

Dr Nebojša Đuranović

TESTS ON FRP REINFORCED BEAMS

Summary:

This paper studies the employability of plastic FRP bars and links as the main reinforcement for concrete beams. It presents some of the experimental results and gives comparisons with the behaviour of beams of the same dimensions that are reinforced with the ordinary steel reinforcements according to the methods of equal capacity, stiffness or area of the main reinforcement. The values of ultimate flexural or shear forces have been compared to those calculated according to the procedures that are in use for the design of ordinary reinforced concrete sections. The experimental results were used to highlight some of the problems related to bond between the FRP bars and the surrounding concrete and also to the reduction of the tensile capacity of FRP material when used in the form of links.

Key words: plastics, FRP, concrete, beam, experiments

TESTIRANJE GREDA ARMIRANIH PLASTIČNIM (FRP) ARMATURAMA

Dr Nebojša Đuranović, dipl. inž. građ.

U radu se razmatra upotreba plastičnih FRP šipki i uzengija kao glavne armature betonskih greda. Prezentirani su eksperimentalni rezultati i data upoređenja sa ponašanjem greda identičnog gabarita ali armiranih standardnim čeličnim armaturama a po metodi istih nosivosti, krutosti ili površina armature. Eksperimentalno dobijene vrijednosti sila loma usled smičućih sila ili savijanja grede su upoređene sa onima sračunatim po istoj teoriji koja se upotrebljava za analizu presjeka armiranih čelikom. U svijetlu dobijenih eksperimentalnih rezultata razmatrani su problemi povezani sa slabijim prijanjanjem betona za FRP armaturu kao i sa znatno nižom čvrstoćom na zatezanje plastičnih uzengija u odnosu na sami materijal od koga su napravljene.

Ključne riječi: plastična armatura, FRP, beton, greda, eksperimenti

1. UVOD

Upotreba plastičnih FRP armatura (engleski: *Fiber Reinforced Plastics*) posljednjih godina izaziva značajno interesovanje projektanata i istraživača a posledica toga je naglo proširenje područja njene primjene. Njihova znatno veća čvrstoća na zatezanje nego čelika, otpornost na koroziju kao i elektro i magnetna neutralnost, čine je veoma privlačnim materijalom za mnoge građevinske objekte. Sa druge strane osobine kao potpuno neposjedovanje duktilnosti i potpuna linearna elastičnost do tačke kidanja, u većini slučajeva znatno niži moduo elastičnosti nego čelika i nedovoljna ispitanoost cijelog niza drugih osobina (prijanjanje za beton, otpornost na vatru, postojanost itd) predstavljaju značajan problem sa kojim se sreću projektanti a što je dovelo do značajnog inteziviranja istraživačkog rada na više mijesta u svijetu koji bi omogućio kakvu - takvu dozu sigurnosti u njegovoj primjeni. Tako, na primjer, problemi nemogućnosti sidrenja plastične armature iziskuju posebno posmatranje napona prijanjanja za beton po dužini šipke. Tako zaključci Nani-ja itd.¹ upućuju na to da je prijanjanje betona za plastičnu armaturu prvenstveno kontrolisano mehaničkim osobinama rebara na armaturi a u mnogo manjoj mjeri frikcijom i adhezijom među samim materijalima, što predstavlja problem s obzirom na pravac dejstva opterećenja na rebrima armature i slabu nosivost rebara u tom pravcu. Manji naponi prijanjanja za armature većih presjeka mogu takođe upućivati na zaključak o neravnomjernoj raspodjeli napona po presjeku same armature. Dalje, ponašanje greda armiranih plastičnim armaturama na smicanje je posebno komplikovano jer propisi za armiranje koji su trenutno u upotrebi, za ustanovljavanje sila loma koriste eksperimentalne podatke dobijene na osnovu testova izvršenih na presjecima armiranim čeličnim armaturama. Zato ovom problemu treba prilaziti odvojeno od posmatranja nosivosti presjeka na savijanje gdje se teoriska osnova korišćena za dimenzionisanje presjeka armiranih čeličnim armaturama može primijeniti u skoro nepromijenjenom obliku pri dimenzionisanju presjeka armiranih FRP šipkama². Promjena dimenzija gabarita presjeka armiranog plastičnim FRP armaturama u odnosu na uporedni presjek armiran uobičajenom čeličnom armaturom predstavlja vjerovatno jedini prihvatljiv način armiranja, ako se želi postići stanje loma po armaturi u uporedna oba presjeka. Optimalno uvećanje

gabarita za presjeke armirane staklenim/plastičnim FRP šipkama iznosi 24 % od efektivne debljine nosača³.

U ovom tekstu biće predstavljeni i analizirani neki od rezultata testova koji su izvršeni na Univerzitetu u Šefildu - Engleska a zatim će eksperimentalno dobijene sile loma biti upoređene sa vrijednostima dobijenim analizom presjeka izvršenom po britanskim propisima BS8110⁴.

2. EKSPERIMENTI

U testovima su korišćene dvije vrste plastične FRP armature. Staklena FRP armatura ima deklarisanu granicu izvlačenja 1000 MPa dok je moduo elastičnosti od 45 GPa provjeren i eksperimentalno. Ova armatura je korišćena i u svojstvu šipki glavne armature ali i kao uzengije. Detalj staklene FRP armature upotrebene za grede GB5, 6, 9 i 10 je prikazan na slici 1. Dok su uzengije bile potpuno glatkih površina na FRP šipkama bila je "zalijepljena" košuljica od lagano naboranog materijala. Testovi na uzengijama pokazali su da je maksimalni napon zatezanja koji se može dostići znatno niži od onog deklarisanog za sami materijal i kreće se oko 460 MPa. Značajno je napomenuti da je u samim testovima na gredi maksimalni izmjereni napon u uzengijama imao vrijednost od 270 MPa, čak i u testovima gdje je dostignut lom grede smičućim silama. Uzengije su u svim slučajevima imale pravoougaoni presjek debljine 4 mm i širine 10 mm. Karbonatna, plastična FRP armatura je korišćena samo u svojstvu glavne armature. Deklarisana čvrstoća na zatezanje joj je 1400 MPa a moduo elastičnosti je provjeren i eksperimentom i iznosi 130 GPa.



Slika 1 - Plastična FRP armatura za grede GB5, GB6, GB9, i GB10

Vrijednosti čvrstoća na zatezanje oba materijala kada su u obliku šipki glavne armature nisu mogle biti provjerene eksperimentom na licu mjesta zbog veoma niske čvrstoće FRP materijala u pravcu upravnom na pravac prostiranja vlakana, tako da je u svim testovima dolazilo do mrvljenja šipki u čeljustima mašine za istezanje pri naponima od oko 40 % od deklariranih čvrstoća na zatezanje.

Šipke glavne podužne armature su u svim testovima bile konstantnog prečnika 13,5 mm.

U nekoliko testova umjesto plastičnih FRP uzengija korišćene su čelične uzengije koje imaju granicu tečenja 600 MPa i modul elastičnosti 200 GPa. Obje vrijednosti su potvrđene i eksperimentima na samom materijalu.

Za izlivanje gredi je korišćen beton marki 35 do 45 MPa i najvećeg zrna agregata 20 mm. U svim slučajevima gotov betona (obično u količinama od 0.5 m³) proizvođač je dopremao do laboratorije gdje su zatim izlivanе grede, kontrolne kocke i valjci. Vrijednosti čvrstoće betona na pritisak dobijene su testovima na kontrolnim kockama veličine 10 x 10 x 10 cm dok su vrijednosti maksimalnih napona zatezanja u betonu ustanovljene Brazilskim testom na valjcima prečnika 10 cm i dužine 20 cm. Kocke i

valjci su izlivani i njegovani u istim uslovima kao i grede a po 3 uzorka su testirani istog dana kada i grede. Testovi u nijednom slučaju nisu vršeni prije roka od 28 dana nakon izlivanja betona.

Testirane grede su u svim niže navedenim testovima imale isti pravougaoni poprečni presjek dimenzija 25 cm x 15 cm. Sve grede su bile 2,5 m dugačke a čisti otvor između oslonaca im je bio 2,3 m. Opterećenje je u svim testovima (sem na gredi GB12) bilo nanošeno u trećinama raspona, to jest 767 mm od oslonaca. Statički sistem je u svim slučajevima bio sistema proste grede tako da je između tačaka nanošenja opterećenja stvorena oblast konstantnog momenta. Širina oslonaca i dodirnih oblasti kroz koje je bilo nanošeno opterećenje, je u svim testovima bilo 100 mm. Greda GB12 je takođe imala opterećenje u dvije tačke ali u ovom slučaju ono nije bilo u trećinama raspona već bliže osloncima grede (512 mm od oslonca). Količine armature kao i dostupni podaci o čvrstoći betona na pritisak i zatezanje dati su u tabeli 1. Grede su uvijek izlivane u grupama od 4 tako da su u tabeli zajedno grupisane grede koje su izlivane istovremeno (npr. grede GB5 i GB6). Grede koje su izostavljene iz tabele neće biti razmatrane u ovom tekstu jer bi to unijelo dodatne nepoznate (sprezanje materijala, spoljašnje uzengije, različite materijale za armaturu, drugačije načine opterećenja itd).

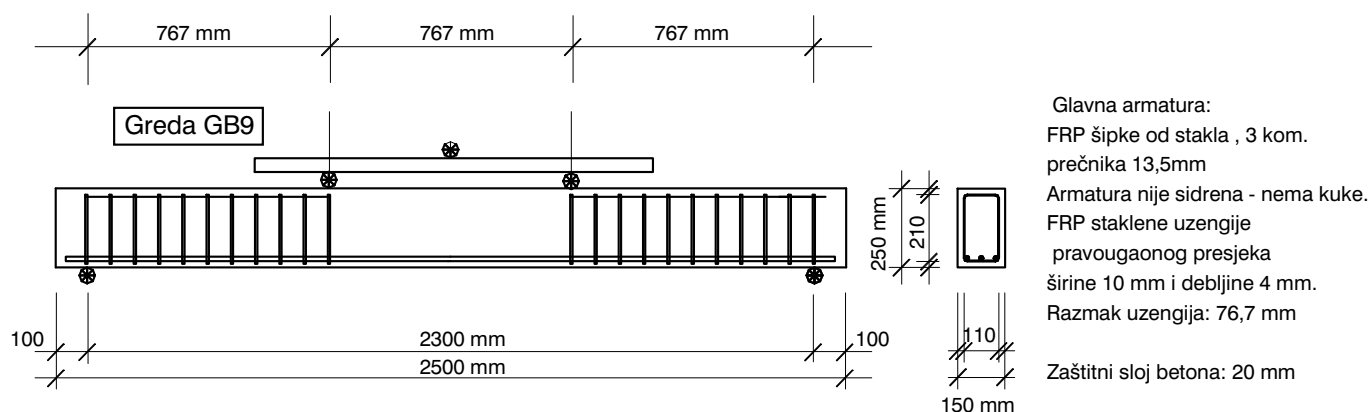
Tabela 1. - Armatura i beton

	Podužna armatura		Uzengije			Beton	
	materijal	n	mat.	A_{stir} (mm ²)	s_v (mm)	f_{cu} (MPa)	f_{ct} (MPa)
GB1	GFRP	3	čelik	50,3	153	30,0	2,85
GB2	GFRP	3	čelik	---	---	38,1	2,94
GB5	GFRP	3	GFRP	40	35	31,2	2,78
GB6	GFRP	3	GFRP	---	---	32,9	2,78
GB9	GFRP	3	GFRP	40	76,7	39,8	3,01
GB10	GFRP	3	GFRP	40	76,7	39,8	3,01
GB11	GFRP	3	GFRP	40	153	39,8	3,01
GB12	GFRP	3	GFRP	40	153	39,8	3,01
GB13	GFRP	2	GFRP	40	76,7	43,4	3,57
GB17	CFRP	3	GFRP	40	76,7	34,0	2,54
GB19	CFRP	2	GFRP	40	76,7	34,0	2,54

Gdje su:

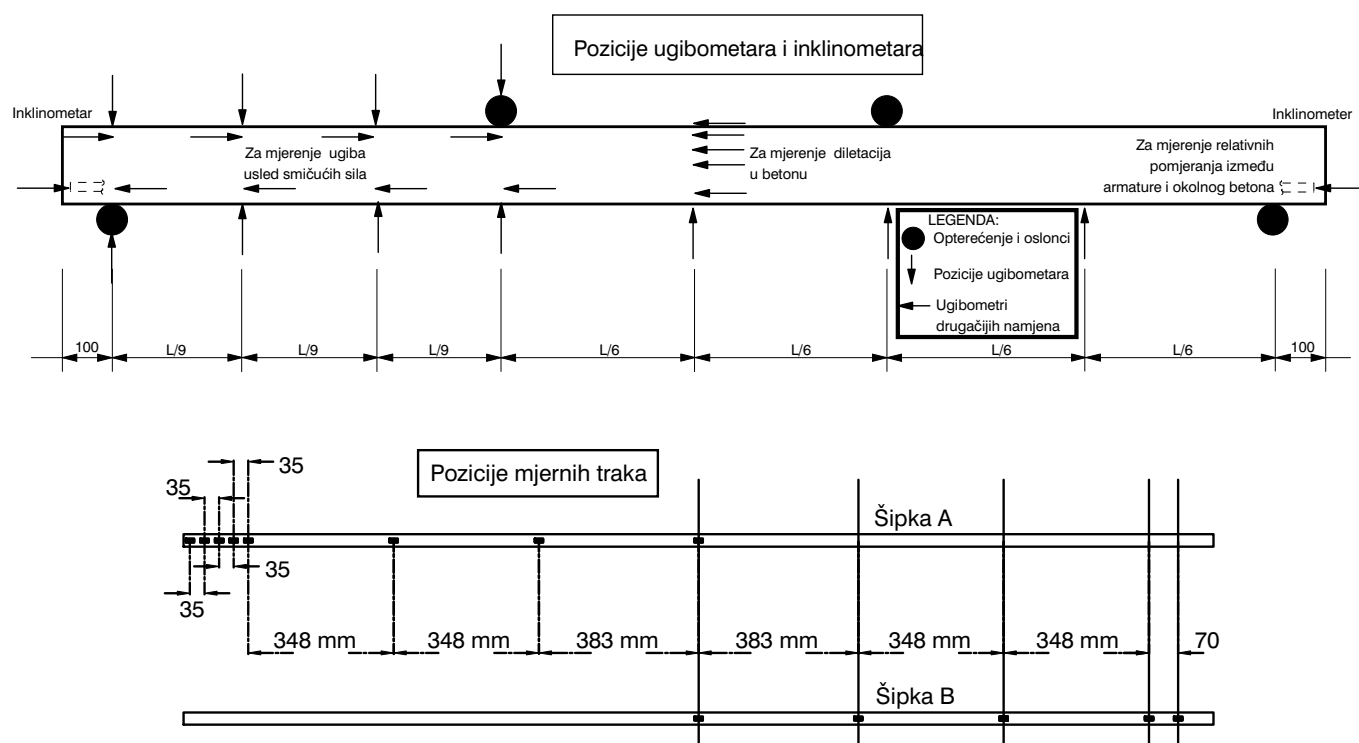
- n - broj šipki glavne podužne armature
- A_{stir} - površina 1 kraka uzengije
- s_v - razmak uzengija
- f_{cu} - čvrstoća betonske kocke na pritisak
- f_{ct} - čvrstoća betonskog valjka na zatezanje
- GFRP - staklena FRP armatura (engleski: *Glass FRP*)
- CFRP - karbonatna FRP armatura (*Carbon FRP*)

Tipični izgled grede kao i sistem opterećenja dati su na slici 2.



Slika 2 - Tipična greda i shema opterećenja

Radi kompletnosti teksta a za informaciju čitaocu ovdje će biti pomenuta i neka mjerenja čiji rezultati nisu prezentirani niti diskutovani na ovom mjestu. Generalna šema mjernih uređaja je prikazana na slici 3. (slika nije u razmjeri).



Slika 3 - Šema položaja ugibometara, inklinometara i mjernih traka

Kao što se da vidjeti sa slike sistem mjerenja i osmatranja ponašanja greda je bio veoma obuhvatan. Činili su ga mjerenja nanesenih sila, uгиба (na 6 lokacija), diletacija u glavnoj armaturi u središnjoj zoni gredi i u blizini oslonaca (6 lokacija), diletacija na glavnoj armaturi u zoni kritičnoj za napone prijanjanja betona za glavnu armaturu tj. u neposrednoj blizini oslonaca (7 mjesta), diletacija u sredinama uzengija (na do 6 uzengija, nisu prikazane na slici 3) i horizontalna pomjeranja grede na 4 lokacije sa 8 mjernih instrumenata (pritisnuta i zategnuta zona grede) a u cilju određivanja uгиба od sila smicanja i njihovog odvajanja od ukupno izmjerenih uгиба. Rotacije grede su mjerene na njena oba kraja. Takođe su mjerene najveće pukotine u zoni čistog savijanja i u zoni dejstva smičućih sila. Sve golim okom vidljive pukotine su obelježavane u toku samog testa, zajedno sa vrijednostima sila koje su ih prouzrokovale, a zatim je greda fotografisana. U cilju osmatranja mehanizma prijanjanja betona i armature posebna pažnja je posvećena mjerenju eventualnih pomjeranja šipki glavne armature u

odnosu na okolni beton. Ovo je postizano tako što su na samim krajevima šipki ostavljeni 10 - 15 mm duboki otvori u betonu u obliku valjka prečnika 15-ak mm kroz koje je zatim provlačen vrh ugibometra koji je sam bio pričvršćen za okolni beton, tako da je mjerio relativna pomjeranja betona i armature. Diletacije betona su dobijene iz mjerenja kratkim ugibometrima koji su bili "prilijepljeni" u sredini raspona grede, na 5 mjesta po visini poprečnog presjeka, a na razmaku od 200 mm između mjerne tačke i samog instrumenta - sve po sistemu Demak mjerača.

Sam proces pričvršćivanja i tačnog postavljanja mjernih instrumenata je bio u velikoj mjeri automatizovan jer su mjerni uređaji praktično bili fiksirani a same grede su postavljane u željeni položaj. Ovim je postignuta ugomna uniformnost kako u pogledu upotrebe određenih (odgovarajućih) mjerača za određena mjesta na samoj gredi, tako i do potpune fiksiranosti kablova mjernih instrumenata, njihovog povezivanja sa izvorima napajanja i na kraju softverom za automatsku primjenu faktora baždarenje i logovanja rezultata u sami kompjuter.

Procedura samog testiranja sastojala se u nanočenju opterećenja u etapama od, u početku testa 3 - 5 kN a zatim, nakon prvih pukotina, u etapama od 5 - 10 kN. Tim načinom se išlo do otprilike 80% od sila loma kada se ponovo prelazilo na cikluse od 3 - 5 kN. U toku testa opterećenje je nanošeno kontrolom brzine uvećavanja ugiba (*Displacement control*), nasuprot metodi kontrole brzine povećavanja opterećenja (*Load control*). U toku opterećivanja grede automatska bilježenja rezultata su vršena u najgorem slučaju svakih 0,5 - 1,0 kN. Nakon svake etape od 3 - 10 kN dalje povećavanje ugiba je zaustavljano kako bi se izvršila obelježavanje pukotina na predhodno u bijelo ofarbanj površini grede, kako bi se izvršilo očitavanja veličine najvećih prslina i kako bi greda zatim bila fotografisana. Ova zaustavljanja su obično trajala 2 - 4 minuta. Kada bi opterećenje na gredi dostiglo oko 30 - 40 % od očekivanih sila loma tada bi ono bilo postepeno sasvim uklonjeno i tek zatim bi greda bila ponovo opterećivana do samog loma. Testovi su u svim slučajevima završavani lomom grede.

3. ODREĐIVANJE UPOREDNIH GREDA

U nedostatku propisa koji bi regulisali upotrebu plastičnih/kompozitnih armatura postojeći propisi za čelične armature se obično pokušavaju prilagoditi za slučaj armiranja sa FRP materijalima. Pri tome postoji nekoliko osnovnih pristupa dimenzionisanju uporednog presjeka i svi se svode na upoređivanje presjeka armiranih uobičajenim čeličnim armaturama, a prema važećim standardima, i presjeka armiranih sa FRP materijalima ⁵.

Uslovi graničnog stanja upotrebljivosti greda armiranih FRP šipkama će u velikoj mjeri biti rukovođeni mnogo manjim modulom elastičnosti ovih armatura u odnosu na čelične armature tako da se za iste sile mogu očekivati znatno veće deformacije, a prema tome i ispucalost. Ako se to želi izbjeći, presjek armiran sa FRP armaturom se može upoređivati sa presjekom armiranim čeličnom armaturom preko tzv. **metode istih krutosti** pri kojoj se, kako i ime kaže, teži izjednačavanju krutosti čelične i FRP armature. Ovaj pristup vodi gotovo uvijek u presjeke koji su prearmirani a samim tim rezultiraju u krutom lomu po betonu, pri čemu će uslovi upotrebljivosti biti skoro u svim slučajevima automatski zadovoljeni. Pri upotrebi ove metode ne dolazi do značajnije promjene položaja neutralne ose a povećanje nosivosti na savijanje se postiže uz promjenu modaliteta loma.

Drugi uobičajeni pristup pri dimenzionisanju uporednog presjeka se bazira na određivanju količine FRP armature koja ima istu graničnu nosivost na zatezanje kao čelična armatura u presjeku koji se posmatra ⁶ - **metoda istih nosivosti**. Značajno je napomenuti da će pri ovom principu u većini slučajeva doći do prekoračenja graničnih uslova upotrebljivosti zadatih za presjeke armirane čeličnom armaturom, jer je krutost smanjena primjenom armature sa smanjenom krutošću a i zbog manje količine armature kao posledice veće čvrstoće na zatezanje FRP šipki. Ovdje je potrebno podsjetiti da je pri dimenzionisanju presjeka uz korišćenje FRP armatura izvesno da, budući da ova armatura ne korodira, nema potrebe razmatrati širinu pukotina sa stanovišta zaštite armature od korozije već samo sa pozicije estetskog izgleda. Pri upotrebi ovog metoda uprkos znatnom smanjenju procenta armiranja skoro svi presjeci ipak postaju prearmirani, a to kao posledica znatno veće čvrstoće na zatezanje FRP armatura kao i niže diletacije na granici tečenja, pri čemu ćemo, u svim slučajevima kada se dogodi ta promjene

modaliteta loma, imati i znatnu redukciju u nosivosti na savijanje za zadati sistem opterećenja. Treba konstatovati da u svim slučajevima dimenzionisanja ovom metodom dolazi do znatnog pomjeranja neutralne ose naviše, tj. do slabije iskorišćenosti betona.

Treći princip se sastoji u direktnom izjednačavanju količine FRP armature sa količinom čelične armature u poprečnom presjeku - **metoda istog procenta armiranja**. Ovaj princip takođe vodi ka značajnom pomjeranju položaja neutralne ose ka gornjoj ivici presjeka tj. smanjenju površine pritisnutog betona. Značajno je zapaziti da iako ovdje ne dolazi do promjene procenta armiranja posmatranog presjeka, u velikoj većini slučajeva presjeci koji su bili lako armirani čeličnim armaturama postaću prearmirani sa FRP šipkama i tako ponovo promijeniti način loma presjeka. Ovo je direktna posledica značajne razlike u čvrstoćama na zatezanje i odgovarajućim diletacijama kod čeličnih i FRP armatura što dovodi do neminovne promjene u nivou armiranosti pri kome je presjek uravnotežen. U svim slučajevima primjene ovog metoda ponovo imamo izraženu neiskorišćenost betona ispoljenu kroz pomjeranje neutralne ose naviše. Kod presjeka koji su bili lako armirani čeličnim šipkama dolazi do povećanja nosivosti presjeka na savijanje dok se kod jače armiranih i prearmiranih presjeka nosivost smanjuje.

Pri dimenzionsanju greda zadata čvrstoća kocke je bila 40 MPa i količine armature su određene na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 2.

Tabela 2. Poređenje nosivosti presjeka i modaliteta loma testiranih i uporednih greda

Greda		Primijenjena metoda	Podužna armatura	Pocenat armiranja	Ukupna krutost armature	Nosivost presjeka na savijanje	Modalitet loma	Ploščaj neutralne ose
			(mm ²)	(%)	(kN)	(kN)		(mm)
GB1 - 12	čelik	nosivosti	715,7	2,17	143,1	183,5	beton	112,3
		krutosti	96,6	0,94	19,3	32,1	armatura	56,0
		površina	429,4	1,31	85,8	126,0	armatura	100,6
	FRP	----	3ϕ13,5	1,31	19,3	100,2	beton	56,0
GB13	čelik	nosivosti	477,1	1,45	95,4	137,4	armatura	104,4
		površina	286,3	0,87	57,2	88,8	armatura	86,8
		krutosti	64,4	0,20	12,9	21,6	armatura	47,0
	FRP	----	2ϕ13,5	0,87	12,9	85,5	beton	47,0
CB17	čelik	nosivosti	1002	3,05	200,4	196,3	beton	131,9
		površina	429,4	1,31	85,8	126,0	armatura	100,6
		krutosti	300,6	0,92	55,8	92,7	armatura	88,4
	FRP	----	3ϕ13,5	1,31	55,8	143,7	bet./arma.	86,0
CB19	čelik	nosivosti	668	2,03	133,6	177,6	armatura	116,7
		površina	286,3	0,87	57,2	88,8	armatura	86,8
		krutosti	200,4	0,61	37,2	64,1	armatura	75,7
	FRP	----	2ϕ13,5	0,87	37,2	126,4	armatura	73,5

Grede GB1 do GB12 su imale istu podužnu armaturu a promenljive su bile količine poprečne armature i način opterećenja.

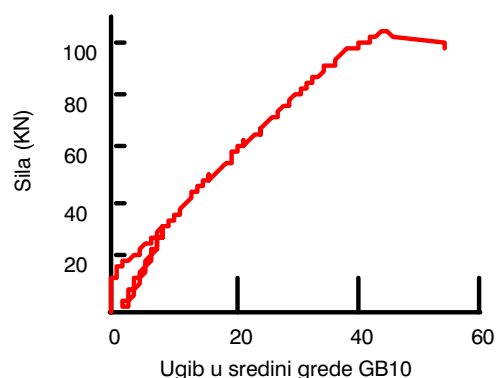
Dok je greda GB1 bila dimenzionisana metodom istih nosivosti glavnih armatura pri čemu je modalitet loma bio isti to jest lom po betonu od momenata savijanja na gredi, greda GB2 bila je dimenzionisana metodom istih krutosti ali bez prisustva poprečne armature, a u cilju utvrđivanja uticaja podužne FRP armature na nosivost poprečnog presjeka na smicanje (vidi poglavlje 4. Modaliteti loma). Greda GB6 je bila dimenzionisana istom metodom pri čemu je došlo do promjene mehanizma loma pa je kao i u predhodnom slučaju došlo do loma smicanjem.

Grede GB11 i GB12 su dimenzionisane tako da se dođe do loma smičućim silama pri čemu bi i uporedne grede napravljene od čelične armature imale taj isti mehanizam loma.

I za grede GB13, CB17 i CB19 korišćena je glavna armatura istog prečnika, pri čemu je izbjegnuto lom smicanjem u osloncima.

4. MODALITETI LOMA

U većini eksperimenata dostignut je lom usled savijanja grede. Tipični slučaj loma grede savijanjem kao i dijagram napadnih sila i ugiba u sredini grede prikazan je na slici 4. U prikazanom slučaju do loma je došlo po betonu, što se jasno vidi i sa dijagrama ugiba. Lom po betonu predstavlja i tipičan slučaj loma za grede armirane plastičnim armaturama, a korišćenjem jednog od metoda pomenutih u poglavlju 4. Dimenzionisanje uporednih greda. Da bi se izbjegao lom po betonu potrebno je promijeniti zadate gabarite uporedne grede armirane čeličnom armaturom, jer se u suprotnom obično dobijaju procenti armiranja koji su manji od minimalnih zahtijevanih propisima.



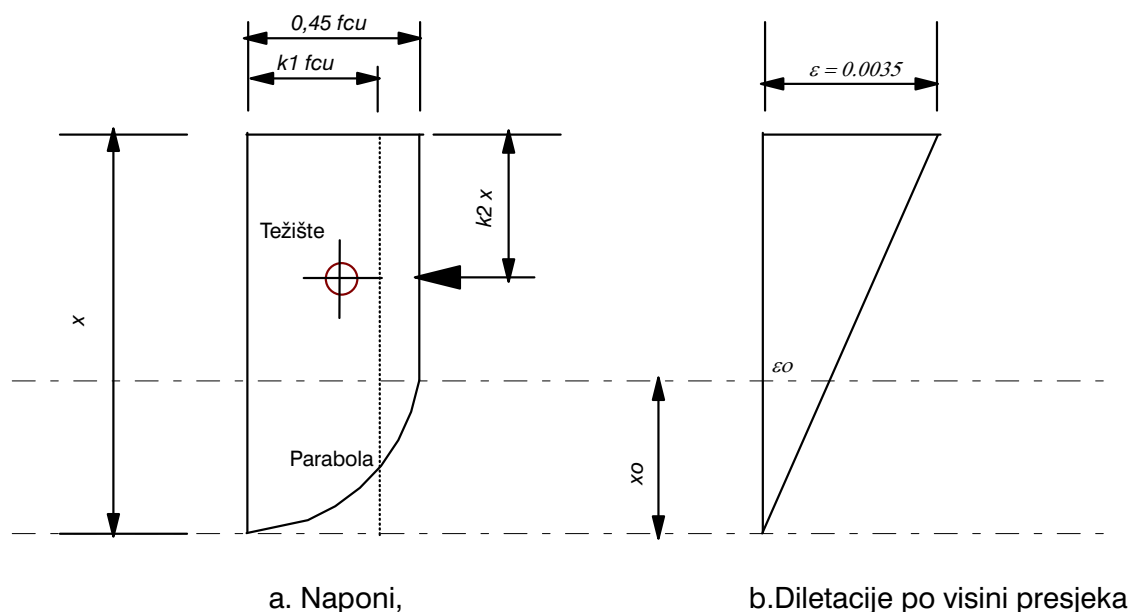
Slika 4. Lom grede savijanjem sa odgovarajućim dijagramom napadna sila - ugib grede

Pri utvrđivanju sila loma posmatrani su oba moguća mehanizma loma grednog nosača tj. lom usled prekoračenja nosivosti grede na savijanje i lom usled prekoračenja nosivosti grede na smicanje, pri čemu je u oba slučaja korišćena metoda granične nosivosti.

Pri utvrđivanju nosivosti grede na savijanje Britanski propisi za "Upotrebu betona u konstrukcijama", BS8110 unose uobičajene pretpostavke:

- Dilatacije u betonu i čeliku su direktno proporcionalne rastojanju od neutralne ose
- Granično stanje loma je dostignuto kada najudaljenije betonsko vlakno dostigne određenu, predhodno specificiranu, vrijednost napona pritiska
- Raspodjela napona pritiska u betonu u trenutku loma je definisan idealizovanim dijagramom napon - deformacija
- Nosivost betona na zatezanje je zanemarena
- Naponi u armaturi su dobijeni iz dijagrama napon - deformacija

Idealizovani dijagrami promjene napona i deformacija kod betona izloženog pritisku u BS8110 su dati kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5. Idealizovani dijagram napon - deformacija po BS8110

Pri tome je:

- f_{cu} - čvrstoća na pritisak betonske kocke
- x - udaljenost neutralne ose od pritisnute ivice presjeka
- ε_{cu} - propisana najveća diletacija betona pri pritisku

Vrijednosti faktora k_1 i k_2 koji definišu raspodjelu napona po visini presjeka su dati kao:

$$k_1 = 0.45 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{f_{cu}}{52.5}} \right) \quad k_2 = \frac{\left(2 - \frac{\sqrt{f_{cu}}}{17.5} \right)^2 + 2}{4 \cdot \left(3 - \frac{\sqrt{f_{cu}}}{17.5} \right)}$$

dok ε_o ima vrijednost: $\varepsilon_o = \frac{\sqrt{f_{cu}}}{5000}$, pa je prema tome: $x_o = \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_{cu}} \cdot x$.

Faktor k_1 u sebi sadrži parcijalni faktor sigurnost za beton koji po BS8110 iznosi $\gamma_m = 1.5$. Pri analizi grede faktori sigurnosti su zanemarivani da bi se uporedile stvarne sile loma.

Položaj neutralne ose grede može se odrediti izjednačavanjem momenata od sile u pritisnutom betonu i od sile u zategnutoj armaturi. Za slučaj prearmiranih greda armatura se u trenutku loma još uvijek nalazi na linearnom dijelu dijagrama napon - deformacija pa se za grede koje nemaju armaturu u pritisnutoj zoni presjeka položaj neutralne ose x za sile loma može sračunati na osnovu:

$$\frac{k_1 \cdot f_{cu}}{\rho \cdot E_{arm}} \cdot \left(\frac{x}{d} \right)^2 + \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{x}{d} \right) - \varepsilon_{cu} = 0$$

gdje je:

- ρ - procenat armiranja presjeka
- d - udaljenost armature od pritisnute ivice presjeka
- E_{arm} - modul elastičnosti armature

Nakon utvrđivanja položaja neutralne ose, granična nosivost prearmiranog presjeka može biti sračunata izračunavanjem momenata od pritisnutog betona na nivou zategnute armature. Dobijeni izraz za maksimalni moment nosivosti M_{max} će imati oblik:

$$M_{\max} = k_1 \cdot f_{cu} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_2 \cdot x)$$

gdje je b širina poprečnog presjeka grede.

Kada je presjek lako armiran to jest procenat armiranja ρ ima vrijednost manju od onog koji bi proizveo simultani lom presjeka po betonu i armaturi, i kada nema armature u pritisnutoj zoni presjeka, maksimalni moment nosivosti se može dobiti u obliku:

$$M_{\max} = A_{\text{arm}} \cdot f_y \cdot \left(1 - \rho \cdot \frac{k_2 \cdot f_y}{k_1 \cdot f_{cu}}\right) \cdot d$$

gdje je:

A_{arm} - površina zategnute armature

f_y - granica tečenja armature

Treba naglasiti da je za dobijanje ove relacije korišćen uslov kompatibilnosti deformacija u armaturi i betonu do same granice tečenja armature, čime je izbjegnuto sračunavanje položaja neutralne ose.

Posebna neizvjesnost u smislu ponašanja greda armiranih plastičnih FRP armatura vlada u domenu njihovog ponašanja i eventualnog loma usled dejstva sila smicanja. Zbog toga su četiri od testiranih greda bile dimenzionisane tako da se postigne lom smicanjem a u jednom slučaju (greda GB11, slika 6) nosivost na smicanje je bila samo neznatno veća nego nosivost na savijanje - oko 8 % sile loma.



Slika 6. Lom grede smičućim silama

Nemogućnost uspostavljanja jedinstvenog mehanizma loma smicanjem kod betona kao posledicu ima upotrebu eksperimentalno dobijenih vrijednosti za određivanje minimalnih količina armature primjenom kojih se on izbjegava. Različiti eksperimenti pomoću kojih su utvrđene te vrijednosti gotovo uvijek su kao jednu od promenljivih imali i količinu glavne armature, tako da se i u empiričkim formulama za određivanje tih maksimalnih napona smicanja u betonu tj. doprinosa betona otpornosti cijelog presjeka na smicanje, u svim propisima nalazi i faktor koji unosi uticaj te armature. Glavne diskusije po pitanju primenljivosti tih empiriskih jednačina, koje su pri upotrebi čeličnih armatura nebrojeno puta našle svoju potvrdu, na presjeke armirane plastičnim FRP armaturama, vodi se upravo oko prisustva faktora koji predstavlja uticaj glavne armature na smičuću nosivost betona. Dva su osnovna pristupa problemu i oni konsekvnetno vode do različitih vrijednosti nosivosti betona na smicanje.

Prvi pristup je baziran na prostoj činjenici da većina propisa barata sa uticajem glavne armature direktno preko procenta armiranja presjeka koji, kao takav, ne zavisi od vrste materijala kojim se armira, pa prema tome i samu nosivost presjeka treba posmatrati i računati isto kao i sa čeličnim armaturama, pri čemu eventualno treba uvesti dodatni faktor sigurnosti zbog nedovoljne ispitivosti materijala.

Drugi pristup polazi od činjenice o znatnoj razlici u modulima elastičnosti dva materijala, to jest čelične i plastične armature. U tom smislu ovaj metod prevodi krutost plastične FRP podužne armature

na ekvivalentnu krutost koja bi bila postignuta sa čeličnom armaturom, tako dobijajući ekvivalentnu količinu armature. To znači:

$$A_{ekv} = \frac{E_{FRP}}{E_{\text{čelik}}} \cdot A_{FRP}$$

gdje je:

E_{FRP} - moduo elastičnosti plastične FRP armature

$E_{\text{čelik}}$ - moduo elastičnosti čelika

A_{FRP} - površina podužne FRP armature

Tako sračunata efektivna površina armature daje ekvivalentni procenat armiranja plastičnom armaturom, pa se tek nakon toga mogu direktno upotrebljavati jednačine za određivanje smičuće nosivosti betona a koje su date u propisima. I u ovom slučaju postoji potreba za utvrđivanjem neophodnosti uvođenja eventualno novih faktora sigurnosti u postojeće empiriske relacije.

Pri računanju nosivosti presjeka na smicanje BS8110 kao i većina drugih propisa utvrđuju doprinose betona i poprečne armature koji zajedno čine ukupnu nosivost. Dok se doprinos poprečne armature - uzengija, utvrđuje jednostavno na osnovu poznatih graničnih nosivosti samog materijala, pri čemu se smatra da je on ravnomjerno razdijeljena na prostoru između dvije uzengije, nosivost betona na smicanje je komplikovanija pa se u proračunu uglavnom koriste empiriski dobijene vrijednosti. U slučaju BS8110 to su faktori k_c i v .

Dakle, doprinos betona V_{bet} nosivosti na smicanje V posmatranog presjeka računa se kao:

$$V_{bet} = v_{bet} \cdot b \cdot d$$

v_{bet} se naziva nominalni smičući napon u betonu i definisan je propisima. Računa se na osnovu:

$$v_{bet} = v \cdot k_c$$

Za betone marke 25 i više faktor k_c se računa kao:

$$k_c = \sqrt[3]{\frac{f_{cu}}{25}}$$

I faktor v je empiriske prirode i ima vrijednost:

$$v = 0.79 \cdot \sqrt[3]{\frac{100 \cdot A_{ekv}}{b \cdot d} \cdot \frac{400}{d}},$$

gdje se površina armature A_{ekv} odnosi na glavnu podužnu armaturu.

Nosivost samih uzengija V_u je računata kao:

$$V_u = A_u \cdot f_{y,u} \cdot \frac{d}{s_u}$$

gdje je:

A_u - površina poprečnog presjeka uzengija (dva kraka kod zatvorenih jednostrukih uzengija)

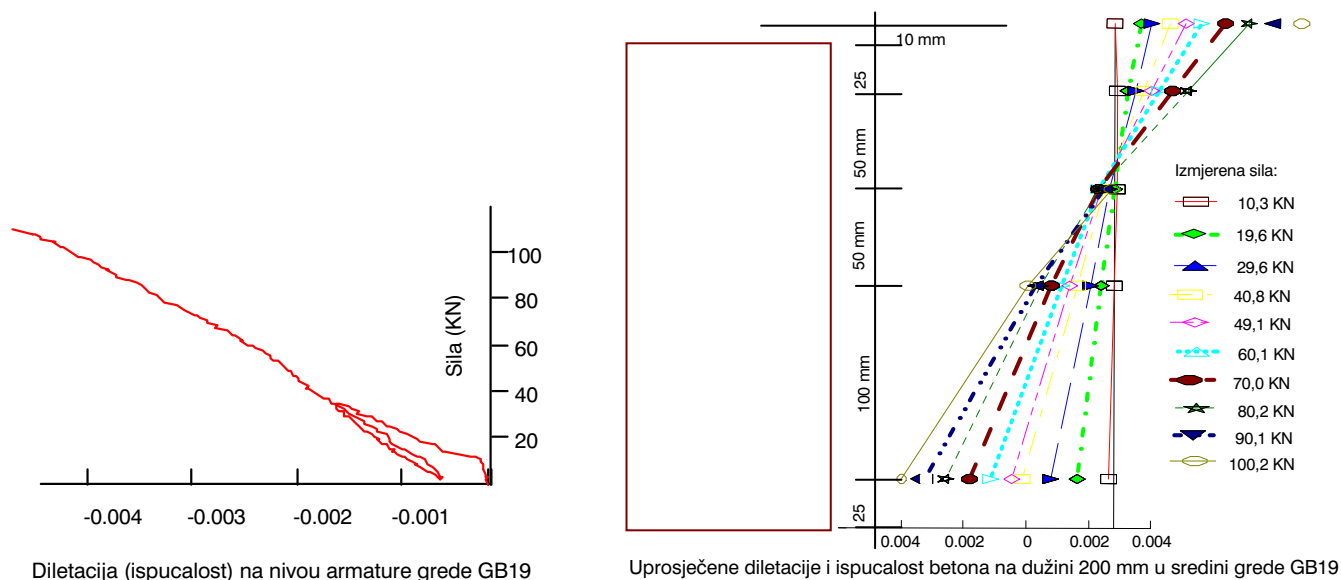
$f_{y,u}$ - granica tečenja uzengija

s_u - razmak uzengija

Za $f_{y,u}$ korišćena je vrijednost dobijena eksperimentalnim putem (vidi poglavlje 2. Eksperimenti) to jest 270 MPa.

5. UPOREĐENJE EKSPERIMENTALNIH I ANALITIČKI DOBIJENIH SILA LOMA

Osnovna pretpostavka o linearnosti diletacija po visini presjeka kao i o njihovoj kompatibilnosti na mjestima dodira betona i armature bila je provjerena na sredini grede upotrebom 5 horizontalnih ugiometara, slika 3. Tipični dijagram sile opterećenja i diletacije u betonu dat je na slici 7 (a) dok je na slici 7 (b) data raspodjela diletacija po visini presjeka.



(a) Dijagram sile opterećenja - diletacija u betonu (b) Raspodjela diletacija po visini presjeka

Slika 7. Diletacije (i ispucalosti) presjeka

Sa slike se vidi da je dijagram po cijeloj visini presjeka linearan do nivoa sila koje odgovaraju formiranju prvih pukotina a da nakon toga, kao što se i očekivalo, postoje određena odstupanja. To je proizvod činjenice da su mjerači ispod neutralne ose u obzir uzimali i otvorenost pukotina koja nije ravnomjerna po dužini nosača. Može se zaključiti da je pretpostavka o linearnosti diletacija validna.

Jedan od glavnih razloga za sprovođenje testova kao i njihovu analitičku analizu bio je pokušaj definisanja primenljivosti standarda i propisa koji su u upotrebi kada se presjeci armiraju čeličnim armaturama, na betonske presjeke koji su armirani plastičnim FRP armaturama. Ovom prilikom će biti prezentirani analitički rezultati za sile loma koje su dobijene kako je objašnjeno u predhodnim poglavljima, to jest po istim principima koji se koriste za analizu greda armiranih čeličnim armaturama. Uporedni rezultati dobijeni eksperimentima i analitičkim postupkom su predstavljeni u tabeli 3.

Može se vidjeti da su analitički rezultati u većini slučajeva veoma bliski eksperimentalnim. Modalitet loma je pravilno predviđen u svim slučajevima sem kod grede GB11 kod koje su i inače sračunate sile loma smicanjem i savijanjem približne. Vrijednosti sila loma smicanjem su sračunate upotrebom efektivne količine podužne armature kojom se izjednačavaju krutost FRP i čelične armature (vidi poglavlje 4. Modaliteti loma). Ako bi se kao efektivna uzela cjelokupna količina plastične FRP armature tada bi sračunate vrijednosti bile znatno veće. U slučaju greda GB11 i GB12 to bi dovelo do povećanja sračunate nosivosti na smicanje do 139,0 kN što je kod grede GB12 mnogo bliže eksperimentalno dobijenoj vrijednosti, ali bi primjenom tog metoda, na primjer, kod grede GB6 sračunata nosivost na smicanje bila 72,3 kN, što je skoro dvostruko više nego vrijednost dobijena u eksperimentu.

Tabela 3. Sile loma dobijene eksperimentalnim i analitičkim putem

Greda	Analitički rezultati		Eksperimentalni rezultati	
	P_{ult}	V_{ult}	P_{lom}	Modalitet loma
	(savijanje)	(smicanje)		
	(kN)	(kN)	(kN)	
GB1	84,3	215,5	97,8	savijanje
GB2	97,4	46,2	52,9	smicanje
GB5	86,32	313,8	105,1	savijanje
GB6	89,2	44,0	43,9	smicanje
GB9	99,9	170,4	103,6	savijanje
GB10	99,9	170,4	103,0	savijanje
GB11	99,9	108,8	97,95	smicanje
GB12	149,7	108,8	133,1	smicanje
GB13	89,8	165,6	90,6	savijanje
CB17	128,8	186,8	127,6	savijanje
CB19	113,9	178,8	109,6	savijanje

Konzistentnost postignutih eksperimentalnih rezultata je posebno značajna u svijetlu određenih sumnji u pogledu mogućnosti proizvođača plastičnih FRP armatura da proizvedu čitave serije materijala sa identičnim karakteristikama. To je posledica načina, a može se reći i recepture miješanja i temperature vezivnog materijala, i prave količine vlakana. Pri tome se moraju postići i održavati određena, konstantna vlažnost, zagrijanost, prodor vazduha i ostale karakteristike ambijenta. Njih je po pravilu teško postići u fabričkim uslovima zato se čine naponi kako bi se došlo do kombinacija predhodno navedenih sastojaka koje su manje podložne ambijentskim promjenama.

Konzistentnost izvršenih eksperimenata, mjernih uređaja i pratećih instrumenata a prije svega konstitutivnih materijala od kojih su napravljene grede je provjerena u dva slučaja.

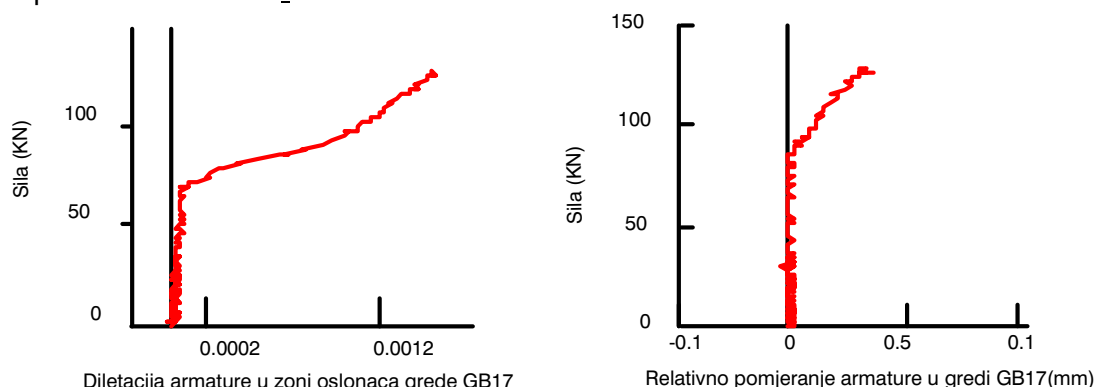
Grede GB2 i GB6 imale su potpuno istu armaturu i sistem nanošenja opterećenja tako da su razlike u izmjerenim silama loma (52,9 odnosno 43,9 kN) kao i maksimalnim ugibima u sredini grede (21,0 odnosno 14,8 mm) proizvod razlike u karakteristikama betona (čvrstoće na pritisak 38,1 odnosno 32,9 MPa i na zatezanje 2,94 odnosno 2,87 MPa). Iako je bilo predviđeno da i beton u ova dva slučaja bude istih karakteristika to nije bilo postignuto tako da je odlučeno da se izvedu dva nova testa, ali sa različitim armaturama, kako bi se postigao lom grede smicanjem, za koji se smatra da ga je teže reprodukovati.

Zbog toga su grede GB9 i GB10 bile proizvedene, armirane i testirane potpuno identično. Izmjerene vrijednosti sila loma (103,6 odnosno 103 kN), sila pri pojavi prvih pukotina (13,7 odnosno 14,5 kN), maksimalnih ugiba (45,4 mm u oba slučaja) kao i ostalih mjerenih veličina skoro ili potpuno su identične.

6. PRIJANJANJE BETONA UZ ARMATURU I PLASTIČNE UZENGIJE

Problemi prijanjanja i sidrenja plastične armature u testovima koji su ovdje prezentirani nisu predstavljali problem. Najveće izmjerene diletacije u armaturi u zoni neposredno uz oslonce, iz kojih se računaju naponi u armaturi koji moraju biti prihvaćeni prijanjanjem betona uz armaturu, a zbog nemogućnosti sidrenja to jest ostavljanja kuka na krajevima plastične FRP armature, iznosili su za slučaj karbonatne plastične armature do 0,0025 (napon u armaturi od 325 MPa) a za slučaj plastične FRP

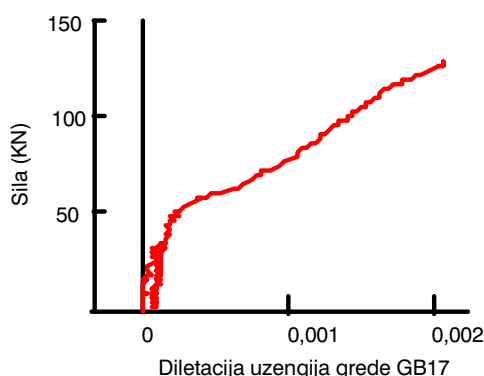
armature od stakla oni su iznosili do 0.005 (napon u armaturi od 225 MPa). Maksimalna relativna pomjeranja između armature i okolnog betona su bila nivoa veličine 0.5 mm. Tipični dijagrami za oba mjerenja su prikazani na slici 8.



Slika 8. Dijagrami dilatacije armature neposredno iznad oslonce i relativnog pomjeranja između armature i betona i nanesene sile

Konačni zaključak o prijanjanju betona za FRP armature u odnosu na čelične armature je teško donijeti na osnovu do sada izvršenih testova, posebno uzimajući u obzir da su maksimalni naponi u armaturi bili na nivou od 30-ak % od njene nosivosti na zatezanje. Može se međutim sa prilično sigurnosti reći da će daljnje povećanje nivoa napona u armaturi gotovo sigurno voditi prekoračenju napona na prijanjanje pa i do promjene modaliteta loma. Sa druge strane, kako je veoma vjerovatno da faktori sigurnosti u propisima u budućnosti neće, zbog nepostojanja duktilnosti u materijalu, dozvoljavati postizanje napona većih od 30-ak % od maksimalnih napona zatezanja, može se zaključiti da naponi prijanjanja i trenutno nepostojanje pogodnog sistema za sidrenje armature neće predstavljati značajan problem pri primjeni ovih materijala.

Plastične staklene uzengije su u testovima pokazale nosivost znatnu nižu od nosivosti na zatezanje konstitutivnog materijala od koga su načinjene. Najveći naponi u uzengijama dostignuti su u testovima u kojima je došlo do loma smicanjem u zoni oslonaca grede - GB6, GB11 i GB12, i oni su iznosili do 270 MPa, dok deklarirana čvrstoća materijala na zatezanje iznosi 1000 MPa. Jedan od mogućih razloga mogla bi biti koncentracija napona u uglovima uzengije nastala kao posledica načina njihove proizvodnje, dok bi drugi mogla biti veoma slaba nosivost vlakana u poprečnom pravcu što uz kombinaciju sa načinom formiranja pukotina od sila smicanja i uticaja agregata koji se "zasijeca" u uzengije može dovesti do ranog loma. Takođe, pri kidanju uzengije u željene širine pri procesu proizvodnje neminovno dolazi do kidanja određenog broja vlakana tako da se efektivno smanjuje površina poprečnog presjeka uzengije jer prekinuta vlakna ne mogu dostići željenu čvrstoću na zatezanje. U svakom slučaju faktor sigurnosti za upotrebu uzengija od FRP plastičnog materijala mora biti znatno veći nego uobičajeni faktor sigurnosti samog materijala. Na slici 9. predstavljen je tipičan dijagram sila - dilatacije u uzengijama dobijen mjernom trakom postavljenom u sredini uzengije.



Slika 9. Dijagram napadnih sila - dilatacija u uzengijama

12. ZAKJUČCI

- a) Eksperimentalni rezultati sila loma usled savijanja mogu biti analitički potvrđene istim metodama koje se koriste pri analizi presjeka armiranih čeličnim armaturama.
- b) Eksperimentalni rezultati sila loma usled smicanja mogu biti analitički potvrđeni primjenom istih jednačina koje se daju Britanskim propisima BS8110 pri čemu se uticaj podužne armature na nosivost na smicanje samog betona mora redukovati za odnos krutosti FRP plastične i uobičajene čelične armature
- c) Modalitet i način loma testiranih greda se ni po čemu ne razlikuju od načina i modaliteta odgovarajućih lomova greda armiranih čeličnim armaturama.
- d) Konzistentnost eksperimentalnih rezultata upućuje na zaključak da ne postoje problemi konzistencije u kvalitetu konstitutivnih materijala, a samim tim i FRP armatura.
- e) Naponi prijanjana betona za šipke staklene - plastične armature ne predstavljaju problem i ne mogu dovesti do loma grede kada ti naponi idu do vrijednosti od 30 % od maksimalnih napona zatezanja armature. Pri ovim naponima maksimalna vrijednost relativnog pomjeranja armature i betona se kreće oko 0,5 mm.
- f) Predpostavka o linearnosti diletacija po visini presjeka može biti primjenjivana i za presjeke armirane plastičnim armaturama, uz istu napomenu kao i pod e).
- g) Plastične uzengije u gredama pokazuju znatno nižu nosivost na zatezanje nego sami materijal. To je vjerovatno posledica koncentracije napona u uglovima uzengija a prilikom procesa njihove proizvodnje. Najveći izmjereni naponi u uzengijama su iznosili oko 25 % od deklariranih za sami materijal.

LITERATURA

-
- ¹ Nani itd.: "Bond of FRP reinforcement to concrete - experimental results", iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metalic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures" , L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 135 - 145.
 - ² Laralde, J. itd: "Fiberglass Reinforced Plastic Rebars in lieu of Steel Bars", iz "Structural Materials, Proceedings of the session related to structural materials at Structures Congress 1989", Orofino, J.F., ASCE, USA, 1989, strana 261 - 269.
 - ³ Alsayed, S.H. itd: "Flexural Behaviour of Concrete Elements reinforced by GFRP bars", iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metalic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures" , L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 219 - 226.
 - ⁴ Britanski propisi: British Standards BS8110 - Structural Use of Concrete, 1985.
 - ⁵ Đuranović N.: Armiranje AB greda plastičnom (FRP) armaturom, objavljeno u časopisu IZGRADNJA - Udruženje građevinskih inženjera i arhitekata Srbije, Beograd, str.____, sveska 7, septembar 1996.
 - ⁶ Heffernan, P.J. i Erki, P.J.: "Equivalent Capacity - A Design Concept for FRP Strengthened RC Beams", iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metalic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures" , L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 517 - 524