

Primljen / Received: 7.7.2013.

Ispravljen / Corrected: 5.2.2014.

Prihvaćen / Accepted: 4.3.2014.

Dostupno online / Available online: 10.5.2014.

Prionljivost armaturne šipke u spoju od polimera armiranog vlaknima

Autori:



Kiarash Koushfar, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
kiarash.frp@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Ahmad Baharuddin Abd. Rahman**
Tehničko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
baharfka@gmail.com



Doc.dr.sc. **Yusof Ahmad**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
a-yusof@utm.my



Izv.prof.dr.sc. **Mohd Hanim Osman**
Tehničko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
mhanim@utm.my

Prethodno priopćenje

Kiarash Koushfar, Ahmad Baharuddin Abd. Rahman, Yusof Ahmad, Mohd Hanim Osman

Prionljivost armaturne šipke u spoju od polimera armiranog vlaknima

U ovom se radu prikazuje ispitivanje prijanjanja i proklizavanja armaturne šipke u novorazvijenoj injektiranoj spojnici sa staklenim vlaknima (eng. glass fiber-reinforced polymer - GFRP). Ukupno dvadeset sedam uzoraka ispitano je postupnim povećavanjem osnog vlačnog opterećenja. Rezultati dobiveni ispitivanjem uzoraka usvojeni su za modeliranje ovisnosti naprezanje prijanjanja - proklizavanje, što je uspoređeno sa zahtjevima iz normi i odredbi. Rezultati pokazuju da se u konusnim spojnicama razvija veća čvrstoća prijanjanja i otpornost na opterećenje usporedo sa smanjenjem promjera u srednjem dijelu.

Ključne riječi:

spojnica, polimer armiran staklenim vlaknima, naprezanje prijanjanja, proklizavanje, predgotovljeni spoj

Preliminary note

Kiarash Koushfar, Ahmad Baharuddin Abd. Rahman, Yusof Ahmad, Mohd Hanim Osman

Bond behavior of the reinforcement bar in glass fiber-reinforced polymer connector

This paper presents the bond stress – slip behavior of a newly developed grouted splice connection fabricated by glass fiber-reinforced polymer (GFRP). A total of twenty seven specimens were tested under increasing axial tension load. Results from the test specimens were adapted to model a bond stress – slip law to be compared with the requirements provided by design codes and provisions. The results show that by reducing mid-length diameter, higher bond strength and load capacity are generated in the tapered splice sleeves.

Key words:

Splice connector, glass fiber-reinforced polymer, bond stress, slip, precast connection

Vorherige Mitteilung

Kiarash Koushfar, Ahmad Baharuddin Abd. Rahman, Yusof Ahmad, Mohd Hanim Osman

Verbundverhalten von Bewehrungsstahl in Verbindungen aus glassfaserverstärktem Polymer

In dieser Arbeit wird das Haft- und Rutschverhalten einer neu entwickelten mit glassfaserverstärktem Polymer (GFRP) verarbeiteten Spleißverbindung dargestellt. Insgesamt sind siebenundzwanzig Proben unter steigenden axialen Zugkräften untersucht worden. Der Einfluss wichtiger Parameter, wie z.B. des inneren Durchmessers der GFRP Verbindung und der Anzahl verwendeter Lagen aus GFRP, ist überprüft worden. Die Versuchsergebnisse sind angewandt worden, um ein Haftungs- und Rutschverhaltensgesetz aufzustellen und das gegebene Model mit den Anforderungen bestehender Regelwerke und Bestimmungen zu vergleichen.

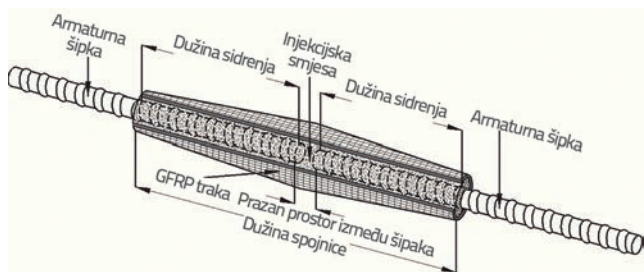
Schlüsselwörter:

Spleißverbindung, glassfaserverstärktes Polymer, Haftspannung; Rutschverhalten, Fertigteil-Anschluss

1. Uvod

Danas se za povezivanje armaturnih šipaka koristi nekoliko metoda. Može se između ostalog spomenuti spajanje sponama, zavarivanje, spajanje pomoću nastavaka s navojima i injektirani sustavi. Injektirani se sustavi često koriste kod predgotovljenih betonskih konstrukcija, a omogućuju postizanje vlačnih i tlačnih čvrstoća armaturnih šipaka koje su za pedeset posto veće od vrijednosti popuštanja koje su zadane za same šipke [1].

Spojnicica se obično sastoji od čelične cilindrične cijevi otvorenih krajeva, što omogućuje umetanje armaturnih šipaka. Nakon postavljanja šipke, posebna injekcijska smjesa visoke početne čvrstoće ubrizgava se u spojnicicu pomoću PVC cijevi koje su spojene na ulazu i izlazu spojnice. Krajevi armature ne moraju se posebno pripremati. Razmak između krajeva armature ne smije biti veći od 25 mm. Varijantno rješenje je spojnicica s unutarnjim navojem na jednoj strani, što omogućava sigurno spajanje armature s navojem. Druga strana spojnice nema navoj i omogućuje umetanje i injektiranje armature (slika 1.).



Slika 1. Injektirana cjevasta (konusna) spojnicica

Djelotvornost spoja ovisi o čvrstoći prianjanja na kontaktu između injekcijske smjese i armature šipke. Općenito uzevši, spoj je interaktivni mehanizam koji omogućuje prijenos sile između armaturnih šipaka i okolnog betona pa stoga osigurava kompozitno djelovanje između ta dva materijala.

Može se reći da otpornosti spoja doprinose tri osnovna elementa: kemijsko prianjanje, tarni otpor i mehaničko uklještenje koje nastaje uslijed nosivog djelovanja na kontaktu između rebra šipke i betona. Do prianjanja dolazi zbog kemijskog povezivanja cementa i šipke te zbog sile skupljanja koja se razvija tijekom njege; osim toga, stupanj prionljivosti ovisi i o svojstvima materijala kojim je šipka okružena [2].

Adhezija i nosivo djelovanje aktiviraju se nakon popuštanja kemijske prionljivosti. Adhezija na kontaktu između šipke i betona, koja se suprotstavlja proklizavanju, pojačava se ako na bočnoj površini šipke postoji radialni pritisak [3]. Očvršćenje koje se javlja u zoni veznog sidrenja značajno doprinosi čvrstoći prianjanja [4, 5, 6]. Očvršćenje se može postići nanošenjem normalnog pritiska u smjeru okomitom na osnu silu u armaturnim šipkama [7, 8].

U građevinskoj industriji, do korozije na spojevima armature najčešće dolazi zbog djelovanja natrijevog klorida koji se može

naći kako u morskim okruženjima tako i u soli za odmrzavanje koja se razastire po ploči mostova i po parkiralištima. Sadašnji mehanički spojevi osjetljivi su na koroziju, što može dovesti do slabljenja čvrstoće konstrukcije. Stoga se u građevinarstvu traže alternativna rješenja koja bi mogla zamijeniti čelične komponente. Jedno od mogućih rješenja je i primjena polimera armiranih vlaknima (eng. *fiber-reinforced polymer* - FRP) kao zamjene za tradicionalne čelične spojeve. FRP materijali mogu se smatrati prihvatljivom zamjenom za tradicionalne čelične spojeve jer su zbog svojstava materijala prikladniji od čelika i to u pogledu težine, trajnosti i otpornosti na koroziju.

U ovoj eksperimentalnoj studiji, GFRP spojevi projektirani su tako da mogu izdržati vlačno opterećenje u spojenim šipkama. Cjevasti se spoj predlaže kao zamjena za sadašnje metalne spojeve i to za spajanje montažnih betonskih elemenata. U istraživanju se razmatra utjecaj GFRP spojeva srednje dužine i broja GFRP slojeva na učinkovitost spoja, te se u tom smislu analizira odnos naprezanje prianjanja – proklizavanje na kontaktu između armaturnih šipaka i injekcijske smjese.

2. Eksperimentalni program

U istraživanju se postupnim nanošenjem osnovnog vlačnog opterećenja analizira čvrstoća prianjanja – proklizavanje čeličnih armaturnih šipaka koje su povezane pomoću konusne (čunjaste) spojnice od GFRP-a. Prate se dimenzije uzoraka, kao primjerice promjer na sredini spojnice. Ispitivanja su obavljena u uređaju za određivanje vlačne čvrstoće. U okviru programa ispitivanja korišten je servouređaj za hidraulička ispitivanja tip Dartec 500 kN. U svim je ispitivanjima brzina nanošenja opterećenja iznosila 0,2 kN/s, što je kontrolirano pomoću sklopa za kontrolu sustava. Ukupno 18 konusnih spojnicica od GFRP-a i 9 čeličnih (kontrolni uzorci) ispitano je postupnim povećavanjem osnovnog vlačnog opterećenja. Rezultati dobiveni na kontrolnim uzorcima uspoređeni su s rezultatima za spojeve od GFRP-a tipa da bi se mogao analizirati utjecaj promjene promjera na sredini spoja od GFRP-a, te vrste materijala korištenog za fiksiranje, na svojstva prionljivosti injektirane spojnice. U svim GFRP spojnica je kao matrica korištena ista epoksidna smola.

2.1. Svojstva materijala

Svi su uzorci izrađeni od istih GFRP traka, epoksidne smole i injekcijske smjese. U ovom programu ispitivanja korištena je injekcijska smjesa Sikagrout-215. To je samonivelirajuća cementna smjesa s kompenzacijom dvostrukog skupljanja, te s produženim djelovanjem u skladu s lokalnim zahtjevima u pogledu vanjske temperature. Prosječna čvrstoća smjese Sikagrout-215 iznosi otprilike 47,86 N/mm² nakon sedam dana njege.

Sve čelične armature šipke korištene u ovoj eksperimentalnoj studiji odlikuju se sličnim geometrijskim svojstvima. Promjer im je 16 mm, prosječna površina presjeka: 201,06 mm², razred 460 prema BS4449 s uzorkom rebra tipa 2 [9]. Prosječna

vlačna čvrstoća čelika, dobivena tijekom tri pojedinačna ispitivanja vlačne čvrstoće šipaka, iznosi 573,95 N/mm², dok granično opterećenje iznosi 115,40 kN, a najmanja granica popuštanja 489,90 N/mm².

U studiji su korištene GFRP trake WOVEN ROVING XD-600 (slika 2.). Predivo (WR) sastoji se od staklenog prediva koje se prede u tkaninu, s jednostavnim tkanjem usmjerene izvedbe. WR ima dvosmjerna ojačanja izvedena od odsukanih vlakana u paralelnim redovima s nizom omatanja (smjer valjanja) i poprečnim nizom (širina valjanja).

Nezasićena epoksidna smola EPICOTE 1006 SYSTEM je izoftalična smola posebno razvijena za tropske klimatske uvjete. Sastojak smole miješa se na sobnoj temperaturi u skladu s uputama proizvođača. Smola se pigmentira dodavanjem učvršćivača EPICOTE 1006 HardenerPart B, te se nakon toga obavlja ispitivanja kako se dodavanjem pigmentne paste ne bi ugrozila učinkovitost laminata. U ovom se istraživanju koristi smola jer se odlikuje sljedećim svojstvima: kompatibilna je sa staklenim vlaknima, ima nisku razinu viskoznosti što omogućuje postizanje prikladnog zasićenja vlakana tijekom postupka, vrijeme njege je kratko i cijena je prihvatljiva.



Slika 2. GFRP tkanina od tkanog prediva

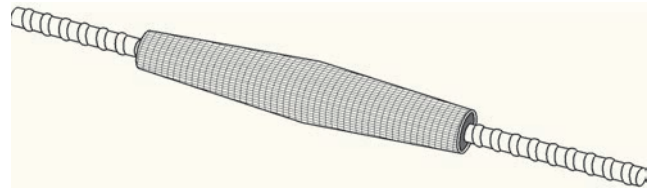
2.2. Uzorci korišteni u ispitivanju

Kontrolni uzorak i konusna GFRP spojnica prikazani su na slikama 3. i 4. Pripremljeni su uzorci raznih promjera spoja i s raznim brojem GFRP slojeva kako bi se odredilo na koji način te varijacije utječu na djelotvornost spoja. Za svaku varijaciju izrađena su po tri identična uzorka. Ukupna dužina svih uzoraka (L_s) iznosila je 360 mm, a promjer na oba kraja (D_0) iznosio je 35 mm.



Slika 3. Čelični kontrolni uzorak

Ispitano je devet kontrolnih uzoraka bez poveznog mehanizma na spoju te su dobiveni rezultati uspoređeni s rezultatima GFRP spojnice. Za kontrolne uzorke korištene su cijevi od mekog čelika debljine 4 mm.

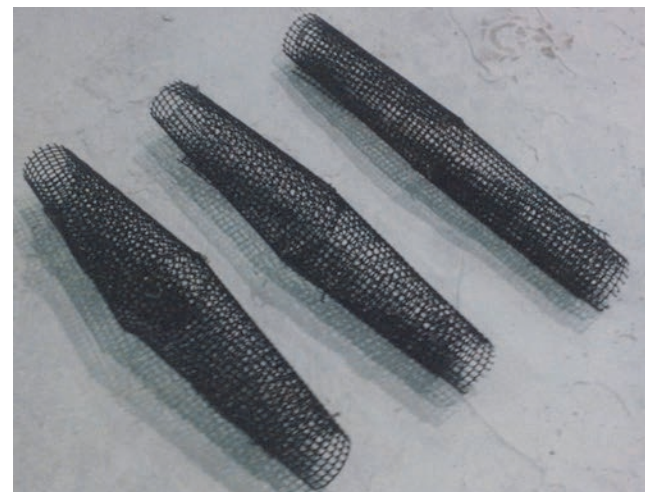


Slika 4. Injektirani GFRP spoj

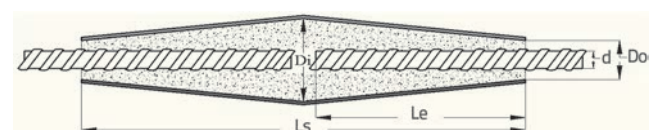
GFRP spojnice izrađene su omatanjem 4 i 5 slojeva GFRP trake oko konusno oblikovanih plastičnih kalupa kako bi debljina bila slična debljini čelične cijevi (slika 5.). Za svaki su uzorak korištene dvije rebraste armaturne šipke visoke čvrstoće, duljine 400 mm i promjera 16 mm. Svaka od tih šipaka je na jednom kraju sučeono povezana s krajem druge šipke u konusnoj GFRP spojnici, dok je drugi kraj objiju šipaka bio slobodan. Šipke su međusobno povezane injekcijskom smjesom Sika grout – 215 u konusnoj GFRP spojnici. Parametri promatrani u ovom ispitivanju su:

- promjer GFRP spoja na sredini: 50 mm, 65 mm i 75 mm,
- broj GFRP slojeva: po 4 i 5 slojeva korišteno je za svaku seriju uzoraka.

Prema tim parametrima, tip uzorka G5-D50 se odnosi na uzorak omotan s pet slojeva GFRP trake kojem promjer na sredini iznosi 50 mm. Dodatni detalji o tipovima uzoraka prikazani su na slici 6. i u tablici 1.



Slika 5. Plastični kalupi



Slika 6. Dimenzije konusnih uzoraka (promatrani parametri)

Tablica 1. Geometrijska svojstva uzoraka

Uzorak	Broj GFRP slojeva	Di [mm]	Do [mm]	Zaštitni sloj na sredini, c [mm]	Materijal od kojeg je sastavljena spojnica
C-D50	–	50	50	$1,06 \cdot d_b$	Čelik
C-D65	–	65	65	$1,53 \cdot d_b$	Čelik
C-D75	–	75	75	$1,84 \cdot d_b$	Čelik
G5-D50	5	50	30	$1,06 \cdot d_b$	GFRP
G4-D50	4	50	30	$1,06 \cdot d_b$	GFRP
G5-D65	5	65	30	$1,53 \cdot d_b$	GFRP
G4-D65	4	65	30	$1,53 \cdot d_b$	GFRP
G5-D75	5	75	30	$1,84 \cdot d_b$	GFRP
G4-D75	4	75	30	$1,84 \cdot d_b$	GFRP

Dužina spojnice $L_s = 22,5 \cdot d_b = 360$ mm, promjer čelične šipke $d_b = 16$ mm, pokrivena dužina šipke $L_e = 4,69 \cdot d_b = 75$ mm, injektirani materijal: Sika grout-215.

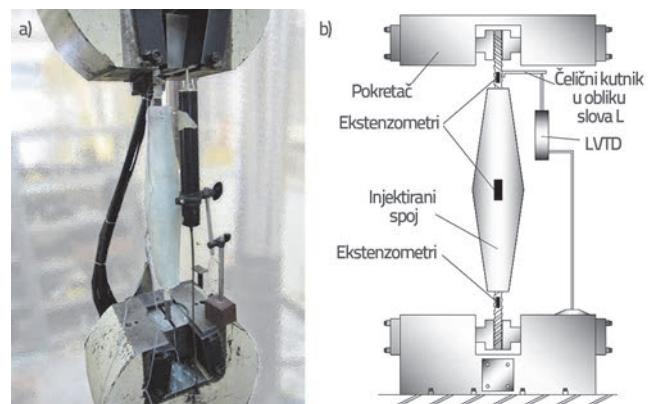
2.3. Prikaz ispitivanja

Uzorcima su ispitani pomoću uređaja za ispitivanje Dartec Universal Testing Machine (slika 7.a). Uzorcima su vertikalno pridržavani pomoću stezaljki potisnutih klinom. Klinovi su omogućili stvaranje bočnog pritiska koji je dovoljan za sprečavanje klizanja između čela stezaljke i čeličnih šipaka koje su izvirivale iz GFRP spojnice. Vrijednosti naprezanja – relativna deformacija te vrijednosti proklizavanja očitane su nakon prikladnog stezanja uzoraka.

Na konusne GFRP spojnice postupno se nanosilo vlačno opterećenje kako bi se odredio odnos između naprezanja i relativne deformacije na spoju, isto kao i proklizavanje koje se javlja u području spoja između šipke i GFRP-a. Dva ekstenzometra instalirana su na povezane šipke na udaljenosti od jednog promjera šipke, d , od kraja injektirane spojnice, i to radi mjerenja relativne vlačne deformacije u čeličnoj šipki. Mjerači deformacije postavljeni su na temelju preporuka koje se daju u ASTM A1034 [10]. Osim toga, jedan mjeri deformacije instaliran je na sredini GFRP spojnice kako bi se ispitalo uzdužno ponašanje spoja pri postupnom povećanju vlačnog opterećenja. Način postavljanja tri mjeri deformacija prikazan na slici 7.b.

Jedan uređaj LVDT (niskonaponski pretvornik pomaka) postavljen je ispod čeličnog kutnika u obliku slova L koji je spojen s čeličnom šipkom (slike 7.a i 7.b) kako bi se tako izmjerilo proklizavanje spojenih šipaka. Magnetsko postolje uređaja LVDT postavljeno je na nepomičnu donju stezaljku. Pri nanošenju vlačnog opterećenja, gornja stezaljka povlačila je uzorak prema gore. Vrijednosti proklizavanja čelične šipke pri povećanju osnovog opterećenja mjerene su bilježenjem vertikalnog pomaka čeličnog L-kutnika pomoću LVDT-a. Prije ispitivanja, uzorci su ostavljeni na sobnoj temperaturi od 27 ± 2 °C pri 70 ± 5 relativne vlage u vremenu od sedam dana radi kondicioniranja i njege epoksidne smole. Nakon njege, uzorci

su bili spremni za ispitivanje. Tlačna ispitivanja obavljena su na kockama dimenzije $100 \times 100 \times 100$ mm injekcijske smjese sedmog dana njege, kako bi se odredila tlačna čvrstoća injekcijske smjese nakon sedam dana.



Slika 7. Konfiguracija uzorka i prikaz ispitivanja: a) prikaz vlačnog ispitivanja; b) postavljanje LVDT-a i mjeri deformacija

3. Analiza rezultata ispitivanja

3.1. Prianjanje i proklizavanje šipaka u uzorcima

Zbog složenosti detaljnog određivanja čvrstoće prianjanja i prisutnosti brojnih faktora koji utječu na učinkovitost prianjanja [11, 12], naprezanje prianjanja između površine šipke izračunano je u skladu s točkama 3.12.8.3 dokumenta BS8110 – Drugi dio [13], pri čemu se uzima da je naprezanje prianjanja jednako sili u šipki podijeljenoj s površinom koja doprinosi otporu sidrenja. Zbog nedostatka informacija o stvarnoj raspodjeli naprezanja prianjanja, prikladno bi bilo usvojiti pojednostavljeno prema kojem je naprezanje prianjanja ravnomjerno raspoređeno duž duljine sidrenja armature. U tom kontekstu, naprezanje prianjanja može se izračunati pomoću jednadžbe (1):

$$\tau = \frac{P_u}{\pi \cdot d \cdot L_e} \quad (1)$$

gdje je:

- τ - naprezanje prijanjanja
- P_u - granično opterećenje čupanja
- d - nazivni promjer šipke
- Le - duljina sidrenja.

Rezultati graničnog opterećenja, graničnog naprezanja prijanjanja i odgovarajućeg proklizavanja prikazani su za sve uzorke u tablici 2. Vrijednosti graničnog naprezanja prijanjanja izračunane su na temelju jednadžbe (1). Vrijednosti proklizavanja prikazane u tablici 2 i na slikama od 8. do 11. očitane su izravno s LVDT-a. Osim kod kontrolnih uzoraka, vrijednosti proklizavanja dobivene su proklizavanjem na šipki i popuštanjem šipke temeljem vrijednosti relativne deformacije

čelika koje su prelazile relativnu deformaciju popuštanja od 0,002 (2000 mm/m), vidi slike 9. i 11. Kod graničnog opterećenja dolazilo je do popuštanja čeličnih šipaka te nakon toga do naglog čupanja zbog neodgovarajuće duljine sidrenja. Zbog toga je bilo nemoguće obaviti očitavanje, pa se stoga nisu ni mogle zabilježiti silazne krivulje naprezanje prijanjanja – proklizavanje. Ovaj odziv sličan je rezultatima analize o kojoj izvještavaju Abbrishami i Mitchell [14, 15]. Proklizavanje zbog izduženja GFRP spojnice smatra se zanemarivim jer je deformacija u GFRP spojnici manja od 0,0006 (600 mm/m), vidi sliku 13.

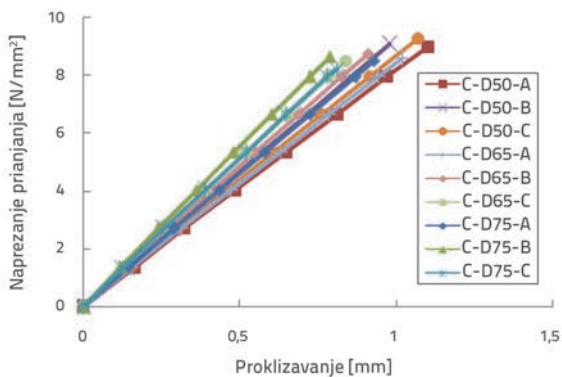
Kao što se vidi iz tablice 2., najveće naprezanje prijanjanja zabilježeno je na 50-milimetarskim uzorcima ovijenima s pet slojeva GFRP-a, dok je najmanje naprezanje prijanjanja

Tablica 2. Sažeti prikaz rezultata ispitivanja

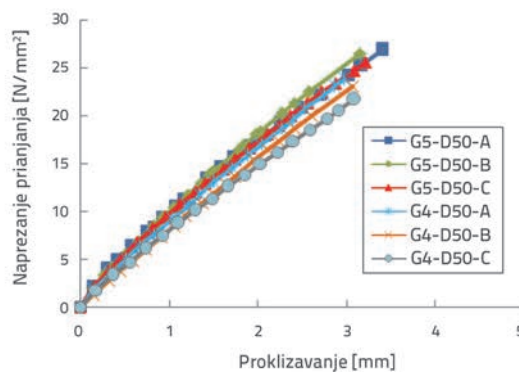
Uzorak	Br.	Granično opterećenje [kN]	Prosječno granično opterećenje [kN]	Granično naprezanje prijanjanja Jednadžba (1) [N/mm ²]	Prosječno granično naprezanje prijanjanja [N/mm ²]	Proklizavanje [mm]
C-D50	A	33,93		9		1,1
	B	34,21	34,41	9,07	9,12	0,98
	C	35,08		9,3		1,07
C-D65	A	32,44		8,6		1,02
	B	33,06	32,54	8,77	8,63	0,91
	C	32,12		8,52		0,84
C-D75	A	32,11		8,52		0,93
	B	32,72	31,97	8,68	8,48	0,79
	C	31,09		8,25		0,81
G5-D50	A	101,44		26,91		3,4
	B	99,94	99,37	26,51	26,36	3,15
	C	96,74		25,66		3,21
G4-D50	A	89,73		23,8		2,97
	B	87,27	86,31	23,15	22,90	3,06
	C	81,94		21,74		3,09
G5-D65	A	91,53		24,28		2,93
	B	92,23	91,57	24,46	24,29	3,24
	C	90,94		24,12		2,94
G4-D65	A	87,37		23,18		2,74
	B	88,19	86,64	23,39	22,98	3,12
	C	84,36		22,38		3,37
G5-D75	A	87,37		23,4		3,04
	B	89,90	88,49	23,85	23,48	3,26
	C	88,21		23,18		2,81
G4-D75	A	83,96		22,55		2,93
	B	85,01	84,44	22,27	22,40	2,89
	C	84,34		22,37		3,47

zabilježeno na 75-milimetarskim uzorcima ovijenima s četiri sloja GFRP-a. Maksimalno naprezanje prijanjanja kontrolnih uzoraka C-D50 iznosilo je samo 9,12 N/mm², što je manje od naprezanja prijanjanja zabilježenog kod uzoraka s konusnom GFRP spojnicom. To bi se moglo objasniti neodgovarajućim radijalnim učvršćenjem injekcijske smjese u spojevima. Maksimalno naprezanje prijanjanja kod uzoraka G-D50 za konusnu GFRP spojnicu iznosilo je 26,36 N/mm², što je otprilike tri puta više nego kod kontrolnih uzoraka. To navodi na zaključak da ovijanje koje daje konusna GFRP spojnica bitno utječe na uzorak koji je otporniji na opterećenje. Rezultati ispitivanja iz tablice 2. također pokazuju da se granično opterećenje i čvrstoća prijanjanja koju uzorak može izdržati smanjuju s povećanjem promjera konusne spojnice na sredini njezine dužine [16]. Može se zaključiti da iako čunjasta smjesa uspješno prenosi vlačna naprezanja na konusnu spojnicu, zbog glatke unutarnje površine konusne GFRP spojnice otpor se ostvaruje samo kroz kemijsko ili adhezijsko prijanjanje smjese, što nije dostatno za preuzimanje naprezanja. Manji promjeri na sredini dužine mogu kontrolirati razvoj pukotina od sila cijepanja pa se tako povećava prionjivost uzorka. Veza između naprezanja prijanjanja i proklizavanja, dobivena kroz eksperimentalne rezultate, prikazana je na slikama od

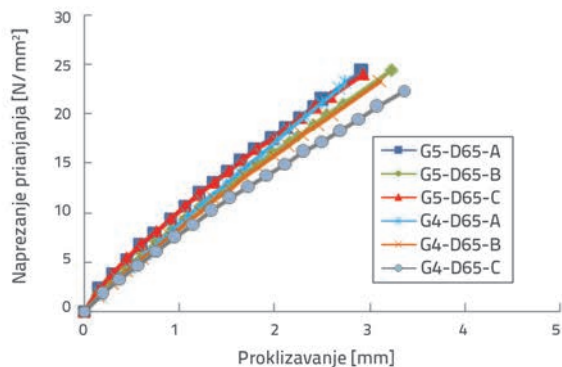
8. do 11. Kod graničnih stanja, niti jedna krivulja naprezanje prijanjanja – proklizavanje ne pokazuju postupnu promjenu nagiba. Duljina sidrenja šipke (75 mm) nije definirana tako da dođe do loma u čeličnim šipkama, pa se stoga u krivulji ne uočava postupna promjena nagiba. U ovoj se studiji očekivalo da je odabrana duljina sidrenja od 75 mm dostatna za analizu naprezanja prijanjanja kod kojeg bi došlo do sloma čupanjem u ranom stadiju opterećenja, bez popuštanja šipke. Međutim, zbog značajnog jačanja mehanizma prijanjanja u konusnoj spojnici, do čupanja šipke došlo je na višim razinama opterećenja, tako da su čelične šipke popustile prije čupanja, vidi slike 14. i 15. Odnos prijanjanje – proklizavanje šipaka u spojnici prikazan je na slikama od 9. do 11. Visoke vrijednosti proklizavanja, u većini slučajeva veće od 3 mm, objašnjavaju se izvlačenjem šipke pri većim razinama opterećenja. U stvarnoj primjeni ove spojnice, tako veliko proklizavanje uslijed izvlačenja šipke ipak se može izbjeći. Da bi se spriječilo izvlačenje šipke, duljina sidrenja šipke treba se definirati primjenom jednadžbe (1). Autori su također ispitali uzorke spoja u svrhu postizanja loma spojenih šipaka. Rezultati pokazuju da je potrebna duljina sidrenja od 125 mm, s promjerom od 50 mm na sredini duljine spoja, da bi se u GFRP spojnici postigla vlačna čvrstoća čelične šipke, vidi sliku 16.c.



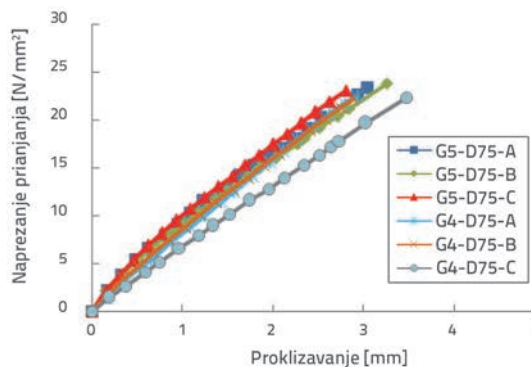
Slika 8. Naprezanje prijanjanja – proklizavanje između injekcijske smjese i čeličnog cilindričnog spoja za kontrolne uzorke



Slika 9. Naprezanje prijanjanja – proklizavanje armaturne šipke za promjer od 50 mm, serije G5 i G4



Slika 10. Naprezanje prijanjanja – proklizavanje armaturne šipke za promjer od 65 mm, serije G5 i G4



Slika 11. Naprezanje prijanjanja – proklizavanje armaturne šipke za promjer od 75 mm, serije G5 i G4

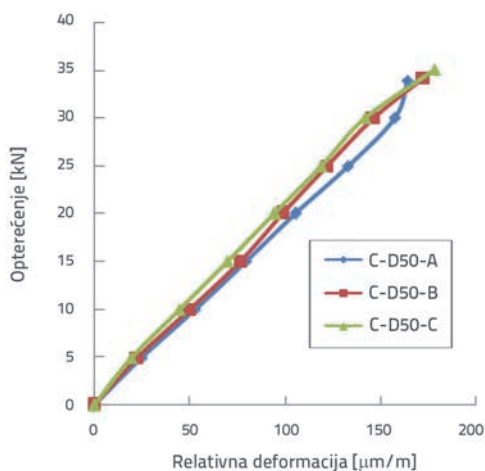
3.2. Naprezanja i relativne deformacije uzoraka

Kao što je već navedeno, na svim su uzorcima postavljeni ekstenzometri radi mjerenja uzdužnih relativnih deformacija šipaka. Prosječne krivulje sila – relativna deformacija za tri identična uzorka iz svake serije armaturnih šipaka prikazane su na slikama 14. i 15. Kao što možemo vidjeti iz tablice 2., vrijednosti granične vlačne sile GFRP uzoraka uglavnom su bile manje od 102 kN.

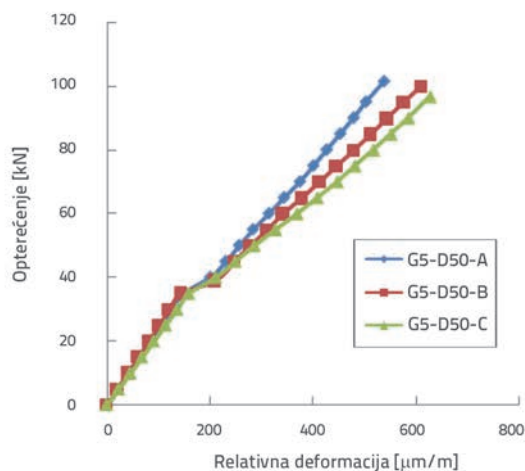
Slika 16.a pokazuje način sloma kontrolnog uzorka zbog curenja injekcijske smjese iz čeličnog cilindričnog spoja, što pokazuje da je čvrstoća priranja na kontaktu spojnice i injekcijske smjese manja od čvrstoće na kontaktu između šipke i injekcijske smjese. Osim toga, relativna deformacija čelične cjevaste spojnice je prilično mala, tj. manja je od 0,0002 (200 mm/m), što pokazuje da se vrlo mala sila prenosi na čeličnu cjevastu spojnicu (slika 12.) i to zbog slabe sile sidrenja između injekcijske smjese i cjevaste spojnice. Kontrolni uzorci su ispitivani kako bi se dokazalo da čelična cjevasta spojnica

ne doprinosi bitno jačanju mehanizma priranja između cijevi i smjese i između šipke i smjese.

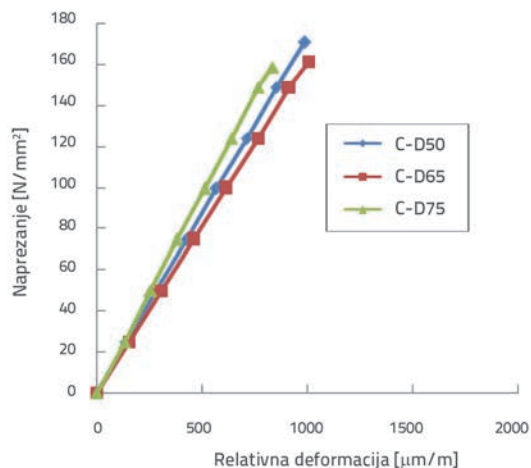
S druge strane, kao što se vidi na slici 16.b, konusna GFRP spojnica poboljšala je vezu između spojnice GFRP i injekcijske smjese. U GFRP uzorcima čelične su šipke popustile iznad relativne deformacije popuštanja od 0,002 (2000 mm/m), prije izvlačenja čelične šipke iz spojnice. Injekcijska smjesa nije izlazila iz spojnice. Kod uzorka je popustila veza između šipke i smjese, pa je stoga armaturna šipka iskliznula iz spojnice. Do ovakve vrste sloma dolazi zbog klinastog djelovanja čeličnih rebara koja odguravaju okolni materijal i zbog lomljenja područja injekcijske smjese djelovanjem rebara, kao što se može vidjeti iz načina na koji je nastupio slom uslijed izvlačenja šipke. Kada se cjevasta spojnica koristi kao sredstvo za ovijanje, tada se pucanje može spriječiti; dakle, do popuštanja veze dolazi zbog posmičnog sloma u području injekcijske mase između čelika i rebara. Takav način sloma pokazuje da je mogućnost spoja manja od vlačne čvrstoće armaturne šipke. Međutim, dužina sidrenja šipke daje potrebno priranje pa uzorci popuštaju prije pucanja armature.



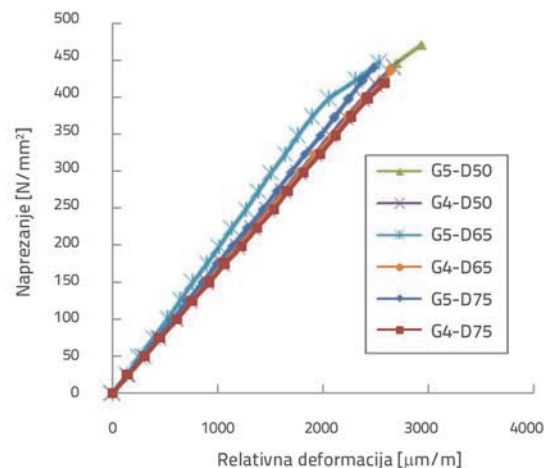
Slika 12. Opterećenje – relativna deformacija u čeličnoj cilindričnoj spojnici (kontrolni uzorci)



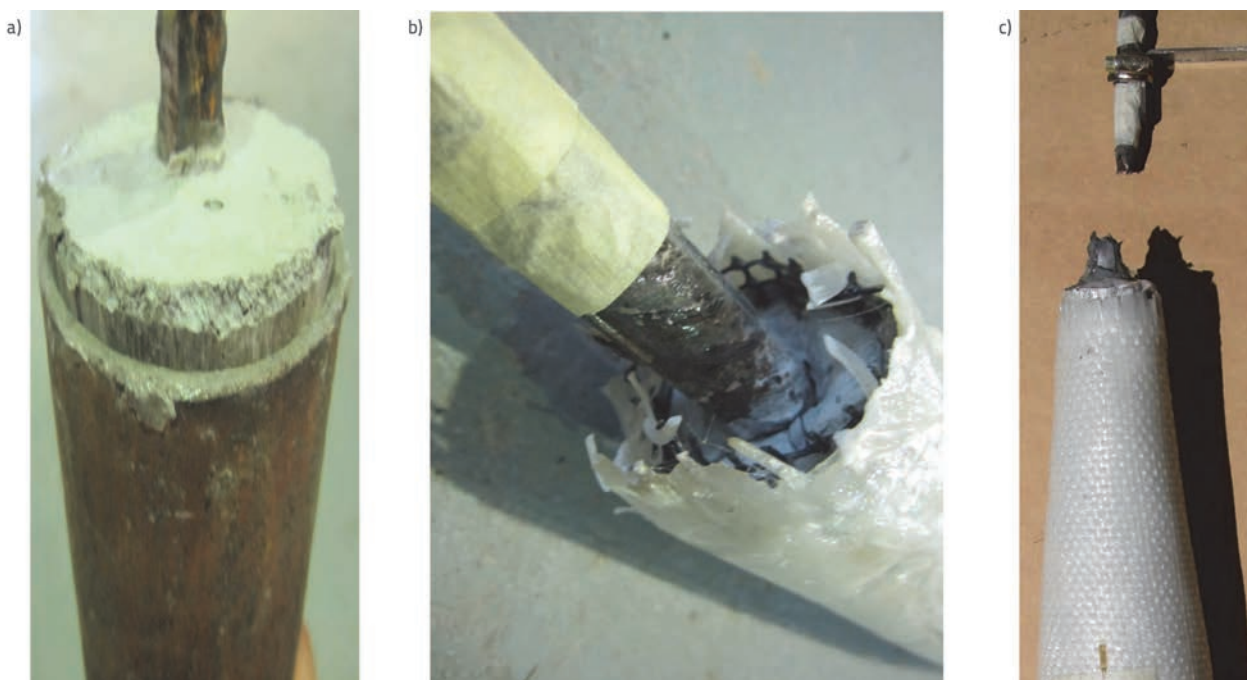
Slika 13. Opterećenje-relativna deformacija u GFRP traci (konusna GFRP spojnica)



Slika 14. Naprezanje – relativna deformacija u šipki, kontrolni uzorci



Slika 15. Naprezanje – relativna deformacija u šipki, GFRP uzorci



Slika 16. Načini popuštanja uzoraka: a) slom na kontaktu između injekcijske smjese i čelične cijevne spojnice; b) slom uslijed izvlačenja šipke; c) vlačni slom šipke

Nakon proklizavanja šipke u odnosu na svoju okolinu, betonska obloga širi se radijalno za vrijednost koja se može izračunati iz veličine klizanja i geometrijskog profila vezujućih rebara. Širenje uzrokuje pucanje obloge, a ako ne postoji mehanizam za zaustavljanje širenja pukotina, do pucanja može doći duž područja sidrenja šipke [17]. Zbog širenja, na šipku djeluje reaktivni radijalni tlak, a njemu se opiru svi dostupni mehanizmi ovijanja kao što su kružno naprezanje u betonskoj oblozi, vlačna sila u sponama ili u vanjski povezanim složenim oblogama duž područja sidrenja, što se sve aktivira kod prekoračenja ravnine pucanja [18]. Ako je dostupno ovijanje dostatno, pucanje kroz oblogu može se usporiti ili čak i spriječiti, što dovodi do miješanog sloma tj. kombinacije djelomičnog pucanja i izvlačenja šipke.



Slika 17. Raspodjela naprezanja

Kao što se vidi na slici 17., uslijed nanošenja vlačne sile P (prikazane strelicom) na armaturnu šipku, reakcijska naprezanja na kraju šipke ravnomjerno se raspoređuju dalje od čelične šipke, tj. po konusnoj smjesi. Nakon toga, kosa površina konusne smjese šalje naprezanja u dijagonalnom smjeru i prebacuje ih na konusnu GFRP spojnicu koja učvršćuje injekcijsku smjesu [19]. Prema rezultatima ispitivanja, naprezanja koja su prebačena na konusnu GFRP spojnicu viša su od onih koja se javljaju u tradicionalnim čeličnim cijevima.

Osim toga, zbog mehanizma prijenosa, naprezanja duž kontakta između armaturne šipke i injekcijske smjese bitno su smanjena.

3.3. Djelovanja na konusni ovoj

Prema Tighiouartetu i ostalima [20], čvrstoća prijanjanja određena je oštećenjem kontakta između čelika i betona. Na lokalnoj razini, ako su naprezanja veća od vlačne čvrstoće betona, čvrstoća prijanjanja se smanjuje i beton puca ispred rebara šipke te se razvijaju lokalne pukotine ili dolazi do pucanja područja betona između čeličnih rebara. Dakle, realno bi se čvrstoća prijanjanja mogla definirati kao vrijednost ovisna o posmičnoj čvrstoći betona ili o vlačnoj čvrstoći betona. Kako se za obje vrijednosti obično usvaja aproksimacija prema kojoj su one proporcionalne kvadratnom korijenu tlačne čvrstoće betona, može se reći da je čvrstoća prijanjanja ovisna o tlačnoj čvrstoći betona.

Prema jednadžbi (1), pretpostavlja se da se karakteristike prijanjanja armaturne šipke mogu analitički opisati lokalnim odnosom u kojem ravnomjerno posmično naprezanje, t , djeluje na kontaktnu površinu između armaturne šipke i betona, dok klizanje, s , predstavlja relativni pomak između armaturne šipke i betona. Kao što je ranije spomenuto, zbog složenosti detaljnog ocjenjivanja čvrstoće prijanjanja, naprezanje prijanjanja između šipke i betona izračunava se u skladu s točkom 3.12.8.3 norme BS8110 – Prvi dio [13]. Prema toj normi, čvrstoća prijanjanja između čelika i betona trebala bi se izračunavati na bazi tlačne čvrstoće betona jer vlačna čvrstoća ovisi o tlačnoj čvrstoći. Britanskom se normom

za određivanje vrijednosti proračunske čvrstoće prijanjanja predlaže sljedeća formula:

$$f_{bu} = \beta \sqrt{f_{cu}} \quad (2)$$

gdje je f_{bu} proračunska čvrstoća prijanjanja, f_{cu} je tlačna čvrstoća ispune, a β je koeficijent ovisan o vrsti šipke koji se može preuzeti iz tablice 3,26 norme BS 8110, Prvi dio. U ovoj studiji, prosječna tlačna čvrstoća injekcijske smjese Sika grout-215, f_{cu} iznosi otprilike 47,86 N/mm² dok se, prema Tablici 3,26 iz BS 8110, vrijednost od $\beta = 0,5$ primjenjuje za rebraste šipke tip 2 u vlaklu. Granična čvrstoća prijanjanja iznosi 3,45 N/mm² za neučvršćenu injekcijsku smjesu dobivenu iz jednadžbe (2), a rezultati ispitivanja pokazuju da uzorci s dužinom sidrenja šipke od 75 mm ostvaruju čvrstoću prijanjanja u rasponu od 22 do 27 N/mm², što je više od proračunske čvrstoće prijanjanja, tj. iznosi oko sedam puta više od f_{bu} . To se uglavnom objašnjava činjenicom da se veće ovijanje postiže primjenom konusne GFRP spojnice.

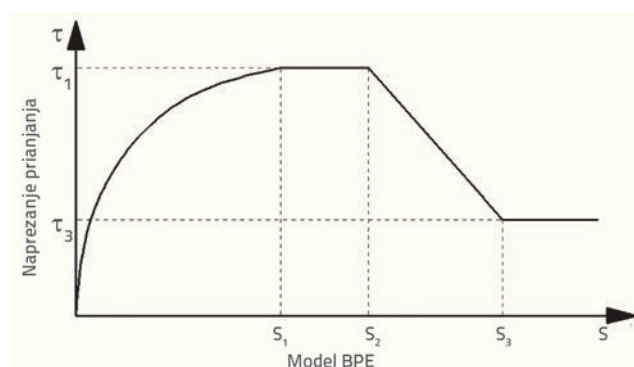
3.4. Modeliranje odnosa prijanjanje -proklizavanje

Zbog nedostatka posebnih formula za razne vrste armaturnih šipaka, potreban je analitički opis za određivanje veze između armaturne šipke i okolnog betona. Ta analitička metoda može se opisati odnosom konstitutivnog naprezanja prijanjanja i proklizavanja, čime se uvodi rješenje problema, kao što je primjerice izračun duljine sidrenja.

Ellgehausen i ostali [21] predlažu dobro poznatu analitičku zakonitost naprezanja prijanjanja i proklizavanja za rebraste armaturne šipke. Prema modelu BPE, odnos naprezanje prijanjanja – proklizavanja za šipku karakteriziraju četiri zasebne grane (slika 18.). Prva grana predstavlja dio u kojem su rebra postavljena u matricu injekcijske smjese, a odnosi se na lokalno lomljenje i stvaranje mikropukotina. Uzlazna grana modela BPE ($s \leq s_1$), izražava se kako slijedi:

$$\frac{\tau}{\tau_1} = \left(\frac{s}{s_1} \right)^\alpha \quad (3)$$

gdje je τ maksimalno naprezanje prijanjanja, s_1 predstavlja proklizavanje koje odgovara maksimalnom naprezanju prijanjanja, dok je α parametar podešavanja krivulje koji ne smije biti veći od 1 ($\alpha = 0,4$ za čelične šipke). Tighiouart i drugi [20] istraživali su prijanjanje u betonu sa šipkama od vlaknima armiranog polimera (FRP šipkama). Oni smatraju da se model BPE, koji se predlaže za rebrastu armaturu, može koristiti za iskazivanje uzlazne grane krivulje prijanjanje - proklizavanje ($s_1 < s_2$) za vlačno naprezani uzorak.

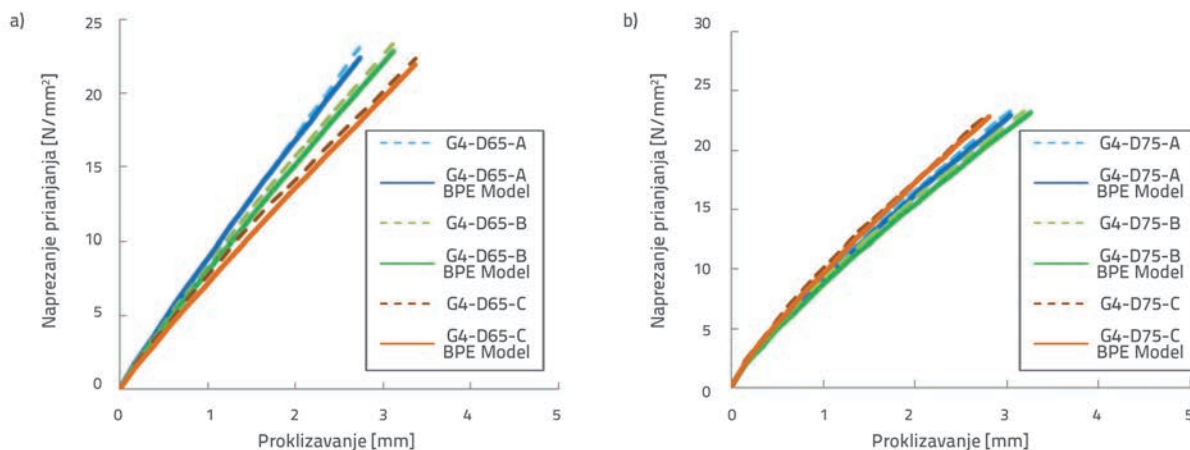


Slika 18. Model BPE

U ovoj studiji, izraz α određen je na temelju eksperimentalnih podataka primjenom metode najmanje kvadratne greške. Dotični izraz iskazuje se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\alpha = \left(\frac{d_f}{N_{GFRP}} \right)^\gamma \quad (4)$$

Vrijednosti α i γ za uzorke prikazane su u tablici 3. Eksperimentalni rezultati krivulja prijanjanje - proklizavanje, i modelirane krivulje za serije G4-D64 i G5-D75, prikazani su na slici 19. Krivulje prijanjanje - proklizavanje pokazuju da model BPE daje donekle konzervativnu aproksimaciju jer podcjenjuje čvrstoću prijanjanja uzoraka.



Slika 19. Krivulja prijanjanje - proklizavanje: a) serija G4-D65; b) serija G5-D75; prikaz neobrađenih podataka i podataka prema BPE modelu

Tablica 3. Vrijednosti korištene u modelu BPE

Uzorak	α	γ
G5-D50	0,83	-0,08
G4-D50	0,92	-0,03
G5-D65	0,83	-0,07
G4-D65	0,92	-0,03
G5-D75	0,83	-0,07
G4-D75	0,92	-0,03

4. Zaključak

Ova je studija provedena da bi se istražili utjecaji broja GFRP slojeva i promjera na sredini uzoraka na prionjivost GFRP spojnica. Rezultati su uspoređeni sa zahtjevima iz normi i odredaba o projektiranju. Na bazi analize eksperimentalnih rezultata određene su nove vrijednosti parametra za podešavanje krivulje primjenom zakonitosti koja vrijedi za odnos između naprezanja prianjanja i proklizavanje. Rezultati ispitivanja pokazuju da se naprezanje prianjanja rebraste armature može znatno povećati učvršćivanjem spoja primjenom čunjastog spoja, čime se ostvaruje mehanizam koji omogućuje bolji prijenos sile između

armaturnih šipaka, injekcijske smjese i GFRP spojnica. Uz to, mogu se izvesti i sljedeći posebni zaključci:

- Rezultati pokazuju da se smanjenjem promjera na sredini dužine uzoraka ostvaruje veća otpornost na opterećenje i veća čvrstoća prionjivosti. Ta činjenica ustanovljena je uspoređivanjem granične vlačne čvrstoće i čvrstoće prianjanja GFRP spojnica i kontrolnih uzoraka istih promjera na sredini i istih duljina sidrenja armature.
- Analiza rezultata ispitivanja pokazuje da preporuke iz britanske norme karakterizira veliki stupanj sigurnost za dovoljno velike duljine, ali i da su moguća smanjenja kada se koristi GFRP spojnica.
- Na temelju rezultata vlačnih ispitivanja pet je slojeva GFRP dovoljno za generiranje traženog ovijanja. S druge strane, ne može se preporučiti korištenje četiri sloja GFRP za postizanje ovakvog spoja čeličnih šipaka. Ovo istraživanje pokazuje da se u slučaju korištenja četiri sloja GFRP traka treba pridružiti i dodatno ovijanje kako bi se postigla dovoljna otpornost na opterećenje te dostatna čvrstoća prionjivosti.
- Rezultati dobiveni ispitivanjem uzoraka korišteni su za modeliranje eksperimentalnih podataka putem modela BPE. Rezultati pokazuju da se primjenom modela BPE donekle podcjenjuje čvrstoća prianjanja uzoraka.

LITERATURA

- [1] Martin, L.D., Perry, C.J.: PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete, Sixth Edition, 2004.
- [2] Cox, J.V., Herrmann, L.R.: Development of a Plasticity Bond Model for Steel Reinforcement, Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, (1998) John Wiley & Sons, Ltd., pp.155–180.
- [3] Tassios, T.P., Vassilopoulou, I.: Shear transfer capacity along a R.C. crack, under cyclic sliding, Befestigungstechnik Bewehrungstechnik, (Rolf Eligehausenzum 60. Geburtstag), (eds. W. Fuchs, H. W. Reinhardt), Ibidem – Verlag, Stuttgart, (2002) pp. 405–414.
- [4] Robins, P.J., Standish, I.G.: The influence of lateral pressure upon anchorage bond, Magazine of Concrete Research, (1984) Volume 36, Issue 129, p.p. 195–202. <http://dx.doi.org/10.1680/mac.1984.36.129.195>
- [5] Einea, A., Yamane, T., Tadros, M.K.: Grout-filled Pipe Splices for Precast Concrete Construction, PCI Journal, (1995) January-February, pp.82–93.
- [6] Moosavi, M., Jafari, A., Khosravi, A.: Bond of cement grouted reinforcing bars under constant radial pressure. Cement Concrete Composites, (2005) 27 (11):103–109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.12.002>
- [7] Soroushian, P., Choi, K.B., Park, G.H., et al.: Bond of deformed bars to concrete: effects of confinement and strength of concrete. ACI Material Journal, (1991), pp. 227–232.
- [8] Tibbetts A.J., Oliva, M.G., Bank, L.C.: Durable fiber reinforced polymer bar splice connections for precast concrete structures, Composites & Ploycon, (2009) Tampa, FL USA: American composites manufacturers association.
- [9] British Standard Institution, Specification for Carbon steel bars for the reinforcement of concrete, BS 4449 : 1988.
- [10] ASTM International, Standard Test Methods for Testing Mechanical Splices for Steel Reinforcing Bars. ASTM A1034/A, 2005.
- [11] Cairns, J., Plizzari, G.A.: Towards a harmonised European bond test, Materials and Structures, Vol. 36, (2003), pp. 498–506. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02480826>
- [12] CEB-FIP, 'Model Code 1990', Thomas Telford, London, (1993), 437pp., ISBN 0 7277 1696.
- [13] British Standard Institution, Structural Use of Concrete BS8110: Part 1: (1997): London, Clauses 3.12.8.3 and 3.12.8.4.
- [14] Abrishami, H.H., Mitchell, D.: Analysis of Bond Stress Distribution in Pull-out Specimens, Journal of Structural Engineering, Vol. 122 (1996) 3, pp. 255–261.
- [15] Tassios, T.P., Koroneos, E.G.: Local Bond-Slip Relationships by Means of the Moire Method, ACI Journal, Vol. 81 (1984) 1, pp. 27–34.
- [16] Ling, J.H., Rahman, A.B.A., Ibrahim I. S., Hamid, Z.A.: Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load, Construction and Building Materials, 33 (2012), pp. 90–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.001>
- [17] FIB Bulletin 10, International Federation for Structural Concrete (2000).
- [18] Tastani, S.P., Pantazopoulou, S.J.: Direct Tension Pullout Bond Test: Experimental Results Journal of structural engineering, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 136 (2010) 6. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000159](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000159)
- [19] Dahl, K.L., High Strength Grouted Pipe Coupler. U.S Patent No. 6,192,647, (2001).
- [20] Tighiouart, B., Benmokrane, B., Gao, D.: Investigation of Bond in Concrete Member with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars, Construction and Building Materials, 12 (1998), pp. 453–462. [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(98\)00027-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(98)00027-0)
- [21] Eligehausen, R., Popov, E.P., Bertero V.V.: Local bond stress – slip relationships of deformed bars under generalized excitations. Report No. 83r23, EERC, University of California, Berkeley, 1983.