklauskas, G. 2001. *Integral Flexural Constitutive Model for Deformational Analysis of Concrete Structures*: monograph. Vilnius: Technika. 139 p.
- Kaklauskas, G. 2004. Flexural layered deformational model of reinforced concrete members, *Magazine of Concrete Research* 56(10): 575–584.
- Naaman, A. E. 2003. Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites, *RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, 95–113.
- Nataraja, M. C.; Dhang, M.; Gupta, A. P. 1999. Stress strain curve for steel-fiber reinforced concrete under compression, *Cement & Concrete Composites* 4(1): 383–390.

II. KOMPOZITINIAIS STRYPAIS ARMUOTOS BETONINĖS KONSTRUKCIJOS

6. BENDROSIOS ŽINIOS APIE KOMPOZITINIO POLIMERO ARMATŪRĄ

6.1. Įžanga

Pasaulyje mažėjant gamtinių išteklių, visose pramonės šakose atliekama inovatyvių ir optimalių sprendimų paieška siekiant šiuos išteklius naudoti efektyviau. Statybos pramonėje daug dėmesio skiriama inovatyvių konstrukcinių sprendimų paieškai, siekiant užtikrinti didesnę statinių konstrukcijų saugą, patikimumą ir ilgaamžiškumą.

Kompozitinės medžiagos statybos pramonėje pradėtos naudoti palyginti neseniai. Kompozitinės medžiagos pluoštu armuoti polimerai (angl. *fiber reinforced polymer – FRP*) pirmiausia pradėti naudoti karinėje, aviacijos ir automobilių pramonės šakose. Pastaraisiais dešimtmečiais jie vis plačiau naudojami statant naujus ir stiprinant eksploatuojamus statinius bei jų konstrukcijas.

Vis plačiau naudoti kompozitines medžiagas statyboje skatina keli pagrindiniai aspektai: šių medžiagų atsparumas korozijai, puikios mechaninės savybės ir lengvas apdirbimas. Tobulinant gamybos technologiją, siekiama sumažinti kompozitinių gaminių kainą. Todėl šiuo metu polimerinės medžiagos jau tampa įprasta tradicinių statybinių medžiagų: plieno, medžio, betono – alternatyva.

Statybinių konstrukcijų srityje kompozitinės medžiagos dažniausiai naudojamos: 1) kaip strypinė armatūra betoninėms konstrukcijoms; 2) kaip išorinė lakštinė armatūra eksploatuojamoms konstrukcijoms stiprinti; 3) kaip statybiniai profiliuočiai. Šioje knygoje aptariama tik pirmoji polimerinių medžiagų naudojimo sritis.

Naujų medžiagų naudojimas realių statinių konstrukcijoms neišvengiamai susijęs su tam tikra rizika. Nors pasaulyje jau sukaupta nemaža kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų projektavimo, statybos ir eksploatacijos patirtis, tačiau dėl didelės kompozitinės armatūros įvairovės ir specifinių mechaninių savybių kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų projektavimas išlieka gana sudėtingu uždaviniu. Knygoje aprašoma strypinės polimerinės armatūros fizikinė prigimtis, mechaninė elgsena, sąveika su betonu, gamybos ir projektavimo ypatumai.

6.2. Kompozitinės armatūros naudojimo tikslai ir sritys

Vienas didžiausių įprastų gelžbetoninių konstrukcijų trūkumų – jų pleišėjimas, dažnai lemiantis plieninės armatūros korozijos vystymąsi. Gelžbetoninių konstrukcijų pleišėjimo procesas gali vykti ne tik konstrukcijų tempiamojoje zonoje, bet ir visame elemento tūryje. Betonas gali supleišėti dėl suvaržytų traukimosi deformacijų, temperatūrinių poveikių, netinkamų kietėjimo sąlygų (ypač pirmosiomis valandomis), taip pat ir dėl įvairių išorinių apkrovų bei poveikių. Kaip rodo ilgametė gelžbetoninių statinių (pvz., tiltų) eksploatacijos patirtis, plyšių dažnai nepavyksta išvengti betoninėms konstrukcijoms armuoti naudojant net ir iš anksto įtemptą armatūrą.

Gelžbetonines konstrukcijas eksploatuojant neagresyviojoje aplinkoje, tam tikro riboto pločio plyšiai yra leistini. Įvairių šalių projektavimo normose apibrėžiama leidžiamoji ribinė plyšio pločio reikšmė yra nuo 0,2 iki 0,4 mm. Tokio pločio plyšiai neturi reikšmingos įtakos normaliai konstrukcijos eksploatacijai. Priešinga situacija gaunama konstrukcijas eksploatuojant agresyviojoje išorinėje aplinkoje (pvz., tiltai, atraminės sienos, talpyklos ir kt.), kai konstrukcijų paviršius nuolat veikiamas drėgmės ir cheminių medžiagų poveikių kartu su išorinėmis apkrovomis. Netinkamai įvertinus agresyviuosius aplinkos poveikius ir kintamą kartotinių apkrovų pobūdį (tiltuose, estakadose) jau po kelerių metų eksploatacijos betone esanti plieninė armatūra gali būti stipriai paveikta korozijos, ir konstrukcijos gali visiškai prarasti eksploatacines savybes.

Šios priežastys paskatino statybinių konstrukcijų projektuotojus ir eksploatuotojus ieškoti alternatyvių medžiagų, kurios būtų atsparios korozijai, ilgaamžės ir ekonomiškos. Šiuo požiūriu kompozitinė armatūra yra viena iš įprastinės plieninės armatūros alternatyvų. Statybinėms konstrukcijoms kompozitinė armatūra pradėta naudoti prieš kelis dešimtmečius. Prireikė dar kelių dešimtmečių, kol buvo ištobulinta kompozitinės armatūros gamybos technologija, iš dalies išspręsti jos sąveikos su betonu klausimai, parengtos projektavimo rekomendacijos, o svarbiausia – iki konkurencingos sumažinta kompozitinės armatūros kaina.

Šiuo metu kompozitinė armatūra statybos pramonėje naudojama keliose pagrindinėse srityse:

- Tiltų paklotą laikančioms plokštėms armuoti. Tai viena dažniausių kompozitinės armatūros naudojimo sričių. Tiltų paklotą laikančios plokštės yra veikiamos atmosferos, agresyvių druskų poveikio, ciklinių ir dinaminių apkrovų. Šiomis eksploatacijos sąlygomis tiltų pakloto plokštės pleišėja, o tai lemia intensyvią plieninės armatūros koroziją. Specialiai tokiems statiniams sukurta plieninės armatūros dengimo epoksidine derva technologija ir alternatyvios armatūros rūšys (dažniausiai stiklo pluošto kompozitinė armatūra). Dar 1980 m. didžiulės kasmetinės išlaidos, susijusios su esamų gelžbetoninių tiltų ir viadukų priežiūra, paskatino JAV kelių priežiūros institucijas ieškoti įprastojo gelžbetonio alter-

natyvų. Kompozitinės armatūros naudojimo tiltų pakloto plokštėms pavyzdys pateiktas 6.1–6.4 pav. (remiamasi Vokietijos kompozitinės armatūros gamintojo „Schöck Bauteile GmbH“ pateikta medžiaga). Nuo 2010 m. su šiuo gamintoju



6.1 pav. Kompozitinės armatūros naudojimas tiltų statyboje („Schöck Bauteile GmbH“)



6.2 pav. Viaduko plokščių pakeitimas Ontario, Kanadoje („Schöck Bauteile GmbH“)



6.3 pav. Viadukas, pastatytas 2010 m. Ontario, Kanadoje. Naudojama stiklo pluošto armatūra („Schöck ComBAR“)



6.4 pav. Kelio plokštės armavimas Péage de Tain, Prancūzijoje („Schöck Bauteile GmbH“)

bendradarbiauja Vilniaus Gedimino technikos universiteto mokslininkai, atliekantys šios kompanijos gaminamais kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų tyrimus.

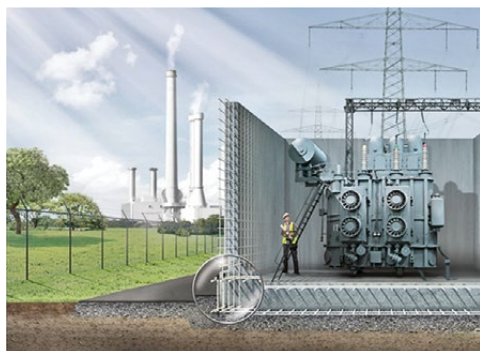
- Konstrukciniams pakrantės elementams ir statiniams, nuolat veikiamiems druskingo jūros vandens. Sūraus vandens poveikis sukelia greitą ir intensyvią plieninės armatūros koroziją. Kompozitinės armatūros naudojimo pakrantės statiniams pavyzdys patiktas 6.5 pav.
- Statiniams, kuriuose naudojama speciali įranga. Tokių statinių pavyzdžiai – medicininės patalpos, mokslinių tyrimų laboratorijos, kuriose reikalingas magnetinis aplinkos neutralumas. Kompozitinės armatūros naudojimo specialios paskirties patalpose pavyzdys pateiktas 6.6 pav.
- Elektrinėse ir aukštosios įtampos transformatorinėse, kurių sukuriamas stiprus elektromagnetinis laukas gali neleistinais įkaitinti ir pažeisti plieninę armatūrą. Kompozitinės armatūros naudojimo transformatorinėse pavyzdys parodytas 6.7 pav.



6.5 pav. Kompozitinės armatūros naudojimas pakrantės statiniams („Schöck Bauteile GmbH“)



6.6 pav. Kompozitinės armatūros naudojimas statiniams, kuriuose naudojama speciali įranga („Schöck Bauteile GmbH“)



6.7 pav. Kompozitinės armatūros naudojimas elektrinėse ir transformatorinėse („Schöck Bauteile GmbH“)



6.8 pav. Kompozitinės armatūros naudojimas požeminiams statiniams („Schöck Bauteile GmbH“)

- Požeminiams statiniams, rezervuarams, talpykloms. Šie statiniai taip pat dažnai veikiami agresyviosios aplinkos. Kompozitinės armatūros naudojimo požeminiame statinyje pavyzdys parodytas 6.8, 6.9 pav.

Kompozitinės armatūros platesnį naudojimo mastą riboja keletas būdingų trūkumų:

- *Aukšta kaina.* Nors per pastaruosius kelis dešimtmečius ištobulinus gamybos technologiją pavyko gerokai sumažinti kompozitinės armatūros gamybos sąnaudas, ji vis dar yra kelis arba net keliasdešimt

kartų brangesnė už įprastą plieninę armatūrą, priklausomai nuo naudojamo pluošto (stiklo, aramido, anglies). Iš kitų kompozitinės armatūros rūšių stiklo pluošto armatūra dėl palyginti nedidelės žaliavų kainos šiuo požiūriu labiausiai priartėjo prie įprastos plieninės armatūros, todėl tapo plačiausiai naudojama statybos pramonėje.

- *Tamprumo modulis ir ilgalaikis stipris.* Kompozitinė armatūra pasižymi ypač dideliu tempiamuoju stipriu: nuo 1000 iki 5000 MPa, tačiau jos tamprumo modulis paprastai yra kelis ar daugiau kartų mažesnis už plieno ir sudaro 40–100 GPa (būdinga stiklo, aramido, bazalto, bet ne anglies pluošto armatūrai). Dėl mažo



6.9 pav. Tunelio statybos Briuselyje. Naudojama stiklo pluošto armatūra (Aslan 100)

tamprumo modulio kyla sunkumų užtikrinant konstrukcijų atitiktį eksploatacinio ribinio būvio reikalavimams (ribinių įlinkių ir plyšių pločių). Kita neigiama kompozitinės armatūros mechaninė savybė – stiprio mažėjimas laike. Kai kurių armatūros rūšių ilgalaikis stipris sudaro tik apie 40 % trumpalaikio stiprio.

- *Trapus suirimo pobūdis.* Kompozitinė armatūra, skirtingai nei takumo aikštelę turintis plienas, suyra trapiai. Toks suirimo pobūdis kelia sunkumų užtikrinant konstrukcijų saugumą, todėl konstrukcijos turi būti projektuojamos su didesne laikomosios galios atsarga.
- *Projektavimo rekomendacijų ir normų stoka.* Šiuo metu pasaulyje parengtos vos kelios kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų projektavimo rekomendacijos. Įvairių šalių statybos inžinieriai kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų projektavimą dažniausiai atlieka vadovaudamiesi įvairiuose pasaulio mokslo centruose sukaupia ilgamete patirtimi šioje srityje.

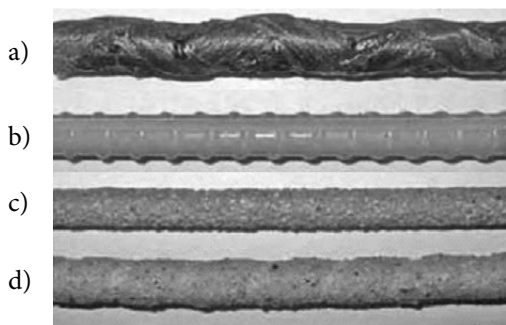
Projektuojant konkrečią konstrukciją, būtina tinkamai įvertinti kompozitinės armatūros fizikines ir mechanines savybes bei jos sąveiką su betonu. Projektuotojas turi siekti visiškai išnaudoti kompozitinės medžiagos teikiamus pranašumus, kartu išvengiant būdingų trūkumų.

6.3. Kompozitinės armatūros raidos istorinė apžvalga

Kompozitinės medžiagos pirmiausia pradėtos naudoti aviacijos pramonėje 1940 m. pradžioje. Pluoštais armuoti polimerai atitiko aviacijai reikalingos aukščiausios kokybės, ypatingų mechaninių savybių ir nedidelės masės medžiagos reikalavimus.

Statybos pramonėje polimeriniai kompozitai pradėti naudoti nuo 1950 m. (Amerikos, Europos, Azijos šalyse). 1970 m. JAV ir Europoje pradėti pirmieji tyrimai, susiję su kompozitinių medžiagų naudojimu betoninėms konstrukcijoms armuoti. Kompozitinės medžiagos buvo naudotos statyboje: tiltų plokštėms, rezervuarams, hidrotechniniams statiniams. Vokietijoje buvo atlikti kompozitiniais strypais armuotų masyvių betoninių konstrukcijų tyrimai. Nagrinėjant šias, armuotas kompozitine armatūra, pastebėta, kad šios medžiagos pasižymi ne tik dideliu stipriu, bet ir gero mis antikorozinėmis savybėmis.

Pradžioje buvo laikomasi nuomonės, jog stiklo pluošto armatūra dėl nedidelio tamprumo modulio ir mažo atsparumo betono šarminėi aplinkai nėra tinkama betoniniams elementams armuoti. Todėl šie gaminiai buvo naudojami mūrinėse konstrukcijose kaip ryšinė sistema. Atlikus eksperimentinius tyrimus paaiškėjo, kad tokia armatūra gali būti gana efektyvi, tinkamai apdorojant jos paviršių. Nepakankamas kompozitinės armatūros ir betono sukibimo užtikrinimas ilgą laiką buvo rimta problema, varžanti platesnį šios armatūros naudojimo mastą. Sukibimo problema buvo iš dalies išspręsta sukūrus specialius armatūros paviršiaus apdirbimo būdus (rumbelių formavimas, dengimas smėliu, spiralinio paviršiaus formavimas) (6.10 pav.).



6.10 pav. Kompozitinės polimerinės armatūros paviršiaus apdirbimas: a – spiralinis; b – rumbuotas; c – smėliu; d – mišrus (smėliu ir spirale)

1978 m. Vokietijos įmonė „Strabag-Bau“ ir cheminės pramonės gamintojas „Bayer“ pradėjo analizuoti būdus, kaip pagerinti armatūros sukibtį su betonu ir apsaugoti stiklo pluoštą nuo šarminės korozijos betone. Ši įmonė pirmoji pasiūlė stiklo pluošto strypo paviršių dengti smėlio grūdeliais. Tokia armatūra naudota kai kuriuose Vokietijos ir Austrijos tiltuose. Tačiau eksploatacijos metų pastebėta, kad šiuose tiltuose atsirado neleistinai didelių įlinkių, o atsivėrę plyšiai neestetiški architektūriniu atžvilgiu. Dėl to 1990 m. Europoje stiklo pluošto naudojimas armuotojo betono statiniams buvo pristabdytas.

1983 m. Olandijoje chemijos įmonė AKZO ir projektavimo įmonė HBG tyrė aramido pluošto strypų naudojimo armuotojo betono konstrukcijoms galimybes. Atlikus armuotųjų betoninių konstrukcijų eksploatacijos agresyviojoje aplinkoje eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad vertinant statinio statybos ir eksploatacijos stadijas vidutiniškai galima sutaupyti apie 30–40 % lėšų.

Didelę reikšmę kompozitinių medžiagų naudojimui turėjo Japonijos mokslininkų atlikti tyrimai. Japonijoje pirmieji tyrimai pradėti 1980 m. Nuo 1980 m. Japonijoje buvo įgyvendinta net keliasdešimt demonstracinių kompozitiniais strypais armuotų tiltų projektų. 1987 m. Japonijos inžinierių sąjungoje įsteigtas techninis komitetas, turėjęs nagrinėti kompozitinių polimerinių gaminių naudojimą betono konstrukcijoms. Remiantis komiteto atliktais tyrimais, 1991 m. Japonijos statybos inžinierių sąjunga paskelbė kompozitinės armatūros projektavimo rekomendacijas, 1997 m. pasirodė angliška jų versija.

Daug dėmesio neplieninės armatūros tyrimams skyrė JAV kelių priežiūros institucijos. Pirmieji išsamūs kompozitinės armatūros ir betono sąveikos tyrimai atlikti šios šalies Kalifornijos San Diego, Vakarų Virdžinijos universitetuose. Eksperimentiniai bandymai parodė sudėtingą ir įvairiapusę kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų elgseną. Vakarų Virdžinijos universitete pasiūlytos pirmosios kompozitinių armatūros strypų gamybos rekomendacijos.

1991 m. Amerikos betono institutas (ACI) suformavo darbo grupę (komitetą) 440 (angl. *Committee 440*), atsakingą už kompozitinės armatūros tyrimus, naudoji-

mo ir projektavimo rekomendacijų kūrimą. Remdamasi Vakarų Virdžinijos universiteto pasiūlytomis rekomendacijomis ši grupė sukūrė standartus ir rekomendacijas, skirtas neplieninės armatūros gamybai ir projektavimui. Šios darbo grupės parengtos rekomendacijos nuolat atnaujinamos ir iki šiol išlieka projektuotojų vienu dažniausiai taikomų dokumentų.

Dėl atšiauraus klimato ir problemų eksploatuojant esamus tiltus, kompozitinės armatūros naudojimu susidomėjo ir Kanados kelių priežiūros institucijos. 1993 m. Kalgaryje pastatytas vienas pirmųjų kompozitiniais strypais armuotų tiltų. 1995 m. buvo įkurta ISIS organizacija (angl. *Intelligent Sensing for Innovative Structures*), jungusi 14 Kanados universitetų. Šios organizacijos tikslas – paskatinti naudoti naujas kompozitines medžiagas įgyvendinant ilgaamžių ir aplinkai nekenksmingų statinių (ypač naujų tiltų) statybą bei plėtrą. ISIS organizacija atliko ypač plačius kompozitinės armatūros taikymo tyrimus, pritraukusi beveik 200 nepriklausomų tyrėjų iš skirtingų valstybių ir institucijų. Kartu su moksliniais tyrimais buvo įgyvendinti keli demonstraciniai projektai: 1997 m. pastatytas tiltas Manitoboje, vėliau kompozitinė armatūra naudota kelių statiniams stiprinti (tiltas į Kvebeką, Champlaino tiltas Monrealyje, Websterio daugiaaukštė stovėjimo aikštelė Kvebeke).

Manitobos universitete nagrinėtos anglies pluošto strypais armuotos betoninės konstrukcijos. Tyrimo metu daug dėmesio skirta armatūros ir betono sukibimui. Kanados karališkojoje karinėje kolegijoje bandytos konstrukcijos armuotos aramido pluošto strypais. Vėliau atlikti eksperimentiniai sijų bandymai esant ypač žemai aplinkos temperatūrai ir veikiant ilgalaikiai apkrovai. Kanados Šerbruko universitete nagrinėti sijų ilgaamžiškumą lemiantys veiksniai ir aplinkos sąlygos.

1997 m. susiformavo „ConFibreCrete“ asociacija, kurią sudaro 10 darbo grupių iš 8 skirtingų Europos šalių. Šiai asociacijai taip pat priklauso Amerikos betono institutas, Tarptautinė betono federacija „FIB“ ir Kanados asociacija ISIS. Pagrindinė šios asociacijos misija – platesnis kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų naudojimas realiuose statiniuose.

Buvusioje Sovietų Sąjungoje XX a. antroje pusėje polimerinių kompozitų gamyklos pastatytos Minske, Maskvoje ir Charkove. Jose buvo gaminama polimerinė stiklo pluošto armatūra. Atlikti šios armatūros ilgaamžiškumo tyrimai, po kurių gaminiai naudoti aukštosios įtampos betoninių elektros linijų atramoms armuoti. Pastaraisiais metais Rusijoje toliau vykdomi tyrimai, susiję su kompozitinių polimerų naudojimu statybos pramonėje. Stiklo pluošto kompozitinė polimerinė armatūra naudota armuotojo betono pėsčiųjų tiltų perdangose (pakloto plokštėms ir sijoms).

Lietuvoje kompozitiniais strypais armuotos betoninės konstrukcijos nebuvo plačiai nagrinėtos. Pirmieji tyrimai atlikti 1970 m. tuomečiame Vilniaus inžineriniame statybos institute. Vadovaujant akademikui A. Kudziui stiklo pluošto strypus ir jų naudojimą armuotojo betono konstrukcijoms nagrinėjo V. Bagočiūnas ir P. Juška. V. Bagočiūno darbai susiję su stiklo pluošto strypais armuotų žiedinio skerspjuvio

betoninių elementų elgsenos analize. Pastaruosius elementus ketinta naudoti aukštos įtampos elektros linijų atramoms. P. Juška savo tyrimuose nagrinėjo galimybes stiklo pluošto strypus naudoti iš anksto įtemptam armavimui. Stiklo pluošto strypų paviršius nebuvo specialiai apsaugotas nuo betone vyraujančios šarminės aplinkos, todėl armatūra buvo ilgainiui pažeista, o pradėti tyrimai jokių apčiuopiamų rezultatų nedavė.

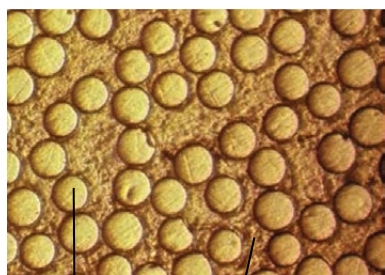
Pasaulio rinkose atsiradus naujos kartos kompozitiniais strypams, jais armuotų betoninių konstrukcijų tyrimai atnaujinti ir Lietuvoje. 2011 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete atlikti pirmieji naujos kartos kompozitiniais stiklo pluošto („Schöck ComBAR“, Vokietija) ir bazalto pluošto („RockBar“, Rusija) strypais armuotų konstrukcijų tyrimai.

Pastaraisiais metais visame pasaulyje kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų tyrimai ir naudojimas realiųjų statinių konstrukcijoms tapo ypač intensyvūs. Tai lemia per kelis dešimtmečius sukaupia tokių konstrukcijų projektavimo, statybos ir eksploatacijos patirtis.

6.4. Kompozitinės armatūros struktūra

Kompozitinės armatūros strypus sudaro stiklo, anglies, aramido, bazalto arba kitos medžiagos pluošto gijos, impregnuotos polimerine derva. Pagrindinė pluošto paskirtis – suteikti kompozitinei medžiagai reikiamą stiprumą, o polimerinės dervos – sujungti ir apsaugoti atskiras pluošto gijas ir užtikrinti kompozito vientisumą. Toks funkcinis medžiagų atskyrimas gerai atspindi bendrą kompozitinių medžiagų esmę: atskirai paimtų kompozitą sudarančių medžiagų fizikinės ir mechaninės savybės nusileidžia kompozitinės medžiagos savybėms. Kompozitinio strypo skerspjūvio fragmentas, padidintas 240 kartų, pateiktas 6.11 pav., kuriame apskritojo skerspjūvio pluošto gijos sujungtos polimerine matrica (derva).

Šiame poskyryje aptarsime kompozitinius armatūros strypus sudarančių medžiagų – pluošto ir polimerinės dervos – fizikines ir mechanines savybes. Nagrinėjami dažniausiai praktikoje naudojami pluoštai ir jiems impregnuoti naudojamos dervos (polimerai).



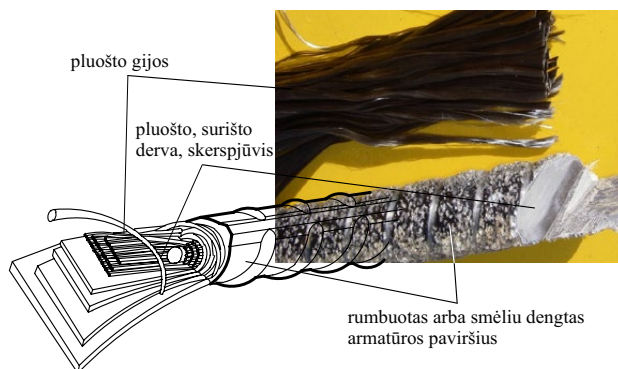
pluošto gija

Polimerinė matrica (derva)

6.11 pav. Tipinis kompozitinio armatūros strypo skerspjūvis, padidintas 240 kartų: pluoštas paprastai užima nuo 40 iki 60 % skerspjūvio ploto

6.4.1. Pluoštai

Pluoštai – tai medžiagos, sudarytos iš daugybės ypač mažo skersmens gijų. Pluoštinė kompozitinio armatūros strypso struktūra parodyta 6.12 pav. Pluoštinės medžiagos struktūra lemia tai, kad to paties skerspjūvio elemento stipris tampa kelis arba net keliasdešimt kartų didesnis nei tos pačios medžiagos vientisojo skerspjūvio elemento. Šis efektas paaiškinamas tuo, kad esant mažam elemento skerspjūvio plotui sumažėja vidinių defektų, kartu padidėja medžiagos stipris. Būtent dėl šios priežasties pluoštinės struktūros kompozitinių medžiagų tempiamasis stipris ypač didelis. Tarkime, turime tokio pat skersmens vienalyčio stiklo ir stiklo pluošto strypus, šiuo atveju stipresnis bus stiklo pluošto strypas (pluošto gijoje bus mažiau defektų nei stiklo strype).



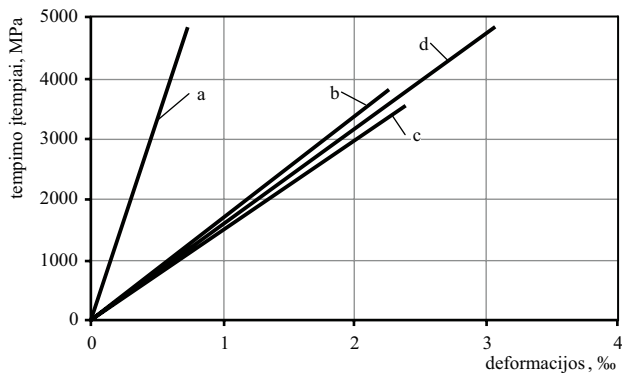
6.12 pav. Pluoštinė kompozitinės armatūros struktūra

Pluoštai yra nepaprastai liauni, todėl gniuždant jie išklumpa (galima palyginti su siūlu). Dėl šios priežasties kompozitinė armatūra nėra rekomenduojama gniuždomosiose konstrukcijų zonose – plačiau šis klausimas nagrinėjamas 8 skyriuje aptariant kompozitinės armatūros mechanines savybes.

Gaminant pluoštines medžiagas siekiama užtikrinti: a) didelį tempiamąjį stiprį; b) aukštą tamprumo modulį; c) pluoštą sudarančių gijų savybių pastovumą; d) ilgą amžiškumą; e) technologiškumą.

Kompozitinės armatūros strypuose dažniausiai naudojami anglies, stiklo, aramido arba bazalto pluoštai. Visiems išvardytiems pluoštams nebūdingos plastinės deformacijos iki pat surimo (6.13 pav.). Tai kelia sunkumų užtikrinant konstrukcijų saugą, nes skirtingai nuo plieno, kompozito strypas suyra trapijai. Trapiosios irties problema iš dalies gali būti išspręsta strypų gamyboje derinant kelis skirtingus pluoštus, tačiau šiuo atveju gamyba tampa daug sudėtingesnė ir brangesnė. Knygos 11 skyriuje parodyta, kad dėl šios priežasties kompozitiniais strypais armuotos betoninės konstrukcijos dažniausiai specialiai *perarmuojamos* siekiant, kad irimas prasidėtų nuo gniuždomojo betono.

Stiklo, anglies, aramido ir bazalto pluoštų fizikinės ir mechaninės savybės pateiktos 6.1 lentelėje. Toliau aptariami kiekvienas iš šių pluoštų.



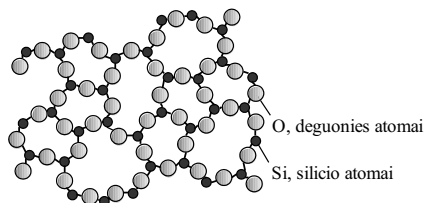
6.13 pav. Įvairių pluoštų įtempių ir deformacijų priklausomybės: a – anglies; b – aramido; c – stiklo; d – bazalto

6.1 lentelė. Pluoštų fizikinės ir mechaninės savybės

Pluošto tipas	Tankis	Tempiamasis stipris	Tamprumo modulis	Didžiausios tempimo deformacijos	Šiluminio plėtimosi koeficientas	Pusono koeficientas
	kg/m ³	MPa	GPa	%	10 ⁻⁶ /°C	
E – stiklas	2500	3450	72,4	2,4	5,0	0,22
S – stiklas	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
AR – stiklas	2270	1800–3500	70–76	2,0–3,0	–	–
Anglis (įprastas)	1700	3700	250	1,2	Nuo –0,6 iki –0,2	0,20
Anglis (didelio tamprumo modulio)	1950	2500–4000	350–800	0,5	Nuo –1,2 iki –0,1	0,20
Anglis (didelio stiprio)	1750	4800	240	1,1	Nuo –0,6 iki –0,2	0,20
Aramidas (Kevlar 29)	1440	2760	62	4,4	–2,0 išilginis 59 radialinis	0,35
Aramidas (Kevlar 49)	1440	3620	124	2,2	–2,0 išilginis 59 radialinis	0,35
Aramidas (Kevlar 149)	1440	3450	175	1,4	–2,0 išilginis 59 radialinis	0,35
Aramidas (Technora H)	1390	3000	70	4,4	–6,0 išilginis 59 radialinis	0,35
Aramidas (SVM)	1430	3800–4200	130	3,5	–	–
Bazaltas (Albarrie)	2800	4840	89	3,1	8,0	–

Stiklo pluoštas

Stiklo pluoštas kompozitinių elementų gamybai naudojamas plačiausiai. Stiklo pluošto populiarumą lemia santykinai nedidelė kaina, palyginus su kitais pluoštų tipais. Stiklas yra amorfinė, neorganinė medžiaga, kurios didžiąją dalį sudaro silicio dioksidas SiO_2 (50–70 % masės). Atominė stiklo struktūra supaprastintai parodyta 6.14 pav.



6.14 pav. Molekulinė stiklo struktūra

Kaip minėta, stiklo stipris daugiausia priklauso nuo bandinio matmenų, todėl suformavus ypač mažo skersmens (paprastai 3–24 μm) gijas, stiklo tempiamasis stipris padidėja keliasdešimt kartų.

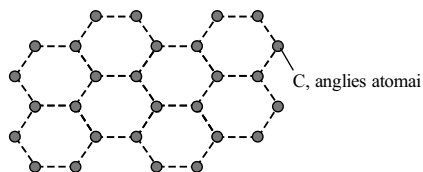
Pluoštas gaminamas lydinį nukreipiant per specialius purkštukus, vadinamus *filjerėmis*. Gaminant pluoštą tokiu būdu, naudojamos nuo 1,6–2 mm skersmens platinos lydinio filjerės, kuriose paprastai išdėstomi keli šimtai purkštukų. Stiklo lydinys teka per purkštukus ir suformuojamos ypač plonos stiklo gijos. Susidariusių gijų skersmuo priklauso nuo stiklo temperatūros purkštuke ir lydinio judėjimo greičio. Iš kelių tokių gijų sudaromas vadinamasis *filjerės pluoštas*, kuris susukamas į rites arba kapojamas. Gamybos metu stiklo pluošto gijos padengiamos specialia danga (kliais), kurios paskirtis: apsaugoti atskiras stiklo gijas nuo mechaninių pažeidimų bei pagerinti sukibimą su polimerine matrica.

Kompozitinės armatūros strypams gaminti dažniausiai naudojami trijų tipų stiklo pluoštai: *E*, *S*, *AR*. *E* – stiklo pluoštas yra pigiausias ir plačiausiai naudojamas, jo pavadinimas siejamas su didele elektrine varža (angl. *Electric glass*); *S* – stiklo pluoštas yra didesnio stiprio ir tamprumo modulis negu *E* – stiklo pluoštas, jo pavadinimas siejamas su naudojimu statyboje (angl. *Structural glass*). Abu šie stiklo pluoštai yra neatsparūs šarmų poveikiui, todėl tam tikrais atvejais naudojamas *AR* – stiklo pluoštas, kurio pavadinimas siejamas su atsparumu šarmams (angl. *Alkali-Resistant glass*). Fizikinės ir mechaninės šių stiklo pluoštų savybės pateiktos 6.1 lentelėje.

Pagrindiniai stiklo pluoštų trūkumai yra nedidelis jo tamprumo modulis, jautrumas trinčiams, mažas atsparumas nuovargiui, šarmams ir reikšmingas stiprio mažėjimas laikui einant. Todėl statybos pramonėje taikomos ir kitos pluoštų rūšys: anglies, aramido, bazalto.

Anglies pluoštas

Anglies pluoštas turi labai gerų fizikinių ir mechaninių savybių. Be didelio stiprio, jis pasižymi ypač aukštu tamprumo moduliu (iki 800 GPa) ir yra atsparus ilgalaikiai bei ciklinei apkrovoms. Vienintelis esminis anglies pluošto trūkumas yra didelė kaina – jis yra nuo 10 iki 30 kartų brangesnis negu stiklo pluoštas.



6.15 pav. Molekulinė anglies pluošto struktūra

Anglies pluoštas yra pusiau kristalinė medžiaga, kurios atominę struktūrą sudaro plokščios, tvarkingai išdėstytų anglies atomų gardelės, kaip parodyta 6.15 pav. Toks atomų išsidėstymas vadinamas *grafitine struktūra*, todėl dažnai anglies pluoštas dar vadinamas *grafito pluoštu*. Dėl plokščios atominės struktūros anglies pluoštas yra ortotropinė

medžiaga. Išilginė pluošto ašis sutampa su grafito gardelės plokštumomis, todėl tik išilgine linkme pluoštas įgyja savo ypač didelį standumą ir stiprį. Teorinis anglies pluošto tamprumo modulis išilgine kryptimi yra 1000 GPa, o skersine – 36 GPa.

1962 m. amerikiečių įmonei „Union Carbide Corporate“ pavyko pradėti pirmąją komercinę anglies pluošto, išgaunamo iš regeneruotos celiuliozės, gamybą. Anglies pluošto gijų skersmuo yra 5–10 μm . Anglies pluoštas gaminamas *pirolizės* būdu, dažniausiai iš celiuliozės arba poliakrilnitrilo (PAN). *Pirolizė* – tai procesas, kurio metu organinės medžiagos termiškai skaidomos be deguonies. Anglies pluoštui suformuoti reikalingi keli technologiniai procesai, vykstantys esant aukštai temperatūrai nuo 1000 iki 3000 $^{\circ}\text{C}$.

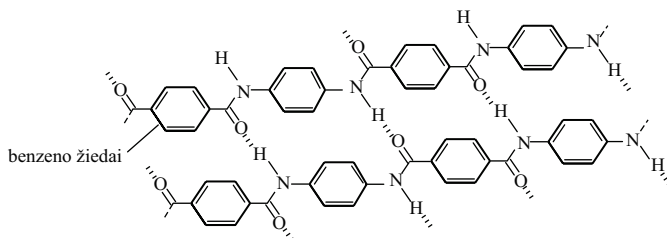
Atsižvelgiant į mechanines savybes, išskiriamos trys pagrindinės anglies pluošto rūšys: įprastas (angl. *standard*), didelio stiprio (angl. *high strength*, *HS*), didelio tamprumo modulio (angl. *high modulus*, *HM*). Fizikinės ir mechaninės šių anglies pluoštų savybės pateiktos 6.1 lentelėje.

Kaip minėta, didžiausias anglies pluošto trūkumas – didelė jo kaina. Tai lemia brangios gamyboje naudojamos žaliavos bei ilgas ir sudėtingas gamybos procesas. Todėl statyboje anglies pluošto kompozitiniai armatūros strypai naudojami tik ypatingais atvejais, dažniausiai gaminant iš anksto įtemptus armuotojo betono elementus ir renovuojant senas konstrukcijas.

Aramido pluoštas

Išskirtinės aramido pluošto savybės – ypač mažas tankis, didelis tempiamasis stipris, atsparumas aukštoms temperatūroms, smūginėms apkrovoms ir mažas stiprio mažėjimas laikui einant. Aramido pluošto tamprumo modulis yra daug mažesnis negu anglies, o kaina didesnė negu stiklo pluošto, todėl aramido pluoštas armatūros gamybai nėra plačiai naudojamas.

Aramido pluoštas yra sintetinis, polimerinis junginys, sudarytas iš anglies, vandenilio, deguonies ir azoto. Jo atominė struktūra parodyta 6.16 pav. Aramido pluoštas pirmą kartą buvo pristatytas 1971 m. prekės ženklu *KevlarTM*, todėl kevlaro ir aramido pluošto sąvokos dažnai sutapatinamas. Dėl mažiausio masės ir stiprio santykio



6.16 pav. Molekulinė aramido pluošto struktūra

aramido pluoštas pirmiausia pradėtas naudoti kosmoso ir aviacijos pramonėse, vėliau – automobilių, sporto ir statybos pramonėse. Šiuo metu aramido pluoštą tiekia keli gamintojai: „DuPont“ (prekės ženklas *Kevlar*), „Teijin“ (prekės ženklas *Technora*), „Akzo Nobel“ (prekės ženklas *Technora*), taip pat aramido pluoštas, gaminamas Rusijoje (prekės ženklas *SVM*). Fizikinės ir mechaninės aramido pluoštų savybės pateiktos 6.1 lentelėje.

Aramido pluošto gniuždomasis stipris sudaro apie 20 % tempiamojo stiprio. Tempimo atveju aramido pluošto suirimas yra trapus, tačiau gniuždant pasireiškia didelės plastinės deformacijos ir medžiaga gali absorbuoti didelį deformavimo energijos kiekį. Ši savybė, kurios neturi stiklo ir anglies pluoštai, daro aramido pluoštą ypač atsparų smūginei apkrovai.

Sudėtinga gamybos technologija, didelė pluošto kaina, mažas atsparumas drėgmės poveikiui (drėgmės absorbcija iki 6 % masės) daro aramido pluoštą mažiau patrauklų gaminant kompozitinius armatūros strypus. Todėl šiuo metu tai yra palyginti retai naudojama pluošto rūšis statybos pramonėje.

Bazalto pluoštas

Bazalto pluoštas yra palyginti naujas pluošto tipas, turintis geresnes chemines ir panašias mechanines savybes, lyginant su stiklo pluoštu. Be to, jis daug pigesnis už anglies pluoštą, bet brangesnis už stiklo pluoštą. Bazalto pluošto pranašumas – atsparumas aukštomis temperatūroms, chemiškai agresyviai aplinkos poveikiui ir didelis tempiamasis stipris.

Didžiąją dalį bazalto uolienos sudaro silicio dioksidas SiO_2 , todėl jo atominė struktūra panaši į stiklo (6.14 pav.). Bazalto pluoštas gaminamas išlydant magminę uolieną – bazaltą. Skirtingai nei gaminant stiklo lydinį, bazalto lydinyje nėra kitų priemaišų (natrio karbonato, kalcio oksido). Bazalto pluošto gamybos technologija yra panaši į stiklo pluošto: lydinys nukreipiamas į specialius purkštukus, kuriuose suformuojamos 9–13 μm skersmens gijos. Fizikinės ir mechaninės bazalto pluošto savybės pateiktos 6.1 lentelėje.

6.4.2. Polimerinės matricos (derva)

Kompozitinės armatūros matricos yra polimerinės medžiagos (dažnai vadinami *plastikais*), kurių pagrindinė paskirtis – sujungti (užtikrinti elementų vientisumą) ir apsaugoti pluošto gijas nuo mechaninio, cheminio ir aplinkos poveikių (drėgmės, temperatūros ir t. t.). Kartu polimerinė matrica padeda pluošto gijoms atlaikyti išorinę apkrovą, ypač kai kompozitinis strypas veikiamas skersinių jėgų. Polimerinė matrica paprastai sudaro nuo 25 iki 60 % polimerinio kompozito tūrio, todėl tinkamas jos pasirinkimas turi didelę įtaką kompozitinės armatūros fizikinėmis ir mechaninėms savybėms. Apibūdinant polimerines matricas dažnai vartojama *dervos* sąvoka. Derva vadinamas mišinys, kurį sudaro polimerinės medžiagos, priedai, skirti rišimosi procesui pagreitinoti (ar sulėtinti), bei kietikliai, suteikiantys mišiniui specifinių mechaninių ar cheminių savybių.

Pagal technologines savybes išskiriamos dvi polimerinių dervų rūšys *termoreaktyviosios* (angl. *thermosetting, thermoset*) ir *termoplastinės* (angl. *thermoplastic*). Šios dvi dervų grupės išskirtos atsižvelgiant į jų savybių priklausomybę nuo temperatūros pokyčių. Dažniausiai kompozitinei polimerinei armatūrai naudojama termoreaktyvioji derva.

Termoreaktyviosios dervos aukštoje temperatūroje tokios, tačiau vėsdamos jos praranda plastiškumą, antrą kartą kaitinant plastiškumas ir takumas nepasiekiamas – jų molekulinė struktūra tiesiog suardoma. Termoreaktyviąją dervą galima palyginti su virtu kiaušiniu – skystas jis gali būti tik prieš virimą.

Termoplastinės dervos gali atlaikyti kelis šildymo ir vėsinimo ciklus. Termoplastinės dervos kaitinamos tampa tokios, o atvėsintos įgauna pradinę kietąją būseną. Tačiau atlikus 4–5 kaitinimo ir vėsinimo ciklus, termoplastinės dervos greitai praranda savo pirmines mechanines savybes. Termoplastinę dervą galima palyginti su guma – atšaldyta ji tampa kieta, trapi, o sušildžius sugrįžta jos tampriosios savybės. Toliau plačiau aptariamoms šios dvi dervų rūšys.

Termoreaktyviosios dervos

Termoreaktyviosios dervos pasižymi mažu klampumu ir tinkamos naudoti tais atvejais, kai kompozito medžiagoje yra didelis pluošto kiekis (60–70 % tūrio dalies). Dėl mažo klampumo pluošto gijos nesunkiai impregnuojamos derva ir nesusidaro nepageidaujamų tuštumų. Šio tipo dervos yra technologiškos (nesudėtingai paruošiamos, jas lengva perpilti ir impregnuoti pluoštą) ir nebrangios. Kita vertus, jų saugojimo laikas yra ribotas, o dervos komponentų (polimero ir kietiklio) gamyba trunka ilgai.

Termoreaktyviosios dervos kietėja kambario arba aukštesnėje temperatūroje, o rišimosi trukmė paprastai yra nuo kelių minučių iki kelių valandų, atsižvelgiant į naudojamą dervą ir kietiklį. Kietėdamos šios dervos susitraukia iki 4–8 % tūrio dalies, todėl dervoje gali susidaryti mikroplyšių. Taip pat gali atsirasti pluošto padėties

nuokrypių: pluošto gijos nesusitraukia ir varžo dervos deformacijas, panašiai kaip plieninė armatūra besitraukiančiame betone.

Statybos pramonėje dažniausiai naudojamos trijų rūšių termoreaktyviosios dervos: epoksidinė, poliesterio, vinilo esterio. Šių dervų fizikinės ir mechaninės savybės pateiktos 6.2 lentelėje.

6.2 lentelė. Termoreaktyviųjų dervų savybės

Savybė	Termoreaktyviosios dervos		
	poliesterio	epoksidinė	vinilo esterio
Tankis, kg/m ³	1200–1400	1200–1400	1150–1350
Tempiamasis stipris, MPa	34,5–104	55–130	73–81
Tamprumo modulis, GPa	2,1–3,45	2,75–4,10	3,0–3,5
Puasono koeficientas	0,35–0,39	0,38–0,40	0,36–0,39
Šiluminio plėtimosi koeficientas, 10 ⁻⁶ /°C	55–100	45–65	50–75
Vandens absorbcija, %	0,15–0,6	0,08–0,15	0,14–1,30

Epoksidinių dervų pranašumai yra geros mechaninės savybės (ypač tempiamasis stipris), nesudėtingas naudojimas, nedidelės traukimosi deformacijos ir geras sukibimas su daugeliu pluoštų tipų. Pagrindiniai epoksidinių dervų trūkumai yra palyginti didelė kaina (didesnė nei poliesterio ir vinilo esterio dervų) ir trumpas kietėjimo laikas.

Poliesterio dervos pasižymi ypač mažu klampumu, atsparumu aplinkos poveikiams ir ilgaamžiškumu. Didžiausias šių dervų trūkumas – didelės susitraukimo deformacijos.

Vinilo esterio dervos yra plastiškesnės nei poliesterio, taip pat ypač gerai sukimba su stiklo pluoštu. Mechaninės vinilo esterio dervų savybės yra tarsi epoksidinių ir poliesterio dervų derinys: jos pasižymi dideliu tempiamuoju stipriu, yra nedidelio klampumo ir greitai kietėja. Dėl šių priežasčių vinilo esterio dervos dažniausiai naudojamos gaminant stiklo pluošto kompozitinę armatūrą. Vinilo esterio dervų trūkumai yra didesnės nei epoksidinės dervos susitraukimo deformacijos, taip pat jos blogiau sukimba su kitais (ne stiklo) pluoštais.

Į termoreaktyviųjų dervų mišinį dažnai dedama įvairių priedų, skirtų susitraukimo deformacijoms sumažinti, dervos klampumui ir rišimosi greičiui kontroliuoti, orui pašalinti, antioksidantų, inhibitorių (sumažina ultravioletinių saulės spindulių poveikį), antistatinių medžiagų, elektros laidumui mažinti ir kt. Tokiu būdu galima pagaminti dervos mišinį, kuris bus tinkamas naudoti su konkrečiu pluoštu tam tikromis eksploatacinėmis sąlygomis.

Termoplastinės dervos

Termoplastinės dervos įkaitinamos iki aukštos temperatūros (paprastai iki 200–350 °C) ir tuomet apdirbamos. Kai derva atvėsta, ji grįžta į pradinę kietąją būseną praktiškai nepakitusiomis fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis. Dėl šios dervos didelio klampumo kyla sunkumų tinkamai impregnuojant pluoštą, tolygiai paskirstant dervą be oro tuštumų.

Termoplastinių dervų pranašumai yra nedidelės susitraukimo deformacijos, nedidelė vandens absorbcija (iki 0,5 % masės). Kompozitinės armatūros gamybai dažniausiai naudojamos trijų rūšių termoplastinės dervos: polieterio eterio ketonas (PEEK), polifenileno sulfidas (PPS) ir polisulfonas (PSU). Šių dervų mechaninės savybės pateiktos 6.3 lentelėje.

6.3 lentelė. Termoplastinių dervų savybės

Savybė	Termoplastinės dervos		
	PEEK	PPS	PSU
Tankis, kg/m ³	1320	1360	1240
Tempiamasis stipris, MPa	100	82,7	70,3
Tamprumo modulis, GPa	3,24	3,30	2,48
Ribinės tempimo deformacijos	50	5	75
Puasono koeficientas	0,40	0,37	0,37
Šiluminio plėtimosi koeficientas, 10 ⁻⁶ /°C	47	49	56

Termoplastinių dervų mišiniai taip pat modifikuojami įvairias priedais, kurie dažniausiai būna skirti medžiagos apdirbimui palengvinti, padidinti atsparumui aukštomis temperatūroms ar ultravioletinei spinduliutei. Šiais priedais siekiama tobulinti dervos fizikines ir chemines savybes, dervos mišinį pritaikant konkrečiam pluoštui tam tikromis eksploatacinėmis sąlygomis.

Dervų užpildai

Užpildai naudojami tiek termoreaktyviosiose, tiek termoplastinėse dervose. Jų paskirtis – sumažinti polimero kiekį, susitraukimo deformacijas, modifikuoti fizikines savybes, užtikrinti apsaugą nuo ultravioletinių spindulių, temperatūros ir drėgmės poveikio. Dervų užpildai klasifikuojami į *funkcinius* ir *nefunkcinius*. Funkciniai užpildai pakeičia tam tikrą dervos savybę, pavyzdžiui, aliuminio trihidratas didina dervos atsparumą aukštai temperatūrai. Žerutis, lauko špatas, malto stiklo dalelės daro dervą atsparesnę mechaniniams poveikiams. Nefunkciniais užpildais (pavyzdžiui, kalcio karbonatas) mažinamas polimero kiekis dervoje, dėl to sumažėja dervos kaina. Užpildai gali sudaryti apie 40–65% dervos masės.

6.5. Skyriaus apibendrinimas

Pastaruosius kelis dešimtmečius kompozitinės medžiagos vis plačiau naudojamos ir statybos pramonėje. Pagrindinė priežastis, paskatinusi įprastos plieninės armatūros inovatyvių alternatyvų paiešką, yra įprastų gelžbetoninių elementų plieninės armatūros korozija ir su tuo susijusios didžiulės priežiūros išlaidos. Be puikių antikoroziinių savybių, kompozitinė armatūra pasižymi dideliu tempiamuoju stipriu, nedidele mase, magnetiniu neutralumu ir lengvu apdirbimu (lengva pjaustyti statybos aikštelėje).

Kompozitinės armatūros strypus sudaro stiklo, anglies, aramido, bazalto arba kitos medžiagos pluošto gijos, impregnuotos polimerine derva. Pagrindinė pluošto paskirtis – suteikti kompozitinei medžiagai reikiamą stiprumą, o polimerinės dervos – sujungti ir apsaugoti atskiras pluošto gijas ir užtikrinti kompozito vientisumą.

Kompozitinės armatūros platesnį naudojimo mastą riboja keli būdingi jos trūkumai: didesnė kaina, mažas tamprumo modulis, trapus suirimo pobūdis, pastebimas stiprio mažėjimas laikui einant ir projektavimo normų stoka. Dalis šių problemų gali būti išspręsta naudojant tam tikras kompozitinės armatūros rūšis. Pavyzdžiui, kompozitinės armatūros kaina nedaug skiriasi nuo plieno naudojant stiklo pluošto strypus, tačiau jos mažas tamprumo modulis ir stiprio mažėjimas kelia papildomų sunkumų projektuojant konstrukciją. Kita vertus, anglies pluošto strypai pasižymi dideliu tamprumo moduliu ir tempiamuoju stipriu, kuris mažai keičiasi laikui bėgant, bei geru atsparumu nuovargiui. Tačiau šių strypų kaina yra keliasdešimt kartų didesnė nei įprasto plieno. Trapiojo suirimo problema iš dalies gali būti išspręsta strypų gamyboje derinant kelis skirtingus pluoštus, bet tokiu atveju gamyba tampa daug sudėtingesnė ir brangesnė.

Pastaraisiais metais visame pasaulyje kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų tyrimai ir naudojimas realių statinių konstrukcijoms tapo ypač intensyvūs. Tai lemia per kelis dešimtmečius sukaupia tokių konstrukcijų projektavimo, statybos ir eksploatacijos patirtis.

Kontroliniai klausimai

1. Kokie yra pagrindiniai kompozitinės armatūros pranašumai, palyginti su plienine armatūra?
2. Kodėl kompozitinės medžiagos buvo pradėtos naudoti statyboje?
3. Kokioms statinių grupėms tikslinga taikyti kompozitinę armatūrą?
4. Kokie yra pagrindiniai kompozitinės armatūros trūkumai?
5. Kokia yra vidinė kompozitinės armatūros struktūra?
6. Kokie pluoštai plačiausiai naudojami gaminant kompozitinę armatūrą? Kokie yra kiekvieno pluošto pranašumai ir trūkumai?
7. Apibūdinkite termoplastinių ir termoreaktyviųjų dervų sąvokas.
8. Kokios priežastys riboja kompozitinės armatūros naudojimą statyboje?

Rekomenduojamoji literatūra

- ACI 440.1R-06 *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. 2006. Michigan: American Concrete Institute. 44 p.
- Atutis, M.; Valivonis, J. 2010. Lenkiamųjų iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų armavimo kompozitine armatūra ypatumai, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* 2(6): 71–78.
- Dolan, C. W.; Rizkalla, S.; Nanni, A. 1999. *Fiber Reinforced-Polymer Reinforcement for Concrete Structures. Fourth International Symposium (FRPRCS4)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- GangaRao, H. V. S.; Taly, N.; Vijay, P. V. 2006. *Reinforced Concrete Design with FRP Composites* USA: CRC Press. 400 p.
- Hackl, G. 2007. *Optimierung des Interfaces in kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen durch CVD-Beschichtung von Kohlenstoffkurzfasern*: Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg. 170 p.
- Jesse, F. 2004. *Tragverhalten von Filament garnen in zementgebundener Matrix* [Load Bearing Behaviour of Filament Yarns in a Cementitious Matrix]: Dissertation. Technische Universität Dresden. 345 p.
- Rizkalla, S. H. 1997. New generation of civil engineering structures and bridges, in *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRDS-3)*. Sapporo, Japan, 9–11.
- Scheffler, Ch. 2009. *Yur Beurteilung von Ar-Glasfasern in alkalischer Umgebung*: Dissertation. Technische Universität Dresden. 170 p.
- Wällisch, A. 2006. *Untersuchungen zur Beständigkeit von Glasfasern in Hochleistungsbetonen*: Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg. 148 p.

Naudingos nuorodos

- Overview of the FRP Composites Industry* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://www.mdacomposites.org/mda/overview.html>>.
- Product Comparison* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <http://www.aramid.com/index.php?option=com_content&task=view&id=80&Itemid=131>.
- Use of Composite Materials in Civil Infrastructure in Japan* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://www.wtec.org/loyola/compce/toc.htm>>.
- Перспективы применения неметаллической арматуры в преднапряженных бетонных конструкциях* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://www.uves.ru/articles/19/>>.

7. KOMPOZITINĖS ARMATŪROS GAMYBOS TECHNOLOGIJA

7.1. Įžanga

Kompozitinės armatūros savybės priklauso net tik nuo sudedamųjų medžiagų – derivos ir pluošto – charakteristikų, bet ir nuo pasirinktos gamybos technologijos. Per pastaruosius kelis dešimtmečius išstobulinta daugiau negu 20 skirtingų savų pranašumų ir trūkumų turinčių pluoštu armuotų polimerinių kompozitų gamybos būdų. Konkretus gamybos būdas pasirenkamas atsižvelgiant į gaminio paskirtį: automobilių ar lėktuvų dalys, armatūros strypai, statybiniai profiliuočiai, sporto reikmenys ir kt.

Statybos pramonėje dominuoja du pagrindiniai kompozitų gamybos būdai: *pultruzija* (angl. *pultrusion*) ir *rankinis dengimas* (angl. *hand lay-up*). Vidiniam betoninių konstrukcijų armavimui naudojami kompozitiniai strypai dažniausiai gaminami pultruzijos būdu. Rankinio dengimo būdas dažniausiai taikomas stiprinant konstrukcijas kompozitiniais lakštais. Toliau šiame skyriuje pateikiama šių technologinių procesų seka ir trumpai aptariami kiti polimerinių kompozitų gamybos būdai.

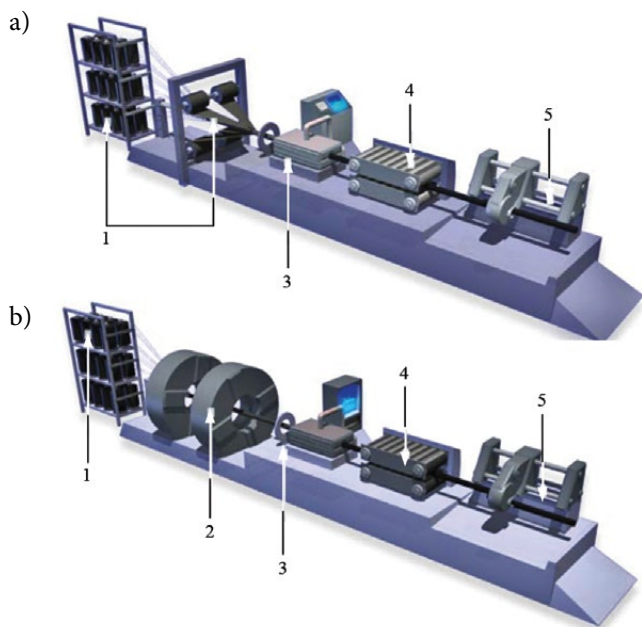
7.2. Pultruzija

Pultruzija (kilęs iš angliško junginio *pull* ir *extrusion*) yra automatizuotas pastovios skerspjūvio formos gaminių formavimo procesas. Pultruzijos būdu gaminama kompozitinė armatūra, konstrukciniai profiliuočiai, langų rėmai ir kt.

Pultruzijos technologinio proceso schema užpatentuota JAV 1951 m. 7-ajame dešimtmetyje pasaulyje jau buvo apie 20 pultruzijos technologijų taikančių pramonės įmonių. Šiuo metu pasaulyje žinoma apie 90 stambių įmonių, tiekiančių pultruzijos būdu pagamintus profiliuočius ir strypinę armatūrą.

Pultruzijos technologinio proceso schema pateikta 7.1 pav. Pirmajame etape sausos pluošto ritės (angl. *roving's* arba *spools*) paruošiamos tam tikroje lentynoje. Per kreipiamąjį įrenginį (angl. *forming die* arba *guide plate*) pluošto gijos surenkamos ir nukreipiamos į impregnavimo talpyklą (angl. *resin impregnator* arba *resin bath*), kuri nuolat pripildoma derivos mišinio.

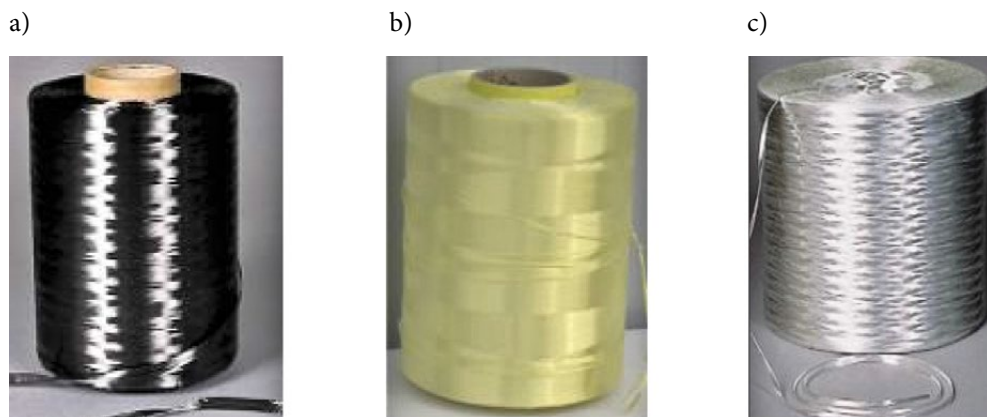
Derva impregnuotos pluošto gijos dažnai padengiamos specialia, nuo aplinkos poveikio ir mechaninio pažeidimo saugančia danga (angl. *surface veiling*) ir nukreipiamos į formavimo ir kietinimo įrenginį (angl. *forming and curing die*). Šio



7.1 pav. Pultruzijos technologinio proceso schema: a – pluošto gijas traukiant lygiagrečiai; b – pluošto gijas vyniojant; 1 – pluošto ritės; 2 – vyniojimo įrenginys; 3 – formavimo šampas; 4 – traukiamasis įrenginys; 5 – pjovimo įrenginys

įrenginio ilgis paprastai yra apie 500–1000 mm, o jame palaikoma apie 90–180 °C temperatūra. Sukietėję gaminiai pastoviu greičiu traukiami specialiu vikšrinio (angl. *caterpillar pullers*) arba pakaitinio traukimo (angl. *reciprocating pullers*) įrenginiu. Iki galo suformuoti gaminiai pjaustomi reikiamu ilgiu ir sandėliuojami.

Pultruzijos būdu gali būti suformuoti bet kokio pluošto armatūros strypai – aramido, stiklo, anglies ar bazalto. Gamybai naudojamos sauso pluošto ritės parodytos 7.2 pav. Kartais gaminama armatūra, susidedanti iš kelių skirtingų pluoštų, opti-



7.2 pav. Pultruzijos technologiniam procesui naudojamas pluoštas: a – anglies; b – aramido; c – stiklo

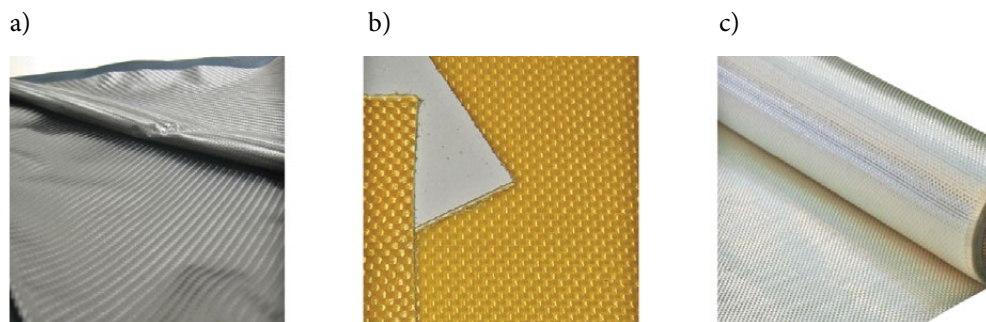
mizuojančią kainą ir mechanines armatūros savybes. Pavyzdžiui, derinant stiklo ir anglies pluoštus, galima gauti palyginti nebrangius ir didelio tamprumo modulio strypus. Konstrukciniu požiūriu kelių pluoštų derinimas gamybos procese taip pat yra pageidautinas, nes strypo irimas tampa labiau prognozuojamas. Toks kompozitas tampa kvaziplastinis, kai, suirus silpniesiems pluoštams, strypas dar nepraranda savo laikomosios galios. Šiuo metu armatūros strypų, susidedančių iš kelių skirtingų pluoštų, elgsena yra tyrinėjama, todėl statybose jie naudojami retai.

Pultruzija yra greitas ir ekonomiškai efektyvus kompozitinės armatūros gamybos būdas, leidęs gerokai sumažinti gamybos išlaidas. Armatūros strypo gamybos procesas yra nepertraukiamas. Gamybos linijos judėjimo greitis priklauso nuo gaminio dydžio ir formos: mažo skersmens ($\varnothing 6-8$ mm) armatūros strypai gaminami apie 150 cm/min greičiu, o sudėtingos formos profiliuočiai gali būti gaminami tik kelių centimetrų per minutę greičiu. Gaminant rumbuotuosius armatūros strypus, taikoma dviejų pakopų technologija: pirmajame etape suformuojami lygūs strypai, kurie iš dalies sukietinami. Antrajame etape prie lygaus paviršiaus papildomai priklijuojamas rumbelius suformuojantis pluošto sluoksnis. Kai kurie gamintojai rumbelius suformuoja lygiame ir sukietėjusiame armatūros strype frezuojant griovelius.

7.3. Dengimas rankomis

Dengimas rankomis yra seniausias polimerinių kompozitų gamybos būdas, kartu su plaušu ir polimerinėmis medžiagomis paplitęs nuo 1940 m. Dengimo rankomis procese naudojami du komponentai: pluošto lakštai ir derva. Skirtingai nei pultruzijos procese, naudojamos ne pluošto ritės, bet tam tikru būdu supinti pluošto audiniai (arba lakštai). Statybos pramonėje anglies, aramido ir stiklo pluoštų audiniai pateikti 7.3 pav.

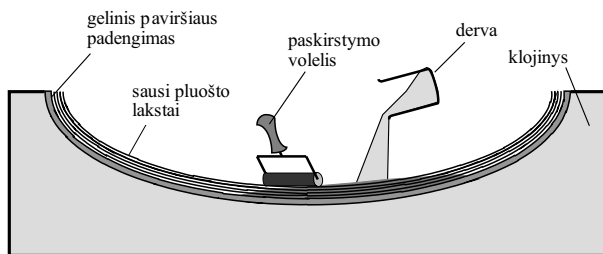
Gamybos metu klijuojami vienas arba keli pluošto lakštai, kol pasiekiamas reikiamas gaminio storis (paprastai iki 3 mm). Tokiu būdu gaunamas vienalytis klojinis



7.3 pav. Dengti rankomis naudojami pluošto audiniai: a – anglies; b – aramido; c – stiklo

formą atkartojantis gaminys (7.4 pav.). Formuojant storesnius gaminius, tarpas tarp pluošto lakštų gali būti užpildomas lengva ir porėta medžiaga (pvz., polistireniniu putplasčiu).

Priklausomai nuo gaminio formos ir kokybės reikalavimų dengimo rankomis technologija gali būti skirtingo sudėtingumo lygio. Kokybės samprata šiuo atveju apima tikslų pluošto ir dervos santykio išlaikymą, tolygų dervos paskirstymą, tikslius pluošto matmenis ir sandūras, minimalų oro tuštumų skaičių tarp sluoksnių.



7.4 pav. Dengimo rankomis schema

Vienas svarbiausių rodiklių, lemiančių gaminio savybes, yra tinkamas kietėjimo sąlygų: temperatūros, slėgio ir laiko – parinkimas. Aukščiausios kokybės gaminiai ruošiami aviacijos pramonėje, todėl čia taikomi specialūs gamybos procesai: išankstinis lakštų impregnavimas derva (angl. *prepreg*) ir vakuumavimas (angl. *vacuum bagging*). Taikant šiuos technologinius procesus, derva impregnuoti lakštai yra iš anksto sukarpomi ir sluoksniais dedami į klijinius. Siekiant sumažinti oro tuštumų tarp sluoksnių, klijinys su gaminiu yra dedamas į specialią talpyklą, iš kurios išsiurbiamas oras, taip pašalinant oro tuštumas tarp lakštų. Gaminys kietinamas specialiuose autoklavuose, parenkant reikiamą temperatūrą ir išorinį slėgį. Kai kokybei nėra keliami ypatingi reikalavimai, kompozitinį gaminį rankomis gali pasigaminti kiekvienas vartotojas, sluoksnis po sluoksnio klijuodamas pluošto lakštus. Galima išskirti keturis pagrindinius dengimo rankomis technologinius procesus:

- **Klojinio paruošimas.** Klojinio forma priklauso nuo gaminio matmenų, naudojamo pluošto ir dervos bei reikalaujamų kietėjimo sąlygų. Vientiniams gaminiams patogų pasigaminti vienkartinis klijinys (pvz., iš kieto polistireninio putplasčio). Serijiniams gaminiams, kai kietinama aukštoje temperatūroje ir dideliu išoriniu slėgiu, dažniausiai naudojami daugkartinio naudojimo plieniniai arba aliumininiai klijiniai.
- **Klojinio padengimas geliu** (angl. *gel coating*). Tai specialios sudėties derva (dažnai vadinama geliu), kuri eksploatacijos metu tampa išoriniu gaminio sluoksniu. Gelinio padengimo paskirtis gali būti dekoratyvinė, apsauginė ir konstrukcinė. Gelis užtikrina lengvą gaminio išėmimą iš klijinio sukietėjus dervai.

- **Lakštų dengimas rankomis.** Pluošto lakštai klojami ant gelio sluoksnio, kuris prieš tai padengiamas dervos mišiniu. Dervos mišinį sudaro derva, kietiklis ir specialūs priedai, skirti gaminio atsparumui ultravioletinei spinduliutei (inhibitoriai), aukštomis temperatūroms ar kitiems agresyviems poveikiams padidinti. Lakštai klojami sluoksniais, juos impregnuojant dervos mišiniu. Dervos paskirstymui ir oro tarp pluošto sluoksniams pašalinti naudojami teptukai, voleliai ar mentės.
- **Kietinimas ir išformavimas.** Gaminiai kietinami natūraliomis sąlygomis arba specialiuose autoklavuose, palaikant reikiamą temperatūrą ir slėgį. Išėjus gaminių atliekamas galutinis mechaninis apdirbimas.

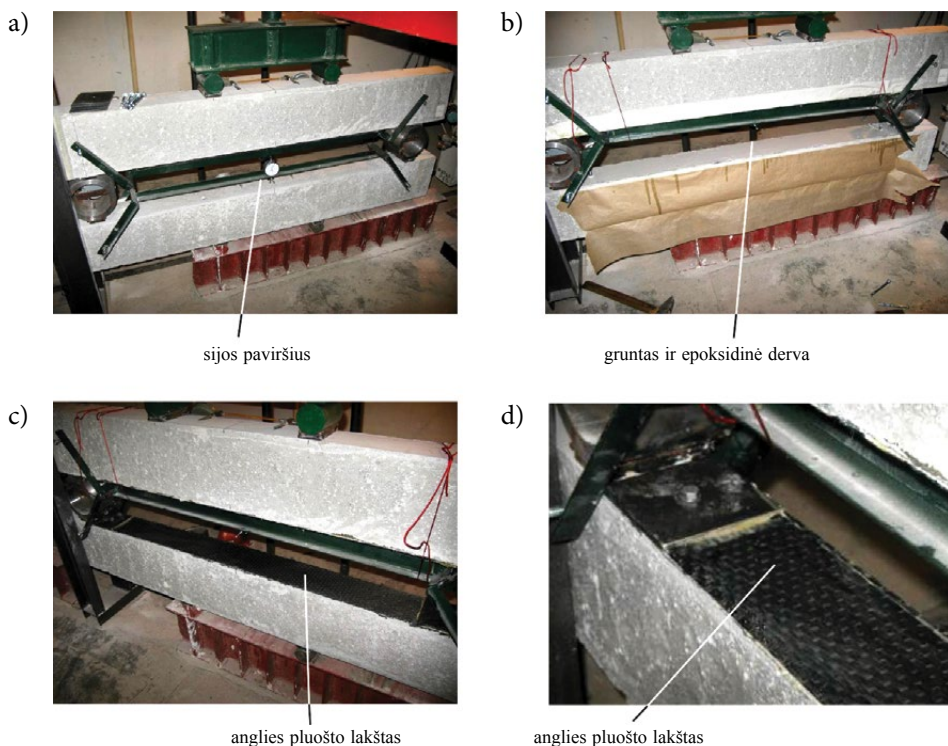
Dengimo rankomis technologija statybos pramonėje naudojama gelžbetoninėms, mūrinėms ir medinėms konstrukcijoms stiprinti. Nors technologinių procesų seka išlieka ta pati kaip ir kitose inžinerijos šakose, yra vienas esminis skirtumas. Kompozitinis gaminy (pavyzdžiui, automobilio korpusas ar dviračio rėmas) suketijęs išimamas iš klojinio. Kaip minėta, tuo tikslu klojiniai padengiami specialiu geliu, užtikrinančiu, kad gaminy nesukibs su klojinio paviršiumi. Statybos pramonėje naudojamo kompozitinio sluoksnio paskirtis – sustiprinti eksploatuojamas konstrukcijas, todėl geras stiprinamo paviršiaus ir kompozito sukibimas yra vienas svarbesnių veiksnių, lemiančių patikimą konstrukcijos ir kompozito sąveiką, o kartu ir stiprinamosios konstrukcijos laikomąją galią. Sukibimo kokybė ypač aktuali stiprinant lenkiamuosius elementus, nes juose kompozitiniai lakštai yra kaip išorinė armatūra. Dėl skirtingų kompozito ir klojinio sąlyčio zonos savybių (stiprinant klojinu gali būti laikomos pačios stiprinamosios konstrukcijos), statybos pramonėje daug dėmesio skiriama naudojamai dervai. Ji turi užtikrinti patikimą sukibimą tiek tarp pluošto lakštų, tiek su stiprinamąja konstrukcija. Dervos parenkamos priklausomai nuo stiprinamosios konstrukcijos paskirties, jos būklės ir statinio atsakingumo klasės.

Statybos pramonėje paprastai naudojama dengimo rankomis technologija, kai derva impregnuoti lakštai sluoksniais klijuojami prie stiprinamosios konstrukcijos paviršių ir vėliau kietėja natūraliomis sąlygomis. Pirmiausia stiprinamosios konstrukcijos paviršius tepamas plonu dervos mišinio sluoksniu (panašiai kaip gruntuojant prieš paviršių dažymą). Tuomet klijuojamas reikiamų matmenų pluošto lakštas. Dantytais voleliais lakštai tolygiai priglaudžiami prie konstrukcijos paviršiaus, kartu tolygiai paskirstant dervos mišinį ir pašalinant oro tuštumas. Jeigu reikalingi papildomi pluošto sluoksniai, procedūra kartojama. Stiprinimo darbams paprastai naudojamos epoksidinės dervos, kurių rišimosi trukmė yra nuo 1 iki 4 valandų. Stiprinimo darbai planuojami taip, kad per šį laiką stiprinamosios konstrukcijos ar jos dalių paviršiai būtų padengti.

Siekiant optimizuoti technologinius procesus ir medžiagų sąnaudas atliekami eksperimentiniai tyrimai. 7.5 pav. pateikta Vilniaus Gedimino technikos universi-

teto Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų laboratorijoje atliktų eksperimentinių sijų stiprinimo kompozitiniais lakštais darbų technologinių procesų seka. Pirmiausia paruošiamas stiprinamosios sijos paviršius, prie kurio bus klijuojami lakštai: betonas nušveičiamas, pašiaušiamas, pašalinamos silpnai sukibusios užpildo dalelės. Toliau sijos paviršius dengiamas grunto sluoksniu ir epoksidine derva (7.5 pav., b). Paskutiniame stiprinimo etape klijuojami anglies pluošto lakštai (7.5 pav., c ir d). Sustiprinta sija paliekama kietėti natūralioje aplinkoje ir vėliau išbandoma iki suirimo.

Prie apatinio sijos paviršiaus priklijuotas pluošto lakštas yra kaip papildoma išorinė armatūra. Galimi keli pluošto lakštais sustiprintos sijos suirimo pobūdžiai: 1) lakštas praslysta betono atžvilgiu; šio suirimo priežastimis gali būti netinkamas betono paviršiaus paruošimas, vadinamas *adheziniu suirimu*, arba netinkamas deros mišinys, vadinamas *koheziniu suirimu* (kai nukerpama pati derva); 2) sukibimas tarp sluoksnių pakankamas, tačiau nukerpamas tempiamosios zonos betonas; 3) nutraukiamas anglies pluošto lakštas; tai lengviausiai prognozuojama suirimo forma, vykstanti pasiekus lakšto tempiamąjį stiprį.



7.5 pav. Anglies pluošto lakštais stiprinama eksperimentinė sija: a – sijos paviršiaus paruošimas; b – paviršiaus padengimas gruntu ir epoksidine derva; c ir d – anglies pluošto lakštų klijavimas

Stiprinamos sijos suirimo forma priklauso ne tik nuo naudojamos dervos ir pluošto, bet ir nuo darbų kokybės – tinkamo lakšto impregnavimo derva, oro tuštumų pašalinimo, stiprinamo paviršiaus paruošimo. Todėl stiprinimo darbams atlikti būtina turėti specialių žinių, darbo patirties ir įgūdžių.

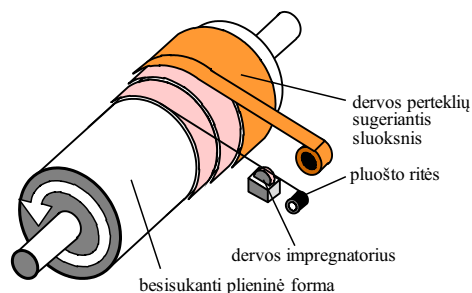
Dengimas rankomis yra populiarus polimerinių kompozitų gamybos metodas dėl kelių priežasčių: a) nesudėtingi technologiniai procesai; b) elementų gamybai nereikalingi sudėtingi įrenginiai; pakanka paprasčiausių darbo priemonių (volelių, teptukų ir menčių); c) stiprinimo darbams atlikti tinka platus įvairių pluoštų ir dervų asortimentas.

Reikia paminėti ir keletą dengimo rankomis technologijos trūkumų. Dažniausia problema – nepakankamas pluošto impregnavimas derva ir susidarančios oro tuštumos tarp sluoksnių. Sukietėjus gaminiiui, tiek neimpregnuotos pluošto zonos, tiek susidariusios oro tuštumos yra mikroplyšių atsiradimo židiniai, kuriems išplitus, kompozitas išsisluoksniuoja arba suyra. Mikroplyšių plitimas sumažina ne tik gaminio mechaninį atsparumą, bet ir atsparumą agresyviosios aplinkos poveikiams. Kita vertus, išsisluoksniavus kompozitui, pažeidžiama estetinė konstrukcijos išvaizda. Kiti dengimo rankomis trūkumai yra šie:

- dervos mišinio (t. y. derva, kietiklis ir specialūs priedai) paruošimas, pluošto ir dervos santykis bei galutinė gaminio kokybė tiesiogiai priklauso nuo darbų atliekančių asmenų žinių, įgūdžių ir patirties;
- rankinis dengimas yra lėtas ir darbui imlus procesas;
- dirbant su dervomis kyla sveikatos ir saugumo problemų; kadangi pluoštas impregnuojamas rankomis, darbams palengvinti dervos mišinys turi būti mažai klampus; mažesnės klampos dervos gali lengvai patekti ant drabužių ir odos, be to, jos pasižymi blogesnėmis mechaninėmis savybėmis.

7.4. Kiti polimerinių kompozitų gamybos būdai

Statybose kai kuriais atvejais taikomi ir kiti polimerinių kompozitinių elementų gamybos būdai. Paprastai jie taikomi gaminant vieną ar kelis unikalius elementus. Didelių matmenų apskritojo skerspjūvio elementai gali būti gaminami vyniojant pluoštą (angl. *filament winding*). Šio gamybos proceso schema pateikta 7.6 pav. Pluošto gijos yra impregnuojamos derva ir sluoksniais vyniojamos ant besisukančios plieninės formos. Dervos perteklius sugeria specialios dangos.



7.6 pav. Pluošto vyniojimo technologinio proceso schema

Vyniojant pluoštą galima pagaminti apskritojo skerspjūvio kolonas, sijas, taip pat įvairias talpyklas.

Didelių matmenų kompozitinių tiltų sijos gali būti gaminamos taikant kitus technologinius procesus. Vienas iš alternatyvių būdų – elementų gamyba uždaruose klojiniuose (angl. *resin transfer molding* – RTM ir *resin infusion molding* – RIM). Šio proceso metu pluošto lakštai sudedami į klojinius ir visa forma užpildoma dervos mišiniu. Kadangi klojinys yra uždaras, oro tuštumoms pašalinti derva tiekama naudojant slėgį. Gali būti naudojamas ir atviras klojinys. Tuomet taikoma vakuumavimo technologija (angl. *vacuum-assisted resin transfer molding* – VARTM). Šio proceso metu sausas gaminys įdedamas į plastikinę talpyklą, iš kurios išsiurbiamas oras. Tuomet tiekiamas dervos mišinys, kuris, veikiamas vakuuminio slėgio, skverbiasi ir užpildo tarpus tarp pluošto lakštų.

7.5. Kompozitinės armatūros gaminiai

Statybinėms konstrukcijoms naudojami kompozitinės armatūros strypai yra labai įvairūs. Be skirtingų pluoštų (stiklo, anglies, aramido, bazalto), dervos mišinių (epoksidinės, poliesterinės, vinilo esterio ir kt.) ir gamybos technologijos (gaminio formavimas, kietinimas, kokybės kontrolė), taikomi įvairūs strypų paviršiaus padengimo būdai. Skirtingai nei naudojant plieninę armatūrą, galima gauti neribotą kiekį skirtingomis fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis pasižyminčių kompozitinės armatūros rūšių.

Pirmieji kompozitiniai strypai buvo gaminami lygiu paviršiumi, tačiau dėl blogo sukibimo su betonu šiuo metu tokie strypai nebenaudojami. Gamybos metu, kai derva nėra sukietėjusi, strypus patogiau padengti smėlio sluoksniu. Toks paviršiaus apdirbimas labai pagerina armatūros sukibimą esant nedideliam apkrovimo lygiui. Smėliu padengtų polimerinės armatūros paviršių pavyzdžiai pateikti 7.7 pav.

Paviršiaus dengimas smėlio sluoksniu veiksmingai pagerina kompozitinio armatūros strypo sukibtį dėl susidarančio mechaninio inkaravimo ir padidėjusio strypo paviršiaus ploto. Kita vertus, didėjant apkrovoms ši danga ne visuomet užtikrina reikiamą sukibtį su betonu. Šiuo atveju efektyvesnis yra rumbelių formavimas armatūros paviršiuje. Kompozitinės armatūros strypų paviršiuje suformuotų rumbelių pavyzdžiai pateikti 7.8 pav.

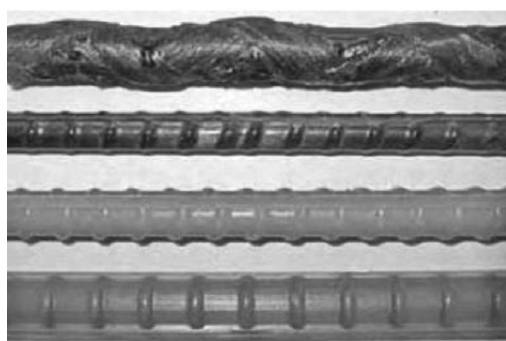
Lietuvoje pirmieji kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų eksperimentiniai tyrimai atlikti 1970 m. Betoninės konstrukcijos buvo armuojamos stiklo pluošto strypais, kurių paviršius padengtas epoksidinėmis dervomis. Ši armatūra dėl betone vyraujančios šarminės aplinkos ilgainiui buvo pažeista, o pradėti tyrimai nutraukti.

Pasaulio rinkose atsiradus naujos kartos kompozitiniais strypams, jais armuotų betoninių konstrukcijų tyrimai atnaujinti ir Lietuvoje. 2011 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete atlikti pirmieji naujos kartos kompozitiniais stiklo pluošto („Schöck ComBar“, Vokietija) ir bazalto pluošto („RockBar“, Rusija) strypais armuotų konstrukcijų tyrimai. Šios armatūros pavyzdžiai pateikti 7.9 pav.

Kompozitinės armatūros strypų skerspjūvis nebūtinai yra apskritosios formos. Dėl didesnio paviršiaus ploto ir geresnio sukibimo kartais taikomi stačiakampiai ar juostiniai skerspjūviai. Be to, pluoštai gali būti įvairiai supinami suformuojant lynus, naudojamus kaip iš anksto įtempta armatūra. Įvairių Japonijos gamintojų tiekiamos kompozitinės armatūros pavyzdžiai pateikti 7.10 pav.



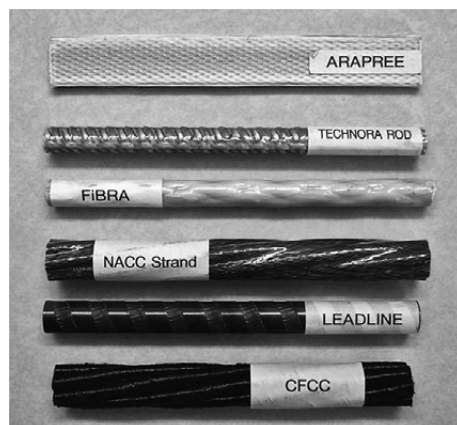
7.7 pav. Kompozitinių strypų paviršiai, padengti smėlio sluoksniu



7.8 pav. Suformuoti rumbeliai ant kompozitinių strypų paviršiaus



7.9 pav. Bazalto pluošto *RockBar* (dengti smėliu) ir stiklo pluošto *ComBar* (suformuoti rumbeliai) kompozitinės armatūros pavyzdžiai



7.10 pav. Japonijos gamintojų tiekiamą kompozitinę armatūrą

7.6. Skyriaus apibendrinimas

Polimerinių kompozitų gamybos technologija turi reikšmingą įtaką fizikinėms ir mechaninėms elemento savybėms, ypač tais atvejais, kai gamybos procesas nėra automatizuotas. Vienas seniausių ir populiariausių kompozitų gamybos būdų yra dengimas rankomis. Dengiant rankomis pluošto lakštai impregnuojami derva, o sluoksniais sudedami į iš anksto paruoštą atvirą klojinį. Šio gamybos būdo privalumai yra šie: nesudėtingas technologinis procesas, galimybė pasigaminti bet kokios formos gaminius, yra darbams atlikti reikalingų derių ir pluoštų įvairovė. Didžiausias šio būdo trūkumas – nekontroliuojamas dervos ir pluošto santykis bei oro tuštumų skaičius tarp pluošto lakštų, todėl gaminio kokybė tiesiogiai priklauso nuo dirbančių asmenų žinių, įgūdžių ir patirties. Dėl didelių darbo sąnaudų dengimo rankomis būdu pagaminti elementai yra brangūs. Statyboje šis metodas dažniausiai taikomas stiprinant eksploatuojamas gelžbetonines ir mūrines konstrukcijas.

Ekonomiškai efektyvesnis ir automatizuotas kompozitinių strypų ir profiliuočių formavimo būdas vadinamas pultruzija. Šio proceso metu suformuojami ilgi, pastovaus skerspjūvio gaminiai, kurie proceso pabaigoje supjaustomi reikiamo ilgio elementais.

Kiti kompozitinių dirbinių gamybos būdai, tokie kaip pluošto vyniojimas ir kt., taikomi atskirais atvejais, kai pagal projektą numatyti nestandartinių matmenų elementai.

Statybinėms konstrukcijoms naudojami kompozitinės armatūros strypai yra labai įvairūs. Be skirtingų pluoštų (stiklo, anglies, aramido, bazalto), dervos mišinių (epoksidinės, poliesterinės, vinilo esterio ir kt.) ir gamybos technologijos (gaminio formavimas, kietinimas, kokybės kontrolė), taikomi ir įvairūs strypų paviršiaus padengimo būdai. Skirtingai nei plieninės armatūros atveju, galima gauti neribotą skaičių skirtingomis fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis pasižyminčių kompozitinės armatūros rūšių.

Dėl blogo sukibimo su betonu, lygaus paviršiaus kompozitiniai strypai armuotojo betono konstrukcijoms naudojami labai retai. Strypų sukibimas su betonu gali būti pagerintas, taikant paviršines smėlio sluoksnio dangas, suformuojant rumbelius arba spirales, naudojant stačiakampio ar juostinio skerspjūvio strypus.

Kontroliniai klausimai

1. Kokie yra dengimo rankomis technologijos pranašumai ir trūkumai?
2. Kurioje statybos srityje dažniausiai taikomas dengimo rankomis būdas?
3. Kas yra pultruzija?
4. Kokie elementai gali būti pagaminti pultruzijos būdu?
5. Kokie yra automatizuotos gamybos pranašumai, lyginant su dengimo rankomis būdu?
6. Kaip gamybos proceso metu galima pagerinti kompozitinių strypų sukibimą su betonu?

Rekomenduojamoji literatūra

- ACI 440.5-08 Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars*. 2008. Michigan: American Concrete Institute. 5 p. ISBN 9780870312861.
- ACI 440.6M-08 Metric Specification for Carbon & Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Conc Reinforcement*. 2008. Michigan: American Concrete Institute. 6 p. ISBN 9780870312892.
- Bank, L. C. 2006. *Composites for Construction: Structural Design with Composite Materials*. John Wiley & Sons. 560 p. ISBN 9780471681267.
- GangaRao, H. V. S.; Taly, N.; Vijay, P. V. 2006. *Reinforced Concrete Design with FRP Composites USA*: CRC Press. 400 p. ISBN 9780824758295.

Naudingos nuorodos

- Bridge & Transportation Products* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <http://www.buildingsystems.basf.com/p02/USWeb-Internet/buildingsystems/en_GB/content/microsites/buildingsystems/products/finder/industry/Bridge_and_Transportation>.
- CGB Carbon Grossbauteile GMBH* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://www.carbon-grossbauteile.com/en/>>.
- Civil Engineering Products* [interaktyvus]. 2012. Teijin Aramid. Prieiga per internetą: <<http://www.teijinaramid.com/applications/civil-engineering-products/>>.
- FRP and Civil Engineering* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://www.sireg.it/en/civil-engineering/products-civil-eng/>>.
- Hughes Brothers Aslan Composite Products* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://aslanfrp.com/>>.
- Schöck ComBAR GFRP Reinforcement* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://www.schoeck-combar.com/comb/combar-gfrp-reinforcement/combar--184>>.
- Utec Structural Materials* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://www.advanced-composites.co.uk/index.htm>>.
- Базальтопластиковая и стеклопластиковая арматура* [ineraktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://armaturaplus.ru/>>.
- Композитная арматура* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://galen.su/produktsiya/kompozitnaya-armatura-rockbar/>>.
- Стеклопластиковая композитная арматура* [interaktyvus]. 2012. Prieiga per internetą: <<http://gidrosar.ru/polymer/armatura-stekloplast>>.

8. KOMPOZITINĖS ARMATŪROS SAVYBĖS

8.1. Įžanga

Vienas pagrindinių kompozitinės armatūros trūkumų – didelė kaina, kurią formuoja brangios žaliavos ir sudėtinga gamybos technologija. Vis dėlto, pažvelgus į šios armatūros fizikines ir mechanines savybes, susiduriama ir su kitais šios armatūros trūkumais. Statyboje naudojamų polimerinių strypų tamprumo modulis gali būti iki 3–5 kartų mažesnis. Mažesnės tamprumo modulio reikšmės lemia didesnius armuotojo betono elementų įlinkius ir plyšio pločius, lyginant su įprastaisiais gelžbetoniniais elementais. Nors kompozitinės armatūros trumpalaikis tempiamasis stipris didelis, šią jos savybę ne visuomet galima išnaudoti dėl nuovargio ir statinio nuovargio reiškinių, vykstančių pačioje kompozitinėje medžiagoje. Daugelis kompozitinės armatūros tipų yra atsparūs korozijai, tačiau kai kurie iš jų gali būti greitai pažeidžiami specifinės agresyviosios aplinkos. Pavyzdžiui, neapsaugotas stiklo pluoštas nėra atsparus betone susidarantiems šarminėms aplinkoms. Su šia problema susidurta tiriant stiklo pluošto strypais armuotas betono konstrukcijas ankstyvuoju jų kūrimo etapu. Ne visuomet pavyksta užtikrinti ir gerą kompozitinio strypo ir betono sukibimą.

Nepaisant minėtų trūkumų, polimerinė armatūra turi ir teigiamų savybių, kurios daugiausia nulemia jų naudojimą šiuolaikinių statinių konstrukcijose. Pagrindiniai kompozitinės armatūros pranašumai yra ypač didelis stipris (kelis kartus viršijantis plieno), atsparumas korozijai, nedidelis svoris ir lengvas apdirbimas statybos aikštelėje.

Šiame skyriuje detalios aptariamos kompozitinės armatūros fizikinės ir mechaninės savybės, pateikiamos pagrindinės formulės joms nustatyti. Būtina pažymėti, kad galutinės strypo savybės priklauso ne tik nuo gamyboje naudojamų pluoštų ir dervų, bet ir nuo gamybos technologijos. Todėl, projektuojant kompozito strypais armuotus betoninius elementus, visuomet būtina vadovautis gamintojo pateiktomis armatūros strypų techninėmis specifikacijomis.

8.2. Fizikinės savybės

Šiame knygos skyriuje tiek fizikinėms, tiek mechaninėms armatūros savybėms aprašyti remsimės bendrais kompozitinių medžiagų savybes apibūdinančiais dėsniais. Pagrindinis principas, kuriuo remiantis nustatomos kompozitinių medžiagų savybės,

pagrįstas kompozitą sudarančių medžiagų tūrio arba masės dalies apskaičiavimu. Tarkime, nagrinėjame kompozitinį elementą, kurio tūris v_c , o masė m_c . Kompozitinis elementas sudarytas iš pluošto ir matricos, kurių užimamą tūrį ir masę pažymėkime atitinkamai v_{fi} bei m_{fi} (pluošto) ir v_m bei m_m (matricos). Pluošto ir matricos tūrio bei masės dalis kompozitiniame elemente pažymėkime atitinkamai V_{fi} bei M_{fi} (pluošto) ir V_m bei M_m (matricos). Laikydami prielaidas, kad kompozitiniame elemente nėra oro tuštumų, jo tūrį ir masę galime išreikšti tokiais priklausomybėmis:

$$v_f = v_{fi} + v_m, \quad (8.1)$$

$$m_f = m_{fi} + m_m. \quad (8.2)$$

Pluošto ir matricos užimamą tūrio dalį kompozitiniame gaminyje galima išreikšti taip:

$$V_{fi} = \frac{v_{fi}}{v_f}, \quad (8.3)$$

$$V_m = \frac{v_m}{v_f}. \quad (8.4)$$

Analogiškai apskaičiuojamos ir pluošto bei matricos masės dalys kompozitiniame gaminyje:

$$M_{fi} = \frac{m_{fi}}{m_f}, \quad (8.5)$$

$$M_m = \frac{m_m}{m_f}. \quad (8.6)$$

Sudėję pluošto ir dervos tūrio arba masės dalis, gauname vienetą:

$$V_{fi} + V_m = 1, \quad (8.7)$$

$$M_{fi} + M_m = 1. \quad (8.8)$$

Gautomis (8.1–8.8) formulėmis remsimės nustatydami kompozitinės armatūros fizikines ir mechanines savybes.

8.2.1. Tankis

Polimerinės armatūros tankis apskaičiuojamas atsižvelgiant į dervos ir pluošto tankį bei jų užimamą tūrio dalį kompozite:

$$\rho_f = \rho_{fi} V_{fi} + \rho_m V_m, \quad (8.9)$$

čia ρ_f – kompozitinės armatūros tankis; ρ_{fi} – pluošto tankis; ρ_m – matricos tankis; V_{fi} – pluošto tūrio dalis; V_m – matricos tūrio dalis.

Pasinaudoję 6.4 poskyryje pateiktais pluoštų bei termoreaktyviųjų dervų tankiais (atitinkamai 6.1 ir 6.2 lentelėse), galime sudaryti betoninėms konstrukcijoms armuoti dažniausiai naudojamų polimerinių strypų tankių lentelę (8.1 lentelė). Šioje lentelėje pateiktos tankio reikšmės apskaičiuotos kintant pluošto tūrio daliai V_{fi} nuo 0,5 iki 0,75.

8.1 lentelė. Kompozitinės armatūros strypų tankiai, kai pluošto tūrio dalis $V_{fi} = 0,5-0,75 \text{ kg/m}^3$

Matrica \ Pluoštas	Anglies pluoštas	Aramido pluoštas	Stiklo pluoštas	Plienai
Poliesterio derva	1430–1650	1310–1430	1750–2170	7850
Epoksidinė derva	1440–1670	1320–1450	1760–2180	
Vinilo esterio derva	1440–1630	1300–1410	1730–2150	

8.1 lentelėje pateikti duomenys rodo, kad kompozitinė armatūra yra 4–6 kartus lengvesnė už plieninę, t. y. polimerinių strypų tankis yra kur kas mažesnis. Dėl šios savybės kompozitinę armatūrą lengviau transportuoti ir naudoti statybos aikštelėje. Taip pat ji tinkama optimizuojant ir mažinant konstrukcijos masę.

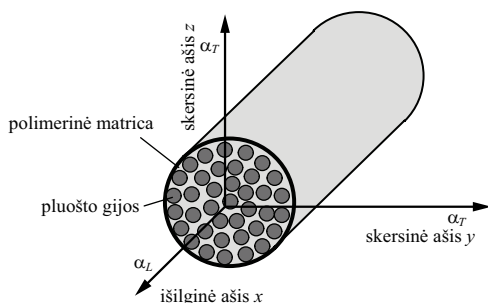
8.2.2. Temperatūrinio plėtimosi koeficientas

Polimerinės armatūros temperatūrinio plėtimosi koeficientas priklauso nuo pluošto ir dervos tipo, jų tūrinės dalies bei pluošto savybių. Stiklo ir bazalto pluoštai yra izotropinės medžiagos, todėl jų temperatūrinio plėtimosi koeficientai tiek skersine, tiek išilgine pluoštui kryptimis yra vienodi. Izotropinės yra ir kompozitą sudarančios matricos. Anglies ir aramido pluoštuose pasireiškia didelis savybių anizotropiškumas. Tai priklauso nuo molekulinės šių pluoštų struktūros (6.14 ir 6.15 pav.).

Temperatūrinio plėtimosi koeficientas išilgine pluoštui kryptimi α_L labiausiai priklauso nuo pluošto savybių, o koeficientas skersine kryptimi α_T – nuo polimerinės matricos (8.1 pav.).

Kai armatūros strypą sudaro izotropiniai pluoštai (stiklo arba bazalto), išilginis ir skersinis kompozitinės armatūros temperatūrinio plėtimosi koeficientai apskaičiuojami pagal tokias formules:

$$\alpha_{f,L} = \frac{E_{fi} V_{fi} \alpha_{fi} + E_m V_m \alpha_m}{E_{fi} V_{fi} + E_m V_m}, \quad (8.10)$$



8.1 pav. Kompozitinio strypo ašys ir temperatūrinio plėtimosi koeficientai

$$\alpha_{f,T} = (1 + \nu_m) V_m \alpha_m + (1 + \nu_{fi}) V_{fi} \alpha_{fi} - \alpha_{f,L} (\nu_{fi} V_{fi} + \nu_m V_m), \quad (8.11)$$

čia E_{fi} ir E_m – pluošto ir matricos tamprumo moduliai; V_{fi} ir V_m – pluošto ir matricos tūrio dalys; α_{fi} ir α_m – pluošto ir matricos temperatūrinio plėtimosi koeficientai; ν_{fi} ir ν_m – pluošto ir matricos Puasono koeficientai.

Kai armatūros strypą sudaro anizotropiniai pluoštai (aramido arba anglies), išilginis ir skersinis kompozitinės armatūros temperatūrinio plėtimosi koeficientai apskaičiuojami pagal šias priklausomybes:

$$\alpha_{f,L} = \frac{E_{fi,L} V_{fi} \alpha_{fi,L} + E_m V_m \alpha_m}{E_{fi,L} V_{fi} + E_m V_m}, \quad (8.12)$$

$$\alpha_{f,T} = V_{fi} \alpha_{fi,T} + V_m \alpha_m + V_{fi} \nu_{fi} (\alpha_{fi,L} - \alpha_{f,L}) + V_m \nu_m (\alpha_m - \alpha_{f,L}), \quad (8.13)$$

čia $E_{fi,L}$ ir E_m – išilginis pluošto ir matricos tamprumo moduliai; V_{fi} ir V_m – pluošto ir matricos tūrio dalys; $\alpha_{fi,L}$; $\alpha_{fi,T}$ ir α_m – pluošto išilginis ir skersinis bei matricos temperatūrinio plėtimosi koeficientai; ν_{fi} ir ν_m – pluošto ir matricos Puasono koeficientai.

Statybinėms konstrukcijoms dažniausiai naudojamų kompozitinių armatūros strypų išilginio ir skersinio šiluminio plėtimosi koeficiento kitimo ribos pateiktos 8.2 lentelėje.

8.2 lentelė. Kompozitinės armatūros išilginio ir skersinio temperatūrinio plėtimosi koeficientų kitimo ribos, kai pluošto tūrio dalis $V_{fi} = 0,5-0,75$

Kryptis	Temperatūrinio plėtimosi koeficientas ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)				
	plienas	nerūdijantysis plienas	stiklo pluošto armatūra	anglies pluošto armatūra	aramido pluošto armatūra
Išilginis $\alpha_{f,L}$	11	10–16,5	6–10	nuo 9 iki 0	nuo –6 iki –2
Skersinis $\alpha_{f,T}$	11	10–16,5	21–23	74–104	60–80

Neigiami anglies ir aramido pluoštų išilginio temperatūrinio plėtimosi koeficientai reiškia, kad kylant temperatūrai šie pluoštai traukiasi, o krįstant – ilgėja. Betono temperatūrinio plėtimosi koeficientas svyruoja nuo 7 iki $13 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Skirtingi betono ir kompozitinės armatūros skersinio temperatūrinio plėtimosi koeficientai gali sukelti papildomus vidinius įtempius armuotajame betoniniame elemente ir pagreitinti išilginių plyšių atsivėrimą. Plačiau šis klausimas aptariamas 10-ajame knygos skyriuje, nagrinėjant armatūros ir betono sąveiką.

8.3. Mechaninės savybės veikiant trumpalaikiams poveikiams

Statybinėms konstrukcijoms naudojamų polimerinių medžiagų mechaninės savybės dažniausiai nustatomos atliekant eksperimentinius tyrimus, kurių metu kompozitinių elementų (strypų, lakštų ir kt.) savybės nustatomos veikiant trumpalaikėmis apkrovomis. Vis dėlto net ir nedaug pasikeitus pluošto ar matricos sudėčiai dėl mechaninių savybių reikšmingų pokyčių minėtus tyrimus būtina atlikti iš naujo. Polimerinės armatūros strypų mechanines savybes patogu nustatyti mikromechaniniu būdu, t. y. remiantis kompozitą sudarančių komponentų kiekiais ir jų savybėmis. Toliau šiame poskyryje pateikiamos išraiškos kompozitinių strypų trumpalaikėms mechaninėms savybėms apskaičiuoti.

8.3.1. Tempimas

Tempiamasis stipris ir tamprumo modulis yra pagrindinės kompozitinės armatūros mechaninės savybės. Šioms savybėms didžiausią įtaką turi: pluošto ir matricos savybės, jų proporcijos ir pasiskirstymas, cheminė ir fizikinė sąveika, gamybos technologija ir kokybės kontrolė gamybos metu. Prognozuojant kompozitų savybes mikromechaniniu požiūriu, įvertinamos pluošto ir matricos savybės. Gamybos technologija ir kokybės kontrolė priklauso nuo konkretaus armatūros gamintojo.

Kompozitinės armatūros tamprumo modulis išilgine pluoštui kryptimi apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$E_{f,L} = E_{fi,L} V_{fi} + E_m (1 - V_{fi}), \quad (8.14)$$

čia $E_{fi,L}$ ir E_m – išilginis pluošto ir matricos tamprumo moduliai; V_{fi} – pluošto tūrio dalis.

Kaip jau minėta, anglies ir aramido pluoštai yra ortotropinės medžiagos, todėl skiriasi jų tamprumo moduliai išilgine ir skersine pluoštui kryptimis. Išilginio $E_{fi,L}$ ir skersinio $E_{fi,T}$ tamprumo modulių santykis aramido pluoštui sudaro apie 24, didelio stiprio anglies pluoštui – 15, didelio tamprumo modulio anglies pluoštui – 65.

Kai armatūros strypą sudaro kelių rūšių pluoštai, jo tamprumo modulis išilgine pluoštui kryptimi apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

$$E_{f,L} = E_{fi1,L} \cdot V_{fi1} + E_{fi2,L} \cdot V_{fi2} \cdot E_m \cdot (1 - V_{fi1} - V_{fi2}), \quad (8.15)$$

čia $E_{fi1,L}$ ir $E_{fi2,L}$ – išilginiai pirmojo ir antrojo pluoštų tamprumo moduliai; V_{fi1} ir V_{fi2} – pirmojo ir antrojo pluošto tūrio dalys.

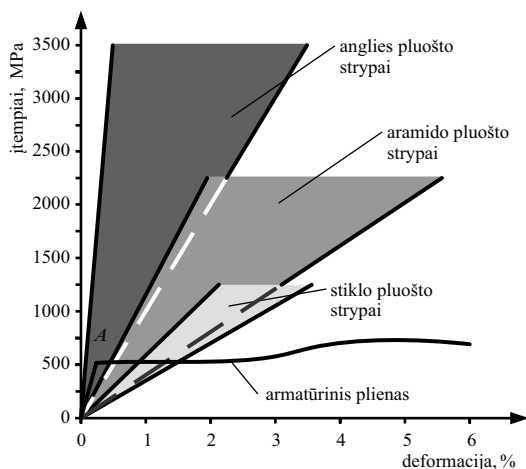
Kompozitiniai armatūros strypai, kaip ir juos sudarantys pluoštai, deformuojasi tampriai iki pat irimo apkrovos. Ribinės pluošto deformacijos irimo metu paprastai yra mažesnės negu matricos, todėl kompozitinių armatūros strypų tempiamasis stipris išilgine kryptimi apskaičiuojamas taikant tokią priklausomybę:

$$f_{fi,L} = f_{fit} \left[V_{fi} + \frac{E_m}{E_{fi,L}} (1 - V_{fi}) \right], \quad (8.16)$$

čia f_{fit} – pluošto tempiamasis stipris; $E_{fi,L}$ ir E_m – išilginis pluošto ir matricos tamprumo moduliai; V_{fi} – pluošto tūrio dalis.

Pasaulyje armuotojo betono konstrukcijoms dažniausiai naudojamos tempiamosios kompozitinės armatūros įtempių ir deformacijų diagramos pateiktos 8.2 pav. Tame pačiame paveiksle palyginimui pateikta plieninės armatūros įtempių ir deformacijų priklausomybė. Iš 8.2 pav. matyti, kad plieninės armatūros stipris yra iki 7 kartų mažesnis už kompozitinės, tačiau ribinės deformacijos irimo metu yra didesnės. Skiriasi ir šių armatūrų elgsena tempiant. Gelžbetoninėms konstrukcijoms naudojami plieno strypai turi aiškią plastinę stadiją. Veikiami tempimo įtempių jie tampa tampriai deformuojasi iki takumo (paprastas plienas) arba sąlyginės takumo ribos (stiprusis plienas), o vėliau suyra plastiškai. Kompozitiniai strypai iki pat suirimo deformuojasi tampriai, o suyra trapijai (8.3 pav.). Kaip minėta, plieno plastiškumas yra svarbus veiksnys, lemiantis plastinį įprastų gelžbetoninių elementų suirimo pobūdį esant saugos ribinio būvio. Trapus kompozitinės armatūros irimas – vienas didžiausių jos trūkumų, lemiančių trapų ir staigų polimeriniais strypais armuotų betoninių elementų suirimą.

Tempiamasis kompozitinės armatūros stipris priklauso ir nuo strypo skersmens. Bandymais nustatyta, kad didėjant armatūros skersmeniui, tempiamasis stipris mažėja, kai kuriais atvejais net iki 40 %. Todėl būtina atkreipti dėmesį į strypų gamintojo pateikiamus armatūros stiprius konkrečiam skerspjūviui.



8.2 pav. Kompozitinės ir plieninės armatūrų įtempių ir deformacijų diagramos

8.3 pav. Trapus stiklo pluošto armatūros irimas atliekant tempimo bandymą



8.3 lentelė. Kompozitinės ir plieninės armatūros savybės, kai pluošto tūrio dalis $V_{fi} = 0,5-0,75$

Savybė	Medžiaga			
	plienas	stiklo pluoštas	anglies pluoštas	aramido pluoštas
Tamprumo modulis išilgai pluošto, GPa	200	35–60	100–580	40–125
Tempiamasis stipris, MPa	450–700	450–1600	600–3500	1 000–2500
Ribinė irimo deformacija, %	5–20	1,2–3,7	0,5–1,7	1,9–4,4

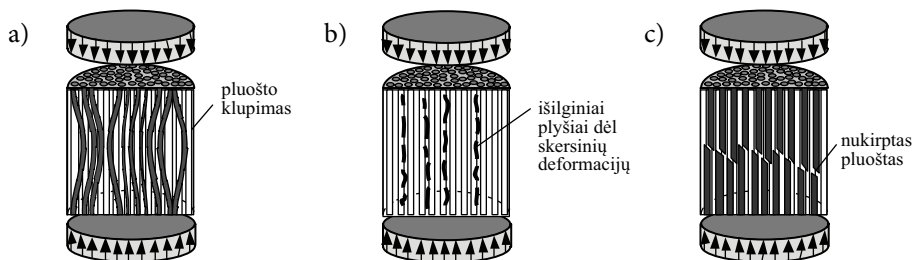
Armutojo betono konstrukcijoms dažniausiai naudojamos kompozitinės armatūros tamprumo modulis, tempiamojo stiprio ir ribinės irimo deformacijos kitimo intervalai pateikti 8.3 lentelėje. Palyginimui pateiktos įprastos plieninės armatūros mechaninės savybės.

8.3.2. Gniuždymas

Kompozitinės armatūros strypų skerspjūvyje pluošto gijų skersmuo sudaro tik tūkstantąsias milimetro dalis, todėl akivaizdu, kad pluoštas negali priešintis išoriniam gniuždymo poveikiui. Dėl šios priežasties polimerinių strypų naudoti gniuždomojoje betono zonoje nerekomenduojama.

Gniuždomąsias kompozitinių armatūros strypų savybes eksperimentiškai nustatyti sudėtinga, nes gaunami rezultatai dažniausiai priklauso nuo bandinio geometrijos ir bandymo metodo. Taip pat kaip ir tempiamųjų strypų atveju svarbios kompozitinį strypą sudarančio pluošto ir matricos savybės, cheminė, fizikinė jų sąveika ir armatūros gamybos technologija.

Kai kompozitinės armatūros naudojimas gniuždomojoje zonoje yra neišvengiamas, išskiriami trys charakteringi šios armatūros suirimo atvejai: a) suklumpa pluošto gijos (8.4 pav., a); b) armatūra suyra dėl skersinių deformacijų (panašiai kaip gniuždomasis betonas) (8.4 pav., b); c) nukerpamos pluošto gijos (8.4 pav., c).



8.4 pav. Gniuždomosios kompozitinės armatūros suirimo atvejai: a – suklumpant pluošto gijoms; b – dėl skersinių deformacijų; c – nukerpamos pluošto gijos

Gniuždomasis kompozitinės armatūros stipris esant pirmajam suirimo atvejui apskaičiuojamas pagal tokią išraišką:

$$f_{fc} = \frac{G_m}{1 - V_{fi}}, \quad (8.17)$$

čia V_{fi} – pluošto tūrio dalis; G_m – matricos šlyties modulis, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}, \quad (8.18)$$

čia E_m – matricos tamprumo modulis; ν_m – matricos skersinių deformacijų (Pua-sono) koeficientas.

Gniuždomasis kompozitinės armatūros stipris esant antrajam suirimo atvejui (dėl skersinių deformacijų) apskaičiuojamas taip:

$$f_{fc} = \frac{[E_{fi}V_{fi} + E_m(1 - V_{fi})](1 - V_{fi}^{1/3})\epsilon_{mu}}{\nu_{fi}V_{fi} + \nu_m(1 - V_{fi})}, \quad (8.19)$$

čia E_{fi} ir E_m – pluošto ir matricos tamprumo moduliai; V_{fi} – pluošto tūrio dalis; ν_{fi} ir ν_m – pluošto ir matricos skersinių deformacijų (Pua-sono) koeficientai; ϵ_{mu} – matricos ribinės irimo deformacijos.

Gniuždomasis kompozitinės armatūros stipris, esant trečiajam suirimo atvejui (pluošto gijų kirpimui), apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_{fc} = 2f_{fis} \left[V_{fi} + (1 - V_{fi}) \frac{E_m}{E_{fi}} \right], \quad (8.20)$$

čia E_{fi} ir E_m – pluošto ir matricos tamprumo moduliai; V_{fi} – pluošto tūrio dalis; f_{fis} – pluošto kerpamasis stipris.

Kai kompozitinė armatūra yra gniuždoma, tikslų jos suirimo pobūdį prognozuoti labai sunku. Kartu tampa neaiškus ir jos gniuždomasis stipris. Todėl, kaip minėta skyriaus pradžioje, projektuojant armuotojo betono konstrukcijas, šios armatūros naudojimo gniuždomosiose zonose reikėtų vengti.

8.3.3. Šlytis

Kai kompozitinę armatūrą veikia skersinės jėgos, jos stiprį lemia matricos atsparumas šlyčiai. Kompozitų mechanikoje dažniausiai nagrinėjamas atvejis, kai šlyties jėgos veikia lygiagrečiai su pluoštu. Kompozitinės armatūros atveju šlyties jėgos praktiškai visada veikia skersai pluošto. Šiuo metu pasaulyje nėra patikimų skaičiavimo metodų kompozitinės armatūros kerpamajam stipriui f_{fs} nustatyti, todėl jį siūloma imti apytiksliai lygų matricos kerpamajam stipriui f_{ms} :

$$f_{fs} \approx f_{ms}. \quad (8.21)$$

Kompozitinės armatūros kerpamąjį stiprį padidina skersai orientuotos pluošto gijos. Gamybos metu taip orientuotu pluoštu gali būti padengiamas išorinis strypų paviršius. Teigiamą įtaką kerpamajam stipriui turi ir išorinių sluoksnių pluošto tvirtinimas spirale. Kita vertus, tai pagerina ir strypų sukibimą su betonu. Paprastai kerpamojo stiprio reikšmės savo produkcijai pateikia armatūros gamintojas.

Šiame poskyryje aptartos kompozitinės armatūros pagrindinės mechaninės savybės trumpalaikio apkrovimo atveju. Poskyriui apibendrinti 8.4 lentelėje pateikiamos dažniausiai pasitaikančios skirtingų tipų kompozitinės armatūros fizikinės ir mechaninės savybės.

8.4 lentelė. Dažniausiai pasitaikančios skirtingų tipų kompozitinės armatūros fizikinės ir mechaninės savybės

Savybė	Epoksidinė derva su pluoštu		
	stiklo	aramido	anglies
Pluošto tūrio dalis V_{fi}	0,55	0,60	0,65
Tankis ρ , kg/m ³	2100	1380	1600
Išilginis tamprumo modulis E_{fL} , GPa	39	87	177
Skersinis tamprumo modulis E_{fT} , GPa	8,6	5,5	10,8
Šlyties modulis G_{fLT} , GPa	3,8	2,2	7,6
Puasono koeficientas ν_{fLT}	0,28	0,34	0,27
Išilginis tempiamasis stipris $f_{ft,L}$, MPa	1080	1280	2860
Skersinis tempiamasis stipris $f_{ft,T}$, MPa	39	30	49
Kerpamasis stipris f_{fs} , MPa	89	49	83
Ribinė išilginė tempimo deformacija $\varepsilon_{ftu,L}$, %	2,8	1,5	1,6
Ribinė skersinė tempimo deformacija $\varepsilon_{ftu,T}$, %	0,5	0,5	0,5
Išilginis gniuždomasis stipris $f_{fc,L}$, MPa	620	335	1875
Skersinis gniuždomasis stipris $f_{fc,T}$, MPa	128	158	246

8.3.4. Aukštų temperatūrų poveikis

Veikiant aukštai temperatūrai kompozitiniame strype pluoštą rišanti polimerinė derva (matrica) pradeda plastifikuotis, o tai sukelia tiek pačios dervos, tiek kompozitinio elemento pradinių fizikinių ir mechaninių savybių kaitą. Polimerinės armatūros mechaninių savybių rodikliai labai mažėja, kai kompozitą veikianti aukšta temperatūra viršija tam tikrą kritinę reikšmę T_g , kuri vadinama agregatinės būsenos kitimo temperatūra (9.8 pav.). Veikiant kritinei temperatūrai matricą sudarančios molekulės įgauna pakankamai energijos ir tampa judrios. Temperatūra T_g priklauso nuo matricos tipo: poliesterio dervų kinta nuo 70 iki 100 °C; vinilo esterio dervų – nuo 70

iki 163 °C; epoksidinių dervų – nuo 95 iki 175 °C. Projektuojant armuotojo betono konstrukcijas, rekomenduojama užtikrinti, kad dervos kritinė temperatūra būtų bent 30 °C didesnė už eksploatacijos metu armatūros strypą veikiančią maksimalią temperatūrą. Viršijus kritinę ribą, pluoštas ir toliau gali perimti tam tikrą išorinių poveikių prieaugį. Vis dėlto, pakitus matricos savybėms, pluošto laikomosios galios rezervas ne visuomet yra pakankamas, ypač kai kompozitiniai strypai yra kerpami.

Aukštos temperatūros poveikis turi reikšmingą įtaką kompozitinės armatūros ir betono sukibimo kokybei, kuri iš esmės priklauso nuo strypo išorinį paviršių sudarančios polimerinės matricos. Kylant temperatūrai ir matricai plastifikuojantis, betonas nebeperduoda tempimo įtempių polimerinei armatūrai. Temperatūrai viršijus kritinę ribą T_g , sukibimo jėga sumažėja apie 70–90 %. Šie pokyčiai pažeidžia strypo inkaravimo zoną, sukelia konstrukcijos įlinkių ir plyšių pločių didesnius prieaugius arba ribiniu atveju konstrukcijos laikomosios galios netekimą.

Kai kompozitinių medžiagų paviršių ugnis veikia tiesiogiai (pvz., kilus gaisrui), kai kurių rūšių polimerai gali užsidegti. Degant išsiskiria šiluma ir sveikatai pavojingos nuodingosios medžiagos. Armuotojo betono konstrukcijose kompozitiniai strypai apsaugoti išoriniu betono sluoksniu, todėl tiesioginio ugnies poveikio pavyksta išvengti. Tiesioginio ugnies poveikio pavojus išlieka eksploatuojant išoriniais kompozitiniais lakštais sustiprintas armuotojo betono konstrukcijas, todėl išoriniam stiprinimui dažniausiai naudojami degimo proceso nepalaikantys polimerai.

Dėl skirsnyje išvardytų dėsningumų polimerinės armatūros nerekomenduojama naudoti toms armuotojo betono konstrukcijoms, kurios nuolatos veikiamos aukšta temperatūra (pvz., dūmtraukiai) arba kurias eksploatuojant kyla didelis aukštų temperatūrų poveikio pavojus (pvz., tuneliai).

8.4. Mechaninės savybės, veikiant ilgalaikiams ir cikliniams poveikiams

Daugelis statinių projektuojami taip, kad jų eksploatacijos trukmė sudarytų ne mažiau kaip 50–100 metų. Šiuo požiūriu svarbios tampa ne trumpalaikės, bet ilgalaikės, laikui bėgant besikeičiančios mechaninės kompozitinių medžiagų savybės.

Nuo kelių iki kelių tūkstančių parų (o kartais ir dar daugiau) trunkantys mechaninių savybių ilgalaikiai bandymai dėl savo specifikos taikomi palyginti retai. Tai lemia ilgalaikių bandymų sudėtingumas, didelės laiko sąnaudos, specifinės laboratorinės įrangos ir bandymams reikalingų patalpų su aplinkos sąlygų (temperatūros ir drėgmės) kontrole poreikis ir kt. Daugelyje pasaulio laboratorijų per metus tokiu būdu galima išbandyti labai ribotą bandinių kieki.

Šiame poskyryje aptariamos svarbiausios kompozitinės armatūros ilgalaikės mechaninės savybės: valkšnumas, relaksacija ir nuovargis. Daugeliu atvejų kompozitinės armatūros ilgalaikės savybės skiriasi nuo įprastos plieninės ir tai būtina įvertinti projektuojant patikimas ir ilgaamžes polimeriniais strypais armuoto betono konstrukcijas.

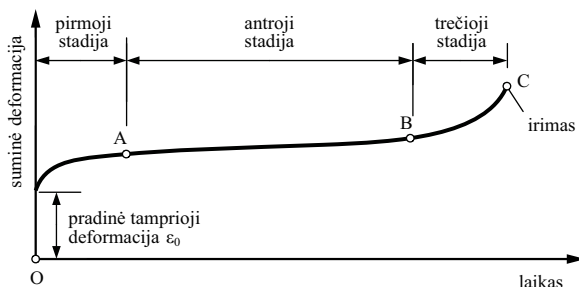
8.4.1. Valkšnumas

Valkšnumu vadinamas reiškinys, kai medžiaga deformuojasi veikiamą laikui bėgant nekintančios išorinės apkrovos. Medžiagą paveikus išorine apkrova, pirmiausia atsiranda pradinė trumpalaikė deformacija $\varepsilon(t_0)$, kuri pamažu auga net ir nekintant išorinei apkrovai. Ilgainiui atsirandantis deformacijų prieaugis vadinamas ilgalaikėmis, kartais tiesiog valksniosiomis deformacijomis $\Delta\varepsilon(t)$. Šių dviejų deformacijų suma apibrėžia bendrą medžiagos deformaciją nuo apkrovimo pradžios iki nagrinėjamojo laiko momento.

Kompozitinių armatūros strypų valksnumas paaiškinamas matricos savybėmis. Polimerinė matrica yra tampriai plastinė medžiaga, todėl joje pasireiškia didelės valksnumo deformacijos. Savo ruožtu pluoštas valksnumu nepasižymi. Šie ypatumai lemia, kad kompozitinės armatūros valksniosios deformacijos labiausiai priklauso nuo pluošto ir matricos santykio: kuo didesnis dervos kiekis, tuo didesnės valksniosios deformacijos, ir atvirkščiai. Kompozitinio armatūros strypo valksnumą galima palyginti su gelžbetoniniu elementu: valksnumu pasižymi tik betonas, o plieninėje armatūroje valksniosios deformacijos nepasireiškia.

Valkšnumo efektą galima nagrinėti dviem aspektais: a) kaip medžiagos deformavimąsi veikiant ilgalaikiai apkrovai; b) kaip medžiagos stiprio ribą atlaikant tam tikro lygio įtempius. Kompozitinės armatūros ilgalaikio deformavimosi kreivė pateikta 8.5 pav.

Panagrinėkime valksnumo reiškinį pirmuoju aspektu. Apkrovus kompozitinę armatūros strypą, iš karto pasireiškia pradinės tampriosios deformacijos. Toliau prasideda pirmoji valksniųjų deformacijų stadija, kurios metu valksniosios deformacijos greitai didėja, kol stabilizuojasi ties tašku A (8.5 pav.). Laiko atkarpa AB žymi statinio normalios eksploatacijos trukmę, jos metu valksniosios deformacijos auga labai nedaug arba visai stabilizuojasi. Tai priklauso nuo įtempių lygio apkrovimo momentu. Jei pradiniam apkrovimo etape įtempiai kompozitinėje medžiagoje yra artimi stiprio ribai, po tam tikro laiko pasiekiamą trečioji valksniųjų deformacijų stadija, kurios metu palaipsniui pažeidžiamas pluoštas ir deformacijos pradeda augti vis intensyviau, kol įvyksta suirimas ties tašku C.



8.5 pav. Kompozitinės armatūros valksniųjų deformacijų kreivė

Pradinę tampriąją deformacijos reikšmę kompozitiniame elemente galima nustatyti remiantis Huko dėsnium:

$$\varepsilon_f(t_0) = \frac{\sigma_f(t_0)}{E_{f,L}} = \frac{\sigma_f(t_0)}{E_{f,L}V_{fi} + E_m(1-V_{fi})}, \quad (8.22)$$

čia σ – normaliniai įtempiai armatūroje; $E_{f,L}$ – išilginis kompozitinės armatūros tamprumo modulis; $E_{fi,L}$ – išilginis pluošto tamprumo modulis; E_m – matricos tamprumo modulis; V_{fi} – pluošto tūrio dalis.

Kadangi pluoštas yra tamprus, o valkšniosios deformacijos pasireiškia tik matricoje, matrica palaipsniui nusikrauna perduodama įtempius pluoštui. Gelžbetoninėse konstrukcijose dėl valkšniųjų deformacijų analogiškai nusikrauna betonas, perduodamas įtempius plieninei armatūrai. Po tam tikro laiko visą išorinę apkrovą perima tik pluoštas, todėl ribines kompozitinės armatūros deformacijas galima apskaičiuoti pagal tokią išraišką:

$$\varepsilon_{f,\text{lim}} = \frac{\sigma_f}{E_{f,L}}. \quad (8.23)$$

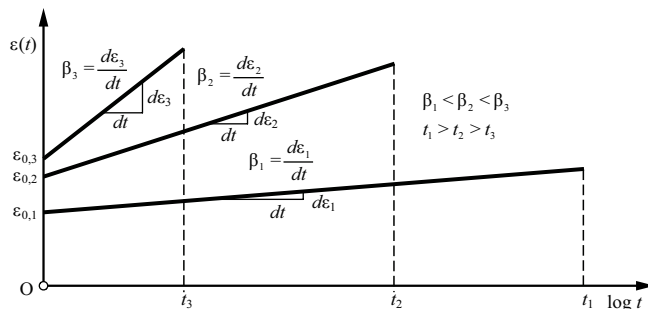
Ribinė polimerinio strypo deformacijų reikšmė pasiekama asimptotiškai, nes laikui bėgant matricos nukrovimo procesas lėtėja. Jei atidėtume laiką t dešimtainio logaritmo masteliu, daugumos kompozitinės armatūros rūšių sumines deformacijas nagrinėjamu momentu galima aprašyti šia funkcija:

$$\varepsilon_f(t) = \beta \log t + \varepsilon(t_0), \quad (8.24)$$

čia $\varepsilon(t_0)$ – pradinė trumpalaikė deformacija; $\beta = d\varepsilon(t) / dt$ – valkšniųjų deformacijų intensyvumą apibūdinantis koeficientas.

Grafiškai (8.24) funkcija parodyta 8.6 pav. Schemiškai pateiktame paveiksle galima pastebėti, kad kuo didesnis koeficientas β , tuo greičiau pasireiškia valkšniosios deformacijos, kartu trumpėja eksploatacijos trukmė.

Valkšnumo reiškinį nagrinėjant antruoju aspektu, svarbi *statinio nuovargio sąvoka* (angl. *static fatigue*), apibūdinanti medžiagos suirimą, veikiant už trumpalaikį stiprį mažesniems įtempiams. Statinio nuovargio reiškinys yra labai svarbus nustatant

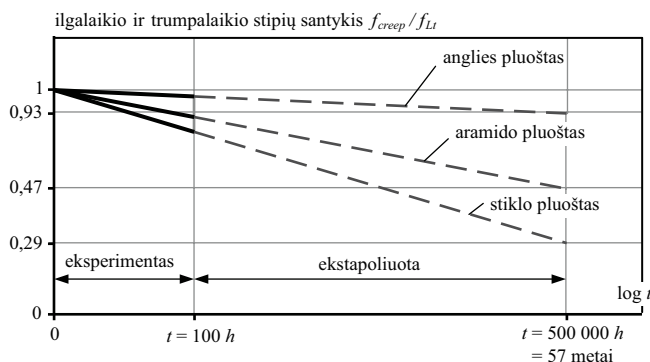


8.6 pav. Kompozitinės armatūros logaritminė valkšniųjų deformacijų kreivė

kompozitinės armatūros *ilgalaikį stiprį* (angl. *creep rupture*). Plieninės armatūros atveju statinis nuovargis nepasireiškia ir jos ilgalaikis stipris yra lygus trumpalaikiam. Kompozitinės armatūros ilgalaikis stipris priklauso nuo naudojamo pluošto tipo: anglies pluoštas yra atspariausias statiniam nuovargiui, aramido pluoštas – mažiau atsparus, o stiklo pluoštas yra pažeidžiamiausias dėl statinio nuovargio. Ilgalaikis stipris taip pat priklauso nuo pradinės apkrovos intensyvumo ir aplinkos poveikių: ultravioletinės spinduliuotės, cheminių medžiagų, temperatūros, drėgmės ir kt.

Svarbiausias uždavinys, nustatant ilgalaikį kompozitinės armatūros stiprį – susieti veikiančius įtempius armatūroje ir laiką, per kurį armatūra suyra. Akivaizdu, kad didinant pradinių įtempių reikšmę, polimerinė armatūra suyra vis greičiau. Todėl galima rasti tokius pradinius įtempius armatūroje, kad ji nesuirytų per visą statinio eksploatacijos laiką (50–100 metų). Atliekant ilgalaikio stiprio bandymus pastebėta, kad egzistuoja tiesinis ryšys tarp ilgalaikio stiprio ir logaritminės laiko skalės (8.7 pav.). Eksperimentinių tyrimų praktikoje sudėtinga atlikti ilgalaikius bandymus, kurie truktų kelis ar keliasdešimt metų. Remiantis tiesine ilgalaikio stiprio ir logaritmio laiko priklausomybe, statinio eksploatacijos laiką atitinkantis ilgalaikis kompozitinės armatūros stipris nustatomas ekstrapoliuojant (8.7 pav. punktyrinė linija). Taikant šią aproksimaciją, nustatytos įvairių kompozitinės armatūros pradinių įtempių reikšmės, kurioms esant nepasireiškia statinis nuovargis ir armatūra nesuyra per visą statinio eksploatacijos laikotarpį. Anglies pluošto armatūros ilgalaikis stipris gali sudaryti apie 90 % trumpalaikio stiprio, aramido pluošto – apie 50 %, o stiklo pluošto armatūros – tik apie 30 %. Didelę įtaką šioms reikšmėms turi aplinkos sąlygos ir konkretus armatūros tipas.

Šiuo metu pasaulyje nėra sukaupta pakankamos kompozitinės armatūros ilgalaikio stiprio eksperimentinių duomenų bazės, todėl JAV projektavimo normose ACI 440.1R-06 rekomenduojamos konservatyvios ilgalaikio stiprio koeficientų reikšmės: stiklo pluoštui – 0,2 (arba 20 % trumpalaikio stiprio reikšmės), aramido pluoštui – 0,3 ir anglies pluoštui – 0,55.



8.7 pav. Kompozitinės armatūros ilgalaikio stiprio reikšmės

Statinis kompozitinės armatūros nuovargis yra vienas didžiausių jos trūkumų. Plačiausiai naudojamos stiklo pluošto armatūros strypų įtempiai ribojami iki 20–30 % trumpalaikio stiprio, todėl praktiškai šios armatūros stipris tampa artimas plieninei. Projektuojant kompozitiniais strypais armuotas betonines konstrukcijas būtina turėti patikimas, gamintojo pateikiamas ilgalaikio stiprio charakteristikas konkrečiam armatūros tipui.

8.4.2. Relaksacija

Relaksacija vadinamas procesas, kurio metu įtempiai medžiagoje mažėja, deformacijai išliekant pastoviai. Su relaksacijos reiškiniu statybos pramonėje dažniausiai susiduriama projektuojant, gaminant ir eksploatuojant iš anksto įtemptas armuotojo betono konstrukcijas.

Kompozitinės armatūros relaksacija apibūdinama matuojant jėgos pokytį strype, kai aplinkos temperatūra ir strypo deformacija yra pastovios. Relaksacijos intensyvumas apskaičiuojamas dalijant išmatuotą jėgą iš pradinės jėgos reikšmės. Šis dydis rodo, kokia dalis pradinės jėgos prarandama, praėjus tam tikram laikui nuo apkrovimo pradžios. Dažniausiai taikomi 1000 h ir 1 000 000 h laiko intervalai. Atitinkamai gaunamos šiuos laiko periodus atitinkančios relaksacijos reikšmės.

Gaminant iš anksto įtemptas armuotojo betono konstrukcijas dažniausiai naudojami anglies ir aramido pluoštai. Stiklo pluošto armatūra pasižymi dideliu statiniu nuovargiu ir tokioms konstrukcijoms naudojama rečiau. Aramido pluošto kompozitinės armatūros relaksacijos intensyvumas 50 metų atskaitiniam laikotarpiui sudaro nuo 18 iki 24 %. Kitaip tariant, eksploatacijos metu jėga armatūros strype sumažėja nuo 18 iki 24 %. Anglies pluošto relaksacijos intensyvumas tam pačiam atskaitos laikotarpiui sudaro nuo 2 iki 4 %. Aramido pluošto strypų relaksacijos intensyvumas 1000 h atskaitos laikotarpiui sudaro nuo 5 iki 8 %, anglies pluošto – nuo 0,5 iki 1 %.

Relaksacijos intensyvumas priklauso nuo pradinių įtempių dydžio. Kuo didesnės pradinių įtempių reikšmės, tuo intensyvesnė relaksacija. Galima pažymėti, kad anglies pluošto kompozitiniai strypai išsiskiria dideliu ilgalaikiu stipriu ir nedideliu relaksacijos intensyvumu. Dėl šių savybių anglies pluošto kompozitinė armatūra dažniausiai naudojama iš anksto įtemptoms armuotojo betono konstrukcijoms.

8.4.3. Nuovargis

Nuovargiu vadinamas reiškiny, kai dėl pasikartojančių apkrovos ciklų pažeidžiama vidinė medžiagos struktūra. Pažeidžiant dažniausiai mažėja trumpalaikis medžiagos stipris arba tamprumo modulis. Dėl nuovargio reiškinio medžiaga gali suirti veikiant įtempių, daug mažesnių už trumpalaikį stiprį.

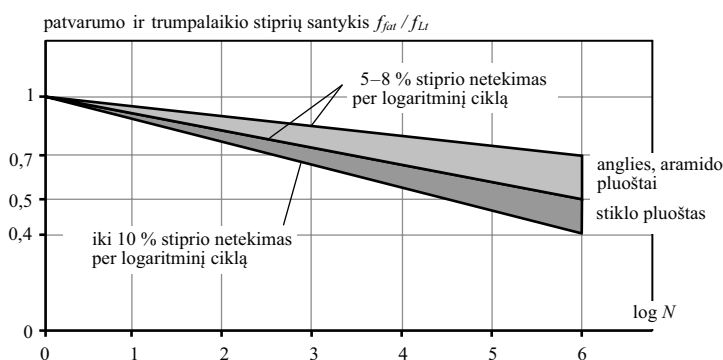
Kompozitinės armatūros nuovargis susijęs su sudėtingais, vidinėje medžiagos struktūroje vykstančiais procesais: matricos mikroplesėjimu; pluošto gijų pažeidimu; pluošto ir matricos ryšių suardymu. Daugiausia informacijos apie kompozitinių medžiagų nuovargį gauta iš eksperimentinių ir teorinių tyrimų, atliktų kosmoso ir

aviacijos pramonėse. Šiose srityse kompozitai pradėti naudoti jau gana seniai. Kita vertus, šiose šakose naudojamiems kompozitiniams elementams būdingos daugiacyklės apkrovos. Bendri įvairių kompozitinių medžiagų nuovargio dėsniai, gauti atliekant intensyvius tyrimus kosmoso ir aviacijos srityse, vėliau pritaikyti ir statybos pramonėje.

Kompozitinės medžiagos pasižymi geru atsparumu nuovargiui. Jos gali patirti kelis milijonus apkrovos ciklų ir išlaikyti daugiau negu 50 % pradinio trumpalaikio stiprio. Tiriant kompozitinės armatūros nuovargio reiškinį, apkrova pridėjama išilgai pluošto, tempimo ciklui kintant pagal sinuso arba kosinuso dėsnį. Apkrovos greitis turi būti išlaikomas gana mažas, kad medžiagoje nepakiltų temperatūra. Nuovargio bandymas atliekamas laboratorinėmis sąlygomis, esant pastoviai aplinkos drėgmei ir temperatūrai. Eksperimentinių nuovargio tyrimų metu nustatomas medžiagos stipris f_{fat} po tam tikro apkrovos ciklų skaičiaus N . Apkrovos ciklai atidedami horizontaliojoje ašyje dešimtainio logaritmo masteliu. Skaičius 3 žymi 1000 apkrovos ciklų, 4 – 10 000 apkrovos ciklų ir t. t. Vienas toks žingsnis logaritmėje skalėje dažnai vadinamas *logaritminiu gyvavimo etapu* (angl. *decade of logarithmic lifetime*).

Tarp statyboje naudojamų kompozitinės armatūros rūšių nuovargis mažiausiai pasireiškia anglies pluošto kompozituose. Per kiekvieną logaritminių gyvavimo etapą jų trumpalaikio stiprio reikšmės sumažėja 5–8 %, o per visą eksploatacijos laikotarpį (eksploatacijos laikotarpis dažniausiai įvertinamas milijonu apkrovos ciklų) – 30–50 %. Aramido pluošto kompozito nuovargio savybės yra panašios: per kiekvieną logaritminių gyvavimo etapą trumpalaikis stipris sumažėja apie 6–8 %, o po milijono ciklų – taip pat apie 30–50 %. Nuovargis labiausiai pasireiškia stiklo pluošto kompozituose. Jų trumpalaikis stipris sumažėja apie 10 % per kiekvieną logaritminių gyvavimo etapą, o po milijono ciklų – apie 60 %.

Statybinio plieno pradinio trumpalaikio stiprio reikšmės po milijono apkrovos ciklų sumažėja nuo 40 iki 75 %, todėl kompozitinės medžiagos, ypač anglies pluoštas, šiuo požiūriu turi nemažą pranašumą. Įvairių pluoštų trumpalaikio stiprio kitimas, atsižvelgiant į apkrovos ciklų skaičių, pateiktas 8.8 pav.



8.8 pav. Įvairių kompozitinių strypų trumpalaikio stiprio mažėjimas dėl nuovargio

Ciklinė apkrova statybinėje praktikoje būdinga transporto statiniams. Šių statinių konstrukcijoms kompozitinė armatūra naudojama ypač dažnai, todėl jas projektuojant būtina tinkamai įvertinti polimerinių strypų ilgalaikes mechanines savybes ir atsparumą nuovargiui.

8.5. Skyriaus apibendrinimas

Pagrindiniai kompozitinės armatūros pranašumai yra ypač didelis stipris (kelis kartus viršijantis plieno), atsparumas korozijai, nedidelis svoris ir lengvas apdirbimas statybos aikštelėje. Be šių pranašumų, susiduriama ir su kompozitinės armatūros trūkumais, susijusiais su fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis bei kaina.

Fizikinėms ir mechaninėms kompozitinės armatūros savybėms nustatyti gali būti taikomi ne tik eksperimentiniai tyrimai, bet ir mikromechaninis principas. Jis pagrįstas matricos ir pluošto savybių bei jų tūrio (arba masės) dalies įtakos kompozitinio elemento savybėms įvertinimu. Mikromechaniniu metodu galima nustatyti ne tik kompozitinės armatūros tankį ar temperatūrinio plėtimosi koeficientą, bet ir tempiamąjį, gniuždomąjį ar šlyties stiprius.

Kompozitinės medžiagos nėra atsparios aukštų temperatūrų poveikiui. Aukšta temperatūra pirmiausia paveikia kompozitinės armatūros matricą (polimerinę dervą). Veikiant neaukštomis temperatūroms (90–180 °C), matrica pradeda plastifikuotis, dėl to mažėja jos efektyvumas dėl sąveikos su plaušu, pažeidžiamas sukibimas su betonu ir konstrukcija gali suirti arba patirti dideles deformacijas. Polimerinės armatūros nerekomenduojama naudoti toms armuotojo betono konstrukcijoms, kurios nuolatos veikiamos aukšta temperatūra arba kurias eksploatuojant kyla didelis aukštų temperatūrų poveikio pavojus.

Siekiant užtikrinti naujai suprojektuotų ir eksploatuojamų kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų patikimumą ir ilgaamžiškumą, būtina tinkamai įvertinti polimerinių strypų ilgalaikes mechanines savybes: valkšnumą, ilgalaikį stiprį, relaksaciją ir nuovargį. Atkreiptinas dėmesys, kad skirtingai nuo plieno kompozitinėje armatūroje pasireiškia statinis nuovargis. Dėl šio efekto kompozitinė armatūra po tam tikro eksploatacijos laiko gali suirti veikiant už trumpalaikio stiprio ribą mažesnėms įtempių reikšmėms.

Kontroliniai klausimai

1. Kas lemia kompozitinės armatūros fizikinių ir mechaninių savybių skirtumus išilgine ir skersine pluoštui kryptimis?
2. Paaiškinkite, kokių principu pagrįstas kompozitinių medžiagų fizikinių ir mechaninių savybių nustatymas?
3. Kodėl kompozitinės armatūros tempiamasis stipris yra apie du kartus mažesnis nei atskirai paimto pluošto stipris?

4. Kodėl kompozitinės armatūros nepatartina naudoti gniuždomosiose zonose?
5. Apibūdinkite valksnumo reiškinių. Kodėl jis vyksta kompozitinėje medžiagoje?
6. Apibūdinkite ilgalaikio stiprio ir statinio nuovargio sąvokas. Kodėl jos svarbios projektuojant kompozitiniais strypais armuotas betonines konstrukcijas?
7. Apibūdinkite relaksacijos ir nuovargio sąvokas. Kuriais atvejais šie reiškiniai tampa svarbūs?
8. Paaiškinkite, kodėl kompozitinės armatūros nepatartina naudoti aukšta temperatūra veikiamoms konstrukcijoms?

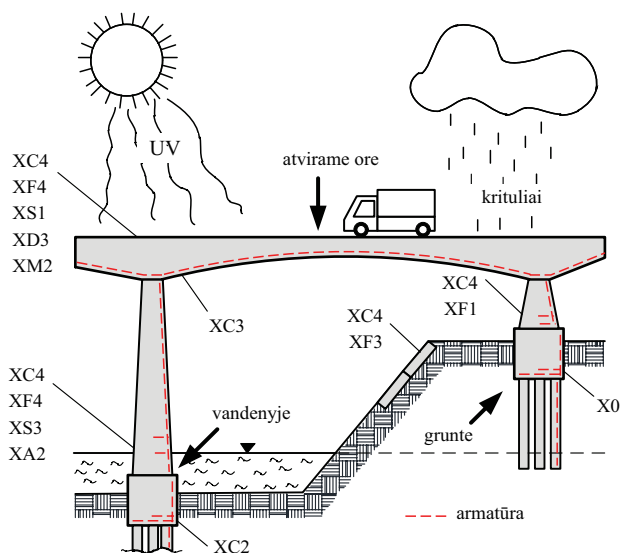
Rekomenduojamoji literatūra

- ACI 440.3R-04 *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*. 2004. Michigan: American Concrete Institute. 40 p. ISBN 9780870311628.
- ACI 440.1R-06: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. 2006. Michigan: American Concrete Institute. 44 p. ISBN 9780870312106.
- Bank, L. C. 2006. *Composites for Construction: Structural Design with Composite Materials*. John Wiley & Sons. 560 p. ISBN 9780471681267.
- FRP reinforcement in RC structures* – Bulletin No. 40. 2007. Lausanne, Switzerland: The International Federation for Structural Concrete (*fib*). 160 p. ISBN 9782883940802.
- GangaRao, H. V. S.; Taly, N.; Vijay, P. V. 2006. *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. USA: CRC Press. 400 p. ISBN 9780824758295.

9. POLIMERINĖS ARMATŪROS ILGAAMŽIŠKUMAS IR SENĖJIMAS

9.1. Įžanga

Kaip minėta, šiuo metu gelžbetonis yra plačiausiai naudojama statybinė medžiaga. Tradiciniai betoniniai ir gelžbetoniniai elementai turi nemažai trūkumų: betonas turi mažą tempiamąjį stiprį, jo cheminės ir mechaninės savybės kinta laikui bėgant ir gali pasiekti kritines ribas betoną veikiant agresyviosios aplinkos poveikiams (9.1 pav.). Agresyviosios aplinkos poveikio klasės betonui nurodytos standarte LST EN 206-1 (2002).



9.1 pav. Agresyviosios aplinkos poveikio klasių betonui pavyzdžiai pagal LST EN 206-1 (2002)

Betono karbonizacija yra didžiausia gelžbetoninių konstrukcijų ilgaamžiškumo mažėjimo priežastis. Karbonizacijos greitis betone priklauso nuo cemento tipo, vandens ir cemento (V/C) santykio, džiovimo sąlygų, drėgmės ir CO₂ koncentracijos ore. Chloridų poveikis pastebimas, kai gelžbetoninės konstrukcijos eksploatuojamos jūroje, baseinuose ir šaltuose regionuose. Chloridai į konstrukcijos elementus patenka netiesiogiai, pučiant vėjui arba tiesiogiai, veikiant sūriam vandeniui arba

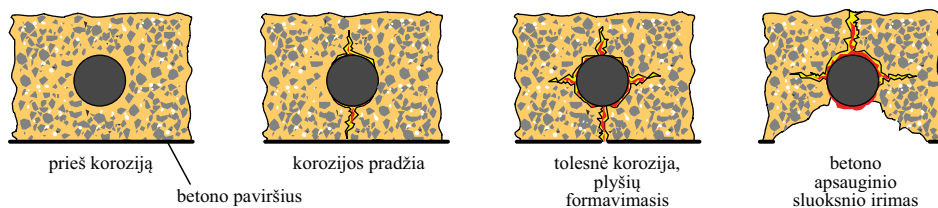
druskoms, kurios naudojamos ledui atitirpinti. Sieros rūgštys dažniausiai patenka dėl biologinių veiksnių, kai mikroorganizmams susidaro palankios sąlygos dauginantis betono porose, nes jose yra sieros vandenilio, kuriuo mikroorganizmai minta ir suformuoja sieros rūgšties išskyras. Betoninių konstrukcijų ilgaamžiškumui ir armatūros korozijai taip pat daro įtaką: įkaitimo – atvėsimo, užšalimo – atšilimo ir sušlapimo – išdžiūvimo ciklai.

Dažniausiai gelžbetoninių konstrukcijų eksploatacinės savybės prarandamos palaipsniui. Pažeidimo procesas prasideda nuo betono karbonizacijos, kai chlorido ir sieros rūgšties jonai prasiskverbia iki armatūros ir sukelia plieno koroziją. Plieno korozija didina strypo apimtį, o tai pagreitina betono irimą. Plieninės armatūros irimo procesą galima suskirstyti į šias stadijas (9.2 pav.):

- lokaliniai apsauginės oksidacinės plieno plėvelės pažeidimai vietose, kuriose chlorido koncentracija didžiausia;
- pirminio rūdžių sluoksnio formavimasis toje vietoje, kurioje pažeista apsauginė plėvelė;
- pirminis rūdžių sluoksnis keičiamas į poringus oksidus arba hidroksidus, jei deguonies kiekis yra gana didelis.

Siekiant išvengti plieno korozijos sukeltų padarinių ir užtikrinti betoninių konstrukcijų ilgaamžiškumą, jau daug dešimtmečių betono konstrukcijoms armuoti bei stiprinti naudojama kompozitinė polimerinė armatūra. Polimerinių kompozitų dirbtinio pluošto ir dervų gamybos technologija sparčiai vystoma siekiant pagerinti chemines, mechanines ir fizikines kompozitų savybes, sumažinti kompozitinių polimerinių gaminių kainą. Šiuo metu polimerinė armatūra yra brangesnė už plieninę, tačiau polimerais armuotų konstrukcijų priežiūros išlaidos dažnai yra mažesnės, todėl kompozitiniai polimerai tampa puiki plieno alternatyva.

Atsižvelgiant į bendrąją situaciją statyboje, naudojama polimerinė armatūra gali sumažinti tiesiogines ir netiesiogines eksploatavimo bei rekonstrukcijos išlaidas. Remiantis Nacionalinės korozijos inžinierių asociacijos (NACE) 2002 metų duomenimis, JAV nuostoliai dėl transporto statinių plieno korozijos sudaro 21 mlrd. Lt per metus. 2012 metų Lietuvos geležinkelių ir kelių direkcijos duomenimis, Lietuvoje iš viso yra per 2 tūkst. tiltų, iš jų 1865 – gelžbetoniniai. Daugiausia tiltų Lietuvoje yra gelžbetoniniai, todėl atliekant jų rekonstrukciją arba kapitalinį remontą reikėtų atsižvelgti į alternatyvius sprendinius ir medžiagas.

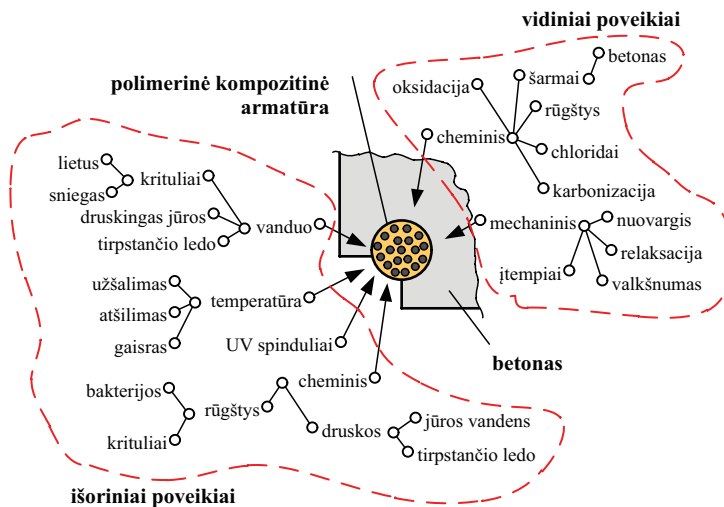


9.2 pav. Plieninės armatūros korozija

Polimerinės armatūros ilgaamžiškumą lemiantys aplinkos veiksniai (9.3 pav.) skiriasi nuo tų, kurie turi įtakos plieninės armatūros savybėms. Polimerų senėjimas vyksta dėl: cheminių¹, fizikinių² ir mechaninių savybių pokyčių. Senėjimo metu makromolekulės suskyla į trumpesnes grandines arba grandys susijungia skersinėmis jungtimis. Sumažėja mechaninis stiprumas, elastingumas, polimerai tampa trapesni, pakinta išvaizda. Naudojant polimerinių kompozitų medžiagas reikia įvertinti aplinkos poveikį jų ilgaamžiškumui. Pagrindiniai polimerinių kompozitų ilgaamžiškumą lemiantys veiksniai:

- agresyvus aplinkos (cheminių medžiagų) poveikis (9.3 pav.);
- mechaninių savybių³ degradavimas eksploatacijos metu;
- ultravioletinių spindulių poveikis (ypač aktualus polimeriniams kompozitams, naudojamiems konstrukcijos išorėje).

Nagrinėjant ilgaamžiškumą įvertinamos pluošto (stiklo, aramido, anglies) ir rišamųjų polimerų (matricos) mechaninės savybės, kurios priklauso nuo jų gamybos technologijos ir naudojamų medžiagų sąveikos (9.4 pav.). Šie parametrai kinta laikui einant (degraduoja), jų reikšmės gali būti nustatytos eksperimentiškai, taikant fizikinių ir mikrostruktūrinių savybių tyrimus, tokius kaip termogravimetrinė analizė



9.3 pav. Kompozitinės polimerinės armatūros ilgaamžiškumą lemiantys poveikiai

¹ Cheminės savybės – tai reiškianiai, kai medžiagos sąveikauja tarpusavyje, dėl to susidaro naujų medžiagų, įvyksta cheminiai arba negrįžtamieji medžiagų pakitimai.

² Fizikinės savybės išreiškia medžiagos gebėjimą reaguoti į fizikinių veiksnių (gravitacijos, drėgmės, temperatūros, elektros srovės, radiacijos ir kt.) poveikius.

³ Mechaninės savybės rodo medžiagos gebėjimą priešintis išorinių mechaninių veiksnių, kurie sukelia įtampius medžiagose ir konstrukcijose, poveikiui.

(TGA), šviesos ir elektronų (SE) mikroskopija, dinaminė mechaninė analizė (DMA), diferencinė skenavimo kolorimetrija (DSC), potenciodinaminės poliarizacijos matavimai, galvaninio ryšio bandymai ir Furjė transformacijos infraraudonoji spektroskopija (FTIR).

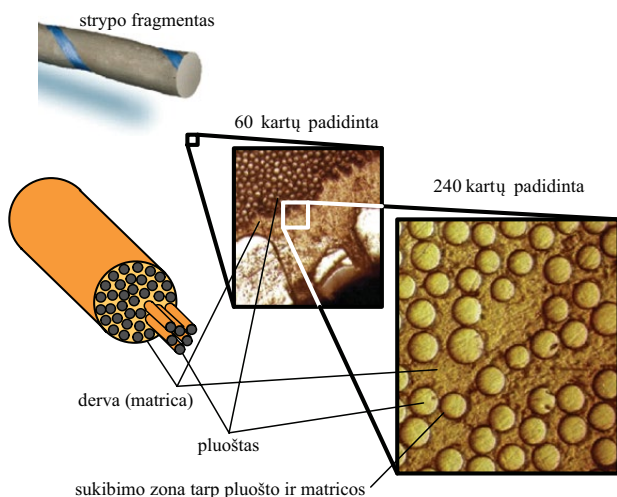
Polimerinę armatūrą sudaro trys komponentai (9.4 pav.), nuo kurių priklauso jos ilgaamžiškumas:

- matrica (derva: epoksidinė, vinilo esterio, poliesterio arba kt.);
- pluoštas (anglies, aramido, stiklo arba kt.);
- sukibimo zona tarp pluošto ir matricos.

Kiekvienas iš kompozito komponentų gali būti veikiamas agresyviųjų veiksnių. Kompozito matrica yra atspari stipriems šarmams (tai svarbu, kai naudojamas stiklo pluoštas, kuris nėra atsparus šarmams), ji apsaugo pluoštą ir sukibimo zoną nuo išorinės aplinkos poveikio. Polimerinio kompozito ilgaamžiškumas priklauso nuo šių komponentų savybių:

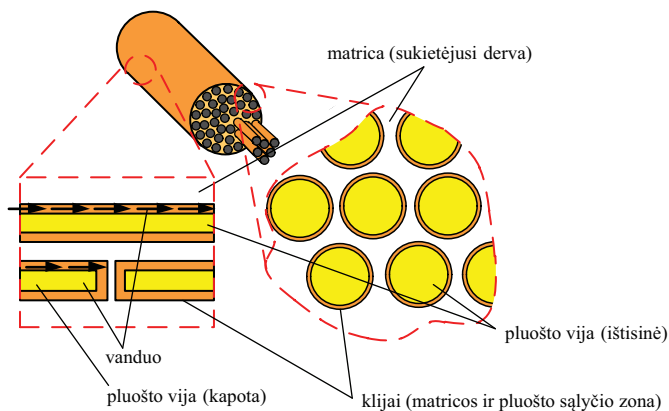
- kaip gerai pluoštas padengtas derva;
- plyšių (paviršiuje arba skerspjūvio plote);
- tuštumų išsidėstymo (mažesnės ir tolygiai pasiskirsčiusios rodo geresnę kokybę);
- dervos ir pluošto sukibimo kokybės (jei gamybos procesas nėra gerai kontroliuojamas, derva netolygiai pasiskirsto pluošte ir numatyta apsauga negali būti užtikrinama);
- sukibimo tarp pluošto ir matricos stiprio (nesuderinamumas tarp pluošto ir matricos (dervos) arba neteisingas apdorojimas silpnina ryšį tarp komponentų).

Sąveikos zona tarp pluošto ir matricos (9.5 pav.) yra silpniausia grandis, nuo kurios dažniausiai ir prasideda irimo procesas. Jis gali įvykti dėl šarminių reakci-



9.4 pav. Polimerinės stiklo pluošto armatūros komponentai („Hughes Brothers“)

9.5 pav. Polimerinio kompozito komponentų sąveikos zonos. Vandens prasiskverbimas sąlyčio zonoje



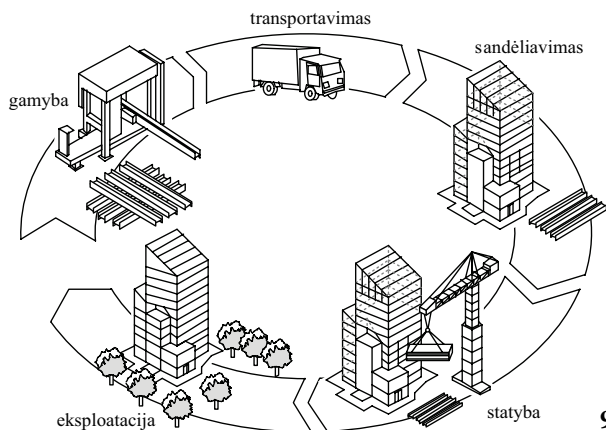
jų, polimerų plastifikacijos, drėgmės poveikio arba susikaupusių liekamųjų įtempių. Vienas pagrindinių poveikių yra drėgmės patekimas į polimerinį kompozitą. Net ir esant tobulam tarpusavio sukibimui tarp pluošto ir matricos, vanduo yra įgeriamas kapiliarais, išilgai pavienių plaušelių. Jis prasiskverbia greičiau pluošto ir matricos sandūroje nei per pačią matricą (sukietėjusią dervą) ir turi didelę įtaką sukibimo sumažėjimui. Kliai pagerina sukibimą tarp pluošto ir dervos, dėl to sumažėja drėgmės poveikis sandūroje.

Šiame skyriuje apžvelgsime atliktų kompozitinės armatūros senėjimo tyrimų rezultatus. Aptarsime polimerinių strypų ilgaamžiškumą betoninėse konstrukcijose. Taip pat aptariamos ilgaamžiškumo užtikrinimo priemonės projektuojant kompozitiniais polimerais armuotas betonines konstrukcijas.

9.2. Aplinkos veiksniai, lemiantys polimerinės armatūros senėjimą

Betonines konstrukcijas esant įvairioms statinio (9.6 pav.) gyvavimo stadijoms veikia agresyvieji aplinkos poveikiai (9.1 pav.), nurodyti LST EN 206-1 (2002) standarte. Kalbant apie kompozitinės polimerinės armatūros ilgaamžiškumą būtina pažymėti, kad:

- gamybos metu dėmesys turi būti skiriamas gamybos technologijos tobulumui, naudojamų medžiagų kokybei ir jų suderinamumui;
- transportuojami gaminiai gali būti pažeisti;
- sandėliuojamus gaminius gali veikti įvairūs aplinkos poveikiai (saulės radiacija ir ultravioletiniai spinduliai, krituliai);
- statybos metu gaminiai veikiami įvairių mechaninių poveikių (keliant gaminius ir juos montuojant), cheminių medžiagų (šarmų, rūgščių, druskų), kritulių;
- eksploatacijos metu pasireiškia agresyviosios aplinkos poveikiai, ilgalaikiai mechaniniai poveikiai (valkšnumas, nuovargis) ir polimerinio kompozito mechaninių savybių kaita.



9.6 pav. Statinio gyvavimo stadijos

Kompozitinių gaminių senėjimo procesas ypač aktualus statiniams, kurių naudojimo laikas viršija 75 metus (pvz., tiltai, viadukai ir kiti specialieji statiniai). Veiksniai, turintys įtakos kompozitinės medžiagos stiprumui, standumui, pluošto ir matricos sukibimo vientisumui, mikro- ir makropleišėjimui, yra:

- cheminiai tirpalai (druska, šarmai ir rūgštys);
- valkšnumas;
- nuovargis;
- terminiai ciklai (užšalimo ir atšilimo);
- ekstremalūs temperatūros pokyčiai;
- drėgmė (krituliai, jūros vanduo);
- UV spinduliai (fotocheminės reakcijos).

Šių veiksnių poveikis kompozitiniam strypams apibendrintai pateiktas 9.3 pav., o šių poveikių daroma įtaka strypo stiprio mažėjimui – 9.1 lentelėje.

Kompozitinių medžiagų ilgaamžiškumas priklauso nuo:

- tinkamo komponentų pasirinkimo (atsparūs šarmų ir chloridų poveikiui, atsparūs mikropleišėjimui, geras pluošto ir matricos sukibimas);
- kompozitinio polimero kokybės (paviršiaus apdirbimas, tuštumos, dervos homogeniškumas);
- kompozitinio polimero būklės vertinimo (pažaidų fiksavimas);
- konstrukcinių priemonių (apsauginis betono sluoksnis, apsauginės dangos).

Kompozitinės polimerinės medžiagos senėjimo greitis priklauso nuo pluošto ir dervos sąryšio kokybės (9.4 pav.), drėgmės patekimo į pluoštą galimybių, temperatūros svyravimų, dervos ir pluošto reakcijos su cheminėmis medžiagomis. Senėjimas gali būti cheminis arba fizikinis.

Cheminis senėjimas apima molekulinis arba cheminius polimero struktūros pokyčius. Cheminių medžiagų poveikis turi įtakos makromolekulių dalijimuisi, molekulinės masės mažėjimui, oksidacijai ir polimero struktūros pokyčiams (angl. *Crosslinking*). Dėl cheminio senėjimo silpnėja polimerinių grandinių ryšiai.

9.1 lentelė. Kompozitinės polimerinės armatūros senėjimas (Burgoyne 2001)

Poveikis	Polimerinio strypo liekamasis stipris,%			Sąlygos
	anglies	aramido	stiklo	
Statinis nuovargis	91	46	30	20 °C, 100 metų
Ciklinis nuovargis	85	70	23	100 MPa amplitudė, 2 milijonai ciklų
Atsparumas šarmams	100	98	29	NaOH, 120 dienos, 40 °C
Atsparumas rūgštims	–	–	–	–
Atsparumas UV	77	69	90	3 metus
Atsparumas užšalimo ir atšilimo ciklams	100	100	100	Nuo –20 °C iki +15 °C, 300 ciklų
Atsparumas aukštai temperatūrai	80	75	80	Nuo –10 °C iki +60 °C
Atsparumas gaisrui	75	65	75	350 °C

Fizikinis senėjimas apima struktūrinius polimero pokyčius, kurie turi įtakos jo mechaninėms savybėms. Šie pokyčiai susidaro dėl vidinių įtempių ir temperatūros kitimo gamybos ir eksploatacijos metu.

9.3. Kompozitinių polimerų senėjimas

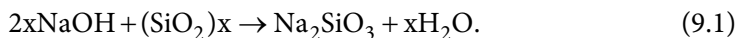
9.3.1. Cheminis senėjimas

Pagrindinės cheminės medžiagos, turinčios įtakos polimerinės armatūros ilgaamžiškumui, yra šarmai, rūgštys ir druskos. Anglies pluošto armatūra yra atsparesnė cheminiam senėjimui (lyginant su aramido ar stiklo pluošto armatūra), tačiau dėl didelės kainos betoninėms konstrukcijoms armuoti ši armatūra naudojama kur kas rečiau nei stiklo pluošto kompozitiniai strypai. Todėl šiame skyriuje daugiausia dėmesio skiriama stiklo pluošto kompozitams.

Betonas gali būti labai šarmingas ($\text{pH}^4 \cong 12,8$ arba didesnis), todėl gali prasi-dėti cheminės reakcijos su pluoštu. Silicio dioksidas (kvarcas) sudaro didžiąją dalį (54,5 %) stiklo pluošto ir būtent jis yra veikiamas šarminės betono aplinkos. Įvairių aplinkos poveikių ir cheminių medžiagų (pvz., lietaus vandens, ledo tirpiklių ar kitų tirpalų, kurie yra šarminiai, rūgštiniai arba neutralaus pH) veikiamuose stiklo kompozituose sumažėja cheminiai stiklo ryšiai. Šis reiškinys vadinamas stiklo korozija. Korozijos metu susidaro silicio gelis, kuris plečiasi ir gali sukelti betono pleišėjimą.

⁴ pH (vandenilio potencialas) – vandenilio jonų (H^+) koncentracijos tirpale matas, rodantis tirpalo rūgštingumą ar šarmingumą.

Pagrindinė stiklo komponento silicio oksido reakcija su šarmu:



Betono šarmingumas gali paveikti stiklo pluoštą, išskyrus tuos atvejus, kai naudojamos polimerinės dervos, kurios atsparios šarmams.

Rūgštinė korozija sukelia išplovimo efektą, kai vandenilio arba hidroksonio (angl. *hydronium*) jonai keičiami šarmais ir kitais teigiamaisiais judriais jonais stikle. Likusi stiklo tinklo dalis, daugiausia iš kvarco, išlieka vientisa. Stiklas gali tapti hidratuotas, jei stiklo molekulių grandinės yra palyginti nestabilios, arba gali tapti dar tankesnis ir stabilesnis nei pradinės būsenos. Palyginti su šarmais, rūgštis reaguoja lėtai. Vandens, druskos ir kiti neutralaus pH tirpalai sukelia stiklo koroziją, panašią į rūgštinę.

Polimerinių kompozitų atsparumas ilgalaikiams cheminių tirpalų poveikiams kinta atsižvelgiant į pluošto ir dervos tipą. Kompozitai, kuriuose pluošto vijos neištisinės, yra atsparesni cheminiam poveikiui nei kompozitai, kuriuose pluošto vijos yra ištisinės, nes pirmuoju atveju agresyvosios medžiagos negali prasiskverbti gilyn į kompozitinę medžiagą (9.5 pav.). Naudojant stiklo kompozitinę armatūrą betoninėse konstrukcijose, jos nupjautus galus reikėtų padengti papildomu dervos sluoksniu, taip apsaugomas pluoštas nuo agresyviųjų medžiagų patekimo.

9.3.2. Fizikinis senėjimas

Eksplatuojamas statinio konstrukcijas veikia įvairios apkrovos, dėl kurių konstrukcijos elementuose susidaro įtempiai. Dėl susidariusių įtempių konstrukcinio elemento armatūroje laikui bėgant gali susidaryti struktūriniai defektai, pasireikšti ilgalaikiai efektai – nuovargis, įtempių relaksacija ir valkšnumas. Plačiau šie efektai aptariami 8.4 poskyryje.

Anglies pluoštas turi geresnes statinio nuovargio charakteristikas nei stiklo ar aramido pluoštai. Todėl stiklo ir aramido polimerinės armatūros trapijoji suirtis įvyksta esant mažesniems įtempiams, lyginant su anglies pluošto armatūra. Kompozitinės polimerinės armatūros tempiamasis stipris yra labai didelis (9.2 lentelė). Tačiau dėl ilgalaikių procesų jis ilgainiui mažėja. Polimerinės armatūros gamintojų specifikacijose ir projektavimo normose rekomenduojama naudoti sumažintas tempiamojo stiprio reikšmes. JAV projektavimo rekomendacijose ACI 440.1R-06 reglamentuo-

9.2 lentelė. Armatūros tempiamojo stiprio reikšmės

Armatūra	f_t , N/mm ²
Stiklo	450–1600
Anglies	600–3500
Aramido	1000–2500
Plieno	450–700

jama skaičiuotinį stiprį sumažinti: stiklo pluošto strypams – 20 %, aramido pluošto strypams – 30 % ir anglies pluošto strypams – 55 % lyginant su pradiniu trumpalaikiu stipriu.

Polimerinės armatūros stipris mažėja veikiant ilgalaikėms apkrovoms. Nagrinėjant įtempių poveikį polimeriniams strypams galima išskirti keletą irimo etapų. Pirmame etape veikiant ilgalaikėms apkrovoms susidaro įtempiai, dėl kurių aplink pažeidimo vietą, polimerinėje armatūroje, suyra pavieniai pluoštai, matrica susilpnėja ir dėl to sumažėja standumas. Antrajame etape pasireiškia irimas, matricoje atsiranda plyšių, vystosi struktūros defektai, komponentai atsiklijuoja (angl. *interfacial debonding*), kai kurie pluoštai suyra, dėl to sparčiai sumažėja standumas. Galiausiai dėl įtempių (angl. *stress rupture*) koncentracijos strypo komponentai visiškai suyra. Toks suirimo procesas yra labai panašus į suirimą veikiant ciklinei apkrovai.

Statinio nuovargio suirimo mechanizmas nėra susijęs tik su įtempiais. Aplinkos sąlygos gali pagreitinoti šį procesą. Polimerinis stiklo pluošto strypas laikomas sausoje aplinkoje, praėjus 100 metų išlaiko 70 % savo trumpalaikio tempiamojo stiprio, o laikant drėgnoje aplinkoje išlieka tik 50 % trumpalaikio stiprio. Poveikis rūgštimis ir šarmais gali lemti suirimą netgi esant žemesniems įtempiams. Atlikus pagreitinto senėjimo eksperimentinius bandymus, gautos reikšmės ekstrapoliuojamos ir nustatomas ilgalaikis polimerinio kompozito stipris. Pasak mokslininkų, kritiniai traukos suirimo įtempiai yra 0,3, 0,47 ir 0,91 nuo pradinio stiprio reikšmės atitinkamai stiklo, aramido ir anglies pluošto polimerinei armatūrai po 50 metų.

Kalbant apie ciklinės apkrovos poveikį, pažeidimai polimerinėje armatūroje atsiranda mikrostruktūriniu lygmeniu: pažeidžiama pluošto ir matricos sukibimo zona; matricoje atsiranda mikropažeidimų; medžiaga susisluoksniuoja; prasideda pluošto skilimas. Nuovargio elgsena kompozitinėje medžiagoje priklauso nuo polimero pluošto išsidėstymo matricoje, temperatūros sąlygų, drėgmės bei įtempių ir apkrovimo ciklų skaičiaus santykio (angl. *stress vs. Number of cycles-to-failure*).

Svarbu tai, kad nuovargis kompozitų naudojimo laikotarpiu priklauso nuo matricos deformacijų ir kontakto tarp matricos ir pluošto parametrų (angl. *inteerfacial characteristics*), bet ne nuo pluošto stiprio. Matricos ir pluošto sąveikos charakteristikos tampa dar svarbesnės, kai kompozitų skerspjūvis didėja.

Valkšnumas polimerinėje armatūroje priklauso nuo pluošto ir dervos tipų, pluošto orientacijos, pluošto tūrio dalies ir eksploataavimo (temperatūros, apkrovimo) sąlygų. Taip pat valkšnumui įtakos turi ir gamybos procesas, nuo kurio priklauso mechaninės kompozito savybės. Matricos defektai gerokai padidina valkšniąsias deformacijas.

Įtempių relaksacija vyksta dėl dervų (polimerų) viskoelastiškumo, kuris pasireiškia dėl polimerams būdingos molekulinės struktūros (ilgų molekulinų grandinių). Kai kurios molekulės grandinėje, o kartais ir dalis grandinės persiskirsto veikiant įtempiams, t. y. pasislenka kitų molekulių atžvilgiu. Šis efektas ypač intensyvėja pasiekus agregatinės polimero būsenos kitimo ribą (T_g).

9.3.3. Kiti veiksniai

9.3.3.1. Drėgmės poveikis

Drėgmė leidžia agresyviems agentams (junginiams) patekti į kompozito vidų. Drėgmė veikia kaip cheminių procesų katalizatorius, todėl jos poveikis pažeidžia ryšius tarp pluošto ir dervos.

Pagrindiniai kompozitinės armatūros rodikliai, kurių kitimą lemia drėgmės poveikis, yra tempiamasis stipris ir tamprumo modulis. Polimerinių dervų irimas gali vykti tuomet, kai vandens molekulės veikia dervos plastifikatorius ir suardo Van der Valso ryšius polimerų grandinėse. Dėl to mažėja tamprumo modulis, stiprumas, irimo deformacija (angl. *failure strain*), tąsumas (angl. *toughness*). Polimeriniame kompozite atsiranda vidinių įtempių dėl pluošto (aramido, stiklo) brinkimo. Dėl šių pokyčių polimerų matricoje gali atsirasti plyšių, vyksta hidrolizė⁵ ir suprastėja sukibimas tarp pluošto ir matricos. Drėgmės poveikis intensyvėja, veikiant aukštesnėms temperatūroms (>60 °C), dėl padidėjusios drėgmės absorbcijos.

Vanduo gali įsiskverbti dviem būdais: difuziniu per dervą ir per plyšius ar kitus struktūros defektus. Difuzijos metu absorbuotas vanduo nėra skystas, bet jį sudaro molekulės ar molekulių grupės, kurios susijungia vandenilniais ryšiais su polimeru. Vandens molekulės prasiskverbia į paviršinį polimero sluoksnį ir migruoja gilyn pagal koncentracijos gradientą. Vanduo dėl veikiančių kapiliarinių jėgų įsiskverbia į medžiagą pro plyšius ar kitas pažeistas vietas. Dėl hidrolizės matrica suminkštėja, tai blogina pagrindinius matricos parametrus, tokius kaip stipris šlyčiai ar standumas. Pabrėžtinas mechaninių savybių sumažėjimas, veikiant mechaniniams įtempiams ir temperatūrinei apkrovai.

Kompozitinėje polimerinėje armatūroje gali pasireikšti hidrolizės reiškinys (būdinga stiklo pluošto armatūrai). Dėl šio reiškinio prasideda polimero (dervos) skilimas. Paprastai hidrolizės reakcijos yra grįžtamosios, todėl medžiagai išdžiūvus prarastosios savybės gali atsikurti. Hidrolizės greitis priklauso nuo daugelio parametrų ir per visą eksploatacijos laikotarpį gali turėti įtakos polimerinės armatūros ilgaamžiškumui.

9.3.3.2. Temperatūros poveikis

Statybinėse konstrukcijose temperatūros poveikis gali kisti labai plačiai, todėl nagrinėti jį apibendrintai nėra teisinga. Knygos autoriai siūlo temperatūros poveikį nagrinėti šiuose intervaluose:

- natūralios sąlygos – saulės radiacija, žemos temperatūros žiemą (nuo –40 °C iki +60 °C);
- technologiniai procesai (iki +200 °C);
- gaisro poveikis (daugiau nei +350 °C).

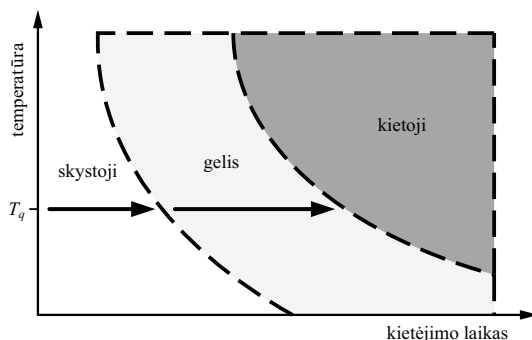
⁵ Hidrolizė – cheminė reakcija arba procesas, kurio metu cheminis junginys reaguoja su vandeniu. Reakcijos metu junginio molekulės skyla į dvi mažesnes, kurių viena prisijungia vandens vandenilio protoną, kita – OH⁻ grupę. Ši reakcija naudojama polimerams skaidyti.

Kompozitinei polimerinei armatūrai dažniausiai naudojami reaktoplastiniai⁶ polimerai (dervos). Kai polimeras kietėja gamybos metu jo makromolekulės persigrupuoja į naują agregatinę būseną, kurios temperatūra yra žemesnė už kietėjimo temperatūrą T_g (9.7 pav.). Temperatūros pokyčiai polimere sukelia vidinius įtempius. Šie įtempiai gali turėti įtakos polimero molekulių išsidėstymui. Dėl nepakankamo makromolekulių mobilumo elemente gali susidaryti porų. Kietėjimas yra viena iš polimero gamybos stadijų, todėl mechaninės savybės priklauso nuo polimero temperatūrinio apdorojimo istorijos ir greito kietėjimo temperatūros T_q (9.8 pav.).

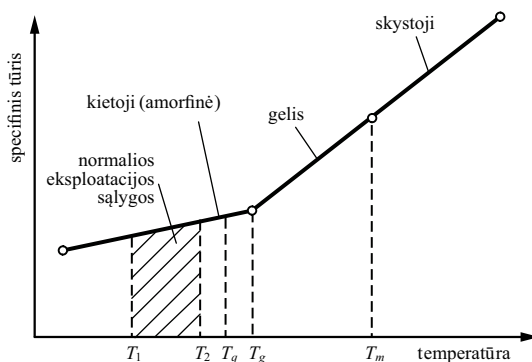
Polimerinę armatūrą patartina naudoti normaliomis eksploataavimo sąlygomis, nes elementus veikiant temperatūrai, artimai T_g , kuri daugumoje statybose taikomų polimerų svyruoja nuo 90 °C iki 180 °C, pasireiškia terminis senėjimas.

Polimerinės armatūros mechaninių savybių pokyčiai nėra tokie ryškūs statiniuose, kurie eksploatuojami šaltuose regionuose. Pastebimas nedidelio stiprio ir standumo kitimas žemoje temperatūroje (< -40 °C). Kompozito elastingumas ir tūsumas (angl. *toughness*) susijęs su sklandžiu molekulių (angl. *glassy*) judėjimu polimere, kuris priklauso nuo polimero temperatūros.

9.7 pav. Polimero agregatinės būsenos kitimas gamybos metu



9.8 pav. Polimero agregatinės būsenos priklausomybė nuo specifinio tūrio⁷ ir temperatūros kitimo



⁶ Reaktoplastikas – termoreaktyvusis plastikas, kuris kaitinamas suminkštėja, o ataušęs sukieta negrįžtamai.

⁷ Specifinis tūris – tai 1 kg medžiagos užimamas tūris.

Mažėjant temperatūrai (natūraliomis sąlygomis) didėja:

- tamprumo modulis;
- tempiamasis ir lenkiamasis stipris;
- atsparumas nuovargiui.

Mažėjant temperatūrai (natūraliomis sąlygomis) mažėja:

- išilginės deformacijos ir įlinkis;
- pleišėjimo ir smūginis atsparumas;
- gniuždomasis stipris;
- išilginio pailgėjimo koeficientas.

Temperatūrinis poveikis gali sukelti vidinius įtempius kompozite, nes pluošto temperatūrinio plėtimosi koeficientas dažniausiai yra mažesnis, lyginant su dervos (matricos). Šaltuose regionuose skirtumas tarp polimerinės armatūros gamybos ir eksploatavimo gali siekti 93 °C, dėl to gali susidaryti vidinių įtempių, kurie savo ruožtu sukelia mikroleišėjimą ir įtrūkius matricoje bei matricos ir pluošto sąveikos zonoje.

Temperatūra turi įtakos cheminiams procesams (apartiams anksčiau) ir drėgmės įgėrimo greičiui. Polimeriniuose kompozituose didžiausias stiprio sumažėjimas dėl šarminės aplinkos buvo dvigubai didesnis nei druskingoje aplinkoje, veikiant užšaldymo ir atitirpinimo ciklams. Padidėjusi temperatūra ir vidiniai įtempiai lemia didesnę stiprio sumažėjimą.

Kompozito irimas dėl temperatūros poveikio gali vykti, jeigu jo komponentai turi skirtingas temperatūrinio plėtimosi savybes. Temperatūros padidėjimas pagreitina valkšnumą (įtempių relaksaciją). Sukibimo su betonu stipris sumažėjo 90 % veikiant 250 °C temperatūrai.

9.3.3.3. Ultravioletinė spinduliuotė

Kai kompozitinės polimerinės medžiagos naudojamos konstrukcijoms stiprinti (išorėje), ultravioletinės spinduliuotės (UV) poveikis yra viena iš pagrindinių senėjimo priežasčių. Ultravioletinių spindulių veikiami polimerai patiria fotochemines paviršiaus pažeidas, dėl to polimeriniai kompozitai susilpnėja. Ilgalaikis ultravioletinių spindulių poveikis gali sukelti dervų eroziją, kuri gali pakenkti pluošto apsaugai nuo drėgmės ir plyšių atsiradimo, sumažėja termomechaninės kompozito savybės.

Anglies pluoštas yra mažiau jautrus ultravioletiniams spinduliams, lyginant su stiklo ir aramido pluoštu. Veikiant UV spinduliams aramido pluošto strypų tempiamasis stipris sumažėja maždaug 13 % po 2500 valandų trukmės poveikio, stiklo pluošto strypų – 8 % po 500 valandų (paskui nebemažėja), o anglies pluošto strypų stiprumas nesumažėja. Stiprumas ir standumas dėl UV spindulių poveikio sumažėja daugiau plonuose kompozito elementuose nei storesniuose.

Betoninėms konstrukcijoms armuoti naudojami kompozitiniai strypai apsaugoti nuo tiesioginio ultravioletinės spinduliuotės poveikio. Tačiau UV spinduliai veikia

kompozitinę armatūrą sandėliuojant (9.1 pav., 9.6 pav.). Siekiant apsaugoti polimerinę armatūrą nuo UV spindulių poveikio, gamybos metu į dervą įdedama priedų (inhibitorių), kurie slopina UV spindulių poveikį.

9.4. Senėjimo prevencijos priemonės

Senėjimo prevencijos tikslas – užtikrinti visų kompozitinę armatūrą sudarančių komponentų atitiktį eksploataciniams reikalavimams visu eksploatacijos periodu. Remiantis pagrindiniais projektavimo principais, statinio ar jo dalies konstrukcijų projekte apibrėžiami agresyvieji veiksniai, dėl kurių naudojami atitinkami armatūros stipri mažinantys koeficientai. Šiais koeficientais užtikrinamas agresyviojoje aplinkoje eksploatuojamų polimeriniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų ilgaamžiškumas. Kita vertus, kompozitinės armatūros stiprio mažinimo koeficientai apibrėžia santykinį atsparumą agresyviajai aplinkai ir norimą projektinį statinio gyvavimo laikotarpį. Pagrindinė problema, su kuria susiduria projektavimo normų kūrėjai – adekvačiai ir pagrįstai apibūdinti šiuos koeficientus ir nustatyti jų reikšmes.

Dėl polimerinių kompozitų degradavimo jų gamybos technologija intensyviai tobulinama. Vystomos dirbtinio pluošto ir dervų gamybos technologijos, gerinamos kompozitų cheminės, mechaninės ir fizikinės savybės. Būtina pažymėti, kad dėl įvairių gamybos technologijų, dervų ir pluoštų tipų, bandymo metodų ir duomenų trūkumo apie realiomis sąlygomis eksploatuojamas konstrukcijas nėra susitarta dėl bendrų polimerinės armatūros ilgaamžiškumo tyrimo metodų. Esami ilgaamžiškumo vertinimo metodai yra bendrieji ir neatsižvelgia į visus veiksnius, kurie literatūroje identifikuoti kaip reikšmingi vertinant kompozitinės polimerinės armatūros ilgaamžiškumą betone.

Šiame poskyryje apžvelgsime Japonijos, Kanados, JAV, Didžiosios Britanijos ir Norvegijos projektavimo normas ir projektavimo rekomendacijas. Pateiksime alternatyvų metodą, kurį pasiūlė Tarptautinės betono federacijos FIB užduočių grupė 9.3. Šis metodas yra lankstus ir universalus, lyginant su kitose projektavimo normose pateiktais metodais.

9.4.1. Projektavimo normos ir rekomendacijos

Šiuo metu polimeriniais kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų projektavimą reglamentuojančius dokumentus turi Japonija, Kanada, JAV, Didžioji Britanija ir Italija. Norvegijoje sudarytos laikinos projektavimo rekomendacijas. 9.3 lentelėje apibendrinami įvairiose projektavimo dokumentuose reglamentuojami kompozitinės armatūros tempiamąją stiprį mažinantys koeficientai. Galima pastebėti, kad visi projektavimo reglamentai apibendrintai vertina aplinkos poveikį – tam naudojami keli stiprumą mažinantys koeficientai, kurie nustatomi pagal pluošto tipą.

9.3 lentelė. Tempiamąjį stiprį mažinantys koeficientai pagal projektavimo normas dėl aplinkos poveikių ir valksnumo

Veiksny	ACI 440.1R-06 (JAV)	NS3473 (Norvegija)	CSA-S806-02 CHBDC-2006 (Kanada)	JSCE (Japonija)	IStructE (tarptautinis dokumentas)
Sumažinimas dėl aplinkos poveikio (saugos ribinis būvis)	C_E aplinkos poveikį įvertinantis koeficientas „drėgna-sausa“ GFRP: 0,70–0,80 AFRP: 0,80–0,90 CFRP: 0,90–1,00	η_{env} perskaičiavimo koeficientas GFRP: 0,50 AFRP: 0,90 CFRP: 1,00	Φ_{FRP} atsparumo koeficientas GFRP: 0,50 AFRP: 0,60 CFRP: 0,75	Tempiamosios kompozitinės medžiagos koeficientas GFRP: 0,77 AFRP: 0,87 CFRP: 0,87	$1/\gamma_m$ medžiagos koeficientas
Sumažinimas dėl ilgalaikio apkrovos poveikio (saugos ribinis būvis)	nebaigtas	η_H perskaičiavimo koeficientas GFRP: 0,8–1,0 AFRP: 0,7–1,0 CFRP: 0,9–1,0			GFRP: 0,30 AFRP: 0,50 CFRP: 0,60
Bendrojo stiprumo sumažinimas dėl aplinkos poveikių (tinkamumo ribinis būvis)	Išskaitant Φ (0,55–0,65) GFRP: 0,39–0,52 AFRP: 0,44–0,59 CFRP: 0,50–0,65	GFRP: 0,40–0,50 AFRP: 0,63–0,90 CFRP: 0,90–1,00	$F_{SL,S}$ didžiausi įtempiai veikiant eksploatacijos apkrovai GFRP: 0,25 AFRP: 0,35 CFRP: 0,65	GFRP: 0,77 AFRP: 0,87 CFRP: 0,87	GFRP: 0,30 AFRP: 0,50 CFRP: 0,60
Įtempių ribos veikiant nuolatinei apkrovai (tinkamumo ribinis būvis)	GFRP: 0,14–0,16 AFRP: 0,24–0,27 CFRP: 0,44–0,50	Modulio sumažinimas, įtempių ribos nenurodomos	Tempimas prieš ir po: GFRP: 0,25–0,30 AFRP: 0,35–0,40 CFRP: 0,65–0,70	$0,8 \times$ ilgalaikis stipris, ne didesnis kaip 0,7 GFRP: $\leq 0,7$ AFRP: $\leq 0,7$ CFRP: $\leq 0,7$	Įtempių ribos nenurodomos
Pastabos: GFRP – stiklo pluošto polimerinė armatūra; AFRP – aramido pluošto polimerinė armatūra; CFRP – anglies pluošto polimerinė armatūra.					

9.4.2. Alternatyvus kompozitinės polimerinės armatūros ilgaamžiškumo užtikrinimo metodas

Tarptautinio betono komiteto FIB darbo grupės 9.3 pasiūlytame metode kompozitinės polimerinės armatūros senėjimą lemiantys veiksniai įvertinami atitinkamais koeficientais, kurie aptariami šiame skirsnyje.

Skaičiuotinė tempiamojo stiprio reikšmė nustatoma pagal formulę:

$$f_{f,d} = f_{f,k0} / (\eta_{env,t} \cdot \gamma_m), \quad (9.2)$$

čia $f_{f,d}$ – skaičiuotinė tempiamojo stiprio reikšmė; $f_{f,k0}$ – charakteringoji tempiamojo stiprio reikšmė; $\eta_{env,t}$ – stiprumo mažinimo koeficientas, įvertinantis aplinkos poveikį, nustatomas pagal 9.4 ir 9.6 formules; γ_m – medžiagos savybės dalinis saugos koeficientas.

Stiprumo mažinimo koeficientas, įvertinantis aplinkos poveikį $\eta_{env,t}$, nustatomas pagal tokią išraišką:

$$\eta_{env,t} = 1 / \left((100 - R_{10}) / 100 \right)^{n+2}, \quad (9.3)$$

čia R_{10} – standartinis tempiamojo stiprumo sumažėjimas procentais per dešimtmetį dėl aplinkos poveikio (9.8 pav.), t. y. stiprio pasikeitimas per maždaug 3 logaritmiškus dešimtmečius nuo 1000 h iki 880 000 h; n – skirtingus poveikius įvertinantis apibendrintas koeficientas (9.5 formulė). Normaliomis eksploataavimo sąlygomis $n = 3$. Bendruoju atveju:

$$n = n_{mo} + n_T + n_{SL} + n_d, \quad (9.4)$$

čia n_{mo} – drėgmės poveikį įvertinantis koeficientas (9.4 lentelė); n_T – temperatūros poveikį įvertinantis koeficientas (9.5 lentelė); n_{SL} – eksploatacijos trukmę įvertinantis koeficientas (9.6 lentelė); n_d – skerspjūvio korekcijos koeficientas (9.7 lentelė).

Jei žinomas stiprumas $f_{f,k1000h}$ po 1000 h ir standartinis sumažėjimas per logaritminį dešimtmetį R_{10} , reikšmės nustatomos bandymais arba grafiškai iš 9.8 pav. Stiprumo mažinimo koeficientas taip pat gali būti nustatytas taikant šią laipsninę lygtį (DIN-53768 1990):

$$\eta_{env,t} = f_{f,k1000h} / f_{f,k0} / \left((100 - R_{10}) / 100 \right)^n, \quad (9.5)$$

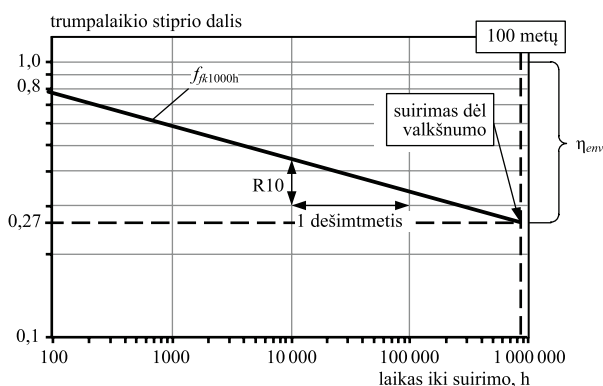
čia $f_{f,k1000h}$ – nuovargis po 1000 h, jei reikšmė nežinoma, ji nustatoma pagal 9.7 formulę (ACI 440. 1R-06 2006):

$$f_{f,k1000h} = f_{f,k} \left[(100 - R_{10}) / 100 \right]^2. \quad (9.6)$$

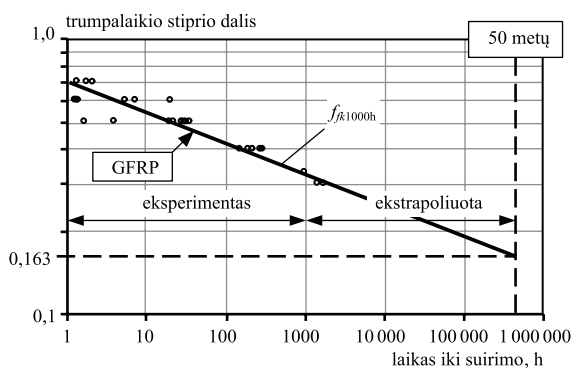
Tempiamojo stiprio sumažinimas dėl aplinkos poveikio per logaritminį dešimtmetį R_{10}

Aplinkos poveikio parametras R_{10} yra apkrovos ir laiko iki suirimo linijos kampo koeficientas dvigubo logaritmo skalėje. Kompozitinei stiklo pluošto kompozito armatūrai šio parametro priklausomybė pateikta 9.8 pav. Pastovaus koeficiento dydis

reiškia vienodą procentinį stiprumo praradimą per tą patį laiko tarpą. Šis atvaizdavimo būdas gerai žinomas nustatant statinį nuovargį. Kiekvienos medžiagų grupės panašiomis sąlygomis ši vertė yra beveik pastovi. Medžiagoms su žinoma R_{10} verte ilgalaikių poveikių reikšmių ekstrapoliavimas į eksploatacijos trukmę yra paprastas ir nustatomas pagal DIN-53768 1990 rekomendacijas atliekant pagreitinto senėjimo eksperimentinius bandymus. Stiklo pluošto kompozitinės armatūros eksperimentinė kreivė ir ekstrapoliuotos reikšmės pateiktos 9.9 ir 9.10 pav. Jei medžiagos rodiklio R_{10} reikšmė nežinoma, ji gali būti nustatoma iš literatūroje konkrečiai medžiagos grupei pateiktų duomenų.



9.9 pav. Stiprumo išlaikymo kreivė logaritminėje skalėje



9.10 pav. Eksperimentinė stiprumo išlaikymo kreivė logaritminėje skalėje

Nuovargis po 1000 h $f_{fk1000h}$

Nuovargis yra charakteringoji apkrovos reikšmė, kurią gali išlaikyti kompozitinė armatūra, praktinio bandymo metu veikiamą 1000 h. Ši reikšmė gali būti išreikšta tempiamojo stiprio procentine dalimi arba absoliučiąja verte. Ilgaamžiškumas gali būti patikimai nustatomas tik tuo atveju, jei yra bandymo duomenų veikiant ilgalaikiai apkrovai. Kuo ilgesnė bandymų trukmė, tuo ekstrapoliacija gaunama tikslesnė (9.9 pav.). Vertinant medžiagas 1000 h vidurkis yra gana tikslus. Šiuo periodu difuzijos procesai stabilizuojasi, o bandymus galima užbaigti per keletą mėnesių. Turint

šiuos duomenis ir atliekant ekstrapoliaciją galima išvesti liniją, kuri apima reikšmes nuo 1000 h (trijų dešimtmečių) iki 1 milijono valandų. Jei 1000 h nuovargio vertė nežinoma, ją galima nustatyti pagal 9.7 formulę. Skaičiuotina ilgalaikio tempiamojo stiprio reikšmė nustatoma naudojant šią formulę:

$$f_{f,d} = f_{f,k1000h} \left[(100 - R_{10}) / 100 \right]^n / \gamma_m. \quad (9.7)$$

Drėgmės poveikio koeficientas n_{mo}

Atsižvelgiant į aplinkos poveikio klases, pateiktas LST EN 206-1 (2002) standarte, galima sudaryti tris drėgnos aplinkos grupes:

1. Sausa – eksploatuojant vidaus sąlygomis, kai apsaugota nuo lietaus ir vidutinė santykinė oro drėgmė apie 50 % (XC1 sausas).
2. Drėgna – eksploatuojant lauko sąlygomis, kai veikia lietus, bet ne nuolat liečiasi su vandeniu ir vidutinė santykinė oro drėgmė apie 80 % (XC3, XD1, XD3, XS1, XS3).
3. Prisotinta – nuolatinis kontaktas su vandeniu, o vidutinė santykinė drėgmė artima 100 % (XC2, XC4, XD2, XS2).

Pateiktų grupių reikšmės pateiktos 9.4 lentelėje.

9.4 lentelė. Betonų, eksploatuojamų drėgnomis sąlygomis, pataisos koeficientai n_{mo}

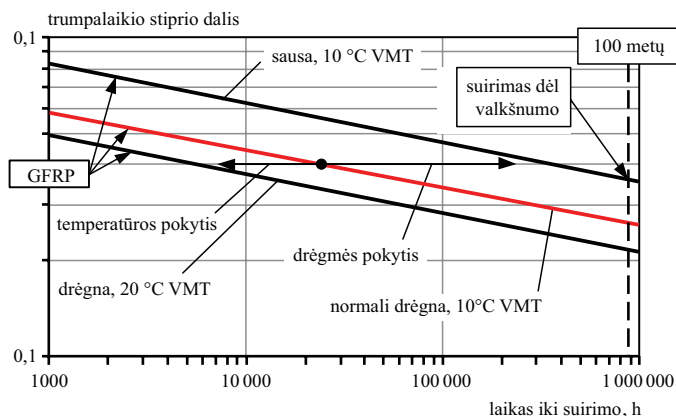
Sausas (RH apie 50 %)	Drėgnas (betonas ne visada liečiasi su vandeniu, RH apie 80 %)	Prisotintas drėgmės (betonas nuolat liečiasi su vandeniu, RH apie 100 %)
-1	0	1

Temperatūros poveikio koeficientas n_T

Temperatūros padidėjimas 10 °C padvigubina cheminės reakcijos greitį. Daroma prielaida, kad yra tiesinė priklausomybė tarp stiprumo sumažėjimo ir laiko logaritmo, tuomet galima tikėtis stiprumo sumažėjimo temperatūrai sumažėjus arba padidėjus 10 °C, atitinkamai laiką dauginant arba dalijant iš dviejų. Temperatūros pokyčio priklausomybės nuo stiklo pluošto kompozito armatūros parodytos 9.11 pav. Atsižvelgiant į šias prielaidas ir siekiant užtikrinti saugumo reikalavimus, vietoje nustatytos koeficiento n_T reikšmės 0,3 rekomenduojama naudoti 0,5. Normaliomis sąlygomis veikianti temperatūra suskirstoma į 4 klases, kuriose temperatūra kinta 10 °C intervalais, jų reikšmės pateiktos 9.5 lentelėje. Jei yra didelės sezoninės temperatūros kaitos (kontinentinis klimatas), rekomenduojama rinktis aukštesnę vertę.

9.5 lentelė. Vidutinės metinės temperatūros (VMT) koeficientas n_T

VMT < 5 °C	5 °C < VMT < 15 °C	15 °C < VMT < 25 °C	25 °C < VMT < 35 °C
-0,5	0	0,5	1



9.11 pav. Stiprumo išlaikymo kreivė logaritminėje skalėje, kintant vidutinei metinei temperatūrai (VMT) ir aplinkos drėgmei (Weber 2006)

Eksplotacijos laiko koeficientas n_{SL}

Tempiamojo stiprio mažinimo koeficientas $\eta_{env,t}$ skirtas 100 metų eksploatacijos laikui įvertinti. Gali būti taikomas ir mažesnis tempiamojo stiprio mažinimo koeficientas, jei pageidaujamas eksploatacijos laikas yra trumpesnis, pavyzdžiui, 10 metų. Priėmus prielaidą, jog yra tiesinė priklausomybė tarp stiprio sumažinimo ir laiko logaritmo, stiprio mažinimo koeficientas $\eta_{env,t}$ gali būti perskaičiuojamas pasinaudojus koeficientu n_{SL} (9.6 lentelė).

9.6 lentelė. Koeficientas pageidaujamam eksploatacijos laikui (DIN-53768 1990; Weber 2006) n_{SL}

Eksplotacijos laikas = 1 metai	Eksplotacijos laikas = 10 metų	Eksplotacijos laikas = 50 metų	Eksplotacijos laikas = 100 metų
1	2	2,7	3

Skerspjuvio pataisos koeficientas n_d

Kadangi visi irimo procesai yra funkcijos, priklausančios nuo temperatūros, laiko ir drėgmės, gali būti taikomas Fiko difuzijos⁸ dėsnis. Pagal šį dėsnį elemento skersmuo turi įtakos suirimo laikui. Jei skersmuo mažesnis nei bandinio, turi būti naudojamas pataisos koeficientas. Didesniems skersmenims koeficiento naudoti nerekomenduojama, nes dydis turi įtakos stiprumo reikšmei. Reikšmės, kurios pateikiamos 9.7 lentelėje skliaustuose, yra suskaičiuotos remiantis difuzijos dėsniu.

⁸ Difuzija – procesas, kai skystosios arba dujinės medžiagos molekulės skverbiasi iš didesnės koncentracijos vietų mažesnės koncentracijos link pagal koncentracijos gradientą, kol pasiskirsto vienodai.

9.7 lentelė. Skerspjūvio pataisos koeficientas n_d

Didesnis nei bandinys	Tokio pat didumo kaip bandinys	75 % bandinio	50 % bandinio
0	0	0,5 (0,3)	1(0,6)

Dalinis medžiagos savybės koeficientas γ_m

Kadangi aplinkos poveikio koeficientas priklauso nuo medžiagos ir išorinių sąlygų, medžiagos koeficientas atsižvelgia į stiprumo reikšmių pasklidimą ir suirimo tipą. Kai kuriuose Europos projektavimo dokumentuose (BÜV-Empfehlung 2002; LST EN 13706 2002; CUR 2003) pateikiamas pultruzijos būdu pagamintų polimerinių profiliuotųjų medžiagos koeficientas, kurio reikšmės yra intervale tarp plieno armatūros ir betono reikšmių (1,15–1,5). Autoriai rekomenduoja taikyti kompozitiniams (stiklo, anglies, aramido) polimero medžiagoms medžiagos dalinį patikimumo koeficientą, kurio reikšmė yra 1,25.

9.4.3. Eksperimentiniai ilgaamžiškumo tyrimai

Atliekant kompozitinės polimerinės armatūros ilgaamžiškumo bandymus, dažniausiai taikomi pagreitinoto aplinkos poveikio bandymai. Jais nustatomas liekamasis tempiamasis stipris po tam tikro eksploatacijos laiko. Tokio tipo bandymų eiga apibūdinta įvairiuose projektavimo dokumentuose (ACI 440.3R-04 2004) ir tarptautiniuose bandymų standartuose (ISO 10406-1:2008 2008). Vadovaudamiesi šiomis rekomendacijomis ir standartais tyrėjai turi nuspręsti, kokias aplinkos poveikio sąlygas reikia pasirinkti ir kaip naudoti liekamąjį stiprumą, nes jose nenurodomos jokios ribos. Ribinių reikšmių tipai nurodyti Kanados standarto (CAN/CSA S806-12 2012) priede O. Jame apibrėžta, kad bandiniai turėtų būti apkrauti iki 1,1 leistino projekcinio stiprumo, kai sendinama dirbtiniame betono tirpale, kurio pH 12,7, arba pačiame betone.

Atliekant eksperimentinius tyrimus bandymo apkrova prilyginama projeketinei apkrovai. Bandymas trunka 2000 h 60 °C temperatūroje, tai atitinka statinio eksploatacinį laikotarpį. Betonui gaminti naudojamas didelio šarmingumo cementas (Na_2O koncentracija = 1 %), vandens cemento santykis (V/C) didesnis už 0,45, tuomet gaunamas didžiausias įmanomas pH. Bandymo metu betonai yra prisotinami vandens ir jame suformuojami plyšiai. Tai leidžia sukurti realių aplinkos sąlygų poveikį. Kaip alternatyvią bandymo terpę betonui galima naudoti dirbtinį tirpalą, kurio pH vertė sutampa su betono pH.

Po bandymo nustatomas strypo liekamasis tempiamasis stipris. Skaičiuotinė tempiamąjo stiprio reikšmė imama kaip mažiausia iš atliktų liekamojo stiprumo bandymų ir charakteristinės liekamojo stiprumo reikšmės, padalintos iš medžiagos koeficiento γ_m :

$$f_{f,d} = \min(f_{Test}, f_{f,k,r} / \gamma_m), \quad (9.8)$$

čia f_{Test} – stipris, nustatytas atliekant bandymus; $f_{f,k,r}$ – polimerinės armatūros charakteristinis liekamasis tempiamasis stipris; $f_{f,d}$ – skaičiuotinis polimerinės armatūros stipris.

Taikant šią supaprastinto bandymo metodiką gaunami rezultatai su labai didele atsarga.

9.4.4. Konstrukcinės priemonės polimerinės armatūros senėjimo prevencijai užtikrinti

Naudojant kompozitinę polimerinę medžiagą konstrukcijos išorėje naudojamos specialios dangos, kurios apsaugo nuo UV ir mechaninių poveikių. Naudojant polimerinius kompozitus betoninių konstrukcijų viduje, svarbu užtikrinti tinkamą apsauginį betono sluoksnį. Jei konstrukcija naudojama normaliomis aplinkos sąlygomis, šis sluoksnis gali būti ir mažesnis, lyginant su gelžbetoninėmis konstrukcijomis. Tačiau jis turi būti kur kas didesnis esant gaisro ir auštų temperatūrų poveikiui. Jei betono apsauginis sluoksnis nepakankamas, galima naudoti išorines medžiagas, kuriomis užtikrinamas reikiamas apsaugos sluoksnis nuo aukštų temperatūrų arba gaisro poveikių.

9.5. Skyriaus apibendrinimas

Tradiciniai betoniniai ir gelžbetoniniai elementai turi nemažai trūkumų: plieninė armatūra nėra atspari korozijai, o betonas yra trapus, turi mažą atsparumą pleišėjimui. Siekiant išvengti plieno korozijos sukeltų padarinių ir užtikrinti betoninių konstrukcijų ilgaamžiškumą, buvo sukurta kompozitinė polimerinė armatūra, jau daug dešimtmečių naudojama betono konstrukcijoms armuoti ir stiprinti. Tačiau dėl medžiagų įvairovės ir gamybos technologijos nevienodumo yra ypatumų, kurie turi įtakos kompozitinių polimerinių medžiagų ilgaamžiškumui:

- mechaninių savybių degradavimas eksploatacijos metu;
- agresyviosios aplinkos (cheminių medžiagų) poveikis;
- ultravioletinių spindulių poveikis (ypač aktualus polimeriniams kompozitams, kurie naudojami konstrukcijos išorėje).

Dėl polimerinių kompozitų degradavimo jų gamybos technologija sparčiai vystoma. Tobulinamos dirbtinio pluošto ir dervų gamybos technologijos, taip pat gerinamos cheminės, mechaninės ir fizinės kompozitų savybės. Taip pat polimerų senėjimą galima sulėtinti antioksidantais, inhibitoriais arba stabilizatoriais. Būtina pažymėti, kad dėl įvairių gamybos technologijų, dervų ir pluoštų tipų, bandymo metodų ir duomenų trūkumo apie realiomis sąlygomis veikiančias konstrukcijas nėra susitarta dėl bendrų polimerinės armatūros ilgaamžiškumo tyrimo metodų. Esami ilgaamžiškumo vertinimo metodai yra bendrieji ir neatsižvelgia į visus veiksnius, kurie identifiukuoti kaip reikšmingi vertinant kompozitinės polimerinės armatūros ilgaamžiškumą betone.

Kompozitų senėjimo prevencijos tikslas – užtikrinti visų kompozitinę armatūrą sudarančių komponentų atitiktį eksploataciniams reikalavimams visu eksploatacijos periodu. Remiantis pagrindiniais projektavimo principais, statinio ar jo dalies konstrukcijų projekte apibrėžiami agresyvieji veiksniai, dėl kurių naudojami atitinkami armatūros stiprį mažinantys koeficientai. Šiais koeficientais užtikrinamas agresyviojoje aplinkoje eksploatuojamų polimeriniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų ilgaamžiškumas. Kita vertus, kompozitinės armatūros stiprio mažinimo koeficientai apibrėžia santykinį atsparumą agresyviajai aplinkai ir norimą projektinį statinio gyvavimo laikotarpį. Pagrindinė problema, su kuria susiduria projektavimo normų kūrėjai, – adekvačiai ir pagrįstai apibūdinti šiuos koeficientus bei nustatyti jų reikšmes.

Šiame skyriuje aptarti aplinkos poveikiai, turintys įtakos polimerinės kompozitinės armatūros ilgaamžiškumui. Pristatytos esamos projektavimo normos ir rekomendacijos, pateiktas alternatyvus metodas kompozitinės polimerinės armatūros ilgaamžiškumui įvertinti.

Kontroliniai klausimai

1. Kodėl statyboje naudojamos polimerinės kompozitinės medžiagos?
2. Kodėl nagrinėjamas polimerinių kompozitinių medžiagų ilgaamžiškumas?
3. Kokie aplinkos poveikiai turi įtakos polimerinės armatūros ilgaamžiškumui?
4. Koks polimerų senėjimo mechanizmas?
5. Kokį poveikį kompozitinei polimerinei armatūrai turi drėgmė?
6. Kokį poveikį kompozitinei polimerinei armatūrai turi šarmai?
7. Kokį poveikį kompozitinei polimerinei armatūrai turi rūgštys?
8. Kokį poveikį kompozitinei polimerinei armatūrai turi druskos?
9. Kokį poveikį kompozitinei polimerinei armatūrai turi temperatūra?
10. Kokį poveikį kompozitinei polimerinei armatūrai turi ultravioletiniai spinduliai?
11. Kokie parametrai nusako polimerinės kompozitinės armatūros ilgaamžiškumą?
12. Kokios polimerinių kompozitų senėjimo prevencijos priemonės?
13. Kaip apskaičiuojamas polimerinės armatūros ilgaamžiškumas supaprastintuoju metodu?
14. Kaip nustatomas polimerinės kompozitinės armatūros ilgaamžiškumas bandymais?

Skaičiavimo pavyzdžiai

Norint parodyti įvairių aplinkos poveikių daromą įtaką, pateikiami kai kurie praktiniai pavyzdžiai. Kiekvienoje 9.8 lentelės eilutėje pateikiamos tempiamojo stiprio ($f_{f,k0}$, $f_{f,k1000h}$), stiprio sumažėjimo per dešimtmetį R_{10} ir įvairių poveikių koeficientų (n_{mo} , n_T ir n_{SL}) reikšmės. Iš šių reikšmių suskaičiuojamos $\eta_{env,t}$ ir $1/\eta_{env,t}$ vertės. Naudojant medžiagos koeficientą, kuris pateiktas priešpaskutiniame stulpelyje, apskaičiuojama skaičiuotinė reikšmė pagal 9.3 formulę.

Pirmose keturiose eilutėse lyginami keturi iš anksto įtempti armatūros strypai, kurie bus taikomi įtemptosioms konstrukcijoms sausoje, šaltoje aplinkoje (sausas, 10 °C, 100 metų). Didžiausia skaičiuotinė vertė gaunama strypui, nusidėvėjusiam mažiausiai (mažiausia R_{10} reikšmė). Nepaisant didelio stiklo pluošto polimerinės 2 klasės armatūros trumpalaikio stiprio, šios armatūros skaičiuotinė stiprio reikšmė sudaro 30 % jos pirminio tempiamojo stiprio, todėl įtemptosioms konstrukcijoms jos naudoti nerekomenduotina.

5, 6 ir 7 eilutėse pateikiami aplinkos poveikio projektavimo pavyzdžiai stiklo pluošto polimerinės 3 klasės armatūrai. 5 eilutėje pateiktas pavyzdys, kai stiklo pluošto polimerinė armatūra naudojama ilgą laiką uoste (drėgna, 20 °C, 50 metų), o 6 eilutėje skaičiuojama reikšmė, kai medžiaga naudojama trumpam laikui (drėgna, 10 °C, 1 metai) ir 7 eilutėje ligoninės perdangai (sausas, 20 °C, 100 metų).

8–10 eilutėse pateikti pavyzdžiai sertifikuotai ir išbandytai 1 klasės armatūros sistemai, kuri rodo 18 % mažėjimą per dešimtmetį. Pagrindinis skirtumas tarp įprastos armatūros ir armatūros strypų sistemos, kuri projektuojama ilgaamžiškumui iš tos pačios medžiagos klasės, yra ne tiesės nuolydis, bet tiesės pradžios taško padėtis (9.8 lentelė).

9.8 lentelė. Aplinkos poveikio projektavimo pavyzdžiai

Eil. Nr.	Medžiaga	f_{fk} , N/mm ²	$f_{fk1000h}$, N/mm ²	R_{10}	Drėgnumo sąlygos	n_{mo}	VMT, °C	n_T	Eksperimento trukmė metais	n_{SL}	n	$\eta_{env,t}$	$1/\eta_{env,t}$	γ_m	f_{fr} , N/mm ²
1	1 klasės CFRP	2000	2000	3 %	Sausa	-1	10	0	100	3	2,0	1,1	94 %	1,25	1505
2	2 klasės CFRP	2000	2000	5 %	Sausa	-1	10	0	100	3	2,0	1,1	90 %	1,25	1444
3	1 klasės AFRP	2000	1800	15 %	Sausa	-1	10	0	100	3	2,0	1,5	65 %	1,25	1040
4	2 klasės GFRP	1400	1000	20 %	Sausa	-1	10	0	100	3	2,0	2,2	46 %	1,25	512
5	3 klasės GFRP	650	366	25 %	Drėgna	1	20	0,5	50	2,7	4,2	5,9	17 %	1,25	87
6	3 klasės GFRP	650	366	25 %	Drėgna	1	10	0	1	1	2,0	3,2	32 %	1,25	165
7	3 klasės GFRP	650	366	25 %	Drėgna	-1	20	0,5	100	3	2,5	3,6	27 %	2,25	79
8	1 klasės GFRP	1100	1000	18 %	Drėgna	0	10	0	100	3	3,0	2,0	50 %	1,25	441
9	1 klasės GFRP	1100	1000	18 %	Drėgna	1	10	0	1	1	2,0	1,6	61 %	1,25	538
10	1 klasės GFRP	1100	1000	18 %	Lauke	0	30	1	100	3	4,0	2,4	41 %	1,25	362

Pastabos: GFRP – stiklo pluošto polimerinė armatūra; AFRP – aramido pluošto polimerinė armatūra; CFRP – anglies pluošto polimerinė armatūra; VAT – vidutinė metinė temperatūra.

Rekomenduojamoji literatūra

- ACI 440.1R-06: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. 2006. Michigan: American Concrete Institute. 44 p. ISBN 9780870312106.
- ACI 440.3R-04 *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*. 2004. Michigan: American Concrete Institute. 40 p. ISBN 9780870311628.
- Burgoyne, C. 2001. *Fibre-reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures. Proceedings of the Fifth International Conference on Fibre-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5)*. Cambridge, UK: Institution of Civil Engineers. 1151 p. ISBN 9780727730299.
- CAN/CSA S806-12 *Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers*. 2012. Toronto, Ontario, Canada. 206 p. ISBN 9781554919314.
- Clarke, J. L.; Sheard, P. 1998. Designing durable FRP reinforced concrete structures, durability of fibre reinforced polymer (FRP) composites for construction, in *Proceedings of the 1st International Conference on Durability of fiber reinforced polymer (FRP) composites for construction (CDCC '98)*. Sherbrooke, Québec, Canada, 13–24.
- Cost of Corrosion Study (CCS)* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. spalio 8 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.nace.org/Publications/Cost-of-Corrosion-Study/> >.
- CUR Recommendation 96 – *Fibre Reinforced Plastics in Civil Engineering Structures*. 2003. Gouda, NL.
- DIN-53768 *Extrapolationsverfahren für die Bestimmung des Langzeit Versagensverhaltens von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK)* [Extrapolation method for the prediction of the long term behaviour]. 1990. Berlin.
- Faza, S.; GangaRao, H. V. S. 1993. Strength and stiffness degradation of fiber reinforced polymers under accelerated environmental conditioning, *Advanced Materials: Performance Through Technology Insertion* 38(2): 1967–1977.
- FRP Reinforcement in RC Structures – Bulletin No. 40. 2007. Lausanne, Switzerland: The International Federation for Structural Concrete (FIB). 160 p. ISBN 9782883940802.
- GangaRao, H. V. S.; Taly, N.; Vijay, P. V. 2007. *Reinforced Concrete Design with FRP Composites* USA: CRC Press. 400 p. ISBN 9780824758295.
- ISO 10406-1:2008 *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods - Part 1: FRP bars and grids*. 2008. 40 p.
- IStructE 1999. *Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fibre composite reinforcement*. London, UK: Institution of Structural Engineers, SETO Ltd. ISBN 9781874266471.
- Karbhari, V. M. 2007. *Durability of Composites for Civil Structural Applications*. Cambridge, UK: Woodhead Pub. 366 p. ISBN 9781845690359.
- Lietuvos geležinkelio tiltai [žiūrėta 2012 m. liepos 17 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.litrail.lt/wps/portal/!ut/p/c1/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3h3C2N_VzcPI-wMDH3NHAYNTU69gPyd_Qy8DM6B8JE55YydjArrDQfaZxRvgAI4GEHl85uOT-DzFEK_e38DQzMPlxDQt2NAFyzc30_Tzyc1P1C3ljDDI9dR0Bm2qIZAI!!/dl2/d1/L2dJQ-SEvUUt3QS9ZQnB3LzZfRzgzT0VGSDIwMEw3QTAYNTVKU05CTzFCVDI!>.
- LST EN 13706-2:2002 *Armuoti plastikų kompozitai. Techniniai reikalavimai, keliami vienašio orientavimo pluoštiniams profiliams. 2 dalis. Tyrimo metodai ir bendrieji reikalavimai* [Re-

- inforced plastics composites - Specifications for pultruded profiles - Part 2: Methods of test and general requirements]. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.
- LST EN 13706-3:2002 Armuoti plastikų kompozitai. Techniniai reikalavimai, keliami vienašio orientavimo pluoštiniais profiliams. 3 dalis. Specialieji reikalavimai* [Reinforced plastics composites - Specifications for pultruded profiles - Part 3: Specific requirements]. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.
- LST EN 206-1:2002 Betonas. 1 dalis. Techniniai reikalavimai, savybės, gamyba ir atitiktis* [Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity]. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.
- Tiltai ir viadukai valstybinės reikšmės keliuose* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. liepos 7 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.lra.lt/lt.php/lietuvos_keliai/tiltai_viadukai/541>.
- Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen (TKB) Entwurf, Bemessung und Konstruktion: Recommendation* [Load supporting plastic members in construction]. Germany, 2002.
- Weber, A. 2006. Durability approach for GFRP Rebars, in *Proceedings of the 3rd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006)*. Miami, Florida, USA.

10. KOMPOZITINĖS ARMATŪROS IR BETONO SĄVEIKA

10.1. Įžanga

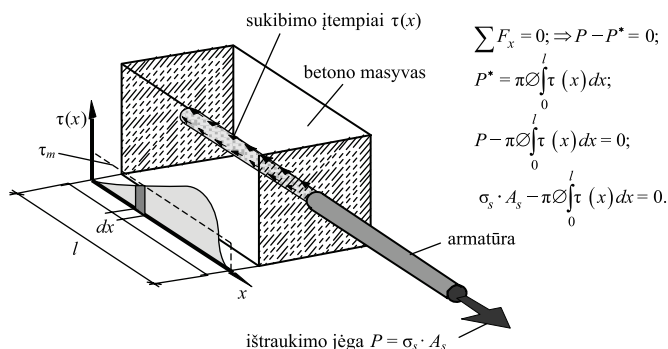
Armutojo betono konstrukcijos projektuojamos taip, kad dėl išorinių poveikių ir apkrovų skerspjuvyje susidarančias tempimo įrašas perimtų strypinė armatūra. Tokiu pačiu principu pagrįstas ir kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų projektavimas, tik šiuo atveju vietoj įprasto plieno naudojamos kompozitinės medžiagos – dažniausiai stiklo, anglies, aramido ar bazalto pluoštais armuoti polimerai. Siekiant efektyviai išnaudoti elemento tempiamojoje zonoje esančią armatūrą, būtina užtikrinti gerą armatūros ir betono sukibimą. Dėl šio efekto betono ir armatūros sąlyčio paviršiuje vyksta įtempių perdavimas. Elementų sandūrose ir ruožuose tarp plyšių galima pastebėti ir atvirkščią procesą – apkrauta armatūra perduoda tempimo įtempius betonui. Abiem atvejais įtempių perdavimas nuo betono armatūrai (ir atvirkščiai) yra viena svarbiausių armutojo betono konstrukcijų savybė, nuo kurios priklauso atitiktis tiek stiprumo (inkaravimo zonos, užleistinės sandūros), tiek tinkamumo (elementų įlinkiai, pleišėjimas) ribinių būvių reikalavimams.

Fizikinės ir mechaninės kompozitinės armatūros savybės reikšmingai skiriasi nuo įprastinės plieninės armatūros. Dėl silpno cheminio kompozitinės armatūros sukičimo, didelio temperatūrinio plėtimosi koeficiento, nedidelių tamprumo ir šlyties modulių kompozitinės armatūros ir betono sąveikos kokybė yra kur kas prastesnė nei įprastuose gelžbetoniniuose elementuose.

Polimerinės armatūros ir betono sąveika priklauso ne tik nuo pačios armatūros savybių, bet ir nuo daugelio konstrukcinių bei technologinių veiksnių, kurie bus nuosekliai aptarti kituose knygos poskyriuose. Pažymėtina, kad egzistuoja tam tikri universalūs armatūros (tiek plieninės, tiek kompozitinės) ir betono sąveiką apibūdinantys dėsniai, kurie projektuotojui leidžia iš anksto numatyti galimas problemas, susijusias su netinkamu armatūros ir betono sąveikos vertinimu (dažniausiai tai atsisverę išilginiai plyšiai, nepakankami inkaravimo zonų ir užleistinių sandūrų ilgiai, pernelyg dideli konstrukcijų įlinkiai). Šioje knygos dalyje daugiau dėmesio skiriama fizikiniams bei mechaniniams armatūros ir betono sąveikos dėsniams aprašyti. Jie galioja bet kokioms strypinės armatūros rūšims. Toliau knygoje aptariama įprastos plieninės armatūros sąveika su betonu, nuosekliai pereinant prie kompozitinės armatūros elgsenos ypatumų.

10.2. Armatūros ir betono sukibimo sąvoka

Sukibimu (angl. *bond*) vadinamas armatūros ir betono tarpusavio sąveikos reiškiny, kurio metu atsirandantys armatūros įtempiai perduodami betonui, ir atvirkščiai. Sukibimo kokybė nulemia tokias svarbias konstrukcijos savybes, kaip armatūros inkaravimo ir užleistinių sandūrų ilgis, plyšio plotis, atstumas tarp plyšių ir bendros konstrukcijos deformacijos. Sukibimo reiškinį aiškiausiai galima stebėti ištraukiant armatūros strypą iš betono masyvo, kaip parodyta 10.1 pav. Iš betoninio masyvo traukiamas armatūros strypas, kurio skersmuo yra $\varnothing$, o inkaravimo ilgis – l .



10.1 pav. Armatūros ir betono sukibimo samprata

Tarkime, strypas traukiamas jėga P , sukeliančia įtempius armatūroje $\sigma_s = P / A_s$, čia A_s – plieninės armatūros skerspjūvio plotas. Dėl sukibimo įtempių betoniniame bloke susidaro priešingos krypties reakcija, kurią pažymėkime P^* . Sukibimo įtempiai bendruoju atveju armatūros ir betono sąveikos zonoje pasiskirsto netolygiai, juos pažymėkime funkcija $\tau(x)$. Tada reakciją P^* galima išreikšti kaip sukibimo įtempių ir strypo paviršiaus ploto sandaugą:

$$P^* = \pi \varnothing \int_0^l \tau(x) dx, \quad (10.1)$$

čia $\varnothing$ – armatūros skersmuo; $\tau(x)$ – šlyties (sukibimo) įtempiai, pasiskirstę ilgyje x ; l – sukibusios su betonu strypo dalies ilgis (inkaravimo ilgis).

Ištraukimo jėgą P galime išsireikšti kaip armatūros įtempių σ_s ir skerspjūvio ploto A_s sandaugą:

$$P = \sigma_s A_s. \quad (10.2)$$

Suprojektavę armatūros strypą veikiančias jėgas į x ašį, galime užrašyti pusiausvyros sąlygą:

$$\sum F_x = 0; \Rightarrow \pi \varnothing \int_0^l \tau(x) dx - \sigma_s A_s = 0. \quad (10.3)$$

Armatūros skerspjūvio plotą $A_s = \pi \varnothing^2 / 4$ įstatę į (10.3) lygtį ir suprastinę gauname:

$$\pi \varnothing \int_0^l \tau(x) dx - \sigma_s \frac{\pi \varnothing^2}{4} = 0 \Rightarrow \int_0^l \tau(x) dx - \sigma_s \frac{\varnothing}{4} = 0. \quad (10.4)$$

Gautoje pusiausvyros lygtyje įtempiai armatūroje σ_s ir armatūros skersmuo $\varnothing$ yra vienareikšmiškai apibrėžti, tačiau sukibimo įtempių funkcija $\tau(x)$ lieka neapibrėžtas dydis. Projektavimo praktikoje dažniausiai daroma prielaida, kad vidutiniai sukibimo įtempiai pasiskirstę tam tikru pastoviu dydžiu τ_m . Padarę tokią prielaidą, gauname:

$$\int_0^l \tau(x) dx = \int_0^l \tau_m dx = \tau_m \int_0^l dx = \tau_m \cdot x \Big|_0^l = \tau_m \cdot l. \quad (10.5)$$

Gautą išraišką įstatę į (10.4) lygtį galime užrašyti:

$$\tau_m \cdot l - \sigma_s \frac{\varnothing}{4} = 0 \Rightarrow l = \frac{\sigma_s \cdot \varnothing}{4 \tau_m}. \quad (10.6)$$

Formulė (10.6) apibrėžia tiesaus armatūros strypo inkaravimo ilgį l , veikiant jėgai P , kuri armatūroje sukelia įtempius σ_s , o armatūros ir betono sąlyčio paviršiuje – vidutinius sukibimo įtempius τ_m . Šioje vietoje verta prisiminti LST EN 1992-1-1:2005 normose siūlomą analogišką *pagrindinio* inkaravimo ilgio išraišką:

$$l_{b,rqd} = \frac{\varnothing}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}. \quad (10.7)$$

Vidutiniai sukibimo įtempiai f_{bd} pagal LST EN 1992-1-1:2005 normų rekomendacijas apskaičiuojami pagal tokią priklausomybę:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \eta_2 f_{ctd}, \quad (10.8)$$

čia f_{ctd} – skaičiuotinis betono tempiamasis stipris; η_1 – koeficientas, įvertinantis sukibimo kokybę ir strypo padėtį betonuojant: ($\eta_1 = 1$ geromis sukibimo sąlygomis, kitais atvejais $\eta_1 = 0,7$); η_2 – koeficientas, įvertinantis strypo skersmenį: $\eta_2 = 1$, kai $\varnothing \leq 32$ mm; $\eta_2 = (132 - \varnothing) / 100$, kai $\varnothing > 32$ mm.

Pažymėtina, kad pagal LST EN 1992-1-1:2005 normų rekomendacijas vidutiniai sukibimo įtempiai yra tiesiogiai proporcingi betono tempiamajam stipriui. Ši paprasta prielaida dažnai taikoma supaprastintai modeliuojant armatūros ir betono sąveiką, vidutinius sukibimo įtempius išreiškiant $\tau_m \approx 2f_{ct}$. Kodėl siūlomos būtent tokios vidutinių sukibimo įtempių reikšmės ir kaip įtempiai perduodami iš armatūros į betoną, bus aptarta vėliau.

10.3. Įtempių perdavimo reiškiny

Nagrinėdami iš betoninio masyvo traukiamą strypą, įvedėme *sukibimo įtempių* sąvoką, kuri apibūdino betono ir armatūros sąlyčio paviršiuje atsirandančius įtempius (veikiančius lygiagrečiai su strypo išilgine ašimi). Šių įtempių susidarymas yra su-

dėtingas ir įvairiapusis betono bei armatūros sąveikos procesas, apimantis tris pagrindinius reiškinius: adheziją (cheminį sukibimą), trintį ir mechaninį inkaravimą.

Adhezija vadinamos traukos jėgos, susidarancios tarp skirtingo tipo molekulių. Kai armatūros strypas yra betone, adhezija pasireiškia tarp cemento matricos ir armatūros paviršiaus. Konstrukciniu požiūriu tai nėra patikima sukibimo dedamoji, nes cheminės tarpmolekulinės jungtys suardomos esant labai mažiems poslinkiams.

Trinties jėga pasireiškia suirus cheminiams ryšiams (adhezijai) tarp armatūros ir betono. Ši sukibimo dedamoji veikia tol, kol armatūros strypas nėra visiškai ištraukiamas. Trinties jėgos dydis priklauso nuo armatūros paviršiaus šiurkštumo ir strypo skersinio apspaudimo.

Mechaninis inkaravimas susidaro tarp armatūros rumbų ir betono. Tai pati efektyviausia sukibimo dedamoji. Rumbuotosios armatūros atveju adhezijai tenka apie 10 %, trinties jėgoms – apie 15–20 %, mechaniniam inkaravimui – apie 70–75 % sukibimo jėgos.

Minėti trys pagrindiniai reiškiniai apibūdina armatūros ir betono sąveikos procesą. Dabar galime tiksliau apibrėžti *sukibimo įtempį* (angl. *bond stress*) sąvoką: sukibimo įtempiais vadinsime vidutinę adhezijos, trinties ir mechaninio inkaravimo jėgų, tenkančių strypo paviršiaus ploto vienetui, projekcijas į strypo išilginę ašį. Pažymėtina, kad rumbuotosios armatūros atveju strypo ir betono sąlyčio paviršiuje susidaro ne tik lygiagrečiai su strypo ašimi veikiančios jėgos, bet atsiranda ir statmenos krypties jėgos, turinčios gana aiškią analogiją su vidiniu slėgiu į betoną. Toliau *sukibimo įtempį* sąvoka bus taikoma tik lygiagrečiai su strypo ašimi susidarantiems įtempiams apibūdinti.

Sukibimo įtempių susidarymo procesui nusakyti dar kartą panagrinėkime 10.1 pav. pateiktą ištraukimo bandymą. Strypas iš betono bus traukiamas skirtingo dydžio jėgomis: vienu atveju jėga P_1 , kitu – P_2 (10.2 pav.). Jėgų reikšmės parinktos taip, kad $P_1 \ll P_2$. Neinkaruotos armatūros dalies deformacijos abiem atvejais gali būti nesunkiai apskaičiuotos remiantis klasikinėmis medžiagų mechanikos formulėmis:

$$\varepsilon_{s1,\max} = \frac{P_1}{A_s E_s}, \quad (10.9)$$

$$\varepsilon_{s2,\max} = \frac{P_2}{A_s E_s}, \quad (10.10)$$

čia A_s ir E_s – plieninės armatūros skerspjūvio plotas ir tamprumo modulis.

Detaliau panagrinėkime pirmąjį atvejį, kai strypas veikiamas jėgos P_1 . Betono deformacija ties laisvuju betono kubelio kraštu yra lygi nuliui, nes nėra paviršiaus apkrovos: $\varepsilon_{c1} = 0$. Apkrovus betone esantį strypą, prasideda *įtempių perdavimo* (angl. *stress transfer*) reiškinys, kurio metu strypas palaipsniui perduoda tempimo jėgą betonui. Būtina *įtempių perdavimo* sąlyga – santykinis betono ir armatūros deformacijų (atitinkamai ε_{c1} ir ε_s) skirtumas, susidarantis pradedant nuo laisvojo kubelio krašto

(10.2 pav., a). Dėl betono ir armatūros deformacijų skirtumo armatūra praslysta betono atžvilgiu. Šis reiškinys vadinamas *slinktimi* (angl. *slip*). Būtina pabrėžti, kad įtempių perdavimo reiškinys gelžbetoninėse konstrukcijose vyksta dėl betono ir armatūros sąlyčio paviršiuje susidarančių sukibimo įtempių. Jie susidaro tik tuomet, kai atsiranda santykinis poslinkių skirtumas arba, kitaip tariant, *slinktis* tarp armatūros ir betono.

Pažymėtina, kad dėl cheminės sukibimo dedamosios slinkties susidaro ir esant nedidelėms apkrovoms. Šiuo atveju gaunamos tamprios slinkties reikšmės. Veikiant nedidelei jėgai P_1 , armatūros strypas perduoda tempimo įtempius betonui tol, kol jų deformacijos tampa lygios: $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{c1, \max}$. Gelžbetoninio elemento ilgis, reikalingas šiai sąlygai patenkinti, vadinamas *įtempių perdavimo ilgiu* (angl. *transfer length*). Įtempių perdavimo ilgį pažymėkime l_1 (10.2 pav., a). Pirmuoju atveju tik šiame ruože susidaro slinktis ir veikia sukibimo įtempiai $\tau(x)$. (10.2 pav. dėl schemos aiškumo armatūros ir betono deformacijos atidėtos skirtingu masteliu).

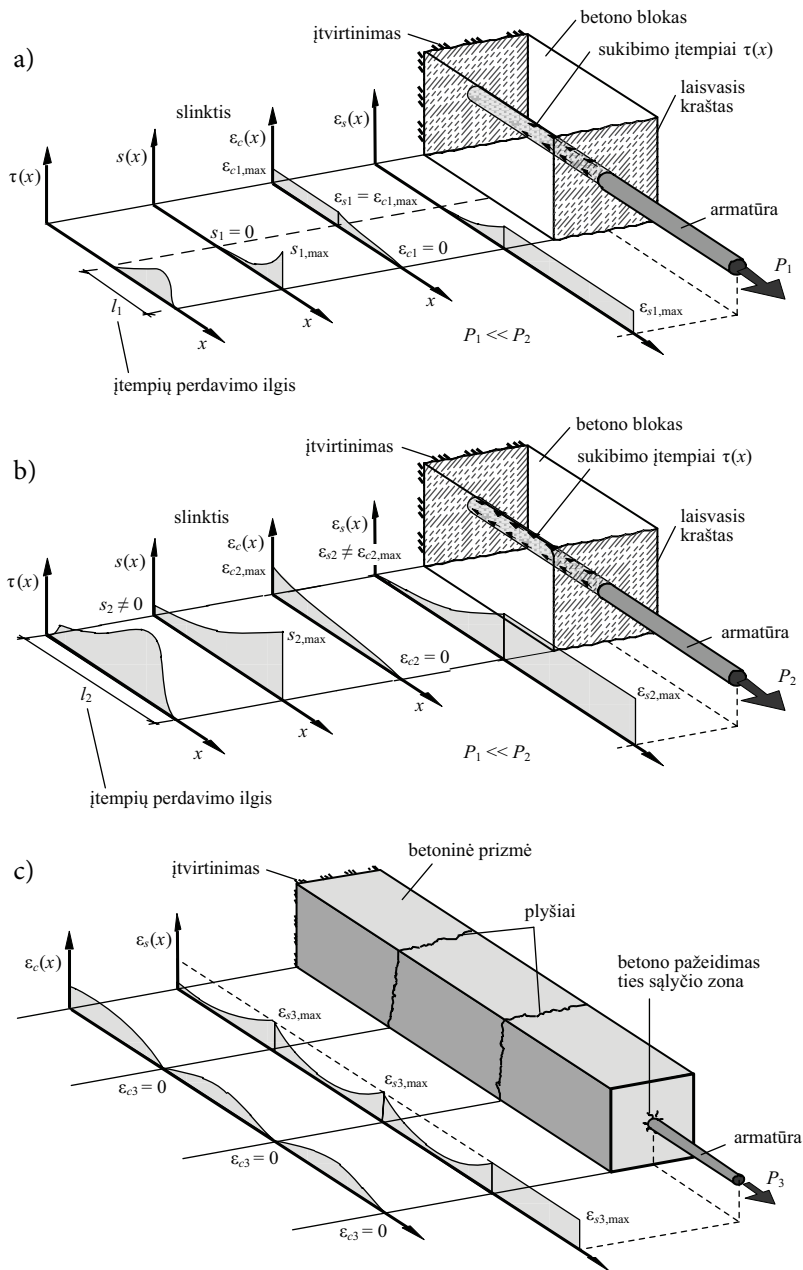
Kai strypą veikia daug didesnė jėga P_2 , slinktis susidaro per visą strypo inkaravimo ilgį. Šiuo atveju betono atžvilgiu juda visas armatūros strypas, todėl atsiranda strypo laisvojo galo poslinkis $s_2 \neq 0$ (10.2 pav., b). Sukibimo įtempiai taip pat veikia per visą strypo inkaravimo ilgį l_2 . Dėl įtempių perdavimo reiškinio deformacija betone nuolat auga. Jei įtempių perdavimo ilgis yra pakankamas, kad betone susidarytų pleišėjimo deformacija ε_{cr} , staiga atsiveria normalinis plyšys ir įrašos persiskirsto. Plyšio vietoje visą tempimo jėgą vėl atlaiko armatūra, o įtempiai betone tampa lygūs nuliui. Tokiu būdu, kai tempiamas ilgas gelžbetoninis elementas, jis supleišėja į atskirus blokus, kaip parodyta 10.2 pav., c. Atstumas tarp šių blokų skiriančių plyšių priklauso nuo betono ir armatūros sukibimo įtempių dydžio: kuo didesni sukibimo įtempiai, tuo trumpesnis tampa bloko ilgis.

Slinktis yra vienas svarbiausių parametru, apibūdinančių armatūros ir betono sąveiką. Slinktis, kaip ir poslinkis, yra integralinis dydis, gaunamas sumuojant santykinį betono ir armatūros deformacijų skirtumą tam tikro ilgio ruože:

$$s(x) = \int_0^x [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] dx, \quad (10.11)$$

čia $\varepsilon_s(x)$ ir $\varepsilon_c(x)$ – atitinkamai armatūros ir tempiamojo betono deformacijų funkcijos. Ruožuose, kuriuose šios deformacijos sutampa, slinktis lygi nuliui.

Aptariant įtempių perdavimo reiškinį minėta, kad slinktis yra būtina sukibimo įtempių atsiradimo sąlyga. Didėjant slinkčiai, iki tam tikros ribos didėja ir sukibimo įtempiai. Šis procesas detalčiau nagrinėjamas kitame knygos poskyryje. Verta paminėti vieną svarbų reiškinį: ties laisvuju kubelio kraštu slinktis pasiekia maksimalią reikšmę, tačiau sukibimo įtempiai $\tau(x)$ yra lygūs nuliui (10.2 pav., a ir b). Šis reiškinys paaiškinamas tuo, kad pažeidžiamas ties laisvuju kraštu esantis betonas ir sukibimo įtempiai fiziškai pasireikšti negali. Betono pažeidimo zonos ilgis paprastai imamas 2–5 $\varnothing$ matuojant nuo laisvojo krašto (čia $\varnothing$ – armatūros skersmuo).



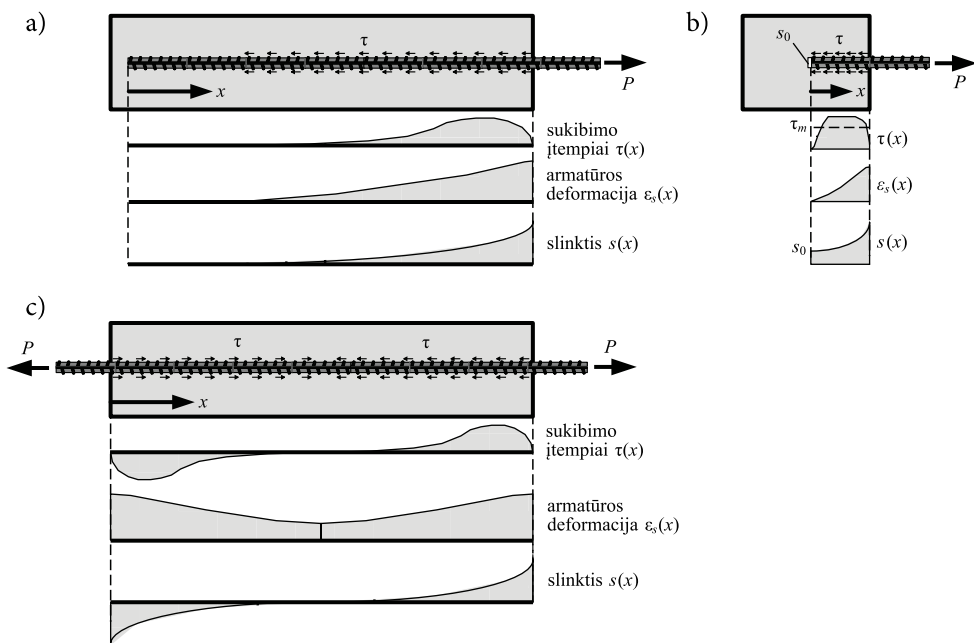
10.2 pav. Slinkties ir sukibimo įtempių susidarymas: a – veikiant nedidelei jėgai P_1 ; b – veikiant daug didesnei jėgai P_2 ; c – tempiamojo gelžbetoninio elemento pleišėjimas

Armatūros ir betono sąveika apibūdinama sukibimo įtempių ir slinkties diagrama ($\tau-s$), panašiai kaip medžiagų fizikiniai modeliai apibūdinami įtempių ir deformacijų ($\sigma-\varepsilon$) diagramomis. Sukibimo įtempių ir slinkties diagramos praktikoje visada nustatomos eksperimentiškai, todėl kitame poskyryje aptariami armatūros ir betono sąveikai analizuoti taikomi eksperimentiniai tyrimų metodai.

10.4. Eksperimentiniai sukibimo tyrimai

Eksperimentiniams armatūros ir betono sąveikos tyrimams dažniausiai naudojamos dvi bandinių grupės: trumpo ir ilgo inkaravimo ilgio bandiniai (10.3 pav., a ir b). Sukibimo įtempių ir slinkties priklausomybės gali būti eksperimentiškai nustatomos ir konstrukciniams elementams, pavyzdžiui, už armatūros strypo galų centriškai tempiant gelžbetoninį elementą, kaip parodyta 10.3 pav., c.

Dažniausiai sukibimo įtempių ir slinkties priklausomybės nustatomos naudojant trumpo inkaravimo ilgio bandinius, kai įbetonuotoji strypo dalis neviršija 3–5 $\varnothing$ (čia $\varnothing$ – armatūros skersmuo). Tokiu atveju galima teigti, kad sukibimo įtempiai per visą inkaravimo ilgį yra pasiskirstę tolygiai (10.3 pav., b). Trumpo inkaravimo ilgio strypuose visuomet susidaro laisvojo armatūros galo (t. y. neapkrautojo) slinktis, todėl įmanoma eksperimentais nustatyti tam tikrą laisvojo galo slinkties ir vidutinių

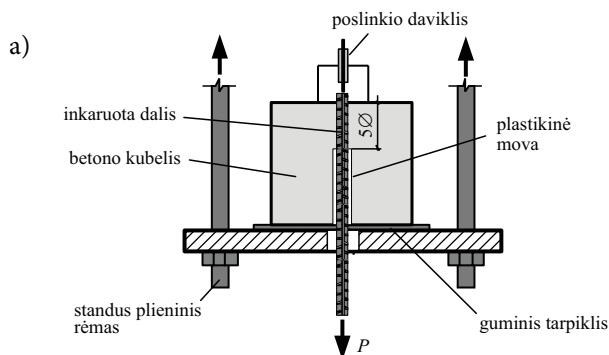


10.3 pav. Sukibimo įtempių ir slinkties priklausomybėms nustatyti taikomi bandiniai: a – ilgo inkaravimo ilgio bandinys; b – trumpo inkaravimo ilgio bandinys; c – tempiamasis gelžbetoninis elementas

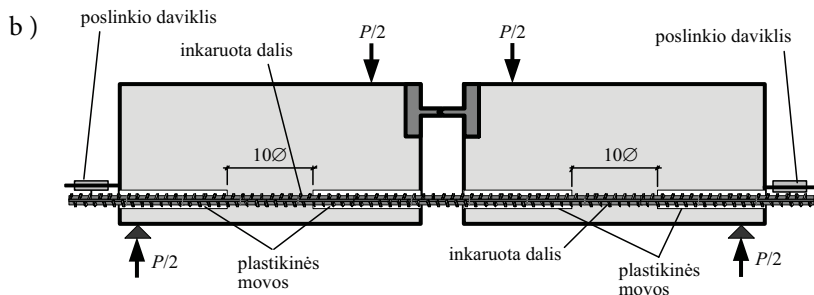
sukibimo įtempių τ - s funkciją. Vidutiniai sukibimo įtempiai tokiu atveju apskaičiuojami veikiančią apkrovą dalijant iš armatūros ir betono sąlyčio paviršiaus ploto. Tokiu būdu gaunamas *vietinio sukibimo dėsnis* (angl. *local bond-slip law*), nusakantis ryšį tarp susidarančios slinkties ir vidutinių sukibimo įtempių trumpame strypo inkaravimo ilgio ruože.

Bandant ilgo inkaravimo strypus, įbetonuotoji strypo dalis yra apie 20–40 $\varnothing$ arba dar didesnė, ir laisvojo armatūros galo poslinkis neatsiranda. Per visą strypo inkaravimo ilgį sukibimo įtempiai pasiskirsto netolygiai ir todėl negalima taikyti vidutinių sukibimo įtempių prielaidos. Šiuo atveju ant plieninių arba kompozitinių armatūros strypų tvirtinami deformacijų jutikliai (dažnai prapjaunant, o paskui vėl suklįjuojant strypą, tokiu būdu išvengiant daviklių įtakos sąlyčio zonai). Eksperimentiškai nustatius deformacijų kitimą strype, galima apskaičiuoti slinkties ir sukibimo įtempių pasiskirstymą, nes šiuos tris dydžius sieja unikalūs ryšys, aptartas knygos 4.5.5 skyrelyje, nagrinėjant sukibimo įtempių pasiskirstymą plieninėje fibroje. Analogiškai sukibimo įtempių pasiskirstymas gali būti nustatytas centriškai tempiant gelžbetonines prizmes už armatūros galų. Šiuo atveju papildomai gaunama papildoma informacija apie elemento pleišėjimą: atstumai tarp plyšių, plyšio pločio ir apkrovos priklausomybė.

Trumpo inkaravimo ilgio bandiniams yra standartizuoti du pagrindiniai vidutinių sukibimo įtempių ir slinkties priklausomybės nustatymo metodai (10.4 pav.): ištraukimo ir sijos bandymai. Toliau detaliau aptariamas kiekvienas šių metodų.



10.4 pav. Bandymo schemas, taikomos vidutinių sukibimo įtempių ir slinkties priklausomybėms nustatyti: a – ištraukimo bandymas; b – sijos bandymas



Dėl savo paprastumo ir efektyvumo, ypač siekiant palyginti skirtingų armatūros strypų sukibimą su betonu, plačiausiai taikomas ištraukimo bandymas (angl. *pull-out test*). Kita vertus, šis bandymo metodas turi kelis esminius trūkumus: visų pirma betone neišvengiamai susidaro gniuždymo įtempių dėl betoninio kubelio rėmimosi į plieninį rėmą. Šis įtempių būvis varžo skersinių mikroplyšių susidarymą ir gaunami didesni nei realūs konstrukcijoje veikiantys sukibimo įtempiai. Norint minimizuoti šį efektą, inkaruota strypo dalis perkeliama toliau nuo atraminės reakcijos (10.4 pav., a). Antras trūkumas tas, kad kubeliui remiantis į plieninį rėmą, dėl trinties jėgų yra varžomos skersinės betono deformacijos, taip pat padidinančios gaunamus sukibimo įtempius (analogiškai kaip dėl trinties su preso plokštėmis padidėja gniuždomųjų kubelių stipris). Trinties efektui sumažinti naudojamos lengvai skersine kryptimi besideformuojantys guminiai tarpikliai (10.4 pav., a).

Atliekant ištraukimo bandymą, betono ir armatūros sąlyčio zonoje veikiantys vidutiniai sukibimo įtempiai apskaičiuojami veikiančią jėgą dalijant iš armatūros paviršiaus ploto:

$$\tau_m = \frac{P}{\pi \cdot \varnothing \cdot l}, \quad (10.12)$$

čia P – ištraukimo jėgos reikšmė; $\varnothing$ – armatūros strypo skersmuo; l – sukibusios su betonu strypo dalies ilgis.

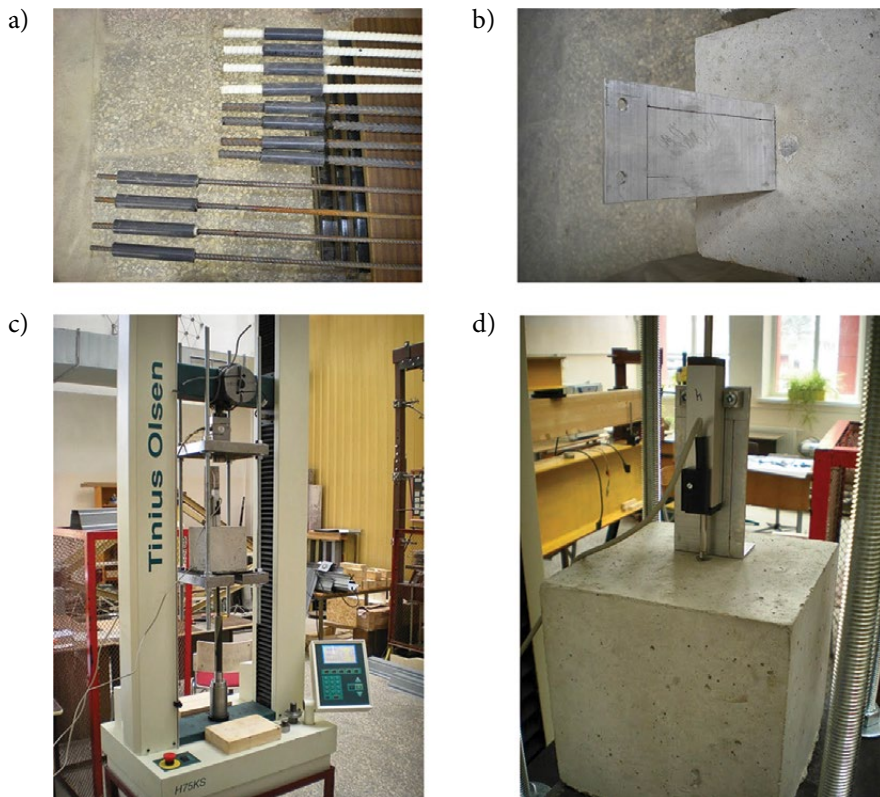
Žinant vidutinius sukibimo įtempius ir išmatavus armatūros laisvojo galo poslinkį, galima sudaryti sukibimo įtempių ir slinkties funkciją (vietinio sukibimo dėsnį). Ištraukimo bandymo schema ir naudojama įranga pateikta 10.5 pav.

Kokybiškai kitoks yra lenkiamosios sijos bandymo metodas (angl. *beam test*). Pagrindinis šio bandymo pranašumas tas, kad bandinyje sukuriama toks įtempių būvis, kai tiek armatūra, tiek aplinkui esantis betonas yra tempiami. Išvengiama gniuždymo ir trinties jėgų įtakos, tokiu būdu atspindint realią konstrukcinių elementų elgseną. Sijos bandymo metu taikomas $10\varnothing$ inkaravimo ilgis, jį atitraukiant nuo koncentruotų apkrovų ir atraminių reakcijų veikimo zonos (10.4 pav., b). Pagrindiniai šio bandymo metodo trūkumai yra sudėtingas bandinių paruošimas, o gaunami rezultatai atspindi ne tik vietinę armatūros ir betono sąveiką, bet ir viso konstrukcinio elemento elgseną. Be to, standartizuotas $10\varnothing$ strypo inkaravimo ilgis jau kelia abejonių dėl tolygaus sukibimo įtempių pasiskirstymo prielaidos.

Vidutiniai sukibimo įtempiai, atliekant sijos bandymą, apskaičiuojami remiantis jėgų pusiausvyros schema, pateikta 10.6 pav. Kai sija apkraunama simetriškai, atraminė reakcija yra lygi pusei apkrovos reikšmės: $F_a = P / 2$. Užrašę jėgų pusiausvyros lygtis apie tašką A , gauname:

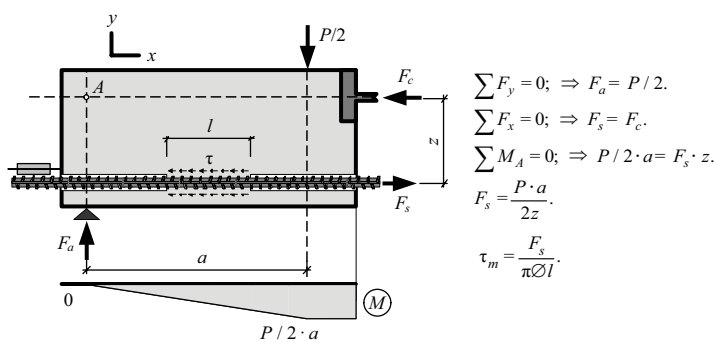
$$\frac{P}{2} \cdot a = F_s \cdot z \Rightarrow F_s = \frac{P \cdot a}{2z}, \quad (10.13)$$

čia F_s – armatūroje veikianti jėga; a – atstumas nuo koncentruotos apkrovos iki atraminės zonos centro; z – vidaus jėgų petys viduriniame sijos pjūvyje.



10.5 pav. Ištraukimo bandymas: a – armatūros strypų ruošiniai; b – aliumininiai kampuočiai, pritvirtinti šalia laisvojo armatūros galo; c – ištraukimo bandymas tempimo mašinoje; d – laisvojo galo poslinkio matavimas skaitmeniniu poslinkių jutikliu (angl. LVDT)

10.6 pav. Vidutinių sukibimo įtempių nustatymas atliekant lenkimo bandymą



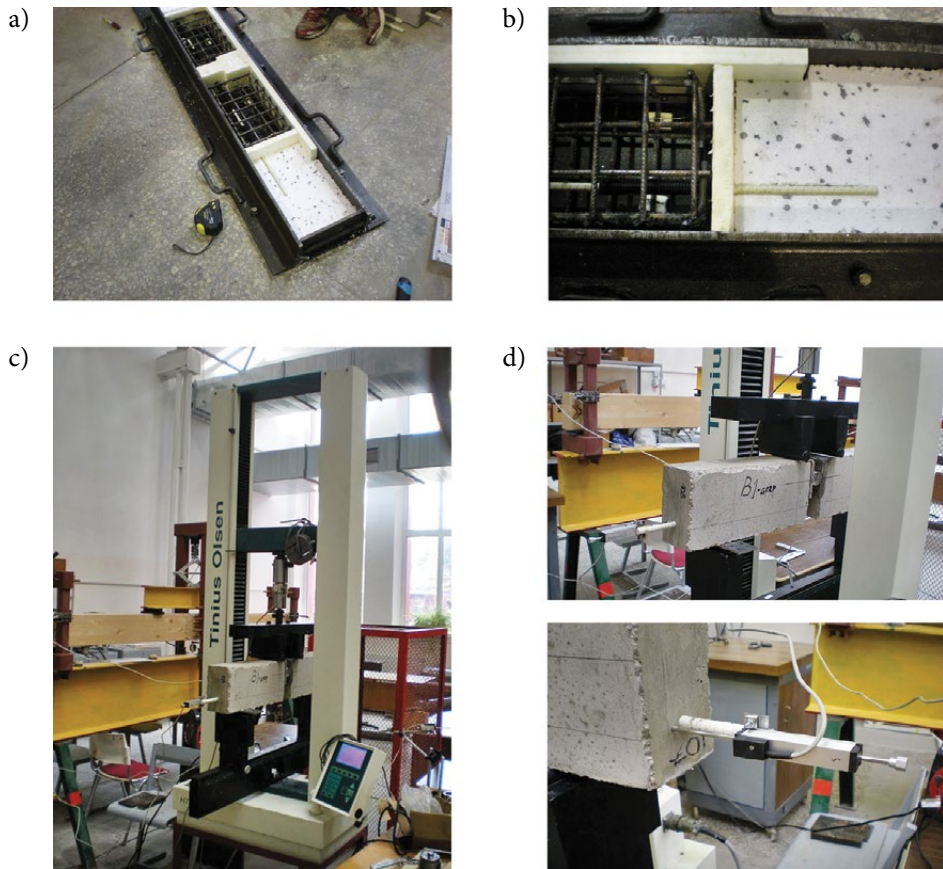
Turint jėgos armatūroje reikšmę, galima apskaičiuoti vidutinius sukibimo įtempius:

$$\tau_m = \frac{F_s}{\pi \cdot \varnothing \cdot l}, \quad (10.14)$$

čia $\varnothing$ – armatūros strypo skersmuo; l – sukibusios su betonu strypo dalies ilgis.

Apskaičiavus vidutinius sukibimo įtempius ir išmatavus armatūros laisvojo galo poslinkį, sudaroma sukibimo įtempių ir slinkties funkcija. Sijos bandymo schema ir įrangos išdėstymas parodyti 10.7 pav.

Nepaisant minėtų trūkumų, abu bandymo metodai yra plačiai taikomi armatūros strypų vidutinių sukibimo įtempių ir slinkties priklausomybei nustatyti. Ištraukimo bandymas yra tinkamesnis, palyginti skirtingų veiksnių įtaką sukibimui, o sijos bandymas tinkamesnis siekiant gautą sukibimo įtempių ir slinkties dėsnį pritaikyti visos konstrukcijos modeliavimui. Toliau, remiantis slinkties ir susidarančių sukibimo įtempių priklausomybėmis, aptariamos sukibimo įtempių perdavimo stadijos.



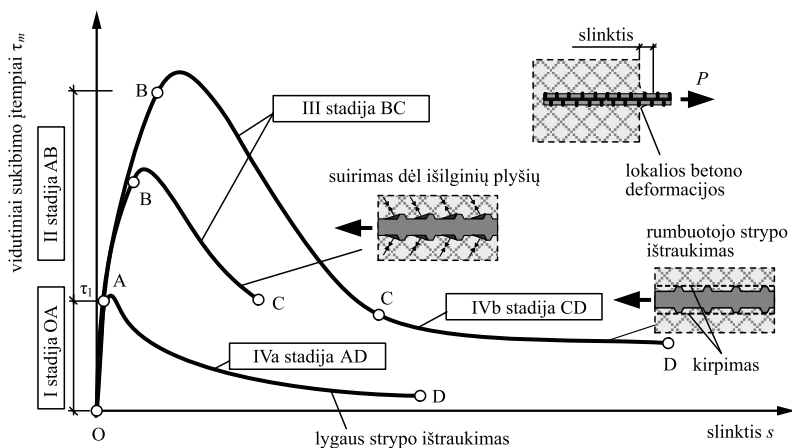
10.7 pav. Betono ir armatūros sukibimo tyrimai atliekant sijos bandymą: a – klojinio ruošimas prieš betonuojant; b – virintinis armatūros strypynas ir sukibties eliminavimas plastikiniu vamzdeliu; c – bendrasis bandymo vaizdas; d – laisvojo galo poslinkio matavimas skaitmeniniu poslinkių jutikliu

10.5. Sukibimo įtempių perdavimo stadijos

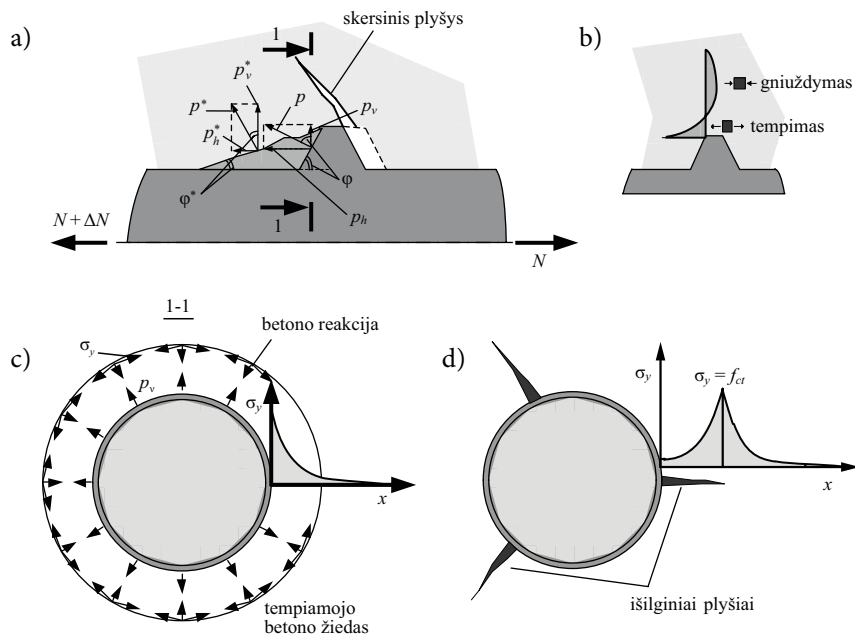
Visame pasaulyje atlikti eksperimentiniai sukibimo tyrimai parodė, kad egzistuoja keturios charakteringos armatūros ir betono sukibimo įtempių perdavimo stadijos (10.8 pav.).

Pirmoji stadija apima nedideles sukibimo įtempių reikšmes $\tau \leq \tau_1$ (paprastai $0,2\text{--}0,8 f_{ct}$). Šioje stadijoje didžiausią įtaką turi cheminio sukibimo dedamoji, todėl apkrovos ir slinkties diagrama yra artima tiesinei (OA dalis). Sukibimo įtempiams nedidelę įtaką turi ir mikromechaninis inkaravimas, susidarantis tarp cemento matricos ir armatūros paviršiaus nelygumų. Vis dėlto, kaip rodo lygių strypų ištraukimo eksperimentiniai tyrimai, šis veiksnys nėra labai reikšmingas. Lygiuose armatūros strypuose, suardžius cheminius sukibimo ryšius, iš karto prasideda palaipsninis armatūros ištraukimas ir pereinama į ketvirtąją stadiją, kurioje ištraukimui priešinasi tik trinties jėgos (IVa stadija, dalis AD). Rumbuotosios armatūros atveju pirmojoje stadijoje ties rumbų viršūnėmis susidaro didelės įtempių koncentracijos, tačiau cemento matrica dar nepleišėja (10.9 pav., b).

Slinkties reikšmės pirmojoje stadijoje yra nedidelės, nes kol nesuardomi cheminiai ryšiai, išlaikoma armatūros ir betono sąlyčio zonos deformacijų darna. Slinktis pirmojoje stadijoje paaiškinama tuo, kad susidaro lokalsios betono šlyties deformacijos sąlyčio zonoje ir skerspjūvis tampa nebe plokščias (10.8 pav.). Slinktis matuojama ne sąlyčio zonoje, o imant tam tikrą nutolusį betono atskaitos tašką. Kai kurie tyrėjai siūlo slinktį apskaičiuoti tik kaip tempiamosios armatūros pailgėjimą betone arba ignoruojant tempiamojo betono deformacijas. K. Maekawa (2003) pabrėžia, kad apskritai neegzistuoja toks fizikinis reiškiny, kaip santykinis armatūros ir betono praslydimas sąlyčio zonoje. Bet kuriuo atveju eksperimentinėje praktikoje priimta slinktį matuoti ne ties sąlyčio zona, o tam tikru atstumu nuo jos.



10.8 pav. Sukibimo įtempių perdavimo stadijos



10.9 pav. Skersinių ir išilginių plyšių susidarymas: a – skersinio mikroplyšio atsivėrimas ties rumbelio viršūne; b – įtempių pasiskirstymas ties rumbu pirmosios stadijos pabaigoje; c – tempiamojo betono žiedo susidarymas aplink armatūros strypą; d – išilginių plyšių atsivėrimas

Antrojoje stadijoje, didėjant apkrovos reikšmei, suardomi cheminiai sukibimo ryšiai ir prasideda pirmasis cemento matricos mikropleišėjimas. Ties armatūros rumbais susidaro didelės atraminės reakcijos į betoną p (10.9 pav., a) ir ties rumbų viršūnėmis pradeda vertis pasvirę skersiniai (kartais vadinami *antriniais*) mikroplyšiai (angl. *transverse microcracks* arba *secondary cracks*). Skersinių vidinių plyšių susidarymą pirmasis eksperimentiškai parodė Y. Goto (1971), todėl jie dažnai dar vadinami Goto plyšiais.

Susidaranti rumbelio reakcija p yra statmena rumbelio plokštumai, sudarančiai kampą φ su strypo ašimi. Atitinkamai jėgą p galima išskaidyti į vertikaliją ir horizontaliją projekcijomis: $p_v = p \cdot \cos\varphi$; $p_h = p \cdot \cos(90 - \varphi)$. Iš šių dedamųjų tik horizontalioji p_h veikia kaip sukibimo jėga, besipriešinanti strypo ištraukimui (prisiminkime sukibimo įtempių apibrėžimą). Vertikalioji projekcija p_v veikia kaip nuo strypo į išorę nukreipta jėga ir yra atlaikoma aplink esančio betono. Dėl vertikaliosios jėgos p_v , poveikio betone susidaro žiediniai tempimo įtempiai σ_y , kaip parodyta 10.9 pav., c. Šiems įtempiams viršijus betono tempiamąjį stiprį, pradeda vertis išilginiai mikroplyšiai (angl. *splitting cracks*). Vertikalioji rumbelio atraminės reakcijos dedamoji p_v turi neigiamą efektą, nes veikia kaip vidinis slėgis į betoną ir, susidarius išilginiams plyšiams, betonas, esantis šalia armatūros strypo, pažeidžiamas. Ši proble-

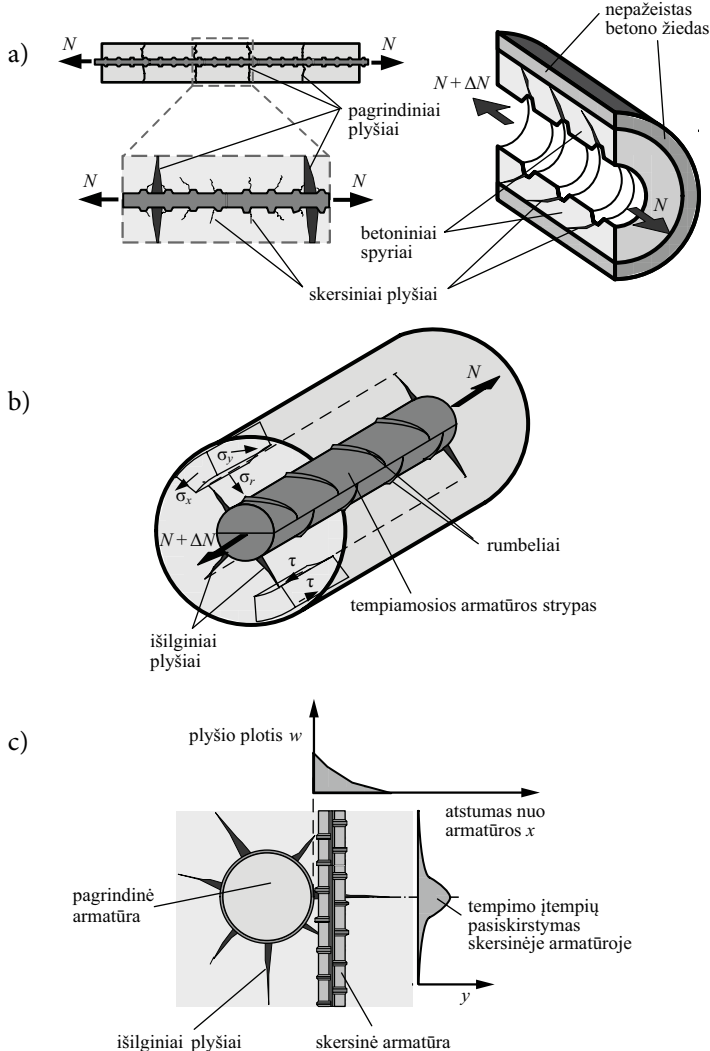
ma neišsprendžiama rumbelio kampą padarius statmeną strypo ašiai (t. y. $\varphi = 90^\circ$ ir $p_v = p \cdot \cos 90 = 0$), nes didėjant slinkčiai priešais rumbelį susiformuoja pasviręs suglemžtos cemento matricos sluoksnis. Tokiu būdu pasikeičia atraminės reakcijos kampas iš buvusio φ į naują φ^* (10.9 pav., a). Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad šio kampo reikšmė yra $30 \leq \varphi^* < 45^\circ$, todėl armatūros rumbelių posvyrio kampas turi būti $\varphi > 30$. Armatūros strypuose su mažesniu rumbelių posvyrio kampu nebelieka efektyvaus mechaninio inkaravimo dedamosios ir jie kur kas blogiau sukimba su betonu. Jėgos perdavimo posvyrio kampo pasikeitimas iš φ į φ^* sumažina horizontaliosios dedamosios p_h dydį ir padidina vertikaliosią komponentę p_v . Dėl šio efekto pradeda greičiau plisti išilginiai mikroplyšiai. Antrojoje stadijoje dėl atsiveriančių skersinių ir išilginių mikroplyšių sukibimo įtempimų ir slinkties diagrama įgauna netiesinį pobūdį (žr. AB dalį, 10.8 pav.).

Trečiojoje stadijoje pasiekiami maksimalūs sukibimo įtempiai $\tau \approx (1-3)f_{cr}$. Šioje stadijoje intensyviai plinta skersiniai ir išilginiai mikroplyšiai, o sukibimo įtempius praktiškai sudaro tik mechaninė sukibimo dedamoji – rumbelių reakcija į betoną. Stipriai padidėjus skersiniams plyšiams, susidaro atskirti pasvirę betoniniai spyriai, kurie iš vienos pusės remiasi į armatūros rumbelius, o iš kitos pusės – į nepažeistą betono žiedą (10.10 pav., a). Didėjant slinkčiai, atraminė rumbelių reakcija iš pradinės p pereina į p^* , kartu dėl vertikaliosios dedamosios p_v^* poveikio stipriai padidėja vidinis slėgis į betoną. Kaip minėta, šis tariamas vidinis slėgis sukelia žiedinius tempimo įtempius σ_y betone (10.10 pav., b), kuriems viršijus betono tempiamąjį stiprį, pradeda vertis išilginiai plyšiai (pradedant nuo armatūros paviršiaus). Esant pakankamam betono apsauginiam sluoksniui (paprastai $c \geq 5\varnothing$, čia $\varnothing$ – armatūros skersmuo), išilginiai plyšiai susidaro betono viduje ir į paviršių neprasisverbia. Esant mažam betono apsauginiam sluoksniui ($c < 5\varnothing$), išilginiai plyšiai dažnai pasiekia išorinį betono sluoksnį, pažeidžiamas išorinis betono žiedas ir staigiai sumažėja sukibimo įtempiai. Tokiu atveju trečiojoje sukibimo įtempių perdavimo stadijoje įvyksta suirimas dėl išilginių plyšių poveikio (10.8 pav.).

Išilginių plyšių atsivėrimą veiksmingai suvaržo skersinė armatūra. Skersine kryptimi stipriai armuotuose elementuose, išilginiams plyšiams net ir pasiekus betono paviršių, gelžbetoninis elementas gali atlaikyti augančią išorinę apkrovą. Išilginio plyšio vietoje tempimo įtempius perima skersinė armatūra, kaip schemiškai parodyta 10.10 pav., c.

Įtempių būvis ir išilginių plyšių plitimas trečiojoje apkrovos stadijoje pateiktas 10.10 pav., b. Čia τ – šlyties įtempiai betone; σ_r – radialinė betono reakcija į tariamą vidinį slėgį (į jėgos projekciją p_v); σ_y – žiediniai tempimo įtempiai betone; σ_x – tempiamosios armatūros perduodami išilginiai įtempiai betone. Įtempiams σ_x pasiekus betono tempiamąjį stiprį, atsiveria įprasti normaliniai, dažnai vadinami pagrindiniais, plyšiai. Būtent šių plyšių atsivėrimo plotį reglamentuoja inžinerinėje praktikoje

taikomos projektavimo normos. Išilginių plyšių atsivėrimas, nors ir dažnas reiškinys gelžbetoninėse konstrukcijose (ypač sijose su mažu apsauginiu sluoksniu ir užleistinėse sandūrose), projektavimo normų nereglamentuojamas. Dėl sudėtingos fizikinės prigimties išilginius plyšius skaičiuoti yra gana keblu ir paprastai siūloma riboti išilginių plyšių atsivėrimą konstrukcinėmis priemonėmis: parenkant reikiamą apsauginį betono sluoksnį, skersinės armatūros išdėstymo žingsnį, užleistinės sandūros ilgį, betono ir armatūros klasę ir t. t.



10.10 pav. Trečioji gelžbetoninių elementų įtempių perdavimo stadija: a – skersinių plyšių plitimas; b – įtempių būvis ir išilginių plyšių plitimas; c – išilginių plyšių suvaržymas skersine armatūra

Atsveriant tiek antriniams, tiek išilginiams, tiek pagrindiniams plyšiams, betono tempimo įtempiai perduodami per plyšį, kitaip tariant, egzistuoja tam tikra liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybė (angl. *tension softening*). Šis reiškinys iš esmės paaiškinamas tuo, kad stambesni betono užpildai kerta atsiveriantį plyšį ir perduoda tempimo įtempius iš vienos plyšio plokštumos į kitą. Schemiškai toks įtempių pasiskirstymas išilginiame plyšyje parodytas 10.9 pav., d, kur tam tikra tempimo įtempių σ_y dalis perduodama per plyšio plokštumą.

Ketvirtoji stadija lygiuose armatūros strypuose prasideda iš karto po cheminio ryšio suardymo. Sukibimo įtempius sudaro tik trinties dedamoji, kuri labiausiai priklauso nuo šoninio slėgio į betoną. Betono traukumas turi teigiamą įtaką trintčiai, nes apspaudžia armatūros strypą. Trintį taip pat padidina armatūros paviršiaus šiurkštumas. Didėjant slinkčiai dėl paviršių dėvėjimosi trinties dedamoji mažėja, kol strypas visiškai ištraukiamas. Panašus paviršių nusidėvėjimo procesas vyksta ir kai gelžbetoninis elementas veikiamas ciklinės apkrovos – sukibimo įtempių reikšmė po kelių apkrovos ciklų pastebimai sumažėja. Kai kurie autoriai siūlo ciklinės apkrovos veikiamų elementų sukibimo įtempius sumažinti keturis kartus, lyginant su vienkartinio apkrovimu (Muttoni, Ruiz 2007).

Rumbuotuosiuose armatūros strypuose ketvirtojoje stadijoje pasikeičia jėgos perdavimo pobūdis: pasvirę betoniniai spyriai nukerpami ties paviršiumi, einančiu per rumbelių viršūnes. Šią stadiją nulemia betono kerpamasis stipris, kuris apytiksliai yra lygus $f_{cs} \approx 2f_{ct}$. Dabar galime pagrįsti LST EN 1992-1-1:2005 siūlomą vidutinių sukibimo įtempių skaičiavimo formulę (10.8), kurioje matomas aiškus ryšys su ketvirtąja sukibimo įtempių perdavimo stadija. Nukirpus betono paviršių tarp rumbelių, ištraukimo jėgai toliau priešinasi tik trintis tarp betono paviršių. Trinties jėgos reikšmė, kartu ir sukibimo įtempiai išlieka pastovūs ($\tau \approx 0,15-0,3f_{ct}$) net ir esant didelėms slinkties reikšmėms ($s \approx 5-20$ mm). Kai armatūros slinktis tampa lygi atstumui tarp rumbelių, besitrinantys betoniniai paviršiai nugludinami ir sukibimo įtempiai pradeda greitai mažėti – vyksta suirimas ištraukiant strypą.

Atkreiptinas dėmesys į tai, kad, skaičiuojant gelžbetoninių konstrukcijų tinkamumo ribinį būvį (įlinkius ir plyšio plotį), praktiškai svarbios yra tik nedidelės slinkties reikšmės $s \approx 0,1-0,3$ mm. Ši reikšmė susijusi su plyšio pločio ribojimu, kuris gali būti apskaičiuotas kaip armatūros slinktis iš abiejų plyšio pusių:

$$w \approx 2s. \quad (10.15)$$

Projektavimo praktikoje priimtinos ribinės plyšio pločio reikšmės nustatomos atsižvelgiant į konstrukcijos tipą ir aplinkos agresyvumo klasę. LST EN 1992-1-1:2005 leidžiamosios gelžbetoninių konstrukcijų didžiausiojo plyšio pločio reikšmės yra 0,2–0,4 mm. Tikrinant saugos ribinius būvius (inkaravimo ilgį, elementų laikomąją galią), priimtoms slinkties reikšmės gali būti kur kas didesnės.

10.6. Armatūros ir betono sąveiką apibūdinantys veiksniai

Betono ir armatūros sukibimo elgseną lemia įvairūs veiksniai ir parametrai, kuriuos galima susieti su viena iš penkių grupių: 1) armatūra; 2) betonas; 3) įtempių būvis armatūroje ir betone; 4) technologiniai veiksniai; 5) konstrukciniai veiksniai.

Armatūros tipas ir forma turi didžiausią įtaką jos sukibimui su betonu. Kaip minėta ankstesniajame poskyryje, rumbuotosios armatūros perduodami sukibimo įtempiai gali būti net kelis kartus didesni nei lygių strypų. Plieninės rumbuotosios armatūros geometrija per ilgą jos naudojimo laikotarpį jau yra optimizuota, atsižvelgiant į gamybos sudėtingumą, mechaninį sukibimą su betonu ir ilgalaikę eksploataciją. Paprastai naudojami apskritojo skerspjūvio armatūros strypai, kurių geometrija kontroliuojama keturiais parametrais: strypo skersmeniu $\varnothing$, rumbelio aukščiu h , rumbelių žingsniu s_R , rumbelio posvyrio kampas θ . Rumbelio aukštis h sudaro 0,04–0,05 armatūros strypo skersmens $\varnothing$. Rumbelių žingsnis s_R turi būti vienodas per visą strypo ilgį ir neturi viršyti 70 % armatūros skersmens $\varnothing$. Rumbelio posvyrio kampas θ strypo ašies atžvilgiu turi būti ne mažesnis kaip 45° (10.11 pav.). Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad rumbelio posvyrio kampas θ yra kitas dydis nei prieš tai nagrinėtas rumbelio nuolydis $\phi \geq 30^\circ$ (10.11 pav.).

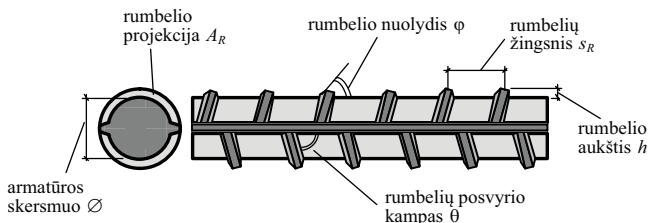
Rumbuotųjų strypų geometrijai apibūdinti taikomas *sukibimo indeksas* (angl. *bond index*):

$$f_r = \frac{A_r}{\pi \cdot \varnothing \cdot s_R}, \quad (10.16)$$

čia A_r – plotas, kurį sudaro rumbelio projekcija į strypo skerspjūvį (perimetrą); $\varnothing$ – armatūros strypo skersmuo; s_R – rumbelių žingsnis.

Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad rumbuotųjų armatūros strypų sukibimas su betonu yra praktiškai vienodas, kai naudojamas tas pats sukibimo indeksas. Iš ilgalaikių tyrimų ir realių gelžbetoninių konstrukcijų eksploatacijos nustatytos optimalios sukibimo indekso reikšmės plieninei armatūrai yra $f_r = 0,05$ – $0,1$.

Optimalus kompozitinės armatūros sukibimo indeksas iki šiol nėra nustatytas dėl didelės tokios armatūros įvairovės ir skirtingos gamybos technologijos. Pažymėtina, kad kompozitinei armatūrai su rumbeliais paprastai taikoma ne mažesnė nei 0,1 sukibimo indekso reikšmė. Atskiri gamintojai pateikia rumbelių išdėstymo schemas konkrečiam kompozitinės armatūros tipui. Kompozitinės armatūros sąveika su betonu plačiau nagrinėjama 10.7 poskyryje.



10.11 pav. Rumbuotųjų armatūros strypų geometrija

Betono kokybė – antras svarbus veiksnys, lemiantis armatūros ir betono sukibimą. Iš aptartų armatūros ir betono sukibimo stadijų akivaizdu, kad suirimas gali prasidėti arba atsivėrus išilginiams plyšiams, arba nukirpus betoną tarp armatūros rumbelių. Pirmuoju atveju lemiamas veiksnys tampa betono tempiamasis stipris f_{ct} , antruoju – kerpamasis stipris f_{cs} . Abu šie dydžiai yra sunkiai eksperimentiškai nustatomi, todėl dažniausiai susiejami su gniuždomuoju betono stipriu f_c , taikant atitinkamas empirines priklausomybes. Kuo tankesnis ir stipresnis betonas, tuo geresnis bus armatūros ir betono sukibimas.

Įtempių būvis armatūroje ir betone taip pat turi įtakos sukibimui. Kai armatūra yra tempiama, jos pjūviuose susidaro išilginės deformacijos ε . Atitinkamai skersinės deformacijos:

$$\varepsilon_q = -\varepsilon \cdot \nu, \quad (10.17)$$

čia ν – medžiagos skersinės deformacijos (Puasono) koeficientas.

Dėl susidarančių skersinių deformacijų mažėja armatūros skersmuo. Skersmens sumažėjimą radialine kryptimi tam tikrame pjūvyje galima apskaičiuoti taip:

$$u_q = \varepsilon_q \cdot \varnothing, \quad (10.18)$$

čia $\varnothing$ – armatūros strypo skersmuo.

Dėl sumažėjusio armatūros skersmens gerokai sumažėja cheminė ir trinties sukibimo dedamosios, todėl lygūs armatūros strypai greitai praranda didžiąją dalį sukibimo jėgos. Šis efektas mažiau ryškėja rumbuotuosiuose strypuose dėl dominuojančio mechaninio inkaravimo dedamosios.

Kai armatūra yra gniuždoma, susidaro teigiamosios radialinės deformacijos ir sukibimas tampa geresnis. Šis efektas pasireiškia gaminant iš anksto įtemptus elementus: atleidus įtemptus lynus, jie sutrumpėja išilgine kryptimi ir prasiplečia radialine. Atitinkamai padidėja cheminė ir trinties sukibimo dedamosios, kurios šiuo atveju yra ypač svarbios, nes išankstinio įtempimo lynų paviršius paprastai yra lygus.

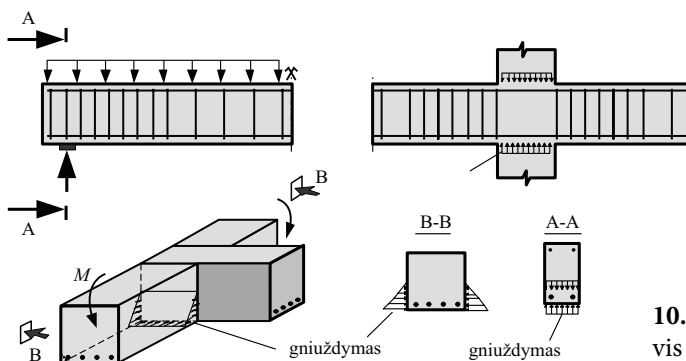
Dėl strypų deformavimosi skersine kryptimi atsiranda dar vienas svarbus veiksnys, turintis įtakos sukibimui – tai armatūros skersmuo $\varnothing$. Iš 10.18 formulės tampa akivaizdu, kad kuo didesnis armatūros skersmuo $\varnothing$, tuo didesnis bus radialinis poslinkis u_q esant tai pačiai skersinės deformacijos reikšmei ε_q . Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad didėjant armatūros skersmeniui, maksimalūs sukibimo įtempiai mažėja pagal tiesinį dėsnį. Prisiminkime skyriaus pradžioje nagrinėtą LST EN 1992-1-1:2005 siūlomą sukibimo įtempių apskaičiavimo formulę: didesnio skersmens strypams (kai $\varnothing > 32$ mm) įvestas koeficientas $\eta_2 = (132 - \varnothing) / 100 \leq 1$. Didėjant strypo skersmeniui, sukibimo įtempiai tiesiškai mažėja – tai patvirtina ir eksperimentiniai tyrimai.

Kai armatūra pasiekia takumo įtempius, sukibimo įtempiai staiga sumažėja praktiškai iki nulio. Tai nulemia didelės armatūros skersinės deformacijos, aplink armatūrą esančio betono pažeidimas ir tekėjimo metu pasikeitusi rumbelių geometrija.

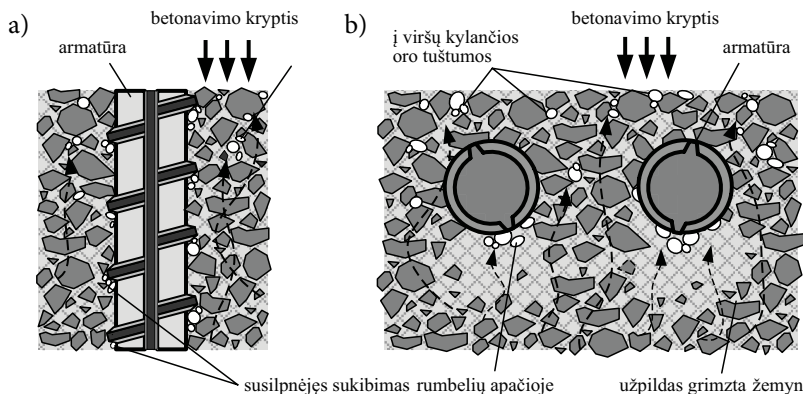
Armatūros išilginės deformacijos gali būti traktuojamos kaip tam tikras rodiklis, rodantis sąlyčio zonoje esančio betono pažeidimo laipsnį. Kuo didesnės šios deformacijos, tuo stipriau pažeidžiamas betonas ir blogesnė tampa sukibtis.

Armatūros ir betono sukibimui įtakos turi ir įtempių būvis betone. Sukibtis tampa geresnė tada, kai aplink armatūros strypą susidaro statmenosios krypties gniuždymo įtempiai. Gniuždomasis betonas sudaro papildomą slėgį į armatūrą ir riboja tiek skersinių, tiek išilginių mikroplyšių atsivėrimą. Pagerėja visos trys sukibimo dėdamosios: cheminė, mechaninė ir trinties. Dažniausiai gniuždymo įtempiai susidaro ties atraminėmis reakcijomis ir elementų sandūrose, kaip parodyta 10.12 pav. Papildomas betono slėgis į armatūrą vadinamas aktyviuoju suvaržymu (angl. *active confinement*), kuris riboja išilginių plyšių atsivėrimą. Pasyviuoju suvaržymu (angl. *passive confinement*) vadinamas aplink armatūrą esantis betono sluoksnis ir skersinės armatūros apkabos. Šie veiksniai taip pat suvaržo išilginių plyšių atsivėrimą.

Technologinių veiksnių įtaka sukibimui dažnai turi didesnę reikšmę negu įtempių būvis betone ir armatūroje. Arti betono paviršiaus esančių horizontalių armatūros strypų sukibtis būna kur kas prastesnė nei apatinių strypų. Kai betonuojant armatūros strypai yra vertikalioje padėtyje, blogesnė sukibtis gaunama, kai išorinė jėgos ir betonavimo kryptys sutampa, ir geresnė, kai jėga veikia priešinga kryptimi. Šie reiškiniai paaiškinami tuo, kad betonuojant sunkesnės užpildo dalelės leidžiasi žemyn, o susidariusios oro tuštumos kyla į viršų. Ties apatiniais horizontaliais strypais susikaupia kylančios oro tuštumos, dėl to labai pablogėja sukibimo kokybė (10.13 pav.). Tai ypač pastebima viršutinių strypų eilėse, todėl skaičiuojant inkaravimo ilgį pagal projektavimo normas dažnai naudojami „viršutinių strypų“ koeficientai. LST EN 1992-1-1:2005 normose šiam efektui įvertinti naudojamas koeficientas η_1 , kurio reikšmė yra $\eta_1 = 0,7$, kai skaičiuojamas viršutinių strypų inkaravimo ilgis (vadinamosios „blogos“ sukibimo sąlygos), kitais atvejais $\eta_1 = 1,0$ („geros“ sukibimo sąlygos). Tas pats efektas pasireiškia ir strypus betonuojant vertikaliai: apatinėje rumbelių dalyje kaupiasi oro tuštumos ir betonas prasčiau sutankėja. Strypą traukiant priešinga kryptimi negu vyko betonavimas, rumbeliai išsiremia į geriau sutankintą betoną ir tokiu būdu užtikrinama aukštesnė sukibimo kokybė.



10.12 pav. Betono įtempių būvis atramų ir sandūrų vietose



10.13 pav. Betonavimo krypties įtaka sukibimui: a – kai betonuojant strypai yra vertikalioje padėtyje; b – kai betonuojant strypai yra horizontalioje padėtyje

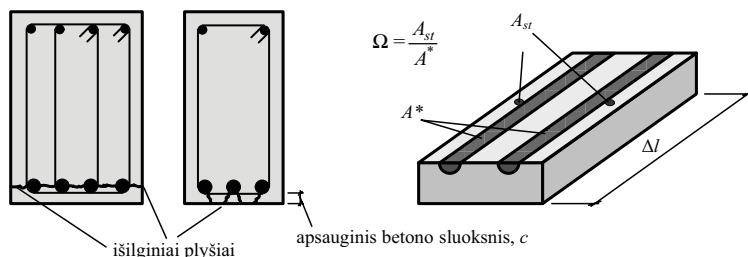
Prie technologinių veiksnių galima priskirti armatūros rūdijimą, koroziją ir temperatūros poveikį. Rūdymis vadinama plona geležies oksido plėvelė, susidaranti armatūros paviršiuje. Ji neturi didesnės įtakos armatūros ir betono sukibčiai, nes reakcija su atmosferoje esančiu deguonimi pasireiškia tik armatūros paviršiuje. Armatūros skerspjūvio pažeidimas yra labai nedidelis (nuo 0,008 iki 0,04 mm) ir strypo laikomajai galiai įtakos praktiškai neturi. Be to, plona geležies oksido plėvelė sulėtina gerokai pavojingesnę elektrocheminę armatūros koroziją.

Elektrocheminė korozija pradeda vykti tuomet, kai plienas sąveikauja su elektra laidžiu skysčiu. Šiuo atveju greičiau ardoma armatūra ir susidaro korozijos produktai: geležies oksidai ir hidroksidai. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad, esant nedidelėms armatūros korozijos reikšmėms (kai pažeidžiama 1–5 % skerspjūvio), sukibimo įtempiai padidėja, tačiau po to vyksta greita sukibimo degradacija. Sukibimo sustiprėjimas siejamas su tuo, kad susidaro plėtrūs korozijos produktai, kurie apspaudžia armatūrą ir padidina trintį. Armatūrai toliau koroduojant, šie plėtrūs produktai sukelia išilginių plyšių atsivėrimą, stipriai pažeidžiami rumbeliai, todėl sukibimas greitai blogėja.

Aukštų temperatūrų poveikis ($T > 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) turi neigiamą įtaką sukibimui daugiausia dėl to, kad sumažėja betono gniuždomasis, tempiamasis ir kerpamasis stipriai. Temperatūros įtakai jautresni yra lygūs strypai, o armatūros skersmuo pastebimos įtakos neturi.

Esant ypač žemoms temperatūroms ($T < -50\text{ }^{\circ}\text{C}$), sukibimo įtempiai gali padidėti 20–50 %, lyginant su konstrukcijomis, eksploatuojamomis kambario temperatūroje. Šis efektas pasireiškia todėl, kad žemoje temperatūroje padidėja betono gniuždomasis ir tempiamasis stipriai. Žinoma, statinių eksploatavimo praktikoje tokios žemos temperatūros yra ypač retos.

Konstrukciniai veiksniai. Apsauginis betono sluoksnis ir skersinės armatūros išdėstymas – du svarbiausi konstrukciniai veiksniai, turintys didelę įtaką sukibimui. Kaip minėta, šie veiksniai vadinami pasyviuoju armatūros suvaržymu, nes neleidžia vystytis išilginiams plyšiams. Kad išilginiai plyšiai neprasiskverbtų į konstrukcijos paviršių, turi būti užtikrintas ne mažesnis kaip $5\varnothing$ (čia $\varnothing$ – strypo skersmuo) betono apsauginis sluoksnis. Realiose konstrukcijose toks apsauginis sluoksnis taikomas retai, ir į paviršių dažnai išplinta išilginiai plyšiai, kaip parodyta 10.14 pav.



10.14 pav. Išilginis sijų pleišėjimas ir skersinio armavimo indeksas Ω

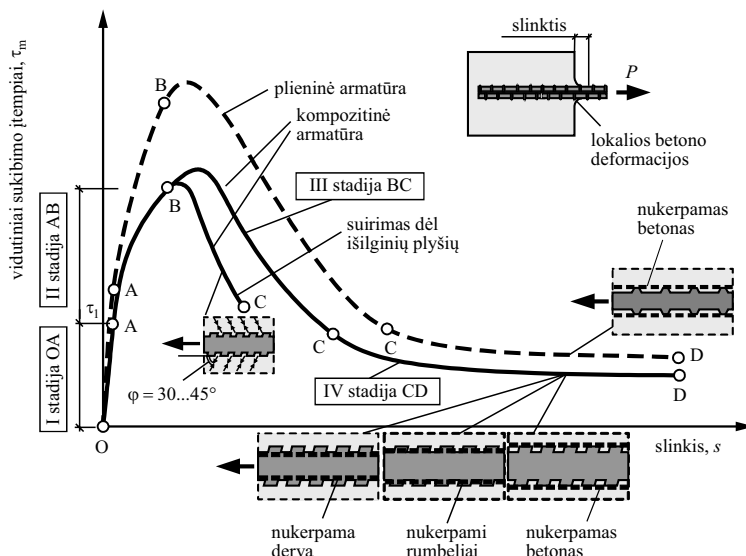
Skersinės armatūros apkabos kerta šiuos plyšius ir neleidžia jiems vystytis. Skersinių apkabų įtaka išilginių plyšių suvaržymui gali būti tiriama atliekant specialius eksperimentinius tyrimus, kuriais nustatomas reikiamas skersinio armavimo indeksas Ω . Jis parodo skersinės armatūros skerspjuvio ploto santykį su pagrindinės armatūros išilginio pjūvio plotu (10.14 pav.). Tyrimų rezultatai rodo, kad sijas armuojant pagal konstrukcinius LST EN 1992-1-1:2005 standarto reikalavimus, skersinio armavimo indeksas Ω sudaro nuo 0,02 iki 0,03 ir užtikrinamas pakankamas išilginių plyšių suvaržymas.

10.7. Kompozitinės armatūros sukibimo ypatumai

Kompozitinės armatūros sukibimo su betonu mechanikoje pasireiškia tie patys dėsniai kaip ir plieninės armatūros atveju, tačiau atsiranda tam tikrų ypatumų dėl skirtingų fizikinių ir mechaninių šių medžiagų savybių. Minėti skirtumai apima šiuos aspektus:

- Kompozitinės armatūros tamprumo modulis yra mažesnis nei plieninės tiek išilgine, tiek skersine kryptimis.
- Kompozitinės armatūros šlyties modulis yra mažesnis nei plieno.
- Polimerinės dervos šlyties (kerpamasis) stipris yra mažesnis nei plieno.
- Skiriasi kompozitinės medžiagos ir plieno temperatūrinio plėtimosi koeficientai.

Kaip ir plieninės armatūros atveju kompozitinės armatūros sukibimo stadijos geriausiai matomos panagrinėjus vidutinių sukibimo įtempių ir slinkties diagramą, kurią vėl suskirstysime į keturias charakteringas sukibimo įtempių perdavimo stadijas (10.15 pav.).



10.15 pav. Plieninės ir kompozitinės armatūros sukibimo įtempių perdavimo stadijos

Pirmojoje stadijoje (diagramos dalis OA) pasireiškia cheminė sukibimo dedamoji, todėl susidaro nedidelės slinkties reikšmės, o sukibimo įtempių ir slinkties priklausomybė yra artima tiesinei. Ši dalis mažai skiriasi nuo plieninės armatūros pirmosios sukibimo įtempių perdavimo stadijos, tik kompozitinės armatūros cheminio sukibimo reikšmė yra mažesnė. Pagrindinės to priežastys – polimerinių derų savybė atstumti vandenį (hidrofobiškumas) ir ypač lygus armatūros paviršius. Dėl šios priežasties lygūs kompozitinės armatūros strypai praktikoje nenaudojami. Dažnai strypų paviršius padengiamas smėliu. Šiuo atveju dėl nelygaus paviršiaus pagerėja cheminė ir mechaninė sukibimo dedamosios.

Antrojoje stadijoje (diagramos dalis AB) prasideda sąlyčio zonos mikropleišėjimas: ties armatūros rumbais atsiveria skersiniai mikroplyšiai, slinkties ir sukibimo įtempių diagrama įgyja netiesinį pobūdį, nes kompozitinė armatūra yra „minkštesnė“ ir kur kas lengviau suglemžiama, skersiniai mikroplyšiai ties rumbelių viršūnėmis susidaro vėliau nei plieninės armatūros atveju. Kai kurių tyrėjų manymu, šioje apkrovos stadijoje kompozitinė armatūra yra net efektyvesnė už plieninę.

Trečiojoje stadijoje (diagramos dalis BC) intensyviai auga skersiniai mikroplyšiai. Dėl didėjančios slinkties pasireiškia vidinis slėgis į betoną (analogiškai plieninei armatūrai), ir nuo armatūros paviršiaus pradeda plisti išilginiai plyšiai. Dėl mažesnio kompozitinės armatūros tamprumo modulio gaunamos didesnės išilginės deformacijos, kartu anksčiau ir intensyviau pasireiškia išilginis pleišėjimas. Kai nėra pakankamo aktyvaus arba pasyvaus armatūros suvaržymo, gali įvykti suirimas dėl išilginių plyšių. Jei išilginių plyšių plitimas pakankamai suvaržytas, trečiojoje apkrovos

stadijoje pasiekiami didžiausieji sukibimo įtempiai, kurie, toliau didėjant slinkčiai, palaipsniui mažėja dėl sąlyčio zonos pažeidimo ir pereinama į ketvirtąją sukibimo įtempių perdavimo stadiją.

Ketvirtojoje stadijoje išorinei jėgai priešinas tik trinties jėgos tarp armatūros ir betono. Naudojant plieninę armatūrą nukerpamas betono paviršius, esantis ties rumbelių viršūnėmis. Naudojant kompozitinę armatūrą ketvirtojoje stadijoje galimi tokie suirimo pobūdžiai:

- Nukerpama armatūros strypo derva. Sukibimo įtempių dydis tokiu atveju nepriklauso nuo betono stiprio, nes suirimas įvyksta pačioje armatūroje. Didinant betono klasę, suirimo įtempiai lieka tokie patys.
- Nukerpami armatūros rumbeliai. Šis reiškinys gali įvykti, kai kompozitinės armatūros rumbeliai yra nepakankamo pločio, per didelis rumbelių žingsnis arba naudojamas stiprus betonas.
- Nukerpamas tarp rumbelių esantis betonas. Šis suirimo pobūdis yra analogiškas plieninei armatūrai. Sukibimo įtempių dydis šiuo atveju priklauso nuo betono kerpamojo stiprio.
- Priklausomai nuo naudojamų medžiagų (betono ir armatūros) galimi ir tarpiniai suirimo variantai.

Ketvirtosios stadijos liekamieji sukibimo įtempiai τ_r (10.15 pav.) priklauso nuo nukirpto paviršiaus šiurkštumo. Kai nukerpamas betonas, įtempiai τ_r gaunami panašūs kaip ir plieninei armatūrai. Kitais atvejais liekamieji įtempiai kompozitinėje armatūroje yra mažesni.

Plieninės armatūros atveju išskirtos penkios pagrindinės sukibimą apibūdinančių veiksnių grupės: 1) armatūros savybės; 2) betono savybės; 3) įtempių būvis betone ir armatūroje; 4) technologiniai veiksniai; 5) konstrukciniai veiksniai. Naudojant kompozitinę armatūrą šis suskirstymas taip pat galioja, tačiau atsiranda tam tikrų ypatumų dėl skirtingų fizikinių ir mechaninių plieninės ir kompozitinės armatūros savybių. Toliau aptariami šie būdingi kompozitinės armatūros sukibties ypatumai.

10.7.1. Skerspjūvio forma

Kompozitinės armatūros skerspjūvis nebūtinai yra apskritasis. Kartais gaminami stačiakampiai, lakštiniai arba vamzdiniai strypai. Dėl tokios formos padidėja strypo paviršiaus plotas, kartu pagerėja ir visos trys sukibimo dedamosios. Kita vertus, briaunos formos strypai sukelia didesnę vidinę slėgį kontakto paviršiuje, todėl greičiau atsiveria išilginiai plyšiai ir sukibimo įtempiai sparčiai mažėja. Vis dėlto statybos pramonėje dažniausiai naudojami apskritojo skerspjūvio polimerinės armatūros strypai, specialiai padengiant arba kitaip apdirbant jų paviršius.

10.7.2. Paviršiaus tipas

Kaip minėta, lygių kompozitinės armatūros strypų cheminė sukibtis su betonu yra labai silpna dėl polimerinių dervų hidrofobiškumo ir ypač lygaus paviršiaus. Dėl

šių aspektų paviršius specialiai apdirbamas: deformuojama paviršiaus derva, suformuojami rumbeliai, klijuojamas papildomas spiralinis pluoštas, strypai padengiami smėliu. Nedideli paviršiaus nelygumai (pvz., smėlio dalelės) yra labai efektyvūs esant mažoms slinkties reikšmėms (I–II stadija). Aukštesnėse apkrovos stadijose skersinė strypo deformacija tampa pakankamai didelė, ir strypas su nedideliais paviršiaus nelygumais gali staiga prarasti sukibtį. Siekiant šito išvengti, kompozitinė armatūra gaminama rumbuotoji. Kai rumbelio aukštis h yra ne mažesnis kaip 5,4 % strypo skersmens $\varnothing$, užtikrinama gera mechaninis sukibtis visose apkrovimo stadijose.

Rumbelių plotis ir išdėstymo žingsnis nėra standartizuoti, nes priklauso nuo konkretaus kompozitinės armatūros tipo. Dėl mažo polimerinės dervos kerpamojo stiprio rumbelių plotis visuomet yra daug didesnis nei plieninės armatūros. Kaip ir plieninės armatūros, rumbelių formą ir išdėstymą apibūdina sukibimo indeksas (10.16 formulė). Remdamiesi eksperimentinių tyrimų rezultatais, konkrečių sukibimo indekso reikšmę savo produkcijai nustato kompozitinės armatūros gamintojai. Pažymėtina, kad strypas su aukštais ir tankiais rumbeliais bus gerai sukibęs su betonu ir gerai priešinsis ištraukimui. Kita vertus, aukšti ir tankūs rumbeliai sukelia didelį vidinį slėgį ir išilginį pleišėjimą. Todėl realiose konstrukcijose susidarius išilginiams plyšiams, tokie strypai gali būti mažiau efektyvūs nei strypai, turintys mažesnę sukibimo indeksą.

Išilginių plyšių susidarymui įtakos turi ir strypo tamprumo modulis. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad mažėjant strypų tamprumo moduliui, išilginis pleišėjimas pasireiškia anksčiau, todėl maksimalūs sukibimo įtempiai mažėja. Šį reiškinį galima paaiškinti tuo, kad esant tai pačiai apkrovos reikšmei, mažiau standžiuose strypuose susidaro didesnės išilginės deformacijos ir slinktis. Dėl didesnės slinkties padidėja vidinis slėgis į betoną, anksčiau susidaro išilginiai plyšiai. Be to, didesnė strypo išilginė deformacija sukelia proporcingai didesnes skersines strypo deformacijas (10.18 formulė). Šis efektas taip pat neigiamai veikia sukibimą. Pavyzdžiui, plačiausiai konstrukcijoms naudojamos stiklo pluošto armatūros tamprumo modulis E_f yra 40–60 GPa, o plieninės armatūros – 200–210 GPa. Esant tai pačiai apkrovos reikšmei, stiklo pluošto armatūros išilginės ir skersinės deformacijos bus 4–5 kartus didesnės nei plieninės.

10.7.3. Skersinis suvaržymas

Skersinis slėgis, sukeliantis gniuždymo įtempius betone, turi teigiamą įtaką tiek plieninės, tiek kompozitinės armatūros sukibimui. Eksperimentiškai nustatyta, kad kompozitinei armatūrai šis poveikis yra mažiau reikšmingas nei plieninės armatūros atveju. Tai paaiškinama tuo, kad polimerinės armatūros tamprumo modulis skersinė kryptimi yra mažesnis negu plieno, ir apspaudimo energija išsklaidoma strypui deformuojantis. Priešingai, kai išorinis slėgis sukelia tempimo įtempius betone (dažniausiai elementų jungčių vietose dėl lenkiamojo momento poveikio, 10.12 pav.), sukibimas pastebimai silpnėja.

10.7.4. Skersinės deformacijos koeficientas

Polimerinės armatūros skersinių deformacijų (Puasono) koeficientas yra maždaug toks pat kaip ir plieno ($\nu = 0,27-0,3$). Kaip minėta, esant tam pačiam apkrovimo lygiui, polimerinės armatūros išilginės deformacijos bus tiek kartų didesnės, kiek kartų mažesnis jos tamprumo modulis lyginant su plienu. Atitinkamai kompozitinėje armatūroje susidaro ir didesnės skersinės deformacijos (10.18 formulė), dėl to mažėja strypo skersmuo ir blogėja sukibtis. Kita vertus, skersinės deformacijos turi teigiamą įtaką sukibimui gaminant iš anksto įtemptus elementus: atleidus įtemptus strypus, dėl įtempių nuostolių strypai trumpėja, didėja jų skersmuo, o tai padidina visas tris sukibimo dedamąsias.

10.7.5. Temperatūrinio plėtimosi koeficientas

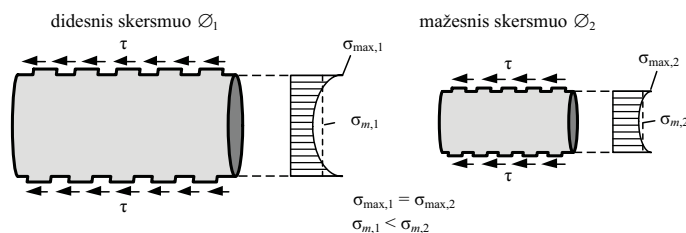
Plieno ir betono temperatūrinio plėtimosi koeficientai yra maždaug vienodi ($\alpha \approx 10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), todėl kintančios temperatūros poveikis sukibimui įtakos praktiškai neturi. Kompozitinės armatūros temperatūrinio plėtimosi koeficientas išilgine pluoštui kryptimi priklauso nuo pluošto tipo ir sudaro: $\alpha_{fL} \approx 1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (anglies pluošto), $\alpha_{fL} \approx 10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (stiklo pluošto), $\alpha_{fL} \approx -4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (aramido pluošto). Atkreiptinas dėmesys į neigiamą temperatūrinio plėtimosi koeficiento reikšmę aramido pluoštui, plačiau pluoštų savybės aptariamos aštuntajame knygos skyriuje. Sukibimui didesnę įtaką turi temperatūrinio plėtimosi koeficientas skersine pluoštui kryptimi, kuris daugiausia priklauso nuo armatūros gamyboje naudojamos dervos mišinio. Kompozitinės armatūros skersinis temperatūrinio plėtimosi koeficientas gali būti 5–8 kartus didesnis nei betono. Kylant temperatūrai, kompozitinė armatūra sukelia daug didesnę vidinę slėgį į betoną negu plieninė, todėl greičiau atsiveria išilginiai plyšiai. Kita vertus, polimerinė armatūra yra lengviau suglemžiama ir pati sugeria dalį plėtimosi energijos. Skersinis temperatūrinis plėtimasis taip pat gali būti kompensuotas skersinių deformacijų dėl Puasono efekto, kuris kompozitinei armatūrai turi didelę reikšmę.

10.7.6. Apsauginis betono sluoksnis

Apsauginis betono sluoksnis veikia kaip pasyvus armatūros suvaržymas, neleidžiantis išilginiams plyšiams pasiekti konstrukcijos paviršiaus. Apsauginio betono sluoksnio storis paprastai nustatomas atsižvelgiant į aplinkos agresyvumo klasę ir atsparumo gaisrui reikalavimus, nes kompozitinė armatūra yra daug atsparesnė aplinkos poveikiams, apsauginis betono sluoksnis paprastai nustatomas iš atsparumo gaisrui reikalavimų. Išilginių plyšių susidarymo atžvilgiu kompozitinei armatūrai dėl jos elgsenos ypatumų trečiojoje apkrovimo stadijoje reikalingas didesnis apsauginis betono sluoksnis. Norint užtikrinti, kad išilginiai plyšiai nepasiektų konstrukcijos paviršiaus, paprastai reikalaujama ne mažesnio kaip 4–5Ø (čia Ø – armatūros skersmuo) apsauginio betono sluoksnio.

10.7.7. Strypo skersmuo

Bandymo rezultatai rodo, kad didėjant armatūros skersmeniui, gaunami vis mažesni sukibimo įtempiai. Šis efektas yra dar labiau pastebimas kompozitinėje armatūroje. Pagrindinė to priežastis – armatūros skersinės deformacijos (10.17 ir 10.18 formules). Kompozitinėje armatūroje atsiranda ir papildomas efektas, turintis įtakos didesnio skersmens strypų sukibimui. Polimerinių strypų šlyties modulis yra daug mažesnis negu plieno ir daugiausia priklauso nuo naudojamos dervos savybių. Kai toks strypas yra veikiamas tempimo jėgos, mažas šlyties modulis lemia netolygų normalinių įtempių pasiskirstymą strypo skerspjūvyje, kaip parodyta 10.16 pav.



10.16 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas tempiamajame kompozitiniame strype

Sukibimo įtempiai τ yra tiesiogiai proporcingi normaliniams įtempiams strype $\sigma_{\max}$, kurie susidaro betono ir armatūros sąlyčio zonoje. Kita vertus, apskaičiuoti „tikrieji“ sukibimo įtempiai (kuriuos randame dalydami strype veikiančią jėgą iš strypo paviršiaus ploto) yra proporcingi vidutiniams įtempiams strype σ_m . Didėjant strypo skersmeniui, skirtumas tarp maksimalių normalinių įtempių $\sigma_{\max}$ ir vidutinių σ_m taip pat didėja, kaip schemiškai parodyta 10.16 pav. Apskaičiuoti „tikrieji“ sukibimo įtempiai didesnio skersmens strypuose yra mažesni, nors fiziškai įtempiai $\sigma_{\max}$ didelio ir mažo skersmens strype bus vienodi (šis efektas tarptautinėje literatūroje anglų kalba vadinamas *shear lag effect*). Plieniniuose armatūros strypuose šis efektas yra nedidelis dėl didelio plieno šlyties modulio.

10.7.8. Betono stipris

Betono stipris turi tiesioginę įtaką sukibimo įtempiams ketvirtojoje apkrovos stadijoje, kai vyksta betono kirpimas. Kompozitiniams strypams betono stiprio įtaka yra reikšminga tik iki tam tikros betono stiprio ribos (apie 30–40 MPa). Kai naudojamas stipresnis betonas, kirpimas vyksta per polimerinę dervą arba rumbelius, todėl didinant betono stiprį sukibimo įtempiai nebedidėja. Kita vertus, stipresnis betonas visada turi teigiamą įtaką išilginių plyšių suvaržymui, todėl pagerėja elgsenos efektyvumas antrojoje ir trečiojoje apkrovimo stadijose.

10.8. Armatūros inkaravimo ilgio apskaičiavimas

Kaip minėta skyriaus pradžioje, apkrova armuoto betono konstrukcijoms perduodama tiesiogiai betonui, o jame atsiradę įtempiai dėl tarpusavio sąveikos perduodami armatūrai. Šiems įtempiams perduoti reikalingas tam tikras betono ir armatūros sąveikos ruožas. Žinant armatūros tempiamąjį stiprį ir sąveikos su betonu dėsnį, galima apskaičiuoti tokį šio ruožo ilgį, kuriame armatūros stipris būtų iki galo išnaudotas. Armutojo betono mechanikoje šio sąveikos ruožo ilgis vadinamas *inkaravimo ilgiu*.

Iš ankstesnių skyrių matyti, kad betono ir armatūros sąveika yra gana sudėtingas cheminis, fizikinis ir mechaninis reiškiny, apimantis įvairias sukibimo įtempių peravimo stadijas, armatūros slinktį betono atžvilgiu, vidinį pleišėjimą ir kitus efektus. Šiuo metu pasaulyje nėra sukurta universalus, medžiagų savybėmis pagrįsto modelio, galinčio tiksliai aprašyti betono ir armatūros sąveiką, esant bet kokiam armatūros tipui ir išdėstymui betone. Nesant vieningos nuomonės dėl betono ir armatūros sąveikos ypatumų, projektavimo praktikoje taikomose normose armatūros ir betono sąveika yra supaprastinama iki klausimo *pakankamas* ar *nepakankamas* yra armatūros inkaravimo ilgis, vengiant sudėtingų slinkties ir sukibimo įtempių priklausomybių. Nekreipdami dėmesio į sukibimo įtempių pasiskirstymą, slinkties dydį ir išilginį pleišėjimą, statybos inžinieriai dažniausiai tiesiog parenka reikiamą armatūros inkaravimo ilgį Daugeliu atvejų tai priimtina, nes sudėtingos ir komplikotos formulės, viena vertus, yra imlios laiko atžvilgiu, kita vertus, sutaupytos medžiagų sąnaudos gali būti nereikšmingos vertinant visos konstrukcijos mastu. Kita vertus, klausimo supaprastinimas iki *taip* arba *ne* neleidžia projektuotojui kontroliuoti realios armatūros ir betono sąveikos, t. y. slinkties dydžio, įtempių perdavimo, išilginio pleišėjimo ir kitų procesų. Kai kurių šalių tarptautinės mokslo organizacijos, atsakingos už projektavimo normų rengimą, ateityje numato spręsti šį klausimą išplečiant ir tobulinant dabartinių projektavimo normų supaprastintuosius skaičiavimo metodus. Ateityje ilgus metus kurti ir tobulinti projektavimo normų etalonai gali keistis ta linkme, kad bus taikomi universalūs fizikiniais dėsniais paremti modeliai, o ne empirinės formulės, išvestos apdorojus konkrečių parametrų eksperimentinių duomenų imtį. Iš dalies ši tendencija jau pastebima konstrukcijoms projektuoti taikant baigtinių elementų metodą.

Projektavimo normose taikomos matematinės išraiškos gerai tinka, kai projektuojami nesudėtingi elementai iš standartinių, seniai eksploatuojamų medžiagų. Gelžbetoninių konstrukcijų atveju tai yra normalaus stiprio betonas (paprastai tariama, kad gniuždomasis stipris $f_c \leq 50$ MPa) ir plieninė armatūra. Per daugelį eksploatacijos dešimtmečių ir gausių laboratorinių tyrimų šių medžiagų sąveika yra gana gerai ištirta ir realizuota empirinėse formulėse. Kita vertus, empirinės formulės turi esminį trūkumą: jos pritaikytos konkrečioms skaičiavimo atvejams ir negali būti tiesiogiai taikomos inovatyvių medžiagų ar konstrukcijų elgsenai prognozuoti. Kaip

pavyzdį galima paminėti neplieninę armatūrą. Nors kompozitinė armatūra statyboje naudojama jau nuo 9-ojo dešimtmečio, iki šiol nėra standartizuota nei šios armatūros gamyba, nei konstrukcijų projektavimas. Panaši situacija yra ir su plieno plaušu armuotu betonu, didelio ir ypač didelio stiprio betonais ir kitomis statyboje plačiai naudojamomis inovatyviomis medžiagomis.

Polimeriniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų skaičiavimo normų sukūrimą apsunkina ir tai, kad pasaulyje naudojami įvairių tipų ir savybių pluoštai (stiklo, anglies, aramido, bazalto), įvairios juos rišančios dervos (epoksidinė derva, silikonas, akrilinė derva, polipropilenas, poliamidas, polistirenas ir kt.), paviršiams padengti taikomi įvairūs technologiniai sprendimai (formuojami rumbeliai, paviršius padengiamas smėliu, apvyniojamas pluoštu spirale). Kaip buvo pastebėta nagrinėjant kompozitinės armatūros sukibimo ypatumus, net rumbų išdėstymas nėra standartizuotas, kaip plieninės armatūros atveju. Derinant įvairių tipų pluoštus su juos jungiančiomis dervomis ir parenkant norimą paviršiaus formą, galima gauti tūkstančius įvairių neplieninės armatūros atmainų, ir kiekvienos iš jų sąveika su betonu bus visiškai skirtinga. Dabartiniu metu konkrečios armatūros tipą optimizuoja gamintojas, remdamasis atliktais teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais.

Įvairių šalių projektavimo normose kompozitinės armatūros inkaravimo ilgio apskaičiavimo metodikose dažniausiai modifikuojamos formulės, skirtos plieniniais strypais armuotiems betoniniams elementams. Toks sprendimas priimtinas tuo požiūriu, kad plieninės armatūros inkaravimo ilgis yra gerai ištirtas ir gali būti traktuojamas kaip atskaitos taškas parenkant įvairių tipų kompozitinės armatūros inkaravimo ilgį. Žinant polimerinės armatūros sukibimo ypatumus ir turint gamintojo pateikiamas charakteristikas, galima nesunkiai įvertinti reikiamą inkaravimo ilgį modifikuojant standartines plieninės armatūros inkaravimo ilgio formules. Toliau knygoje apžvelgiamos LST EN 1992-1-1:2005 ir JAV Betono instituto ACI 318-11 projektavimo normų rekomendacijos parenkant plieninės armatūros inkaravimo ilgį.

Inkaravimo ilgio skaičiavimas pagal LST EN 1992-1-1:2005 normas

Lietuvos standarte LST EN 1992-1-1:2005 reglamentuotas inkaravimo ilgio apskaičiavimo metodas remiasi šiais supaprastinimais: nagrinėjant armatūros inkaravimą betone išskiriamos dvi situacijos – *pakankamas* ar *nepakankamas* inkaravimo ilgis. Jei inkaravimo ilgis yra *pakankamas*, tuomet konstrukcijoje neturėtų susidaryti per didelė armatūros slinktis, atsiveriančių plyšių plotis bus ne didesnis už ribinį ir armatūros stipris bus iki galo išnaudotas. Esant *nepakankamam* inkaravimo ilgiui, visi šie efektai gali pasireikšti ir paskatinti konstrukcijoje ribinio būvio (tiek stiprumo, tiek tinkamumo) atsiradimą.

LST EN 1992-1-1:2005 standarte pažymima, kad, esant būtinybei, turi būti įrengiama gulsčioji skersinė armatūra. Ankstesniuose skyriuose aptarę betono ir armatūros sukibimo mechaniką, galime konstatuoti, kad skersinė armatūra veikia kaip

pasyvus išilginės armatūros suvaržymas, neleidžiantis plėtotis išilginiams plyšiams. Taip pat eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad gelžbetoninius elementus skersine kryptimi armuojant pagal LST EN 1992-1-1:2005 reikalavimus, t. y. $\Omega = 0,02-0,03$ (čia Ω – skersinio armavimo indeksas, 10.14 pav.), užtikrinamas pakankamas išilginių plyšių suvaržymas.

Pagal LST EN 1992-1-1:2005 normų nuostatas tiesių strypų *pagrindinis inkaravimo ilgis* apskaičiuojamas iš pusiausvyros sąlygos, kad tempimo jėga strype turi būti lygi armatūros ir betono sąlyčio zonoje susidaranti sukibimo jėgai. Sukibimo jėga apskaičiuojama strypo paviršiaus plotą padauginus iš vidutinių sukibimo įtempių. Reikiamas inkaravimo ilgis išreiškiamas sulyginus jėgą strype su reakcija betone (sukibimo jėga), (taip pat žr. 10.1–10.8 formules):

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}, \quad (10.19)$$

čia $\emptyset$ – armatūros strypo skersmuo; f_{bd} – ribinių sukibimo įtempių skaičiuotinė reikšmė; σ_{sd} – armatūros strypo skaičiuotiniai įtempiai pjūvyje, kurio atžvilgiu nustatomas skaičiuojamas inkaravimo ilgis.

Formulė (10.19) palieka projektuotojui laisvę sumažinti strypo inkaravimo ilgį, jei jo stipris nėra iki galo išnaudojamas. Paprastai tariama, kad strypo skaičiuotiniai įtempiai yra lygūs plieno takumo ribai, t. y. $\sigma_{sd} = f_{yd}$. Ribiniai sukibimo įtempiai f_{bd} apskaičiuojami taip (taip pat žr. 10.8 formulę):

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \eta_2 f_{ctd}, \quad (10.20)$$

čia f_{ctd} – skaičiuotinis tempiamąjo betono stipris.

Koeficientai η_1 ir η_2 aptarti skyriaus pradžioje. Pirmasis iš jų įvertina sukibimo kokybę ir strypo padėtį betonuojant, antrasis – strypo skersmenį. Išsiaiškinę betono ir armatūros sukibimo mechaniką, galime pagrįsti jų fizikinę prasmę: blogesnis sukibimas gaunamas viršutiniuose strypuose dėl prastesnio betono sutankinimo ir vandens bei oro judėjimo į paviršių (žr. 10.6 poskyrį ir 10.13 pav.). Siūloma koeficiento η_1 reikšmė viršutinės eilės strypams yra 0,7. Kitaip tariant, sukibimo įtempiai sumažinami 30 %. Pasaulinėje praktikoje šis reiškinys vadinamas viršutinių strypų efektu (angl. *top-bar effect*). Koeficientu η_2 sumažinami didelio skersmens strypų sukibimo įtempiai. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad vidutiniai sukibimo įtempiai mažėja proporcingai didėjant strypo skersmeniui. Šis reiškinys susijęs su strypų skersinėmis deformacijomis (žr. 10.17 ir 10.18 formules), o kompozitinės armatūros strypuose ir su netolygiu normalinių įtempių pasiskirstymu strypo skerspjūvyje (10.16 pav.). Koeficientą η_2 siūloma imti $\eta_2 = 1$, kai strypo skersmuo $\emptyset \leq 32$ mm, ir $\eta_2 = (132 - \emptyset) / 100$, kai skersmuo $\emptyset > 32$ mm. Statybinėms konstrukcijoms dažniausiai naudojami armatūros strypai, kurių skersmuo $\emptyset < 40$ mm, todėl minimali koeficiento reikšmė $\eta_2 = (132 - 40) / 100 = 0,92$. Pažymėtina, kad koeficientas η_2 išvestas plieninei ar

matūrai. Jo taikymas polimerinės armatūros atveju reikalauja papildomų tyrimų, nes polimerinės armatūros ir betono sukibimo įtempiai yra jautresni strypo skersmeniui.

LST EN 1992-1-1:2005 standarte vartojama *skaičiuotinio inkaravimo ilgio* sąvoka l_{bd} :

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \leq l_{b,min} \quad (10.21)$$

Koeficientas α_1 įvertina geometrinę armatūros strypo formą. Kai inkaruojamas tiesus strypas, $\alpha_1 = 1$. Strypų su užlenktais galais, kai yra pakankamas betono apsauginis sluoksnis ($\geq 3\varnothing$), $\alpha_1 = 0,7$.

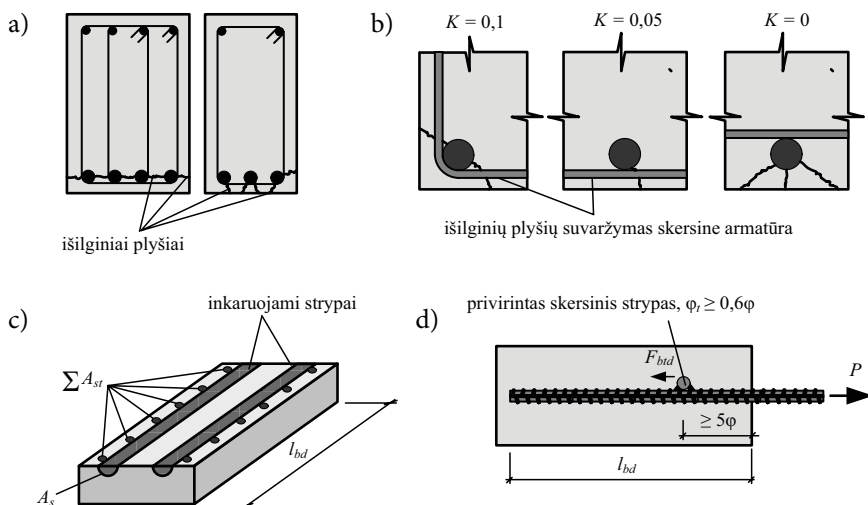
Koeficientas α_2 įvertina apsauginį betono sluoksnį c_d . Tiesių armatūros strypų: $\alpha_2 = 1 - 0,15(c_d - \varnothing) / \varnothing$ ir kinta nuo 0,7 iki 1,0. Kaip minėta nagrinėjant betono ir armatūros sukibimo mechaniką, išilginiai plyšiai neišplinta iki konstrukcijos paviršiaus, kai betono apsauginis sluoksnis c_d yra ne mažesnis kaip (3–5) $\varnothing$. Imdami $c_d = 3\varnothing$ gauname: $\alpha_2 = 1 - 0,15(3\varnothing - \varnothing) / \varnothing = 0,7$. Kitaip tariant, kai išilginių plyšių plitimas yra suvaržomas, strypo inkaravimo ilgis gali būti sumažintas 30 %.

Koeficientas α_3 įvertina skersinės armatūros įtaką sukibimui. Tiek skersinė armatūra, tiek apsauginis betono sluoksnis priskiriami prie pasyvaus armatūros strypo suvaržymo, kuris neleidžia vystytis išilginiams plyšiams (10.14 pav.). Skaitinė šio koeficiento reikšmė kinta nuo 0,7 iki 1,0 ir priklauso nuo skersinės armatūros kiekio ir išdėstymo. Koeficientas $\alpha_3 = 1 - K\lambda$. Skersinės armatūros kiekiui įvertinti naudojamas parametras $\lambda = (\Sigma A_{sw} - \Sigma A_{sw,min}) / A_s$, čia ΣA_{sw} – inkaravimo ilgiui l_{bd} tenkantis skersinės armatūros suminis skerspjuvio plotas; A_s – inkaruojamo išilginio armatūros strypo skerspjuvių plotas; $\Sigma A_{sw,min}$ – mažiausias skersinės armatūros suminis skerspjuvių plotas, imamas 0,25 A_s sijoms ir 0 plokštėms. Koeficientui λ apskaičiuoti reikalingi dydžiai pateikti 10.17 pav., c. Skersinės armatūros padėtį išilginių strypų atžvilgiu įvertina koeficientas K , kurio reikšmės: $K = 0,1$, kai skersinė armatūra gaubia kampinį išilginį strypą iš išorės; $K = 0,05$, kai skersinė armatūra gaubia tarpinį išilginį strypą iš išorės; $K = 0$, kai skersinė armatūra gaubia išilginį strypą iš vidaus. Pirmaisiais dviem atvejais skersinės armatūros strypai suvaržo išilginių plyšių atsivėrimą, trečiu atveju išilginiai plyšiai gali nevaržomai pasiekti konstrukcijos išorinį paviršių (10.17 pav., b).

Koeficientui α_3 apskaičiuoti panagrinėsime trumpą pavyzdį. Tarkime, reikia inkaruoti tarpinį $\varnothing = 20$ mm strypą ($A_s = 3,142$ cm²), kurio apskaičiuotasis inkaravimo ilgis $l_{bd} = 600$ mm. Skersinei armatūrai naudojami $\varnothing = 8$ mm strypai ($A_{st} = 0,503$ cm²), juos išdėstant 100 mm žingsniu išilginių strypų išorinėje pusėje. Tuomet koeficientas $K = 0,05$. Inkaravimo ilgiui tenkantis suminis skersinių strypų skerspjuvio plotas $\Sigma A_{sw} = 6 \times A_{sw} = 3,018$ cm². Mažiausias suminis skersinės armatūros skerspjuvių plotas sijoms: $\Sigma A_{sw,min} = 0,25 \times A_s = 0,786$ cm². Nagrinėjamos sijos parametras $\lambda = (3,018 - 0,786) / 3,142 = 0,710$. Tuomet koeficientas $\alpha_3 = 1 - K\lambda = 1 - 0,05 \times 0,710 = 0,96$. Parametro λ fizikinė prasmė yra panaši kaip ir anksčiau aptarto sker-

sinio armavimo indekso Ω (10.14 pav.) – tai skersinės armatūros skerspjūvio ploto santykis su išilginės armatūros skerspjūvio plotu. Tačiau parametras λ yra suminis, t. y. vertinamas inkaravimo ilgiui tenkantis visas skersinės armatūros skerspjūvio plotas. Nagrinėjamai sijai gautoji koeficiento reikšmė $\alpha_3 = 0,96$ reiškia, kad skaičiuotinis inkaravimo ilgis gali būti sumažintas 4 %. Esant intensyvesniam skersiniam armavimui, gautume mažesnę koeficiento α_3 reikšmę. Reikia atkreipti dėmesį, kad apskaičiavus koeficientą α_3 gali pasikeisti skaičiuotinis inkaravimo ilgis l_{bd} , todėl reikėtų atlikti dar vieną priartėjimą.

Koeficientas α_4 įvertina skersinės armatūros įtaką inkaravimo ilgiui, kai skersinė armatūra yra privirinta prie išilginių strypų. Kai prie skaičiuotinio inkaravimo ilgio l_{bd} privirintas bent vienas skersinės armatūros strypas, kurio skersmuo $\varnothing_t \geq 0,6\varnothing$ (čia $\varnothing$ – inkaruojamo strypo skersmuo), siūloma koeficiento reikšmė $\alpha_4 = 0,7$. Taip pat turi būti užtikrinta sąlyga, kad skersinis armatūros strypas turėtų pakankamą betono suvaržymą jėgos veikimo kryptimi (10.17 pav., d). LST EN 1992-1-1:2005 normose pateikiama metodika, kaip tiksliau įvertinti kiekvieno iš privirintų skersinės armatūros strypų įtaką inkaravimo ilgiui. Tam tikslui naudojama vieno skersinės armatūros strypo atlaikoma jėga F_{btd} , kuri veikia kaip papildoma dedamoji, besipriešinanti strypo ištraukimui (10.17 pav., d). Apskaičiavus vieno ar kelių skersinės armatūros strypų atlaikomąją jėgą F_{btd} , galima įvertinti jų įtaką pagrindinio strypo inkaravimo ilgiui. Jėgą F_{btd} padalinę iš išilginio strypo skerspjūvio ploto A_s , gauname tam tikrus vidutinius įtempius, rodančius, kurią išilginio strypo įtempių σ_{sd} dalį gali



10.17 pav. Išilginių plyšių susidarymas gelžbetoninėse sijose ir inkaravimo ilgio koeficientų nustatymas: a – išilginiai plyšiai sijose; b – koeficiento K nustatymo schema; c – koeficiento λ nustatymo schema; d – koeficiento α_4 nustatymo schema

atlaikyti privirinta skersinė armatūra. Tuomet formulė (10.19) gali būti perrašyta taip:

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd} - F_{btd} / A_s}{f_{bd}}. \quad (10.22)$$

Sumažinę pagrindinio strypo įtempius dydžiu F_{btd} / A_s , gauname atitinkamai mažesnę reikiamą *pagrindinį inkaravimo ilgį*. Jėgai F_{btd} apskaičiuoti pateikiama sudėtinga metodika, įvertinanti skersinio strypo skersmenį, ilgį, betono apsauginį sluoksnį ir betono gniuždymo įtempius, atsirandančius dėl betono ir skersinio strypo sąveikos. Kita vertus, tokiu būdu galima tiksliau kontroliuoti privirintų skersinių strypų įtaką pagrindinių strypų inkaravimo ilgiui.

Koeficientas α_5 įvertina išorinio slėgio įtaką inkaravimo ilgiui. Kaip minėta, išorinis slėgis priskiriamas prie aktyviojo suvaržymo. Palankus jo poveikis pasireiškia tuo, kad suvaržomas išilginių plyšių plitimas ir padidėja trintis tarp armatūros ir betono. Šie palankūs efektai pasireiškia, kai išorinis slėgis sukelia gniuždymo įtempius. Realiose konstrukcijose ruožai, kuriuose veikia išorinis slėgis, dažniausiai yra elementų sandūros (10.12 pav.). Koeficiento α_5 kitimo ribos yra $0,7 \leq \alpha_5 \leq 1$. Šis koeficientas $\alpha_5 = 1 - 0,04p$, čia p – saugos ribinio būvio skersinis slėgis (MPa) inkaravimo ilgio l_{bd} išilgine kryptimi.

LST EN 1992-1-1:2005 normose taikomas papildomas apribojimas: $\alpha_2 \alpha_3 \alpha_5 \leq 0,7$. Šie trys koeficientai yra susiję su išilginių plyšių plitimu ir pagrindinio strypo suvaržymu (pasyvusis suvaržymas α_2 ir α_3 ; aktyvusis suvaržymas α_5). Šis ribojimas taikomas, kad nebūtų gautas nerealistiškas vieno efekto vertinimas, kurio reikšmė imant minimalias koeficientų α_2 , α_3 ir α_5 reikšmes gali būti $0,7^3 = 0,343$.

Taip pat įvedamas mažiausio inkaravimo ilgio apribojimas $l_{b,min} = \max(0,3l_{b,rqd}; 10\emptyset; 100 \text{ mm})$. Šis apribojimas yra konstrukcinis, grindžiamas ilgamete gelžbetoninių konstrukcijų eksploatacijos patirtimi.

Apibendrinant galima pažymėti, kad LST EN 1992-1-1:2005 siūlomas armatūros strypų inkaravimo ilgio apskaičiavimas pagrįstas ribinės pusiausvyros sąlyga (10.1–10.8 formulės), papildomai įvertinant įvairius sukibimui įtakos turinčius veiksnius: strypų padėtį betonavimo metu (koeficientas η_1), strypų skersmenį (koeficientas η_2), strypo formą (koeficientas α_1), apsauginį betono sluoksnį (koeficientas α_2), skersinį armavimą (koeficientas α_3), privirintų strypų įtaką (koeficientas α_4) ir įtempių būvį betone (koeficientas α_5). Visi šie koeficientai išvesti plieninei armatūrai, remiantis įvairių autorių atliktais eksperimentinių ir teorinių tyrimų rezultatais. Pažymėtina, kad jų taikymas kompozitinei armatūrai ne visuomet gali būti pagrįstas dėl polimerinės armatūros įvairovės. Kita vertus, remiantis bendrais sukibimą apibūdinančiais dėsniais, kompozitinės armatūros sukibimo ypatumais ir gamintojo pateikiamomis kompozitinės armatūros specifikacijomis, galima įvertinti reikiamą polimerinės armatūros inkaravimo ilgį. Šiuo atveju gali būti taikoma ta pati ribinės pusiausvyros sąlyga (10.1–10.8 formulės), iš kurios randamas reikiamas *pagrindinis*

inkaravimo ilgis. Modifikuojant šį ilgį minėtais sukibimą apibūdinančiais koeficientais ir atsižvelgiant į inkaruojamos armatūros savybes, galima įvertinti reikiamą kompozitinės armatūros *skaičiuotinį inkaravimo ilgį*.

Inkaravimo ilgio apskaičiavimas taikant ACI 318-11 rekomendacijas

JAV Betono instituto projektavimo normose ACI 318-11 reglamentuojama, kad armatūra per inkaravimo ilgį (angl. *development length* – skirtingai nuo Europoje vartojamo termino angl. *anchorage length*) turi būti pratęsta į abi puses nuo pjūvio, kuriame apskaičiuota įraža. Tempiamų rumbuotųjų armatūros strypų inkaravimo ilgis apskaičiuojamas pagal tokią išraišką:

$$l_d = \left(\frac{3}{40} \frac{f_{yd}}{\sqrt{f_{cd}}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s \lambda}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{\emptyset} \right)} \right) \emptyset, \quad (10.23a)$$

$$l_d = \left(0,9 \frac{f_{yd}}{\sqrt{f_{cd}}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s \lambda}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{\emptyset} \right)} \right) \emptyset, \quad (10.23b)$$

čia f_{cd} ir f_{yd} – skaičiuotinis gniuždomojo betono stipris ir armatūros takumo įtempiai. 10.23a formulėje betono ir armatūros stiprio matavimo vienetai yra psi (1 psi $\approx$ 6895 Pa). 10.23b formulėje betono ir armatūros stiprio matavimo vienetai yra MPa.

Vardiklyje esantis narys $(c_b + K_{tr}) / \emptyset$ įvertina betono apsauginio sluoksnio ir skersinės armatūros įtaką sukibimui. Jo kitimo ribos yra $1,5 \leq (c_b + K_{tr}) / \emptyset \leq 2,5$, čia c_b – apsauginis betono sluoksnis; $\emptyset$ – inkaruojamos armatūros skersmuo; K_{tr} – skersinį armavimą įvertinantis koeficientas. Normose siūloma supaprastinta jo reikšmė $K_{tr} = 0$, esant bet kokiam skersinės armatūros kiekiui. Tarus, kad $K_{tr} = 0$, minimalus apsauginio betono sluoksnio storis, užtikrinantis, kad išilginiai plyšiai nepasieks konstrukcijos paviršiaus, yra $c_b = 2,5\emptyset$. Kai $c_b \geq 2,5\emptyset$, strypas yra ištraukiamas iš betono (ketvirtoji sukibimo įtempių perdavimo stadija) ir apsauginio sluoksnio arba aktyvaus bei pasyvaus suvaržymo didinimas nebeturi įtakos sukibimo įtempiams. Kai $(c_b + K_{tr}) / \emptyset \leq 2,5$, išilginiai plyšiai pasiekia konstrukcijos išorinį paviršių ir sukibimas greitai mažėja.

Koeficientas ψ_t įvertina strypų padėtį betonuojant ir yra analogiškas LST EN 1992-1-1:2005 taikomam koeficientui η_1 . Viršutinės eilės strypams, kai po jais klojama ne mažiau kaip 30 cm betono, $\psi_t = 1,3$, kitais atvejais $\psi_t = 1$. Kitaip tariant, viršutinės eilės strypams reglamentuojamas inkaravimo ilgis padidinamas 30 % (LST EN 1992-1-1:2005 normose 30 % sumažinami ribiniai sukibimo įtempiai – abiem atvejais gaunami panašūs rezultatai).

Koeficientas ψ_e įvertina strypų paviršiaus padengimą. Siekiant apsaugoti tiltų paklotus laikančių konstrukcijų armatūros atsparumą korozijai, JAV 1960 m. sukurta armatūros strypų padengimo epoksidu technologija (angl. *Fusion Bonded Epoxy Coated Reinforcement – FBECR*). Pirmasis gelžbetoninis tiltas, naudojant šios rūšies armatūrą, pastatytas 1973 m. Pensilvanijos valstijoje. Pastaraisiais metais šios rūšies armatūra ir toliau plačiai naudojama JAV. Koeficientas ψ_e į JAV projektavimo normas įtrauktas siekiant įvertinti epoksidinio strypų padengimo įtaką sukibimui ir inkaravimo ilgiui. Siūlomos koeficiento reikšmės: $\psi_e = 1,5$, kai betono apsauginis sluoksnis $c_b < 3\varnothing$; kitais atvejais $\psi_e = 1,2$. Epoksidu nepadengtų strypų $\psi_e = 1$. Epoksidinė danga turi neigiamą įtaką sukibimui dėl sumažėjančios armatūros strypo adhezijos ir trinties su betonu, todėl inkaravimo ilgis padidinamas nuo 20 % iki 50 %. Pažymėtina, kad panašūs koeficientai dažnai taikomi įvairiai kompozitinei armatūrai, modifikuojant standartines plieninės armatūros inkaravimo ilgio skaičiavimo formules.

Koeficientas ψ_s įvertina strypo skersmens įtaką sukibimui. Jis atitinka LST EN 1992-1-1:2005 normose taikomą koeficientą η_2 . Sukibimo įtempiai yra didesni mažesnio skersmens strypuose, todėl ACI 318 siūlomos tokios koeficiento ψ_s reikšmės: kai $\varnothing \leq 14$ mm, $\psi_s = 0,8$. Kai strypo skersmuo $\varnothing \geq 16$ mm, $\psi_s = 1,0$. Kaip minėta, didesnio skersmens strypuose dėl išorinės apkrovos poveikio pasireiškia didesnės skersinės deformacijos, todėl strypai susitraukia skersine kryptimi ir blogėja jų sukibimas, ypač esant dideliame apkrovimo lygiui. Kita vertus, kai strypas yra gniuždomas (pvz., atleidžiant įtemptus armatūros strypus), šis efektas tampa palankus.

Koeficientu λ įvertinama lengvojo betono (angl. *lightweight concrete*) savybių įtaka sukibimui. Lengvojo betono tempiamasis stipris yra mažesnis, todėl greičiau plinta išilginiai plyšiai ir betonas lengviau nukerpamas per rumbelių viršūnes. Projektavimo normose ACI 318-11 siūloma imti $\lambda = 1,3$ lengvajam betonui ir $\lambda = 1,0$ – įprastajam sunkiajam betonui.

Lyginant JAV projektavimo normas ACI 318-11 su LST EN 1992-1-1:2005, galima pastebėti, kad abiejose normose vertinami tie patys sukibimą apibūdinantys veiksniai: betono apsauginis sluoksnis ir skersinės armatūros kiekis, strypų padėtis betonavimo metu, strypų skersmuo, betono savybės. Visi šie veiksniai susiję su fundamentine betono ir armatūros sąveikos samprata.

Neplieninės armatūros atveju neįmanoma išbandyti visų tipų armatūros ir įvertinti kiekvieną iš sukibimą apibūdinančių veiksnių dėl didelės šios armatūros įvairovės. Vertinant neplieninės armatūros sukibtį ir inkaravimo ilgį, reikia remtis bendrais sukibimo dėsniais, kompozitinės armatūros sukibimo ypatumais ir gamintojo pateikiamomis specifikacijomis. Plieninės armatūros inkaravimo ilgis gali būti geru, laiko patikrintu atskaitos tašku apskaičiuojant reikiamą kompozitinės armatūros inkaravimo ilgį.

10.9. Skyriaus apibendrinimas

Plieniniais ir kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų pranašumai pasireiškia tik užtikrinant dviejų skirtingas mechanines ir fizikines savybes turinčių medžiagų – betono ir armatūros – sukibimą. Tam, kad tempiamosios zonos betonas veiksmingai perduotų įtempius armatūrai, būtina užtikrinti patikimą šių medžiagų sukibtį, kuri apibrėžiama kaip vidutinė jėga, tenkanti betono ir armatūros sąlyčio paviršiaus ploto vienetui. Nagrinėjant betono ir armatūros sukibimo mechaniką, galima išskirti tris pagrindines sąveikos dedamąsias:

1. Cheminis sukibimas, arba adhezija. Kai armatūros strypas yra betone, adhezija pasireiškia tarp cemento matricos ir armatūros paviršiaus. Konstrukciniu požiūriu tai nėra patikimas sukibimo komponentas, nes cheminės jungtys yra suardomos, esant labai mažoms slinkties reikšmėms.
2. Trinties jėga pradeda veikti suirus cheminiams ryšiams tarp armatūros ir betono. Ši sukibimo dedamoji veikia tol, kol armatūros strypas visiškai ištraukiamas arba suyra. Trinties jėgos dydis priklauso nuo armatūros paviršiaus šiurkštumo ir šoninio slėgio į betoną.
3. Mechaninis inkaravimas susidaro tarp armatūros rumbų ir betono. Tai pati efektyviausia sukibimo dedamoji. Kai armatūra rumbuotoji, adhezijai tenka apie 10 %; trinties jėgoms – 15–20 %; mechaniniam inkaravimui – 70–75 % visos sukibimo jėgos.

Efektyviausiai sukibimo įtempius perduoda mechaninis inkaravimas, todėl konstrukcinės armatūros strypai gaminami rumbuotieji. Rumbams sąveikaujant su betonu, sąlyčio zonoje susidaro sudėtingas erdvinis įtempių būvis. Pirmiausia dėl įtempių koncentracijos suglemžiamas priešais rumbą esantis porėtas cemento matricos sluoksnis. Dėl šios nedidelės strypo slinkties suardoma cheminė sukibimo dedamoji ir toliau strypo ištraukimui priešinasi trinties jėgos ir priešais rumbelius esantis betonas. Didėjant ištraukimo jėgai, prasideda vidinis betono mikropleišėjimas. Ties armatūros rumbais atsiveria skersinių (kartais vadinamų antriniais) mikroplyšių. Dėl susidarusių žiedinių tempimo jėgų betone, pradedant nuo armatūros paviršiaus, atsiveria išilginių plyšių (10.9, 10.10 pav.). Šis mikropleišėjimas lemia tai, kad strypo slinkties ir sukibimo įtempių priklausomybė įgauna netiesinį pobūdį (10.8, 10.15 pav.).

Sukibimo suirtis gali būti dviejų tipų: 1) esant pakankamam apsauginiam betono sluoksniui ($c \approx 3-5\varnothing$) nukerpamas tarp rumbelių esantis betonas; kompozitinės armatūros atveju gali būti nukerpami ir patys rumbeliai arba paviršinis armatūros pluoštas; tai priklauso nuo betono ir armatūros savybių; 2) esant nepakankamam apsauginiam betono sluoksniui, išilginiai plyšiai išplinta iki konstrukcijos paviršiaus ir, staigiai sumažėjus sukibimo įtempiams, įvyksta suirimas dėl išilginio pleišėjimo.

Betono ir armatūros sąveika priklauso nuo daugelio veiksnių, kuriuos galima susieti su viena iš penkių grupių: 1) armatūra; 2) betonas; 3) įtempių būvis armatūroje ir betone; 4) technologiniai veiksniai; 5) konstrukciniai veiksniai.

Armatūros tipas turi didžiausią įtaką jos sukibimui su betonu. Svarbiausi rodikliai šiuo atveju yra *sukibimo indeksas* (10.16 formulė) ir mechaninės armatūros savybės: tamprumo modulis ir skersinės deformacijos koeficientas.

Betono kokybė – antras svarbus sukibimą lemiantis veiksnys, nes sukibtis paprastai suyra nukerpant betoną arba susidarius išilginiams plyšiams, svarbiausias rodiklis yra betono gniuždomasis stipris f_c , pagal kurį gali būti apskaičiuoti kerpamasis ir tempiamasis stipriai.

Įtempių būvio armatūroje įtaka pasireiškia tuo, kad tempiamieji strypai traukiasi skersine kryptimi. Šio susitraukimo reikšmė yra tiesiog proporcinga išilginei deformacijai ir strypo skersmeniui (10.18 formulė). Gniuždomųjų strypų atveju skersinės deformacijos efektas yra palankus sukibimui. Įtempių būvis betone turi palankų poveikį tuomet, kai armatūra yra apgniuždoma. Šiuo atveju suvaržomas skersinių ir išilginių plyšių plitimas, kartu padidėja trintis tarp armatūros ir betono.

Iš technologinių veiksnių didžiausią įtaką sukibimui turi armatūros padėtis betonuojant ir betono sutankinimo kokybė. Ties rumbeliais susidarančios vandens ir oro sankaupos stipriai pablogina strypų sukibimą. Dėl šių veiksnių gali būti gauti net iki 30–40 % mažesni maksimalūs sukibimo įtempiai.

Prie konstrukcinių veiksnių priskiriamas skersinio armavimo intensyvumas ir apsauginis betono sluoksnis. Abu veiksniai suvaržo išilginių plyšių plėtimąsi ir pagerina sukibties kokybę.

Bet kokios rūšies armatūros ir betono sąveikai įvertinti, esant bet kaip išdėstytiems armatūros strypams, būtini universalūs fizikiniais dėsniais pagrįsti sąveikos modeliai. Pasaulyje iki šiol nėra sukurtas universalus bet kokioms medžiagoms tinkamas armatūros ir betono sukibimo modelis. Įvairių šalių projektavimo normų metodai pagrįsti empirinėmis išraiškomis, gautomis apdorojus eksperimentinių tyrimų duomenis. Projektavimo normose taikomos matematinės išraiškos gerai tinka, kai projektuojami nesudėtingi elementai iš standartinių, seniai eksploatuojamų medžiagų. Per daugelį eksploatacijos dešimtmečių ir gausių laboratorinių tyrimų įprasto betono bei armatūros sąveika yra gana gerai ištirta ir realizuota empirinėmis formulėmis.

Polimeriniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų skaičiavimo normų sukūrimą apsunkina tai, kad statybinėms konstrukcijoms naudojami įvairių tipų ir savybių pluoštai (stiklo, anglies, aramido, bazalto), įvairios juos rišančios dervos (epoksidinė derva, silikonas, akrilinė derva, polipropilenas, poliamidas, polistirenas ir kt.), paviršiams padengti taikomi įvairūs technologiniai sprendimai (formuojami rumbeliai, paviršius padengiamas smėliu, apvyniojamas pluoštu spirale). Nagrinėjant kompozitinės armatūros sukibimo ypatumus, net rumbų išdėstymas nėra standartizuotas, kaip plieninės armatūros atveju. Derinant įvairių tipų pluoštus su juos jungiančiomis dervomis ir parenkant norimą paviršiaus formą, galima gauti tūkstančius įvairių neplieninės armatūros atmainų, ir kiekvienos iš jų sąveika su betonu bus vi-

siškai skirtinga. Dabartiniu metu konkrečios armatūros tipą optimizuoja gamintojas, remdamasis atliktais teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais.

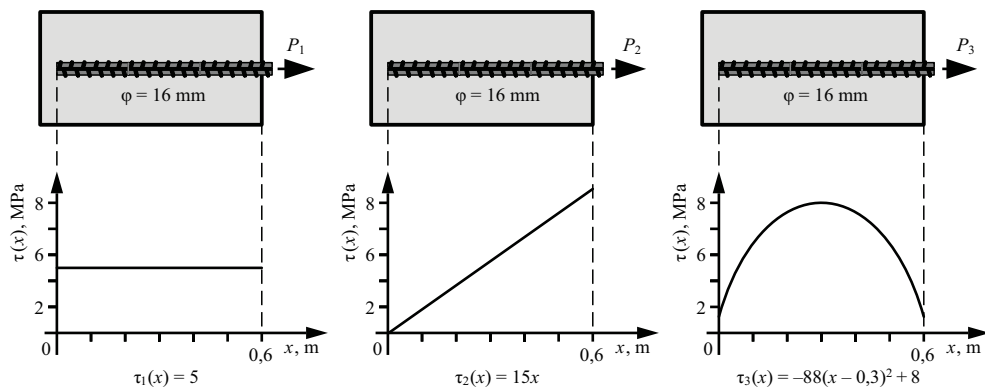
Apskaičiuojant kompozitinės armatūros inkaravimo ilgį galima remtis plieninės armatūros ir betono sukibimo analizėje taikomais dėsningumais. Remiantis bendrais sukibimo mechanikos dėsniais ir kompozitinės armatūros sukibimo ypatumais, galima įvertinti reikiamą kompozitinės armatūros inkaravimo ilgį betone.

Kontroliniai klausimai

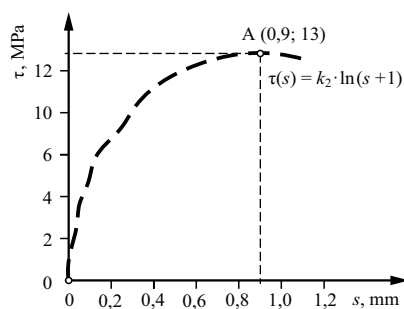
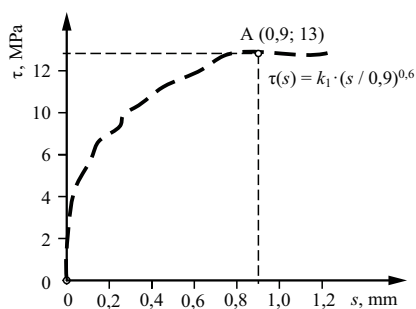
1. Kuo svarbus betono ir armatūros sukibimas vertinant konstrukcijų stiprumo ir tinkamumo ribinius būvius?
2. Kaip siejasi sąvokos *sukibimas*, *adhezija*, *trintis*, *mechaninis inkaravimas*?
3. Kas yra armatūros slinktis?
4. Kokie procesai vyksta armatūrai perduodant sukibimo įtempius betonui kiekvienoje iš keturių stadijų?
5. Kodėl susidaro vidiniai skersiniai ir išilginiai mikroplyšiai?
6. Kokiais būdais galima suvaržyti išilginių plyšių atsivėrimą?
7. Apibūdinkite sukibimą lemiančius veiksnius.
8. Kuo ypatingos kompozitinės armatūros fizikinės ir mechaninės savybės vertinant sukibimo su betonu požiūriu?
9. Kokie procesai vyksta kiekvienoje iš keturių įtempių perdavimo stadijų, kai naudojama kompozitinė armatūra. Kokių pastebima skirtumų, lyginant su plienine armatūra?
10. Apibūdinkite kompozitinės armatūros sukibimo ypatumus.
11. Kaip eksperimentiškai nustatomi sukibimo įtempiai? Kokie naudojami bandiniai ir kokios priklausomybės sudaromos?
12. Ką vadiname *inkaravimo ilgiu*? Kokia yra inkaravimo ilgio nustatymo pusiausvyros sąlyga?

Uždaviniai

1. Betone inkaruojamas tempiamasis strypas, veikiamas jėgos P , kaip parodyta schemoje.
 - 1.1. Apskaičiuokite ištraukimo jėgas P_1 , P_2 , P_3 , kai žinomos įtempių pasiskirstymo funkcijos $\tau_1(x)$, $\tau_2(x)$, $\tau_3(x)$.
 - 1.2. Apskaičiuokite reikiamą inkaravimo ilgį l_1 , l_2 , l_3 , kai žinomas strypo tempiamais stipris $f = 600$ MPa. Įtempių pasiskirstymo funkcijos $\tau_1(x)$, $\tau_2(x)$, $\tau_3(x)$ lieka tos pačios.



2. Eksperimento metu gautas sukibimo įtempių ir slinkties diagramas norima aproksimuoti laipsnine ir logaritmine funkcijomis. Parinkite tokius funkcijų koeficientus k_1 ir k_2 , kad jos kirstų sukibimo įtempių maksimumą atitinkantį tašką A.



- 2.1. Parinkite tokius funkcijų koeficientus k_1 ir k_2 , kad jos kirstų sukibimo įtempių maksimumą atitinkantį tašką A.
 2.2. Nubraižykite šių funkcijų grafikus.

Atsakymai

- 1.1. $P_1 = 150,8 \text{ kN}$; $P_2 = 135,7 \text{ kN}$; $P_3 = 161,7 \text{ kN}$.
 1.2. $l_1 = 0,4799 \text{ m}$; $l_2 = 0,5656 \text{ m}$; $l_3 = 0,4029 \text{ m}$.
 2.1. $k_1 = 13$; $k_2 = 20,25$.

Rekomenduojamoji literatūra

- ACI 318-11: *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. 2011. Michigan: American Concrete Institute. 503 p. ISBN 9780870317446.
- ACI 440.1R-06: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. 2006. Michigan: American Concrete Institute. 44 p. ISBN 9780870312106.
- Bond of Reinforcement in Concrete – Bulletin No. 10*. 2000. Lausanne, Switzerland: The International Federation for Structural Concrete (FIB). 434 p. ISBN 9782883940505.
- Goto, Y. 1971. Cracks formed in concrete around deformed tension bars, *ACI Journal Proceedings* 68(4): 244–251.
- LST EN 1992-1-1:2005. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės* [Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings]. Vilnius, 2007. 232 p.
- Maekawa, K.; Pimanmas, A.; Okamura, H. 2003. *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*. New York: Spon Press. 721 p. ISBN 9780415271264.
- Muttoni, A.; Ruiz, M. F. 2007. Concrete cracking in tension members and application to deck slabs of bridges, *Journal of Bridge Engineering* 12: 646–653.

11. KOMPOZITINIAIS STRYPAIS ARMUOTŲ KONSTRUKCIJŲ PROJEKTAVIMAS: PAGRINDAI IR SAUGOS RIBINIS BŪVIS

11.1. Įžanga

Kompozitiniai strypai betoninėms konstrukcijoms armuoti dažniausiai naudojami tais atvejais, kai statinys bus eksploatuojamas ypač agresyvioje, plieno koroziją sukeliančioje aplinkoje. Tipiniai tokių statinių pavyzdžiai yra tiltų paklotai, pastatų pamatai, požeminiai statiniai, vandens valymo įrenginiai, druskų ar cheminių medžiagų poveikio veikiamos konstrukcijos. Didelis kompozitinės armatūros pranašumas – jos magnetinis neutralumas, todėl ji tinka specifinėse patalpose, kuriose naudojama didelio tikslumo elektroninė (dažniausiai medicininė) įranga.

Kompozitiniai strypai tokioms konstrukcijoms armuoti naudojami jau kelis dešimtmečius. Moksliniai tyrimai, susiję su šios armatūros naudojimu statybinėms konstrukcijoms, vykdomi dar ilgesnį laiką. Remiantis sukaupta patirtimi, skirtingose pasaulio valstybėse (pirmiausia Japonijoje, vėliau Kanadoje, JAV ir Europoje) buvo parengtos kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų projektavimo rekomendacijos, modifikuojant įprastų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normas.

Skirtingos projektavimo rekomendacijos remiasi tais pačiais fizikiniais ir mechaniniais kompozitinės armatūros elgsenos dėsningumais, o tarpusavyje skiriasi tik skaičiuoti taikomomis empirinėmis išraiškomis, įvertinančiomis polimeriniais strypais armuotų betoninių elementų elgsenos ypatumus. Šioje knygos dalyje daugiausia dėmesio skiriama kompozitiniais strypais armuotų betoninių elementų projektavimo ypatumams aprašyti, akcentuojant būdingus įprastų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normų metodų skirtumus.

Skyriaus pradžioje pateikiami kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų projektavimo pagrindai, apimantys skaičiuoti taikomas prielaidas, medžiagų skaičiuotinių reikšmių nustatymą ir irimo pobūdžio vertinimą. Toliau pateikiama lenkiamųjų elementų stiprio normaliniame ir įstrižajame pjūviuose analizė, pristatomi konstrukcijų plastiškumo ir deformavimosi indeksai, užtikrinantys kompozitiniais strypais armuotų eksploatuojamų konstrukcijų saugą. Skyriaus pabaigoje pateikiama praktinių skaičiavimo pavyzdžių.

11.2. Projektavimo pagrindai

Kompozitinė armatūra pasižymi fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis, kurios iš esmės skiriasi nuo statybinio plieno. Pirmiausia kompozitinė armatūra yra anizotropinė medžiaga – skiriasi jos savybės išilgine ir skersine pluoštui kryptimis. Kitas esminis skirtumas, lyginant su plieniu, yra tas, kad kompozitinės armatūros suirimo pobūdis yra trapus, t. y. kompozite nevyksta apie irimo pavojų išpėjančios plastinės deformacijos. Skiriasi plieninės ir kompozitinės armatūros stipriai, tamprumo moduliai, ilgalaikės mechaninės savybės ir sąveika su betonu. Šie skirtumai detaliau aptariami nagrinėjant konkretų projektavimo aspektą.

Projektuojant įprastas gelžbetonines konstrukcijas taria, kad irimas prasidės nuo tempiamosios armatūros tekėjimo, išskyrus kai kuriuos išskirtinius atvejus, kai elemento irimas prasideda nuo gniuždomojo betono (pvz., necentriškai gniuždomi gelžbetoniniai elementai mažų ekscentricitetų atveju). Plieninei armatūrai pasiekus takumo ribą, konstrukcija pradeda greitai deformuotis. Šis reiškinys ypač naudingas saugos ribinio būvio požiūriu, nes didėjančios deformacijos išpėja apie griūties pavojų. Kompozitinės armatūros strypuose plastinės deformacijos irimo stadijoje nepasireiškia. Polimeriniais strypais armuoti betoniniai elementai suyra staiga, todėl svarbu tinkamai modifikuoti šių elementų laikomosios galios analizei taikomus įprastų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normų metodus.

Kompozitinė armatūra pasižymi nedideliu tamprumo moduliu (ypač stiklo pluošto strypai), todėl prieš irimą konstrukcijoje atsiveria didelio pločio plyšiai ir pasiekiami dideli įlinkiai. Šios deformacijos išpėja apie artėjančią laikomosios galios netekimą, todėl projektuojant kompozitiniais strypais armotas konstrukcijas naudojamas *deformavimosi indeksas*, apibrėžiantis tam tikrą saugios deformacijos reikšmę. Plačiau *deformavimosi indeksas* aptariamas šios knygos 11.6 poskyryje.

Įprastų gelžbetoninių elementų irimas dėl gniuždomojo betono nepageidautinas, nes yra trapesnis, lyginant su plastiniu plieninės armatūros suirimu. Kita vertus, eksperimentiniai tyrimai parodė, kad kompozitiniais strypais armuotų elementų irimas dėl gniuždomojo betono yra laipsniškesnis, anksčiau pastebimas, lengviau prognozuojamas ir mažiau katastrofiškas, lyginant su tempiamosios kompozitinės armatūros nutraukimu, turinčiu net sprogstamąjį pobūdį. Šie dėsningumai, atskiriant du galimus kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų suirimo pobūdžius, yra labai svarbūs užtikrinant tokių konstrukcijų atitiktį saugos ribinio būvio reikalavimams. Priklausomai nuo armuotojo betoninio elemento irimo pobūdžio, skaičiuoti taikomi papildomi, irimo pobūdį įvertinantys koeficientai, kurie aptariami 11.2.3 skirsnyje.

Nors projektuojant kompozitiniais strypais armotas konstrukcijas irimas dėl gniuždomojo betono yra labiau pageidaujamas, jis ne visada ekonomiškai naudingas dėl intensyvaus armavimo tempiamojoje zonoje. Tais atvejais, kai konstrukcija veikiama nedidelių išorinių apkrovų ir nereikalingas intensyvus armavimas, galima

konstrukciją projektuoti numatant irimą dėl tempiamosios kompozitinės armatūros. Šiuo atveju būtina didesnė stiprumo atsarga, taikant atitinkamą dalinį patikimumo koeficientą. Reikia atkreipti dėmesį, kad projektuojant įprastas gelžbetonines konstrukcijas tokie koeficientai nėra taikomi.

Nagrinėjant gniuždomąsias kompozitinės armatūros savybes (8.3.2 skirsnis) pastebėta, kad dėl pluoštinės struktūros kompozitiniai strypai blogai priešinasi gniuždymo įtempiams. Dėl šios priežasties, taip pat dėl nedidelio tamprumo modulio kompozitinės armatūros nepatariama naudoti gniuždomosiose konstrukcijų zonose. Tais atvejais, kai ši armatūra gniuždomojoje zonoje naudojama, jos įtaka konstrukcijos laikomajai galiai nevertinama.

Skirtingai nuo įprastų gelžbetoninių elementų, projektuojant kompozitiniais strypais armuotas konstrukcijas lemiamas veiksnys dažnai yra ne laikomosios galios užtikrinimas, bet įlinkių ir plyšių pločių ribojimas, t. y. konstrukcijos matmenys ir armavimas parenkami ne pagal saugos, bet pagal tinkamumo ribinio būvio reikalavimus. Šiuos dėsningumus lemia tai, kad kompozitinės armatūros stipris yra kelis kartus didesnis negu plieno, o tamprumo modulis mažesnis. Dėl šių savybių skirtumo polimerinės armatūros strypai pradeda irti esant didelėms elemento deformacijoms, kurių reikšmės paprastai yra nepriimtinos tinkamumo ribinio būvio požiūriu. Tinkamumo ribinio būvio reikalavimai bei įlinkių ir plyšių pločių skaičiavimo metodai nagrinėjami 12 šios knygos skyriuje.

11.2.1. Projektavimo prielaidos

Kompozitiniais strypais armuotoms betoninėms konstrukcijoms projektuoti taikomos tos pačios klasikinės gelžbetonio teorijos prielaidos. Skiriasi tik tempiamosios kompozitinės armatūros įtempių ir deformacijų diagrama bei suirimo pobūdžio vertinimas. Toliau pateikiamos klasikinės projektavimo prielaidos:

- Galioja J. Bernulio plokščiųjų pjūvių hipotezė: neutraliajai elemento ašiai statmeni plokštieji pjūviai prieš apkrovimą išlieka tokie pat ir po apkrovimo: jie pasislenka, pasisuka, tačiau neišsikreivina. Remiantis šia prielaida, bet kuriame apkrovimo etape deformacijų pasiskirstymas elemento skerspjuvyje yra tiesinis, o betono ir armatūros deformacija yra proporcinga atstumui nuo neutraliosios ašies iki nagrinėjamo sluoksnio.
- Betonas ir kompozitinė armatūra yra idealiai sukibę, t. y. nepasireiškia armatūros slinktis.
- Kompozitinė armatūra nuo apkrovimo pradžios iki suirimo deformuojasi tampriai.
- Skaičiuojant saugos ribinį būvį betono tempiamasis stipris yra nevertinamas.
- Skaičiuojant saugos ribinį būvį parabolinė gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų diagramos forma pakeičiama ekvivalentine stačiakampe diagrama,

apibrėžiama dviem parametrais: efektyviosios gniuždomosios zonos aukščiu ir skaičiuotiniais gniuždomojo betono įtempiais. Šioje knygoje gniuždomosios zonos betono elgsenai aprašyti taikomos LST EN 1992-1-1:2005 normose reglamentuojamos priklausomybės.

- Gniuždomosios kompozitinės armatūros stipris yra nevertinamas.

11.2.2. Medžiagų skaičiuotinės reikšmės

Projektuojamų konstrukcijų patikimumas užtikrinamas taikant medžiagos savybių ir poveikių nepastovumą įvertinančius koeficientus. Europos projektavimo praktikoje vyrauja dalinių koeficientų metodas, kuriuo tikimybiškai užtikrinamas projektuojamos konstrukcijos patikimumas. Konstrukcijoms projektuoti taikomos charakteristinės ir skaičiuotinės medžiagų savybių reikšmės. Charakteristinė medžiagos stiprio reikšmė užtikrina 95 %, o skaičiuotinė – 99,9 % tikimybę, kad medžiagos stipris bus didesnis arba lygus už priimtąjį (atitinkamai už *charakteristinį* arba *skaičiuotinį* medžiagos stiprį).

Charakteristinė kompozitinės armatūros tempiamojo stiprio f_{fk} reikšmė nustatoma tikimybiškai apdorojus eksperimentinių tyrimų rezultatus. Skaičiuotinė tempiamojo stiprio reikšmė gaunama pagal tokią išraišką:

$$f_{fd} = \eta \frac{f_{fk}}{\gamma_m}, \quad (11.1)$$

čia γ_m – medžiagos dalinis patikimumo koeficientas; η – eksploatacinę aplinką ir ilgalaikius efektus įvertinantis koeficientas.

Skaičiuotinę ir charakteristinę konkrečios armatūros stiprio reikšmę dažniausiai pateikia gamintojas. Kai medžiagos stipris pasiskirsto pagal normalųjį dėsnį (šiuo metu šis dėsnis dažniausiai taikomas ir kompozitinei armatūrai, tačiau šiai prielaidai pagrįsti reikia išsamesnių tyrimų), charakteristinė ir skaičiuotinė medžiagos stiprio reikšmės apskaičiuojamos pagal šias formules:

$$f_{fk} = f_{fm} - 1,64\sigma, \quad (11.2)$$

$$f_{fd}^* = f_{fm} - 3\sigma, \quad (11.3)$$

čia f_{fm} – vidutinis medžiagos stipris, nustatomas eksperimentiškai; σ – stiprio pasiskirstymo vidutinis kvadratinis nuokrypis.

Reikia atkreipti dėmesį, kad 11.3 formulėje skaičiuotinis kompozitinės armatūros stipris nėra padaugintas iš eksploatacinę aplinką ir ilgalaikius efektus įvertinančio koeficiento η (žr. 11.1 formulę), todėl papildomai pažymėtas viršutiniu indeksu „*“.

Kompozitinės armatūros medžiagos dalinis patikimumo koeficientas γ_m priklauso nuo armatūrai taikomo pluošto (stiklo, anglies ar aramido), dervos, gamybos technologijos ir kokybės kontrolės gamybos metu. Japonijos projektavimo rekomendacijose (JSCE 1997) šis koeficientas, priklausomai nuo pluošto tipo, kinta nuo 1,1

iki 1,3. Italijos projektavimo rekomendacijose (CNR-DT 203/2006 2007) siūloma pastovi γ_m reikšmė visiems pluoštų tipams – $\gamma_m = 1,5$. JAV projektavimo rekomendacijose (ACI 440.1R-06 2006) siūloma taikyti $\gamma_m = 1,67$ reikšmę. Kai nėra patikimų gamintojo duomenų, šio vadovėlio autoriai siūlo taikyti konservatyviausią $\gamma_m = 1,67$ reikšmę visoms kompozitinės armatūros rūšims.

Koeficientas η yra specifinis ir taikomas tik kompozitinei armatūrai, nes jos stipriui didelę įtaką turi eksploataavimo aplinka: drėgmė, temperatūra, ultravioletinė spinduliuotė. Laikui bėgant šioje armatūroje pasireiškia nuovargio ir statinio nuovargio reiškiniai. Kaip minėta, koeficientu η įvertinamos eksploatacinės aplinkos ir ilgalaikės mechaninės kompozitinės armatūros savybės:

$$\eta = \eta_a \cdot \eta_1, \quad (11.4)$$

čia η_a – eksploatacinę aplinką įvertinantis koeficientas, kurio reikšmės pateikiamos 11.1 lentelėje; η_1 – ilgalaikės mechaninės kompozitinės armatūros savybės įvertinantis koeficientas, kurio reikšmės pateikiamos 11.2 lentelėje.

11.1 lentelė. Eksploatacinę aplinką įvertinantis koeficientas η_a

Eksploatacijos sąlygos	Pluošto tipas	η_a
Nuo atmosferos ar grunto poveikio apsaugotas betonas	Anglies	1,0
	Aramido	0,9
	Stiklo	0,8
Nuo atmosferos ar grunto poveikio neapsaugotas betonas	Anglies	0,9
	Aramido	0,8
	Stiklo	0,7

11.2 lentelė. Ilgalaikius efektus įvertinantis koeficientas η_1

Efektai	Pluošto tipas	η_1
Nuovargis, statinis nuovargis	Anglies	0,9
	Aramido	0,5
	Stiklo	0,3

Lentelėse nurodytos η_a ir η_1 reikšmės yra konservatyvios, užtikrinančios didesnę stiprumo atsargą. Šios reikšmės reglamentuotos JAV (ACI 440.1R-06) ir Italijos (CNR-DT 203/2006) projektavimo rekomendacijose. Taikant eksploatacijos sąlygas įvertinantį koeficientą η_a , reikia užtikrinti, kad konstrukcija bus eksploatuojama žemesnėje nei matricos fazės kitimo temperatūroje T_g (žr. 8.5 poskyrį). Koeficientu η_1 ribojami įtempiai armatūroje dėl ilgalaikių efektų (dėl nuovargio ir statinio kompozitinės armatūros nuovargio žr. 8.4 poskyrį). Ilgalaikiai įtempiai kompozitinėje armatūroje ribojami gana griežtai, toks ribojimas susijęs su nepakankamu ekspe-

rimentinių duomenų kiekiu. Be to, realios kompozitiniais strypais armuoto betono konstrukcijos dar nėra eksploatuojamos numatytą 50 ar 100 metų laikotarpį, o tai taip pat turi didelę įtaką nustatant ilgalaikes mechanines savybes apibūdinantį koeficientą.

Skaičiuotinė kompozitinės armatūros deformacija randama pagal išraišką:

$$\varepsilon_{fd} = \eta \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_m}, \quad (11.5)$$

čia ε_{fk} – charakteristinė tempiamosios kompozitinės armatūros deformacija.

Kadangi formulėse (11.1) ir (11.4) charakteristinis ir skaičiuotinis stipriai bei šiuos stiprius atitinkančios deformacijos randamos pagal analogiškas išraiškas, kompozitinės armatūros tamprumo modulis bet kurioje skaičiuotinėje situacijoje išlieka nepakitęs. Skaičiuojant tiek stiprumo, tiek tinkamumo ribinius būvius taikoma vidutinė kompozitinės armatūros tamprumo modulio reikšmė:

$$E_f = E_{fm}, \quad (11.6)$$

čia E_{fm} – gamintojo pateikiama vidutinė kompozitinės armatūros tamprumo modulio reikšmė.

Gniuždomojo ir tempiamojo betono charakteristinės ir skaičiuotinės stiprių reikšmės apskaičiuojamos taip pat kaip ir įprastų gelžbetoninių konstrukcijų. Kaip minėta 11.2.1 poskyryje, šioje knygoje taikomos LST EN 1992-1-1:2005 normose siūlomos betono savybių reikšmės bei įtempių ir deformacijų priklausomybės.

11.2.3. Elemento irimo pobūdžio vertinimas

Aptariant kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų projektavimo pagrindus išskirti du galimi suirimo atvejai: 1) dėl gniuždomojo betono suirimo; 2) dėl tempiamosios armatūros suirimo. Įprastų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normose reglamentuojama, kad elementai turi būti suprojektuoti taip, kad jų suirimas prasidėtų nuo tempiamosios armatūros.

Kaip minėta, vertinant polimeriniais strypais armuotų betoninių elementų laikomąją galią priimtinesnis yra 1 suirimo atvejis (dėl gniuždomojo betono). Toks suirimo pobūdis yra laipsniškesnis, labiau prognozuojamas ir mažiau katastrofiškas, lyginant su tempiamosios kompozitinės armatūros nutraukimu. Konstrukcijos skaičiuotinė laikomoji galia nustatoma pagal tokią sąlyga:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R(f_{d,i}; A_i), \quad (11.7)$$

čia $f_{d,i}$ – i -tosios medžiagos skaičiuotinis stipris (kompozitinės armatūros ir betono); A_i – i -tosios medžiagos skerspjūvio plotas; γ_{Rd} – dalinis patikimumo koeficientas elemento irimo pobūdžiui įvertinti.

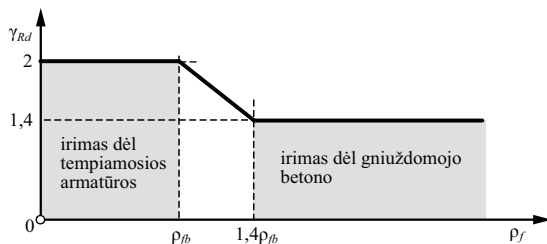
Armutojo betoninio elemento suirimo pobūdis priklauso nuo jo armavimo intensyvumo. Stipriai armuotų elementų irimas prasideda dėl gniuždomojo be-

tono, o silpnai armuotose – dėl tempiamųjų strypų irimo. Teoriškai egzistuoja ir toks armavimo koeficientas, kai vienu metu suyra tiek gniuždomasis betonas, tiek ir tempiamoji armatūra. Toks armavimo koeficientas vadinamas *subalansuotu* (angl. *balanced reinforcement ratio*) ir žymimas $\rho_{f,bal}$. Subalansuoto armavimo koeficiento priklausomybės išvedimas pateiktas 11.3 poskyryje.

Kai elemento armavimo koeficientas yra artimas subalansuotam, tiksliai prognozuoti realios konstrukcijos suirimo pobūdį sunku. Pavyzdžiui, jei faktinis gniuždomojo betono stipris yra didesnis nei priimtas projektuojant konstrukciją, irimas gali prasidėti nuo tempiamosios armatūros. Analogiškai kinta ir kompozitinės armatūros savybės: eksploatacijos metu jos stipris mažėja ir elemento irimas gali prasidėti nuo tempiamosios armatūros. Dėl šių priežasčių praktiniams skaičiavimams naudojamos tam tikros armavimo procento ribos: kai faktinis konstrukcijos armavimo koeficientas $\rho_f \geq 1,4\rho_{f,bal}$ konstrukcijos suirimas prasidės nuo gniuždomojo betono; kai faktinis konstrukcijos armavimo koeficientas $\rho_f \leq \rho_{f,bal}$ – konstrukcija suirs dėl tempiamosios armatūros. Taikant šias sąlygas, dalinis patikimumo koeficientas γ_{Rd} nustatomas taip:

$$\begin{cases} \gamma_{Rd} = 2 & \text{kai } \rho_f \leq \rho_{f,bal} \\ \gamma_{Rd} = 1,4 & \text{kai } \rho_f \geq 1,4\rho_{f,bal} \end{cases} \quad (11.8)$$

Tarpinės koeficiento γ_{Rd} reikšmės gaunamos tiesiškai interpoliuojant, kaip parodyta 11.1 pav.



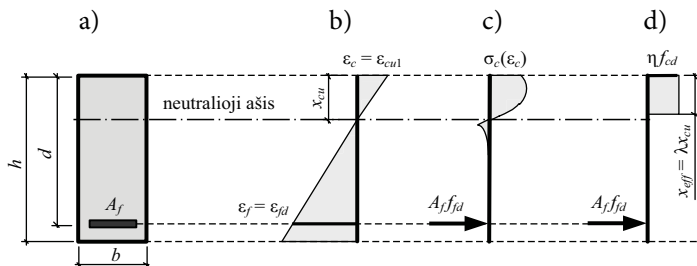
11.1 pav. Irimo pobūdį įvertinančio koeficiento γ_{Rd} kitimas

11.3. Kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų normalinio pjūvio stiprumas

Atliekant kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų laikomosios galios normaliniame pjūvyje skaičiavimus, būtina numatyti konstrukcijos suirimo pobūdį ir energijos kiekį, reikalingą suirimui pasiekti. Irimo energijos kiekis yra svarbus konstrukcijų saugos ribinių būvių požiūriu. Plačiau šis klausimas nagrinėjamas 11.6 poskyryje, taikant *deformavimosi faktorių*. Toliau pateikiami polimeriniais strypais armuotų lenkiamųjų betoninių elementų laikomosios galios normaliniame pjūvyje skaičiavimai, esant trims skirtingiems irimo pobūdžiams: subalansuotam irimui, irimui dėl tempiamosios armatūros ir irimui dėl gniuždomojo betono.

11.3.1. Subalansuoto irimo pobūdis

Panagrinėkime stačiakampio skerspjūvio kompozitiniais strypais armuotą elementą (11.2 pav., a). Gniuždomosios armatūros ir tempiamojo betono įtaka elemento laikomajai galiai nevertinama.



11.2 pav. Subalansuotas kompozitiniais strypais armuoto betoninio elemento irimas: a – elemento skerspjūvis; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje; c – tikrasis įtempių pasiskirstymas betone ir armatūroje; d – skaičiuotinis įtempių pasiskirstymas betone ir armatūroje

Taikant projektavimo prielaidose priimtą plokščiųjų pjūvių hipotezę (11.2.1 skirsnis), deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje yra tiesinis, kaip parodyta 11.2 pav., b. Gniuždomosios zonos aukštis x_{cu} yra nežinomas dydis. Kai irimas yra subalansuotas, tempiamoji kompozitinė armatūra pasiekia savo skaičiuotinę irimo deformaciją ε_{fd} (žr. 11.5 formulę), o gniuždomasis betonas pasiekia ribinę irimo deformaciją ε_{cu} . Ribinė betono irimo deformacija, priklausomai nuo betono klasės sudaro $(2800\text{--}3500) \times 10^{-6}$ ir nustatoma pagal įprastam gelžbetoniui taikomą betono savybių lentelę (žr. LST EN 1992-1-1:2005). Pasinaudojus trikampių panašumu (11.2 pav., b) santykinį gniuždomosios zonos aukštį subalansuoto irimo metu galima išreikšti taip:

$$\frac{x_{cu}}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fd}} = \xi_{\lim}. \quad (11.9)$$

Santykis x_{cu} / d yra svarbus nustatant tiek įprastų gelžbetoninių, tiek kompozitais armuotų betoninių konstrukcijų suirimo pobūdį. Šį santykį įprasta vadinti ribiniu gniuždomosios zonos aukščiu ir žymėti $\xi_{\lim}$. Jeigu santykis $x_{cu} / d \leq \xi_{\lim}$, elemento irimas prasideda nuo tempiamosios armatūros. Jei $x_{cu} / d > \xi_{\lim}$, elemento irimas prasideda nuo gniuždomojo betono.

Tikrasis įtempių pasiskirstymas elemento skerspjūvyje subalansuoto irimo metu pateiktas 11.2 pav., c. Tempiamosios armatūros įtempiai yra proporcingi jos deformacijoms – armatūra yra pasiekusi savo skaičiuotinį stiprį. Įtempių pasiskirstymas gniuždomojoje betono zonoje atitinka nustatytą gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų diagramą. Labiausiai gniuždomame skerspjūvio krašte betonas pasiekia

ribinę irimo deformaciją ir pereina į krintančiąją įtempių ir deformacijos diagramos dalį. Tempiamajoje zonoje didžioji dalis betono yra supleišėjusi. Tempiamasis betonas įtempius perima tik nedideliame skerspjūvio ruože arti neutraliosios ašies.

Skaiciavimams supaprastinti taikoma idealizuota stačiakampė gniuždomojo betono įtempių pasiskirstymo diagrama, o tempiamajo betono įtaka nevertinama (11.2 pav., d). Stačiakampės betono diagramos įtempiai apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma_c = \eta_c f_{cd}, \quad (11.10)$$

čia f_{cd} – skaičiuotinis betono stipris; η_c – koeficientas, priklausantis nuo betono stiprio:

$$\eta_c = 1, \text{ kai } f_{ck} < 50 \text{ MPa};$$

$$\eta_c = 1 - (f_{ck} - 50) / 200, \text{ kai } 50 < f_{ck} < 90 \text{ MPa}.$$

Idealizuotos gniuždomosios betono zonos aukštis x_{eff} apskaičiuojamas pagal tokią išraišką:

$$x_{eff} = \lambda x_{cu}, \quad (11.11)$$

čia λ – koeficientas, priklausantis nuo betono stiprio: $\lambda = 0,8$, kai $f_{ck} < 50$ MPa; $\lambda = 1 - (f_{ck} - 50) / 400$, kai $50 < f_{ck} < 90$ MPa.

Taikydami stačiakampę gniuždomojo betono įtempių diagramą, galime apskaičiuoti skerspjūvio atstojamąją gniuždymo jėgą N_c , kuri lygi gniuždymo jėgai betone:

$$N_c = \eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b, \quad (11.12)$$

čia b – skerspjūvio plotis.

Tempimo jėgos atstojamoji N_t lygi armatūroje veikiančiai jėgai:

$$N_t = A_f \cdot f_{fd}, \quad (11.13)$$

čia A_f – kompozitinės armatūros skerspjūvio plotas.

Iš horizontaliųjų jėgų pusiausvyros sąlygos gauname:

$$\eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b = A_f \cdot f_{fd}. \quad (11.14)$$

Pertvarkę (11.14) išraišką ir abi lygties puses padaliję iš naudingojo skerspjūvio aukščio d , gauname:

$$\frac{\lambda x_{cu}}{d} \frac{\eta_c f_{cd}}{f_{fd}} = \frac{A_f}{bd}. \quad (11.15)$$

Dešiniojoje (11.15) lygties pusėje esantis narys išreiškia skerspjūvio armavimo procentą subalansuoto irimo metu, todėl $\rho_f = \rho_{f, bal} = A_f / bd$. Tuomet subalansuoto armavimo procentas:

$$\rho_{f, bal} = \frac{\lambda x_{cu}}{d} \frac{\eta_c f_{cd}}{f_{fd}}. \quad (11.16)$$

Pasinaudoję santykinio gniuždomosios zonos aukščio x_{cu}/d priklausomybe (11.9) gauname:

$$\rho_{f,bal} = \frac{\lambda \eta_c f_{cd}}{f_{fd}} \left(\frac{\varepsilon_{cu1}}{\varepsilon_{cu1} + \varepsilon_{fd}} \right). \quad (11.17)$$

Gauta formulė rodo reikiamą skerspjūvio armavimo procentą, kad vyktų subalansuotas irimas. Jis priklauso nuo taikomo betono ir armatūros stiprių bei jų ribinių irimo deformacijų.

Nagrinėjamo elemento skerspjūvio atlaikomasis lenkiamasis momentas subalansuoto irimo metu gali būti apskaičiuotas tempiamosios armatūros arba gniuždomojo betono zonos svorio centrų atžvilgiu, atitinkamai:

$$M_{Rd} = \eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b \cdot \left(d - \frac{\lambda x_{cu}}{2} \right), \quad (11.18)$$

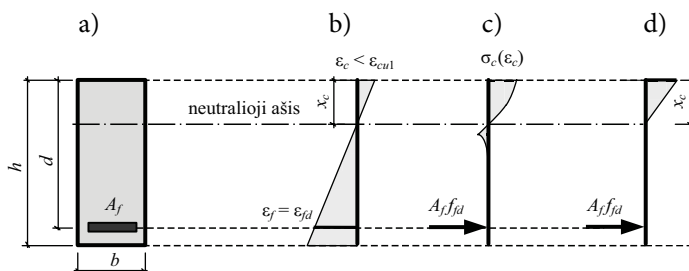
$$M_{Rd} = A_f \cdot f_{fd} \cdot \left(d - \frac{\lambda x_{cu}}{2} \right). \quad (11.19)$$

Reikia atkreipti dėmesį, kad apskaičiuotas lenkiamasis momentas turi būti papildomai dalijamas iš γ_{Rd} – dalinio patikimumo koeficiento, kuriuo įvertinamas irimo pobūdis (žr. (11.18) formulę, 11.1 pav.) konstrukcinio elemento irimo pobūdžiui įvertinti.

11.3.2. Irimas dėl tempiamosios armatūros

Armutojo betoninio elemento irimas prasideda nuo tempiamosios armatūros tuomet, kai faktinis armavimo koeficientas $\rho_f \leq \rho_{f,bal}$. Tokio irimo metu tempiamojoje kompozitinėje armatūroje pasiekiami skaičiuotinė irimo deformacija ε_{fd} ir skaičiuotinis stipris f_{fd} . Gniuždomoji betono deformacija yra mažesnė už ribinę: $\varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$. Skerspjūvio skaičiavimo schema pateikta 11.3 pav.

Elementui pradedant irti nuo tempiamosios armatūros santykinis gniuždomosios zonos aukštis yra mažesnis už ribinį: $x_c/d < \xi_{lim}$. Tokio irimo metu gniuždomosios zonos aukštis paprastai sudaro apie 15 % skerspjūvio naudingojo aukščio.



11.3 pav. Elemento irimas dėl tempiamosios armatūros: a – elemento skerspjūvis; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje; c – tikrasis įtempių pasiskirstymas betone ir armatūroje; d – skaičiuotinis įtempių pasiskirstymas betone ir armatūroje

Deformacijų pasiskirstymas elemento skerspjūvyje irimo metu pateiktas 11.3 pav., b. Kaip ir subalansuoto irimo metu, nežinomuojų laikomas gniuždomosios zonos aukštis x_c . Tikrasis įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje parodytas 11.3 pav., c. Dėl nedidelių betono deformacijų gniuždomojo betono įtempių diagramą galima pakeisti ekvivalente trikampe diagrama, kaip parodyta 11.3 pav., d. Šioje diagramoje atsiranda antrasis nežinomas dydis – gniuždomojo betono įtempiai σ_c ties labiausiai gniuždomu skerspjūvio kraštu. Skerspjūvyje veikiančios gniuždymo ir tempimo atstojamosios jėgos gali būti apskaičiuojamos pagal šias priklausomybes:

$$N_c = -\sigma_c \cdot x_c \cdot b. \quad (11.20)$$

$$N_t = A_f \cdot f_{fd}. \quad (11.21)$$

Iš horizontaliųjų jėgų pusiausvyros sąlygos gauname:

$$\frac{1}{2} \sigma_c \cdot x_c \cdot b = A_f \cdot f_{fd}. \quad (11.22)$$

Šioje lygtyje yra du nežinomieji dydžiai: gniuždomosios zonos aukštis x_c ir gniuždomojo betono įtempiai σ_c . Nežinomieji σ_c eliminuojami naudojantis deformacijų pasiskirstymu skerspjūvyje (11.3 pav., b). Pirmiausia išsireiškia gniuždomoji betono deformacija:

$$\frac{\varepsilon_c}{x_c} = \frac{\varepsilon_{fd}}{d - x_c} \Rightarrow \varepsilon_c = \varepsilon_{fd} \frac{x_c}{d - x_c}. \quad (11.23)$$

Pagal priimtą skaičiavimo schemą dėl mažos gniuždomojo betono deformacijos įtempiai betone gali būti nustatomi taikant Huko dėsnį (11.3 pav., d):

$$\sigma_c = \varepsilon_c E_c = \varepsilon_{fd} \frac{x_c}{d - x_c} E_c, \quad (11.24)$$

čia E_c – betono tamprumo modulis.

Įstatę gautą betono įtempių išraišką į (11.22) pusiausvyros lygtį gauname:

$$\frac{1}{2} \varepsilon_{fd} \frac{x_c}{d - x_c} E_c \cdot x_c \cdot b = A_f \cdot f_{fd}. \quad (11.25)$$

Gniuždomosios zonos aukštis x_c randamas išsprendus kvadratinę lygtį (11.25). Kompozitiniais strypais armuoto betoninio elemento skerspjūvio atlaikomasis lenkiamasis momentas M_{Rd} gali būti apskaičiuotas tempiamosios armatūros arba gniuždomojo betono zonos svorio centro atžvilgiu:

$$M_{Rd} = \frac{1}{2} \sigma_c \cdot x_c \cdot b \cdot \left(d - \frac{x_c}{3} \right). \quad (11.26)$$

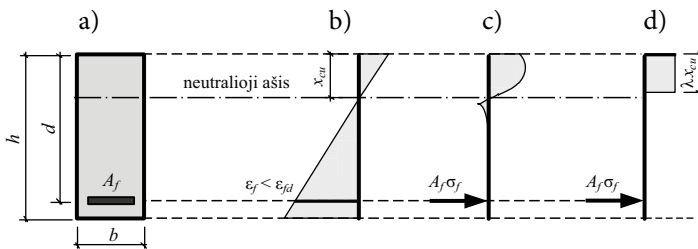
$$M_{Rd} = A_f \cdot f_{fd} \cdot \left(d - \frac{x_c}{3} \right). \quad (11.27)$$

Apskaičiuotąjį atlaikomąjį lenkiamąjį momentą M_{Rd} reikia papildomai dalinti iš elemento irimo pobūdį įvertinančio dalinio patikimumo koeficiento, kuris šiuo atveju yra $\gamma_{Rd} = 2$.

11.3.3. Irimas dėl gniuždomojo betono

Armutojo betoninio elemento irimas prasideda nuo gniuždomojo betono tuomet, kai faktinis armavimo procentas $\rho_f \geq 1,4\rho_{f,bal}$. Šiuo irimo atveju gniuždomajame betone pasiekama ribinė deformacija ϵ_{cu} bei skaičiuotinis betono stipris f_{cd} , o kompozitinės armatūros deformacija yra nedidelė – $\epsilon_f < \epsilon_{fd}$. Inžinerinėje praktikoje tai dažniausiai pasitaikantis ir pageidautinas irimo atvejis, kai betoninėms konstrukcijoms armuoti naudojami kompozitiniai strypai. Elemento irimo dėl gniuždomojo betono skaičiuojamoji schema pateikta 11.4 pav.

Deformacijų pasiskirstymas armutojo betoninio elemento skerspjūvyje irimo metu pateiktas 11.4 pav., b. Nežinomaisiais laikomi gniuždomosios zonos aukštis x_{cu} ir įtempiai armatūroje σ_f .



11.4 pav. Elemento irimas dėl gniuždomojo betono: a – elemento skerspjūvis; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje; c – tikrasis įtempių pasiskirstymas betone ir armatūroje; d – skaičiuotinis įtempių pasiskirstymas betone ir armatūroje

Tikrasis įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje pateiktas 11.4 pav., c. Kadangi gniuždomasis betonas pasiekia ribinę irimo deformaciją ϵ_{cu} , jo įtempių diagrama tampa parabolinė su krintančiąja dalimi ties labiausiai gniuždomu skerspjūvio kraštu. Gniuždomojo betono įtempių pasiskirstymas atitinka subalansuoto irimo atvejį, todėl įvedama analogiška idealizuota stačiakampė įtempių diagrama (11.4 pav., d). Stačiakampės diagramos skaičiuotinis gniuždomasis stipris f_{cd} bei koeficientai η_1 ir λ nustatomi pagal (11.10) ir (11.11) formules. Gniuždymo ir tempimo atstojamosios jėgos skerspjūvyje nustatomos pagal tokias formules:

$$N_c = \eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b, \quad (11.28)$$

$$N_t = A_f \cdot \sigma_f. \quad (11.29)$$

Suprojektavę tempimo ir gniuždymo jėgą į horizontaliąją ašį gauname:

$$\eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b = A_f \cdot \sigma_f. \quad (11.30)$$

Šioje lygtyje yra du nežinomieji dydžiai: gniuždomosios zonos aukštis x_{cu} ir kompozitinės armatūros įtempiai σ_f . Kaip ir irimo dėl tempiamosios armatūros atveju, panaikinsime vieną nežinomąjį – šiuo atveju kompozitinės armatūros įtempį σ_f . Tuo tikslu deformacija tempiamojoje armatūroje išreiškiama ribine gniuždomojo betono deformacija (11.4 pav., b):

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x_{cu}} = \frac{\varepsilon_f}{d - x_{cu}} \Rightarrow \varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{d - x_{cu}}{x_{cu}}. \quad (11.31)$$

Įtempiai kompozitinėje armatūroje proporcingi deformacijai ε_f , todėl:

$$\sigma_f = \varepsilon_f E_f = \varepsilon_{cu} \frac{d - x_{cu}}{x_{cu}} E_f, \quad (11.32)$$

čia E_f – kompozitinės armatūros tamprumo modulis.

Pastarąją kompozitinės armatūros įtempių išraišką įstatę į (11.22) pusiausvyros lygtį gauname:

$$\eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b = A_f \cdot \varepsilon_{cu} \frac{d - x_{cu}}{x_{cu}} E_f. \quad (11.33)$$

Išsprendus šią lygtį randamas gniuždomosios zonos aukštis x_{cu} .

Skerspjūvyje veikiantis atlaikomasis lenkiamasis momentas apskaičiuojamas gniuždomosios zonos betono arba tempiamosios armatūros svorio centro atžvilgiu:

$$M_{Rd} = \eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b \cdot \left(d - \frac{\lambda x_{cu}}{2} \right), \quad (11.34)$$

$$M_{Rd} = A_f \cdot \sigma_f \cdot \left(d - \frac{\lambda x_{cu}}{2} \right). \quad (11.35)$$

Apskaičiuotąjį atlaikomąjį lenkiamąjį momentą M_{Rd} reikia papildomai dalinti iš elemento irimo pobūdį įvertinančio dalinio patikimumo koeficiento, kuris šiuo atveju yra $\gamma_{Rd} = 1,4$.

Gelžbetoninių konstrukcijų teorijoje armuotųjų betoninių elementų irimas dėl gniuždomojo betono dažnai vadinamas *perarmavimu*. Jo siekiama vengti dėl dviejų priežasčių: pirmiausia toks irimo pobūdis yra daug trapesnis už tempiamosios plieninės armatūros suirimą. Antra, perarmavimas yra ekonomiškai nenaudingas, nes didinant armatūros kiekį elemento laikomoji galia nedidėja. Kompozitinės armatūros atveju perarmavimas yra priimtinas, nes užtikrina saugesnį elemento irimą. Be to, dažnai tik betoninių elementų perarmavimas leidžia užtikrinti tinkamumo ribinių būvių reikalavimus (reikiamą elemento standumą ir leidžiamąsias plyšio pločio reikšmes).

11.4. Kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų įstrižojo pjūvio stiprumas

Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų irimas gali prasidėti normaliniame arba įstrižajame pjūviuose, priklausomai nuo veikiančių įrašų, armatūros išdėstymo, jos savybių, betono klasės ir elemento geometrijos. Lenkiamosioms betoninėms konstrukcijoms armuoti naudojant ne plieninius, o kompozitinius strypus, šie du principiniai suirimo atvejai išlieka, tačiau skaičiuojant tiek normalinio, tiek įstrižojo pjūvių laikomąją galią atsiranda specifinių ypatumų, susijusių su skirtingomis fizikinėmis ir mechaninėmis kompozitinės armatūros savybėmis.

Ankstesniame knygos poskyryje aptartas kompozitiniais strypais armuotų elementų irimas normaliniame pjūvyje. Toks irimas vyksta tada, kai skerspjuviuose veikia dideli lenkimo momentai ir palyginti mažos skersinės jėgos. Ruožuose prie atramų ir ruožuose ties centruotomis jėgomis, elemento skerspjuviuose susidaro didelės skersinės jėgos, todėl gali įvykti ir kitas elemento suirimo atvejis – irimas įstrižajame pjūvyje. Šiame poskyryje aptarti įstrižojo pjūvio stiprio skaičiavimo ypatumai, kai tiek skersiniam, tiek išilginiam elemento armavimui taikomi kompozitinės armatūros strypai.

Armutojo betono konstrukcijose skersinė armatūra paprastai gaubia išilginius strypus, todėl ją dengia mažesnis betono apsauginio sluoksnio storis. Tai lemia, kad skersinės armatūros apkabos yra daug greičiau pažeidžiamos agresyviosios aplinkos poveikio ir gelžbetoninėse konstrukcijose dažnai tampa korozijos židiniais. Suprantama, kad išilginiam armavimui naudojant kompozitinius strypus, juos racionalu naudoti ir skersiniam armavimui, taip išnaudojant naudingą kompozitinių medžiagų atsparumo korozijai savybę. Kita vertus, kompozitinė armatūra turi tam tikrų ypatumų, kurie įstrižojo pjūvio stiprumo atžvilgiu yra neigiami. Be jau minėtų trūkumų: mažo tamprumo modulio, trapiosios irties, blogesnio sukibimo su betonu, papildomai galima paminėti šiuos:

1. Kai iš kompozito gamykloje formuojamos lenktos apkabos, lenktos dalies stipris tampa daug mažesnis negu tiesios dalies.
2. Kompozitinė armatūra pasižymi mažu atsparumu kirpimui skersai pluošto.

Toliau šiame poskyryje detaliau aptariami kompozitinių strypų taikymo skersiniam armavimui ypatumai, nagrinėjamas skersinės jėgos perdavimas įstrižajame pjūvyje ir pateikiamos formulės kompozitiniais strypais armuotų elementų įstrižojo pjūvio stipriui apskaičiuoti.

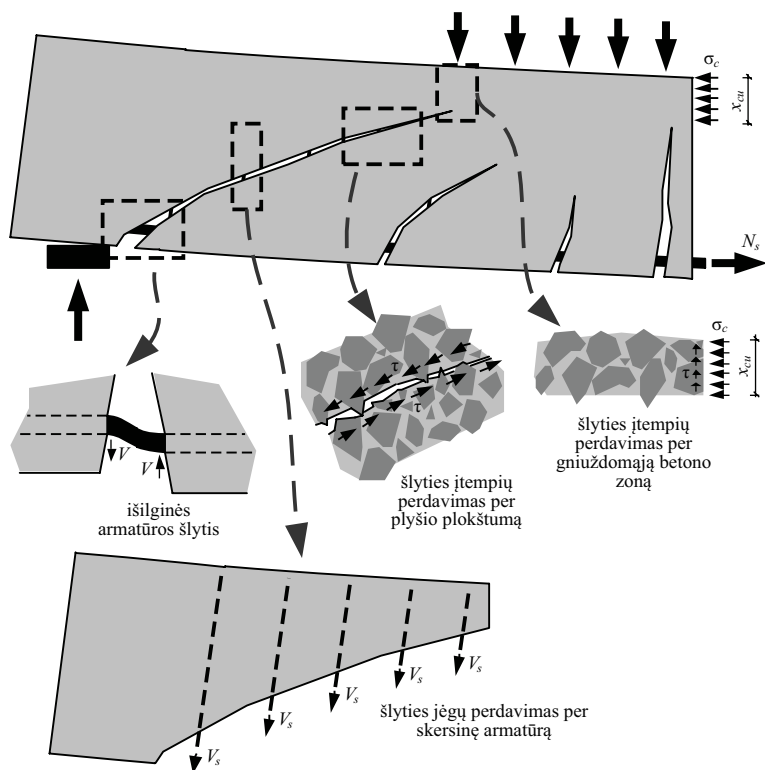
11.4.1. Įtempių perdavimas įstrižajame pjūvyje

Veikiant didelėms skersinėms jėgoms armutojo betono konstrukcijose svarbiausiųjų tempimo įtempių kryptimi atsiveria įstrižieji plyšiai. Vienas šių įstrižųjų plyšių tampa ir pavojinguoju pjūviu, kuriame gali prasidėti elemento irimas. Atsivėrus skersiniams

plyšiams, konstrukcijoje susidaro sudėtingas įtempių būvis, o skersinė jėga atlaikoma dėl keturių pagrindinių veiksnių, schemiškai pateiktų 11.5 pav.

Pirmasis veiksnys, turintis įtakos įstrižojo pjūvio bendrajam stiprumui, yra išilginių armatūros strypų šlytis (arba kirpimas per plyšio plokštumą, kitaip žinomas kaip *kaiščio efektas*, angl. *dowel action*). Plienai gerai priešinasi šlyčiai ir kerpami išilginiai armatūros strypai lemia aiškų įstrižojo pjūvio stiprumo padidėjimą. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normose, skaičiuojant įstrižojo pjūvio stiprumą, visada vertinama išilginio armavimo įtaka. Kompozitiniai strypai pasižymi mažu atsparumu kirpimui skersai pluošto, todėl išilginiai strypai turi nedidelę įtaką bendrajam elemento įstrižojo pjūvio stiprumui. Dėl riboto eksperimentinių duomenų kiekio ir didelės kompozitinės armatūros įvairovės, pasaulyje iki šiol nėra patikimų matematinių modelių įstrižajame pjūvyje kerpamų strypų laikomajai galiai įvertinti. Kol nėra patikimų eksperimentinių duomenų ir skaičiavimo metodų, skaičiuojant armuotųjų betoninių elementų įstrižojo būvio stiprumą šio efekto rekomenduojama nevertinti.

Antrasis veiksnys, lemiantis armuotojo betoninio elemento įstrižojo pjūvio stiprumą, yra gniuždomosios zonos šlytis. Kai armuoti naudojami kompozitiniai strypai,



11.5 pav. Įtempių perdavimas įstrižajame elemento pjūvyje

gniuždomosios zonos aukštis tampa daug mažesnis, lyginant su įprastais gelžbetoniniais elementais. Taip yra todėl, kad kompozitinės armatūros tamprumo modulis paprastai yra kelis kartus mažesnis (nebūdinga kai kurių tipų anglies kompozitinei armatūrai) negu plieno, o tai lemia iki kelių kartų didesnes irimo deformacijų reikšmes.

Gniuždomosios zonos aukščio kitimą, priklausomai nuo armatūros ribinės irimo deformacijos, akivaizdžiai galima pamatyti išnagrinėjus 11.2 pav., b, pateiktą deformacijų pasiskirstymą kompozitiniais strypais armuotų betoninių elementų skerspjūvyje. Fiksuodami gniuždomojo betono ribinę irimo deformaciją ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$) ir keisdami tempiamosios kompozitinės armatūros irimo deformaciją ε_p gauname skirtingo dydžio viršutinį trikampį, kurio statinis x_{cu} išreiškia gniuždomosios zonos aukštį. Taigi kuo mažesnis armatūros tamprumo modulis, tuo didesnė bus jos ribinė irimo deformacija, kartu mažės ir gniuždomosios zonos aukštis. Skersinio pjūvio stiprumo atveju mažesnis gniuždomosios zonos aukštis reiškia ir mažesnę šlyties jėgą, kurią gali perimti gniuždomoji betono zona (11.5 pav.).

Trečiasis veiksnys, turintis įtakos suminiam elemento įstrižojo pjūvio stiprumui, yra šlyties įtempių perdavimas per plyšio plokštumą (angl. *aggregate interlock*). Šis efektas atsiranda dėl to, kad susiformavusią plyšio plokštumą kerta betono užpildai, varžantys tiek plyšio atsivėrimą, tiek išilginį plyšio plokštumų poslinkį. Per plyšio plokštumą perduodamų šlyties įtempių dydis daugiausia priklauso nuo atsiveriančio plyšio pločio. Didėjant plyšio pločiui, perduodamų šlyties įtempių dydis mažėja. Kai konstrukcijai armuoti naudojami nedidelį tamprumo modulį turintys kompozitinės armatūros strypai, atsiveriančių plyšių plotis yra didesnis, lyginant su įprastais gelžbetoniniais elementais. Dėl to per plyšio plokštumą perduodamų šlyties įtempių dydis sumažėja.

Ketvirtasis ir svarbiausias veiksnys, vertinat įstrižojo pjūvio stiprumą, yra skersinės armatūros perduodamos jėgos. Skersinės armatūros strypai kerta atsivėrusį įstrižąjį plyšį ir efektyviai perduoda skersines jėgas per plyšio plokštumą (11.5 pav.). Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normose LST EN 1992-1-1:2005 reglamentuojama, kad tais atvejais, kai konstrukcijoje atsiveria įstrižieji plyšiai, visą skersinę jėgą turi perimti skersinės armatūros strypai. Tokiu atveju svarbiausias uždavinys – nustatyti įstrižojo plyšio projekciją į išilginę elemento ašį ir parinkti reikiamą skersinio armavimo intensyvumą. Kitaip tariant, įstrižajame pjūvyje turi būti tiek armatūros strypų, kad jie perimtų visą nagrinėjamam elemento ruožui tenkančią skersinę jėgą.

Panašūs dėsningumai taikomi naudojant ir kompozitinę armatūrą. Dėl šios armatūros fizikinių ir mechaninių savybių skirtumo, lyginant su tradiciniu plieniu, polimeriniais strypais armuotų elementų įstrižojo pjūvio stipris skaičiuojamas modifikuojant įprastajam gelžbetoniui tinkamas matematinės priklausomybės. Jos ir skaičiavimo ypatumai aptariami kitame skirsnyje.

11.4.2. Įstrižojo pjūvio stiprio skaičiavimas

Tiek tradicinių gelžbetoninių, tiek kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų įstrižojo pjūvio laikomoji galia susideda iš dviejų dedamųjų: skersinės jėgos, kurią perima betonas V_c , ir skersinės jėgos, kurią perima armatūra V_s . Šiame poskyryje skersinė jėga, kurią perima kompozitiniais strypais (išilgine ir skersine kryptimis) armuotas betonas, žymima $V_{c,f}$, o skersinė jėga, kurią perima kompozitinė armatūra, – V_f .

Pirmiausia aptarsime, kaip skaičiuojama betono, armuoto kompozitine armatūra, atlaikomos skersinės jėgos dedamoji $V_{c,f}$. Ankstesniajame skirsnyje išskirti keturi veiksniai, turintys įtakos bendrai įstrižojo pjūvio laikomajai galiai. Pirmieji trys veiksniai apibendrintai priskiriami prie betono, armuoto kompozitine armatūra, atlaikomos jėgos $V_{c,f}$ o paskutinį veiksnį – skersinės kompozitinės armatūros atlaikomą jėgą V_f vėliau panagrinėsime atskirai.

Kaip minėta, kompozitinė armatūra paprastai pasižymi mažesniu tamprumo moduliu. Dėl šios priežasties padidėja elementų įlinkiai ir plyšio pločiai, sumažėja gniuždomosios zonos aukštis. Didesnės plyšio pločio vertės sumažina per plyšio plokštumą perduodamų šlyties jėgų dydį, o dėl mažesnės gniuždomosios zonos aukščio sumažėja šlyties jėgų, perduodamų per gniuždomąjį betoną, dydis. Abu šiuos efektus galima susieti su išilginiu elemento standumu ir modifikuoti įprastam gelžbetoniui taikomą betono atlaikomos skersinės jėgos dydį:

$$\begin{aligned} V_{c,f} &= \frac{A_f E_f}{A_s E_s} V_c, \\ V_{c,f} &\leq V_c, \end{aligned} \quad (11.36)$$

čia V_c – nagrinėjamo elemento armavimą ir matmenis atitinkančio įprasto gelžbetoninio elemento betono atlaikomoji skersinė jėga įstrižajame pjūvyje; A_f ir E_f – kompozitinės armatūros (išilginės) skerspjūvio plotas ir tamprumo modulis; A_s ir E_s – plieninės armatūros (išilginės) skerspjūvio plotas ir tamprumo modulis.

Plotas A_s parenkamas toks, kad plieniniais ir kompozitiniais strypais armuotų skerspjūvių atlaikomieji momentai būtų lygūs. Kompozitiniais strypais armuoto elemento betono atlaikomosios skersinės jėgos nustatymas detalai aptartas skaičiavimo pavyzdžiuose 11.6 poskyryje.

Kai betono atlaikomosios skersinės jėgos dydis nepakankamas, reikia numatyti papildomą skersinę armatūrą. Kai skersiniam armavimui naudojami kompozitiniai strypai, skersinės armatūros perimamą jėgą V_f galima apskaičiuoti pagal tokią išraišką:

$$V_f = \frac{A_{fw} \cdot f_{fwd} \cdot d}{s}, \quad (11.37)$$

čia A_{fw} – skersinės kompozitinės armatūros skerspjūvio plotas pjūvyje; f_{fwd} – skaičiuotinis skersinės kompozitinės armatūros stipris; d – elemento naudingasis skerspjūvio aukštis; s – skersinės armatūros žingsnis.

Skaičiuotinis skersinės kompozitinės armatūros stipris f_{fwd} ribojamas, kad konstrukcijoje neatsivertų pernelyg didelių įstrižųjų plyšių. Eksperimentiškai nustatyta, kad, ribojant deformaciją skersinėje armatūroje iki 0,004 reikšmės, užtikrinamas leidžiamasis skersinių plyšių plotis. Remiantis šia sąlyga, skaičiuotinis skersinės kompozitinės armatūros stipris f_{fwd} nustatomas taikant šią išraišką:

$$f_{fwd} = 0,004 E_{fw}, \quad (11.38)$$

čia E_{fw} – skersinės kompozitinės armatūros tamprumo modulis.

Pagal (11.38) formulę apskaičiuotas leidžiamasis stipris neturi viršyti kompozitinės armatūros stiprio užlenkimo zonoje (kai gamykloje formuojamos apkabos). Lenkimo zonoje kompozitinės armatūros stipris gali būti apskaičiuotas pagal tokią priklausomybę:

$$f_{f,bent} = \left(0,05 \cdot \frac{r_b}{\varnothing} + 0,3 \right) \cdot f_{fd} \leq f_{fd}, \quad (11.39)$$

čia r_b – strypo lenkimo spindulys, pagal konstrukcinius reikalavimus minimali lenkimo spindulio reikšmė turi būti ne mažesnė kaip trys armatūros skersmenys; $\varnothing$ – armatūros skersmuo; f_{fd} – skaičiuotinis kompozitinės armatūros stipris (žr. 11.1 formulę).

Pagal konstrukcinius reikalavimus mažiausias skersinės armatūros plotas turi būti ne mažesnis kaip:

$$A_{fw,min} = 0,35 \frac{b_w s}{f_{fw}}, \quad (11.40)$$

čia b_w – elemento sienelės plotis; s – skersinės armatūros žingsnis; f_{fwd} – skaičiuotinis skersinės kompozitinės armatūros stipris (žr. 11.38 formulę).

Pagal konstrukcinius reikalavimus rekomenduojamas maksimalus skersinės armatūros žingsnis neturi viršyti $d / 2$. Tokiu atveju užtikrinama, kad įstrižąjį pjūvį kirs bent vienas skersinės armatūros strypas. Skersinės kompozitinės armatūros parinkimas detaliam nagrinėjimui skaičiavimo pavyzdžiuose 11.6 poskyryje.

11.5. Plastiškumo ir deformatyvumo indeksų sąvokos

Visos statybinės medžiagos, veikiamos išorinių apkrovų, deformuojasi. Šios deformacijos, priklausomai nuo medžiagos vidinės struktūros, gali būti tampriosios arba plastinės. Plastinės deformacijos dažnai pasireiškia esant didelėms apkrovoms, prieš medžiagos irimą. Plienai, aliuminiai ir daugelis metalų lydiniai prieš suirdami patiria ypač dideles plastines deformacijas, šis reiškinys dar vadinamas *takumu*. Kita medžiagų grupė iki pat irimo apkrovos deformuojasi tampriai ir plastinės deformacijos praktiškai nepasireiškia. Tokios medžiagos vadinamos *trapiosiomis*. Kompozitinei armatūrai naudojami angliai, stiklo ir aramido pluoštai galima laikyti idealiais trapiomis medžiagomis.

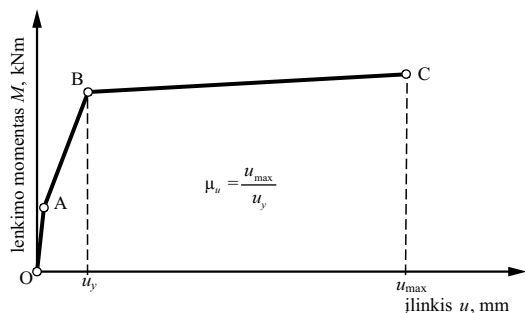
Medžiagos suyra pasiekusios tam tikrą ribinę deformacijų reikšmę. Plastiškos medžiagos prieš suirimą išsklaido didelį energijos kiekį. Tai susiję su didelėmis plastinėmis deformacijomis, kurios gali šimtus kartų viršyti tampriąsias. Pavyzdžiui, statybinio plieno ribinė irimo deformacija sudaro iki 30 %, o takumo riba pasiekama esant 0,2–0,3 % deformacijos reikšmei. Ypač plastiškų medžiagų ribinė irimo deformacija sudaro 350 % (polietileno) ar net 800 % (kaučiuko).

Statybinėse konstrukcijose didelės plastinės deformacijos įspėja apie galimą konstrukcijos suirimo pavojų, todėl galima imtis reikiamų konstrukcijų stiprinimo veiksmų. Tai ypač aktualu statiniams, eksploatuojamiems seisminėse zonose ir veikiamiems žemės drebėjimų apkrovų, kurių metu būtina išskaidyti didelį energijos kiekį.

Konstrukcijų gebėjimas patirti plastines deformacijas apibūdinamas plastiškumo indeksu μ_u (angl. *ductility factor*, *ductility index*). Plastiškumo indeksas yra bematis dydis, apibūdinantis konstrukcijos maksimalaus poslinkio $u_{\max}$ ir poslinkio prieš pasiekiant takumo ribą u_y santykį:

$$\mu_u = \frac{u_{\max}}{u_y}. \quad (11.41)$$

Plastiškumo indekso reikšmė visada didesnė už vienetą. Šis indeksas gali būti taikomas sijų kreiviams, įlinkiams, deviacijoms ar ašinės jėgos veikiamų elementų išilginiams poslinkiams apibūdinti. Grafiškai plastiškumo indekso prasmė pateikta idealizuotoje gelžbetoninės sijos apkrovos ir įlinkių diagramoje (11.6 pav.).



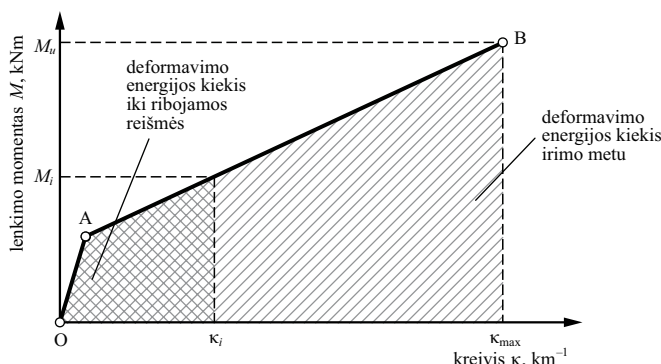
11.6 pav. Plastiškumo indekso sąvoka

Plastiškumo indeksas gali būti taikomas tik toms medžiagoms, kurios prieš irimą pasižymi didelėmis plastinėmis deformacijomis ir takumu. Iš esmės šis indeksas sukurtas plieninėms ir gelžbetoninėms konstrukcijoms. Trapiosios medžiagos nepasižymi takumu ir suyra staiga, neįspėdamos apie griūties pavojų. Todėl trapiosioms medžiagoms, tokioms kaip kompozitinė armatūra, taikomas alternatyvus dydis – *deformavimosi indeksas* (angl. *deformability index*, *deformability factor*). Šis dydis taip pat yra bematis ir siejamas su deformavimosi energijos kiekiu:

$$DF = \frac{E_{\max}}{E_i}, \quad (11.42)$$

čia $E_{\max}$ – deformavimosi energijos kiekis (momentų ir kreivių diagramos plotas), atitinkantis elemento irimą; E_i – deformavimosi energijos kiekis (momentų ir kreivių diagramos plotas) iki tam tikros ribojamos reikšmės.

Grafinė deformavimosi indekso interpretacija parodyta 11.7 pav. Čia maksimalus deformavimosi energijos kiekis $E_{\max}$ apima visą momentų ir kreivių diagramos plotą (kartu su E_i reikšme).



11.7 pav. Deformatyvumo indekso sąvoka

Ribojama kreivio ir momento reikšmė nustatoma iš tinkamumo ribinių būvių sąlygos – maksimalaus leidžiamojo įlinkio ar plyšio pločio. Tokiu būdu deformavimosi indeksas parodo tam tikrus saugius konstrukcijos įlinkius (arba kreivius, posūkius) eksploatacijos metu.

Kai kompozitiniais strypais armuoto elemento irimas prasideda dėl gniuždomojo betono, deformavimosi indeksas yra nuo 11 iki 14. Šis skaičius yra artimas perarmuotoms (kai irimas prasideda dėl gniuždomojo betono) gelžbetoninėms konstrukcijoms. Kai elemento irimas prasideda nuo tempiamųjų kompozitinių strypų, deformavimosi indeksas sudaro nuo 6 iki 7. Šioje vietoje derėtų prisiminti elemento irimo pobūdžiui apibūdinti taikomus dalinius patikimumo koeficientus γ_{Rd} (11.1 pav.) ir susieti juos su deformavimosi indeksu DF : kuo didesnis deformavimosi indeksas, tuo saugesnė konstrukcijos eksploatacija.

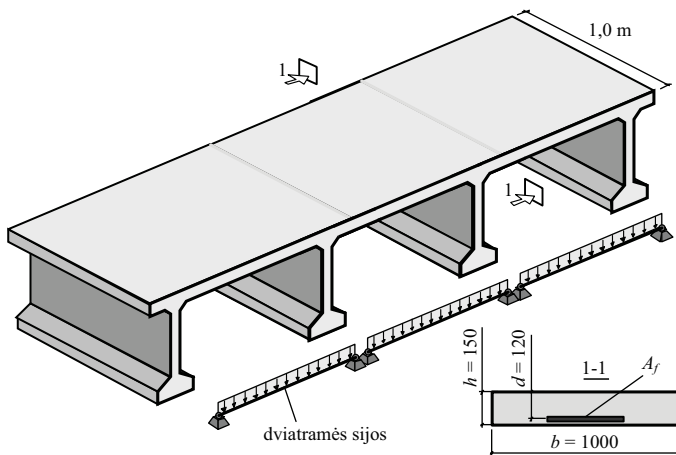
11.6. Skaičiavimo pavyzdžiai

11.1 pavyzdys

Vienas iš konstrukcinių elementų, kuriems plačiai naudojama kompozitinė armatūra, yra automobilių tiltų paklotą laikančios plokštės. Labiausiai paplitusi automobilių tiltų konstrukcija – sijinės perdangos. Šiuo atveju tilto paklotą laikanti plokštė skaičiuojama išpjovus 1 m pločio ruožą skersine tilto kryptimi, kaip parodyta 11.8 pav.

Projektuojamo tilto betono klasė C45/55. Charakteristinis gniuždomasis betono stipris $f_{ck} = 45$ MPa, skaičiuotinis gniuždomasis betono stipris $f_{cd} = 27$ MPa, ribinė

11.8 pav. Tilto paklotą laikinės plokštės skaičiuojamoji schema



gniuždomoji betono irimo deformacija $\varepsilon_{cu} = 3500 \cdot 10^{-6}$. Paklotui armuoti naudojami *Schöck ComBAR* stiklo pluošto strypai. Gamintojo deklaruojamas kompozitinio strypo charakteristinis tempiamasis stipris $f_{fk} = 1000$ MPa, tamprumo modulis $E_f = 60$ GPa. Gamintojo pateikiamas medžiagos dalinis patikimumo koeficientas $\gamma_m = 1,3$, todėl skaičiuotinis trumpalaikis tempiamasis stipris:

$$f_{fd}^* = \frac{f_{fk}}{\gamma_m} = \frac{1000}{1,3} = 769 \text{ MPa}.$$

Gamintojo pateikiamas skaičiuotinis, ilgalaikis, kompozitinės (stiklo pluošto) armatūros stipris $f_{fd} = 445$ MPa. Galime įvertinti gamintojo taikomą eksploatacinę aplinką ir ilgalaikius efektus įvertinantį koeficientą η (žr. 11.1 formulę):

$$\eta = \frac{f_{fd}}{f_{fd}^*} = \frac{445}{769} = 0,58.$$

Apskaičiuosime reikiamą tempiamosios armatūros kiekį, kai: 1) paklotą veikiantis išorinis skaičiuotinis lenkiamasis momentas $M_{Ed} = 30$ kNm; 2) $M_{Ed} = 70$ kNm. Atlikę normalinio pjūvio laikomosios galios skaičiavimus, patikrinsime plokštės stiprumą įstrižajame pjūvyje, veikiant $V_{Ed} = 20$ kN skersinei jėgai.

Pirmasis atvejis, kai $M_{Ed} = 30$ kNm

Iš anksto nėra žinoma, koks bus skerspjūvio suirimo pobūdis ir kokį dalinį patikimumo koeficientą γ_{Rd} (11.1 pav.) reikės taikyti. Todėl tikslinga apskaičiuoti skerspjūvio laikomąją galią, kai kompozitinio armavimo koeficientas yra lygus subalansuotajam $\rho_f = \rho_{f,bal}$. Tokiu atveju elemento skerspjūvyje tiek tempiamoji armatūra, tiek gniuždomasis betonas pasiekia ribines irimo deformacijas. Gniuždomojo betono ribinių irimo deformacijų ε_{cu} reikšmės pateiktos LST EN 1992-1-1:2005 projektavimo normose. Ribinės tempiamosios armatūros deformacijos apskaičiuojamos pagal

gamintojo pateikiamas armatūros charakteristikas:

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fd}}{E_f} = \frac{445 \cdot 10^6}{60 \cdot 10^9} = 7417 \cdot 10^{-6}.$$

Pagal (11.17) formulę apskaičiuojamas kompozitinės armatūros subalansuoto armavimo koeficientas:

$$\rho_{f,bal} = \frac{\lambda \eta_c f_{cd}}{f_{fd}} \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fd}} \right) = \frac{0,8 \cdot 1 \cdot 27 \cdot 10^6}{445 \cdot 10^6} \left(\frac{3500}{3500 + 7417} \right) = 0,016 = 1,6 \, \%.$$

Pagal (11.9) formulę apskaičiuojamas santykinis ribinis gniuždomosios zonos aukštis:

$$\xi_{lim} = \frac{x_{cu}}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fd}} = \frac{3500}{3500 + 7417} = 0,321.$$

Jei pagal faktinį armatūros kiekį gaunamas santykinis gniuždomosios zonos aukštis $\xi = x_c / d \leq \xi_{lim}$ yra mažesnis už ribinį ξ_{lim} , tai elemento irimas prasidės nuo tempiamosios armatūros. Jei santykinis gniuždomosios zonos aukštis $\xi = x_c / d$ yra didesnis už ribinį ξ_{lim} , tai elemento irimas prasidės nuo gniuždomojo betono. Kompozitiniais strypais armuotų elementų atveju nustatyti šį irimo pobūdį yra ypač svarbu, nes nuo jo priklauso dalinio patikimumo koeficiento γ_{Rd} reikšmė (11.1 pav.).

Kai subalansuoto armavimo procentas žinomas, galima nustatyti skerspjūvio laikomąją galią. Pagal (11.19) arba (11.18) formulę apskaičiuojamas skerspjūvio atlaikomas lenkiamasis momentas:

$$\begin{aligned} M_{Rd}^* &= f_{fd} \cdot A_f \cdot \left(d - \frac{\lambda x_{cu}}{2} \right) = \\ &= 445 \cdot 10^6 \cdot 18,67 \cdot 10^{-4} \cdot \left(0,12 - \frac{0,8 \cdot 0,0385}{2} \right) = 86,9 \, \text{kNm}. \end{aligned}$$

čia A_f – kompozitinės armatūros skerspjūvio plotas, $A_f = \rho_{f,bal} \times bd$.

Apskaičiuotąjį skerspjūvio atlaikomąjį lenkiamąjį momentą papildomai reikia padalinti iš dalinio suirimo pobūdį apibūdinančio koeficiento γ_{Rd} . Kai $\rho_f = \rho_{f,bal}$ tai $\gamma_{Rd} = 2$ (11.1 pav.):

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rd}^*}{\gamma_{Rd}} = \frac{86,9}{2} = 43,5 \, \text{kNm}.$$

Galima numatyti, kad veikiant $M_{Ed} = 30 \, \text{kNm}$, reikiamas armavimo procentas ρ_f bus mažesnis už subalansuotą $\rho_{f,bal}$. Taikysime formules, apibūdinančias elemento irimą dėl tempiamosios armatūros (11.3.2 skirsnis).

Reikiamas skerspjūvio atlaikomas momentas:

$$M_{Rd}^* = M_{Rd} \cdot \gamma_{Rd} = 30 \cdot 2 = 60 \, \text{kNm}.$$

Nustatysime reikiamą armatūros kiekį, kad skerspjūvio laikomoji galia sudarytų 60 kNm. Tuo tikslu taikysime 11.24 ir 11.26 formules. (11.25) formulė išvesta patikrinamajam atvejui, kai žinomas armatūros kiekis ir ieškomas skerspjūvio atlaikomasis momentas. Šiame pavyzdyje sprendžiamas projektavimo uždavinys – žinomas lenkiamasis momentas ir ieškomas reikiamas armatūros kiekis. Nustatomas skerspjūvyje veikiantis lenkiamasis momentas (imant momentų sumą apie tempiamosios armatūros svorio centrą, 11.26 formulė):

$$\frac{1}{2} \sigma_c \cdot x_c \cdot b \cdot \left(d - \frac{x_c}{3} \right) = M_{Rd}^*.$$

Kadangi šioje formulėje yra du nežinomieji dydžiai (gniuždomosios zonos aukštis x_c ir betono įtempis σ_c), pasinaudosime 11.24 formule betono įtempiams išreikšti:

$$\sigma_c = \varepsilon_c E_c = \varepsilon_{fd} \frac{x_c}{d - x_c} E_c.$$

Įstatę betono įtempio išraišką į skerspjūvyje veikiančio lenkiamojo momento formulę gauname lygtį, kurią išsprendę randame gniuždomosios zonos aukštį:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left(\varepsilon_{fd} \cdot \frac{x_c}{d - x_c} E_c \right) \cdot x_c \cdot b \cdot \left(d - \frac{x_c}{3} \right) &= M_{Rd}^*; \\ \frac{1}{2} \left(7417 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{x_c}{0,12 - x_c} \cdot 36 \cdot 10^9 \right) \cdot x_c \cdot 1 \cdot \left(0,12 - \frac{x_c}{3} \right) &= 60 \cdot 10^3; \\ x_c &= 0,0199 \text{ m.} \end{aligned}$$

Reikiamas tempiamosios armatūros kiekis randamas pertvarkius (11.22) formulę (iš horizontaliųjų jėgų pusiausvyros sąlygos):

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sigma_c \cdot x_c \cdot b &= A_f \cdot f_{fd} \Rightarrow A_f = \frac{\sigma_c \cdot x_c \cdot b}{2 f_{fd}} = \frac{\varepsilon_{fd} \left(\frac{x_c}{d - x_c} \right) E_c \cdot x_c \cdot b}{2 f_{fd}}; \\ A_f &= \frac{\varepsilon_{fd} \left(\frac{x_c}{d - x_c} \right) E_c \cdot x_c \cdot b}{2 f_{fd}} = \frac{7417 \cdot 10^{-6} \left(\frac{0,0199}{0,12 - 0,0199} \right) 36 \cdot 10^9 \cdot 0,0199 \cdot 1}{2 \cdot 445 \cdot 10^6} = \\ &= 11,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2. \end{aligned}$$

Tilto paklotui parinksime 10×Ø14 mm strypų, juos išdėstysime kas 100 mm. Bendras kompozitinių strypų skerspjūvio plotas $A_f = 15,39 \text{ cm}^2$. Patikrinamas skerspjūvio faktinis armavimo procentas:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{15,39 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 0,12} = 0,013 = 1,3 \, \%.$$

Kadangi $\rho_f = 1,3 \% < \rho_{f,bal} = 1,6 \%$, elementui bus taikomas dalinis patikimumo koeficientas $\gamma_{Rd} = 2$. Žinodami faktinį skerspjūvio armavimą, pagal (11.25) formulę patiksliname gniuždomosios zonos aukštį:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \varepsilon_{fd} \frac{x_c}{d - x_c} E_c \cdot x_c \cdot b &= A_f \cdot f_{fd}; \\ \frac{1}{2} \cdot 7417 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{x_c}{0,12 - x_c} \cdot 36 \cdot 10^9 \cdot x_c \cdot 1 &= 15,39 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot 10^6; \\ x_c &= 0,0224 \text{ m.} \end{aligned}$$

Pagal (11.27) arba (11.26) formulę patikrinamas skerspjūvio atlaikomasis lenkiamasis momentas:

$$M_{Rd}^* = A_f \cdot f_{fd} \cdot \left(d - \frac{x_c}{3} \right) = 15,39 \cdot 10^{-4} \cdot 445 \cdot 10^6 \cdot \left(0,12 - \frac{0,0224}{3} \right) = 77,1 \text{ kNm.}$$

Pritaikius dalinį patikimumo koeficientą elemento irimo pobūdžiui įvertinti γ_{Rd} :

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rd}^*}{\gamma_{Rd}} = \frac{77,1}{2} = 38,6 \text{ kNm.}$$

Kadangi $M_{Rd} = 38,5 \text{ kNm} > M_{Ed} = 30 \text{ kNm}$, skerspjūvio stiprumas pakankamas.

Antrasis atvejis, kai $M_{Ed} = 70 \text{ kNm}$

Šiuo atveju galima numatyti, kad elemento irimas prasidės nuo gniuždomojo betono, nes subalansuoto armavimo procento skerspjūvio atlaikomasis lenkiamasis momentas $M_{Rd} = 43,5 \text{ kNm}$. Vadinas, taikysime dalinį patikimumo koeficientą elemento irimo pobūdžiui įvertinti $\gamma_{Rd} = 1,4$. Reikiamas skerspjūvio atlaikomasis lenkiamasis momentas:

$$M_{Rd}^* = M_{Rd} \cdot \gamma_{Rd} = 70 \cdot 1,4 = 98 \text{ kNm.}$$

Apskaičiuosime armatūros kiekį, atitinkantį skerspjūvio atlaikomąjį momentą $M_{Rd}^* = 98 \text{ kNm}$. Pagal (11.34) formulę randame gniuždomosios zonos aukštį:

$$\begin{aligned} \eta f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b \cdot \left(d - \frac{\lambda x_{cu}}{2} \right) &= M_{Rd}^*, \\ 1 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot 0,8 x_{cu} \cdot 1 \cdot \left(0,12 - \frac{0,8 x_{cu}}{2} \right) &= 98 \cdot 10^3, \\ x_{cu} &= 0,0443 \text{ m.} \end{aligned}$$

Iš horizontaliųjų jėgų pusiausvyros sąlygos, pertvarkius (11.33) formulę, randamas reikiamas kompozitinės armatūros skerspjūvio plotas:

$$\eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b = A_f \cdot \varepsilon_{cu} \frac{d - x_{cu}}{x_{cu}} E_f \Rightarrow A_f = \frac{\eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b}{\varepsilon_{cu} \frac{d - x_{cu}}{x_{cu}} E_f},$$

$$A_f = \frac{\eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b}{\varepsilon_{cu} \frac{d - x_{cu}}{x_{cu}} E_f} = \frac{1 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 0,0443 \cdot 1}{3500 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,12 - 0,0443}{0,0443} \cdot 60 \cdot 10^9} = 26,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Parenkami $11 \times \varnothing 18$ mm strypų, kurių $A_f = 28,0 \text{ cm}^2$. Įstačius faktinį armatūros skerspjūvio plotą į horizontaliųjų jėgų pusiausvyros lygtį (11.33), patikslinamas gniuždomosios zonos aukštis:

$$\begin{aligned} \eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b &= A_f \cdot \varepsilon_{cu} \frac{d - x_{cu}}{x_{cu}} E_f, \\ 1 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot x_{cu} \cdot 1 &= 28 \cdot 10^{-4} \cdot 3500 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,12 - x_{cu}}{x_{cu}} \cdot 60 \cdot 10^9, \\ x_{cu} &= 0,0451 \text{ m}. \end{aligned}$$

Pagal (11.34) formulę apskaičiuojamas skerspjūvio atlaikomasis lenkiamasis momentas:

$$\begin{aligned} M_{Rd}^* &= \eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b \cdot \left(d - \frac{\lambda x_{cu}}{2} \right) = \\ &= 1 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 0,0451 \cdot 1 \cdot \left(0,12 - \frac{0,8 \cdot 0,451}{2} \right) = 99,4 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Pritaikius dalinį patikimumo koeficientą, kuris įvertina elemento suirimo pobūdį, γ_{Rd} :

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rd}^*}{\gamma_{Rd}} = \frac{99,4}{1,4} = 71,0 \text{ kNm}.$$

Kadangi $M_{Rd} = 71,0 \text{ kNm} > M_{Ed} = 70 \text{ kNm}$, skerspjūvio laikomoji galia pakankama.

Plokštės įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas

Patikrinsime tilto paklotą laikančios plokštės stiprumą įstrižajame pjūvyje. Pagal (11.36) formulę apskaičiuosime betono atlaikomąją skersinę jėgą, kai elementas armuotas kompozitiniais strypais:

$$V_{c,f} = \frac{A_f \cdot E_f}{A_s \cdot E_s} \cdot V_c.$$

Pirmiausia randame analogiško plieniniais strypais armuoto elemento betono atlaikomąją skersinę jėgą V_c . Pasinaudosime LST EN 1992-1-1:2005 projektavimo normų siūloma išraiška, kai, skaičiuojant betono atlaikomąją skersinę jėgą, nevertinama išilginio armavimo įtaka:

$$\begin{aligned} k &= 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2; \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{120}} = 2,29; \quad \Rightarrow \quad k = 2; \\ \nu_{\min} &= 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,035 \cdot 2^{3/2} \cdot 45^{1/2} = 0,664 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

Apskaičiuotasis dydis v_m parodo vidutinius pjūvio atlaikomus šlyties įtempius. Padauginę šiuos įtempius iš pjūvio ploto randame betono atlaikomąją jėgą:

$$V_c = (v_m + k_1 \cdot \sigma_{cp}) b_w d = (0,664 + 0,15 \cdot 0) \cdot 1 \cdot 0,12 = 79,7 \text{ kN}.$$

Šioje formulėje σ_{cp} apibūdina išankstinių įtempių poveikį. Elementų be išankstinio įtempimo $\sigma_{cp} = 0$.

Įvertinkime betono atlaikomą skersinę jėgą pagal JAV projektavimo normų ACI 318-11 siūlomą formulę:

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_{cd}} \cdot b_w d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{27} \cdot 1 \cdot 0,12 = 104 \text{ kN}.$$

Galime pastebėti aiškų LST EN 1992-1-1:2005 ir ACI 318-11 formulių panašumą. Pagal ACI 318-11 projektavimo normas apskaičiuotoji betono atlaikoma jėga yra apie 20 % didesnė, nes taikomi skirtingi koeficientai. Toliau naudosime LST EN 1992-1-1:2005 normose siūlomą metodiką.

Apskaičiuotąją betono atlaikomą jėgą reikia dauginti iš kompozitinės ir plieninės armatūros ašinių standumų santykio. Tam reikia rasti tokį išilginės plieninės armatūros skerspjūvio plotą, kad skerspjūvio laikomoji galia sudarytų 98 kNm. Pasinaudoję (11.34) formule apskaičiuojame skerspjūvio gniuždomosios zonos aukštį:

$$\begin{aligned} \eta f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b \cdot \left(d - \frac{\lambda x_{cu}}{2} \right) &= M_{Rd}^*; \\ 1 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot 0,8 x_{cu} \cdot 1 \cdot \left(0,12 - \frac{0,8 x_{cu}}{2} \right) &= 99,4 \cdot 10^3; \\ x_{cu} &= 0,0451 \text{ m}. \end{aligned}$$

Gniuždomosios zonos aukštis gaunamas toks pats kaip ir kompozitinės armatūros atveju (nes ši lygtis užrašyta tempiamosios armatūros atžvilgiu). Pertvarkę (11.30) pusiausvyros sąlygą ir imdami skaičiuotinį plieno stiprį $f_{yd} = 348 \text{ MPa}$, randame reikiamą plieninės armatūros skerspjūvio plotą:

$$\begin{aligned} \eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b &= A_s \cdot f_{yd}; \\ \Downarrow \\ A_s &= \frac{\eta_c f_{cd} \lambda x_{cu} b}{f_{yd}} = \frac{1 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 0,0451 \cdot 1}{348 \cdot 10^6} = 28,0 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

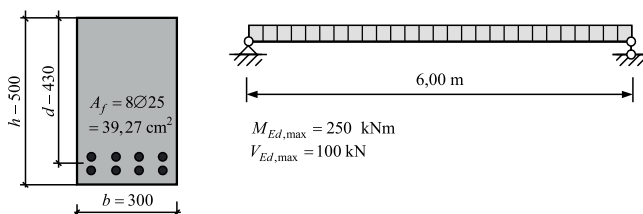
Taikant plieno tamprumo modulį $E_s = 200 \text{ GPa}$, pagal (11.36) formulę apskaičiuojamas ašinių standumų santykis ir kompozitiniais strypais armuoto tilto paklotą laikančiosios plokštės betono atlaikomoji skersinė jėga:

$$V_{c,f} = \frac{A_f E_f}{A_s E_s} V_c = \frac{28 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \cdot 10^9}{28 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^9} \cdot 79,7 \cdot 10^3 = 23,9 \text{ kN}.$$

Kadangi $V_{cf} = 23,9 \text{ kN} > V_{Ed} = 20 \text{ kN}$, skerspjūvio stiprumas pakankamas. Čia dar kartą reikia atkreipti dėmesį, kad kompozitiniais strypais armuotų elementų atveju netinka klasikinių gelžbetoninių konstrukcijų įstrižojo pjūvio stiprio nustatymo formulės. Dėl mažesnio ašinio standumo kompozitiniais strypais armuoto elemento betono atlaikomoji skersinė jėga yra kelis kartus mažesnė nei analogiško plieniniais strypais armuoto elemento. Kitame skaičiavimo pavyzdyje nagrinėsime atvejį, kai skersinė armatūra yra reikalinga.

11.2 pavyzdys

Reikia patikrinti dvitramės sijos normalinio pjūvio stiprį ir užtikrinti sijos laikomąją galią įstrižajame pjūvyje, veikiant $M_{Ed} = 250 \text{ kNm}$ skaičiuotiniam lenkimo momentui ir $V_{Ed} = 100 \text{ kN}$ skersinei jėgai. Sijos skaičiavimo schema ir skerspjūvis pateikti 11.9 pav.



11.9 pav. Sijos skaičiuojamoji schema

Sijos medžiagų charakteristikos tokios pačios kaip ir ankstesniame pavyzdyje nagrinėtos tilto paklotą laikančios plokštės.

Pirmiausia patikrinsime sijos stiprumą normaliniame pjūvyje. Apskaičiuojame kompozitinės armatūros armavimo procentą:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{39,27 \cdot 10^{-4}}{0,3 \cdot 0,43} = 0,030 = 3 \, \%.$$

Apskaičiuojame subalansuotą kompozitinės armatūros armavimo procentą:

$$\rho_{f,bal} = \frac{\lambda \eta_c f_{cd}}{f_{fd}} \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fd}} \right) = \frac{0,8 \cdot 1 \cdot 27 \cdot 10^6}{445 \cdot 10^6} \left(\frac{3500}{3500 + 7417} \right) = 0,016 = 1,6 \, \%.$$

Kadangi $\rho_f > 1,4\rho_{f,bal}$ sijos irimas prasidės nuo gniuždomojo betono ir taikysime dalinį patikimumo koeficientą $\gamma_{Rd} = 1,4$, kuriuo įvertinamas elemento irimo pobūdis.

Pagal (11.33) formulę apskaičiuojamas gniuždomosios zonos aukštis:

$$\eta_c f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b = A_f \cdot \varepsilon_{cu} \frac{d - x_{cu}}{x_{cu}} E_f,$$

$$1 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot 0,8 x_{cu} \cdot 0,3 = 39,27 \cdot 10^{-4} \cdot 3500 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,43 - x_{cu}}{x_{cu}} \cdot 60 \cdot 10^9,$$

$$x_{cu} = 0,179 \text{ m}.$$

Pagal (11.34) formulę apskaičiuojamas skerspjūvio atlaikomasis lenkiamasis momentas:

$$M_{Rd}^* = \eta f_{cd} \cdot \lambda x_{cu} \cdot b \cdot \left(d - \frac{\lambda x_{cu}}{2} \right) =$$

$$= 1 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 0,179 \cdot 0,43 \cdot \left(0,43 - \frac{0,8 \cdot 0,179}{2} \right) = 415,3 \text{ kNm}.$$

Pritaikius dalinį patikimumo koeficientą, kuris įvertina elemento suirimo pobūdį, γ_{Rd} :

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rd}^*}{\gamma_{Rd}} = \frac{415,3}{1,4} = 297 \text{ kNm}.$$

Kadangi $M_{Rd} = 297,0 \text{ kNm} > M_{Ed} = 250 \text{ kNm}$, skerspjūvio stiprumas pakankamas.

Tikrinamas sijos stiprumas įstrižajame pjūvyje. Apskaičiuojama betono atlaikoma skersinė jėga V_c :

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2; \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{430}} = 1,68,$$

$$\nu_m = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,035 \cdot 1,68^{3/2} \cdot 45^{1/2} = 0,512 \text{ MPa},$$

$$V_c = (\nu_m + k_1 \cdot \sigma_{cp}) b_w d = (0,512 + 0,15 \cdot 0) \cdot 0,3 \cdot 0,43 = 66,1 \text{ kN}.$$

Apskaičiuotąją betono atlaikomąją skersinę jėgą reikia dauginti iš kompozitinės ir plieninės armatūros ašinių standumų santykio. Tuo tikslu pagal (11.34) ir (11.30) formules (analogiškai pirmajam pavyzdžiui) randamas betono gniuždomosios zonos aukštis x_{cu} ir toks išilginės plieninės armatūros kiekis, kad skerspjūvio laikomoji galia sudarytų 415,3 kNm: $x_{cu} = 0,179 \text{ m}$ ir $A_s = 33,3 \text{ cm}^2$. Šiuo atveju plieninės armatūros skerspjūvio plotas gaunamas mažesnis negu kompozitinės, nes kompozitinis elementas yra perarmuotas, todėl įtempiai armatūroje tampa mažesni už jos tempiamąjį stiprį. Galima nesunkiai patikrinti, kad nagrinėjamojo elemento atveju įtempiai kompozitinėje armatūroje sudaro $\sigma_f = 295 \text{ MPa}$.

Pagal (11.36) formulę apskaičiuojamas ašinių standumų santykis, ir kompozitiniais strypais armuotos sijos betono atlaikomoji skersinė jėga:

$$V_{c,f} = \frac{A_f E_f}{A_s E_s} V_c = \frac{39,27 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \cdot 10^9}{33,3 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^9} \cdot 66,1 \cdot 10^3 = 23,4 \text{ kN}.$$

Kadangi $V_{c,f} = 23,4 \text{ kN} < V_{Ed} = 100 \text{ kN}$, skerspjūvio stiprumas nepakankamas, turi būti numatytas skersinis elemento armavimas. Skersinę kompozitinę armatūrą parinksime taip, kad ji perimtų visą elemento ruožui tenkančią skersinę jėgą. Iš deformacijų ribojimo sąlygos pagal (11.38) formulę apskaičiuojami leidžiamieji įtempiai kompozitinėje armatūroje:

$$f_{fv} = 0,004 E_f = 0,004 \cdot 60 \cdot 10^9 = 240 \text{ MPa}.$$

Skersiniam armavimui taikomos gamykloje suformuotos apkabos, kurių skersmuo $\varnothing = 10$ mm, o lenkimo spindulys sudaro $r_b = 3\varnothing$. Patikrinamas armatūros stiprumas ties lenkimo vieta:

$$f_{f,bent} = \left(0,05 \cdot \frac{r_b}{\varnothing} + 0,3\right) \cdot f_{fd} = \left(0,05 \cdot \frac{30}{10} + 0,3\right) \cdot 445 \cdot 10^6 = 200 \text{ MPa}.$$

Toliau skaičiuoti naudosime mažesnijį iš apskaičiuotųjų stiprių $f_{f,bent} = 200$ MPa. Galime apskaičiuoti vieno skersiniam armavimui naudojamo kompozitinio strypo atlaikomąją jėgą:

$$N_f = A_f \cdot f_{f,bent} = 0,785 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 = 15,7 \text{ kN}.$$

Kadangi atlanką sudaro du tokie strypai, tai viena atlanka gali perimti $2N_f = 31,4$ kN jėgą. Vadinasi, visai skersinei jėgai $V_{Ed} = 100$ kN perimti reikės keturių atlankų. Pagal (11.37) formulę atlankos turi tilpti bendrajame ilgyje d . Nagrinėjamos sijos naudingasis aukštis sudaro $d = 0,43$ m, todėl atlankų žingsnis turi būti ne didesnis kaip $d / 4 = 0,11$ m. Parenkame skersinio armavimo žingsnį $s = 0,1$ m ir pagal (11.37) formulę patikriname sijos stiprumą įstrižajame pjūvyje:

$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fv} \cdot d}{s} = \frac{2 \cdot 0,785 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 0,43}{0,1} = 135,2 \text{ kN}.$$

Kadangi $V_f = 135,3 \text{ kN} > V_{Ed} = 100 \text{ kN}$, skerspjuvio stiprumas pakankamas.

11.7. Skyriaus apibendrinimas

Skaičiuojant kompozitiniais strypais armuotų elementų stiprį, taikomos modifikuotos įprastų gelžbetoninių konstrukcijų skaičiavimo formulės. Dėl fizikinių ir mechaninių kompozitinės armatūros savybių skirtumo, lyginant su tradiciniu plienu, būtina atsižvelgti į kelis ypač svarbius aspektus:

- Kompozitinė armatūra yra beveik idealiai trapi medžiaga, todėl prieš jos irtį nepasireiškia pastebimų plastinių deformacijų. Dėl šios priežasties kompozitiniais strypais armuoti elementai yra specialiai perarmuojami, kad irimas prasidėtų dėl gniuždomojo betono. Irimas dėl gniuždomojo betono yra laipsniškesnis, saugesnis ir lengviau prognozuojamas, lyginant su staigiu kompozitinės armatūros suirimu. Irimo pobūdžiams atskirti naudojami papildomi daliniai patikimumo koeficientai, kurie nėra taikomi projektuojant įprastas gelžbetonines konstrukcijas.
- Kompozitinės armatūros ilgalaikis stipris gali būti kelis kartus mažesnis negu trumpalaikis. Projektuojant kompozitiniais strypais armuotas konstrukcijas ypatingą dėmesį reikia skirti ilgalaikiam skaičiuotiniam armatūros stipriui įvertinti.
- Dėl sudėties ypatumų kompozitinė armatūra blogai priešinasi gniuždymui, todėl jos stipris gniuždomojoje betono zonoje nevertinamas. Kompozitinė ar-

matūra yra neatspari kirpimui skersai pluošto. Dėl šios priežasties sumažėja elementų laikomoji galia įstrižajame pjūvyje.

- Lyginant su plienu, kompozitinės armatūros tamprumo modulis mažesnis. Tai tampa svarbiu veiksniu skaičiuojant elementų įstrižojo pjūvio stiprumą. Dėl mažesnio elemento ašinio standumo betonas perima mažesnę skersinę jėgą.

Kontroliniai klausimai

1. Apibūdinkite įprastų gelžbetoninių konstrukcijų galimus irimo atvejus. Koks irimo atvejis realiose konstrukcijose yra labiau pageidautinas?
2. Kuo kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų irimas skiriasi nuo įprastų gelžbetoninių konstrukcijų?
3. Kaip suyra kompozitiniais strypais armuotas elementas esant subalansuotam armavimo procentui? Kaip pasikeičia elemento irimo pobūdis, kai armavimo procentas tampa didesnis arba mažesnis už subalansuotąjį?
4. Kokie išskiriami keturi pagrindiniai veiksniai, turintys įtakos elemento įstrižojo pjūvio stiprumui? Kokią įtaką šiems veiksniams turi kompozitinės armatūros naudojimas?
5. Apibūdinkite plastiškumo ir deformatyvumo indeksų sąvokas. Kuo jos svarbios eksploatuojant armuotojo betono konstrukcijas?

Uždaviniai

1. Apskaičiuokite 11.2 pavyzdyje nagrinėtos sijos skerspjuvio atlaikomąjį lenkiamąjį momentą esant subalansuotam armavimo procentui.
2. Apskaičiuokite 11.2 pavyzdyje nagrinėtos sijos reikiamą armatūros kiekį veikiant $M_{Ed} = 200$ kNm skaičiuotiniam lenkimo momentui.
3. Apskaičiuokite 11.2 pavyzdyje nagrinėtos sijos įstrižojo pjūvio stiprį, kai armatūros atlankos yra 8 mm skersmens ir išdėstytos kas 80 mm.

Atsakymai

1. $M_{Rd}^* = 335$ kNm; $M_{Rd} = 168$ kNm.
2. $A_f = 12,2$ cm² ($M_{Rd}^* = 280$ kNm; $M_{Rd} = 200$ kNm).
3. $V_f = 108,3$ kN.

Rekomenduojamoji literatūra

- ACI 318-11: *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. 2011. Michigan: American Concrete Institute. 503 p. ISBN 9780870317446.
- ACI 440.1R-06: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. 2006. Michigan: American Concrete Institute. 44 p. ISBN 9780870312106.
- CNR-DT 203/2006. *Guide for Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. 2007.
- FRP reinforcement in RC structures – *Bulletin No. 40*. 2007. Lausanne, Switzerland: The International Federation for Structural Concrete (FIB). 160 p. ISBN 9782883940802.
- GangaRao, H. V. S.; Taly, N.; Vijay, P. V. 2006. *Reinforced Concrete Design with FRP Composites* USA: CRC Press. 400 p. ISBN 9780824758295.
- JCSE, *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*. 1997. Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan.
- LST EN 1992-1-1:2005. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės* [Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings]. 2007. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 232 p.

12. KOMPOZITINIAIS STRYPAIS ARMUOTŲ KONSTRUKCIJŲ PROJEKTAVIMAS: TINKAMUMO RIBINIS BŪVIS

12.1. Įžanga

Visų statybinių konstrukcijų patikimumas, ilgaamžiškumas ir sauga priklauso nuo ribiniams būviams nustatyti taikomų skaičiavimo metodų adekvatumo. Tiek plieniniais, tiek kompozitiniais strypais armuoto betono konstrukcijų saugos ribinio būvio skaičiavimai paprastai nesukelia didesnių sunkumų, nes juose dažniausiai taikomi fundamentiniai medžiagų mechanikos principai ir prielaidos. Tinkamumo ribiniam būviui (deformacijoms, įlinkiams, plyšio pločiui) skaičiuoti taikomų algoritmų sudėtingumas priklauso nuo konstrukciją sudarančių medžiagų deformacinių savybių. Šiuo požiūriu plieniniais ar kompozitiniais strypais armuotos betoninės konstrukcijos užima išskirtinę vietą tarp kitų dažniausiai naudojamų (plieninių, medinių ar aliuminių) konstrukcijų. Pažymėtina, kad daugeliui inžinierių projektuotojų armuotųjų betoninių konstrukcijų tikrinimas tinkamumo ribinio būvio reikalavimams yra tarsi „juodoji dėžė“, kurią atidarius kyla daugiau klausimų negu randama atsakymų. Taikant skirtingus metodus, taip pat ir adaptuotus įvairių šalių projektavimo normose, naudojamos tarpusavyje nesusijusios įlinkių (kreivių) ir plyšių pločių apskaičiavimo priklausomybės. Minėtų konstrukcijų standumo ir pleišėtumo skaičiavimas yra komplikotas dėl sudėtingos betono kaip kompozitinės medžiagos struktūros ir jo sąveikos su tempimo įtempius perimančiais armatūros strypais. Sąveikos zonos modeliavimas dar labiau komplikavosi betoniniams elementams armuoti pradėjus naudoti kompozitinės armatūros strypus. Ši armatūra labai pagerina eksploatacines betoninių elementų savybes, tačiau savo ruožtu įneša papildomų nežinomųjų, kurie atsiranda dėl šios armatūros savybių skirtumų, lyginant su įprastąja plienine armatūra.

Mechaninės polimerinių strypų savybės priklauso nuo strypų gamybai naudojamo polimerinio mišinio tipo, pluošto tipo ir jo tūrio dalies strype. Polimerinė armatūra pasižymi dideliu tempiamuoju stipriu ir mažu tamprumo moduliui, todėl tinkamumo ribinis būvis dažniausiai tampa pagrindiniu veiksnium projektuojant šiais strypais armuotas konstrukcijas. Tinkamumo ribinio būvio tikrinimas apima *įtempių, plyšio pločio ir įlinkių* ribojimą. Pagrindinės konstrukcijų tinkamumo ribinio būvio tikrinimo sąlygos pateiktos 12.2 poskyryje.

12.2. Įtempių, plyšio pločio ir įlinkių ribojimas

Įtempių ribojimas. Įtempių pasiskirstymas kompozitiniais strypais armuoto betoninio elemento skerspjūvyje priklauso nuo daugelio parametrų: apkrovos poveikio trukmės, betono ir armatūros fizikinių bei mechaninių savybių, betono valkšnumo ir traukimosi, apkrovimo istorijos, pleišėjimo pobūdžio bei aplinkos sąlygų. Daugelis užsienio ekspertų pateikia vieningą nuomonę, kad įtempių ribojimas kompozitiniais strypais armuoto betoninio elemento skerspjūvyje veikiant trumpalaikei apkrovai gali būti nustatytas, taikant įprastiniams gelžbetoniniams elementams skirtas projektavimo normų nuostatas. Rekomenduojama, kad eksploatacijos metu įtempiai betone ir armatūroje neturėtų viršyti medžiagų tamprumo ribos, o įtempiams įvertinti gali būti taikomi klasikiniai tampaiai medžiagai tinkami medžiagų mechanikos metodai.

Įprastų gelžbetoninių konstrukcijų normose ribojami eksploatuojamo gniuždomojo betono įtempiai. Kai jie viršija tamprumo ribą, ryšys tarp betono įtempių ir deformacijų tampa netiesinis. Dėl šios priežasties betono valkšnumo poveikis ilgalaikėje apkrova veikiamo armuotojo elemento elgsenai tampa daug reikšmingesnis ir ryškesnis. Kita vertus, gniuždomieji įtempiai turi būti ribojami, kad neatsirastų išilginių plyšių. Išvardyti veiksniai turi įtakos konstrukcijų funkcionalumui ir ilgalaikiškumui. Projektavimo normose LST EN 1992-1-1:2005 maksimalūs betono įtempiai ribojami atsižvelgiant į aplinkos sąlygas bei poveikių derinį. Išilginių plyšių gali atsirasti, jei įtempių lygmuo, veikiant charakteristiniam apkrovų deriniui, viršija kritinę reikšmę. XD, XF ir XS poveikių klasių (pagal LST EN 1992-1-1:2005) aplinkos veikiamose zonose gniuždomieji įtempiai apribojami iki $k_1 f_{ck}$ reikšmės, kur rekomenduojamoji reikšmė $k_1 = 0,6$, f_{ck} – betono gniuždomojo stiprio charakteringoji reikšmė. Normose LST EN 1992-1-1:2005 reglamentuojama, kad betono valkšnumas bus tiesinėje srityje, jei įtempiai tariamai nuolatinių apkrovų veikiamajame betone yra mažesni kaip $k_2 f_{ck}$, kur rekomenduojamoji reikšmė $k_2 = 0,45$. Betono įtempiams viršijus $k_2 f_{ck}$, būtina vertinti netiesinio valkšnumo deformacijas.

Ilgalaikių ir pernelyg didelių plyšių vystymuisi gelžbetoniniame elemente išvengti bei ilgamžiškumui užtikrinti kai kurios normos riboja maksimalius įtempius tempiamosiose armatūroje. Normose LST EN 1992-1-1:2005 maksimalūs tempiamosios armatūros įtempiai, veikiant charakteristiniam apkrovų deriniui, neturi viršyti $k_3 f_{yk}$, kur rekomenduojamoji reikšmė $k_3 = 0,8$, f_{yk} – plieninės armatūros takumo ribos charakteringoji reikšmė.

Kompozitiniais strypais armuotuose elementuose armatūros tempimo įtempių lygis ribojamas dėl kitų sumetimų. Visų pirma kompozitiniai strypai, panašiai kaip ir betonas, veikiant ilgalaikiai apkrovai, deformuojasi dėl valkšnumo. Šis efektas ilgai gali lemti strypo suirimą. Iš visų polimerinių strypų tipų didžiausios valkšnumo deformacijos būdingos stiklo pluošto armatūrai.

Patikimai eksploatuojama kompozitinė armatūra yra ilgaamžė, nes strypo struktūrą sudarantys pluoštai apsaugoti polimerinėmis dervomis. Kita vertus, strypuose veikiant didelio intensyvumo įtempiams, polimerinėje matricoje susidaro mikroplyšių, kurie lemia pluoštų struktūros pokyčius. Šis veiksnys ypač svarbus stiklo pluošto armatūrai, nes pluoštus gali pažeisti betone esanti drėgmė bei šarminė aplinka.

Atsižvelgiant į šiuos veiksnys, įtempiei polimerinėje armatūroje, veikiant tariai mai nuolatinei ar ciklinei apkrovoms, turi atitikti šias sąlygas:

- $\sigma_f \leq 0,2f_{fu}$ – stiklo puošto strypams,
- $\sigma_f \leq 0,3f_{fu}$ – aramido puošto strypams,
- $\sigma_f \leq 0,55f_{fu}$ – anglies puošto strypams.

Plyšio pločio ribojimas įprastuose gelžbetoniniuose elementuose dažniausiai susijęs ne tik su estetiniais, bet ir eksploataciniais reikalavimais, siekiant užtikrinti patikimą plieninės armatūros apsaugą nuo korozijos. Atsižvelgiant į poveikio klasę, plieniniais strypais armuotų elementų maksimalus leidžiamasis plyšio plotis $w_{\max} = 0,3$ mm arba $w_{\max} = 0,4$ mm (LST EN 1992-1-1:2005).

Kompozitiniais strypais armuotuose elementuose plyšio pločio ribojimas yra mažiau konservatyvus, nes šie strypai yra ilgaamžiai ir atsparūs korozijai. Nesant specialių eksploatacinių reikalavimų, plyšio pločio ribojimas dažniausiai susijęs su estetinė konstrukcijų išvaizda. Polimerinės armatūros strypais armuotose konstrukcijose plyšio plotis neturėtų būti didesnis nei $w_{\max} = 0,5$ mm ir $w_{\max} = 0,7$ mm atitinkamai išorėje ir viduje eksploatuojamoms konstrukcijoms. Pažymėtina, kad minėta riba turėtų būti sumažinta, veikiant agresyvioms ir ypatingoms aplinkos sąlygoms bei projektuojant vandeniui nepralaidžias konstrukcijas. Šiuo atveju pleišėjimui riboti gali būti taikomos įprasto gelžbetonio projektavimo normų nuostatos. Projektuojant laikinas konstrukcijas, kurioms betono pleišėjimas nėra svarbus estetiniu požiūriu, ribinio plyšio pločio tikrinimo skaičiavimai gali būti neatliekami. Kompozitiniais strypais armuotų gelžbetoninių elementų plyšio pločio skaičiavimo algoritmai pateikiami 12.3 poskyryje.

Įlinkių ribojimas yra ne tik pagrindinė kompozitiniais strypais armuotų betoninių konstrukcijų tinkamumo ribinio būvio sąlyga, bet dažniausiai ir lemiamas veiksnys, renkantis konstrukcinio elemento matmenis ir armavimo intensyvumą. Tomis pačiomis sąlygomis, tokiomis kaip betono klasė, poveikio tipas ir veikimo trukmė, geometriniai elemento matmenys, armavimo procentas, kompozitiniais strypais armuotų betoninių elementų įlinkiai bus didesni, lyginant su įprastais gelžbetoniniais elementais. Šiuos skirtumus lemia santykinai didelis polimerinės armatūros stipris tempiant, mažas tamprumo modulis bei skirtingos armatūros ir betono sukibimo savybės.

Įlinkiai ribojami atsižvelgiant į konstrukcinio elemento svarbą, statinio tipą (pastatas, tiltas ir pan.), poveikio tipą (statinis ar dinaminis, ilgalaikis ar trumpalaikis ir pan.). Įlinkiams riboti taikomos tos pačios prielaidos kaip ir įprastiems gelžbetoniniams elementams. Apskaičiuotieji įlinkiai neturi viršyti ribinių reikšmių, kurios

nustatomos atsižvelgiant į statinio paskirtį. Konstrukcijų išvaizda ir funkcionalumas gali pablogėti, jei tariamai nuolatinų apkrovų veikiamų sijų ar plokščių įlinkiai viršys $L/250$, čia L – elemento tarpatramio ilgis. Papildomai gali būti ribojami konstrukcinių elementų įlinkiai, kurie gali lemti gretimų konstrukcinių elementų ar dalių pažeidimą. Projektinėje padėtyje esančio elemento įlinkis nuo tariamai nuolatinio apkrovos poveikio neturi viršyti $L/500$. Galimos ir kitos ribinių įlinkių reikšmės – tai priklauso nuo gretimų konstrukcijų ar jų dalių jautrumo deformacijoms.

Kai kuriems inžineriniams statiniams (pvz., tiltams) įlinkiai ribojami atsižvelgiant į vartotojo komfortą arba eksploatacinės įrangos funkcionalumą. Šiuo atveju konstrukcinių elementų įlinkiai apskaičiuojami nuo dominuojančio kintamojo poveikio, o ribinis įlinkis reglamentuojamas atitinkamų projektavimo normų nuostatomis.

Armutojo betono konstrukcijų atitiktis ribinio įlinkio reikalavimui gali būti derinama ribojant elemento tarpatramio ilgio ir skerspjūvio aukščio santykį L/h . Taikant šią nuostatą tarama, kad statinių konstrukcijų įlinkiai bus mažesni už minėtas ribines reikšmes, jei jų matmenys neviršys santykio L/h . Vis dėlto daugelis ekspertų pažymi, kad įprasto gelžbetonio normose reglamentuojamos santykio L/h priklausomybės negali būti tiesiogiai taikomos kompozitiniais strypais armuotų elementų analizei. Santykiui L/h apskaičiuoti gali būti taikoma toliau pateikiama priklausomybė:

$$\left(\frac{L}{h}\right)_f \leq \left(\frac{48\eta}{5K_1}\right) \cdot \left(\frac{1-k}{\varepsilon_f}\right) \cdot \left(\frac{\delta}{L}\right)_{\max}, \quad (12.1)$$

čia L – elemento ilgis; h – elemento skerspjūvio aukštis; $\eta = d/h$ – naudingojo skerspjūvio aukščio ir viso elemento skerspjūvio aukščio santykis; K_1 – atrėmimo ir apkrovimo sąlygų koeficientas: tolygiai išskirstyta apkrova apkrautos dviatramės sijos $K_1 = 1,0$, nekarpytųjų sijų $K_1 = 0,8$, kraštinių tarpatramių ir vidurinių tarpatramių $K_1 = 0,6$, gembinės sijos $K_1 = 2,4$; k – gniuždomosios zonos ir naudingojo skerspjūvio aukščio santykis, apskaičiuotas visiškai supleišėjusiam skerspjūviui pritaikius tamprias betono charakteristikas; ε_f – tempiamoji kompozitinės aramtūros deformacija nuo charakteristinio poveikių derinio tarpatramio viduryje (dviatramėms ir nekarpytosioms sijoms) arba atramoje (gembinėms sijoms); $(\delta/L)_{\max}$ – ribinė įlinkio ir tarpatramio ilgio santykio reikšmė.

Remiantis (12.1) išraiška dviatramėms, nekarpytosioms ir gembinėms plokštėms bei sijoms pasiūlytosios mažiausios skerspjūvio aukščio reikšmės pateiktos 12.1 lentelėje. Jos gautos santykį L/h padauginus iš santykio I_{eff}/I_c , naudojant ribinio įlinkio reikšmę $\delta_{lim} = L/240$ ir armavimo procentą $\rho_f = 2\rho_{f,bal}$ arba $\rho_f = 3\rho_{f,bal}$ atitinkamai plokštėms arba sijoms, čia I_{eff} – efektyvusis betono skerspjūvio ploto inercijos momentas, apskaičiuojamas pagal (12.20) priklausomybę; I_c – betono skerspjūvio ploto inercijos momentas; δ_{lim} – ribinis įlinkis; $\rho_f = A_f/bd$ – kompozitinės aramtūros armavimo procentas; $\rho_{f,bal}$ – subalansuoto armavimo procentas, apskaičiuojamas taikant (11.17) išraišką.

12.1 lentelė. Rekomenduojami mažiausi sijų ir viena linkme dirbančių plokščių storiai

Konstrukcija	Mažiausias storis, h			
	Dviatramė	Nekarpytoji, kai tarpatramis		Gembė
		kraštinis	vidurinis	
Viena kryptimi dirbančios vientiso skerspjūvio plokštės	$L/13$	$L/17$	$L/22$	$L/5,5$
Sijos	$L/10$	$L/12$	$L/16$	$L/4$

Pažymėtina, kad 12.1 lentelėje pateikti mažiausi skerspjūvio aukščiai yra rekomendacinio pobūdžio, leidžiantys parinkti preliminarinius skerspjūvio matmenis, ir ne visada užtikrina atitikimą įlinkių ribojimo reikalavimams.

12.3. Įlinkių ir normalinių plyšių pločio nustatymas

Nors pasaulyje atlikta nemažai tyrimų betono, armuoto kompozitine armatūra, srityje, pasaulyje iki šiol nėra bendrų tokių konstrukcijų projektavimą reglamentuojančių nuostatų. Kaip minėta, dėl mažo tamprumo modulio bei blogesnio betono ir armatūros sukibimo (palyginti su įprasta plienine armatūra) įprastiems gelžbetoniniams elementams taikomi projektavimo normų metodai ne visada gali būti tiesiogiai pritaikomi kompozitais armuotų betoninių konstrukcijų analizei. Teorinio pobūdžio darbuose kompozitinio armavimo įtaka betoninių elementų įtempių ir deformacijų būviui dažniausiai įvertinama empiriškai, aproksimuojant eksperimentinių tyrimų rezultatus. Šiame poskyryje pateikiami LST EN 1992-1-1:2005 ir ACI 440.1R-06 projektavimo normų metodai įlinkių ir normalinių plyšių pločiams apskaičiuoti. Papildomai pateiktas knygos autorių pasiūlytas alternatyvus įlinkių ir plyšio pločio nustatymo metodas yra pagrįstas diskretaus pleišėjimo skaičiavimo algoritmu.

12.3.1. Įlinkių ir plyšio pločio nustatymas, taikant projektavimo normų metodus

Ankstyvuojų gelžbetonio teorijos vystymosi periodu deformacijų vertinimo problemos nebuvo nagrinėtos. Pirmieji gelžbetoninių elementų standumo ir pleišėjimo vertinimo metodai buvo paremti klasikiniais medžiagų mechanikos principais. Suprantama, taip apskaičiuoti supleišėjusių gelžbetoninių konstrukcijų įlinkiai buvo mažesni už tikruosius. Vėliau, remiantis stiprumo teorija, buvo taikoma prielaida, kad skerspjūvyje žemiau neutraliosios ašies betonas neatlaiko tempimo įtempių. Visgi dar XX a. pradžioje pastebėta, kad dėl supleišėjusio tempiamojo betono tarp plyšių įtakos konstrukcijos tampa standesnės.

Betonas turi mažą tempimo stiprį, todėl jis pleišėja. Visų pirma atsiranda didieji plyšiai (angl. *major cracks*), pasireiškiantys didžiojoje elemento tempiamosios zonos dalyje. Atsiradus šiems plyšiams, gelžbetoninių elementų deformacijos gali padidėti

keletą kartų. Plyšiuose ir gretimuose pjūviuose armatūra betone praslysta, o rumbelių vietose betone atsiranda lokalių plyšių (angl. *secondary cracks*). Praslydus armatūrai, sąlyčio zonoje atsiranda tangentinių įtempių, kurie perduodami betonui. Ruožuose tarp plyšių betonas perima tempimo įtempius, o tai lemia gelžbetoninio elemento standumo padidėjimą. Šis reiškinys vadinamas tempiamojo betono elgsena tarp plyšių arba tempiamuoju sustandėjimu (angl. *tension stiffening effect*). Neteisingai įvertinus šį reiškinį, gali būti daromos didelės deformacijų apskaičiavimo paklaidos.

Įlinkių ir pleišėjimo analizę apsunkina tai, kad didieji plyšiai yra diskretūs, t. y. nutolę tam tikru atstumu, kintančiu atsižvelgiant į įvairius veiksnius (elemento skerspjūvio forma, armatūros kiekis, strypų skersmuo ir skaičius, jų paviršius ir tamprumo modulis, apsauginis sluoksnis ir kt.). Skaičiavimo neapibrėžtumus lemia labai sudėtinga armuotojo betono elgsena: skirtingos betono ir armatūros fizikinės bei mechaninės savybės, jų netiesiškumas, betono pleišėjimas, traukumas ir valkšnumas, armatūros ir betono sukibimo pažeidimai, diskretus armatūros strypų išdėstymas, mastelio faktorius ir kt. Tikslus minėtų efektų įvertinimas yra labai sudėtingas ir analiziniais inžineriniais metodais sunkiai išsprendžiamas uždavinys.

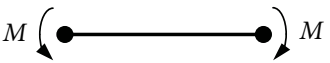
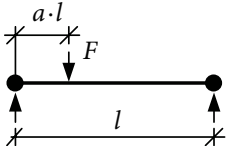
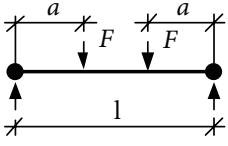
Daugelio šalių normose taikomi inžineriniai įlinkių (kreivių) ir plyšių pločių apskaičiavimo metodai, kuriuose betono ir armatūros sąveika tarp plyšių vertinama empiriniais koeficientais, gautais aproksimavus eksperimentinių tyrimų duomenis. Taikant plieninės ir polimerinės armatūros tamprumo modulių santykio koeficientą, polimeriniais strypais armuotų elementų įlinkių ir plyšių pločių skaičiavimai savo principais praktiškai nesiskiria nuo tradicinių gelžbetoninių elementų. Šiame poskyryje pateikiami LST EN 1992-1-1:2005 ir ACI 440.1R-06 projektavimo normų metodai įlinkių ir normalinių plyšių pločiams apskaičiuoti.

Statiškai išsprendžiamų lenkiamųjų elementų įlinkį δ galima apskaičiuoti taikant klasikinę medžiagų mechanikos išraišką:

$$\delta = k \cdot \kappa \cdot l^2, \quad (12.2)$$

čia k – apkrovimo ir atrėmimo sąlygas įvertinantis koeficientas (12.2 lentelė); κ – elemento kreivis pavojingajame pjūvyje; l – elemento skaičiuotinis ilgis.

12.2 lentelė. Dvitramių sijų apkrovos tipų įvertinantys koeficientai k

Apkrova	k
	0,125
	$\frac{3 - 4a^2}{48(1 - a)}$
	$\frac{1}{8} - \frac{a^2}{6 \cdot l^2}$
	$\frac{5}{48}$

LST EN 1992-1-1:2005 projektavimo normose kreiviui κ apskaičiuoti armuotajame betoniniame elemente išskiriami nesupleišjęs (I) ir visiškai supleišjęs (II) ruožai. Pirmajame ruože betonas ir armatūra yra tampri, o antrajame ruože visą tempimo jėgą atlaiko armatūra. Kreiviui nustatyti taikoma tokia interpoliacinė priklausomybė:

$$\kappa = (1 - \zeta) \cdot \kappa_I + \zeta \cdot \kappa_{II}, \quad (12.3)$$

čia κ_I ir κ_{II} – nesupleišėjusio ir visiškai supleišėjusio armuotojo elemento pjūvių kreiviai; ζ – pasiskirstymo koeficientas, kuriuo netiesiogiai įvertinama tempiamojo betono ir armatūros sąveika ruožuose tarp plyšių. Šis koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią priklausomybę:

$$\begin{cases} \zeta = 0, \text{ kai } M \leq M_{cr}, \\ \zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2, \text{ kai } M > M_{cr}, \end{cases} \quad (12.4)$$

čia M_{cr} – pleišėjimo lenkiamasis momentas armuotajame betoniniame elemente; M – lenkiamasis momentas, sukeltas išorinio poveikio nagrinėjamame pjūvyje; β – apkrovos trukmę įvertinantis koeficientas: $\beta = 1,0$, kai apkrova trumpalaikė; $\beta = 0,5$, kai apkrova ilgalaikė.

Armutojo betoninio elemento pleišėjimo lenkiamasis momentas apskaičiuojamas taikant formulę:

$$M_{cr} = \frac{f_{ct} I_{el}}{h - x_{c,el}}, \quad (12.5)$$

čia f_{ct} – betono tempiamasis stipris; I_{el} – nesupleišėjusio betono skerspjūvio ploto inercijos momentas; $x_{c,el}$ – nesupleišėjusio skerspjūvio gniuždomosios zonos aukštis; h – skerspjūvio aukštis.

Nesupleišėjusio ir supleišėjusio pjūvių kreiviai κ_I ir κ_{II} apskaičiuojami taikant klasikinę medžiagų mechanikos priklausomybę ir naudojant atitinkamo skerspjūvio lenkiamojo standumo EI reikšmes:

$$\kappa_I = \frac{M}{E_{c,eff} \cdot I_{el}}, \quad (12.6)$$

$$\kappa_{II} = \frac{M}{E_{c,eff} \cdot I_{cr}}, \quad (12.7)$$

čia $E_{c,eff}$ – efektyvus betono tamprumo modulis; I_{el} ir I_{cr} – nesupleišėjusio ir visiškai supleišėjusio betoninio skerspjūvio ploto inercijos momentai.

Efektyvusis betono tamprumo modulis apskaičiuojamas atsižvelgiant į išorinio poveikio trukmę:

$$E_{c,eff} = E_c(t_0), \text{ kai poveikis trumpalaikis,} \quad (12.8)$$

$$E_{c,eff} = \frac{E_c(t_0)}{1 + \varphi(t, t_0)}, \text{ kai poveikis ilgalaikis,} \quad (12.9)$$

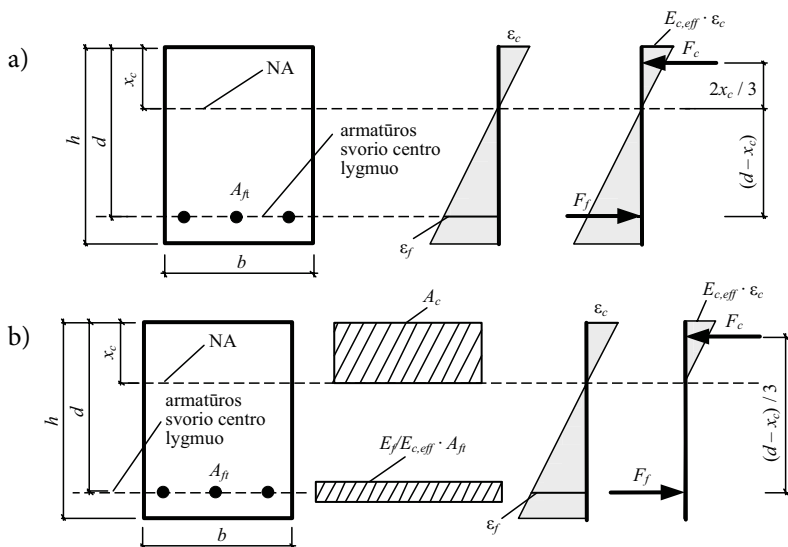
čia t_0 – betono amžius paromis apkrovimo metu; $E_c(t_0)$ – betono tamprumo modulis apkrovimo metu t_0 ; 28 parų amžiaus betono $E_c(28) = E_{cm} = 22[f_{cm}/10]^{0,3}$ MPa, čia E_{cm} – kirstinis (vidutinis) betono tamprumo modulis; f_{cm} – 28 parų amžiaus betono vidutinis gniuždomasis stipris, MPa; $\varphi(t, t_0)$ – betono valkšnumo koeficientas stebimuoju laiko momentu t ; t – betono amžius paromis nagrinėjamuoju metu.

Kompozitiniais strypais armuoto betoninio elemento nesupleišėjusio ir supleišėjusio skerspjūvio efektyvieji inercijos momentai apskaičiuojami pagal tas pačias išraiškas kaip ir gelžbetoniniams elementams (Marčiukaitis *et al.* 2007), plieninės armatūros tamprumo modulį E_s pakeitus kompozitinės armatūros tamprumo moduliu E_f . Vienpusiai armuoto stačiakampio skerspjūvio elemento (12.1 pav.) nesupleišėjusio ir supleišėjusio skerspjūvio efektyvieji inercijos momentai apskaičiuojami pagal šias priklausomybes:

$$I_{el,eff} = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} - x_{c,el} \right)^2 + A_{ft} \left(\frac{E_f}{E_{c,eff}} - 1 \right) (d - x_{c,el})^2, \quad (12.10)$$

$$I_{cr,eff} = \frac{bx_{c,cr}^3}{12} + bx_{c,cr} \left(\frac{x_{c,cr}}{2} \right)^2 + \frac{E_f}{E_{c,eff}} A_{ft} (d - x_{c,cr})^2, \quad (12.11)$$

čia b ir h – elemento skerspjūvio plotis ir aukštis; $x_{c,el}$ ir $x_{c,cr}$ – nesupleišėjusios ir visiškai supleišėjusios skerspjūvio neutralios ašies padėtis viršutinio krašto atžvilgiu; A_{ft} – tempiamosios kompozitinės armatūros skerspjūvio plotas; E_f – kompozitinės armatūros tamprumo modulis; d – naudingasis skerspjūvio aukštis.



12.1 pav. Skerspjūvių skaičiuotinės schemos: a – nesupleišėjusio; b – visiškai supleišėjusio

Betono traukumo sukeltas armuotojo betoninio elemento kreivis apskaičiuojamas taikant (12.3) formulę analogišką priklausomybę:

$$\kappa_{cs} = (1 - \zeta) \cdot \kappa_{cs,I} + \zeta \cdot \kappa_{cs,II}, \quad (12.12)$$

čia $\kappa_{cs,I}$ ir $\kappa_{cs,II}$ – betono traukumo sukelti atitinkamai nesupleišėjusio ir visiškai supleišėjusio skerspjūvio kreiviai, apskaičiuojami naudojantis išraiškomis:

$$\kappa_{cs,I} = \varepsilon_{cs}(t, t_0) \frac{E_f}{E_{c,eff}} \cdot \frac{S_{f,el}}{I_{el}}, \quad (12.13)$$

$$\kappa_{cs,II} = \varepsilon_{sc}(t, t_0) \frac{E_f}{E_{c,eff}} \cdot \frac{S_{f,cr}}{I_{cr}}, \quad (12.14)$$

čia $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ – betono laisvoji traukumo deformacija; I_{el} ir I_{cr} – nesupleišėjusio ir visiškai supleišėjusio skerspjūvio ploto inercijos momentai; $S_{f,el}$ ir $S_{f,cr}$ – kompozitinės armatūros ploto statinis momentas nesupleišėjusio ir visiškai supleišėjusio skerspjūvio svorio centro atžvilgiu vienpusiai armuotam elementui apskaičiuojamas pagal šias priklausomybes:

$$S_{f,el} = A_{f1}(d - x_{el}), \quad (12.15)$$

$$S_{f,cr} = A_{f1}(d - x_{cr}). \quad (12.16)$$

Suminis armuotojo betoninio elemento nagrinėjamojo pjūvio kreivis apskaičiuojamas įvertinus trumpalaikio bei ilgalaikio apkrovos poveikio (12.3 išraiška) ir betono traukumo (12.12 išraiška) sukeltus kreivius.

Daugelis pasaulio ekspertų pažymi, kad Europos normose pateiktos priklausomybės lenkiamųjų gelžbetoninių elementų kreiviams apskaičiuoti gali būti tiesiogiai taikomos kompozitiniais strypais armuotiems betoniniams elementams. Vis dėlto kai kurie autoriai polimeriniais strypais armuotų betoninių elementų kreiviams nuo trumpalaikio apkrovos poveikio siūlo taikyti modifikuotą interpoliacinę priklausomybę, įvertinančią kompozitinės armatūros savybes:

$$\kappa = (1 - \eta\zeta) \cdot \kappa_I + \zeta \cdot \kappa_{II}, \quad (12.17)$$

čia η – koeficientas, priklausantis nuo kompozitinės ir plieninės armatūros tamprumo modulių santykio.

Šis koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią išraišką:

$$\eta = a_1 \left[1 + 0,5 \frac{E_f}{E_s} \right], \quad (12.18)$$

čia E_f – kompozitinės armatūros tamprumo modulis; E_s – plieninės armatūros tamprumo modulis; a_1 – koeficientas, priklausantis nuo santykio ρ/ρ_b :

$$a_1 = 0,0121 \frac{\rho_f}{\rho_{f,bal}} + 0,8581, \quad (12.19)$$

čia $\rho_f = A_f / bd$ – kompozitinės armatūros armavimo procentas; $\rho_{f,bal}$ – subalansuoto armavimo procentas, apskaičiuojamas taikant (11.17) išraišką.

Taikant ACI 440.1R-06 rekomendacijas, kompozitiniais strypais armuotų elementų kreiviai nuo trumpalaikės apkrovos poveikio apskaičiuojami pagal (12.6) priklausomybę, nesupleišėjusio skerspjuvio ploto inercijos momentą I_{el} pakeitus efektyviuoju betono skerspjuvio ploto inercijos momentu I_{eff} . Efektyviajam inercijos momentui I_{eff} apskaičiuoti taikoma modifikuota D. Bransono priklausomybė:

$$I_{eff} = \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \beta_d I_c + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_c, \quad (12.20)$$

čia I_c ir I_{cr} – betoninio ir visiškai supleišėjusio skerspjuvio ploto inercijos momentai; stačiakampio skerspjuvio $I_c = bh^3 / 12$, o I_{cr} apskaičiuojamas pagal (12.11) formulę; M_{cr} – pleišėjimo lenkiamasis momentas, apskaičiuojamas pagal tokią priklausomybę:

$$M_{cr} = f_r \cdot W_c, \quad (12.21)$$

čia f_r – iš lenkimo bandymų nustatytas tempiamojo betono stipris, neįvertinant jo plastinių savybių (angl. *modulus of rupture*); W_c – betoninio skerspjuvio ploto atsparumo momentas stačiakampiui skerspjuviui $W_c = bh^2 / 6$; M – lenkiamasis momentas, sukeltas išorinės trumpalaikės apkrovos; β_d – empirinis koeficientas, įvertinantis kompozitinės armatūros savybes, apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

$$\beta_d = 0,5 \left[\frac{E_f}{E_s} + 1 \right]. \quad (12.22)$$

Gelžbetoninių elementų $\beta_d = 1$.

Betono valkšnumo ir traukumo deformacijų sukeltas įlinkių prieaugis apskaičiuojamas įlinkius nuo trumpalaikės apkrovos padauginus iš koeficiento λ . Suminis įlinkis δ_{tot} nuo trumpalaikio ir ilgalaikio apkrovos poveikio (įvertinant valkšnumą ir traukumą) apskaičiuojamas pagal šią priklausomybę:

$$\delta_{tot} = (1 + 0,6 \cdot \xi) \cdot \delta(t_0), \quad (12.23)$$

čia $\delta(t_0)$ – trumpalaikės apkrovos sukeltas armuotojo betoninio elemento įlinkis; ξ – koeficientas, priklausantis nuo apkrovos veikimo trukmės, lygus 1, 1,2, 1,4 ir 2, kai apkrovos veikimo trukmė yra atitinkamai 3, 6, 12 bei 60 ir daugiau mėnesių.

Įprastų gelžbetoninių elementų pleišetumo analizė iki šiol nėra iki galo išspręsta ir dažnai prieštaringomis prielaidomis pagrįsta problema. Ji tampa dar sudėtingesnė elementus armuojant polimeriniais strypais. Analizę apsunkina tai, kad dėl sudėtingos betono struktūros (nevienalytiškumo, vidinių defektų ir t. t.) plyšių atsiradimo vieta nėra iš anksto žinoma. Plyšio atsivėrimo plotis priklauso nuo armatūros deformacijų, betono ir armatūros sukibimo, atstumo tarp plyšių, išilginės armatūros

strypų skersmens ir armavimo koeficiento. Armuotųjų betoninių elementų pleišėjimo analizėje visus šiuos veiksnus susieti gana sudėtinga, todėl daugelis inžinerinėje praktikoje taikomų skaičiavimo metodų yra empirinio pobūdžio.

Vienodomis sąlygomis kompozitiniais strypais armuotuose betoniniuose elementuose atsivėrusių normalinių plyšių plotis yra didesnis nei įprastuose gelžbetoniniuose elementuose. Šiuos skirtumus lemia tie patys veiksniai kaip įlinkių atveju.

LST EN 1992-1-1:2005 normose plyšio plotis apibrėžiamas klasikine išraiška, priklausančia nuo armatūros ir betono deformacijų bei atstumo tarp plyšių. Ši priklausomybė gali būti taikoma tiek plieniniais, tiek kompozitiniais strypais armuotiems elementams, plieninės armatūros vidutinės deformacijas ε_{cm} pakeitus polimerinės armatūros deformacijomis ε_{fm} :

$$w = l_{cr,max} (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}), \quad (12.24)$$

čia $l_{cr,max}$ – didžiausias atstumas tarp plyšių; ε_{fm} – vidutinė tempiamosios kompozitinės armatūros deformacija; ε_{cm} – vidutinė betono deformacija ruožuose tarp plyšių.

Vidutinių armatūros ir betono deformacijų skirtumas $(\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm})$ apskaičiuojamas pagal tokią išraišką:

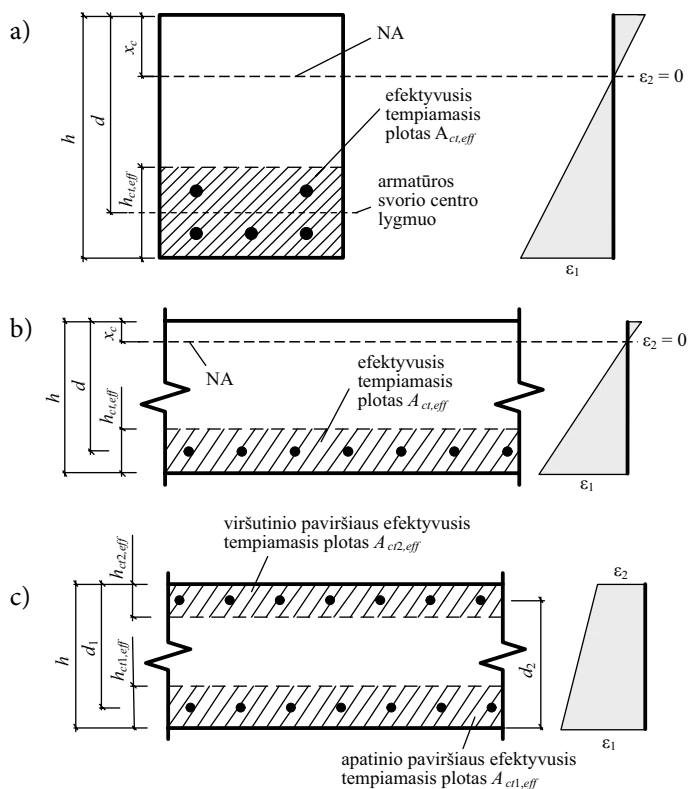
$$\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_f - k_t \frac{f_{ct}}{\rho_{eff}} (1 + n_e \rho_{eff})}{E_f} \geq 0,6 \frac{\sigma_f}{E_f}, \quad (12.25)$$

čia σ_f – įtempiai tempiamojoje kompozitinėje armatūroje darant prielaidą, kad skerspjuvis supleišėjęs; k_t – koeficientas, įvertinantis apkrovimo trukmę: $k_t = 0,6$ veikiant trumpalaikiai apkrovai; $k_t = 0,4$ veikiant ilgalaikiai apkrovai; f_{ct} – tempiamojo betono stipris; $\rho_{eff} = A_f / A_{ct,eff}$ – efektyvus armavimo koeficientas; A_f – kompozitinės armatūros skerspjuvio plotas; $A_{ct,eff}$ – efektyvusis tempiamojo betono plotas, priklausantis nuo efektyviojo tempiamojo betono aukščio $h_{ct,eff}$, kurio dydis imamas mažiausias iš reikšmių: $2,5(h-d)$, $(h-x_c)/3$ arba $h/2$ (12.2 pav.); n_e – kompozitinės armatūros ir efektyviojo betono tamprumo modulių santykis $E_f / E_{c,eff}$; E_f – kompozitinės (polimerinės) armatūros tamprumo modulis; $E_{c,eff}$ – efektyvusis betono tamprumo modulis, apskaičiuojamas pagal (12.8) arba (12.9) formules atsižvelgiant į apkrovos veikimo trukmę.

Didžiausias atstumas tarp plyšių $l_{cr,max}$ apskaičiuojamas atsižvelgiant į atstumą tarp išilginės tempiamosios armatūros strypų centrų $(a + \emptyset)$, tempiamosios armatūros skersmenį $\emptyset$ bei apsauginį sluoksnį c (5.3 pav.). Tais atvejais, kai $(a + \emptyset) \leq 5 \cdot (c + 0,5 \cdot \emptyset)$, $l_{cr,max}$ apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$l_{cr,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \emptyset / \rho_{eff}, \quad (12.26)$$

čia c – išilginės armatūros apsauginio betono sluoksnio storis; $\emptyset$ – armatūros strypo skersmuo; k_1 – koeficientas, kuriuo įvertinamas strypų sukibimas su betonu: $k_1 = 0,8$ – rumbuotųjų strypų, $k_1 = 1,6$ – lygaus paviršiaus strypų; k_2 – koeficientas, kuriuo įvertinamas deformacijų pasiskirstymo pobūdis: $k_2 = 0,5$ – lenkiamųjų elemen-



12.2 pav. Efektyvusis tempiamosios armatūros ir betono sąveikos plotas: a – sijos; b – plokštės; c – ekscentriškai tempiamo elemento

tų, $k_2 = 1,0$ – centriškai tempiamų elementų; k_3 ir k_4 – empiriniai koeficientai, kurių reikšmės 3,4 ir 0,425.

Ekscentrinio tempimo arba vietinėse zonose turėtų būti taikomos tarpinės koeficiento k_2 reikšmės, apskaičiuojamos pagal išraišką:

$$k_2 = (\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2\epsilon_1, \quad (12.27)$$

čia ϵ_1 ir ϵ_2 – didesnioji ir mažesnioji tempiamoji deformacija nagrinėjamame pjūvyje (12.2 pav., c).

Elemento skerspjūvyje yra įvairių skersmenų strypų. Skaičiuojant atstumą tarp plyšių, taikomas ekvivalentinis armatūros strypo skersmuo. Skerspjūviui, kuriame yra n_1 strypų, kurių skersmuo $\varnothing_1$, ir n_2 strypų, kurių skersmuo $\varnothing_2$, ekvivalentiniam skersmeniui apskaičiuoti taikoma tokia formulė:

$$\varnothing_{eq} = (n_1 \varnothing_1^2 + n_2 \varnothing_2^2) / (n_1 \varnothing_1 + n_2 \varnothing_2). \quad (12.28)$$

Jei atstumai tarp išilginės armatūros strypų didesni kaip $5(c + 0,5\varnothing)$ (5.3 pav.), didžiausias atstumas tarp plyšių nustatomas pagal formulę:

$$l_{cr,max} = 1,3(h - x_c). \quad (12.29)$$

Pagal ACI 440.1R-06 rekomendacijas plieniniais strypais armuotų elementų plyšio plotis apskaičiuojamas taikant tokią išraišką:

$$w = 2,2\beta\varepsilon_f\sqrt[3]{cA_f}, \quad (12.30)$$

čia $\beta = (h - x_c) / (d - x_c)$; h – skerspjūvio aukštis; d – naudingasis skerspjūvio aukštis; x_c – gniuždomosios zonos aukštis; ε_f – armatūros deformacijos; c – apsauginis betono sluoksnis; A_f – kompozitinės armatūros skerspjūvio plotas.

Kompozitiniais strypais armuotų elementų plyšio plotis pagal ACI 440.1R-06 rekomendacijas apskaičiuojamas pagal modifikuotą išraišką:

$$w = 2\beta\varepsilon_f k_b \sqrt{c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}, \quad (12.31)$$

čia $\varepsilon_f = f_f / E_f$ – kompozitinės armatūros deformacijos; f_f – kompozitinės armatūros stipris; E_f – kompozitinės armatūros tamprumo modulis; k_b – armatūros ir betono sukibtį įvertinantis koeficientas; $k_b > 1$, kai kompozitinės armatūros ir betono sukibtis yra prastesnė už plieno, kitais atvejais $k_b \leq 1$. Nesant duomenų apie kompozitinės armatūros ir betono sukibtį, rekomenduojama imti $k_b = 1,2$; s – atstumas tarp armatūros strypų.

12.3.2. Alternatyvusis įlinkių ir plyšio pločio nustatymo metodas

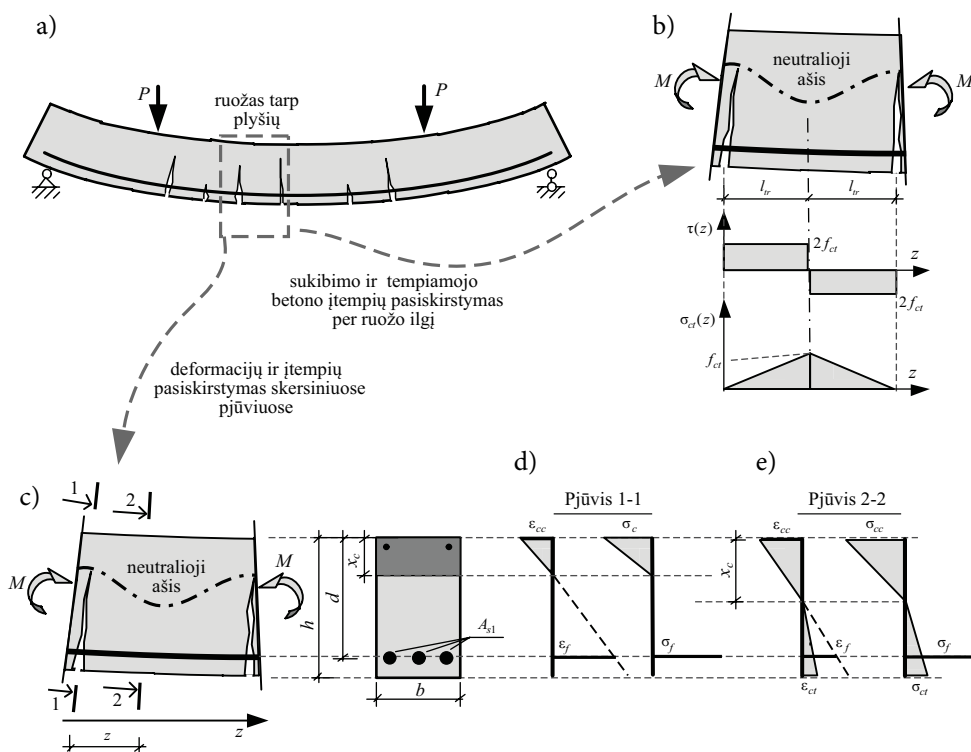
Betono pleišėjimo ir deformacijų analizė – vienas sudėtingiausių aspektų projektuojant gelžbetonines konstrukcijas. Nuo pat gelžbetonio teorijos sukūrimo pradžios iki šių dienų ieškoma adekvačių ir patikimų metodų betono deformacijų ir pleišėjimo procesui prognozuoti. Statybos inžinieriai armuotojo betono konstrukcijų įtempių ir deformacijų būvio analizei dažniausiai taiko projektavimo normų metodus. Vis dėlto jau kelis dešimtmečius visame pasaulyje kuriami ir taikomi projektavimo normų metodams alternatyvūs skaitiniai skaičiavimo algoritmai, leidžiantys įvertinti netiesines betono savybes, betono ir armatūros sąveikos ypatumus ir kitus efektus, lemiančius armuotojo betono elementų deformacijas ir pleišėjimą.

Šiame skirsnyje pateikiamas alternatyvus įlinkių ir plyšio pločio nustatymo metodas, pagrįstas diskreta pleišėjimo modeliu. Pagrindinė alternatyvaus metodo idėja – supaprastintai idealizuoti armatūros ir betono sąveiką bei ja remiantis apskaičiuoti įtempių bei deformacijų pasiskirstymą supleišėjusiame elemente. Radus armatūros ir betono deformacijų pasiskirstymą, apskaičiuojami tiek vidutinis elemento kreivis, tiek atsiveriančių plyšių plotis.

Alternatyvus metodas remiasi tokiomis skaičiuoti taikomomis prielaidomis:

1. Iki pleišėjimo apkrovos M_{cr} elementas deformuojasi tampriai. Apkrovai viršijus M_{cr} reikšmę, atsivėrę plyšiai visą elementą išilginės ašies kryptimi sudalija į atskirus ruožus, kurių ilgis l_{cr} pateka į intervalą: $l_{tr} \leq l_{cr} \leq 2l_{tr}$ (žr. 5.5.2 skirsnį). Skaičiuojant elemento įlinkį imamas vidutinis atstumas tarp plyšių $l_{cr} = 1,5l_{tr}$.

- Skaiciuojant maksimalų atsiveriančių plyšių plotį imamas didžiausias atstumas tarp plyšių $l_{cr} = 2l_{tr}$.
- Po pleišėjimo apkrovos nagrinėjamas tik vienas iš susidariusių ruožų tarp plyšių. Šis ruožas turi du charakteringuosius pjūvius: pjūvį 1–1, einantį per atsivėrusį plyšį, ir pjūvį 2–2, esantį tam tikru atstumu z nuo pjūvio 1–1 (12.3 pav., c).
 - Pjūvyje 1–1 deformacijų pasiskirstymas yra tiesinis (galioja plokščiųjų pjūvių hipotezė, žr. 12.3 pav., d).
 - Pjūvyje 2–2 gniuždomojo betono ir armatūros deformacijų pasiskirstymas išlieka tiesinis. Dėl sąveikos su armatūros strypais tempiamojo betono deformacijų pasiskirstymas yra tiesinis, tačiau kinta pagal atskirą dėsnį (12.3 pav., e).
 - Kompozitinė armatūra, tempiamasis ir gniuždomasis betonas deformuojasi tamptariai – galioja Huko dėsnis.
 - Armatūros ir betono sukibimo įtempiai yra pastovūs ir sudaro $\tau(z) = 2f_{ct}$ (12.3 pav., b).



12.3 pav. Alternatyvus įlinkių ir plyšio pločio nustatymo metodo skaičiavimo schemas: a – lenkiamojo elemento pleišėjimas ir ruožų tarp plyšių susidarymas; b – sukibimo ir tempiamojo betono įtempių pasiskirstymas per ruožo ilgį; c – ruožo tarp plyšių charakteringieji pjūviai; d – deformacijų ir įtempių pasiskirstymas charakteringajame pjūvyje 1–1; e – deformacijų ir įtempių pasiskirstymas charakteringajame pjūvyje 2–2

Vienas svarbiausių aspektų, taikant alternatyvųjį metodą, yra įtempių perdavimo ilgio l_{tr} nustatymas. Kaip minėta 5.5 poskyryje, įtempių perdavimo ilgiu vadinamas toks armatūros ir betono sąveikos ruožo ilgis, per kurį betonas pasiekia savo tempiamąjį stiprį. Panagrinėkime 12.3 pav., b. Plyšyje (arba pjūvyje 1–1) tempiamojo betono įtempiai yra lygūs nuliui, visą tempimo jėgą perima armatūra. Tam tikru atstumu nuo plyšio z betonas perima dalį tempimo įtempių. Įtempiai ties labiausiai tempiamu betono sluoksniu tampa lygūs σ_{ct} (12.3 pav., e). Kai atstumas $z = l_{tr}$, betonas pasiekia savo tempiamąjį stiprį ir $\sigma_{ct} = f_{ct}$ (12.3 pav., b).

Kaip buvo parodyta 5.5.3 skirsnyje, esant pastoviems sukibimo įtempiams $\tau(z) = 2f_{cp}$, tempiamojo betono perimamą jėgą galima apskaičiuoti taip:

$$N_{ct}(z) = n \cdot \pi \varnothing \cdot 2f_{ct} \cdot z, \quad (12.32)$$

čia n – strypų skaičius; $\varnothing$ – strypų skersmuo.

Kai $z = l_{tr}$, pasiekiamas betono tempiamasis stipris, todėl:

$$N_{ct}(l_{tr}) = \frac{1}{2} f_{ct} \cdot A_c, \quad (12.33)$$

čia A_c – betono skerspjūvio plotas. Daugiklis $1/2$ taikomas dėl trikampio betono tempimo įtempių pasiskirstymo.

Remdamiesi (12.32) ir (12.33) formulėmis galime parašyti:

$$n \cdot \pi \varnothing \cdot 2f_{ct} \cdot l_{tr} = \frac{1}{2} f_{ct} \cdot A_c \Rightarrow l_{tr} = \frac{f_{ct} \cdot A_c}{2 \cdot n \cdot \pi \varnothing \cdot 2f_{ct}} = \frac{A_c}{4 \cdot n \cdot \pi \varnothing}. \quad (12.34)$$

Gautoji (12.34) formulė yra analogiška formulei (5.34), išvestai nagrinėjant tempiamąjį gelžbetoninį elementą. Skirtumas tas, kad lenkiamojo elemento atveju dėl trikampio įtempių pasiskirstymo atsiranda papildomas daugiklis $1/2$. Be to, lenkiamojo elemento atveju iš anksto nėra apibrėžtas betono skerspjūvio plotas, nes jis priklauso nuo neutraliosios ašies padėties x_c ($A_c = b \times [h - x_c]$, 12.3 pav., e). Neutraliosios ašies koordinatė x_c savo ruožtu priklauso nuo apkrovos lygmens. Čia galime padaryti svarbią išvadą, kad, net ir taikant pastovių sukibimo įtempių prielaidą $\tau(z) = 2f_{cp}$, įtempių perdavimo ilgis l_{tr} negali būti vienareikšmiškai nustatytas – jis tampa priklausomas nuo apkrovos lygmens.

Tam, kad supaprastintume skaičiavimus, įtempių perdavimo ilgį nustatysime esant pleišėjimo apkrovai. Skerspjūvyje veikiant lenkiamajam momentui $M = M_{cr}$, neutraliosios ašies padėtis atitinka nesupleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtį: $x_c = x_{c,el}$ (12.1 pav.). Tokiu atveju įtempių perdavimo ilgis apskaičiuojamas taip:

$$l_{tr} = \frac{A_c}{4 \cdot n \cdot \pi \varnothing} = \frac{b \cdot [h - x_{c,el}]}{4 \cdot n \cdot \pi \varnothing}. \quad (12.35)$$

Pagal (12.35) formulę apskaičiuotą įtempių perdavimo ilgį taikysime ir esant apkrovos lygmeniui $M > M_{cr}$.

Nustačius įtempių perdavimo ilgį l_{tr} , apskaičiuojamas armatūros ir betono deformacijų pasiskirstymas išilgai ruožo tarp plyšių. Pjūvyje 1–1 (kurio koordinatė $z = 0$, 12.3 pav., c) tempiamosios armatūros ir gniuždomojo betono deformacijos apskaičiuojamos taikant klasikinės medžiagų mechanikos formules:

$$\varepsilon_c = \frac{M}{E_{c,eff} \cdot I_{cr}} \cdot x_{cr}, \quad (12.36)$$

$$\varepsilon_f = \frac{M}{E_{c,eff} \cdot I_{cr}} \cdot (d - x_{cr}), \quad (12.37)$$

čia M – lenkiamasis momentas (išorinis), $M > M_{cr}$; $E_{c,eff}$ – efektyvusis betono tamprumo modulis (žr. 12.8 ir 12.9 formules); d – naudingasis skerspjuvio aukštis; x_{cr} – visiškai supleišėjusio skerspjuvio gniuždomosios zonos aukštis (žr. 12.1 pav.); I_{cr} – supleišėjusio skerspjuvio ploto inercijos momentas.

Pjūvyje 2–2 (kurio koordinatė z , 12.3 pav., c) veikia papildoma tempiamojo betono jėga $N_{ct}(z)$, todėl klasikinės medžiagų mechanikos formulės netinka. Tempiamojo betono jėgos dydis priklauso nuo nagrinėjamo pjūvio koordinatės: pjūvyje 1–1 $N_{ct}(z) = 0$, o didėjant koordinatei z , didėja ir jėga $N_{ct}(z)$, kol atstumu $z = l_{tr}$ pasiekia savo maksimalią reikšmę. Norėdami apskaičiuoti deformacijų pasiskirstymą bet kuriame pjūvyje $0 < z \leq l_{tr}$, turime iš anksto žinoti nagrinėjamo pjūvio padėtį. Tokiu atveju pagal (12.32) formulę galime rasti jėgą $N_{ct}(z)$. Pjūvyje 2–2 nežinomaisiais lieka gniuždomoji betono deformacija ε_c , tempiamoji kompozitinės armatūros deformacija ε_f ir gniuždomosios zonos aukštis x_c . Turime tris nežinomuosius ir galėsime parašyti dvi pusiausvyros lygtis (momentų ir horizontaliųjų jėgų), gniuždomojo betono deformaciją eliminuosime pasinaudodami ketvirtąją prielaida, teigiančia, kad gniuždomoji betono ir tempiamoji armatūros deformacijos yra vienoje tiesėje. Iš trikampių panašumo gauname (12.3 pav., e):

$$\frac{x_c}{\varepsilon_c} = \frac{d - x_c}{\varepsilon_f} \Rightarrow \varepsilon_c = \varepsilon_f \frac{x_c}{d - x_c}. \quad (12.38)$$

Jėgą armatūroje galime išreikšti taip:

$$N_f = \sigma_f A_f = \varepsilon_f E_f A_f. \quad (12.39)$$

Jėgą gniuždomajame betone galime išreikšti šia lygtimi:

$$N_{cc} = \frac{1}{2} \sigma_{cc} A_c = \frac{1}{2} \varepsilon_c E_{c,eff} \cdot b \cdot x_c = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_f \frac{x_c}{d - x_c} \right] E_{c,eff} \cdot b \cdot x_c. \quad (12.40)$$

Gniuždomojo ir tempiamojo betono atstojamosios jėgos pridedamos ties atitinkamų įtempių diagramų svorio centrais (1/3 nuo trikampio pagrindo). Tuomet užrašome horizontaliųjų jėgų ir lenkimo momentų (apie gniuždomojo betono atstojamąją jėgą) pusiausvyros lygtis:

$$N_f + N_{ct}(z) - N_{cc} = 0. \quad (12.41)$$

$$N_f \cdot \left[d - \frac{x_c}{3} \right] + N_{ct}(z) \cdot \left[\frac{2}{3}x_c + \frac{2}{3}(h - x_c) \right] = M. \quad (12.42)$$

Istatę gniuždomojo betono ir tempiamosios kompozitinės armatūros jėgų išraiškas gauname lygčių sistemą su dviem nežinomaisiais ε_f ir x_c :

$$\begin{cases} \varepsilon_f E_f A_f + N_{ct}(z) - \frac{1}{2} \left[\varepsilon_f \frac{x_c}{d - x_c} \right] E_{c,eff} \cdot b \cdot x_c = 0 \\ \varepsilon_f E_f A_f \cdot \left[d - \frac{x_c}{3} \right] + N_{ct}(z) \cdot \left[\frac{2}{3}x_c + \frac{2}{3}(h - x_c) \right] = M \end{cases}. \quad (12.43)$$

Dar kartą atkreipkime dėmesį, kad sprendžiant šią lygčių sistemą, tempiamojo betono jėga $N_{ct}(z)$ turi būti žinoma. Radus nežinomuosius ε_f ir x_c , pagal (12.38) išraišką apskaičiuojama ir gniuždomoji betono deformacija ε_c . Turint skerspjūvio deformacijų pasiskirstymą apskaičiuojamas skerspjūvio kreivis (5.9 pav. ir 5.20 formulę):

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c}{x_c}. \quad (12.44)$$

Kreivio skaičiavimo formulė (12.44) tinka visada, kai skerspjūvyje imamas tiesinis deformacijų pasiskirstymas. Ji tinka ir pjūvio 1–1 kreiviui apskaičiuoti. Pjūvio 1–1, kuriame neveikia papildoma tempiamojo betono jėga $N_{ct}(z)$, kreivis gali būti apskaičiuotas pagal (12.7) formulę. Abiem atvejais gaunamas tas pats rezultatas, nes $\varepsilon_c = \kappa \cdot x_c$.

Skaičiuojant elemento įlinkį, reikia rasti ne vieno iš pjūvių, bet vidutinį ruožo tarp plyšių kreivį. Ruožą tarp plyšių padalijus į n pjūvių, vidutinis šio ruožo kreivis apskaičiuojamas taip:

$$\kappa_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \kappa_i, \quad (12.45)$$

čia κ_i – kreivis i -tajame pjūvyje.

Maksimaliam plyšio pločiui rasti pasinaudosime 5 knygos skyriuje išvesta (5.37) formulę:

$$w = \int_0^{l_{cr}} \left[\varepsilon_f(z) - \varepsilon_{ct}(z) \right] dz \approx \int_0^{l_{cr}} \varepsilon_f(z) dz, \quad (12.46)$$

čia $\varepsilon_f(z)$ ir $\varepsilon_{ct}(z)$ – armatūros ir tempiamojo betono deformacijų pasiskirstymo funkcijos.

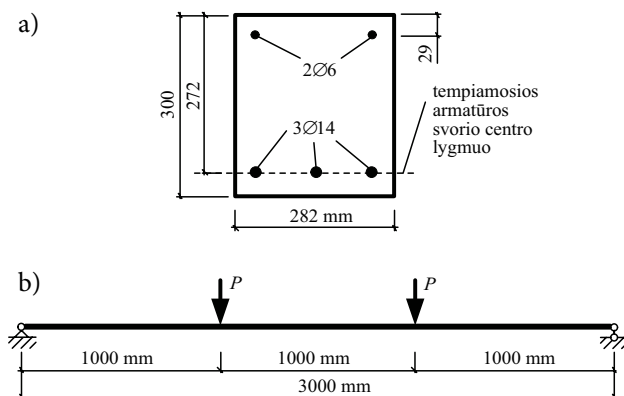
Apskaičiuojant atsiveriančių plyšių plotį, tempiamojo betono deformacijos $\varepsilon_{ct}(z)$ gali būti nevertinamos, nes yra keliomis eilėmis mažesnis dydis nei kompozitinės armatūros deformacijos $\varepsilon_f(z)$. Tokiu atveju formulė (12.46) tampa paprastesnė. Alternatyvaus įlinkių ir plyšio pločio nustatymo metodo algoritmas nuosekliai pateikiamas skaičiavimo pavyzdžiuose.

12.3.3. Skaičiavimo pavyzdžiai

Šiame skirsnyje pateikiami plieniniais ir stiklo pluošto strypais armuotų betoninių sijų įlinkių ir plyšio plokčių apskaičiavimo pavyzdžiai, taikant LST EN 1992-1-1:2005 normų bei alternatyvią diskretaus pleišėjimo metodiką. Gautieji skaičiavimo rezultatai palyginti tarpusavyje. Palyginimas pateiktas skirsnio pabaigoje 12.3 lentelėje.

12.1 pavyzdys

Trumpalaikė apkrova veikiamo įprasto gelžbetoninio lenkiamojo elemento įlinkio ir plyšio pločio skaičiavimas pagal LST EN 1992-1-1:2005 normas. Nagrinėjamas eksperimentinis stačiakampio skerspjūvio 282×300 mm lenkiamasis elementas, armuotas trimis $3\varnothing 14$ plieninės armatūros strypais. Naudingasis skerspjūvio aukštis $d = 272$ mm (12.4 pav.).



12.4 pav. Sijos: a – skerspjūvis; b – apkrovimo schema

Sijos ilgis – 3,0 m, betonas – C40/50. Eksperimentiškai nustatytas betono tempiamasis stipris $f_{ct} = 3,41 \cdot 10^3$ kPa. Kirstinis betono tamprumo modulis $E_{cm} = 36,8 \cdot 10^6$ kPa. Armatūros tamprumo modulis $E_s = 211 \cdot 10^6$ kPa. Sijos apkrovimo schema pateikta 12.6 pav. Bandymo metu sija suiro esant $M_{\max} = 63,13$ kNm lenkimo momentui. Reikia apskaičiuoti sijos įlinkį veikiant lenkimo momentui $M = 0,6M_{\max}$ ir maksimalų plyšio plotį.

1 žingsnis. Plieninės armatūros ir betono tamprumo modulių santykis

$$n_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{211 \cdot 10^6}{36,8 \cdot 10^6} = 5,734.$$

2 žingsnis. Nesupleišėjusio skerspjūvio plotas:

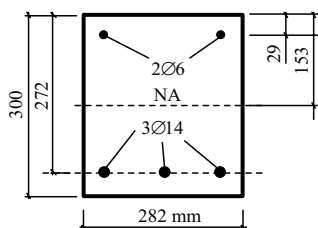
$$\begin{aligned} A_{el} &= A_c + (n_e - 1) \cdot (A_{s1} + A_{s2}) = \\ &= 0,282 \cdot 0,3 + (5,734 - 1) \cdot (4,661 \cdot 10^{-4} + 0,5732 \cdot 10^{-4}) = 0,0871 \text{ m}^2. \end{aligned}$$

3 žingsnis. Nesupleišėjusio elemento statinis skerspjūvio ploto momentas viršutinio krašto atžvilgiu

$$\begin{aligned} S_{el} &= A_c \cdot \frac{h}{2} + (n_e - 1) \cdot (A_{s1} \cdot d + A_{s2} \cdot a_{s2}) = \\ &= 0,282 \cdot 0,3 \cdot 0,15 + (5,734 - 1) \cdot (4,661 \cdot 10^{-4} \cdot 0,272 + 0,5732 \cdot 10^{-4} \cdot 0,029) = \\ &= 0,0133 \text{ m}^3. \end{aligned}$$

4 žingsnis. Nesupleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis viršutinio krašto atžvilgiu (12.5 pav.):

$$x_{c,el} = \frac{S_{el}}{A_{el}} = \frac{0,0133}{0,0871} = 0,153 \text{ m}.$$



12.5 pav. Nesupleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis

5 žingsnis. Nesupleišėjusio skerspjūvio ploto inercijos momentas

$$\begin{aligned} I_{el} &= \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} - x_{c,el} \right)^2 + A_{s1} (n_e - 1) (d - x_{c,el})^2 + A_{s2} (n_e - 1) (x_{c,el} - a_{s2})^2 = \\ &= \frac{0,282 \cdot 0,3^3}{12} + 0,282 \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{0,3}{2} - 0,153 \right)^2 + 4,661 \cdot 10^{-4} \cdot (5,734 - 1) \cdot (0,272 - 0,153)^2 + \\ &+ 0,5732 \cdot 10^{-4} \cdot (5,734 - 1) \cdot (0,153 - 0,029)^2 = 0,000671 \text{ m}^4. \end{aligned}$$

6 žingsnis. Išorinės apkrovos sukeltas kreivis nesupleišėjusiame pjūvyje, kai $M = 0,6M_{\max}$:

$$\kappa_I = \frac{0,6M_{\max}}{E_{c,eff} \cdot I_{el}} = \frac{0,6 \cdot 63,13}{36,8 \cdot 10^6 \cdot 0,000671} = 0,00153 \frac{1}{\text{m}}.$$

7 žingsnis. Supleišėjusio skerspjūvio gniuždomosios zonos aukštis

$$\begin{aligned} b \cdot x_{c,cr} \cdot \frac{x_{c,cr}}{2} + n_e \cdot A_{s2} \cdot (x_{c,cr} - a_{s2}) &= n_e \cdot A_{s1} \cdot (d - x_{c,cr}), \\ 0,141 \cdot x_{c,cr}^2 + 0,003 \cdot x_{c,cr} - 0,000736 &= 0, \\ x_{c,cr} &= 0,0624 \text{ m}. \end{aligned}$$

8 žingsnis. Supleišėjusio skerspjūvio ploto inercijos momentas:

$$\begin{aligned} I_{cr} &= \frac{bx_{c,cr}^3}{12} + bx_{c,cr} \left(\frac{x_{c,cr}}{2} \right)^2 + n_e A_{s1} (d - x_{c,cr})^2 + A_{s2} (n_e - 1) (x_{c,cr} - a_{s2})^2 = \\ &= \frac{0,282 \cdot 0,0624^3}{12} + 0,282 \cdot 0,0624 \cdot \left(\frac{0,0624}{2} \right)^2 + 5,734 \cdot 4,661 \cdot 10^{-4} \cdot (0,272 - 0,0624)^2 + \end{aligned}$$

$$+ 0,5732 \cdot 10^{-4} \cdot (5,734 - 1) \cdot (0,0624 - 0,029)^2 = 0,000141 \text{ m}^4.$$

9 žingsnis. Išorinės apkrovos sukeltas supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$\kappa_{II} = \frac{0,6M_{\max}}{E_{c,eff} \cdot I_{cr}} = \frac{0,6 \cdot 63,13}{36,8 \cdot 10^6 \cdot 0,000141} = 0,0073 \frac{1}{\text{m}}.$$

10 žingsnis. Elemento pleišėjimo lenkiamasis momentas:

$$M_{cr} = f_{ct} \cdot \frac{I_{el}}{(h - x_{c,el})} = 3,41 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,000671}{(0,3 - 0,153)} = 15,565 \text{ kNm}.$$

11 žingsnis. Pasiskirstymo koeficientas:

$$\varsigma = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{0,6M_{\max}} \right)^2 = 1 - 1,0 \cdot \left(\frac{15,565}{0,6 \cdot 63,13} \right)^2 = 0,831.$$

12 žingsnis. Išorinės apkrovos sukeltas vidutinis kreivis:

$$\begin{aligned} \kappa_m &= \varsigma \kappa_{II} + (1 - \varsigma) \kappa_I = \\ &= 0,831 \cdot 0,0073 + (1 - 0,831) \cdot 0,00153 = 0,00632 \frac{1}{\text{m}}. \end{aligned}$$

13 žingsnis. Sijos įlinkis (koeficientas k pateiktas 12.2 lentelėje):

$$\delta = k \kappa_m \cdot l^2 = \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{6} \cdot \frac{l^2}{3^2} \right) \cdot 0,00632 \cdot 3,0^2 = 0,00606 \text{ m}.$$

14 žingsnis. Tempiamojo betono efektyvaus ploto aukštis $h_{ct,eff}$ yra mažiausia reikšmė iš šių:

$$\begin{aligned} 2,5(h - d) &= 2,5 \cdot (0,3 - 0,272) = 0,07, \\ (h - x_{c,el})/3 &= (0,3 - 0,153)/3 = 0,049, \\ h/2 &= 0,3/2 = 0,15. \end{aligned}$$

15 žingsnis. Efektyvusis tempiamojo betono plotas:

$$A_{ct,eff} = b \cdot h_{ct,eff} = 0,282 \cdot 0,049 = 0,013818 \text{ m}^2.$$

16 žingsnis. Armavimo koeficientas:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{s1}}{A_{ct,eff}} = \frac{4,661 \cdot 10^{-4}}{0,013818} = 0,0337.$$

17 žingsnis. Armatūros ir betono vidutinių deformacijų skirtumas. Įtempiai tempiamojoje armatūroje, darant prielaidą, kad skerspjūvis supleišėjęs, $\sigma_s = 325 \cdot 10^3 \text{ kPa}$.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct}}{\rho_{eff}} (1 + n_e \rho_{eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s},$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{325 \cdot 10^3 - 0,6 \cdot \frac{3,41 \cdot 10^3}{0,0337} (1 + 5,734 \cdot 0,0337)}{2,11 \cdot 10^8} \geq 0,6 \cdot \frac{325 \cdot 10^3}{2,11 \cdot 10^8},$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 0,001197 \geq 0,000924.$$

18 žingsnis. Didžiausias atstumas tarp plyšių

$$l_{cr,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \varnothing / \rho_{eff} =$$

$$= 3,4 \cdot 0,029 + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 0,014 / 0,0337 = 0,169 \text{ m}.$$

19 žingsnis. Didžiausias plyšio plotis:

$$w = l_{cr,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 0,169 \cdot 0,001197 = 0,2 \text{ mm}.$$

12.2 pavyzdys

Trumpalaikė apkrova veikiamo įprasto gelžbetoninio lenkiamojo elemento įlinkio ir plyšio pločio skaičiavimas, taikant alternatyvią įlinkių ir plyšio pločio nustatymo metodiką. Nagrinėjamos sijos skerspjūvio geometriniai parametrai ir kiti duomenys imami tokie pat kaip 12.1 pavyzdyje (12.4 pav.). Armatūros ir betono sukibimo įtempiai $\tau(z) = 2f_{ct}$. Skerspjūvio parametrai nepasikeitė, tad tam tikri skaičiavimo rezultatai imami iš 12.1 pavyzdžio.

1 žingsnis. Pagal (12.35) formulę apskaičiuojamas įtempių perdavimo ilgis:

$$l_{tr} = \frac{b \cdot [h - x_{c,el}]}{4 \cdot n \cdot \pi \varnothing} = \frac{0,282 \cdot [0,3 - 0,153]}{4 \cdot 3 \cdot 3,14 \cdot 0,014} = 0,079 \text{ m} = 7,9 \text{ cm}.$$

Elemento įlinkiams skaičiuoti taikysime vidutinį ruožo tarp plyšių ilgį $l_{cr} = 1,5l_{tr} = 1,5 \times 7,9 = 11,8 \text{ cm}$. Didžiausiam plyšio pločiui skaičiuoti taikysime didžiausią ruožo tarp plyšių ilgį $l_{cr} = 2l_{tr} = 2 \times 7,9 = 15,8 \text{ cm}$.

2 žingsnis. Pagal (12.36) ir (12.37) formules apskaičiuojame gniuždomojo betono ir tempiamosios armatūros deformaciją plyšyje (pjūvyje 1-1, 12.3 pav., c), veikiant lenkimo momentui $M = 0,6 M_{max}$:

$$\varepsilon_c = \frac{0,6 \cdot M_{max}}{E_{c,eff} \cdot I_{cr}} \cdot x_{cr} = \frac{0,6 \cdot 63,13 \cdot 10^3}{36,8 \cdot 10^9 \cdot 0,000141} \cdot 0,0624 = 458 \cdot 10^{-6},$$

$$\varepsilon_s = \frac{0,6 \cdot M_{max}}{E_{c,eff} \cdot I_{cr}} \cdot (d - x_{cr}) = \frac{0,6 \cdot 63,13 \cdot 10^3}{36,8 \cdot 10^9 \cdot 0,000141} \cdot (0,272 - 0,0624) = 1538 \cdot 10^{-6}.$$

3 žingsnis. Pagal (12.44) formulę apskaičiuojamas pjūvio 1-1 kreivis:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c}{x_{cr}} = \frac{458 \cdot 10^{-6}}{0,0624} = 7,34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}.$$

Tą patį pjūvio 1–1 kreivio rezultatą gautume ir skaičiuodami pagal (12.7) formulę (visiškai supleišėjusio skerspjuvio kreivis):

$$\kappa_{II} = \frac{0,6 \cdot M_{\max}}{E_{c,eff} \cdot I_{cr}} = \frac{0,6 \cdot 63,13 \cdot 10^3}{36,8 \cdot 10^9 \cdot 0,000141} = 7,34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}.$$

4 žingsnis. Skaičiuojamas deformacijų pasiskirstymas pjūvyje 2–2. Norint gauti armatūros ir betono deformacijų pasiskirstymą ne tik skerspjuvyje (12.3 pav., e), bet ir išilgai ruožo tarp plyšių (12.3 pav., b), imamos skirtingos koordinatės z reikšmės (pradedant nuo pjūvio 1–1, 12.3 pav., c) ir kiekviename pjūvyje sprendžiama (12.42) lygčių sistema. Ruožą tarp plyšių dalijant į $n \approx 10$ pjūvių, gaunamas gana tikslus deformacijų pasiskirstymas išilgine ruožo tarp plyšių kryptimi. Šiame skaičiavimo pavyzdyje panagrinėsime tik vieną pjūvį, kurio koordinatė $z = 0,75l_{tr}$. Skaičiuojant elemento įlinkį šis pjūvis atitinka ruožo tarp plyšių vidurį (kartu ir simetrijos ašį), nes viso ruožo ilgis pagal priimtas skaičiavimo prielaidas sudaro $l_{cr} = 1,5l_{tr}$.

Kai $z = 0,75l_{tr} = 0,75 \times 7,9 = 5,9$ cm, tai jėga, veikianti tempiamajame betone, apskaičiuojama pagal (12.32) formulę:

$$N_{ct}(z) = n \cdot \pi \varnothing \cdot 2f_{ct} \cdot z = 3 \cdot 3,14 \cdot 0,014 \cdot 2 \cdot 3,41 \cdot 10^6 \cdot 0,059 = 53,1 \text{ kN}.$$

5 žingsnis. Sprendžiama (12.43) lygčių sistema ir randami pjūvio 2–2 nežinomieji ε_s ir x_c :

$$\begin{cases} \varepsilon_s E_s A_s + N_{ct}(z) - \frac{1}{2} \left[\varepsilon_s \frac{x_c}{d - x_c} \right] E_{c,eff} \cdot b \cdot x_c = 0 \\ \varepsilon_s E_s A_s \cdot \left[d - \frac{x_c}{3} \right] + N_{ct}(z) \cdot \left[\frac{2}{3} x_c + \frac{2}{3} (h - x_c) \right] = M \end{cases},$$

$$\begin{cases} \varepsilon_s \cdot 211 \cdot 10^9 \cdot 4,66 \cdot 10^{-4} + 53,1 \cdot 10^3 - \frac{1}{2} \left[\varepsilon_s \frac{x_c}{0,272 - x_c} \right] \cdot 36,8 \cdot 10^9 \cdot 0,282 \cdot x_c = 0 \\ \varepsilon_s \cdot 211 \cdot 10^9 \cdot 4,66 \cdot 10^{-4} \cdot \left[0,272 - \frac{x_c}{3} \right] + 53,1 \cdot 10^3 \cdot \left[\frac{2}{3} x_c + \frac{2}{3} (0,3 - x_c) \right] = 0,6 \cdot 63,13 \cdot 10^3 \end{cases},$$

$$x_c = 0,0745 \text{ m},$$

$$\varepsilon_s = 1121 \cdot 10^{-6}.$$

Analizuodami gautus rezultatus galime pastebėti, kad armatūros deformacija ties ruožo tarp plyšių viduriu ($\varepsilon_s = 1121 \cdot 10^{-6}$) gaunama mažesnė negu plyšio vietoje ties pjūviu 1–1 ($\varepsilon_s = 1538 \cdot 10^{-6}$). Taip yra todėl, kad ruožuose tarp plyšių tempiamasis betonas perima dalį tempimo jėgos iš armatūros ir sumažina jos deformacijas. Šis efektas, dažnai vadinamas tempiamuoju sustandėjimu (angl. *tension-stiffening*), plačiau nagrinėjamas trečiajame knygos skyriuje.

Dėl tempiamojo betono įtakos pjūvyje 2–2 pasikeičia ir neutraliosios ašies padėtis. Plyšio vietoje (ties pjūviu 1–1) gniuždomosios zonos aukštis sudarė $x_{cr} = 0,0624$ m, o ties nagrinėjamuoju pjūviu 2–2 gauta $x_c = 0,0745$ m reikšmė.

6 žingsnis. Remdamiesi (12.38) formule apskaičiuojame gniuždomojo betono deformaciją:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \frac{x_c}{d - x_c} = 1121 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,0745}{0,272 - 0,0745} = 423 \cdot 10^{-6}.$$

7 žingsnis. Pagal (12.44) formulę apskaičiuojamas pjūvio 2–2 kreivis:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c}{x_c} = \frac{423 \cdot 10^{-6}}{0,0745} = 5,68 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}.$$

Pjūvyje 2–2 gaunama kreivio reikšmė yra mažesnė negu apskaičiuotoji ties plyšiu (pjūviu 1–1). Tai gali būti vėl paaiškinama tuo, kad ruožuose tarp plyšių tempiamasis betonas iš armatūros perima dalį tempimo jėgos ir padidina viso elemento standumą.

Kaip minėta, norint tiksliai apskaičiuoti vidutinį ruožo tarp plyšių kreivį, šį ruožą reikia dalinti į $n \approx 10$ pjūvių. Šiame pavyzdyje vidutinį ruožo tarp plyšių kreivį apskaičiuosime remdamiesi dviejų apskaičiuotųjų pjūvių kreiviais:

$$\kappa = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \kappa_i = \frac{1}{2} (7,34 \cdot 10^{-3} + 5,68 \cdot 10^{-3}) = 6,51 \cdot 10^{-3}.$$

8 žingsnis. Sijos įlinkis, kai $M = 0,6M_{\max}$ (koeficientas k pateiktas 12.2 lentelėje):

$$\delta = k \kappa \cdot l^2 = \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{6} \cdot \frac{l^2}{3^2} \right) \cdot 0,00651 \cdot 3,0^2 = 0,0062 \text{ m}.$$

9 žingsnis. Didžiausias plyšio plotis apskaičiuojamas pagal (12.43) formulę. Norint apskaičiuoti didžiausiąjį plyšio plotį, reikia sudaryti armatūros deformacijų kitimo funkciją nuo pjūvio 1–1 (kuriame $z = 0$) iki pjūvio 2–2. Skaičiuojant didžiausiąjį plyšio plotį, pjūvio 2–2 koordinatė sudarys $z = l_{tr} = 7,9 \text{ cm}$, nes šiuo atveju imame ne vidutinį, bet maksimalų įmanomą ruožo tarp plyšių ilgį.

Pagal skaičiavimo prielaidas armatūros ir betono sukibimo įtempiai yra pastovūs. Remdamiesi ketvirtajame skyriuje išvesta diferencialine sukibimo įtempių ir deformacijų priklausomybe (žr. 4.1–4.3 formules) galime pastebėti, kad sukibimo įtempiai pastovūs bus tik tada, kai armatūros deformacijos kinta pagal tiesės lygtį. Vadinasi, armatūros deformacijų kitimą aprašysime tiesės lygtimi, einančią per du taškus. Vienas iš šių taškų yra apskaičiuotoji armatūros deformacija ties pjūviu 1–1 ($z = 0$). Kitas taškas bus ties bloko viduriu, pjūvyje 2–2 ($z = l_{tr} = 7,9 \text{ cm}$). Pirmiausia pagal (12.32) formulę apskaičiuojame tempiamojo betono jėgą, kai $z = l_{tr} = 7,9 \text{ cm}$:

$$N_{ct}(z) = n \cdot \pi \varnothing \cdot 2 f_{ct} \cdot z = 3 \cdot 3,14 \cdot 0,014 \cdot 2 \cdot 3,41 \cdot 10^6 \cdot 0,079 = 70,8 \text{ kN}.$$

10 žingsnis. Sprendžiama (12.43) lygčių sistema ir randami pjūvio 2–2 nežinomieji ε_s ir x_c :

$$\begin{cases} \varepsilon_s E_s A_s + N_{ct}(z) - \frac{1}{2} \left[\varepsilon_s \frac{x_c}{d - x_c} \right] E_{c,eff} \cdot b \cdot x_c = 0 \\ \varepsilon_s E_s A_s \cdot \left[d - \frac{x_c}{3} \right] + N_{ct}(z) \cdot \left[\frac{2}{3} x_c + \frac{2}{3} (h - x_c) \right] = M \end{cases},$$

$$\begin{cases} \varepsilon_s \cdot 211 \cdot 10^9 \cdot 4,66 \cdot 10^{-4} + 70,8 \cdot 10^3 - \frac{1}{2} \left[\varepsilon_s \frac{x_c}{0,272 - x_c} \right] \cdot 36,8 \cdot 10^9 \cdot 0,282 \cdot x_c = 0 \\ \varepsilon_s \cdot 211 \cdot 10^9 \cdot 4,66 \cdot 10^{-4} \cdot \left[0,272 - \frac{x_c}{3} \right] + 70,8 \cdot 10^3 \cdot \left[\frac{2}{3} x_c + \frac{2}{3} (0,3 - x_c) \right] = 0,6 \cdot 63,13 \cdot 10^3 \end{cases},$$

$$x_c = 0,0795 \text{ m},$$

$$\varepsilon_s = 982 \cdot 10^{-6}.$$

11 žingsnis. Sudaroma armatūros deformacijų kitimo funkcija. Kai $z = 0$, tai armatūros deformacija $\varepsilon_{s,1-1} = 1538 \cdot 10^{-6}$. Kai $z = l_{tr}$, armatūros deformacija $\varepsilon_{s,2-2} = 982 \cdot 10^{-6}$. Pagal šiuos taškus sudarome tiesės lygtį $\varepsilon_s(z)$:

$$\varepsilon_s(z) = \frac{\varepsilon_{s,2-2} - \varepsilon_{s,1-1}}{l_{tr}} \cdot z + \varepsilon_{s,1-1}.$$

12 žingsnis. Pagal (12.46) formulę apskaičiuojamas didžiausias plyšio plotis. $l_{cr} = 2l_{tr}$, tad integravimo ribos sudarys nuo $z = 0$ iki $z = l_{tr}$, o gautą rezultatą padauginsime iš 2 norėdami gauti simetrinę armatūros deformacijų pasiskirstymą:

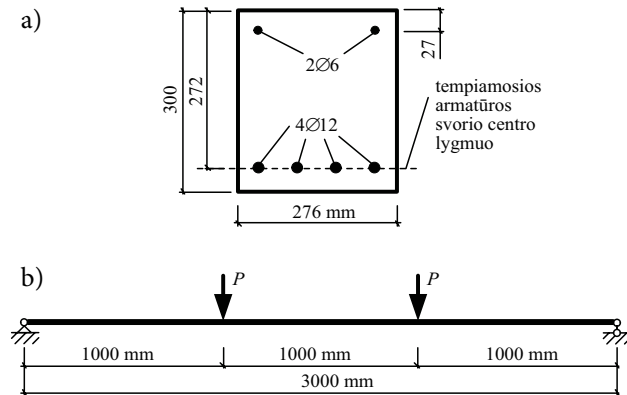
$$\begin{aligned} w &= \int_0^{l_{cr}} \varepsilon_s(z) dz = 2 \int_0^{l_{tr}} \varepsilon_s(z) dz = 2 \int_0^{l_{tr}} \left[\frac{\varepsilon_{s,2-2} - \varepsilon_{s,1-1}}{l_{tr}} \cdot z + \varepsilon_{s,1-1} \right] dz = \\ &= 2 \left[\frac{(\varepsilon_{s,2-2} - \varepsilon_{s,1-1}) \cdot z^2}{2 \cdot l_{tr}} + \varepsilon_{s,1-1} \cdot z \right]_0^{l_{tr}} = 2 \left[\frac{(\varepsilon_{s,2-2} - \varepsilon_{s,1-1}) \cdot l_{tr}^2}{2 \cdot l_{tr}} + \varepsilon_{s,1-1} \cdot l_{tr} \right] = \\ &= (\varepsilon_{s,2-2} - \varepsilon_{s,1-1}) \cdot l_{tr} + 2\varepsilon_{s,1-1} \cdot l_{tr} = (\varepsilon_{s,2-2} + \varepsilon_{s,1-1}) \cdot l_{tr} = \\ &= (982 \cdot 10^{-6} + 1538 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,079 = 0,198 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Plyšio pločio skaičiavimas yra analogiškas 5.5.3 skirsnyje nagrinėtos tilto sijos skaičiavimui. Šiame skirsnyje parodyta ir grafinė skaičiavimų interpretacija (5.22 pav.).

12.3 pavyzdys

Trumpalaikė apkrova veikiamo stiklo pluošto strypais armuoto lenkiamojo betoninio elemento įlinkio ir plyšio pločio skaičiavimas pagal LST EN 1992-1-1:2005 normas. Stačiakampio skerspjūvio 276×303 mm lenkiamasis elementas armuotas $4\varnothing 12$ polimerinės armatūros strypais, naudingasis skerspjūvio aukštis $d = 272$ mm (12.6 pav.).

Sijos ilgis – 3,0 m, sijos betonas – C40/50. Eksperimentiškai nustatytas betono tempiamasis stipris $f_{ct} = 3,41 \cdot 10^3$ kPa. Betono kirstinis (vidutinis) tamprumo modulis $E_{cm} = 35,44 \cdot 10^6$ kPa. Kompozitinės armatūros tamprumo modulis $E_f = 7,0 \cdot 10^7$ kPa. Sijos apkrovimo schema pateikta 12.6 pav. Eksperimentiškai nustatyta didžiausia apkrova $M_{\max} = 82,488$ kNm. Reikia apskaičiuoti sijos įlinkį veikiant lenkimo momentui $M = 0,6M_{\max}$ ir didžiausią plyšio plotį.



12.6 pav. Sijos: a – skerspjūvis; b – apkrovimo schema

1 žingsnis. Kompozitinės armatūros ir betono tamprumo modulių santykis:

$$n_e = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{7,0 \cdot 10^7}{35,44 \cdot 10^6} = 1,975.$$

2 žingsnis. Nesupleišėjusio skerspjūvio plotas:

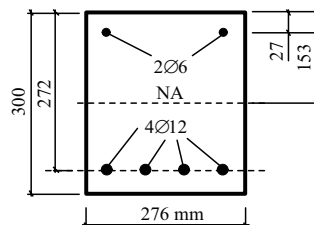
$$\begin{aligned} A_{el} &= A_c + (n_e - 1) \cdot (A_{f1} + A_{f2}) = \\ &= 0,276 \cdot 0,303 + (1,975 - 1) \cdot (4,524 \cdot 10^{-4} + 0,5732 \cdot 10^{-4}) = 0,0841 \text{ m}^2. \end{aligned}$$

3 žingsnis. Nesupleišėjusio elemento statinis skerspjūvio ploto momentas viršutinio krašto atžvilgiu:

$$\begin{aligned} S_{el} &= A_c \cdot \frac{h}{2} + (n_e - 1) \cdot (A_{f1} \cdot d + A_{s2} \cdot a_{s2}) = \\ &= 0,276 \cdot 0,303 \cdot 0,1515 + (1,975 - 1) \cdot (4,524 \cdot 10^{-4} \cdot 0,272 + 0,5732 \cdot 10^{-4} \cdot 0,027) = \\ &= 0,01279 \text{ m}^3. \end{aligned}$$

4 žingsnis. Nesupleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (12.7 pav.):

$$x_{c,el} = \frac{S_{el}}{A_{el}} = \frac{0,01279}{0,0841} = 0,153 \text{ m}.$$



12.7 pav. Nesupleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis

5 žingsnis. Nesupleišėjusio skerspjūvio ploto inercijos momentas:

$$I_{el} = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} - x_{c,el} \right)^2 + A_{f1} (n_e - 1) (d - x_{c,el})^2 + A_{f2} (n_e - 1) (x_{c,el} - a_{s2})^2 =$$

$$= \frac{0,276 \cdot 0,303^3}{12} + 0,276 \cdot 0,303 \cdot \left(\frac{0,303}{2} - 0,153 \right)^2 + 4,524 \cdot 10^{-4} \cdot (1,975 - 1) \cdot$$

$$\cdot (0,272 - 0,153)^2 + 0,5732 \cdot 10^{-4} \cdot (1,975 - 1) \cdot (0,153 - 0,027)^2 = 0,000647 \text{ m}^4.$$

6 žingsnis. Išorinės apkrovos sukeltas nesupleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$\kappa_I = \frac{0,6 \cdot M_{\max}}{E_{c,eff} \cdot I_{el}} = \frac{0,6 \cdot 82,488}{35,44 \cdot 10^6 \cdot 0,000647} = 0,002158 \frac{1}{\text{m}}.$$

7 žingsnis. Supleišėjusio skerspjūvio gniuždomosios zonos aukštis:

$$b \cdot x_{c,cr} \cdot \frac{x_{c,cr}}{2} + n_e \cdot A_{f2} \cdot (x_{c,cr} - a_{s2}) = n_e \cdot A_{f1} \cdot (d - x_{c,cr}),$$

$$0,138 \cdot x_{c,cr}^2 + 0,001 \cdot x_{c,cr} - 0,000246 = 0,$$

$$x_{c,cr} = 0,0387 \text{ m}.$$

8 žingsnis. Supleišėjusio skerspjūvio ploto inercijos momentas:

$$I_{cr} = \frac{bx_{c,cr}^3}{12} + bx_{c,cr} \left(\frac{x_{c,cr}}{2} \right)^2 + n_e A_{f1} (d - x_{c,cr})^2 + A_{f2} (n_e - 1) (x_{c,cr} - a_{s2})^2 =$$

$$= \frac{0,276 \cdot 0,0387^3}{12} + 0,276 \cdot 0,0387 \cdot \left(\frac{0,0387}{2} \right)^2 + 1,975 \cdot 4,524 \cdot 10^{-4} \cdot (0,272 - 0,0387)^2 +$$

$$+ 0,5732 \cdot 10^{-4} \cdot (1,975 - 1) \cdot (0,0387 - 0,027)^2 = 0,000054 \text{ m}^4.$$

9 žingsnis. Išorinės apkrovos sukeltas supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$\kappa_{II} = \frac{0,6 M_{\max}}{E_{c,eff} \cdot I_{cr}} = \frac{0,6 \cdot 82,488}{35,44 \cdot 10^6 \cdot 0,000054} = 0,025862 \frac{1}{\text{m}}.$$

10 žingsnis. Elemento pleišėjimo lenkiamasis momentas:

$$M_{cr} = f_{ct} \cdot \frac{I_{el}}{(h - x_{c,el})} = 3,41 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,000647}{(0,303 - 0,153)} = 14,708 \text{ kNm}.$$

11 žingsnis. Pasiskirstymo koeficientas:

$$\varsigma = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{0,6 M_{\max}} \right)^2 = 1 - 1,0 \cdot \left(\frac{14,708}{0,6 \cdot 82,488} \right)^2 = 0,912.$$

12 žingsnis. Išorinės apkrovos sukeltas vidutinis kreivis:

$$\kappa_m = \varsigma \kappa_{II} + (1 - \varsigma) \kappa_I =$$

$$= 0,912 \cdot 0,025862 + (1 - 0,912) \cdot 0,002158 = 0,02377 \frac{1}{\text{m}}.$$

13 žingsnis. Sijos įlinkis (koeficientas k pateiktas 12.2 lentelėje):

$$\delta = k\kappa_m \cdot l^2 = \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{6} \cdot \frac{l^2}{3^2} \right) \cdot 0,02377 \cdot 3,0^2 = 0,02278 \text{ m.}$$

14 žingsnis. Tempiamojo betono efektyvaus ploto aukštis $h_{ct,eff}$ yra mažiausia reikšmė iš šių:

$$2,5(h-d) = 2,5 \cdot (0,303 - 0,272) = 0,0775,$$

$$(h - x_{c,el})/3 = (0,303 - 0,153)/3 = 0,05,$$

$$h/2 = 0,303/2 = 0,1515.$$

15 žingsnis. Efektyvusis tempiamojo betono plotas:

$$A_{ct,eff} = b \cdot h_{ct,eff} = 0,276 \cdot 0,05 = 0,0138 \text{ m}^2.$$

16 žingsnis. Armavimo koeficientas:

$$\rho_{eff} = \frac{A_{f1}}{A_{ct,eff}} = \frac{4,524 \cdot 10^{-4}}{0,0138} = 0,0328.$$

17 žingsnis. Vidutinių tempiamosios kompozitinės armatūros ir gniuždomojo betono deformacijų skirtumas. Įtempiai tempiamojoje kompozitinėje armatūroje darant prielaidą, kad skerspjūvis supleišėjęs $\sigma_f = 422 \cdot 10^3$ kPa.

$$\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_f - k_t \frac{f_{ct}}{\rho_{eff}} (1 + n_e \rho_{eff})}{E_f} \geq 0,6 \frac{\sigma_f}{E_f},$$

$$\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = \frac{422 \cdot 10^3 - 0,6 \cdot \frac{3,41 \cdot 10^3}{0,0328} (1 + 1,975 \cdot 0,0328)}{7,0 \cdot 10^7} \geq 0,6 \cdot \frac{422 \cdot 10^3}{7,0 \cdot 10^7},$$

$$\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = 0,00508 > 0,003617.$$

18 žingsnis. Didžiausias atstumas tarp plyšių:

$$\begin{aligned} l_{cr,max} &= k_3 c + k_1 k_2 k_4 \varnothing / \rho_{eff} = \\ &= 3,4 \cdot 0,031 + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 0,012 / 0,0328 = 0,168 \text{ m.} \end{aligned}$$

19 žingsnis. Didžiausias plyšio plotis:

$$w_{max} = l_{cr,max} \cdot (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) = 0,168 \cdot 0,00508 = 0,9 \text{ mm.}$$

12.4 pavyzdys

Trumpalaikė apkrova veikiamo stiklo pluošto strypais armuoto betoninio lenkiamojo elemento įlinkio ir plyšio pločio apskaičiavimas, taikant alternatyvią įlinkių ir plyšio pločio nustatymo metodiką. Nagrinėjamos sijos skerspjūvio geometriniai

parametrai ir kiti duomenys imami tokie pat kaip 12.3 pavyzdyje (12.10 pav.). Skerspjūvio parametrai nepasikeitė, tad tam tikri skaičiavimo rezultatai imami iš 12.3 pavyzdžio.

1 žingsnis. Pagal (12.35) formulę apskaičiuojamas įtempių perdavimo ilgis:

$$l_{tr} = \frac{b \cdot [h - x_{c,el}]}{4 \cdot n \cdot \pi \varnothing} = \frac{0,276 \cdot [0,303 - 0,153]}{4 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 0,012} = 0,069 \text{ m} = 6,9 \text{ cm}.$$

Elemento įlinkiams skaičiuoti taikysime vidutinį ruožo tarp plyšių ilgį $l_{cr} = 1,5l_{tr} = 1,5 \times 6,9 = 10,3 \text{ cm}$. Didžiausiam plyšio pločiui skaičiuoti taikysime didžiausią ruožo tarp plyšių ilgį $l_{cr} = 2l_{tr} = 2 \times 6,9 = 13,8 \text{ cm}$.

2 žingsnis. Pagal (12.36) ir (12.37) formules apskaičiuojame gniuždomojo betono ir tempiamosios armatūros deformaciją plyšyje (pjūvyje 1–1, 12.3 pav., c), veikiant lenkimo momentui $M = 0,6 M_{\max}$:

$$\varepsilon_c = \frac{0,6 \cdot M_{\max}}{E_{c,eff} \cdot I_{cr}} \cdot x_{cr} = \frac{0,6 \cdot 82,49 \cdot 10^3}{35,4 \cdot 10^9 \cdot 0,000054} \cdot 0,0387 = 1001 \cdot 10^{-6}.$$

$$\varepsilon_s = \frac{0,6 \cdot M_{\max}}{E_{c,eff} \cdot I_{cr}} \cdot (d - x_{cr}) = \frac{0,6 \cdot 82,49 \cdot 10^3}{35,4 \cdot 10^9 \cdot 0,000054} \cdot (0,272 - 0,0387) = 6033 \cdot 10^{-6}.$$

3 žingsnis. Pagal (12.44) formulę apskaičiuojamas pjūvio 1–1 kreivis:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c}{x_{cr}} = \frac{1001 \cdot 10^{-6}}{0,0387} = 25,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}.$$

4 žingsnis. Skaičiuojamas deformacijų pasiskirstymas pjūvyje 2–2. Kaip ir ankstesniame pavyzdyje nagrinėsime tik vieną pjūvį, esantį ties ruožo tarp plyšių centru. Kai $z = 0,75l_{tr} = 0,75 \times 6,9 = 5,1 \text{ cm}$, tai jėga, veikianti tempiamajame betone, apskaičiuojama pagal (12.32) formulę:

$$N_{ct}(z) = n \cdot \pi \varnothing \cdot 2 f_{ct} \cdot z = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,012 \cdot 2 \cdot 3,41 \cdot 10^6 \cdot 0,051 = 52,9 \text{ kN}.$$

5 žingsnis. Sprendžiama (12.43) lygčių sistema ir randami pjūvio 2–2 nežinomieji ε_s ir x_c :

$$\begin{cases} \varepsilon_f E_f A_f + N_{ct}(z) - \frac{1}{2} \left[\varepsilon_f \frac{x_c}{d - x_c} \right] E_{c,eff} \cdot b \cdot x_c = 0 \\ \varepsilon_f E_f A_f \cdot \left[d - \frac{x_c}{3} \right] + N_{ct}(z) \cdot \left[\frac{2}{3} x_c + \frac{2}{3} (h - x_c) \right] = M \end{cases},$$

$$\begin{cases} \varepsilon_f \cdot 70 \cdot 10^9 \cdot 4,52 \cdot 10^{-4} + 52,9 \cdot 10^3 - \frac{1}{2} \left[\varepsilon_f \frac{x_c}{0,272 - x_c} \right] \cdot 36,8 \cdot 10^9 \cdot 0,282 \cdot x_c = 0 \\ \varepsilon_f \cdot 70 \cdot 10^9 \cdot 4,52 \cdot 10^{-4} \cdot \left[0,272 - \frac{x_c}{3} \right] + 52,9 \cdot 10^3 \cdot \left[\frac{2}{3} x_c + \frac{2}{3} (0,303 - x_c) \right] = 0,6 \cdot 82,49 \cdot 10^3 \end{cases},$$

$$x_c = 0,0446 \text{ m},$$

$$\varepsilon_f = 4769 \cdot 10^{-6}.$$

6 žingsnis. Remdamiesi (12.38) formule apskaičiuojame gniuždomojo betono deformaciją:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f \frac{x_c}{d - x_c} = 4769 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,0446}{0,272 - 0,0446} = 935 \cdot 10^{-6}.$$

7 žingsnis. Pagal (12.44) formulę apskaičiuojamas pjūvio 2–2 kreivis:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c}{x_c} = \frac{935 \cdot 10^{-6}}{0,0446} = 21,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}.$$

Kai ir ankstesniu atveju, pjūvyje 2–2 gaunamos mažesnės armatūros ir betono deformacijų reikšmės, kartu sumažėja ir pjūvio kreivis. Vidutinis ruožo tarp plyšių kreivis:

$$\kappa = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \kappa_i = \frac{1}{2} (25,9 \cdot 10^{-3} + 21,0 \cdot 10^{-3}) = 23,4 \cdot 10^{-3}.$$

8 žingsnis. Sijos įlinkis, kai $M = 0,6M_{\max}$ (koeficientas k pateiktas 12.2 lentelėje):

$$\delta = k\kappa \cdot l^2 = \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{6} \cdot \frac{l^2}{3^2} \right) \cdot 0,0234 \cdot 3,0^2 = 0,0224 \text{ m}.$$

9 žingsnis. Pagal (12.32) formulę apskaičiuojame tempiamojo betono jėgą, kai $z = l_{tr} = 6,9 \text{ cm}$:

$$N_{ct}(z) = n \cdot \pi \varnothing \cdot 2f_{ct} \cdot z = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,012 \cdot 2 \cdot 3,41 \cdot 10^6 \cdot 0,069 = 70,6 \text{ kN}.$$

10 žingsnis. Sprendžiama (12.43) lygčių sistema ir randami pjūvio 2–2 nežinomieji ε_s ir x_c :

$$\begin{cases} \varepsilon_f E_f A_f + N_{ct}(z) - \frac{1}{2} \left[\varepsilon_f \frac{x_c}{d - x_c} \right] E_{c,eff} \cdot b \cdot x_c = 0 \\ \varepsilon_f E_f A_f \cdot \left[d - \frac{x_c}{3} \right] + N_{ct}(z) \cdot \left[\frac{2}{3} x_c + \frac{2}{3} (h - x_c) \right] = M \end{cases},$$

$$\begin{cases} \varepsilon_f \cdot 70 \cdot 10^9 \cdot 4,52 \cdot 10^{-4} + 70,6 \cdot 10^3 - \frac{1}{2} \left[\varepsilon_f \frac{x_c}{0,272 - x_c} \right] \cdot 36,8 \cdot 10^9 \cdot 0,282 \cdot x_c = 0 \\ \varepsilon_f \cdot 70 \cdot 10^9 \cdot 4,52 \cdot 10^{-4} \cdot \left[0,272 - \frac{x_c}{3} \right] + 70,6 \cdot 10^3 \cdot \left[\frac{2}{3} x_c + \frac{2}{3} (0,303 - x_c) \right] = 0,6 \cdot 82,49 \cdot 10^3 \end{cases},$$

$$x_c = 0,0469 \text{ m},$$

$$\varepsilon_f = 4344 \cdot 10^{-6}.$$

11 žingsnis. Sudaroma armatūros deformacijų kitimo funkcija. Kai $z = 0$, tai armatūros deformacija $\varepsilon_{f,1-1} = 6033 \cdot 10^{-6}$. Kai $z = l_{tr}$, armatūros deformacija $\varepsilon_{f,2-2} = 4344 \cdot 10^{-6}$. Pagal šiuos taškus sudarome tiesės lygtį $\varepsilon_s(z)$:

$$\varepsilon_f(z) = \frac{\varepsilon_{f,2-2} - \varepsilon_{f,1-1}}{l_{tr}} \cdot z + \varepsilon_{f,1-1} \cdot$$

12 žingsnis. Pagal (12.46) formulę apskaičiuojamas didžiausias plyšio plotis.

$$\begin{aligned} w &= \int_0^{l_{tr}} \varepsilon_f(z) dz = 2 \int_0^{l_{tr}} \varepsilon_f(z) dz = 2 \int_0^{l_{tr}} \left[\frac{\varepsilon_{f,2-2} - \varepsilon_{f,1-1}}{l_{tr}} \cdot z + \varepsilon_{f,1-1} \right] dz = \\ &= 2 \left[\frac{(\varepsilon_{f,2-2} - \varepsilon_{f,1-1}) \cdot z^2}{2 \cdot l_{tr}} + \varepsilon_{f,1-1} \cdot z \right]_0^{l_{tr}} = 2 \left[\frac{(\varepsilon_{f,2-2} - \varepsilon_{f,1-1}) \cdot l_{tr}^2}{2 \cdot l_{tr}} + \varepsilon_{f,1-1} \cdot l_{tr} \right] = \\ &= (\varepsilon_{f,2-2} - \varepsilon_{f,1-1}) \cdot l_{tr} + 2\varepsilon_{f,1-1} \cdot l_{tr} = (\varepsilon_{f,2-2} + \varepsilon_{f,1-1}) \cdot l_{tr} = \\ &= (4344 \cdot 10^{-6} + 6033 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,069 = 0,712 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Skaiciavimo pavyzdžių palyginimas

12.3 lentelė. Skaiciavimo pavyzdžių palyginimas

Metodas	δ, mm	w, mm
	Plieninė armatūra	
LST-EN	6,06	0,200
Alternatyvus	6,20	0,198
	Kompozitinė armatūra	
LST-EN	22,78	0,900
Alternatyvus	22,4	0,712

12.4. Skyriaus apibendrinimas

Skyriuje pateiktos polimeriniais strypais armuotų betoninių elementų tinkamumo ribinio būvio tikrinimo sąlygos ir taikomi skaičiavimo metodai. Pateikti LST EN 1992-1-1:2005 ir ACI 440.1R-06 projektavimo normų įlinkių bei plyšio pločio nustatymo metodai. Pristatytas knygos autorių pasiūlytas alternatyvus įlinkių ir plyšių pločio skaičiavimo algoritmas, pagrįstas diskretaus pleišėjimo metodu. Skyriaus pabaigoje pateikti praktiniai skaičiavimo pavyzdžiai.

Kontroliniai klausimai

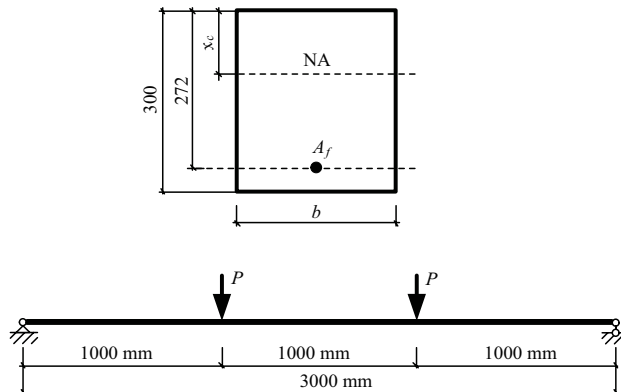
1. Kokios yra pagrindinės tinkamumo ribinio būvio tikrinimo sąlygos?
2. Kokios yra polimeriniais strypais armuotų elementų ribinės įlinkio ir plyšio pločio reikšmės?
3. Paaiškinkite, kodėl ribojami kompozitiniais strypais armuotų betoninių elementų plyšio pločiai.

4. Kodėl polimeriniais strypais armuotų betoninių elementų įlinkiai ir plyšių pločiai vienodomis sąlygomis yra didesni už įprastų gelžbetoninių elementų?
5. Kaip LST EN 1992-1-1:2005 normose įvertintos polimerinės armatūros savybės apskaičiuojant įlinkius?
6. Kaip nustatomas efektyvusis tempiamojo betono plotas LST EN 1992-1-1:2005 plyšių pločio apskaičiavimo metodikoje?
7. Paaiškinkite alternatyvaus įlinkių ir plyšio pločio nustatymo metodo esmę.

Uždaviniai

Uždaviniui spręsti reikiami duomenys (12.8 pav.):

$b = 0,283 \text{ m}$; $h = 0,299 \text{ m}$; $d = 0,268 \text{ m}$; $A_f = 7,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$; $f_{ctm} = 3,41 \cdot 10^3 \text{ kPa}$; $E_{cm} = 36,8 \cdot 10^6 \text{ kPa}$; $E_s = 2,05 \cdot 10^8 \text{ kPa}$; $E_f = 7,0 \cdot 10^7 \text{ kPa}$; $x_{el} = 0,1538 \text{ m}$; $x_{cr} = 0,0754 \text{ m}$; $M = 30 \text{ kNm}$; $k = 0,1065$; $l = 3,0 \text{ m}$.



12.8 pav. Elemento skerspjūvio schema

Elementas veikiamas trumpalaikės apkrova.

1. Apskaičiuoti tamprios ir supleišėjusios stadijų elemento skerspjūvio ploto inercijos momentus.
2. Apskaičiuoti pleišėjimo lenkiamąjį momentą.
3. Apskaičiuoti elemento įlinkį pagal LST EN 1992-1-1:2005.

Atsakymai

1. $I_{el} = 6,41 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$; $I_{cr} = 0,94 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$.
2. $M_{cr} = 15,05 \text{ kNm}$.
3. $\delta = 0,007 \text{ m}$.

Rekomenduojamoji literatūra

- ACI 440.1R-06: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. 2006. Michigan: American Concrete Institute. 44 p. ISBN 9780870312106.
- Al-Sunna, R. A. S. 2006. *Deflection behaviour of FRP reinforced concrete flexural members*: Dissertation. University of Sheffield. 197 p.
- Benmokrane, B.; Challal, O., Masmoundi, R. 1996. Flexural response of concrete beams reinforced with FRP bars, *ACI Structural Journal* 93(1): 46–55.
- Bischoff, P. H.; Gross, S. P. 2011. Design approach for calculating deflection of FRP-reinforced Concrete, *ASCE Journal of Composites for Construction* 15(4): 490–499.
- FRP reinforcement in RC structures – Bulletin No. 40*. 2007. Lausanne, Switzerland: The International Federation for Structural Concrete (FIB). 160 p. ISBN 9782883940802.
- LST EN 1992-1-1:2005. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės* [Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings]. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007. 232 p.
- Marčiukaitis, G.; Jonaitis, B.; Papinigis, V.; Valivonis, J. 2007. *Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas pagal euronormas*. Vilnius: Technika. 340 p. ISBN 9789955281306.
- Marčiukaitis, G.; Valivonis, J. 2010. *Statybinės konstrukcijos ir jų projektavimo pagal euronormas pagrindai*. Vilnius: Technika. 388 p. ISBN 9789955286769.
- Rafi, M. M.; Nadjai, A. A. 2011. Suggested model for European code to calculate deflection of FRP reinforced concrete beams, *Magazine of Concrete Research* 63(3): 197–214.

BAIGIAMASIS ŽODIS

Vadovėlis parašytas remiantis pasauline ir autorių sukaupta patirtimi, įgyta tiriant kompozitais armuotas betonines konstrukcijas. Šių statybinių medžiagų naudojimas statyboje – palyginti nauja kryptis, todėl tik ilgalaikiai ir išsamūs tyrimai padės patikimai įvertinti tokių konstrukcijų elgseną ir suformuluoti tinkamus skaičiavimo modelius.

Knygoje daugiau dėmesio buvo skiriama kompozitais armuotų konstrukcijų fizikinės ir mechaninės prigimties atskleidimui, bet ne konkrečių projektavimo nurodymų formulavimui. Toks medžiagos dėstymo metodas leidžia pačiam skaitytojui pajusti dispersiškai ir polimerinio kompozito strypais armuotų konstrukcijų elgsenos ypatumus. Daug dėmesio buvo skirta kompozitais armuotų betoninių konstrukcijų ir įprasto betono bei gelžbetonio skirtumams atskleisti.

Autoriai stengėsi medžiagą išdėstyti aiškiai ir suprantamai, tačiau dėl dėstomos medžiagos naujumo gali pasitaikyti kai kurių nesklandumų. Į skaitytojų pastabas autoriai atsižvelgs rengdami antrąją vadovėlio laidą.

Leidinyi parengtas ir iŖleistas uŖ Europos socialinio fondo lėŖŖas vykdamant projektą „Transporto ir civilinės inŖinerijos sektorių mokslo, verslo ir studijų integralumo didinimas (TRANCIV)“, VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-008

KOMPOZITAIS ARMUOTOS BETONINĖS KONSTRUKCIJOS

Vadovėlis

Autorių kolektyvas:

Gintaris KAKLAUSKAS, Darius BAČINSKAS, Viktor GRIBNIAK,
Ronaldas JAKUBOVSKIS, Darius ULBINAS, Eugenijus GUDONIS,
Adas MEŠKĖNAS, Edgaras TIMINSKAS, Aleksandr SOKOLOV

Redaktorė *Rita Malikėnienė*
Maketuotojas *Gintautas Bancevičius*
Viršelio dizaineris *Rokas Gelažius*

2012 11 26. 18,73 aut. l. TiraŖas 100 egz.
El. versija pagal leidinio identifikatorių: doi:10.3846/1411-S
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius
<http://www.ciklonas.lt>