Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano-betonske grede

Lubina, Mirjana

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:073551

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split







SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Mirjana Lubina

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Mirjana Lubina

Ispitivanje konstrukcija

Diplomski rad

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Mirjana Lubina

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

Diplomski rad

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: **Mirjana Lubina**

BROJ INDEKSA: **327**

KATEDRA: **Katedra za otpornost materijala i ispitivanje konstrukcija**

PREDMET: **Ispitivanje konstrukcija**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: **Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede**

Opis zadatka: U ovom diplomskom radu potrebno je izvršiti eksperimentalna ispitivanja i numeričke analize armirano betonskih greda ojačanih karbonskim trakama različite duljine u donjoj, vlačnoj, zoni. Za tu svrhu potrebno je napraviti tri armirano betonske grede jednakih dimenzija, jednako armirane i izrađene od istog betona. Armirano betonske grede trebaju biti izrađene dimenzija 100 x 20 x 10 centimetara. Jednu gredu treba ostaviti neojačanu, drugu treba ojačati karbonskim trakama po cijeloj duljini (100 cm) dok treću treba ojačati samo u srednjem dijelu (50 cm odnosno po 25 cm od sredine sa svake strane). S poznatim svojstvima materijala (ako ih se ne zna, treba ih odrediti na odgovarajući način) provesti numeričke proračune pomoću računalnog programa Scia Engineer 2014. Eksperimentalna ispitivanja treba, u sva tri slučaja, provesti do sloma pri čemu treba izmjeriti sile nosivosti i progibe kao i nacrtati odgovarajuće sila-pomak dijagrame. Na kraju treba usporediti dobivene numeričke i eksperimentalne rezultate te izvući odgovarajuće zaključke.

U Splitu, 04. ožujka, 2016.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof. dr. sc. Pavao Marović

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:

Prof. dr. sc. Ivica Boko

Zahvaljujem se svom mentoru prof .dr.sc. Pavlu Maroviću na strpljenju, velikoj pomoći i vodstvu tijekom izrade ovog rada.

Hvala svima profesorima i asistentima koji su mi pomagali tijekom studija.

Također hvala djelatnicima labaratorija IGH PC Split dr.sc. Elici Marusić dipl.ing.građ., Tinu Dragovicu dipl.ing. građ., te vlasniku i djelatnicima labaratorija Ante-inženjerstvo iz Zmijavaca koji su mi pomogli u izradi ovog rada.

Hvala svim kolegicam, kolegama i prijateljima koji su bili uz mene, pomagali mi svojim znanjem,savjetima i nezaboravnim trenucima provedenim zajedno tijekom studiranja.

Hvala mojoj sestri,bratu i kumi Ani na velikoj podršci , sto su bili pravi oslonci kroz moje školovanja, ulijevali mi samopouzdanje i vjerovali u mene, zbog njih sada pišem ovaj diplomski.

Hvala mojoj svekrvi i svekru koji su mi čuvali djecu i pomagali kad mi je bilo najpotrebnije.

Največe HVALA mom suprugu Tomi koji me je pažljivo vodio kroz cijelo školovanje, bio mi podrška u najtežim trenutcima života, podizao mi samopouzdanje i vjerovao u mene. Kada bi zastala on bi mi dao snage da nastavim.

Za kraj hvala mojim prijateljicama i kolegicama s modeliranja koje su bile uz mene u trenutcima koje se nikad neće zaboravit!

Eksperimentalne i numeričke analize armirana betonskih greda s karbonskim ojačanjem

Sažetak:

U ovom diplomskom radu izvršene su numeričke i eksperimentalne analize armirano betonskih greda. Grede su istih dimenzija i armature.Jedna od greda je bez karbonskog ojačanja , a druge dvije ojačane karbonskom trakom različite duljine . Numerička analiza je provedena korištenjem računalnog paketa Scia Engineer 2016. Eksperimentalna analiza se provodila u IGH. Na kraju ovog rada je izvršena usporedba dobivenih rezultata, tablično i grafički.

Ključne riječi:

eksperimentalna analiza, prosta greda, karbon, vertikalni progib, koncentrirano opterećenje, , rubni uvjeti, numerički proračun.

Eksperimental and numerical analyses of reinforced concrete beams with carbon reinforcement

Summary:

This diploma project deals with analytical, numerical and experimental analyses of the reinforced concrete beams . The beams are the same size and armature. One of the beams is without carbon reinforcements , and the other two are with reinforced carbon strips on different lengths . Numerical analysis was made with aid of the computer programme Scia Engineer 2016. Eksperimental analysis was made in IGH . At the end of this work the obtained results were compared and discussed, in tablesheets and grafical display.

.

Keywords:

experimental analysis, simple beam,carbon, vertical displacement, concentrated load, continuous load, boundary conditions, numerical calculation.

SADRŽAJ

1. UVOD 4

1.1 Općenito o ispitivanju konstrukcija.....4

2. OPIS GREDE 8

2.1 Opis oplate greda.....8

2.2 Opis armature greda 9

2.3 Karakteristike betona od kojeg su izvedene grede 10

2.3.1 Rezultati tlačne čvrstoće uzoraka betona..... 11

2.4 Pojam, karakteristike i tehonologija izrade kompozitnih materijala..... 14

2.4.1 Korištenje kompozitnih materijala u građevinarstvu..... 19

2.4.2 Ojačanje grede G2 karbonskom trakom duljine 96 cm u donjoj zoni 21

3. NUMERIČKE ANALIZE PONAŠANJA GREDA 22

3.1 Općenito o numeričkoj analizi greda 22

3.2 Modeliranje greda pomoću računala.....22

3.2.1 Materijalne i geometrijske karakteristike 23

3.3 Opterećenje greda i njihova simulacija pomoću računala 27

3.4 Rezultati numeričke analize greda.....27

3.4.1 Progibi kao rezultat numeričke analize greda.....31

4. EKSPERIMENTALNA ANALIZA GREDA..... 36

4.1 Općenito 36

4.2 Uvod u izvršeno eksperimentalno ispitivanje 39

4.3 Priprema ispitivanja.....40

4.3.1 Simulacija rubnih uvjeta 41

4.3.2 Postavljanje uređaja za mjerenje progiba 42

4.3.3 Mjerni uređaji za mjerenje pomaka 43

4.4 Ispitivanje greda 45

4.4.1 Ispitivanje grede G1.....45

4.4.2 Rezultati ispitivanje grede G1.....47

4.4.3 Ispitivanje grede G2.....48

4.4.4 Rezultati ispitivanje grede G2.....50

4.4.5 Ispitivanje grede G3.....53

4.4.6 Rezultati ispitivanje grede G3.....55

5. USPOREDBE ANALIZE GREDA..... 58

5.1 Usporedba rezultata pomaka numeričkog ispitivanja greda G1 ,G2 i G3 58

5.2 Usporedba rezultata pomaka eksper. ispitivanja greda G1,G2 i G3 60

5.3 Usporedba rezultata pomaka numeričkog ispitivanja grede G1 i eksperimentalnog ispitivanja grede G1 63

5.4 Usporedba rezultata pomaka numeričkog ispitivanja grede G2 i eksperimentalnog ispitivanja grede G2 65

6. ZAKLJUČAK 70

7. LITERATURA 72

1. UVOD

1.1 Općenito o ispitivanju konstrukcija

Ispitivanje konstrukcija je znanstvena disciplina koja je sastavni dio modernog građevinarstvu. Svrha ispitivanja se dijeli na provjeravanje dviju funkcija tj. da li se provjeravaju nosiva svojstva pojedinih već ugrađenih komponenta ili ispitujemo da li su materijali sposobni za određenu svrhu koju trebaju obnašati u kontrukciji. Također vrlo često se ispituju i svojsta novih, još neprovjerenih materijala što se vrši u za to adekvatnim laboratorijima.

Postupak proučavanja te ispitivanja konstrukcije usmjeren je na eksperiment kojim ispitivanjem u kontroliranim uvjetima dobivamo rezultate. Laboratorijskim pokusom ili eksperimentom ispitujemo ponašanje nekog elementa ili konstrukcije na neko vanjsko djelovanje tj. možemo reći da ispitujemo pouzdanost konstrukcije. Pouzdanost je sposobnost građevine da izdrži sva predviđena djelovanja koja se javljaju pri normalnoj uporabi, te da zadrži odgovarajuća svojstva u predviđenom vremenu trajanja.

Izvođenje pokusa se može vršiti na izvornim konstrukcijama ili na modelu te je ovakve opsežne radnje potrebno pomno i detaljno organizirati u smislu definiranja onoga što se mjeri, dokumentacije, probnih opterećenja, instrumenata, osoblja i uvjeta rada. Ovisno o veličinama koje mjerimo, odnosno vrsti i namjeni konstrukcije, ispitivanje ovisi o nekoliko faktora [1]:

Fizikalna (mehanička) djelovanja: opterećenja vlastitom težinom, uporabnim opterećenjem, te izvanredna djelovanja u koje ubrajamo potres, požar, eksplozija, udar, itd.

Kemijska djelovanja: korozija, agresija plinova, agresija kemikalija, itd.

Ispitivanje konstrukcija / elemenata konstrukcija / modela konstrukcija je jedina mogućnost dobivanja pouzdanih podataka o ponašanju istog (uvid u stvarno stanje tj. ponašanje konstrukcije). Možemo reći da ispitivanjem vršimo provjeru pouzdanosti rezultata dobivenih analitičkim proračunom.

Po karakteru opterećenja, dijelimo ih na [1]:

Statičko ispitivanje: pomaci, deformacije

Dinamičko ispitivanje: vlastiti periodi, frekvencije

U ovome radu provedena su statička ispitivanja tj. ispitivanja progiba nosača izrađenog od medijapana pod raznim shemama i iznosima opterećenja.

1.2 Prikaz rada

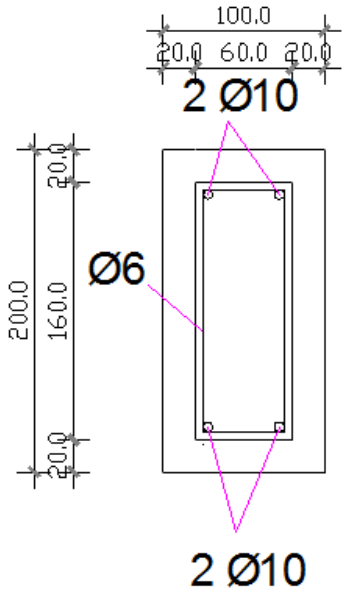
U ovom radu proučavati će se tri jednake armirano betonske grede preko jednog polja raspona 100 cm, tzv. proste grede.

Sve tri grede su izrađene od armiranog betona klase C 25\30 te su istih dimenzija. Armatura greda su 2ϕ10 mm u gornjoj zoni, te 2ϕ10 mm u donjoj zoni, te vilice ϕ6mm na razmaku od 20 cm. Razlika između greda je u tome što su dvije od greda u donjoj zoni ojačane karbonskom trakom u cilju povećanja nosivosti. Jedna od greda je ojačana karbonskom trakom od 50 cm, a druga karbonskom trakom duljine 96cm.

Opterećenje greda je u obliku koncentrirane sile na polovini raspona grede. Ispitat će se potrebne sile koje će dovesti grede do sloma, eksperimentalnom i numeričkom metodom, te će se usporediti nosivost armirano betonske greda bez ojačanja i armirano betonske greda ojačane s 50 cm dugom karbonskom trakom, te 96 cm dugom karbonskom trakom.

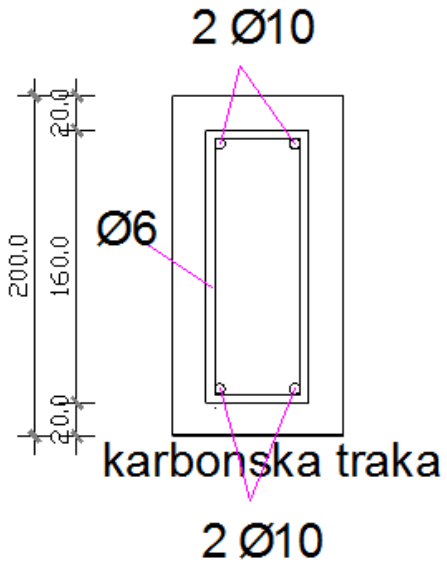
Za ojačanje karbonskom trakom koristiti će se karbonske trake sustava Carboniar, te epoxy smola proizvođača YACHTCARE.

Greda G1 izrađena je od armiranog betona poprečnog presjeka dimenzija: b = 100 mm, h = 200 mm, L= 1000 mm (vidi Crtež 1.1).



Crtež 1.1. Poprečni presjek grede G1

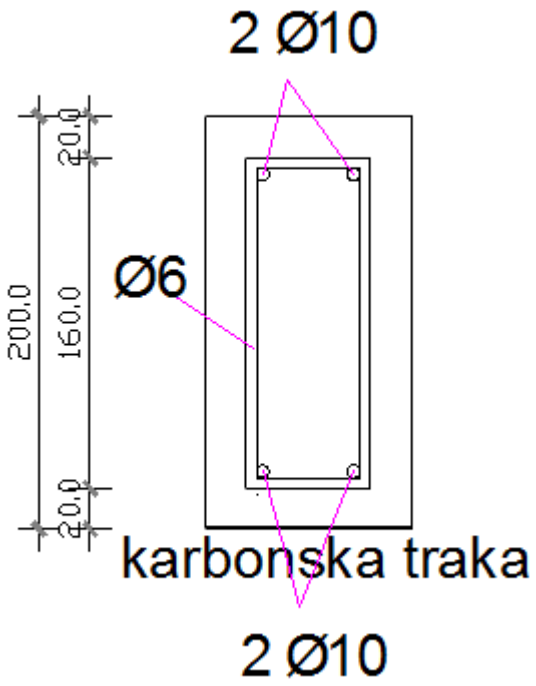
Greda G2 izrađena je od armiranog betona poprečnog presjeka dimenzija: b = 100 mm, h = 200 mm, L=1000 mm (jednakih dimenzija kao i greda G1) s time da je s donje strane nalijepljena karbonska traka širine 100 mm , debljine 2 mm i duzine 96 cm (vidi Crtež 1.2).



Crtež 1.2. Poprečni presjek grede G2

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

Greda G3 izrađena je od armiranog betona poprečnog presjeka dimenzija: b = 100 mm, h = 200 mm, L=1000 mm (jednakih dimenzija kao i greda G1 i G2) s time da je s donje strane nalijepljena karbonska traka širine 100 mm , debljine 2 mm i duzine 50 cm (vidi Crtež 1.3).



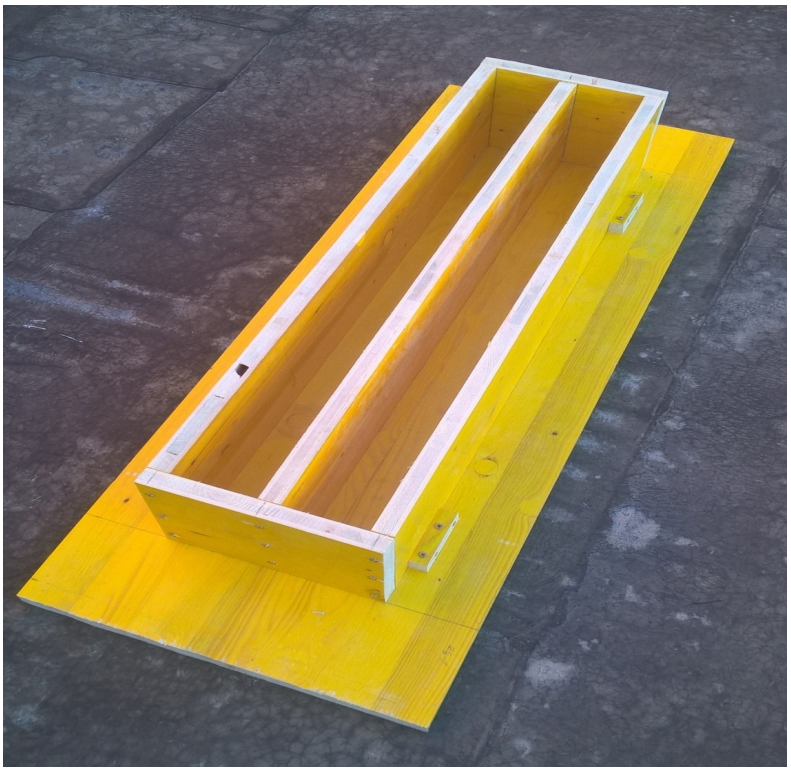
Crtež 1.3. Poprečni presjek grede G3

Kod nanošenja opterećenja na grede, korištena je shema opterećenja, i to djelovanje koncentrirane sile na sredini raspone grede. Shema opterećenja će biti prikazana prilikom objašnjenja provođenja samog ispitivanja greda.

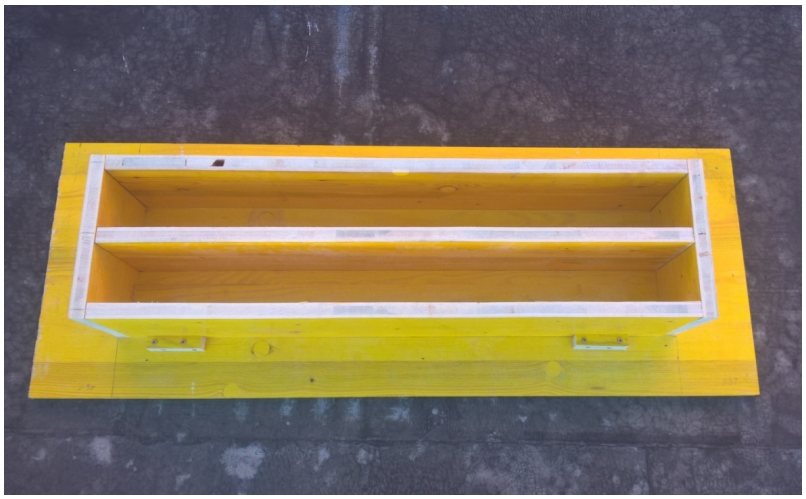
2. OPIS GREDE

2.1 Opis oplate greda

Oplata greda G1 ,G2 i G3 napravljena je od vodootporne šperploče debljine 2,7 cm, te učvršćena čeličnim vijcima kao što se vidi na Fotografijama 2.1 i 2.2.



Fotografija 2.1. Oplata greda G1, G2 i G3



Fotografija 2.2. Oplata greda G1, G2 iG3

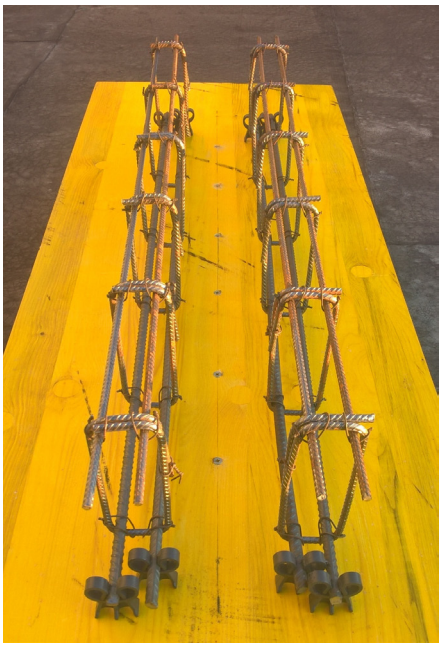
2.2 Opis armature greda

Grede G1, G2 i G3 su jednako armirane. Korišten je čelik B 500 B.

Armature greda G1, G2 i G3 su 2ϕ10 mm u gornjoj zoni, 2ϕ10 mm u donjoj zoni, te vilice ϕ6 mm na razmaku od 20 cm kao što se vidi na Fotografijama 2.3 i 2.4.



Fotografija 2.3. Armatura greda G1, G2 i G3



Fotografija 2.4. Armatura greda G2 , G2 i G3

Na Fotografiji 2.4 su vidljivi plastični distanceri koji služe da bi armatura bila na pravilnoj udaljenosti od oplate.

2.3 Karakteristike betona od kojeg su izvedene grede

Receptura kao i sami beton za navedene grede su napravljeni u Građevinskom labaratoriju ***Ante- inženjerstvo d.o.o.*** u Zmijavcima kod Imotskog (Fotografija 2.5).

Kako bi se postigla tražena tlačna čvrstoća betona (f_{cc}) C 25/30, zamiješan je agregat maksimalnog promjera zrna d<16 mm, te količina od 320 kg cementa na 1 m^3 betona, uz odgovarajuću količinu vode.

Prilikom izvođenja greda, uzeta su 2 uzorka kako bi se naknadno provjerile karakteristike upotrebljenog betona (Fotografija 2.5).

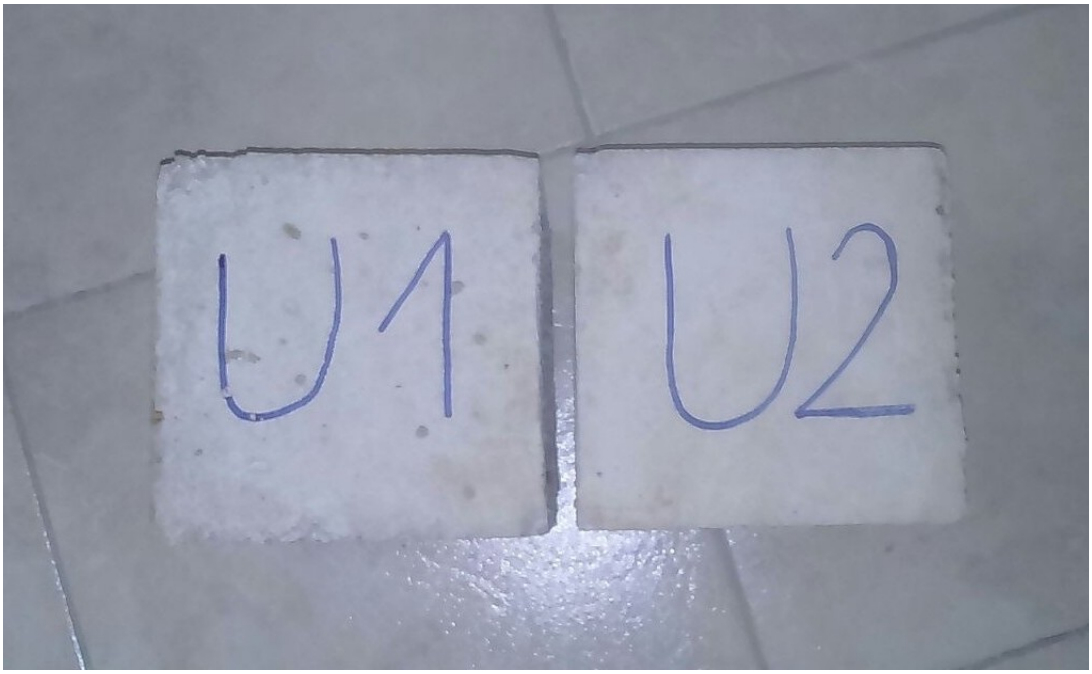


Fotografija 2.5. Grede i uzorci za ispitivanje nedugo nakon izvođenja

2.3.1 Rezultati tlačne čvrstoće uzoraka betona

Uzorci betona dimenzija 15 x 15 x 15 cm uzeti prilikom betoniranja greda označeni su kao uzorci U1 i U2 (Fotografija 2.6).

Nakon 48 sati od betoniranja, uzorci su izvađeni iz kalupa te potopljeni u vodu temperature 20 ±2^{o}C gdje su ostali do ispitivanja. Ispitivanje je provedeno 28. dan od dana betoniranja uzoraka.



Fotografija 2.6. Uzorci U1 i U2 označeni za ispitivanje

Ispitivanje tlačne čvrstoće betonskih kocaka provedeno je na preši proizvođača Tecnotest Modena – Italy (Fotografija 2.7). Maksimalna sila koju preša može proizvesti je 3000 kN. Rezultati dobiveni ispitivanjem kocaka su prikazani u Tablici 2.1.

Oznaka uzorka	Sila loma (kN)	Tlačna čvrstoća (N/mm^2)
U1	716.0	31.82
U2	785,9	34,92

Tablica 2.1. Rezultati dobiveni ispitivanjem uzoraka U1 i U2



Fotografija 2.7. Uzorci U1 prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće

Na Fotografiji 2.7 je prikazan slom uzorka U1 prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće betona. U tablici 2.1 može se očitati sila loma .

Srednja vrijednost tlačne čvrstoće postignuta ovim ipitivanjem je zadovoljila zahtjevanu tlačnu čvrstoću betona iznosa 30 (N/mm^2).

Rezultati ispitivanja uzoraka U1 i U2 su vidljivi u izjavi o izvršenom ispitivanju na Fotografiji 2.8.

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

GRAĐEVINSKI LABORATORIJ
Ante-inženjerstvo d.o.o.
Petra Krešimira 19 ; 21266 Zmijavci
web: www.ante-inzenjerstvo.hr ; e-mail: info@ante-inzenjerstvo.hr
tel. 021/840-615 / fax:021/552-157 ; mob. 099/2840-615

17025·HAA 1457

IZJAVA O IZVRŠENOM ISPITIVANJU

Građevinski laboratorij Ante-inženjerstvo d.o.o. izdaje izjavu o izradi armirano-betonskih elemenata i ispitivanju tlačne čvrstoće ugrađenog betona prema HRN EN 12390-3.

Izrada elemenata i ispitivanje tlačne čvrstoće betona izvršena je na zahtjev Mirjane Lubina. Armirano-betonski elemenati su izrađeni za potrebe usporednog ispitivanja vlačne čvrstoće elemenata sa i bez ojačanja karbonskim vlaknima vlačne zone (tema diplomskog rada).

Beton je izrađen prema recepturi za beton klase C 25/30, razreda konzistencije S3, razreda izloženosti XC2, sadržaja klorida Cl=0,20 i maksimalne veličine zrna agregata D_{max} = 16mm. Korišten je portland cement, proizvođača Cemex oznake CEM II/B-M 42,5 N/mm^2. Korištena je količina od 320 kg/m^3, a vodocementni faktor je iznosio v/c = 0,54.

Betoniranje elemenata izvršeno 20.05.2016. u laboratoriju tvrtke Ante-inženjerstvo d.o.o. te su uzeti uzorci betona za ispitivanje tlačne čvrstoće očvrslog betona. Armirano-betonski elementi su dimenzija 10x20x100 cm (3 komada), a uzeti uzorci su standardnih dimenzija 15x15x15 cm (2 uzorka).

Nakon betoniranja elementi su njegovani u laboratorijskim uvjetima, te su nakon 48 sati stavljeni u bazen za njegovanje uzoraka u vodi pri temperaturi vode 20°C, gdje su bili njegovani do preuzimanja.

Uzorci betona su označeni jednoznačnim oznakama U-1 i U-2. Ispitivanje uzoraka U-1 na tlačnu čvrstoću provedeno je 17.06.2016. to jest nakon 28 dana starosti, a uzorka U-2 01.07.2016. to jest nakon 42 dana starosti odnosno na dan ispitivanja armirano-betonskih elemenata.

Ispitivanje je vršeno prema HRN EN 12390-3. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Prikaz rezultata ispitivanja

Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka (mm)			Masa uzorka (kg)	Sila loma (kN)	Tlačna čvrstoća (N/mm^2)
U-1	150,0	149,9	150,2	7,722	716,0	31,82
U-2	150,1	149,8	150,4	7,695	785,9	34,92
SREDNJA VRIJEDNOST:	**150,05**	**149,85**	**150,3**	**7,709**	**750,95**	**33,37**

Izjava služi kao dokaz o izvršenim ispitivanjima i dobivenim rezultatima.

za Ante-inženjerstvo d.o.o.

Ante Puljić ing.građ.

GRAĐEVINSKI LABORATORIJ ANTE-INŽENJERSTVO d.o.o. ZMIJAVCI

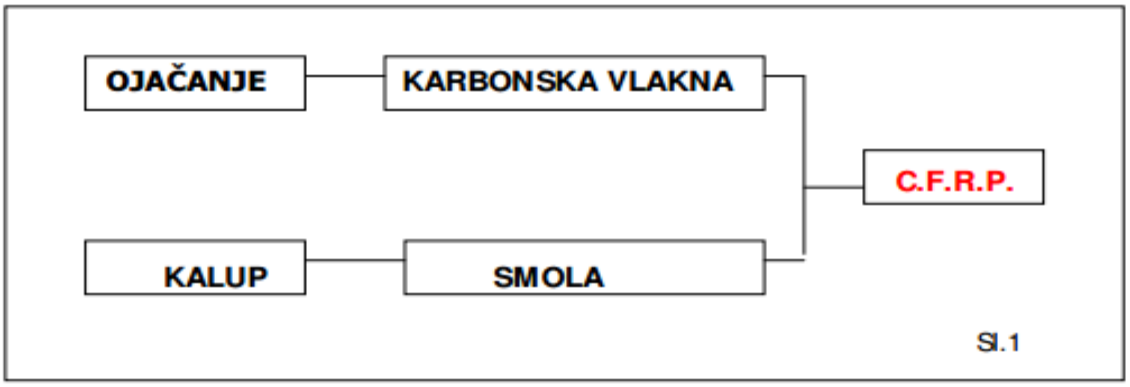
U Zmijavcima, 01.07.2016.

Fotografija 2.8. Izjava o izvršenom ispitivanju uzoraka betona

2.4 Pojam, karakteristike i tehonologija izrade kompozitnih materijala

Kompozitni materijali općenito

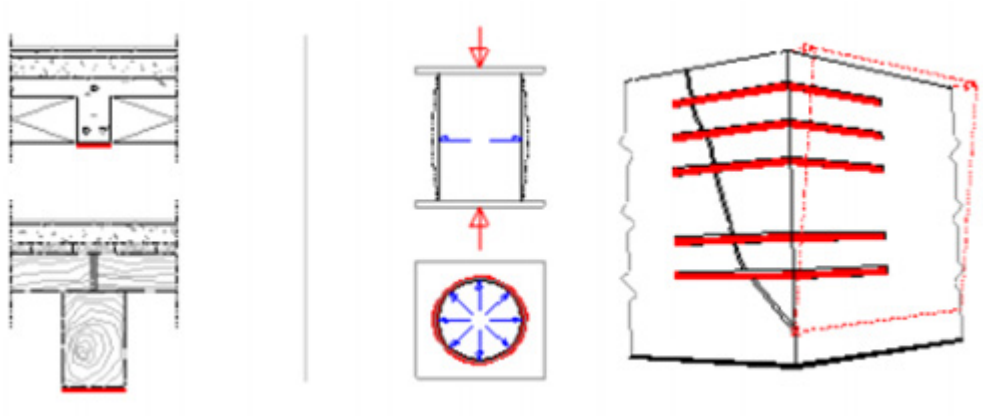
Pojam ″kompozitni″ predstavlja svaki materijal u kojemu se jedan ili više nestalnih oblika, općenito sastavljeni od materijala izvanrednih mehaničkih karakteristika, stapaju u jedan stalni oblik. Stari Egipćani su izrađivali kompozitne cigle miješajući glinu i slamu. Kompoziti, o kojima se ovdje govori su plastični materijali ojačani karbonskim vlaknima, poznati kao CFRP (Carbon Fibers Reinforced Polymers) (Crtež 2.1). Vlakna su ojačavajuća komponenta, a smola redistribuira sile uzrokovane vanjskim naponom. Rezultat je materijal koji sjedinjuje veliku čvrstoću i krutost s iznimnom lakoćom i trajnošću, a CFRP je zaista otporan na koroziju. CFRP je u uporabi u avioindustriji više od 30 godina, a u građevinarstvu zadnjih 10 godina.



Crtež 2.1.

Karbonska vlakna

Karbonska vlakna se proizvode oksidacijom, karbonizacijom i grafitizacijom na visokim temperaturama sirovih materijala s visokim sadržajem karbona, kao što su katranska smola, celuloza ili poliakrilnitrat (PAN). Varijacijom temperature od 2600°C do 3000°C tokom procesa grafitizacije mogu se dobiti vlakna velike čvrstoće (HS) ili vlakna visokog modula elastičnosti (HM). FRP kompoziti koji su bazirani na karbonskim vlaknima su obično označeni kao CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)(Crtež 2.2).



Crtež 2.2. Osnovni Carboniar sisitem

Karbonska vlakna imaju visoke mehaničke karakteristike u pravcu vlakana i znatno niže u poprečnom pravcu (anizotropno ponašanje). Ova vlakna imaju suštinski krto ponašanje s relativno niskom absorpcijom energije, pa ipak njihova otpornost na zamor je veća u usporedbi sa staklenim i aramidnim vlaknima. Koeficijent toplinskog širenja karbonskih vlakana je negativan, što ih čini dimenzionalno stabilnim. Osnovne prednosti karbonskih vlakana su odnos između čvrstoće i težine, odlična trajnost i dobra deformabilna svojstva. Glavni ograničavajući faktor za primjenu karbonskih vlakana je njihova cijena.

Karbonska vlakna imaju nekoliko iznimnih karakteristika kao što su:

a) izvrsno ponašanje pri seizmičkim djelovanjima,

b) iznimno malen zamor materijala,

c) izvrsna kemijska otpornost na otapala, kiseline te baze,

d) elastično linearno ponašanje do loma.

CFRP materijali mogu se dobiti kroz dva različita procesa:

prvi oblikuje vlakna i smolu u tvornici pod visokim tlakom i vrućim izvlačenjem te nudi uglavnom samo jednosmjerne lamele preko 1 mm debljine,

drugi koristi karbonska vlakna tkana kao trake ili platna, s jedinom razlikom u njihovoj širini, ne impregnirana sa smolom, stoga suha, što dopušta proizvodnju kompozitnog materijala na mjestu ugradbe, a ne u nekoj udaljenoj tvornici.

Drugi proces koristi karbonska vlakna kao ojačanje te posebno formuliranu epoksidnu smolu kao kalup. Ojačavajuća komponenta u ovom sustavu je suha traka ili platno karbonskih vlakana, koje drži na okupu minimalni broj transverzalnih staklenih vlakana, savršeno savitljivo, s mogućnošću impregnacije, te prilagodljivo bilo kojem obliku. Ovaj sistem može se prilagoditi širini strukturalnog elementa, smanjujući debljinu ojačanja, a zadržavajući iznos otpora.

Karakteristike i mehanička svojstva standarda karbonskih vlakana

Ovaj sustav ojačanja nudi:

minimalno dodavanje težine (obično manje od 1% težine same strukture),

minimalnu debljinu (oko 1 mm),

reverzibilnost procesa, budući je moguće ukloniti ojačanje, te ponovno izvesti novo,

veliku otpornost u vlažnom okruženju, čak do 100 %, jer karbonska vlakna, za razliku od drugih sintetičkih vlakana minimalno apsorbiraju vlagu,

kemijski inertna smola, koja proizvodi ambijent ph>13, pomaže u pasiviziranju čeličnih šipki u betonu,

znatno smanjeno vrijeme za obnovu, te kasniju uporabu,

mogućnost dozvoljavanja pristupa, u većini slučajeva, još za trajanja radova,

izvrsnu kemijska otpornost, naročito u lužnatom ambijentu,

minimalna zavisnost od različitih higroskopskih uvjeta za vrijeme aplikacije.

Otporna komponenta standardnih karbonskih vlakana spojenih u suhe trake pokazuje slijedeća svojstva (Crtež 2.3.):

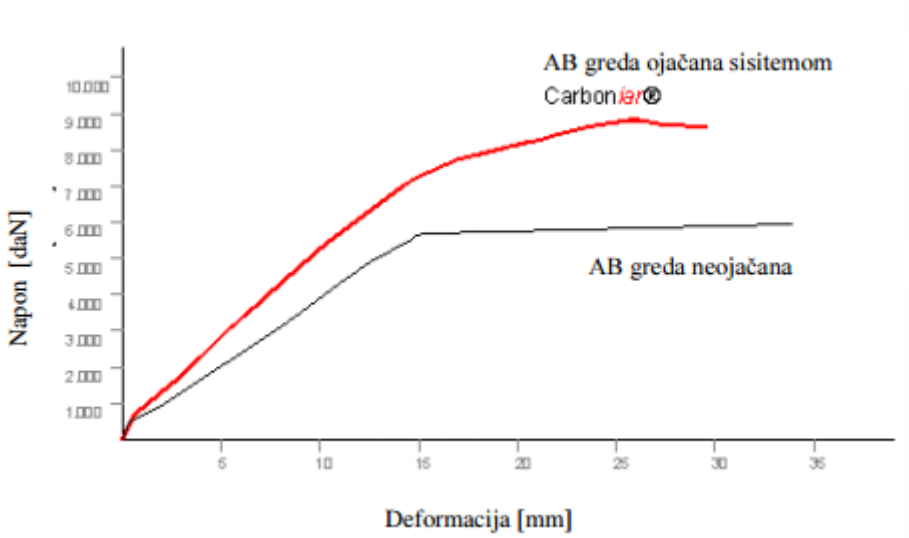
vlačna čvrstoća: 4900 MPa

modul elastičnosti: 230 GPa

lomno produljenje: 2.1 %

koeficijent temperaturnog širenja: $0,4*10^{-6}$ / ^{o}C

gustoća: 1.8 kg/dm^3



Crtež 2.3. dijagram –AB greda ojačana karbonskom trakom

U odnosu na težinu, karbonska vlakna su uistinu superiorna čak i za čelik namjenjen za prednapregnuti beton (crtez 2.4). Sve trake karbonskih vlakana imaju atest dobiven od proizvođača, koji ističu mehanička svojstva proizvoda, koja su, općenito, jednaka ili bolja od gore navedenih.

Izvanredno ponašanje ovakvog sustava također zavisi o prodiranju smole kroz vlakna na podlogu za vrijeme procesa polaganja, dok ovo nije moguće s već impregniranim ojačanjima, kao što su lamelirani ojačivači. Različiti koraci ciklusa polaganja, pažljivo završeni u vremenu propisanom od proizvođača smole, dopuštaju izvedbu homogenog i monolitnog posla zahvaljujući prodoru kroz ojačanje, te trodimenzionalnoj povezanosti presjeka matrice (tiksotropičnost – bitno svojstvo epoksidne smole) izbjegavajući bilo kakav rizik nedovršene polimerizacije i posljedičnog zapleta planova.



Crtež 2.4. Ojačanje karbonskim vlaknima

Trajnost sistema

Po dostupnoj tehničkoj literaturi karbonska vlakna ne pokazuju nikakvo smanjenje mehaničkih svojstava preko perioda od 50 godina. Što se smole tiče, proizvođači ističu da se epoxy sistem koristi apsolutno pouzdano i s povjerenjem preko 40 godina. Usprkos ovome, uputno je planirati, od projektnog stadija, periodičke kontrole, te ako je potrebno održavanje ili zamjena.

Težina traka može se birati između 300 i 1200 gr/m^2; ovo je parametar za određivanje debljine te, stoga, presjeka otpora.

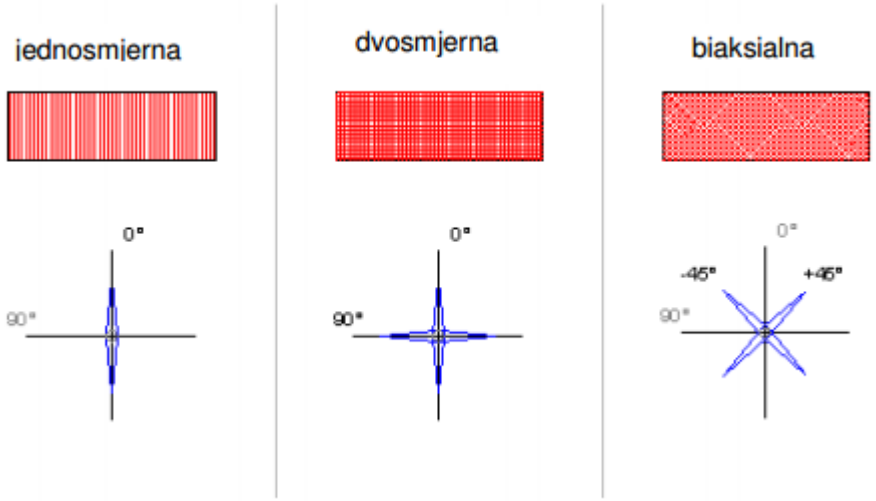
Proizvode se različiti tipovi traka karbonskih vlakana i platna.

Nadalje, karakteristike ojačanja mjenjaju se sa smjerom vlakana (Crtež 2.5) i to:

jednosmjerni, sa svim vlaknima u jednom smjeru,

dvosmjerni, gdje su vlakna usmjerena na 0^o te na 90^o (vlakna su usmjerena u dva međusobno okomita smjera); ako je količina vlakana u oba smjera ista, ojačanje je "balansirano", u suprotnom je "nebalansirano",

biaksialni, gdje vlakna idu pod 45^o u odnosu na smjer djelovanja opterećenja, a međusobno su pod kutem od 90^o.



Crtež 2.5. Tipovi traka karbonskih vlakana i platna

2.4.1 Korištenje kompozitnih materijala u građevinarstvu

U građevinarstvu, najčešća upotreba ovakvih kompozitnih materijala je kod strukturalnog ojačanja postojećih građevina gdje se CFRP poželjno uspoređuje s čelikom u ojačanju uglavnom savijenih djelova, kao što su podovi i grede, u ojačanju stupova omatanjem, te u ojačanju zidanih objekata.

Na zidanim konstrukcijama ovakvi kompozitni materijali se koriste za:

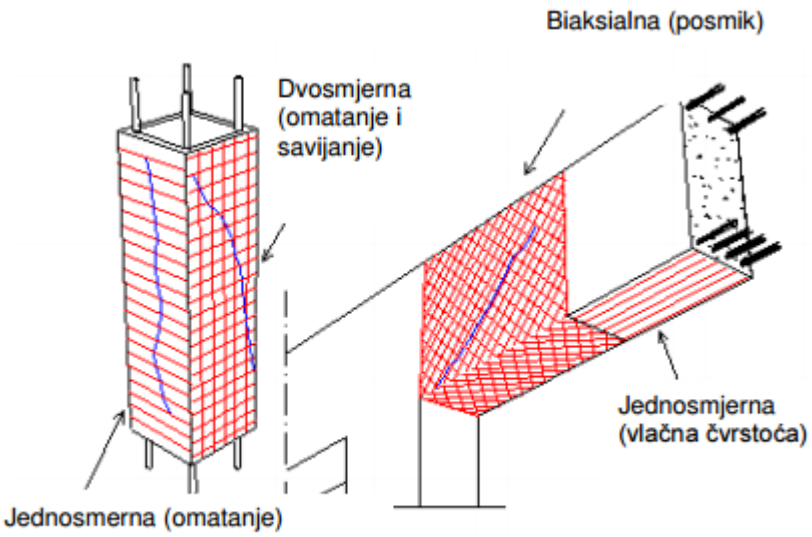
spajanje oštećenih objekata ili dijelova, za krpanje slomljenih krajeva, smanjenje uvjeta nakošenosti, apsorpciju vlačnih napona statičkog ili dinamičkog porijekla na svodovima, lukovima i kupolama, povećanje otpora horizontalnom stresu.

Na drvenim konstrukcijama ovakvi kompozitni materijali se koriste za:

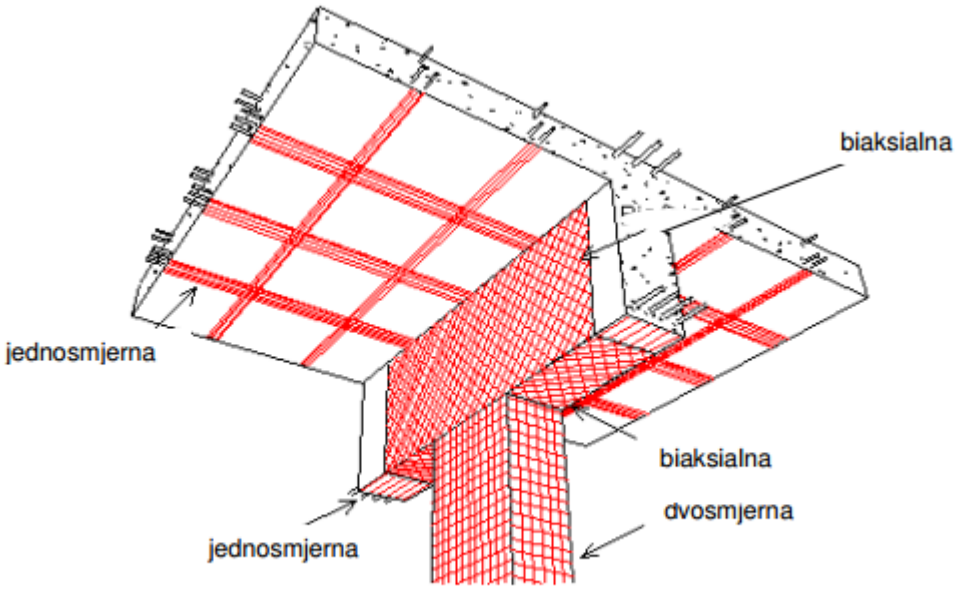
povećanje nosivosti i za zadržavanje deformacija u prihvatljivim granicama.

Na betonskim konstrukcijama ovakvi kompozitni materijali se koriste za (vidi Crteže 2.6 i 2.7):

povećanje vlačne i posmične čvrstoće,omatanje stlačenih elemenata i poboljšanje njihove žilavosti, u smislu mogućnosti otpora određenim deformacijama u plastičnom području, uglavnom za vrijeme potresa, povećanje otpornosti strukture na zamor pod harmonijskim promjenjivim naprezanjem.



Crtež 2.6. Načini korištenja karbonskih traka kod armirano betonskih stupova i greda



Crtež 2.7. Načini korištenja karbonskih traka kod armirano betonskih stupova, greda i ploča

2.4.2 Ojačanje grede G2 karbonskom trakom duljine 96 cm u donjoj zoni

Za ojačanje grede G2 u donjoj zoni, koja će se ispitati u ovom radu, korištena je dvosmjerna karbonska traka težine 200 gr/m^2 nanesena u dva sloja što je podjednako jednom sloju karbonske trake težine 400 gr/m^2.

Kao ljepilo korištena je epoxy smola proizvođača YACHTCARE Epoxy koji se proizvodi u Velikoj Britaniji prema licenci Gougeon Brothers Inc. i smatra se jednom od najboljih epoxy smola današnjice [7].

Na gredu je prvo nanesen tanak sloj epoxy smole zamješane od A (105 Epoxy Resin) i B (205 Hardener) komponente u pravilnom težinskom omjeru, te na njega položena karbonska traka sirine grede (10 cm) i duzine 96cm (Fotografija 2.9). Nakon toga slijedi još jedan premaz smole, zatim polaganje druge trake, te na kraju završni premaz epoxy smole. Kako bi se postigao što kvalitetniji laminat, potrebno je koristiti minimalnu količinu smole. Laminat postiže proračunsku vlačnu čvrstoću 7 dana nakon izvođenja.



Fotografija 2.9. Greda G2 i G3 ojačana karbonskom trakom (pogled na preokrenutu gredu prilikom lijepljenja) i kantice s komponentama epoxy smole

3. NUMERIČKE ANALIZE PONAŠANJA GREDA

3.1 Općenito o numeričkoj analizi greda

U ovom poglavlju analizirati će se numerički rezultati analize greda G1,G2 i G3.

Osnovni cilj numeričkog modeliranja konstrukcije ili nekog njenog izdvojenog elementa je prikazivanje ponašanja numeričkog modela,

te u ovom slučaju i usporedba s experimentalnodobivenim rezultatima.

Rezultati uspješnog modeliranja su najbolje vidljivi na dijagramima unutarnjih sila i deformacija.

U ovom dijelu rada će se provesti usporedba opterećenja i pomaka na sredini raspona opterećenih greda.

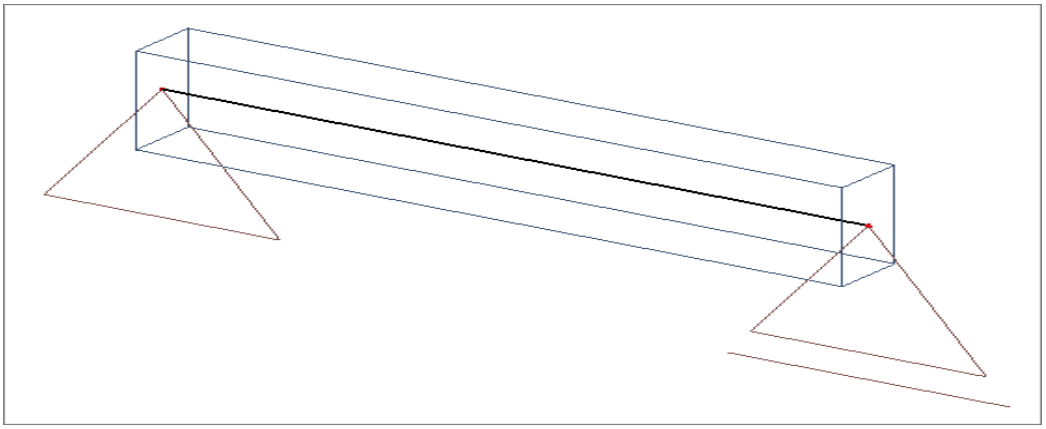
Numerički proračun modela je proveden u računalnom programu SCIA Engineer 2015.

3.2 Modeliranje greda pomoću računala

Rubni uvjeti

Izabrani statički sustav promatranog modela greda G1,G2 i G3 je prosta greda, zglobno oslonjena na krajevima raspona. Raspon ležajeva je 90 cm.

Na Crtežu 3.1 prikazan je statički sustav modela greda G1,G2 i G3.



Crtež 3.1. Statički sustav modela greda G1,G2 i G3

3.2.1 Materijalne i geometrijske karakteristike

Prilikom modeliranja korištena su sljedeća svojstva karbonskih vlakana spojena u trake epoxy smolom:

vlačna čvrstoća: 4900 MPa

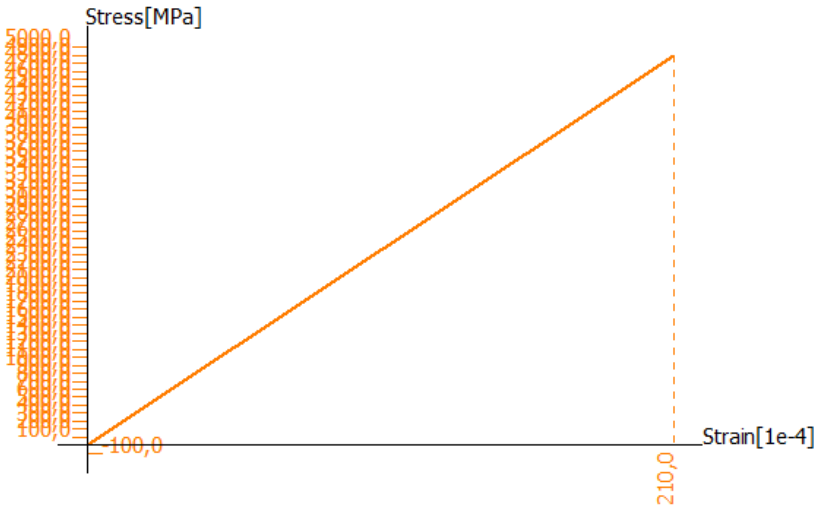
modul elastičnosti: 230 GPa

lomno produljenje: 2.1%

gustoća: 1,8 kg/dm^3

Grede G1,G2 i G3 modelirane su za beton C 25\30, armirane su u donjoj i gornjoj zoni s dvije armaturne šipke ϕ10, dok su vilice ϕ 6/ 20 cm. Čelik s kojim je modelirana armatura obje grede je B500 B. Greda G2 i G3 su u donjoj zoni ojačana s dva sloja karbonskih traka (200 gr/m^2). Navedena karbonska vlakna modelirana su kao dvije armaturne šipke u donjoj zoni poprečnog presjeka , odgovarajuće duljinama s odgovarajućim materijalnim svojstvima karbonskih vlakana.

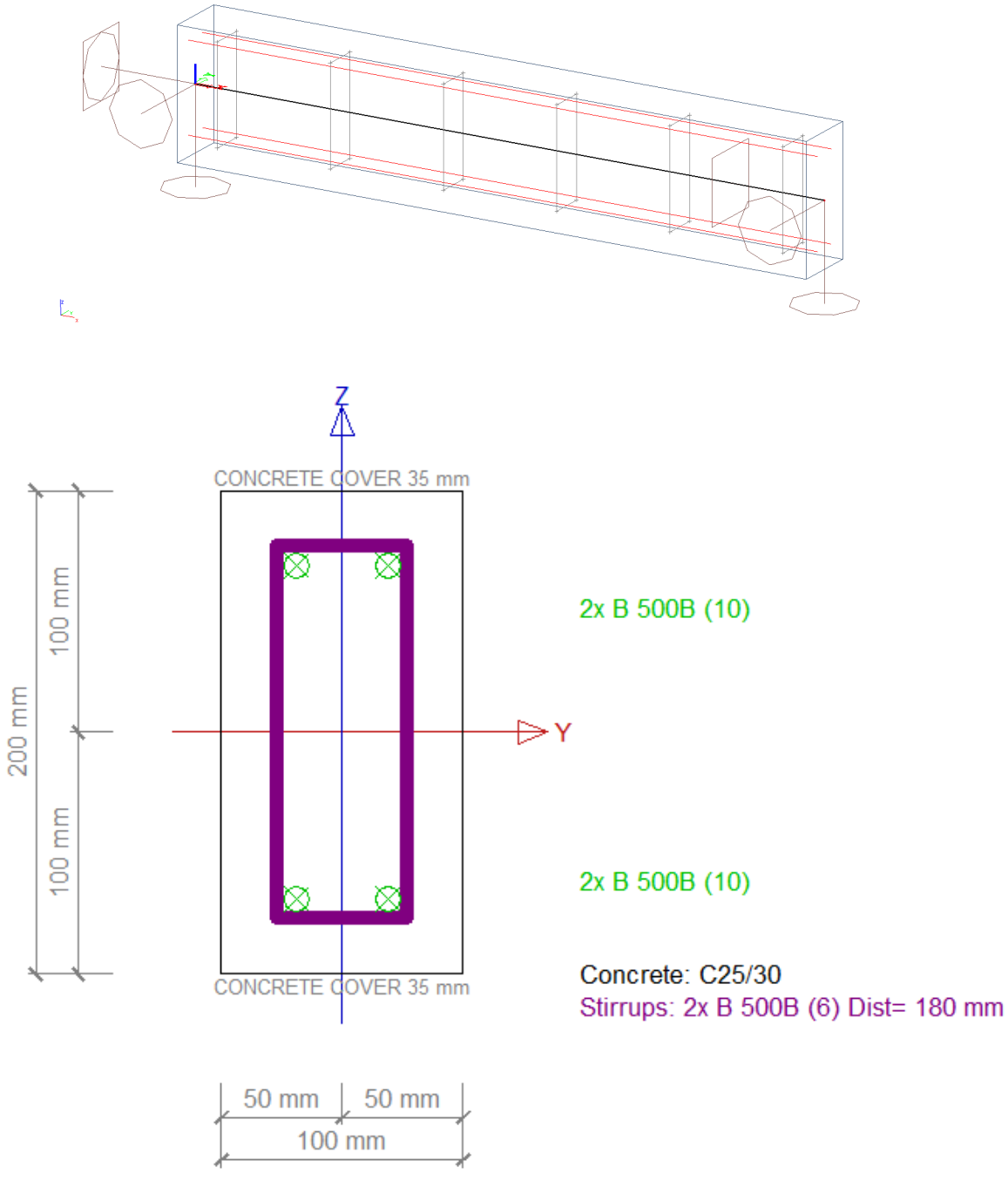
Na Dijagramu 3.1 je prikazan dijagram prema kojem su modelirana svojstva karbonskih vlakana.



Dijagram 3.1. Dijagram prema kojem su modelirana fizikalna svojstva karbonskih vlakana

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

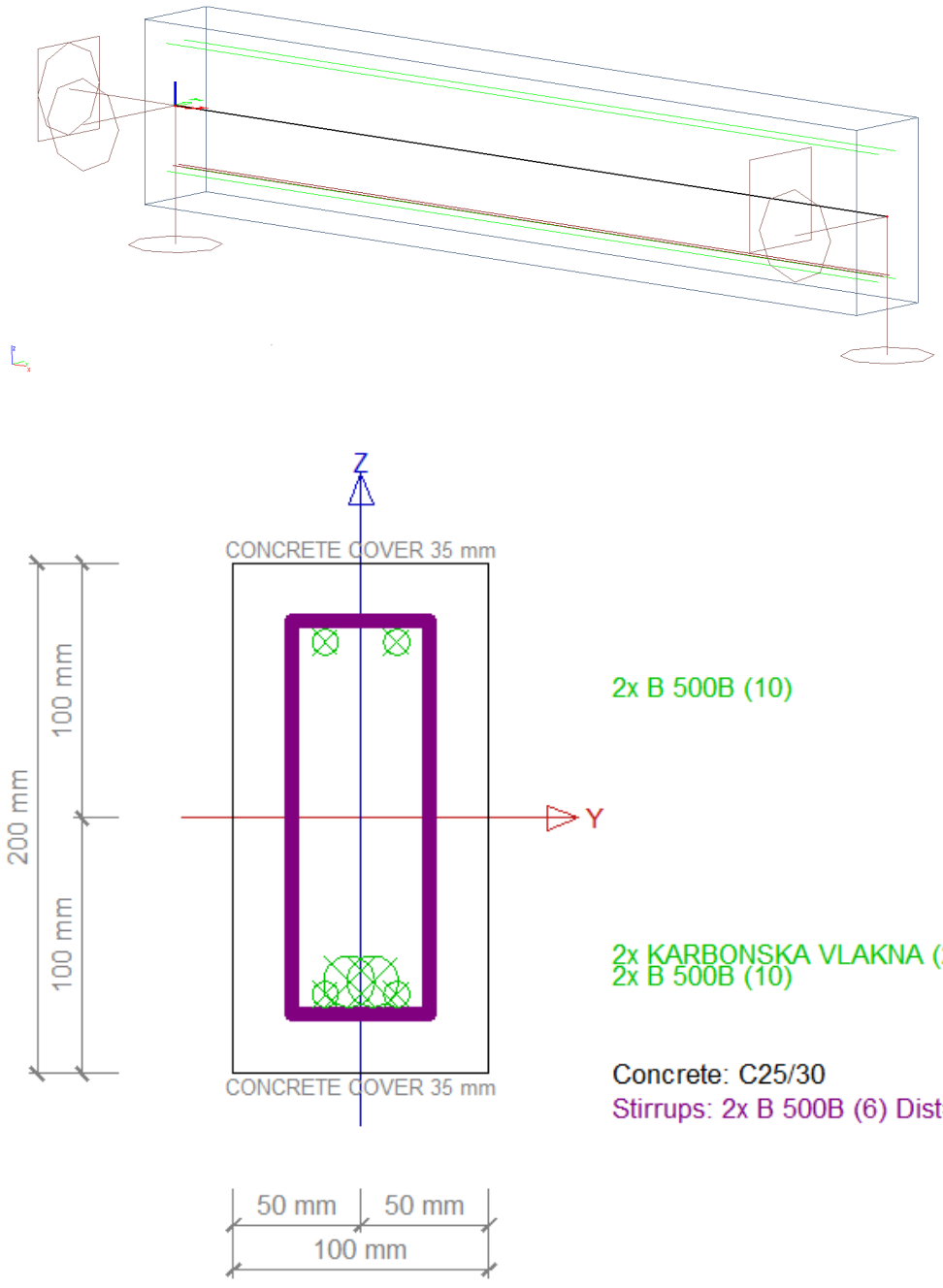
Materijalne i geometrijske karakteristike modela grede G1 (bez ojačanja karbonskom trakom) prikazane su na Crtežu 3.2..



Crtež 3.2. Materijalne i geometrijske karakteristike modela grede G1

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

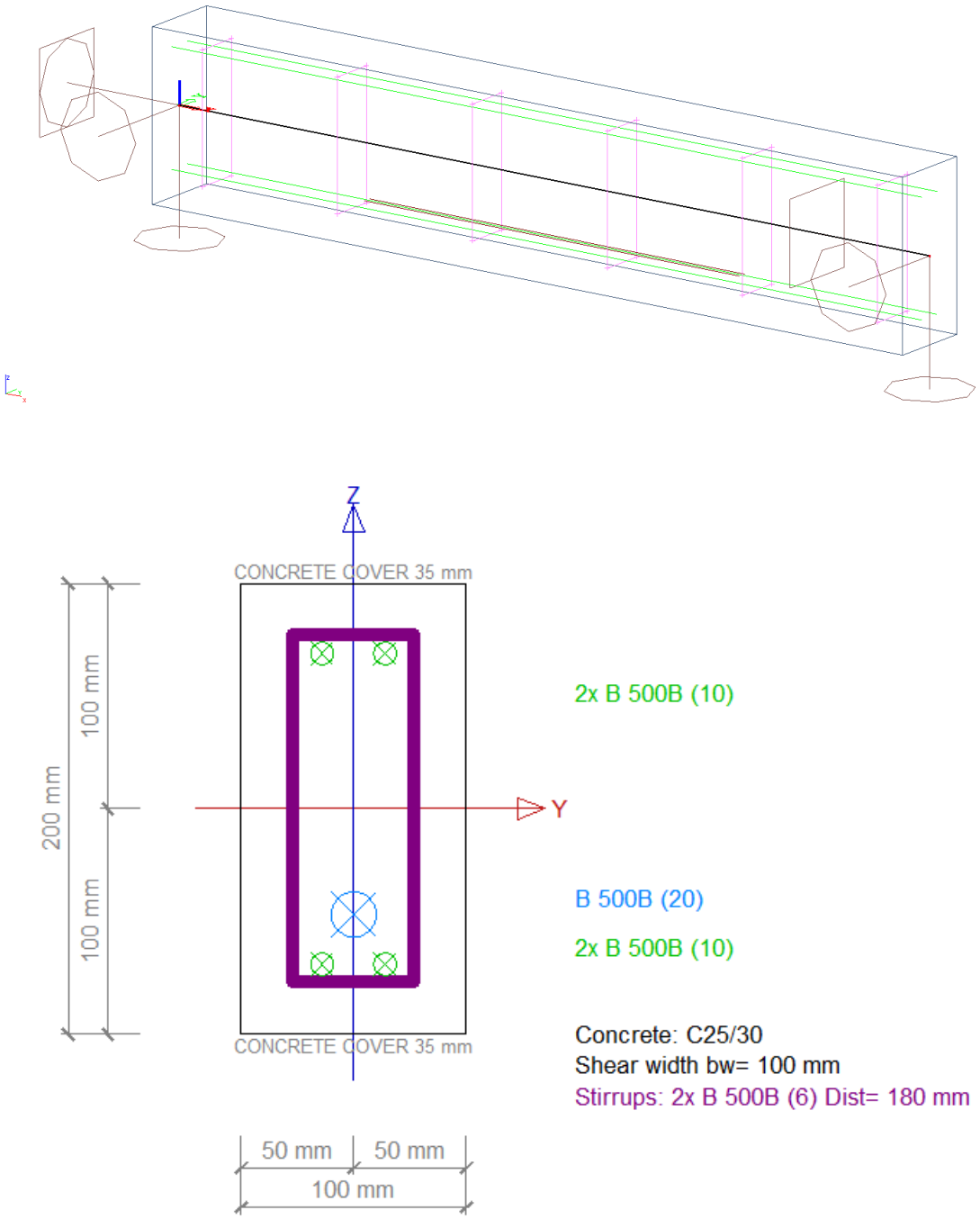
Materijalne i geometrijske karakteristike modela grede G2 (greda ojačana karbonskom trakom) prikazane su na Crtežu 3.3. Na crtežu je uz armaturu grede, i dvije armaturne šipke koje imaju svojstva karbonskih vlakana navedena u prethodnom poglavlju.



Crtež 3.3. Materijalne i geometrijske karakteristike modela grede G2

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

Materijalne i geometrijske karakteristike modela grede G3 (greda ojačana karbonskom trakom duljine 50 cm) prikazane su na Crtežu 3.4. Na crtežu je uz armaturu grede, i dvije armaturne šipke koje imaju svojstva karbonskih vlakana navedena u prethodnom poglavlju.



Crtež 3.4.Materijalne i geometrijske karakteristike modela grede G3

3.3 Opterećenje greda i njihova simulacija pomoću računala

Opterećenje na grede u računalnoj simulaciji je modelirano kao koncentrirana sila na polovini raspona greda. Opterećenje modela greda G1 ,G2 i G3 je prikazano na Crtežima 3.2, 3.3, 3.4.

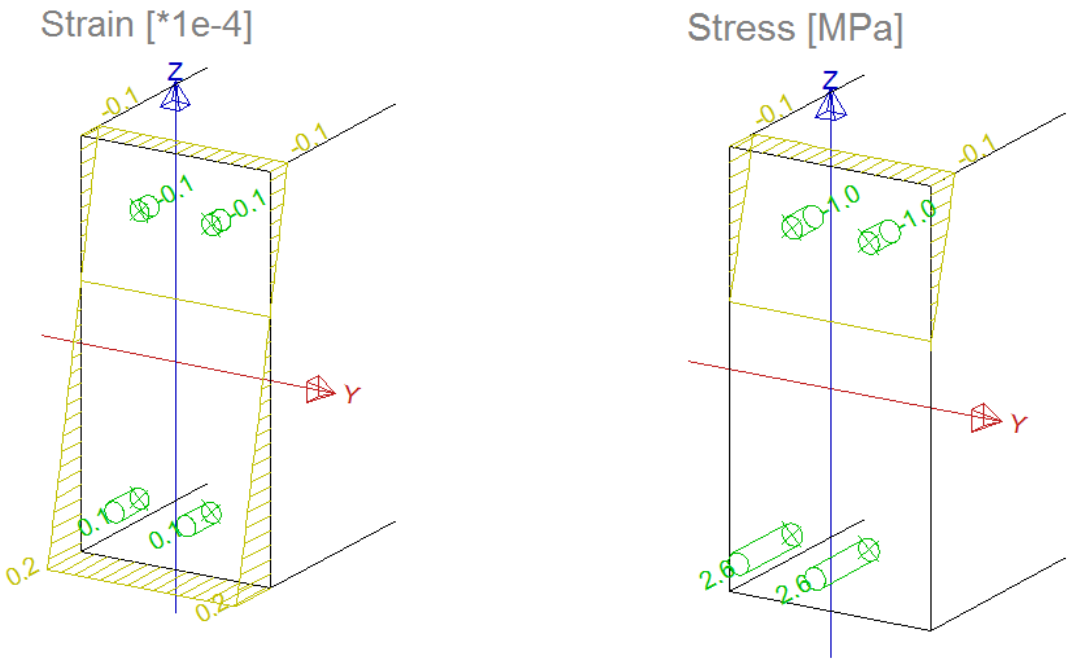
Grede G1, G2 i G3 su kod numeričke analize opterećivane postepeno u koracima do sloma.

Početno opterećenje greda je 5 kN, te se nastavlja s opterećenjem u koracima po 5 kN sve do sloma konstrukcije. Budući da je za numerički proračun korišten računalni program SCIA Engineer 2016, greda nije opterećivana do sloma po armaturi, zbog toga što kod eksperimentalnog ispitivanja grede dužine 1 m nije moguće postići tečenje armature, već je greda opterećivana do prekoračenja tlačne čvrstoće betona u gornjoj zoni grede.

3.4 Rezultati numeričke analize greda

Opterećenje grede G1 je prekinuto na iznosu koncentrirane sile od 50 kN, dok je greda G2 (ojačana karbonskom trakom duljine 96 cm) opterećivana do iznosa sile od 220 kN, a greda G3 (ojačana karbonskom trakom duljine 50 cm) opterećivana do iznosa sile od 190 kN.

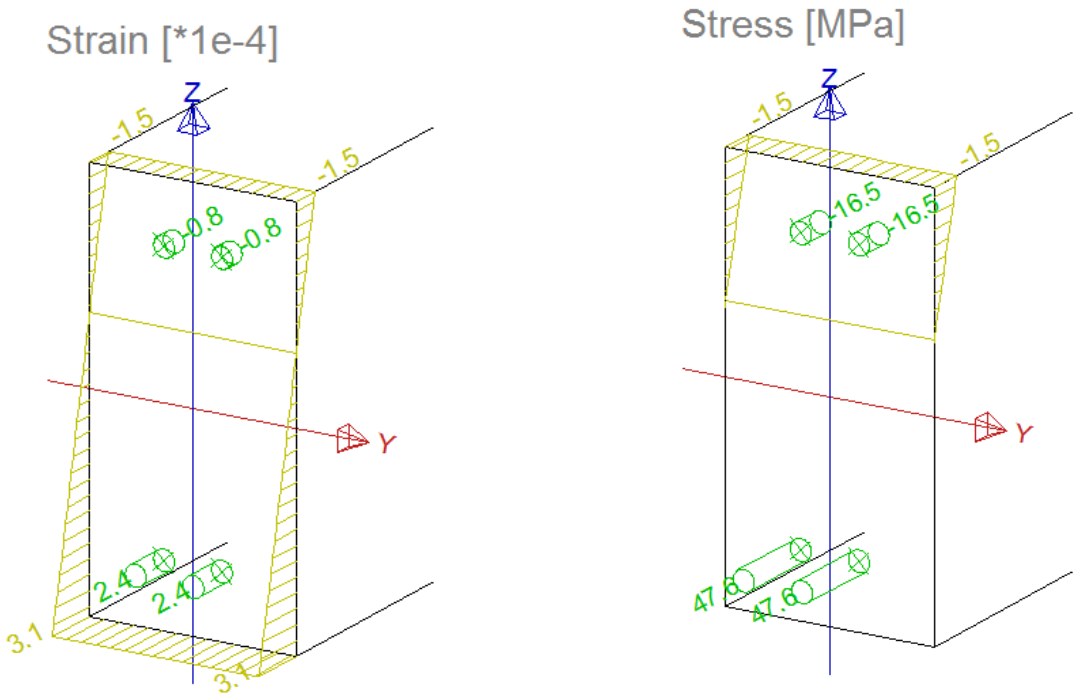
Na Crtežu 3.5 je prikazan dijagram naprezanja u kojem je vidljivo kako u gornjoj zoni grede dolazi do prekoračenja tlačne čvrstoće betona (računalni program SCIA Engineer računa do iznosa od 20 MPa).



Crtež 3.5. Opterećenje grede G1 (bez ojačanja karbonskom trakom) koncentriranom silom na polovini raspona u iznosu od 50 kN

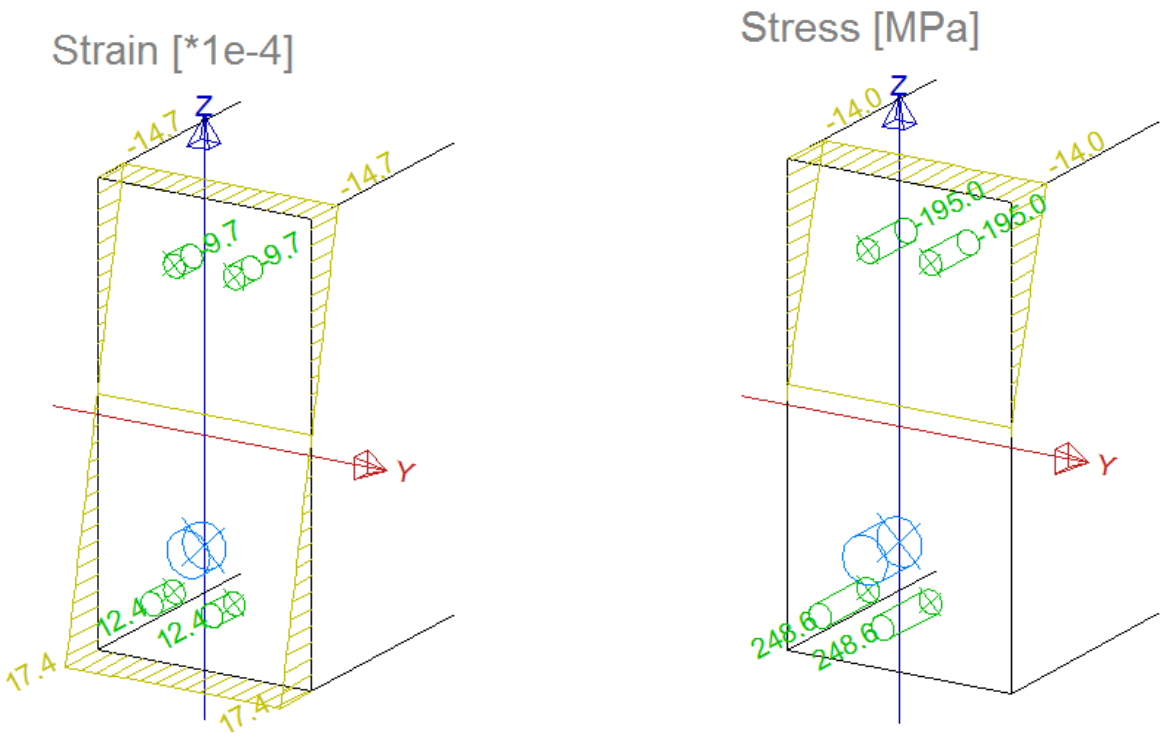
Opterećenje grede G2 je prekinuto na iznosu koncentrirane sile od 220 Kn.

Na Crtežu 3.6 je prikazan dijagram opterećenja grede G2 koncentriranom silom na sredini raspona u iznosu od 220 Kn



Crtež 3.6. Opterećenje grede G2 (ojačana karbonskom trakom duljine 96 cm) koncentriranom silom na polovini raspona u iznosu od 220 kN

Na Crtežu 3.7 je prikazan dijagram opterećenja grede G3 koncentriranom silom na sredini raspona u iznosu od 190 Kn.



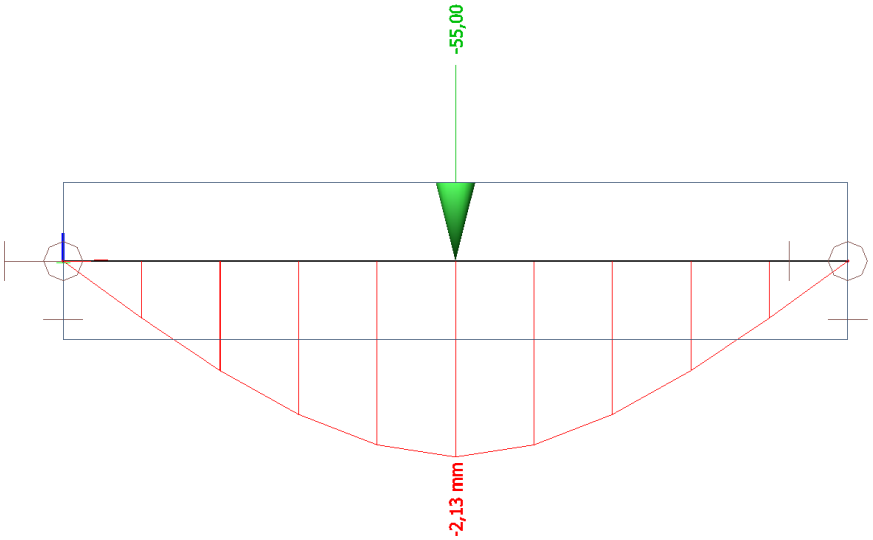
Crtež 3.7. Opterećenje grede G3 (ojačana karbonskom trakom duljine 50 cm) koncentriranom silom na polovini raspona u iznosu od 190 kN

Iz ovog dijagrama je vidljivo kako u gornjoj zoni grede dolazi do prekoračenja tlačne čvrstoće betona (računalni program SCIA Engineer računa do iznosa od 20 MPa), ali također je zamjetan pad vlačnih naprezanja u donjoj zoni grede G2 u odnosu na gredu G1 (prikazano na Crtežu 3.4) što je rezultat ojačanja donje zone grede karbonskom trakom.

3.4.1 Progibi kao rezultat numeričke analize greda

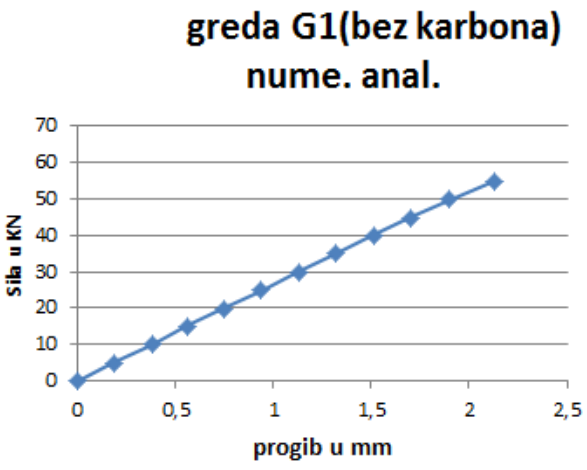
Kao rezultat numeričke analize greda prikazati će se odnos opterećenja i progiba na mjestu koncentrirane sile (na polovini raspona grede) kod greda G1 , G2 i G3.

Na Crtežu 3.8 prikazan je progib grede G1 pri opterećenju iznosa 55 kN, dok su na Dijagramu 3.2 prikazani iznosi sila pri opterećenju grede i pripadni pomaci. Iznos najvećeg progiba na sredini raspona je 2,13 mm.



Crtež 3.8. Prikaz progiba grede G1 pri opterećenju iznosa 50 kN

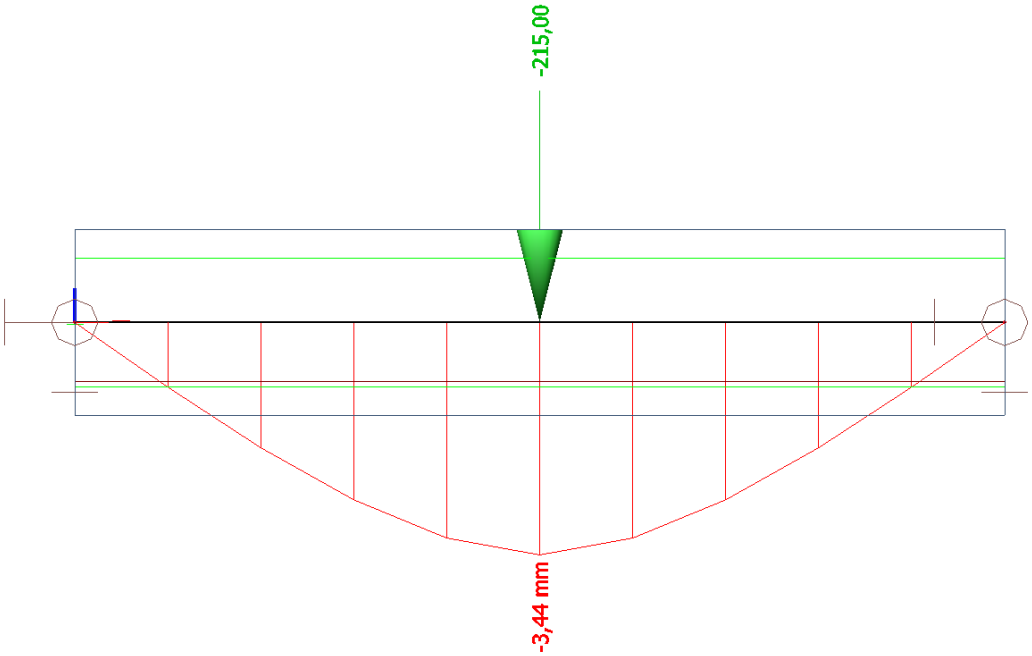
greda G1 (bez karbona)	
SILA U KN	progib u mm (numeri. anal.)
0	0
5	0,19
10	0,38
15	0,56
20	0,75
25	0,94
30	1,13
35	1,32
40	1,51
45	1,7
50	1,9
55	2,13
60	



Dijagram 3.2. Dijagram i tablica Sila – Pomak grede G1 proračunato u računalnom programu SCIA Engineer

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

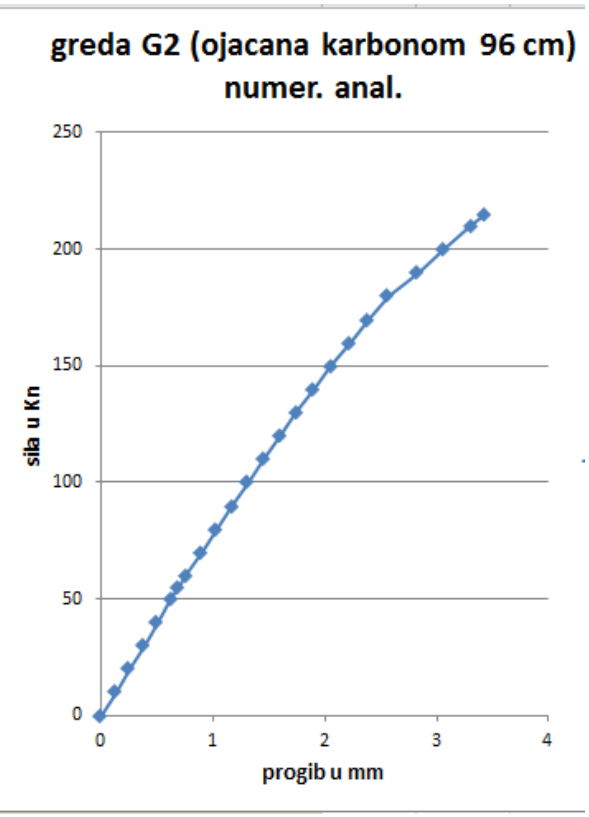
Na Crtežu 3.9 prikazan je progib grede G2 ojačane karbonskom trakom (duljine 96) pri opterećenju iznosa 215 kN, dok su na dijagramu 3.3 prikazani iznosi sila pri opterećenju grede i pripadni pomaci. Iznos najvećeg progiba na sredini raspona je 3,44 mm.



Crtež 3.9.Prikaz progiba grede G2 ojačane karbonskom trakom (duljine 96 cm) pri opterećenju iznosa 220 Kn

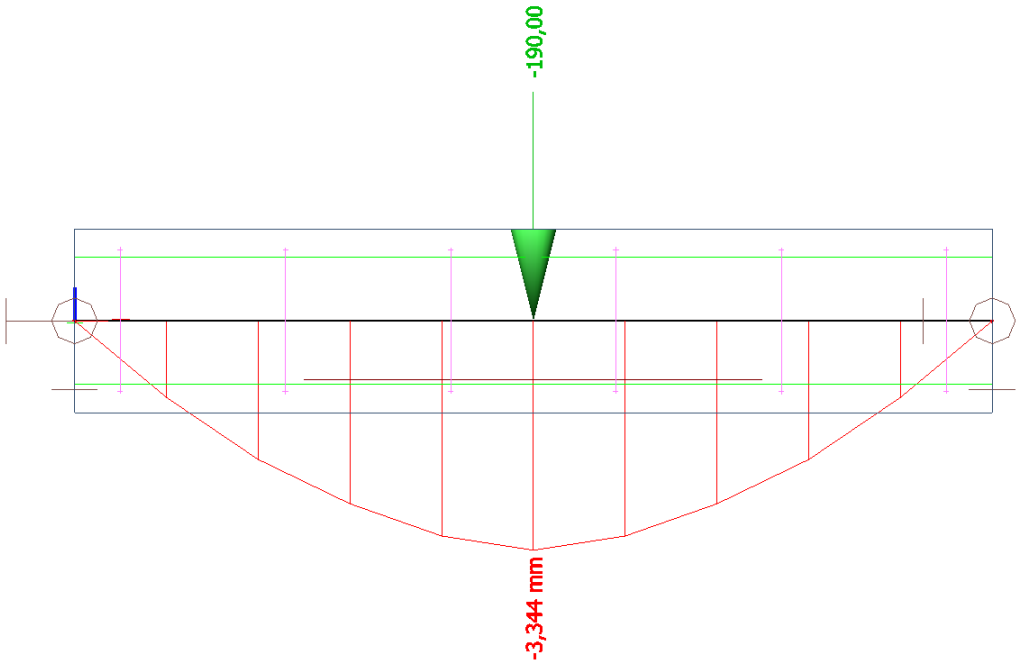
Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

greda G2 (s karbonom 96cm)	
SILA U KN	progib u mm (numeri. anal.)
0	0
10	0,13
20	0,25
30	0,38
40	0,5
50	0,63
55	0,69
60	0,76
70	0,9
80	1,03
90	1,17
100	1,31
110	1,45
120	1,6
130	1,75
140	1,9
150	2,06
160	2,23
170	2,39
180	2,57
190	2,83
200	3,06
210	3,31
215	3,44
220	



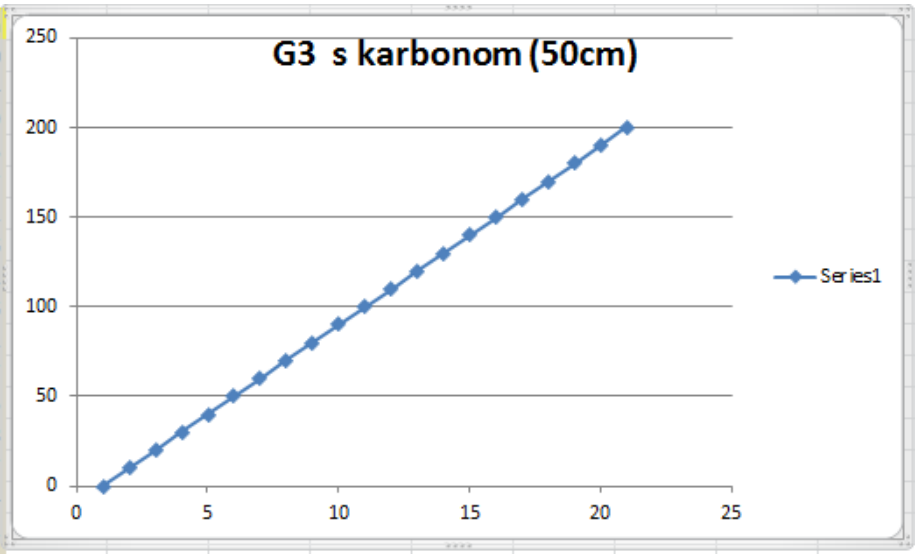
Dijagram 3.3. Dijagram Sila – Pomak grede G2 ojačane karbonskom trakom (duljine 96 cm) proračunato u računalnom programu SCIA Engineer

Na Crtežu 3.10 prikazan je progib grede G3 ojačane karbonskom trakom (duljine 50 cm) pri opterećenju iznosa 190 kN, dok su na dijagramu 3.4 prikazani iznosi sila pri opterećenju grede i pripadni pomaci. Iznos najvećeg progiba na sredini raspona je 3,34 mm.



Crtež 3.10. Prikaz progiba grede G3 ojačane karbonskom trakom (duljine 50 cm) pri opterećenju iznosa 190 Kn

sila u KN	pogib u mm
0	0
10	0,14
20	1,029
30	0,43
40	0,57
50	0,71
60	0,86
70	1,01
80	1,16
90	1,31
100	1,47
110	1,63
120	1,8
130	1,97
140	2,14
150	2,32
160	2,52
170	2,73
180	2,96
190	3,34
200	-



Dijagram 3.4. Dijagram Sila – Pomak grede G3 ojačane karbonskom trakom (duljine 50 cm) proračunato u računalnom programu SCIA Engineer

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

Usporedbom linija veze Sila – Pomak na Dijagrama 3.1, 3.2 i 3.3 vidljivo je kako je kod sile od 50 KN u G1 znatno veći progib nego kod G2 i G3 koje su ojačane karbondkim trakama (npr. za silu 50 KN greda G1 ima progib 2,13mm, greda G2 ima progib 0,63mm, greda G3 ima progib 0,71mm). Kod greda G2 koja je ojačane karbonskom trakom (duljine 96 cm) zamjetno je manji iznos progiba pri istoj sili nego kod grede G3 s manjim ojačanjem (karbonskom trakom dužine 50 cm).

Kod grafičkog prikaza ponašanja grede G1, G2 i G3 odnosno veze između sila i progiba (pomak na sredini raspona grede) vidljivo je da su u linearnoj vezi iz čega zaključujemo da se ponašanje i grede G1 i grede G2 nalazi u elastičnom području.

4. EKSPERIMENTALNA ANALIZA GREDA

4.1 Općenito

Skup operacija koje se vrše na objektu kako bi se odredile vrijednosti veličine koja se mjeri nazivamo mjerenjem. Mjerenjem se dobivaju informacije o fizičkoj ili kemijskoj prirodi promatranog procesa.

Mjerenje fizikalnih veličina kao što su na primjer duljina ili masa svodi se na uspoređivanje s etalonima, te kao krajnji cilj dobivamo rezultat. To je brojčana vrijednost koja opisuje koliko je puta neka mjerna veličina veća ili manja od promatrane mjerne jedinice.

Izmjeriti neku fizikalnu veličinu znači usporediti je s nekom njenom vrijednošću koju smo usvojili za jedinicu. Međusobno se mogu uspoređivati samo brojne vrijednosti jedne te iste fizikalne veličine.

Cilj mjerenja je dobivanje pouzdanog iskaza o nepoznatim podacima objekta.

Mjerenja fizikalnih veličina mogu biti:

Direktna – to su ona mjerenja kod kojih se rezultat dobije iz eksperimentalnih podataka nekoliko mjerenja jedne te iste fizikalne veličine.

Indirektna – to su ona mjerenja kod kojih se rezultat dobije iz eksperimentalnih podataka nekoliko različitih direktno mjerenih fizikalnih veličina koje su s mjernom veličinom povezane preko neke funkcionalne zavisnosti.

Osnovni zadatak mjerne tehnike je odrediti pravu vrijednost mjerene veličine, imajući u vidu okolnosti pod kojima se vrši mjerenje. I pored primjene suvremenih tehnika mjerenja, mjerne opreme visokih performansi i uz svu moguću pažnju dolazi do određenih odstupanja između stvarne i izmjerene vrednosti.

Greške mjerenja nastaju zbog:

Nesavršenosti mjerne opreme, postupka (procedure) mjerenja, objekta mjerenja i znanja i vještine osobe koja vrši mjerenje. Što je greška mjerenja manja, mjerenje je točnije. Zbog navedenog mjerenje nije potpuno, tj. rezultat mjerenja nema pravu vrijednost, ako se pored izmjerene vrijednosti na neki na način ne definiraju i granice u kojima se nalazi stvarna vrijednost u odnosu na izmjerenu.

Prilikom mjerenja ne možemo izbjeći greške, ali trebamo nastojati da ih bude što manje.

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

Klasifikacija grešaka:

Sistematske greške - javljaju se zbog istog uzroka koji je najčešće poznat unaprijed; najčešće se takva greška sistematski ponavlja i može se otkloniti (npr. podjela na mjernoj letvi nije jednaka, kazaljka ampermetra nije na nuli, kapilara termometra ima na raznim mjestima različit presjek, itd.)

Slučajne greške - nastaju uslijed velikog broja različitih uzroka koji nisu unaprijed poznati; ne mogu se izbjeći jer zavise od netočnosti mjernih uređaja, nesavršenosti naših čula, sporednih utjecaja (na primjer: otpor se mijenja s temperaturom, utjecaj vibracija na mjerenje, promet na ulici, itd.). Naime, prilikom mjerenja dobijamo disperziju (rasipanje) rezultata, ali ne možemo unaprijed reći koji uzrok dovodi do toga. Takve greške se mogu svesti na minimum, ali se ne mogu otkloniti.

Promašaji (grube greške) - pogrešna mjerenja uslijed nemarnog očitanja, nepravilno uključenog instrumenta ili lošeg zapisivanja rezultata. Takve podatke treba odbaciti prilikom izračunavanja mjerene veličine.

Najčešći uzroci pogreški su sljedeći:

- nepravilno rukovanje s mjernim instrumentima,
- nepoznavanje mjernog instrumenta, veličine, objekta ili pojave koja se mjeri,
- nepreciznost,
- neispravnost mjernog instrumenta,
- predrasude ili instinkt kod osobe koja mjeri određenu pojavu ili objekt.

Organizacija ispitivanja:

Kada organiziramo ispitivanje, važno je prije same provedbe ispitivanja detaljno organizirati postupak ispitivanja, te razraditi sve detalje i stvari na koje treba obratiti pozornost prilikom provedbe ispitivanja kako bi ispitivanje proteklo prema planu.

Prije provođenja ispitivanja, potrebno je odrediti redoslijed radnji prije postupka ispitivanja:

- točno definirati zadatak (što se mjeri),
- izvršiti prethodni pregled konstrukcije,
- odrediti probna opterećenja,
- odrediti što će se mjeriti i gdje,
- poduzeti sve mjere osiguranja,

- uskladiti ispitivanje s normama,
- kontrolirati rezultate mjerenja i praviti zabilješke radi izrade detaljnog izvještaja.

Proces mjerenja

U procesu mjerenja neke veličine, potrebno je poštivati redosljed radnji prilikom mjerenja.

Faze mjerenja po redu izvršavanja su sljedeće:

- točno postaviti zadatak i cilj mjerenja,
- napraviti plan mjerenja,
- izvršiti mjerenje,
- obraditi rezultate mjerenja.

Kod uređaja koji se koriste za mjerenje fizičkih veličina mogu se koristiti mjerni sustavi i sredstva čiji se rad zasniva na nekom od sljedećim principima:

mehaničkom, optičkom, optoelektričnom, električnom, piezoelektričnom, fotoelektričnom, pneumatskom.

4.2 Uvod u izvršeno eksperimentalno ispitivanje

Postoje različite metode mjerenja koje se koriste prilikom ispitivanja grednih nosača, zavisno o tome koje podatke prilikom ispitivanja želimo zabilježiti. Prilikom ovog ispitivanja, promatrati će se progibi na sredini raspona grede. Gibanje točke može se odrediti kao mijenjanje položaja tijekom vremena. Ono je u cjelosti opisano ako u svakom trenutku znamo odrediti položaj točke. Pomak točke je po definiciji promjena položaja neke točke u odnosu na neopterećeno i opterećeno stanje konstrukcije. U ovom radu provesti će se mjerenje vertikalnog pomaka točke u sredini raspona greda izazvano konstantnim povećanjem opterećenja dok ne dođe do sloma konstrukcije. Mjerenje će se vršiti pomoću mjernog uređaja za mjerenje pomaka – digitalne mikroure (vidi kasnije Fotografiju 4.6). Usporedno s mjerenjem pomaka mjeriti će se i prirast sile, kako bi na kraju mogli dobiti dijagram u kojem će biti prikazan odnos sila – pomak.

4.3 Priprema ispitivanja

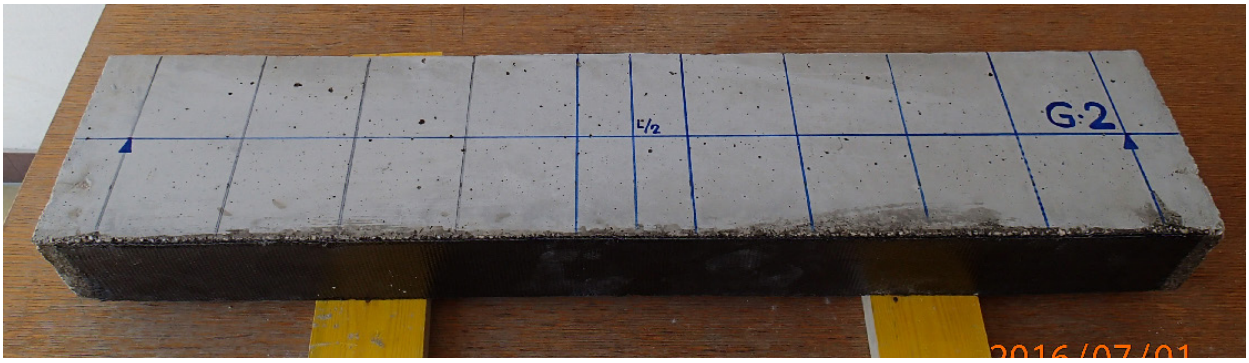
Kako bi se provelo kvalitetno eksperimentalno ispitivanje, potrebno je izvršiti pripremne radnje koje će naknadno omogućiti kvalitetno praćenje samog postupka ispitivanja.

Kao što je prethodno opisano u Poglavlju 2 ovog rada, u laboratoriju su izvedene armirano betonske grede odgovarajućih dimenzija i svojstava materijala.

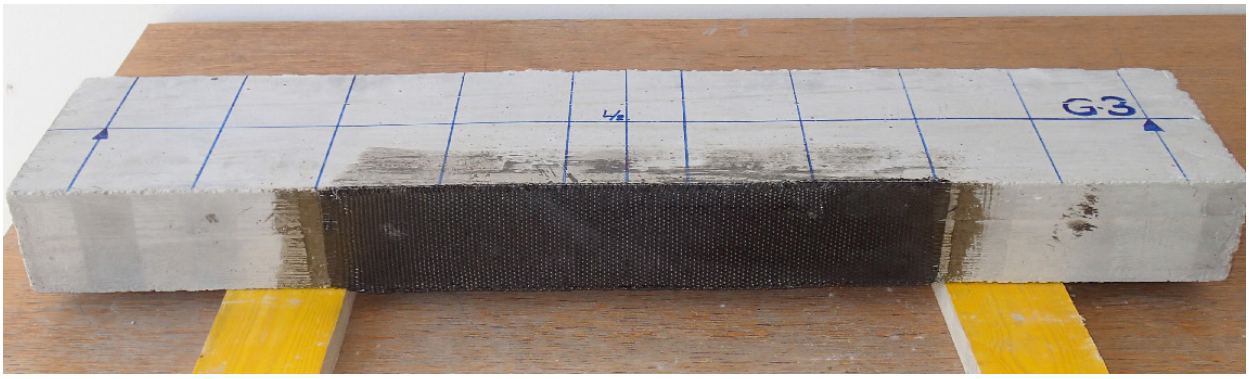
Nakon što je postignuta odgovarajuća čvrstoća greda pristupilo se označavanju greda za ispitivanje (Fotografije 4.1 , 4.2 i 4.3). Na gredama su označeni položaji ležajeva, središnja os grede (polovina raspona na kojem će djelovati koncentrirana sila) te su iscrtane vertikalne linije na razmaku od 10 cm u svrhu kvalitetnijeg praćenja pojave pukotina tijekom ispitivanja.



Fotografija 4.1. Greda G1 označena za ispitivanje



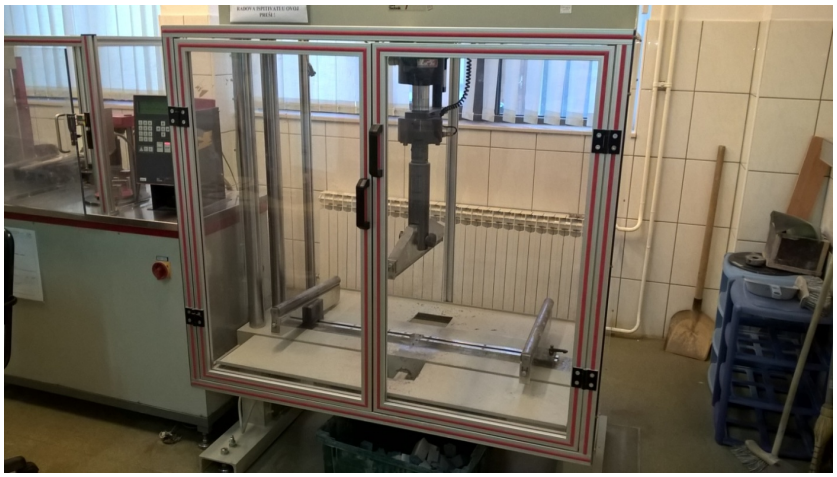
Fotografija 4.2. Greda G2 označena za ispitivanje



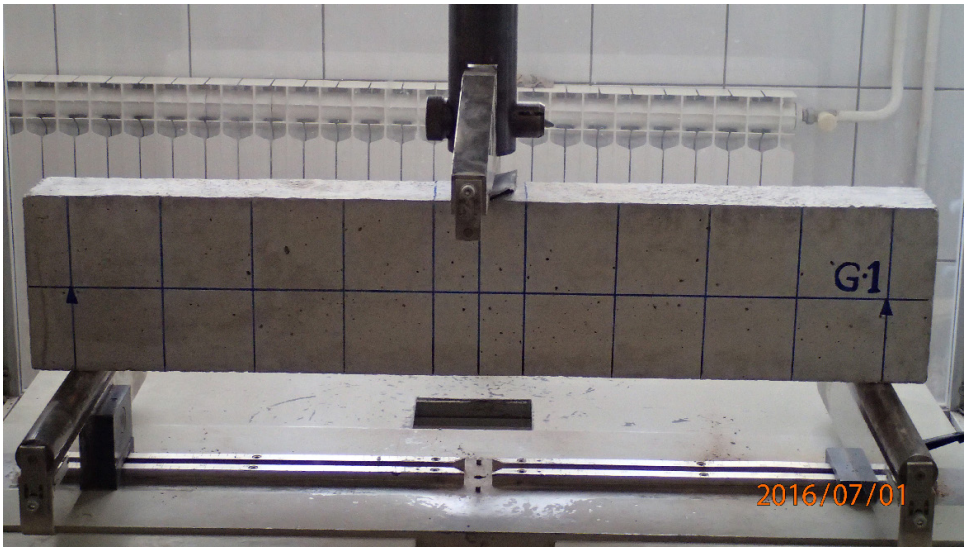
Fotografija 4.3. Greda G3 označena za ispitivanje

4.3.1 Simulacija rubnih uvjeta

Simulacija rubnih uvjeta prvenstveno je određena mogućnostima laboratorija tj. uređaja u kojem će se grede ispitati. Ispitivanje će se provesti na hidrauličnoj preši proizvođača Toni Technik (Fotografija 4.4). Maksimalna statička sila koju ova preša može postići je 200 kN. Maksimalni pomak klipa iznosi 25 cm. U ovom eksperimentu, greda je zglobno oslonjena na osloncima. Oslonci imaju mogućnost horizontalnog pomaka, dok su zbog same konstrukcije uređaja onemogućeni vertikalni pomaci (Fotografija 4.5). Prije samog izvođenja eksperimenta, lijevom osloncu je spriječena mogućnost horizontalnog pomaka dok desni oslonac ima mogućnost horizontalnog pomaka zbog što bolje simulacije rubnih uvjeta. Razmak oslonaca je 90 cm. Na klip kojim se vrši opterećenje na gredu montiran je nastavak u obliku horizonalno položenog valjka čime se opterećenjem na sredinu raspona simulira utjecaj koncentrirane sile.



Fotografija 4.4 Uređaj za ispitivanje Toni Technik



Fotografija 4.5 Rubni uvjeti oslanjanja grede

4.3.2 Postavljanje uređaja za mjerenje progiba

Kada su određeni rubni uvjeti, te je greda postavljena u odgovarajući položaj za ispitivanje, slijedi postavljanje mjernog instrumenta za mjerenje vertikalnog pomaka (mikroura). Uređaj mora biti postavljen vertikalno kako bi se mjerio pomak samo u vertikalnom smjeru (Fotografija 4.6). Ispitivanje je provedeno mikrourom s digitalnim očitanjem pomaka proizvođača Mitutoyo. Točnost ove mikroure je 1/100 mm, uz maksimalni mogući pomak ticala od 50 mm.



Fotografija 4.6 Rubni uvjeti oslanjanja grede i postavljena mikroura

4.3.3 Mjerni uređaji za mjerenje pomaka

Postoji više vrsta uređaja kojima se mogu mjeriti pomaci na konstrukciji. Prema principu na koji funkcioniraju dijelimo ih na mehaničke, optičke, električne, laserske i ostale uređaje. Ti uređaji služe mjerenju pomaka odabrane točke na konstrukciji.

Načini mjerenja pomaka:

milimetarski papir ili letva,

mjerni sat ili mikroura - služi za precizno mjerenje apsolutnih pomaka,

indikatorska ploča,

induktivni mjerač pomaka (LVDT - linear variable diferential transducer),

kapacitativni pretvarač pomaka,

geodetski instrument – nivelir.

U ovom radu za mjerenje vertikalnih pomaka korišten je mjerni sat (mikroura) (prikazan na Fotografiji 4.6) koji pretvara linearni pomak točke doticaja (ticala) u kutni pomak kazaljke (indeksa) u odnosu na kružnu brojčanu podjelu.

Mjerni sat (mjerna urica) (mikroura)

Mjerni sat (mikroura) je uređaj koji služi za precizno mjerenje apsolutnih pomaka. Najčešći pomaci koji se mjere su u rasponu od 0 do 25 mm. Najčešće se koriste instrumenti čija je preciznost 1/100 mm, te se to ujedno smatra i zadovoljavajućom razinom preciznosti. Također postoje i mikroure s razinom preciznosti većom od 1/1000 mm.

Podjela mikroura s obzirom na preciznost rada:

- mehanička mikroura,

- elektronska mikroura.

Mehanička mikroura radi na principu uvećavanja pomaka pomoću sustava zupčanika, te očitavanja tih pomaka na skali. Očitavanja pomaka može se vršiti analogno (preko kazaljke) ili digitalno (preko numeričkog zaslona) (Fotografija 4.7).

Digitalna mikroura ima mogućnost spajanja na računalo i na taj način direktno dobivamo podatke preko kojih možemo pratiti ispitivanje i koje je na kraju moguće usporediti s ostalim rezultatima ispitivanja.



Fotografija 4.7 Slika postavljanja i nuliranja mikroure

4.4 Ispitivanje greda

4.4.1 Ispitivanje grede G1

Nakon pripremnih radnji, koje su prethodno opisane, označavanja greda, postavljanja na odgovarajući raspon oslonaca, postavljanje klipa za nanošenje opterećenja, te postavljanje mikroure na sredinu raspona, može se početi s postepnim opterećenjem greda. Grede G1 , G2 i G3 se opterećuju opterećenjem koje se nanosilo brzinom od 0,03 MPa/s do sloma konstrukcije.

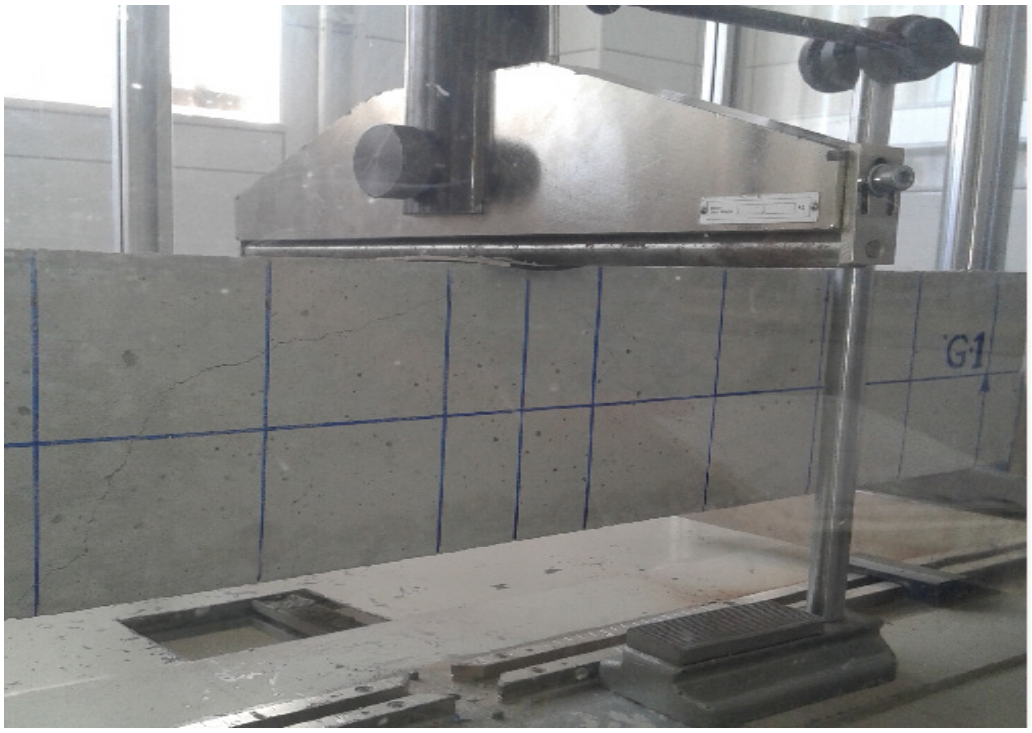
Ispod klipa koji vrši opterećenje na gredu postavljen je sloj gume debljine 2 mm kako bi se smanjilo početno površinsko drobljenje betona na mjestu koncentrirane sile zbog nezaglađenosti gornje površine grede prilikom izrade (Fotografija 4.8).



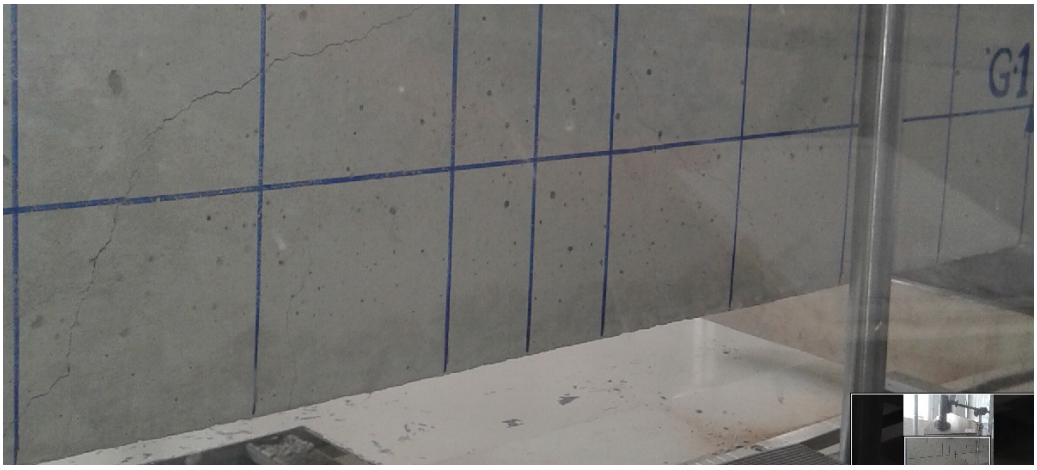
Fotografija 4.8 Početak ispitivanja grede G1

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

Uočavanje pojave prvih pukotina na gredi G1 prikazano ja na Fotografiji 4.9, dok se na Fotografiji 4.10 vidi širenje, produljenje i progušćavanje pukotina prije sloma. Pukotine se protežu od mjesta opterećenja koncentriranom silom dijagonalno prema osloncima grede.

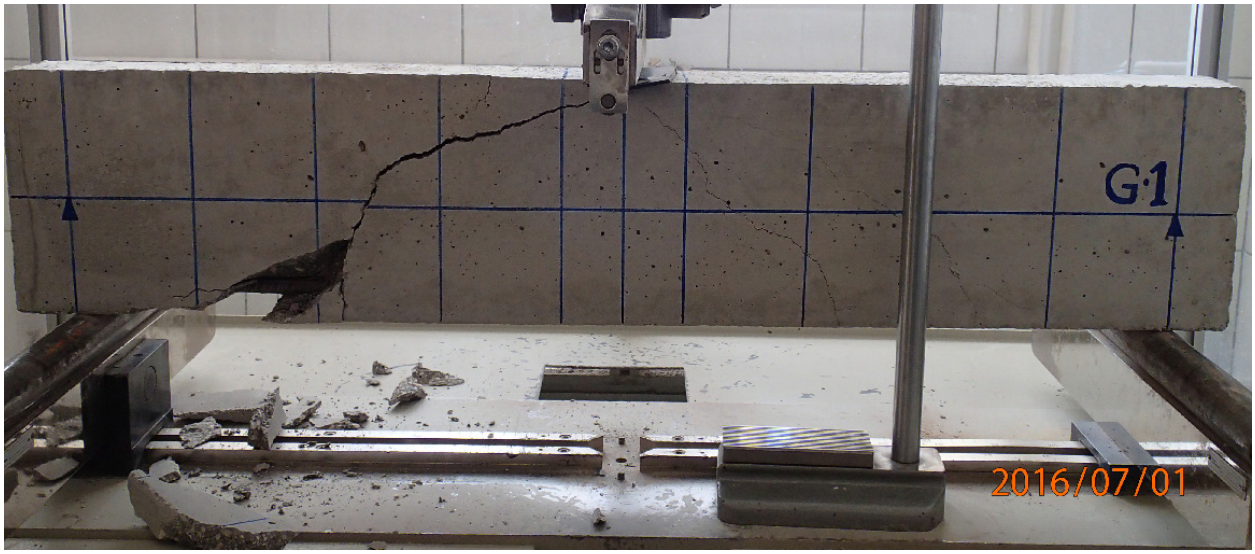


Fotografija 4.9 Pojava prvih pukotina na gredi G1



Fotografija 4.10 Širenje pukotina prije sloma na gredi G1

Na Fotografiji 4.11. vidi se greda G1 neposredno nakon sloma. Dobro se uočava protezanje pukotina od mjesta nanošenja opterećenja koncentriranom silom dijagonalno prema osloncima grede.



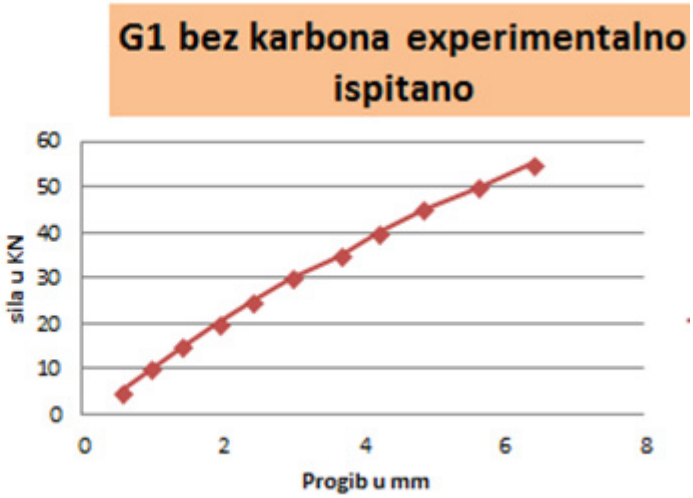
Fotografija 4.11. Slom i kraj ispitivanja grede G1

Kontinuiranim praćenjem ponašanja grede do sloma, uočeno je da je slom grede G1 nastupio pri sili od 55 kN.

4.4.2 Rezultati ispitivanje grede G1

Očitane veličine pomaka, kao rezultat ispitivanje, u polovini grede G1 za odgovarajuće opterećenje prikazane su na Dijagramu 4.1.

greda G1 (bez karbona)	
SILA U KN	progib u mm
0	0
5	0,54
10	0,97
15	1,41
20	1,94
25	2,42
30	2,97
35	3,66
40	4,21
45	4,84
50	5,63
55	6,4
60	-

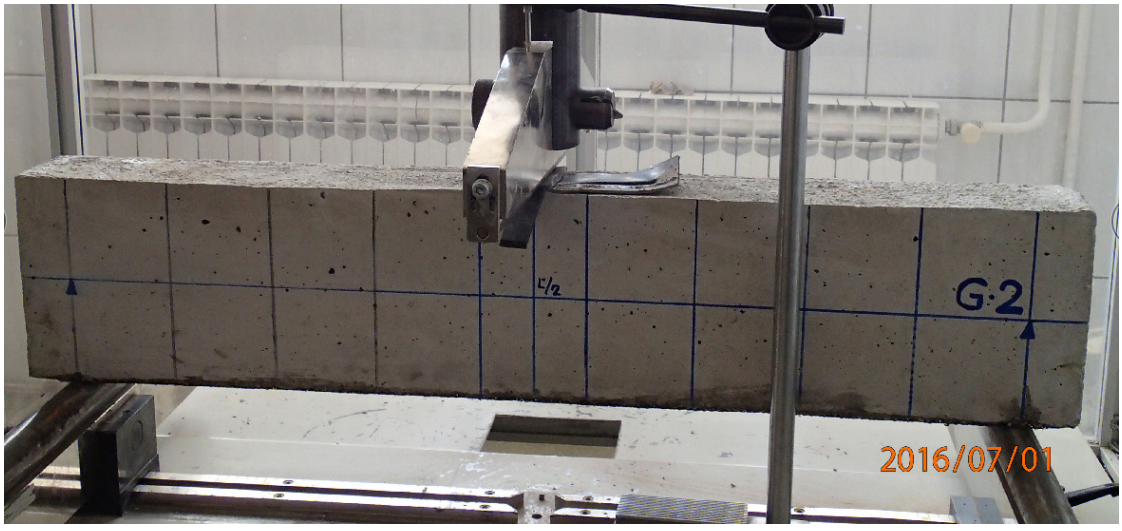


Dijagram 4.1 Prikaz dijagrama i tablice Sila - Pomak grede G1

4.4.3 Ispitivanje grede G2

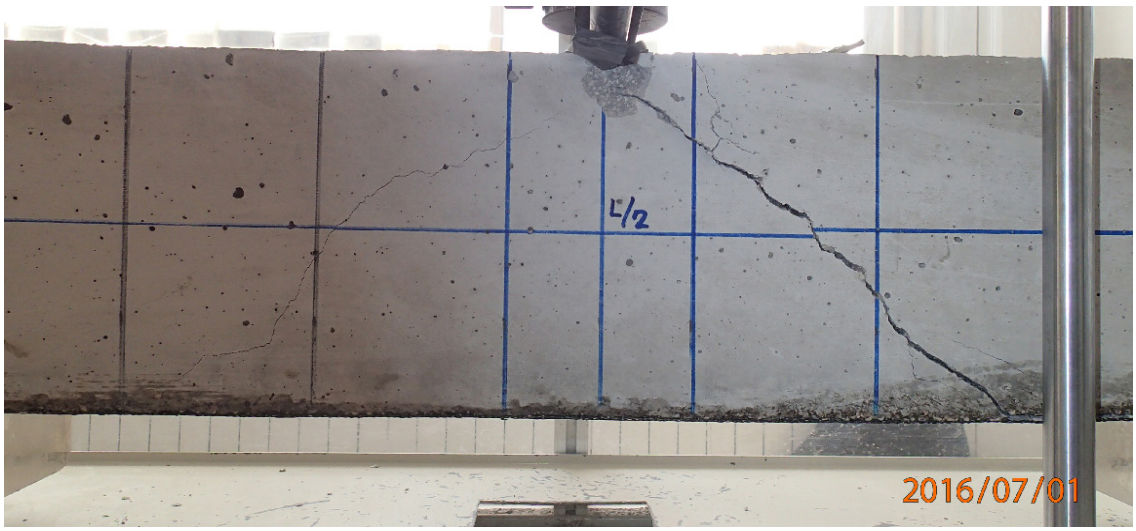
Nakon završetka ispitivanja grede G1 pristupilo se ispitivanju grede G2**.**

Greda G2 je postavljena na oslonce, te je ponovljen postupak postavljanja mikroure te klipa za unos opterećenja (Fotografija 4.12) isto kao i kod grede G1.



Fotografija 4.12. Početak ispitivanja grede G2 (ojačana karbon. trakom duljine 96cm)

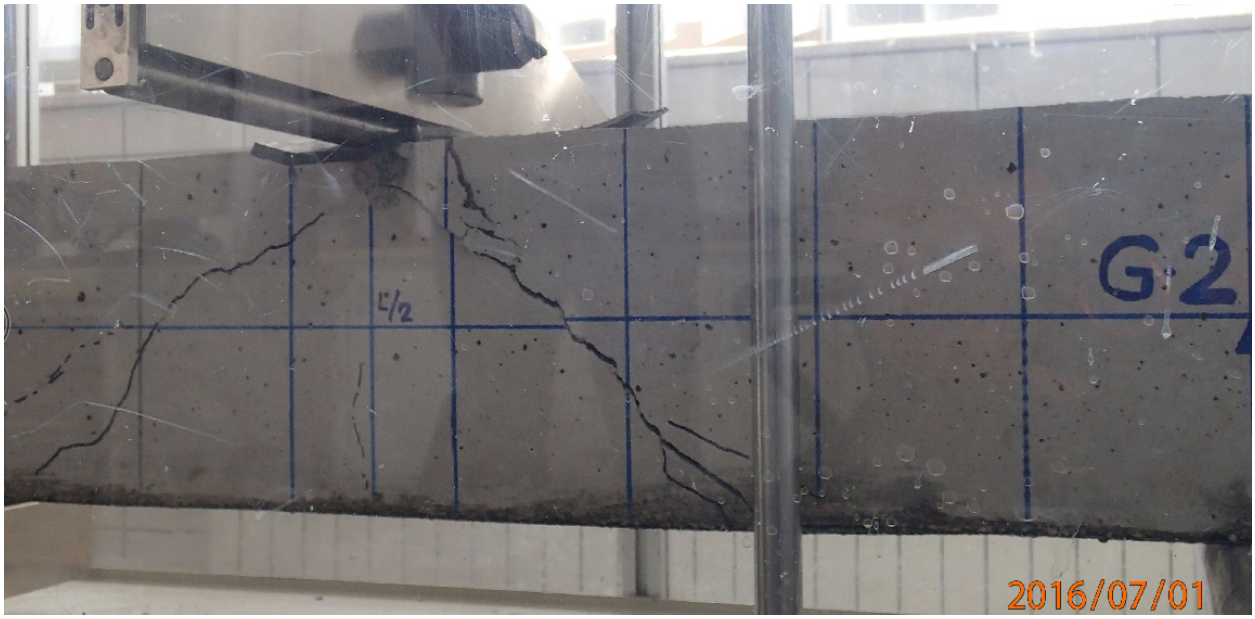
Uočavanje pojave prvih pukotina na gredi G2 prikazano ja na fotografiji 4.13. Pukotine se protežu od mjesta opterećenja koncentriranom silom dijagonalno prema osloncima grede.



Fotografija 4.13. Pojava pukotina na gredi G2 (ojačana karbon. trakom duljine 96 cm)

Na gredi G2 (ojačana karbonskom trakom duljine 96 cm) je uočena kasnija pojava pukotina nego na gredi G1, što možemo pripisati ojačanju grede u donjoj zoni karbonskom trakom, te smanjenoj mogućnosti vlačnih deformacija u donjoj zoni.

Na Fotografiji 4.14 prikazan je slom grede G2 (ojačane karbonskom trakom duljine 96 cm). Do sloma dolazi zbog prekoračenja posmične čvrstoće na spoju karbonske trake i armirano betonske grede, te dolazi do njihovog razdvajanja (Fotografija 4.14).



Fotografija 4.14. Slom grede G2 (ojačana karbonskom trakom duljine 96 cm)

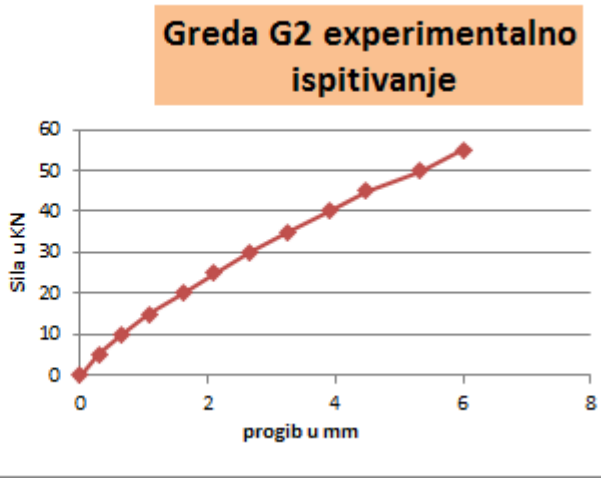
Kontinuiranim praćenjem ponašanja grede do sloma, uočeno je da je slom grede G2 nastupio pri sili od 55kN.

4.4.4 Rezultati ispitivanje grede G2

Očitane veličine pomaka, kao rezultat ispitivanja, u polovini grede G2 (ojačane karbonskom trakom duljine 96cm) za odgovarajuće opterećenje prikazane su u Dijagramu 4.2 Prikazani progibi su pomaci u vertikalnom smjeru, dok su pomaci u horizontalnom smjeru jednaki nuli.

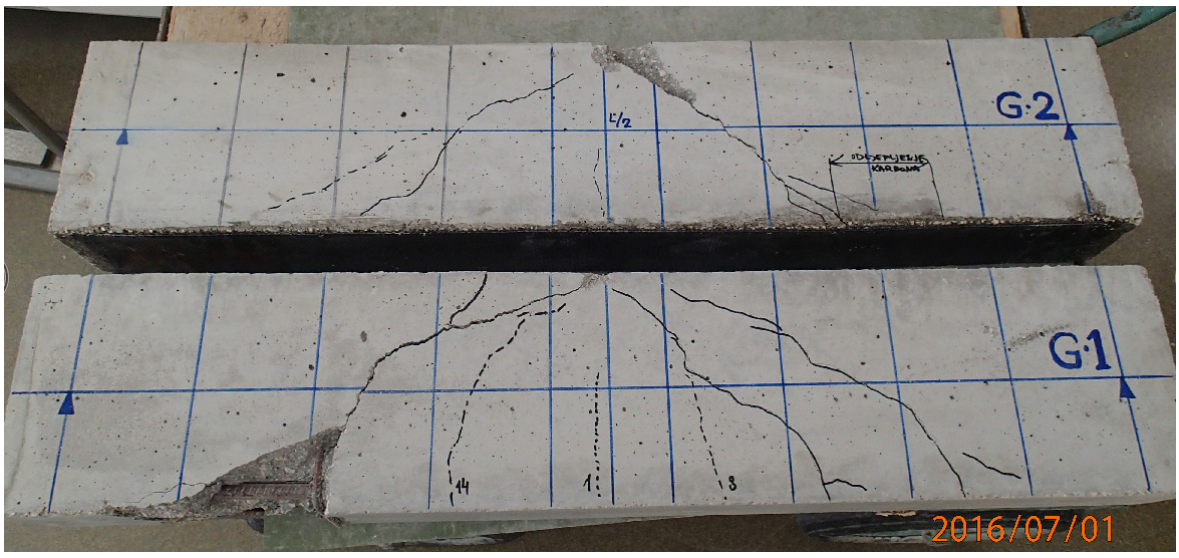
Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

greda G2 (s karbona 96cm)	
SILA U KN	progib u mm
0	0
5	0,3
10	0,65
15	1,08
20	1,61
25	2,1
30	2,67
35	3,26
40	3,91
45	4,48
50	5,33
55	6
60	-



Dijagram 4.2 Prikaz dijagrama i tablice Sila - Pomak grede G-2

Na Fotografiji 4.15 prikazano je stanje grede G1 (bez karbonske trake) i grede G2 (s karbonskom trakom duljine 96 cm), nakon sloma, te usporedni prikaz stanja pukotina greda G1 i G2. Punom linijom su označene vidljive pukotine dok su crtkanom linijom označene pukotine koje su se zatvorile nakon uklanjanja opterećenja.



Fotografija 4.15 Grede G1 i G2 nakon sloma i prikaz stanja pukotina

Na Fotografiji 4.15. može se uočiti kako je kod grede G1 i G2 nema velike razlike kod vertikalnog pomaka pukotine pri slomu. Razlog tome je amatersko ljepljenje karbonske trake. Kada je došlo do prekoračenja posmične čvrstoće između karbonske trake i betona grede, greda G2 trenutno je izgubila nosivost i karbonska traka se odlijepila. Područje na kojem se odlijepila karbonska traka vidi se na slici 4.15. i 4.16.



Fotografija 4.16. Grede G2 nakon sloma, prikaz odljepljenja karbonske trake

Greda G2 nije bila ravna na vrhu, stoga je sila djelovala koncentrirano na rubovima Nastalo je i lokalno oštećenje grede tijekom nanošenja sile (zbog neravne površine). Oštećenje grede je vidljivo na fotografiji 4.17.

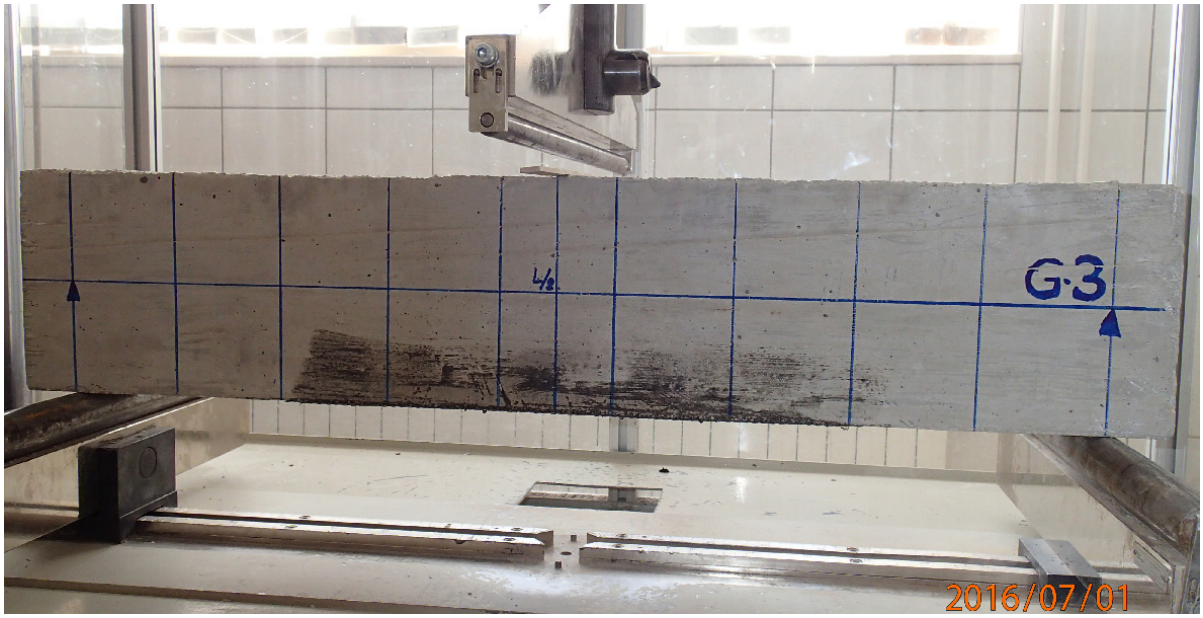


Fotografija 4.17. Grede G2 tijekom nanošenja sile, prikaz lokalnog oštećenja

4.4.5 Ispitivanje grede G3

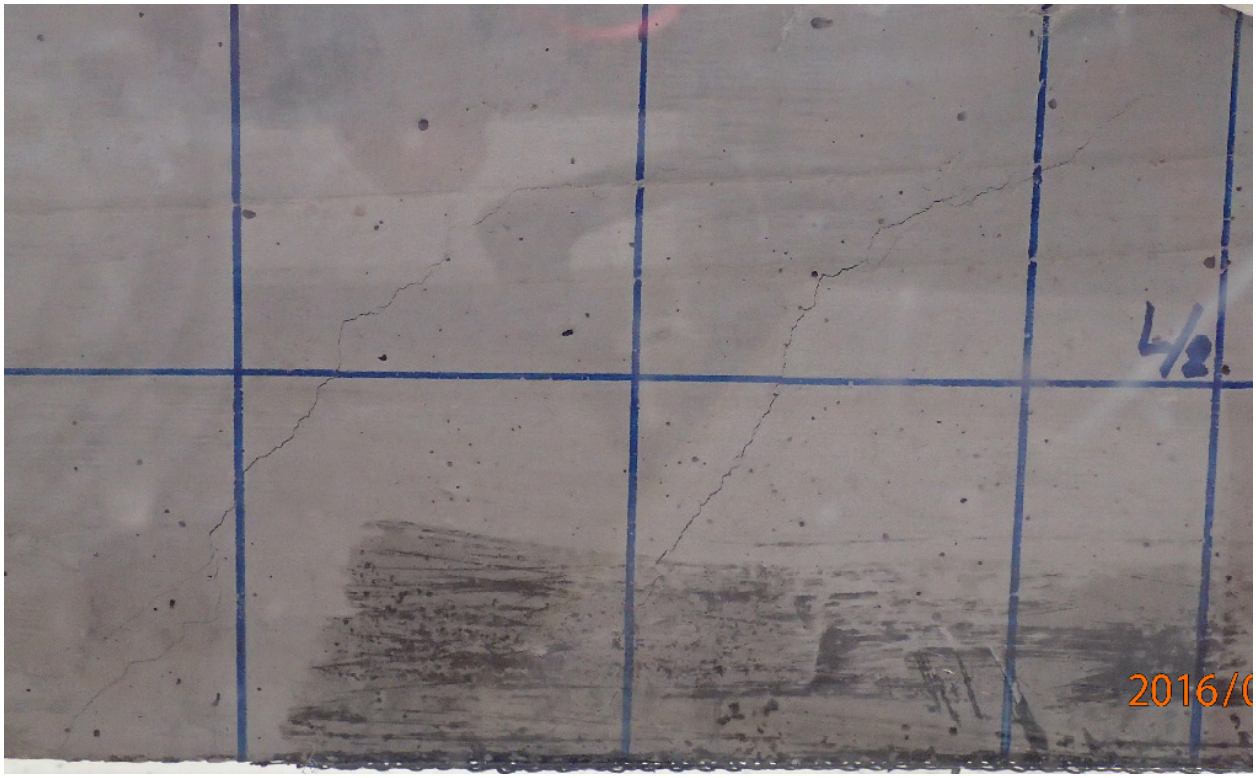
Nakon završetka ispitivanja grede G2 pristupilo se ispitivanju grede G3**.**

Greda G3 je postavljena na oslonce, te je ponovljen postupak postavljanja mikroure i klipa za unos opterećenja (Fotografija 4.18) isto kao i kod grede G2 i G1.



Fotografija 4.18. Početak ispitivanja grede G3 (ojačana karbo. trakom duljine 50 cm)

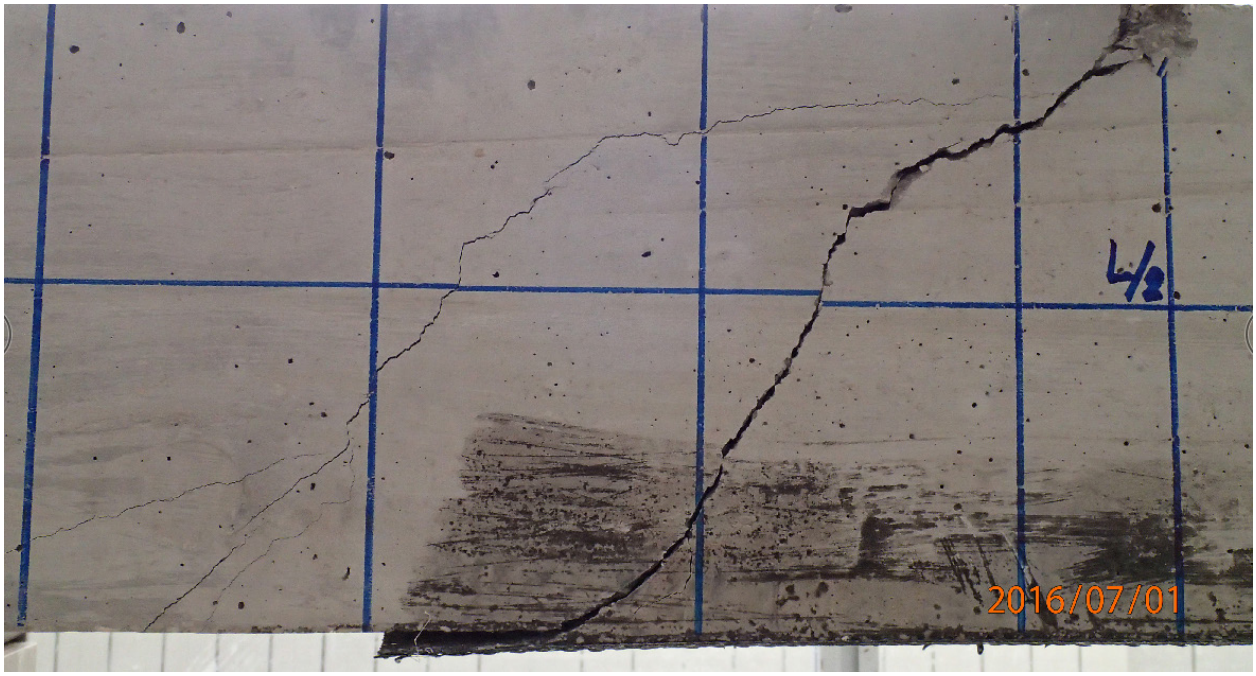
Uočavanje pojave prvih pukotina na gredi G3 prikazano ja na Fotografiji 4.19. Pukotine se protežu od mjesta opterećenja koncentriranom silom dijagonalno prema osloncima grede.



Fotografija 4.19. Pojava pukotina na gredi G3(ojačana karbonskom trakom duljine 50 cm)

Na gredi G3 (ojačana karbonskom trakom duljine 50 cm) je uočena kasnija pojava pukotina nego na gredi G1, ali su se pukotine ipak prije pojavile nego na gredi G2, što možemo pripisati ojačanju grede u donjoj zoni karbonskom trakom od 50 cm, te smanjenoj mogućnosti vlačnih deformacija u donjoj zoni.

Na Fotografiji 4.20 prikazan je slom grede G3 (ojačane karbonskom trakom duljine 50 cm). Do sloma dolazi zbog prekoračenja posmične čvrstoće na spoju karbonske trake i armirano betonske grede, te dolazi do njihovog razdvajanja (Fotografija 4.20).



Fotografija 4.20. Slom grede G3 i odlijepljenje karbonske trake (ojačana karbonskom trakom duljine 50 cm)

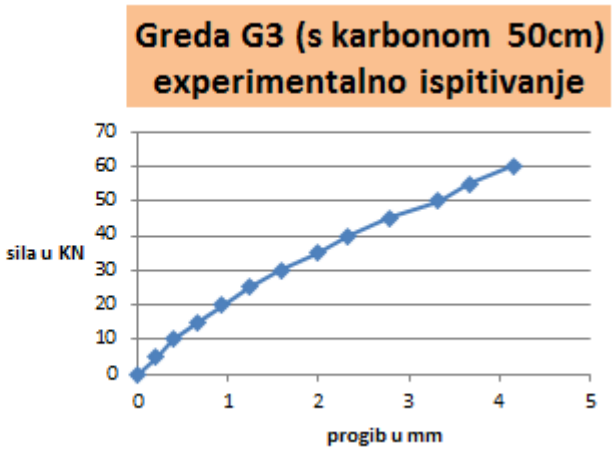
Kontinuiranim praćenjem ponašanja grede do sloma, uočeno je da je slom grede G3 nastupio pri sili od 60 kN.

4.4.6 Rezultati ispitivanje grede G3

Očitane veličine pomaka, kao rezultat ispitivanja, u polovini grede G3 (ojačane karbonskom trakom duljine 50 cm) za odgovarajuće opterećenje prikazane su u dijagramu 4.3 Prikazani progibi su pomaci u vertikalnom smjeru, dok su pomaci u horizontalnom smjeru jednaki nuli.

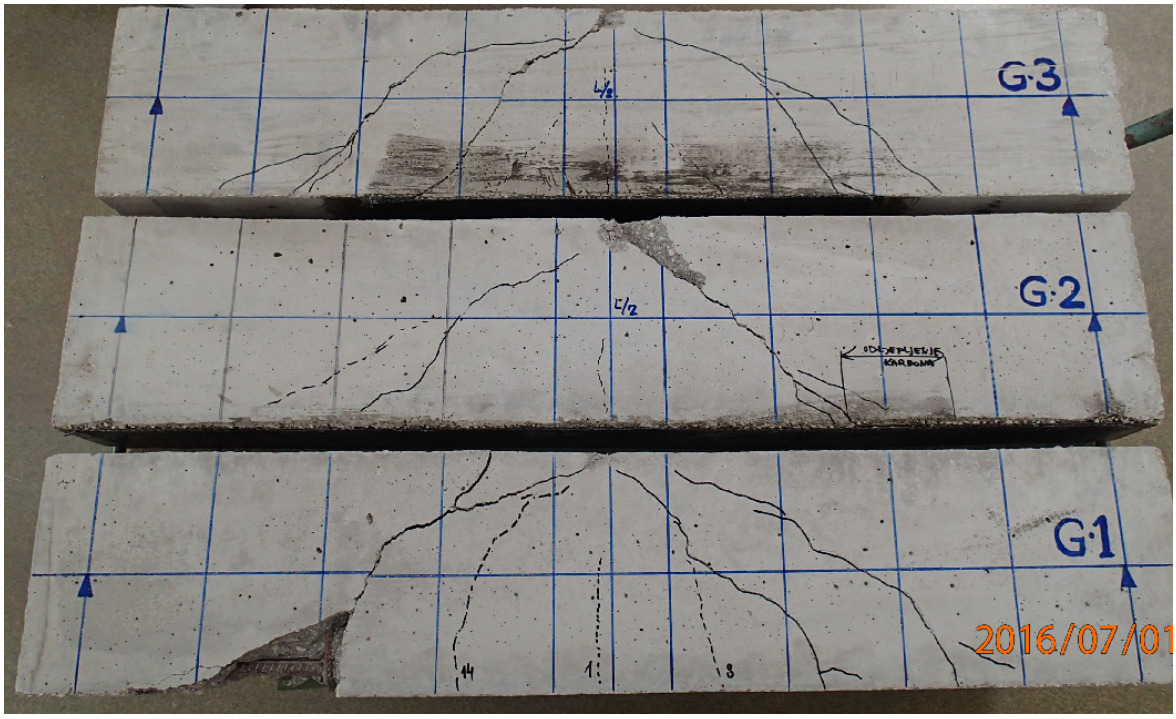
Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

greda G3 (s karbona 96cm)	
SILA U KN	progib u mm
0	0
5	0,2
10	0,39
15	0,67
20	0,93
25	1,23
30	1,58
35	1,98
40	2,33
45	2,78
50	3,32
55	3,67
60	4,15



Dijagram 4.3. Prikaz dijagrama i tablica Sila - Pomak grede G3

Na Fotografiji 4.21 prikazano je stanje grede G1 (bez karbonske trake), grede G2 (s karbonskom trakom duljine 96 cm) i greda G3 (karbonskom trakom duljine 50 cm), nakon sloma, te usporedni prikaz stanja pukotina greda G1, G2 i G3. Punom linijom su označene vidljive pukotine dok su crtkanom linijom označene pukotine koje su se zatvorile nakon uklanjanja opterećenja.



Fotografija 4.21. Grede G1 ,G2 i G3 nakon sloma i prikaz stanja pukotina

Na Fotografiji 4.21 može se uočiti kako je kod grede G2 i G3 došlo do većeg vertikalnog pomaka pukotine pri slomu u usporedbi s gredom G1, a razlog tome je ojačanje karbonskom trakom usljed kojeg je greda G2 podnijela veće opterećenje prije pojave prvih pukotina od grede G1. Greda G3 je podnijela veće opterećenje prije pojave prvih pukotina od grede G2, iako smo očekivali suprotne rezultate. Razlog tome je lokalno oštećenje grede G2 na mjestu nanošenja sile (koje je vidljivo na fotografiji 4.17 i 4.21) i odljepljenje karbonske trake u označenom području (koje je vidljivo na fotografiji 4.21). Kada je došlo do prekoračenja posmične čvrstoće između karbonske trake i betona grede, grede G2 i G3 trenutno su izgubile nosivost te su uzrok tome šire pukotine nego kod grede G1.

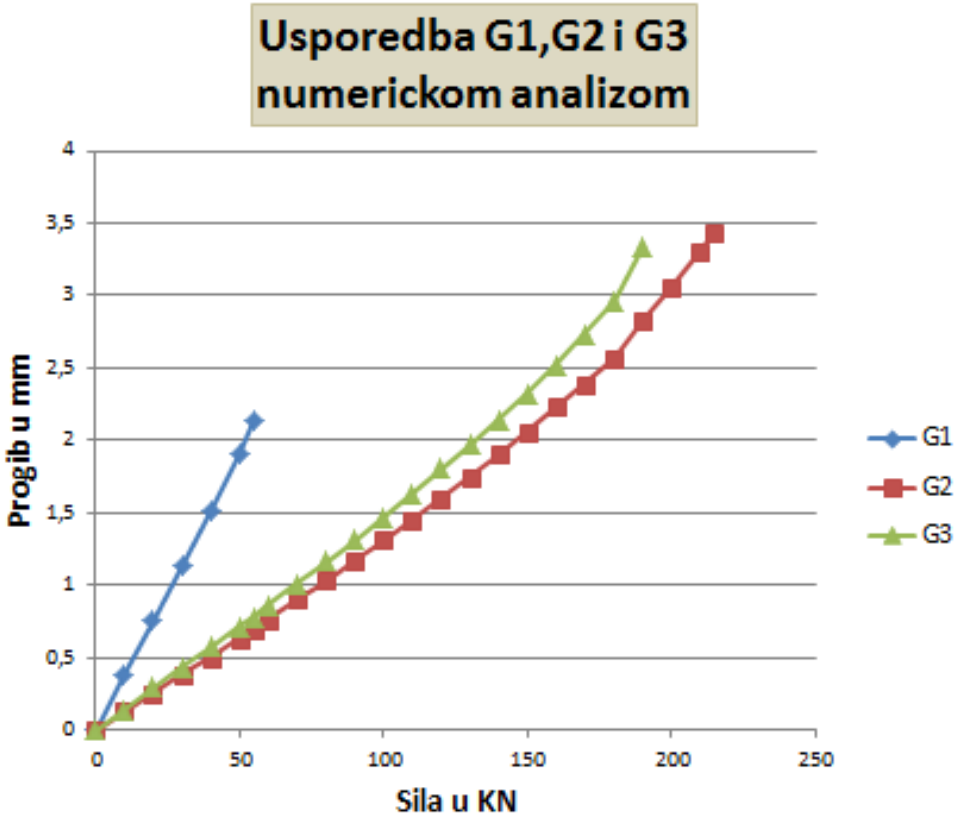
5. USPOREDBE ANALIZE GREDA

5.1 Usporedba rezultata pomaka numeričkog ispitivanja greda G1 ,G2 i G3

U tablici 5.1. i na dijagramu 5.1. prikazana je usporedba progiba numeričke analize grede G1 (bez ojačanja karbonskom trakom) , grede G2 (ojačanu karbonskom trakom duljine 96 cm) i grede G3 (ojačanu karbonskom trakom duljine 50 cm).

Sila u KN	G1	G2	G3
0	0	0	0
10	0,38	0,13	0,14
20	0,75	0,25	0,29
30	1,13	0,38	0,43
40	1,51	0,5	0,57
50	1,9	0,63	0,71
55	2,13	0,69	0,78
60	lom	0,76	0,86
70		0,9	1,01
80		1,03	1,16
90		1,17	1,31
100		1,31	1,47
110		1,45	1,63
120		1,6	1,8
130		1,75	1,97
140		1,9	2,14
150		2,06	2,32
160		2,23	2,52
170		2,39	2,73
180		2,57	2,96
190		2,83	3,34
200		3,06	lom
210		3,31	
215		3,44	
220		lom	

Tablica 5.1. Usporedba progiba greda G1, G2 i G3 provedena numeričkom analizom



Dijagram 5.1. Grafički prikaz usporedbe progiba greda G1 , G2 i G3 provedena numeričkom analizom

Numeričkom analizom ponašanja grede G1 ,grede G2 i grede G3 u računalnom programu SCIA Engineer dobili smo računsko ponašanje analiziranih greda. Iz dijagrama Sila – Pomak možemo uočiti približno linearno ponašanje sve tri grede i to od samog početka opterećivanja do kraja nanošenja opterećenja.

Od samog početka opterećenja greda, uočljivi su veći iznosi progiba za istu silu kod grede G1 (koja nije ojačana karbonskom trakom u donjoj zoni) nego kod greda G2 i G3. Razlog tome je što grede G2 i G3 (ojačana karbonskom trakom) imaju veću vlačnu čvrstoću u donjoj zoni i samim time karbonska vlakna onemogućavaju veće iznose progiba kao što je slučaj s gredom G1.

Lom grede G1 dogodio se pri iznosu sile od 55 KN, dok se lom grede G2 ojačane karbonskom trakom dogodio pri iznosu sile od 215 KN, a kod grede G3 pri iznosu 190 KN.

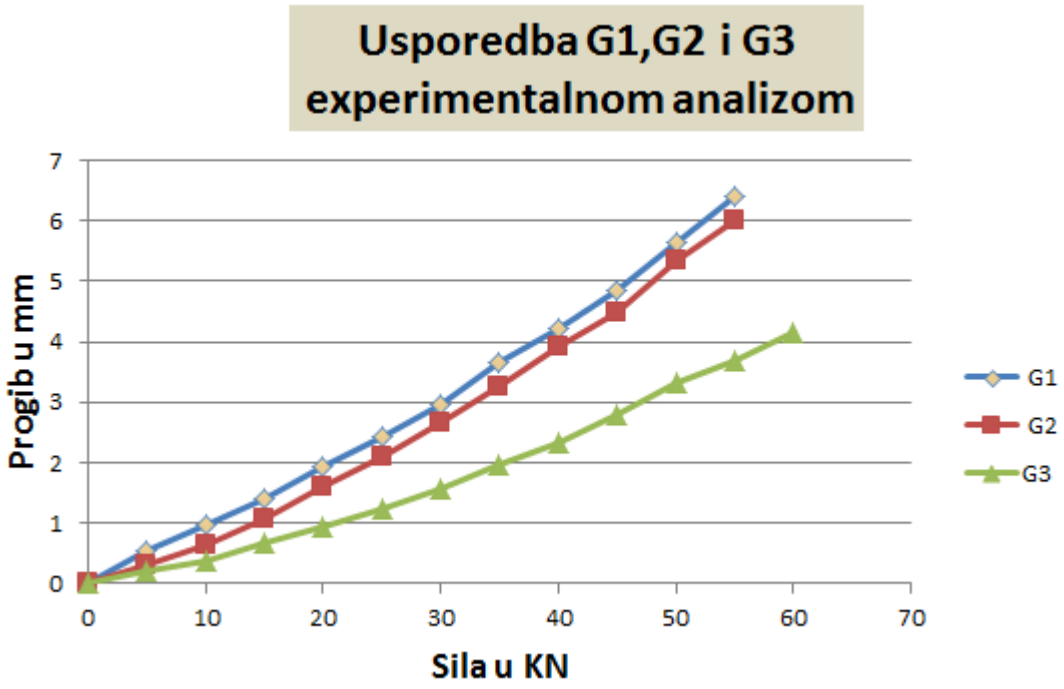
Uočljiva je razlika u sili loma. Također postoji mogućnost netočnosti u ovom obliku numeričke analize zbog modeliranja karbonskih vlakana kao dvije šipke čelika u donjoj zoni poprečnog presjeka, dok se u eksperimentalnom ispitivanju karbonska traka lijepi s donje strane greda.

5.2 Usporedba rezultata pomaka eksper. ispitivanja greda G1,G2 i G3

U Tablici 5.2 i na Dijagramu 5.2 prikazana je usporedba progiba eksperimentalne analize grede G1 (bez ojačanja karbonskom trakom), grede G2 (ojačanu karbonskom trakom duljine 96 cm) i grede G3 (ojačanu karbonskom trakom duljine 50 cm).

Sila (kN)	Progib u mm G1	Progib u mm G2	Progib u mm G3
0	0	0	0
5	0,54	0,3	0,2
10	0,97	0,65	0,39
15	1,41	1,08	0,67
20	1,94	1,61	0,93
25	2,42	2,1	1,23
30	2,97	2,67	1,58
35	3,66	3,26	1,98
40	4,21	3,91	2,33
45	4,84	4,48	2,78
50	5,63	5,33	3,32
55	6,4	6	3,67
60	-	-	4,15

Tablica 5.2. Usporedba progiba greda G1 ,G2 i G3 provedena eksperimentalnom analizom



Dijagram 5.2. Grafički prikaz usporedbe progiba grede G1 , G2 i G3 provedena eksperimentalnom analizom

Eksperimentalnom analizom grede G1, G2 i grede G3 dobiveni su rezultati koji pokazuju stvarno ponašanje greda izloženih djelovanju koncentrirane sile na polovici raspona.

Analizirajući dijagrame Sila–Pomak kod grede G1 uočeno je približno linearno ponašanje. Do loma je došlo kod nanošenja sile od 55 KN, što odgovara rezultatima kod numerčike analizi.

Iz dijagrama Sila–Pomak grede G2 (ojačane karbonskom trakom dužine 96cm) vidljivo je linearno ponašanje, dok maksimalna sila nosivosti grede G2 iznosi 55 kN, što je identično kao i kod grede G1. Razlog tome je amatersko ljepljenje karbonske trake (koja se odlijepila već pri sili od 55 KN), te lokalno oštećenje koje se javilo tokom djelovanja sile od 25 KN (jer je greda bila neravna na mjestu nanošenja sile, te je sila djelovala kao koncentrirana sila na rubovima).

Zaključujemo da se greda G2 ponaša linearno sve do trenutka kada dolazi do smanjenja posmične čvrstoće između karbonske trake zaljepljene s donje strane grede i same grede.

Nedugo zatim dolazi i do samog loma grede pri iznosu sile od 55kN.

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

Prilikom ispitivanja grede G3 došlo je do pojave prvih pukotina dosta kasnije za razliku od grede G1. Prva pukotina se javila tek tokom djelovanja sile od 30 KN. Značajnije pukotine kod grede G3 uočene su nedugo prije loma same grede.

Iz dijagrama Sila–Pomak grede G3 (ojačane karbonskom trakom dužine 50 cm) vidljivo je približno linearno ponašanje, dok maksimalna sila nosivosti grede G3 iznosi 60 KN, što je samo malo veće nego kod greda G1. Razlog tome je amatersko ljepljenje karbonske trake (koja se odlijepila već pri sili od 60 KN). Greda G2 je slomljena pri djelovanju sile od 55 KN, a greda G3 pri djelovanju sile od 60 KN. Rezultati su suprotni od očekivanog, jer je greda G2 dvostruko više ojačana od grede G3.

Zaključujemo da se greda G3 ponaša linearno sve do trenutka kada dolazi do smanjenja posmične čvrstoće između karbonske trake zaljepljene s donje strane grede i same grede.

Nedugo zatim dolazi i do samog loma grede pri iznosu sile od 60 kN..

Gubitak nosivosti kod eksperimentalnog ispitivanja grede G1 dolazi kod progiba iznosa 6.4 mm, dok je progib pri kojem greda G2 gubi nosivost iznosa 6 mm, a greda G3 iznosa 4.15 mm.

Progib grede G1 bez ojačanja karbonskom trakom je samo malo veći od progiba grede koja je ojačana karbonskom trakom od 96 cm, što nije očekivan rezultat.

Progib grede G3 je znatno manji od progiba grede G1, što smo i očekivali.

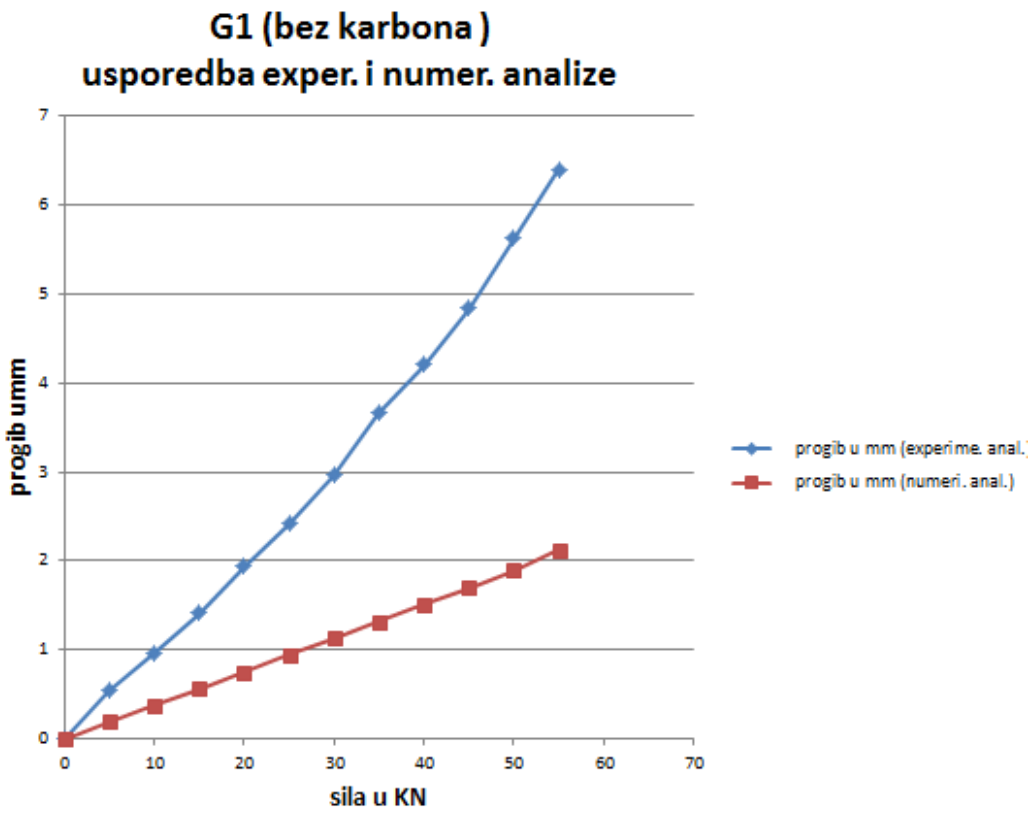
Iz toga zaključujemo da je karbonska traka u donjoj zoni grede povećala nosivost i doprinjela smanjenju progiba, ali je također u trenutku prekoračenja posmične čvrstoće između karbonske trake i betona došlo do trenutnog sloma grede.

5.3 Usporedba rezultata pomaka numeričkog ispitivanja grede G1 i eksperimentalnog ispitivanja grede G1

U tablici 5.3. i na dijagramu 5.3. prikazana je usporedba progiba numeričke analize grede G1 u odnosu na eksperimentalnu analizu grede G1.

greda G1 (bez karbona)		
SILA U KN	progib u mm (experime. anal.)	progib u mm (numeri. anal.)
0	0	0
5	0,54	0,19
10	0,97	0,38
15	1,41	0,56
20	1,94	0,75
25	2,42	0,94
30	2,97	1,13
35	3,66	1,32
40	4,21	1,51
45	4,84	1,7
50	5,63	1,9
55	6,4	2,13
60	lom	lom

Tablica 5.3. Usporedba eksperimentalne i numeričke analize progiba grede G1



Dijagram 5.3. Grafički prikaz usporedbe progiba numeričke i eksperimentalne analize grede G1

Iz rezultata dobivenih usporedbom numeričke analize grede G1 (bez ojačanja karbonskom trakom) i eksperimentalne analize grede G1 (bez ojačanja karbonskom trakom) na sredini raspona grede, zaključujemo da je krivulja Sila – Pomak grede dobiven numeričkom metodom podjednak pravom ponašanju grede pri eksperimentalnom ispitivanju sve do loma. Do loma je došlo u oba slućaja kod djelovanja sile od 55 KN.

5.4 Usporedba rezultata pomaka numeričkog ispitivanja grede G2 i eksperimentalnog ispitivanja grede G2

U Tablici 5.4 i na Dijagramu 5.4 prikazana je usporedba progiba numeričke analize grede G2 u odnosu na eksperimentalnu analizu grede G2.

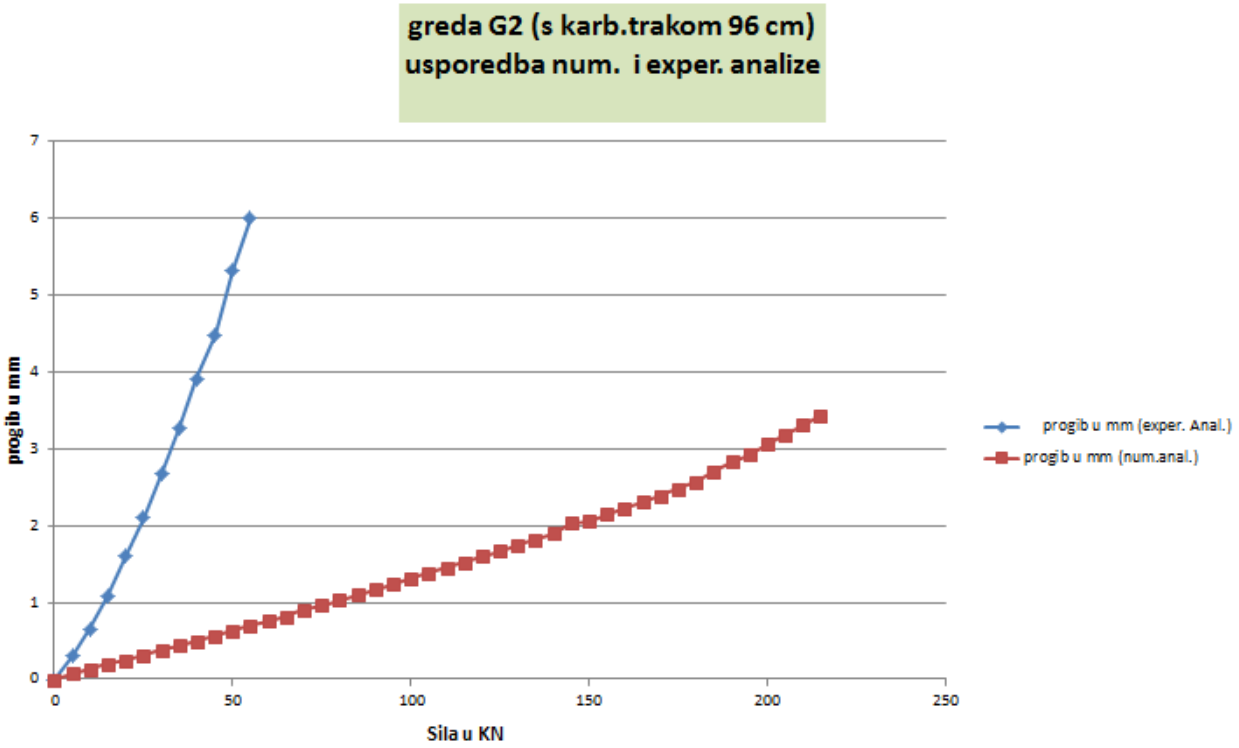
Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

greda G2 (s karbonskom trakom 96 cm)		
Sila u KN	progib u mm (exper. Anal.)	progib u mm (num.anal.)
0	0	0
5	0,3	0,07
10	0,65	0,13
15	1,08	0,2
20	1,61	0,25
25	2,1	0,31
30	2,67	0,38
35	3,26	0,44
40	3,91	0,5
45	4,48	0,56
50	5,33	0,63
55	6	0,7
60		0,76
65		0,82
70		0,9
75		0,96
80		1,03
85		1,1
90		1,17
95		1,24
100		1,31
105		1,38
110		1,45
115		1,52
120		1,6
125		1,67
130		1,75
135		1,82
140		1,9
145		2,03
150		2,06
155		2,15
160		2,23
165		2,31
170		2,39
175		2,48
180		2,57
185		2,7
190		2,83
195		2,92
200		3,06
205		3,18
210		3,31
215		3,44
220		lom

n

Tablica 5.4.Usporedba eksperimentalne i numeričke analize progiba grede G2 (greda ojačana karbonskom trakom duljine 96 cm)

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede



Dijagram 5.4. Grafički prikaz usporedbe progiba numeričke i eksperimentalne analize grede G2 (greda ojačana karbonskom trakom duljine 96 cm)

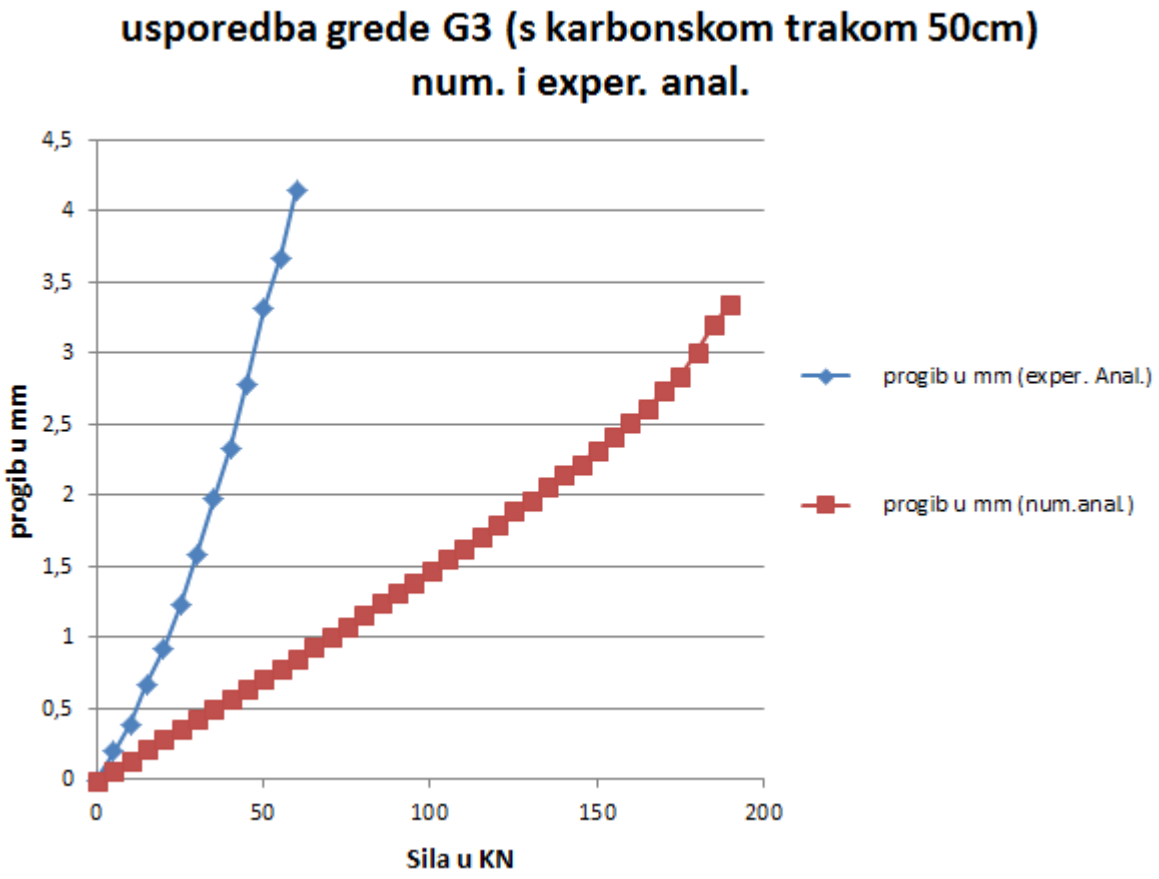
Kod grede G2 iz rezultata dobivenih usporedbom numeričke i eksperimentalne analize grede G2 promatrajući odnos Sila – Pomak na sredini raspona grede zaključujemo da i numerička i eksperimentalna analiza daju velike razlike u rezultatima.Razlog tome je amaterski ljepljena karbonska traka i lokalno ostečenje koje je nastalo tokom experimentalnog ispitivanja zbog neravnina same grede.

5.5 Usporedba rezultata pomaka numeričkog ispitivanja grede G3 i eksperimentalnog ispitivanja grede G3

U tablici 5.5. i na dijagramu 5.5. prikazana je usporedba progiba numeričke analize grede G3 u odnosu na eksperimentalnu analizu grede G3.

greda G3 (s karbonskom trakom 50 cm)		
Sila u KN	progib u mm (exper. Anal.)	progib u mm (num.anal.)
0	0	0,00
5	0,2	0,07
10	0,39	0,14
15	0,67	0,22
20	0,93	0,29
25	1,23	0,36
30	1,58	0,43
35	1,98	0,50
40	2,33	0,57
45	2,78	0,64
50	3,32	0,71
55	3,67	0,78
60	4,15	0,86
65	lom	0,94
70		1,01
75		1,08
80		1,16
85		1,24
90		1,31
95		1,39
100		1,47
105		1,55
110		1,63
110		1,63
115		1,71
120		1,80
125		1,89
130		1,97
135		2,06
140		2,14
145		2,22
150		2,32
155		2,41
160		2,52
165		2,61
170		2,73
175		2,84
180		3,01
185		3,20
190		3,34
195		lom

Tablica 5.5. Usporedba eksperimentalne i numeričke analize progiba grede G3 (greda ojačana karbonskom trakom duljine 50 cm)



Dijagram 5.5. Grafički prikaz usporedbe progiba numeričke i eksperimentalne analize grede G3 (greda ojačana karbonskom trakom duljine 50 cm)

Iz rezultata dobivenih usporedbom numeričke i eksperimentalne analize grede G3 promatrajući odnos Sila – Pomak na sredini raspona grede zaključujemo da i numerička i eksperimentalna analiza daju velike razlike u rezultatima. Razlog tome je amaterski ljepljena karbonska traka i neravnina same grede.

6. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu provedena su eksperimentalna ispitivanja i numeričke analize tri armirano betonske grede, jedna uobičajeno izvedena, druga u svemu jednaka prvoj, ojačana karbonskom trakom duljine 96 cm u vlačnoj zoni, a treća u svemu jednaka prvoj i drugoj, samo ojačana karbonskom trakom duljine 50 cm u vlačnoj zoni.

Armirano betonske grede G1, G2 i G3 izrađene su dimenzija 100x20x10 cm. Grede su izrađene od betona klase C 25\30, te su armirane armaturnim šipkama 2ϕ10 mm u gornjoj zoni i 2ϕ10 mm u donjoj zoni. Vilice su ϕ6 mm na razmaku od 20 cm. Čelik od kojih su napravljene armaturne šipke pri izradi greda je B500B. Raspon između oslonaca greda je 90 cm. Obje grede opterećene su koncentriranom silom na polovini raspona koja je inkrementalno povećavana do sloma greda.

Numerička analiza je provedena u računalnom programu SCIA Engineer [6], dok su eksperimentalna ispitivanja provedena u laboratoriju IGH u Splitu.

Cilj ispitivanja u ovom radu je usporedba numeričkih analiza grede G1 ,grede G2 i grede G3, te usporedba eksperimentalnih ispitivanja greda G1 ,G2 i grede G3 pri čemu su izmjerene sile nosivosti i progibi, kao i nacrtani odgovarajući Sila – Pomak dijagrami.

Numeričkom analizom izvršen je proračun te su dobiveni pomaci i pripadajuće sile. Usporedbom dobivenih rezultata sila i pomaka između grede G1 (bez ojačanja karbonskom trakom), grede G2 (ojačane karbonskom trakom u donjoj zoni duljine 96 cm) i grede G3 (ojačane karbonskom trakom u donjoj zoni duljine 50 cm) došli smo do zaključka da je utjecaj karbonske trake značajan, pogotovo kod numeričke analize, dok kod experimentalne zbog neravnih greda i amaterskog ljepljenja karbonske trake, nismo dobili točne rezultate. Lomna sila grede G2 je kod numeričke analize veća u odnosu na gredu G1. Također uočavamo dvostruko manji progib na sredini raspona grede G2 u odnosu na gredu G1. Lomna sila grede G3 je kod numeričke analize manja u odnosu na gredu G2. Također uočavamo manji progib na sredini raspona grede G3 u odnosu na gredu G2.

Prilog analizi utjecaja duljine karbonske trake na ponašanje armirano betonske grede

Dijagrami Sila – Pomak dobiveni numeričkom i eksperimentalnom analizom nisu u potpunosti linearni. Jedan od mogućih razloga je sto je kod eksperimentalnog ispitivanju karbonska traka epoxy smolom zaljepljena amaterski u vlačnoj zoni za betonsku gredu.

Kod experimentalnog ispitivanja dolazilo je do drobljenja komadića betona na mjestu nanošenja koncentrirane sile. Također je važan i kontakt između greda i oslonaca kao i postupak i ujednačenost izrade armirano betonskih greda.

Kod grede G1 (bez karbonske trake) možemo zaključiti da numerička analiza i eksperimentalno ispitivanje daju približno jednake rezultate.

Kod grede G2 iz rezultata dobivenih usporedbom numeričke i eksperimentalne analize promatrajući odnos Sila – Pomak na sredini raspona grede zaključujemo da i numerička i eksperimentalna analiza daju velike razlike u rezultatima. Razlog tome je amaterski ljepljena karbonska traka i lokalno oštećenje koje je nastalo tokom experimentalnog ispitivanja zbog neravnina same grede.

Iz rezultata dobivenih usporedbom numeričke i eksperimentalne analize grede G3 promatrajući odnos Sila – Pomak na sredini raspona grede zaključujemo da i numerička i eksperimentalna analiza daju velike razlike u rezultatima. Razlog tome je također amaterski ljepljena karbonska traka i neravnina same grede.

Na kraju ovog rada može se zaključiti da grede G1 ,G2 i G3 imaju različito ponašanje tokom numeričke i eksperimentalne analize. Numeričkom analizom dobijemo sliku pomaka u idealnim uvjetima, dok u eksperimentalnom ispitivanju nismo dobili stvarnu sliku pomaka u stvarnim uvjetima zbog nesavršenosti greda.

Rad s karbonom i karbonskom trakom kao još nedovoljno istraženim materijalima u građevinarstvu u ovom radu nam je omogućio da zapazimo povećanje nosivosti armirano betonske grede G3 koja je bila ojačana karbonskom trakom duljine 50 cm u odnosu na istovjetnu armirano betonske gredu G1 bez ojačanja.

7. LITERATURA

[1] P. Marović: Ispitivanje konstrukcija, interna skripta – zapisi s predavanja, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, 2013.

[2] http://www.propisi.hr/print.php?id=10911

[3] Diplomski rad ,Alen Zemunik ,2016.

[4] V. Kozulić: Tehnička mehanika II, nastavni materijali, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, 2013.

[5] A. Mihanović, B. Trogrlić: Građevna statika I, interna skripta – zapisi s predavanja, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Sveučilište u Splitu, Split, 2009.

[6] SCIA Engineer 2014, Nemetschek Scia nv, Copyright ©2013.

[7] http://www.westsystem.com/ss/use-guides/

[8] https://bib.irb.hr/datoteka/445419.TS-AJ-SM_Zabljak_2010_cijeli.pdf

[9] http://www.dracomerx.com/