

STIKLO PLUOŠTO ARMATŪRA ARMUOTŲ SIJŲ, IŠANKSTINIO ĮTEMPIMO  
ĮTAKOS LAIKOMAJAI GALIAI IR STANDUMUI EKSPERIMENTINIS TYRIMASEdgaras Atutis<sup>1</sup>, Marius Budvytis<sup>2</sup>, Mantas Atutis<sup>3</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>atutis.edgaras@gmail.com; <sup>2</sup>mariusbudvytis1@gmail.com; <sup>3</sup>atutis.mantas@gmail.com

**Santrauka.** Straipsnyje nagrinėjami sijų, armuotų stiklo pluošto armatūra, eksperimentiniai tyrimai, kuriuose buvo nagrinėjama šių sijų laikomoji galia statmenajame ir įstrižajame pjūviuose. Buvo bandomos dvi sijos, armuotos išilgine iš anksto įtempta stiklo pluošto armatūra, dvi sijos armuotos neįtemptą stiklo pluošto armatūra, dvi sijos armuotos plienine išilgine armatūra ir skersine stiklo pluošto armatūra. Gautos statmenojų ir įstrižojo pjūvio laikomosios galios palyginamos su įvairiomis projektavimo normomis ir rekomendacijomis, analizuojama išankstinio įtempimo reikšmė sijų lenkiamajam standumui.

**Reikšminiai žodžiai:** išankstinis įtempimas, stiklo pluošto armatūra, statmenojų pjūvio laikomoji galia, įstrižojo pjūvio laikomoji galia, eksperimentiniai tyrimai, pleišėjimas, įlinkis.

## Įvadas

Pastaruosius kelis dešimtmečius kompozitinė (angl. *fiber reinforced polymer* – kompozito pluošto polimero) armatūra pradėta vis dažniau naudoti betoninėse konstrukcijose. Ši armatūra pasižymi geromis antimagnetinėmis savybėmis, dideliu stipriu, atsparumu nuovargiui, įvairiems cheminiams poveikiams ir korozijai bei mažu šilumos laidumu. Dėl šių priežasčių jos panaudojimas betoninėse konstrukcijose yra dar aktualesnis. Stiklo pluošto armatūros mažesnė kaina, palyginti su kitų pluoštų armatūra, lemia dar platesnį jos panaudojimą. Tačiau, veikiant ilgalaikėms apkrovoms, stiklo pluošto tempiamasis stipris mažėja (Bank 2006).

Kompozitinė armatūra yra sudaryta iš dviejų pagrindinių komponentų – polimerinių plaušų ir matricos, dar vadinamos jungiamąja medžiaga. Plaušai kompozitinei medžiagai suteikia stiprumo ir standumo, o matrica yra kaip terpė, kuria įtempiai perduodami plaušams. Priklausomai nuo matricos tipo ir plaušų išsidėstymo, plaušo kiekis kompozite sudaro nuo 30 iki 75 % viso elemento tūrio. Tam, kad tokią kompozitinę medžiagą būtų galima naudoti konstrukciniuose elementuose ir šios medžiagos savybės būtų maksimaliai išnaudojamos, plaušų paviršius turi būti visiškai padengtas matrica.

Šiuo metu pasaulyje įgyvendinta daug projektų, kuriuose dėl agresyvios aplinkos poveikio buvo naudojama kompozitinė armatūra. Tokia armatūra dažniausiai naudojama gelžbetoniniams greitkeliams, tiltams ir viadukams, tuneliams, gamykloms ir laivybos statiniams armuoti.

Sijų, armuotų iš anksto įtempta aramido pluošto kompozitine armatūra, eksperimentinių tyrimų rezultatai

(Kim 2010) parodė, kad išankstinio įtempimo dydis turėjo didelę įtaką plyšio atsivėrimo apkrovos reikšmei, to negalima pasakyti apie ardančiąją apkrovą. Tačiau dėl kompozitinės armatūros mažo tamprumo modulio, palyginti su plieno, gauti dideli sijų įlinkiai. Sijos suiro dėl viršytų aramido pluošto lynų ribinių įtempių.

Bandymais (Eshani *et al.* 1995; Maruyama *et al.* 1989) nustatyta, kad kompozitinės armatūros strypų stipris žymiai sumažėja, kai juos vienu metu veikia tempimo ir šlyties įtempiai. Toks įtempių būvis susidaro skersinės armatūros sankabų sulenktose dalyse, todėl sankabų nutrauktis beveik visada įvyksta būtent sulenkimo zonoje. Todėl skaičiuojant įstrižojo pjūvio laikomąją galią siūloma kompozitinės armatūros sankabų stiprį sumažinti apie 40–50 % (Morphy *et al.* 1997; Shehata *et al.* 2000). Norint išvengti šio neigiamo efekto, reikia keisti skersinės armatūros užinkaravimo būdą, t. y. nenaudoti sulenktų strypų, taip nesumažinant jų tempiamojo stiprio.

Atliktų bandymų (Kobraei *et al.* 2011) su anglies pluošto (CFRP) skersinės armatūros strypais rezultatai parodė, kad sijų skersinio armavimo pobūdis, pririšant strypus prie išilginės armatūros, gali būti naudojamas.

Kaip jau anksčiau minėta, kompozitinė armatūra pasižymi atsparumu korozijai. Tai yra ypač aktualu skersinės armatūros atveju, nes dažniausiai ši armatūra yra pirmiausiai veikiama agresyvios aplinkos. Skersinius kompozitinius strypus galima montuoti net konstrukcijos išorėje, o tai yra svarbu, norint užtikrinti bendrą atskirų elementų darbą.

## Medžiagos, bandiniai ir bandymo metodika

Tyrimams atlikti buvo paruoštos šešios sijos, kurių duomenys pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Bandinių duomenys

Table 1. Details of specimens

Žymuo	$h$ , m	$b$ , m	$a$ , m	$l$ , m	Armavimo procentas $\rho$ , %
S-1	0,303	0,146	0,05	2,0	0,665
S-2	0,302	0,150	0,05	2,0	0,650
SI-1	0,303	0,148	0,05	2,0	0,656
SI-2	0,301	0,149	0,05	2,0	0,657
S-3-A	0,303	0,149	0,05	2,0	1,633
S-4-A	0,303	0,151	0,05	2,0	1,612
S-3-B	0,301	0,150	0,05	2,0	1,638
S-4-B	0,304	0,148	0,05	2,0	1,635

Gaminiamis naudoto betono mechaninės savybės pateiktos 2 lentelėje. Bandiniai klojiniuose kietėjo 28 paras normaliomis sąlygomis.

2 lentelė. Betono mechaninės savybės

Table 2. Mechanical properties of concrete

Vidutinis kubinis gniuždomasis stipris $f_{cm, cube}$ , MPa	Vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris $f_{cm}$ , MPa	Vidutinis tempiamasis stipris $f_{ctm}$ , MPa	Kirstinis tamprumo modulis $E_{cm}$ , GPa
36,3	31,5	3,34	26,5

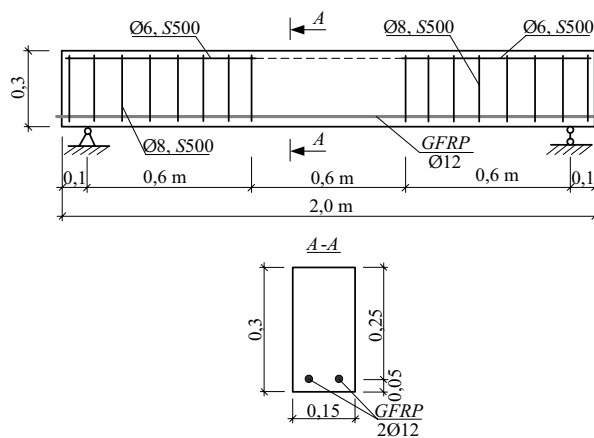
Sijos armuoti buvo naudojami plieniniai armatūros strypai ir *Schock ComBAR* stiklo pluošto 12 ir 8 mm skersmens strypai. Armatūros mechaninės savybės, nustatytos eksperimentiškai, pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Stiklo pluošto armatūros mechaninės savybės

Table 3. Mechanical properties of GFRP rebar

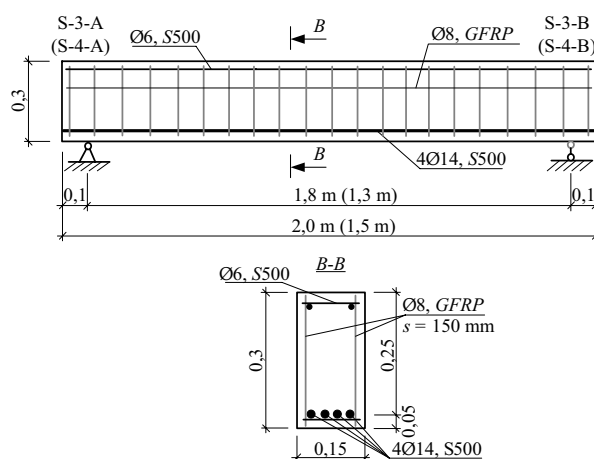
Tempiamasis stipris $f_{fu}$ , MPa	Tamprumo modulis $E_f$ , GPa	Ribinės deformacijos $\epsilon_{fu}$
1418,2	60,2	0,0236

Sijos S-1 ir S-2 tempiamojoje zonoje armuojamos 2Ø12 mm stiklo pluošto armatūros strypais. Šių sijų skersinė armatūra plieninė – Ø8 mm. SI-1 ir SI-2 armuojamos analogiškai, tik stiklo pluošto armatūra yra įtempama į atsparas prieš užklojant bandinius betonu. Sijos S-3 ir S-4 tempiamojoje zonoje armuojamos 4Ø14 mm plieniniais strypais, o šių sijų skersiniam armavimui naudojami Ø8 mm stiklo pluošto armatūros strypai, kurie išdėstomi 150 mm žingsniu. Sijų armavimo schemas pateiktos 1 ir 2 pav.



1 pav. Sijų S-1, S-2, SI-1 ir SI-2 armavimo schema

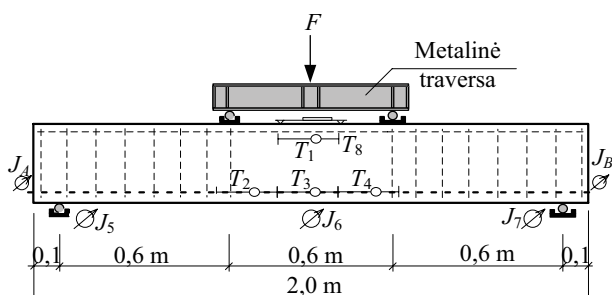
Fig. 1. Scheme for reinforcing beams S-1, S-2, SI-1 and SI-2



2 pav. Sijų S-3-A(-B) ir S-4-A(-B) armavimo schema

Fig. 2. Scheme for reinforcing beams S-3-A(-B) and S-4-A(-B)

Sijų skirtų statmenojai pjūvio laikomosios galios analizei (S-1, S-2, SI-1 ir SI-2), bandymo schema pateikta 3 pav. Bandiniai apkraunami dviem sutelktomis apkrovomis.

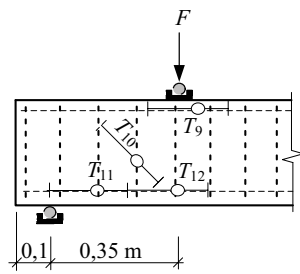


3 pav. Sijų S-1, S-2, SI-1 ir SI-2 bandymo schema ir matavimo prietaisų išdėstymo schema

Fig. 3. Scheme for load placement and gauges layout for beams S-1, S-2, SI-1 and SI-2

Apkrova keliama pakopomis po 5 kN iki atsiveriant pirmiesiems plyšiams, toliau keliama po 10 kN iki sijoms suyrant. Kiekvienoje apkrovimo pakopoje buvo išmatuoti atsivėrusių plyšių pločiai. Sijų santykinės deformacijos, vidurio taško įlinkiai ir atramų deviacijos matuojamos indukciniais davikliais. Visų indukcinų daviklių, pavaizduotų 3 pav., matavimų bazė – 200 mm. Tempiamų strypų galuose buvo pritvirtinti mechaniniai mikrometrai armatūros slinkčiai betono atžvilgiu matuoti.

Bandinių, skirtų įstrižojo pjūvio analizei, bandymo schema ir matavimo prietaisų išdėstymo schema pateikta 4 pav. Šie bandiniai apkraunami viena sutelkta jėga, pridėta 0,35 m atstumu nuo atramos. Apkrova keliama pakopomis, kurių dydis 10 kN. Kaip ir sijų S-1, S-2, SI-1, SI-2 atveju, buvo išmatuoti atsivėrusių plyšių pločiai.



4 pav. Jėgos pridėjimo ir indukcinų daviklių išdėstymo schema

Fig. 4. Scheme for load placement and the layout of inductive gauges

### Laikomosios galios skaičiavimas

Elemento, armuoto neplienine armatūra (FRP), statmenoj pjūvio laikomosios galios skaičiavimas priklauso nuo armavimo koeficiento  $\rho$ . Atvejais, kai lenkiamoj elemento tempiamosios zonos armatūros ir gniuždomojoje zonoje esančio betono deformacijų ribinės reikšmės pasiekiamos vienu metu, vadinamas subalansuotų deformacijų būviu. Optimalus armavimo koeficientas  $\rho_b$  nurodo, kokiam armavimui esant gali būti pasiekiamas šis būvis. Kai elemento armavimo koeficientas  $\rho$  yra didesnis už  $\rho_b$ , veikiant ardančiai apkrovai, suyra gniuždomosios zonos betonas, o tempiamoji armatūra nepasiekia ribinių deformacijų. Toks armavimo atvejis vadinamas gausiai armuoto elemento atveju.

Lenkiamoj elemento statmenoj pjūvio laikomoji galia, kai elementas yra gausiai armuotas, remiantis Amerikos projektavimo normomis, apskaičiuojama pagal šią išraišką:

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

čia  $\beta_1$  yra gniuždomosios zonos betono įtempimų epiūrą apibūdinantis koeficientas,  $b$  – elemento skerspjūvio plotis,  $d$  – skerspjūvio naudingasis aukštis,  $f'_c$  – betono gniuždomasis stipris,  $k_u$  – santykinis gniuždomosios zonos aukštis.

Elemento laikomoji galia minėtu atveju, remiantis Europos projektavimo normomis, apskaičiuojama pagal šią išraišką:

$$M_u = \rho \cdot b \cdot d \cdot f_{pu} \left( d - \frac{x}{2} \right), \quad (2)$$

čia  $f_{pu}$  yra kompozitinės armatūros tempiamasis stipris,  $x$  – gniuždomosios zonos aukštis,  $\rho$  – elemento armavimo koeficientas.

Remiantis Kanados projektavimo normomis lenkiamoj elemento statmenoj pjūvio laikomoji galia gali būti apskaičiuojama taip:

$$M_u = C \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right), \quad (3)$$

čia  $C$  – gniuždomosios zonos atstojamoji jėga, kuri apskaičiuojama taip:

$$C = \alpha_1 \cdot \phi_c \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c, \quad (4)$$

čia  $\alpha_1$  yra betono gniuždomosios zonos įtempimų epiūros korekcijos koeficientas,  $b$  – elemento skerspjūvio plotis,  $c$  – gniuždomosios zonos aukštis,  $\phi_c$  – betono gniuždomojo stiprio korekcijos koeficientas.

Pagal EC 2 įstrižojo pjūvio laikomoji galia  $V_u$  yra mažesnė iš šių reikšmių:

$$V_u = \min \begin{cases} V_{u,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{fu} \text{ctg}\theta \\ V_{u,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cm} / (\text{ctg}\theta + \text{tg}\theta) \end{cases}, \quad (5)$$

čia  $V_{u,s}$  – tempiamoj santvaros spyrio stiprumas,  $V_{u,max}$  – gniuždomoj betono spyrio stiprumas,  $A_{sw}$  – skersinės armatūros skerspjūvio plotas,  $s$  – tarpas tarp skersinės armatūros strypų,  $z$  – vienodo aukščio elemento vidinis petys (laikoma, kad  $z = 0,9 d$ ),  $d$  – efektyvusis skerspjūvio aukštis,  $\theta$  – kampas tarp betono gniuždomoj spyrio ir skersinei jėgai statmenos sijos ašies,  $\alpha_{cw}$  – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į gniuždomosios juostos įtempimų būvį (konstrukcijoms be išankstinio įtempimo  $\alpha_{cw} = 1$ ),  $b_w$  – mažiausias atstumas tarp tempiamųjų ir gniuždomųjų juostų,  $v_1$  – supleišėjusio įstrižajame pjūvyje betono stiprio mažinamasis koeficientas, lygus  $v_1 = 0,6[1 - (f_{cm}/250)]$ .

Pagal STR įstrižojo pjūvio laikomoji galia  $V_u$  apskaičiuojama taip:

$$V_u = \min \begin{cases} V_{u,max} = 0,3 \phi_w \phi_c f_{cm} b_w d \\ V_{u,cs} = V_{Rc} + V_{Rs} = \frac{\phi_c 2 (1 + \phi_n) f_{cm} b_w d^2}{c} + v_{sw} \cdot c_0 \end{cases}, \quad (6)$$

čia  $V_{u,max}$  – gniuždomoj betono tarp įstrižųjų plyšių stiprumas,  $V_{u,cs}$  – įstrižojo pjūvio stiprumas,  $V_{Rc}$  – gniuždymo įtempius perimančio betono įstrižojo pjūvio laikomosios galios dedamoji,  $V_{Rs}$  – skersinės armatūros, perimančios tempimo ir

kirpimo įtempius, laikomosios galios dedamoji,  $\varphi_{w1}$  – koeficientas, skirtas atsižvelgti į skersinio armavimo įtaką stiprumui tarp įstrižųjų plyšių, lygus  $\varphi_{w1} = 1 + 5 \alpha \rho_w \leq 1,3$ ,  $\varphi_{c1}$ ,  $\varphi_{c2}$  – empirinis koeficientas, priklausantis nuo betono savybių, lygus  $\varphi_{c1} = 1 - \beta f_{cm} \leq 1,3$ ,  $c$ ,  $c_0$  – įstrižojo pjūvio projekcija.

Pagal ACI 318M-08 įstrižojo pjūvio laikomoji galia  $V_u$  nustatoma taip:

$$V_u = V_c + V_s = 0,17\lambda\sqrt{f_{cm}}b_wd + \frac{A_{sw}f_{fu}d}{s}, \quad (7)$$

čia  $V_c$  – skersinė jėga, kurią atlaiko betonas,  $V_s$  – skersinė jėga, kurią atlaiko skersinė armatūra.

## Rezultatų analizė

Taikant minėtų normų statmenojo pjūvio laikomosios galios nustatymo išraiškas buvo apskaičiuotos tiriamų sijų laikomosios galios, kurios pateiktos 4 lentelėje.

Sijų, kurių žymuo SI-1 ir SI-2, eksperimentinių ir apskaičiuotų, remiantis Europos projektavimo normomis, laikomųjų galių didžiausias skirtumas sudaro 5,89 %. Didžiausias skirtumas tarp eksperimentinių ir apskaičiuotų pagal Amerikos projektavimo normas – 20,57 %, Kanados projektavimo normas – 19,18 %. Artimiausios gautoms eksperimentinėms lenkiamųjų sijų laikomosioms galioms yra apskaičiuotosios remiantis Europos rekomendacijoms.

Teorinės bandinių S-3-A, S-4-A, S-3-B ir S-4-B įstrižojo pjūvio laikomųjų galių reikšmės yra didesnės už eksperimentines. Tai rodo, kad eksperimento metu nebuvo išnaudotas didelis skersinės armatūros stipris, nes armatūra nebuvo pakankamai užsiinkaravusi. Bandinio S-4-B eksperimentinė įstrižojo pjūvio laikomosios galios reikšmė mažiausiai skiriasi nuo teorinės – pagal EC 2 teorinė laikomosios galios reikšmė yra 21,2 % didesnė už eksperimentinę, pagal STR – 11,8 %, o pagal ACI 318M-08 – 22,1 %. Didžiausi skirtumai tarp eksperimentinių ir teorinių rezultatų gauti bandant S-4-A bandinį. Šiuo atveju skirtumas pagal EC 2 yra 48,6 %, pagal STR – 37,1 %, o pagal ACI 318M-08 – 49,8 %. Remiantis minėtais rezultatais, taip pat 5 lentelėje pateiktais duomenimis galima teigti, kad tiksliausi įstrižojo pjūvio laikomosios galios rezultatai gaunami skaičiuojant pagal STR.

Eksperimentinių tyrimų metu gautų laikomųjų galių reikšmių palyginimas pateiktas 4 ir 5 lentelėse.

Eksperimento metu buvo matuojamas sijų SI-1, SI-2, S-3 ir S-4 vidurio įlinkis bei atramų deviacijos. 5 pav. matomos gautos sijų apkrovos ir įlinkio priklausomybės. Didėjant veikiančios išorinės apkrovos reikšmei iki pirmųjų plyšių atsivėrimo apkrovos vertės, tirtos sijos dirbo tampriai. Galima teigti, jog kintant apkrovos reikšmei įlinkis didėja tiesiškai. Pasiekus pleišėjimo apkrovą sijų standumas itin krito.

4 lentelė. Eksperimentinių ir teorinių sijų laikomųjų galių palyginimas

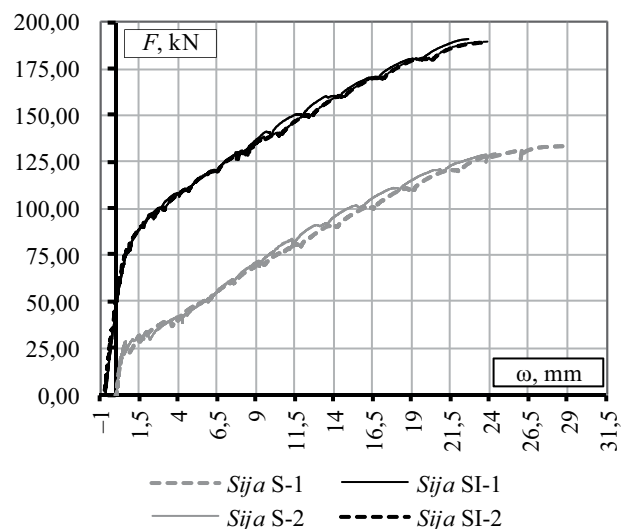
Table 4. A comparison of experimental and theoretical flexural strength

Žymuo	$M_{exp}$ , kNm	$M_{exp}/M_{ACI\ 440}$	$M_{exp}/M_{fib\ 40}$	$M_{exp}/M_{CAN}$
SI-1	57,27	1,254	1,076	1,251
SI-2	56,79	1,259	1,059	1,234
S-1	39,93	1,087	1,015	1,128
S-2	38,88	1,080	1,005	1,084

5 lentelė. Eksperimentinių ir teorinių sijų laikomųjų galių palyginimas

Table 5. A comparison of theoretical and experimental results of shear strength

Žymuo	$V_{exp}$ , kN	$V_{exp}/V_{EC2}$	$V_{exp}/V_{STR}$	$V_{exp}/V_{ACI}$
S-3-A	191,5	0,71	0,77	0,70
S-4-A	182,5	0,67	0,73	0,67
S-3-B	202,9	0,75	0,81	0,74
S-4-B	223,9	0,83	0,89	0,82



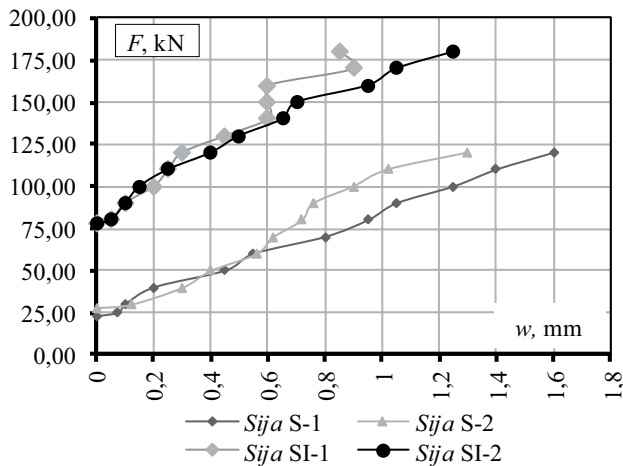
5 pav. Tirtų sijų apkrovos ir įlinkio priklausomybės

Fig. 5. Relationship between beam midspan deflection and applied load

Sijų, kurios buvo armuotos iš anksto įtempta stiklo pluošto armatūra, plyšių atsivėrimo ir maksimalaus lenkiamomo momento santykis –  $M_{cr,exp}/M_{u,exp} = 0,41$ , o sijų, armuotų neįtemptąja armatūra, –  $M_{cr,exp}/M_{u,exp} = 0,22$ . Matome, kad iš anksto įtemptų sijų standumas didesnis apie 1,86 karto. Šis skirtumas gautas dėl išankstinės įtempimo jėgos sijų tempiamojoje zonoje sukeltų gniuždymo įtempimų.

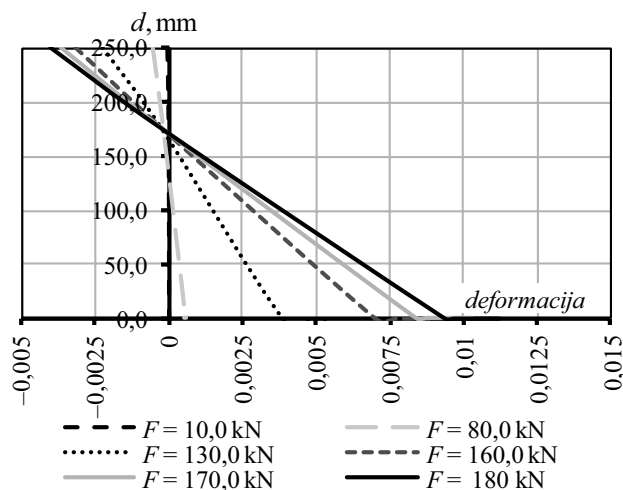
Iš atlikto tyrimo duomenų buvo gautos sijų plyšio pločio ir veikiančios apkrovos priklausomybės, kurios pateiktos 6 pav. Šiame paveiksle matyti, kad įtemptosios

se sijose pirmasis plyšys atsivėrė veikiant daug didesnei apkrovai, palyginti su neįtemptomis sijomis. Veikiant lenkimo momentui  $M_{test} = 0,6 M_w$ , sijose su iš anksto įtempta stiklo pluošto armatūra plyšio plotis  $w_{exp} = 0,40$  mm, o sijose su neįtemptąja armatūra –  $w_{exp} = 0,95$  mm. Plyšių plotis skiriasi 2,38 karto. Taip pat iš 6 pav. pateiktų priklausomybių matyti, kad apkrovai priartėjus prie ribinės, iš anksto įtemptų sijų plyšiai buvo mažesni nei sijų, armuotų neįtemptąja armatūra.



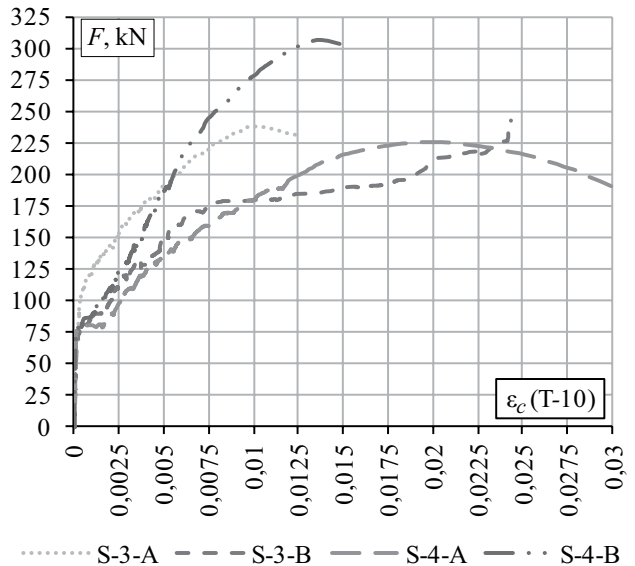
6 pav. Tirtų sijų plyšio pločio ir apkrovos priklausomybės  
Fig. 6. Relationship between the width of the beam crack and applied load

7 pav. pateiktas sijos SI-2 deformacijų kitimas didėjant veikiančiai apkrovai. Kai apkrova yra nedidelė, sijos neutralioji ašis yra arti jos svorio centro linijos. Apkrovai didėjant, gniuždomosios zonos aukštis mažėja, dėl to neutraliosios ašies padėtis kinta ir artėja prie gniuždomosios zonos išorinio krašto. Sijos S-1, S-2, SI-1 ir SI-2, veikiamos ardančiosios apkrovos, suiro gniuždomojoje zonoje.



7 pav. Sijos SI-2 skerspjūvio deformacijų kitimas  
Fig. 7. Changes in strain across the section depth of beam SI-2

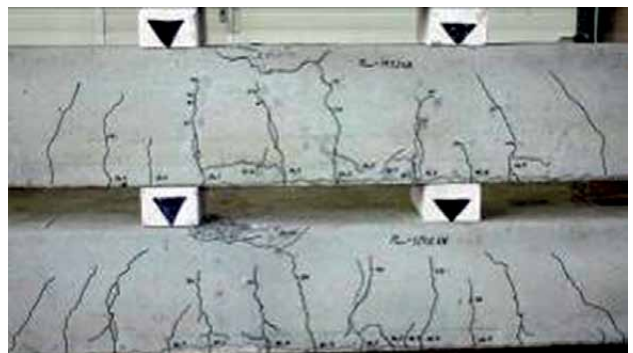
8 pav. pateiktos bandinių S-3-A, S-3-B, S-4-A ir S-4-B betono deformacijų ir veikiančios apkrovos kitimo kreivės. Grafike matoma, kad betono deformacijos didėja tiesiškai didėjant apkrovai iki tol, kol atsiveria įstrižas plyšys. Iš šio grafiko nustatoma jėga, kuriai veikiant atsiveria įstrižasis plyšys (S-3-A –  $F_{crc,exp} = 66,1$  kN, S-4-A –  $F_{crc,exp} = 78,3$  kN, S-3-B –  $F_{crc,exp} = 77,4$  kN, S-4-B –  $F_{crc,exp} = 73,1$  kN). Atsivėrus pirmiems įstrižiesiems plyšiams, betono deformacijos nebekinta tiesiškai, o taip yra dėl to, kad atsiveria nevienodo pločio, ilgio plyšiai, nevienodai greitai jie vystosi.



8 pav. Betono deformacijų kitimas (pagal T-10 daviklį), kintant veikiančiai apkrovai

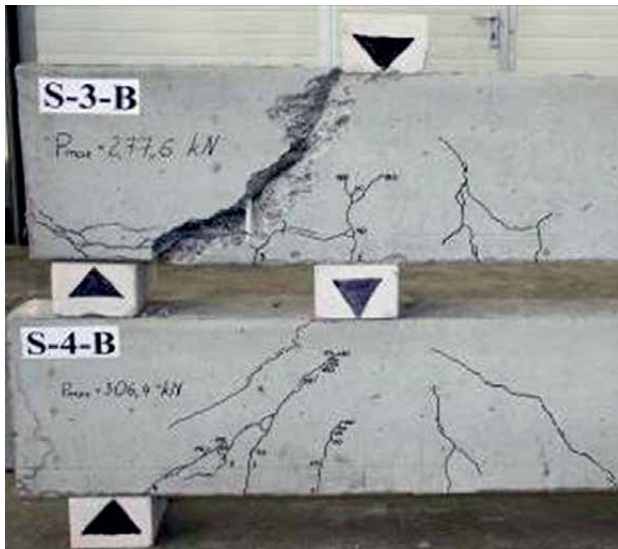
Fig. 8. The effect of load variation on concrete strain (according to gauge T-10)

9 pav. matomas sijų, armuotų neįtemptąja stiklo pluošto (GFRP) armatūra, suirimo pobūdis bei plyšių išsidėstymas. Remiantis minėtomis projektavimo normomis ir rekomendacijomis gausaus armavimo atveju elemento irtis prasideda dėl pasiektų ribinių gniuždomojo betono deformacijų.



9 pav. Sijų S-1 ir S-2 suirimo ir supleišėjimo pobūdis  
Fig. 9. A mode of failure and cracking of beams S-1 and S-2





10 pav. Bandinių S-3-B ir S-4-B suirimo ir supleišėjimo pobūdis

Fig. 10. A mode of failure and cracking of specimens S-3-B and S-4-B

Bandiniai S-3-A, S-3-B, S-4-A ir S-4-B suiro įstrižajame pjūvyje (žr. 10 pav.). Veikiant apkrovai, pirmiausiai atsivėrė statmenasis plyšys lygiagrečiai su plokštelės, kuri buvo padėta ties jėgos pridėjimo vieta, kraštu. Šie statmenieji plyšiai didėjo iki tol, kol buvo pasiekama apytiksliai 30 % bandinio laikomosios galios.

Bandinys S-3-B (10 pav.) buvo bandomas, kol atsivėrusiame plyšyje aiškiai matysis skersinės kompozitinės armatūros padėtis išilginės armatūros atžvilgiu. Atlikus bandymą buvo matyti, kad kažkuriuo momentu veikiant apkrovai stiklo pluošto armatūros strypas praslydo, jo rumbelis buvo nuglemžtas. Tai rodo, kad naudotas skersinių strypų pritvirtinimo prie išilginės armatūros būdas nėra patikimas. Skersinės armatūros praslydimas reiškia, kad strypas neužsiinkaravo pakankamai, jo tempiamasis stipris nebuvo išnaudotas.

## Išvados

1. Armatūros išankstinis įtempimas žymiai padidina sijų plyšio atsivėrimo momentą. Eksperimentinės statmenojo pjūvio laikomosios galios ir plyšių atsiradimo momento santykis yra 1,864.
2. Sijas veikiant eksploatacinei apkrovai plyšių plotis dėl išankstinio gniuždymo jėgos poveikio padidėjo 2,38 karto.
3. Atlikus eksperimentą ir palyginus tirtų sijų statmenojo pjūvio eksperimentinę laikomąją galią su apskaičiuotomis teorinėmis reikšmėmis, nustatyta, kad geriausias sutapimas yra su reikšmėmis, apskaičiuotomis pagal *fib bulletin 40* siūlytą metodą ( $M_{u,exp}/M_u = 0,93$ ).

4. Palyginus teorines ir eksperimentines įstrižojo pjūvio laikomųjų galių reikšmes, gauta, kad tiksliausi rezultatai gaunami atliekant skaičiavimus pagal STR 2.05.05:2005. Didžiausias skirtumas tarp teorinių ir eksperimentinių reikšmių – 27 %.
5. Teoriškai apskaičiuotos įstrižojo pjūvio laikomųjų galių reikšmės gautos didesnės už eksperimentines. Taip yra dėl to, kad skersinės armatūros strypai tinkamai neužsiinkaravo ir bandymo metu nebuvo pasiekta jų tempiamojo stiprio riba.
6. Skersiniai stiklo pluošto (GFRP) armatūros strypai, pririšami prie išilginės plieninės armatūros, negali būti naudojami dėl nepakankamo strypų užsiinkaravimo betone. Skersiniam armavimui reikia naudoti kompozitinių strypų apkabas, iš anksto pagamintas gamykloje.

## Literatūra

- ACI 318M-08. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary*. 2008. American Concrete Institute. 473 p.
- ACI 440.4R-04. *Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons*. 2011. American Concrete Institute: 13–16.
- Bank, L. 2006. *Composites for construction: structural design with FRP materials*. Canada.
- Borosnyoi, A. *Serviceability of CFRP prestresses concrete beams*: PhD Thesis. 2002.
- Burke, Ch.; Dolan, W. 2001. Flexural design of prestressed concrete beams using FRP tendons, *PCI Journal* 46: 76–87.
- Canadian Standards Association. 2004. *Design and Construction of Building components with Fiber Reinforced Polymers*. CAN/CSA-S806-02. Canada.
- CEB-FIP. 2007. *FRP reinforcement in RC structures*, fib Bulletin No. 40.
- Eshani, M. R.; Saadatmanesh, H.; Tao, S. 1995. Bond of hooked glass fiber reinforced plastic (GFRP) reinforcing bars to concrete, *Materials Journal* 122(3): 247–257.
- ISIS Canada Educational Module 10. 2007. *Prestressing Concrete Structures with FRP*.
- Kelpša, Š.; Augonis, M. 2012. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įstrižojo pjūvio stiprumo pagal STR ir EC2 analizė, *Engineering Structures and Technologies* 4(4): 133–144. <http://dx.doi.org/10.3846/2029882X.2012.753683>
- Kim, J. 2010. Flexural response of concrete beams prestressed with AFRP tendons: numerical investigation, *Journal of Composites for Construction*: 647–658. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000128](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000128)
- Kobraei, M.; Jumaat, M. Z.; Shafiq, P. 2011. An experimental study on shear reinforcement in RC beams using CFRP-bars, *Scientific Research and Essays* 6(16): 3447–3460. doi:10.5897/SRE11.650.
- LST EN 1992-1-1. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. 1-1 dalis. *Bendrosios ir pastatų taisyklės*. 2007. Vilnius. 232 p.

- Maruyama, T.; Honma, M.; Okamura, H. 1989. Experimental study on the diagonal tensile characteristics of various fiber reinforced plastic rods, *Transactions of the Japan Concrete Institute* 11: 193–198.
- Morphy, R.; Shehata, E.; Rizkalla, S. 1997. Bent effect on strength of CFRP stirrups, in *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, Japan: 19–26.
- Shehata, E.; Morphy, R.; Rizkalla, S. 2000. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines, *Canadian Journal of Civil Engineering* 27(5): 859–872. <http://dx.doi.org/10.1139/100-004>
- STR 2.05.05:2005. *Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. 2005. Vilnius.

#### **EXPERIMENTAL STUDY ON THE FLEXURAL AND SHEAR ANALYSIS OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH GLASS FIBER-REINFORCED (GFRP) BARS**

**E. Atutis, M. Budvytis, M. Atutis**

##### **Abstract**

The paper analyzes experimental studies examining the flexural and shear analysis of the beams reinforced with GFRP bars. A testing program consisted of two beams reinforced with longitudinal prestressed GFRP tendons, two beams reinforced with longitudinal GFRP bars and two beams reinforced with longitudinal steel reinforcement and shear reinforcement of GFRP bars. The experimental flexural and shear strength of concrete beams were compared with theoretical strength calculated according to a number of design recommendations, and the significance of prestressing for deflection and cracking was analyzed.

**Keywords:** prestressing, glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars, flexural strength, shear strength, crack width, midspan deflection, experimental studies.