



LENKIAMŪJŲ IŠ ANKSTO ĮTEMPŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ARMAVIMO KOMPOZITINE ARMATŪRA YPATUMAI

Mantas Atutis¹, Juozas Valivonis²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹mantas.atutis@vgtu.lt; ²juozas.valivonis@vgtu.lt

Įteikta 2010 04 22; priimta 2010 06 02

Santrauka. Straipsnyje aptariamos pagrindinės iš anksto įtempto gelžbetonio kompozitinės armatūros (FRP) savybės. Kompozitinė armatūra iki pat lenkiamųjų gelžbetoninių ar iš anksto įtempto gelžbetonio elementų laikomosios galios netekimo išlaiko tampriąsias savybės. Šia armatūra armuotų sijų, lyginant su tradicine plieno armatūra, elgsena skiriasi. Galimi keli kompozitine (FRP) armatūra armuotų lenkiamųjų elementų suirimo atvejai. Konstrukcijų su kompozitine (FRP) armatūra suirimo pobūdis gali būti nustatytas remiantis mokslinėje literatūroje pasiūlytomis formulėmis racionaliam armavimo procentui apskaičiuoti. Gauti skirtingi skaičiavimų rezultatai. Parodyta, kaip armavimo procentas priklauso nuo mechaninių betono ir neplieninės (FRP) armatūros savybių.

Reikšminiai žodžiai: anglies pluoštas, armavimo procentas, išankstinis įtempimas, tamprumo modulis, relaksacija.

1. Įvadas

Palyginti dar neseniai statybos industrijoje pradėti kompozitinių medžiagų, ypač ne plieninės kompozitinės (FRP) armatūros tyrimai. Tai paskatino vis didėjančios išlaidos rekonstruojant statinius dėl plieno korozijos gelžbetoninėse konstrukcijose.

Kompozitinės medžiagos sudarytos iš dviejų ar daugiau komponentų, tarp kurių yra ryškūs skiriamieji paviršiai. Išsistinis visame medžiagos tūryje komponentas vadinamas matrica, arba rišamąja medžiaga, o atskiromis tūrio dalimis matricoje pasiskirstęs komponentas vadinamas užpildu, armuojančiu arba sustiprinančiuoju komponentu. Iš visų kompozitinių medžiagų labiausiai išsiskiria anglies, stiklo ir aramido pluoštai, kurie turi gerų mechaninių antimagnetinių savybių, yra atsparūs korozijai, nuovargiui, jų mažas šilumos laidumas, didesnis nei plieno stipris ir masės santykis bei mažesni išankstinio įtempimo nuostoliai dėl armatūros relaksacijos (Abdelrahman, Rizkalla 1995).

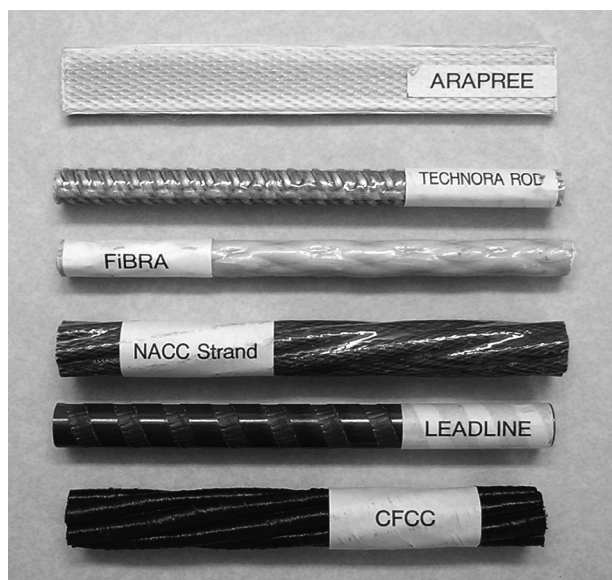
Šios savybės paskatino pirmųjų tiltų, kurių iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijos armuotos

neplienine (FRP) armatūra, statybą Europoje, Japonijoje, Kanadoje (Abdelrahman *et al.* 1995).

Dažniausiai kompozitinė (FRP) armatūra naudojama gelžbetoninėse konstrukcijose kaip pagrindinė strypinė paprastoji arba iš anksto įtempta armatūra. Lakštinė paprastoji arba iš anksto įtempta armatūra dažniausiai naudojama gelžbetoninėms konstrukcijoms stiprinti.

2. Kompozitinės (FRP) armatūros savybės

Kompozitinė (FRP) armatūra gali būti apskritojo skerspjūvio arba plokšti strypai, viela, lynai. Jų paviršius gali būti lygus, grublėtas, padengtas užpildo dalelėmis, su įdubomis, raižytas (1–3 pav.). Šios armatūros mechaninės savybės priklauso nuo armavimo elementų stiprumo, matricos standumo, kontakto ribos tarp matricos ir armavimo elemento stiprumo. Anglies pluošto (CFRP) armatūros tempiamasis stipris bei tamprumo modulis labiausiai priklauso nuo pluošto tipo, jo kiekio, pluošto orientacijos, skerspjūvio formos, užpildo matricos (Borosnyoi 2002). Viena svarbiausių neplieninės armatūros charakteristikų yra darbas esant tamprios stadijos



1 pav. Iš anksto įtempta aramido („Arapree“, „Technora rod“, „Fibra“) ir anglies („Nacc strand“, „Leadline“, „CFCC“) pluošto armatūra

Fig. 1. Prestressed aramid (Arapree, Technora rod, Fibra) and carbon (Nacc strand, Leadline, CFCC) fiber reinforced polymer reinforcement



2 pav. Stiklo pluošto lynai

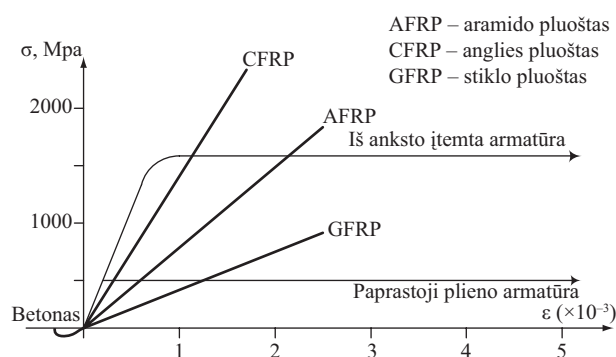
Fig. 2. Glass fiber-reinforced polymer tendons



3 pav. Ne plieninės armatūros paviršius padengtas užpildu

Fig. 3. Aggregate-coated surface of fiber-reinforced polymer reinforcement

iki suirimo nepasireiškiant plastinėms deformacijoms (4 pav.). 1 lentelėje pateiktos anglies pluošto armatūros mechaninės savybės (Borosnyoi 2002). Visų kompozitinių lynų įtempių ir deformacijų priklausomybės kreivės yra panašios, tačiau jų pobūdį lemia skirtingas tamprumo modulis. Mažesnis tamprumo modulis, palyginti su plieno, esant tai pačiai apkrovai, leidžia atsirasti didesnėms deformacijoms, tačiau yra naudingas norint sumažinti įtempių nuostolius lynuose dėl betono valkšnumo ir traukumo. To paties betono elementuose, armuotuose vienodai iš anksto įtempta, tačiau skirtingos rūšies kompozitine armatūra, įtempiai joje kinta priklausomai nuo jos tamprumo modulio (Pisani 1997).



4 pav. Betono ir armatūros įtempių ir deformacijų priklausomybės diagramos veikiant trumpalaikiai apkrovai

Fig. 4. Stress-strain characteristics for concrete and reinforcing materials under short-term loading

Iš visų kompozitinių lynų (FRP) anglies pluošto lynai (CFRP) išsiskiria didžiausiu tamprumo moduli. Taip pat jie yra mažo tankio, kuris ~5 kartus mažesnis negu plieno bei yra labai atsparus korozijai ir šarminės aplinkos poveikiui.

Stiklo pluošto lynai (GFRP) taip pat gali būti alternatyva tradicinei plieno armatūrai, tačiau pasižymi blogu atsparumu šarminei aplinkai (Sen *et al.* 1993). Aramido pluošto lynai (AFRP) yra atsparūs šarminės aplinkos poveikiui, tačiau labai jautrūs ultravioletinių spindulių poveikiui (Pisani 1997). Nustatyta, kad dėl ultravioletinių spindulių poveikio aramido pluošto armatūros tempiamasis stipris gali sumažėti 13 %, taip pat ir stiklo pluošto armatūros – 8%. Anglies pluošto (CFRP) armatūros tempiamasis stipris nepriklauso nuo ultravioletinių spindulių poveikio (Kato *et al.* 1997). Tai reiškia, kad aramido (AFRP) ir stiklo (GFRP) pluošto lynus geriausia naudoti gelžbetoniniuose elementuose, kai betonas yra sukibęs su armatūra, o anglies pluošto (CFRP) lynus galima naudoti konstrukcijose, kai betonas sukibęs su armatūra arba kai lynai naudojami kaip išorinė armatūra.

1 lentelė. Anglies pluošto lynų tempimo charakteristikos

Table 1. Tensile characteristics of CFRP tendons

| Tipas | Nominalus skersmuo $\varnothing n$, mm | Tempiamasis stipris, MPa | Tamprumo modulis, GPa | Ribinė deformacija, % | Autorius |
|-----------------|---|--------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| „Leadline“ | – | 2300 | 160,0 | 1,44 | JSCE (1997) |
| | – | 1700 | 150,0 | 1,13 | |
| | 8,0 | 1876 | 147,0 | 1,28 | Jerett-Ahmad (1995) |
| | 8,0 | 2911 | 163,3 | 1,78 | Benmokrane, Chennouf (1997) |
| | 8,0 | 1999 | 149,6 | 1,34 | Saadatmanesh, Tannous (1999) |
| | 8,0 | 1970 | 147,0 | 1,34 | Abdelrahman (1995) |
| | 8,0 | 2170 | 150-190 | 1,20 | Mahmoud (1999) |
| | 8,0 | 2997 | 170,8 | 1,75 | Lu (2000) |
| „CFCC“ | – | 2120 | 137,0 | 1,55 | Tokyo Rope (1993) |
| | 12,5 | 2280 | 137,0 | 1,66 | Domenico (1997) |
| | 15,2 | 2140 | 137,0 | 1,56 | |
| | 15,2 | 2150 | 137,0 | 1,57 | Abdelrahman (1995) |
| | 15,2 | 1915 | 155,0 | 1,23 | Mahmoul (1999) |
| | 7,5 | 2255 | 134,0 | 1,68 | Park, Naaman (1999) |
| | 7,5 | 2218 | 140,0 | 1,58 | Benmokrane, Chennouf (1997) |
| | 7,5 | 2140 | 145,0 | 1,48 | Hattori (1995) |
| 7,5 | 2135 | 146,7 | 1,45 | Saadatmanesh, Tannous (1999) | |
| „Bri-Ten“ | 5,0 | 2350 | 134,3 | 1,75 | Rostasy (1996) |
| „Nefmac“ | – | 1475 | 85,0 | 1,73 | Rahman (2000) |
| | – | 1800 | 92,3 | 1,95 | Kobayashi (1997) |
| | – | 1200 | 100,0 | 1,20 | JSCE (1997) |
| „Eurocrete“ | 8,0 | 1200 | 90-110 | – | Moss, Arora (1996) |
| „Carbon-Stress“ | – | 2400 | 160,0 | 1,50 | Nedri (1998) |
| | – | 2700 | 158,8 | 1,70 | |
| | – | 3000 | 158,0 | 1,9 | |
| „Carbopree“ | 16,0 | 2300 | 115,0 | 2,0 | Sireg (2000) |
| * | – | 1500 | 150,0 | 1,0 | Mogahadam, Sentler (1995) |
| * | 9,6 | 1640 | 109,0 | 1,50 | Mutsuyoshi (2001) |
| | 8,0 | 2020 | 127,2 | 1,58 | |
| | 7,5 | 1730 | 130,8 | 1,32 | |
| | 5,0 | 2120 | 145,4 | 1,46 | |
| | 4,7 | 1090 | 90,9 | 1,20 | |
| | 11,0 | 1820 | 113,6 | 1,60 | |
| * | 5,0 | 1340 | 135,3 | 1,0 | Uomoto (2001) |
| * | 5,0 | 1610 | 136,0 | 1,18 | Yeung, Naylor (1996) |
| | 5,0 | 1800 | 159,0 | 1,13 | |
| | 5,0 | 2310 | 194,0 | 1,19 | |
| | 5,0 | 2930 | 193,0 | 1,52 | |
| | 5,0 | 2750 | 153,0 | 1,80 | |
| | 8,0 | 1888 | 160,5 | 1,18 | |
| * | 10,2 | 1562 | 113,0 | 1,38 | Cox (2000) |
| | 8,2 | 1456 | 139,0 | 1,05 | |
| | 10,6 | 1931 | 157,0 | 1,23 | |
| | 9,8 | 1871 | 137,0 | 1,36 | |
| * | – | 1026 | 152,0 | 0,68 | Sugiyama (1997) |
| | – | 912 | 148,0 | 0,62 | |
| * | 8,0 | 1740 | 126,1 | 1,38 | Wang (1997, 1999) |
| | | 1730 | 125,3 | 1,38 | |
| | 7,5 | 2210 | 120,9 | 1,83 | |
| | | 2210 | 121,3 | 1,82 | |
| | 7,3 | 2360 | 119,2 | 2,0 | |
| | 8,9 | 1690 | 140,7 | 1,20 | |
| | | 1700 | 141,5 | 1,20 | |

Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad temperatūros poveikis turi įtakos iš anksto įtempto gelžbetonio konstrukcijų su kompozitine (FRP) armatūra elgsenai (Katz *et al.* 1999). Nustatyta, kad visi kompozitiniai lynai veikiant 250 °C temperatūrai netenka ~90 % sukibties stiprio. Kai aplinkos temperatūra siekia iki –50 °C, kompozitinės armatūros mechaninės savybės nekinta (Pisani 1997). Stiklo (GFRP) pluošto lynų tempiamasis stipris sumažėja ~30 %, kai aplinkos temperatūra pakyla nuo 20 iki 100 °C. Aramido (AFRP) pluošto lynų tempiamasis stipris mažėja, kai aplinkos temperatūra pasiekia 150 °C. Aptarti kompozitinių lynų mechaninių savybių pokyčiai dėl temperatūros įtakos aktualūs tada, kai lynus tiesiogiai veikia oras, t. y. kai lynai naudojami kaip išorinė armatūra.

Nustatyta, kad druskos poveikis taip pat turi įtakos mechaninėms kompozitinių lynų savybėms (GangaRao *et al.* 2007). Dėl šio poveikio stiklo pluošto armatūros tempiamasis stipris gali sumažėti iki 50 %.

3. Gelžbetoninių konstrukcijų su neplienine armatūra racionalaus armavimo procento apskaičiavimas

Vienas pagrindinių lenkiamųjų gelžbetoninių elementų elgsenos parametrų yra armavimo procentas, kuris daro įtaką konstrukcijos ekonomiškamui, trumpalaikėms bei ilgalaikėms deformacijoms bei pačiai konstrukcijos elgsenai.

Kai iš anksto įtempto gelžbetonio elementas armuotas plieno armatūra, esant tam tikrai apkrovai armatūra pradeda tekėti, dėl to atsiranda didelės deformacijos ir pagaliau elementas netenka laikomosios galios, kai suyra gniuždomosios zonos betonas. Iš anksto įtempto gelžbetonio elemento armuoto anglies pluošto (CFRP) armatūros elgsena kitokia. Ši armatūra išlaiko tampriąsias savybes iki pat elementui netenkat laikomosios galios, t. y. staigus ir trapus elemento suirimas. Tokiu atveju skaičiuojant lenkiamojo elemento stiprumą normaliniame pjūvyje laikomasi racionalaus koeficiento ρ_{br} koncepcijos. Tai armavimo procentas, kuriam esant vienu metu nutrūksta kompozitinė armatūra ir suyra gniuždomosios zonos betonas (Burke, Dolan 2001). Priklausomai nuo armavimo procento ρ_i , gali būti trys elemento elgsenos atvejai.

Kai $\rho = \rho_{br}$, elementas netenka laikomosios galios nutrūkstiant armatūrai ir suyrant gniuždomosios zonos betonui tuo pačiu metu. Kai $\rho < \rho_{br}$, elementas laikomas normaliai armuotu ir ima irti tempiamojoje zonoje. Įtempiai betone pasiskirsto tiesiškai. Kai $\rho > \rho_{br}$, greičiau suyra gniuždomosios zonos betonas, negu nutrūksta tempiamosios zonos armatūra.

Armavimo procentas ρ_{br} gali būti apskaičiuotas taip (Dolan, Bakis 2001; American Concrete...):

$$\rho_{br} = 0,85\beta_1 \frac{f'_c \varepsilon_{cu}}{f_{pu} \varepsilon_{cu} + \varepsilon_{pu} - \varepsilon_{pe}}, \quad (1)$$

čia: β_1 – gniuždomosios zonos aukščio redukavimo koeficientas; E_f – iš anksto įtemptos neplieninės (FRP) armatūros tamprumo modulis; f_{pu} – iš anksto įtemptos neplieninės (FRP) armatūros tempiamasis stipris; f'_c – cilindrinis betono gniuždomasis stipris; ε_{cu} – ribinė betono gniuždymo deformacija; ε_{pu} – ribinė lyno tempimo deformacija; ε_{pe} – efektyvioji deformacija, įvertinant visus iš anksto įtemptos armatūros įtempių nuostolius.

Pilakoutas *et al.* (2002), *Fib bulletin 40* (2007) siūlo kompozitinės (FRP) armatūros armavimo procentą ρ_{br} apskaičiuoti taip:

$$\rho_{br} = \frac{0,81(f_{ck} + 8)\varepsilon_{cu}}{f_{fk} \left(\frac{f_{fk}}{E_{fk}} + \varepsilon_{cu} \right)}, \quad (2)$$

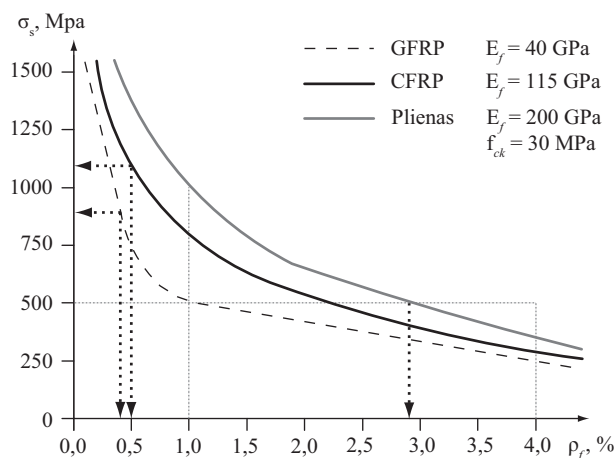
čia E_{fk} , f_{ck} , f_{fk} – charakteristinis kompozitinės (FRP) armatūros tamprumo modulis, gniuždomasis betono, pluoštinės polimerinės armatūros tempiamasis stipriai.

El-Ghandour *et al.* (1999) pasiūlė pusiau empirinę armavimo procento ρ_{br} apskaičiavimo formulę:

$$\rho_{br} = 2,1 \left(\frac{f_{cu}}{40} \right) \left(\frac{E_f}{110 \cdot 10^3} \right)^{0,7} \left(\frac{500}{f_{pu}} \right)^{1,6}, \quad (3)$$

čia f_{cu} – kubinis betono gniuždomasis stipris.

Lenkiamasis iš anksto įtemptas gelžbetoninis elementas, armuotas plieno armatūra, yra gausiai armuotas, kai armavimo procento reikšmė viršija 3 %. Kai elementas armuotas kompozitine (FRP) armatūra, elementas laikomas perarmuotu, kai ρ_i viršija 0,5 % (5 pav.). Iki šios ribos kompozitinės armatūros tempiamasis stipris yra visiškai išnaudojamas. Kai kompozitinės armatūros įtempiai yra mažesni nei plieno armatūros tempiamasis stipris, elemento laikomosios galios sąlyga bus išpildyta tik esant didesniam armavimo procentui (5 pav.). Remiantis (1), (2), (3) formulėmis, taip pat ir 2 lentelės duomenimis, buvo atlikti teoriniai iš anksto įtempto gelžbetonio stačiakampio skerspjūvio sijų, kurių matmenys 500×250 mm, skaičiavimai. Nustatytos armavimo procento ρ_{br} reikšmės. Skaičiavimų rezultatai pagal pasiūlytas apskaičiavimo formules skiriasi (6–12 pav). Visais atvejais gauta, kad armavimo procento ρ_{br} reikšmės, apskaičiuotos pagal (2), yra didžiausios. Skaičiuojant ρ_{br} pagal (1), gautos mažiausios armavimo procento ρ_{br} reikšmės. Remiantis (3) išraiška, gautos armavimo procento reikšmės tarp reikšmių, apskaičiuotų formulėmis (1), (2).



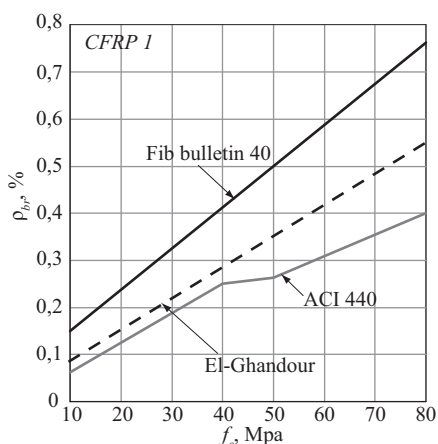
5 pav. Armatūros tempiamojo stiprio išnaudojimas didėjant armavimo procentui

Fig. 5. Stress in reinforcement versus percentage amount of reinforcement

2 lentelė. Neplieninės (FRP) armatūros tipai ir savybės

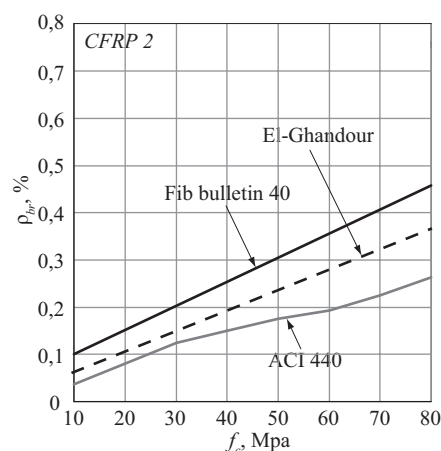
Table 2. Types and properties of non-metallic reinforcement

| Iš anksto įtemptos armatūros tipas | Tamprumo modulis E_f , GPa | Tempiamasis stipris f_{pu} , MPa |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| (CFRP) | | |
| „Leadline 1“ | 147 | 1970 |
| „Leadline 2“ | | 2550 |
| (GFRP) | | |
| „Isorod“ | 42 | 692 |
| „C-bar“ | | 746 |
| (AFRP) | | |
| „Arapree“ | 64 | 1500 |
| „Kevlar 49“ | 120 | 1200 |
| Plienas | | |
| „Y 1230“ | 200 | 1100 |



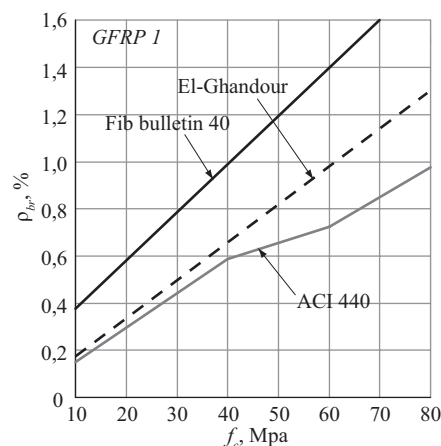
6 pav. Armavimo procento ρ_{br} kitimas, kintant betono gniuždomajam stipriui, kai sija armuota anglies pluošto (CFRP1) armatūra

Fig. 6. Effect of concrete compression strength and CFRP1 properties on ρ_{br}



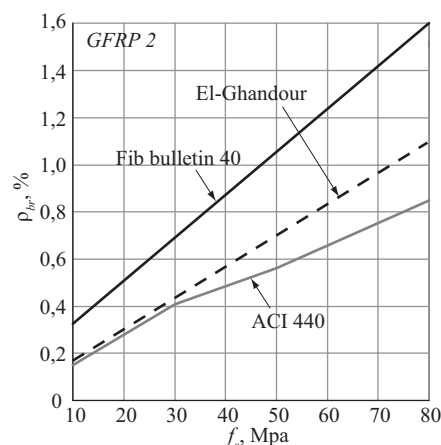
7 pav. Armavimo procento ρ_{br} kitimas, kintant betono gniuždomajam stipriui, kai sija armuota anglies pluošto (CFRP2) armatūra

Fig. 7. Effect of concrete compression strength and CFRP 2 properties on ρ_{br}



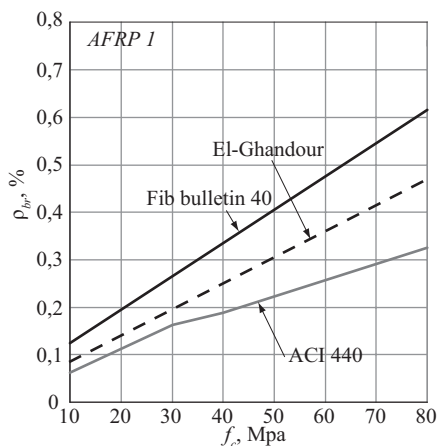
8 pav. Armavimo procento ρ_{br} kitimas, kintant betono gniuždomajam stipriui, kai sija armuota stiklo pluošto (GFRP1) armatūra

Fig. 8. Effect of concrete compression strength and GFRP1 properties on ρ_{br}



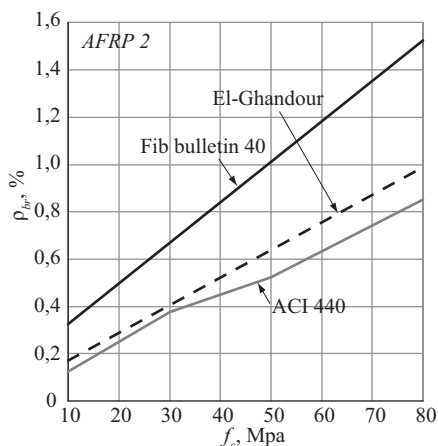
9 pav. Armavimo procento ρ_{br} kitimas, kintant betono gniuždomajam stipriui, kai sija armuota stiklo pluošto (GFRP2) armatūra

Fig. 9. Effect of concrete compression strength and GFRP2 properties on ρ_{br}



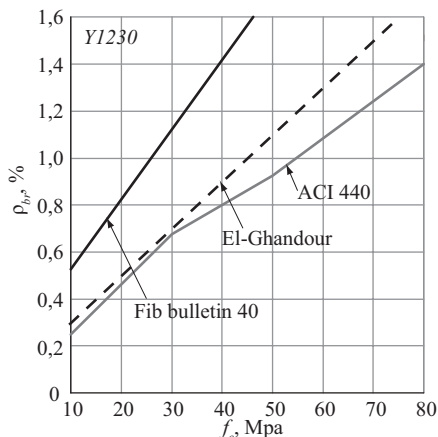
10 pav. Armavimo procento ρ_{br} kitimas, kintant betono gniuždomajam stipriui, kai sija armuota aramido pluošto (AFRP1) armatūra

Fig. 10. Effect of concrete compression strength and AFRP 1 properties on ρ_{br}



11 pav. Armavimo procento ρ_{br} kitimas, kintant betono gniuždomajam stipriui, kai sija armuota aramido pluošto (AFRP2) armatūra

Fig. 11. Effect of concrete compression strength and AFRP 2 properties on ρ_{br}



12 pav. Armavimo procento ρ_{br} kitimas, kintant betono gniuždomajam stipriui, kai sija yra armuota plienine (Y1230) armatūra

Fig. 12. Effect of concrete compression strength and prestressed steel Y1230 properties on ρ_{br}

Kai iš anksto įtempto gelžbetonio sija armuota anglies pluošto (CFRP) armatūra, pagal (2) formulę apskaičiuota armavimo procento reikšmė $\sim 2,31$ karto didesnė už armavimo procento ρ_{br} reikšmę, gautą pagal (1) formulę. Ši reikšmė gauta, kai gniuždomasis betono stipris siekia 10 MPa. Didėjant betono stipriui santykis $\rho_{br(2)} / \rho_{br(1)}$ mažėja. Kai betono stipris siekia 80 MPa, bendroju atveju $\rho_{br(2)} = 1,838\rho_{br(1)}$. Lyginant skaičiavimo rezultatus, gautus pagal (2) ir (3) formules, kai betono gniuždomasis stipris f_c lygus 10 MPa, pusiausvyros koeficientas $\rho_{br(2)} = 1,818\rho_{br(3)}$. Kai betono gniuždomasis stipris 80 MPa, $\rho_{br(2)} = 1,384\rho_{br(3)}$. Skaičiavimų rezultatai praktiškai sutampa, kai armavimo procentas ρ_{br} apskaičiuojamas remiantis El-Ghandour ir Dolan pasiūlytomis formulėmis, jei betono gniuždomasis stipris neviršija 30 MPa ribos. Tada $\rho_{br(3)} = 1,070\rho_{br(1)}$. Kai f_c lygus 80 MPa, tada $\rho_{br(3)} = 1,330\rho_{br(1)}$.

Konstrukcijos irimo pobūdį nusakantis koeficientas ρ_{br} , kai iš anksto įtemptas gelžbetoninis elementas armuotas anglies pluošto (CFRP2) lynais pagal (2) formulę, yra 3,3 karto mažesnis, palyginti su elementu, kuris armuotas aramido pluošto (AFRP2) armatūra. Lyginant su elementu, kuris armuotas stiklo pluošto (GFRP) lynais, $\rho_{CFRP(2)} \approx 0,421\rho_{GFRP(2)}$. Apskaičiuojant armavimo koeficientą ρ_{br} pagal formules (1) ir (3), santykių vertės $\rho_{CFRP(1)} / \rho_{GFRP(1)}$ ir $\rho_{CFRP(3)} / \rho_{GFRP(3)}$ yra adekvacijos $\rho_{CFRP(2)} / \rho_{GFRP(2)} \approx 0,42$. Kai iš anksto įtempto gelžbetonio sija armuota plieno lynais ir betono gniuždomasis stipris lygus 10 MPa, apskaičiuotas armavimo procentas $\rho_{br} \sim 3$ kartus didesnis negu sijos, armuotos anglies pluošto lynais ($\rho_{CFRP} \approx 0,3\rho_{Y1230}$). Lyginant su stiklo pluošto (GFRP) armatūra, $\rho_{GFRP} \approx 0,61\rho_{Y1230}$. Kai sijai armuoti naudojami aramido pluošto (AFRP) lynai, $\rho_{AFRP} \approx 0,720\rho_{Y1230}$.

4. Išvados

1. Lenkiamieji gelžbetoniniai elementai gali būti armuojami kompozitine (FRP) iš anksto įtempta armatūra. Tačiau naudojant šią armatūrą susiduriama su inkaravimo problema, kuri gali būti sėkmingai sprendžiama naudojant specialius inkarus.
2. Kompozitinė (FRP) armatūra priklausomai nuo plaušo (anglies plaušas, stiklo plaušas, aramido plaušas) yra skirtingo atsparumo aplinkos poveikiui. Jeigu anglies plaušas aplinkos poveikiui yra atsparus, tai stiklo ir aramido plaušas yra neatsparus ultravioletinių spindulių poveikiui, o stiklo plaušas – ir šarminėi aplinkai. Temperatūros po-

veikis daro didelę įtaką visų rūšių kompozitinės (FRP) armatūros inkaravimui betone.

3. Norint parinkti racionalų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų armavimą įvairiuose literatūros šaltiniuose siūlomos skirtingos metodikos racionaliam armavimo koeficientui apskaičiuoti. Atlikta šių metodų analizė parodė, kad pagal jas apskaičiuotosios racionaliosios armavimo koeficiento reikšmės, esantoms pačioms geometrinėms charakteristikoms ir betono stipriui, skiriasi iki dviejų kartų.
4. Atlikti skaičiavimai rodo, kad iš visų aptartų kompozitinės (FRP) armatūros tipų iš anksto įtemptiems ar paprastiesiems gelžbetonio elementams armuoti racionaliausia naudoti anglies pluošto (CFRP) armatūrą. Šiuo atveju koeficientas ρ_{br} , kuris nusako elemento suirimo pobūdį, gautas pats mažiausias. Vadinas, lenkiamųjų iš anksto įtempto gelžbetonio elementų laikomosios galios sąlyga bus įvykdyta su mažiausiu armavimo procentu, o tai lemia jau minėtą pagrindinį ekonomiškumo kriterijų.

Literatūra

- Abdelrahman, A. A.; Rizkalla, S. H. 1995. Serviceability of concrete beams prestressed by carbon fibre plastic rods, in *Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. London, 403–412.
- Abdelrahman, A. A.; Tadros, G.; Rizkalla, S. H. 1995. Test model for the first Canadian smart highway bridge, *ACI Structural Journal* 92(4): 451–458.
- American Concrete Institute. 2004. *Prestressed Concrete Structures with FRP Tendons*. ACI 440.4R-04. Detroit, Michigan: ACI. 35 p.
- Borosnyoi, A. 2002. *Serviceability of CFRP prestressed concrete beams*: PhD Thesis. Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Civil Engineering. 285 p.
- Burke, Ch. R.; Dolan, Ch.W. 2001. Flexural Design of Prestressed Concrete Beams Using FRP Tendons, *PCI Journal*: 76–87.
- 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, Vol 1. 133 p.
- El-Ghandour, A. W.; Pilakoutas, K.; Waldron, P. 1999. New Approach for Punching Shear Capacity Prediction of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Flat Slabs, in *ACI SP-188, Proceedings of the Fourth International Symposium Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-4)*. Baltimore, USA, 135–144.
- Fib bulletin 40. 2007. FRP reinforcement in RC structures. Technical report. Switzerland. 160 p.
- GangaRao, H. V. S.; Taly, N.; Vijay, P. V. 2007. *REINFORCED Concrete Design with FRP Composites*. CRC Press. Taylor & Francis Group. 400 p.
- Kato, Y.; Yamaguchi, T.; Nishimura, T.; Uomoto, T. 1997. Computational model for deterioration of aramid fibre by ultraviolet rays, in *Proceedings of the 3rd International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures 2*: 163–170.
- Katz, A.; Berman, N.; Bank, L. C. 1999. Effect of high temperature on bond strength of FRP rebars, *Journal of Composites for Construction* 3(2): 73–81.
[doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:2(73))
- Pisani, M. A. 1997. A numerical survey on the behaviour of beams pre-stressed with FRP cables, *Construction and Building Materials* (12): 221–232.
- Pilakoutas, K.; Neocleous, K.; Guadagnini, M. 2002. Design Philosophy Issues of FRP RC Structures, *Journal of Composites for Construction*, ASCE 6(3): 154–161.
[doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:3\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(154))
- Sen, R.; Mariscal, D.; Shahawy, M. 1993. Durability of fiberglass pretensioned beams, *ACI Structural Journal*: 525–533.

REINFORCEMENT CHARACTERISTICS OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITH FIBER-REINFORCED POLYMER (FRP) TENDONS

M. Atutis, J. Valivonis

Abstract. The basic advantages of fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement are reviewed. FRP tendons exhibit linear elastic response to rupture without yielding and thus failure is expected to be brittle. Structural behaviour of beams prestressed with FRP tendons is different from that of beams with traditional steel reinforcement. Strength design approach for prestressed beams with FRP tendons is based on the concept of brittle ratio, reinforcement ratio at which concrete fails in compression at the same time as FRP tendon ruptures. Depending on reinforcement ratio, the flexural behaviour of the beam can be divided into several groups. If reinforcement ratio is equal to brittle ratio, beams fail by rupture of tendons and crushing of concrete simultaneously. Beams with reinforcement ratio, less than brittle ratio, are under-reinforced and will fail by rupture of tendons. When reinforcement ratio is greater than brittle ratio, concrete fails in compression prior to rupture of tendons. Brittle ratio was calculated by different expressions proposed in scientific literature, and particular results were given. It has been shown, that brittle ratio is influenced by the mechanical properties of FRP and concrete.

Keywords: prestressed concrete, fiber-reinforced polymer tendons.

Mantas ATUTIS. MSc at the Dept of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). Research interests: prestressed concrete behaviour using carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) reinforcement, composite structures, finite element method.

Juozas VALIVONIS. Prof. at the Dept of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). Publications: author of over 55 scientific publications. Research interests: theory of reinforced concrete behaviour, composite structures, reinforced concrete bridges.