

## LENKIAMOSIOS GELŽBETONINĖS SIJOS SU PAPILDOMA ANGLIES PLUOŠTO KOMPOZITO ARMATŪRA LAIKOMOSIOS GALIOS SUMAŽĖJIMAS DĖL ŠLYTIES

Mykolas Daugevičius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas mykolas\_d@yahoo.com

**Anotacija.** Straipsnyje pateiktas gelžbetoninės sijos su anglies pluošto kompozito armatūra statmenojų pjūvio skaičiavimas, kai papildomai įvertinamas šlyties įrašų sukiamas kompozito pasislinkimo efektas. Šlyties įtaka nagrinėjama tempiamuose sijos sluoksniuose – tarp tempiamos armatūros ir tempiamos anglies pluošto kompozito armatūros. Taip pat aptariami įvairių projektavimo rekomendacijų metodai, rodantys kompozitinės išorinės armatūros pasislinkimą ir jo neįvertinantis. Statmenojų pjūvio skaičiavimas ir eksperimentinis bandymas parodė, kad būtina įvertinti horizontalųjį pluošto pasislinkimą, nes jo neįvertinus sijos apskaičiuota atlaikoma apkrova bus gerokai didesnė už nustatytąjį eksperimentiniais bandymais.

**Reikšminiai žodžiai:** anglies pluošto kompozito armatūra, horizontalusis kompozito poslinkis, šlyties įtempiai.

### Įvadas

Projektuojant arba stiprinant gelžbetonines konstrukcijas su papildoma anglies pluošto kompozito armatūra (1 pav.), būtina įvertinti šlyties įtaką, nes atsiranda papildomas kompozito horizontalus pasislinkimas ir sumažėja konstrukcinio elemento laikomoji galia. Dėl horizontalaus kompozito pasislinkimo jo stiprumas visiškai nepanaudojamas. Poslinkiui nustatyti atliekami tyrimai ne tik su lenkiamaisiais gelžbetoniniais elementais, bet ir su tempiamaisiais elementais (Chen 2001; Ferreir *et al.* 2001). Ilgalaikės apkrovos tyrimais nustatyta, kad šlyties įrašas ties kompozito priklijavimo pabaiga nuolat slopsta (Diab *et al.* 2009), todėl yra kuriami skaičiavimo modeliai, kurie rodo kompozito pasidavimą (Rabinovitch *et al.* 2001, 2004).

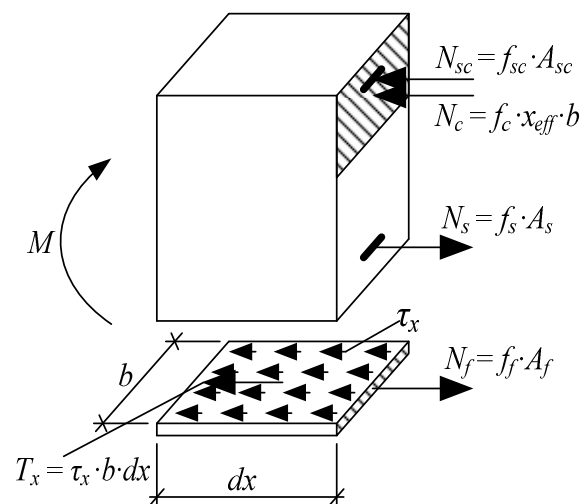


1 pav. Gelžbetoninės sijos su papildoma anglies pluošto kompozito armatūra

Fig. 1. Reinforced concrete beams with additional carbon fiber reinforced polymer (CFRP)

### Siūlomas papildomas šlyties jėgos vertinimas

Veikiant lenkimo momentui, sijos sluoksnių (anglies pluošto kompozito ir betono) horizontalioje jungtyje atsiranda šlyties įtempiai (2 pav.).

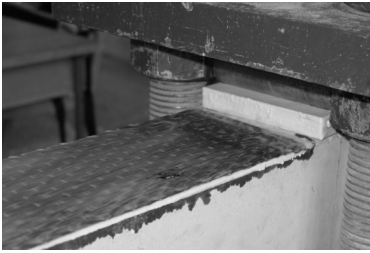


2 pav. Sijos dalijimas į elementus

Fig. 2. Separate beam elements

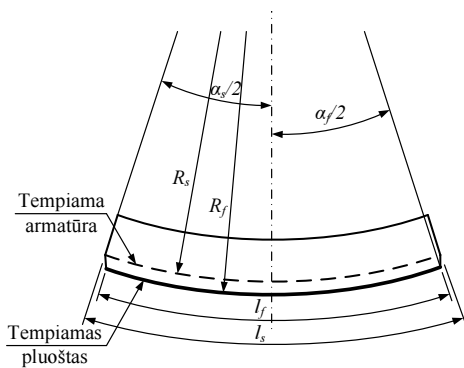
Didžiausi šlyties įtempiai veikia ties pluošto priklijavimo pabaiga (3 pav.), todėl čia atsiranda ir didžiausių horizontaliųjų pluošto kompozito poslinkių.

Imama, kad plieninės armatūros ir betono sukibimas yra idealus.



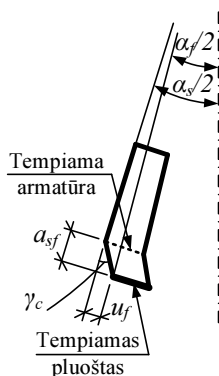
3 pav. Pluošto armatūra ties atrama  
Fig. 3. CFRP bonding near the support

Todėl, kai pasiekama ribinė plieninės armatūros tempimo deformacija, sijos lanko ilgis ties ta zona lygus  $l_s$  (4 pav.) ir atitinkamai  $\alpha_s$ ,  $R_s$ .



4 pav. Išlenkta sija  
Fig. 4. Beam flexure

Tempiamame armatūros ir pluošto kompozito ruože dėl šlyties įrašų betonai pašlyja ir taip atsiranda papildomas kompozito sluoksnio poslinkis sijos išilgine kryptimi. Šis poslinkis didžiausias ties priklijavimo pradžia (5 pav.).



5 pav. Išskiriamas sijos fragmentas ties pluošto priklijavimo pradžia  
Fig. 5. Beam fragment near the CFRP bonding beginning

Kai pasiekama ribinė plieninės armatūros tempimo deformacija, lanko pasisukimo kampas:

$$\alpha_{su} = \frac{\varepsilon_{su} \times l_s + l_s}{R_s}, \quad (1)$$

čia  $\varepsilon_{su}$  – ribinė tempiamos armatūros takumo deformacija.

Pluošto lanko pasisukimo kampas mažesnis, nes papildomai vertinama betono šlytis tarp tempiamos armatūros ir pluošto kompozito. Taigi pluošto lanko pasisukimo kampas:

$$\alpha_{f,su} = \frac{(\varepsilon_{f,su} \times l_f + l_f) - u_f}{R_f} = \frac{(\varepsilon_{f,su} \times l_f + l_f) - \text{tg} \gamma_c \times a_{sf}}{R_f}. \quad (2)$$

Formulėje 2 šlyties kampas  $\gamma_c$ :

$$\gamma_c = \frac{\tau_{f,c}}{G_{ct,eff}}, \quad (3)$$

čia  $\tau_{f,c}$  – tangentiniai įtempiai, veikiantys tarp kompozito ir betono,  $G_{c,eff}$  – betono su plyšiais šlyties modulis.

Šlyties įtempiai sąveikaujant pluoštui ir betonui:

$$\tau_{f,c} = \frac{T_{f,c} \times 4}{b_f \times l_f}. \quad (4)$$

Kadangi pagal antrą paveikslą šlyties jėgos  $T_{f,c}$  atstojamoji yra pluošto kompozito skerspjūvio atlaikoma jėga  $N_f$ , tada šlyties įtempiai:

$$\tau_{f,c} = \frac{N_f \times 4}{b_f \times l_f}. \quad (5)$$

Šlyties kampas (5 pav.):

$$\gamma_c = \frac{N_f \times 4}{b_f \times l_f \times G_{c,eff}}. \quad (6)$$

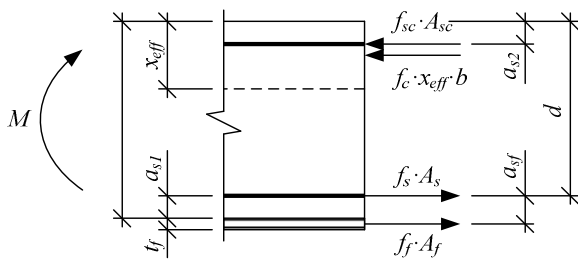
Taigi apskaičiuavus pasisukimo kampus, lengvai randamas poslinkis  $u_f$ :

$$u_f = \frac{\alpha_{su} R_s - \alpha_{f,su} R_f}{2}. \quad (7)$$

Pagal paprastąjį statmenojo pjūvio skaičiavimo modelį pridedamos jėgų atstojamosios ties pagrindiniais laikančiųjų elementų centrais (6 pav.) ir užrašomos dvi pagrindinės lygtys:

$$\sum F_x = 0; \quad f_{sc} A_{sc} + f_c \times b \times x_{eff} + f_s A_s + f_f A_f \times k_1 = 0; \quad (8)$$

$$\sum M_s = 0; \quad f_c \times b \times x_{eff} (d - x_{eff} / 2) + f_{sc} \times A_{sc} (d - a_{s2}) + f_f \times A_f \times k_1 \times a_{sf} = 0. \quad (9)$$



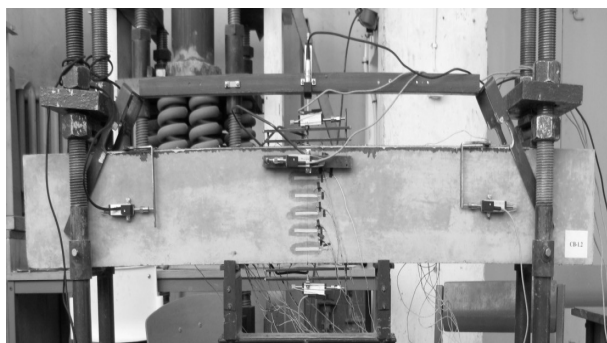
6 pav. Statmenojio pjūvio skaičiavimas  
Fig. 6. Normal section calculation

Formulėse (8) ir (9) pluošto kompozito atstojamosios jėgos  $N_f = f_f A_f$  vertinamos visu dydžiu. Vertinant betono šlytį ir atsiradusio poslinkio  $u_f$  įtaką – pluošto atlaikoma jėga visai neįvertinama. Dėl poslinkio sumažėja pluošto atlaikoma jėga santykiu:  $T_f = k_1 \cdot N_f$ , čia  $k_1 < 1$ .

Projektavimo rekomendacijose (ACI 440.2R-02 2002) pluošto kompozito jėgą patariama padauginti iš koeficiento  $\psi_f = 0,85$  ir dar papildomai dėl aplinkos poveikio sumažinti pluošto kompozito tempiamąjį stiprį. Europos Sąjungos rekomendacijose (Fib bulletin 14 2001) patariama sumažinti gniuždomosios zonos aukštį dauginant iš  $\delta_G$ , kuris priklauso nuo gniuždomo betono deformacijų, ir pluošto sąlyčio zonoje su betonu deformacijas imti:  $\epsilon_f + \epsilon_0$ , čia  $\epsilon_f$  – kompozito deformacijos;  $\epsilon_0$  – betono deformacijos, esančios prieš konstrukcijos stiprinimą.

### Eksperimentinis bandymas

Buvo atlikti gelžbetoninių sijų su papildoma anglies pluošto kompozito armatūra lenkimo bandymai (7 pav.). Bandymų tikslas yra nustatyti sijų laikomąją galią ir anglies pluošto kompozito horizontalųjį poslinkį.



7 pav. Lenkiamosios sijos bandymas  
Fig. 7. Bending moment capacity experiment

Prieš klijuojant anglies pluoštą paruošiamas betono paviršius, kuris kruopščiai nušveičiamas, kol atsirado poros ir pasirodo užpildo paviršius. Susikaupusios dulksės susiurbiamos aukšto slėgio siurbliu.

Po paviršiaus paruošimo buvo pritaikytas polimerinis gruntas „Primer 1“, kuris sustiprina betoninį paviršių. Kadangi paruoštas paviršius buvo porėtas ir nelygus, pritaikytas specialus polimerinis glaistas „Mapewrap 11“, išeiga  $150 \text{ g/m}^2$ . Išlyginus betoninį paviršių klojamas  $0,5 \text{ mm}$  storio epoksidinių klijų „Mapewrap 31“ sluoksnis ir ant klijų patiesiama anglies pluošto juosta. Su guminiu voleliu pluošto juosta tolygiu spaudimu prispaudžiama prie betoninio paviršiaus, kad po ja nesudarytų oro pūlių. Pluošto paviršius dar kartą tepamas epoksidiniais klijais, kad derva prasisunktų per visus pluošto plaušus. Rekomenduojama dervą maišyti pagal gamintojo nurodytą santykį, nes tai garantuoja gerą sukibimą su betonu, o pluoštas atplyšta kartu su betonu.

Ties pluošto klijavimo pradžia ir pabaiga sumontuoti poslinkio indikatoriai, kuriais buvo matuojamas horizontaliojo kompozito pasislinkimas.

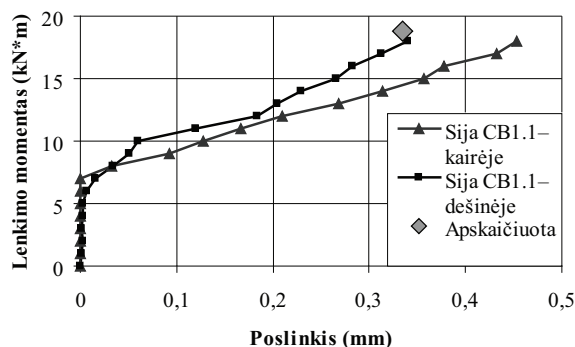
### Rezultatai

Lentelėje pateikiama išbandytų sijų „CB1.1“, „CB1.2“ atlaikomi ir apskaičiuoti ribiniai lenkimo momentai, pluošto poslinkiai ir koeficientai, rodantys poslinkio įtaką. Taip pat pateikti apskaičiuoti atlaikomi momentai, kai vertinamas horizontalusis kompozito pasislinkimas ir jis nevertinamas (Calc.1 ir Calc.2).

Lentelė. Apskaičiuoti ir eksperimentiniai parametrai  
Table. Numerical and experimental characteristics

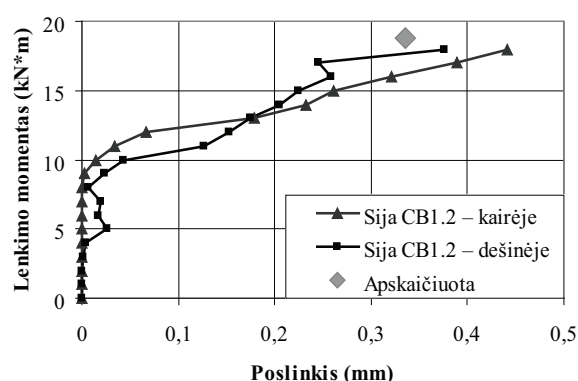
	Poslinkis $u_f$ (mm)	Suirimo momentas $M_u$ (kN·m)	$x_{eff}$ (mm)	Koeficientas ( $k_1$ )
CB1.1	0,363	18,0	–	0,73
CB1.2	0,409	18,0	–	0,694
Calc.1	0,335	18,8	26,2	0,75
Calc.2	0	22,24	32,41	1,0

Sijų „CB1.1“ ir „CB1.2“ kompozito horizontaliųjų poslinkių grafikai pateikti (8 ir 9 pav.); čia pavaizduota ir apskaičiuotoji reikšmė.



8 pav. Sijos CB1.1 anglies pluošto kompozito horizontalusis poslinkis

Fig. 8. CFRP horizontal slip in beam CB1.1



9 pav. Sijos CB1.2 anglies pluošto kompozito horizontalusis poslinkis

Fig. 9. CFRP horizontal slip in beam CB1.2

## Išvados

1. Skaičiavimai parodė, kad, įvertinant šlytį tempiamojoje betono zonoje tarp armatūros ir pluošto, atlaikomas sijos momentas sumažėjo apie 15 %.

2. Kadangi dėl šlyties sumažėjo kompozito atstojamoji jėga, tai turi įtaką ir gniuždomosios zonos aukščiui.

3. Papildomai šlyties įtaką reikia įvertinti ir skaičiuojant sijos įlinkį.

## Literatūra

- Chen, J. F. 2001. FRP or steel plate-to-concrete bonded joints: effect of test methods on experimental bond strength, *Steel and Composites Structures* 1(2): 231–244.
- Ferreir, E.; Hamelin, P. 2002. Long-time concrete-composite interface characterization for reliability prediction of RC beam strengthened with FRP, *Materials and Structures* 35 (November): 564–572.
- Diab, H.; Wu, Z.; Iwashita, K. 2009. Short and long-term bond performance of prestressed FRP sheet anchorages, *Engineering Structures* 31: 1241–1249.

Ranzi, G. 2005. Short- and long-term analyses of composite beams with partial interaction stiffened by longitudinal plate, *Steel and Composites Structures* 6(3): 237–255.

Rabinovitch, B. O.; Frosting, Y. 2001. Delamination failure of RC beams strengthened with FRP strips—a closed-form high-order an fracture mechanics approach, *Engineering Mechanics* 127(8): 852–861.

Rabinovitch, O. 2004. Fracture-mechanics failure criteria for RC beams strengthened with FRP strips—a simplified approach, *Composite Structures* 64(3–4): 479–492.

ACI 440.2R-02. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, ACI Committee 440.

Fib bulletin 14. 2001. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, *Technical report*. Federation internationale du beton (fib).

## BENDING MOMENT DECREASE OF REINFORCED CONCRETE BEAM SUPPORTED BY ADDITIONAL CFRP

M. Daugevičius

Summary

The calculation method of reinforced concrete beam with additional CFRP composite is proposed in this article. This method estimates tangential angular concrete deformations in tensioned beam layers between steel and bonded carbon fiber reinforced polymer. The horizontal slip of CFRP composite reduce beam bending moment capacity. An additional coefficient to reduce CFRP resultant force is necessary for better precision of bending moment capacity. Also, various calculation methods of bending moment capacity are considered.

**Keywords:** CFRP composite, horizontal composite slip, shear stress.