

OJAČAVANJE GREDA ARMIRANIH KOMPOZITNIM FRP ŠIPKAMA POMOĆU SPOLJAŠNJIH UZENGIJA

Dr Nebojša Đuranović

Rezime

Ovaj članak se bavi proučavanjem primjenjivosti kompozitnih vlaknastih armatura (FRP) kao, u određenim situacijama, pogodne zamjene za uobičajene čelične armature. Date su im dobre i loše osobine a zatim su predstavljeni i analizirani eksperimentalni rezultati dobijeni testiranjem greda armiranih ovim armaturama i naknadno ojačanih spoljašnjim uzengijama. Prikazani su rezultati testova sa 8 greda. Pri analiziranju rezultata testova korišćena su uputstva britanskih propisa za beton i armirani beton BS 8110 i evropskih kodova za projektovanje objekata izloženih dejstvu zemljotresa - Eurocode 8. Posebno je analizirana pojava loma grede usled gubitka sile prijanjanja između betona i armature.

Ključne riječi: FRP, armirani beton, vlakna, prijanjanje, ojačavanje

Abstract

This paper studies the employability of composite fibre reinforcement in place of ordinary steel reinforcement. Some advantages and disadvantages of these reinforcements have been presented. The results from the analytical and experimental work have been compared, with the emphasis put on those beams externally confined with steel hoops. Altogether eight tests have been analysed. The analysis was conducted by using BS 8110 and Eurocode 8. Bond failure of FRP reinforced concrete beams have been examined in detail.

Key words: FRP, reinforced concrete, fibre, bond, strengthening

UVOD

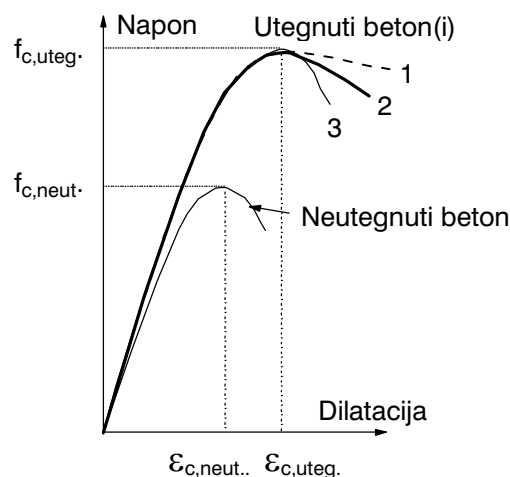
U poslednje vrijeme dolazi do ubrzanog istraživanja u oblasti primjene alternativnih materijala kao glavne, podužne i poprečne, ali i konstruktivne armature betonskih presjeka. Tu se prvenstveno radi o tzv. kompozitnim materijalima koji se sastoje od osnove, koju čini plastično-smolasti materijal, na koju se, ili kroz koju se, provlače vlakna drugog materijala, dajući mu tako karakteristike koje čine kombinaciju karakteristika osnovnih materijala. Završni proizvod dobija se u formi armaturnih šipki i uzengija.

Termin FRP (na engleskom **Fibre Reinforced Plastics**, to jest plastike ojačane vlaknima) koji će ovdje biti upotrebljavan, pokriva ogroman broj različitih materijala čije osobine ne zavise samo od sastojaka već, veoma često i u veoma velikoj mjeri, i od načina, to jest postupka proizvodnje. Na samom početku treba reći da se ovdje pod vlaknima ne podrazumijevaju kratka vlakna koja se obično koriste kao aditiv za poboljšavanje određenih karakteristika samog betona već kontinuirana vlakna čiji se prečnici, kao i kod predhodno pomenutih, mjere mikronima.

Suštinu kompozitnih FRP materijala dakle čini kombinacija tih vlakana i veziva. Mehaničke i fizičke osobine vlakana u ogromnoj mjeri određuju karakteristike završnog proizvoda. Vezivni materijali ne poboljšavaju nosivost završnog proizvoda ali utiču na njegov modul elastičnosti. Oni se po pravilu doziraju u najmanjim mogućim količinama koje pružaju dobru zaštitu od spoljnih uticaja i doprinose ukupnoj čvrstoći na smicanje, koja je kod vlakana inače veoma niska. Najčešće upotrebljavana veziva su epoksidna i poliesterska ljepila - plastike. Ona se najčešće oblikuju temperaturom pri čemu neka od njih mogu biti čak i pretapana i njihov oblik naknadno mijenjan.

Svrha serije testova prikazane u ovom članku je bila da se provjere mehanizmi analitičkog proračuna uticaja naknadnog utezanja AB presjeka, u situacijama kada su grede armirane kompozitnim FRP armaturama. Testovi su izvršeni na Građevinskom fakultetu Univerzitetu u Šefildu - Engleska. U daljem tekstu, eksperimentalno dobijene sile loma biće upoređene sa vrijednostima dobijenim analizom presjeka izvršenom po britanskim propisima BS8110 ¹ i evropskom standardu Eurocode-u 8 ².

Dakle, predstavljeni eksperimenti su izvedeni na AB gredama ojačanim spoljašnjim uzengijama. Ojačanja su rađena u cilju postizanja troosnog stanja napona u pritisnutom betonu a samim tim i povećavanja čvrstoće betona na pritisak, dilatacija betona pri lomu i postizanja veće duktilnosti loma cijelog AB presjeka. Tipična promjena fizičko - mehaničkih osobina betona usled utezanja je prikazana na slici 1.



Slika 1 - Tipični dijagrami napon - dilatacija za neutegnuti i utegnuti beton

¹ Britanski propisi: British Standards BS8110 - Structural Use of Concrete, 1985.

² Eurocode 8: part 1 -3: General rules and rules for buildings - specific rules for buildings of different materials

Značajno je napomenuti da je eksperimentima utvrđeno da se postizanjem prostornog stanja napona u betonu putem sprezanja, naponi prijanjanja znatno povećavaju³ što je posebno interesantno jer je povezano i sa onako dobrodošlim povećanjem u iskorišćenosti betona u presjeku, to jest pomjeranja neutralne ose presjeka naniže.

Inače, postoji više načina na koji se može procijeniti povećanje čvrstoće betonskog presjeka usled utezanja presjeka armaturom. Pored modela koji će biti primijenjen za analizu greda u ovom članku, ovdje ću podsjetiti na model koji se najviše koristi kod nas. Po njemu se prirast čvrstoće betona $\Delta\beta_{ps}$ može sračunati kao što je dato u referenci ⁴ :

$$\Delta\beta_{ps} = \frac{1}{2\nu} \cdot \frac{A_s}{A_{bs}} \cdot \sigma_{vs}$$

gdje su:

- ν - Poasson-ov koeficijent
- A_s - površina spiralne armature stuba
- A_{bs} - spiralom obuhvaćena površina jezgra betonskog presjeka
- σ_{vs} - granica tečenja spiralne armature

Inače ovaj model se koristi kod proračuna povećanja nosivosti spiralno armiranih stubova.

GLAVNE PREDNOSTI I NEDOSTACI KOMPOZITNIH FRP ARMATURA

Pravilo je da se materijal, u ovom slučaju čelik, koji se u mnogobrojnim primjenama pokazao kao uspješan i ekonomičan ne mijenja bez valjanih razloga koji opravdavaju tu promjenu. Međutim, istraživanja na kompozitnim FRP armaturama upućuju na zaključak da će one, u skoroj budućnosti, preuzeti dio zadataka dosada povjeravanih čeličnim armaturama i čeličnim kablovima za prednaprezanje. To se prvenstveno odnosi na situacije u kojima se armature pravljene od čelika pokazuju kao neadekvatno ili nedovoljno pouzdano sredstvo armiranja. Ta neadekvatnost čelika u pojedinim situacijama direktna je posljedica njegovih fizičkih, mehaničkih i hemiskih osobina.

Kompozitne FRP armature imaju cijeli niz karakteristika zbog kojih su u pojedinim situacijama pogodnije za upotrebu nego klasične čelične armature.

Tako, na primjer, za razliku od čeličnih, kompozitne armature nisu podložne koroziji.

Kompozitni FRP materijali imaju čvrstoću na zatezanje znatno veću nego čelici koji se uobičajeno upotrebljavaju.

Kompozitni materijali pokazuju potpunu magnetnu i električnu neutralnost. Električna "transparentnost" FRP armatura predstavlja karakteristiku koja je od suštinskog značaja za sve objekte u kojima su smješteni osjetljivi elektronski uređaji i u kojima prisustvo većih količina čelične armature može nepovoljno uticati na upotrebljivost tih instrumenata. Magnetna "providnost" pruža prednosti slične onima pomenutim kod električne.

Mala specifična težina kompozitnih armatura, iako ne predstavlja njihovu najveću prednost sa stanovišta građevinarstva, može u određenim situacijama da znatno smanji težinu samog objekta pa tako i smanji statičke i dinamičke uticaje koji negativno djeluju na njegove niže nivoe. Ovo se posebno odnosi na objekte kod kojih su prisutni jako armirani presjeci.

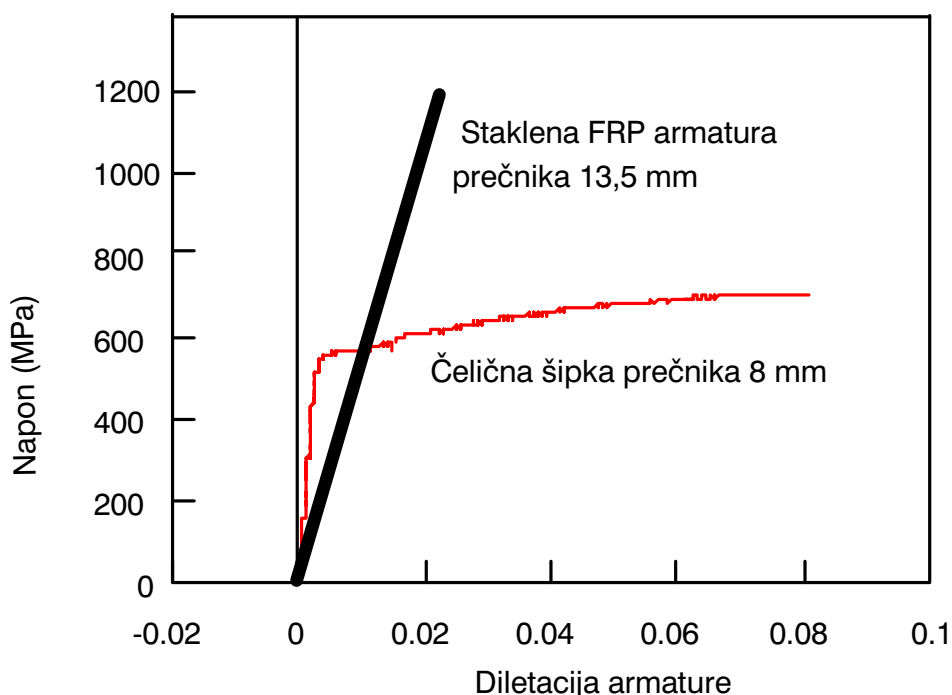
³ Malvar, L.J.: "Bond Stress-Slip Characteristics of FRP Rebars", ACI Convention, San Francisco, 1994, strana 17 - 20.

⁴ Beton i armirani beton prema BAB 87 - knjiga 1, Priručnik za primenu Pravilnika o tehničkim normativima za beton i armirani beton - BAB 87, autora priloga M. Ačić, str. 205.

Velika otpornost na zamor materijala (za aramidne i karbonatne FRP armature čak do 3 puta veća nego kod čelika ali kod staklenih FRP armatura može biti manja nego kod čelika⁵) i otpornost na hamiske uticaje takođe mogu u određenim situacijama olakšati posao projektanta.

I na kraju proces proizvodnje kompozitnih armatura, koji se odvija pod ne tako visokim temperaturama, i vlaknasta priroda završnog proizvoda ostavljaju dosta prostora za ugrađivanje raznih vrsta mjerača i senzora u samu armaturu, koji mogu u budućnosti predstavljati značajan korak ka tzv. "inteligentnim" konstrukcijama koje bi praktično same izvještavale o svom trenutnom upotrebnom stanju.

Pored svih svojih dobrih karakteristika postoje razlozi zbog kojih kompozitni materijali mogu biti upotrebljavani samo uz značajnu dozu opreza. Najznačajniji od njih, sa stanovišta projektovanja, su potpuna linearnost dijagrama napon - deformacija i problemi povezani sa prijanjanjem FRP armature i betona, o kojima će nešto više biti rečeno i u ovom članku.



Slika 2. Dijagrami napon-dilekacija za tipičnu čeličnu i FRP armaturu

Sa slike 2 je evidentno da FRP materijali ne posjeduju tačku tečenja kao čelične armature već se do tačke kidanja ponašaju potpuno linearno. To potpuno odsustvo duktiliteta to jest nepostojanje zone plastičnosti je veoma značajna osobina FRP armature i ona ima najveće posledice po njihovu upotrebu za armiranje AB konstrukcija. Dalje, FRP materijali imaju po pravilu veoma nizak modul elastičnosti, ali se mora naglasiti da se već sada proizvode karbonatne FRP armature koje imaju modul čak i veći od 200 GPa. Sledeća bitna karakteristika vidljiva sa slike 2 je po pravilu niska dilekacija na granici kidanja. Jedina, sa gornje slike vidljiva karakteristika, a zbog koje su ovi materijali itekako dobrodošli za mnoštvo primjena u građevinarstvu je njihova izuzatno visoka čvrstoća na zatezanje.

Pored ovih ovi materijali posjeduju još niz drugih problema a neki od njih su:

- Relativno visoka cijena - u ovom trenutku cijena im je do 3 puta veća nego obične čelične armature ali se smatra da će povećanom konkurencijom proizvođača cijena biti snižena,
- Granična čvrstoća pri dugotrajnim opterećenjima im je nedovoljno ispitana,
- Postoje izvještaji koji nagoveštavaju da ultra-violentna zračenja mogu prouzrokovati oštećenja na materijalu,

⁵ Erki, M.A. i Rizkalla, S.H.: "FRP Reinforcement for Concrete Structures", Concrete International; Design and Construction, tom 15, dio 6 strana 48 - 53.

- d) Problemi obradljivosti npr. kod staklenih armatura zbog opasnosti od povreda stalnim vlaknima,
- e) Znatno niža čvrstoća na smicanje nego kod čelika,
- f) Nepostojanje standarda za projektovanje kao u slučaju čeličnih armatura.

Ima još nepoznanica koje zahtijevaju oprez pri primjeni kompozitnih armatura. Neke od njih su na primjer nedovoljna ispitatost postojanosti staklenih FRP armatura u betonu, slabljenje aramidnih FRP armatura pri apsorpciji vode, veoma slab nivo ispitatosti ponašanja u uslovima vatre i dinamičkih opterećenja, nedovoljna ekološka ispitatost itd. Istraživanja koja se trenutno vrše na više mjesta u svijetu pokušavaju da osvijetle neke od ovih nepoznanica pa se sa prilično sigurnosti mogu očekivati i dalja poboljšanja samog materijala.

PROCJENA MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA KOMPOZITNE ARMATURE

Dosta precizne procjene modula elastičnosti kompozitne armature, E_{frp} , se mogu dobiti ako su poznati modul elastičnosti E_{vl} i procenat vlakana V_{vl} u ukupnoj zapremini šipke, i modul elastičnosti veziva E_{ve} upotrebljenog za spravljanje šipki. Tada:

$$E_{frp} = E_{vl} \cdot V_{vl} + E_{ve} \cdot (1 - V_{ve})$$

Po istom principu se može procijeniti i čvrstoća na zatezanje f_{frp} plastične armature, a na osnovu poznate čvrstoća na zatezanje f_{vl} vlakana koja je čine. Tada:

$$f_{frp} = f_{vl} \cdot V_{vl}$$

OPIS EKSPERIMENATA

U testovima je korišćeno više vrsta kompozitne, FRP armature. Staklena FRP armatura ima deklarisanu granicu izvlačenja 1000 MPa dok je moduo elastičnost od 45 GPa provjeren i eksperimentalno. Ova armatura je korišćena i u svojstvu šipki glavne armature, ali i kao uzengije.

Tipičan detalj staklene FRP armature upotrebljene za armiranje greda je prikazan na slici 3.



Slika 3 - Staklena FRP armatura sa kablovima mjernih traka, spremna za postavljanje u kalupe

Karbonatna kao i aramidna plastična FRP armatura su korišćene samo u svojstvu glavne podužne armature. Deklarisana čvrstoća na zatezanje im je bila 1700 MPa i 1300 MPa, a moduo elastičnosti provjeravan im je eksperimentalno i iznosi 130 GPa i 65 GPa, respektivno.

Testovi na staklenim uzengijama korišćenim u ovoj seriji testova, 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. 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. Staklene unutrašnje uzengije su u svim slučajevima imale pravougaoni presjek debljine 4 mm i širine 10 mm.

Problemi duktilnost loma greda armiranih kompozitnim armaturama već duže vremena predstavljaju jedan od glavnih pravaca istraživanja au usled ograničavajućeg dejstva na moguće primjene kompozitnih FRP armatura. O eventualnom progresivnom kidanju (i na taj način postizanju duktiliteta u presjeku) šipki napravljenih od kompozitnih vlakana različitih modula elastičnosti i čvrstoća biće govora nekom drugom prilikom. Međutim, ovom prilikom, po prvi put u svijetu testirane su grede armirane šipkama napravljenim od kombinacije vlakana visokog (karbonatna vlakna) i niskog (staklena vlakna) modula elastičnosti. Ta kombinacija je imala ukupni modul elastičnosti 70 GPa i granicu kidanja od 1000 MPa. Ove šipke su korišćene kao glavna armatura za gredu CGB 22.

Dok su uzengije bile potpuno glatkih površina, na kompozitnim FRP šipkama bila je zalijepljena "košuljica" od lagano naboranog materijala. Svrha "košuljice" je bila da, koliko - toliko poboljša nivo prijanjanja betona za armaturne šipke. Inače "izboranosti" FRP šipki mogu biti u različitim formama kao što su nalijepljena zrnca pijeska, nalijepljene navlake sa različitim dubinama i oblicima šara itd. Značajno je napomenuti da, za sada, ove "izboranosti" ni u kom slučaju ne mogu biti na nivou i kvalitetu rebara koje ima obična rebrasta armatura.

Tehnologija izlivanja i njegovanja uzoraka i kontrolnih tijela, kao i detalji izvršenih mjerenja, položaj mjernih mjesta, način i postupak mjerenja dati su u referenci ⁶.

Testirane grede su u svim, u tekstu pomenutim eksperimentima, 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 bilo nanošeno u trećinama raspona, to jest 767 mm od oslonaca. Statički sistem je u svim slučajevima bio sistem 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. Količine armature kao i dostupni podaci o čvrstoći betona na pritisak i zatezanje dati su u tabeli 1.

⁶ Đuranović, N.: Ispitivanje greda armiranih plastičnim (FRP) armaturama, časopis "Izgradnja", broj 12/96, strane 657 - 665.

Tabela 1. - Armatura i beton

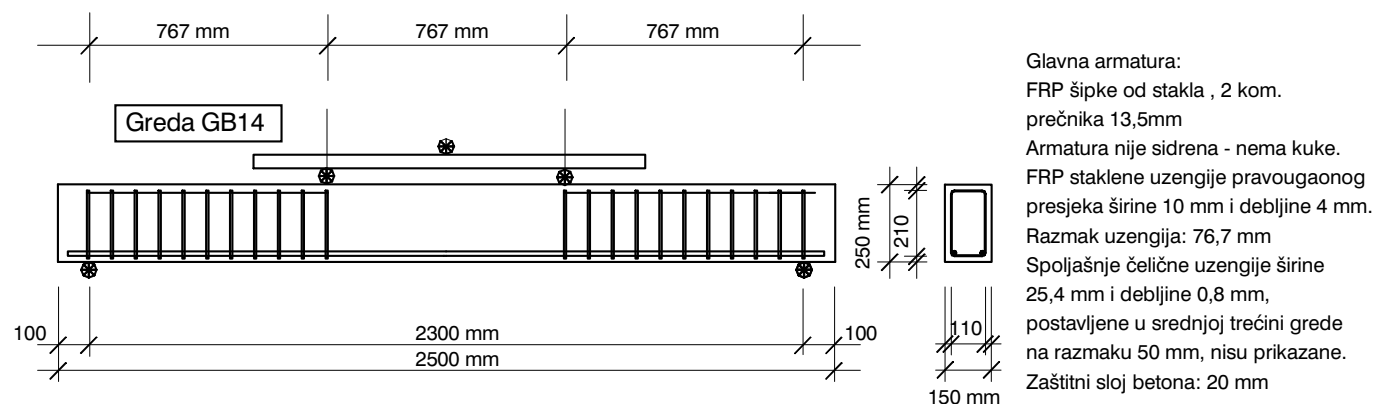
Oznaka grede	Podužna armatura			Unutrašnje uzengije			Beton		Spoljašnje uzengije	
	materijal	prečnik (mm)	n	mat.	A_{stir} (mm ²)	s_v (mm)	f_{cu} (MPa)	f_{ct} (MPa)	A_{conf} (mm ²)	s_{conf} (mm)
GB 14	GFRP	13,5	2	GFRP	40	77	43,4	3,57	20,3	50
GB 15	GFRP	13,5	2	GFRP	40	77	43,4	3,57	20,3	200
GB 16	GFRP	13,5	2	GFRP	40	77	43,4	3,57	6,0	62
CB 18	CFRP	13,5	3	GFRP	40	77	34,0	2,54	20,3	50
CB 20	CFRP	13,5	2	GFRP	40	77	34,0	2,54	20,3	50
CGB 22	CGFRP	13,5	3	----	----	----	18,1	1,72	20,3	savij. 30, smic. 75
CB 26	CFRP	8,5	3	GFRP	40	110	47,8	3,59	20,3	30
AB28	AFRP	8,5	3	GFRP	40	110	47,8	3,59	20,3	30

Gdje su:

- n - broj šipki glavne podužne armature
- A_{stir} - površina 1 kraka unutrašnje uzengije
- A_{conf} - površina 1 kraka spoljašnje uzengije
- s_v - razmak unutrašnjih uzengija
- s_{conf} - razmak spoljašnjih 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*)
- CGFRP - karbonatn-staklena FRP armatura (*Carbon-Glass FRP*)
- AFRP - aramidna FRP armatura

Grede su uvijek izlivanе u grupama od 4 tako da su u tabeli zajedno grupisane grede koje su izlivanе istovremeno (npr. grede GB14 do GB16). Grede koje su izostavljene iz tabele neće biti razmatrane u ovom tekstu jer su na njima ispitivane pojave nebitne sa staovišta ovog članka.

Tipični izgled grede kao i sistem opterećenja dati su na slici 4.



Slika 4. Tipična greda i shema opterećenja

Pri utezanju greda spoljašnjim uzengijama korišćene su čelične trake (poprečni presjek 25,4 mm x 0,8 mm, sem kod grede GB16 kod koje su korišćene trake širine 12 mm i debljine 0,5mm). Ove čelične trake imaju visoku granicu tečenja od 700 MPa i modula elastičnosti 200 GPa. Sem kod grede

CB 26, uvijek je utezana samo središnja trećina grede, jer je tu i najveća potreba za postizanjem veće čvrstoće betona, a zatim su postavljane i po par traka na prelazu sa srednje na krajnje trećine grede.

Kako je greda CB 26 projektovana bez unutrašnjih uzengija to je osiguranje ove grede od glavnih kosih napona zatezanja postignuto spoljašnjim uzengijama. Ova greda je takođe imala spoljašnje uzengije i po svom središnjem dijelu.

SRAČUNAVANJE UTICAJA UTEZANJA PRESJEKA SPOLJAŠNJIM UZENGIJAMA NA NOSIVOST AB GREDA

Doprinos spoljašnjih uzengija ogleda se prvenstveno u povećanju čvrstoće betona na pritisak za presjeke koji su utegnuti. To povećanje se postiže na račun uspostavljanja troakosialnog stanja napona u utegnutim presjecima. Nivo povećanja čvrstoće betona direktno zavisi od količine spoljašnjih uzengija, kao i od dodatnog pritiska koji se unosi u presjek početnim pričvršćivanjem spoljašnjih uzengija. Pod nenapregnutim spoljnim uzengijama podrazumijevaju se uzengije koje se postavljene u posmatrani presjek i pritegnute silom dovoljnom da ih drži na svome mjestu. I u takvoj situaciji utezanjem unijeta je određena sila pritiska u presjek ali se ona obično smatra zanemarljivom.

U slučajevima greda koji se obrađuju u ovom članku korišćene su uzengije koje nisu bile dodatno utezane. To praktično znači da se sila u njima razvija tek nakon nanošenja opterećenja na gredu i početka deformisanja napregnutog betonskog presjeka. Tek tada će ove spoljašnje uzengije početi da daju doprinos povećanju čvrstoće betona na pritisak. Ovo unošenje spoljašnje sile u AB presjek je srazmjerno veličini ukupnih dilatacija betona, jer se povećavanjem dilatacija povećava napon u spoljašnjim uzengijama a time i podiže čvrstoća betona.

Pri računanju povećanje granične nosivosti betona na pritisak kod ovakve situacije kada spoljašnje uzengije nisu dodatno utezane, količina tih spoljašnjih uzengija je jedan od glavnih parametara.

Eurocode 8, u dijelu I - 3, član 2.3.1.3. - "Lokalni duktilitet", (kod stubova, prim. aut.) barata sa pojmom "mehanički odnos uzengija za utezanje i obavljenog betona (*"mechanical volumetric ratio of confining hoops"*), w_{wd} . Ovaj koeficijent je korišten i u ovom radu kao mjera veličine (nivoa) utegnutosti AB presjeka. Taj koeficijent se definiše kao odnos proizvod ukupne (razmazane) zapremine uzengija (kod nas: spoljašnjih uzengija) i njihove granice tečenja, prema proizvodu ukupne zapremine obuhvaćenog AB presjeka i računске čvrstoće betona na pritisak.

Gore pomenuti član Eurocode-a 8 propisuje potrebne količine uzengija, a u smislu zadovoljenja uslova duktilnosti krajeva stubova, ali ne daje direktnu vezu količine tih uzengija i povećanja čvrstoće betona na pritisak. U ovom radu za tu vezu korišćeni su sledeći izrazi:

$$f_{Bu} = f_B \cdot (1 + 2,5 \cdot \alpha \cdot w_{wd}) \text{ kada je } w_{wd} \cdot \alpha < 0,1$$

$$f_{Bu} = f_B \cdot (1,125 + 2,5 \cdot \alpha \cdot w_{wd}) \text{ kada je } w_{wd} \cdot \alpha > 0,1$$

gdje su:

f_{Bu} - računska čvrstoća betona utegnutog spoljašnjim uzengijama u MPa

f_B - računska čvrstoća neutegnutog betona u MPa

w_{wd} - nivo utegnutosti presjeka, predhodno objašnjen

α - mjera efikasnosti spoljašnjih uzengija.

Trebamo se malo detaljnije osvrnuti na "mjeru efikasnosti djelovanja spoljašnjih uzengija" datu kroz veličinu α . Ovaj parametar je takođe definisan u pomenutom članu Eurocode-a 8 (*"global effectiveness of confinement"*), a iz načina njegovog sračunavanja najbolje se vidi što mu je fizički smisao. Dakle:

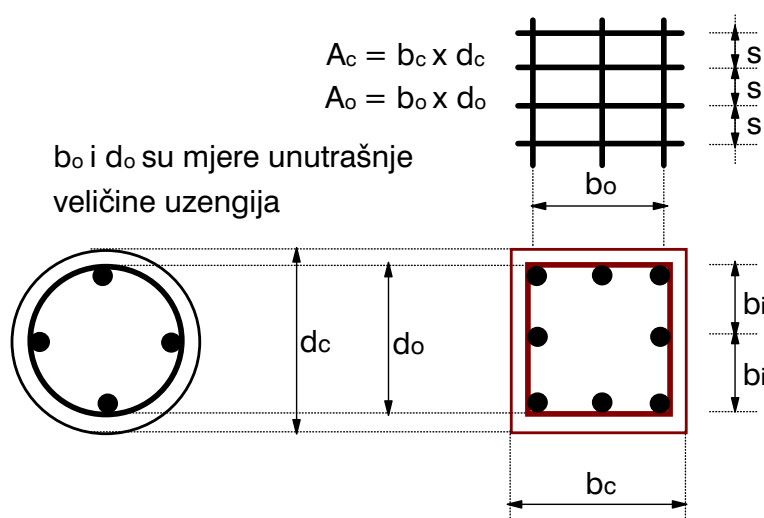
$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$$

Na istom mjestu su dati načini sračunavanja α_n i α_s za kružni presjek obuhvaćen spiralnom armaturom, za kružni presjek obuhvaćen zatvorenim horizontalnim uzengijama kao i za pravougaoni presjek. Tako se za pravougaoni presjek α_n i α_s sračunavaju kao:

$$\alpha_n = 1 - \frac{\sum b_i^2}{6 \cdot A_o}$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2 \cdot b_o}\right)^2$$

Smisao geometrijskih oznaka A_o , b_i i b_o data je na slici 5.



Slika 5 - Definisanje koeficijenta efikasnosti uzengija, (prenijeto iz Eurocode 8, part I - 3, slika 2.12)

Pri tome treba napomenuti da se vrijednosti d_o i b_o odnose na unutrašnje dimenzije uzengija. Takođe na slici je prikazan sloj zaštitnog betona što treba imati u vidu kod primjene formula za spoljašnja ojačanja.

Izraz za α_s treba dodatno razjasniti. Jasno je da se u pomenutom članu Eurocode-a 8 formula za α_s odnosi na stub kvadratnog presjeka pa je potrebno dati njeno tumačenje za naš slučaj, tj. za gredu pravougaonog presjeka. Najlogičnije je da se data formula za slučaj pravougaonog presjeka napiše kao:

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2 \cdot b}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2 \cdot d}\right)$$

gdje su b i d gabaritne dimenzije pravougaonog presjeka.

Pažljivi čitalac je odmah uočio da se u pomenutom članu Eurocode-a 8 govori o stubovima a ne o gredama. Znači, treba posebno naglasiti da su ove odredbe date u poglavlju koje govori o armiranobetonskim stubovima, kod kojih je postizanje utezanja uzengijama posebno aktuelno i često neophodno. Kako u Eurocode-u 8 nisu razmatrani slučajevi spoljašnjeg ojačanja AB greda uzengijama to su ovom prilikom u tu svrhu upotrebljene odredbe člana koji se odnosi na AB stubove.

Postupak daljnjeg analiziranja presjeka ni u čemu se nije razlikovao od uobičajenog načina analiziranja AB greda, sem što je analiza vršena sa ovako uvećanom računskom čvrstoćom betona na pritisak.

Kao što se iz predhodno navedenog vidi, postoji fundamentalna razlika između ovog načina sračunavanja doprinosa spoljašnjih uzengija kroz utezanje presjeka, povećanju računске čvrstoće betona na pritisak i modela koji se kod nas najviše koristi a koji je ukratko izložen u poglavlju "Uvod". Ta razlika se ogleda se u tome što kod ovog modela postoji direktna veza računске čvrstoće betona kod utegnuto i neutegnuto presjeka dok u gore pomenutom modelu ta veza uopšte ne postoji. Na ovom mjestu neće biti diskutovana opravdanost ni jednog ni drugog modela.

Sem uloge u povećavanju nosivosti na pritisak obuhvaćenog betona, spoljašnje uzengije, isto kao i one postavljene unutar AB presjeka, povećavaju i nosivost presjeka na smicanje. O tom aspektu djelovanja spoljašnjih uzengija, kod rezultata prezentiranih u ovom tekstu, treba voditi računa jedino kod grede CGB 22, jer su kod ostalih greda spoljašnje uzengije bile raspoređene samo u zoni najvećih pritisaka u betonu, tj. zoni djelovanja čistog momenta u i oko sredine nosača.

Utezanjem betona, sem povećanja granične nosivosti betona, mijenjaju se i ostale fizičko - mehaničke karakteristike. Tako naprimjer postiže se znatno veća duktilnost loma nego kod neutegnuto betona a i maksimalna dilatacija kao i dilatacija na granici loma betona su znatno veća. Međutim, kod analitičkog modela upotrebljavanog pri analiziranju ovdje predstavljenih AB greda, obje ove činjenice su zanemarene.

Faktorom povećavanja računске čvrstoće betona, u principu treba da bude obuhvaćena i činjenica da je ipak, prilikom postupka postavljanja spoljašnjih uzengija, neminovno, s obzirom na tehnološki postupak njihovog montiranja, da dođe do unošenja dodatne sile pritiska u presjek. Neminovna posledica te unesene sile je bio dodatno utezanje presjeka, pa samim tim i daljnje povećanje čvrstoće betona na pritisak.

Isto tako, treba naglasiti da je zanemaren uticaj utezanja betona koji se ostvaruje dejstvom uobičajenih unutrašnjih uzengija. Taj oblik dejstva ovih unutrašnjih uzengija takođe se može, po potrebi, unijeti u proračun ali se to gotovo nikad ne čini, sem u slučajevima spiralno armiranih stubova.

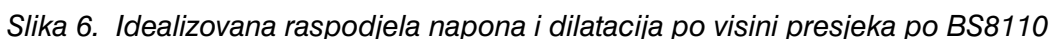
SRAČUNAVANJE GRANIČNE NOSIVOSTI AB PRESJEKA USLED ČISTOG SAVIJANJA ZA SLUČAJ GREDA ARMIRANIH KOMPOZITNIM ŠIPKAMA

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:

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

Idealizovani dijagrami raspodjele napona i dilatacija kod betona izloženog pritisku u BS8110 su dati kao što je prikazano na slici 6.



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

$$k_1 = 0.45 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{f_{cu}}{52,5}}\right) \quad k_2 = \frac{\left(2 - \frac{\sqrt{f_{cu}}}{17,5}\right)^2 + 2}{4 \cdot \left(3 - \frac{\sqrt{f_{cu}}}{17,5}\right)}$$
$$\text{dok } \varepsilon_0 \text{ ima vrijednost: } \varepsilon_o = \frac{\sqrt{f_{cu}}}{5000}, \text{ pa je prema tome: } x_o = \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_{cu}} \cdot x.$$

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:

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

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

Nakon utvrđivanja položaja neutralne ose, granična nosivost prermiranog 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:

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

gdje je:

A_{arm} - površina zategnute armature

f_y - granica tečenja armature

Treba naglasiti da je za dobijanje ove relacije korišćena pogodnost totalne linearne veze napona i dilatacija kod kompozitnih armatura kao i uslov kompatibilnosti deformacija u armaturi i betonu do same granice kidanja kompozitne FRP armature, čime je izbjegnuto sračunavanje položaja neutralne ose presjeka.

SRAČUNAVANJE GRANIČNE NOSIVOSTI AB PRESJEKA USLED GLAVNIH KOSIH NAPONA ZATEZANJA ZA SLUČAJ GREDA ARMIRANIH KOMPOZITNIM ŠIPKAMA

Nemogućnost uspostavljanja jedinstvenog mehanizma loma smicanjem kod betona kao posledicu ima. po BS 8110, 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 konsekvetno vode do različitih vrijednosti nosivosti betona na smicanje.

Prvi pristup je baziran na prosto 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 nedovoljnje 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:

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

gdje je:

E_{FRP} - moduo elastičnosti plastične FRP armature

$E_{čelik}$ - 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.

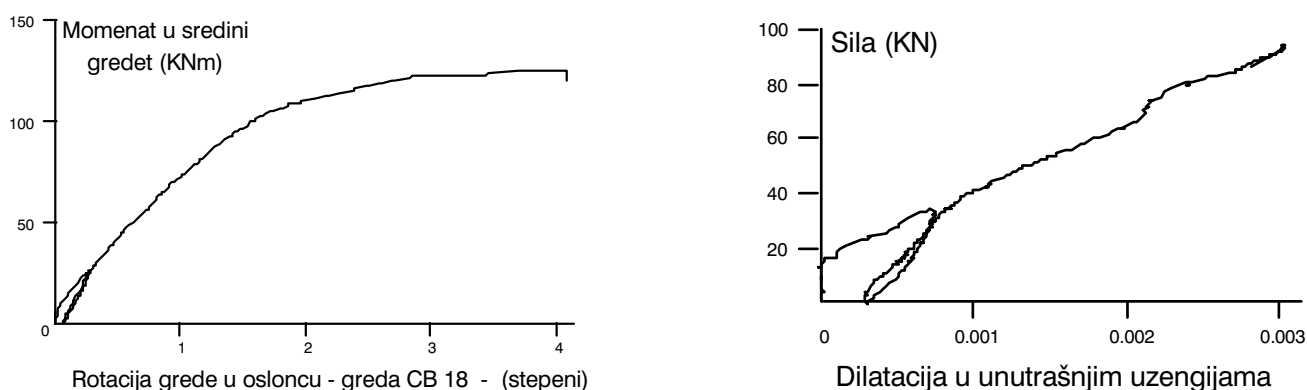
REZULTATI EKSPERIMENATA

Pri lomu greda armiranih kompozitnim FRP armaturama i dodatno utegnutih čeličnim trakama postižu se modaliteti loma identični onima kod greda armiranih standardnim čeličnim šipkama. Na slici 7 prikaza je lom grede usled prekoračenja nosivosti armature.



Slika 7. Greda GB14 u fazi loma

Na slici 8, a radi ilustracije rezultata eksperimenata, dati su i dijagrami *rotacije grede u osloncu vs nanesei momenat u sredini grede*, kao i dijagram *izmjenjenih dilatacija u unutrašnjim uzengijama vs nanesea sila*.



Slika 8 - Tipični dijagrami rotacija kraja grede i dilatacija u unutrašnjim uzengijama vs nanijeto opterećenje

U tabeli 2 dati su glavni indikatori ponašanja testiranih greda. Način njihovog mjerenja detaljno je opisan u predhodno spomenutoj referenci iz časopisa "Izgradnja".

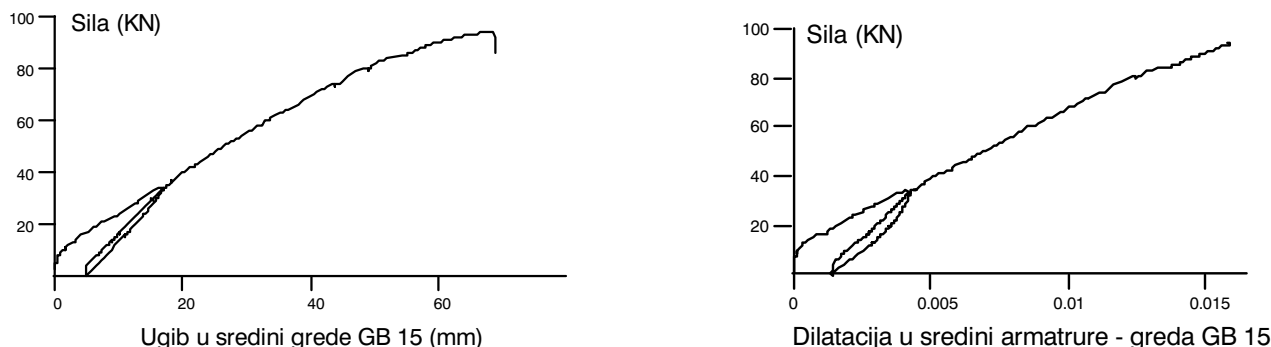
Tabela 2 - Rezultati testova

Oznaka grede	Maksimalne vrijednosti izmjerene u sredini grede				Maksimalne vrijednosti izmjerena na krajevima armature			
	Ugib	Dilatacija armature	Napon u armaturi	Procenat od sile kidanja	Proklizavanje	Dilatacija prijanjanja	Napon prijanjanja	Procenat od sile kidanja
	(mm)		(MPa)		(mm)		(MPa)	
GB14	73,0	0,022	990	94,5 %	0,01	0,0047	212	21,2 %
GB15	68,1	0,016	720	72,0 %	0,01	0,0015	68	nebitno
GB16	67,1	0,017	765	76,5 %	0,06	0,0041	185	nebitno
CB18	63,3	0,008	1040	61,2 %	0,16	0,0027	351	20,6 %
CB20	52,8	0,010	1300	76,5 %	1,15	0,0032	416	24,5 %
CGB22	74,2	0,011	770	77,0 %	0,6 → 2,2	0,0055	385	38,5 %
CB26	48,1	0,012	1560	91,8 %	0,02 → ??	0,0044	572	33,6 %
AB28	64,0	0,020	1300	"100 %"	0,72	0,0054	351	27,0 %

Postignuti lom greda je u ovim testovima uvijek posledica momenata savijanja, koji su već nego što greda može da primi (grede 14,15,16,18 i 28) ili prekoračenja sila veze prijanjanja betona i armature

(ostale grede). Saglasno tome, najveći izmjereni naponi u armaturi su se kretali od 61,2% do 100 % sile kidanja armature. Kod grede AB 28 je dostignut istovremeni, simultani, lom po betonu i armaturi

Ugibi izmjereni u ovoj seriji testovima neće biti komentarisani niti analizirani u ovom članku, ali je iz samih rezultata jasno da su znatno veći nego oni koji bi bili dobijeni da je korišćena odgovarajuća čelična armatura. Ugibi su dodatno povećani korišćenjem spoljašnjih uzengija za utezanje presjeka. Tipični dijagrami *ugib* tj. *dilatacija armature vs naneseno opterećenje* prikazani su na slici 9.



Slika 9 - Tipični dijagrami *ugib* i *dilatacija* vs *naneseno opterećenje*

UPOREĐENJE EKSPERIMENTALNIH I ANALITIČKIH REZULTATA SILE LOMA

Upoređenje eksperimentalnih i analitički sračunatih sila loma, a prema modelima objašnjenim u predhodnim poglavljima prikazano je u tabeli 3.

Tabela 3. *Sile loma dobijene eksperimentalnim i analitičkim putem*

Oznaka grede	Analitički rezultati				Eksperimentalni rezultati	
	Neutegnuta greda		Utegnuta greda		P_{lom} (kN)	Modalitet loma
	P_{ult}	V_{ult}	P_{ult}	V_{ult}		
	(savijanje)	(smicanje)	(savijanje)	(smicanje)		
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)		
GB14	88,1	165,6	93,3	165,6	106,5	armatura
GB15	88,1	165,6	88,4	165,6	94,58	beton
GB16	88,1	165,6	89,3	165,6	103,4	beton
CB18	126,2	186,9	137,8	186,9	163,5	beton
CB20	111,7	178,8	121,4	178,8	146,2	prijanjanje
CGB22	68,9	37,3	90,4	208,1	98,7	prijanjanje
CB26	116,8	139,8	128,8	139,8	122,6	prijanjanje
AB28	89,0	129,0	97,5	129,0	84,6	arm./beton

Iz rezultata se vidi da ni za jednu grede smicanje nije kritični modalitet loma tako da u ostalim analizama neće biti ni razmatrano.

U najmanje tri slučaja kod greda ovdje izloženih (greda 20, 22 i 26) došlo je do otkazivanja veze armatura - okolni beton tj do došlo je do loma sile prijanjanja. I pored toga analitički rezultati sračunati pre nabregavajući lom usled prijanjanja su znatno niži nego eksperimentalni rezultati, uprkos činjenici da je kritični mehanizam loma drugačiji od analitički sračunatog. To govori da bi, u situaciji spriječenog

loma usled prijanjanja, lom grede u eksperimentu nastao znatno kasnije, to jest eksperimentalna sila loma bi bila još veća.

Uopšte, vidi se da su u svim slučajevima vrijednosti graničnih sila sračunatih analitičkim putem podcijenjene u odnosu na eksperimentalne rezultate.

S obzirom na činjenicu da se eksperimentalni i analitički rezultati sile loma za slučaj greda koje nisu dodatno utezane spoljašnjim uzengijama određeni sa mnogo većom tačnošću (vidi već pomenutu referencu iz časopisa IZGRADNJA), može se zaključiti da do razlike u analitičkim i eksperimentalnim rezultatima dolazi usled nedovoljno tačnog računanja uticaja sila od utezanja betona.

Ovo dalje upućuje na zaključak da se analitička sila doprinosa spoljašnjih uzengija povećanju nosivosti pritisnutog betona po gore datoj formuli nalazi na strani sigurnosti i do 25% od stvarne nosivosti betona.

Još u uvodu je rečeno da sem na graničnu čvrstoću na pritisak, utezanje betona utiče i na maksimalne moguće dilatacije u betonu. Do sada nigdje u analizi ta činjenica nije uzimana u obzir već su sva računanja sprovedena korišćenjem maksimalnih dilatacija u betonu datih britanskim propisima BS 8110. Po njima granične dilatacije betona iznose 0,0035. Ako se uzme da će najveća dilatacija u betonu pri utezanju ustvari iznositi 0,0050 onda se za graničnu silu loma dobijaju veličine prikazane u tabeli 4.

Tabela 4. Vrijednosti sile loma sračunate korišćenjem realne vrijednosti granične dilatacije betona

Oznaka grede	Rezultati korigovani povećanim dilatacijama		Rezultati testova
	P_{ult} (kN)	Procenat uvećanja	P_{lom} (kN)
GB14	107,4	15,1 %	106,5
GB15	101,6	14,9 %	94,58
GB16	102,6	14,9 %	103,4
CB18	152,3	10,5 %	163,5
CB20	135,8	11,9 %	146,2
CGB22	101,1	11,8 %	98,7
CB26	147,2	14,3 %	122,6
AB28	112,8 (89,0)	15,7 %	84,6

Dati procenat uvećanja predstavlja uvećanje u odnosu na prvobitno sračunate vrijednosti za utegnuti presjek, tabela 3.

Vidi se da su ove vrijednosti znatno bliže stvarno izmjerenim, i u smislu preciznosti sasvim zadovoljavajuće, a sa obzirom na proračunski model i uoprostavanja koja su korišćena. Pri tome treba uzeti u obzir da kod greda 20, 22 i 26, nije računata vrijednosti usled stvarnog loma nastalog gubitkom veze prijanjanja betona i armature, već usled eventualnog loma od momenata savijanja.

Rezultati grede AB 28 zaslužuju posebnu pažnju. Očito je da je u eksperimentu do loma došlo pri znatno nižoj sili loma nego što je sračunato analitički, po ma kojoj od primjenjivanih veza za čvrstoće utegnuto i neutegnuto presjeka. Pažljivim posmatranjem vidi se da je lom grede nastao neposredno izvan oblast grede koja je utezana spoljašnjim uzengijama. Iako lom podsjeća na lom usled glavnih kosih napona zatezanja, on to ne bi trebao da bude jer je nosivost presjeka na smicanje znatno veća od sile loma. Vjerovatno je lom uslijedio zbog prekoračenja granične nosivosti betona na pritisak u zoni koja nije bila utegnuta pri čemu je posebno do izražaja došao prekid u kontinuitetu utezanja, slika 10, jer na ovoj gredi posljednja spoljašnja uzengija je stavljena baš u ivicama srednje trećine raspona greda (tačka nanošenja opterećenja) tj. uzengije nisu uopšte prevođene u krajnje trećine grede.



Slika 10. Raspored spoljašnjih uzengija na gredi AB 28

Znači kod ove grede uzengije nisu vođene kao što je to, na primjer, bio slučaj kod grede GB 14, slika 7, sa čime se postiže bolji kontinuitet utegnuto i neutegnuto dijela AB grede.

Ako se računski provjeri nosivost presjeka bez uzimanja u obzir povećanje nosivosti usled utezanja spoljašnjim uzengijama, dobija se sila loma po betonu od 89,0 kN, što se samo nekoliko procenata razlikuje od stvarne sile loma ove grede.

Na ovom mjestu je možda zanimljivo primjetiti da bi se slično povećanje graničnih sila loma ovih greda dobilo i ako bi se zanemarilo povećanje graničnih dilatacija betona usled utezanja, a doprinos spoljašnjih uzengija u smislu povećanja računске čvrstoće betona odredio po formuli:

$$f_{Bu} = f_B \cdot (1,25 + 2,5 \cdot \alpha \cdot w_{wd})$$

Time bi se znači vrijednost računске čvrstoće betona na pritisak povećala za još 25 % u odnosu na računsku čvrstoću neutegnuto betona. Na ovaj način sile loma se dobijaju kako je prikazano u tabeli 5.

Tabela 5. Rezultati korigovanim povećavanjem računске čvrstoće betona

Oznaka grede	Rezultati korigovani povećanjem čvrstoće		Rezultati testova
	P_{ult} (kN)	Procenat uvećanja	P_{lom} (kN)
GB14	104,2	11,7 %	106,5
GB15	99,8	12,9 %	94,58
GB16	100,6	12,6 %	103,4
CB18	156,7	13,7 %	163,5
CB20	137,3	13,1 %	146,2
CGB22	99,7	10,3 %	98,7
CB26	146,2	13,5 %	122,6
AB28	107,8 (89,0)	10,6 %	84,6

Ponovo, dati procenat uvećanja predstavlja uvećanje u odnosu na prvobitno sračunate vrijednosti za utegnuto presjek, tabela 3.

LOM GREDE USLED GUBITKA VEZE PRIJANJANJA BETONA ZA ARMATURU

U predhodno pomenutoj referenci iz časopisa Izgradnja kao i u referenci ⁷ dat je detaljan opis loma greda armiranih kompozitnim FRP armaturama, a usled prekoračenja čvrstoće betona na pritisak, prekoračenja glavnih kosih napona zatezanja i usled prekoračenja napona zatezanja kod kompozitne armature. Kao što je već rečeno, kod više greda ovdje prezentiranih, granično stanje loma je dostignuto prekoračenjem sile prijanjanja između kompozitnih šipki i okolnog betona.

Znatno viša čvrstoća FRP šipki na zatezanje kao posledicu ima potrebu za većim dužinama sidrenja ove nego obične, čelične armature. Kada se vrši direktno upoređivanje rezultata testova na čeličnim i FRP armaturama autor još nije naišao na slučaj da je neko izvestio da nije bilo smanjenja napona prijanjanja za FRP armaturu u odnosu na čelične armature istih presjeka. Isto se odnosi i na minimalne dužine sidrenja. Ovo ima značajne konsekvence i može direktno voditi do loma u presjeku.

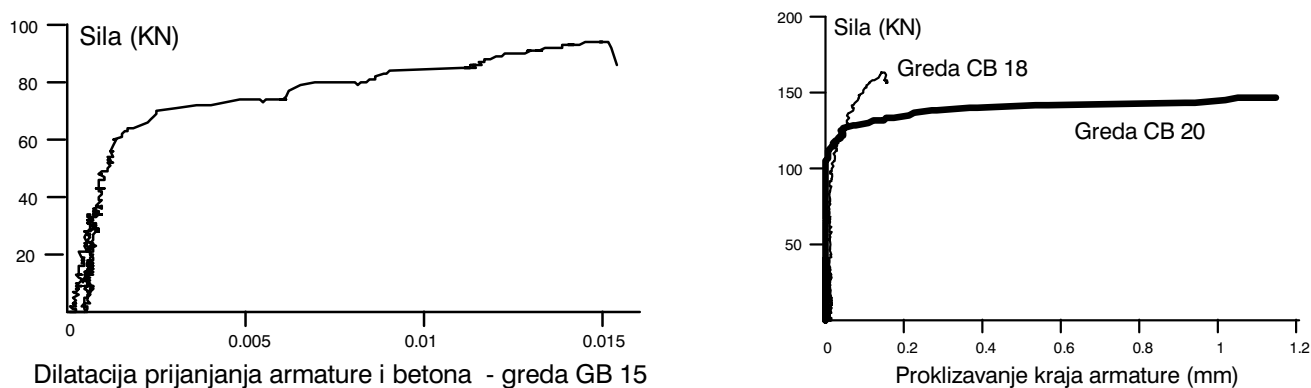
U suštini, problemi prijanjanja betona za FRP armaturu su povezani sa visokim Poisonov-im koeficijentom FRP materijala i mehaničkim karakteristikama rebara same armature. Prihvatanje napona zatezanja u armaturi je dalje komplikovano zbog nemogućnosti sidrenja ovih armatura na način uobičajen za čelične armature. Sidrenje je praktično nemoguće zbog nepostojanja duktilnosti u FRP materijalu što sprečava pravljenje kuka i krivina na krajevima armaturnih šipki, tako da se one ostavljaju prave.

Ovaj problem se trenutno razmatra na više mjesta u svijetu a predložena rešenja se kreću u pravcu proizvodnje specijalnih završetaka za šipke koji bi se postavljali neposredno prije izlivanja betona, istraživanja uticaja različitih poprečnih presjeka šipke na napone prijanjanja, uticaj različitih vrsta rebara i tekstura šipke⁸ itd. Ima takođe pokušaja da se problem izbjegne kontrolisanjem najvećih napona u šipci armature tako što bi oni bili znatno niži od maksimalnih koji se mogu postići.

Testovi izvedeni u Šefildu pokazuju da se za slučaj FRP armatura od staklenih ili karbonatnih vlakana, bez utezanja presjeka, problemi prijanjanja nisu pojavili u nijednom slučaju kada su naponi u armaturi do 30 % od onih na granici kidanja.

Kao što je već rešeno, eksperimentima je utvrđeno da se postizanjem prostornog stanja napona u betonu putem sprezanja, naponi prijanjanja znatno povećavaju što je posebno interesantno jer je povezano i sa onako dobrodošlim povećanjem u iskorišćenosti betona u presjeku, to jest pomjeranja neutralne ose naniže.

Na slici 11 prikazani su dijagrami dilatacija prijanjanja i proklizavanja armature i nanešenog opterećenja. Na istoj slici je prikazan i slučaj kod greda 18 i 20 gdje kod grede 18, uprkos postojanja izvesnog proklizavanja, nije došlo do gubitka (loma) veze prijanjanja između betona i armature, a kod grede 20 jeste.



Slika 11 - Dijagrami relevantni za analiziranje prijanjanje betona i armature

⁷ Đuranović, N.: Armiranje AB greda plastičnom (FRP) armaturom, časopis "Izgradnja", broj 8/96, strane 469 - 476.

⁸ Malvar, L.J.: "Tensile and bond properties of GFRP Reinforcing Bars", ACI Materials Journal, Maj-Jun 1995, strana 276 - 285.

Naponi prijanjanja armature iako su izazvali lom tri grede nisu problem za koga se ne može naći rešenje. To se može zaključiti na osnovu rezultata iz tabele 2 - Rezultati testova. Čak i kod grede 20, 22 i 26 kod koji je nastao lom usled loma veze prijanjanja naponi zatezanja u sredini šipki armaturi su bili na nivou od 77 % do 100 % granične sile kidanja odgovarajuće armature to jest između 24,5 % i 38,5 % od sile kidanja i to na samom mjestu mjerenja prijanjanja.

Veoma je vjerovatno da usled nedovoljne ispitivosti ovih armatura zakonodavac neće dozvoliti tolike napone u armaturi tako da će se vjerovatno problem prijanjanja prevazići ili samim dužinama sidrenja bez povijanja ili postavljanjem enkernih glava na grajevima armature

Značajno je primjetiti da se najveće proklizavanje armature a bez gubitka sile prijanjanja dostiže u gredi AB 28 i ono iznosi 0,72 mm. To znači da se sa sigurnošću može reći da sva krajnja proklizavanja armature od reda veličine 1 mm dovode do loma konstrukcije.

ZAKLJUČCI

U članku su date osnovna dobra i loša svojstva i karakteristike kompozitnih FRP armatura. Dat je način procjene modula elastičnosti i čvrstoće na zatezanje armaturnih šipki ako su date količine i karakteristike sastavnih komponenti.

Eksperimentalni rezultati sile loma mogu biti analitički potvrđeni istim metodama koje se koriste pri analizi presjeka armiranih čeličnom armaturom. Pri analizi presjeka dodatno utegnutih spoljašnjim uzengijama proračun se može sprovoditi na osnovu principa izloženih u Eurocode 8 a korišćenih za analizu doprinosa uzengija povećanju granične nosivosti obuhvaćenog betona. Pri utezanju betona postiže se troosno naponsko stanje u betonu pa se i dilatacije betona pri najvećim naponima trebaju srazmjerno povećati na 0,005.

Prijanjanje betona za šipke kompozitne FRP armature je jedan od osnovnih razloga loma greda izloženih u ovom članku. Najveći izmjereni naponi zatezanja u sredini šipki kompozitne armature, a za slučaj loma usled gubitka prijanjanja, su bili na nivou od 77 % do 100 % granične napona kidanja odgovarajuće armature, to jest između 24,5 % i 38,5 % od napona kidanja na samom mjestu mjerenja prijanjanja.

Najveće izmjereno proklizavanje armature koje nije dovelo do gubitka sile prijanjanja iznosilo je 0,72 mm. To znači da se sa dozom sigurnosti može reći da sva krajnja proklizavanja armature od reda veličine 1 mm dovode do loma AB presjeka.

Može se zaključiti da naponi prijanjanja neće predstavljati problem pri eksploataciji upotrebi ovih armatura.

Inače, modalitet i način loma greda armiranih kompozitnim FRP armaturama se ni po čemu ne razlikuju od načina i modaliteta loma odgovarajućih greda armiranih čeličnim armaturama.