

KOMPOZITINĖS ARMATŪROS INKARAVIMO BETONE YPATUMAI

Mantas Atutis¹, Juozas Valivonis²

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

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

Įteikta 2011 03 01; priimta 2011 04 28

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamos kompozitinės armatūros inkaravimo betone problemos. Pateikiamos projektavimo normų (ACI, STR, JSCE) ir rekomendacijų (*fib* MC 2010) metodikos armatūros inkaravimo ilgiui nustatyti. Atlikta eksperimentinių rezultatų ir teorinių skaičiavimų lyginamoji analizė. Aptarti eksperimentiniai armatūros ir betono sukibties stiprio nustatymo būdai, betono ir armatūros sukibimą veikiantys veiksniai. Remiantis šio darbo rezultatais nustatyta, kaip armatūros inkaravimo ilgis priklauso nuo armatūros ir betono mechaninių savybių, geometrinių parametrų. Pateikiamos šių veiksnių ir kompozitinės armatūros inkaravimo ilgio priklausomybės.

Reikšminiai žodžiai: anglies pluoštas, bazalto pluoštas, inkaravimo ilgis, sukibties stipris, strypo ištraukimo iš betono bandymas, kompozitinė armatūra.

1. Įvadas

Dažnai gelžbetonines konstrukcijas veikia agresyvioji cheminė aplinka, kuri neigiamai veikia šių konstrukcijų elgseną. Tyrimai rodo, kad naujos kompozitinės medžiagos (anglies, aramido, bazalto, stiklo pluoštai) yra atsparios korozijai, todėl kaip alternatyva tradicinei plieno armatūrai gali būti pradėtos naudoti ir inžinerinėje praktikoje (Valivonis, Marčiukaitis 2006; Skuturna 2009; Atutis, Valivonis 2010; Daugevičius 2010).

Gelžbetoninis elementas gerai dirbs tik tuomet, kai armatūra bus gerai sukibusi su betonu arba gerai jame inkaruota. Plieninės armatūros sukibties su betonu priklauso nuo betono stiprio, gelžbetoninio elemento geometrijos, armatūros išdėstymo pobūdžio skerspjūvyje, betono apsauginio sluoksnio, trinties tarp armatūros ir betono, kuri atsiranda kietėjančiam betonui traukiantis ir apspaudžiant armatūrą, sukibties įtempių pasiskirstymo inkaravimo ilgyje (Tepfers 2004: 29, 2006a, 2006b; *fib* bulletin 40 2007).

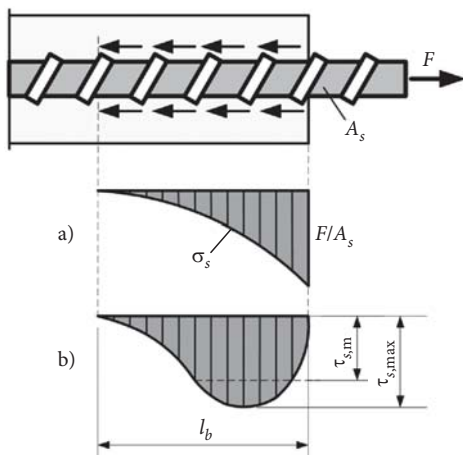
Kompozitinė armatūra yra daugiakomponentė medžiaga, todėl, be išvardytų veiksnių, šia armatūra armuotų gelžbetoninių konstrukcijų betono ir armatūros sukibtį veikia kompozitinės armatūros struktūra, temperatūros ir drėgmės poveikiai, vandenilio potenci-

alo (pH) pokyčiai, sudrėkimo ir išdžiūvimo, užšalimo ir atšilimo ciklai (Ganga Rao *et al.* 2007; Tepfers 2004, 2006a, 2006b).

Mechaninės plieninės ir kompozitinės armatūros savybės skiriasi. Be to, skiriasi kompozitinės armatūros gamybos sąlygos, kokybė, naudojamos skirtingos gamybos technologijos, skirtingi paviršiaus formavimo procesai, gaunamos skirtingos medžiagų savybės išilgine ir skersine kryptimis. Todėl modeliai, taikomi nustatant betono sukibties elgseną su plienine armatūra, nėra visiškai tinkami betoną armuojant kompozitine armatūra.

Skirtingą kompozitinės armatūros ir betono sukibimo elgseną veikia skirtingos medžiagų savybės (Achillides, Pilakoutas, Waldron 1997):

- kompozitinės armatūros tamprumo modulis tiek išilgine, tiek skersine linkme yra mažesnis negu plieninės armatūros;
- kompozitinės armatūros matricos atsparumas šlyčiai yra mažas, todėl kompozitinės armatūros komponentų deformacijos ribojamos;
- skirtingi betono, kompozitinės ir tradicinės plieninės armatūros šilumos plėtimosi koeficientai;
- kompozitinės armatūros skersinis standumas yra kur kas mažesnis negu plieno armatūros.

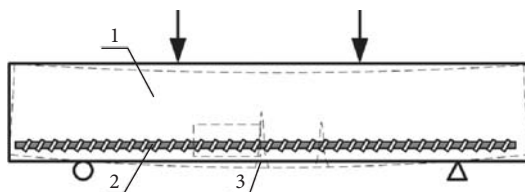


1 pav. Įtempių epiūros, traukiant anglies pluošto strypą iš betono: a – normalinių įtempių; b – sukibimo įtempių
Fig. 1. Distribution of stress of the pulling-out the bar of carbon FRP bar from the concrete: a – normal stress, b – bond stress

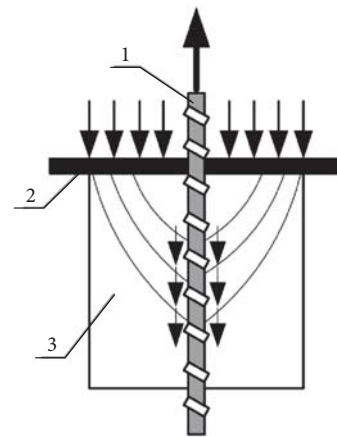
2. Armatūros sukibties su betonu stiprio nustatymas eksperimentiškai

Tiriant armatūros ir betono sukibties stiprį įprastai taikomi du eksperimentinių bandymų metodai. Pirmasis – armatūros strypo ištraukimo iš betono bandymas (Benmokrane *et al.* 2001; Achillides *et al.* 2006), antrasis – sijų bandymas lenkiant (Ganga Rao *et al.* 2001; Thamrin *et al.* 2005).

Taikant sijų bandymą lenkiant (3 pav.) armatūros ir betono sukibties stipris yra mažesnis negu taikant armatūros strypo ištraukimo iš betono bandymą (2 pav.), nes traukiant armatūros strypą iš betono išvengiama statmenųjų plyšių betone. Bandymo ištraukiant metu armatūra turi gana didelį betono apsauginį sluoksnį. Be to, betono sluoksniai apie armatūros strypą yra gniuždomi. Lenkiant siją betono sluoksniai apie tempiamosios zonos armatūrą grynojo lenkimo zonoje yra tempiami. Todėl išilgai sijos tarpatramio tempiamojoje zonoje atsiranda plyšių, taip sumažinamas armatūros ir betono sukibties stipris. Dažnai tyrimuose



2 pav. Principinė armatūros ištraukimo iš betono bandymo schema: 1 – armatūros strypas; 2 – atraminė plokštelė; 3 – betoninis elementas
Fig. 2. Scheme of pull-out bond test: 1 – reinforcing bar; 2 – support plate; 3 – concrete section



3 pav. Principinė sijos bandymo lenkiant schema: 1 – betoninė sija; 2 – tempiamoji armatūra; 3 – plyšys
Fig. 3. Scheme of beam bending test: 1 – concrete beam; 2 – reinforcing bar in tension; 3 – crack

naudojamas lenkiamų sijų bandymas, kuris labiau atspindi realią konstrukcijos elemento elgseną veikiant sutelktajai apkrovai (Tighiourt *et al.* 1998).

3. Armatūros inkaravimo ilgio nustatymas

Armatūros sukibties su betonu suminei jėgai nustatyti strypą iš betoninio bandinio reikia ištraukti arba išstumti. Strypo inkaravimo ruožo ilgyje l_{bd} sukibimo įtempiai τ_s pasiskirsto netolygiai (1 pav., b). Vidutiniai sukibimo įtempiai:

$$\tau_{s,m} = \frac{N}{u \cdot l_{bd}}, \tag{1}$$

čia: F – ištraukiamo (išstumiamo) iš betono strypo jėga; u – strypo skerspjūvio perimetras. Ištraukiamas iš betono strypas plonėja, o išstumiamas – storėja, todėl pirmuoju atveju sukibimo jėga bus mažesnė nei antruoju.

Tyrimai rodo, kad armatūros ir betono sukibties įtempiai veikia tik tam tikrame ilgyje. Pagal STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“ (toliau – STR) bei CEB / FIB Model Code 2010 (toliau – MC) šį ilgį galima apskaičiuoti tokia formule:

$$l_b = \frac{d \cdot f_{fu}}{4 \cdot f_{bd}}, \tag{2}$$

čia: d – armatūros skersmuo; f_{fu} – kompozitinės armatūros tempiamasis stipris; f_{bd} – armatūros sukibties su betonu stipris, apytiksliai lygus skeliamo betono stipriui.

Pagal STR 2.05.05:2005 armatūros ir betono sukibimo stipris apskaičiuojamas taip:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}, \quad (3)$$

čia: f_{ctd} – skaičiuojamasis betono tempiamasis stipris (kai $\gamma_c = 1,5$); η_1 – koeficientas, įvertinantis armatūros padėtį betonuojant ir sukibimo sąlygas; η_2 – koeficientas, įvertinantis strypo skersmens įtaką.

Remiantis MC metodika, armatūros ir betono sukibimo stipris apskaičiuojamas tokia formule:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot (f_{ck} / 20)^{0,5} / \gamma_c, \quad (4)$$

čia: η_1 – koeficientas, kuris lygus 1,8, kai strypas yra rumbuotas; 1,4 – kai strypas rumbuotasis ir nuteptas epoksidinės dervos sluoksniu; 1,1 – kai strypas su įraižomis; 0,9 – kai strypas plokščias; η_2 – koeficientas, įvertinantis armatūros ir betono sukibimo sąlygas; η_3 – koeficientas, įvertinantis armatūros strypo skersmenį; η_4 – koeficientas, priklausantis nuo armatūros tempiamojo stiprio.

Remiantis STR armatūros skaičiuotinis inkaravimo ilgis apskaičiuojamas tokia formule:

$$l_{b,net} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_b \geq l_{b,min}, \quad (5)$$

čia: α_1 – koeficientas, kuris priklauso nuo armatūros skerspjuvio formos; α_2 – koeficientas, priklausantis nuo apsauginio betono sluoksnio storio; α_3, α_4 – koeficientai, priklausantys nuo skersinės armatūros kiekio, esančio armatūros inkaravimo ilgyje; α_5 – koeficientas, apibūdinantis skersinės jėgos įtaką; $l_{b,min}$ – mažiausias inkaravimo ilgis, kuris turi būti ne mažesnis kaip: tempiamo armatūros strypo $l_{b,min} > \max\{0,3l_b; 15d_b; 100 \text{ mm}\}$; gniuždomo strypo $l_{b,min} > \max\{0,6l_b; 15d_b; 100 \text{ mm}\}$.

Projektavimo normose ACI 440.1R-03 (toliau – ACI) kompozitinės armatūros inkaravimo ilgis skaičiuojamas remiantis Benmokrane *et al.* (1998) pasiūlyta formule:

$$l_{bd} = \frac{d \cdot f_{fu}}{K_3}, \quad (6)$$

čia: d – kompozitinės armatūros skersmuo; K_3 – kompozitinės armatūros inkaravimo koeficientas, lygus 18,5; f_{fu} – skaičiuojamasis kompozitinės armatūros stipris.

Kompozitinės armatūros inkaravimo betone ilgis remiantis Japonijos statybos inžinierių sąjungos reko-

mendacijomis (toliau – JSCE) apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$l_{bd} = \alpha_1 \frac{d \cdot f_{fu}}{4 \cdot f_{bd}}, \quad (7)$$

čia: $\alpha_1 = 1,0$ (kai $k_c \leq 1,0$); 0,9 (kai $1,0 \leq k_c \leq 1,5$); 0,8 (kai $1,5 \leq k_c \leq 2,0$); 0,7 (kai $2,0 \leq k_c \leq 2,5$); 0,6 (kai $2,5 \leq k_c$);

Koeficientas k_c nustatomas taip:

$$k_c = \frac{c}{d} + \frac{15 \cdot A_t}{s \cdot d \cdot \frac{E_t}{E_0}}, \quad (8)$$

čia: c – apsauginis betono sluoksnis; d – kompozitinės armatūros skersmuo; A_t – skersinės armatūros skerspjuvio plotas; s – atstumas tarp skersinės armatūros strypų; E_t – skersinės armatūros tamprumo modulis; E_0 – armatūros tamprumo modulis (205 kN/mm²).

Šioje metodikoje armatūros ir betono sukibimo stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_{bd} = \alpha_2 \cdot \left(\frac{0,28 \cdot f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c} \right) \leq 3,2 \text{ N/mm}^2, \quad (9)$$

čia: f_{ck} – charakteristinis betono gniuždomasis stipris; α_2 – koeficientas, įvertinantis armatūros ir betono sukibtį.

Kompozitinės armatūros strypo inkaravimo betone ilgis priklauso nuo betono gniuždomojo stiprio, betono apsauginio sluoksnio ir skersinio armavimo.

Remiantis JSCE metodika kompozitinės armatūros sukibimo su betonu stipris nustatomas pagal armatūros strypo ištraukimo eksperimentinį bandymą, įvertinant armavimo medžiagų tamprumo modulių santykį bei skersinės armatūros įtaką:

$$f_{bd} = \frac{0,318 + 0,795 \left(\frac{c}{d} + \frac{15A_t}{s \cdot d} \frac{E_t}{E_0} \right)}{1 - \frac{53,2}{3,2 \sqrt{f_{cd}} - f_{fu}}}, \quad (10)$$

čia: f_{cd} – skaičiuojamasis betono gniuždomasis stipris; f_{fu} – skaičiuojamasis kompozitinės armatūros stipris.

Benmokrane *et al.* (2003) atliko eksperimentinius anglies pluošto armatūros strypų ištraukimo iš betono bandymus. Buvo siekiama eksperimentiškai nustatyti armatūros inkaravimo ilgio priklausomybę nuo armatūros ir betono mechaninių savybių (1 lentelė). Bandymams panaudoti 100×100 mm skerspjuvio ir 500 mm ilgio betono prizmės bei 1100 mm ilgio

anglies pluošto armatūros strypai, „MTS“ apkrovimo įrenginys. Tyrimai parodė, kad norint visiškai užinkaruoti anglies pluošto armatūros strypus (visiškai išnaudojamas armatūros tempiamasis stipris), inkaravimo ilgis turi būti ne mažesnis kaip $\sim 20d_b$.

1 lentelė. Medžiagų mechaninės savybės

Table 1. Mechanical properties of concrete and reinforcement

Medžiaga	Strypo skersmuo d , mm	Tamprumo modulis E , GPa	Tempiamasis stipris f_{fu} , MPa	Gniuždomasis stipris f_c , MPa
Anglies pluoštas (CFRP)	9,5	128	1536	1536
Betonas	–	29	–	34

4. Eksperimentinio ir inkaravimo tyrimo rezultatų bei skaičiavimų rezultatų analizė

Kompozitinės armatūros inkaravimo betone teorinei analizei naudoti Benmokrane *et al.* (2001) eksperimentinių tyrimų duomenys. Taikant pirmiau aptartas metodikas, teoriškai apskaičiuotas anglies pluošto armatūros inkaravimo ilgis.

Palyginus teorinius ir eksperimentinius duomenis (2 lentelė), matyti, kad mažiausias skirtumas tarp eksperimentinės ir teorinės inkaravimo ilgio reikšmių yra tada, kai skaičiuojama pagal ACI empirinę priklausomybę. Tada $l_{b,ACI} / l_{b,EXP} = 3,67$. Didžiausias skirtumas tarp teorinių ir eksperimentinių duomenų yra tada, kai kompozitinės armatūros inkaravimo ilgis nustatomas remiantis MC rekomendacijomis. Tada $l_{b,MC} / l_{b,EXP} = 10,18$. Skirtumas tarp projektavimo nor-

2 lentelė. Eksperimentinio ir teorinių inkaravimo ilgių rezultatų palyginimas

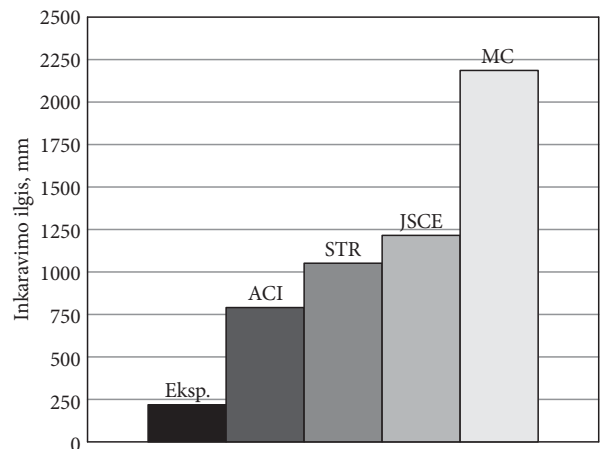
Table 2. A comparison of experimental and theoretical results of anchorage length

Inkaravimo ilgis $l_{b,STR}$, mm	Inkaravimo ilgis $l_{b,ACI}$, mm	Inkaravimo ilgis $l_{b,JSCE}$, mm	Inkaravimo ilgis $l_{b,MC}$, mm	Inkaravimo ilgis $l_{b,EXP}$, mm	Santykis $l_{b,STR} / l_{b,EXP}$	Santykis $l_{b,ACI} / l_{b,EXP}$	Santykis $l_{b,JSCE} / l_{b,EXP}$	Santykis $l_{b,MC} / l_{b,EXP}$
1053	788,758	1218	2189	215	4,89	3,67	5,67	10,18

mų ir rekomendacijų rezultatų yra didelis todėl, kad pagal ACI normas kompozitinės armatūros inkaravimo ilgis tiesiogiai proporcingas armatūros skersmeniui ir tempiamajam stipriui ir atvirkščiai proporcingas empiriniam koeficientui – K_3 . Remiantis STR, MC bei JSCE kompozitinės armatūros inkaravimo ilgis atvirkščiai proporcingas betono gniuždomajam stipriui. Būtent šis skirtumas daro įtaką teorinių skaičiavimų rezultatų pasiskirstymui (4 pav.).

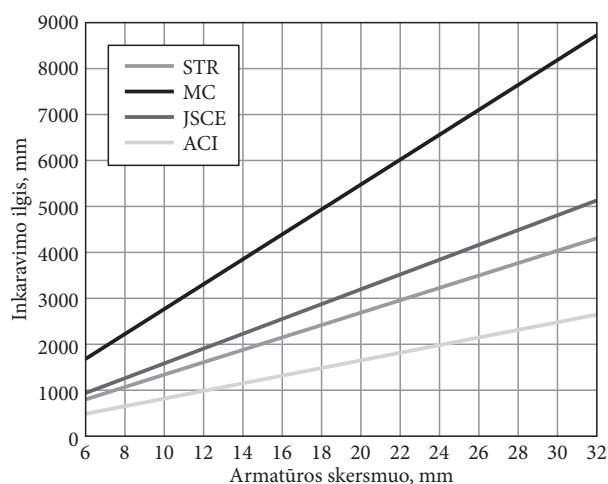
Svarbus veiksnys, kuris turi įtakos armatūros inkaravimo ilgiui, yra armatūros skersmuo. Keičiantis armatūros skersmeniui, kinta ir armatūros bei betono sąlyčio paviršiaus plotas, todėl tai gali būti labai svarbu apskaičiuojant armatūros inkaravimo ilgį. Idealiomis sąlygomis, didėjant armatūros skersmeniui, inkaravimo ilgis didėja tiesine priklausomybe (5 pav.). Taip yra todėl, kad, didėjant armatūros skersmeniui, armatūra turi atlaikyti didesnes įrašas, o vien tik sąlyčio paviršiaus ploto padidėjimo nepakanka, kad armatūra visiškai įsitrauktų į darbą. Nustatyta, kad anglies pluošto armatūros (3 lentelė) inkaravimo ilgis betone, remiantis ACI, STR, MC, JSCE normomis, padidėja tiek kartų, kiek kartų padidėja armatūros skersmuo (5 pav.).

Taip pat pastebimas akivaizdus skirtumas tarp projektavimo normų rezultatų. Armatūros skersmeniui kintant nuo 6 iki 32 mm, MC ir STR rezultatai skiriasi du kartus. Šis skirtumas gaunamas taip pat lyginant MC ir kitas projektavimo normas. Tačiau skirtumas tarp MC ir ACI normų rezultatų, kintant armatūros skersmeniui, yra gerokai didesnis – 3,3 karto.



4 pav. Anglies pluošto armatūros (CFRP) inkaravimo betone ilgis pagal eksperimentinio bandymo duomenis ir remiantis projektavimo normomis STR, ACI, JSCE, MC

Fig. 4. Experimental and theoretical by STR, ACI, JSCE, MC codes anchorage length of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforcement



5 pav. Anglies pluošto armatūros inkaravimo ilgio l_b kitimas, kintant armatūros skersmeniui

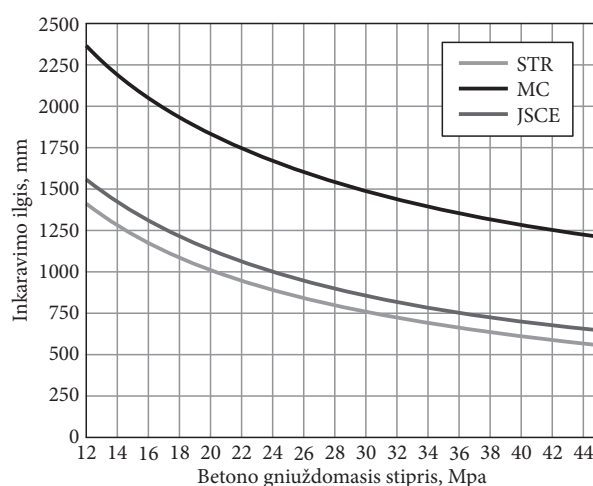
Fig. 5. Effect of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bar diameter on reinforcement anchorage length

Kompozitinės armatūros inkaravimo ilgio reikšmės mažiausiai skiriasi, kai yra apskaičiuotos MC ir JSCE metodikomis – 1,7 karto.

Armatūros ir betono sukibtis priklauso ir nuo kito svarbaus parametro – betono gniuždomojo stiprio. Didėjant betono gniuždomajam stipriui, armatūros inkaravimo ilgis betone mažėja (6 pav.).

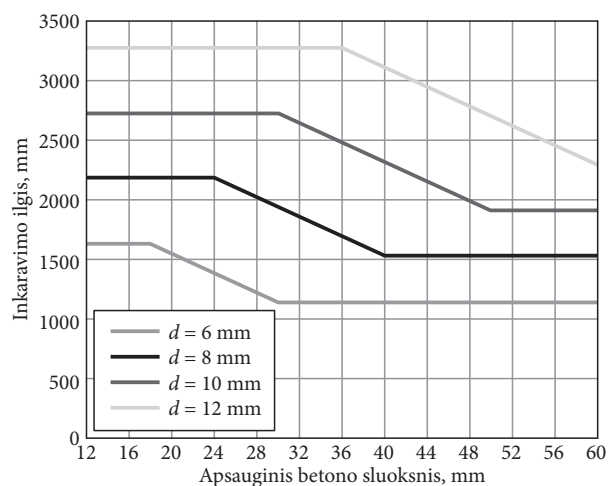
Inkaravimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybė yra netiesinė. Betono gniuždomajam stipriui padidėjus du kartus, armatūros inkaravimo ilgis sumažėja 1,44 karto, padidėjus keturis kartus – 1,71 karto. Šis skirtumas apytiksliai vienodas skaičiuojant MC, STR ir JSCE metodikomis. Mažiausias skirtumas tarp inkaravimo ilgio reikšmių yra skaičiuojant STR ir JSCE metodikomis – 1,13 karto, o $l_{b,MC} / l_{b,STR} = 1,7$. Tačiau armatūros inkaravimo ilgio ir betono gniuždomojo stiprio priklausomybės kreivės yra vienodo pobūdžio (6 pav.).

Gelžbetoninių konstrukcijų armatūra ir betonas turi dirbti bendrai. Todėl armatūrą būtina turi dengti tinkamo storio apsauginis betono sluoksnis. Jis turi būti tankus, stiprus, apsaugoti armatūrą nuo atmosferinio, temperatūrinio, mechaninio ir kitokių poveikių. Skaičiuojant nustatyta, kad apsauginis betono sluoksnis turi įtakos kompozitinės armatūros inkaravimo ilgiui. Didėjant apsauginiam betono sluoksniui, armatūros inkaravimo ilgis mažėja (7 pav.). Pagal MC rekomendacijas nors betono apsauginis sluoksnis ir didėja, kompozitinės armatūros inkaravimo ilgis yra pastovus ir nekinta, kai betono apsauginis sluoksnis pasiekia tris armatūros skersmenis. Kai apsauginis betono sluoksnis yra mažesnis negu trys armatūros skersmenys,



6 pav. Anglies pluošto armatūros inkaravimo ilgio l_b kitimas, kintant betono gniuždomajam stipriui

Fig. 6. Effect of concrete compression strength on carbon fiber reinforced polymer bars anchorage length l_b



7 pav. Anglies pluošto armatūros inkaravimo ilgio l_b kitimas, kintant apsauginiam betono sluoksniui

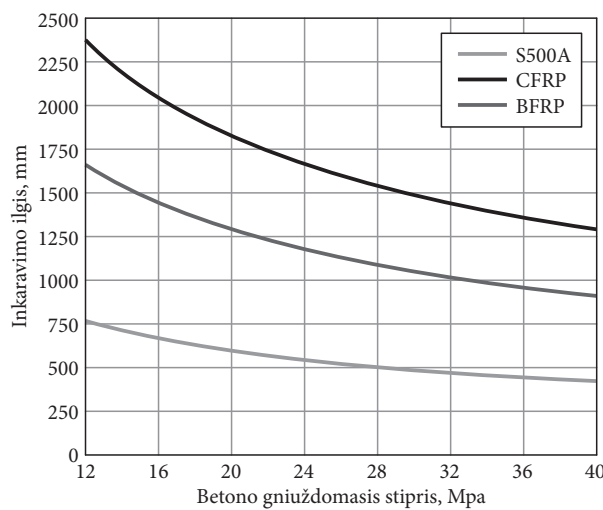
Fig. 7. Effect of concrete cover on anchorage length of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bars

inkaravimo ilgis mažėja pagal tiesinę priklausomybę. Kai apsauginis betono sluoksnis padidėja keturis kartus, kompozitinės armatūros inkaravimo ilgis betone sumažėja 18 proc., kai 6 kartus – 42 proc. (7 pav.). Skaičiavimai parodė, kad priklausomai nuo armatūros skersmens, norint optimaliai sumažinti kompozitinės armatūros inkaravimo ilgį, imti didesnę negu $3d_b$ betono apsauginį sluoksnį yra neracionalu.

Armatūros ir betono sukibčiai įtakos gali turėti ir mechaninės armatūros strypo savybės. Viena iš jų – tempiamasis stipris. Buvo nagrinėjami trys armatūros tipai: anglies pluošto (CFRP), bazalto pluošto (BFRP) ir tradicinė plieninė armatūra (S500 A) (3 lentelė).

3 lentelė. Armatūros tipai ir jų mechaninės savybės
Table 3. Mechanical properties of reinforcement types

Armatūra	Strypo skersmuo d , mm	Tamprumo modulis E , GPa	Tempiamasis stipris f_{ju} , MPa
Anglies pluoštas (CFRP)	6,0	128	1536
Bazalto pluoštas (BFRP)		45	1084
Plienas S 500A		205	490



8 pav. Skirtingo tipo armatūros inkaravimo ilgio kitimas, kintant betono gniuždomajam stipriui, kai naudojama skirtingo tipo armatūra

Fig. 8. Effect of concrete compression strength on anchorage length when different reinforcement types are used

Nustatyta, kad naudojant tradicinę plieninę armatūrą, jos inkaravimo ilgis betone yra tris kartus mažesnis, negu naudojant anglies pluošto armatūrą, ir maždaug du kartus mažesnis, negu naudojant bazalto pluošto armatūrą (8 pav.). Didėjant betono gniuždomajam stipriui, armatūros inkaravimo ilgis mažėja, tačiau skirtumas tarp inkaravimo ilgio reikšmių, naudojant skirtingo tipo armatūrą, išlieka toks pat. Naudojant tik kompozitinę armatūrą santykis – $l_{b,CFRP} / l_{b,BFRP} = 1,42$.

6. Išvados

1. Apskaičiuojant kompozitinės armatūros inkaravimo ilgį betone galima taikyti įprastą plieninei armatūrai projektavimo normų reglamentuojamą metodiką, tačiau turi būti taikomi koeficientai, įvertinan-

tys agresyviosios aplinkos ir temperatūros poveikį kompozitinės armatūros mechaninėms savybėms. Koeficientų reikšmės turi būti nustatytos atliekant eksperimentinius tyrimus.

- Atlikta anglies pluošto strypinės armatūros inkaravimo ilgio skaičiavimo metodų (ACI, STR, JSCE, MC) teorinė analizė parodė, kad šiais metodais apskaičiuotas inkaravimo ilgis 3,67–10,18 karto didesnis už eksperimentiniais tyrimais gautus inkaravimo ilgius. Tai rodo, kad siūlomos skaičiavimo metodikos suteikia gan didelę atsargą ir neatspindi tikrosios kompozitinės armatūros elgsenos betone.
- Atlikti tyrimai parodė, kad ACI, STR, JSCE, MC siūlomos armatūros inkaravimo skaičiavimo metodikos vienodai tinka skirtingo skersmens armatūrai. Taikant visas metodikas apskaičiuotasis armatūros inkaravimo ilgis kinta proporcingai armatūros skersmens kitimui.
- Atlikta analizė parodė, kad didėjant betono stipriui armatūros inkaravimo ilgis mažėja neproporcingai. Betono gniuždomajam stipriui padidėjus du kartus, jame esančios armatūros skaičiuotinis inkaravimo ilgis sumažėja 1,44 karto, o betono stiprį padidinus keturis kartus inkaravimo ilgis sumažėja tik 1,71 karto.
- Teoriniai skaičiavimai parodė, kad priklausomai nuo armatūros skersmens, norint optimaliai sumažinti kompozitinės armatūros inkaravimo ilgį, imti didesnę negu $3d_b$ betono apsauginį sluoksnį yra neracionalu.
- Nustatyta, kad naudojamos tradicinės plieno armatūros inkaravimo ilgis betone yra tris kartus mažesnis, negu naudojant anglies pluošto (CFRP) armatūrą, ir maždaug du kartus mažesnis, negu naudojant bazalto pluošto (BFRP) armatūrą.

Literatūra

- Achillides, Z.; Pilakoutas, K.; Waldron, P. 1997. Bond Behaviour of FRP Bars to Concrete. Non – metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, in *Proceedings of the International Symposium, Sapporo*, 877–884.
- Achillides, Z.; Pilakoutas, K. 2006. FE modeling of bond interaction of FRP bars to concrete, *Structural Concrete* 7(1): 7–16. doi:10.1680/stco.2006.7.1.7
- American Concrete Institute. 2004. *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*. ACI 440.1R-03. Detroit, Michigan: ACI, 42.
- Atutis, M.; Valivonis, J. 2010. Reinforcement Characteristics of Prestressed Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Tendons, *Engineering Structures and Technologies* 2(2): 71–78.

- Benmokrane, B.; Zhang, B.; Laoubi, K.; Tighiouart, B.; Lord, I. 2001. *Mechanical and Bond Properties of New Generation of Isorod CFRP Reinforcing Bars for Concrete Structures*: technical progress report. ISIS Canada. 23 p.
- Daugevičius, M. 2010. *Influence of Long – Term Load on The Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fibre Composite*: PhD dissertation. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: Technika. 150 p.
- fib Model Code 2010. *First complete draft – Volume 1. Draft Model Code*. Switzerland. 318 p.
- fib bulletin 40. 2007. *FRP reinforcement in RC structures. Technical report*. Switzerland. 160 p.
- Ganga Rao, H. V. S.; Taly, N.; Vijay, P. V. 2007. *Reinforced concrete design with FRP composites*. CRC Press. Taylor & Francis Group. 400 p.
- JSCE. 1997. *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforcing materials. Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials*, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan.
- Skuturna, T. 2009. *Research of Flexural Reinforced Concrete Members Strengthened with External Carbon Fibre*: PhD dissertation. Vilnius Gediminas Technical University. Vilnius: Technika. 138 p.
- Statybos techninis reglamentas STR 2.05.05:2005. *Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. Vilnius.
- Tepfers, R. 2004. *Bond clause proposal for FRP-bars/rods in concrete based CEB/FIP Model Code 90 with discussion of needed tests*. Goteborg, Sweden.
- Tepfers, R. 2006a. Bond clause proposals for FRP bars/rods in concrete based on CEB/FIP Model Code 90. Part 1: Design bond stress for FRP reinforcing bars, *Structural Concrete* 7(2): 47–55. doi:10.1680/stco.2006.7.2.47
- Tepfers, R. 2006b. Bond clause proposals for FRP bars/rods in concrete based on CEB/FIP Model Code 90. Part 2 Design lengths and tension stiffening, *Structural Concrete* 7(2): 57–63. doi:10.1680/stco.2006.7.2.57
- Tighiourat, B.; Benmokrane, B.; Gao, D. 1998. Investigation in bond of concrete member with fiber reinforced polymer (FRP) bars, *Construction and Building Materials* 12(8): 453–462. doi:10.1016/S0950-0618(98)00027-0
- Thamrin, R.; Kaku, T. 2005. Development length evaluation of Reinforced beam with CFRP bars, in *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)*. Hong Kong, China, 385–391.
- Valivonis, J.; Marčiukaitis, G. 2006. Gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimo anglies pluoštu technologiniai ir konstrukciniai ypatumai, *Technological and Economic Development of Economy* 12(2): 77–83.

ANCHORAGE CHARACTERISTICS OF NON-METALLIC REINFORCEMENT FOR CONCRETE

M. Atutis, J. Valivonis

Summary. This article analyzes the basic problems of the anchorage of non-metallic reinforcement for concrete and reviews calculation methods of anchorage length using ACI, STR, JSCE and fib Model Code 2010. The paper presents a comparison of experimental (Benmokrane *et al.* 2003) and theoretical results and studies the major types of experimental tests to determine the bond strength of FRP reinforcing bars. The anchorage length of continuous fiber reinforcement (non-metallic reinforcement bars) is calculated using different expressions proposed in codes and recommendations, thus providing with particular results. The article also shows how the anchorage length of a reinforcing bar is influenced by mechanical properties of reinforcement and concrete, concrete cover and the diameter of the reinforcing bar. Experimental results are compared with theoretically obtained values referring to codes and recommendations. A scatter of results is 3.67-10.18. It was found, that the anchorage length of the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bar calculated by ACI, STR, JSCE and MC increases in the number of times an increase in bar diameter. It has been stated, that anchorage length decreases by 1,44 and 1,71 when the compression strength of concrete increases by 2 and 4. Theoretical calculations have revealed that depending on a bar diameter, in order to minimize the anchorage length of non – metallic reinforcement, the use of the concrete cover higher than $3 d_b$ is not feasible. Moreover, when using conventional steel for concrete reinforcement, anchorage length is 3 times less than that of a concrete member with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforcement and 2 times less than using basalt fiber reinforced polymer (BFRP) reinforcement. Calculation methodology for the anchorage length of a steel reinforcing bar can be used for calculating the anchorage length of non-metallic reinforcement. However, individual coefficients of different FRP reinforcement must be applied to determine environmental factors and temperature of mechanical properties of non-metallic reinforcement. The values of coefficients must be determined conducting experimental tests.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer, bazalt fiber reinforced polymer, anchorage length of a reinforcing bar, bond strength, pull-out test.

Mantas ATUTIS. A structural engineer at JSC “Konstruktorių CECHAS”, Lithuania. B. Sc. (CE) and M.Sc. (CE) at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). Research interests: mechanics of reinforced concrete, prestressed concrete, new composite materials.

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