

Primljen / Received: 25.10.2023.

Ispravljen / Corrected: 15.3.2024.

Prihvaćen / Accepted: 28.3.2024.

Dostupno online / Available online: 10.5.2024.

Ponašanje tijekom sloma izvana pojačanih armiranobetonskih greda s primjesom krutih vlakana

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Syed Muhammad Syed Ibrahim**

Ilahia Sveučilište, Indija

Odjel za građevinarstvo

syed_ibms@yahoo.co.in

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Selvaraj Kandasamy**, dipl.ing.građ.

Institut za istraživanje i razvoj znanosti i tehn., Indija

Odjel za građevinarstvo

drskandasamy@veltech.edu.inDoc.dr.sc. **Jagadeesan Thivya**, dipl.ing.građ.

Dindigul Sveučilište, Indija

Odjel za građevinarstvo

thivyame@gmail.comDoc.dr.sc. **Jagadeesan Vijayaraghavan**, dipl.ing.građ.

Ramanathapuram Sveučilište, Indija

Odjel za građevinarstvo

drjvr1988@gmail.com

Izvorni znanstveni rad

Syed Muhammad Syed Ibrahim, Selvaraj Kandasamy, Jagadeesan Thivya, Jagadeesan Vijayaraghavan

Ponašanje tijekom sloma izvana pojačanih armiranobetonskih greda s primjesom krutih vlakana

Posljednjih desetljeća opsežno su provedena eksperimentalna istraživanja na armiranobetonskim (AB) gredama pojačanim vlaknima. Utvrđena je učinkovitost u području pojačanja na savijanje i posmik. S druge strane, primarni problem koji se često susreće u takvoj tehnici jest odvajanje FRP laminata od betonske površine. Takva otkazivanja nastaju zbog formiranja lokaliziranih savojnih i posmičnih pukotina u krhkoma području FRP betona. Pojava odvajanja također značajno utječe na povećanje nosivosti pojačanih greda. Težište istraživanja je poboljšati potencijalno ponašanje izvana pojačanih AB greda FRP-om dodavanjem učinkovitog sredstva za kontrolu pukotina u matricu, a to su "kruta čelična vlakna s kukastim krajevima". Izvedeno je devet AB greda i ispitano u ovom istraživanju s varijablama uključujući različite količine čeličnih vlakana s kukastim krajevima i debljinu polimera armiranih staklenim vlaknima. Ponašanje izvana FRP-om pojačanih AB greda pomiješanih s kratkim vlaknima prije i nakon raspucavanja sustavno je procijenjeno i utvrđeno je poboljšano djelovanje u različitim fazama raspucavanja. Drugo otkriće je transformacija oblika loma iz krtog u duktilni zbog izuzetnog fenomena deformacijskog očvršćivanja uzrokovanog čeličnim vlaknima u pojačanim AB gredama, u usporedbi s ostalim gredama bez čeličnih vlakana. Formiranje i širenje pukotina u različitim fazama numerički je modelirano za sve grede uporabom ANSYS-a i uspoređena je validacija numeričkog modela s eksperimentom.

Ključne riječi:

armiranobetonske grede, SFRC, GFRP, čelična vlakna, odvajanje, širina pukotine, FEA, ANSYS

Original research paper

Syed Muhammad Syed Ibrahim, Selvaraj Kandasamy, Jagadeesan Thivya, Jagadeesan Vijayaraghavan

Fracture performance of externally FRP strengthened reinforced concrete beams mixed with rigid fibres

In recent decades experimental investigations on fibre reinforced polymer (FRP) laminate-strengthened reinforced concrete (RC) beams have been extensively conducted. It has been found effective in flexural and shear strengthening perspectives. On the other hand, a primary problem frequently encountered in such technique is the separation of FRP laminate with the concrete bonded surface. Such failures are due to the formation of localized flexural and otherwise shear cracks in the fragile region of the FRP-concrete interface. The debonding occurrence also significantly affects the strength enhancement of the laminated beams. The emphasis of the study is to enhance the potential performance of externally FRP strengthened RC beams by incorporating an effective crack controlling agent, that is 'rigid hooked-end steel fibres' in the matrix. Nine RC beams were cast and tested in this study with variables including different quantities of hooked-ends steel and glass fibre reinforced polymer (GFRP) thickness. The pre-cracking and post-cracking behaviour of the externally FRP strengthened RC beams mixed with the short fibres were systematically evaluated and improved performance at various stages of cracking was found. Another finding is the transformation of failure pattern from brittle to ductile due to exceptional strain-hardening phenomenon caused by steel fibres in the strengthened RC beams, in comparison to that of other beams without steel fibres. The formations and propagations of the cracks at different stages were numerically modelled for all the beams using the ANSYS and compared the numerical design validation with the experiment.

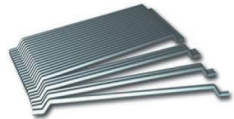
Key words:

reinforced concrete beams, SFRC, GFRP, steel fibre, debonding, crack-width, FEA, ANSYS


1. Uvod

“Konstrukcijsko pojačanje” je metoda poboljšanja nosivosti u odnosu na postojeće stanje konstrukcija. Postoji nekoliko prednosti konstrukcijskog pojačanja, kao što su (a) povećanje kapaciteta nosivosti i krutosti u najkraćem vremenu izgradnje uz minimalne ili nikakve smetnje u prometu ili drugim operacijama, (b) isplativost jer izbjegava uklanjanje i rekonstrukciju, i (c) smanjenje rasipanja materijala i posljedično smanjenje degradacije okoliša u određenoj mjeri. Utvrđeno je da je pojačanje metodom vezivanja ili laminacije vanjskim polimerima armiranim vlaknima (FRP) superiornije u odnosu na druge metode zbog nekoliko dokazanih prednosti u različitim aspektima, kao što su čvrstoća (tj. visok omjer čvrstoće i težine i visoka otpornost na zamor), krutost (tj. visok omjer krutosti i težine) i izdržljivost u većini nepovoljnih okruženja, nemagnetska i nevodljiva svojstva te veliki stupanj kemijske inertnosti [1-7]. Proteklih desetljeća provedena su opsežna eksperimentalna istraživanja izvana FRP-om laminiranih armiranobetonskih (AB) greda pod statičkim opterećenjem [8-11]. Do sada je utvrđeno i objavljeno u literaturi sedam različitih načina sloma u vezi s gornjom tehnikom lijepljenja FRP ploča. Oni su: (a) slom zbog posmika, (b) vlačni slom, (c) slom zbog drobljenja betona, (d) slom zaštitnog sloja, (e) slom odvajanja FRP-a na kraju površine, (f) slom odvajanja induciran savijanjem i posmikom i (g) slom odvajanjem uzrokovan međupovršinskim savojnim pukotinama. Od toga, svi tipovi od (iv) do (vii) pokazuju prerano odvajanje, a takvi načini loma značajno ograničavaju učinkovitost FRP-om pojačanih greda [12-14]. Razlog sloma naveden u većini studija ostaje prerano odvajanje FRP-a, koje počinje zbog stvaranja lokaliziranih savojnih pukotina u zoni manjih naprezanja betonskog elementa. Pri daljnjem opterećenju, pukotine se stalno sve više šire (tj. povećava se širina pukotine) unutar načina loma i prema pragu međupovršine FRP-betona, što je ozbiljno poremetilo fenomen vezivanja ljepljivom smolom [15-17].

Tablica 1. Svojstva krutih vlakana

Svojstva	Duljina	Promjer	Omjer oblika	Vlačna čvrstoća	Youngov modul	Oblik vlakana
Čelično vlakno	30 mm	0,5 mm	60	532 MPa	210 GPa	

Tablica 2. Detalji staklene tkanine

Tehnički		Građevinski		Oblik vlakana
Stil pređenja	Jednosmjerni	0°	1200 g/m ² E-staklo pomično 2400 - 4800 tex	
		90°	50 g/m ² E-glass roving 300 tex	
Gustoća	1258 g/m ²	0°	8 g/m ² poliester 7.8 tex	
Tip vlakana	L1200 staklo	širina	1270 mm	

Kontrola stvaranja takvih lokaliziranih pukotina može se omogućiti dodavanjem nasumično usmjerenih kratkih, nevezanih vlakana u svježi beton [18-21]. Stoga je ovo istraživanje trebalo kontrolirati nastajanje pukotina na izvana spojenim FRP-om pojačanim AB gredama dodavanjem sredstva za kontrolu pukotina, “3D čeličnih vlakana s kukastim krajem”, u betonsku matricu. Glavni je cilj ugradnje vlakana u beton poboljšati vlačna svojstva i žilavost, što rezultira povećanjem karakteristika raspucavanja i deformacije očvrstlog betona [22-25]. Parametarske studije uključuju širine pukotina u različitim fazama (prva pukotina, opuštanje i konačna), formiranje pukotina, razmak pukotina i način sloma ispitanih greda. Grede su se sastojale od različitih udjela nevezanih čeličnih vlakana s kukastim krajevima (0 %, 0,5 %, 1 % i 1,5 %), a zatim su bile spojene s vanjske strane s dvije različite debljine (3 i 5 mm) polimera armiranih staklenim vlaknima (engl. *glass fibre reinforced polymer* - GFRP). Sve su grede bile izložene istom načinu statičkog monotonom opterećenja. Rezultati ispitivanja greda su sustavno procijenjeni i raspravljani, uz usporedbu gore navedenih rezultata s FRP pojačanjem i bez njega.

2. Eksperimentalni rad

2.1. Karakterizacija materijala

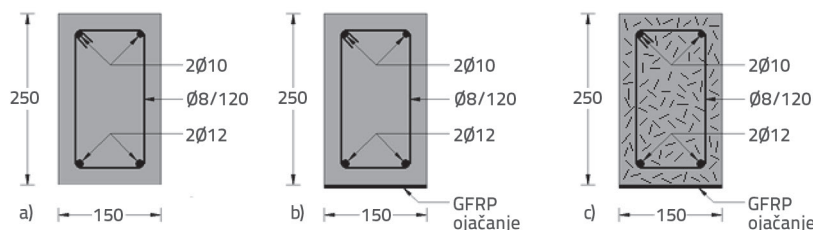
Konvencionalni materijali kao što je portlandski cement s dodatkom pucolana (PPC), obližnji postojeći riječni pijesak (kao fini agregat) i 20 mm dobro usitnjeni drobljeni granit (kao grubi agregat), u skladu s normama IS 1489 dio I [26], IS 2386 dio III [27], odnosno IS 383 [28] upotrijebljeni su za ovo istraživanje. Uz to, dodano je komercijalno dostupno ‘čelično vlakno s kukastim krajevima’ za pripremu betona armiranog vlaknima (FRC). U tablici 1. prikazana su svojstva čeličnih vlakana prema navodima proizvođača. Ugradnja i njegovanje betona nastavljeno je s običnom pitkom vodom. Dodan je komercijalno dostupan reduktor vode visokog dometa, tj. Classic Superflo

SP superplastifikator koji je u skladu s IS 9103 [29]. Komercijalno dostupna jednosmjerna E-staklena tkanina ELO05 bila je sredstvo za pojačavanje koje je korišteno u ovom ispitivanju. ELO05 je visokokvalitetna, jednosmjerna (gdje su vlakna postavljena pretežno u jednom ravninskom smjeru) prošivena staklena tkanina.

Tehnički i konstrukcijski detalji upotrijebljene jednosmjerne staklene tkanine koje su dali proizvođači nalaze se u tablici 2. Odabir vrste smole za lijepljenje FRP-a s betonskom površinom također je izazovan zadatak za uspjeh ove metode, budući da su različite vrste dodataka epoksidnim smolama s širokim rasponom mehaničkih svojstava komercijalno dostupne. Obično aditiv sadrži dvije komponente: smolu i učvršćivač. U istraživanju su korišteni Araldite LY 556 i Aradur HY 951.

2.2. Ispitivanje uzoraka i greda

Projektirana mješavina betona razreda M20 s omjerom mješavine 1:2,01:3,36 s vodo cementnim omjerom 0,5 izrađena je prema IS 10262 [30]. Omjer je uzet u obzir za lijevane kontrolne (betonske) uzorke i uzorke greda. Istraživanje je usmjereno na kontrolne uzorke kako bi se utvrdila svojstva običnog betona i FRC-a, kao što su jednoosna tlačna i vlačna čvrstoća prema IS 516 [31], odnosno IS 5816 [32]. Za izradu uzorka korišteni su cilindrični kalupi dimenzija 150 x 300 mm, odnosno 100 x 200 mm (tj. promjer x visina) za određivanje tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem. Slijedeći udjele ukupnog volumena vlakana (V_f) održavani su s dosljednim povećanjem od 0, 0,5, 1 i 1,5 %. Tablica 3. daje rezultate ispitivanja različitih betonskih uzoraka. Za eksperimentalno ispitivanje izrađeno je i ispitano ukupno devet greda jednake veličine, širine 150 mm, visine 250 mm i duljine 3000 mm. Jedna nepojačana AB greda kao 'kontrolna greda', po jedna AB greda pojačana s 3 i 5 mm debelim GFRP-



Slika 1. Detalji: a) Nepojačana AB (kontrolna) greda; b) GFRP pojačane AB grede (RBL3 & RBL5); c) GFRP pojačane FRC grede (SF0.5L3, SF0.5L5, SF1.0L3, SF1.0L5, SF1.5L3 & SF1.5L5)

om i tri od svake AB grede pojačane s 3 i 5 mm debelim GFRP-om pomiješane s tri različita volumna udjela čeličnih vlakana (tj. 0,5 %, 1 % i 1,5 %), uzete su u obzir za istraživanje. Za sve grede korištene su dvije deformirane (eng. *high yield steel deformed - HYS*) čelične šipke promjera 12 mm s granicom popuštanja = 415 MPa, kao vlačna armatura i dvije HYS (sekundarne) konstrukcijske šipke promjera 10 mm u tlačnoj zoni. 8 mm HYS šipke kao posmična armatura bile su jednako razmaknute na osnovnom razmaku od 120 mm kroz cijeli raspon. Na slici 1. shematski su prikazi armature i pojačanja greda.

Pojedinosti eksperimentalne grede ukratko su dane u tablici 3. Za pripremu zelenog betona korištena je miješalica s nagibnim bubnjem. Poduzete su sve potrebne mjere kako bi se izbjeglo stvaranje vlaknastih loptica i grupiranje tijekom miješanja vlakana. Slike 2.a i 2.b prikazuju temeljito miješanje i izlivanje betona u kalup. Sve su grede izrađene u seriji. Grede su izvađene iz kalupa nakon 24 sata od lijevanja i njege pod vodom 28 dana prije testiranja.

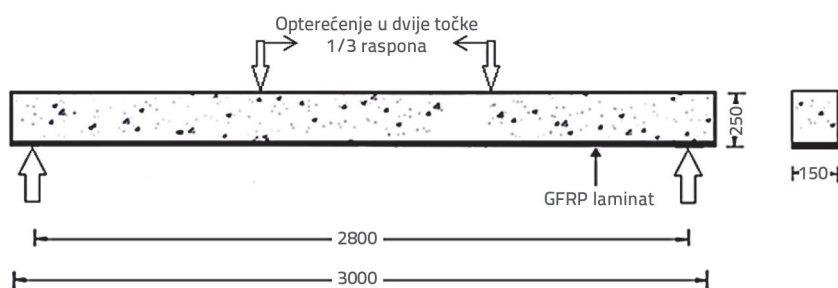
Učinkovitost pojačanja vanjski spojene FRP laminirane AB grede uglavnom ovisi o vrsti korištene ljepljive smole. Prema uputama proizvođača, epoksidna smola (Araldite LY 556 i Hardener HY 951 miješanje dijelova u težinskom omjeru 100:10) pripremljena je u plastičnoj posudi, a armaturna vlakna izrezana su prema veličini grede. Smola se ravnomjerno nanosi na strogo pripremljenu (tj. na vlačnu) površinu betonskih greda. Zatim je staklena tkanina za pojačanje nježno postavljena i utisnuta u nestvrđnutu smolu;

Tablica 3. Svojstva betona i detalji greda

Uzorak grede	Beton			Vlačna armaturna šipka		Frakcija količine vlakana [%]	Debljina GFRP [mm]
	Tlačna čvrstoća [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Youngov modul [GPa]	Broj i promjer [mm]	Površina [%]		
RB	26.70	3.80	25.83	2Ø12	0.60	0	0
RBL3	26.70	3.80	25.83	2Ø12	0.60	0	3
RBL5	26.70	3.80	25.83	2Ø12	0.60	0	5
SF0.5L3	27.50	4.20	26.19	2Ø12	0.60	0.5	3
SF0.5L5	27.50	4.20	26.19	2Ø12	0.60	0.5	5
SF1.0L3	29.05	5.55	26.98	2Ø12	0.60	1.0	3
SF1.0L5	29.05	5.55	26.98	2Ø12	0.60	1.0	5
SF1.5L3	32.25	7.60	28.37	2Ø12	0.60	1.5	3
SF1.5L5	32.25	7.60	28.37	2Ø12	0.60	1.5	5



Slika 2. Izrada greda i pojačavanje u tijeku



Slika 3. Postavke ispitivanja (sve dimenzije u [mm])

u isto vrijeme, višak smole je istisnut valjkom. Primijenjena je dovoljna količina smole da se postigne potpuna zasićenost vlakana. Zatim su pojačane grede ispitane nakon stvrdnjavanja na sobnoj temperaturi. Slike 2.c i 2.d prikazuju procese pojačanja greda. Sve testne varijable prikazane su u tablici 3.

Za ispitivanje greda korišten je uređaj za ispitivanje koji se sastoji od okvira nosivosti 500 kN te uređajima za mjerenje u četiri točke. Najprije su grede raspoređene sa svim ispitnim postavkama (tj. rasporedom uređaja za opterećenje i mjerenja na odgovarajućim pozicijama) u okviru. Opterećenje je započeto i nastavljeno brzinom od 2,5 kN po inkrementu monotono do potpunog sloma greda pomoću ručno upravljane cilindrične hidraulične dizalice. Razvoj pukotina i njihovo širenje praćeni su i mjereni tijekom ispitivanja. Povećalo je pažljivo korišteno za praćenje i identificiranje stvaranja pukotina na površini greda. Mikroskop je korišten isključivo za otkrivanje pukotina, s najmanjim brojem od 0,02 mm za mjerenje širine pukotina u konstantnom intervalu tijekom opterećenja od nastanka prve pukotine do potpunog sloma greda.

Slika 3. prikazuje shematski dijagram ispitne postavke. Na slici 4. fotografski je prikaz procesa otkrivanja pukotina.



Slika 4. Mjerenje širine pukotine u tijeku

3. Rasprava

3.1. Svojstva pukotina

Razvoj i širenje pukotina promatrani su i bilježeni tijekom cijelog procesa ispitivanja laminiranih FRC greda. Vrlo se malo savojnih pukotina u početku formiralo u vlačnoj zoni ispod točaka opterećenja nakon nekoliko povećanja opterećenja na grede. Daljnjim povećanjem opterećenja stvarao se veći broj pukotina prema sredini raspona i u posmičnom rasponu. Pukotine su se širile prema tlačnoj zoni i također do sloma greda. U međuvremenu,

mikroskop za otkrivanje pukotina, preciznosti od 0,02 mm, upotrijebljen je za mjerenje širine pukotine (W_c) u redovitim intervalima tijekom ispitivanja greda od prividne prve pukotine do krajnje faze. Mjerenja širine pukotine obavljena su za sve grede na razini vlačne čelične armature i područja konstantnog momenta. Izmjerene širine pukotina u različitim fazama (prva pukotina, granica popuštanja i konačni slom) svih greda prikazane su u tablici 4. Tablica 5. prikazuje pojedinosti o slomovima greda.

3.2. Širine pukotina u različitim fazama

Širine pukotine koje odgovaraju prvoj pukotini, granici popuštanja i konačnom (potpunom) slomu različitih greda nalaze se u tablici 4. Slike 5. i 6. prikazuju iznos opterećenja u odnosu na širinu pukotine svih ispitanih greda. Rasprave temeljene na gornjim fazama i istaknutim zaključcima o širini pukotine s obzirom na debljinu laminata u odnosu na ukupni volumen vlakana (V_f) dane su u nastavku.

Tablica 4. Širine pukotina laminiranih FRC greda u različitim stadijima

ID grede	Širina pukotine [mm]		
	Stadij prve pukotine	Stadij popuštanja	Krajnji stadij
RB	0,07	0,44	0,58
RBL3	0,06	0,32	0,54
RBL5	0,05	0,30	0,52
SF0,5L3	0,05	0,28	0,46
SF0,5L5	0,04	0,25	0,42
SF1,0L3	0,04	0,20	0,42
SF1,0L5	0,03	0,18	0,38
SF1,5L3	0,03	0,17	0,38
SF1,5L5	0,02	0,16	0,32

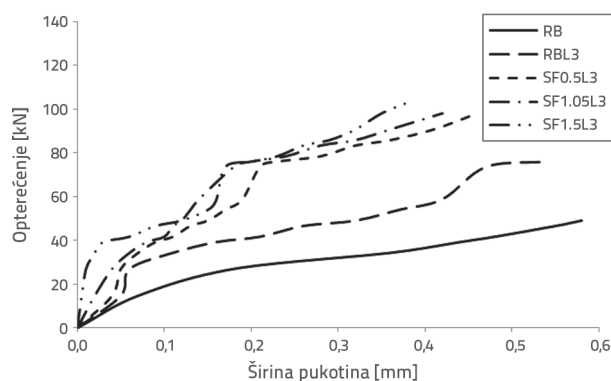
3.2.1. Stadij prve pukotine

Širina pukotine GFRP-om pojačanih AB greda (RBL3 & RBL5) blago je smanjena s povećanjem debljine GFRP-a u odnosu na kontrolnu gredu (RB). Nadalje, to smanjenje bilo je veće za najveću debljinu korištenog laminata (5 mm u ovom ispitivanju). Smanjenje navedene širine pukotina je 14,3 % i 28,6 % za laminata debljine 3 mm i 5 mm u usporedbi s kontrolnom gredom. Nadalje, kako se debljina laminata povećala na 5 mm s 3 mm, došlo je do smanjenja širine pukotine od 16,7 %, što upućuje na utjecaj debljine laminata na širinu pukotine. U tom se slučaju smanjenje širine pukotine smatra značajnim. Čini se da je širina pukotine GFRP-om pojačane FRC grede najmanja pri najvećem volumenu vlakana ($V_f = 1,5\%$), a u ovom je ispitivanju uzeta u obzir najveća debljina GFRP-a (5 mm).

Širina pukotina 5 mm GFRP-om pojačanih FRC greda (SF0.5L5, SF1.0L5 i SF1.5L5) smanjuje se u usporedbi s kontrolnom gredom, a smanjenja su 42,9 %, 57,1 % i 71,4 % za odgovarajućih 0,5 %, 1,0 % te 1,5 % udjela vlakana (V_f). Pokazuje se kombinirani učinak "vlakana i laminacije" u smanjenju širine pukotina pojačanih FRC greda, što je vrlo povoljno s aspekta trajnosti konstrukcijskog elementa, a time i konstrukcije. Smanjenje širine pukotine je vrlo veliko i nastavlja se povećavati s povećanjem V_f . Uspoređujući širine pukotina 5 mm pojačanih FRC greda sa širinama 5 mm pojačanih RC greda (RBL5), smanjenje širine pukotina u prvim gredama je 20 %, 40 % i 60 %, za $V_f = 0,5\%$, 1,0 %, odnosno 1,5 %. Drugim riječima, za svakih 0,5 % povećanja V_f , postoji smanjenje od 20 % u širini pukotine pojačanih FRC greda u odnosu na GFRP-om pojačanu AB gredu. To implicira da su 3D čelična vlakna s kukastim krajem imala vitalnu ulogu u kontroli širine pukotina čak i pri najnižem udjelu vlakana (0,5 %), a spomenuti fenomen nastavlja rasti s povećanjem udjela vlakana.

3.2.2. Stadij popuštanja

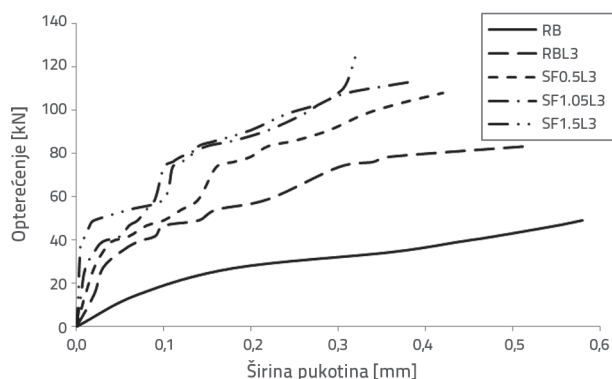
Trend s obzirom na smanjenje širine pukotine GFRP-om pojačanih FRC greda u odnosu na kontrolnu gredu u fazi popuštanja je kao u stadiju prve pukotine. Širina pukotina za laminat debljine 5 mm u fazi popuštanja za razmatrani raspon V_f je minimalna, kao i stadij prve pukotine. Maksimalni pad u navedenim širinama pukotina pojačanih AB greda (RBL3 & RBL5) u odnosu na kontrolnu gredu je 27,3 % i 31,8 % za laminata debljine 3 i 5 mm. Čini se da je uloga laminata velika u smanjenju širine pukotina u fazi popuštanja. Nadalje, kako se debljina laminata povećala na 5 mm umjesto 3 mm, uočeno je smanjenje širine pukotina od 6,3 %. Međutim, učinak navedenog smanjenja širine pukotina je beznačajan. Fenomen upućuje na ulogu laminata i njegove debljine na širinu pukotina.



Slika 5. Opterećenje i širina pukotina za 3 mm GFRP-om pojačane FRC grede

Uspoređujući širine pukotina 5 mm pojačanih FRC greda s kontrolnim gredama, prve grede daju smanjenje širine pukotina od približno 43,2 %, 59,1 % i 63,6 %, odnosno za 0,5,

1,0 i 1,5 % udjela vlakana. Prikazuje se kombinirani učinak 'vlakana i laminacije' na smanjenje širine pukotina FRC greda pojačanih GFRP-om, što je vrlo povoljno s aspekta trajnosti konstrukcijskog elementa, a time i konstrukcije. Nadalje, smanjenje širine pukotina je vrlo veliko i nastavlja rasti s povećanjem V_f .



Slika 6. Opterećenje i širina pukotina za 5 mm GFRP-om pojačane FRC grede

Uspoređujući širine pukotina 5 mm pojačanih FRC greda s 5 mm pojačanim AB gredama, prve grede imaju smanjenje širine pukotina od približno 16,7 %, 40 % i 46,7 %, odnosno za 0,5, 1,0 i 1,5 % udjela vlakana. To implicira da su korištena čelična vlakna imala ključnu ulogu u kontroli širine pukotina u stadiju popuštanja, čak i pri najnižem udjelu vlakana, a taj se fenomen nastavlja povećavati s povećanjem udjela vlakana. Uspoređujući ulogu čeličnih vlakana s kombiniranim učinkom, čelična vlakna značajno utječu na širinu pukotina pojačanih FRC greda u fazi popuštanja.

3.2.3. Krajnji stadij

Trend s obzirom na smanjenje širine pukotine u krajnjoj fazi pojačanih FRC greda u odnosu na kontrolnu gredu također se čini kao kod faza prve pukotine i popuštanja. Konačna širina pukotina manja je za najveću (5 mm) debljinu laminata koja se koristi za razmatrani raspon V_f sličan je onom kod prve pukotine i faza popuštanja. Smanjenje krajnje širine pukotina pojačanih AB greda u odnosu na kontrolnu gredu iznosi 6,9 % odnosno 10,3 % za laminata debljine 3 i 5 mm, što je beznačajno. Trend uloge laminata u pogledu kontrole širine pukotina u krajnjoj fazi je suprotan onom u fazi popuštanja (tj. laminat je imao relativno veću ulogu do faze popuštanja). Kako se debljina laminata povećala na 5 mm s 3 mm debljine, došlo je do smanjenja navedenih širina pukotina od približno 3,4 %, što je također bilo zanemarivo. Međutim, spomenuti učinak na širinu pukotina u krajnjoj fazi zbog povećanja debljine pokazuje isti trend kao što je objašnjeno u fazi popuštanja.

Kada se usporede širine pukotina 5 mm pojačanih FRC greda s kontrolnom gredom, smanjene širine pukotina u prvim

gredama su 27,6 %, 34,5 % i 44,8 %, odnosno za $V_f = 0,5 %$, 1,0 %, i 1,5 %. Čini se da je spomenuto smanjenje širine pukotina relativno manje u krajnjoj fazi nego u fazi popuštanja. To pokazuje da je kombinirani učinak 'vlakana i laminacije' u smanjenju širine pukotina GFRP pojačanih FRC greda, što je vrlo povoljno s aspekta trajnosti konstrukcijskog elementa, a time i konstrukcije. Uspoređujući širine pukotina 5 mm pojačanih FRC greda sa širinama 5 mm pojačanih RC greda, prve grede imaju smanjenje širine pukotina od približno 19,2 %, 27 % i 38,5 %, odnosno za $V_f = 0,5 %$, 1,0 %, i 1,5 %, što je relativno manje u krajnjoj fazi nego u fazi popuštanja. Otkrivena je uloga čeličnih vlakana koja značajno utječu na širinu pukotina čak i pri najnižem udjelu vlakana i imaju tendenciju povećanja kada se udio vlakana povećava do maksimuma pri najvišem udjelu vlakana korištenom u ovom radu. Uspoređujući ulogu čeličnih vlakana s kombiniranim učinkom, čini se da je utjecaj vlakana relativno velik na širinu pukotina FRC greda pojačanih GFRP-om.

3.3. Detalji sloma

Pojedinosti sloma dobivene eksperimentalnim istraživanjem, kao što su broj pukotina, prosječni razmak između pukotina i način sloma pojačanih FRC greda, prikazane su u tablici 5.

3.3.1. Stvaranje pukotina

Na kraju ispitivanja na površini laminiranih FRC greda uočene su brojne uske raspodijeljene savojne pukotine. Rasprava i istaknuti zaključci o broju i stvaranju pukotina s obzirom na debljinu laminacije u odnosu na volumen vlakana (%) su kako slijede.

Formiranje pukotina varira s povećanjem debljine laminata i V_f na FRC gredama, a najveće je za višu laminatnost (5 mm) za razmatrani raspon V_f . Formiranje pukotina se povećava s povećanjem debljine sloja. Maksimalno povećanje stvaranja pukotina za pojačane AB grede debljine 3 i 5 mm iznosi 41,2 % odnosno 66,7 % u usporedbi s kontrolnom gredom. Pokazuje se značajno povećanje stvaranja pukotina na oba laminata, što može biti posljedica učinka ukršćivanja laminata. Uspoređujući pojačane FRC grede debljine 5 mm s kontrolnom gredom, maksimalno povećanje stvaranja pukotina je 91,7 % za $V_f = 1,5 %$. Slično, uspoređujući pojačane FRC grede debljine 5 mm i pojačane AB grede debljine 5 mm, maksimalno povećanje stvaranja pukotina je 15 %, što odgovara $V_f = 1,5 %$. Gore navedene usporedbe pokazuju kombinirani učinak na pojačane FRC grede koji utječe na stvaranje pukotina.

3.3.2. Prosječni razmak pukotina

Tijekom eksperimentalnog istraživanja dosljedno je praćeno i bilježeno stvaranje pukotina i njihovo širenje. Općenito, savojne pukotine su se ponajprije razvile u području

Tablica 5. Detalji pucanja različitih ispitanih greda

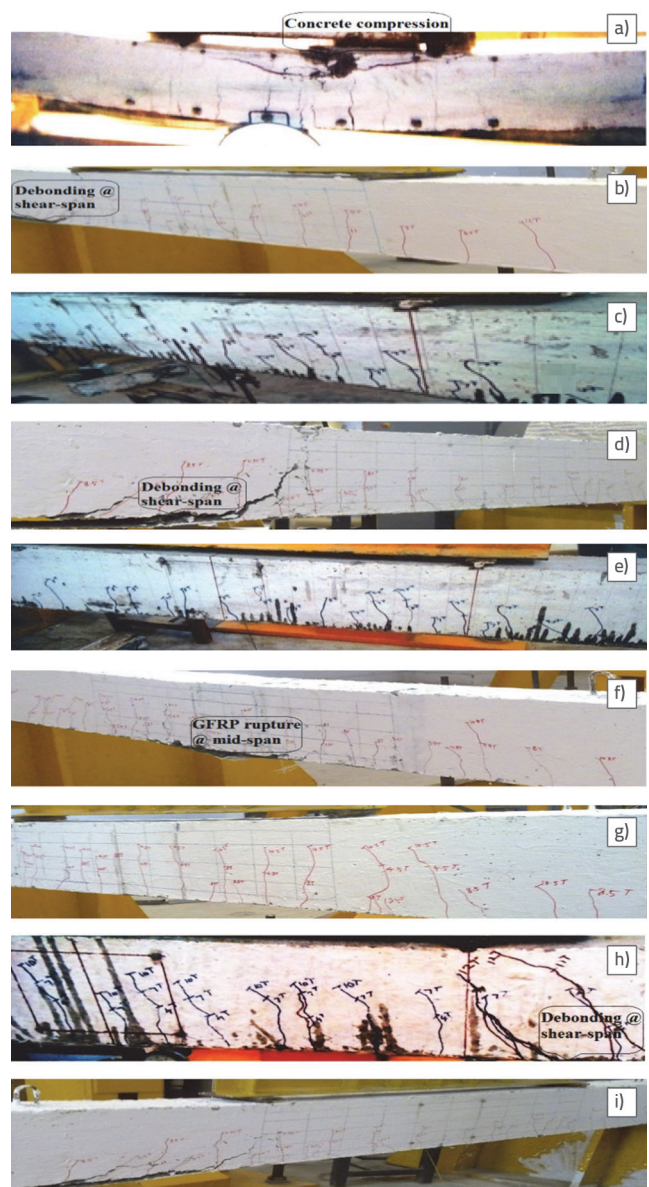
ID grede	Broj vidljivih pukotina	Prosječni razmak pukotina [mm]	Način sloma
RB	12	156,20	Popuštanje vlačne armaturne šipke, nakon čega slijedi drobljenje betona u zoni pritiska
RBL3	17	95,60	Proširenje savojnih pukotina na spojnoj površini betona i GFRP-a nakon čega slijedi odvajanje
RBL5	20	81,00	Proširenje savojnih pukotina na spojnoj površini betona i GFRP-a nakon čega slijedi odvajanje
SF0.5L3	18	89,30	Proširenje savojnih pukotina na spojnoj površini betona i GFRP-a nakon čega slijedi odvajanje
SF0.5L5	20	76,20	Proširenje savojnih pukotina na spojnoj površini betona i GFRP-a nakon čega slijedi odvajanje
SF1.0L3	21	85,40	Proširenje savojnih pukotina praćeno pucanjem GFRP-a uz zvuk pucanja
SF1.0L5	22	72,40	Proširenje savojnih pukotina na spojnoj površini betona i GFRP-a nakon čega slijedi odvajanje
SF1.5L3	23	80,20	Proširenje savojnih pukotina na spojnoj površini betona i GFRP-a nakon čega slijedi odvajanje
SF1.5L5	23	67,10	Proširenje savojnih pukotina na spojnoj površini betona i GFRP-a nakon čega slijedi odvajanje

konstantnog momenta, a zatim su se neke savojno posmične (dijagonalne) pukotine također razvile u posmičnom rasponu greda. Slijedi rasprava i istaknuti zaključci o prosječnom razmaku pukotina (vidi tablicu 5.) u odnosu na debljinu laminata i u odnosu na ukupni udio vlakana (V_f).

Prosječni razmak pukotina FRC greda smanjuje se s povećanjem laminata i V_f korištenih u ovom ispitivanju. Nadalje, dolazi do promjene načina sloma u duktilni iz krhkog. Razmak pukotina je minimalan za veću debljinu laminata za razmatrani raspon V_f . Razmak pukotina smanjuje se s povećanjem debljine sloja. Maksimalno smanjenje razmaka pukotina na pojačanim AB gredama je 38,8 % odnosno 48,1 % za lamelirane grede od 3 odnosno 5 mm u odnosu na kontrolnu gredu. Može se vidjeti da je to smanjenje značajno za lamimirane grede od 3 i 5 mm, što može biti posljedica učinka ukrućenja laminatom. Međutim, utvrđeno smanjenje razmaka pukotina bilo je najviše 57 % za 5 mm laminiranu FRC gredu, što odgovara $V_f = 1,5$ % u usporedbi s kontrolnom gredom. Slično tome, utvrđeno najveće smanjenje razmaka pukotina koje odgovara $V_f = 1,5$ % iznosi 17,2 % za 5 mm laminiranu RC gredu, u usporedbi sa 5 mm laminiranu RC gredu. Navedene usporedbe pokazuju 'kombinirani učinak' na pojačane FRC grede koje utječu na razmak pukotina.

3.3.3. Način loma

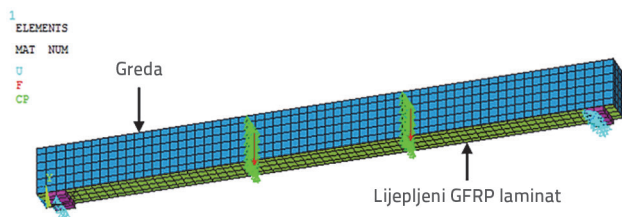
Pojedinosti o lomovima različitih greda navedene su u tablici 5. U eksperimentalnom istraživanju uočena su tri različita tipa loma: drobljenje betona, odvajanje laminata i pucanje GFRP-a. Kontrolna greda (RB) otkazala je pri drobljenju betona u tlačnoj zoni nakon vlačnog istezanja čelika. Pojačane AB grede (RBL3 i RBL5) i pojačane FRC grede (SF0.5L3, SF0.5L5, SF1.0L5, SF1.5L3 i SF1.5L5) otkazale su odvajanjem laminata. Laminirana FRC greda (SF1.0L3) otkazala je zbog vlačnog sloma GFRPa uz zvuk pucanja. Takvi načini sloma općenito se ubrajaju u slomove savijanjem, a nijedna od laminiranih greda nije pokazala prijevremeni slom zbog raslojavanja. Slom različitih ispitanih greda prikazan je na slici 7.



Slika 7. Način sloma i uzorak pukotina različitih greda: a) RB; b) RBL3; c) RBL5; d) SF0.5L3; e) SF0.5L5; f) SF1.0L3; g) SF1.0L5; h) SF1.5L3; i) SF1.5L5

3.4. Numerička usporedba

Numeričke metode za provjeru bilo kojeg modela imaju različite prednosti u usporedbi s analitičkim i/ili eksperimentalnim metodama, kao što su: (a) primjena čak i ako fizički prototip nije dostupan; (b) brže postizanje rezultata; (c) rješavanje složenih problema; (d) rezultati postignuti na cjelokupnoj geometriji. No, jedini nedostatak numeričkih metoda je taj što dobiveni rezultati mogu biti približni. Postoje četiri numeričke metode, uključujući metodu analize konačnim elementima (eng. *finite element analysis - FEA*), metodu graničnih elemenata, metodu konačnog volumena i metodu konačnih razlika. Od navedenog, za modeliranje i usporedbu eksperimentalnih rezultata korišten je dobro poznati računalni program ANSYS temeljen na FEA metodi [33]. Numerička potvrda projektiranja obrađena je za sve grede, isključivo na betonskim (vlačnim i tlačnim) naprezanjima, opterećenju, pomaku i stvaranju pukotina u različitim fazama. Grede su prethodno modelirane odabirom odgovarajućih ugrađenih elemenata koji zadovoljavaju ponašanje materijala u stvarnom vremenu i simulirani su rubni uvjeti (oslonac i opterećenje) u skladu s postavkama ispitivanja. Slika 8. prikazuje GFRP laminirani ANSYS model grede u punoj veličini s mrežom konačnih elemenata.



Slika 8. Mrežasti GFRP laminirani model s graničnim uvjetima

3.4.1. Kriterij loma betona razmatran u ANSYS-u

Za općenito modeliranje betona, ugrađeni element RC SOLID65 u FEA računalnom programu može modelirati načine sloma pucanjem i drobljenjem (krtost). Jednadžba (1) za model betonskog materijala kriterij je loma od pucanja/drobljenja zbog stanja višeosnog naprezanja ako je zadovoljen [33]:

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \tag{1}$$

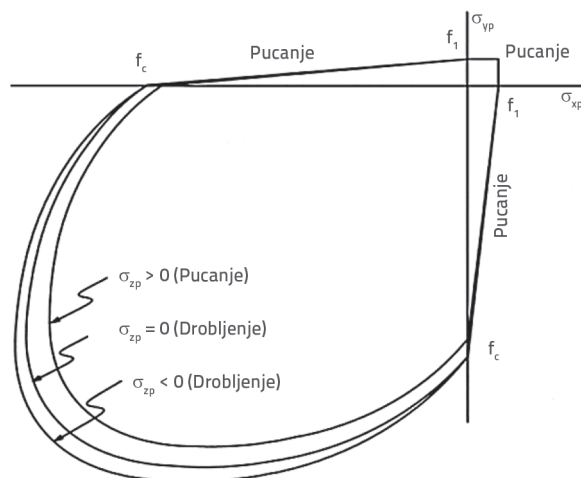
Za definiranje loma krte površine betona u modelu, konstante f_t , f_c , f_{cb} , f_1 i f_2 su parametri čvrstoće (ovisni o temperaturi) potrebni kao ulazni parametri za izraze (2), (3), (4). Naravno, važno je specificirati f_t i f_c kako bi se definirala površina sloma kao što je prikazano na slici 9., a koja prikazuje tri površine sloma kao projekcije između ravnina σ_{xp} i σ_{yp} gdje su glavna naprezanja različita od nule u odgovarajućim smjerovima x i y, iako je način sloma funkcija σ_{zp} . Ostale konstante su zadane u [33]:

$$f_{cb} = 1,2 f_c \tag{2}$$

$$f_1 = 1,45 f_c \tag{3}$$

$$f_2 = 1,725 f_c \tag{4}$$

Trodimenzionalna površina sloma u ravnini glavnih naprezanja prikazana je na slici 9. Kad je gornji uvjet zadovoljen za stanja naprezanja, tada dolaze u obzir samo zadane vrijednosti. Stoga pri niskoj komponenti hidrostatskog naprezanja uvjet izraza (5) odnosi se na uvjete naprezanja. Ako se očekuje vlačna komponenta hidrostatskog naprezanja, svi parametri sloma moraju biti specificirani.



Slika 9. Površina sloma u ravnini glavnih naprezanja s gotovo dvoosnim naprezanjem

$$|\sigma_h| \leq \sqrt{3} f_c \tag{5}$$

$$\sigma_h = \text{stanje hidrostatskog naprezanja} = \frac{1}{3}(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp}) \tag{6}$$

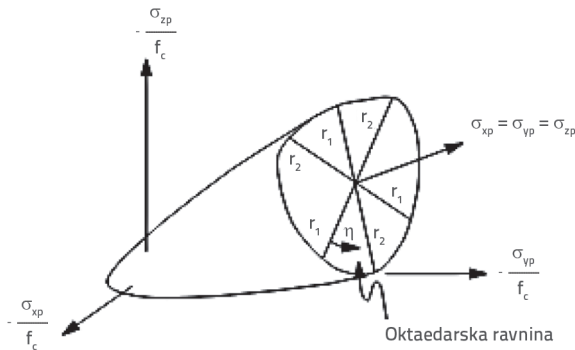
Inače, ako izraz (5) ne zadovoljava pretpostavljene zadane vrijednosti, izrazi (2) do (4) netočno procjenjuju čvrstoću betona. Ako je glavna komponenta naprezanja veća od krajnje jednoosne vlačne čvrstoće betona (f_t) i model betonskog materijala puknut će pod uvjetom da je f_c jednak $-1,0$ kako bi se smanjila sposobnost drobljenja betonskog materijala. Funkcije F i S izražene u smislu glavnih naprezanja označenih kao σ_1 (maksimum), σ_2 (prosjeak) i σ_3 (minimum) i $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, gdje se σ_1 i σ_3 mogu promatrati izrazima (7) i (8):

$$\sigma_1 = \max(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \tag{7}$$

$$\sigma_3 = \min(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \tag{8}$$

Slom betona u modeliranju elemenata SOLID65 kategoriziran je u četiri domene kao što su:

- $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (tlak – tlak – tlak)
- $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (vlak – tlak – tlak)
- $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ (vlak – vlak – tlak)
- $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ (vlak – vlak – vlak).

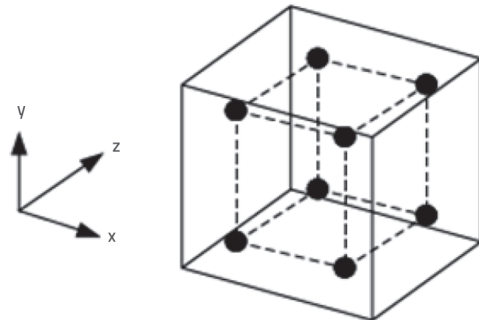


Slika 10. Trodimenzionalna ploha sloma u prostoru glavnog naprezanja

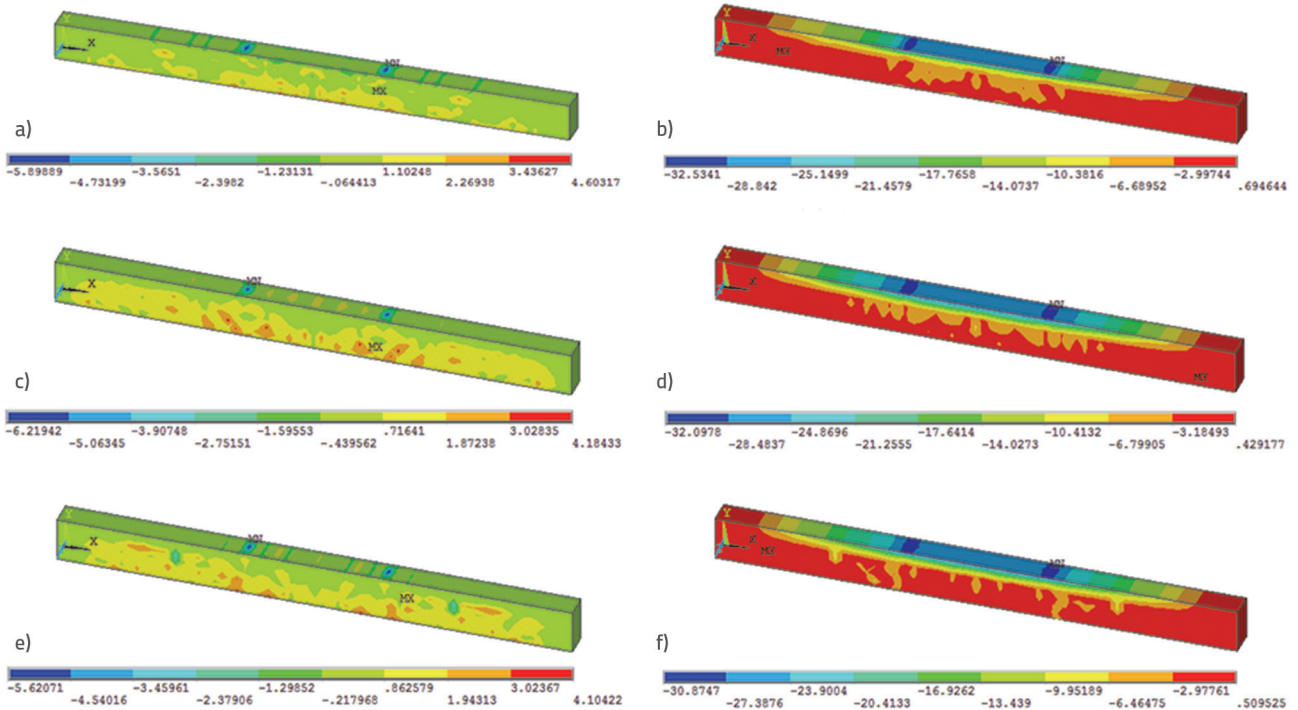
Slika 10. prikazuje površinu sloma u prostoru glavnog naprezanja s gotovo dvoosnim naprezanjem. Funkcije F i S opisuju neovisno u svakoj domeni. Gornje četiri funkcije opisuju opću funkciju F i S , označene kao F_1, F_2, F_3, F_4 i S_1, S_2, S_3, S_4 , redom. "Funkcije S_i ($i = 1$ do 4) imaju svojstva da je površina koju opisuju kontinuirana dok površinski gradijenti nisu kontinuirani kada bilo koje od glavnih naprezanja promijeni predznak. Na primjer, ako su σ_{xp} i σ_{yp} negativni (tlačni), a σ_{zp} blago pozitivan (vlačni), slom bi se predvidio u smjeru okomitom na σ_{zp} . Ako je σ_{zp} nula ili približno nula tada se pretpostavlja da će se materijal zdrobiti" [33].

3.4.2. Glavna naprezanja u betonu

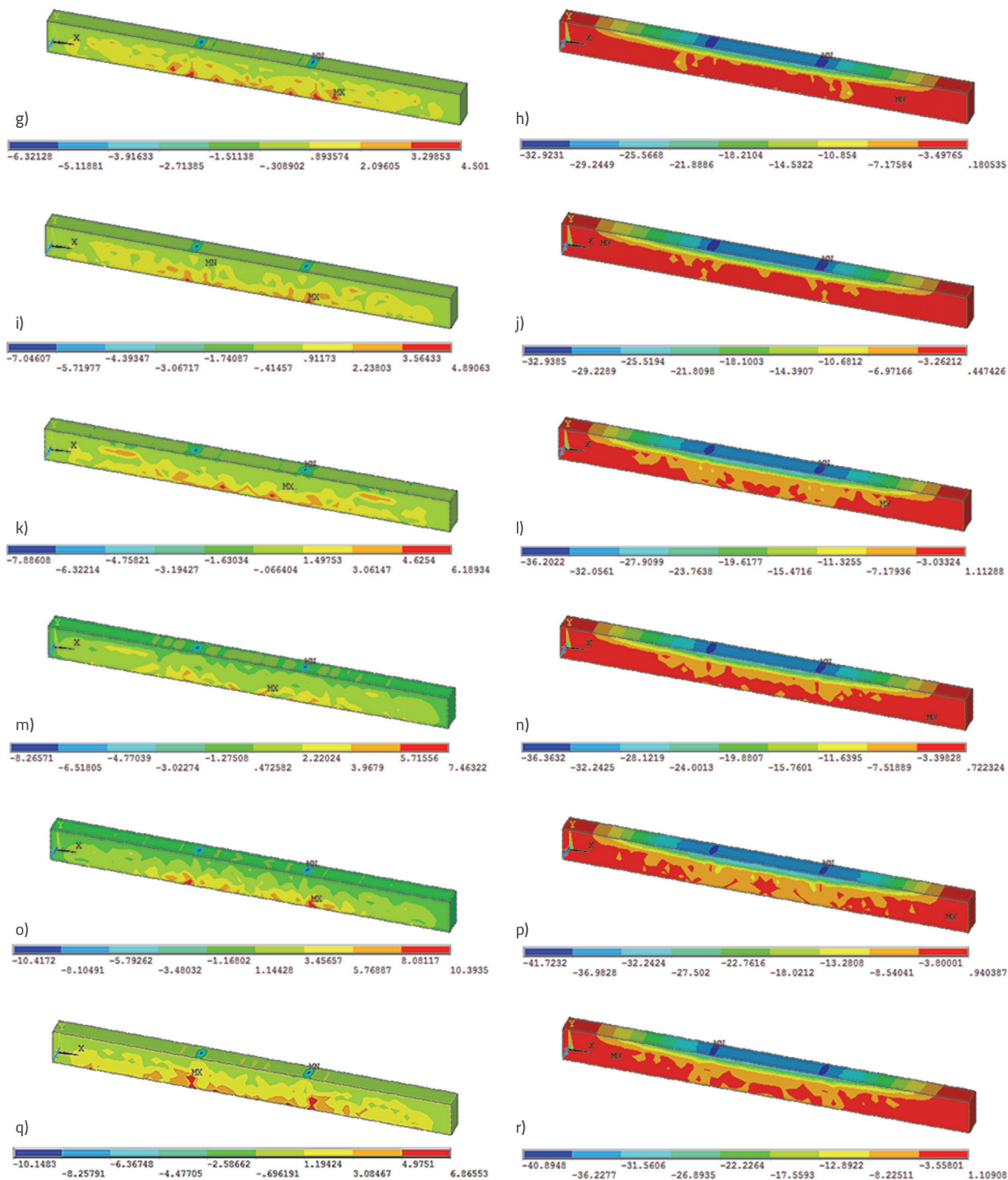
Na integracijskim točkama SOLID65 (betonskih) elemenata, glavna naprezanja i deformacije predviđaju se pomoću ANSYS postprocesora. Tipična integracijska točka u betonskom SOLID65 elementu je kao na slici 11. Konturni dijagrami glavnih naprezanja (σ_1 i σ_3) iz nodalnog rješenja za različite modele greda su kao što je prikazano na slici 12. Prvo glavno naprezanje (σ_1) i treće glavno naprezanje (σ_3) odgovara najvećim vlačnim i tlačnim naprezanjima u betonu. Primjetno je da konturni dijagram σ_1 pokazuje maksimalno vlačno naprezanje na donjoj strani grede. Štoviše, konturni dijagram σ_3 pokazuje veću koncentraciju tlačnog naprezanja na gornjoj površini grede.



Slika 11. Integracijske točke u SOLID65 elementu



Slika 12. Raspored naprezanja različitih modela greda: a) RB: Prvo glavno naprezanje, σ_1 ; b) RB: Treće glavno naprezanje, σ_3 ; c) RBL3: Prvo glavno naprezanje, σ_1 ; d) RBL3: Treće glavno naprezanje, σ_3 ; e) RBL5: Prvo glavno naprezanje, σ_1 ; f) RBL5: Treće glavno naprezanje, σ_3

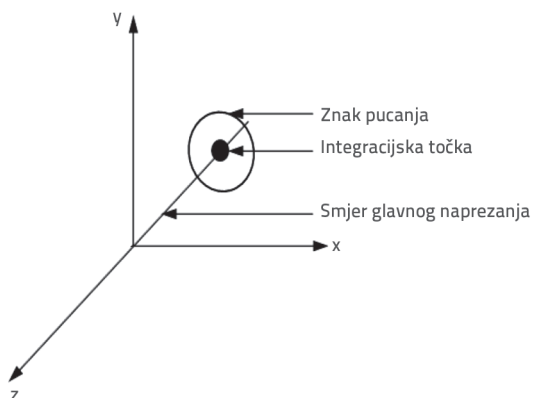


Slika 12. Raspored naprezanja različitih modela greda: g) SF0.5L3: Prvo glavno naprezanje, σ_1 ; h) SF0.5L3: Treće glavno naprezanje, σ_3 ; i) SF0.5L5: Prvo glavno naprezanje, σ_1 ; j) SF0.5L5: Treće glavno naprezanje, σ_3 ; k) SF1.0L3: Prvo glavno naprezanje, σ_1 ; l) SF1.0L3: Treće glavno naprezanje, σ_3 ; m) SF1.0L5: Prvo glavno naprezanje, σ_1 ; n) SF1.0L5: Treće glavno naprezanje, σ_3 ; o) SF1.5L3: Prvo glavno naprezanje, σ_1 ; p) SF1.5L3: Treće glavno naprezanje, σ_3 ; q) SF1.5L5: Prvo glavno naprezanje, σ_1 ; r) SF1.5L5: Treće glavno naprezanje, σ_3

3.4.3. ANSYS simbol pucanja

Slika 13. prikazuje simbol pucanja betonskog modela ANSYS poput kruga okomito na smjer glavnog naprezanja, a pucanje pokazuje kada se vlačno naprezanje betona povećava iznad krajnje vlačne čvrstoće.

Slika 14. prikazuje tipični krug pucanja u tri različite ravnine, formiran na integracijskim točkama s tri različite boje (ili stupnja) kao što su crvena, zelena i plava, preko prve, druge i treće pukotine, tim redom. Nakon dostizanja treće faze (tj. formiranja višestrukih pukotina), elementi povezani u SOLID65 bit će isključeni, a model betonskog materijala pokazat će ponašanje omekšavanja u svim smjerovima. Tri moguće vrste formiranja pukotina (jedna polovica grede RB prikazana na slici 14.), modelirane pomoću računalnog programa ANSYS, opisane su u nastavku.

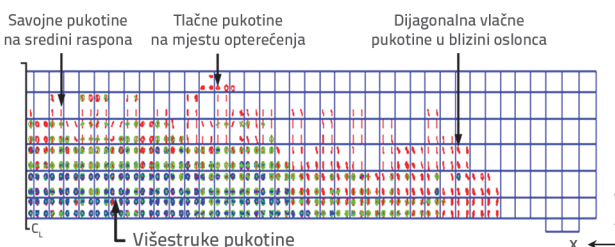


Slika 13. ANSYS simbol pucanja

Savojne pukotine: Kada se glavna vlačna naprezanja javljaju duž osi grede, ova vrsta pukotine pretežno se razvija i širi od početka prve pukotine. Znak pucanja u krugovima pojavljuje se poput okomitih linija (vidi sliku 14.) duž duljine grede ako glavna naprezanja prelaze vlačnu čvrstoću betona. Te linije

predstavljene kao ‘savojne pukotine’ nastale su na mjestu integracije SOLID65 elemenata.

Tlačne pukotine: Općenito, znak tlačne vrste pukotina pojavljuje se kao krug duž modela grede ispod točaka opterećenja na integracijskim točkama u betonskim elementima, kao što je prikazano na slici 13. U početku se pukotina razvija i širi u smjeru vanjskog opterećenja (F). Tada su se zbog Poissonovog efekta u elementima naknadno razvile vlačne deformacije [33, 34]. Slično se ponašanje ostvaruje u ovoj analizi budući da je opterećenje primijenjeno po širini grede što rezultira vlačnim naprezanjem koje se razvija po dubini grede. Pukotina se pojavljuje poput kruga (vidi sliku 14.) po duljini grede, označena kao tlačna pukotina.

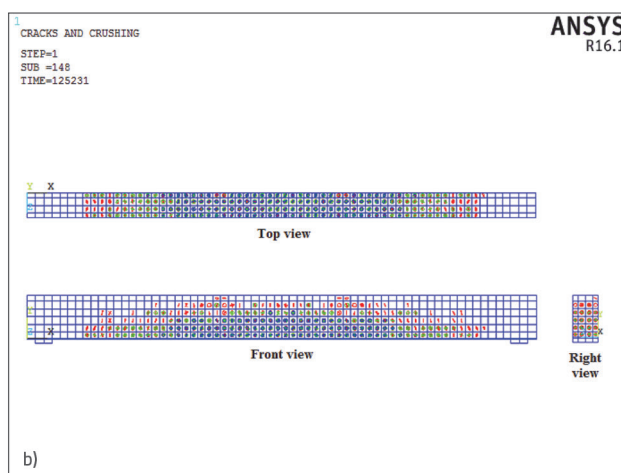
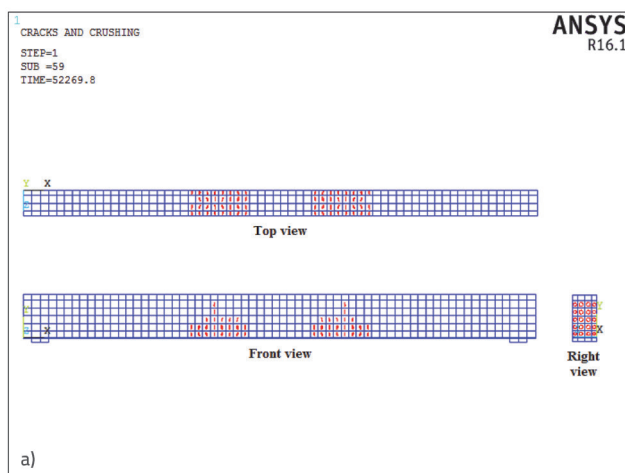


Slika 14. Tipični simboli pukotina u ANSYS modelu grede

Vlačne pukotine: Općenito, normalno vlačno naprezanje razvija se duž osi grede (tj. u smjeru x), a posmično naprezanje se razvija okomito na os grede (tj. u ravnini xz). Primjećuje se ‘nagnuta linija’ znakova pucanja (vidi sliku 14.) ako vlačna i posmična naprezanja koja zajedno djeluju na betonske SOLID65 elemente kao rezultat glavnih vlačnih naprezanja izgledaju nagnuta ako premašuju vlačnu čvrstoću betona u točki integracije SOLID65 elemenata. Nagnuta linija simbola pukotine naziva se dijagonalna vlačna pukotina.

3.4.4. Uzorak središta pukotine

Uz prije navedene tipove pukotina, ANSYS također predviđa tri različite vrste pukotina istovremeno na svakom potkoraku



Slika 15. Uzorci središta pukotine SF1.5L5 modela grede u različitim stadijima; a) Stadij prve pukotine; b) Krajnji stadij

od nastanka prve pukotine do krajnje faze sloma, što je predstavljeno s tri različite boje: crvenom, zelenom i plavom (vidi sliku 14.). Crvena, zelena i plava označavaju prvu, drugu i treću pukotinu. O tome slijedi rasprava i istaknuti zaključci. Čini se da je "prva pukotina" svih modela grede nastala ispod točaka područja opterećenja u vlačnoj zoni grede. Navedeno ponašanje također je vizualno potvrđeno tijekom ispitivanja. U sljedećim podkoracima, 'pukotine savijanjem' razvijaju se dalje prema sredini raspona i posmičnom rasponu modela grede. Duljina pukotine također se širi prema tlačnoj zoni grede. Gornji razvoj i širenje pukotina slični su opažanjima tijekom eksperimentalnih istraživanja. Nekoliko 'tlačnih pukotina' i 'dijagonalnih vlačnih pukotina' formirano je u blizini točaka opterećenja, odnosno u posmičnom rasponu grede u krajnjoj fazi. Nadalje, najveći broj višestrukih savojnih pukotina također se formirao u sredini raspona. Navedeni smjer razvoja sličan je opažanjima tijekom eksperimentalnih istraživanja. Predviđeno stvaranje pukotine i njezino širenje na gredi SF1.5L5 u fazi prve pukotine i krajnjoj fazi prikazani su na slici 15. Slika prikazuje višestruke pukotine u najviše napregnutim vlaknima grede u krajnjoj fazi, tako da može postojati mogućnost odvajanja zaštitnog sloja betona ili odljepljivanja laminata od betonske površine zbog prevelike koncentracije savojnih pukotina na krajnjoj vlačnoj plohi grede.

3.5. Usporedba s normom

S obzirom na konstrukcijsku sigurnost i zahtjeve za upotrebljivost, norma IS 456 odredba 35.3.2 [35] preporučuje da širina površinske pukotine općenito ne bi trebala prelaziti 0,3 mm. Iz navedene perspektive, eksperimentalno dobivena širina pukotine svih GFRP-om pojačanih FRC greda u fazi popuštanja je unutar preporučene vrijednosti. Štoviše, maksimalna širina pukotine grede SF1.5L5, čak i u krajnjoj fazi, pokazuje blisko pridržavanje odredbi norme (vidi tablicu 4.).

4. Zaključak

Zaključci su izvedeni na temelju rezultata i prikazanih uvida eksperimentalnih i numeričkih istraživanja GFRP-om pojačanih greda od betona armiranog čeličnim vlaknima s kukastim krajem.

Širina pukotina AB greda pojačanih GFRP-om smanjuje se s povećanjem debljine laminata u odnosu na nepojačanu AB (kontrolnu) gredu. Maksimalno smanjenje širine pukotine pojačanih AB greda u odnosu na kontrolnu gredu (bez GFRP pojačanja) pri opterećenju prve pukotine iznosi oko 14 % i 29 %, a pri opterećenju popuštanja oko 27 % i 32 % za 3 mm, odnosno 5 mm. Međutim, u krajnjoj fazi, maksimalno smanjenje je samo oko 7 % odnosno 10 % za 3 mm odnosno 5 mm u odnosu na kontrolnu gredu. To pokazuje da je uloga koju ima laminacija do

faze popuštanja visoka s obzirom na širinu pukotine. Smanjenje širine pukotine 5 mm laminiranih FRC greda pri $V_f = 1,5 \%$ u odnosu na kontrolnu gredu je oko 71 %, 63 % i 44 %. Pokazuje 'kombinirani učinak' u smanjenju širine pukotina laminiranih FRC greda. Taj je učinak uvijek značajan i vrlo visok u svim fazama. Ovaj fenomen ima veliku prednost s aspekta duktilnosti konstrukcijskog elementa, a time i konstrukcije.

- Tri tipična načina sloma u ovom istraživanju uključuju drobljenje betona, odvajanje laminata i vlačni slom laminata. Kontrolna greda otkazuje drobljenjem betona u tlačnoj zoni kojoj prethodi popuštanje čelika, dok su u GFRP-om pojačanim FRP gredama, vlačni slom i/ili odvajanje bili tipični načini sloma uočeni kako je navedeno u literaturi, u skladu s uobičajenim i karakteriziranim modovima sloma.
- U kontekstu eksperimentalnih rezultata s numeričkom validacijom rezultata, softver temeljen na FEA ima sposobnost predviđanja stvaranja pukotina u različitim fazama modela AB greda. Predviđanja stvaranja i širenja pukotina u različitim fazama i vrstama pukotina u modelima AB greda eksplicitno su se dobro slagala s eksperimentom.
- Holističko ponašanje izvana pojačanih AB greda pomiješanih s 3D čeličnim vlaknima s kukastim krajevima daje realističnu i održivu metodu u kontekstu konstrukcijskog pojačanja. Međutim, potrebna su daljnja istraživanja u pogledu dugotrajne učinkovitosti betonskih greda pojačanih GFRP-om radi poboljšanja metode pojačanja.

Nazivlje

3D - trodimenzionalno

F - funkcija stanja glavnog opterećenja (σ_{xp} , σ_{yp} , σ_{zp})

V_f - ukupan volumen frakcije vlakana

f_1 - krajnja tlačna čvrstoća za stanje dvoosnog tlaka superponirana preko stanja hidrostatskog naprezanja

f_2 - krajnja tlačna čvrstoća za stanje jednoosnog tlaka superponirano preko stanja hidrostatskog naprezanja

f_c - krajnja jednoosna čvrstoća betona na tlačnu čvrstoću/drobljenje

f_{cb} - krajnja dvoosna tlačna čvrstoća betona

f_t - krajnja jednoosna vlačna čvrstoća betona

s - površina sloma izražena s obzirom na glavna opterećenja i pet ulaznih parametara f_t , f_c , f_{cb} , f_1 , f_2

σ_h^a - stanje hidrostatskog naprezanja okoline

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - najveća, srednja i minimalna glavna naprezanja

σ_{xp} , σ_{yp} , σ_{zp} - naprezanja u glavnim pravcima x, y, z, redom

Zahvala

Zahvaljujemo na osiguranim prostorima i proširenoj suradnji za provođenje ovog istraživačkog rada na Odsjeku za građevinarstvo, Pondicherry Engineering College, Pondicherry, Indija.

LITERATURA

- [1] Tarafder, N., Swain, R.: Durability and case study of fiber reinforced polymer (Frp), *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13 (2016) 6, pp. 53-62, <https://doi.org/10.9790/1684-1306035362>
- [2] Amrana, Y.H.M., Alyousef, R., Rashid, R.S.M., Alabduljabbar, H., Hung, C.C.: Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review, *Structures*, 16 (2018), pp. 208-238, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.008>
- [3] Ibrahim, S.S., Eswari, S., Sundararajan, T.: Behaviour of hybrid fibre reinforced concrete beams strengthened with GFRP laminates, *Structural Engineering and Mechanics*, 66 (2018), pp. 631-636, <https://doi.org/10.12989/sem.2018.66.5.631>
- [4] Abbood, I.S., Odaa, S.A., Hasan, K.F., Jasim, M.A.: Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures – A review, *Materials Today: Proceedings*, 43 (2021), pp.1003-1008, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.636>
- [5] Cvetanovska, G.N., Roshi, A., Bojadjeva, J., Bojadjevi, J., Trajcevski, Z.: Quasi-static tests on RC building columns strengthened with CFRP, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 8, pp. 805-818, <https://doi.org/10.14256/JCE.3087.2020>
- [6] Cvetanovska, G.N., Roshi, A., Bojadjevi, J., Bojadjeva, J., Trajcevski, Z.: Performance of CFRP-confined concrete cylinder specimens - laboratory study, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 2, pp. 95-104, <https://doi.org/10.14256/JCE.3020.2020>
- [7] Vivekanandan, R., Karmegam, A.: Failure analysis of hybrid strengthened RC square column, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024) 1, pp. 25-34, <https://doi.org/10.14256/JCE.3837.2023>
- [8] Aravind, N., Samanta, A.K., Roy, D.K.S., Thanikal, J.V.: Retrofitting of reinforced concrete beams using fibre reinforced polymer (FRP) composites – A review, *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7 (2013), pp.164-175, <https://doi.org/10.4090/juee.2013.v7n1.164175>
- [9] Abid, A.L.: Critical review of strength and durability of concrete beams externally bonded with FRP, *Cogent Engineering*, 5 (2018), 1-27, <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1525015>
- [10] Siddika, A., Al-Mamun, M.A., Alyousef, R., Amran, Y.H.M.: Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review, *Journal of Building Engineering*, 25 (2019), 100798, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100798>
- [11] Demir, A., Ince, Y., Altok, T.Y.: Experimental and numerical investigation of RC beams strengthened with CFRP composites, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 6, pp. 605-616, <https://doi.org/10.14256/JCE.3051.2020>
- [12] Kang, T.H.K., Howell, J., Kim, S., Lee, D.J.: A state-of-the-art review on debonding failures of FRP laminates externally adhered to concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6 (2012), pp. 123-134, <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0012-1>
- [13] Danraka, M.N., Mahmud, H.M., Oluwatosin, O.J.: Strengthening of reinforced concrete beams using FRP technique: A review, *International Journal of Engineering Science and Computing*, 7 (2017) 6, pp. 13199-13213.
- [14] Ibrahim, S.S., Kandasamy, S., Subashchandrabose, R., Baskar, S., Madhava, V.: Performance enhancement of externally bonded reinforced concrete beams with 3D hooked-end steel fibres". *Case Studies in Construction Materials*, 17 (2022), pp01181, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01181>
- [15] Wypych, G.: Mechanisms of Adhesion Loss, *Handbook of Adhesion Promoters*, Elsevier B.V., 2018.
- [16] Zhang, Z., Xiao, Y., Zhuge, P., Zhang, X.: Experimental investigation on the interfacial debonding between FRP sheet and concrete under medium strain rate, *Hindawi International Journal of Polymer Science*, (2019), pp. 1973453, <https://doi.org/10.1155/2019/1973453>
- [17] Al-Saawania, A.M., El-Sayed, K.A., Al-Negheimish, I.A.: Assessment of plate-end debonding design provisions for RC beams strengthened with FRP, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 17 (2020) 2, e255 1/18, <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/1679-78255920>
- [18] Gribniak, V., Tamulenas, V., Ng, P.N., Arnautov, A.K., Gudonis, E., Misiunaite, I.: Mechanical behavior of steel fiber-reinforced concrete beams bonded with external carbon fiber sheets, *Materials*, 10 (2017), pp. 1-18, <https://doi.org/10.3390/ma10060666>
- [19] Abbass, A., Abid, S., Ozakça, M.: Experimental investigation on the effect of steel fibers on the flexural behavior and ductility of high-strength concrete hollow beams, *Advances in Civil Engineering*, 2019 (2019), pp. 1-13, <https://doi.org/10.1155/2019/8390345>
- [20] Markić, T., Amin, A., Kaufmann, W., Pfyl, T.: Strength and deformation capacity of tension and flexural RC members containing steel fibers, *Journal of Structural Engineering*, 146 (2020), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002614](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002614)
- [21] Sharaky, I.A., Eldin, H.K.S., Shehata, M.M., Mohamed, H.: Flexural response of RC beams cast with normal and steel fibre concrete internally reinforced with various types of FRP bars, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 12, pp. 1117-1130, <https://doi.org/10.14256/JCE.3009.2020>
- [22] Gribniak, V., Arnautov, A.K., Norkus, A., Tamulenas, V., Gudonis, E., Sokolov, A.: Experimental investigation of the capacity of steel fibers to ensure the structural integrity of reinforced concrete specimens coated with CFRP sheets, *Mechanics of Composite Materials*, 52 (2016), pp. 401-410, <https://doi.org/10.1007/s11029-016-9592-1>
- [23] Ali, A., Iqbal, S., Holschemacher, K., Bier, T.A.: Comparison of flexural performance of lightweight fibre reinforced concrete and normal weight fibre reinforced concrete, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61 (2017), pp. 498-504, <https://doi.org/10.3311/PPci.8858>
- [24] Mohajerani, A., Hui, S.Q., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Kadir, A.A., Rahman, M.T., Maghool, F.: Amazing types, properties, and applications of fibres in construction materials, *Materials*, 12 (2019), pp.1-45, <https://doi.org/10.3390/ma12162513>
- [25] Kytinou, V.K., Chalioris, C.E., Karayannis, C.G., Elenas, A.: Effect of steel fibers on the hysteretic performance of concrete beams with steel reinforcement-tests and analysis, *Materials*, 13 (2020), pp. 1-32, <https://doi.org/10.3390/ma13132923>
- [26] IS 1489-Part I: Specification for Portland Pozzolana Cement, Part 1: Flyash Based, New Delhi, India, 1991.
- [27] IS 2386-Part III: Methods of Test for Aggregates for Concrete, Part 3: Specific Gravity, Density, Voids, Absorption and Bulking, New Delhi, India 1963.
- [28] IS 383: Specification for Coarse and Fine Aggregates from Natural Sources for Concrete, New Delhi, India, 1970.
- [29] IS 9103: Specification for Concrete Admixtures, New Delhi, India, 1999.
- [30] IS 10262: Concrete Mix Proportioning, New Delhi, India, 2009.
- [31] IS 516: Methods of Tests for Strength of Concrete, New Delhi, India, 1959.
- [32] IS 5816: Method of Test Splitting Tensile Strength of Concrete, New Delhi, India, 1999.
- [33] SAS: Finite Element Analysis System, ANSYS Release 16.1, © SAS IP, Inc., 2015.
- [34] Dahmani, L., Khennane, A., Kaci, S.: Crack identification in reinforced concrete beams using ANSYS software, *Strength of Materials*, 42 (2010) 2, pp. 232- 240.
- [35] IS 456: Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice [CED 2: Cement and Concrete], New Delhi, India, 2000.