

GELŽBETONINIŲ ARKŲ TAIKYMAS DIDELIŲ ANGŲ DENGINIAMS

Tomas Grudė¹, Vytautas Papinigis²

¹Magistrantas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas, gelžbetoninių konstrukcijų katedra

²Doc. Dr., Vilniaus Gedimino technikos universitetas, gelžbetoninių konstrukcijų katedra

Santrauka. Aptariamos statybos praktikoje naudojamos didelio tarpatramio denginių laikančiosios konstrukcijos, tokių konstrukcijų projektavimo pagal Euronormas ypatumai. Nagrinėjamas gelžbetoninės dviejų lankstų denginio arkos patikimumas, išskiriami rodikliai, darantys didžiausią įtaką konstrukcijos patikimumui, atliekama konstrukcijos parametrinė analizė. Formuluojamos praktinės išvados.

Reikšminiai žodžiai: gelžbetoninė arka, patikimumas, patikimumo indeksas.

Išvada

Projektuojamas prekybos ir pramogų centro ledo arenos denginys. Ledo arenos denginio matmenis plane 38,0 x 85,0 m. Kolonų žingsnis išilgine arenos kryptimi 17,0 m, pagrindinės laikančiosios konstrukcijos tarpatramis 38,0 m.

Didelių angų denginiams plačiai taikoma konstrukcija - santvara. Gelžbetoninės santvaros taikomos iki 30,0 m tarpams perdengti. Techniškai įmanomos ir 60,0 m ilgio gelžbetoninės santvaros, tačiau 36,0 m ir didesnių tarpatramių perdengimui kaip ekonomiškesnės naudojamos plieninės (Байков, Сигалов 1991). Gelžbetoninės santvaros ekonomiškumą vertinant pagal plieno sąnaudas, tačiau imlesnės darbui ir jų gamyba brangesnė nei plieninių.

Didelių tarpatramių denginiams labai tinka arkos, nes veikiant skėtimo jėgai lenkimo momentas jose labai sumažėja – reikšmingiausia įraža lieka ašinė jėga ir skerspjuvis gaunamas labai ekonomišką, iš visų standžių plokščių sistemų arka yra lengviausia konstrukcija (Paulauskas, Kvedaras 1977). Kaip teigia Байков ir Сигалов (1991), gelžbetoninės arkos jau nuo 30,0 m tampa ekonomiškesnės, nei gelžbetoninės santvaros. Pastatų denginiams dažniausiai naudojamos dviejų lankstų arkos – jos nelybia jautrios atramų nusėdimui ir yra paprastos konstrukcijos.

Optimali plonasienė erdvinė didelio tarpatramio gelžbetoninė denginio konstrukcija - dvigubo teigiamo Gauso kreivumo kevalas (Рюле *et al.* 1973). Palyginus su kitomis plonasienėmis erdvinėmis denginio konstrukcijomis, jis pasižymi pastovumu, nedideliais lenkimo ir sukimo momentais, nedidelėmis tempimo zonomis, efek-

tyviu medžiagų išnaudojimu, pakankamai nedideliu savuoju svoriu.

Atsižvelgus į didelio tarpatramio denginių statybos patirtį, nagrinėjami šie galimi ledo arenos denginio laikančiųjų konstrukcijų variantai:

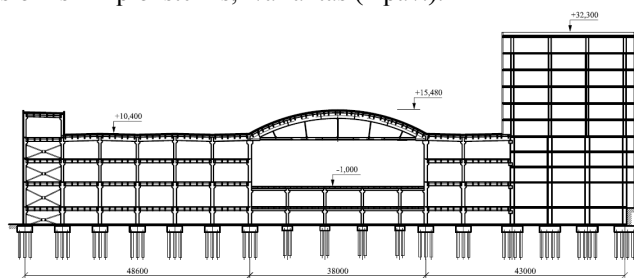
plieninės 38,0 m ilgio santvaros, atremtos ant 17,0 m posantvarių, plieniniai ilginiai, profiliuotas plieninis paklotas;

plieninės 38,0 m dviejų lankstų arkos su styga, atremtos ant 17,0 m posantvarių, plieniniai ilginiai, profiliuotas plieninis paklotas;

gelžbetoninės surenkamos dviejų lankstų 38,0 m ilgio arkos su įtempto gelžbetonio styga, perdengtos 17,0 m ilgio TT tipo denginio plokštėmis;

gelžbetoninis dvigubo teigiamo Gauso kreivumo monolitinis kevalas.

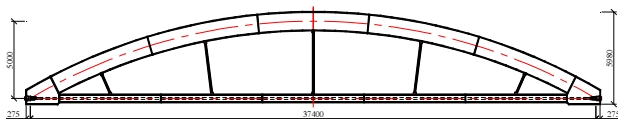
Įvertinus ledo arenos denginio konstrukcijų variantų techninius – ekonominius rodiklius bei atsižvelgus į galimybę naudoti tipinius konstrukcinius elementus (pastato perdangų ir denginio konstrukcijoms naudojamos briaunotosios TT tipo plokštės), tolimesniam projektavimui pasirenkamas gelžbetoninių arkų, perdengtų briaunotosiomis TT plokštėmis, variantas (1 pav.).



1 pav. Pastato schema

Fig.1. Building scheme

Arka ir jos styga (2 pav.) projektuojama surenkama iš atskirų segmentų, segmentai unifikuojami, montavimo metu tarpusavyje jungiami suvirinant išleistus armatūros strypus, paskui sandūros užbetonuojamos. Arkos styga armuojama armatūros lynais, kurie įtempiami į betoną. Po armatūros įtempimo, kanalai injektuojami cementiniu skiediniu. Arkos skerspjūvio matmenys 1200 x 500 mm, stygos – 500 x 500 mm. Stygos pakabos – kvadratinio skerspjūvio 60 x 60 x 5 mm vamzdinis profiliuotis.



2 pav. Gelžbetoninės arkos schema

Fig. 2. Reinforced concrete arch scheme

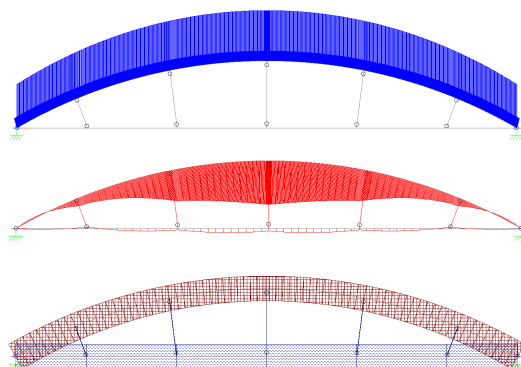
1. Didelių angų denginio konstrukcijų projektavimas

Laikoma, kad taikant dalinių koeficientų metodą su LST EN 1990:2004 A1 priede bei EN 1991 – EN 1999 pateiktomis dalinių koeficientų reikšmėmis, suprojektuojama konstrukcija su patikimumo indekso β reikšme, didesne nei 3,80 pamatiniam 50 metų laikotarpiui. Nagrinėjama dviejų lankstų surenkama gelžbetoninė arka su įtemptojo gelžbetonio styga pagal LST EN 1990:2004 B priedo B.1 ir B.2 lentelių duomenis priskiriama CC3 konstrukcijos pasekmių klasei (daugelio žmonių gyvybių praradimas, labai sunkios ekonominės socialinės arba aplinkos pasekmės), konstrukcijos patikimumo klasė RC3, rekomenduojama mažiausia patikimumo indekso reikšmė saugos ribiniam būviui $\beta_n = 4,30$. Poveikių patikimumui diferencijuoti LST EN 1990:2002 pateikia koeficientų K_{FI} reikšmes, tačiau esant RC3 klasei rekomenduoja pirmumą teikti projektavimo priežiūrai ir kokybės valdymo priemonėms, o ne koeficiento K_{FI} taikymui. Atsižvelgus į šias rekomendacijas, pasirenkamas toks projektavimo kelias:

1. konstrukcija projektuojama dalinių koeficientų metodu taikant įprastas koeficientų reikšmes;
2. tikrinama, ar konstrukcijos patikimumas tenkina norminius reikalavimus;
3. išskiriami konstrukcijos geometriniai ir jos medžiagų rodikliai, turintys didžiausią įtaką konstrukcijos patikimumui, t.y. tie rodikliai, kurių kontrolei turi būti skiriamas ypatingas dėmesys projektavimo, gamybos ir montavimo metu.

2. Arkos patikimumo indeksas

Arka vertinama kaip nuosekliai sujungtų elementų – arkos ir stygos - sistema. Sistemos patikimumas apskaičiuojamas pagal arkos normalinio pjūvio ir centriškai tempiamos stygos stiprumo patikimumą. Nagrinėjamas atvejis, kai arkos stygą veikia maksimali skėtimo jėga nuo konstrukcijų savojo svorio ir sniego apkrovos pagal nepernešto sniego apkrovos schemą (3 pav.), vėjo apkrova kaip palankus poveikis nevertinama, daroma prielaida, kad išankstiniai stygos armatūros įtempiai panaikinti, bet styga nesupleišėjusi.



3 pav. Gelžbetoninės arkos sniego apkrovos schema ir lenkimo momentų bei ašinių jėgų diagramos

Fig. 3. Scheme of reinforced concrete arch snow loading and bending moments and axial force diagrams

Sudarant arkos ir jos stygos stiprumo atsargos funkcijas, arkos ir stygos įrašos su konstrukcijų savojo svorio ir sniego apkrova susiejamos naudojant klasikinės arkų įrašų skaičiavimo priklausomybes (Jokūbaitis et al. 1992):

$$H_{Ed} = \kappa \cdot \frac{(g_d + s_d) \cdot l^2}{8 \cdot f}; \quad (1)$$

$$N_{Ed} = V_{Ed} \cdot \sin \varphi + H_{Ed} \cdot \cos \varphi; \Rightarrow \Rightarrow \varphi = 0^\circ; N_{Ed} = H_{Ed}; \quad (2)$$

$$M_{Ed} = \frac{(g_d + s_d) \cdot l^2}{8} \cdot (1 - \kappa); \quad (3)$$

čia φ - kampas tarp arkos ašies liestinės ir horizontalios linijos ties skaičiuojamuoju pjūviu; nagrinėjamas arkos tarpatrio vidurio pjūvis, kuriame veikia maksimalus lenkimo momentas, todėl kampas $\varphi = 0^\circ$;

κ - koeficientas, įvertinantis skėtimo jėgos mažėjimą deformuojantis arkai ir stygai.

Daroma prielaida, kad konstrukcijos geometriniai, medžiagų stiprio ir apkrovų rodikliai pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį. Skaičiavimuose vertinamos nepalankiausios STR 2.05.03:2003, Užpolevičiaus (2006) ir Ilneret

(1994) pateikiamos variacijos koeficiento ir vidutinio kvadratinio nuokrypio reikšmės.

Atsitiktinis konstrukcijų montavimo ir gamybos metu atsiradęs ekscentricitetas

$$e_a = \max \left\{ \frac{h/30 = 1200/30 = 40 \text{ mm}}{20 \text{ mm}} \right\} = 40 \text{ mm} \quad \text{vertinamas}$$

kaip atsitiktinė ašinės jėgos ekscentriciteto paklaida $\sigma_e = 40 \text{ mm}$ ir arkos normalinio pjūvio vidutinės stiprumo atsargos skaičiavimuose nevertinamas.

Atsparumo apskaičiavimo modelio paklaida įvertinama pagal STR 2.05.03:2003 2 priedo 2 lentelės ir literatūroje (Ellingwood et al. 1980) pateikiamus duomenis: ekscentriškai gniuždomo gelžbetoninio elemento statmenoj pjūvio stiprio apskaičiavimo modelio sistemingoji paklaida $\mu_{\Delta R} = 1,01$, atsitiktinė paklaida - $\delta_{\Delta R} = 0,05$; tempiamojo plieninio elemento stiprio apskaičiavimo modelio sistemingoji paklaida $\mu_{\Delta R, st} = 1,0$, atsitiktinė paklaida - $\delta_{\Delta R, st} = 0,0$.

Įrašų skaičiavimo modelio paklaida nevertinama.

Arkos ir stygos patikimumo indeksas β apskaičiuojamas pagal Užpolevičiaus (2006) pateiktą metodiką ir išraišką:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \geq \beta_n = 4,30; \quad (4)$$

čia σ_Z - stiprumo atsargos vidutinis kvadratinis nuokrypis:

$$\sigma_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial z(\mu_X)}{\partial X_i} \sigma_{X_i} \right)^2}; \quad (5)$$

$\frac{\partial z(\mu_X)}{\partial X_i}$ - stiprumo atsargos funkcijos

$Z = z(d, g, s, l, f, e, f_y, A_{s1}, f_{sc}, A_{s2}, f_c, b, a_2, \Delta R)$ ir
 $Z_{st} = z(g, s, l, f, f_y, A_{s, st}, f_{p0,1}, A_p, \Delta R)$ dalinės išvestinės vidurkių taške;

σ_{X_i} - stiprumo atsargos funkcijos $Z(X_i)$ argumentų vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai;

μ_Z - stiprumo atsarga, apskaičiuojama taikant vidutinės stiprumo atsargos funkcijos argumentų reikšmes:

$$\mu_Z = Z = R + \Delta R - E; \quad (6)$$

čia E - skerspjuvyje veikianti įraža;

R - skerspjuvio laikomoji galia;

ΔR - atsparumo apskaičiavimo modelio paklaida.

Stygos stiprumo atsargos funkcija $Z(X_i)$:

$$Z_{st} = f_{p0,1m} \cdot A_p + f_{ym} \cdot A_{s,st} - \kappa \cdot \frac{(g_m + s_m) \cdot l^2}{8 \cdot f} + \Delta R. \quad (9)$$

Arkos normalinio pjūvio stiprumo atsargos funkcija $Z(X_i)$:

$$Z = \kappa \cdot \frac{(g_m + s_m) \cdot l^2}{8 \cdot f} \cdot \frac{d}{e} + \frac{f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d}{e} - \frac{\left(\kappa \cdot \frac{(g_m + s_m) \cdot l^2}{8 \cdot f} + f_{ym} \cdot A_{s1} - f_{scm} \cdot A_{s2} \right)^2}{2 \cdot \eta \cdot f_{cm} \cdot b \cdot e} - \frac{f_{scm} \cdot A_{s2} \cdot a_2}{e} - \kappa \cdot \frac{(g_m + s_m) \cdot l^2}{8 \cdot f} + \Delta R. \quad (8)$$

3. Skaičiavimo rezultatai

Gauti arkos patikimumo indekso skaičiavimo rezultatai:

arkos normalinio pjūvio stiprumo patikimumo indeksas β_{ark} :

$$\beta_{ark} = 4,363 > \beta_n = 4,30; \quad (9)$$

centriškai tempiamos stygos stiprumo patikimumo indeksas β_{st} :

$$\beta_{st} = 5,267 > \beta_n = 4,30; \quad (10)$$

arkos kaip nuosekliai sujungtų elementų sistemos patikimumo indeksas β :

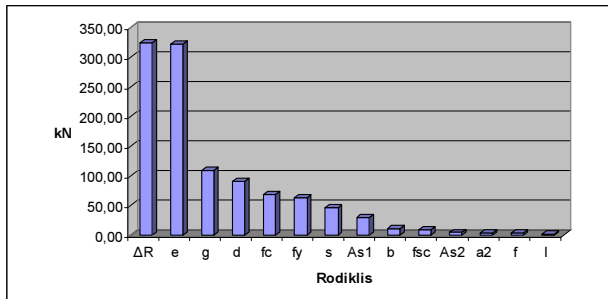
$$\beta = 4,36 > \beta_n = 4,30. \quad (11)$$

Rodikliai, darantys didžiausią įtaką arkos normalinio pjūvio stiprumo patikimumui (4 pav.):

1. atsparumo skaičiavimo modelio paklaida;
2. ašinės jėgos ekscentricitetas;
3. konstrukcijų savojo svorio apkrova;
4. naudingasis skerspjuvio aukštis
5. betono gniuždomasis stipris.

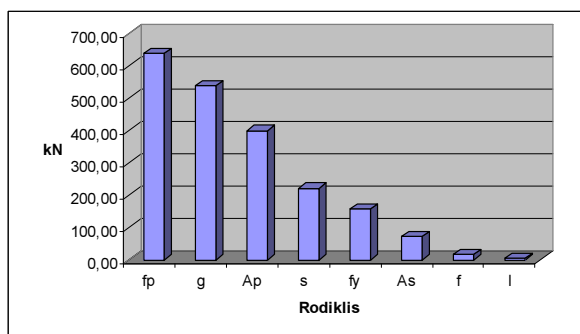
Rodikliai, darantys didžiausią įtaką stygos stiprumo patikimumui (5 pav.):

1. įtemptosios armatūros plieno stipris;
2. konstrukcijų savojo svorio apkrova;
3. įtemptosios armatūros skerspjūvio plotas.



4 pav. Arkos stiprumo atsargos funkcijos argumentų įtaka stiprumo atsargos paklaidai, kN: ΔR - skaičiavimo modelio paklaida; e - ašinės jėgos ekscentricitetas; g - konstrukcijų savojo svorio apkrova; d - naudingasis skerspjūvio aukštis; f_c - betono gniuždomasis stipris; f_y - tempiamosios armatūros stipris; s - sniego apkrova; A_{s1} - tempiamosios armatūros skerspjūvio plotas; b - arkos skerspjūvio plotis; f_{sc} - gniuždomosios armatūros stipris; A_{s2} - gniuždomosios armatūros skerspjūvio plotas; a_2 - atstumas nuo skerspjūvio krašto iki gniuždomosios armatūros svorio centro; f - arkos pakyla; l - arkos skaičiuotinis ilgis

Fig. 4. Influence of arch performance function arguments on its standart deviation, kN: ΔR – error margin of the calculation model; e – eccentricity of axial load; g - self-weight load of the structure; d – effective depth; f_c – strength of concrete; f_y - strength of tension steel; s – snow loading; A_{s1} – area of tension steel; b – width of arch; f_{sc} - strength of compression steel; A_{s2} – area of compression steel; a_2 – distance from the outside of cross-section to the centre of compression steel; f – rise of arch; l – span of arch



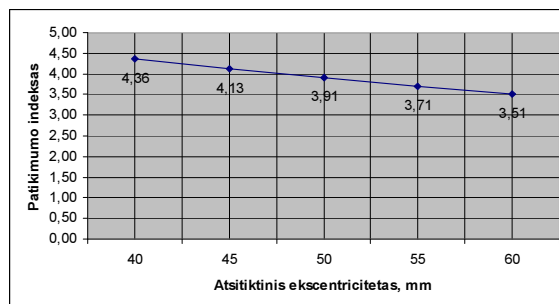
5 pav. Stygos stiprumo atsargos funkcijos argumentų įtaka stiprumo atsargos paklaidai, kN: f_p – įtemptosios armatūros stipris; g - konstrukcijų savojo svorio apkrova; A_p - įtemptosios armatūros skerspjūvio plotas; s - sniego apkrova; f_y – paprastosios armatūros stipris; A_s – paprastosios armatūros skerspjūvio plotas; f - arkos pakyla; l - skaičiuotinis arkos ilgis

Fig. 5. Influence of tie performance function arguments on its standart deviation, kN: f_p – strength of pre-stressed steel; g - self-weight of structure; A_p – area of pre-stressed steel; s – snow loading; f_y - strength of steel; A_s – area of steel; f – rise of arch; l – span of arch

Skaičiuojant patikimumą įvertintas atsitiktinis ekscentricitetas $e_a = 40 \text{ mm}$. Gamybos ir montavimo darbų paklaidai didėjant, arkos normalinio pjūvio atsparumo patikimumas mažėja (6 pav.) ir nebetenkina norminių reikalavimų – 15 mm nuokrypis nuo projektuojant įvertintos reikšmės sumažina patikimumo indeksą iki 3,70, t.y. netenkinami ir RC2 patikimumo klasės reikalavimai ($\beta_n = 3,80$).

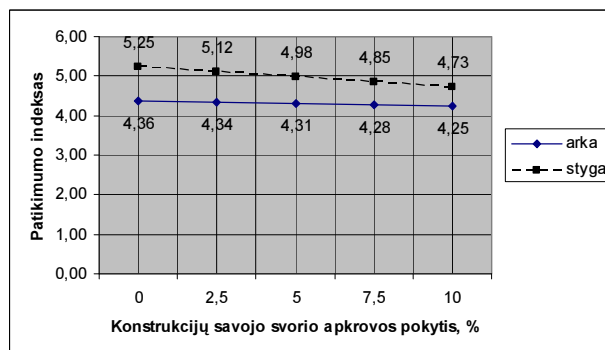
Konstrukcijos savojo svorio apkrovai viršijus projektinę, arkos ir stygos patikimumas mažėja (7 pav.). Apkrovos pokytis didesnę įtaką daro stygos patikimumo indeksui – apkrovai padidėjus 10 % , arkos normalinio pjūvio stiprumo patikimumo indeksas sumažėja 2,5 %, stygos – 10,0 %. Ribinė arkos kaip nuosekliai sujungtų elementų sistemos patikimumo indekso reikšmė pasiekama konstrukciją perkrovus 5 % nuo projektinės apkrovos:

$$\left. \begin{matrix} \beta_{ark} = 4,31; \\ \beta_{st} = 4,98; \end{matrix} \right\} \Rightarrow \beta = 4,30 = \beta_n. \quad (12)$$



6 pav. Arkos normalinio pjūvio stiprumo patikimumo indekso priklausomybė nuo ašinės jėgos atsitiktinio ekscentriciteto

Fig. 6. Strength reliability index of the normal section of the arch relative to the accidental eccentricity of axial force

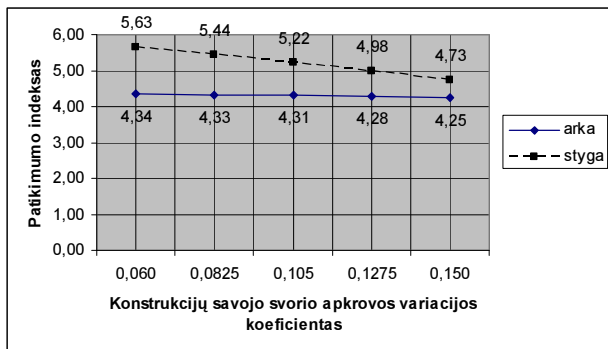


7 pav. Arkos ir stygos patikimumo indeksų priklausomybė nuo konstrukcijų savojo svorio apkrovos pokyčio

Fig. 7. Arch and tie reliability indices relative to the variation of the structure self-weight

Patikimumo skaičiavimuose įvertinta nepalankiausia savojo svorio variacijos koeficiento reikšmė lygi 0,15

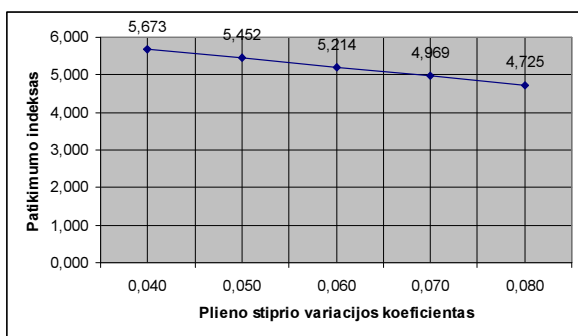
(literatūroje pateikiamos reikšmės 0,06 – 0,15 (Užpolevičius 2006)). 8 paveiksle parodyta 10 % nuo projektinės apkrovos perkrautos konstrukcijos patikimumo indekso priklausomybė nuo variacijos koeficiento – savojo svorio apkrovos neapibrėžtumui mažėjant, pasiekiamas pradinis konstrukcijos patikimumo lygis.



8 pav. Arkos ir stygos patikimumo indeksų priklausomybė nuo konstrukcijų savojo svorio apkrovos variacijos koeficiento

Fig. 8. Arch and tie reliability indices relative to the variation coefficient of the structure self-weight

STR 2.05.03:2003 pateikiama armatūros lynų plieno stiprio variacijos koeficiento reikšmė 0,04 – 0,08 (skaičiavimuose įvertinta 0,08). 9 paveiksle parodyta 10 % nuo projektinės apkrovos perkrautos konstrukcijos stygos stiprumo patikimumo indekso priklausomybė nuo plieno stiprio variacijos koeficiento. Naudojant kokybiškesnius armatūros lynus, pasiekiamas pradinis patikimumo lygis.

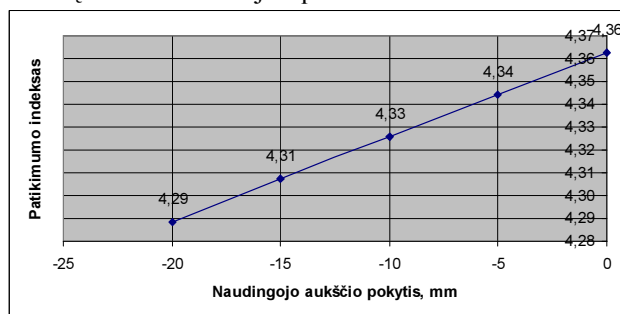


9 pav. Stygos patikimumo indekso priklausomybė nuo plieno stiprio variacijos koeficiento

Fig. 9. Tie reliability index relative to the variation coefficient of steel strength

Naudingajam arkos skerspjūvio aukščiui mažėjant, t.y. armatūrą montuojant ne projektinėje padėtyje, patikimumo indeksas mažėja (10 pav.). Leistinas armatūros strypo nuokrypis nuo projektinės padėties pagal statybos taisyklių reikalavimus yra 10 mm (Bendrieji statybos... 2009). Arkos normalinio pjūvio stiprumo patikimumo

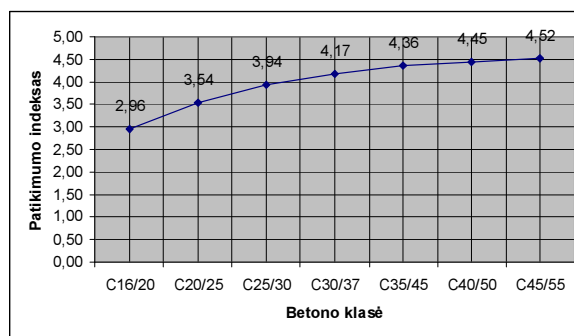
indeksas šiuo atveju sumažėja nuo 4,36 iki 4,33, kas esminės įtakos konstrukcijos patikimumui nedaro.



10 pav. Arkos normalinio pjūvio stiprumo patikimumo indekso priklausomybė nuo naudingojo skerspjūvio aukščio pokyčio

Fig. 10. Strength reliability index of the normal section of the arch relative to the variation of effective depth

Naudojant aukštesnės klasės betoną, betono gniuždomojo stiprio įtaka arkos normalinio pjūvio stiprumo patikimumo indeksui mažėja (11 pav.).



11 pav. Arkos normalinio pjūvio stiprumo patikimumo indekso priklausomybė nuo betono klasės

Fig. 11. Strength reliability index of the normal section of the arch relative to the concrete strength class

Išvados

1. Nagrinėjamos gelžbetoninės arkos stiprumo patikimumas tenkina tokio tipo konstrukcijoms keliamus norminius reikalavimus.
2. Arkos kaip nuosekliai sujungtų elementų – arkos ir stygos - sistemos patikimumas gaunamas mažesnis, nei atskirų jos elementų.
3. Didžiausią įtaką arkos patikimumui darantis rodiklis – ašinės jėgos ekscentricitetas; gamybos stadijoje ypatingas dėmesys turi būti skiriamas arkos segmentų geometrinės formos (kreivio) atitikimui projektinei, montavimo stadijoje - segmentų montavimo tikslumui.
4. Arkos skerspjūvio naudingojo aukščio sumažėjimas, armatūrą montuojant ne projektinėje pa-

dėtyje leistinose ribose, žymios įtakos patikimumui neturi.

5. Skaiciuojant konstrukcijų savojo svorio apkrovas būtina įvertinti technologinės įrangos - vėdinimo, kondicionavimo, apšvietimo sistemų - ir kitos pakabinamos įrangos savąjį svorį.
6. Stygos įtemptosios armatūros plieno techniniai rodikliai turi atitikti projektinius; kadangi reikiama stygos patikimumą užtikrina ir konstrukcinė armatūra, stygos segmentų montavimo metu svarbu kontroliuoti armatūros suvirinimo darbų kokybę.
7. Efektyvus būdas didinti konstrukcijos patikimumą – jautrių rodiklių neapibrėžtumo mažinimas, t.y. kokybės kontrolė ir tikslesnės informacijos apie konstrukcijos tikimybinis rodiklius bei darbo sąlygas surinkimas.

Literatūra

Ellingwood, B. R.; Galambos, T. V.; MacGregor, J. G.; Cornell, A. 1980. *Development of a probability based on load criterion for American national standard A58*. National bureau of standards. Special publication 577.

Jokūbaitis, V. ir kt. 1992. *Gelžbetoninės ir mūrinės konstrukcijos*. Vilnius: Mokslas.

LST EN 1990:2004. Eurokodas. *Konstrukcijų projektavimo pagrindai*.

Paulauskas, J.; Kvedaras, A. 1977. *Metalinės konstrukcijos*. Vilnius: Mokslas.

Statybos taisyklės. Bendrieji statybos darbai. 2009. Lietuvos statybininkų asociacija: Vilnius.

STR 2.05.03:2003. *Statybinių konstrukcijų projektavimo pagrindai*.

Užpolevičius, B. 2006. *Statinių tyrinėjimas, bandymas ir vertinimas*. Vilnius: Technika.

Байков, В.; Сигалов, Э. 1991. *Железобетонные конструкции*. Москва: Стройиздат.

Рюле, Г.; Кюн, Э.; Вайсбах, К.; Цайдлер, Д. 1973. *Пространственные покрытия*. Москва: Стройиздат.

Шпете, Г. 1994. *Надёжность несущих строительных конструкций*. Москва: Стройиздат.

USING REINFORCED CONCRETE ARCHES FOR LONG SPAN ROOF CONSTRUCTIONS

T. Grudė, V. Papinigis

Abstract

The article focuses on the use of long span load-bearing roof constructions in building practices as well as their design in accordance with European standards. Moreover, it also offers the analysis of the reliability of the reinforced concrete two-hinged roof arch and singles out the parameters that have the biggest influence on the reliability of the construction. The article analyses the construction parameters and, finally, presents the concluding remarks.

Keywords: reinforced concrete arch, reliability, reliability index.