

## LENKIAMŪJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ, SUSTIPRINTŲ PLUOŠTU ARMUOTU KOMPOZITU, LAIKOMOSIOS GALIOS SKAIČIAVIMAS PAGAL KRITINĮ PLYŠIO AUKŠTĮ

Justas ŠLAITAS

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva  
El. paštas [justas.slaitas@vgtu.lt](mailto:justas.slaitas@vgtu.lt)*

**Santrauka.** Šiame straipsnyje nagrinėjamas lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų pluoštu armuotu kompozitu, būklės vertinimas irimo etape. Pasiūlytas universalus gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų skirtingų rūšių pluoštu armuotu kompozitu, laikomosios galios vertinimo metodas pagal apskaičiuotą ribinį statmenojo pjūvio plyšio aukštį. Šiame darbe patvirtinama trikampės betono gniuždomosios zonos diagramos taikymo sąlygų laikomajai galiai skaičiuoti be tempiamojo betono virš plyšio vertinimo hipotezė. Nustatytas ryšys tarp plyšio aukščio ir pluoštu armuoto kompozito įtempių ir deformacijų, kuris leidžia spręsti apie likusį konstrukcijos laikomosios galios rezervą. Skaičiavimo rezultatai patvirtinti skirtingų autorių eksperimentiniais 73 gelžbetoninių sąjų, sustiprintų anglies pluošto kompozito (CFRP) ir stiklo pluošto kompozito (GFRP) lakštais, juostomis, strypais, tyrimais. Taip pat pasiūlytos stiprinimo pluoštu armuotu kompozitu taikymo ribos.

**Reikšminiai žodžiai:** gelžbetonis, pluoštu armuotas kompozitas, laikomoji galia, betono irimas, plyšio aukštis.

### Įvadas

Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų irimas statmenajame pjūvyje prasideda, kai tempiamosios armatūros įtempiai pasiekia takumo ribą. Konstrukcija visiškai suyra, kai iki galo išnaudojamas gniuždomosios zonos betono stipris. Gelžbetoninių sąjų ir plokščių irimo trukmė priklauso nuo fizinių ir mechaninių betono ir armatūros savybių. Todėl statmenojo pjūvio laikomosios galios analitinių ir eksperimentinių tyrimų dėmesys koncentruojamas į betono gniuždymo įtempių ir deformacijų priklausomybę bei gniuždymo diagramos pobūdį. Irimo mechanikos mokslas leidžia analizuoti lenkiamųjų gelžbetoninių elementų irimo pradžią pagal kritinius statmenojo pjūvio plyšių parametrus, kas yra įtempių būvio pasekmė (kai tempiamosios armatūros įtempiai pasiekė takumo ribą) (Jokūbaitis *et al.* 2013).

Šiame straipsnyje nagrinėjamas lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų pluoštu armuotu kompozitu, būklės vertinimas irimo etape. Pasiūlytas lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų skirtingų rūšių pluoštu armuotu kompozitu, statmenojo pjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodas, paremtas kietųjų kūnų irimo mechanika. Skaičiavimo rezultatai palyginti su skirtingų autorių eksperimentiniais 73 gelžbetoninių sąjų tyrimais. I. A. Sharaky ir kiti (Sharaky *et al.* 2014) nagrinėjo gelžbetonines sąjas, sustiprintas anglies pluošto kompozito

(CFRP) ir stiklo pluošto kompozito (GFRP) strypais, epoksidiniais klijais, įklijuotais į griovelius, išpjautus betono paviršiuje (NSM tvirtinimo metodas), kitame tyrime (Sharaky *et al.* 2015) bandymų programa papildyta tokiu pat metodu priklijuotomis CFRP juostomis, taip pat iširta neviso kompozitinės medžiagos priklijavimo įtaka. R. El-Hacha ir M. Gaafar (El-Hacha, Gaafar 2011) ištyrė NSM metodu pritvirtintus įtemptuosius CFRP strypus, inkaruotus metalinėmis plokštelėmis, nustatė skirtingo išankstinio įtempimo lygio įtaką sąjos darbui. J. A. O. Barros ir A. S. Fortes (Barros, Fortes 2005) nagrinėjo stiprinimo CFRP juostomis NSM metodu įtaką sąjos darbui, lyginant su nesustiprintomis sąjomis. W.-T. Jung ir kiti (Jung *et al.* 2005) nustatė skersinių griovelių, užpildytų epoksidine derva, inkaravimo metodo įtaką gelžbetoninių sąjų, sustiprintų CFRP strypais ir juostomis, pritvirtintomis NSM metodu, darbui. A. A. Shukri ir kiti (Shukri *et al.* 2015) nagrinėjo NSM metodu pritvirtintų CFRP strypų deformacijas. M. Rezazadeh ir kiti (Rezazadeh *et al.* 2014) pristatė naują NSM metodu tvirtinamų CFRP juostų įtempimo būdą, kurį galima pritaikyti praktikoje trumpoms gelžbetoninėms sąjomis stiprinti. H. Peng ir kiti (Peng *et al.* 2014) atliko įtemptųjų anglies pluošto juostų, pritvirtintų NSM metodu, ir lakštų, priklijuotų ant betono paviršiaus (EBR metodas), elgsenos tyrimą. S.-K. Woo ir kiti (Woo *et al.* 2008) ištyrė

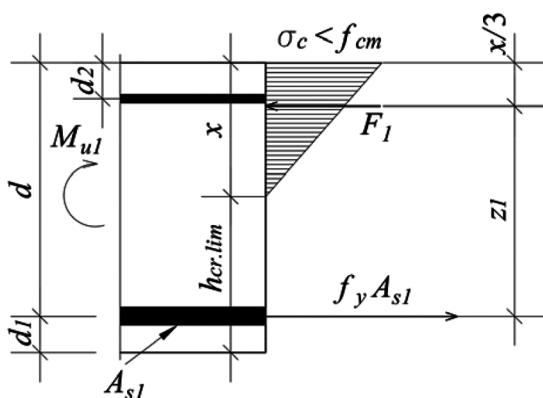
daug gelžbetoninių sijų, sustiprintų įtemptaisiais CFRP lakštais, pritvirtintais EBR metodu, tyrimams panaudojo sijas, kurių plotis didesnis už aukštį.

Šio tyrimo pagrindinis dėmesys skiriamas statmenojų pjūvio ribinio plyšio aukščio ir pluoštu armuoto kompozito įtempimų ir deformacijų būviui nustatyti. Remiantis tyrimo rezultatais, pasiūlytos rekomenduojamos stiprinimo pluoštu armuotu kompozitu ribos.

### Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų pluoštu armuotu kompozitu, laikomosios galios skaičiavimas statmenajame pjūvyje

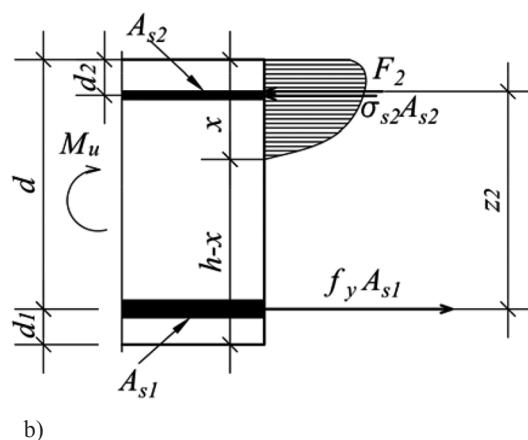
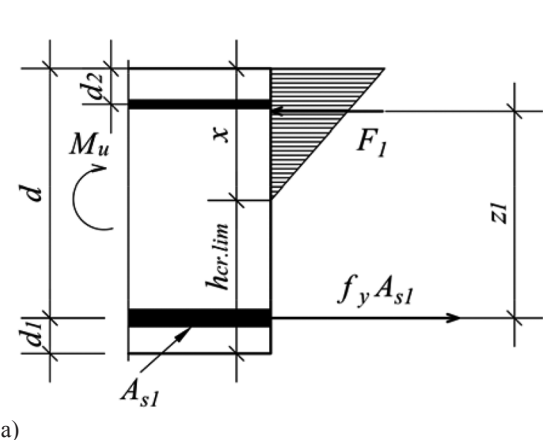
#### Gelžbetoninių elementų laikomoji galia

Laikomoji galia skaičiuojama, kai tempiamosios armatūros įtempiai artimi takumo ribai, taikant trikampę gniuždomosios zonos diagramą. Skaičiuojant nevertinamas



1 pav. Sijos įtempimų būvis, kai tempiamosios armatūros įtempiai priartėja prie takumo ribos

Fig. 1. Estimated state of stress when tensile reinforcement reaches yield strength



2 pav. Vidinės jėgos: a) naudojant trikampę betono gniuždomosios zonos diagramą; b) naudojant kreivinę gniuždomosios zonos diagramą

Fig. 2. Internal forces: a) using triangular concrete's compressive zone stress diagram; b) using curved concrete's compressive zone stress diagram

tempiamojo betono virš plyšio darbas, tai kompensuojama betono plastinėmis deformacijomis ir gniuždomosios armatūros neįvertinimu. Remiantis šiomis prielaidomis, lenkiamosios gelžbetoninės sijos laikomoji galia iš vidinių ir išorinių jėgų pusiausvyros sąlygos yra (1 pav.) (Jokūbaitis *et al.* 2013):

$$M_u \cong \frac{f_y A_{s1} (h_{cr.lim} + 2h - 3d_1)}{3} \quad (1)$$

Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų laikomosios galios skaičiavimo rezultatai, remiantis EC2 (Eurocode 2), ACI (ACI 318-14), H. Rüşch (Rüşch 1960), I. Židonio (Židonis 2007a, 2007b, 2010), V. Jokūbaitis (Jokūbaitis, Juknevičius 2013; Jokūbaitis *et al.* 2013) metodikomis, yra panašūs. Tai reiškia, kad vidinių jėgų peties ir gniuždomojo betono atstojamųjų sandaugos, naudojant trikampę ir kreivinę betono gniuždomosios zonos diagramas, yra panašios (2 pav.) (plačiau Slaitas *et al.* 2017).

Daroma prielaida, kad galima naudoti trikampę gniuždomosios zonos diagramą, kai tempiamosios armatūros įtempiai priartėja prie takumo ribos. Taigi galime apskaičiuoti vidines jėgas ir iš pusiausvyros sąlygų turėsime:

$$F_2 = A_{s1} f_y - A_{s2} \sigma_{s2}, \quad (2)$$

$$(A_{s1} f_y - A_{s2} \sigma_{s2}) z_2 \approx A_{s1} f_y \frac{(h_{cr.lim} + 2h - 3d_1)}{3} \quad (3)$$

Iš (3) formulės išsireiškiame kritinį plyšio aukštį:

$$h_{cr.lim} \approx \frac{(A_{s1} f_y - A_{s2} \sigma_{s2}) 3z_2}{A_{s1} f_y} - 2h + 3d_1 \quad (4)$$

(4) lygtyje nustatytas ryšys tarp ribinio plyšio aukščio ir vidinių jėgų peties. Vidinių jėgų petys gali būti nustatytas bet kuriuo kreivinės ar jai ekvivalentinės stačiakampės betono gniuždomosios zonos diagramos taikymo metodu.

Jeigu elemento gniuždomoji zona nearmuota arba nevertinama gniuždomoji armatūra, tai:

$$h_{cr.lim} \approx 3z_2 - 2h + 3d_1. \quad (5)$$

Pagal (5) lygtį apskaičiuojamas kritinis plyšio aukštis taikant EC2:

$$h_{cr.lim.d} \approx 3h - 3d_1 - 3 \frac{A_{s1}f_y}{2\eta f_{cm}b} - 2h + 3d_1 = h - 3 \frac{A_{s1}f_y}{2\eta f_{cm}b}. \quad (6)$$

(6) lygties skaičiavimo rezultatus įstatę į (1) lygtį gauname lenkiamojo gelžbetoninio elemento laikomąją galią statmenajame pjūvyje.

#### Gelžbetoninių elementų, sustiprintų pluoštu armuotu kompozitu, laikomoji galia

Ta pati metodika gali būti pritaikyta lenkiamiesiems gelžbetoniniams elementams, sustiprintiems pluoštu armuotu kompozitu, tik skaičiuojant atsiranda dar vienas narys. Nagrinėjami du skirtingi stiprinimo būdai:

- išoriškai tvirtinamas pluoštu armuotas kompozitas EBR (3 pav.);
- pluoštu armuotas kompozitas tvirtinamas į griovelius NSM (4 pav.).

Šiuo atveju (6) lygtis būtų tokia:

$$h_{cr.lim.i} \approx h - 3 \frac{(A_{s1}f_y + A_f\sigma_{f,i-1})}{2\eta f_{cm}b}, \quad (7)$$

čia  $A_f$  – pluoštu armuoto kompozito skerspjūvio plotas;  $\sigma_{f,i-1}$  – įtempiai pluoštu armuotame kompozite, nustatyti  $i - 1$  iteracijos metu, pirmai iteracijai jie lygūs ribiniams įtempiams  $\sigma_{f,0} = f_f$ .

Toliau galime apskaičiuoti statmenojo pjūvio laikomąją galią pagal šią lygtį:

$$M_{calc.i} \cong \frac{f_y A_{s1} (h_{cr.lim.i} + 2h - 3d_1)}{3} + \frac{\sigma_{f,i} A_f (4h + 2h_{cr.lim.i} + 3t_f)}{6}. \quad (8)$$

Kitas stiprinimo metodas, kai pluoštu armuotas kompozitas tvirtinamas į griovelius (NSM) (4 pav.).

Tada (8) lygtis būtų tokia:

$$M_{calc.i} \cong \frac{f_y A_{s1} (h_{cr.lim} + 2h - 3d_1)}{3} + \frac{\sigma_{f,i} A_f (4h + 2h_{cr.lim} - 3d_g)}{6}. \quad (9)$$

Įtempiai pluoštu armuotame kompozite kiekvienos iteracijos metu gali būti nustatyti pagal Huko dėsnį:

$$\sigma_{f,i} = E_f \cdot \varepsilon_{f,i}. \quad (10)$$

Bet  $\sigma_{f,i} \leq f_p$ , čia  $E_f$  – pluoštu armuoto kompozito tamprumo modulis;  $\varepsilon_{f,i}$  – pluoštu armuoto kompozito deformacija, nustatyta  $i$ -tosios iteracijos metu.

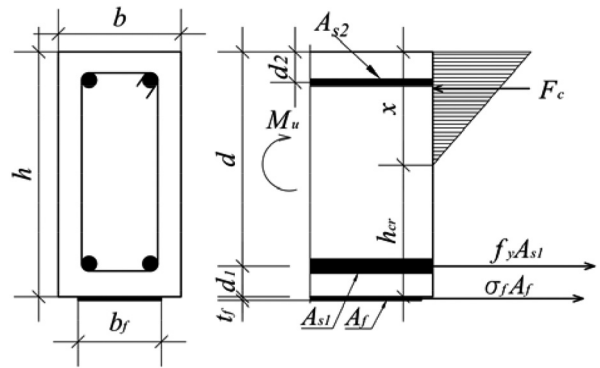
Jeigu pagal (10) lygtį gauname  $\sigma_{f,i} < f_p$ , tai reiškia, kad konstrukcijos irimo rezultatas turėtų būti gniuždomojo betono suirimas, ir jeigu  $\sigma_{f,i} \geq f_p$ , tai konstrukcijos irimo rezultatas turėtų būti pluoštu armuoto kompozito suirimas.

Pluoštu armuoto kompozito  $i$ -tosios iteracijos deformacijos gali būti nustatytos iš ribinio deformacijų būvio elemente, irimo etape (5 pav.):

$$\varepsilon_{f,i} = \varepsilon_{fe,i} + \varepsilon_p, \quad (11)$$

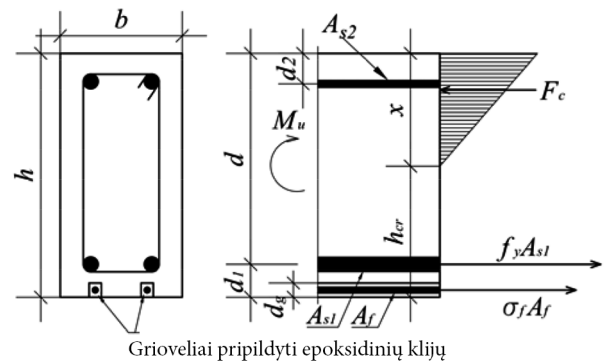
čia  $\varepsilon_{fe,i}$  – pluoštu sustiprinto kompozito  $i$ -tosios iteracijos deformacija, sukelta išorinių jėgų;  $\varepsilon_p$  – pluoštu sustiprinto kompozito deformacija, sukelta išankstinio įtempimo jėgos.

Ribinė betono deformacija  $\varepsilon_{cu}$  pagal EC2 imama 3,5 ‰ betonui, kurio stipris  $f_{ck} < 50$  MPa ir  $\varepsilon_{cu} = 2,8 + 27 \left( \frac{98 - f_{cm}}{100} \right)^4$ , kai  $f_{ck} \geq 50$  MPa.



3 pav. Sijos, sustiprintos išoriškai tvirtinamu pluoštu armuotu kompozitu, įtempių būvis

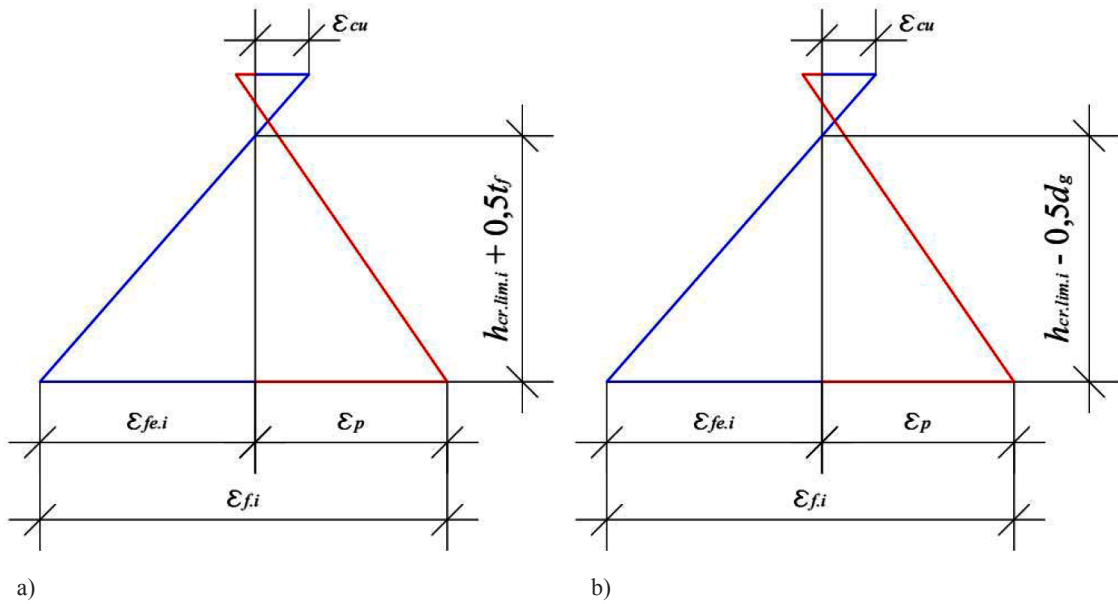
Fig. 3. Estimated state of stress when tensile reinforcement reaches yield strength for RC beam strengthened with externally bonded FRP



Grioveliai pripildyti epoksidinių kliju

4 pav. Sijos, sustiprintos į griovelius tvirtinamu pluoštu armuotu kompozitu, įtempių būvis

Fig. 4. Estimated state of stress for RC beam strengthened with near surface mounted FRP



5 pav. Deformacijų būvis irimo etape: a) kai pluoštu armuotas kompozitas tvirtinamas ant betono paviršiaus (EBR); b) kai pluoštu armuotas kompozitas grioveliuose (NSM)

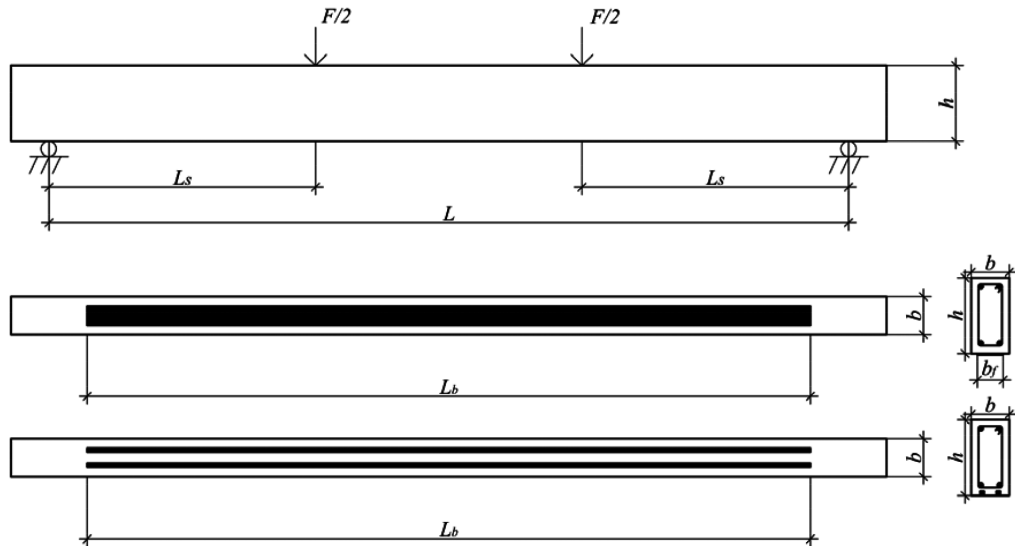
Fig. 5. State of strain at fracture stage: a) FRP is on the surface of concrete (EBR); b) FRP is in the grooves (NSM)

### Eksperimentinių ir skaičiuotinių duomenų analizė

Teorijai patvirtinti eksperimentiškai iš skirtingų tyrimų buvo atrinktos skirtingos gelžbetoninės sijos, sustiprintos anglies pluoštu armuoto kompozito (CFRP) ir stiklo pluoštu armuoto kompozito (GFRP) lakštais, juostomis ir strypais.

Visos sijos buvo apkrautos dviem koncentruotomis apkrovomis (6 pav.).

1 lentelėje pateikti pagrindiniai sijų duomenys, 2 lentelėje pateikti sijų stiprinimo duomenys, 3 lentelėje pateikti pagrindiniai rezultatai.



6 pav. Principinė sijos apkrovimo schema (a); pluoštu armuoto kompozito tvirtinimo schema (EBR metodas) (b); pluoštu armuoto kompozito tvirtinimo schema (NSM metodas) (c)

Fig. 6. Principle scheme of beam loading (a); principle scheme of FRP mounting (EBR) (b); principle scheme of FRP mounting (NSM) (c)

1 lentelė. Pagrindiniai sijų duomenys

Table 1. Base parameters of the tested beams

Sijos Nr.	Literatūros šaltinis	Sijos ID	$b$ , m	$h$ , m	$L_s$ , m	$L$ , m	$f_{cm}$ , MPa	$\rho_{sl}$ , %	$\sigma_y$ , MPa	$E_{sl}$ , GPa
1	Peng <i>et al.</i> 2014	US	0,15	0,35	1,20	3,30	37,60	0,85	400	200
2	Peng <i>et al.</i> 2014	RS-2N20	0,15	0,35	1,20	3,30	32,10	0,85	400	200
3	Peng <i>et al.</i> 2014	PRS-EB	0,15	0,35	1,20	3,30	26,60	0,85	400	200
4	Peng <i>et al.</i> 2014	PRS-2N20	0,15	0,35	1,20	3,30	30,40	0,85	400	200
5	Peng <i>et al.</i> 2014	PRS-1N45	0,15	0,35	1,20	3,30	35,50	0,85	400	200
6	Peng <i>et al.</i> 2014	PRS2N20-BL330	0,15	0,35	1,20	3,30	60,80	0,85	400	200
7	Peng <i>et al.</i> 2014	PRS-2N20-AN	0,15	0,35	1,20	3,30	59,50	0,85	400	200
8	Jung <i>et al.</i> 2005	Control	0,20	0,30	1,05	3,00	31,30	0,40	426	200
9	Jung <i>et al.</i> 2005	SH-BOND	0,20	0,30	1,05	3,00	31,30	0,40	426	200
10	Jung <i>et al.</i> 2005	CPL-50-BOND	0,20	0,30	1,05	3,00	31,30	0,40	426	200
11	Jung <i>et al.</i> 2005	CRD-NSM	0,20	0,30	1,05	3,00	31,30	0,40	426	200
12	Jung <i>et al.</i> 2005	NSM-PL-25	0,20	0,30	1,05	3,00	31,30	0,40	426	200
13	Jung <i>et al.</i> 2005	NSM-PL-15	0,20	0,30	1,05	3,00	31,30	0,40	426	200
14	Jung <i>et al.</i> 2005	ROD-MI-20	0,20	0,30	1,05	3,00	31,30	0,40	426	200
15	Jung <i>et al.</i> 2005	PL-MI-20	0,20	0,30	1,05	3,00	31,30	0,40	426	200
16	Shukri <i>et al.</i> 2015	CB	0,13	0,25	0,75	2,00	35,63	0,83	520	200
17	Shukri <i>et al.</i> 2015	A1	0,13	0,25	0,75	2,00	35,63	0,83	520	200
18	Shukri <i>et al.</i> 2015	A2	0,13	0,25	0,75	2,00	35,63	0,83	520	200
19	El-Hacha, Gaafar 2011	B00	0,20	0,40	2,08	5,00	45,50	0,77	475	200
20	El-Hacha, Gaafar 2011	B2-0%	0,20	0,40	2,08	5,00	36,40	0,77	475	200
21	El-Hacha, Gaafar 2011	B2-20%	0,20	0,40	2,08	5,00	40,70	0,77	475	200
22	El-Hacha, Gaafar 2011	B2-40%	0,20	0,40	2,08	5,00	40,00	0,77	475	200
23	El-Hacha, Gaafar 2011	B2-60%	0,20	0,40	2,08	5,00	36,00	0,77	475	200
24	Barros, Fortes 2005	V2R2	0,10	0,18	0,50	1,50	46,10	0,54	730	200
25	Barros, Fortes 2005	V3R2	0,10	0,18	0,50	1,50	46,10	0,69	730	200
26	Barros, Fortes 2005	V4R3	0,10	0,18	0,50	1,50	46,10	0,94	730	200

Sijos Nr.	Literatūros šaltinis	Sijos ID	$b$ , m	$h$ , m	$L_s$ , m	$L$ , m	$f_{cm}$ , MPa	$\rho_{s1}$ , %	$\sigma_y$ , MPa	$E_{s1}$ , GPa
27	Rezazadeh <i>et al.</i> 2014	Control	0,15	0,30	0,90	2,20	32,20	0,39	585	208
28	Rezazadeh <i>et al.</i> 2014	Non prestressed	0,15	0,30	0,90	2,20	32,20	0,39	585	208
29	Rezazadeh <i>et al.</i> 2014	20 % prestressed	0,15	0,30	0,90	2,20	32,20	0,39	585	208
30	Rezazadeh <i>et al.</i> 2014	30 % prestressed	0,15	0,30	0,90	2,20	32,20	0,39	585	208
31	Rezazadeh <i>et al.</i> 2014	40 % prestressed	0,15	0,30	0,90	2,20	32,20	0,39	585	208
32	Sharaky <i>et al.</i> 2014	CB	0,16	0,28	0,80	2,40	32,40	0,58	545	205
33	Sharaky <i>et al.</i> 2014	LB1C1	0,16	0,28	0,80	2,40	32,40	0,58	545	205
34	Sharaky <i>et al.</i> 2014	LB1G1	0,16	0,28	0,80	2,40	32,40	0,58	545	205
35	Sharaky <i>et al.</i> 2014	LB2C1	0,16	0,28	0,80	2,40	32,40	0,58	545	205
36	Sharaky <i>et al.</i> 2014	LB2G1	0,16	0,28	0,80	2,40	32,40	0,58	545	205
37	Sharaky <i>et al.</i> 2014	LA2C1	0,16	0,28	0,80	2,40	32,40	0,58	545	205
38	Sharaky <i>et al.</i> 2014	LA2G1	0,16	0,28	0,80	2,40	32,40	0,58	545	205
39	Sharaky <i>et al.</i> 2014	LB1G2	0,16	0,28	0,80	2,40	32,40	0,58	545	205
40	Sharaky <i>et al.</i> 2015	CB	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
41	Sharaky <i>et al.</i> 2015	S2C1	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
42	Sharaky <i>et al.</i> 2015	M2C1	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
43	Sharaky <i>et al.</i> 2015	M2C1ES	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
44	Sharaky <i>et al.</i> 2015	F2C1	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
45	Sharaky <i>et al.</i> 2015	M2S1	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
46	Sharaky <i>et al.</i> 2015	F2S1	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
47	Sharaky <i>et al.</i> 2015	S2G1	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
48	Sharaky <i>et al.</i> 2015	M2G1	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
49	Sharaky <i>et al.</i> 2015	F2G1	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
50	Sharaky <i>et al.</i> 2015	M1G2	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
51	Sharaky <i>et al.</i> 2015	M1G2T	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
52	Sharaky <i>et al.</i> 2015	F1G2	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200
53	Sharaky <i>et al.</i> 2015	F1G2T	0,16	0,28	0,80	2,40	30,50	0,58	540	200

Sijos Nr.	Literatūros šaltinis	Sijos ID	$b$ , m	$h$ , m	$L_s$ , m	$L$ , m	$f_{cm}$ , MPa	$\rho_{s1}$ , %	$\sigma_y$ , MPa	$E_{s1}$ , GPa
54	Woo <i>et al.</i> 2008	MU-III	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	0,82	476,2	200
55	Woo <i>et al.</i> 2008	M0-III	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	0,82	476,2	200
56	Woo <i>et al.</i> 2008	M4-III	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	0,82	476,2	200
57	Woo <i>et al.</i> 2008	M6-III	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	0,82	476,2	200
58	Woo <i>et al.</i> 2008	M8-III	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	0,82	476,2	200
59	Woo <i>et al.</i> 2008	M4-I	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	0,29	500,7	200
60	Woo <i>et al.</i> 2008	M6-I	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	0,29	500,7	200
61	Woo <i>et al.</i> 2008	M8-I	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	0,29	500,7	200
62	Woo <i>et al.</i> 2008	M6-II	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	0,52	498,7	200
63	Woo <i>et al.</i> 2008	M8-II	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	0,52	498,7	200
64	Woo <i>et al.</i> 2008	M6-IV	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	1,19	465,8	200
65	Woo <i>et al.</i> 2008	M8-IV	0,40	0,22	1,20	3,00	26,40	1,19	465,8	200
66	Woo <i>et al.</i> 2008	L6-III	0,40	0,22	1,20	3,00	20,60	0,82	476,2	200
67	Woo <i>et al.</i> 2008	L8-III	0,40	0,22	1,20	3,00	20,60	0,82	476,2	200
68	Woo <i>et al.</i> 2008	H6-III	0,40	0,22	1,20	3,00	35,60	0,82	476,2	200
69	Woo <i>et al.</i> 2008	H8-III	0,40	0,22	1,20	3,00	35,60	0,82	476,2	200
70	Woo <i>et al.</i> 2008	U7-I	0,40	0,22	1,20	3,00	44,10	0,29	500,7	200
71	Woo <i>et al.</i> 2008	U7-II	0,40	0,22	1,20	3,00	44,10	0,52	498,7	200
72	Woo <i>et al.</i> 2008	U7-III	0,40	0,22	1,20	3,00	44,10	0,82	476,2	200
73	Woo <i>et al.</i> 2008	U7-IV	0,40	0,22	1,20	3,00	44,10	1,19	465,8	200

2 lentelė. Stiprinimo parametrai

Table 2. Strengthening parameters

Sijos Nr.	FRP rūšys	$A_p$ , mm <sup>2</sup>	$f_p$ , MPa	$E_p$ , GPa	$\sigma_p$ , MPa	Stiprinimo būdas	Inkaravimas
1	–	0	0,00	0,00	0,00	–	–
2	2 CFRP juostos	64	2068,00	131,00	0,00	NSM	Ne
3	CFRP lakštas	60	3100,00	165,00	1000,00	EBR	Ne
4	2 CFRP juostos	64	2068,00	131,00	1000,00	NSM	Ne
5	CFRP juosta	72	2068,00	131,00	1000,00	NSM	Ne
6	2 CFRP juostos	64	2068,00	131,00	1000,00	NSM	Ne
7	2 CFRP juostos	64	2068,00	131,00	1000,00	NSM	Taip



Sijos Nr.	FRP rūšys	$A_f$ , mm <sup>2</sup>	$f_f$ , MPa	$E_f$ , GPa	$\sigma_f$ , MPa	Stiprinimo būdas	Inkaravimas
8	–	0	0,00	0,00	0,00	–	–
9	CFRP lakštas	30	3479,00	230,30	0,00	EBR	Ne
10	CFRP lakštas	70	2452,59	165,49	0,00	EBR	Ne
11	CFRP strypas	60	1878,00	121,42	0,00	NSM	Ne
12	CFRP juosta	40	2452,59	165,49	0,00	NSM	Ne
13	CFRP juosta	20	2452,59	165,49	0,00	NSM	Ne
14	CFRP strypas	60	1878,00	121,42	0,00	NSM	Taip
15	CFRP juosta	40	2452,59	165,49	0,00	NSM	Taip
16	–	0	0,00	0,00	0,00	–	–
17	CFRP strypas	110	2400,00	165,00	0,00	NSM	Ne
18	CFRP strypas	110	2400,00	165,00	0,00	NSM	Ne
19	–	0	0,00	0,00	0,00	–	–
20	CFRP strypas	70	2167,00	130,00	0,00	NSM	Taip
21	CFRP strypas	70	2167,00	130,00	413,60	NSM	Taip
22	CFRP strypas	70	2167,00	130,00	827,20	NSM	Taip
23	CFRP strypas	70	2167,00	130,00	1240,88	NSM	Taip
24	2 CFRP juostos	30	2739,50	158,80	0,00	NSM	Ne
25	2 CFRP juostos	30	2739,50	158,80	0,00	NSM	Ne
26	3 CFRP juostos	40	2739,50	158,80	0,00	NSM	Ne
27	–	0	0,00	0,00	0,00	–	–
28	CFRP juosta	30	1922,00	164,00	0,00	NSM	Ne
29	CFRP juosta	30	1922,00	164,00	429,02	NSM	Ne
30	CFRP juosta	30	1922,00	164,00	666,17	NSM	Ne
31	CFRP juosta	30	1922,00	164,00	823,28	NSM	Ne
32	–	0	0,00	0,00	0,00	–	–
33	CFRP strypas	50	2350,00	170,00	0,00	NSM	Ne
34	GFRP strypas	50	1350,00	64,00	0,00	NSM	Ne
35	2 CFRP strypai	100	2350,00	170,00	0,00	NSM	Ne
36	2 GFRP strypai	100	1350,00	64,00	0,00	NSM	Ne
37	2 CFRP strypai	100	2350,00	170,00	0,00	NSM	Ne
38	2 GFRP strypai	100	1350,00	64,00	0,00	NSM	Ne
39	GFRP strypas	110	1350,00	64,00	0,00	NSM	Ne
40	–	0	0,00	0,00	0,00	–	–
41	2 CFRP strypai	100	2350,00	170,00	0,00	NSM	Ne
42	2 CFRP strypai	100	2350,00	170,00	0,00	NSM	Ne
43	2 CFRP strypai	100	2350,00	170,00	0,00	NSM	Taip
44	2 CFRP strypai	100	2350,00	170,00	0,00	NSM	Ne
45	2 CFRP juostos	60	2500,00	165,00	0,00	NSM	Ne
46	2 CFRP juostos	60	2500,00	165,00	0,00	NSM	Ne
47	2 GFRP strypai	100	1350,00	64,00	0,00	NSM	Ne
48	2 GFRP strypai	100	1350,00	64,00	0,00	NSM	Ne
49	2 GFRP strypai	100	1350,00	64,00	0,00	NSM	Ne
50	GFRP strypas	110	1350,00	64,00	0,00	NSM	Ne
51	GFRP strypas	110	1350,00	64,00	0,00	NSM	Taip
52	GFRP strypas	110	1350,00	64,00	0,00	NSM	Ne
53	GFRP strypas	110	1350,00	64,00	0,00	NSM	Taip
54	–	0	0,00	0,00	0,00	–	–
55	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	0,00	EBR	Ne



Sijos Nr.	FRP rūšys	$A_p$ , mm <sup>2</sup>	$f_p$ , MPa	$E_p$ , GPa	$\sigma_p$ , MPa	Stiprinimo būdas	Inkaravimas
56	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	658,57	EBR	Taip
57	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1012,86	EBR	Taip
58	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1314,29	EBR	Taip
59	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	832,86	EBR	Taip
60	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	992,86	EBR	Taip
61	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1205,71	EBR	Taip
62	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1014,29	EBR	Taip
63	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1322,86	EBR	Taip
64	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1057,14	EBR	Taip
65	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1191,43	EBR	Taip
66	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	970,00	EBR	Taip
67	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1267,14	EBR	Taip
68	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	945,71	EBR	Taip
69	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1292,86	EBR	Taip
70	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1067,14	EBR	Taip
71	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1145,71	EBR	Taip
72	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1158,57	EBR	Taip
73	CFRP lakštas	70	2850,00	165,00	1265,71	EBR	Taip

Čia:  $A_p$  – FRP plotas;  $f_p$  – FRP ribiniai įtempiai;  $E_p$  – FRP tamprumo modulis;  $\sigma_p$  – iš ankstinio įtempimo įtempiai.

3 lentelė. Pagrindiniai rezultatai

Table 3. Main results

Sijos Nr.	$M_{y,exp}$ , kNm	$M_{u,exp}$ , kNm	$M_{calc}$ , kNm	$M_{u,exp}/M_{y,exp}$	$M_{u,exp}/M_{calc}$	$h_{cr,lim,calc}/h$	$A_f/A_{bond,eff}$ , %	$A_j E_j / A_{sl} E_{sl}$	$A_j f_j / A_{sl} f_y$	$L_{bond}/L$	Irimo rezultatas
1	37,20	49,20	48,67	1,32	1,01	0,88	–	–	–	–	a
2	54,12	75,72	76,64	1,40	0,99	0,77	0,09	0,10	0,82	0,88	b
3	75,42	87,84	87,25	1,16	1,01	0,68	0,12	0,12	1,16	0,88	b
4	75,78	85,02	86,54	1,12	0,98	0,72	0,09	0,10	0,82	0,88	b
5	58,20	58,20	92,58	1,00	0,63	0,75	0,21	0,12	0,93	0,88	b
6	70,80	109,20	91,25	1,54	1,20	0,86	0,09	0,10	0,82	1,00	c
7	73,20	106,80	91,15	1,46	1,17	0,86	0,09	0,10	0,82	0,88	c
8	24,51	29,50	23,49	1,20	1,26	0,93	–	–	–	–	a
9	31,93	43,25	49,05	1,35	0,88	0,85	0,02	0,14	1,01	0,90	b
10	32,05	38,45	67,35	1,20	0,57	0,80	0,14	0,27	1,88	0,90	b
11	32,85	48,63	54,95	1,48	0,88	0,83	0,23	0,18	1,31	0,90	b
12	32,54	45,24	46,33	1,39	0,98	0,86	0,07	0,14	0,94	0,90	b
13	30,17	41,21	37,60	1,37	1,10	0,89	0,07	0,08	0,56	0,90	c
14	34,18	55,76	54,95	1,63	1,01	0,83	0,23	0,18	1,31	0,90	c
15	32,46	51,83	46,33	1,60	1,12	0,86	0,07	0,14	0,94	0,90	c
16	22,88	24,15	24,19	1,06	1,00	0,84	–	–	–	–	a
17	41,48	49,05	47,75	1,18	1,03	0,67	0,30	0,41	2,31	0,90	b
18	39,19	49,95	47,75	1,27	1,05	0,67	0,30	0,41	2,31	0,95	b
19	81,86	86,94	82,85	1,06	1,05	0,90	–	–	–	–	a
20	93,58	141,52	123,45	1,51	1,15	0,81	0,23	0,08	0,56	0,88	c
21	109,66	146,29	131,59	1,33	1,11	0,82	0,23	0,08	0,56	0,87	c
22	118,79	147,01	131,43	1,24	1,12	0,82	0,23	0,08	0,56	0,87	c
23	122,11	139,75	130,35	1,14	1,07	0,80	0,23	0,08	0,56	0,87	c
24	13,07	19,63	17,52	1,50	1,12	0,79	0,07	0,26	1,24	0,93	b
25	13,63	20,48	18,51	1,50	1,11	0,77	0,07	0,21	0,98	0,93	b
26	17,28	23,73	23,95	1,37	0,99	0,71	0,07	0,22	1,04	0,93	b
27	22,37	27,66	23,47	1,24	1,18	0,90	–	–	–	–	a

Sijos Nr.	$M_{y,exp}$ kNm	$M_{u,exp}$ kNm	$M_{calc}$ kNm	$M_{u,exp}/M_{y,exp}$	$M_{u,exp}/M_{calc}$	$h_{cr,lim,calc}/h$	$A_f/A_{bond,eff}$ %	$A_j \cdot E_f / A_{sl} \cdot E_{sl}$	$A_{jf}/A_{sl} \cdot f_y$	$L_{bond}/L$	Irimo rezultatas
28	27,14	41,84	37,64	1,54	1,11	0,85	0,07	0,14	0,59	0,95	c
29	30,91	42,30	37,64	1,37	1,12	0,85	0,07	0,14	0,59	0,95	c
30	32,63	42,82	37,64	1,31	1,14	0,85	0,07	0,14	0,59	0,95	c
31	33,37	39,35	37,64	1,18	1,05	0,85	0,07	0,14	0,59	0,95	c
32	25,80	28,16	28,60	1,09	0,98	0,87	–	–	–	–	a
33	32,04	43,64	51,87	1,36	0,84	0,77	0,20	0,18	0,96	0,83	b
34	40,20	46,88	40,74	1,17	1,15	0,82	0,20	0,07	0,55	0,83	b
35	37,92	45,80	62,51	1,21	0,73	0,72	0,20	0,37	1,92	0,83	b
36	29,48	39,68	48,09	1,35	0,83	0,79	0,20	0,14	1,10	0,83	b, c
37	32,92	44,88	62,51	1,36	0,72	0,72	0,20	0,37	1,92	0,83	b
38	32,68	44,24	48,09	1,35	0,92	0,79	0,20	0,14	1,10	0,83	b
39	33,48	42,32	49,00	1,26	0,86	0,78	0,30	0,16	1,24	0,83	b
40	25,80	28,16	28,26	1,09	1,00	0,87	–	–	–	–	a
41	34,20	34,20	60,43	1,00	0,57	0,71	0,52	0,38	1,93	0,32	b
42	34,12	39,04	60,43	1,14	0,65	0,71	0,42	0,38	1,93	0,40	b
43	37,44	48,72	60,43	1,30	0,81	0,71	0,42	0,38	1,93	0,40	b
44	40,20	46,88	60,43	1,17	0,78	0,71	0,20	0,38	1,93	0,83	b
45	33,36	37,72	50,68	1,13	0,74	0,76	0,18	0,20	1,15	0,32	b
46	34,96	44,68	50,68	1,28	0,88	0,76	0,07	0,20	1,15	0,83	b
47	29,72	33,80	46,75	1,14	0,72	0,78	0,52	0,14	1,11	0,32	b
48	29,40	40,00	46,75	1,36	0,86	0,78	0,42	0,14	1,11	0,40	b
49	32,92	44,88	46,75	1,36	0,96	0,78	0,20	0,14	1,11	0,83	b
50	30,52	39,36	47,62	1,29	0,83	0,78	0,63	0,16	1,25	0,40	b
51	30,88	46,92	47,62	1,52	0,99	0,78	0,63	0,16	1,25	0,40	b
52	33,48	42,32	47,62	1,26	0,89	0,78	0,30	0,16	1,25	0,83	b
53	34,56	54,00	47,62	1,56	1,13	0,78	0,30	0,16	1,25	0,83	a
54	36,00	44,46	47,81	1,24	0,93	0,82	–	–	–	–	a
55	44,58	53,76	69,76	1,21	0,77	0,74	0,12	0,10	0,70	0,80	b
56	55,32	67,62	75,90	1,22	0,89	0,72	0,12	0,10	0,70	0,80	c
57	58,92	71,04	79,25	1,21	0,90	0,71	0,12	0,10	0,70	0,80	c
58	67,44	75,06	82,14	1,11	0,91	0,70	0,12	0,10	0,70	0,80	c
59	43,20	49,02	59,42	1,13	0,83	0,80	0,12	0,27	1,86	0,80	c
60	44,46	52,38	59,42	1,18	0,88	0,80	0,12	0,27	1,86	0,80	c
61	48,06	54,36	59,42	1,13	0,91	0,80	0,12	0,27	1,86	0,80	c
62	57,36	65,52	70,69	1,14	0,93	0,75	0,12	0,15	1,05	0,80	c
63	62,58	69,78	71,66	1,12	0,97	0,75	0,12	0,15	1,05	0,80	c
64	82,68	87,60	90,67	1,06	0,97	0,65	0,12	0,07	0,50	0,80	c
65	82,26	91,14	91,98	1,11	0,99	0,64	0,12	0,07	0,50	0,80	c
66	58,44	67,02	72,05	1,15	0,93	0,65	0,12	0,10	0,70	0,80	c
67	66,06	73,14	74,83	1,11	0,98	0,63	0,12	0,10	0,70	0,80	c
68	63,00	75,72	87,45	1,20	0,87	0,77	0,12	0,10	0,70	0,80	c
69	66,48	76,08	87,45	1,14	0,87	0,77	0,12	0,10	0,70	0,80	c
70	46,26	63,18	61,20	1,37	1,03	0,88	0,12	0,27	1,86	0,80	c
71	61,32	75,24	74,53	1,23	1,01	0,85	0,12	0,15	1,05	0,80	c
72	73,14	82,98	89,03	1,13	0,93	0,81	0,12	0,10	0,70	0,80	c
73	85,38	102,30	106,05	1,20	0,96	0,77	0,12	0,07	0,50	0,80	c

Čia  $M_{y,exp}$  – bandymo metu nustatytas lenkimo momentas, kai tempiamosios armatūros įtempiami pasiekia takumo ribą (pasireiškia didelės plastinės deformacijos);  $M_{u,exp}$  – bandymo metu nustatytas ribinis lenkimo momentas, kai konstrukcija suyra;  $h_{cr,lim,calc}/h$  – apskaičiuoto ribinio plyšio aukščio ir elemento aukščio santykis;  $M_{calc}$  – apskaičiuotas ribinis lenkimo momentas pagal (8) ir (9) lygtis;  $b_{bond}$  – bendras klijuojamo paviršiaus plotis (strypo atveju perimetras);  $A_{bond,eff}$  – klijuojamo paviršiaus plotas 1 m ilgyje;  $L_{bond}$  – bendras klijuojamo paviršiaus ilgis. Irimo rezultatas: a – gniuždomas betonas suiro; b – stiprinimo medžiaga atsiklijavo; c – nutrūko pluoštu armuotas kompozitas.

Iš 3 lentelės galime palyginti apskaičiuotus lenkimo momentus pagal (8) ir (9) lygtis su nustatytais eksperimentiškai (7 pav.).

Pasiūlyto skaičiavimo metodo statistiniai parametrai:

- sisteminė paklaida: 0,95;
- atsitiktinė paklaida: 0,15;
- variacijos koeficientas:  $\pm 15,51\%$ ;
- pasikliautinumo ribos ( $P = 95\%$ ):  $0,92 \dots M_{u.exp} / M_{calc} \dots 0,98$ .

Atlikta regresinė analizė, siekiant sužinoti skaičiavimo metodo priklausomybę nuo atskirų argumentų reikšmių ir jų santykinų dydžių (8 pav.).

Kaip matome iš 8 pav., santykinų dydžių dydžių  $A_f \cdot E_f / A_{s1} \cdot E_{s1}$ ,  $A_f / A_{bond,eff}$ ,  $L_{bond} / L$ ,  $A_f \cdot f_f / A_{s1} \cdot f_y$  koreliacija su  $M_{u.exp} / M_{calc}$  artima vidutinei. Taigi žinodami, kad tarp šių dydžių yra ryšys, ir turėdami priklausomybės grafikus, nustatome ribines

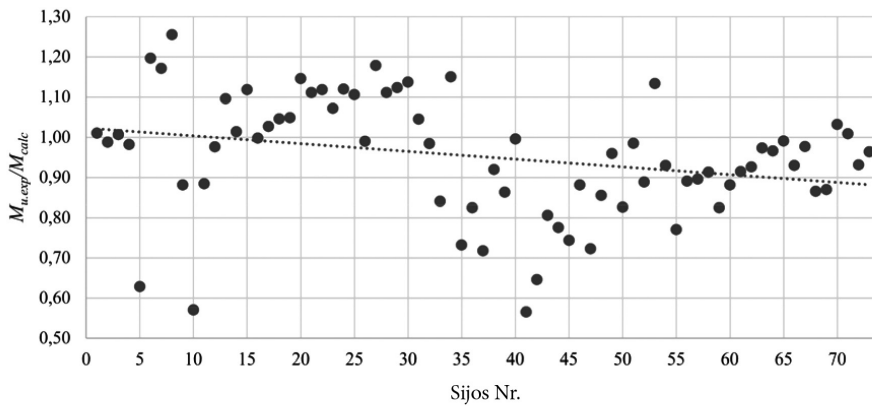
siūlomo skaičiavimo metodo taikymo (rekomenduojamas stiprinimo pluoštu armuotu kompozitu taikymo) reikšmes:

- $A_f \cdot E_f / A_{s1} \cdot E_{s1} \leq 0,35$ ;
- $A_f / A_{bond,eff} \leq 0,40\%$ ;
- $L_{bond} / L \geq 0,79$ ;
- $A_f \cdot f_f / A_{s1} \cdot f_y \leq 1,80$ .

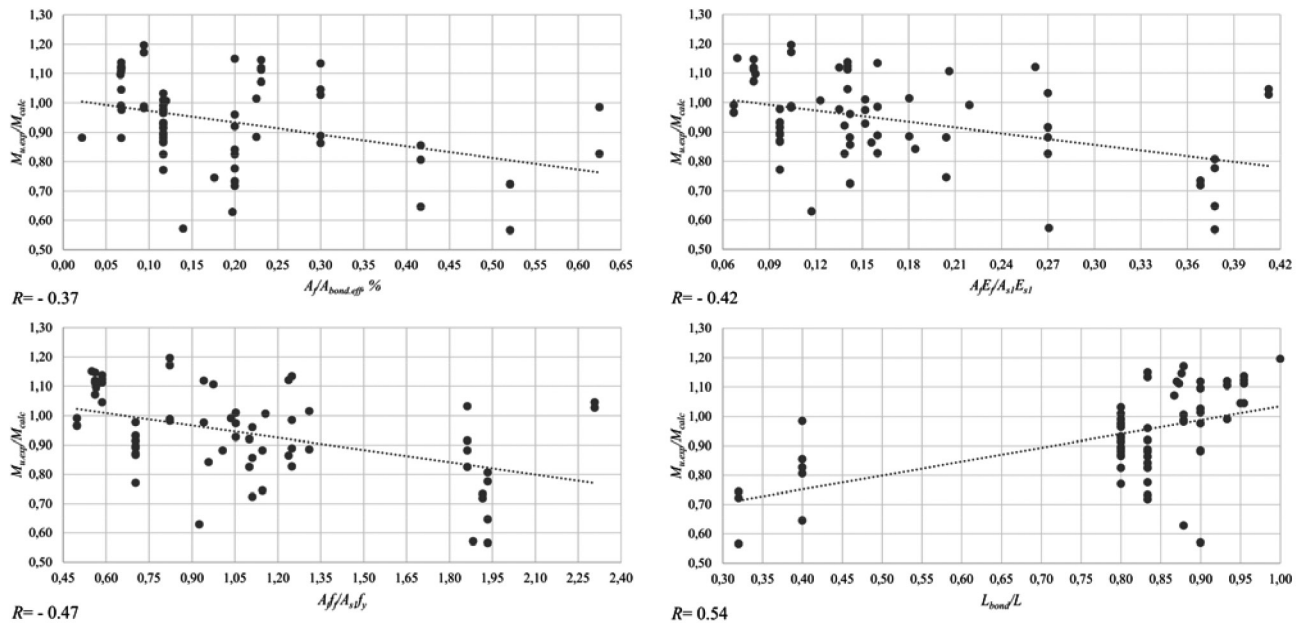
Statistiniai parametrai perskaičiuoti atmetus ribas viršijančias sijas:

- sisteminė paklaida: 0,99;
- atsitiktinė paklaida: 0,12;
- variacijos koeficientas:  $\pm 12,04\%$ ;
- pasikliautinumo ribos ( $P = 95\%$ ):  $0,96 \dots M_{u.exp} / M_{calc} \dots 1,02$ .

Kaip matome, siūlomas skaičiavimo metodas leidžia gana tiksliai nustatyti gelžbetoninių sijų, sustiprintų pluoštu armuotu kompozitu, laikomąją galią.



7 pav. Nustatytų eksperimentiškai ir apskaičiuotų pagal (8), (9) lygtis lenkimo momentų santykio pasiskirstymas  
Fig. 7. The ratio of ultimate bending moments set experimentally and calculated by Eq. (8) and (9)



8 pav. Metodo tikslumo (kintamojo) priklausomybė nuo nekintamųjų santykinų dydžių  
Fig. 8. A regression analysis of proposed calculation method accuracy

## Išvados

1. Plyšiai statmenajame lenkiamosios gelžbetoninės konstrukcijos pjūvyje yra įtempių būvio pasekmė, todėl, naudojantis plyšio parametrais, galima nustatyti lenkiamojo gelžbetoninio elemento, sustiprinto pluoštu armuotu kompozitu, esamą įtempių ir deformacijų būvį. Siūlomas laikomosios galios skaičiavimo metodas pagal apskaičiuotą ribinį plyšio aukštį leidžia gana tiksliai prognozuoti šių elementų irimą.
2. Gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies pluošto, stiklo pluošto kompozito lakštais, juostomis ir strypais, pritvirtintais išoriškai ir įgilintais į griovelius, skaičiavimo rezultatai patvirtino, kad galima taikyti trikampę betono gniuždomosios zonos diagramą, nevertinant tempiamojo betono virš plyšio, nustatyti elemento laikomąją galią ir pluoštu armuoto kompozito įtempius pagal apskaičiuotą ribinį plyšio aukštį irimo etape.
3. Remiantis koreliacija, grafiškai nustatyti skaičiavimo metodo taikymo apribojimai (rekomenduojami stiprinimo pluoštu armuotu kompozitu apribojimai). Siūlomo skaičiavimo metodo pasikliautinumo ribos  $0,96 \dots M_{u,exp} / M_{calc} \dots 1,02$  ( $P = 95\%$ ) be apribojimus neatitinkančių bandinių.

## Literatūra

- ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. 430 p.
- Barros, J. A. O.; Fortes, A. S. 2005. Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits, *Cement and Concrete Composites* 27(4): 471–480. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.004>
- El-Hacha, R.; Gaafar, M. 2011. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, near-surface-mounted CFRP bars, *PCI Journal* 56(4): 134–151. <https://doi.org/10.15554/pcij.09012011.134.151>
- Jokūbaitis, V.; Juknevičius, L. 2013. Critical depth of normal cracks in reinforced concrete beams of rectangular cross-section, *Journal of Civil Engineering and Management* 19(4): 583–590. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.812575>
- Jokūbaitis, V.; Juknevičius, L.; Šalna, R. 2013. Conditions for failure of normal section in flexural reinforced concrete beams of rectangular cross-section, in *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 16–17 May 2013, Vilnius, Lithuania. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.060>
- Jung, W.-T.; Park, Y.-H.; Park, J.-S.; Kang, J.-Y.; You, Y.-J. 2005. Experimental investigation on flexural behavior of RC Beams strengthened by NSM CFRP reinforcements, in *7th International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, 6–9 November 2005, Kansas City, Missouri, USA.
- LST EN 1992-1-1:2005. *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European standard*.
- Peng, H.; Zhang, J.; Cai, C. S.; Liu, Y. 2014. An experimental study on reinforced concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP strips, *Engineering Structures* 79: 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.08.007>
- Rezazadeh, M.; Costa, I.; Barros, J. 2014. Influence of prestress level on NSM CFRP laminates for the flexural strengthening of RC beams, *Composite Structures* 116: 489–500. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.043>
- Rüsch, H. 1960. Research towards a general flexural theory for structural concrete, *ACI Journal* 57: 1–28.
- Sharaky, I. A.; Torres, L.; Comas, J.; Barris, C. 2014. Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Composite Structures* 109: 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.051>
- Sharaky, I. A.; Torres, L.; Sallam, H. E. M. 2015. Experimental and analytical investigation into the flexural performance of RC beams with partially and fully bonded NSM FRP bars/strips, *Composite Structures* 122: 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.057>
- Shukri, A. A.; Darain, K. M.; Jumaat, M. Z. 2015. The tension-stiffening contribution of NSM CFRP to the behavior of strengthened RC beams, *Materials* 8(7): 4131–4146. <https://doi.org/10.3390/ma8074131>
- Slaitas, J.; Hlavac, Z.; Šneideris, A. 2017. Flexural reinforced concrete elements normal section bearing capacity evaluation in fracture stage, *Engineering Structures and Technologies* 9(2): 70–78. <https://doi.org/10.3846/2029882X.2017.1322919>
- Woo, S.-K.; Nam, J.-W.; Kim, J.-H. J.; Han, S.-H.; Byun, K. J. 2008. Suggestion of flexural capacity evaluation and prediction of prestressed CFRP strengthened design, *Engineering Structures* 30: 3751–3763. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.06.013>
- Židonis, I. 2007a. A simple to integrate formula of stress as a function of strain in concrete and its description procedure, *Mechanika* 4(66): 23–30.
- Židonis, I. 2007b. Method for calculation of stress-strain state parameters in normal sections of structural members, in *9th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 16–18 May 2007, Vilnius, Lithuania.
- Židonis, I. 2010. Alternative method for calculation of stress-strain state parameters in cross-sections of beam type members, in *10th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 19–21 May 2010, Vilnius, Lithuania.

**FLEXURAL REINFORCED CONCRETE ELEMENTS,  
STRENGTHENED WITH FIBRE REINFORCED  
POLYMER, BEARING CAPACITY EVALUATION  
ACCORDING TO LIMIT CRACK DEPTH**

**J. Šlaitas**

Abstract

The research was made on condition assessment of flexed reinforced concrete structures, strengthened with fibre reinforced polymers, in fracture stage. Universal bearing capacity calculation method based on limit normal section crack depth was proposed. This paper confirms the hypothesis of triangular concrete's compressive zone chart usage for flexural strength calculation, without tensile concrete above crack evaluation. There is established connection between crack depth and FRP stress-strain, which allows to decide about structures bearing capacity reserve. The calculation results are confirmed with experimental studies of 73 reinforced concrete beams, strengthened with carbon fibre reinforced polymer (CFRP) and glass fibre reinforced polymer (GFRP) sheets, plates, strips and rods, taken from different researches. Furthermore, recommended limits of strengthening with FRP were proposed.

**Keywords:** reinforced concrete, fibre reinforced polymer, flexural strength, concrete fracture, crack depth.