MEHANIZAMI OŠTEĆENJA, MODELI ODRŽAVANJA I SANACIJA BETONSKIH KONSTRUKCIJA POJAČANIH FRP ELEMENTIMA

Radomir FOLIĆ
Dragana GLAVARDANOV

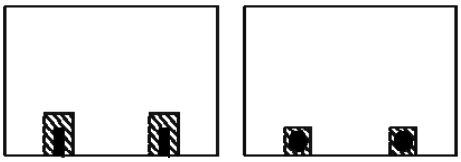
PREGLEDNI RAD
UDK: 624.012.46.059.3 = 861

1 UVOD

Armiranobetonske (AB) konstrukcije, usled promene namene, oštećenja/defekata ili drugih zahteva u fazi eksploatacije, često zahtevaju pojačavanje, tj. povećanje nosivosti preseka postojećih elemenata. Pojačavanje AB preseka FRP kompozitnim materijalima je veoma efektan, jednostavan i brz način pojačavanja [1] i [8]. Uobičajeni načini pojačavanja ovim kompozitnim materijalima su spoljašnjim lepljenjem elemenata od FRP materijala na površinu AB elementa [2] i [13], ili usecanjem i ubacivanjem FRP materijala u zaštitni sloj betona AB preseka [14]. Pored toga efikasno se primenjuje i prednaprezanje kablovima na bazi FRP materijala što je opširno opisano u [3] i [11].

Kod preseka pojačanih spoljašnjim lepljenjem FRP materijala na betonsku površinu, koriste se uglavnom platna ili trake sastavljene od aramidnih (AFRP), staklenih (GFRP) ili karbonskih vlakana (CFRP) u polimernoj matrici [7] i [13]. Noviji način pojačavanja, koji se sve više koristi je NSM sistemom, tj. ubacivanjem napred pomenutih šipki u proreze zaštitnog sloja betona [14]. Ovaj sistem pojačavanja prikazan je na slici 1, a skraćenica se vezuje za engleski prevod- near surface mounted (NSM), ili ubacivanje elemenata za pojačavanje blizu površine. U daljem tekstu će se koristiti skraćenica NSM, a taj sistem podrazumeva prorezivanje zaštitnog sloja betona i ubacivanje FRP elementa u taj prorez, uz naknadno zapunjavanje proreza. FRP element korišćen za primenu NSM metode pojačavanja može biti u obliku šipki ili traka, uglavnom sastavljenih od ugljeničnih CFRP ili staklenih GFRP vlakana.

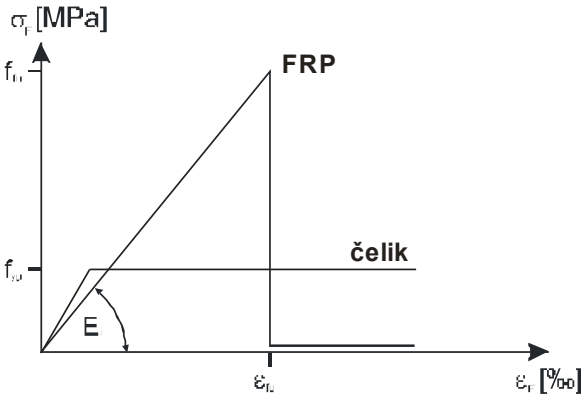
Adresa autora:
Dr. Radomir Folić, dipl.inž.građ. profesor emeritus
Departman za građevinarstvo Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad
Dragana Glavardanov, dipl. inž. građ.
Energogroup, Beograd



Slika 1. NSM sistem pojačavanja betonskih preseka napregnutih na savijanje

Pošto FRP materijali ne ispoljavaju plastične karakteristike kao čelik, već kod ove vrste materijala postoji samo zona elastičnih deformacija nakon kojih dolazi do prethodno nenajavljenog krtog loma, i pored svih očiglednih prednosti pojačavanja FRP materijalima, ovako pojačani AB preseci mogu biti veoma krti što se vidi na slici 2 na kojoj je dat uporedni dijagram za čelik i FRP materijale. Iz tog razloga, poslednjih godina su sprovedena mnoga istraživanja koja se bave proučavanjem duktilnosti, kao i analize mehanizama loma AB preseka pojačanih FRP kompozitima. Treba imati u vidu da različiti načini primene FRP sistema pojačavanja imaju različite efekte ne samo sa aspekta nosivosti već i trajnosti i mogućnosti održavanja [23].

Sanirane/pojačane konstrukcije mogu biti izložene različitim dejstvima, jer pored eksploatacionog često deluju i incidentna opterećenja koja mogu prouzrokovati različita oštećenja [15]. Spolja lepljeni elementi su znatno izloženiji, nepovoljnim spoljnim dejstvima i većem opadnju svojstava, od vođenja traka ili šipki unutar zaštitnog sloja NSM sistema. Pošto nema dovoljno iskustava ni kod nas ni u svetu, od značaja je i dugotrajno osmatranje ponašanja objekata, na kojima su pri intervenciji primenjeni FRP elementi, pod uticajem sredine u kojoj se oni nalaze [12] i [20]. Često se različita dejstva sprežu kao, npr. biološka i hemijska i imaju značajan uticaj na ukupno pogoršanje performansi pojačane konstrukcije [6], [16] i [19].



Slika 2. Karakterističan σ–ε dijagram za FRP i čelik

Istraživanja sprovedena na AB elementima pojačanim spoljašnjim lepljenjem FRP materijala [12] i [15] su pokazala da do otkaza dolazi uglavnom usled odvajanja FRP materijala od betona, dok kod NSM sistema pojačavanja [22]. Pošto je veza sa betonom, po pravilu-zahtevima, 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 [14] i [22], tj. pre krtog loma.

U ovom radu analiziraju se različiti oblici oštećenja i mehanizmi loma pojačanih AB elemenata koristeći različite postupka intervencija (popravke i pojačavanja). U tom smislu dat je širi pregled literature i međunarodnih preporuka za održavanje i sanacije pojačanih AB elemenata.

2 MEHANIZMI LOMA AB PRESEKA POJAČANIH SPOLJAŠNJIM LEPLJENJEM FRP ELEMENATA

Pri proveri graničnih stanja loma elemenata pojačanih spoljašnjim lepljenjem FRP materijala formira se znatno više mehanizama loma nego kod armirano-betonskih i prethodno napregnutih konstrukcija. Mehanizmi loma elemenata napregnutih na savijanje i pojačanih FRP laminatima se mogu podeliti, [15] i [21], u dve kategorije:

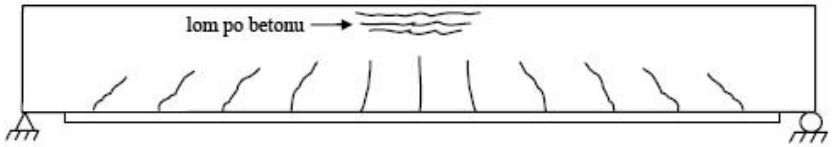
1/ Lom koji nastaje bez gubitka veze betona i FRP elementa

- lom po betonu, pre dostizanja granice razvlačenja čelične armature, dok FRP element ostaje neoštećen (slika 3). Ovo je nenajavljen, krti lom, koji nije dozvoljen i koji po svaku cenu treba izbeći.
- lom usled dostizanja granice istezanja čelika, praćen lomom FRP elementa izazvanim prevelikom silom zatezanja u FRP elementu (slika 4). Ova vrsta loma je moguća, ali je verovatnije da će do otkaza doći usled narušavanja veze kompozita sa betonom, pre samog ""pucanje" FRP elementa. U smernicama FIB-a [9] se, ipak, dozvoljava mogućnost ove vrste loma.
- lom gde dolazi do dostizanja granice istezanja čelika, praćen lomom u betonu, dok FRP element ostaje neoštećen. Ovo je najavljena i poželjna vrsta loma kojem se teži u svim smernicama (Međunarodnog društva za beton- FIB [7], Društva za beton V. Britanije- CSC [6] i Američkog instituta za beton- ACI [1], koje su uporedo analizirane u radu [13]).

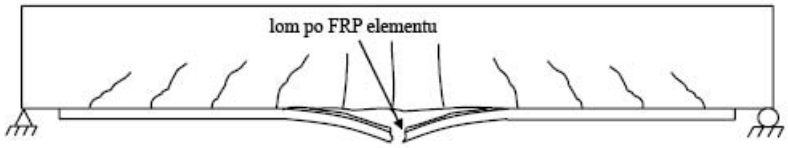
2/ Lom koji nastaje prethodnim gubitkom veze betonskog i FRP elementa

- odvajanjem dva elementa ili otkazom u nekom od slojeva

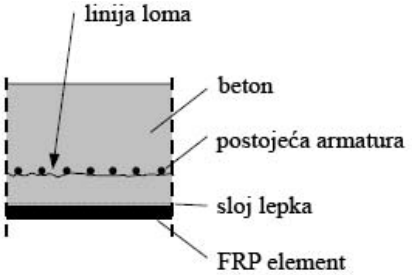
a) "pucanjem" betona u blizini linije sloja lepka ili u liniji postojeće zategnute armature (slika 5),



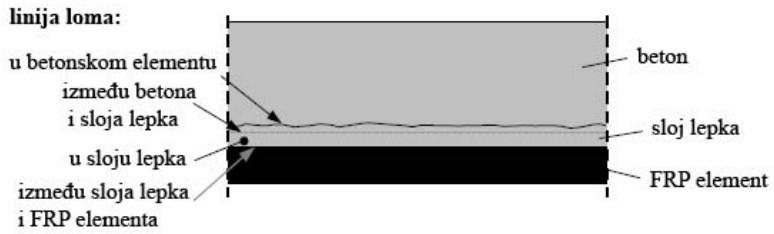
Slika 3. Prikaz loma po betonu



Slika 4. Prikaz loma po FRP elementu



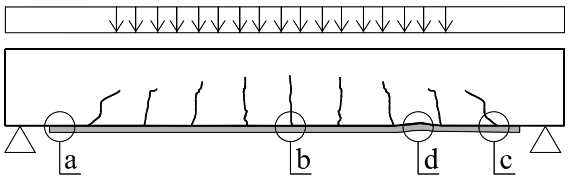
Slika 5. Prikaz linije loma duž postojeće armature



Slika 6. Prikaz pojave linije loma pri otkazu adhezije i kohezije

b) otkazom u sloju lepka (otkaz kohezije) (slika 6),
c) otkazom između sloja lepka i betona ili otkazom između sloja lepka i FRP elementa (otkaz adhezije) prikazanim na slici 6,
d) odlepljivanje unutar FRP elementa (otkaz smicanjem između slojeva)

- odlepljivanjem ili odvajanjem FRP elementa od betonske površine (prikazanim na slici 7)
  a) odlepljivanjem kraja FRP laminata od betonskog elementa u neispucaloj zoni sidrenja,
  b) odvajanjem FRP laminata prouzrokovanim prslinama u betonskom elementu nastalim usled napona savijanja,
  c) odvajanjem FRP laminata prouzrokovanim prslinama u betonskom elementu nastalim usled smičućih napona,
  d) odvajanjem FRP laminata prouzrokovanim neravninama na površini betonskog elementa.

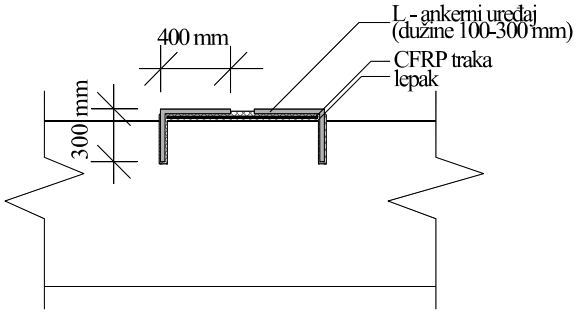


Slika 7. Prikaz loma nastalog prethodnim gubitkom veze betonskog i FRP elementa

Da ne bi došlo do odlepljivanja ili odvajanja FRP laminata od betonske površine elementa na neisprskalom delu ili usled prslina prouzrokovanih momentima savijanja, neopohodno je odrediti potrebnu dužinu sidrenja FRP laminata [21]. Ukoliko nije moguće obezbediti dovoljnu dužinu sidrenja, potrebno je osigurati krajeve FRP laminata od odlepljivanja trakama upravno orijentisanim u odnosu na trake kojim pojačavamo element, ili pomoću specijalnih uređaja za ankerovanje [12].

Upotreba traka upravno orijentisanih u odnosu na trake kojima pojačavamo element na savijanje, oblikovanih u uzengije, kojima se obuhvataju podužne trake je preporučljiva, ali se ove uzengije ne mogu smatrati delom pojačanja na smičuće sile, ukoliko je i ono potrebno.

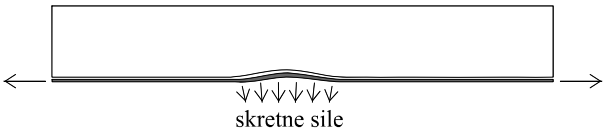
Korišćenje mehaničkih ankernih uređaja kao što su zavrtnjevi treba izbegavati ili sa velikim oprezom koristiti, pošto oni mogu uticati na integritet FRP elemenata. Rupe koje su neophodne u slučaju zavrtnjeva npr., mogu prouzrokovati „pucanje“ po dužini FRP laminata, i smanjenje njegovog poprečnog preseka na tom mestu.



Slika 8. Prikaz mehaničkog sredstva za ankerovanje CFRP traka

Specijalna mehanička sredstva za ankerovanje L oblika, prikazanih na slici 12, dužine 100-300 mm su preporučljiva naročito pri upotrebi CFRP traka za pojačavanje tavanica. Ovi ankerni uređaji se postavljaju u zareze napravljene u tavanici i znatno povećavaju mogućnost primanja zatežuće sile na krajevima traka. Nakon ugradnje, ove ankerne uređaje treba zaštiti minimalnim zaštitnim betonskim slojem od 20 mm.

Odvajanje FRP elemenata od betonske površine usled neravnina je još jedna od mogućnosti koju treba izbeći. Ovaj problem nije dovoljno proučen, i s'toga postoje samo preporuke za temeljnu pripremu betonske podloge. FRP sistemi se ne smeju lepiti na neravne nosive površine, pošto to dovodi do pojave nepoželjnih skretnih sila (slika 9).



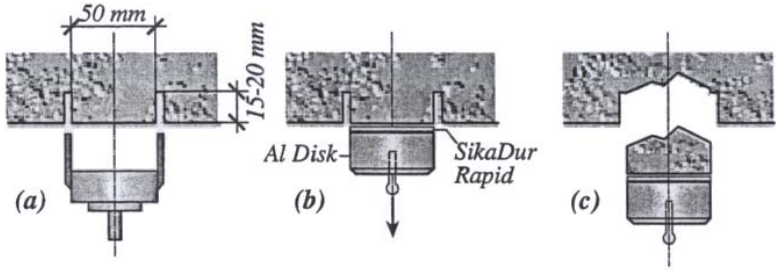
Slika 9. Prikaz skretnih sila nastalih usled neravnina na betonskoj podlozi

Pre nanošenja lepka, a nakon detaljnog čišćenja, treba proveriti betonsku površinu metalnom letvom, dužine 2m kod koje ne sme da se pojavi neravnina veća od 5 mm. Pri kontroli na dužini, odnosno širini od 30 cm, dozvoljeno odstupanje letve od betonske površine treba da je manje od 1mm. Ukoliko ovo nije slučaj, odnosno ukoliko su neravnine veće od dozvoljenih, potrebno je primeniti izravnavajuću podlogu i prajmer.

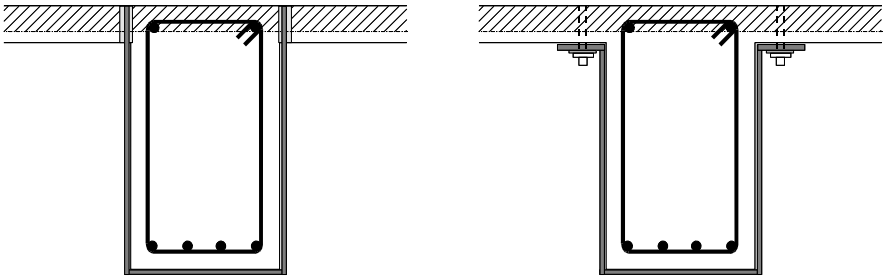
Najznačajniji kriterijum za primenu FRP elemenata kao sistema za pojačanje konstrukcije je kvalitet ugrađenog betona. Pre nanošenja lepka, poslednja provera kvaliteta betonske površine na koju treba da zalepimo FRP element, vrši se tzv. „pull-off testom“ kojim se dobija stvarna čvrstoća betona na zatezanje kao i kvalitet pripremljene podloge. Na ovaj način utvrđena čvrstoća betona na zatezanje prema [7] treba da iznosi minimalno f_{ct}=1,5 MPa. Ukoliko je utvrđeno da je potrebno konstrukciju prethodno izravnati tankim nanosom izravnavajuće podloge i prajmera, „pull-off“ test se vrši nakon nanošenja ove podloge na betonsku površinu (slika 10). U Tehničkom izveštaju 55 [6] ističe se potreba uzimanja minimalno tri uzorka za betonsku površinu na koju želimo da lepimo FRP element.

Pri pojačavanju elemenata za prijem povećanih momenata savijanja, mora se voditi računa da se sa druge strane može povećati mogućnost loma od uticaja transverzalnih sila u preseku.

Što se elemenata pojačanih na smičuće sile tiče, da ne bi došlo do njihovog otkaza, neophodno je propisno ankerovanje FRP laminata. Ovo se postiže obuhvatanjem betonskog preseka sa tri ili čak sa sve četiri strane i izbegavanjem lepljenja laminata samo po obrazima. Laminati koji obuhvataju zategnutu zonu poprečnog preseka betonskog elementa sa njegove tri strane, formirajući pri tome obvojnicu u obliku slova U, moraju prema Tehničkom biltenu 14 [7] biti ankerovani u pritisnutu zonu preseka, da bi se formirao efekat rešetke, a gde je to moguće, preporučljivo je čak da se ankerovanje izvrši celom visinom pritisnute zone (slika 11).



Slika 10. Prikaz „pull-off" testa

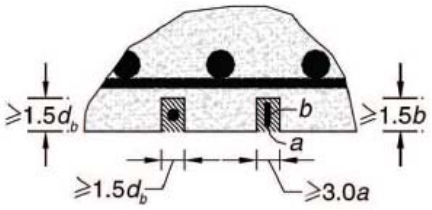


Slika 11. Pravilno ankerovanje FRP elementa kod elementa pojačanog na smicanje

3 OBLICI I MEHANIZMI LOMA AB PRESEKA POJAČANIH NSM METODOM APLICIRANJA FRP ELEMENATA

Pojačavanje betonskih elemenata napregnutih na savijanje može biti izvedeno umetanjem FRP traka ili šipki u prethodno napravljene proreze u betonu. Ovaj način pojačavanja, kako je napred naglašeno, se naziva pojačavanjem u blizini površine betonskog preseka, tzv. NSM sistem [14].

FRP elementi aplicirani na ovaj način su bolje zaštićeni od traka koje se lepe na samu površinu, što omogućuje bezbedno apliciranje u zonama gde postoji mogućnost oštećenja. Takođe, ovako apliciran FRP ima veću specifičnu površinu sprezanja sa betonom, što je još jedna od prednosti NSM sistema (slika 12). Da bi se poboljšalo prianjanje, FRP elementi korišćeni za primenu NSM sistema uglavnom imaju obrađenu površinu. Ovo se može postići na razne načine, a jedan od uobičajenih je fabrička profilacija tj. rebra, slična čeličnoj rebrastoj armaturi.



Slika 12. Detalji za ugradnju NSM sistema pojačavanja

Dosadašnja ispitivanja su pokazala [23] 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. Ipak, ova granična dužina sidrenja daje mnogo veću jačinu i prianjanja kod NSM sistema, te je zbog toga manje verovatno da će ona u ovom slučaju biti limitirajući faktor pri dimenzionisanju.

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

1/ Otkaz nastao usled odvajanja u sloju lepka

Do odvajanja u sloju lepka, kojim se zapunjava prorez nakon umetanja FRP elementa, može doći usled visokih 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 koji okružuje FRP element i može se minimalizovati, ili čak izbeći korišćenjem lepkova veće čvrstoće na zatezanje.

2/ Otkaz nastao usled odvajanja betona

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

Ova vrsta otkaza je u direktnoj zavisnosti 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

Pošto 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.

Sidrenje NSM sistema se razlikuje od FRP sistema nanetih 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 primeniti na NSM sisteme.

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

4 MEHANIZMI LOMA KOD POJAČAVANJA PREDNAPREZANJEM

Eksperimentalna istraživanja obavljena u EMPA-Cirih 1993. g., pokazala su povoljan rezultat na pojačavanje konstrukcije pri prednaprezanju CFRP traka. Njime je postignuto poboljšanje ponašanja u upotrebi i za granično stanje loma [3] i [11]. Prednaprezanje korišćenjem spolja vođenih kablova (van poprečnog preseka) je povoljno zbog zanemarljivog povećanja težine i ometanja saobraćaja. Kod prednaprezanja kablovima od čelika često dolazi do korozije, a time i do redukcija njihovog preseka i do povećanja napona u kablovima. To može dovesti do loma, kao na mostu Znys-y-Gwas u Velsu 1985. godine. Pored toga održavanje ovako pojačanih konstrukcija je otežano. Ovaj problem je moguće rešiti korišćenjem kablova od različitih FRP materijala. Za pojačavanje elemenata izloženih savijanju mogu se primeniti prethodno i naknadno naprezanje kablova [11].

Za prednaprezanje se koriste različite trake (CFRP) kao spoljašnji kablovi jer su izduženja lepljenih traka ograničena nosivošću lepka i površinskih slojeva betona. Potreban je dokaz sidrenja zatežuće komponente, a prednapregnute trake su vrlo povoljne za pojačavanje AB elemenata i sa aspekta graničnih stanja upotrebljivosti i loma [2] i [3].

Ukoliko se pojačavanje vrši prednaprezanjem FRP elemenata, neophodno je obratiti pažnju na mehanizme otkaza ankernih sistema:

- pomeranje ili proklizavanje kabla van ankera izazvano nedovoljnim uklještenjem između kabla i cilindra - čaure,
- proklizavanje kabla i cilindra, skupa, relativno u odnosu na klin,
- proklizavanje klina, relativno u odnosu na cev,
- prekid štapova van zone ankerovanja. Prekid kabla van zone ankerovanja je, kada do prekida dođe u zoni dalje od, trostruke vrednosti prečnika, u odnosu na anker.

Otpornost na zamor je posebno važna kod mostova, jer je kod njih, često potrebno povećati njihovu nosivost zbog porasta saobraćajnog opterećenja. Kako je naglašeno, da bi se pojačanje izvelo brzo i sa malim ometanjem saobraćaja i sa malim povećanjem težine primenjuje se spoljašnje prednaprezanje kablovima na bazi FRP.

U istraživanju opisanom u radu [11] primenjeno je prednaprezanje Parafil užadima (linearni aramidni laminati) uz određivanje uticaja sledećih parametara: veličine unete sile, broja devijatora (jedan u sredini i dva u trećinama raspona), maksimalno opterećenje pre prednaprezanja, efektivne visine do unete sile, čvrstoće betona i odnosa raspona i visine grede. Na osnovu upoređenja eksperimentalnih i teorijskih rezultata razvijen je jednostavan izraz za određivanje granične nosivosti grede.

Mehanizmu loma prethodili su veliki ugibi i otvaranje širokih prslina, a lom se događao u zoni unošenja sila (devijatora), dok su smičuće sile izazvale prsline u zoni smicanja (savijanja silama). Rezultati, prikazani u radu [11], su pokazali da granični momenat savijanja pojačane grede raste:

- sa porastom spoljašnje sile prednaprezanja, kao dominantnim parametrom,
- pri korišćenju dva devijatora u trećinama raspona umesto jednog u sredini,
- sa porastom ekscentriciteta sile prednaprezanja,
- sa porastom čvrstoće betona na pritisak.

Na vrednost graničnog momenta neznatno utiče opterećenje naneto pre pojačavanja i vitkost grede (za ispitivane odnose) [3]. Predloženi metod, sa malim modifikacijama, može se primeniti na bilo koja FRP užad. Spoljašnja sile prednaprezanja povećava momenat nosivosti u odnosu na nepojačane grede bez bitne redukcije duktilnosti [2].

5 PREGLEDI I PROCENA STANJA OBJEKATA

Nadgledanje obuhvata skup mera koje se preduzimaju na objektu u toku njegove eksploatacije da bi se utvrdile potrebe za izvođenje različitih intervencija tokom održavanja. O nadgledanju, zavisno od vrste i nivoa detaljnosti sastavlja se odgovarajući izveštaj. Prema Model Code Evro-internacionalnog komiteta za beton (1990/93) preporučuje se da vreme između dva detaljna pregleda, za stambene zgrade, ne bude duže od deset godina. Znatno kraći periodi vremena, npr. zahtevaju se za mostove (šest za drumske, dve za železničke). U našem Pravilniku BAB' 87 Projekat osmatranja i održavanja je obavezni deo projektne dokumentacije. AB konstrukcije moraju se održavati u stanju projektom predviđene sigurnosti i funkcionalnosti, a u slučaju oštećenja moraju se predvideti mere zaštite i/ili sanacije.

S obzirom da ne postoji dovoljno iskustava sa praćenjem ponašanja izvedenih objekata čine se pokušaji da se to nadoknadi eksperimentalnim istraživanjem nekih najčešćih mehanizama oštećenja, kao npr. [5]. U tom radu istraživana je otpornost veze na kontaktu FRP elemenata i betona za slučaj lepljenja i njihovog vođenja u okviru zaštitnog sloja-NMS sistema. U njemu su razvijeni matematički modeli popuštanja veze za pojedinačne elemenate/ploče koji se koriste za povećanje nosivosti na savijanje i na smicanje AB greda, kao i za pojačanje korišćenjem NSM sistema. Istraživani su pojedinačni elementi i grupe elemenata koji se koriste za pojačavanje.

Slabljenje FRP materijala odvija se kao kombinacija sledećih činilaca [19]:

– Mehanička dejstva (zamor, ponovljeni udari, abrazija, erozija i ređe preopterećenje);

– Hemijska dejstva (zagađena voda, rastvori, ulja, kiseline, i dr.);

– Radijacija;

– Visoke temperature ili njihove fluktuacije;

– Biološka dejstva (bakterije, alge, insekti, i dr.) više o tome dato je u [5].

Promene pri pomenutim dejstvima mogu se uočiti uz uslov, očišćenih površina na kojima su naneti FRP elementi od nečistoća. Pregledom se obuhvata stanje zaštitnih obloga iako ne utiču na konstrukcijska svojstva AB konstrukcije. Često na stanje pojačane konstrukcije utiče više činioca pa je važno odrediti primerne uzroke neadekvatnog stanja i ukloniti ih pa zatim izvesti popravke. Značajno je odrediti vek trajanja komponenti da bi se odredio preostali vek trajanja objekta, da konstrukcija ne bude skupa za održavanje i da ispuni zahteve nosivosti i estetske.

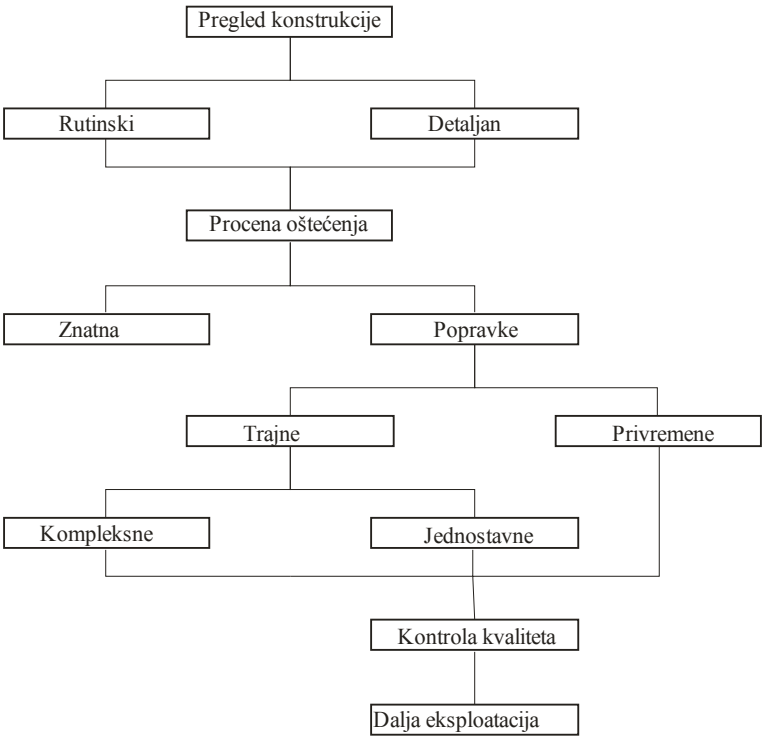
I pored toga što je trajnost FRP elemenata za pojačanje manja od AB elemenata od značaja je činjenica da se oni lakše mogu popraviti ili zameniti nego ostali elementi kod klasičnih intervencija čime se postiže produženje eksploatacionog veka (EV). Za estetske popravke koriste se blaga sredstva za čišćenje ili specijalni vosak. Neadekvatno održavanje FRP materijala za pojačavanje, povećava oštećenja i negativno utiče na trajnost, tj. EV. Oštećenja mogu biti posledica povrede elemenata za pojačavanje tokom sečenja i postavljanja. Najozbiljnija oštećenja javljaju se za incidentna opterećenja, neplanirana povećanja opterećenja i izlaganja dugotrajnim dejstvima.

Za razliku od metode spolja lepljenih (EBR) FRP elemenata, koja se razvija oko dve decenije, NSM metoda u svetu se primenjuje svega nekoliko godina i nedovoljno je obrađena u literaturi, kao i preporukama i smernicama za projektovanje

Posle nekoliko decenija korišćenja početna svojstva elemenata se menjaju, čak i bez mehaničkih oštećenja. Obavljanje pregleda i registracija promene svojstava tokom vremena mogu obezbediti da se pad svojstava i oštećenja ne povećavaju. Rutinski pregledi obavljaju se vizuelno i beleže sve promene uključivo i promene boje. Registruju se prsline ili ispupčenje/ bubrenja, ali ponekad nije lako uočiti znake deterioracije. Zbog toga je u nekim slučajevima potrebno koristiti specijalnu opremu kao što je termografija, ultrazvuk, i dr. instrumenti. I to je onda detaljni pregled praćen ispitivanjima.

Uzorci vlaknastih elemenata se lepe za konstrukciju van dela područja koje je pojačano u svhu ispitivanja tokom eksploatacionog veka. Alternativno uzorci FRP laminata se mogu lepiti na grede u neposrednoj blizini pojačane konstrukcije, koji se kasnije ispituju prema režimu pregleda. Deo uzoraka se ne prekriva zaštitnim oblogama. Značajne su naznake slabijeg prianjanja kada se ona ispituje. Regularno ispitivanje uključuje tradicionalni pull-off test da bi se odredila čvrstoća na zatezanje ili se obavlja ispitivanje konstrukcije pod probnim opterećenjem. Analiza prikupljenih podataka i rezultati ispitivanja koriste se za procenu integriteta pojačane konstrukcije. Izveštaj treba da sadrži i preporuke za popravke i sprečavanje daljeg pogoršavanja stanja.

Rutinskim vizuelnim pregledom sa mogu konstatovati nabori prsline ili raslojavanje, za lokalna oštećenja (usled udara ili abrazije, npr.) i deterioracija (degradacija) konstrukcije (dodatne prsline ili korozija). Kada se elementi FRP pokriju zaštitnim slojem, pregledom se mogu konstatovati oštećenja na kompozitima, najčešće bez uklanjanja zaštitnog sloja. Planirani radovi na pojačanim elementima mogu biti uzrok povrede FRP elemenata-armature.



Slika 13. Dijagram toka monitoringa i sanacija

Upitnik za rutinski pregled konstrukcija pojačanih sa FRP elementima sadrži sledeće:

- Da li je FRP vlažan?
- Postoje li znaci oštećenja na FRP koji su vizuelno primetni? (oštećenja od udara, površinske prsline, izloženost vlakana, promena boje, i dr.),
- Da li je obavljeno čišćenje posle prethodnog pregleda?
- Da li ne nanošen zaštitni sloj ili bojenje posle prethodnog pregleda?

Detaljni pregledi se obavljaju uz nedestruktivne metode ispitivanja, kao što su obični čekić za kucanje po betonu i korišćenje ultrazvuka, tokom eksploatacionog veka. Upotreba termografije je nešto kompleksnija i skuplja, ali znatno preciznija za ispitivanje FRP materijala. Ali ne postoji pouzdan metod nedestruktivnog ispitivanja prianjanja, tj. stanja adheziva. U tom cilju primenjuje se kao adekvatan pull-off test, na kontrolnim uzorcima koji se čuvaju u blizini pojačane konstrukcije. Ostali instrumenti za ispitivanje tokom korišćenja objekta mogu se postaviti u vreme pregleda i procene (merenje dilatacija pod pokretnim opterećenjem, npr.) ili u procesu pojačavanja. Pri većim promenama neophodno je utvrditi poreklo neregularnosti u FRP nanetom materijalu ili originalnoj konstrukciji, kao što su dodatne prsline u betonu [7] na koje treba primeniti sanacione mere.

Intervali između pojedinih pregleda dati su u Preporukama Američkog instituta za beton [1], Međunarodne federacije za beton [7], i Društva za beton [6]. U dokumentu [6] se uslovljavaju češći pregledi u prvih nekoliko godina posle postavljanja FRP elemenata kao provera efikasnosti obavljene intervencije.

6 TRAJNOST I PERFORMANSE

Prema Evrokodu 0 [16], koji daje osnove projektovanja konstrukcija i [4] potrebno je za BK odrediti proračunski eksploatacioni vek koji za konstrukcije zgrada i druge jednostavne konstrukcije iznosi 50 godina. Takođe se uslovljava da degradacija konstrukcije posle isteka eksploatacionog veka, ne utiče na smanjenje nivoa njenog ponašanja ispod određene mere imajući u vidu sredinu u kojoj se nalazi, kao i njeno održavanje. Zbog toga je od značaja poznavanje efekata na trajnost i performanse AB konstrukcija pojačanih FRP elemenatima.

6.1 Mehanički efekti

Trajnost FRP materijala na mehanička dejstva je zadovoljavajuća [17] jer su prisutna vlakna koja obezbeđuju nosivost, ali treba imati u vidu da slabljenje matrice koja prenosi opterećenje između vlakana, može indirektno uticati na ukupna mehanička svojstva materijala. Meke matrice su podložne eroziji i ogrebotinama. Udari manjih predmeta izazivaju oštećenja materijala koja se, često, ne vide golim okom ali se može javiti raslojavanje, prsline u matrici, odlepljivanje vlakana čak i njihovo cepanje. Najbolje je ovakva oštećenja odmah sanirati zamenom FRP materijala [18].

Da bi se popravile karakteristike žilavosti matrice, pre završne obrade dodaju se, oko 10% mereno težinski, modifikatori od gume, termoplastike, koristi se i umetanje sloja apsorbera energije (elastomera) između zubaca armature.

Zamor pod cikličkim opterećenjem koje se spreže sa ostalim dinamičkim dejstvima koja mogu biti mehanička, termička i hemijska. Ponašanje se prognozira na osnovu eksperimentalnih istraživanja, jer ovaj činilac bitno utiče na eksploatacioni vek pojačane AB konstrukcije [4].

Iako su dostupni za preged spojevi, tj. pojačanja FRP elementima spoljašnjim lepljenjem, posebno su osetljivi. Uopšte trajnost popravke zavisi od primenjenih adheziva i mogu se analizirati odgovarajućim kriterijumima loma.

6.2 Hemijska dejstva

Poznato je da FRP materijali apsorbuju vodu, kao što su stakleni (sa nižom cenom) i karbonski FRP materijali uz napomenu da se staklena vlakna završnom obradom mogu zaštititi od apsorpcije. Apsorpcija dovodi do migracije vlage kroz smolu, pa može izazvati redukciju nosivosti zbog odvajanja vlakana i smole. Neke smole su osetljive na ključalu vodu, ali ne i na hladnu. Vlaga i temperaturna fluktacija izazivaju prsline i druga oštećenja. Debeli slojevi su manje podložni ovom dejstvu nego tanki što se objašnjava ranijim iskustvom iz sanacija sa FRP materijalima. Zbog toga je važan adekvatan izbor materijala, smole i geometrije, kao i pažljivo sečenje i bušenje pri postavljanju.

Neke materijale na bazi FRP treba zaštititi od kontakta sa hemikalijama jer su podložni oštećenjima pod njihovim delovanjem [18]. Izbeći kontakt sa deterdžentima, rastvaračima za čišćenje, kiselinama, alkalijama i dr. Otpornost većine FRP materijala na visoko reaktivne hemikalije je dobro, što omogućuje njihovu primenu u objektima sa hemikalijama i sličnim materijalima, kao i na nepovoljnu sredinu. Agensi oksigena, jake alkalije, bromidi i vlažni hloridi remete efekte smole. Ako su FRP materijali podvrgnuti simultanom mehaničkom i hemijskom dejstvu mogu izazvati prsline, koje pod uticajem sredine dovode do nepoželjnog, tj. naglog-krtog loma.

Tabela 1: Preporučeni intervali između dva pregleda

Tip konstrukcije:	Rutinski pregledi:	Detaljni pregledi:
Mostovi	Svake godine	Najmanje jednom u šest godina
Zgrade	Svake godine	Pri promeni namene Pri promeni načina korišćenja Pri izvođenju radova na konstrukciji ili pojačavanju. Najmanje jednom u šest godina
Ostali objekti	Zavisno od korišćenja objekta (idealno svake godine)	Zavisno od korišćenja objekta (najmanje jednom u deset godina)

6.3 Promena boje

Od značaja je da su FRP materijali otporni na promenu boje. Smole imaju promenljivu otpornost na dugotrajna dejstva spoljašnje sredine. Za tu svrhu se preporučuje korišćenje staklo/poliester ili ugljenik/epoksi materijala na koje nepovoljno deluje samo površinski. Efekti su „kozmetičke" prirode:

- Bleđenje i zatamnjenje ako se ne koriste odgovarajući pigmenti za očuvanje boje.
- Žutilo usled zatamnjenja baze obloge smole. Izbegava se korišćenjem smola otpornih na ultravioletna zračenja (UV), ili se uslovljava da ih apsorbuje, uz dobru negu smole.
- Cvetanje zbog migracije nekompatibilnih pigmenata ili aditiva doprinosi da površina postaje tamnija. Posledice se mogu ukloniti poliranjem, kao kratkotrajna mera.
- Gubitak sjaja i razgradnja površinskog veziva izaziva erozija površinskih slojeva usled hemijskog ili mehaničkog oštećenja, ili njihove kombinacije.

Klimatske promene takođe utiču na FRP materijale. Više o ovome videti u [10].

6.4 Temperatura

Najveće temperature pri korišćenju FRP materijala uslovljavaju dva činioca: prvi je prenos toplote sa smole na staklo, i temperatura kada počinje hemijska razgradnja (retko se javlja). Pri porastu temperature opadaju čvrstoća, napon pri popuštanju, i modul elastičnosti. Smole imaju ograničenu otpornost na temperaturu, ali postoje i otporne smole koje su veoma skupe. Vlakna su stabilni materijali i na visokim temperaturama, čak i za komercijalne smole. Efekti visokih temperatura su:

- Hemijska razgradnja smola pri zagrevanju.
- Redukcija modula i čvrstoća.
- Ubrzavanje procesa deterioracije/degradacije, slično kao pri radijaciji ili hemijskom dejstvu.
- Oštećenja usled termičke ekspanzije i nekompatibilnosti dva susedna materijala sa aspekta termičkog koeficijenta.
- Termički udar posle naglih promena temperature i pojava prslina.
- Ponovljena nagla zagrevanja FRP materijala koji je prethodno apsorbovao vlagu ili rastvarače izaziva različite mehanizme oštećenja.
- Požari.

Protivpožarna otpornost FRP je, pored čvrstoće i modula elastičnosti, značajan podatak za projektovanje. Smola ne sme biti podložna zapaljenju, ali pri zagrevanju iznad kritične temperature gubi mehanička svojstva i integritet. Najveći broj organskih smola se naglo degradira već na temperaturama između 300 i 400^0 C. Zbog toga se izboru smola i dodataka pri intervencijama (sanacije/pojačavanje) sa FRP materijalima mora pokloniti puna pažnja.

7 ODRŽAVANJE, SANACIJE I POPRAVKE

FRP materijali ne uslovljavaju velike radove na održavanju tokom eksploatacionog perioda. Ipak, popravke se obavljaju i u toku izvođenja radova, tj. njihovog nanošenja na konstrukcijske elemente i tokom korišćenja objekta. Tokom nanošenja FRP elemenata (izvođenje radova na pojačavanju) radovi na bušenju, pravljenje zareza, brušenje i ostali radovi mogu izazvati površinska oštećenja FRP elemenata, naročito izlaganje vlakana, sa smanjenom zaštitom matrice od spoljašnjih dejstava. To bitno utiče na performanse (ponašanje u upotrebi).

Oštećena površina mora biti zaštićena slojem matrice ili boje. Opšte pravilo je da se koristi materijal istog tipa od kojeg je prvobitno izvedena sanacija/pojačavanje. Uputstva proizvođača se moraju uvažavati da bi se postigla optimalna popravka. Da bi se obezbedila adekvatna popravka zaostala prašina ili druge nečistoće nastale tokom izvođenja pojačanja moraju se ukloniti pre početka same popravke. Odluka o izvođenju popravke donosi se zavisno od stepena zahteva da se performanse dovedu na nivo projektovanih. Ostale stavke su koštanje popravke, pristup oštećenom mestu i dostupnost materijala za popravku.

Iskustveno neophodni koraci za izvođenje popravke su:

1. Pregledati i proceniti oštećenje
   - Vizuelne-tehnika posmatranja, i
   - Korišćenjem instrumenata.
2. Procena opcija popravki
   - Nastavak korišćenja bez popravke.
   - Popravka oštećenog dela pojačanja, i
   - Zamena oštećenog dela pojačanja.
3. Izvođenje popravki
   - Ukloniti oštećeni materijal.
   - Očistiti materijal do zdravog dela.
   - Pripremiti oblast za popravku, i
   - Izvesti planiranu popravku.
4. Kontrolisati kvalitet popravke
5. Obnoviti zaštitni sloj-premaz

7.1 Tipovi poravki

Prema prikazanom dijagramu toka (slika 13) postoje tri tipa popravki:

1. Jednostavna popravka ako je oštećenje neznatno ili ne utiče na strukture FRP materijala. U ovom slučaju popravka je isključivo estetskog karaktera i izvodi se radi zaštite i dekorisanja površine. Ovim se ne poboljšava čvrstoća na zatezanje i koristi se tamo gde ovo nije potrebno postići. Zbog značajnog stepena skupljanja materijala kojim se izvodi popravka, ovi delovi mogu isprskati posle određenog vremena.
2. Kompleksna popravka je potrebna kada je oštećenje znatno i kada se moraju nadomestiti snižene mehaničke karakteristike materijala. Najbolji izbor materijala bi bio korišćenje originalnih vlakana i recepture matrice ukoliko je to moguće. Ukoliko to nije alternativno rešenje iziskuje pažljivi izbor. Predložena šema popravki mora da odgovara originalnom projektu pojačanja konstrukcije/betonskog elementa.
3. Privremena popravka izvodi se u slučaju malih oštećenja koja ne ugrožavaju strukturu i/ili mehaničke karakteristike materijala. Ove popravke se obavljaju sa minimumom pripremnih radova i u cilju zaštita FRP elementa do trenutka kada se izvede potpuna popravka. Za privremene popravke se, takođe, uslovljavaju redovni pregledi.

7.2 Neke tehnike poravki

1. Premaz

Ukoliko je u pitanju samo ogrebotina ili abrazija popravka se obavlja jednostavnim premazivanje te površine premazom obogaćenom matricom.

2. Popravka krpljenjem

Debljina originalnog FRP materijala se nadoknađuje korišćenjem umetnutih slojeva i materijala za popravku koji se lepe na površinu FRP materijala. Uglove zakrpe treba zaobliti za sve slojeve. Zakrpom se zamenjuje oštećena površina da što više odgovara originalu. To znači da broj slojeva i orijentacija vlakana treba da budu kao kod originalnog pojačanja. Popravljeno pojačanje ima 60 do 80% čvrstoće originalnog pojačanja (slika 14).

Prednosti ovog postupka su: jednostavno izvođenje, male su potrebe za pripremne radove, a mane popravljeni FRP element je deblji i teži od originalnog pojačanja. Da bi se obezbedila adekvatna adhezija potrebna je priprema površine čišćenjem.

3. Popravka sa zakošenjem i umetkom

Oblast oko oštećenja se peskari da bi se ogolio svaki sloj laminata. Važno je znati broj slojeva FRP materijala, kao i njihovu orijentaciju. Ponekad je potrebno umetnuti sloj FRP materijala radi izravnavanja površina.

Prednosti ovog postupka su što je neznatno deblji od originala, svaki sloj za popravku se preklapa sa slojem koje se popravlja (slika 15). Dobro prianjanje može da se postigne sveže ogoljenim površinama (peskarenje). Mane su mu što je postupak vremenski zahtevan i što je potreban visok stepen veštine radnika da bi se pravilno izveo.

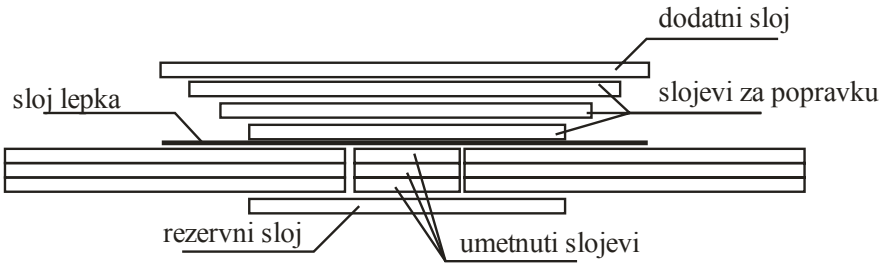
4. Stepenasta popravka konstrukcijskog elementa

Stepenasta popravka (slika 16) je alternativa za popravku sa zakošenjem. U ovom slučaju ugao se postiže preciznim uklanjanjem određene površine FRP materijala svakog sloja. Laminat se peskari sve dok se ne ukaže sledeći sloj FRP pojačanja, što rezultuje stepenastim oblikom. Ovaj oblik ostavlja oštre ivice na svakom sloju i veoma ga je teško izvesti, a da se pri tome ne jave oštećenja.

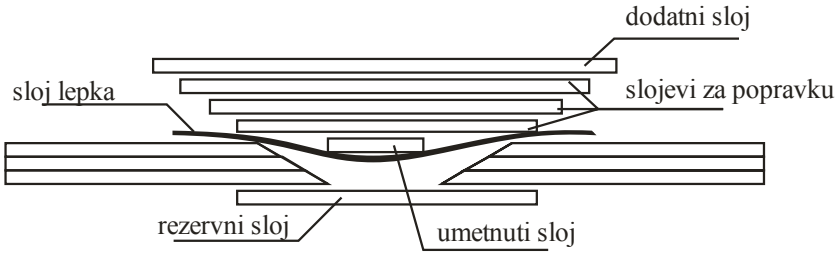
Prednosti su mu što je neznatno deblji od originala, svaki sloj za popravku se preklapa sa slojem koje se popravlja. Dobro prianjanje može da se postigne sveže ogoljenim površinama. Mana mu je što je izuzetno komplikovan za izvođenje.

Za građevinske objekte koriste se sledeće strategije održavanja:

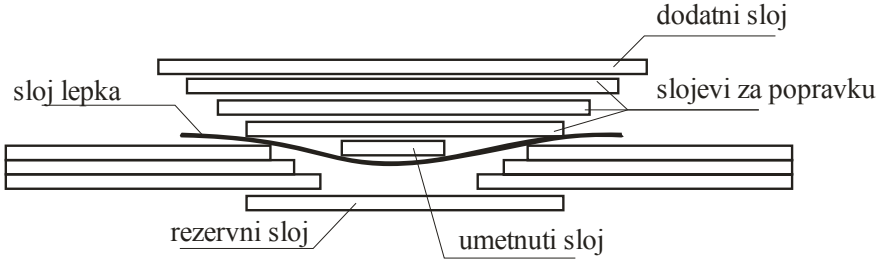
1. Osnovno održavanje popravkama nakon registrovanja oštećenja.
2. Popravkama nakon određenog vremena korišćenja objekta.
3. Intervencije prema stanju važnijih komponenti nakon nekih nepredviđenih okolnosti ili usled prekoračenja nekih granica odstupanja konstatovanih redovnim pregledom.



Slika 14. Krpljenje nenosećih elemenata



Slika 15.Nastavak sa zakošenjem i umetkom



Slika 16. Stepenasta popravka konstrukcijskog elementa

To se svodi na podelu na: korektivno održavanje (popravka nakon otkaza), preventivno održavanje i kombinovano održavanje. Nakon svakog pregleda upoređuju se stanje sa onim iz prethodnog pregleda. Za ove konstrukcije prikladan je samo treći model održavanja, tj. održavanje prema stanju.

Ukupno koštanje je zbir koštanja popravki, očekivanih pregleda, plus totalni rizik od oštećenja podeljeno sa životnim vekom objekta

8 ZAKLJUČAK

Iako savremeni način sanacija i pojačavanja AB konstrukcija, korišćenjem različitih elemenata na bazi FRP materijala i tehnika rada, on uslovljava redovno (kontinualno) praćenje stanja dodatnih elemenata i veze sa pojačanom konstrukcijom. Razlog za učestalije praćenje, nego za klasične AB konstrukcije, je nedostatak iskustava vezane za trajnost na ovaj način saniranih/pojačanih objekata. Zbog toga je od značaja prikaz i analiza dostupnih podataka iz literature i međunarodnih preporuka, jer je kod nas literatura iz ove oblasti veoma oskudna.

Pošto su, kako je naglašeno, trajnost i performanse u toku korišćenja objekata ključni faktori za primenu FRP materijala za sanacije/pojačanje betonskih konstrukcija, tj. svih njenih elemenata njima se mora posvetiti posebna pažnja. Naročito je značajna provera FRP elemenata kao dela pojačane konstrukcije tokom pregleda i procene stanja. Kada se oblast koja je oštećena identifikuje potrebno je sprovesti popravke, na način kako je to napred opisano. Za održavanje AB konstrukcija pojačanih FRP elementima jedino je ispravan model održavanja prema stanju uz adekvatno periodično praćenje i procenu stanja.

Pri intervencijama na konstrukciji treba imati u vidu da je pojačavanje AB preseka FRP materijalima naročito efikasno u slučajevima relativno male količine postojeće zategnute armature u preseku. Mora se voditi računa da se zbog izraženih elastičnih karakteristika FRP materijala uvek obezbedi potrebna duktilnost preseka, kojom se sprečava nepoželjni mehanizam otkaza preseka, kao i u slučajevima lošeg kvaliteta izvođenja ili kvaliteta kontrole ovih sistema za pojačavanje.

Kod pojačavanja AB ploča sa FRP elementima (trake, lamele, ploče) treba sprečiti lom odlepljivanjem jer se u tom slučaju ne može razviti puni kapacitet nosivosti na savijanje. Do otkaza najčešće dolazi na krajevima obloge, pa se za njegovo sprečavanje koristi specijalno ankerovanje na krajevima ili prednaprezanje, tj. aktivno pojačavanje.

Nameće se, kao imperativ, da je pored solidnog projekta i izvođenja radova na pojačavanju, potreban adekvatan monitoring i sprovođenje mera održavanja saglasno navedenim preporukama koje su u radu sažeto prikazane i analizirane. Pošto su FRP materijali novi i sa njima nema dovoljno iskustava Preporuke za njihovo projektovanje sanacija/pojačavanja se često menjaju. Sa povećanjem fonda eksperimentalnih istraživanja i iskustava u njihovoj primeni preporuke su detaljnije i ne uslovljavaju tako česte promene. S tim u vezi je i potreba njihovog adekvatnog nadgledanja i održavanja, znatno više nego kod klasičnih intervencija na elementima AB konstrukcija. Zbog toga se AB konstrukcija pojačane FRP elementima moraju češće nadgledati uz procena stanja betona, armature i FRP materijala, kao i veze osnovnih i dodatnih materijala (elemenata).

I u našoj zemlji bi bilo neophodno usvojiti, što je moguće pre, adekvatnu regulativu iz oblasti primene FRP elemenata za projektovanje i izvođenje novih ili pojačavanje postojećih AB konstrukcija kao i njihovog nadgledanja i održavanja.

Napomena: Ovaj rad je deo istraživanja na Projektu 16018 koji finansira Ministarstvo za nauku Republike Srbije.

9 LITERATURA

[1] American Concrete Institute (ACI), Committee 440: ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2008.

[2] American Concrete Institute (ACI), Committee 440: ACI 440R-96 State of the Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.

[3] American Concrete Institute (ACI), Committee 440: ACI 440.4R-04 Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons, pp. 35.

[4] American Concrete Institute (ACI), Committee 365: ACI 365.1R-42 Service-Life Prediction-State of the Art report, 2000.

[5] Bastidas-Arteaga, E. Et al.: Coupled reliability model of biodeterioration, chlorade ingress and cracking for RC structures, Structural safety 30 (2008), pp. 110-129

[6] Concrete Society (CSC), Technical Report No.55: Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials, 2004

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

[8] FIB: Management, maintenance and strengthening of concrete structures, April 2002.

[9] FIB: Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures (Task Group 5.1), March 2003.

[10] Folić R., Glavardanov D.: Damage, inspection, monitoring and maintenance of structures strengthened with FRP materials, Proc. Int. Conference VSU` 08, Sofia, May, 2008.

[11] Folić R., Glavardanov D.: Pojačavanje betonskih konstrukcija prednaprezanjem FRP kablovima, Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja, Zlatibor, 2007., str. 47-52.

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

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

[14] Glavardanov D., Folić R.: Pojačavanje betonskih konstrukcija FRP elementima NSM sistemom, Materijali i konstrukcije 4, 2007., str. 29-35.
[15] Glavardanov D., Folić R.: Failure modes and detailing of RC elements in flexure strenghtened with FRP composites, Jubilee Scientific Conference of UACEG, Sofia, May, 2007.
[16] Gulvanessian, H., et al.: Designers' Guide to EN 1990, T. Telford, London, 2002.
[17] Halliwell S.: Fibre reinforced polymers in construction: durability; BRE- Information paper IP10/03; September 2003
[18] Halliwell S., Suttie E.: Repair and maintenance of FRP structures; BRE- Good repair guide GRG34; October 2003
[19] Halliwell S., Reynolds, T.: FRP in construction: Long-term performaance in service, BRE Centre for Composites in Construction, 2003.
[20] Kindij A., Sorić Z.: Kabeli i trake od složenih materijala za prednaprezanje, Građevinar, 2007.
[21] Oehlers, D. J.: Plates Adhesively Bonded to Reinforced Concrete Beams: Generic Debonding Mechanisms, Advances in Structural Engineering Vol. 9, No. 6, 2006., pp. 737-750.
[22] Oehlers, D. J., Rashid,R., Serciano, R.: IC debonding reistance of groups of FRP NSM strips in RC beams, Construction and Building Materials, 22 (2008), pp. 1547-1582.
[23] Szabo Z. K., Balazs G. L.: Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures.

REZIME

MEHANIZAMI OŠTEĆENJA, MODELI ODRŽAVANJA I SANACIJA BETONSKIH KONSTRUKCIJA POJAČANIH FRP ELEMENTIMA

Radomir FOLIĆ
Dragana GLAVARDANOV

Pojačavanje armiranobetonskih (AB) preseka polimernim materijalima ojačanih vlaknima (FRP materijalima) se izvodi lepljenjem elemenata na spoljašnju površinu betonskog preseka ili ugradnjom FRP šipki u zaštitni sloj betona (tzv. NSM sistem). Primenjuje se i prednaprezanje FRP kablovima. Efikasno pojačanje uslovljava sprečavanje mehanizma loma u fazi eksploatacije. Zbog toga je važno poznavanje mehanizama loma i načina kako izbeći njihovu pojavu. To se postiže pravilnim sidrenjem FRP elemenata i oblikovanjem detalja. U radu su klasifikovani mehanizmi loma i date preporuke da bi se izbegla njihova pojava kod AB elemenata pojačanih na pomenute načine (lepljenjem, NSM i prednaprezanjem). Za obezbeđenje adekvatne trajnosti, tj. produženje eksploatacionog perioda pojačanih elemenata, od posebnog značaja je izbor adekvatnog modela njihovog održavanja. Zbog toga su analizirani načini praćenja ponašanja i modela održavanja ovih specifičnih konstrukcijskih elemenata.

Ključne reči: FRP, oštećenja, lepljenje, NSM sistem, prednaprezanje, monitoring, održavanje, popravke

SUMMARY

DAMAGE MECHANISMS, MAINTENANCE & REPAIR MODELS OF CONCRETE STRUCTURES STRENGTHENED WITH FRP ELEMENTS

Radomir FOLIĆ
Dragana GLAVARDANOV

Strengthening of reinforced concrete (RC) sections using polymer materials strengthened with fibers (FRP) is executed by gluing (bonding) elements on the exterior surface of the concrete section or by building in FRP bars in the protective concrete layer (the so-called NSM system). Prestressing with FRP cables is also used. Efficient strengthening conditions the preventing of damage mechanism in the phase of operation (service). Therefore, it is important to know the damage mechanisms and the way how to avoid their occurrence. This is achieved by proper anchoring of FRP elements and detailing. The paper presents a classification of damage mechanisms and gives recommendations to avoid their occurrence in strengthened RC elements in the mentioned ways (gluing, NSM, and prestressing). To provide adequate durability, i.e. prolonging (extended) service life of strengthened elements, choice of appropriate maintenance model is very important. Therefore, means of monitoring and modeling maintenance of these specific structural elements have been analysed.

Key words: FRP, damage, bonded, NSM system, prestressed, monitoring, maintenance, repair works