

ARMATŪROS IŠANKSTINIŲ ĮTEMPIŲ ĮTAKA GELŽBETONINIŲ
LENKIAMŲJŲ ELEMENTŲ ELGSENAI

Aidas Jokūbaitis

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas aidas.jokubaitis@vgtu.lt*

Santrauka. Publikacijoje glaustai aptarta įtemptojo gelžbetonio esmė, pranašumai ir trūkumai. Atlikta nuostolių vertinimo skirtingų normų metodikomis skaičiavimo analizė. Analizuojamas racionalios armatūros įtempimo jėgos ir jos pridėties ekscentriciteto parinkimas. Nagrinėjama leistinųjų betono tempimo ir gniuždymo įtempimų įtaka sijų pleišėjimui.

Reikšminiai žodžiai: racionali armatūros padėtis, iš anksto įtemptas gelžbetonis, išankstinio įtempimo jėga, išankstinio įtempimo nuostoliai.

Įvadas

Išankstinis armatūros įtempimo principas taikomas jau seniai. Medžiagoje arba dirbinyje sudarius pradinius įtempimus, pagerėja jų eksploatacinės savybės, todėl didelio tarpatramio gelžbetoniniuose elementuose, kuriuose pasireiškia dideli įlinkiai ir plyšiai, tikslinga naudoti iš anksto įtemptą armatūrą. Iš anksto įtemptuose gelžbetoniniuose elementuose visą apkrovą tempiamojoje zonoje perima armatūra, todėl išankstinis armatūros įtempimas sumažina įlinkius ir plyšius.

Iš anksto įtempti gelžbetoniniai elementai yra mažesnių skerspjūvio matmenų nei įprasto gelžbetonio elementai, todėl įtemptojo gelžbetonio elementų gamybai sunaudojama mažiau betono ir armatūros.

Dėl išankstinio įtempimo gelžbetoniniai elementai yra mažesnio skerspjūvio ir svorio nei įprasto gelžbetonio elementai. Dėl elementų ir viso pastato svorio sumažėjimo gali būti naudojami mažesni pamatai. Tai lemia iš anksto įtemptų gelžbetoninių konstrukcijų estetinį architektūrinį pranašumą.

Pagrindinių pastatų laikančiųjų konstrukcijų (sijų, perdangų plokščių) išankstinis įtempimas padidina erdvinį pastato standumą, leidžia parinkti ekonomiškėsių skerspjūvių konstrukcijas, sutaupyti daug medžiagų (Marčiukaitis 2012).

Gelžbetoninės konstrukcijos pleišėjimas buvo viena iš priežasčių, privertusių ieškoti būdų padidinti konstrukcijų tempiamosios zonos atsparumą pleišėjimui. Kadangi armatūros tampriosios deformacijos, palyginti su betono deformacijomis, yra didelės, tai dalį tų deformacijų galima išnaudoti iš anksto ją įtemptiant ir apspaudžiant betoną. Armatūros išankstinio įtempimo jėga sumažina plyšių vystymąsi, panaikina arba pakankamai sumažina tempi-

mo įtempimus kritiniuose pjūviuose (tarpatramio viduryje ir atramoje). Tačiau išankstinio įtempimo jėgos dydis yra ribojamas tam, kad didžiausi betono gniuždomieji įtempimai neviršytų betono gniuždomojo stiprio.

Projektuojant iš anksto įtemptas gelžbetonines konstrukcijas būtina tinkamai įvertinti išankstinių įtempimų nuostolius. Kai įvertinami per dideli armatūros išankstinio įtempimo įtempimų nuostoliai, yra neteisingai nustatoma išankstinio apgnūždymo jėga. Todėl konstrukcijoje veikianti išankstinio apgnūždymo jėga gali būti per didelė ir sukelti didelį elemento išlinkį ir plyšius (Caro *et al.* 2012).

Tam, kad įtempiai, atsiradę dėl išankstinio armatūros įtempimo, pasiskirstytų tolygiai, yra svarbu nustatyti racionalią armatūros padėties elemente. Pagal Magnelio diagramas gali būti parenkamos racionalios armatūros išankstinio įtempimo jėgos ir jos pridėties ekscentriciteto reikšmės, kurios tenkins ribinių įtempimų ir laikomosios galios reikalavimus. Pagal ribinius įtempimus gali būti ribojamas iš anksto įtempto gelžbetoninio elemento pleišėjimas (Boczkaj 1984; Taylor 1987).

Iš anksto įtemptos armatūros nuostolių vertinimas

Didesnę įtaką iš anksto įtemptų gelžbetoninių konstrukcijų įtempimų būvio kitimui turi nuo laiko ir aplinkos priklausančių veiksnių kitimas – armatūros relaksacija, betono traukumas, valksnumas, aplinkos drėgnis ir temperatūra.

Iš anksto įtemptos armatūros įtempimų nuostolių atsiradimas bei įtempimų ir deformacijų būvio kitimas gali būti nagrinėjami konstrukcijos gamybos ir naudojimo etapuose.

Konstrukcijų gamybos etape armatūros išankstinio įtempimo metu jos įtempiai gali sumažėti dėl galimo praslidimo inventoriniuose inkaruose ir poveržlių galvučių susiglemžimo. Skirtingose projektavimo normose (LST EN 1992-1-1, STR 2.05.05:2005, PCI 1999) nuostoliai dėl inkarinių pleiščių įtraukimo ir deformacijų nustatomi

$$\Delta\sigma_{pd} = \frac{\Delta l}{l} \cdot E_p, \quad (1)$$

čia Δl – supresuotų poveržlių galvučių susiglemžimas arba strypų praslidimas inventoriniuose inkaruose, l – tempiamojo elemento ilgis, mm.

Dydis Δl priklauso nuo pasirinkto armatūros inkaravimo būdo, naudojamos įrangos nuokrypų.

Dėl apgniuždymo jėgos, kurią sukelia išankstinis armatūros įtempimas, pasireiškia nuostoliai dėl betono tampraus apspaudimo. Šie nuostoliai pagal EC 2 ir PCI nustatomi

$$\Delta\sigma_{el} = \alpha_e \cdot \left(\frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \cdot e^2}{I_c} - \frac{M_{sw} \cdot e}{I_c} \right), \quad (2)$$

čia α_e – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis, e – ekscentricitetas, P_i – apgniuždymo jėga, M_{sw} – momentas nuo konstrukcijos savojo svorio.

Įtempiai armatūroje mažėja, nes iš anksto įtempioje armatūroje, esant vienodoms tempiamosioms deformacijoms, laikui einant dėl relaksacijos vyksta vidiniai plieno struktūros pokyčiai. Pagal STR metodiką nuostoliai dėl armatūros relaksacijos gamybos etape apskaičiuojami

$$\Delta\sigma_{pr} = \left(0,22 \cdot \frac{\sigma_p}{f_{p0,1k}} - 0,1 \right) \cdot \sigma_p, \quad (3)$$

čia σ_p – pradiniai armatūros įtempiai, $f_{p0,1k}$ – įtemptosios armatūros sąlyginės takumo ribos charakteristinė reikšmė.

EC 2 nuostoliai dėl relaksacijos priklauso nuo laiko t , aplinkos temperatūros, santykinio įtempių dydžio $\mu = \sigma_{pi} / f_{pk}$ ir armatūros klasės. Šie nuostoliai yra vertinami tiek gamybos, tiek naudojimo etapuose.

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}. \quad (4)$$

Pagal PCI rekomendacijas nuostoliai dėl iš anksto įtemptos armatūros relaksacijos apskaičiuojami

$$\Delta\sigma_{pr} = \left[K_{re} - J (\Delta\sigma_{el} + \Delta\sigma_{cr} + \Delta\sigma_{cs}) \right] \cdot C, \quad (5)$$

čia $\Delta\sigma_{el}$, $\Delta\sigma_{cs}$, $\Delta\sigma_{cr}$ – atitinkamai nuostoliai dėl tampraus betono apspaudimo, susitraukimo ir valkšnumo, C – koeficientas, priklausantis nuo armatūros tipo ir santykinio įtempių dydžio σ_{pi} / f_{pk} , K_{re} ir J – dydžiai, priklausantys nuo plieno klasės.

Dėl išankstinio betono apgniuždymo laikui einant pasireiškia betono valkšnumo deformacijos. Kadangi betonas ir armatūra deformuojasi kartu, armatūra atsileidžia ir įtempiai armatūroje mažėja, sukeldami išankstinius armatūros įtempimų nuostolius. Šie nuostoliai vadinami nuostoliais dėl betono valkšnumo.

PCI rekomendacijose laikoma, kad valkšnumo koeficientas yra lygus 2,0 (armatūrą įtempiant į atsparas), o EC 2 šis koeficientas apskaičiuojamas įvertinant betono klasę, laiką ir tariamąjį dydį h_0 . Pagal EC 2 ir PCI nuostoliai dėl betono valkšnumo nustatomi

$$\Delta\sigma_{cr} = \varphi(\sigma, t_0) \cdot \alpha_e \cdot \left(\frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \cdot e^2}{I_c} - \frac{M_{ext} \cdot e}{I_c} \right), \quad (6)$$

čia M_{ext} – momentas, atsiradęs dėl tariamai nuolatinių apkrovų.

Įtemptosios armatūros įtempių nuostoliai dėl valkšnumo STR metodikoje yra suskirstyti į dvi dalis: nuostolius dėl greitai pasireiškiančio betono valkšnumo gamybos etape ((7) ir (8)) ir nuostolius dėl valkšnumo naudojimo etape ((9) ir (10)). Pagal santykinius betono įtempimus ties iš anksto įtemptos armatūros centru (σ_{cp} / f_{cp}) gali būti įvertinamas betono tiesinis ((7) ir (9)) arba netiesinis ((8) ir (10)) valkšnumas.

$$\Delta\sigma_{cr} = \chi \cdot \left(40 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} \right), \text{ kai } \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} \leq \alpha, \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_{cr} = \chi \cdot \left(40 \cdot \alpha + 85 \cdot \beta \cdot \left(\frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} - \alpha \right) \right), \text{ kai } \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} > \alpha, \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_{cr} = 150 \cdot \chi \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}}, \text{ kai } \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} \leq 0,75, \quad (9)$$

$$\Delta\sigma_{cr} = 300 \cdot \chi \cdot \left(\frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} - 0,375 \right), \text{ kai } \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} > 0,75. \quad (10)$$

Traukumo deformacijos yra nuo laiko priklausančios deformacijos, kurios atsiranda betonui kietėjant ir kurią laiką jam sukietėjus. Dėl betono traukumo deformacijų elementas trumpėja ir mažėja įtempiai armatūroje. Šis įtempių sumažėjimas vadinamas nuostoliais dėl betono traukumo.

Elementuose, kuriuose tūrio ir paviršiaus ploto santykis (V / S) yra didelis, pasireiškia didesnės traukumo deformacijos. Šis santykis yra įvertinamas PCI rekomendacijose

$$\Delta\sigma_{cs} = 8,2 \cdot 10^{-6} \cdot K_{sh} \cdot E_p \cdot \left(1 - 0,00236 \cdot \frac{V}{S} \right) \cdot (100 - RH), \quad (11)$$

čia $K_{sh} = 1,0$, įtempiant į atsparas, V – elemento tūris, S – elemento viso paviršiaus plotas, RH – santykinis drėgnis.

EC 2 skerspjūvio ploto ir paviršiaus santykis įvertinamas tariamuoju dydžiu. Nuostoliai dėl betono traukumo nustatomi

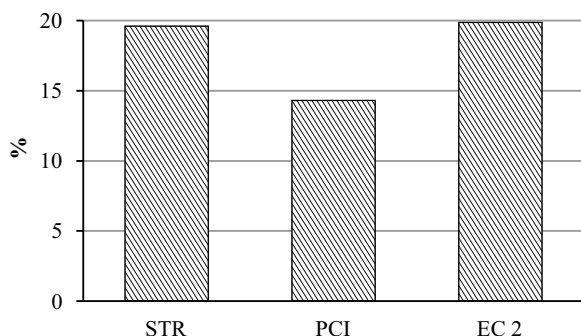
$$\Delta\sigma_{cs} = \varepsilon_{cs} \cdot E_p, \quad (12)$$

čia ε_{cs} – bendroji traukumo deformacija.

STR nuostoliai dėl betono traukumo nustatomi pagal betono tipą, klasę ir kietėjimo sąlygas.

Armatūros išankstinio įtempimo nuostoliams palyginti buvo nagrinėta stačiakampio skerspjūvio gelžbetoninė sija, tempiamojoje zonoje armuota iš anksto įtemptais lynais. Lynų klasė Y1860S, betono klasė C40/50.

1 pav. pateikti skaičiavimo rezultatų palyginimai. Mažiausi bendrieji armatūros įtempių nuostoliai gauti skaičiuojant pagal PCI rekomendacijas. Nuostoliai sudarė 14,2 % nuo pradinių įtempių. Skaičiuojant pagal STR ir EC 2 nuostoliai sudarė atitinkamai 19,5 % ir 19,6 % nuo pradinių įtempių.

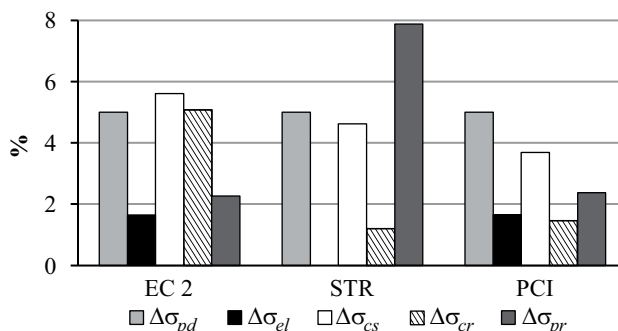


1 pav. Bendrieji įtemptosios armatūros įtempių nuostoliai
Fig. 1. General prestress losses

Išankstiniai armatūros įtempių nuostoliai dėl armatūros relaksacijos ir betono valkšnumo, skaičiuojant skirtingomis metodikomis, yra skirtingai įvertinami gamybos ir naudojimo etapuose, todėl yra tikslinga nagrinėti suminius dėl armatūros relaksacijos ir betono valkšnumo pasireiškusius nuostolius (žr. 2 pav.).

Skaičiuojant pagal STR ir PCI rekomendacijas didžiausią įtaką bendriesiems įtemptosios armatūros įtempių nuostoliams daro nuostoliai dėl armatūros relaksacijos (STR – 7,9 %, PCI – 2,4 % nuo pradinių įtempių) ir betono traukumo (STR – 4,6 %, PCI – 3,7 % nuo pradinių įtempių). Skaičiuojant pagal EC 2, didžiausią įtaką bendriesiems įtemptosios armatūros įtempimams daro nuostoliai dėl betono traukumo (5,6 % nuo pradinių įtempių) ir nuostoliai dėl betono valkšnumo (5,1 % nuo pradinių įtempių) (žr. 2 pav.).

Kadangi priimama, kad lynai yra įtempiami vienodomis sąlygomis ir naudojama ta pati įranga, todėl nuostoliai dėl inkarų deformacijų pagal nagrinėjamas normas gaunami vienodi.



2 pav. Įtemptosios armatūros įtempių nuostoliai: $\Delta\sigma_{pd}$ – atsiradę dėl inkarų deformacijų; $\Delta\sigma_{el}$ – dėl betono tampraus apspaudimo; $\Delta\sigma_{cs}$ – dėl betono traukumo; $\Delta\sigma_{cr}$ – dėl betono valkšnumo; $\Delta\sigma_{pr}$ – dėl armatūros relaksacijos

Fig. 2. Prestress losses caused by: $\Delta\sigma_{pd}$ – anchorage seating; $\Delta\sigma_{el}$ – elastic shortening of concrete; $\Delta\sigma_{cs}$ – the shrinkage of concrete; $\Delta\sigma_{cr}$ – the creep of concrete; $\Delta\sigma_{pr}$ – steel relaxation

Išankstinio armatūros įtempimo nuostoliai dėl armatūros relaksacijos, betono valkšnumo ir traukumo yra nuo laiko priklausantys nuostoliai, todėl jie turi didesnę įtaką bendriesiems įtemptosios armatūros įtempių nuostoliams nei trumpalaikiai nuostoliai.

Racionalios armatūros įtempimo atstojamosios jėgos ir ekscentriciteto parinkimas

Norint nustatyti racionalią armatūros padėtį įtemptosios armatūros įtempių nuostoliai gali būti tiksliai apskaičiuojami ir įvertinami pagal anksčiau aptartų nuostolių skaičiavimo metodikas. Įvertinant armatūros įtempių nuostolius didelis tikslumas nebūtinai, taigi gamybos metu pasireiškiantys nuostoliai gali būti imami 10 % nuo pradinių armatūros įtempių, o naudojimo – 20–25 %.

Norint pasiekti visuose iš anksto įtempto elemento pjūviuose panašų įtempių būvį galima keisti apspaudimo jėgos ekscentricitetą (Krishnamurthy 1983; Boczkaj 1984): gamybos etape

$$e \leq -\frac{\sigma'_{min} \cdot W_v}{P_0} + \frac{M_{min}}{P_0} + \frac{W_v}{A_c}, \quad (13)$$

$$e \leq \frac{\sigma'_{max} \cdot W_a}{P_0} + \frac{M_{min}}{P_0} - \frac{W_a}{A_c}, \quad (14)$$

naudojimo etape

$$e \geq -\frac{\sigma_{min} \cdot W_v}{P_0} + \frac{M_{max}}{P_0} + \frac{W_v}{A_c}, \quad (15)$$

$$e \geq \frac{\sigma_{min} \cdot W_a}{P_0} + \frac{M_{max}}{P_0} - \frac{W_a}{A_c}, \quad (16)$$

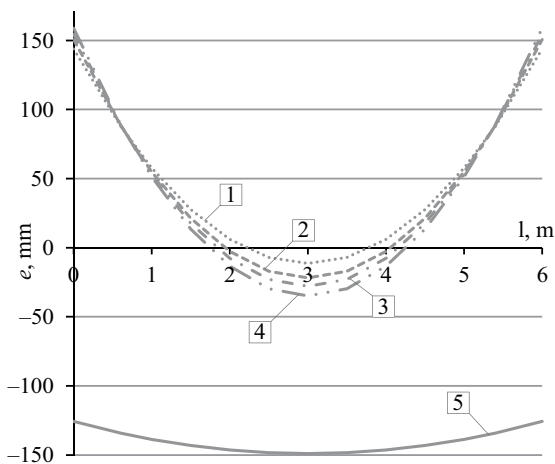
čia σ'_{min} , σ'_{max} , σ_{min} , σ_{max} – leidžiami mažiausieji ir didžiausieji betono įtempiai gamybos ir naudojimo etapuose,

M_{\min}, M_{\max} – lenkimo momentai, atsirandantys nuo apkrovų, veikiančių atitinkamai gamybos ir naudojimo etapuose, W_v, W_a – skerspjūvio atsparumo momentai atitinkamai viršutinio ir apatinio skerspjūvio krašto atžvilgiu, e – išankstinio įtempimo jėgos pridėties ekscentricitetas.

Pagal (13) ir (16) nelygybes galima nustatyti racionalias iš anksto įtemptos armatūros padėties ribas. Laikoma, kad gamybos etape iš anksto įtemptos armatūros nuostoliai yra pastovaus dydžio. Naudojimo etape laikoma, kad patiriami nuostoliai yra 10 %, 15 % ir 20 % nuo pradinio įtempimo.

Iš anksto įtemptuose lenkiamuosiuose gelžbetoniniuose elementuose plyšiai gali būti leidžiami gamybos etape (elemento viršuje) ir naudojimo etape (elemento apačioje) arba neleidžiami. Taip pat tiek gamybos, tiek naudojimo etapuose yra ribojami betono gniuždomieji įtempiai. Yra aptariami keturi sijos pleišėjimo atvejai: kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos ir naudojimo etapuose, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos ir naudojimo etapuose, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos etape, bet leidžiami naudojimo etape, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos etape, bet neleidžiami naudojimo etape.

Kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos ir naudojimo etapuose (žr. 3 pav.) ir nuostoliai naudojimo etape sudaro 10 %, 15 % ir 20 % nuo pradinio įtempimo, elemento viduryje armatūros padėties ekscentricitetas atitinkamai yra 2, 2,5 ir 3 kartus žemiau lyginant su armatūros padėties ekscentricitetu veikiant pradiniam armatūros įtempimui. Elemento galuose (inkaravimo zonoje), kai nuosto-

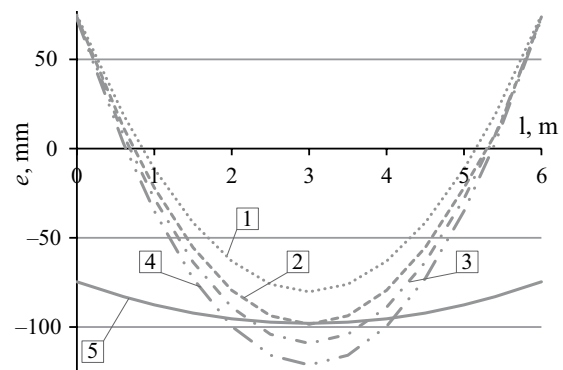


3 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos ir naudojimo etapuose: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis

Fig. 3. Reinforcement position, when cracks are allowed in the tension zone, at transfer and service stages: 1 – no prestress loss; 2 – 10 % loss; 3 – 15 % loss; 4 – 20 % loss; 5 – lower position of reinforcement

liai naudojimo etape sudaro 10 %, 15 % ir 20 %, armatūros padėties ekscentricitetas atitinkamai yra 5 %, 7 % ir 11 % aukščiau lyginant su armatūros padėties ekscentricitetu veikiant pradiniam armatūros įtempimui.

Kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos ir naudojimo etapuose (žr. 4 pav.) ir nuostoliai naudojimo etape sudaro 10 %, 15 % ir 20 % nuo pradinio įtempimo, elemento viduryje armatūros padėties ekscentricitetas atitinkamai yra 23 %, 29 % ir 41 % žemiau lyginant su armatūros padėties ekscentricitetu veikiant pradiniam armatūros įtempimui. Elemento galuose armatūros padėties ekscentricitetas keičiasi nedaug nuo 1 % iki 3 %.

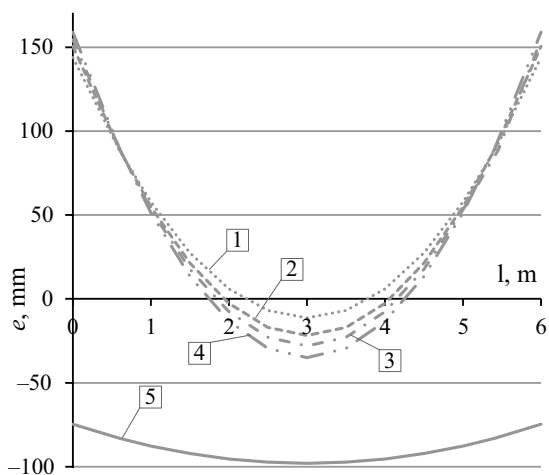


4 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos ir naudojimo etapuose: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis

Fig. 4. Reinforcement position, when cracks are not allowed in the tension zone, at transfer and service stages: 1 – no prestress loss; 2 – 10 % loss; 3 – 15 % loss; 4 – 20 % loss; 5 – lower position of reinforcement

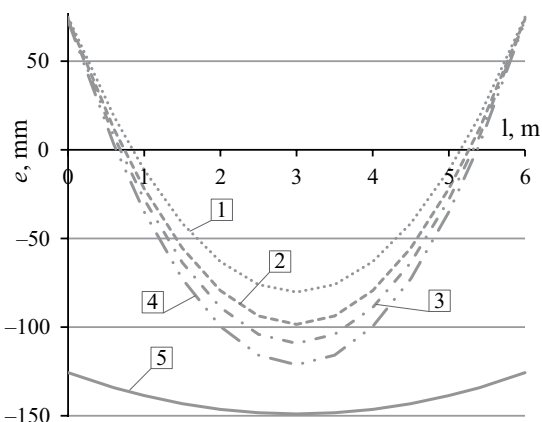
Atvejais, kai plyšiai elemento tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos ir naudojimo etapuose (žr. 3 pav.) bei kai plyšiai neleidžiami gamybos etape, bet leidžiami naudojimo etape (žr. 5 pav.), armatūros ekscentriciteto viršutinės ribos padėtis yra vienoda esant skirtingiems išankstinio įtempimo nuostoliams (10 %, 15 %, 20 %). Taip pat armatūros ekscentriciteto viršutinės ribos padėtis yra vienoda, kai plyšiai elemento tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos ir naudojimo etape (žr. 4 pav.) bei kai plyšiai leidžiami gamybos etape, bet neleidžiami naudojimo etape (žr. 6 pav.).

Armatūros ekscentriciteto apatinės ribos padėtis elemento viduryje skiriasi 65 %, o elemento gale 59 % lyginant atvejus, kai plyšiai elemento tempiamojoje zonoje yra leidžiami gamybos ir naudojimo etape, su atveju, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami tik naudojimo etape, bei atvejį, kai plyšiai elemento tempiamojoje zonoje yra neleidžiami gamybos ir naudojimo etape, su atveju, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami tik naudojimo etape.



5 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos etape, bet leidžiami naudojimo etape: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis

Fig. 5. Reinforcement position, when cracks are not allowed in the tension zone at the transfer stage, but are allowed at the service stage: 1 – no prestress loss; 2 – 10 % loss; 3 – 15 % loss; 4 – 20 % loss; 5 – lower position of reinforcement



6 pav. Armatūros padėtis, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos etape, bet neleidžiami naudojimo etape: 1 – nėra išankstinio įtempimo nuostolių; 2 – nuostoliai sudaro 10 %; 3 – 15 %; 4 – 20 %; 5 – apatinė armatūros padėtis

Fig. 6. Reinforcement position, when cracks are allowed in the tension zone at the transfer stage, but are not allowed at the service stage: 1 – no prestress loss; 2 – 10 % loss; 3 – 15 % loss; 4 – 20 % loss; 5 – lower position of reinforcement

Norint parinkti armatūros išankstinio įtempimo jėgos ir jos pridėties ekscentriciteto racionalias reikšmes, galima naudotis Magnelio diagramomis.

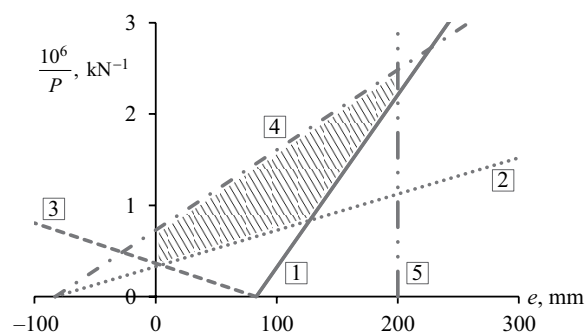
Pertvarkius anksčiau pateiktas nelygybes ((13)–(16)) gaunama diagrama, kurioje besikertančios lygčių tiesės išskiria plotą, kurio viduje visos keturios nelygybės yra tenkinamos (žr. 7–10 pav.). Gaunamas leistinasis plotas, kuriame galima parinkti įvairias armatūros įtempimo jėgos ir jos pridėties ekscentriciteto kombinacijas (Boczka

1984; Taylor 1987). Šiame plote parinkti P ir e dydžiai tenkins ribinių įtempių ir laikomosios galios reikalavimus (Adewuyi, Franklin 2011).

Racionaliausia iš grafikų parinkti didžiausią $1/P$ reikšmę ir ją atitinkantį ekscentricitetą. Ekonominiu požiūriu tai yra naudinga, nes bus gaunama mažiausia įtempimo jėga P (Boczka 1984; Taylor 1987).

Ekscentriciteto parinkimas yra ribojamas maksimalia jo reikšme priklausomai nuo elemento skerspjūvio matmenų ir apsauginio betono sluoksnio.

Kai plyšiai leidžiami gamybos ir naudojimo etapuose (žr. 7 pav.), galimas didžiausias ekscentricitetas viršija leistiną ($e_{\max} = 200$ mm). Pasirenkama ekscentriciteto reikšmė yra 200 mm. Dėl didelio ekscentriciteto sija išlinks labiau ir viršutiniuose skerspjūvio sluoksniuose galimi plyšiai. Šiuo atveju įtempimo jėga yra mažesnė lyginant su kitais atvejais, todėl dėl veikiančių apkrovų sija išlinks labiau ir apatiniuose skerspjūvio sluoksniuose galimi plyšiai.



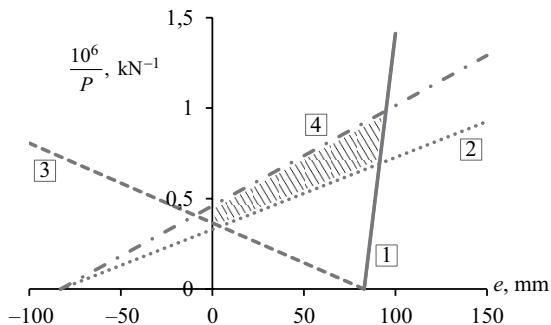
7 pav. Magnelio diagrama, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos ir naudojimo etapuose: 1 – (13); 2 – (14); 3 – (15); 4 – (16); 5 – e_{\max}

Fig. 7. Magnel diagram, when cracks are allowed in the tension zone, at transfer and service stages: 1 – (13); 2 – (14); 3 – (15); 4 – (16); 5 – e_{\max}

Kai plyšiai neleidžiami gamybos ir naudojimo etapuose, tempiamasis betono stipris negali būti pasiektas tiek sijos viršutiniuose sluoksniuose, tiek sijos apatiniuose sluoksniuose. Ekscentricitetas gaunamas 53 % mažesnis nei tuo atveju, kai plyšiai leidžiami gamybos ir naudojimo etapuose, o įtempimo jėga – 2,5 karto didesnė (žr. 8 pav.). Todėl sumažėjus ekscentricitetui sumažėja sijos išlinkis, o padidėjus įtempimo jėgai sumažėja įlinkis.

Kai plyšiai gamybos etape neleidžiami, o naudojimo etape sija gali pleišėti, ekscentricitetas gaunamas 8 % didesnis nei tuo atveju, kai plyšiai neleidžiami gamybos ir naudojimo etapuose, o įtempimo jėga – 66 % mažesnė (žr. 9 pav.). Todėl sijos apačia veikiant išorinėms apkrovoms išlinks labiau ir gali atsirasti plyšių.

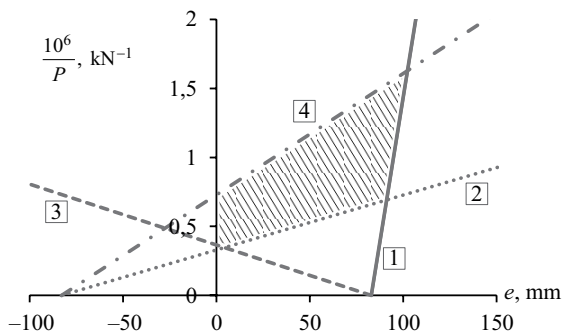
Kai plyšiai buvo neleidžiami tik naudojimo etape (žr. 10 pav.), ekscentricitetas ir įtempimo jėga padidėjo atitinkamai 48 % ir 26 % lyginant su atveju, kai plyšiai leidžiami tik naudojimo etape. Todėl sijos viršus išlinks labiau ir gali pleišėti, o sijos apačia įlinks mažiau ir plyšių atsivėrimo galimybė yra mažesnė.



8 pav. Magnelio diagrama, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos ir naudojimo etapuose:

1 – (13); 2 – (14); 3 – (15); 4 – (16)

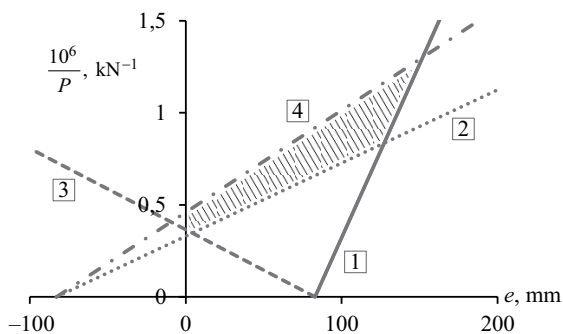
Fig. 8. Magnel diagram, when cracks are not allowed in the tension zone, at transfer and service stages: 1 – (13); 2 – (14); 3 – (15); 4 – (16)



9 pav. Magnelio diagrama, kai plyšiai tempiamojoje zonoje neleidžiami gamybos etape, bet leidžiami naudojimo etape:

1 – (13); 2 – (14); 3 – (15); 4 – (16)

Fig. 9. Magnel diagram, when cracks are not allowed in the tension zone at the transfer stage, but are allowed at the service stage: 1 – (13); 2 – (14); 3 – (15); 4 – (16)



10 pav. Magnelio diagrama, kai plyšiai tempiamojoje zonoje leidžiami gamybos etape, bet neleidžiami naudojimo etape:

1 – (13); 2 – (14); 3 – (15); 4 – (16)

Fig. 10. Magnel diagram, when cracks are allowed in the tension zone at the transfer stage, but are not allowed at the service stage: 1 – (13); 2 – (14); 3 – (15); 4 – (16)

Gauti Magnelio diagramų atvejai parodė, kad priklausomai nuo parinktų armatūros išankstinio įtempimo jėgos ir jos pridėties ekscentriciteto reikšmių galima riboti gelžbetoninio lenkiamojo elemento pleišėjimą.

Išvados

1. Iš anksto įtemptos konstrukcijos (sijos, perdangų plokštės) padidina pastato erdvinį standumą, yra ekonomiškesnių skerspjūvių, leidžia sutaupyti daug medžiagų.
2. Iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijų įtempių būvio kitimui didesnę įtaką turi nuo laiko priklausančių veiksnių kitimas – armatūros relaksacija, betono traukumas, valkšnumas. Skaičiuojant iš anksto įtemptos armatūros nuostolius pagal STR ir PCI rekomendacijas, didžiausią įtaką bendriesiems įtemptosios armatūros įtempių nuostoliams daro nuostoliai dėl armatūros relaksacijos ir betono traukumo. Skaičiuojant pagal EC 2 – nuostoliai dėl betono traukumo ir valkšnumo.
3. Nustatyta, kad naudojimo etape didėjant išankstinio įtempimo nuostoliams (mažėjant įtempimo jėgai) didėja armatūros viršutinės zonos pridėties ekscentricitetas visais elemento tempiamųjų ir gniuždomųjų betono įtempių ribojimo atvejais. Labiausiai ekscentricitetas didėja vidurinėje elemento dalyje, o atraminėse zonose kinta nedaug. Kai plyšiai yra leidžiami, didėja atitinkamos ekscentriciteto ribos, kai plyšiai yra neleidžiami, atitinkamos ekscentriciteto ribos mažėja.
4. Naudojantis Magnelio diagramomis, priklausomai nuo elemento tempiamųjų ir gniuždomųjų betono įtempių ribojimo, galima parinkti racionalias įtempimo jėgos ir jos pridėties ekscentriciteto reikšmes. Nustatyta, kad mažinant ekscentricitetą ir armatūros išankstinio įtempimo jėgą mažėja galimybė gamybos etape tempiamojoje betono zonoje atsiverti plyšiams, o naudojimo etape plyšių atsivėrimo galimybė didėja.

Literatūra

- Adewuyi, A. P.; Franklin, S. O. 2011. Analytical investigation of prestressed concrete structures incorporating combined post-tensioned and post-compressed reinforcements, *ARPN Journal of Engineering and Applied Science* 6 (12, december).
- Boczkaj, B. K. 1984. Design prestressed concrete section for flexure, *Journal of Structural Engineering* 110: 439–460. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1984\)110:3\(439\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:3(439))
- Caro, L. A.; Marti-Vargas, J. R.; Serna, P. 2012. Prestress losses evaluation in prestressed concrete prismatic specimens, *Engineering Structures* 48: 704–715. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.038>

- Krishnamurthy, N. 1983. Magnel diagrams for prestressed concrete beams, *Journal of Structural Engineering* 109: 2761–2769. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1983\)109:12\(2761\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:12(2761))
- LST EN 1992-1-1 Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės. 2005. Vilnius. 232 p.
- Marčiukaitis, G. 2012. *Iš anksto įtemptas gelžbetonis*. Vilnius: Technika. 294 p.
- PCI design handbook. *Precast and prestressed concrete*. Fifth edition. 1999.
- STR 2.05.05:2005 Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 2005. Vilnius: Aplinkos ministerija. 128 p.
- Taylor, M. A. 1987. Direct design of nonprismatic prestressed beams: I, *Journal of Structural Engineering* 113: 1154–1166. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1987\)113:6\(1154\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:6(1154))
- Taylor, M. A. 1987. Direct design of nonprismatic prestressed beams: II, *Journal of Structural Engineering* 113: 1167–1184. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1987\)113:6\(1167\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:6(1167))

THE INFLUENCE OF THE PRESTRESS OF REINFORCED STEEL ON THE BEHAVIOR OF THE FLEXURAL ELEMENTS OF REINFORCED CONCRETE

A. Jokūbaitis

Abstract

This article briefly discusses the essence of prestressed concrete, its advantages and disadvantages. The analysis of prestress losses is done according to different standards. The paper explains pretensioning force and selection of its eccentricity as well as analyzes the influence of beam cracking according to limitations on concrete tensile and compressive stresses.

Keywords: rational position of reinforcement, prestressed concrete, prestressing force, loss of prestress.