



ANGLIES PLUOŠTU SUSTIPRINTŲ GELŽBETONINIŲ SIJŲ TEMPIAMOSIOS ZONOS IRIMŲ POBŪDŽIO ANALIZĖ

Gediminas Marčiukaitis¹, Mykolas Daugevičius², Juozas Valivonis³

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

El. paštas: ^{1, 2, 3}gelz@vgtu.lt; ³juozas.valivonis@vgtu.lt

Įteikta 2010 10 01; priimta 2010 11 06

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamas anglies pluoštu sustiprintų sijų kontaktinės betono zonos sustiprėjimas dėl epoksidinių klijų įsigėrimo į betono struktūrą. Pateikiama šios zonos betono sluoksnio gniuždomojo, tempiamojo bei kerpamojo stiprio nustatymo metodika, taip pat epoksidinių klijų įsigėrimo į betoną gylio skaičiavimo ir mikroskopinės analizės rezultatai. Pristatoma statmenųjų plyšių atsivėrimo apskaičiavimo metodika, įvertinanti ir neįvertinanti betoninio sluoksnio sustiprėjimo įtaką. Atlikti eksperimentiniai lenkiamųjų gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies pluošto kompozitu, tyrimai parodė, kad įvertinus sustiprėjusio betoninio sluoksnio įtaką, teoriniai apskaičiuoti pleišėjimo momento rezultatai geriau sutampa su eksperimentiniais nei jo neįvertinus.

Reikšminiai žodžiai: anglies pluoštas, polimeriniais kljais įsigėręs betonas, vertikalus ir horizontalus supleišėjimas.

1. Įvadas

Kompozitinių medžiagų ir konstrukcijų naudojimas įvairiose technikos srityse yra viena iš prioritetinių mokslo ir technologijos vystymosi kryptių XXI amžiuje. Jų komponentų įvairovė leidžia sukurti efektyvesnių charakteristikų gaminius. Vienas iš plačiai pradėtų naudoti kompozitinių konstrukcijų komponentų yra anglies pluoštas ir jo gaminiai. Statybinių dirbinių ir konstrukcijų savybėms pagerinti pradėtos taikyti anglies pluošto fibros ir anglies pluošto juostos.

Kaip rodo atlikta kitų autorių tyrimų apžvalga ir analizė (Li 2004; Akihama *et al.* 1986) anglies pluošto fibrų naudojimas iš esmės pagerina mechanines betono savybes. Didžiausia pritaikymo nauda tenka toms konstrukcijoms ar jų dalims, kuriose susidaro daugiausia įtempimų būvis. Fibros, betono struktūroje išsidėsčiusios chaotiškai, perima įrašas bet kokios kryptimi.

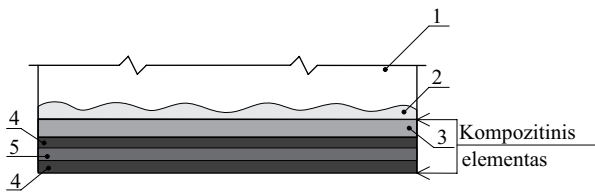
Vienos krypties pluoštai ir jų kompozitai (audinio pavidalu) yra lengvai ir efektyviai naudojami konstrukcijoms ir jų dalims sustiprinti, kai pagrindinės įrašos veikia viena kryptimi. Didžiausią efektą duoda jų naudojimas tempimo įtempiams tiek išilgine, tiek skersine kryptimi atlaikyti (Daugevičius, Apinis 2009; Zile *et al.* 2009).

sine kryptimi atlaikyti (Daugevičius, Apinis 2009; Zile *et al.* 2009).

Statybinių konstrukcijų ir jų poveikių įvairovė reikalauja vis naujesnių tyrimo rezultatų apie anglies pluošto kompozito elgseną kartu su betonu. Paskutiniaisiais metais vis gausėja eksperimentinių tyrimų įrodymų apie konstrukcijų elgseną veikiant apkrovai. Ypač daugėja konstrukcijų, kurios stiprinamos anglies pluošto kompozitu. Anglies pluoštas padeda ne tik atstatyti arba padidinti laikomąją galią, bet ir padidinti atsparumą agresyviajai aplinkai. Tuo tikslu kuriamos projektavimo rekomendacijos, plėtojamoms ir tobulinamos konstrukcijų stiprinimo anglies pluoštu technologijos. Stiprinimas anglies pluoštu laikomą vienalytę konstrukciją padaro sluoksnuotąja (1 pav.).

Kaip žinoma, skaičiuojant įprastojo gelžbetonio lenkiamąją konstrukciją tikrinami du pavojingi pjūviai – vertikalus ir įstrižasis. Skaičiuojant sluoksnuotąją konstrukciją atsiranda trečias – horizontalus pereinamasis sluoksnis betono ir anglies pluošto kompozito sąlyčio zonoje.

Klijuojant anglies pluošto kompozitą keičiasi kontaktinės zonos struktūra. Dėl klijų įsigėrimo labai pa-



1 pav. Betono ir kompozitinio sluoksnio jungtis gelžbetoninės sijos skerspjūvio apačioje: 1 – betoninis sluoksnis; 2 – impregnuoto epoksidiniu gruntu betono sluoksnis; 3 – epoksidinio glaisto sluoksnis; 4 – epoksidiniai klijai; 5 – anglies pluoštas

Fig. 1. The joint of concrete and carbon fiber composite layer: 1 – a concrete layer; 2 – an impregnated concrete layer with epoxy primer; 3 – a layer of epoxy lute; 4 – epoxy glue; 5 – a tape of carbon fibers

gerėja adhezinė jungtis, kartu susidaro ir mechaniniai ryšiai. Įsigėrę į paviršiaus poras ir atvirus kapiliarus klijai tampa mechaninėmis jungėmis, kurių kerpamasis stipris priklauso nuo klijų mechaninių savybių. Be to, tarp atskirų sluoksnių veikia ir tarpmolekulinės jėgos (Marčiukaitis 1998). Tyrimais nustatyta, kad polimerinio apvalkalo storis priklauso nuo polimerinio rišklio kiekio ir užpildų dispersiškumo (Maksimov et al. 1999). Dėl viso to susidariusi naujų savybių pereinamoji betoninė zona daro poveikį įtempių pasiskirstymo ir tempiamos zonos pleišėjimo pobūdžiui.

Tyrimai rodo (Skuturna et al. 2008; Valivonis et al. 2010), kad anglies pluoštu sustiprintų (lenkiamųjų) elementų suirimo pobūdis priklauso nuo pluošto užsiinkaravimo. Nesant atrėmimo zonoje papildomų jungių, suirtis prasideda atramėje zonoje. Tai rodo ir daugelio autorių atlikti tyrimai (Gunes et al. 2009). Horizontalaus pjūvio sluoksnis betono ir kompozito jungties zonoje būna skirtingas. Kaip parodyta 1 pav., vienasluoksnė gelžbetoninė sija tampa trislauksne. Tokių sustiprintų lenkiamųjų sijų ir tempiamosios zonos laikomoji galia turi būti tikrinama įvertinant naujai susidariusio pereinamojo sluoksnio įtaką. Tyrimų apžvalga rodo, kad dažniausiai sustiprėjusio betono sluoksnio įtaką sijos vertikalinių ir horizontalių plyšių vystymosi pobūdžiui nevertinama (Obaidat et al. 2010; Ombres 2010; Pan et al. 2010).

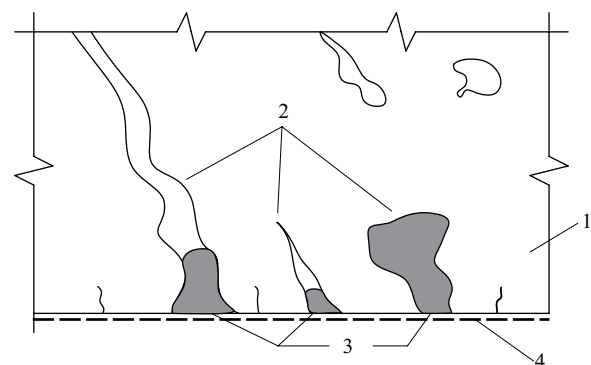
2. Tempimojo betoninio sluoksnio sustiprėjimo, priklijuojant anglies pluoštą, mechanizmas

Betonas yra porėtoji ir kapiliarais išraizgyta medžiaga. Atviros poros ir kapiliarai dėl kapiliarinių jėgų įtraukia skystąsias medžiagas. Paviršinės poros ir didesni kapiliarai tam tikrame gylyje užsipildo skystais klijais, pakeisdami betono paviršinio sluoksnio struktūrą. Kaip rodo 2 pav. analizė, tam tikras betoninis sluoksnis gau-

namas kaip nauja dvikomponentė medžiaga, kurios matrica yra betonas, o intarpai – sukietėję klijai.

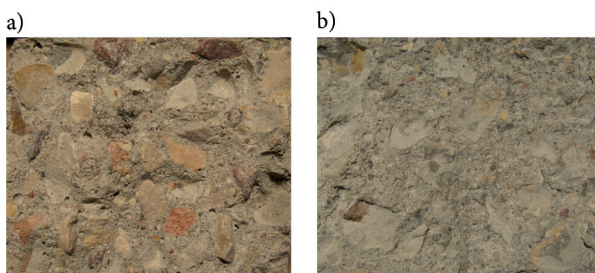
Betono struktūros pakitimui didelę įtaką turi klijų išsiskverbimas į betono poras. Kaip žinoma, cementinio betono fizikinės mechaninės savybės priklauso ne tik nuo jų sudarančių komponentų skaičiaus, bet ir nuo jų ryšio. Betono struktūrą sudaro sukietėjęs cementinis akmuo, jame chaotiškai išsidėstę intarpai – užpildai (skalda, žvyras, smėlis) ir įvairios poros bei kapiliarai. Normalios sudėties betone užpildai sudaro apie 60–70 % viso betono tūrio. Kadangi užpildų poringumas yra nedidelis, tai pagrindinę jo dalį sudaro poros ir kapiliarai cementiniame akmenyje. Kaip parodė šio straipsnio autorių ir kitų autorių tyrimai, didžiausias poringumas ir atviri kapiliarai yra paviršiniuose konstrukcijos sluoksniuose. Be to, šiuose sluoksniuose daugiausia yra mikroplyšių, ypač komponentų sąlyčio plokštumoje, kuriuos sukelia skirtingos drėgminės ir temperatūrinės užpildo ir cementinio akmens deformacijos. Tokiu būdu polimeriniai klijai, užpildydami atviras poras, paviršinius kapiliarus bei mikroplyšius, pakeičia paviršinio sluoksnio struktūrą: atviros poros ir kapiliarai užpildomi stipria medžiaga (sukietėję klijai) (2 pav.). Tyrimai rodo, kad ne visos poros ir kapiliarai užsipildo polimerais. Tai priklauso nuo porų tipo, jų dydžio, klijų rišlumo ir kitų veiksnių. Polimerais impregnuoto betoninio sluoksnio suirimo pobūdis skiriasi, palyginti su įprastu cementiniu betonu (3 pav.).

Teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad cementinio akmens poringumas (gelio poros) sudaro beveik 1/3 viso tūrio. Jų skersmuo – apie $15 \cdot 10^{-7}$ – $30 \cdot 10^{-7}$ mm. Todėl tik nedidelė jų dalis ir paviršiniame



2 pav. Betono jungties su anglies pluošto kompozitu paviršiaus sluoksnio su klijais struktūros schema: 1 – betonas; 2 – atviri kapiliarai ir poros; 3 – atvirų porų ir kapiliarų, užpildytų klijais, gylis; 4 – klijų sluoksnis

Fig. 2. A scheme of the impregnated concrete surface at the joint with carbon fiber composite layer: 1 – concrete; 2 – capillary and pores; 3 – the deep of the filed capillary and pores; 4 – a layer of epoxy glue



3 pav. Irimo paviršiai: a – normalaus betono;
b – klijų įsigėrusio betono
Fig. 3. Fragmentation surface: a – normal concrete;
b – impregnated concrete

sluoksnyje gali būti užpildyta klijais. Didesnės yra kapiliarinės poros. Jų tūris ir dydis priklauso nuo cemento hidratacijos, taip pat gamybos technologinių veiksnių. Vykstant cemento hidratacijai cementinio akmens paviršius didėja, tačiau bendras ir kapiliarinis betono poringumas V/C ribose kinta nuo 0,35 iki 0,70 ir esant hidratacijos laipsniui $\alpha = 0,5-0,6$ bendras cementinio akmens poringumas gali būti 0,45–0,55 (Шейкин 1974). Todėl tokio betono poringumas bus 13–18 %. Tačiau, kaip parodė tyrimai, polimerais užsipildo apie 20–25 % betono kiekio, t. y. porų, kurių skersmuo mažesnis už $4 \cdot 10^{-7}$ mm. Vadinasi, polimerais gali būti užpildyta apie 7–8 % bendro kiekio porų. Įvertinus, tai, kad didelė dalis paviršinio sluoksnio porų bei kapiliarų yra atviros, galima teigti, kad paviršiniame sluoksnyje gali užsipildyti klijais ketvirtadalis ar penktadalis visų porų.

Polimeriniai klijai ne tik užpildo nurodytą tūrį porų, bet ir užtikrina fizikinę ryšį su cementiniu akmeniu ir užpildais bei padidina bendrą ryšį tarp jų. Gaunamas naujos struktūros ir geresnių savybių betono sluoksniu, kurį galima nagrinėti kaip dvikomponentę kompozitinę sistemą. Naujai susidariusios kompozitinės medžiagos savybės priklauso nuo jos matricos – porėtojo betono sluoksnio (betoninio skeleto) ir polimerinių klijų, kurie užpildo betoninio skeleto tuštumas – poras (Марчюкайтис 1977a, b). Pagrindinė mechaninė tokio kompozito savybė – gniuždomasis stipris – gali būti apskaičiuojamas remiantis atliktais tyrimais (Marchukaitis 1978).

Remiantis žinomu „mišinio“ dėsniumi gauta tokia gniuždomojo stiprio apskaičiavimo formulė:

$$f_{c,g} = f_{c,0} \left[k_m (1 - V_p) + k_g V_g \frac{E_g}{E_{cm}} \right], \quad (1)$$

čia: $f_{c,0}$ – betono skeleto (be porų) gniuždomasis stipris; V_p – santykinis porų kiekis paviršinio sluoksnio

betone; V_g – klijų santykinis tūris; E_g ir E_{cm} – klijų ir betoninio skeleto betono tamprumo moduliai; k_m ir k_g – įtempių matricoje (skelete) ir klijuose koncentracijos koeficientai, kurie apskaičiuojami pagal tokias formules:

$$k_m = \frac{2 + 14\eta + 8\eta^2}{14 + 11\eta - 2\eta^2} \cdot \frac{V_g}{V_p}, \quad (2)$$

$$k_g = \frac{2 + 14\eta + 8\eta^2}{15\eta + 9\eta^2}, \quad (3)$$

$$\text{čia } \eta = \frac{E_g}{E_{cm}}.$$

Betono skeleto stipris yra:

$$f_{c,0} = f_{cm}^{0,5} \frac{37 \left(1 + 100V_p \right)^{0,333}}{1 - 1,5V_p^{0,667}}. \quad (4)$$

Panašiai gaunama ir formulė betono skeleto su klijais deformacijų moduliui apskaičiuoti:

$$E_{c,g} = E_{c,0} \frac{9(V_p - V_g) - 2 \frac{\eta - 1}{\eta} V_g}{1 + 8(V_p - V_g) + \frac{3\eta - \eta^2 - 2}{\eta(\eta - 1)} V_g}, \quad (5)$$

čia $E_{c,0}$ – betono matricos (skeleto) deformacijų modulis, nustatomas pagal šią formulę:

$$E_{c,0} = E_{cm} \left(\frac{1 + 7,75V_p}{1 - 1,25V_p} \right). \quad (6)$$

Santykinis porų skaičius viršutinio sluoksnio betone remiantis tyrimais (Горчаков *et al.* 1976) yra:

$$V_p = 0,6k_p \exp(-2,6 \cdot 10^{-5} f_c), \quad (7)$$

čia k_p – koeficientas, apibūdinantis betono ir cementinio akmens poringumą:

$$k_p = \frac{W + 0,32C}{1000}, \quad (8)$$

čia W ir C – vandens ir cemento kiekis betone.

Mūsų tyrimai (Marchukaitis *et al.* 2007) parodė, kad klijų įgerties gylį galima apskaičiuoti pagal tokią empirinę formulę:

$$d_{im} = d_{ag} \left(\frac{W}{C} \right)^{3/2} + \left(\frac{C}{100} - 0,1d_{ag}^{1/2} \right), \quad (9)$$

čia d_{ag} užpildų skersmuo ($10 < d_{ag} < 25$ mm).

Koreliacinis ryšys tarp kliais įsigėrusio betono tempiamojo ir gniuždomojo stiprumų yra išreikštas tokia priklausomybe:

$$f_{c,tg} = 0,068 f_{c,cg}^{1,04} \quad (10)$$

Svarbi tokio betono savybė, kai veikia šlytis, yra jo kerpamasis stipris, kuris su gniuždomuoju stipriu $f_{c,cg}$ koreliuoja pagal tokią priklausomybę:

$$f_{c,sh} = 0,216 \sqrt{f_{c,cg}^{2,08}} \approx 0,22 f_{c,cg} \quad (11)$$

Kita svarbi polimerais įsigėrusio betono savybė, vertinant jo pleišėjimą, yra jo deformatyvumas tempiant. Mūsų tyrimai parodė, kad kompozitinio polimerbetonio tempimosi deformacija yra didesnė k_ε kartų, t. y. $\varepsilon_{c,tg} = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{ct}$. Koeficientas

$$k_\varepsilon = 1 + f_{ct} \cdot V_g \frac{V_g}{\alpha_g^{0,8} \cdot V_p} \quad (12)$$

čia α_g – koeficientas priklausantis nuo klijų (polimerų) tipo ir kietėjimo būdo bei sąlygų. Kai naudojami polimeriniai klįjai galima priimti 0,12.

Kai $\alpha_g = 0,12$, (12) formulė įgyja tokią formą:

$$k_\varepsilon = 1 + 5,56 \cdot V_g \frac{V_g}{V_p} \quad (13)$$

Duotųjų formulių analizė rodo, kad paviršinio polimeriniais klįjais įsigėrusio sluoksnio betono pagrindinės mechaninės savybės skiriasi nuo kito normalaus betono sluoksnio.

3. Statmenųjų plyšių atsiradimo momento skaičiavimas

Skaičiuojant lenkiamos gelžbetoninės sijos, tempimoje zonoje sustiprintos anglies pluošto kompozitu, pleišėjimo momentą, įvertinamas betoninio sluoksnio sustiprėjimas dėl epoksidinės dervos įgėrimo. Buvo minėta, kad impregnuoto betoninio sluoksnio mechaninės savybės pagerėja. Todėl plyšių tempiamuosiuose sijos sluoksniuose vystymasis prasideda aukščiau impregnuoto betono sluoksnio. Toks charakteringas plyšių vystymasis nustatytas atliktų eksperimentų metu (4 pav.).

Gelžbetoninių sijų, tempiamojoje zonoje sustiprintų anglies pluošto kompozitu, standumo skaičiavimo metodikų apžvalga rodo, kad skaičiuojant pleišėjimo momentą nevertinamas betono sustiprėjimas ties jungtimi su anglies pluošto kompozitu. Todėl nustatytas pakitusias impregnuoto betono mechanines savybes patikslinta sijos skerspjūvyje išsidėsčiusių įrašų

schema, kai pasiekiamas plyšių atsiradimo momentas (5 pav.).

Nustačius tempiamųjų ir gniuždomųjų sluoksnių statinius ir inercijos momentus apie neutraliąją ašį, šios vertikaliųjų plyšių atsiradimo momentas skaičiuojamas:

$$M_{crc} = \varepsilon_{ct} \cdot E_{ct} \times \left(\frac{\alpha_{sc} \cdot I_{sc} + I_{cc} + \alpha_s \cdot I_s + \alpha_{ct,2} \cdot I_{ct,2} + \alpha_f \cdot I_f}{h - x - t_{ct,2}} + S_{ct} \right) \quad (14)$$

Neutraliosios ašies padėtis vertikalaus plyšio atsiradimo metu nustatoma priartėjimo būdu pagal sąlygą:

$$A_{ct} (h - x - t_{ct,2}) = \frac{2}{3} S_{cc} + \alpha_s \cdot S_{sc} - \alpha_s \cdot S_s - \alpha_{ct,2} \cdot S_{ct,2} - \alpha_{ff} \cdot S \quad (15)$$

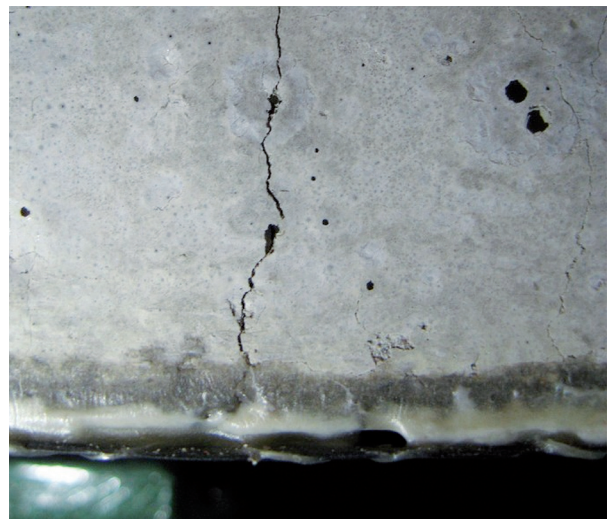
Jeigu nevertinamas impregnuoto sluoksnio sustiprėjimas, skerspjūvyje išsidėsčiusių įrašų schema, kai pasiekiamas pleišėjimo momentas, pateikiama 6 pav.

Tokiu atveju vertikaliųjų plyšių atsiradimo momentas skaičiuojamas pagal šią formulę:

$$M_{crc} = \varepsilon_{ct} \cdot E_{ct} \times \left(\frac{\alpha_{sc} \cdot I_{sc} + I_{cc} + \alpha_s \cdot I_s}{h - x} + S_{ct} + \alpha_f \cdot S_f \right) \quad (16)$$

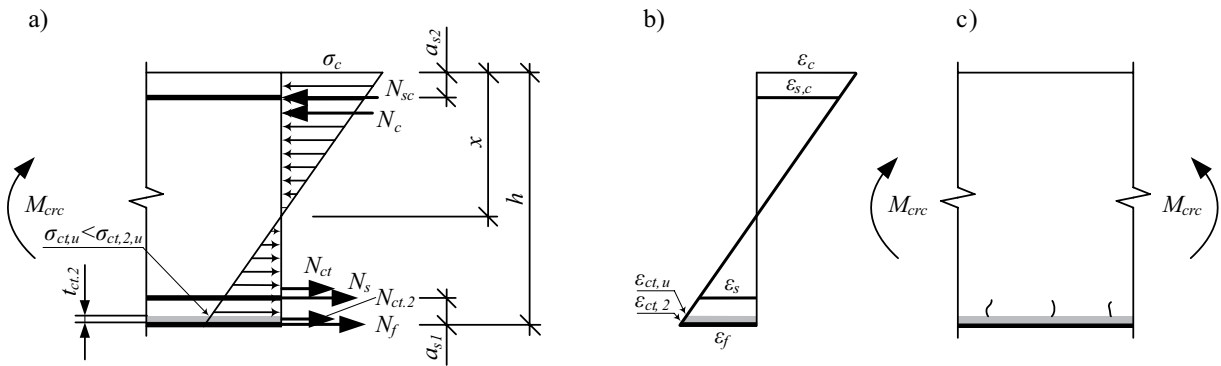
Neutraliosios ašies padėtis vertikalaus plyšio atsiradimo metu, nustatoma priartėjimo būdu pagal sąlygą:

$$(A_{ct} + \alpha_f \cdot A_f)(h - x) = \frac{2}{3} S + \alpha_s \cdot S_{sc} - \alpha_s \cdot S_s \quad (17)$$



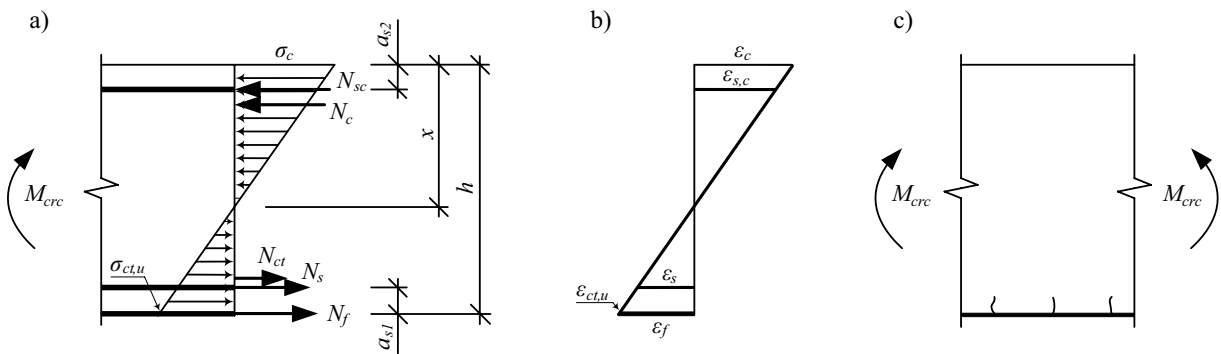
4 pav. Vertikalojo plyšio vystymasis virš betono ir anglies pluošto kompozito jungties

Fig. 4. The evolution of vertical crack above concrete and carbon fiber composite joint



5 pav. Įrašų pasiskirstymas skerspjūvyje pasiekus pleišėjimo momentą, kai vertinama impregnuoto sluoksnio įtaka: a – vidinių jėgų ir įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje; c – plyšių vystymosi charakteris virš impregnuoto sluoksnio

Fig. 5. The distribution of internal forces when the influence of the impregnated tensioned concrete layer is evaluated: a – the distribution of internal forces and stresses; b – the distribution of deformations; c – a character of the evolution of vertical crack



6 pav. Įrašų pasiskirstymas skerspjūvyje pasiekus pleišėjimo momentą, kai nevertinama impregnuoto sluoksnio įtaka: a – vidinių jėgų ir įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje; c – plyšių vystymosi charakteris virš impregnuoto sluoksnio

Fig. 6. The distribution of internal forces when the influence of the impregnated tensioned concrete layer is not evaluated: a – the distribution of internal forces and stresses; b – the distribution of deformations; c – a character of the evolution of vertical cracks

Neįvertinus impregnuoto sluoksnio stiprumo padidėjimo, vertikalūs plyšys ima vystytis nuo betono ir anglies pluošto kompozito jungties (6 pav., c).

4. Eksperimentiniai tyrimai ir jų rezultatų palyginimas su teoriniais

Eksperimentiniams tyrimams atlikti pagamintos gelžbetoninės sijos, kurių projektiniai matmenys – 100×200×1500 mm. Sijų tempiamoji zona buvo armuota 2×Ø12 armatūros strypais. Gniuždomoji sijų zona armuota 2×Ø8 armatūros strypais. Tempiamosios plieninės strypinės armatūros takumo įtempiai ir tamprumo modulis: $f_{s,y} = 318$ MPa, $E_{s,y} = 205$ MPa. Gniuždomosios plieninės armatūros takumo įtempiai ir tamprumo modulis: $f_{s,y} = 420$ MPa, $E_{s,y} = 204$ MPa. Sijų betono ir pluošto savybės pateiktos 1 lentelėje.

Pateiktose sijose anglies pluošto kompozitinis sluoksnis priklijuotas iki sijos atramų. Papildomos

kompozitinio sluoksnio jungtys nepanaudotas, todėl stiprinamo gelžbetoninio elemento ir kompozito jungtis užtikrinama tik epoksidinių klijų sukibimu su betonu. Sijų II.B12.1C ir II.B12.2C betono vandens ir cemento santykis 0,456, o sijų III.B12.1 ir III.B12.2 atitinkamai 0,475.

Klijais įsigėrusio sluoksnio savybės ir įsigėrimo gylis apskaičiuotas pagal duotąsias formules. Įsigėrimo gylis buvo patikrintas mikroskopiniais tyrimais. Gauti tyrimo rezultatai pateikti 2 lentelėje.

Sustiprintos gelžbetoninės sijos buvo apkraunamos dviem sutelktomis apkrovomis. Efektyvus sijos tarpatramio ilgis – 1200 mm. Sijos bandymo stendas pavaizduotas 7 pav. Išorinė apkrova buvo didinama hidrauliniu keltuvu. Apkrova didinama pakopomis. Pakopos dydis – 5,5 % nuo skaičiuotinės irimo apkrovos.

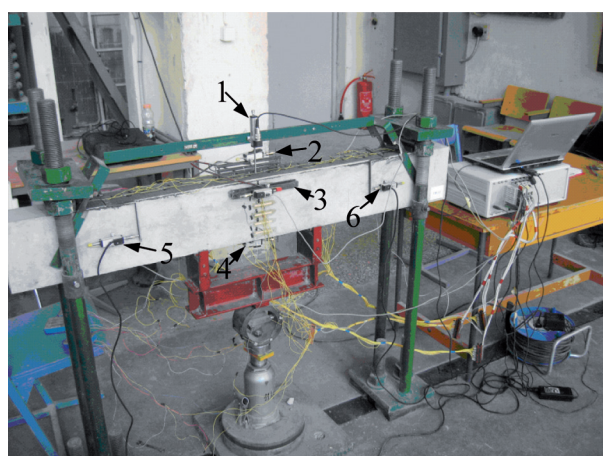
Eksperimentinio bandymo metu buvo matuojamas sijos vertikalusis poslinkis tarpatramio viduryje. Nustatytos deformacijos labiausiai gniuždomo beto-

1 lentelė. Sijos komponentų savybės**Table 1.** Characteristics of concrete admixture components

Sijos šifras				Anglies pluošto			Epoksidinių klijų	
	f_c , MPa	f_{ct} , MPa	E_{cm} , MPa	A_f , cm ²	f_f , MPa	E_f , MPa	f_g , MPa	E_g , GPa
II.B12.1C	34	3,8	32,3	0,167	4800	231	24,5	1,8
II.B12.2C								
III.B12.1	30,1	3,46	32,4					
III.B12.2								

2 lentelė. Apskaičiuotos modifikuoto betono stiprumo mechaninės savybės**Table 2.** The calculated mechanical properties of the modified concrete layer

Serijs	d_{min}	V_p	V_g	E_{cg} , MPa	f_{cg} , MPa	$f_{c,sh}$, MPa	$f_{c,tg}$, MPa
II.B12.1C	7,71	0,185	0,056	60,4	137,8	30,3	11,4
II.B12.2C							
III.B12.1	7,62	0,183	0,057	58,3	115,58	25,4	9,5
III.B12.2							



7 pav. Sustiprintų sijų bandymo schema ir matavimo prietaisų išdėstymas: 1 – įlinkio matavimo prietaisas; 2 – kompozitinio tempiamojo sluoksnio tenzometras; 3 – tempiamojo sluoksnio su strypine plienine armatūra tenzometras; 4 – viršutinio gniuždomojo betono sluoksnio tenzometras; 5 ir 6 – šlyčiomačiai

Fig. 7. The arrangement of linear transducers and electrical gauges on the experimental beam: 1 – deflection measurement device; 2 – a linear transducer on the layer of carbon fiber composite; 3 – a linear transducer on the tensioned layer with a steel bar; 4 – a linear transducer on the layer of compressed concrete; 5 and 6 – displacement indicators of carbon fiber composite layer

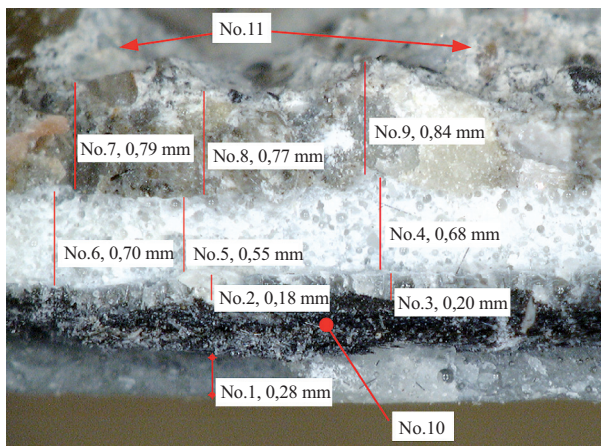
no sluoksnyje, tempiamajame sluoksnyje su plienine strypine armatūra ir išoriniame tempiamajame kompozitiniame sluoksnyje. Anglies pluošto kompozitinio sluoksnio pasislinkimas stiprinamojo elemento atžvilgiu matuotas ties kompozito priklijavimo galais.

Ekspirimentiniai tyrimai parodė, kad kompozitinis sluoksnis irimo metu nuo betono paviršiaus pa-

pildomai atplėšia betoninį sluoksnį. Tai įrodo, kad betono sluoksnis sukibęs su kompozitiniu sluoksniu yra žymiai stipresnis kaip paprastas betonas. Impregnuoto betono mechaninės savybės pasikeitė, dėl epoksidinių klijų įgėrimo.

Tyrimų metu elektroniniu skaitmeniniu mikroskopu DG-3x buvo išmatuotas anglies pluošto kompozitinio sluoksnio storis ir epoksidinių klijų įsigėrimo gylis (8 pav.). Vaizdas nuotraukoje padidintas 50 kartų. Kompiuterine programa Micro Measure V 1.0 išmatuoti sluoksnių storiai. Nuotraukoje matomi kompozitinis sluoksniuotas elementas sudarytas iš epoksidinių klijų (Nr. 1), epoksidiniais kljais permirkusio vienakrypčio anglies pluošto (Nr. 10), epoksidinių klijų ir epoksidinio glaisto sluoksnio (Nr. 2; 3), epoksidinio glaisto sluoksnio (Nr. 4; 5; 6), impregnuoto betoninio sluoksnio (Nr. 7; 8; 9). Atplyšusio kompozitinio sluoksnio mikroskopinė analizė parodė, kad šlyties įrašų poveikis kompozito sluoksnio nepažeidžia. Sustiprinto elemento, impregnuoto kljais, betoninio sluoksnio struktūra rodo, kad betono užpildai tarpusavyje sujungti hidratuoto cementinio akmens apvaskalais bei mikroplyšiuose įsigėrusiais polimerizuotais epoksidiniais kljais. Epoksidiniais kljais impregnuoto betono tempiamasis stipris yra penkis kartus didesnis negu paprasto betono. Todėl irimas vyksta betono sluoksnyje, kuriam užpildai surišti tik hidratuoto cemento apvaskalais (8 pav., Nr. 11).

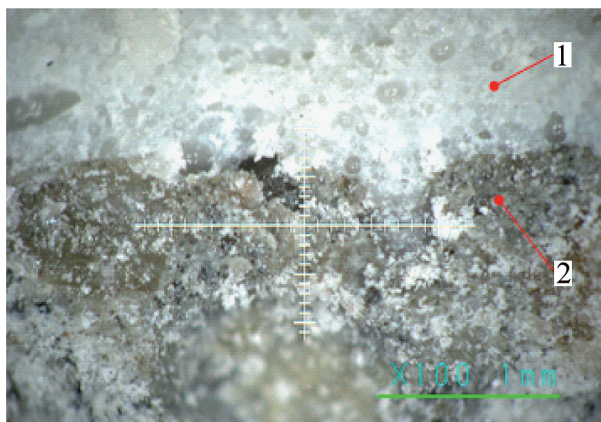
Kompozitinio sluoksnio su betonu jungties vaizdą padidinus 100 kartų, 9 pav. parodyta epoksidinio



8 pav. Kompozitinio sluoksnio jungtis su betonu:

1 – epoksidiniai klijai; 2, 3 – epoksidiniai klijai, susimaišę su epoksidiniu glaistu; 4, 5, 6 – epoksidinis glaistas; 7, 8, 9 – impregnuotas betonas; 10 – anglies pluoštas; 11 – cementinio akmens ruožai ant impregnuoto betono paviršiaus

Fig. 8. The joint of modified concrete and carbon fiber composite layer: 1 – epoxy glue; 2, 3 – epoxy glue mixed with epoxy lute; 4, 5, 6 – epoxy lute; 7, 8, 9 – a layer of modified concrete; 10 – a layer of carbon fiber; 11 – hydrated cement on the modified concrete layer



9 pav. Epoksidinio glaisto jungtis su betonu:

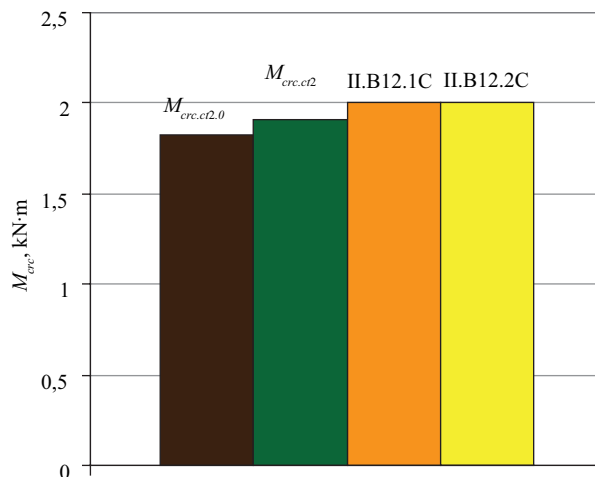
1 – epoksidinis glaistas; 2 – impregnuotas betonas

Fig. 9. The joint of epoxy lute with concrete:

1 – epoxy lute; 2 – modified concrete

glaisto ir betono jungtis. Jungties nuotrauka rodo, kad kraštinio sluoksnio betone esančios tuštumos yra užpildytos klijais.

Tyrimais nustatyta, kad sustiprintų sijų pleišėjimo momentas iki 26,5 % didesnis negu nesustiprintų gelžbetoninių sijų. Nesustiprintų gelžbetoninių sijų III.B12.1 ir III.B12.2 plyšių susidarymo momentai sudarė 11,8 % 13,6 % nuo momento, kai pasireiškia takumo įtempiai tempiamojoje strypinėje plieninėje armatūroje. Gelžbetoninius lenkiamuosius elementus sustiprinus anglies pluošto kompozitu, pleišėjimo momentas atitiko 17,3 % nuo momento, kai pasireiškia takumo įtempiai tempiamojoje plieninėje arma-



10 pav. Anglies pluošto kompozitu sustiprintų gelžbetoninių sijų apskaičiuotas ir eksperimentinis pleišėjimo momentas:

$M_{cr.ct2.0}$ – neįvertinus betono sustiprėjimo;

$M_{cr.ct2}$ – įvertinus betono sustiprėjimą

Fig. 10. The calculated and experimentally determined cracking moment of strengthened beams: $M_{cr.ct2.0}$ – cracking moment when the influence of modified concrete is not evaluated; $M_{cr.ct2}$ – cracking moment when the influence of modified concrete layer is evaluated

tūroje. Pleišėjimo momento padidėjimą galima paaiškinti tuo, kad sustiprintą siją veikiant išorine apkrova, kompozitinis sluoksnis, priklijuotas išilgai sijos, suvaržo deformacijų vystymąsi tempiamuosiuose betono sluoksnuose bei papildomai įsigėrusios polimerinės medžiagos padidina tempiamojo betono ribines tempimo deformacijas.

Sijų pleišėjimo momentas apskaičiuotas įvertinant ir neįvertinant impregnuoto sluoksnio įtakos. Įvertinus impregnuoto betoninio sluoksnio stiprio padidėjimą, apskaičiuotas pleišėjimo momento ir eksperimentais nustatyto momento santykis 0,954. Kai nevertinamas betoninio sluoksnio stiprio padidėjimas, šis santykis yra atitinkamai 0,915. Pleišėjimo momentai palyginti 10 pav. Tai rodo, kad įvertinus betono kontaktinės zonos sustiprėjimą, teoriniai rezultatai geriau sutampa su eksperimentiniais.

Teorinių tyrimų analizė buvo atliekama pagal duotą metodiką apskaičiuojant normalinių plyšių atsiradimo momentą. Kaip rodo (5) formulės analizė, betono įsigėrusio polimeriniais klijais, ištįsimo deformacijos gali ženkliai padidėti. Tai galima paaiškinti tuo, kad klijai labai sumažina įtempių koncentraciją ties poromis, kapiliarais bei kontakto vietoje tarp užpildų ir cementinio akmens. Kaip rodo 8 pav. ir atlikti mikroskopiniai tyrimai, įprasto tempiamojo betono irimas dažniausiai įvyksta tarp cementinio akmens ir užpildo. Betono struktūros užpildymas polimeriais tempiamąjį betono stiprį padidino iki 3 kartų.

5. Išvados

Atlikus anglies pluoštu sustiprintų gelžbetoninių sijų tempiamosios zonos supleišėjimo teorinę ir eksperimentinę analizę nustatyta:

1. Gelžbetoninių sijų stiprinimo metu formuojant išorinį kompozitinį sluoksnį pasikeičia mechaninės savybės dėl epoksidinių klijų įgėrimo.
2. Polimerinės medžiagos, užpildydamos betono ir kompozito jungties zonos poras bei kapiliarus, pakeičia betono struktūrą ir sudaro papildomus ryšius su betono užpildais. Modifikuoto betono sluoksnio fizinių ir mechaninių savybių nustatymas pagal pateiktą metodiką ir eksperimentas rodo, kad betono tempiamasis stipris ir tamprumo modulis padidėja atitinkamai 3,0 ir 1,9 karto.
3. Tempiamojo betono fizinių ir mechaninių savybių pasikeitimas turi didelę įtaką sijos statmenųjų ir horizontaliųjų plyšių vystymosi pobūdžiui.
4. Pateikta statmenųjų plyšių atsiradimo momento apskaičiavimo metodika. Pagal ją gauti rezultatai parodė, kad, įvertinus sustiprėjusio betono savybes, teorinių plyšių atsiradimo momento tikslumas padidėjo nuo 8,5 % iki 4,6 %.
5. Sustiprintų sijų betono ir kompozito jungties zonoje esančio impregnuoto betono mikroskopinė analizė patvirtino teorines prielaidas apie klijų įsigėrimo gylį ir pasiskirstymo pobūdį.

Literatūra

- Akihama, S.; Kobayashi, M.; Suenaga, T. 1986. *Mechanical properties of carbon fiber reinforced cement composite and the applications to buildings (Part 2)*. Report No. 65, Kajima Institute of Construction Technology. Tokyo, Japan.
- Daugevičius, M.; Apinis, R. 2009. Gniuždomų elementų, sustiprintų įtemptu anglies pluoštu, darbo analizė, iš *Statybinės konstrukcijos. Konferencijos, įvykusios 2009 m. vasario 6 d., straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika, 51–59.
- Gunes, O.; Buyukozturk, O.; Karaca, E. 2009. A fracture – based model for FRP debonding in strengthened beams, *Engineering Fracture Mechanics* 76: 1897–1909. doi:10.1016/j.engfracmech.2009.04.011
- Li, V. C. 2004. High performance fiber reinforced cementitious Composites as durable material for concrete structure repair, *International Journal for Restoration* 10(2): 163–180.
- Maksimov, R. D.; Jirgens, L.; Jansons, J.; Plume, E. 1999. Mechanical properties of polyester polymer-concrete, *Mechanics of Composite Materials* 35(2): 99–110. doi:10.1007/BF02257239
- Marčiukaitis, G. V. 1978. Die Abhandigkeit des Festigkeits and Deformations Eigenschaften das Polymers Betons von der Polymermenge, *Internationale Bausoff und Silikatung*, 54–56.
- Marčiukaitis, G. 1998. *Statybinių kompozitų kūrimo ir savybių prognozavimo principai*. Vilnius: Technika.
- Marchukaitis, G.; Valivonis, Yu.; Bareishis, J. 2007. An analysis of the joint operation of a CFRP concrete in flexural elements, *Mechanics of Composite Materials* 43(5): 467–478. doi:10.1007/s11029-007-0044-9
- Obaidat, Y. T.; Heyden, S.; Dahlblom, O. 2010. The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM, *Composite Structures* 92: 1391–1398. doi:10.1016/j.compstruct.2009.11.008
- Ombres, L. 2010. Prediction of intermediate crack debonding failure in FRP-strengthened reinforced concrete beams, *Composite Structures* 92: 322–329. doi:10.1016/j.compstruct.2009.08.003
- Pan, J.; Leung, C. K. Y.; Luo, M. 2010. Effect of multiple secondary cracks on FRP debonding from the substrate of reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials* 24: 2507–2516. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.006
- Skuturna, T.; Valivonis, J.; Vainiūnas, P.; Marčiukaitis, G.; Daugevičius, M. 2008. Analysis of deflections of bridge girders strengthened by carbon fibre reinforcement, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(3): 145–151. doi:10.3846/1822-427X.2008.3.145-151
- Valivonis, J.; Skuturna, T.; Daugevičius, M. 2010. The load-carrying capacity of reinforced concrete beams strengthened carbon fibre composite in the tension zone subjected to temporary or sustained loading, in *The 10th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*: Selected Papers, vol. 2. Ed. by P. Vainiūnas, E. K. Zavadskas. May 19–21, 2010, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 818–825.
- Zile, E.; Daugevičius, M.; Tamužs, V. 2009. The effect of pretensioned FRP windings on the behavior of concrete columns in axial compression, *Mechanics of Composite Materials* 45(5): 457–466. doi:10.1007/s11029-009-9107-4
- Горчаков, Г. И., et al. 1976. *Состав, структура и свойства цементных бетонов* [Gorchakov, G. I., et al. Composition, Structure and Properties of Cement Concretes]. Москва: Стройиздат. 145 с.
- Марчюкайтис, Г. В. 1977а. О расчете прочности пропитанного полимерами бетона как композиционного материала [Marchukaitis, G. V. Calculation of strength of concrete impregnated with polymers as a composite material], *Железобетонные конструкции* [Reinforced Concrete Structures] 8: 65–73.
- Марчюкайтис, Г. В. 1977б. Влияние пропитки бетона мономерами на его деформативные свойства [Marchukaitis, G. V. Effect of impregnation of concrete by monomers on its deformation properties], *Бетон и железобетон* [Concrete and Reinforced Concrete Structures] 6: 30–31.
- Шейкин, А. Е. 1974. *Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня* [Sheikin, A. E. Composition, resistance and fracture durability of cement stone]. Москва: Стройиздат.

THE FRAGMENTATION OF THE TENSIONED ZONE OF THE STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE BEAM WITH CARBON FIBER COMPOSITE

G. Marčiukaitis, M. Daugevičius, J. Valivonis

Abstract. The article analyzes the intensification influence of tensioned concrete on carbon fiber composite and concrete joint in a strengthened beam cracking manner. The paper calculates enlarged concrete compressive tensioned strength according to the impregnation of epoxy resin. The article figures out the level of epoxy resin penetration and deals with a microscopic analysis of concrete and carbon fiber composite joint. The presented modified calculation method of the cracking moment evaluates the characteristics of impregnated modified tensioned concrete. Four beams were tested. Two reinforced concrete beams were additionally strengthened with an external carbon fiber composite layer and loaded till failure. In addition, two reinforced beams without external reinforcement were tested. The accomplished experimental research of cracking strengthened beams showed that the calculated cracking moments with evaluated tensioned concrete layer intensification were more similar than the results without evaluation. After failure of strengthened beams, accomplished microscopic analysis of debonded carbon fiber composite layer. A microscopic analysis of concrete and carbon fiber composite joint was performed applying electronic microscope DG-3x. The thickness of the composite layer and modified tensioned concrete layer was measured using Micro Measure V 1.0 computer program. The accomplished microscopic analysis approved theoretical assumptions about epoxy resin penetration and distribution between aggregates. The strengthening of the reinforced concrete beam with carbon fiber composite improved mechanical characteristics of the tensioned concrete layer near concrete and carbon fiber composite joint. During strengthening, epoxy resin penetrates into concrete and fills micro cracks and pores. Thus, epoxy resin provides additional connections with aggregates. The calculated modified concrete tensioned strength and modulus of elasticity was respectively 3,0 and 1,9 times higher than that of ordinary concrete. Changes in concrete strength at the tensioned layer have influence on cracking manner because the ultimate deformation of modified concrete increases. Experimentally determined what evolution of vertical crack starts above the modified tensioned concrete layer at the joint with carbon fiber composite. Peeling the carbon fiber composite layer when the ultimate load level is reached also evolves above the modified tensioned concrete layer. The remained hydrated cement on the surface of the peeled external composite layer proves that shear stresses in the joint of concrete and carbon fiber composite reduced a weaker tensioned layer of concrete.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer, concrete impregnated with epoxy resin, vertical and horizontal cracking.

Gediminas MARČIUKAITIS. Prof. Dr Habil at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University. PhD at Kaunas Polytechnic Institute in 1963. Research visit to the University of Illinois in 1969. A Habilitated Doctor at Moscow Civil Engineering University in 1980. Professor in 1982. The author and co-author of 5 monographs, 6 course books and more than 300 scientific articles. Research interests: mechanics of reinforced concrete, masonry and layered structures, new composite materials, investigation and renovation of buildings.

Mykolas DAUGEVIČIUS. A senior researcher and assistant at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University. Research interests: the theory of reinforced concrete behaviour, composite materials and their calculation methods, rehabilitation of structures, thin walled structures.

Juozas VALIVONIS. Prof. at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University. Research interests: the theory of reinforced concrete behaviour, composite materials and their calculation methods, reinforced concrete bridges.