

Primljen / Received: 13.7.2019.

Ispravljen / Corrected: 15.1.2020.

Prihvaćen / Accepted: 8.5.2020.

Dostupno online / Available online: 10.5.2021.

Eksperimentalno istraživanje vanjskih armiranobetonskih spojeva greda-stup ojačanih hibridnim FRP lamelama

Autori:

Mr.sc. **Sumathi Marimuthu**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Anna, Tamilnadu, Indija

Građevinski fakultet

sumathimarimuthu20@gmail.com

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Greeshma Sivasankara Pillai**

Sveučilište Anna, Tamilnadu, Indija

Građevinski fakultet

greeshmasspillai@yahoo.co.in

Prethodno priopćenje

Sumathi Marimuthu, Greeshma Sivasankara Pillai

Eksperimentalno istraživanje vanjskih armiranobetonskih spojeva greda-stup ojačanih hibridnim FRP lamelama

U ovom je radu prikazano eksperimentalno i teoretsko istraživanje armiranobetonskih vanjskih spojeva greda-stup pojačanih hibridnim vlaknima-armiranim polimerom (HFRP). Utjecaj povratnog oštećenja do kojeg dolazi u području spoja zbog seizmičkih sila definiran je eksperimentalno nanošenjem reverzibilnog cikličnog opterećenja na vrh grede. U okviru teoretske analize određena je posmična čvrstoća pojačanih spojeva te je utvrđena zadovoljavajuća podudarnost s eksperimentalnim rezultatima. Stoga predloženi fizikalni model pruža vrijedne spoznaje o čvrstoći spojeva.

Ključne riječi:

vanjski spoj greda-stup, hibridni polimer ojačan vlaknima (HFRP) laminat, polimer ojačan staklenim vlaknima

Research Paper

Sumathi Marimuthu, Greeshma Sivasankara Pillai

Experimental investigation of exterior reinforced concrete beam - column joints strengthened with hybrid FRP laminates

In the present study, an experimental and theoretical investigation is carried out on the reinforced concrete exterior beam-column joints strengthened with the hybrid fibre reinforced polymer (HFRP). The effect of reversible distress that develops in the joint region due to seismic force is determined experimentally by applying reverse cyclic loading on the tip of the beam. In theoretical analysis, the shear strength of strengthened joints was determined, and satisfactory correlations with experimental results were established. Hence, the proposed physical model provides valuable insight into the strength behaviour of the joints.

Key words:

exterior beam-column joint, hybrid fibre reinforced polymer (HFRP) lamination, glass fibre reinforced polymer

Vorherige Mitteilung

Sumathi Marimuthu, Greeshma Sivasankara Pillai

Experimentale Forschung von Außen-Stahlbetonbalkenverbindungen – Säule, welche mit den hybriden FRP-Lamellen verstärkt wurden

In dieser Arbeit wurde die experimentale und theoretische Forschung von Außen-Stahlbetonbalkenverbindungen – Säulen, welche mit den Hybridfasern – mit dem armierten Polymer (HFRP) verstärkt wurden – dargestellt. Der Einfluss der Rückbeschädigung, zu welcher es auf dem Gebiet der Verbindung wegen der seismischen Kräfte kommt, wurde experimentell definiert, und zwar durch die Übertragung der reversiblen zyklischen Belastung auf die Spitze des Balkens. Im Rahmen der theoretischen Analyse wurde die Schiebefestigkeit der verstärkten Verbindungen festgelegt, und es wurde die zufriedenstellende Übereinstimmung mit den experimentalen Ergebnissen festgestellt. Aus diesem Grund bietet das vorgeschlagene physikalische Modell die wertvollen Erkenntnisse über die Festigkeit von Verbindungen.

Schlüsselwörter:

Außenbalkenverbindung-Säule, Hybrid-Polymer, welches mit den Fasern (HFRP) verstärkt wurde – Laminat, Polymer, welches mit den Glasfasern verstärkt wurde

1. Uvod

Starije građevine uglavnom su projektirane i građene s naglaskom na gravitacijsko opterećenje. Kod armiranobetonskih okvirnih konstrukcija, najkritičnija komponenta je vanjski spoj između grede i stupa jer je on osjetljiv na drastične promjene vanjskih uvjeta. Mnogi stručnjaci istražuju ponajprije potrese kako bi stekli nova znanja o uzrocima i razlozima popuštanja u spoju između grede i stupa.

Kaushik i Jain [1] i Saatcioglu i dr. [2] uočili su istražujući potres na Sumatri (2004.) da je do oštećenja armiranobetonskih konstrukcija dolazilo zbog neodgovarajućeg seizmičkog projektiranja i loše razrade kritičnih detalja. Tijekom potresa Bhuj (2001.) utvrđeno je da su velika oštećenja vanjskih spojeva između greda i stupova nastala zbog nestabilnosti stupova uzrokovana lošom organizacijom i korištenjem nedostatnih uzdužnih i posmičnih ojačanja. Dva osnovna oblika otkazivanja na razini spojeva su: posmično otkazivanje spojeva i otkazivanje u sidrenom području (Ghobarah i Said [3]).

Na temelju analize prijašnjih potresa može se uočiti da su u armiranim okvirnim konstrukcijama spojevi između grede i stupa ključne zone za djelotvorno prenošenje opterećenja između segmenata konstrukcije (tj. greda i stupova). Ako se gradnja bazira na gravitacijskom opterećenju, kontrola spojeva tijekom projektiranja ne smatra se potrebnom jer oni nisu kritični segmenti. Do otkazivanja armiranih okvirnih konstrukcija dolazi zbog velikih naprezanja uzrokovanih posmikom u spoju što rezultira otkazivanjem građevine.

Jedan od postupaka koji se primjenjuje u obnovi građevina oštećenih u potresu jest njihova sanacija i ojačanje. Prijašnja su istraživanja pokazala da se polimer ojačan vlaknima (FRP) može uspješno koristiti za obnovu tj. poboljšanje vanjskih, unutarnjih i kutnih spojeva greda i stupova i to zbog jednostavne primjene, niskih troškova, izrazite otpornosti na koroziju, niske jedinične težine, visokog omjera vlačne čvrstoće i krutosti te izvrsnih karakteristika u pogledu zamora Ozcan i dr. [4]. Antonopoulos i Triantafyllou [5] naglašavaju da prisutnost poprečne grede u velikoj mjeri utječe kako će djelovati FRP na spojeve greda i stupova. Attari i dr. [6] analizirali su utjecaj vanjskog ojačanja spojeva grede i stupa i u tom su smislu koristili različite vrste kompozita ojačanih vlaknima. Posmična čvrstoća i duktilnost mogu se poboljšati primjenom odgovarajuće kombinacije polimera ojačanih ugljičnim i staklenim vlaknima. Vanjsko spajanje FRP obloge s epoksidnom smolom jednostavan je postupak sanacije i poboljšanja spojeva armiranobetonskih stupova i greda pogođenih seizmičkim djelovanjem Engindeniz i dr. [7]. Mosallam i Banerjee [8], Parvin i Granata [9], Said i Nehdi [10], Mukherjee i Joshi [11] te Parvin i Wu [12], uočili su da se ojačanjem spojeva može poboljšati moment, duktilnost, početna krutost i sposobnost disipacije energije, te da se takvim ojačanjem mogu smanjiti rotacije i naprezanja spojeva

kako u betonu tako i u armaturi. Mahini i Ronagh [13] ispitali su sedam uzoraka u umanjenom mjerilu vanjskih spojeva od običnog betona i armiranog betona ojačanog FRP-om tipičnog uobičajenog okvira otpornog na moment. Uzorci su ispitani nanošenjem monotonog/cikličnog opterećenja. Rezultati njihovih ispitivanja pokazuju da ta metoda omogućuje i povećanje čvrstoće čitavog sustava. Zou i dr. [14] analizirali su trokatnu okvirnu konstrukciju ojačanu obavijanjem FRP-a oko stupova. Nakon takvog ojačanja uočeno je tek manje povećanje krutosti. Malo povećanje krutosti pridonosi općoj stabilnosti okvira jer krući stupovi preuzimaju jače seizmičke sile. Osim toga, način sloma okvira prebačen je s mehanizma bočnog njihanja stupa na prihvatljivu razinu katne deformacije s karakteristikama slabe grede i jakog stupa. Mahini i Ronagh [15] i Niroomandi i dr. [16] analizirali su graničnu čvrstoću običnih spojeva ojačanih FRP-om i dobivene su rezultate usporedili s onima za okvir ojačan čeličnim poduporama. Konačni rezultati pokazuju da se AB okvir ojačan FRP-om ponaša bolje od okvira ojačanog čeličnim poduporama.

Ghobarah [17], Priestley i dr. [18], Fave i Kim [19], Park i Mosalam [20] te Masi i dr. [21] analizirali su modele teoretskog kapaciteta nosivosti kako bi predvidjeli nosivost spojeva grede i stupa te utvrdili slijed popuštanja podsklopova. Ispitana je i pouzdanost modela kapaciteta definiranjem teoretskog i eksperimentalnog posmika na razini spojeva.

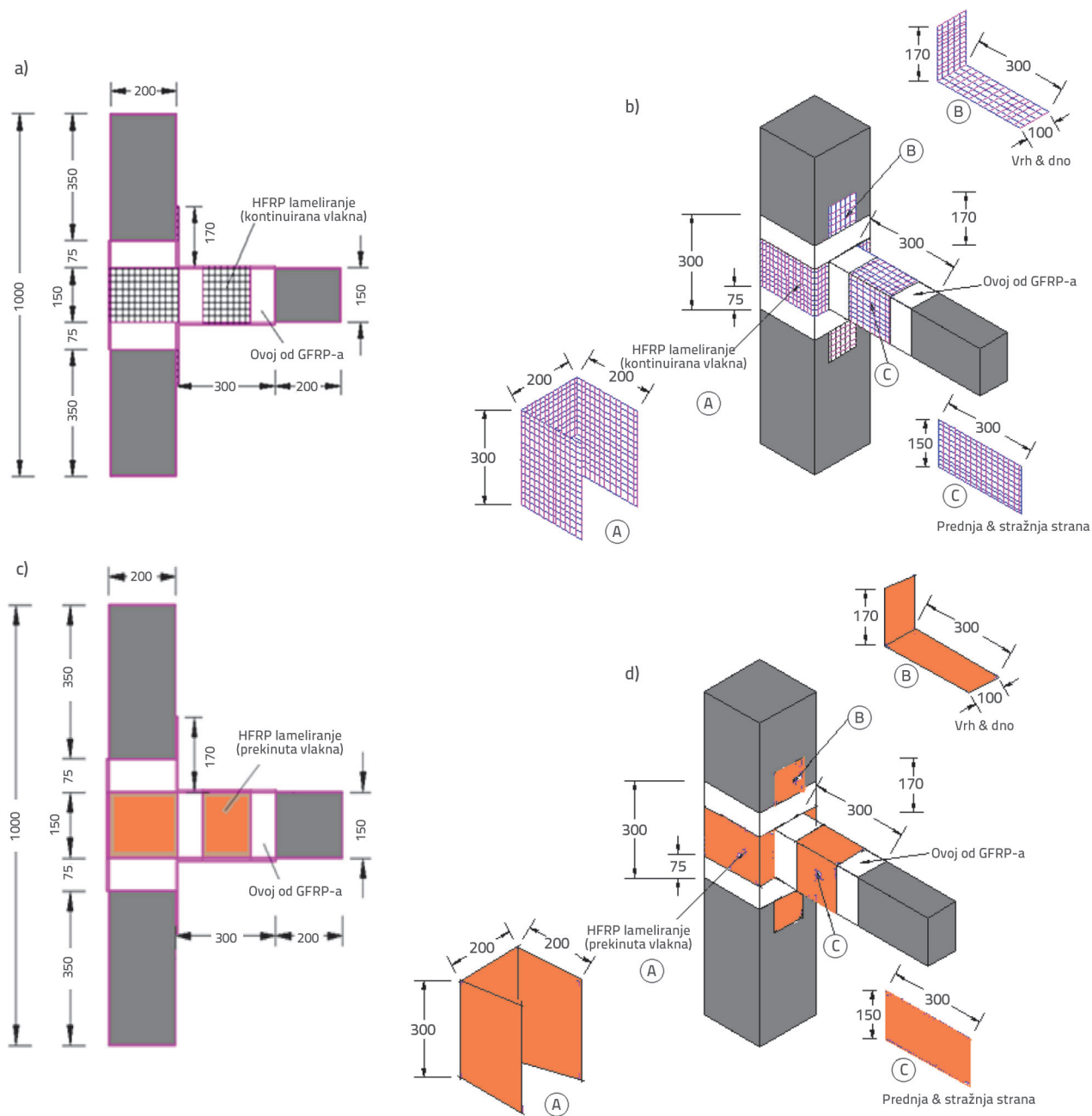
Nakon opsežno analizirane literature, pokazala se potreba za provođenjem eksperimentalnog ispitivanja nanošenjem reverzibilnog cikličnog opterećenja na spoj grede i stupa ojačanog odgovarajućim postupcima sanacije i ugradnjom lamela. Također je provedena i usporedba posmične čvrstoće vanjskih spojeva armiranobetonskih greda i stupova prije i nakon sanacije/ojačanja.

Ispitivanje prikazano u ovom radu ograničeno je na preliminarna eksperimentalna istraživanja u okviru kojih se uspoređuje ponašanje vanjskih spojeva grede i stupa ojačanih hibridnim FRP-om s kontinuiranim i prekinutim vlaknima banane.

U ovom se radu predlaže metoda ojačanja kojom se izbjegava posmično otkazivanje spoja, tj. prednost se daje savojnim karakteristikama spoja grede.

2. Značaj istraživanja

Metode koje uključuju primjenu HFRP laminata (s kontinuiranim i prekinutim vlaknima banane) i obavijanje GFRP polimerom smatraju se učinkovitim i ekonomičnim postupcima sanacije koji omogućuju poboljšanje seizmičke otpornosti vanjskog spoja između grede i stupa. U eksperimentalnoj provjeri koja se prikazuje u ovom radu prije svega se analizira odnos opterećenja i pomaka, granično opterećenje, histerezna petlja opterećenja i pomaka, kumulativno disipiranje energije, krutost i duktilnost. Teoretska provjera provodi se analiziranjem horizontalne posmične sile i posmične čvrstoće na razini spojeva.



Slika 3. Ojačanje s HFRP lamelama i GFRP ovijanjem spojeva grede i stupa: a) Pogled sprijeda (S2ARF); b) Aksonometrija (S2ARF); c) Pogled sprijeda (S3ARF); d) Aksonometrija (S3ARF), sve dimenzije na slici u [mm]

3.4. Eksperimentalno istraživanje

3.4.1. Karakteristike materijala

Beton i čelik

Korišten je obični portlandski cement (klase 53) koji udovoljava uvjetima iz norme IS 12269 [26]. Za izradu umanjenog modela korišten je riječni pijesak i drobljeni granit maksimalne veličine zrna od 10 mm. Za armaturu je korišten čelik klase Fe415. Betonska mješavina definirana je za umanjeni model; prosječna

tlačna čvrstoća kocke (f_{ck}) iznosila je 39 N/mm² nakon 28 dana. Modul elastičnosti definiran je određivanjem krivulje naprezanja - deformacije za beton, pri čemu je usvojen sekantni modul modela ($E_c = 29,7$ GPa).

Materijali korišteni u sanaciji

Sanacija vanjskog spoja grede i stupa provedena je odstranjivanjem i zamjenom betona na mjestu oštećenih spojeva. Tijekom sanacije posebno se pazilo na to da se osiguraju dobre veze između novog i postojećeg betona. Oštećeni

Tablica 2. Mehanička svojstva laminata za učvršćenje

Sustav učvršćenja	Vrsta vlakana	Vlačna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Granična deformacija [%]	Debljina [mm]
Prvi sustav	kontinuirani oblik	67	12,5	6	4
Drugi sustav	prekinuti oblik	58,5	13,13	5	4

dijelovi zamijenjeni su novim betonom. Čvrstoća mješavine koja je korištena u sanaciji spoja trebala je odgovarati čvrstoći postojećeg betona (39 MPa). Maksimalna veličina agregata korištenog u izradi zamjenskog betona bila je manja od 10 mm. Težinski omjer sastojaka mješavine iznosio je 1:1,51:2,53, a vodocementni faktor 0,45. Sitnozrnatni agregat djelomično je zamijenjen čeličanskom zgurom (20 %), a elastomerski materijal SBR (stiren-butadien guma) dodan je u volumenskom omjeru (20 %) koji omogućuje poboljšanje veze s cementnom kašom. Korišten je i superplastifikator za redukciju vode (1 %) kako bi se postigla tražena razina obradivosti. Kao vezni sloj između postojećeg betona i novog betona upotrijebljena je epoksidna smola (3:1) koja je također omogućila potpunu ispunu većih vidljivih pukotina epoksidnom smolom.

Laminat od hibridnog polimera ojačanog vlaknima (HFRP)

U ovom su istraživanju primijenjene dvije vrste sustava ojačanja pomoću HFRP lamela. Prvi se sustav sastojao od kontinuiranih (dvosmjernih) vlakana banane sa staklenim vlaknima (dvosmjerna, 610 g/m²). Drugi se sustav sastojao od vlakana banane u prekinutom obliku (dužine 12 mm, promjera 100-125 mikrona). Vlakna su služila kao armatura, a epoksidna smola kao matrica. Kao postupak izrade usvojena je metoda prijenosa smole. U oba lamelna sustava upotrebljava se mješavina tekuće smole koja se sastoji od epoksidne smole (Araldite LY 556) i učvršćivača (HY 951) u težinskom omjeru od 10:1. U prvom sustavu (kontinuirani oblik) hibridno ojačanje zastupljeno je sa 60 % a matrica s 40 % u ukupnom volumenu, dok u drugom sustavu (prekinuti oblik vlakana) hibridno ojačanje sudjeluje u ukupnom volumenu s 48 %, a udio matrice je 52 %. Detaljne karakteristike tih dviju vrsta HFRP lamela i epoksidne smole prikazane su u tablici 2.

Polimer ojačan staklenim vlaknima (GFRP)

Za ojačanje dvaju uzoraka (S2ARF i S3ARF) GFRP ovojem, debljina mora biti barem 35 % veća od debljine segmenta kako bi se izbjeglo pucanje, prema [27]. Za obavljanja obaju uzoraka korišteno je osam GFRP slojeva (ukupne debljine 1 mm). Vrijednosti vlačne čvrstoće, modula elastičnosti i granične deformacije redom iznose 81 MPa, 20 GPa i 4 %.

Adhezivno sredstvo

Kao sredstvo za ostvarivanje veze između laminata i betona korišten je Sikadur 330 debljine 2 mm. Smola i učvršćivač pomiješani su u težinskom omjeru 3 : 1. Ravnomjerna srednje siva boja upućuje na dobru pomiješanost bijele smole i crnog

učvršćivača, pri čem se silicij koristi kao punilo. Uzorci su njegovani sedam dana prije ispitivanja. Prosječna čvrstoća i modul iznosili su 28,4 MPa tj. 8,6 GPa.

3.4.2. Postupak sanacije

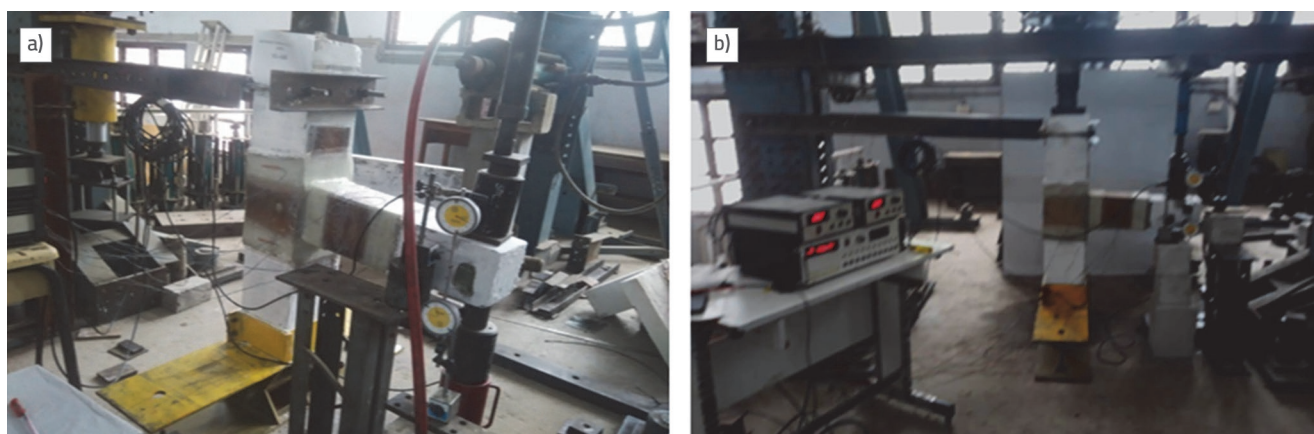
Izuzetno je značajno dobro pripremiti kontaktne površine prije povezivanja lamela s betonom. Oštećena površina betona tretira se pjeskarenjem korundom granulacije 180 koji se nanosi pod prosječnim tlakom od 207 kPa (30 psi) pomoću stroja za tlačno recirkuliranje, a nakon toga se površina čisti čistim zrakom kako bi se odstranila prašina. Adhezijski premaz nanosi se na obje površine kako bi se spriječilo stvaranje mjehurića zraka tijekom širenja sredstva s jedne površine na drugu. Ballotini (staklene kuglice) korištene su kako bi se dobila potrebna debljina ljepila od 2 mm. Utezima se postiže odgovarajući tlak za dobro povezivanje materijala, tj. tako se opterećenje ravnomjerno raspoređuje po površini svake lamele, kako je to prikazano na slici 4.

3.4.3. Način ispitivanja

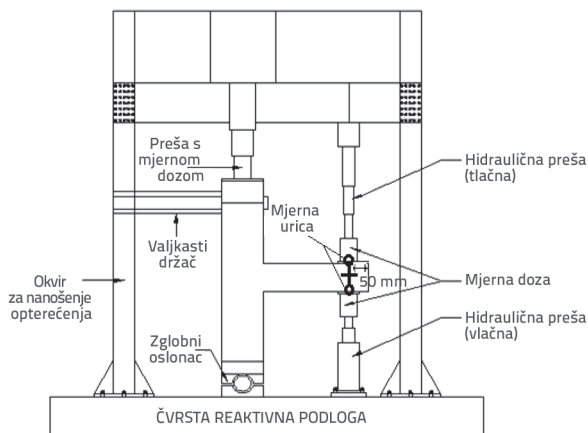
Uzorci vanjskog spoja grede i stupa (u mjerilu 1:3) ispitani su na prikladan način tj. u uređaju za nanošenje opterećenja kapaciteta 200 tona, u Laboratoriju za dinamiku konstrukcija Odjela za konstruktorstvo na Sveučilištu Anna u Chennaiju (Indija). Kako bi se omogućila pobuda modela, na dnu stupa postavljen je zglobni oslonac, a na vrhu stupa valjkasti oslonac. Deset posto konstantnog osnovog naprezanja (5 tona) nanoseno je na vrh stupa jer je tako omogućeno rasterećivanje spoja tijekom cikličnog opterećivanja. Kod svih je uzoraka održavana konstantna razina opterećenja tijekom čitavog postupka opterećivanja. Donji čelični oslonac pravilno je spojen s čvrstom reaktivnom podlogom. Za bilježenje opterećenja i pomaka uzoraka korištene su mjerne doze i urice. Pomoću dviju desettonskih hidrauličnih preša nanosilo se reverzibilno ciklično opterećenje na vrh i dno greda. U modelu je usvojen postupak kontrole pomaka. Prema rasporedu opterećenja, to se nanosilo u serijama od po tri ciklusa s povećanjem razine pomaka. Mjerne urice i doze postavljene su 50 mm od vrha grede. Mjernom uricom je provjeravano nanosi li se opterećenje nanosi u skladu sa zadanim rasporedom opterećenja. Vrijednosti opterećenja unošene su pomoću doza za nanošenje opterećenja (potisak i povlačenje). Na postavu pokusa prikazanom na slici 5. može se uočiti: a) postava u laboratoriju - uzorak S2ARF i b) postava u laboratoriju - uzorak S3ARF. Pozicija uređaja za praćenje prikazana je na slici 6.



Slika 4. Stanje prije i nakon sanacije uzorka: a) Prije sanacije (ravnanje površine (lijevo) i ljepilo (desno)); b) Nakon sanacije (sanacija uzorka S2ARF (lijevo) i sanacija uzorka S3ARF (desno))

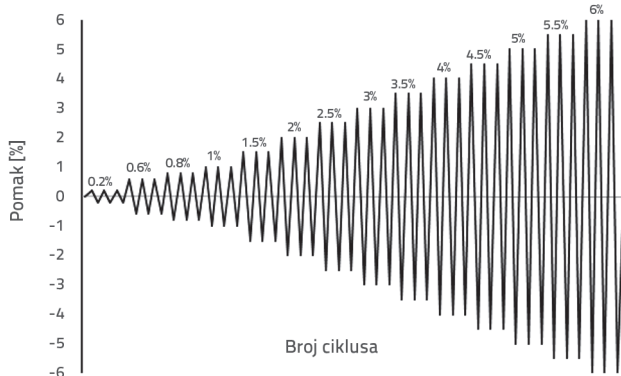


Slika 5. Postava pokusa u laboratoriju: a) uzorak S2ARF; b) uzorak S3ARF



Slika 6. Shematski prikaz postave pokusa

Tipičan raspored opterećenja korišten za sve uzorke prikazan je na slici 7., prema [28].



Slika 7. Protokol opterećenja

4. Eksperimentalni rezultati i rasprava

U ovom su poglavlju opisani rezultati dobiveni prije i nakon sanacije/poboljšanja.

4.1. Granično opterećenje

Granično opterećenje izmjereno za potiskivanje i povlačenje na uzorcima ispitanim prije i nakon sanacije, prikazano je u tablici 3.

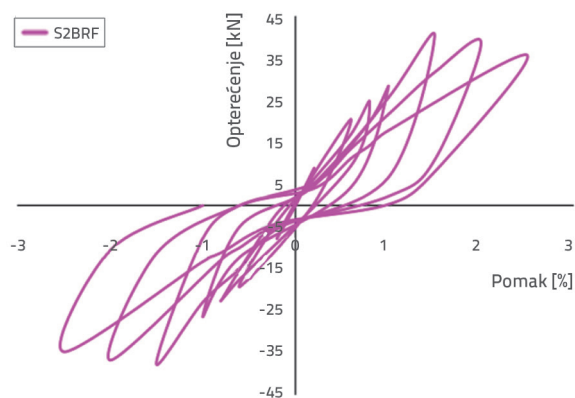
Tablica 3. Usporedba graničnih nosivosti

Uzorci	Granično opterećenje [kN]		
	Potisno	Izvlačno	Prosjeak
S2BRF	40	38	39
S2ARF	63,11	62	62,56
S3BRF	40,45	37,6	39,03
S3ARF	66,75	64	65,38

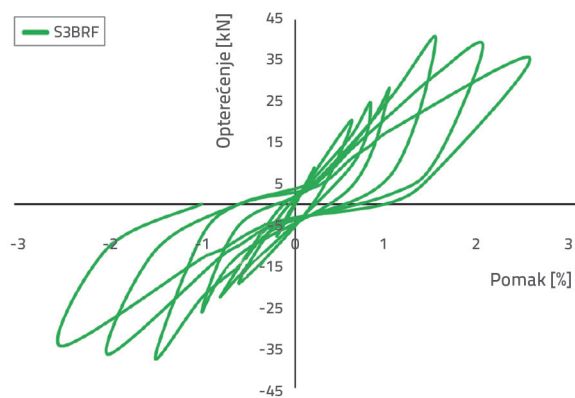
Maksimalno granično opterećenje registrirano je na uzorku S3ARF. Granično opterećenje zabilježeno na tom uzorku bilo je za 67,5 % veće od odgovarajućeg opterećenja zabilježenog na uzorku S3BRF. Osim toga, granično opterećenje zabilježeno na uzorku S3ARF bilo je za 4,5 % veće od odgovarajućeg opterećenja zabilježenog na uzorku S2ARF.

4.2. Histerezne petlje opterećenje - pomak

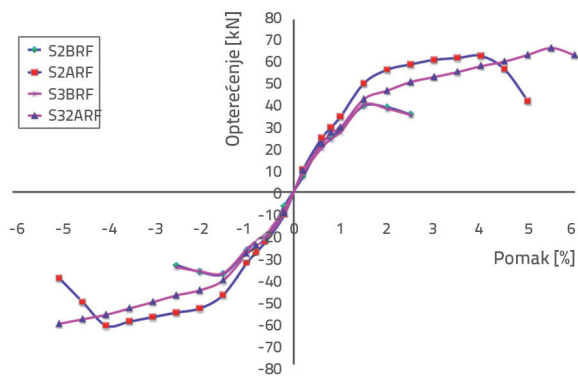
Histerezna petlja opterećenja i pomaka prikazana je na slikama 8. i 9. za oba sustava lameliranja. U histereznim petljama se u obzir uzima i učinak suženja zbog proklizavanja iz sidrenog dijela, te zbog posmičnog pomaka. Kod saniranih uzoraka, površina histereznih krivulja postupno je rasla s povećanjem ciklusa pomaka, pri čemu je zabilježeno da uzorak S2ARF ima bolju sposobnost raspršivanja energije od uzorka S3ARF. Krivulja odnosa opterećenja i pomaka prikazana je na slici 10.



Slika 8. Histerezna petlja opterećenja i pomaka za nesanirani uzorak (S2BRF)



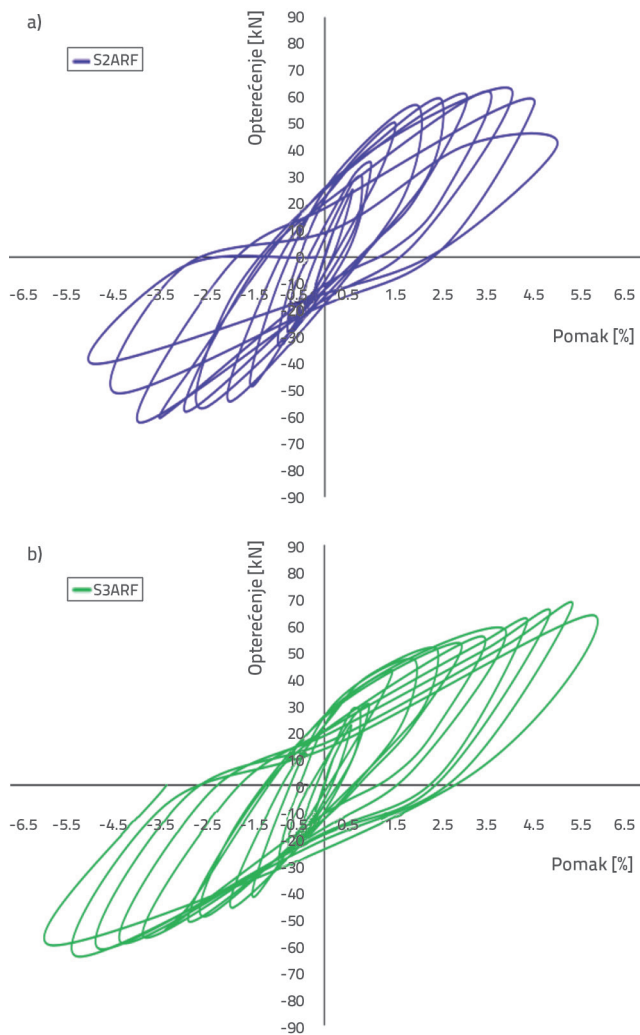
Slika 9. Histerezna petlja opterećenja i pomaka za nesanirani uzorak (S3BRF)



Slika 10. Krivulje odnosa opterećenja i pomaka

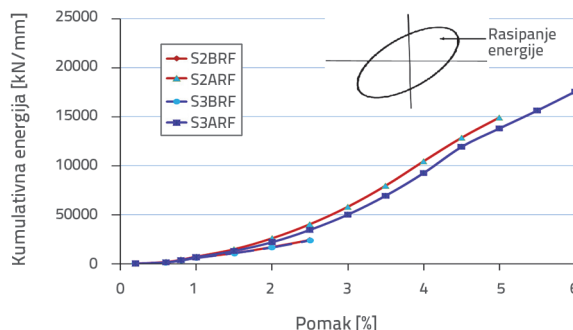
4.3. Disipacija energije

Sposobnost disipacije energije značajan je kriterij za ocjenjivanje učinkovitosti komponenata u slučaju seizmičkog opterećenja. Ta ocjena uglavnom ovisi o brzini smanjenja krutosti i čvrstoće u svakom ciklusu tijekom histereznog odziva.



Slika 11. Histerezna krivulja opterećenja - pomaka za sanirani uzorak

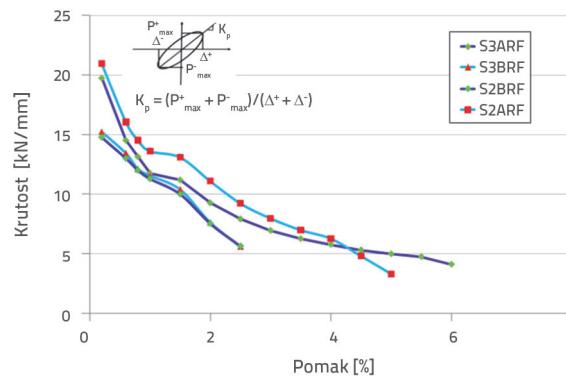
Kumulativna disipacija energije zabilježena je ispitivanjem uzoraka prikazanih na slici 11. Ustanovljeno je da je disipacija energije kod uzoraka S2ARF i S3ARF za 68,3 % tj. 44,4 % veća u odnosu na uzorke S2BRF i S3BRF pri katnom pomaku od 2,5 % (slika 12.). Pri višim vrijednostima katnog pomaka, veća disipacija energije zabilježena je kod uzoraka na koje su nanosena veća posmična naprezanja na spoju. Povećanje posmičnog naprezanja na spoju dovelo je do većeg oštećenja spoja, što je rezultiralo većom disipacijom energije.



Slika 12. Kumulativni prikaz disipacije energije

4.4. Smanjenje krutosti

Krutost spojeva greda i stupova procjenjuje se pomoću nagiba linije od vrha do vrha za svaku petlju i za svaki katni pomak (ACI 318 [29]). Konstrukcija ima veću duktilnost zbog niže razine oštećenja. Pri katnom pomaku od 2,5 %, krutost ojačanih uzoraka S2ARF za 63,3 % je veća od krutosti uzoraka S2BRF, kao što se to vidi na slici 13.



Slika 13. Krivulja krutosti

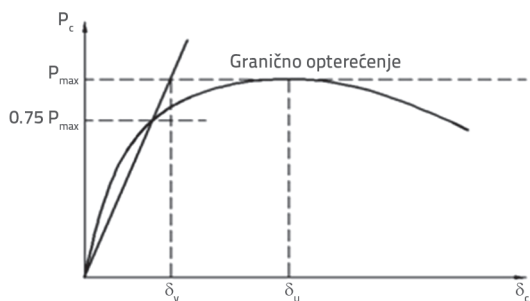
Krutost konstrukcije predstavlja njenu otpornost na deformacije, a ojačani uzorci S2ARF imaju veću krutost od uzoraka S3ARF, kao što se to vidi iz tablice 4. i slike 14.

Tablica 4. Usporedba sekantnih krutosti

Uzorci	Pomak pri popuštanju [mm]		Sekantna krutost [kN/mm]		Sekantna krutost [kN/mm]
	Potisno δ_y^*	Izvlačno δ_y	Potisno	Izvlačno	
S2BRF	1,6	1,47	8,78	8,6	17,38
S2ARF	2,5	2,3	9,26	9,2	18,46
S3BRF	1,6	1,47	8,78	8,6	17,38
S3ARF	3,0	2,78	8,9	9,2	18,1

Tablica 5. Usporedba vrijednosti duktilnosti pomaka

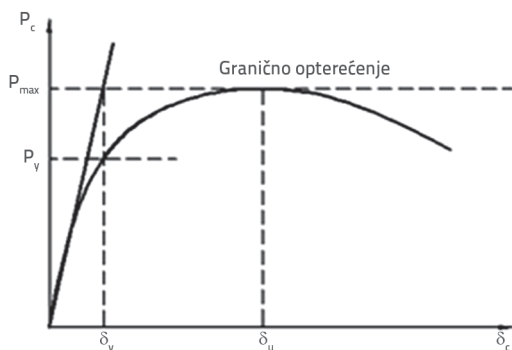
Uzorci	Pomak pri popuštanju [mm]			Granični pomak [mm]			Faktor duktilnosti
	Potisno	Izvlačno	Prosjeak	Potisno	Izvlačno	Prosjeak	
S2BRF	4,73	4,53	4,63	7,5	7,5	7,5	1,619
S2ARF	6,93	6,81	6,87	20,1	19,93	20,01	2,91
S3BRF	4,65	4,38	4,52	7,5	7,5	7,5	1,66
S3ARF	10,06	9,65	9,86	27,5	27,5	27,5	2,789



Slika 14. Sekantna krutost

4.5. Duktilnost

Duktilnost pomaka definira se kao odnos graničnog pomaka (δ_u) i pomaka pri popuštanju (δ_y). Vrijednosti opterećenja pri popuštanju (P_y) i δ_y određuju se prema slici 15.



Slika 15. Duktilnost pomaka

Vrijednosti P_{max} i δ_u predstavljaju vršno opterećenje i odgovarajući pomak na krivulji odnosa opterećenja i pomaka. Duktilnost pomaka uzoraka pokazuje da se sanirani uzorci ponašaju duktilno u oba sustava. Poboljšanje duktilnosti pomaka uzorka S2ARF bilo je za 79,74 % veće u odnosu na uzorak S2BRF. Kod uzorka

S3ARF postotak povećanja iznosio je samo 68 %, kao što se to vidi iz tablice 5. Pomak pri popuštanju izračunava se izradom krivulje odnosa opterećenja i pomaka iz histereznih petlji, a na temelju modela ekvivalentnog elastoplastičnog popuštanja. Granični se pomak izračunava kao točka maksimalne sile koju uzorak može podnijeti na temelju vršnog opterećenja, [30].

4.6. Popuštanje uzoraka

Uzorci S2BRF i S2ARF

Kod uzorka S2BRF pukotina se u trećem ciklusu opterećenja počela širiti od čela stupa prema gredi (0,8 % pomaka prema dolje). U četvrtom i petom ciklusu opterećenja (1 % i 1,5 % pomaka), uočeno je formiranje serije savojnih i savojno-posmičnih pukotina po dužini grede. Te su se pukotine dodatno proširile u šestom i sedmom ciklusu opterećenja (2 % i 2,5 % pomaka) (slika 16.).



Slika 16. Raspored pukotina (uzorak S2BRF)

Na uzorku S2ARF pukotine su se pojavile tek tijekom četvrtog ciklusa opterećenja (1 % pomaka), a njihovo je širenje uočeno u

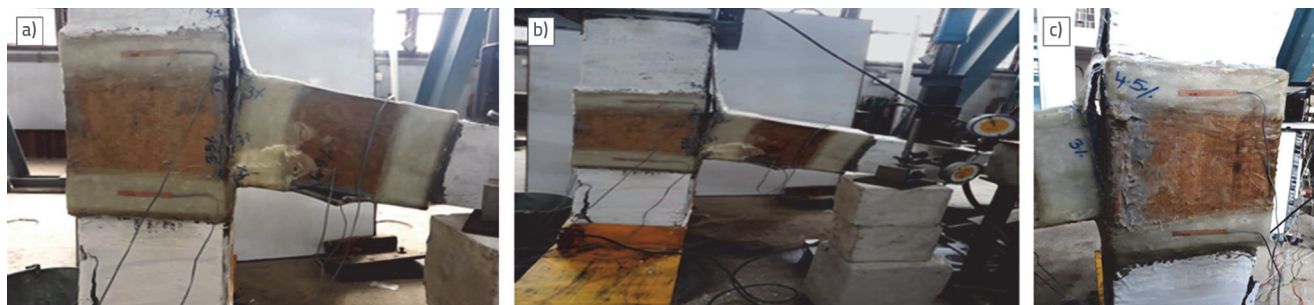
petom ciklusu opterećenja (1,5 % pomaka). Osim toga, posmične pukotine otvorile su se na vrhu grede, tj. daleko od saniranog područja. U tom području nije zabilježen dodatni razvoj pukotina. Pri postupnom povećanju pomaka, tek je u osmom ciklusu opterećenja (3 % pomaka) zabilježena pojava pukotina, popuštanja veze i odvajanja slojeva. Znakovi prekidanja uočeni su na vrhu ovoja stupa na spoju grede i stupa, i to u devetom ciklusu opterećenja (3,5 % pomaka). Širenje prekida, te ljuštenje ovoja stupa, zabilježeno je na rubu bližem gredi tijekom desetog ciklusa opterećenja (4 % pomaka). Osim toga, početno popuštanje veze zabilježeno je na istom mjestu prekida pri pomaku od 4 %. U jedanaestom ciklusu opterećenja (4,5 % pomaka) zabilježeno je na istom mjestu potpuno popuštanje veze s jakim prekidanjem. Na uzorku je zabilježeno potpuno popuštanje spoja grede i stupa u dvanaestom ciklusu opterećenja (5 % pomaka) (slika 17.).



Slika 17. Raspored pukotina na uzorku S2ARF pri pomaku od 5 %



Slika 18. Raspored pukotina na uzorku S3BRF



Slika 19. Raspored pukotina na uzorku S3ARF: a) popuštanje pri 5 %; b) popuštanje pri 6 %; c) potpuno popuštanje pri 6 %

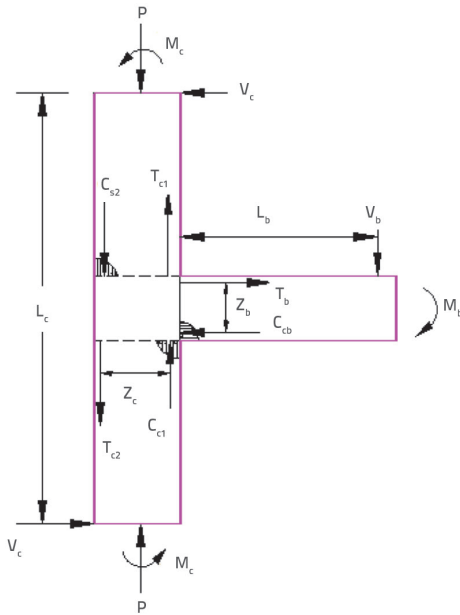
Uzorci S3BRF i S3ARF

Na uzorku S3BRF pukotina se pojavila na čelu stupa tijekom silaznog pomaka u trećem ciklusu (0,8 % pomaka) te se širila prema gredi u trećem ciklusu opterećenja (0,8 % pomaka). Savojne i savojno-posmične pukotine pojavile su se tijekom četvrtog i petog ciklusa opterećenja (1 % tj. 1,5 % pomaka). Pukotine su se proširile tijekom šestog i sedmog ciklusa opterećenja (2 % tj. 2,5 % pomaka), kao što se to vidi na slici 18.

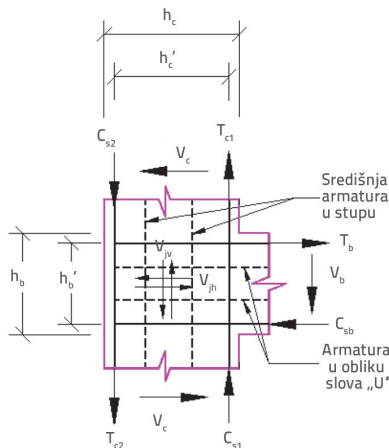
Na uzorku S3ARF nije bilo znakova pojave pukotine tijekom postupnog povećanja pomaka. Znakovi pucanja (prekida) uočeni su na vrhu ovoja stupa lociranog na spoju grede i stupa u osmom ciklusu opterećenja (3,0 % pomaka). Osim toga, širenje prekida odvijalo se usporedo s ljuštenjem ovoja stupa na rubu bližem gredi, a početno popuštanje veze zabilježeno je na spoju grede i stupa tijekom devetog ciklusa opterećenja (3,5 % pomaka). Dubinsko popuštanje veze uočeno je na spoju u desetom ciklusu opterećenja (4 % pomaka). U jedanaestom ciklusu opterećenja (4,5 % pomaka) uočeno je novo popuštanje veze u sredini donjeg dijela lameliranja, na dnu grede i na spoju grede i stupa. Popuštanje veze dodatno je uznapredovalo i lameliranje se još više odvojilo od površine betona. Potpuno popuštanje uzorka spoja grede i stupa zabilježeno je u četrnaestom ciklusu opterećenja (6 % pomaka), kao što se to vidi na slici 19.: a) popuštanje pri 5 %, b) popuštanje pri 6 % i c) potpuno popuštanje pri 6 %.

5. Teoretska analiza

Pri seizmičkom udaru, u okvirnim se konstrukcijama bilježi snažna posmična sila u području vanjskih spojeva. Neke interne sile generirane u betonu međusobno se povezuju i tako se razvija dijagonalna potpora. Mehanizam rešetke ovisi o djelotvornosti veze između betona i armature (armatura grede i stupa). Poprečna armatura u spoju zadržava betonsku dijagonalnu potporu u jezgri spoja i pridonosi povećanju čvrstoće spoja. Sile razvijene u predloženom spoju grede i stupa prikazane su na slici 20. Posmične sile na spoju, generirane vanjskim silama, prikazane su na slici 21.



Slika 20. Vanjske i unutarnje sile u gredi i stupu



Slika 21. Horizontalne i vertikalne posmične sile u spoju

Oznake na slikama 20. i 21. imaju sljedeća značenja:

- C_{cb}, C_{c1}, C_{c2} - tlačna sila u betonu grede i stupa,
- C_{sb}, C_{s1}, C_{s2} - tlačna sila u armaturi grede i stupa,
- h_b, L_b - visina presjeka i dužina elementa grede,
- h_c, L_c - visina presjeka i duljina elementa stupa,
- h_b', h_c' - krak sile u armaturi grede i stupa,
- M_b, M_c - moment u gredi i stupu,
- P - osno opterećenje,
- T_b, T_{c1}, T_{c2} - vlačna sila u armaturi grede i stupa,
- V_b i V_c - vertikalni i horizontalni posmik u gredi i stupu,
- V_{jv}, V_{jh} - vertikalni i horizontalni posmik u spoju,
- Z_b, Z_c - krak sile za gredu i stup.

5.1. Posmična sila na spoju

Maksimalna horizontalna posmična sila na spoju (V_{jh}) iz teoretske analize može se izračunati pomoću ravnoteže sile na

spoju neposredno prije popuštanja, kako je to prikazano u izrazu (1):

$$V_{jh} = T_b - V_c \quad (1)$$

$$T_b = \alpha A_s f_y \quad (2)$$

gdje je α - multiplikator naprezanja za uzdužnu armaturu na kontaktu između spoja i elementa.

$$T_b = \frac{M_b}{Z_b} = \frac{V_b - L_b}{Z_b} \quad (3)$$

Prema tome, vrijednost (V_b) iz teoretske analize može se odrediti prema izrazu (3).

Ravnoteža vanjskih sila iz koje se može izračunati vrijednost V_c (teoretska analiza) prikazana je u izrazu (4). Dodatna maksimalna horizontalna posmična sila iz teoretske analize (V_{jh}) dobiva se prema izrazu (1).

$$V_c = \frac{V_b(L_b + 0,5h_c)}{L_c} \quad (4)$$

Za sanirane uzorke hibridnog polimera HFRP, posmična sila na spoju ($V_{jh, retrofitted}$), koja odgovara maksimalnoj otpornosti grede na savijanje, može se izračunati tako da se pretpostavi da se vlačna sila u uzdužnoj armaturi grede (T_b) ne mijenja kod saniranih uzoraka, kao što je prikazano u izrazu (4).

Za izračunavanje maksimalne horizontalne posmične sile iz eksperimentalnog istraživanja (V_{jh}), vertikalna posmična sila grede (V_b) uzima se kao granično opterećenje eksperimenta, a horizontalna posmična sila (V_c) u stupu izračunava se prema izrazu (4). Vrijednost (V_{jh}) izračunava se prema izrazu (1). Isto tako, $V_{jh, retrofitted}$ izračunava se prema izrazu (5).

$$V_{jh, retrofitted} = T_b + T_{HFRP} - V_c \quad (5)$$

gdje je:

$$T_{HFRP} = \epsilon_f A_f E_f - \text{vlačna sila u hibridnom polimeru armiranom vlaknima}$$

ϵ_f - deformacija u hibridnom polimeru HFRP

A_f - površina presjeka hibridnog polimera HFRP

E_f - elastičnost hibridnog polimera HFRP.

5.2. Posmična sila u spoju

Projektirana granična otpornost spoja prije popuštanja (V_n) iz eksperimentalne i teoretske analize može se izračunati prema jednadžbi (6).

$$V_n = V_c + V_s, \text{ pri čemu je } V_s = 0,87f_v A_s \quad (6)$$

gdje je:

V_s - projektirana otpornost spoja na posmik

V_c - projektirana posmična čvrstoća betona u spoju

f_y - granično naprezanje armature
 A_s - površina presjeka armature.

Iako se kod saniranih spojeva ukupna posmična čvrstoća ($V_{n,retrofitted}$) sastoji od čvrstoće betona, otpornosti vezne armature i otpornosti kompozitnog laminata iskazuje se prema izrazu (7).

$$V_{n,retrofitted} = V_c + V_s + V_{HFRP} \quad (7)$$

$$V_{HFRP} = 0,9 \varepsilon_f E_f \rho_f A_j \quad (8)$$

gdje je:

- V_{HFRP} - projektirana posmična čvrstoća hibridnog polimera ojačanog vlaknima (HFRP) u spoju (Hadi i Tran [31])
- ρ_f - FRP koeficijent armiranja
- ε_{fe} - efektivna razina deformacije u armaturi polimera ojačanog vlaknima (FRP)
- E_f - modul elastičnosti polimera ojačanog vlaknima (FRP).

5.3. Upute za projektiranje

Navodi se izraz za povećanu savojnu čvrstoću presjeka (M_b), izračunanu prema ACI-ASCE Odbor 352 [32]

$$M_b = A_s \alpha f_y (d - a/2) \quad (9)$$

gdje je:

- d - udaljenost od najudaljenijega tlačnog vlakna do težišta vlačne armature
- b - širina betonske grede
- a - dubina ekvivalentnog pravokutnog tlačnog bloka
- α - multiplikator naprezanja za uzdužnu armaturu na kontaktu između spoja i elementa.

$$a = \frac{A_s \alpha f_y}{0,85 f_{ck} b} \quad (10)$$

Posmik u stupu (V_j) izračunava se na temelju nominalne savojne čvrstoće presjeka

$$V_c = \frac{M_b}{L_c} \quad (11)$$

gdje je L_c - visina stupa

Horizontalna posmična sila ($V_{jh,ACI}$) može se izračunati pomoću izraza (1).

Potrebno je udovoljiti zahtjevima ACI-440.2R-08 [33] glede nominalne savojne čvrstoće saniranog spoja (M_n), a prema sljedećim izrazima (12) do (16).

$$M_n = M_{ns} + \Psi_f M_{nf} \quad (12)$$

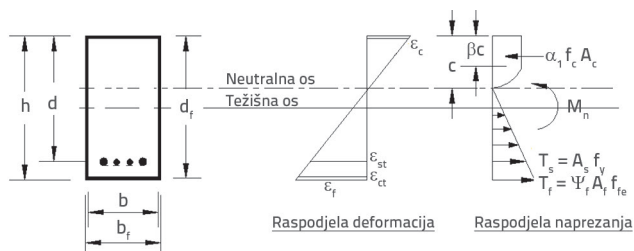
gdje je:

- M_{ns} - doprinos čelične armature nominalnoj savojnoj čvrstoći
- M_{nf} - doprinos pojačanja HFRP nominalnoj savojnoj čvrstoći

A_f - površina vanjskog pojačanja pomoću HFRP-a
 Ψ_f - faktor redukcije čvrstoće FRP-a (0,95).

Savojna čvrstoća grede izračunava se pomoću analize presjeka kako je to prikazano na slici 22. Oznake na slici 22. imaju ova značenja:

- β - odnos dubine ekvivalentnog bloka pravokutnog naprezanja i nelinearne raspodjele naprezanja
- c - udaljenost između najudaljenijega tlačnog vlakna i neutralne osi
- b_f - efektivna širina savojnog pojačanja pomoću FRP-a,
- $\varepsilon_c, \varepsilon_{sc}$ - razina efektivne tlačne deformacije u betonu i čeliku,
- $\varepsilon_{ct}, \varepsilon_{st}, \varepsilon_f$ - razina efektivne vlačne deformacije u betonu, čeliku i FRP-u.



Slika 22. Analiza presjeka grede ojačane FRP-om

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{\beta c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta c}{2} \right) \quad (13)$$

$$\beta = \frac{4 \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \varepsilon'_c - 2 \varepsilon_c} \quad (14)$$

gdje je $\varepsilon'_c = 1,7 f_c / E_c$ deformacija koja odgovara vrijednosti f_c , a E_c je modul elastičnosti betona.

$$c = \frac{A_s f_y + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta b} \quad (15)$$

gdje je α_1 multiplikator za f_c za određivanje intenziteta raspodjele ekvivalentnog pravokutnog naprezanja za beton, a f_{fe} efektivno naprezanje za razinu naprezanja FRP-a pri popuštanju presjeka.

$$\alpha_1 = \frac{3 \varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \beta \varepsilon_c'^2} \quad (16)$$

Maksimalna vlačna sila (T_n) koju može podnijeti horizontalni sloj FRP-a duž grede može se izračunati prema uputama:

$$T_n = \frac{M_n}{d_f} \quad (17)$$

gdje je d_f efektivna dubina savojnog ojačanja pomoću HFRP-a.

$$V_{jh,retrofitted} = T_b + T_n + V_c \quad (18)$$

Vrijednosti T_b i V_c mogu se odrediti prema izrazima (2) i (4).

Tablica 6. Eksperimentalna i teoretska ocjena sila u području spoja

Sustav	Uzorak	Vrijednost sile u zoni spoja [kN]							
		Eksperimentalna ocjena				Teoretska ocjena			
		V_{jh} [Izraz (1)]	$V_{jh}^{retrofit}$ [Izraz (5)]	V_n [Izraz (6)]	$V_n^{retrofit}$ [Izraz (7)]	V_{jh} [Izraz (1)]	$V_{jh}^{retrofit}$ [Izraz (5)]	V_n [Izraz (6)]	$V_n^{retrofit}$ [Izraz (7)]
Prvi sustav	S2BRF	101,6	-	102,2	-	106,7	-	217,4	-
	S2ARF	-	176,1	-	177,2	-	195,3	-	240,0
Drugi sustav	S3BRF	101,6	-	102,2	-	106,7	-	217,4	-
	S3ARF	-	165,9	-	169,9	-	186,8	-	241,9

Tablica 7. Usporedba eksperimentalnih i teoretskih rezultata za sile u spoju

Sustav	Uzorak	ACI		Faktor posmika u spoju	
		V_{jh} [Izraz (1)]	$V_{jh}^{retrofit}$ [Izraz (18)]	$\frac{V_{jh}^{exp}}{V_{jf}^{ACI}}$	$\frac{V_{jh}^{theo}}{V_{jf}^{ACI}}$
Prvi sustav	S2BRF	109,4	-	0,93	0,97
	S2ARF	-	221,0	0,80	0,88
Drugi sustav	S3BRF	109,4	-	0,93	0,97
	S3ARF	-	217,6	0,76	0,86

6. Usporedba eksperimentalnih i teoretskih rezultata

Eksperimentalne i teoretske vrijednosti posmične sile, posmične čvrstoće i posmičnog faktora za područje spoja prikazane su u tablici 6. Detaljna usporedba prikazana je u tablici 7.

Iz tablice 7. može se vidjeti da postoji prilično dobra podudarnost između teoretskih i eksperimentalnih vrijednosti V_{jh} . Vrijednosti prema ACI uputama više su, i to naročito kod uzoraka S2ARF i S3ARF.

Napomena: V_{jh}^{exp} je eksperimentalna vrijednost posmika na spoju, V_{jh}^{theo} je teoretska vrijednost posmika na spoju, a V_{jh}^{ACI} je posmik na spoju prema ACI uputama. V_n^{exp} je eksperimentalna posmična čvrstoća na spoju, V_n^{theo} je teoretska posmična čvrstoća na spoju, a V_n^{ACI} je posmična čvrstoća na spoju prema ACI uputama.

7. Zaključak

Na temelju eksperimentalnih i teoretskih analiza mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Utvrđeno je da je granično opterećenje podudarno (razlika je <5 %) kod obje vrste ojačanih uzoraka (S2ARF i S3ARF). Eksperimentalno utvrđena granična nosivost ojačanog uzorka (S2ARF) veća je za 4,5 % u odnosu na uzorak S3ARF. Utvrđeno je da je nosivost uzorka S2ARF za 25,7 % veća u odnosu na uzorak S2BRF, dok je kod uzorka S3ARF razlika unutar 6,3 % pri pomaku od 2,5 %.
- Kod uzorka S2ARF utvrđeno je blago povećanje duktilnosti pomaka (< 5 %) u odnosu na uzorak S3ARF kod ojačanih uzoraka. Utvrđeno je da kod uzorka S2ARF povećanje iznosi 4,3 % u odnosu na uzorak S3ARF. Međutim, kod uzoraka

S2ARF i S3ARF utvrđen je vrlo velik porast duktilnosti pomaka (79,7 % tj. 68 %) u usporedbi s uzorcima S2BRF i S3BRF.

- Vretenaste histerezne petlje pokazuju da obje vrste sustava za ojačanje (S2ARF i S3ARF) imaju izrazitu sposobnost raspršivanja energije. Eksperimentalni su rezultati uspoređeni s osnovnim odnosom histereznog opterećenja i pomaka (granično opterećenje i krutost).
- Vrijednosti krutosti pokazuju povećanje od 63,3 % kod uzorka S2ARF u odnosu na uzorak S2BRF, a vrijednost za uzorak S3ARF veća je za 41,4 % veća od one za uzorak S3BRF pri katnom pomaku od 2,5 %. Stoga varijacija iznosi 16,3 % u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima za S2ARF i S3ARF.
- Kod neojačanog uzorka dolazi do dijagonalnog posmičnog popuštanja na vrhu i dnu grede što pridonosi popuštanju uzorka pri reverzibilnom cikličnom opterećenju, kod pomaka od 2,5 %. Međutim, kod ojačanog uzorka do pojave pukotina dolazi na rubu, puzanje se uočava na ovoju GFRP-om, pucanje lamele HFRP i dolazi do savijanja armature nakon ponovnog reverzibilnog cikličnog opterećenja, kod pomaka od 5 %.
- Vrijednosti posmične sile na spoju i posmične čvrstoće prema dostupnim uputama za projektiranje (ACI) uspoređene su s eksperimentalnim vrijednostima posmične čvrstoće. Utvrđena je dobra podudarnost između teoretskih i eksperimentalnih rezultata.
- Nakon uspoređivanja različitih metoda za utvrđivanje seizmičkog ponašanja spojeva greda-stup ojačanih HFRP-om, može se zaključiti da oba postupka ojačanja podjednako utječu na povećanje faktora duktilnosti i čvrstoće. Kod uzorka S2ARF, primjena laminata HFRP (s kontinuiranim vlaknima banane) spriječila je odvajanje od površine betona kod katnih pomaka do

5 %. Za HFRP je ostvarena granična deformacija bez popuštanja u vlaklu ili tlaku. U usporedbi s neojačanim uzorcima (S2BRF), ojačani uzorci su za 67,5 % otporniji na opterećenje, dok im je disipacija energije četiri puta veća od disipacije zabilježene kod neojačanih uzoraka.

Zahvala

Autori zahvaljuju na financijskoj potpori koju im je dodijelilo Sveučilišno povjerenstvo za dodjelu potpora iz sredstava Zaklade Rajiv Gandhi za doktorske studije.

LITERATURA

- [1] Kaushik, B.H., Jain, S.K.: Impact of Great December 26, 2004, Sumatra Earthquake and Tsunami on Structures in Port Blair. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 21 (2007) 2, pp.128-142, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2007\)21:2\(128\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2007)21:2(128))
- [2] Saatcioglu, M., Ghobarah, A., Nistor, I.C.: Effects of December 26, 2004, Sumatra earthquake and tsunami on physical infrastructure, *Journal of Earthquake Technology*, 42 (2005) 4, pp.79-94, <http://home.iitk.ac.in/~vinaykg/1set457.pdf>
- [3] Ghobarah, A., Said, A.: Shear strengthening of the beam-column joints, *Engineering of Structures*, 24 (2002), pp. 881-888, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00026-3)
- [4] Ozcan, O., Binici, B., Ozcebe, G.: Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fibre-reinforced polymers, *Engineering Structures*, 30 (2008) 1, pp.1632-1646, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.10.013>
- [5] Antonopoulos, C., Triantafyllou, T.C.: Experimental investigation of FRP-strengthened RC beam-column joints, *Journal of Composites for Construction*, 7 (2003) 1, pp. 39-49, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:1\(39\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:1(39))
- [6] Attari, N., Amziane, S., Chemrouk, M.: Efficiency of beam-column joint strengthened by FRP laminates. *Advance Composite Materials*, 19 (2010), pp.171-183, <https://doi.org/10.1163/092430409X12605406698192>
- [7] Engindeniz, M., Kahn, L.F., Zureick, A.H.: Repair and strengthening of reinforced concrete beam-column joints: State of the art. *ACI Structural Journal*, 102 (2005) 2, pp. 187-197.
- [8] Mosallam, A.S., Banerjee, S.: Shear enhancement of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, 38 (2007), pp.781-793, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.10.002>
- [9] Parvin, A., Granata, P.: Investigation of the effects of fibre composites at concrete joints. *Composites Part B: Engineering*, 31 (2000), pp.499-509, [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00046-3)
- [10] Said, A.M., Nehd, I.M.L.: Use of FRP for RC frames in seismic zones: Part I. Evaluation of FRP beam-column joint rehabilitation techniques, *Applied Composite Materials*, 11 (2004), pp.205-226, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FB%3AACMA.0000035462.41572.7a.pdf>
- [11] Mukherjee, A., Joshi, M.: FRPC reinforced concrete beam-column joints under cyclic excitation. *Composite Structures*, 70 (2005) 9, pp. 185-199, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.08.022>
- [12] Parvin, A., Wu, S.H.: Ply angle effect on fibre composite wrapped reinforced concrete beam-column connections under combined axial and cyclic loads. *Compoite Structures*, 82 (2008) 4, pp.532-538, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.02.004>
- [13] Mahini, S.S., Ronagh, H.R.: Strength and ductility of FRP web-bonded RC beams for the assessment of retrofitted beam-column joints. *Composite Structures*, 9 (2010) 6, pp.1325-1332, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.09.006>
- [14] Zou, X.K., Teng, J.G., Lorenzis, L.D., Xu, S. H.: Optimal performance-based design of FRP jackets for seismic retrofit of reinforced concrete frames. *Composites Part B: Engineering*, 38 (2007), pp.584-597, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.07.016>
- [15] Mahini, S.S., Ronagh, H.R.: Web-bonded FRPs for the relocation of plastic hinges away from the column face in exterior RC joints, *Composite Structures*, 93 (2011), pp.2460-2472, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.04.002>
- [16] Niroomandi, A., Maheri, A., Maheri, M.R., Mahini, S.S.: Seismic performance of ordinary RC frames retrofitted at joints by FRP sheets. *Engineering Structures*, 32 (2010) 8, pp.2326-2336, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.04.008>
- [17] Ghobarah, A., El-Amoury, T.: Seismic rehabilitation of deficient exterior concrete frame joints. *Journal of Composites for Construction*, (2005), pp. 408-416. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2005\)9:5\(408\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:5(408))
- [18] Priestley, M.J.N.: Displacement-based seismic assessment of reinforced concrete buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 1 (1997) 1, pp.157-192.
- [19] Fave, J.M.L, Kim, J.: Joint shear behaviour prediction for RC beam-column connections. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 5 (2011) 1, pp. 57-64, <https://doi.org/10.4334/IJCSM.2011.5.1.057>
- [20] Park, S., Mosalam, K.M.: Parameters for shear strength prediction of exterior beam-column joints without transverse reinforcement. *Engineering Structures*, 36 (2012), pp.198-209, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.017>
- [21] Masi, G., Santarsiero, G.P., Lignola, G.M., Verderame, G.M.: Study of the seismic behaviour of external RC beam-column joint through experimental tests and numerical simulation. *Engineering Structures*. 52 (2013), pp.207-219, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.023>
- [22] IS 1893 (Part 1): 2002-Indian Standard Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures, Part 1: General Provisions and Buildings (Fifth Revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi, <https://law.resource.org/pub/in/bis/S03/is.1893.1.2002.pdf>
- [23] IS 456: 2000-Indian Standard Plain and Reinforced Concrete-Code of Practice (Fourth Revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi, <http://www.iitk.ac.in/ce/test/IS-codes/is.456.2000.pdf>
- [24] SP 34: 1987-Handbook on Concrete Reinforcement and Detailing, Bureau of Indian Standards, New Delhi, <https://www.iet.co.in/downloads/20140911095221-sp.34.1987%20Structural%20Designing%20Practice.pdf>
- [25] Carvalho, E.C.: Invited Lecture: Seismic Testing of Structure. Proc.11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France, (1998), pp. 53-64,
- [26] IS 12269: 1987-Indian Standard Specification for 53 Grade Ordinary Portland cement, Bureau of Indian Standards, New Delhi, <http://www.iitk.ac.in/ce/test/IS-codes/is.12269.2013.pdf>

- [27] Granata, P.J., Parvin, A.: An experimental study on Kevlar strengthening of beam-column connections. *Journal of Composite Structures* 53 (2001) 2, pp.163-171, [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00187-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00187-2)
- [28] Pampanin, S., Bolognini, D., Pavese, A.: Performance-Based Retrofit Strategy for Existing Reinforced Concrete Frame Systems using Fibre-Reinforced Polymer Composites. *Journal of composites for construction*, (2007), pp. 1-16.
- [29] ACI Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-M02). American Concrete Institute, 2002.
- [30] Park, R.: Ductility of structural concrete. IABSE reports, (1991), pp. 445-456, <http://doi.org/10.5169/seals-47669>
- [31] Hadi, M.N.S., Tran, T.M.: Retrofitting nonseismically detailed exterior beam-column joints using concrete covers together with CFRP jacket. *Construction and Building Materials*, (2014), pp.161-173.
- [32] ACI-ASCE Committee 352 (ACI 352R-02). Recommendations for the design of beam-column connections in monolithic reinforced concrete structures (aci 352r-02). Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute; 2002.
- [33] ACI Committee 440: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI 440.2R-02. USA: American Concrete Institute, 2012.