POJAČAVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA FRP ELEMENTIMA NSM SISTEMOM

Dragana GLAVARDANOV
Radomir FOLIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 624.012.3:693.567 = 861

1 UVOD

Novi način pojačavanja koji se nanosi u okviru zaštitnog sloja betona, tj. blizu površine betona naziva se NSM sistem. Otuda i dolazi skraćenica, prevedeno sa engleskog- near surface mounted NSM, ili nanošenje elemenata za pojačavanje blizu površine. NSM sistem podrazumeva pravljenje podužnih proreza (šliceva) u zaštitnom sloja betona i ubacivanje- smeštaj FRP elementa u taj prorez. Elementi FRP korišćeni za primenu NSM sistema mogu biti u obliku šipki prečnika 7- 16 mm, ili traka debljine do 2mm kao što je prikazano na slici 1. Pri tome se uglavnom primenjuju FRP elementi sastavljeni od ugljeničkih CFRP ili staklenih GFRP vlakana.

NSM sistem pojačavanja je relativno nov i u svetu se koristi svega nekoliko godina, pa smernice izdate od strane ACI [1] i FIB [7] ne tretiraju ovaj način korišćenja FRP elemenata, dok CSC [3] u svom poslednjem izdanju smernica, iz 2004, pominju kao mogućnost i ovakav način pojačavanja. Ipak, neki od članova američkog instituta za beton ACI, koji su učestvovali u sastavljanju smernica vezanog za spoljašnje pojačavanje FRP elementima, aktivno učestvuju u istraživanjima NSM metode pojačavanja [15] i predlažu detalje za primenu FRP elemenata kao sistema NSM [5], kao i metode njihovog dimenzionisanja [6].

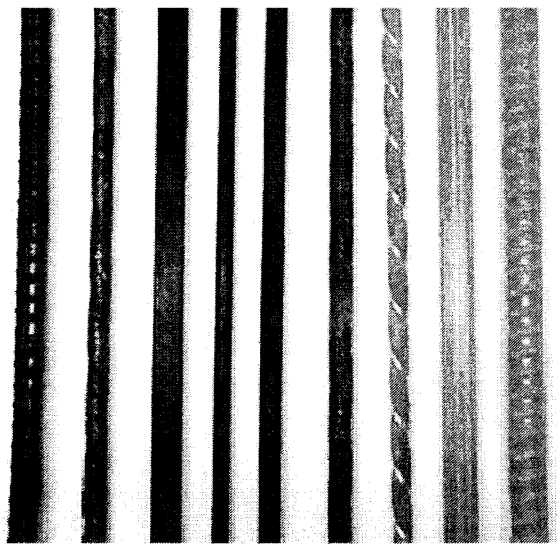
Da bi se poboljšalo prianjanje, FRP elemenata korišćeni sa NSM sistemom uglavnom imaju obrađenu površinu. Ovo se postiže na različite načine, a jedan od uobičajenih je primena fabrički profilisanih elemenata, tj. rebra, slična čeličnoj rebrastoj armaturi.

Upotreba NSM sistema se razmatra, prema [3] i [4], u sledećim situacijama:

– ukoliko je pojačana površina podložna oštećenjima,

– ukoliko površina betona koja treba da se pojača ima nedovoljnu čvrstoću na zatezanje, dok je ostatak preseka „zdrav",

Adresa autora:
Dragana Glavardanov, dipl. inž. građ.
Energogroup, Beograd
Prof. dr Radomir Folić, dipl. inž. građ.
Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu



Slika 1. FRP elementi korišćeni kao NSM sistem pojačavanja

– ukoliko je površina betona veoma neravna,

– ukoliko ima malo prostora za postavljanje-instalaciju druge vrste pojačanja.

Primena NSM sistema, uslovljava isecanje proreza u koje će biti ubačen FRP element, pa se mora pažljivo raditi i voditi računa da se ne ošteti postojeća armatura u preseku. Zbog toga ovaj sistem pojačavanja nije poželjan ukoliko je zaštitni sloj betona mali.

Kada se ustanovi da je moguća primena NSM sistema na betonsku konstrukciju, treba, takođe, ispitati ekonomsku opravdanost ovog sistema u odnosu na tradicionalnu upotrebu FRP traka i platana lepljenjem na zategnutu površinu betonskg preseka. Zbog kompleksnije pripreme betonskog elementa, odnosno potrebe za prosecanjem betona, NSM sistem pojačavanja je skuplje rešenje i uglavnom se upotrebljava samo u slučaju kada iz opravdanog razloga nije moguće lepiti FRP element direktno na betonsku površinu. Pored toga, ovaj

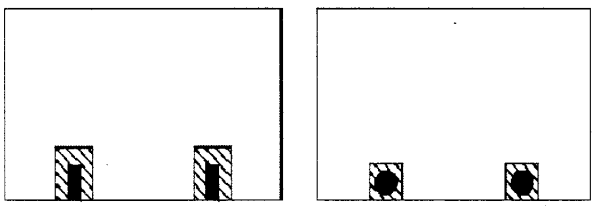
način pojačavanja je sigurniji ako se radovi izvedu korektno, tj. prema tehničkim uslovima da se predupredi nenajavljeni lom.

2 POJAČAVANJE ELEMENATA IZLOŽENIH SAVIJANJU

Prema CSC [3], prva upotreba NSM sistema u Velikoj Britaniji je zabeležena 2002. godine, ali kako ovaj način pojačavanja ima svojih prednosti, korišćenje NSM sistema je od tada ima sve rasprostranjeniju primenu. Prvenstveno, ovako primenjeni FRP elementi su bolje zaštićeni od traka koje se lepe na samu površinu, što omogućava bezbedno nanošenje u zonama gde postoji mogućnost oštećenja. Takođe, ovako nanet FRP element ima veću specifičnu površinu sprezanja sa betonom, što je još jedna od prednosti NSM sistema.

Većina analiziranih smernica koje se odnose na dimenzionisanje FRP traka i platana, njihovim lepljenjem na zategnutu površinu, [8], [9] i [10], odnosi se i na dimenzionisanje NSM sistema. Glavna razlika ispoljava se u načinu sidrenja i otkazu NSM sistema.

Pojačavanje betonskih elemenata napregnutih na savijanje, kako je već naglašeno, može biti izvedeno umetanjem FRP traka ili šipki u prethodno napravljene proreze u betonu. Ovaj način pojačavanja se naziva pojačavanjem u blizini površine betonskog preseka, tzv. NSM sistem.

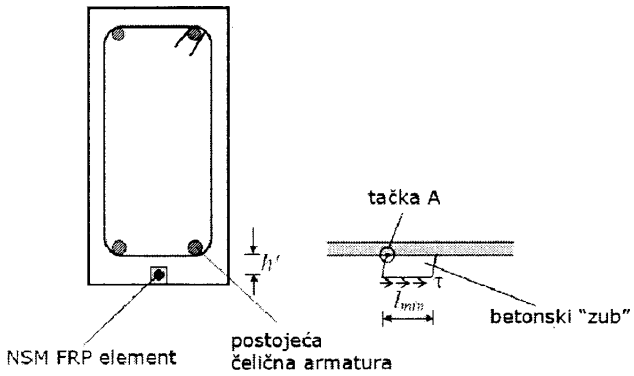


Slika 2. NSM sistem pojačavanja betonskih preseka napregnutih na savijanje

Dimenzionisanje NSM sistema je u suštini isto kao i dimensionisanje FRP elemenata koji se lepe na površinu betonskog preseka, samo treba uzeti u obzir da je statička visina FRP elemenata nešto manja u slučaju NSM sistema, te su samim tim i naponi u ovako apliciranom FRP elementu nešto veći. Ipak, kako su ovo neznatno male razlike, CSC u Tehničkom Izveštaju 55 [3] predlaže iste metode i granice kao i pri nanošenju FRP elemenata na samu površinu betonskog elementa.

Smernice izdate od strane Američkog instituta za beton ACI [1] publikovane su pre početka upotrebe NSM sistema pojačavanja, pa se on ne pominje u njima, ali se autori, iz ove Institucije, proteklih godina intenzivno bave istraživanjma u ovoj oblasti. U njihovim radovima [5], [6] i [15] publikovanih poslednjih nekoliko godina, izložena je analiza naponskih stanja u pojačanim betonskim elementima korišćenjem NSM sistema.

Modelom tzv. betonskog „zuba" može se analizirati naponsko stanje u zaštitnom sloju betona, koja se zasniva na konceptu formiranja „zuba" između dve susedne prsline u betonu. Pri tome, on se ponaša kao konzolni element opterećen horizontalnim naponom smicanja u liniji spoja betona i zategnute armature (slika 3).



Slika 3 Model NSM sistema pojačavanja i model tzv. betonskog „zuba"

Iako je ovaj model prvenstveno formiran da bi se njime predvideo otkaz usled delaminacije tj. odvajanja zaštitnog sloja betona, pokazalo se da je on dovoljno tačan i pri određivnju drugih vrsta otkaza, te je modifikovan i kod primene NSM sistema pojačavanja.

Osnovna pretpostavka u ovom modelu je ujednačena raspodela napona prianjanja između čelika i betona, odnosno između FRP šipki NSM sistema i lepka oko njih.

Minimalan razmak između dve stabilizovane prsline je označen sa l_{min} i iznosi:

$$l_{min} = \frac{A_e \cdot f_{ct}}{u_s \cdot \Sigma O_s + u_f \cdot \Sigma O_f} \qquad (1)$$

gde su:

A_e – površina zategnutog dela betona,

f_{ct} – karakteristična čvrstoća betona na zatezanje,

u_s – osrednjena čvrstoća prianjanja između betona i čelične armature,

ΣO_s – zbirni obim šipki čelične armature u preseku,

u_f – osrednjena čvrstoća prianjanja između FRP šipke i lepka,

ΣO_f – zbirni obim FRP šipki u preseku,

Za čvrstoću prianjanja u_f bi trebalo uzeti vrednost lokalnog napona prianjanja iz kataloga proizvođača, ili iz rezultata eksperimentalnih istraživanja.

Maksimalan razmak između dve stabilizovane prsline je:

$$l_{max} = 2 \cdot l_{min} \qquad (2)$$

a:

$$u_s = 0{,}28\sqrt{f_{cu}} \qquad (3)$$

$f_{ct} = 0{,}36\sqrt{f_{cu}}$ čvrstoća betonske kocke na pritisak. (4)

U modelu betonskog „zuba" pretpostavlja se da otkaz nastaje, u tački A (slika 3), u trenutku kada napon u toj tački premaši vrednost karakteristične čvrstoće betona na zatezanje. Vrednost ovog napona u tački A se može izračunati koristeći izraz:

$$\sigma_A = \frac{M_A}{I_A} \cdot \left(\frac{l}{2}\right) \quad (5)$$

momenat savijanja u korenu „zuba"

$$M_A = \tau \cdot n \cdot \pi \cdot d_b \cdot l \cdot h' \quad (6)$$

a momenat inercije betonskog „zuba"

$$I_A = \frac{b \cdot l^3}{12} \quad (7)$$

u ovim izrazima su:

l – 'međusobni razmak između u dve prsline, tj. širina betonskog „zuba",

h' – razmak između donje ivice čelične amrature i težišta FRP elementa NSM pojačanja,

τ – smičući napon na spoju lepka i NSM pojačanja,

n – broj FRP šipki,

d_b – prečnik FRP šipki, i

b – širina grednog elementa.

Pod pretpostavkom da je $\sigma_A = f_{ct}$, vrednost smičućeg napona τ koji se javlja pri odvajanju, tj. delaminaciji zaštitnog sloja betona određuje se prema:

$$\tau_{del} = \frac{f_{ct} \cdot l}{6 \cdot h'} \cdot \frac{b}{n \cdot \pi \cdot d_b} \quad (8)$$

dok je odgovarajući normalni napon:

$$\sigma_{fdel} = \frac{4}{\phi} \cdot L_p \cdot \tau_{del} = \frac{2 \cdot b \cdot L_p \cdot l}{3 \cdot n \cdot \pi \cdot d_b^2 \cdot h'} \cdot f_{ct} \quad (9)$$

gde je:

L_p – efektivna dužina NSM pojačanja duž koje se odgovarajući smičući naponi na spoju lepka i FRP šipke mogu smatrati konstantnim.

Minimalni i maksimalni normalni naponi u spoju FRP elementa i lepka se mogu izračunati ubacivanjem l_{max}, odnosno l_{min} u jednačinu (9).

Iz svega gore navedenog, prema [6] sledi zaključak da se **predloženi proračun NSM sistema pojačavanja elemenata izloženih savijanju izvodi u sledećim koracima**:

1. **Usvojiti** u_f iz literature ili odrediti eksperimentalno.
2. **Izračunati** l_{min} **i** l_{max} ($l_{max} = 2 \cdot l_{min}$).
3. **Izračunati** $\sigma_{fdelmax}$ za $l = l_{max} = 2 \cdot l_{min}$.
4. **Izračunati** nominalni granični momenat savijanja M_n koristeći konvencionalne metode kao i kod AB preseka, uz uslov da se za zatežuću čvrstoću NSM sistema uzima vrednost

$$\sigma_{fueff} = \min(\sigma_{fu}, \sigma_{fdelmax}) \quad (10)$$

5. **Izračunati** proračunski granični momenat savijanja M_u pojačanog preseka i uporediti ga sa nominalnim, množeći nominalni granični momenat savijanja sa redukcionim koeficijentima ϕ =0,7÷0,9 ϕ=0,85, pri čemu mora biti zadovoljen uslov:

$$\phi \cdot M_n \geq M_u \quad (11)$$

$$\phi \cdot M_n = \phi [M_s \phi \cdot M_f] \quad (12)$$

gde su:

M_s – deo momenta savijanja koji prihvata čelična armatura, i

M_f – deo momenta savijanja koji prihvata NSM sistem.

3 POJAČAVANJE ELEMENATA IZLOŽENIH SMICANJU

Zbog znatno boljeg prianjanja za betonsku površinu, NSM sistemi se smatraju povoljnijim načinom pojačavanja betonskih elemenata izloženih savijanju nego primenom FRP traka i platana lepljenih na spoljašnju površinu betonskog preseka, pa se pokušalo i sa njihovom primenom u svrhu pojačavanja betonskih elemenata izloženih smicanju.

Upotreba staklenih GFRP ili karbonskih CFRP šipki kao NSM pojačanja povećava otpornost betonskih preseka na smicanje. Ukoliko je reč o T presecima, i ukoliko se ankerovanje uspešno vrši u pritisnutu zonu, istraživanja su pokazala znatno povećanje nosivosti AB preseka na smicanje [2].

Poznato je da se efikasnost povećava, ukoliko se FRP elementi postave pod uglom od 45°, u odnosu na one elemente postavljene vertikalno [12]. Lepljenje FRP traka i platana na spoljašnju površinu betonskog preseka pod uglom nije lako izvodljivo, dok kod NSM sistema ovo ne predstavlja poseban problem, što ih čini potencijalno povoljnijim rešenjem i kod primene za pojačavanje betonskih elemenata na smicanje [15].

Predloženi princip dimenzionisanja NSM sistema pojačavanja na smičuće sile [6] podrazumeva dve jednačine kojima se dolazi do potrebne površine FRP šipki, a za merodavnu se usvaja manja vrednost.

Predložen proračun NSM sistema pojačavanja elemenata izloženih smicanju izvodi se na sledeći način:

1. **Izračunati** d_{net} redukovanu visinu poprečnog preseka koji treba pojačati na smicanje prema:

$$d_{net} = d_r - 2 \cdot c \quad (13)$$

gde su:

d_r – ukupna visina poprečnog AB preseka dela pojačanog na smicanje. U slučaju vertikalno orijentisanih FRP šipki NSM sistema, veličina d_r se podudara sa dužinom FRP šipki.

c – debljina zaštitnog sloja betona AB preseka.

Redukcija visine poprečnog preseka odgovara visini modela rešetke koji se koristi za proračun i kod konvencionalnih armiranobetonskih preseka.

2. **Izračunati** doprinos FRP šipki kontrolisanom otkazu na smicanje, u najnepovoljnijem položaju prsline, označen sa V_{1F}:

$$V_{1F} = 2 \cdot \pi \cdot d_b \cdot u_f \cdot L_{totmin} \quad (14)$$

gde su:

L_{totmin} zavisi od d_{net}, od razmaka šipki s, kao i uglu pod kojim se nalaze.

Za vertikalno orijentisane šipke ova vrednost iznosi:

$$L_{totmin} = d_{net} - s \quad \text{ukoliko je} \quad \frac{d_{net}}{3} < s < d_{net} \quad (15)$$

$$L_{totmin} = 2 \cdot d_{net} - 4 \cdot s \quad \text{ukoliko je} \quad \frac{d_{net}}{4} < s < \frac{d_{net}}{3} \quad (16)$$

Za šipke orijentisane pod 45° vrednost L_{totmin} iznosi:

$$L_{totmin} = (2 \cdot d_{net} - s) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

ukoliko je $\frac{2 \cdot d_{net}}{3} < s < 2 \cdot d_{net}$ (17)

$$L_{totmin} = 2\sqrt{2} \cdot (d_{net} - s)$$

ukoliko je $\frac{d_{net}}{2} < s < \frac{2 \cdot d_{net}}{3}$ (18)

3. **Proveriti** da li je neophodan proračun V_{2F}, kao doprinos FRP šipki kontrolisanom otkazu na smicanje, pod uslovom da je dostignuta maksimalna dozvoljena dilatacija FRP materijala. Ukoliko su zadvoljeni sledeći uslovi, nije potrebno proračunavati V_{2F}:

Za vertikalno orijentisane šipke:

$$d_{net} < 0{,}002 \cdot \frac{d_b \cdot E_b}{u_f} \quad (19)$$

Za šipke orijentisane pod 45° vrednost:

$$d_{net} < \sqrt{2} \cdot 0{,}001 \cdot \frac{d_b \cdot E_b}{u_f} \quad (20)$$

4. Ukoliko nije zadovoljen gore naveden uslov pod 3 (izrazi 19 i 20), **izračunati vrednost** V_{2F} u najnepovoljnijem položaju prsline:

Za vertikalno orijentisane šipke ova vrednost iznosi:

$$V_{2F} = 2 \cdot \pi \cdot d_b \cdot u_f \cdot \overline{L_i}$$

ukoliko je $\frac{d_{net}}{2} < s < d_{net}$ (21)

$$V_{2F} = 2 \cdot \pi \cdot d_b \cdot u_f \cdot \overline{L_i} \cdot \frac{3 \cdot d_{net} - 4 \cdot s}{d_{net}}$$

ukoliko je $\frac{d_{net}}{4} < s < \frac{d_{net}}{2}$ (22)

Za šipke orijentisane pod 45° vrednost V_{2F} iznosi:

$$V_{2F} = 2 \cdot \pi \cdot d_b \cdot u_f \cdot \overline{L_i}$$

ukoliko je $d_{net} < s < 2 \cdot d_{net}$ (23)

$$V_{2F} = 2 \cdot \pi \cdot d_b \cdot u_f \cdot \overline{L_i} \cdot \frac{3 \cdot d_{net} - 2 \cdot s}{d_{net}}$$

ukoliko je $\frac{d_{net}}{2} < s < d_{net}$ (24)

Pri čemu je $\overline{L_i}$ efektivna dužina FRP šipke koju preseca prslina, i koja odgovara maksimalno dozvoljenoj dilataciji FRP materijala:

$$\overline{L_i} = 0{,}001 \frac{d_b \cdot E_b}{u_f} \quad (25)$$

5. **Izračunati** V_{FRP}:

$$V_{FRP} = \min(V_{1F}, V_{2F}) \quad (26)$$

6. **Proveriti** da li su **granice** V_{FRP} zadovoljene:

$$V_s + V_{FRP} \le 8\sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d \quad (27)$$

$$V_s + V_{FRP} \ge 0{,}66\sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d \quad (28)$$

Ove granice su određene za FRP elemente lepljene na spoljašnju površinu betonskog elementa, i trebalo bi ih povećati za slučaj pojačavanja NSM sistemom.

7. **Proveriti nosivost AB preseka** na smicanje prema izrazima:

$$\phi \cdot V_n \ge V_u \quad (29)$$

$$\phi \cdot V_n = \phi \cdot (V_c + V_s + \phi \cdot V_{FRP}) \quad (30)$$

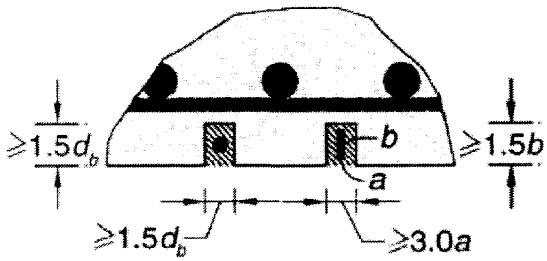
gde su:

V_c – deo smičuće sile koju prihvata beton,
V_s – deo smičuće sile koju prihvata čelična armatura, a
V_{FRP} – deo smičuće sile koju prihvata NSM sistem.

4 DETALJI ZA IZVOĐENJE

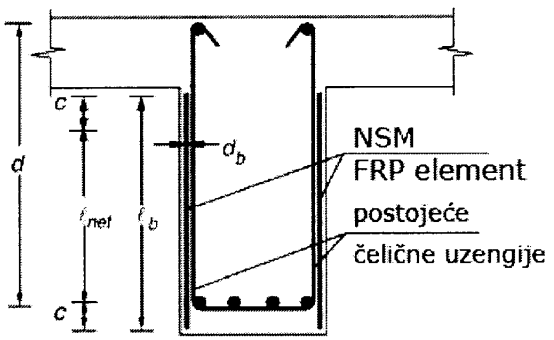
Pri dimenzionisanju NSM sistema, da bi se olakšala ugradnja, potrebno je odabrati što adekvatniji poprečni presek FRP elementa, kao i vrstu lepka koji će se koristiti. Neophodno je, takođe, voditi računa i o minimalnim rastojanjima dva susedna FRP elementa u preseku, da bi se izbeglo formiranje horizontalnih prslina, kao i minimalno rastojanje od ivice betonskog preseka, čime se izbegava pojava odljuskivanja betona.

Minimalne dimenzije zaseka treba da su bar 1,5 puta veće od prečnika FRP šipke, odnosno bar 3 puta širi i 1,5 puta viši od FRP trake koja se ugrađuje, kako je ilustrovano na slici 3. Optimalne dimenzije zaseka zavise i od karakteristika lepka koji se koristi, kao i od drugih izvođačkih parametara - detalja (širine noža za sečenje betona npr.) [16]



Slika 4. Detalji za ugradnju NSM sistema pojačavanja

Međusobno rastojanje FRP elemenata kod primene NSM sistema pojačanja betonskog elementa na smicanje ne treba da prelazi $l_{net}/2$, odnosno 600mm (slika 5). Da bi se sprečio lom po betonu, mora se uzeti u obzir i postojeća čelična armatura na smicanje, te u zavisnosti od nje ograničiti maksimalna površina poprečnog preseka FRP elementa.



Slika 5. NSM sistem pojačanja betonskog elementa na smicanje

Pre samog formiranja zaseka u betonskom elementu, neophodno je utvrditi debljinu zaštitnog sloja betona i poziciju postojeće čelične armature u preseku kako se ona ne bi oštetila prilikom izvođenja radova na pojačavanju.

Pripremu betonske površne nakon prosecanja, treba usvojiti u zavisnosti od vrste lepka koji će biti korišćen, a u saglasnosti sa preporukama proizvođača. Uglavnom se traže čiste, suve površine, ali u nekim slučajevima se pre zapunjavanja epoksidom moraju koristiti i tzv. prajmeri. Takođe, debljina lepka može da varira, tako da bi trebalo konsultovati proizvođača još u fazi projektovanja NSM sistema pojačanja.

Sama ugradnja NSM sistema za pojačavanje se sastoji iz sledećih koraka:

– zasecanje betona dijamantskim noževima ili štemalicama, vodeći računa da se ne ošteti postojeća čelična armatura,

– priprema betonske površine koja se sastoji od čišćenja zaseka celom njegovom dužinom od prašine i oštećenih-labavih delova betona, koristeći usisivač ili kompresor,

– zasek se do pola ispunjava lepkom, koji mora biti adekvatne konzistencije da se lako ugradi bez zarobljenog vazduha,

– FRP element se ubacuje u zasek i lagano pritiskom utiskuje u lepak,

– zasek se do vrha ispunjava lepkom nešto gušće konzistencije, pazeći da u zaseku ne ostane zarobljeni vazduh, i izravnava se sa površinom betonskog elementa.

Postoji više činioca - faktora koji se moraju uzeti u obzir pri primeni NSM sistema, nego što se to čini kod površinski lepljenih FRP elemenata. Ključni faktori uključuju oblik i veličinu FRP elementa koji se upotrebljava, što su uglavnom šipke. Pored toga, zavisi od vrste FRP vlakana od kojeg su napravljene, od načina prethodne pripreme betonske površine, veličine i oblika proreza, vrste lepka, čvrstoće betona na zatezanje, kao i pozicije čelične armature u preseku. Kako se ovi sistemi od skora upotrebljavaju u svrhu pojačavanja, još uvek ne postoji dovoljno istraživanja vezano za njihovo ponašanje u upotrebi (performanse), niti u vezi sa kombinacijom uticaja pomenutih faktora.

Veličina i oblik proreza u koji se smešta FRP element utiču na vrstu otkaza elementa za sidrenje NSM sistema. Na ovo utiču i drugi faktori, kao što su debljina i vrsta lepka koji se koristi. On može biti na cementnoj ili epoksidnoj bazi. Iako se lepkovi na bazi cementa, mogu koristiti za zapunjavanje proreza kod primene NSM sistema, dosadašnja istraživanja su pokazala da oni daju u proseku niže čvrstoće prianjanja od lepkova na bazi epoksida. Ekspanzivne cementne maltere treba izbegavati, pošto oni pri ekspandiranju mogu prouzrokovati prsline u betonu, pa samim tim i oslabiti vezu sa betonom. Pošto su pri dosadašnjim istraživanja uglavnom korišćeni lepkovi na bazi epoksida, u CSC [3] njima se daje prednost pri apliciranju NSM sistema.

5 VRSTE OTKAZA

Pull-out testovi (ispitivanje prionljivosti zatezanjem) kao i testovi izvedeni na gredama su pokazali da se granična nosivost NSM sistema povećava sa povećanjem dužine sidrenja. Kao i kod FRP elemenata koji se lepe na površinu betonske konstrukcije postoji granična dužina sidrenja posle koje njeno dalje povećavanje ne utiče na povećanje veze FRP elementa sa betonom [11] i [13]. Ipak, ova granična dužina sidrenja obezbeđuje znatno veće prianjanje kod NSM sistema, te je zbog toga manje verovatno da će ona u ovom slučaju biti ograničavajući faktor pri dimen-zionisanju.

U osnovi postoje tri vrste otkaza koji se mogu javiti kod NSM sistema [4]:

1. Otkaz nastao usled odvajanja u sloju lepka

Do odvajanja u sloju lepka, kojim se zapunjava prorez nakon umetanja FRP elementa, može doći usled prekoračenja napona zatezanja na spoju FRP elementa i epoksida. U ovom slučaju se formiraju podužne prsline u sloju lepka. Ova vrsta otkaza uglavnom nastaje zbog debljine lepka oko FRP elementa i može se minimizirati, ili čak izbeći korišćenjem lepkova veće čvrstoće na zatezanje.

2. Otkaz nastao usled odvajanja betona

Odvajanje betona u neposrednoj blizini lepka usled dostizanja granice zatežućih napona u betonu se uglavnom javlja ukoliko upotrebljeni epoksid ima veću čvrstoću na zatezanje od betonskog elementa koji se pojačava.

Ova vrsta otkaza direktno zavisi od veličine proreza.

Ove dve vrste otkaza su uglavnom propraćene odvajanjem FRP elementa duž linije otkaza. Kombinacija ova dva otkaza je takođe moguća.

3. Lom po FRP elementu usled zatežućih sila

Kako je veza NSM sistema sa betonom mnogo jača nego veza FRP elementa lepljenog na površinu, postoji realna mogućnost dostizanja granice loma FRP elementa usled zatežućih sila, pre otkaza usled odvajanja u sloju lepka ili otkaza u betonu.

Otkaze prouzrokovane prslinama nastalim usled smičućih napona, usled neravne betonske površine i maksimalne zatežuće sile u FRP elementu, treba proveriti na identičan način kao i kod površinski nanetih sistema [12].

Smičući napon koji se javlja duž spoja lepka i betona takođe treba proveriti, isto kao i kod površinski nanetih - lepljenih FRP sistema [10].

$$\tau = \frac{V \cdot \frac{E_{fd}}{E_c} \cdot A_f (d - x)}{I_{cs} \cdot b_a} \leq 0{,}8 \text{ MPa} \quad (31)$$

Pri čemu b_a u slučaju NSM sistema predstavlja iskorišćeni obim proreza. Kako se prorez ne može pripremiti dovoljno temeljito sa svih strana, s obzirom da nisu sve jednako dostupne, u slučaju pravougaonog proreza, npr. veličina b_a se proračunava kao zbir minimalne širine i minimalne dubine proreza. U izuzetnim slučajevima kada se koriste specijalna sredstva i obraća posebna pažnja na pripremu betonskog proreza, moguće je povećati vrednost b_a i uzeti ga kao zbir minimalne širine i dvostruke minimalne dubine proreza. S druge strane, ukoliko je zaštitni sloj betona u lošem stanju, ovo treba uzeti u obzir i adekvatno smanjiti vrednost b_a.

Postoje dva glavna pristupa za određivanje potrebne dužine sidrenja NSM sistema.

U prvom pristupu koriste se podaci dobijeni tzv. "bond slip" testom. Jednačine dobijene na ovaj način omogućuju predviđanje potrebne dužinu sidrenja kao i rezultujuće napone u FRP elementu.

U drugom pristupu polazi se od pretpostavke o veličini napona, dok se radijalni pritisak na beton određuje u zavisnosti od graničnog napona loma po lepku ili betonu.

Smernice date u Tehničkom izveštaju 55 [3] su zasnovane na publikovanim podacima i rezultatima dobijenim eksperimentalnim istraživanjima, te se ograničavaju na sledeće pretpostavke:

– FRP element primenjen kao NSM sistem pojačavanja je šipka prečnika do 16 mm,

– lepak kojim se zapunjava prorez je na bazi epoksida,

– postoji prethodna priprema površine FRP šipke u skladu sa preporukama proizvođača

– prorezi su takvog oblika da je FRP šipka ununtar njih prava

– prorezi u betonskom elementu su pravougaonog preseka, širine i dubine bar dva puta veće od prečnika FRP šipke

– postojeća čelična armatura ne preseca prorez napravljen za NSM sistem

– međusobni razmak zaseka bi trebao da bude minimalno širine samog zaseka, a minimalno čisto rastojanje krajnjih zaseka od betonske ivice bi trebalo da bude 4 prečnika FRP šipke upotrebljene za NSM pojačanje.

6 SIDRENJE NSM SISTEMA

Sidrenje NSM sistema se razlikuje od FRP sistema apliciranih na površinu betonskog elementa. Sloj lepka je znatno deblji, tako da površina naleganja FRP elementa i lepka može biti znatno manja od površine naleganja betona na lepak. Takođe, uslovi pripreme betonskog proreza, tj. pristupačnost svim stranama proreza, mogu rezultovati nejednako pripremljenom betonskom površinom. Iz svih ovih razloga, smernice koje se tiču otkaza površinski lepljenih FRP elemenata, ne mogu se, bez korekcije, primeniti na NSM sisteme.

U Smernicama izdatim od strane CSC [3] za NSM sisteme pojačavanja analizira se upotreba FRP šipki. Iako FRP trake deluju kao jednostvnije rešenje, CSC se zbog nedostatka informacija u trenutku publikovanja, ograničava na šipke.

Da bi se izbegao otkaz usled odvajanja u sloju lepka, smičuća sila u FRP elementu prema smernicama CSC [3] bi trebala da se ograniči na:

– za obične FRP šipke, uključujući i šipke sa spiralnim navojem i šipke sa kvarcnim posipom:

$$T_{NSM,ad} = 0{,}1 \cdot b_{barperim} \cdot l_{NSM} \cdot f_{at} \quad (32)$$

– za rebraste FRP šipke:

$$T_{NSM,ad} = 0{,}3 \cdot b_{barperim} \cdot l_{NSM} \cdot f_{at} \quad (33)$$

gde su nepoznate:

$T_{NSM,ad}$ - karakteristična granična sila prianjanja lepka,

$b_{barperim}$ - obim FRP šipke,

l_{NSM} - predviđena dužina sdrenja FRP šipke,

f_{at} - karakteristična granična čvrstoća lepka na zatezanje,

Da bi se izbegao otkaz usled odvajanja betona, treba izračunati maksimalnu graničnu silu prianjanja $T_{NSM,\,max}$ i odgovarajuću maksimalnu dužinu sidrenja $l_{NSM,max}$ prema [14]:

$$T_{NSM,max} = 1{,}9 \cdot \sqrt{E_{fd} \cdot A_f \cdot b_{notchperim} \cdot f_{ctm}} \quad (34)$$

$$l_{NSM,max} = 4{,}5 \cdot \sqrt{\frac{E_{fd} \cdot A_f}{b_{notchperim} \cdot f_{ctm}}} \quad (35)$$

gde su nepoznate:

$T_{NSM,max}$ - maksimalna sila prianjanja NSM sistema u [N],

$l_{NSM,max}$ - dužina sidrenja FRP šipke predviđena da bi se ostvarila $T_{NSM,\,max}$,

E_{fd} - računski modul elastičnosti u [N/mm^2],

A_f - površina FRP elementa u [mm^2],

$b_{notchperim}$ -efektivni obim FRP šipke u [mm], a

f_{ctm} - granična čvrstoća materijala na zatezanje [N/mm^2].

U slučajevima gde nije moguće ili nije potrebno, obezbediti maksimalnu dužinu sidrenja NSM sistema, sila prianjanja će biti manja od njene maksimalne vrednosti, i kao kod FRP elemenata lepljenih na betonsku površinu, iznosiće:

$$T_{NSM} = T_{NSM,max} \frac{l_{NSM}}{l_{NSM,max}} \left(2 - \frac{l_{NSM}}{l_{NSM,max}} \right) \quad (36)$$

gde su nepoznate:

T_{NSM} - karakteristična sila prianjanja NSM sistema u [N], a

l_{NSM} - odgovarajuća dužina sidrenja FRP šipke predviđena da bi se ostvarila T_{NSM}.

7 ZAKLJUČAK

NSM sistem pojačvanja, iako nov, pokazao se često NSM sistem pojačvanja, iako nov, pokazao se često efikasnijim od spoljašnjeg pojačavanja FRP elementima. FRP elementi korišćeni kao pojačanja NSM sistemom pojačavanja su bolje zaštićeni od traka koje se lepe na samu površinu, što omogućava bezbednu primenu u zonama gde postoji mogućnost oštećenja. Ovako nanet

FRP element ima veću specifičnu površinu sprezanja sa betonom, te se istim poprečnim presekom FRP elementa postiže veća nosivost od one koju je moguće postići trakama lepljenim na samu površinu, što predstavlja prednost NSM sistema.

Ipak, NSM metoda pojačavanja zahteva kompleksniju pripremu betonske površine, a samim tim i dodatne troškove, pa predstavlja skuplje rešenje u odnosu na spoljašnje pojačavanje FRP elementima.

8 LITERATURA

[1] American Concrete Institute (ACI), Committee 440: ACI440.2R-02 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2002.

[2] Carolin, A.: CFRP for Strengthening of Structural Elements, Lulea University of Technology, 2003.

[3] Concrete Society (CSC), Technical Report No.55: Desing guidance for Stremgthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials, 2004.

[4] Darby A., Ibell T., Clarke J., Denton S., Farmer N., Luke S.: Strengthening concrete structures using fibre composites; Proceedings of the Institution of Civil Engineers, September 2004, Issue BE3, pp 123-129

[5] De Lorenzis,L.,Galati,D., La Tegola, A.: Stiffness and ductility of fibre-reinforced polymer - strengthening reinforced concrete members, ICE Structures and Buildings 157, January, 2004. pp. 31-51.

[6] De Lorenzis,L.,Nanni,A.: Proposed design procedure od NSM FRP reinforcement for fexural and shear strengthening of RC beams

[7] Fédération Internationale du Béton (FIB):Tecnical Report Bulletin 14: Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Lausanne, 2001.

[8] Folić, R., Malešev, M.: Održavanje i sanacija konstrukcija- Generalni izveštaj, Materijali i konstrukcije, br.4, 2005, str. 62-80.

[9] Folić, R., Glavardanov, D.: Upoređenje metoda analize armiranobetonskih greda pojačanih vlaknastim kompozitima (FRP), JUDIMK, 2005, Novi Sad,.str. 333-340

[10] Folić, R., Glavardanov, D.: Analiza metoda pojačavanja armiranobetonskih elemenata lepljenjem vlaknastih kompozita (FRP), Izgradnja br. 5-6, 2006, str. 113-126.

[11] Folić R., Glavardanov D.: Mehanizmi loma i oblikovanje detalja pri pojačavanju AB savijenih elemenata FRP kompozitima; Tehnika br. 5, Naše građevinarstvo, Beograd, 2006, str 5-12

[12] Glavardanov, D., Folić, R.: Analiza metoda za pojačavanje elemenata izloženih smicanju FRP kompozitima, Zbornik radova, Građevinski fakultet, Subotica, 2006.

[13] Glavardanov, D., Folić, R.: Failure modes and detailing of RC elements in flexure strengthened with FRP composites, Jubilee scientific conference, Abstract of contribution, University of architecture, civil engineering and geodesy, Sofia, 2007.

[14] Neubauer U., Rostasy, F. S.: Design Aspects of Concrete Structures Strengthened with Externally Bonded CFRP Plates, Concrete and Composites; Proceedings of the 7th International Conference on Structural Faults and Repair 1997, Vol. 2 pp 109-118, ECS Publications, Edinburgh, 1997.

[15] Phillis S. E., Parretti R., Nanni A.: Evaluation of FRP repair method for cracked bridge members; Research, Development and Technology; University of Missouri-Rolla; 2005

[16] Szabo Z. K., Balazs G. L.: Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures; Periodica Polytechnica; January 2007

REZIME

POJAČAVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA FRP ELEMENTIMA NSM SISTEMOM

Dragana GLAVARDANOV
Radomir FOLIĆ

FRP (polimeri armirani vlaknima) elementi lepljeni na površinu betonskog elementa kao dodatni elementi kojima se postiže povećanje nosivosti, je široko rasprostranjena tehnologija pojačavanja elemenata konstrukcije napregnutih na savijanje i/ili na smicanje. Poslednjih godina, primenjuje se nova tehnologija izvođenja dodavanjem FRP elemenata u zasečene podužne šliceve koji služe za pojačavanje nosača izloženih savijanju i smicanju. Ova metoda NSM sistema pojačavanja koristi FRP elemenate (šipke ili trake) smeštene blizu površine (na engleskom near surface mounted), tj. u proreze napravljene u zaštitnom sloju betonskog preseka pojačavanog elementa. U ovom radu dat je pregled dostupne literature i do sada izdatih smernica za dimenzionisanje preseka pojačanih na ovaj način.

Ključne reči: NSM sistemi, FRP elementi, savijanje, smicanje, otkaz, detalji, sidrenje

SUMMARY

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH NEAR SURFACE MOUNTED FRP REINFORCEMENT

Dragana GLAVARDANOV
Radomir FOLIĆ

FRP (Fibre Reinforced Polymers) elements applied as externally bonded reinforcement is a widespread technology for strengthening RC elements, both in flexure and shear. Recently, a new technology of near surface mounted (NSM) reinforcement has been introduced. Rather than mounting the FRP elements on the surface of the RC element to be strengthened, the use of NSM reinforcement involves cutting a slot into the concrete and inserting an FRP element (bar or strip) into it. Literature review and available design guidelines on the use of this new technique have been shown in this paper.

Key words: NSM system, FRP elements, flexure, shear, failure, detailing, anchorage