

LENKIAMŲ IŠ ANKSTO ĮTEMPTŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ SU NEPLIENINE ARMATŪRA NORMALINIO PJŪVIO LAIKOMOSIOS GALIOS SKAIČIAVIMAS

Mantas Atutis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: mantas.atutis@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje aptarti lenkiamųjų iš anksto įtemptų gelžbetoninių sijų su neplienine (angl. *non-metallic*) arba kompozitine armatūra normalinio pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodai. Neplieninė armatūra iki pat lenkiamų gelžbetoninių ar iš anksto įtempto gelžbetonio elementų laikomosios galios netekimo išlaiko tamprumo savybes. Šia armatūra armuotų sijų, lyginant su tradicine plieno armatūra, elgsena skiriasi. Galimi keli kompozitine (FRP) armatūra armuotų lenkiamųjų elementų suirimo atvejai. Skaičiavimo rezultatai rodo, kad priklausomai nuo elemento suirimo pobūdžio, remiantis straipsnyje aptartais metodais, normalinio pjūvio laikomosios galios skaičiavimų rezultatai skiriasi. Nustatyta, kad neplieninės armatūros naudojimas iš anksto įtemptose konstrukcijose yra efektyvus: laikomoji galia gali būti apie 5 % didesnė už sijų su įprastine plienine armatūra laikomąją galią.

Reikšminiai žodžiai: anglies pluošto armatūra, įtemptasis gelžbetonis, pusiau pusiausviro suirimo metodas, Collinso betono modelis.

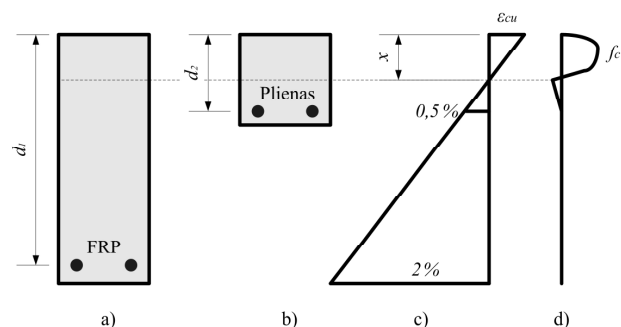
Įvadas

Kompozitinė (FRP) armatūra dažniausiai naudojama gelžbetoninėse konstrukcijose kaip pagrindinė strypinė paprastoji arba iš anksto įtempta armatūra. Lakštinė paprastoji arba iš anksto įtempta armatūra dažniausiai naudojama gelžbetoninėms konstrukcijoms stiprinti. Iš visų kompozitinių medžiagų labiausiai išsiskiria anglies, stiklo ir aramido pluoštai, pasižymintys geromis mechaninėmis ir antimagnetinėmis savybėmis, atsparumu korozijai ir nuovargiui, mažu šilumos laidumu, didesniu nei plieno stiprio ir masės santykiu bei mažesniais išankstinio įtempimo nuostoliais dėl armatūros relaksacijos (Abdelrahman; Rizkalla 1993).

Viena svarbiausių neplieninės armatūros savybių yra darbas esant tampriai stadijai ir iki suirimo nepasireiškiant plastinėms deformacijoms. Norint atlikti normalinio pjūvio laikomosios galios skaičiavimą, priklausomai nuo armavimo procento, galima nustatyti elemento suirimo pobūdį (Dolan; Burke 2001).

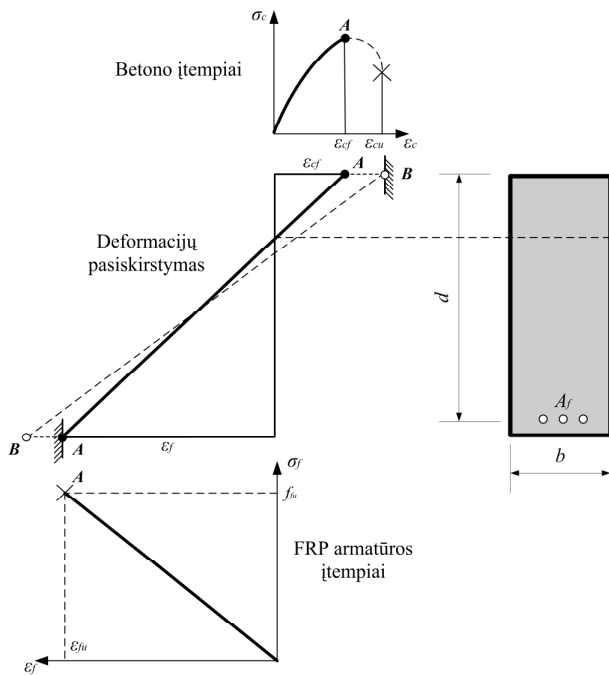
Gelžbetoninėse konstrukcijose naudojamos tradicinės plieno armatūros (1 pav., b) stiprumo ir tamprumo modulio santykis yra panašus į betono, todėl tokio elemento neutralioji ašis yra viduryje skerspjūvio efektyviojo aukščio. Kai elementas armuotas kompozitine armatūra, (1 pav., a) jos stiprio ir tamprumo modulio

santykis yra gerokai didesnis negu betono, todėl skerspjūvio neutralioji ašis šiuo atveju yra arti gniuždomosios skerspjūvio dalies krašto. Norint, kad neplieninės (FRP) armatūros stipris būtų visiškai išnaudojamas, reikia didinti elemento skerspjūvį, bet tai mažina tokio elemento ekonomišumą. Šią problemą galima išspręsti konstrukcijai suteikiant išankstinį įtempimą, t. y. neplieninę armatūrą naudojant iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijoms armuoti (2 pav.). Bendruoju atveju elementas su plieno armatūra yra laikomas gausiai armuotu, kai armavimo procentas yra apie 3 %. Iki šios reikšmės elementas laikomas pakankamai arba normaliai armuotu.



1 pav. Armuota gelžbetoninė sija: kompozitine (FRP) (a), plienine armatūra (b); diagramos: deformacijų (c), įtempių (d)

Fig. 1. A reinforced concrete beam: (a) reinforced with fiber reinforced polymer, (b) conventional steel bars, (c) strain, (d) stress distribution



2 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas, kai gelžbetoninė sija yra armuota neplienine (FRP) armatūra

Fig. 2. The distribution of stress strain in the FRP-reinforced beam

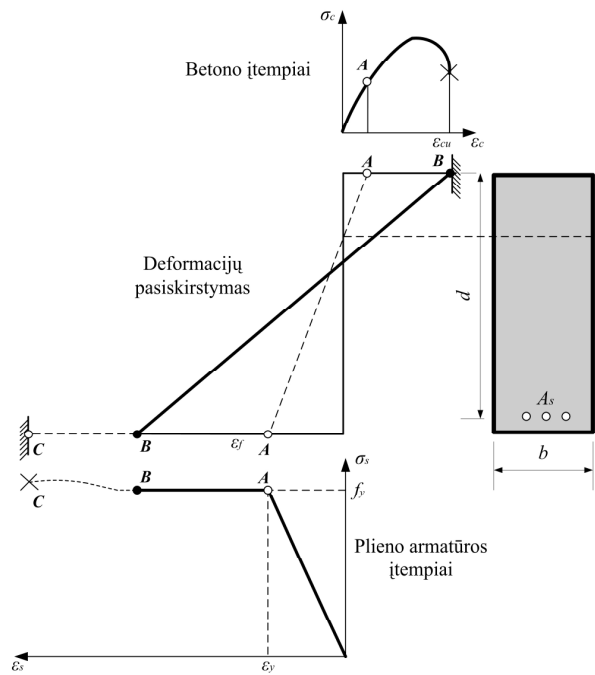
Naudojant anglies (CFRP) arba stiklo (GFRP) pluošto armatūrą, elementas būna gausiai armuotas, kai armavimo procentas siekia apie 0,5 % (GangaRao *et al.* 2007). Priklausomai nuo elemento suirimo pobūdžio, normalinio pjūvio skaičiavimas naudojant kompozitinę (FRP) armatūrą yra reglamentuojamas JAV projektavimo normų ACI 440.1R-03 ir ACI 440.4R-04.

Normalinio pjūvio skaičiavimo prielaidos

Skaičiuojant lenkiamų iš anksto įtemptų gelžbetoninių konstrukcijų su kompozitine (FRP) armatūra laikomąją galią, taikomos šios prielaidos:

- 1) deformacijos per visą skerspjūvio aukštį pasiskirsto tiesiškai; 2) betono ir armatūros deformacijos apskaičiuojamos taikant Bernulio hipotezę; 3) betono tempiamasis stipris neturi įtakos elemento laikomajai galią; įtempiai betone ir iš anksto įtemptoje armatūroje nustatomi remiantis tikrąja arba idealizuota įtempių ir deformacijų priklausomybe; 4) armatūros ir betono sukibimas laikomas idealiuoju; 5) tempiamosios zonos armatūra skerspjūvyje išdėstoma vienu lygiu.

Praktiniams skaičiavimams JAV projektavimo normos ACI reglamentuoja betono gniuždymo įtempių pasiskirstymo idealizavimą, laikant, kad betono gniuždymo įtempių pasiskirstymo diagrama yra trikampė arba stačiakampė, kai jos svorio centras apytikriai sutampa su kreivlininės įtempių diagramos svorio centru.



3 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas, kai gelžbetoninė sija yra armuota plienine armatūra

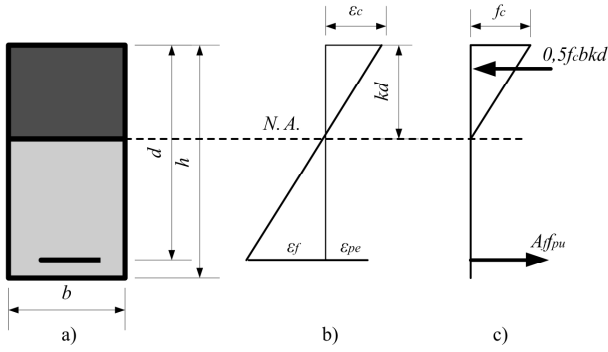
Fig. 3. The distribution of stress strain in the steel-reinforced beam

Normalinio pjūvio skaičiavimo atvejai

Lenkiamų iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų elgsena apima tris atvejus. Jei $\rho > \rho_{fb}$, elementas pradeda irti gniuždomoje zonoje, armatūrai nepasiekus ribinės deformacijos reikšmės, čia ρ_{fb} – armavimo procentas, kai betonas ir armatūra vienu metu pasiekia ribinę deformaciją. Kai $0,5\rho_{fb} < \rho < \rho_{fb}$, elementas pradeda irti tempiamoje zonoje ir skerspjūvio gniuždomoje dalyje pasireiškia betono plastinės deformacijos. Šiuo atveju gaunama stačiakampė betono gniuždymo įtempių diagrama. Jei $\rho < 0,5\rho_{fb}$, elemento statmeno stiprumo sąlygą veikia tempiamosios zonos armatūra. Laikoma, kad betono įtempiai gniuždomoje zonoje pasiskirsto tiesiškai. Statmeno pjūvio laikomosios galios skaičiavimo ypatumai bus aptariami detalčiau.

Normaliai armuotas elementas

Kai elementas yra normaliai armuotas ($\rho < \rho_{fb}$), tempiamos zonos armatūra lemia elemento laikomąją galią. Naudojant neplieninę (FRP) armatūrą elemento suirimo metu betonas nepasiekia ribinės gniuždymo deformacijos reikšmės (2 pav., taškas A). Tuo tarpu armatūra ribinę deformaciją pasiekia ir elementas netenka laikomosios galios.



4 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas, kai elementas yra normaliai armuotas ($\rho_f < 0,5 \rho_{fb}$): skerspjūvis (a), deformacijos (b), įtempiai (c)

Fig. 4. The distribution of stress and strain in the underreinforced beam ($\rho_f < 0,5 \rho_{fb}$): a) section, b) strain, c) stress

Taškas B (2 pav.), kuriame pradeda irti betonai, šiuo atveju yra nepasiekiamas. Tokiu atveju elementas laikomosios galios netenka taške A . Kai elementas yra armuotas plienine armatūra, taškas B yra pasiekiamas (3 pav.). Taške A pasiekiamas armatūros tekėjimas. Taškas C gali būti pasiektas arba ne. Elementas laikomosios galios netenka taške B . Tai yra pagrindinis elemento suirimo mechanizmo skirtumas, kai naudojama kompozitinė ir tradicinė plieno armatūra (Kyoung-Kyu Choi *et al.* 2008).

Esant normaliai armuotam elementui, išskiriami 2 atvejai: kai $\rho < \rho_{fb}$ ir $0,5\rho_{fb} < \rho < \rho_{fb}$ (Dolan *et al.* 2001; GangaRao *et al.* 2007). Pirmuoju atveju naudojama trikampė betono įtempių pasiskirstymo diagrama (4 pav.). Elemento laikomoji galia apskaičiuojama sumuojant momentus apie gniuždomos zonos svorio centrą arba tempiamos zonos armatūros svorio centrą.

Skerspjūvio horizontalių jėgų pusiausvyra:

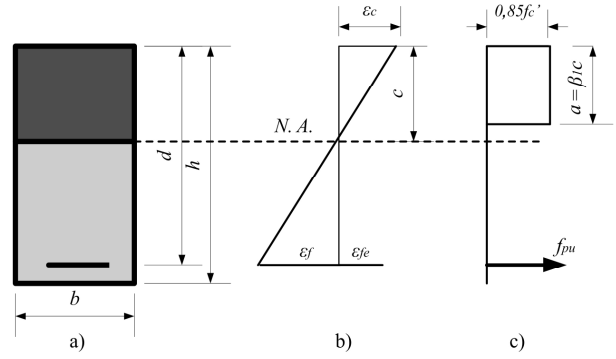
$$0,5f_c' bkd = \rho b d f_{pu}' \quad (1)$$

čia b – skerspjūvio plotis, f_c' – betono gniuždomasis stipris, f_{pu}' – kompozitinės armatūros tempiamasis stipris, d – efektyvusis skerspjūvio aukštis.

Empirinė santykinio gniuždomos zonos aukščio išraiška:

$$k = \sqrt{(\rho_f n_f)^2 + 2\rho_f n_f - \rho_f n_f} \quad (2)$$

čia ρ_f – armavimo procentas; n_f – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis.



5 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas, kai elementas yra normaliai armuotas ($\rho_f < \rho_{fb}$): skerspjūvis (a), deformacijos (b), įtempiai (c)

Fig. 5. The distribution of stress and strain in the underreinforced beam ($\rho_f < \rho_{fb}$): a) section, b) strain, c) stress

Elemento laikomoji galia, užrašant sumą momentų apie gniuždomos zonos svorio centrą:

$$M_R = \rho_f b d f_{pu}' \left(d - \frac{kd}{3} \right) \quad (3)$$

čia f_{pu} – iš anksto įtemptos kompozitinės (FRP) armatūros stipris, MPa.

Naudojant gniuždymo įtempių atstojamąjį elemento laikomosios galios lygtis:

$$M_R = 0,5f_c' bkd^2 \left(1 - \frac{k}{3} \right) \quad (4)$$

Kai elementas yra normaliai armuotas, bet galioja sąlyga $0,5\rho_{fb} < \rho < \rho_{fb}$, betono įtempiai per visą gniuždomos zonos aukštį pasiskirsto netiesiškai. Betono gniuždymo įtempių diagrama pateikta 5 pav. Elemento laikomąją galią lemia tempiamos zonos armatūra.

Tokiu atveju elemento laikomosios galios lygtis:

$$M_R = \rho b d f_{pu}' \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (5)$$

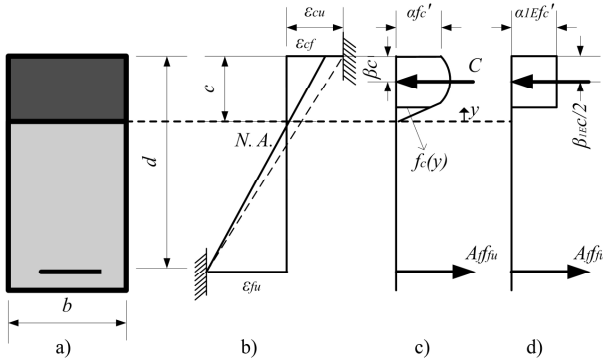
čia a – gniuždomosios zonos aukštis.

Iš skerspjūvio vidinių jėgų pusiausvyros sąlygos gauname:

$$a = \frac{\rho d f_{pu}'}{0,85f_c'} \quad (6)$$

Pertvarkę (5) lygtį gauname:

$$M_R = \rho b d^2 f_{pu}' \left(1 - \frac{\rho f_{pu}'}{1,7f_c'} \right) \quad (7)$$



6 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas, kai elementas yra normaliai armuotas ($\rho_f < \rho_{fb}$); diagramos: skerspjūvio (a), deformacijų (b), tikroji įtempių (c), ekvivalentinė betono gniuždymo įtempių (d) (Kyoung-Kyu, Ch. *et al.* 2008)

Fig. 6. The distribution of stress and strain in the underreinforced beam ($\rho_f < \rho_{fb}$): a) section, b) strain, c) generalized stress, d) equivalent stress (Kyoung-Kyu Choi *et al.* 2008).

JAV projektavimo normose ACI 440.1R-03 normalaus armavimo atveju elemento laikomąją galią siūloma apskaičiuoti taip:

$$M_R = 0,8\rho_f b d f_{pu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right), \quad (8)$$

čia c_b – neutraliosios ašies atstumas nuo viršutinio skerspjūvio krašto, kai betonas ir armatūra vienu metu pasiekia ribinę deformaciją, m; β_1 – gniuždomos zonos aukščio redukavimo koeficientas.

Neutraliosios ašies padėtis nustatoma taip:

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d, \quad (9)$$

čia d – skerspjūvio efektyvusis aukštis; ε_{cu} – betono ribinė gniuždymo deformacija; ε_{fu} – kompozitinės (FRP) armatūros ribinė deformacija.

Kyoung-Kyu Choi (2008) pasiūlė metodą normaliai armuoto elemento statmenam pjūviui apskaičiuoti, kuris remiasi Collinso betono įtempių ir deformacijų priklausomybės modeliu. Šis metodas dar vadinamas pusiau pusiausvyro suirimo metodu (angl. *Quasi – balanced failure method*) Remiantis 6 pav., elemento laikomosios galios lygtis:

$$M_R = \rho b d f_{fu} (d - \beta c), \quad (10)$$

čia β – koeficientas, kuriuo nusakoma betono gniuždymo įtempių atstojamosios padėtis, priklausomai nuo betono gniuždymo įtempių pasiskirstymo.

Gniuždomosios zonos aukštis:

$$c = \frac{A_f f_{fu}}{\alpha f_c' b}, \quad (11)$$

čia A_f – armatūros skerspjūvio plotas; α – betono vidutinių gniuždymo įtempių ir gniuždomojo stiprio santykis.

Kaip matyti 6 paveiksle, esant tikrajai betono įtempių pasiskirstymo diagramai, betono gniuždymo įtempiai pasiskirsto netiesiškai. Netiesinio betono gniuždymo įtempių pasiskirstymo pobūdis gali būti įvertintas parametrais α ir β . Šie parametrai apskaičiuojami taip:

$$\alpha = \frac{1}{f_c'} \int_0^c \sigma_c(y) dy, \quad (12)$$

$$\beta = 1 - \frac{\int_0^c y \cdot \sigma_c(y) dy}{c \int_0^c \sigma_c(y) dy}, \quad (13)$$

čia $\sigma_c(y)$ – betono gniuždymo įtempiai; y – atstumas nuo neutraliosios ašies iki nagrinėjamo taško.

Ryšys tarp tikrosios betono įtempių epiūros parametru (α ir β) ir priimtose ekvivalentinės (6 pav., d) stačiakampės betono gniuždymo įtempių diagramos parametru α_{1E} ir β_{1E} gali būti užrašytas remiantis geometrijos ir jėgų pusiausvyros sąlygomis:

$$\alpha_{1E} = \frac{\alpha}{\beta_{1E}}, \quad (14)$$

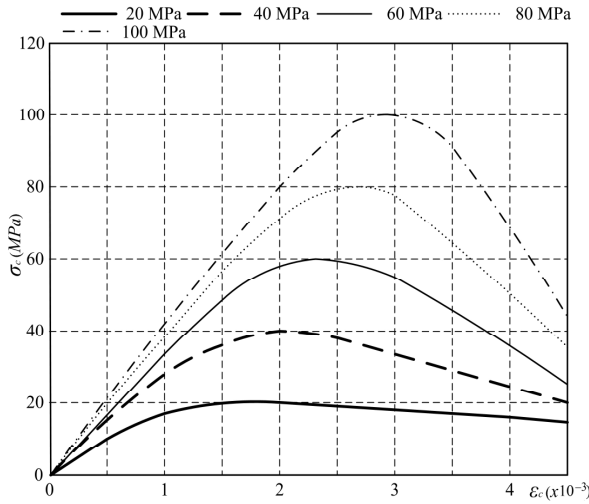
$$\beta_{1E} = 2\beta. \quad (15)$$

Priešingai, negu ACI 440.1R-03 ir ACI 440.4R-04, kai betono įtempių diagramos parametras α apskaičiuojamas esant ribiniai betono deformacijai ($\varepsilon_{cu} = 0,003$), ekvivalentinės betono įtempių epiūros parametrai α_{1E} ir β_{1E} apskaičiuojami esant tikrajai betono gniuždymo deformacijos reikšmei, kai elementas netenka laikomosios galios armatūrai pasiekus ribinę deformacijos reikšmę. Norint nustatyti šiuos parametrus būtina žinoti įtempių ir deformacijų priklausomybę. Šiuo tikslu pusiau pusiausvyro suirimo metodas (Kyoung-Kyu, Ch. *et al.* 2008) remiasi Collinso betono modeliu (7 pav.).

Ryšys tarp gniuždymo įtempių, esant bet kuriai gniuždymo deformacijai ir betono gniuždomajam stipriui, užrašomas taip:

$$\frac{\sigma_c}{f_c'} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \left(\frac{n}{n-1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{co})^{nk}} \right), \quad (16)$$

čia n – betono įtempių ir deformacijos priklausomybės kreivės parametras; k – betono gniuždymo įtempių slopinimo koeficientas; ε_{co} – betono gniuždymo deformacija, atitinkanti įtempių ir deformacijų kreivės piką.



7 pav. Collinso betono įtempių ir deformacijų priklausomybė
Fig. 7. Stress-strain relationship to concrete. Collins *et al.* (1993) model

$$k = 0,67 + f'_c / 62 \text{ (MPa)}, \quad (17)$$

$$n = 0,8 + \frac{f'_c}{17} \text{ (MPa)}, \quad (18)$$

$$\epsilon_{co} = \frac{f'_c}{E_c} \frac{n}{n-1}. \quad (19)$$

Betono tamprumo modulis:

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \text{ (MPa)}. \quad (20)$$

Nustatyta, kad betono gniuždymo deformacija ϵ_c tiesiogiai proporcinga pasirinkto armavimo procento ρ ir armavimo procento, kuriam esant skerspjūvis laikomas pusiausviru, $\rho_{fb,ACI}$ santykiui (Kyoung-Kyu, Ch. *et al.* 2008), kai neplieninė armatūra pasiekia ribinę tempimo deformaciją ϵ_{fu} , t. y. elementas netenka laikomosios galios ir betono deformacija ϵ_c nelygi ribinei deformacijai. Taikant pusiau pusiausvirą suirimo metodą, ši betono deformacija išreiškiama taip:

$$\epsilon_{cf-Qb} = 0,003 \frac{\rho_f}{\rho_{fb,ACI}}; \text{ kai } \frac{\rho_f}{\rho_{fb,ACI}} \leq 1,0. \quad (21)$$

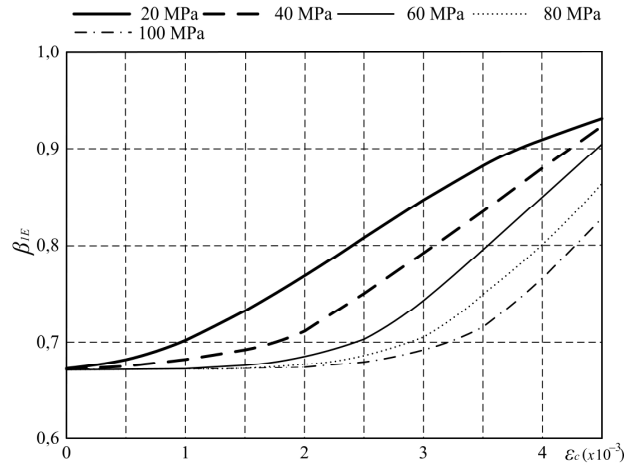
Gniuždomosios zonos aukštį galima apskaičiuoti pagal šią formulę:

$$c_{Qb} = \frac{\epsilon_{cf-Qb}}{\epsilon_{cf-Qb} + \epsilon_{fu}} d. \quad (22)$$

Elemento laikomosios galios lygtis (Kyoung-Kyu, Ch. *et al.* 2008):

$$M_R = \rho b d f_{fu} \left(d - \frac{\beta_{1E} c_{Qb}}{2} \right), \quad (23)$$

čia β_{1E} – ekvivalentinės betono gniuždymo įtempių pasiskirstymo diagramos parametras, kuris nustatomas grafiniu būdu pagal 8 paveikslą.

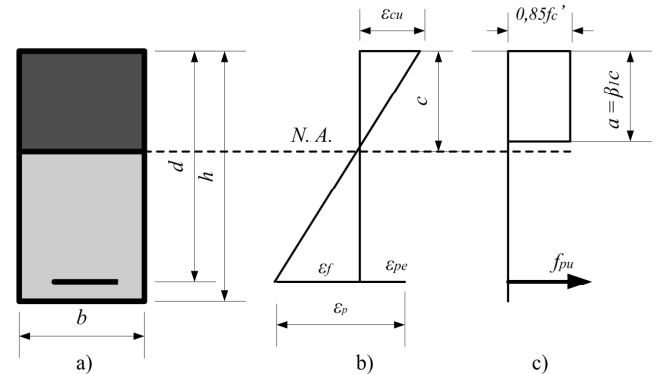


8 pav. Ekvivalentinės betono įtempių diagramos parametras β_{1E} nustatymas remiantis Collinso betono modeliu

Fig. 8. Equivalent stress block parameter β_{1E} using Collins model

Gausiai armotas elementas

Kai armavimo procentas $\rho < \rho_{fb}$, laikoma, kad elementas yra gausiai armotas. Tokiu atveju elementas netenka laikomosios galios, kai betonas anksčiau nei armatūra pasiekia ribinę deformaciją ϵ_{cu} .



9 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas, kai elementas yra gausiai armotas ($\rho_f > \rho_{fb}$): diagramos: skerspjūvio (a), deformacijų (b), betono gniuždymo įtempių (c)

Fig. 9. The distribution of stress and strain in the underreinforced beam ($\rho_f > \rho_{fb}$): a) section, b) strain, c) stress distribution

Remiantis JAV projektavimo normų ACI 440.4R-04 metodika parinkta stačiakampė betono gniuždymo įtempių pasiskirstymo diagrama. Neutraliosios ašies c padėtis nustatoma pagal horizontalių jėgų pusiausvirą:

$$\rho b d f_p = 0,85 f'_c b \beta_{1c}. \quad (24)$$

Žinant, kad neplieninė (FRP) armatūra iki pat suirimo pasižymi tamprumu:

$$f_p = \epsilon_p E_p. \quad (25)$$

Pagal trikampių panašumo teoriją deformacija armatūroje po dekompresijos:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{d-c}{c}. \quad (26)$$

Suminė armatūros deformacija:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pe} + \varepsilon_{cu} \frac{d-c}{c}, \quad (27)$$

čia ε_{pe} – efektyvioji deformacija, įvertinant visus iš anksto įtemptos armatūros įtempių nuostolius; ε_{cu} – ribinė betono gniuždymo deformacija; d – efektyvusis skerspjūvio aukštis, m; c – neutralios ašies padėtis.

Laikydami, kad $c/d = k_u$, pusiausvyros lygtis:

$$\rho \left(\varepsilon_{pe} + \varepsilon_{cu} \frac{1-k_u}{k_u} \right) E_p = 0,85 f'_c \beta_1 k_u, \quad (28)$$

čia E_p – neplieninės (FRP) armatūros tamprumo modulis, GPa; β_1 – gniuždomos zonos aukščio redukavimo koeficientas:

$$\beta_1 = 1 - 0,05 \left(\frac{f'_c - 27,6}{6,7} \right), \text{ MPa}. \quad (29)$$

Nustatomas dydis – medžiagos konstanta:

$$\lambda = \frac{E_p \varepsilon_{cu}}{0,85 f'_c \beta_1}. \quad (30)$$

Santykinis gniuždomosios zonos aukštis:

$$k_u = \sqrt{\rho \lambda + \left(\frac{\rho \lambda}{2} \left(1 - \frac{\varepsilon_{pe}}{\varepsilon_{cu}} \right) \right)^2} - \frac{\rho \lambda}{2} \left(1 - \frac{\varepsilon_{pe}}{\varepsilon_{cu}} \right). \quad (31)$$

Gausiai armuoto elemento laikomosios galios lygtis:

$$M_R = 0,85 f'_c b \beta_1 k_u d^2 \left(1 - \frac{\beta_1 k_u}{2} \right). \quad (32)$$

Laikomosios galios skaičiavimas

Remiantis anksčiau išnagrinėtomis metodikomis, atliekami lenkiamųjų iš anksto įtemptų gelžbetoninių sijų su neplienine (FRP) armatūra laikomosios galios skaičiavimai.

2 lentelėje pateikiami sijoms armuoti naudojamos armatūros tipai ir jų mechaninės savybės. Priklausomai nuo nustatyto armavimo procento, nustatomas sijų suirimo pobūdis ir apskaičiuojama laikomoji galia M_R .

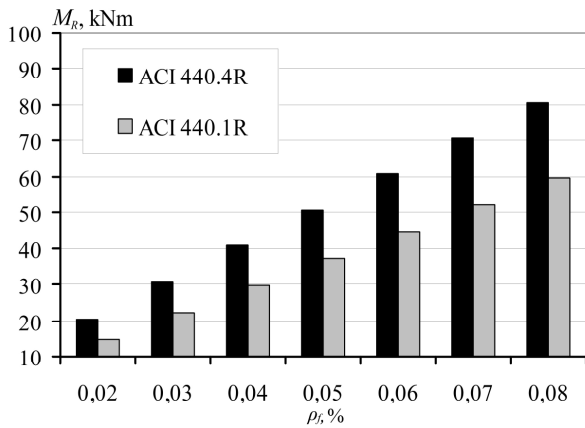
Kai elementas yra normaliai armuotas ir $\rho_f < 0,5\rho_{fb}$, sijų su anglies pluošto (CFRP1) armatūra laikomoji galia pagal ACI 440.1R-03 ir ACI 440.4R-04 skiriasi (10, 12, 14 pav.).

2 lentelė. Iš anksto įtempto gelžbetonio armatūros tipai ir savybės
Table 2. Types and properties of prestressing reinforcement

| Iš anksto įtemptos armatūros tipas | Tamprumo modulis E_f , GPa | Tempiamasis stipris f_{pu} , MPa |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Anglies pluoštas | | |
| CFRP 1 | 147 | 2550 |
| CFRP 2 | 294 | 2550 |
| Stiklo pluoštas | | |
| GFRP | 42 | 1200 |
| Aramido pluoštas | | |
| AFRP | 64 | 1500 |
| Plienas | | |
| Y 1860 | 200 | 1860 |

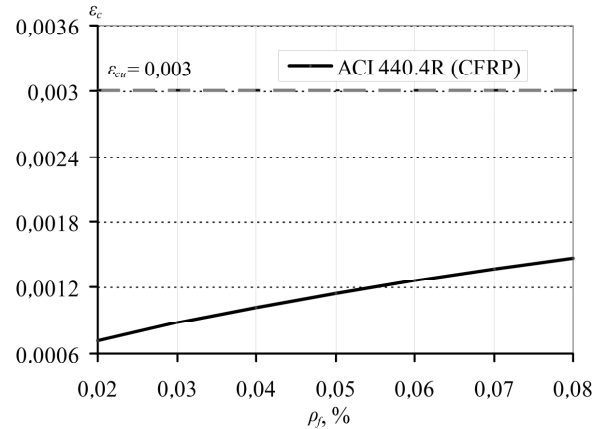
Gauta, kad M_R pagal ACI.440.4R-04 yra apie 1,341 karto didesnė už M_R pagal ACI.440.1R-03. Šis skirtumas gautas todėl, kad pagal ACI.440.4R-04, kai sija netenka laikomosios galios, betono deformacija nepasiekia ribinės reikšmės $\varepsilon_{cu} = 0,003$ (11, 13, 15 pav.), tuo tarpu skaičiuojant pagal ACI.440.1R-031 laikoma, kad betonas ir armatūra pasiekia ribinę deformaciją, todėl skaičiuojant sijos laikomąją galią M_R pasitelkiamas koeficientas 0,8 (8 formulė).

Kai elementas yra normaliai armuotas ir $0,5\rho_{fb} < \rho_f < \rho_{fb}$, sijos su neplienine armatūra laikomoji galia M_R , apskaičiuota 3 būdais, skiriasi. Visais atvejais parinkta stačiakampė betono įtempių pasiskirstymo diagrama. Kai betono gniuždomasis stipris yra 20 MPa, sijos laikomoji galia M_R pagal ACI.440.4R-04 apytikriai lygi laikomajai galiai, apskaičiuotai remiantis pusiau pusiausvyro suirimo metodu, kuris pagrįstas Collinso betono modeliu (16 pav.). Kai betono gniuždomasis stipris f'_c yra 40 MPa, sijos laikomoji galia M_R pagal ACI.440.4R-04 yra apie 1,01 karto didesnė už laikomąją galią pagal pusiau pusiausvyro suirimo metodą (17 pav.). Kai f'_c yra 60 MPa, gauta, kad $M_{R \text{ ACI } 440.4R}$ yra ~1,015 karto didesnė už $M_{R \text{ PPSM}}$ (18 pav.). Tuo tarpu lyginant ACI.440.4R-04 ir ACI.440.1R-03 metodikas, bendruoju atveju gauta, kad $M_{R \text{ ACI } 440.4R}$ yra ~1,25 karto didesnė už $M_{R \text{ ACI } 440.1R}$ (16, 17, 18 pav.).



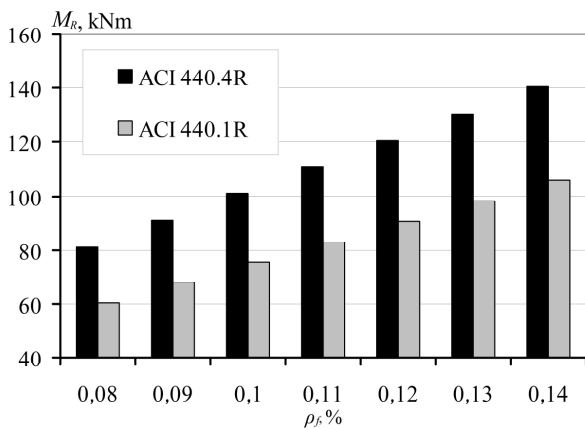
10 pav. Laikomosios galios ir armavimo procento priklausomybė, kai $\rho_f < 0,5\rho_{fb}$ ir $f_c = 20$ MPa

Fig. 10. Moment resistance and reinforcement ratio relationship in the under-reinforced beam ($\rho_f < 0,5\rho_{fb}$) and $f_c = 20$ MPa



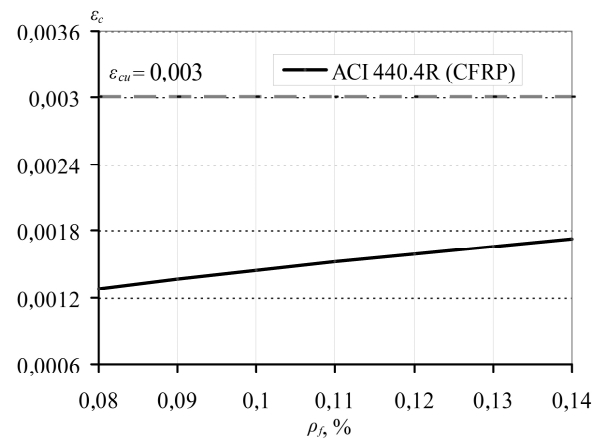
11 pav. Betono gniuždymo deformacija priklausomai nuo armavimo procento, kai $\rho_f < 0,5\rho_{fb}$ ir $f_c = 20$ MPa

Fig. 11. Variation in concrete compressive strain according to the reinforcement ratio ($\rho_f < 0,5\rho_{fb}$) and $f_c = 20$ MPa



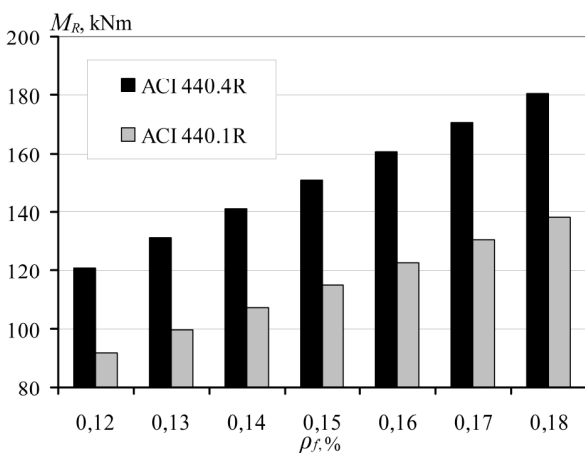
12 pav. Laikomosios galios ir armavimo procento priklausomybė, kai $\rho_f < 0,5\rho_{fb}$ ir $f_c = 40$ MPa

Fig. 12. Moment resistance and reinforcement ratio relationship in the under-reinforced beam ($\rho_f < 0,5\rho_{fb}$) and $f_c = 40$ MPa



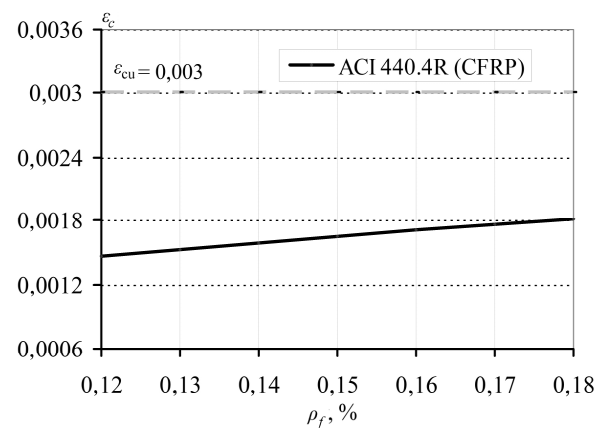
13 pav. Betono gniuždymo deformacija priklausomai nuo armavimo procento, kai $\rho_f < 0,5\rho_{fb}$ ir $f_c = 40$ MPa

Fig. 13. Variation in concrete compressive strain according to the reinforcement ratio ($\rho_f < 0,5\rho_{fb}$) and $f_c = 40$ MPa



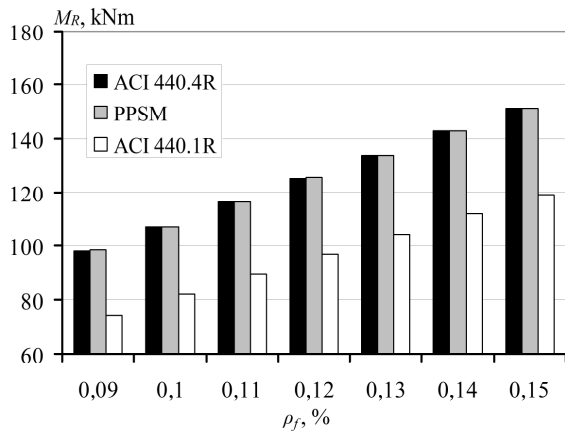
14 pav. Laikomosios galios ir armavimo procento priklausomybė, kai $\rho_f < 0,5\rho_{fb}$ ir $f_c = 60$ MPa

Fig. 14. Moment resistance and reinforcement ratio relationship in the under-reinforced beam ($\rho_f < 0,5\rho_{fb}$) and $f_c = 60$ MPa



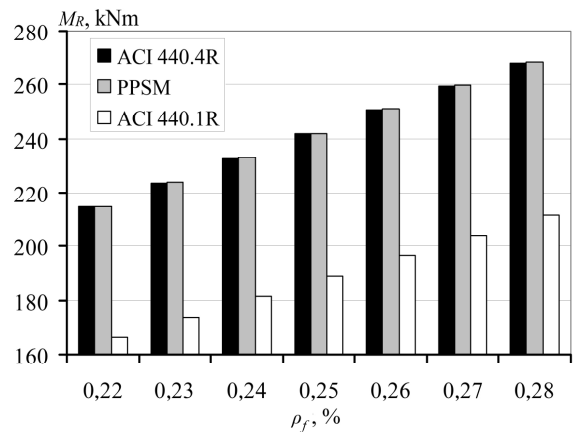
15 pav. Betono gniuždymo deformacija priklausomai nuo armavimo procento, kai $\rho_f < 0,5\rho_{fb}$ ir $f_c = 60$ MPa.

Fig. 15. Variation in concrete compressive strain according to the reinforcement ratio $\rho_f < 0,5\rho_{fb}$ and $f_c = 60$ MPa.



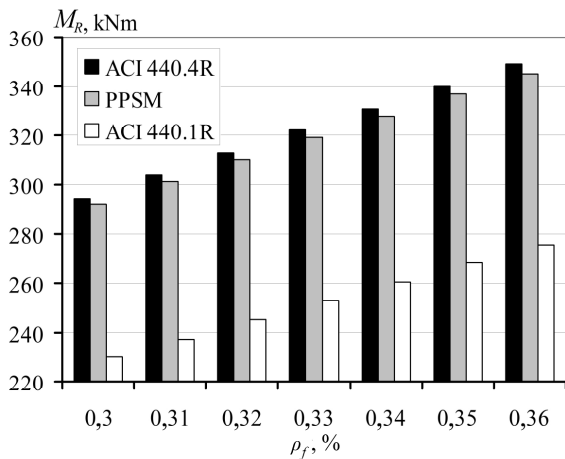
16 pav. Laikomosios galios ir armavimo procento priklausomybė, kai $0,5\rho_{fb} < \rho_f < \rho_{fb}$ ir $f_c = 20$ MPa

Fig. 16. Moment resistance and reinforcement ratio relationship in the under-reinforced beam ($0,5\rho_{fb} < \rho_f < \rho_{fb}$) and $f_c = 20$ MPa



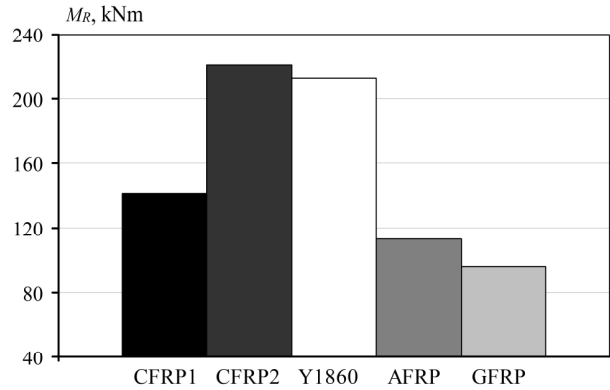
17 pav. Laikomosios galios ir armavimo procento priklausomybė, kai $0,5\rho_{fb} < \rho_f < \rho_{fb}$ ir $f_c = 40$ MPa

Fig. 17. Moment resistance and reinforcement ratio relationship in the under-reinforced beam ($0,5\rho_{fb} < \rho_f < \rho_{fb}$) and $f_c = 40$ MPa



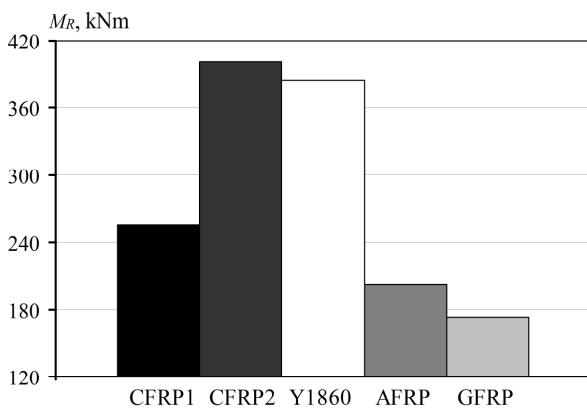
18 pav. Laikomosios galios ir armavimo procento priklausomybė, kai $0,5\rho_{fb} < \rho_f < \rho_{fb}$ ir $f_c = 60$ MPa

Fig. 18. Moment resistance and reinforcement ratio relationship in the under-reinforced beam ($0,5\rho_{fb} < \rho_f < \rho_{fb}$) and $f_c = 60$ MPa



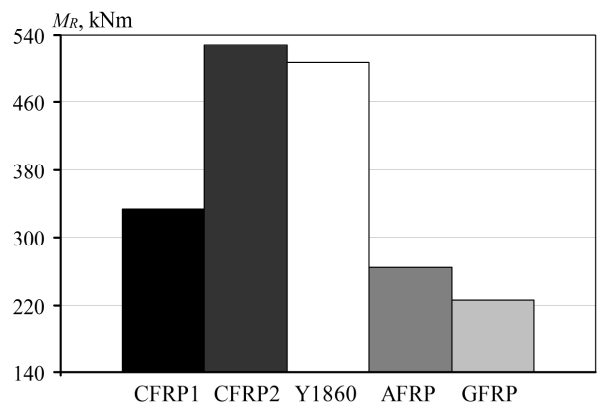
19 pav. Sijos laikomoji galia priklausomai nuo armatūros tipo, kai $\rho_f > \rho_{fb}$ ir $f_c = 20$ MPa

Fig. 19. Moment resistance and reinforcement type relationship in the over-reinforced beam ($\rho_f > \rho_{fb}$) and $f_c = 20$ MPa



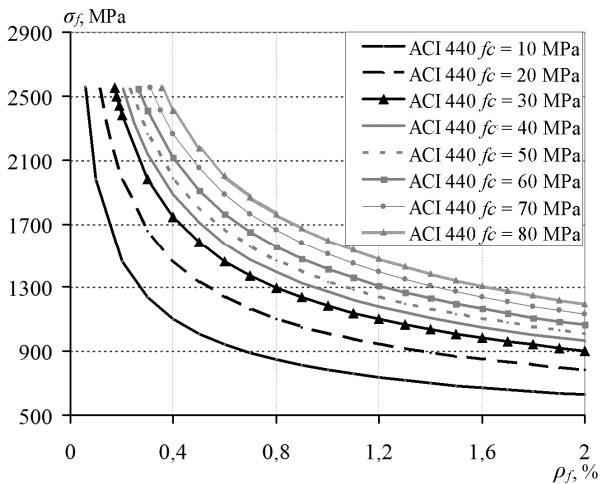
20 pav. Sijos laikomoji galia priklausomai nuo armatūros tipo, kai $\rho_f > \rho_{fb}$ ir $f_c = 40$ MPa

Fig. 20. Moment resistance and reinforcement type relationship in the over-reinforced beam ($\rho_f > \rho_{fb}$) and $f_c = 40$ MPa



21 pav. Sijos laikomoji galia priklausomai nuo armatūros tipo, kai $\rho_f > \rho_{fb}$ ir $f_c = 60$ MPa

Fig. 21. Moment resistance and reinforcement type relationship in the over-reinforced beam ($\rho_f > \rho_{fb}$) and $f_c = 60$ MPa



22 pav. Įtempiai anglies pluošto (CFRP2) armatūroje, kai $\rho_f > \rho_{fb}$
Fig. 22. Tensile stresses of CFRP2 reinforcement in the over-reinforced beam ($\rho_f > \rho_{fb}$)

Atlikta sijų laikomosios galios lyginamoji analizė, priklausomai nuo armatūros tipo ir jos mechaninių savybių, kai elementas yra gausiai armuotas ($\rho_f > \rho_{fb}$). Skaičiavimų rezultatai rodo, kad sijų su anglies pluošto (CFRP1, CFRP2) armatūra laikomoji galia yra didesnė už sijų atitinkamai su aramido (AFRP) ir stiklo pluošto (GFRP) armatūra (19, 20, 21 pav.). Skaičiavimų rezultatai rodo, kad naudojant anglies pluošto armatūrą (CFRP2), sijos laikomoji galia M_R yra apie 1,05 karto didesnė už sijos su plieno armatūrą (Y 1860). Kai iš anksto įtempto gelžbetonio elementas yra gausiai armuotas, didėjant armavimo procentui, armatūros tempiamasis stipris nėra visiškai išnaudojamas (22 pav.).

Išvados

1. Kai sija yra normaliai armuota ($\rho_f < 0,5\rho_{fb}$), remiantis JAV projektavimo normų ACI 440.1R-03 ir ACI 440.4R-04 metodikomis laikomosios galios M_R skaičiavimo rezultatai skiriasi iki 34 %. Kai sija yra normaliai armuota ($0,5\rho_{fb} < \rho_f < \rho_{fb}$), remiantis ACI 440.4R-04 ir pusiau pusiausviro suirimo metodais, iš anksto lenkiamų įtemptųjų gelžbetoninių sijų su neplienine (FRP) armatūra laikomosios galios M_R skaičiavimo rezultatai skiriasi iki 1,4 %.

2. Nustatyta, kad sijų su anglies pluošto (CFRP2) armatūra laikomoji galia M_R yra apie 5 % didesnė už sijų su tradicine plieno (Y 1860) armatūra laikomąją galią M_R , kai sija yra gausiai armuota ($\rho_f > \rho_{fb}$).

3. Dėl mechaninių, ir ypač antikoroziinių, savybių iš visų neplieninės (FRP) armatūros tipų išsiskiria anglies pluošto (CFRP1, CFRP2) armatūra. Todėl šią armatūrą yra efektyvu naudoti gelžbetoninėms konstrukcijoms armuoti. Kad neplieninės (FRP) armatūros savybės būtų

visiškai išnaudojamos, tokią armatūrą racionalu naudoti iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijose.

Literatūra

- Abdelrahman, A. A.; Rizkalla, S. H. 1993. Serviceability of concrete beams prestressed by carbon fibre plastic rods, *Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures*: 403–412.
- American Concrete Institute. 2003. *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*. ACI 440.1R-03. Detroit, Michigan: 42.
- American Concrete Institute. 2004. *Prestressed Concrete Structures with FRP Tendons*. ACI 440.4R-04. Detroit, Michigan: 35.
- Burke, Ch. R.; Dolan, Ch. W. 2001. Flexural Design of Prestressed Concrete Beams Using FRP Tendons, *PCI Journal*: 76–87.
- Collins, M. P.; Mitchell, D.; MacGregor, J. G. 1993. Structural consideration for high-strength concrete, *Concrete International* 15(5): 27–34.
- Dolan, Ch. W. 1990. Developments in Non-Metallic Prestressing Tendons, *PCI Journal*: 80–88.
- Dolan, Ch. W.; Bakis, Ch. E. 2001. Design recommendations for concrete structures prestressed with FRP tendons, *FHWA* 1: 133.
- GangaRao, H. V. S; Taly, N.; Vijay, P. V. 2007. *Reinforced concrete design with FRP composites*. CRC Press. Taylor & Francis Group, 400.
- Kyoung-Kyu, Ch.; Urgessa, G.; Taha, M. M. R.; Maji, A. K. 2008. Quasi-Balanced Failure Approach for Evaluation Moment Capacity of FRP Underreinforced Concrete Beams, *Journal of Composites for Construction* 12(3): 236–245. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:3(236).

CALCULATING THE CARRYING CAPACITY OF FLEXURAL PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITH NON-METALLIC REINFORCEMENT

M. Atutis

Abstract

The article reviews moment resistance design methods of prestressed concrete beams with fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement. FRP tendons exhibit linear elastic response to rupture without yielding and thus failure is expected to be brittle. The structural behaviour of beams prestressed with FRP tendons is different from beams with traditional steel reinforcement. Depending on the reinforcement ratio, the flexural behaviour of the beam can be divided into several groups. The numerical results show that depending on the nature of the element failure, moment resistance calculation results are different by using reviewed methods. It was found, that the use of non-metallic reinforcement in prestressed concrete structures is effective: moment capacity is about 5% higher than that of the beams with conventional steel reinforcement.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforcement, prestressed concrete, Collins concrete model, quasi-balanced failure method