

**UNIVERZITET CRNE GORE
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



Nataša Kopitović Vuković

**PONAŠANJE AB KONSTRUKCIJA
OJAČANIH KOMPOZITNIM MATERIJALIMA
POD DUGOTRAJNIM OPTEREĆENJEM**

Doktorska disertacija

Podgorica, 2020. godine

**UNIVERSITY OF MONTENEGRO
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING**



Nataša Kopitović Vuković

**BEHAVIOUR OF RC STRUCTURES
STRENGTHENED WITH COMPOSITE
MATERIALS UNDER THE LONG-TERM LOAD**

Doctoral dissertation

Podgorica, 2020. godine

Doktorand:

Ime i prezime: Nataša Kopitović Vuković, dipl. inž. građ.

Datum i mjesto rođenja: 17. 07. 1975. god, Podgorica, Crna Gora

Postdiplomske studije: Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore

Postdiplomske magistarske akademske studije,

Studijski program Građevinarstvo, Konstruktivni smjer, 2008. god.

Mentor:

Prof. dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

Komisija za ocjenu podobnosti doktorske teze i kandidata:

prof. dr Radenko Pejović, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

prof. dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

prof. dr Vlastimir Radonjanin, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu

Komisija za ocjenu doktorske teze:

prof. dr Radenko Pejović, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

prof. dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

prof. dr Vlastimir Radonjanin, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu

Komisija za odbranu doktorske teze:

prof. dr Radenko Pejović, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

prof. dr Vlastimir Radonjanin, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu

prof. dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

Datum odbrane: 06.11.2020.god.

Zahvalnost

Zadovoljstvo mi je da nakon završetka jednog ovako kompleksnog i zahtjevnog zadatka, zahvalim svima koji su doprinijeli da on bude uspješno okončan i da rad na njemu predstavlja drago sjećanje.

Prije svega, moja zahvalnost pripada mentoru prof. dr Radomiru Zejaku, redovnom profesoru na Građevinskom fakultetu u Podgorici. Zahvaljujući njegovim sugestijama sam na samom početku svog naučnog istraživanja došla do savremene i aktuelne teme. Ova disertacija je, između ostalog, rezultat njegove nesebične podrške tokom pripreme i izrade disertacije, a posebno u dijelu eksperimentalnog istraživanja.

Priprema eksperimenta i rad na toj fazi istraživanja predstavljali su zahtjevan ali najinteresantniji dio posla, koji bi bilo nemoguće obaviti bez podrške ljudi neposredno uključenih u proces rada u laboratoriji, a to su Dimo, Zoran i Dragan.

U realizaciji eksperimentalnog istraživanja od velikog značaja bila je finansijska podrška Inženjerske komore Crne Gore, kao i preduzeća „Fidija“ iz Podgorice, na čemu sam im veoma zahvalna.

Magistru Svetislavu Popoviću od srca zahvaljujem na stručnoj i nesebičnoj pomoći pri korišćenju programskog paketa ANSYS.

Za finalni izgled i tehničku obradu ove disertacije zahvalnost dugujem dragoj kolegici i prijateljici Mariji Jevrić, čije su sugestije i podrška tokom rada bile dragocjene.

Posebnu zahvalnost dugujem kolektivu Građevinskog fakulteta u Podgorici, na čelu sa dekanom prof. dr Marinom Rakočević, koji su uvijek našli riječi razumijevanja i prijateljske podrške.

Na kraju, najvažnije i najveće hvala mojoj porodici na razumijevanju i bezrezervnoj podršci tokom nastajanja ovog rada.

PODACI O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Naziv doktorskih studija:	Doktorske studije Univerziteta Crne Gore Građevinski fakultet Studijski program - Građevinarstvo
Naslov doktorske disertacije:	Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod dugotrajnim opterećenjem

Rezime:

Korozija, zamor i nedostatak pravilnog održavanja su u većini slučajeva glavni uzročnici propadanja konstrukcija. Za njihovu rekonstrukciju primjenjuju se različite tehnologije, u zavisnosti od vrste elementa koji se ojačava, od njegovog naponskog stanja, kao i od upotrijebljenog materijala. Spoljašnje CFRP ojačanje zategnutog pojasa betonske grede pokazalo se kao uspješna alternativa mnogo skupljoj zamjeni ovih elemenata. Visoka čvrstoća na zatezanje i modul elastičnosti čine ovaj materijal atraktivnim i praktičnim za ojačanje postojećih elemenata.

Ovaj rad je nastao kao rezultat eksperimentalnog istraživanja, sprovedenog kako bi se utvrdio doprinos kompozitnog materijala povoljnijem ponašanju greda T-presjeka, realnih dimenzija i određene starosti, u eksploatacionim uslovima, pod uticajem dva tipa kratkotrajnog i dva nivoa dugotrajnog opterećenja. Kako je pregledom literature utvrđeno da su takva eksperimentalna ispitivanja veoma rijetka, u tu svrhu je prije više od 10 godina napravljeno deset predmetnih uzoraka. Oni su ojačavani karbonskim trakama različitih dužina na donjoj, zategnutoj ivici rebra, a zatim su ispitivani na dejstvo koncentrisanog kratkotrajnog i ravnomjernog kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja. Utvrđen je uticaj oba tipa opterećenja kao i različitih dužina ojačanja, kako na mehanizam loma ispitivanih uzoraka, tako i na redukciju njihovih graničnih nosivosti, veličine ugiba, širine prslina i sl. Samim tim, ispitivanje uticajnih parametara na ponašanje uzoraka ojačanih FRP materijalom, fokusirano je na:

- uticaj položaja i dužine spoljašnjeg ojačanja;
- uticaj tipa kratkotrajnog opterećenja za 2 neojačane i 4 ojačane grede;
- uticaj nivoa i dužine trajanja dugotrajnog opterećenja za 4 ojačane grede.

Ponašanje armirano-betonskih greda, pri dejstvu dugotrajnog konstantnog opterećenja, u uslovima nivoa napona od 55% do 85% čvrstoće na kratkotrajno opterećenje, bio je predmet proučavanja u ovom radu. Sve četiri grede su opterećene ravnomjernim opterećenjem po cijeloj dužini, u trajanju od 6 mjeseci. Ovo opterećenje je iznosilo 55%, odnosno 60% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, za grede ojačane dužom, odnosno kraćom trakom. Nakon analize rezultata na kraju tog perioda, bilo je evidentno da predmetni uzorci ne reaguju značajno na taj nivo opterećenja, što je bilo očekivano, s obzirom da su grede bile stare 10 godina u trenutku ojačavanja i proces tečenja betona se u najvećoj mjeri završio. Što se tiče vremenskih deformacija karbonskih traka, poznato je da su one, u poređenju sa staklenim ili aramidnim, najmanje podložne tečenju. Kako efikasnost spoljašnjeg ojačanja slabi sa porastom nivoa opterećenja, ono je u sljedećoj fazi povećano na 75-85% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, u zavisnosti od dužine trake. Ovo opterećenje je održavano konstantnim u trajanju od 4 mjeseca, sve do stabilizacije procesa.

Nakon sopstvenog eksperimentalnog istraživanja i obrade i analize rezultata, sprovedena je uporedna analiza sa rezultatima istraživanja drugih autora, u cilju donošenja validnih zaključaka. Odgovor ovako definisanih sistema je analiziran preko osnovnih naponsko-deformacijskih efekata i njihove komparacije sa neojačanim kontrolnim uzorcima.

Ovo ispitivanje je pokazalo da primijenjeni tip ojačanja značajno povećava nosivost greda, istovremeno vršeći redukciju veličine ugiba i širine prslina. Takođe utiče na ponašanje ovih elemenata pod opterećenjem i na njihov mehanizam loma.

Opsežnim ispitivanjem na dugotrajna dejstva dokazano je da za armirano-betonske grede određene starosti, ojačane karbonskim trakama minimalne dužine $0.8l$, ne postoji opasnost da u toku vremena, u eksploatacionim uslovima, mogu biti dovedene u granično stanje loma.

Rezultati numeričke analize primjenom programskog paketa ANSYS, pokazuju zadovoljavajuću saglasnost sa sopstvenim eksperimentalnim podacima.

Na osnovu navedenog, a uzevši u obzir inertnost CFRP materijala na kombinovani uticaj sredine i mehaničkog dejstva, kao i brojne druge prednosti, treba naglasiti da je moguće uspješno, brzo i jednostavno ojačati proste armirano-betonske grede određene starosti, održavajući zahtijevani nivo nosivosti na savijanje i upotrebljivosti. Dobijeni su korisni

rezultati koji, pored ostalog, mogu dobro poslužiti i u savremenoj inženjerskoj praksi, imajući u vidu da su ispitivanja starih uzoraka stvarnih dimenzija veoma rijetka.

Ključne riječi: kompozitna T-greda, realni modeli, CFRP traka, ponašanje na savijanje, eksperiment, dugotrajno opterećenje, tečenje betona

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uža naučna oblast: Konstrukcije

UDK broj: 624.012.45:624.042(043.3)

THE DATA OF DOCTORAL DISSERTATION

Name of doctoral studies:	Doctoral studies at the University of Montenegro Faculty of Civil Engineering Study program – Civil Engineering
Title of doctoral dissertation:	Behaviour of RC structures strengthened with composite materials under the long-term load

Abstract:

Corrosion, fatigue and lack of proper maintenance are generally the main causes of the structure deterioration. Various technologies, depending on the type of elements, stresses and materials used, are applied to improve reinforced concrete structures. The external CFRP strengthening of the concrete beams tensioned side has proven to be a successful alternative to the much more expensive replacement of these structures. High tensile strength and modulus of elasticity make this material attractive and practical to strengthen the existing elements.

This work is the result of experimental research conducted in order to determine the contribution of composite material to favorable behavior of old, full-size reinforced concrete T-beams in exploited conditions, under the influence of two types of short-term load and two levels of long-term load. The total of ten beams were specifically designed for this purpose 10 years ago, after literature reviewal finding that data on the experimental testing of strengthened full-size T-samples of certain age were not so common. The tensioned sides of the ribs were strengthened by different lengths of carbon strips. Testing was then performed to determine the effects of a strengthening length, then the effect of concentrated and uniformly distributed short-term load, as well as uniformly distributed long-term load. This was related to the increase of the ultimate capacities of the tested samples, then to the reduction of deflections, strains, crack widths, and also to the change of their fracture mechanism. Thus, the study of parameters influencing the behavior of these samples had a focus on:

- the effect of position and length of the external strengthening;
- the influence of the short-term load type for 2 unstrengthened and 4 strengthened beams;

- the influence of the long-term load level and the duration of load for 4 strengthened beams.

Behavior of strengthened reinforced concrete beams, under the effect of long-term constant load, at stress level of 55% to 85% of the short-term capacity, was the subject of study in this dissertation. All four beams were loaded with a uniform load over the entire length, for the period of 6 months. This load was 55% and 60% of the short-term load capacity, for beams strengthened by longer or shorter strips, respectively. After analyzing the results at the end of that period, it was evident that the examined specimens did not react significantly to the considered load level. That was expected, since the beams were more than 10 years old at the time of strengthening hence the concrete creep process was mostly completed. Also, the carbon strips are the least susceptible to the creep deformations, compared to glass or aramid ones. As the effectiveness of the external strengthening weakens with the load increase, its level was in the next phase increased to about 75-85% of short-term capacity, depending on the length of the strip. This load was kept constant for 4 months until the process was stabilized. In relation to the considered, a detail analysis of the obtained experimental results is done. A comparative analysis with previous research studies was then carried out, in order to verify their conclusions. The response of such systems is analyzed through basic stress-strain effects and through their comparison with unstrengthened control samples.

The examination has shown that this type of strengthening significantly increases the ultimate beam capacity, while reducing the size of deflections and width of cracks. It also affects the behavior of these elements under load and influences the change in their mechanism of fracture.

Extensive long-term testing has shown that reinforced concrete beams loaded with uniform constant load, strengthened with carbon strips of a minimum length of 0.8l, are not in the risk of fracture over time.

The results of numerical analysis using the ANSYS software show satisfactory agreement with obtained experimental data.

Based on all of the above stated and considering CFRP material inertness at the combined influence of the environment and the mechanical action, as well as its many other advantages, it should be emphasized that simply supported reinforced concrete beams of

a certain age can be rapidly and successfully strengthened with CFRP strips, while maintaining the required level of flexural capacity and serviceability. The results obtained from this experiment are viable and may be of use in modern engineering practices, especially because tests conducted on old, full-size samples are very rare.

Key words: composite T-beams, full size, CFRP strip, flexural behavior, experiment, long-term load, creep of concrete

Scientific area: Civil Engineering

Narrow scientific area: Constructions

UDK number: 624.012.45:624.042(043.3)

SADRŽAJ

1. Uvodna razmatranja	1
1.1. Predmet, cilj i značaj istraživanja	2
1.2. Kratak pregled doktorske disertacije	3
2. Opšte o kompozitnim materijalima	6
2.1. Uvod	6
2.2. Istorijski razvoj	6
2.3. Karakteristike FRP kompozitnih materijala	8
2.3.1. Karakteristike komponenti FRP materijala	8
2.3.1.1. Karakteristike vlakana	8
2.3.1.2. Karakteristike matrice	9
2.3.2. Karakteristike FRP kompozita za ojačanje	9
2.3.3. Prednosti FRP materijala	10
2.3.4. Nedostaci FRP materijala	12
2.3.5. Proizvodnja FRP materijala	13
2.3.6. Primjena FRP materijala	14
2.3.7. Zaključna razmatranja o značaju primjene FRP materijala	15
2.4. FRP materijali za sanacije konstrukcija	17
2.4.1. Uvod	17
2.4.2. Pripremne radnje prije početka sanacije	18
2.4.3. Tipovi FRP sistema za ojačanje	19
2.4.4. Područje primjene FRP materijala za ojačanje	20
3. Ponašanje ojačanih armirano-betonskih greda opterećenih na savijanje	22
3.1. Uvod	22
3.2. Teorijske osnove i historijat prethodnih istraživanja	22
3.2.1. Grede ojačane podužnim FRP ojačanjem	22
3.2.2. Grede ojačane podužnim i poprečnim FRP ojačanjem	25
3.2.2.1. Uvod	25
3.2.2.2. Efikasnost primjene FRP poprečnih ukrućenja	26
3.3. Tipovi loma kod ojačanih armirano-betonskih greda	30
3.3.1. Lom koji nastaje bez gubitka veze betona i kompozita	30
3.3.2. Lom koji nastaje usljed gubitka veze betona i kompozita	32

3.3.2.1. Lom koji nastaje odvajanjem FRP ojačanja od betona.....	32
3.3.2.2. Lom koji nastaje u zoni interakcije betona i FRP ojačanja.....	33
3.4. Ispitivanje uticaja parametara na ponašanje ojačanih greda	34
3.4.1. Debljina FRP ojačanja.....	34
3.4.2. Širina FRP ojačanja.....	36
3.4.3. Dužina FRP ojačanja.....	37
3.4.4. Debljina lijepka za ojačanje.....	37
3.4.5. Čvrstoća betona.....	38
3.4.6. Modul elastičnosti.....	38
3.4.6.1. Uticaj modula elastičnosti betona.....	38
3.4.6.2. Uticaj modula elastičnosti FRP materijala.....	38
3.4.7. Procenat armiranja	39
3.4.7.1. Uticaj procenta armiranja čelika	39
3.4.7.2. Uticaj procenta armiranja FRP materijala	39
3.4.8. Prisustvo prslina.....	40
3.4.9. Fleksibilno lijepljenje.....	40
3.4.10. Krutost FRP ojačanja	41
3.4.11. Vrsta opterećenja	42
3.5. Dimenzionisanje na savijanje presjeka ojačanih FRP materijalom.....	42
3.5.1. Dimenzionisanje prema Pravilniku ACI 440.2R-08.....	42
3.5.2. Dimenzionisanje prema Pravilniku CEB-FIP 2001	50
3.5.2.1. Postupak proračuna armirano-betonskog elementa ojačanog spoljašnjim FRP ojačanjem.....	50
3.5.2.2. Proračun prema graničnom stanju upotrebljivosti (GSU)	51
3.5.2.3. Proračun prema graničnom stanju nosivosti (GSN).....	54
3.6. Ponašanje ojačanih armirano-betonskih greda opterećenih na savijanje u toku vremena	58
3.6.1. Deformacije betona u toku vremena	58
3.6.1.1. Uvod u reologiju betona	58
3.6.1.2. Skupljanje i tečenje betona	59
3.6.1.3. Faktori koji utiču na deformacije betona u toku vremena	64
3.6.1.4. Deformacije betona u toku vremena prema Pravilniku Evrokod 2.....	65

3.6.1.5. Deformacije FRP materijala u toku vremena prema Pravilniku CEB-FIP Bulletin 2007	72
3.6.2. Deformacije armirano-betonskih greda ojačanih FRP materijalom u toku vremena.....	73
3.6.3. Analiza prethodnih eksperimentalnih istraživanja	75
3.7. Opšti zaključak o dosadašnjim istraživanjima	77
4. Sopstveno eksperimentalno istraživanje	79
4.1. Uvod	79
4.2. Materijali upotrijebljeni u eksperimentu.....	79
4.2.1. Karakteristike upotrijebljene armature.....	79
4.2.2. Karakteristike upotrijebljene karbonske trake	81
4.2.3. Karakteristike komponenti betonske mješavine	81
4.2.3.1. Agregat za spravljanje betona	81
4.2.3.2. Cement za spravljanje betona.....	83
4.2.3.3. Voda za spravljanje betona	84
4.2.4. Karakteristike upotrijebljenog betona	84
4.3. Eksperimentalni modeli	85
4.4. Tehnologija izvođenja radova na ojačanju	86
4.5. Tok eksperimenta	90
4.6. Program eksperimentalnog istraživanja.....	92
4.6.1. Aparatura za ispitivanje.....	93
4.6.1.1. Aparatura za ispitivanje kontrolnih uzoraka	93
4.6.1.2. Aparatura za nanošenje kratkotrajnog opterećenja	95
4.6.1.3. Aparatura za nanošenje dugotrajnog opterećenja.....	96
4.6.2. Mjerna tehnika	96
4.6.2.1. Mjerenja na kontrolnim uzorcima	96
4.6.2.2. Mjerenja na gredama	98
4.6.2.3. Ostala mjerenja.....	101
4.7. Rezultati ispitivanja	102
4.7.1. Rezultati ispitivanja greda opterećenih kratkotrajnim opterećenjem.....	102
4.7.2. Rezultati ispitivanja greda opterećenih dugotrajnim opterećenjem.....	103

5. Analiza rezultata dobijenih dejstvom kratkotrajnog opterećenja	105
5.1. Granična nosivost greda.....	105
5.2. Ugibi u sredini grede	106
5.3. Deformacije u betonu	107
5.3.1. Deformacije u zategnutom betonu	107
5.3.2. Deformacije u pritisnutom betonu	108
5.3.3. Deformacije karbonske trake.....	109
5.4. Prsline u betonu	110
5.5. Mehanizam loma grede.....	110
5.6. Zaključna razmatranja	112
5.6.1. Granični momenat savijanja	112
5.6.2. Ugibi.....	113
5.6.3. Deformacije	113
5.6.4. Prsline.....	113
5.6.5. Mehanizam loma.....	114
6. Analiza rezultata dobijenih dejstvom dugotrajnog opterećenja	115
6.1. Ponašanje ojačanih AB greda u funkciji graničnog momenta	115
6.1.1. Granična nosivost greda	115
6.1.2. Ugibi u sredini grede.....	116
6.1.3. Deformacije u betonu	117
6.1.3.1. Deformacije u zategnutom betonu	117
6.1.3.2. Deformacije u pritisnutom betonu	118
6.1.3.3. Deformacije karbonske trake	119
6.1.4. Prsline u betonu	119
6.1.5. Mehanizam loma grede	120
6.1.6. Zaključna razmatranja	122
6.1.6.1. Granični momenat savijanja.....	122
6.1.6.2. Ugibi	122
6.1.6.3. Deformacije.....	122
6.1.6.4. Prsline	122
6.1.6.5. Mehanizam loma	123

6.2. Uporedna analiza rezultata dobijenih dejstvom kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja	123
6.2.1. Granična nosivost greda	123
6.2.2. Ugibi	124
6.2.3. Deformacije u zategnutom betonu	124
6.2.4. Deformacije u pritisnutom betonu	125
6.2.5. Deformacije karbonske trake	126
6.2.6. Prsline u betonu	126
6.3. Ponašanje ojačanih armirano-betonskih greda usljed vremenskih deformacija	127
6.3.1. Uvod	127
6.3.2. Rezultati ponašanja ojačanih uzoraka usljed vremenskih deformacija	128
6.3.3. Analiza rezultata sopstvenog eksperimentalnog istraživanja	130
6.3.4. Ispitivanje tečenja starih betonskih uzoraka	133
6.3.5. Zaključna razmatranja	135
7. Numerička analiza ojačanih greda	136
7.1. Uvod u numeričku analizu primjenom programskog paketa ANSYS	136
7.1.1. Beton	136
7.1.2. Čelična armatura	143
7.1.3. FRP kompoziti	143
7.2. Geometrija i definisanje mreže konačnih elemenata	145
7.3. Analiza rezultata dobijenih primjenom programskog paketa ANSYS	146
7.3.1. Analiza slike prslina	147
7.3.2. Analiza dijagrama ugiba	148
7.3.3. Analiza dilatacija u karbonskoj traci	150
7.4. Kritička analiza razmatranih parametara	150
8. Zaključna razmatranja	152
Granični momenat savijanja	153
Ugibi	153
Deformacije	154
Prsline	154
Mehanizam loma	155
Deformacije u toku vremena	155

Literatura	157
Prilog A	165
Rezultati ispitivanja greda pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja	165
Prilog B	174
Rezultati ispitivanja greda pod dejstvom dugotrajnog opterećenja	174
Prilog C	191
Slika prslina	191
Prilog D	196
Komparativna analiza eksperimentalnih i rezultata dobijenih primjenom programskog paketa ANSYS	196
Prilog E	200
Radni dijagram betona	200
Prilog F	203
Dimenzionisanje na savijanje poprečnog presjeka ojačanih greda pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja	203
Prilog G	206
Proračun ugiba greda pod dejstvom dugotrajnog opterećenja	206
Prilog H	213
Spisak slika	213
Prilog I	216
Spisak tabela	216
Biografija autora	217

1. UVODNA RAZMATRANJA

Građevinski objekti se grade uglavnom od tradicionalnih vrsta materijala – drveta, zidarije, čelika i betona, i ta primjena im najčešće obezbjeđuje uobičajeni životni vijek od oko 100 godina. Kao najviše korišćen građevinski materijal na svijetu (10-12 milijardi tona godišnje) izdvaja se beton. Gotovo vijek i po, koliko se primjenjuje, pokrivao je oko 70% potreba u građenju i postao infrastrukturna i urbana osnova savremenog života.

Današnji ubrzani razvoj u svim područjima života ljudi prati neizbježno i razvoj u građevinarstvu, koji nameće nove zahtjeve kao što su veća otpornost, lakša gradnja, veća ekonomičnost i naročito veća trajnost građevinskih konstrukcija. Glavni uzročnici propadanja upotrijebljenog materijala u konstrukcijama su uglavnom korozija, zamor i nedostatak pravilnog održavanja. To je uslovalo intenzivna istraživanja na području dobijanja novih, boljih građevinskih materijala, koji bi mogli zadovoljiti novonastale zahtjeve. Takođe, savremeni vid projektovanja, praćen zahtjevima nove moderne tehnike, uslovio je izmjene postojećih propisa. Međutim, prihvatanje inovacija u građevinarstvu je veoma spor proces – dešavalo se da prođe 10-25 godina dok neka nova ideja prodre i postane prihvaćena od strane građevinske industrije. To je jedna od prepreka u primjeni novih materijala na tržištu. Njihovu primjenu takođe otežava i značajan nedostatak ulaganja u razvoj novih tehnologija i istraživanja.

Za ojačanje elemenata armirano-betonskih konstrukcija primjenjivale su se razne tehnologije, u zavisnosti od vrste elementa, naprezanja i upotrijebljenog materijala. Sasvim neočekivano, inovacija u FRP (*Fiber reinforced polymer*) kompozitnim materijalima osamdesetih godina prošlog vijeka, ostvarila je prilično brz napredak u građevinarstvu. Posljednjih par decenija ovi materijali su sve više zastupljeni u građevinarstvu, naročito tanki FRP proizvodi za spoljašnje ojačavanje konstrukcija. Prednosti u odnosu na tradicionalne materijale čine ovaj materijal atraktivnim i praktičnim za ojačanje postojećih elemenata [1], [2]. Njegova pojava dovela je do razvoja novih tehnologija građenja, kao i postupaka analize i projektovanja, a samim tim i do promjena u filozofiji projektovanja sanacija.

Brojna eksperimentalna i teorijska istraživanja pokazala su da spoljašnja FRP ojačanja zategnute strane betonskih greda značajno povećavaju čvrstoću na savijanje, smanjuju ugibe i redukuju širinu prslina [3], [4], [5]. Takođe utiču na promjenu ponašanja ovih elemenata pod opterećenjem, odnosno mijenjaju im mehanizam loma [6].

U idealnom slučaju, do loma FRP ojačanih armirano-betonskih greda došlo bi simultanim lomom pritisnutog betona i pucanjem FRP trake. U stvarnosti se lom najčešće dešava usljed odvajanja FRP ojačanja od betonske podloge, pa se ne može iskoristiti puni kapacitet nosivosti ovako ojačanog elementa [7], [8], [9]. Utvrđeno je da se to odvajanje uglavnom dešava na krajevima trake, na kontaktu sa betonom, izazvano središnjom ili dijagonalnom prslinom [10]. Zato se može reći da uspješnost ove metode ojačavanja zavisi prvenstveno od kvaliteta i ispravnosti veze kompozitni materijal - beton, kao i od efikasnosti upotrijebljenog lijepka. Karakteristike ove veze određuju ponašanje ojačanih betonskih presjeka [11].

1.1. Predmet, cilj i značaj istraživanja

Obimna eksperimentalna istraživanja sprovedena su tokom posljednje dvije decenije, u cilju utvrđivanja ključnih karakteristika betonskih greda ojačanih FRP materijalom. Pri tom su varirane kombinacije brojnih parametara koji utiču na ponašanje uzoraka, pa je zaključeno da su ovakva ispitivanja veoma zahtjevna. Zato i nije iznenađujuće što je pregledom literature utvrđeno da su podaci o eksperimentalnom ispitivanju ojačanih uzoraka realnih dimenzija veoma oskudni. Najveći broj radova na ovu temu odnosi se na ispitivanja na modelima, tj. uzorcima malih dimenzija [12], [13]. Imajući u vidu principe modeliranja, ispitivanja na takvim uzorcima nijesu uvijek dovoljno reprezentativna i primjenljiva na elemente realnih dimenzija [14]. Takođe je najveći broj ispitivanja izvršen na gredama pravougaonog poprečnog presjeka, i to uglavnom na novim modelima. Ispitivanja ojačanih uzoraka T - poprečnog presjeka su veoma rijetka [15]. Ista zapažanja su prisutna i kada se radi o ispitivanju ponašanja FRP ojačanih armirano-betonskih elemenata u toku vremena. Osim toga, pregledom literature je utvrđeno da se mali broj radova odnosi na ispitivanja u stvarnim vremenskim okvirima. Naime, većina do sada sprovedenih eksperimentalnih istraživanja u svijetu bila je usmjerena na ispitivanja reoloških svojstava ovih elemenata u laboratorijskim uslovima, koji su, u uslovima

povećane temperature i vlažnosti, simulirali postizanje ubrzanog starenja (*accelerated tests*). Korelaciju između ovih rezultata i onih dobijenih u realnim vremenskim okvirima je moguće sprovesti, ali ne sa zadovoljavajućom pouzdanošću.

Stoga je predmet sopstvenog istraživanja, u užem smislu, upravo ponašanje grednih nosača T-presjeka, stvarnih dimenzija, značajne starosti, ojačanih CFRP trakama i ispitanih u realnom vremenu na dejstvo kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja.

Centralno mjesto u programu istraživanja zauzima sopstvena eksperimentalna analiza, pri čemu je formulisan precizan plan i program tog istraživanja na osnovu prethodnih iskustava drugih autora, kao i sopstvenih.

Ispitivanje uticajnih parametara na ponašanje uzoraka ojačanih FRP materijalom, fokusirano je na:

- uticaj položaja i dužine spoljašnjeg ojačanja;
- uticaj tipa kratkotrajnog opterećenja;
- uticaj nivoa i dužine trajanja dugotrajnog opterećenja.

Dakle, cilj istraživanja je da se, kroz eksperimentalno i teorijsko istraživanje, utvrdi uticaj različitih dužina ojačanja, zatim uticaj dva tipa kratkotrajnog opterećenja, koncentrisanog i ravnomjernog, kao i dva nivoa dugotrajnog ravnomjernog opterećenja. Navedeni uticaji razmatrani su u odnosu na redukciju granične nosivosti, ugiba, deformacija, širine prslina, kao i u odnosu na mehanizam loma.

Nakon sopstvenog eksperimentalnog istraživanja i obrade i analize rezultata, sprovedena je uporedna analiza sa rezultatima istraživanja drugih autora, u cilju donošenja validnih zaključaka.

1.2. Kratak pregled doktorske disertacije

Doktorska disertacija se sastoji od osam poglavlja.

Prvo poglavlje obuhvata uvodna razmatranja, u kojima je predstavljen predmet, cilj i značaj istraživanja ove disertacije, kao i kratak pregled sadržaja u pojedinim poglavljima.

U drugom poglavlju je dat hronološki pregled razvoja i primjene kompozitnih materijala. Bliže su definisane karakteristike FRP materijala, sa osvrtom na konstitutivne materijale, proizvodni proces i primjenu u AB konstrukcijama. Posebna pažnja je posvećena materijalima za sanacije konstrukcija, kao užoj oblasti autorovog interesovanja.

Treće poglavlje daje kratak prikaz dosadašnjih istraživanja iz predmetne oblasti, u svijetu i kod nas. U posebnim tačkama ovog poglavlja predstavljeni su karakteristični tipovi loma ojačanih armirano-betonskih greda i dat je kritički osvrt u odnosu na pojedine uticajne parametre. Takođe su data i teorijska predviđanja ponašanja na savijanje elemenata ojačanih FRP materijalom, uz algoritme za dimenzionisanje, preporučene od strane odgovarajućih Pravilnika. Posebna pažnja je posvećena ponašanju kompozitnog materijala u toku vremena, i to ponašanju njegovih komponenti, zatim kompozita u cjelini i na kraju greda ojačanih ovim materijalom.

U četvrtom poglavlju su prikazana sopstvena eksperimentalna istraživanja, počevši od prikaza kompletnog programa ispitivanja sa svim relevantnim karakteristikama opreme i materijala, upotrijebljenih za izradu eksperimentalnih modela. U okviru zasebnih tačaka date su geometrijske karakteristike modela, karakteristike uređaja za njihovo ispitivanje, mjerne veličine, mjerna tehnika, kao i detaljna procedura koja je sprovedena tokom ispitivanja modela.

U petom poglavlju je, kroz dijagrame zavisnosti razmatranih veličina u odnosu na granični momenat savijanja, izvršena analiza ponašanja sopstvenih eksperimentalnih modela pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja. Opisani su mehanizmi loma i proces deformacije i destrukcije ispitivanih modela, sa prikazom fenomena koji su se manifestovali u toku ispitivanja. Istovremeno je analiziran odgovor sistema u odnosu na pojedine uticajne parametre koji su varirani u ovom eksperimentu.

Napomena: Svi izmjereni podaci dobijeni ispitivanjem modela na dejstvo kratkotrajnog opterećenja dati su u Prilogu A1 na kraju disertacije. Dijagrami analizirani u ovom poglavlju dobijeni su na osnovu tabela iz Priloga A2. U njima su prikazani najvažniji izmjereni podaci u eksperimentu, sa karakterističnim rezultatima ispitivanja za sve modele. Ove maksimalne/mjerodavne vrijednosti pojedinih veličina, date su u odnosu na nivo i karakter opterećenja.

U šestom poglavlju zadržan je isti princip analize ponašanja ojačanih modela kao u prethodnom poglavlju, s tim što je razmatran uticaj dugotrajnog opterećenja. Posebna pažnja se poklanja analizi rezultata dobijenih usljed dejstva većeg nivoa dugotrajnog opterećenja.

Napomena: Svi izmjereni podaci dobijeni ispitivanjem modela na dejstvo dugotrajnog opterećenja dati su u Prilogu B1 na kraju disertacije. Dijagrami analizirani u ovom poglavlju dobijeni su na osnovu tabela sa karakterističnim rezultatima ispitivanja iz Priloga B2.

Sedmo poglavlje odnosi se na numeričku analizu problema ojačanih armirano-betonskih greda, napregnutih na savijanje pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja, kako bi se izvršila verifikacija dobijenih sopstvenih eksperimentalnih rezultata. Za analizu je korišćena metoda konačnih elemenata uz primjenu savremenog softvera ANSYS. U ovom dijelu disertacije dat je opis i način modeliranja greda u navedenom programskom paketu, uključujući opis materijala i tipove elemenata, faze modeliranja i interakciju između elemenata. Takođe je data uporedna analiza rezultata ispitivanja dobijenih eksperimentalnim i numeričkim putem. Ova analiza je data u pogledu kapaciteta nosivosti, veličine ugiba, dilatacija u karbonskim trakama i slike formiranih prslina.

U posljednjem, osmom poglavlju, data su zaključna razmatranja i predlozi za buduća istraživanja. Pri tome se u formulaciji zaključaka autor najviše oslanjao na sopstvene rezultate istraživanja. Naime, bez obzira na aktuelnost teme, veoma je oskudan broj sličnih istraživanja, koja bi mogla poslužiti u svrhu poređenja sa dobijenim rezultatima. Zato se u ovom radu i ne pretenduje na donošenje “izričitih” generalizovanih zaključaka, već se više ukazuje na kvalitativnu prirodu problema. Eventualna primjena ovih zaključaka u inženjerskoj praksi predstavljala bi njihovu svojevrsnu provjeru.

Na kraju ove disertacije dat je spisak korišćene literature, spisak slika i tabela i kratka biografija autora. Dati su i prilozi sa rezultatima ispitivanja svih deset eksperimentalnih modela.

2. OPŠTE O KOMPOZITNIM MATERIJALIMA

2.1. Uvod

Termin FRP, odnosno polimeri ojačani vlaknima, pokriva ogroman broj različitih materijala čije osobine ne zavise samo od komponenti, već veoma često i u veoma velikoj mjeri i od tehnologije proizvodnje.

Jedinstvene karakteristike FRP kompozita mogu biti iskorišćene na više načina:

- za formiranje konstrukcija izrađenih samo od FRP kompozita;
- u kombinaciji s drugim inženjerskim materijalima za poboljšanje krutosti, čvrstoće i trajnosti samog kompozita;
- za novu generaciju FRP građevinskih elemenata.

Prije analize postojećih i budućih kompozitnih konstrukcijskih sistema u građevinarstvu, važno je poznavati karakteristike materijala koje ga čine atraktivnim u nekim oblastima gradnje, kao i druge karakteristike koje se moraju poboljšati u cilju postizanja većeg stepena povjerenja u materijal.

Od početka ovog vijeka, veliki napor je uložen u kreiranje standarda i procedura za analizu strukturnih kapaciteta FRP materijala i njegovih komponenti. Ove procedure se uglavnom zasnivaju na eksperimentalnim podacima pa samim tim predstavljaju samo okvirne smjernice.

2.2. Istorijski razvoj

FRP kompoziti predstavljaju najnoviju verziju vrlo stare ideje stvaranja boljeg kompozitnog materijala, kombinovanjem dva različita materijala. Naime, čovjek je od davnina bio svjestan osnovnog načela da kompozitni materijal ima bolja svojstva od njegovih komponenti. Drevne civilizacije su na primjeru gline i slame - gline kao matrice, i slame kao vlaknastog ojačanja utvrdili da je dobijeni kompozit jači od same gline (npr. pečene kocke od gline i slame, 3000 g.p.n.e).

Uključivanje FRP kompozitne tehnologije u industrijske tokove nije starije od jednog vijeka. U nekim početnim primjenama kompoziti su se koristili kao sekundarne konstrukcije, tj. mali djelovi zgrada, kao što su prozori, vrata, nadstrešnice, fasade i sl., pri čemu se noseća konstrukcija radila od tradicionalnog građevinskog materijala. Prvi poznati FRP proizvod je trup broda proizveden sredinom 30-ih godina, kao dio proizvodnog eksperimenta, korišćenjem tkanine od staklenih vlakana i poliestera [16]. Cijevi od staklenih vlakana su, na primjer, prvi put predstavljene na tržištu 1948. godine, nakon čega su našle najširu primjenu u naftnoj industriji.

Razvoj FRP materijala ogleda se u značajno povećanoj upotrebi kompozita nakon Drugog svjetskog rata. Automobilaska industrija je prva uvela kompozite pedesetih godina prošlog vijeka, i od tada se mnogo djelova današnjih vozila izrađuju od kompozita. Primjena FRP kompozitnih materijala je revolucionizovala cijele industrije, uključujući avio, pomorsku, elektro, automobilsku itd. Vazduhoplovna industrija je počela koristiti FRP kompozite kao lagane materijale dobre otpornosti i krutosti, i na taj način se redukovala težina aviona. Najpoznatiji primjer je američki „nevidljivi“ vojni avion - Stealth, koji je u potpunosti izgrađen od ovog materijala.

FRP materijal se nije razmatrao kao održivo rješenje i nije bio komercijalno dostupan do kraja sedamdesetih godina. U tom periodu je rad na primjeni kompozitnih materijala predstavljao rezultat individualnih napora istraživača. Prva ozbiljnija eksperimentalna istraživanja na upotrebi kompozita u građevinarstvu započeta su 1978. godine u Njemačkoj. FRP materijal je prvi put upotrijebljen 1982. godine za izgradnju mosta u Kini, dok je 1986. jedan kompletan most u Diseldorfu prethodno napregnut kablovima od ovog materijala. Karbonski FRP kablovi za prethodno naprezanje su prvi put korišćeni 1991. godine za izgradnju jednog mosta, takođe u Njemačkoj. Prva upotreba karbonskih traka za spoljašnje ojačanje konstrukcija zabilježena je iste godine za ojačanje mosta u Švajcarskoj i od tada su široko zastupljene u sanacijama građevinskih konstrukcija. Samo do 1997. godine, više od 1500 betonskih konstrukcija ojačano je elementima od FRP materijala.

2.3. Karakteristike FRP kompozitnih materijala

2.3.1. Karakteristike komponenti FRP materijala

FRP kompozitni materijal se sastoji od osnove, koju čini polimerno-smolasti materijal, koji sadrži duga vlakna drugog materijala, dajući mu tako kombinovane karakteristike osnovnih materijala.

2.3.1.1. Karakteristike vlakana

U tabeli 2.1 prikazane su karakteristike vlakana u zavisnosti od primijenjenog tipa. Prečnik vlakana se kreće uglavnom od 0,01 do 0,1 mm. Ona zauzimaju više od 70% ukupne zapremine kompozita. Vlakna mogu biti staklena (GFRP), karbonska (CFRP), aramidna (AFRP) i bazaltna (BFRP), a takođe se koriste i njihove kombinacije. Svojstva vlakana se poboljšavaju raznim premazima, kao i tretmanima fizičke i hemijske prirode, kojima se poboljšava prionljivost sa osnovom - matricom.

Tabela 2.1 Karakteristike vlakana [17]

Tip vlakana	Čvrstoća na zatezanje (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)	Granična dilatacija (%)
Karbonska vlakna			
visoke čvrstoće - HS	3500-4800	215-235	1.4-2.0
veoma visoke čvrstoće - UHS	3500-6000	215-235	1.5-2.3
visokog modula elastičnosti - HM	2500-3100	350-500	0.5-0.9
veoma visokog modula elastičnosti - UHM	2100-2400	500-700	0.2-0.4
Staklena vlakna			
E	1900-3000	70	3.0-4.5
S	3500-4800	85-90	4.5-5.5
Aramidna vlakna			
niskog modula elastičnosti - LM	3500-4100	70-80	4.3-5.0
visokog modula elastičnosti - HM	3500-4000	115-130	2.5-3.5

2.3.1.2. Karakteristike matrice

Za povezivanje vlakana koristi se epoksidna smola, rjeđe poliester i vinilester. Njihove karakteristike date su u tabeli 2.2. Vezivni materijali ne poboljšavaju nosivost završnog proizvoda ali utiču na njegov modul elastičnosti, kao i na čvrstoću na pritisak. Oni se po pravilu doziraju u najmanjim mogućim količinama koje pružaju dobru zaštitu od spoljnjih uticaja i doprinose ukupnoj čvrstoći na smicanje, koja je kod vlakana inače veoma mala.

Tabela 2.2 Karakteristike polimerne matrice [18]

Tip matrice	Čvrstoća na zatezanje (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)	Zapreminska masa (kg/m ³)
Epoksidna smola	55-130	2.8-4.1	1200-1400
Poliester	35-104	2.1-3.5	1200-1400
Vinilester	73-81	3.0-3.5	1150-1350

2.3.2. Karakteristike FRP kompozita za ojačanje

Mehaničke i fizičke karakteristike kompozita variraju u zavisnosti od vrste vlakana koja se koriste. Do sada su najširu primjenu našli stakleni (GFRP) kompoziti, kao najjeftiniji, uprkos najmanjoj čvrstoći na zatezanje i najnižem modulu elastičnosti u odnosu na ostale kompozite na tržištu (tabela 2.3). Međutim, kao suprotnost ovom tipu FRP materijala, sve više su zastupljeni karbonski (CFRP) kompoziti. Iako su nekoliko puta skuplji od GFRP materijala, svoju široku primjenu nalaze zahvaljujući najvećoj čvrstoći na zatezanje i najvećem modulu elastičnosti, kao i velikoj otpornosti na spoljašnje uticaje sredine.

Karakteristike tipičnih komercijalnih proizvoda u obliku prefabrikovanih CFRP traka date su u tabeli 2.4, gdje su date i karakteristike čelika, radi poređenja.

Tabela 2.3 Karakteristike FRP materijala [17]

Tip ojačanja	Čvrstoća na zatezanje (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)	Granična dilatacija (%)
CFRP	600-3500	100-580	0.5-1.7
GFRP	450-1600	35-60	1.2-3.7
AFRP	1000-2500	40-125	1.9-4.4
BFRP	900-2600	35-90	2.0-3.2

Tabela 2.4 Karakteristike CFRP traka za ojačanje i poređenje sa čelikom [19]

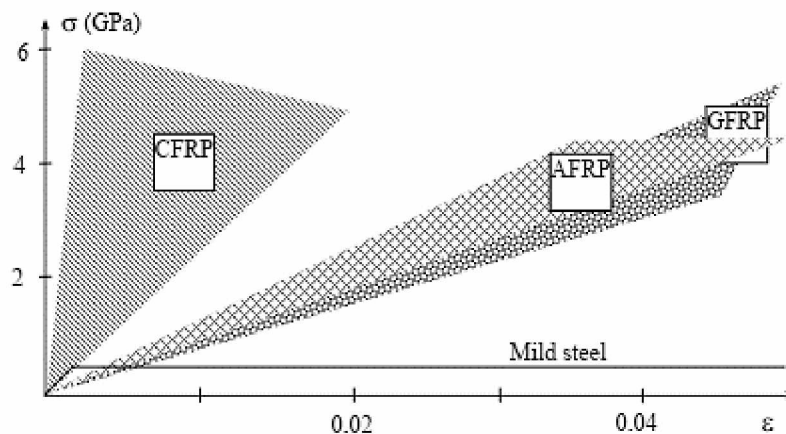
Tip ojačanja	Čvrstoća na zatezanje (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)	Granična dilatacija (%)
CFRP trake			
niskog modula elastičnosti	2800	170	1.6
visokog modula elastičnosti	1300	300	0.5
Čelik	400	200	25

2.3.3. Prednosti FRP materijala

FRP materijali su zbog svojih prednosti (mala težina, jednostavnost ugradnje, niska cijena održavanja, otpornost na koroziju, visoki koeficijent konstrukcione povoljnosti i niska cijena u odnosu na vijek trajanja) sve više zastupljeni u građevinarstvu.

U cilju poređenja sa čelikom, na slici 2.1 prikazani su radni dijagrami za različite vrste FRP traka i lamela za ojačanje pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja [19].

Jedina vidljiva dobra karakteristika sa slike 2.1, a zbog koje su FRP materijali veoma poželjni za mnoštvo primjena u građevinarstvu, je njihova izuzetno visoka čvrstoća na zatezanje - čak 4 do 8 puta veća nego kod običnih čelika.



Slika 2.1 Radni dijagrami FRP materijala za spoljašnje ojačanje

Mala specifična težina ovog materijala, iako ne predstavlja njegovu najveću prednost sa stanovišta upotrebe u građevinarstvu, može u određenim situacijama znatno smanjiti težinu samog objekta, a time i efekte statičkih i dinamičkih dejstava. FRP materijali pokazuju potpunu magnetnu i električnu neutralnost, koje su od značaja u agresivnim sredinama. Kompozitni materijali posjeduju otpornost na hemijske uticaje i veliku otpornost na zamor. Ona je kod FRP materijala sa aramidnim i karbonskim vlaknima čak do 3 puta veća nego kod čelika, dok kod onih sa staklenim vlaknima može biti manja nego kod čelika. I na kraju, proces proizvodnje koji se odvija pod ne tako visokim temperaturama, kao i vlaknasta priroda gotovog proizvoda, ostavljaju dosta prostora za ugrađivanje raznih vrsta mjerača i senzora u sami materijal, što predstavlja značajan korak ka tzv. „inteligentnim“ konstrukcijama, koje bi praktično same izvještavale o svom trenutnom stanju tokom eksploatacije.

Analiza potrošnje energije u toku proizvodnje ukazuje na prednost FRP materijala u odnosu na ostale materijale koji koriste najmanje dva puta veću količinu energije [20]. FRP je takođe proglašen favoritom nakon procjene uticaja materijala na životnu sredinu [21].

Korišćenje FRP kompozita omogućuje brzu zamjenu kolovozne konstrukcije, smanjenje stalnog opterećenja i redukciju troškova budućeg održavanja. Prednosti prefabrikacije koja bi se mogla postići korišćenjem FRP kompozita uključuje, na primjer, izradu kompletnog mosta u fabrici, a zatim i brzo i jednostavno postavljanje. Iako početni troškovi za FRP most mogu biti i znatno veći nego kod čelika, kada se u obzir uzme životni vijek konstrukcije i dugotrajnost materijala, cijena njegovog korišćenja je

uglavnom niža od cijene tradicionalnih materijala. Smatra se da će FRP opcija i nakon 15 godina, tj. nakon prvog premazivanja čelične konstrukcije i dalje biti ekonomičnija.

2.3.4. Nedostaci FRP materijala

Pored svih svojih dobrih karakteristika postoje razlozi zbog kojih kompozitni materijali mogu biti upotrebljavani samo uz značajnu dozu opreza. Glavni nedostaci FRP kompozita leže u njihovoj relativno krhkoj prirodi u odnosu na tradicionalne građevinske materijale, kao i u nedovoljnom iskustvu nekih od FRP projektanata i izvođača konstrukcije, što je rezultiralo upotrebom visokih sigurnosnih faktora u projektovanju. Visoke cijene ovog materijala su još jedan faktor koji donekle ograničava njegovu veću primjenu.

Sa slike 2.1. je evidentno da FRP materijali ne posjeduju tačku tečenja kao čelik, već se do tačke kidanja ponašaju potpuno linearno. To potpuno odsustvo duktilnosti, odnosno nepostojanje zone plastičnosti je veoma važna osobina FRP materijala i ona ima najveće posljedice po njegovu manju upotrebu u armirano-betonskim konstrukcijama. Sljedeća bitna karakteristika koja se uočava sa dijagrama je niska dilatacija na granici kidanja kod nekih proizvoda.

Značajan nedostatak ovog materijala, sa stanovišta projektovanja, predstavlja i problem povezan sa njegovim prianjanjem za beton, a koji je evidentiran u većem broju eksperimentalnih istraživanja.

Protivpožarna otpornost FRP materijala je, pored čvrstoće i modula elastičnosti, značajan podatak za projektovanje, mada je još uvijek nedovoljno ispitana. Vlakna su stabilni materijali čak i na visokim temperaturama. Smole, međutim, imaju ograničenu otpornost na temperaturu, s tim što postoje i otporne smole koje su veoma skupe. Smola ne smije biti podložna zapaljenju, ali pri zagrijavanju iznad kritične temperature gubi mehanička svojstva i integritet i javljaju se različiti mehanizmi oštećenja i degradacije. Najveći broj organskih smola se naglo degradira već na temperaturama 300 – 400°C, pa se njenom izboru mora pokloniti puna pažnja.

Sa stanovišta zaštite životne sredine FRP otpad izaziva veliku zabrinutost. Njegovo spaljivanje iziskuje intenzivne troškove, a ujedno izaziva i zagađenje vazduha. Istražuju

se mogućnosti reciklaže i prerade ovog otpada, na primjer mljevenje u cilju dobijanja punila za nove materijale, koji bi se koristili za posebne građevinske svrhe.

Pored navedenih, ovi materijali posjeduju još niz drugih nedostataka, a neki od njih su:

- znatno niža čvrstoća na smicanje nego kod čelika;
- nedovoljna ispitanaost ponašanja u uslovima dinamičkih opterećenja;
- relativno visoka cijena;
- ultra-violentna zračenja mogu prouzrokovati oštećenja na materijalu;
- granična čvrstoća pri dugotrajnim opterećenjima im je nedovoljno ispitana;
- nepoznanice vezane za uticaj na životnu sredinu;
- nepostojanje standarda za projektovanje.

Aktuelna istraživanja u svijetu pokušavaju da rasvijetle neke od ovih nepoznanica. Stoga se, sa priličnom sigurnošću, mogu očekivati i dalja poboljšanja svojstava samog materijala.

2.3.5. Proizvodnja FRP materijala

Kao što je prethodno rečeno, suštinu FRP materijala čini kombinacija vlakana i veziva. Mehaničke i fizičke osobine vlakana u ogromnoj mjeri određuju karakteristike gotovog proizvoda. Veziva se oblikuju temperaturom, pri čemu neka od njih mogu biti čak i pretapana i njihov oblik naknadno mijenjan.

Osobine kompozitnih materijala ne zavise samo od sastojaka, već veoma često i u velikoj mjeri od načina proizvodnje. Proces spajanja veziva i vlakana je od suštinske važnosti za kvalitet kompozitnog materijala. Može biti izveden na više načina:

- proces provlačenja vlakana kroz „termalno kupatilo“, napunjeno tečnim vezivom;
- proces mašinskog ili ručnog polaganja vlakana zajedno sa vezivom u slojeve različitih debljina koji se mogu naknadno kidati u željene oblike;
- proces namotavanja vlakana prethodno natopljenih vezivom na kalupe željenih dimenzija - najčešće se koristi pri dobijanju uzengija, pri čemu one imaju presjek zavisno od oblika kalema na koji se namotavaju i mogu se kidati u proizvoljnim širinama.

Ova tri procesa proizvodnje omogućavaju proizvodnju FRP materijala u obliku traka i tkanina za ojačavanje postojećih armirano-betonskih elemenata, zatim armaturnih šipki, kablova za prednaprezanje, armaturnih mreža, uzengija i slično. Završni proizvod je heterogene prirode (zbog prisustva konstitutivnih materijala sa različitim osobinama) i anizotropan.

2.3.6. Primjena FRP materijala

Hibridni konstruktivni sistem, sastavljen od optimalno kombinovanih FRP kompozita i tradicionalnih materijala kao što su beton i/ili čelik, su trenutno glavna tema interesovanja sa stanovišta upotrebe kompozitnih materijala u izgradnji novih konstrukcija. Navedene kombinacije mogu obrazovati razne strukturne forme, kao što su:

- kolovozna ploča i gornji stroj mosta izrađeni od FRP kompozita;
- sanacija armirano-betonskih greda direktnom montažom FRP šipki na spoljnu površinu elementa ili tankim proizvodima za spoljašnje ojačanje konstrukcija, od kojih se primjenjuju trake, lamele i tkanine u jednom ili dva smjera;
- sanacija čeličnih greda spoljašnjim ojačanjem FRP pločama;
- sanacija armirano-betonskih stubova korišćenjem FRP kompozita;
- armiranje armirano-betonskih greda i ploča korišćenjem FRP šipki i traka.

Ojačanje betonskih konstrukcija može se uspješno obaviti spoljašnjim oblaganjem pomoću kompozitnih materijala. Ova tehnika se pokazala kao uspješna alternativa mnogo skupljoj zamjeni ovih konstrukcija. Njena efikasna primjena kod armirano-betonskih greda se vidi kroz veliki broj sprovedenih eksperimenata [3], [22], [23]. Strukturna analiza i projektovanje ovih sistema u načelu ne predstavlja problem, dok odgovarajućim ispitivanjem, konstrukcijom i izradom, FRP kompoziti mogu produžiti životni vijek i značajno smanjiti troškove održavanja u odnosu na konstrukciju od tradicionalnih materijala. Budućnost primjene FRP kompozita, kao i načini monitoringa konstrukcija tokom njihovog životnog vijeka, zavise od inovativnosti ideja koje bi ukazale na mogućnosti upotrebe FRP kompozita tamo gdje tradicionalni materijali nijesu pogodni.

2.3.7. Zaključna razmatranja o značaju primjene FRP materijala

FRP materijali su svoju najveću primjenu našli u avionskoj, automobilskoj i elektro industriji, zatim u procesu modeliranja, kao i u građevinskoj industriji.

Poznato je da je glavna upotreba kompozitnih materijala u području građevinarstva uglavnom bila u njihovom spoju sa tradicionalnim materijalima. FRP materijali su svoje mjesto našli najviše u području prednapregnutih konstrukcija, traka za naknadno, spoljne ojačavanje presjeka kao i u području izrade gotovih proizvoda različitih presjeka. Istovremeno, oni nude značajan potencijal za veću primjenu u zgradama, uključujući i velike noseće konstrukcije, imajući u vidu da iste moraju biti efikasno projektovane i konstruisane, da bi bile isplative.

Osnovne prednosti kompozita leže u smanjenju sopstvene težine nosive konstrukcije, te u izvrsnoj otpornosti na koroziju i truljenje, koji su glavni uzročnici smanjene trajnosti konstrukcija izgrađenih od drveta i čelika. Lakši materijali olakšavaju rukovanje tokom proizvodnje, smanjuju troškove instalacije, kao i troškove prevoza. Manje održavanja i popravki znači smanjenje troškova životnog ciklusa. Kompoziti takođe nude veću slobodu oblikovanja, što omogućava stvaranje složenih oblika. Uopšteno, prednost FRP kompozita je njegova mogućnost da produži životni vijek postojećih konstrukcija, kao i da razvije nove, mnogo otpornije na uticaje starenja, atmosferilija i degradacije u agresivnim uslovima sredine. Sada je moguće izgraditi mnogo veće objekte korišćenjem FRP kompozita, uključujući i kompletnu nosivu konstrukciju. Prednosti značajne uštede na težini će sasvim izvjesno biti još izraženije na konstrukcijama velikih raspona, a arhitektonske slobode u upotrebi kompozita omogućiće izvođenje novih atraktivnih oblika, uključujući i nove membanske konstrukcije. Na osnovu ranijih zaključaka, jasno je da bi glavni fokus istraživanja u primjeni FRP kompozita trebao biti na području izgradnje novih, racionalnih hibridnih struktura, inovativnih oblika, visokih performansi.

Budući da su FRP strukturni elementi, u većini slučajeva skuplji od onih od konvencionalnog građevinskog materijala, moraju se na tržištu ponuditi za rješenja problema koja njihovi konkurenti ne mogu pružiti. Stoga je potrebno promijeniti metodologiju građenja kako bi se upotrebom FRP materijala osigurala efikasnija rješenja nego što su trenutno dostupna s tradicionalnim materijalima. Takođe je neophodno

usvajanje novih propisa i standarda, koji uključuju razmatranja o sigurnosti, izvođenju i održivosti, potrebnih za tranfer tehnologija iz laboratorije na tržište.

Velika prepreka značajnijem korišćenju kompozita leži u nedostatku svijesti i prihvatanja od strane građevinske industrije. Naime, usvajanje i racionalna upotreba FRP materijala će biti izazov za tradicionalne arhitekte i inženjere, koji se moraju upoznati sa materijalima i proizvodnim procesima, u cilju projektovanja efikasnih FRP konstrukcija.

Ono što takođe zabrinjava jeste činjenica da je najčešći način rukovanja FRP otpadnim materijalima još uvijek u vidu odlaganja, mada se očekuje da će u bliskoj budućnosti, odluke zakonodavstva, kao i povećanje troškova odlaganja, uticati na intenziviranje procesa recikliranja i smanjenje količine otpada. Za sada ne postoji tržište za FRP reciklirani materijal, što otvara prostor naučnicima za nova istraživanja. Pilot projekti su pokazali da je moguće reciklirati FRP materijal, ali pouzdani lanac snabdijevanja mora biti uspostavljen.

U ovom poglavlju naglašeno je da će većina klijenata, uprkos brojnim raspravama o koštanju životnog ciklusa, ipak izabrati materijal koji u proračunu konstrukcije daje najniže početne troškove, tako da je cijeli proračun koštanja životnog ciklusa često nerealan. Međutim, korišćenje FRP materijala je ekonomično u drugim oblastima, kao što su popravka i ojačanje konstrukcija, a povećana upotreba je u ovim slučajevima bazirana isključivo na početnim troškovima.

Jasno je da FRP materijali neće zamijeniti konvencionalne materijale gradnje u svim područjima, ali će naći povećanu primjenu u potencijalno velikom tržišnom sektoru. U budućnosti će vjerovatno najveća upotreba strukturnih kompozitnih FRP materijala biti u području građevinskih elemenata namijenjenih za projekte iskorišćavanja energije iz vjetra, talasa, vode, geotermalne i solarne energije.

Ovo je sektor sa značajnim potencijalom rasta, u kome se očekuje uzbudljivi razvoj u budućnosti.

2.4. FRP materijali za sanacije konstrukcija

2.4.1. Uvod

U Crnoj Gori se prate savremeni trendovi u oblasti sanacija konstrukcija ali nešto manje u oblasti održavanja, dijelom zbog nedostatka sredstava, a dijelom zbog tradicije. Posljedice neadekvatnog održavanja građevinskih objekata su: pojava prslina i deformacija, pogoršanje izgleda objekata, kao i skraćenje njihovog eksploatacionog vijeka. Samim tim su i kasnije popravke sve skuplje, što vremenom dovodi do ekonomskih gubitaka.

Neophodno je obezbijediti sigurnost i funkcionalnost objekta, a to se postiže blagovremenim otkrivanjem i otklanjanjem uzroka oštećenja.

Najveći broj podataka ovih istraživanja odnosi se na betonske konstrukcije. Razlog za to je što su betonske konstrukcije najbrojnije, pa su i aktivnosti u oblasti održavanja i sanacija betonskih konstrukcija najviše zastupljene.

Konstrukciju je potrebno ojačati u sljedećim slučajevima:

- ako je došlo do promjene namjene građevine, odnosno zbog povećanog opterećenja;
- ukoliko projektovana nosivost elementa ili cijele konstrukcije nije postignuta pri građenju zbog podbačaja kvaliteta materijala, prvenstveno betona;
- zbog lošeg izvođenja, grešaka u proračunu ili postavljanju armature u projektovani položaj konstruktivnih elemenata;
- usljed neusklađenosti seizmičke otpornosti sa novim propisima.

Iz tih razloga potrebno je izvršiti detaljna ispitivanja ugrađenih materijala i analizu statičkih uticaja. Na osnovu ovih rezultata donosi se odluka o vrsti, načinu i tipu sanacije konstrukcija.

Za ojačanje elemenata armirano-betonskih konstrukcija primjenjivale su se razne tehnologije, u zavisnosti od vrste elementa, naprezanja i upotrijebljenog materijala.

Za povećanje nosivosti elemenata konstrukcije do skoro su se primjenjivale nalijepljene čelične lamele. Tehnologija je vrlo brza i jednostavna, uz minimalno povećanje težine i dimenzija. Međutim, primijećeno je da su takve lamele, naročito u agresivnoj sredini, sklone koroziji. To se nepovoljno odražava na prionljivost betona i lamele, odnosno lijepka, koji je obično epoksidna smola. Najčešće posljedice ove pojave su odvajanje lamele od betona, čime se gubi predviđena svrha ojačavanja. Osim što su teške, čelične lamele se proizvode ograničene dužine pa se ponekad moraju nastavljati, što je još jedan od nedostataka zbog kojih se sve manje primjenjuju. Zbog navedenih teškoća s upotrebom čeličnih lamela, u posljednje vrijeme se sve više koriste FRP tanki proizvodi za ojačanje. Njihova pojava je dovela do razvoja novih tehnologija građenja, kao i postupaka analize i projektovanja, a samim tim i do promjena u filozofiji projektovanja sanacija.

2.4.2. Pripremne radnje prije početka sanacije

Prije sprovođenja sanacionih zahvata na objektu neophodna je realna procjena njegovog stanja. Nju je moguće dati samo ukoliko postoji redovno nadgledanje objekta [1]. Potreba procjene vezuje se za:

- veliki procenat oštećenja,
- velike deformacije-ugibe,
- neadekvatnu primjenu materijala,
- promjenu vlasnika/korisnika, odnosno namjene prostora i
- rušenje susjednih objekata.

Obavljaju se kontrole:

- stabilnosti, nosivosti i upotrebljivosti elemenata konstrukcije,
- trajnosti i nepropustljivosti na vlagu i
- vatrootpornosti.

Svojstva materijala upotrijebljenog za sanaciju treba da budu kompatibilna sa svojstvima materijala objekta koji se sanira, i to u pogledu koeficijenta termičke dilatacije, čvrstoće na pritisak i smicanje, modula elastičnosti i dr.

Tradicionalna sanacija elemenata betonskih konstrukcija obavlja se:

- dodavanjem nove armature,

- dodavanjem naknadno napregnutih kablova i
- dodavanjem čeličnih ploča u zategnutoj zoni.

Pri tom se zahtijeva da površine budu očišćene od prašine, prljavštine, masnoća i boja, pjeskarenjem ili metalnim četkama. Obavezno je i uklanjanje nevezanih ili loše vezanih dijelova materijala, sve do zdravog betona.

Posljednjih godina se za ojačavanje i betonskih i zidanih konstrukcija primjenjuju trake ili lamele od FRP kompozita. U ovom poglavlju daje se osvrt na ojačanje betonskih konstrukcija, gdje se najčešće primjenjuju karbonska vlakna u formi različitih traka i tkanina, njihovim lijepljenjem za beton specijalnim lijepkom. Mogu se ojačavati presjeci i u donjoj i u gornjoj zoni.

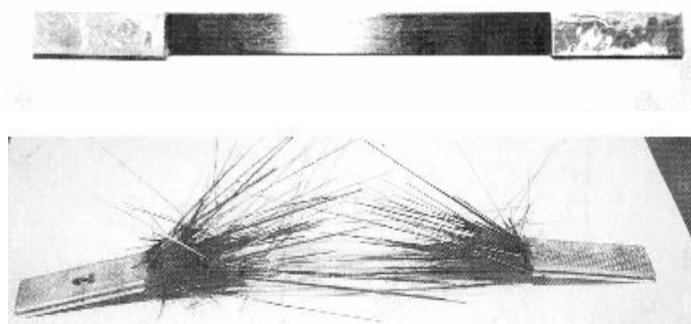
2.4.3. Tipovi FRP sistema za ojačanje

U građevinarstvu je zastupljena široka paleta FRP proizvoda [1].

- FRP sistemi za suhu montažu: Prefabrickovana lamelirana FRP folija, mrežica ili ljuska za zakrivljene elemente.
- FRP sistemi za mokro polaganje: Tkanina ili folija sa vlaknima, koja se na mjestu ugradnje impregnira polimernom smolom.
- FRP sistemi ojačanja ugrađivanjem FRP šipki: Prefabrickovane šipke ugrađuju se u izdubljene žljebove, koji se naknadno zapune malterom ili epoksidnom smolom.
- Prednapregnuti FRP sistemi: Trake od aramidnih vlakana i lamele od karbonskih vlakana.
- FRP tkanine: Ovaj materijal dobija se tkanjem konaca formiranih od vlakana. Mogu biti nosive u jednom ili više pravaca, u zavisnosti od načina tkanja, i to:
 - Monoaksijalne trake – tkanine, koje imaju vlakna samo u jednom pravcu;
 - Biaksijalne trake imaju vlakna (tkanje) u dva međusobno upravna pravca;
 - Trake sa dijagonalnim tkanjem, gdje vlakna sa osom trake zaklapaju ugao 45° .
- FRP lamele i trake: Vlakna postavljena u jednom uzdužnom smjeru, međusobno slijepljena odgovarajućim epoksidnim sredstvom.

GFRP materijali su pogodni za sanacije istorijskih objekata i zidanih elemenata, AFRP za ojačanja od udarnih opterećenja, dok su CFRP materijali najviše primjenjivani za sanacije objekata u građevinarstvu.

Karbonske trake se proizvode u praktično neograničenim dužinama. Imaju debljine do oko 2 mm i širine do 200 mm. Kada se primjenjuju trake, s obzirom da su nosive samo u jednom pravcu, mogu se postaviti i dodatne trake upravno na raspon kako bi se još više povećala nosivost na savijanje.



Slika 2.2 Uzorak trake-lamele prije i nakon ispitivanja na zatezanje

2.4.4. Područje primjene FRP materijala za ojačanje

Područje primjene FRP kompozitnih materijala kod ojačanja konstruktivnih elemenata je veoma široko:

- Čvrstoća na savijanje konstruktivnih elemenata pojačava se lijepljenjem FRP traka u zategnutoj zoni. Tehnologija je vrlo brza i jednostavna, uz minimalno povećanje težine i dimenzija;
- Smičuća čvrstoća povećava se lijepljenjem FRP lamela ili traka i to: na stranice greda, u obliku slova U ili obmotavanjem oko grede;
- Otpornost na izvijanje može se poboljšati korištenjem FRP materijala, iako kod samog kompozita dolazi do izvijanja pri relativno malim opterećenjima;
- Ojačanjem greda povećava se otpornost na savijanje i smicanje, kao i duktilnost, dok dolazi do smanjenja deformacija i ugiba, čime se ograničavaju i prsline;
- Ojačanjem zidova povećava se otpornost na savijanje u ravni i izvan nje, kao i na pritisak i na smicanje;

- Ojačanjem stubova povećava se duktilnost, otpornost na savijanje, izvijanje, smicanje, kao i dinamička čvrstoća.



Slika 2.3 Ojačanje greda i ploča na savijanje i smicanje [19]

3. PONAŠANJE OJAČANIH ARMIRANO-BETONSKIH GREDA OPTEREĆENIH NA SAVIJANJE

3.1. Uvod

Mnogo je eksperimentalnog istraživanja sprovedeno u posljednje dvije decenije, u cilju utvrđivanja brojnih ključnih karakteristika betonskih greda ojačanih FRP materijalom. Pri tom su varirane kombinacije brojnih parametara koji utiču na ponašanje uzoraka, pa je zaključeno da su ovakva ispitivanja veoma zahtjevnja. Kao dobra alternativa, pogodna za uštedu vremena i novca, nameću se razni softveri za proračun.

Kod elemenata ojačanih spoljašnjim ojačanjem, najviše pažnje posvećeno je vezi između betona i FRP materijala. Ukoliko dođe do popuštanja ove veze, gube se mnoge konstruktivne prednosti upotrebe FRP kompozita. Zato treba imati u vidu da kvalitet ove veze određuje ponašanje ojačanih betonskih presjeka [24].

3.2. Teorijske osnove i istorijat prethodnih istraživanja

3.2.1. Grede ojačane podužnim FRP ojačanjem

Najjednostavnija varijanta povećanja nosivosti greda ogleda se u ojačavanju trakama i lamelama konstantnog presjeka, upotrebom GFRP, CFRP i AFRP materijala nalijepljenih epoksidnom smolom na zategnuti pojas grede. Pri takvom načinu ojačavanja dolazi do značajnog povećanja čvrstoće na savijanje [25]. To povećanje iznosilo je 10 do 160% [26], mada, uzevši u obzir ograničenja data propisima u vezi ojačavanja, duktilnosti i upotrebljivosti, povećanje čvrstoće do 40% predstavlja razumnu granicu. Dokazano je da upotrebom CFRP ili GFRP materijala za spoljašnje ojačavanje betonskih greda, dolazi do značajnog povećanja momenta nosivosti oštećene grede [27]. Kod ojačanih greda T-presjeka stvarnih dimenzija utvrđeno je povećanje nosivosti od 50% u odnosu na neojačanu gredu [15]. Ojačavanjem greda stvarnih dimenzija pravougaonog poprečnog presjeka povećanje graničnog momenta nosivosti iznosilo je 99% u odnosu na neojačane grede [28]. Slični zaključci su donijeti i u radu [10], u kom je istraživano ojačanje

oštećenih armirano-betonskih greda stvarnih dimenzija lamelama od karbonskih vlakana (CFRP). Zaključeno je da ovako ojačane grede dostižu vrijednosti nosivosti i krutosti koje su jednake ili veće nego kod neojačanih greda. Ova granica je pomjerena u radu [29] u kome je, primjenom CFRP ojačanja, utvrđen porast nosivosti ojačanih greda od 170% u odnosu na kontrolnu gredu [15].

U slučaju primjene podužnog ojačanja FRP lamelama potrebno je, iz uslova nosivosti na savijanje, sračunati potrebnu površinu lamele a zatim provjeriti najveće lokalne smičuće i normalne napone na krajevima lamele, s obzirom da je kontaktna površina FRP-beton izložena tim naponima odnosno mješovitom režimu opterećenja. Naime, istraživanja sprovedena u nekoliko zemalja pokazala su da zbog ovih napona može doći do odvajanja krajeva lamele pa je dokaz lokalne nosivosti sastavni dio proračuna ojačavanja [30]. Prslina u toj zoni može biti izložena jednom od tri tipa opterećenja: zatezanju, smicanju u ravni i van nje (torziji). Za razmatranje jačine veze FRP-beton, najznačajnija su prva dva tipa opterećenja, odnosno njihova kombinacija [31]. Lom se najčešće dešava usljed odvajanja FRP ojačanja od betonske podloge, ukoliko se ne preduzmu određene mjere. Kritični faktor od koga zavisi odvajanje trake od betona je međuprostorno naprezanje između zategnute čelične armature i kompozitne ploče/trake (zaštitnog sloja betona, ako je traka dovoljno široka). Ako je širina trake mala u odnosu na širinu grede, onda se odvajanje trake može kontrolisati međuprostornim naprezanjima između FRP trake i betona. Sigurnost veze FRP materijala i betona neophodna je za uspješno ojačanje, pa se istraživanjima tog tipa posvećuje naročita pažnja. U daljem tekstu navedeni su najvažniji zaključci tih istraživanja:

- Kvalitet obrade površine betona, na koju će se lijepiti FRP proizvod, predstavlja preduslov dobrog prijanjanja. Ono neće biti ugroženo ukoliko se objekat ne nalazi u izuzetno nepovoljnoj sredini ili ukoliko se primjenjuje epoksidna smola visoke otpornosti na hemijska dejstva [32].
- Veza FRP-beton pokazala je izvanredne karakteristike pri kratkotrajnim opterećenjima [31]. Lom ojačanih uzoraka dešavao se uglavnom unutar betona, a ne u samoj vezi. Potvrđen je raniji zaključak da ojačanje CFRP lamelama povećava krutost i graničnu otpornost greda. Maksimalno povećanje nosivosti nakon ojačanja iznosilo je 120% u odnosu na kontrolnu gredu. Duktilnost ojačanih

greda se tada smanjila i do 70%. Karakteristike CFRP materijala uslovljavale su nivo redukcije [26].

- U radu [8] izvršeno je 21 ispitivanje na savijanje na prostim gredama, ojačanim tankom FRP pločom, pri čemu je 10 testova izvršeno savijanjem sa dvije koncentrisane sile (4-point load), a 11 testova sa jednom koncentrisanom silom (3-point load). Prvih 10 uzoraka doživjeli su lom usljed odvajanja FRP trake od betona, uz odvajanje zaštitnog sloja betona. Kod preostalih 11 uzoraka uočena su 4 različita tipa loma:
 - odvajanje zaštitnog sloja betona (u 6 testova);
 - međuprostorne prsline koje su izazvale razdvajanje (u 2 testa);
 - lom izazvan kritičnom dijagonalnom pukotinom (u 1 testu) i
 - lom usljed savijanja neojačanih uzoraka (u 2 testa).

Samo je u prvom i trećem slučaju prisutno odvajanje trake. U oba slučaja lom je nastupio nakon pojave velike smičuće pukotine.

- U eksperimentalnim ispitivanjima na prostim armirano-betonskim gredama, T-presjeka, ojačanim trakama i tkaninama u zategnutoj zoni [33] ispitivane su sljedeće šeme ojačanja:
 - 1: greda bez ojačanja (kontrolna greda);
 - 2: greda ojačana sa donje strane GFRP trakom duž cijelog raspona;
 - 3: greda ojačana sa donje strane GFRP trakom u središnjem rasponu, na polovini dužine;
 - 4: greda ojačana GFRP tkaninom duž cijelog raspona, cijelom visinom presjeka, do ploče;
 - 5: greda ojačana GFRP tkaninom u središnjem rasponu, na polovini dužine, cijelom visinom presjeka, do ploče;
 - 6: šema ojačanja ista kao i šema 5, ali je greda prije ojačanja ispitana kratkotrajnim opterećenjem do pojave prve prsline;
 - 7: šema ojačanja je ista kao i šema 4, ali je greda prije ojačanja ispitana kratkotrajnim opterećenjem do pojave prve prsline.

Lom usljed otkazivanja materijala (pucanje trake, cijepanje tkanine) nastupio je u slučajevima 2, 4 i 5. U slučaju 3 i 6 došlo je do odvajanja FRP materijala od grede, dok je u slučaju 7 nastupio kombinovani lom (cijepanje i odvajanje tkanine).

Najveća nosivost postignuta je ojačavanjem u slučaju 4, dok je najmanje ugibe doživjela greda 5, u poređenju sa ostalim neispucalim gredama. Prethodno ispucale grede 6 i 7 su doživjele manje krajnje ugibe u poređenju sa identičnim neispucalim 5 i 4, respektivno.

U pogledu uticaja dužine ojačanja na veličinu ugiba, na osnovu rezultata istraživanja, zaključeno je da ojačanje u središnjem rasponu dopušta manje ugibe, u odnosu na ojačanje na cijeloj dužini raspona. Ovo važi i u slučaju primjene traka i tkanina, a takođe važi i kod ispucalih i neispucalih presjeka. Međutim, samo u slučaju ojačanja tkaninom neispucalog presjeka, došlo je do iskorišćenja nosivosti FRP materijala, dok je u ostalim slučajevima došlo do preranog odvajanja.

- U istraživanjima lokalnog loma na gredama ojačanim CFRP lamelama primijećeno je da se osim odvajanja lamele na krajevima od donjeg pojasa grede, javlja i više slučajeva loma ispitanih greda. Takvi lomovi se dešavaju između CFRP ojačanja i glavne čelične armature. Zaključeno je da su glavni uzročnici ovakvih lomova smičući i normalni naponi koncentrisani na krajevima ojačanja, kao i naponi savijanja koji izazivaju pukotine na spoju epoksidne smole i karbonske lamele. Kao dostupno rješenje ovakvih problema nameću se poprečna ukrućenja podužnih ojačanja [34].

3.2.2. Grede ojačane podužnim i poprečnim FRP ojačanjem

3.2.2.1. Uvod

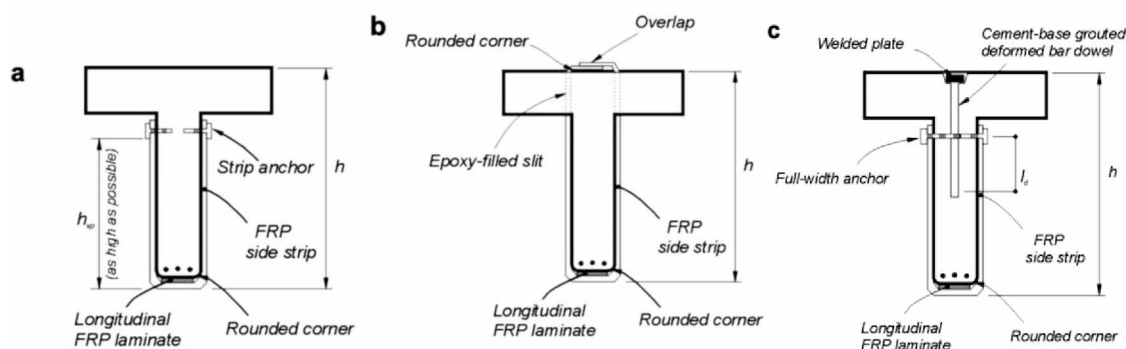
Mogućnosti brzog nanošenja FRP ojačanja, naročito karbonskih, uz minimalno ometanje u radu konstrukcije i bez vidljivih izmjena u težini ili geometriji ojačanog elementa, čini FRP materijal atraktivnim i praktičnim za ojačanje postojećih elemenata. Međutim, mnogi istraživači smatraju da se ne može iskoristiti puni kapacitet nosivosti ovog sistema ojačanja, ukoliko se FRP trake ne učvrste (ankeruju) dodatnim elementima – konektorima, jer će doći do preranog odvajanja podužne kompozitne trake.

FRP trake U-profila sa mehaničkim ankerovanjem su pogodne kada želimo postići povećanje čvrstoće podužne veze traka-beton, kao i smičuće čvrstoće grede. Takođe se

sprječava nepoželjno odvajanje podužne trake od betona i time dobija znatno pouzdaniji sistem ojačanja [22], [35].

Od ključnog značaja za ponašanje FRP sistema ojačanja je i ispravna montaža. Potrebno je obezbijediti čistu i glatku betonsku površinu za postavljanje FRP ploče, da bi se eliminisale izbočine u kojima bi moglo doći do koncentracije napona, kao i zbog kontrole širenja prslina, odnosno poboljšanja ukupne efikasnosti sistema.

Na slici 3.1. prikazani su neki od načina ojačavanja konstrukcijskih elemenata: a) U-poprečna traka, ankerovana za rebro grede; b) poprečna traka duž cijele visine presjeka, preklapljena na pritisnutoj strani; c) ankerovana U-poprečna traka i dodatni vertikalni anker.



Slika 3.1 Načini ojačavanja konstrukcijskih elemenata [35]

3.2.2.2. Efikasnost primjene FRP poprečnih ukrućenja

Brojni istraživači su se bavili primjenom kompozitnog materijala za ojačanje konstrukcija:

- Eksperimentalna i teorijska istraživanja ukazala su na značaj položaja ojačanja u ukupnoj čvrstoći, mehanizmu loma i duktilnom ponašanju grede [36]. Zapažena su značajna povećanja nosivosti na savijanje greda u funkciji mjesta ojačanja, u poređenju sa kontrolnom neojačanom gredom. Poprečno ukrućenje služi kao osiguranje od preranog odvajanja trake na donjem pojasu grede. Uticaj tog parametra na mehanizam loma evidentan je s obzirom da su grede sa ojačanjem na donjem pojasu doživjele lom usljed odvajanja trake, dok je u slučaju dodatnog ojačanja na stranama grede nastupio kombinovani lom - odvajanje traka sa strana

grede i drobljenje betona. Zaključeno je da konstrukcije ojačane trakama i lamelama, bez dodatnog poprečnog ukrućenja, mogu doživjeti iznenađan krti lom [23]. Kroz obimna istraživanja ispitana je opravdanost ojačavanja greda tankim kompozitnim proizvodima [22]. Korišćen je CFRP materijal u obliku traka i tkanina armiranih vlaknima u jednom i dva smjera. Zaključeno je da su se sve grede ojačane tankim karbonskim proizvodima ponašale nedovoljno fleksibilno, što ukazuje na potrebu za većim faktorom sigurnosti. Njihovom primjenom se uglavnom povećava nosivost greda, a takođe se redukuju ugibi i prsline. Primijećeno je da primjena poprečnih ukrućenja značajno utiče na poboljšano ponašanje ojačanih greda.

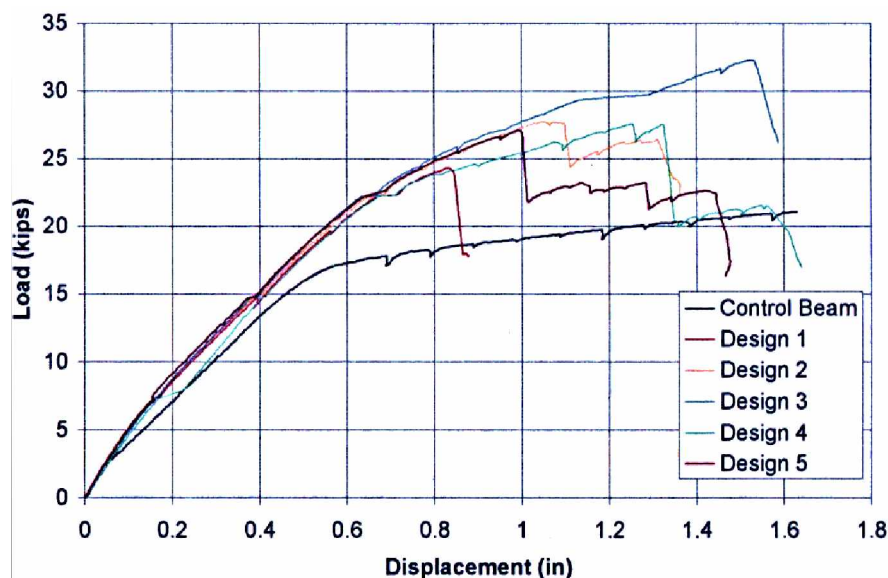
- U radu [35] predložen je način spoljašnjeg ojačanja betonskih greda pomoću FRP lamele postavljene na zategnutu stranu grede. U cilju sprječavanja odvajanja lamele od betona, predloženo je njeno učvršćivanje FRP trakama U oblika. Na taj način se povećava podužna snaga veze, kao i smičuća čvrstoća grede.
- U radu [37] ispitivano je ojačavanje greda opterećenih na savijanje nalijepljenim staklenim (GFRP) lamelama raznih oblika. Kod greda koje su bile ojačane samo podužno došlo je do odvajanja lamele na krajevima zbog lokalnih normalnih i smičućih napona. Razmatrana su i dva tipa poprečnog ukrućenja - sidrenje zavrtnjem i tzv. *I-jacket plate*, kod koga se CFRP traka na krajevima završava proširenjem potrebnim za obmotavanje presjeka. U prvom slučaju nije došlo do odvajanja krajeva lamele, ali je do loma došlo zbog glavnih kosih zatežućih napona. Međutim, u drugom slučaju došlo je do povećanja nosivosti i redukcije širine prsline uz zadovoljavajuću duktilnost i pojavu loma dostizanjem nosivosti na savijanje u zategnutoj zoni grede. Ovakvo poželjno ponašanje greda se objašnjava dobrim sidrenjem primijenjene lamele za ojačanje.
- Ispitivana je i primjena CFRP ankerovanog sistema ojačanja na T-gredama i I-nosačima stvarnih dimenzija [38]. Grede ojačane podužnim CFRP neankеровanim trakama su eksperimentalnim ispitivanjima pokazala povećanje smičuće čvrstoće od samo 5%, u odnosu na neojačanu gredu. CFRP poprečna ojačanja korišćena u ovom eksperimentu omogućila su u potpunosti iskorišćenje nosivosti CFRP traka, pa je tako spriječen lom usljed njenog odvajanja. Efikasnost primjene CFRP ankera se ogledao u povećanju predmetne čvrstoće i do 50%. Oni su uspješno

aktivirali pun kapacitet CFRP traka sve do njihovog kidanja i time doveli gredu do željenog mehanizma loma.

- U radu [36] sprovedena je nelinearna analiza povećanja nosivosti armirano-betonskih greda, metodom konačnih elemenata. Razmatrani su sljedeći slučajevi:
 - greda bez ojačanja (kontrolna greda);
 - 1: greda ojačana sa donje strane karbonskom trakom;
 - 2: greda ojačana sa donje strane karbonskom trakom, a bočno sa po 4 U-trake na obje polovine grede. Bočna ojačanja postavljena su pod uglom od 90° , a njihova visina se smanjuje od oslonca ka sredini;
 - 3: greda ojačana sa donje strane karbonskom trakom, a bočno sa po 3 U-trake na obje polovine grede. Bočna ojačanja postavljena su pod uglom od 45° i konstantne su visine;
 - 4: greda ojačana sa donje strane karbonskom trakom, a bočno sa po 3 U-trake na obje polovine grede. Bočna ojačanja postavljena su pod različitim uglovima (45° , 60° i 90°) i konstantne su visine;
 - 5: greda ojačana sa donje strane karbonskom trakom, a bočno sa po 4 U-trake na obje polovine grede. Bočna ojačanja postavljena su pod uglom od 90° , a njihova visina se smanjuje od sredine ka osloncima.

Na slici 3.2. prikazana je zavisnost sila-ugib za sve šeme ojačanja, kao i za kontrolnu gredu. Analizom dobijenih dijagrama jasno je da je nosivost kontrolne grede manja od nosivosti ojačanih greda, ali je deformabilnost znatno veća. Povećanje maksimalnog opterećenja prije loma iznosilo je od 12.5% (model 1) do 35.4% (model 3), u odnosu na kontrolnu gredu. Rezultati ovog istraživanja su pokazali dobro poklapanje sa rezultatima nekih ranijih eksperimentalnih ispitivanja.

Dodatne FRP trake U-profila predstavljaju ankere za podužnu FRP traku, a taj sistem ojačanja povećava mogućnost ranijeg otkazivanja betona (modeli 2 i 5), dok u nekim slučajevima do loma po betonu nikada ne dođe, zbog ranijeg odvajanja trake (model 1). Ovo ankerovanje, međutim, nema značajan uticaj na pojavu i širenje prslina. Naponi nastali u poprečnom smjeru su mali u poređenju sa onim nastalim od savijanja grede. To znači da prve prsline nastaju upravo na pravac pružanja grede, gdje poprečna ukrućenja nemaju uticaj.



Slika 3.2 Zavisnost veličine ugiba od opterećenja

- Rezultati eksperimentalnog istraživanja na armirano-betonskim gredama T-presjeka, ojačanim sa spoljne strane FRP trakama, prikazani su u radu [6]. I ovdje je efikasnost spoljašnjeg ojačanja utvrđena ispitivanjem na gredama sa i bez ankerovanja. Porast nosivosti greda u odnosu na kontrolnu iznosio je 25% za ojačanu neankerisanu gredu, odnosno 50% za ojačanu ankerisanu gredu.
- Na osnovu istraživanja [39], autori zaključuju da ankerovanje smanjuje koncentraciju napona i povećava snagu veze. Nosivost na savijanje ojačanih greda sa i bez ankerovanja podužnog ojačanja razlikuje se i do 35%.
- U radu [23] zaključeno je da se mehanizmi loma neojačane i ojačane grede značajno razlikuju (vidjeti kratak prikaz istraživanja u tački 3.4.1). Grede sa CFRP ojačanjem se ponašaju elastično, skoro do loma. U početku, dok najveći dio zatezanja prima unutrašnja, čelična armatura, sve grede se ponašaju kao kontrolna. Kada dođe do tečenja čelika, dodatnu silu zatezanja prima FRP sistem ojačanja i dolazi do povećanja nosivosti elementa. Dodatni slojevi CFRP ojačanja značajno utiču na povećanje nosivosti i krutosti grede. Radni dijagrami greda sa i bez poprečnog ukrućenja su veoma slični, s tim što u prvom slučaju postoji značajan porast granične nosivosti, mada ipak uz određeni stepen odvajanja ojačanja neposredno prije loma. Povećanje nosivosti na savijanje kod grede sa poprečnim ukrućenjem iznosilo je 82% u odnosu na kontrolnu gredu, a 23% u odnosu na gredu ojačanu samo podužnim ojačanjem.

3.3. Tipovi loma kod ojačanih armirano-betonskih greda

Jačina veze između FRP ojačanja i betona predstavlja ključni faktor u kontroli različitih tipova loma [40]. Brojni testovi sprovedeni na ojačanim armirano-betonskim gredama i pločama ukazuju na odvajanje trake kao na najčešći tip loma. Ono se dešava na spoju sa betonom, na krajevima trake, kao i na mjestu središnje ili dijagonalne pukotine koja uslovljava razdvajanje. Takav tip loma nastupa naglo, na krt način, čime se redukuje čvrstoća i smanjuje duktilnost elementa.

Kod greda ojačanih tankim FRP proizvodima postoji nekoliko modela loma, što zavisi od vrste proizvoda (traka, tkanina), vrste opterećenja i od mjesta ojačavanja.

Kada se ojačava greda zbog nedovoljne nosivosti na savijanje, što je predmet ovoga rada, tanki proizvodi se lijepe na zategnuti pojas tako da su im vlakna paralelna rasponu grede. Kod ovako ojačane grede do otkazivanja nosivosti može doći na dva načina - savijanjem grede na mjestu maksimalnog momenta tj. lokalnim lomom, koji se manifestuje odvajanjem krajeva lamele od pojasa ili u obliku smičućeg loma između lamele i zategnute armature grede.

Dodatne lamele ili tkanine kojima su vlakna upravna na osovinu grede mogu prihvatiti kose napone zatezanja, pa time povećati nosivost na savijanje [30].

U nastavku je dat pregled tipova loma ojačanih elemenata napregutih na savijanje.

3.3.1. Lom koji nastaje bez gubitka veze betona i kompozita

Tečenje čelika, praćeno lomom betona: Ovo je slučaj kada je dostignuta nosivost grede na savijanje, uz tečenje čelične armature, praćeno lomom betona u pritisutoj zoni. FRP traka u ovom slučaju ostaje neiskorišćena. Ova vrsta loma se dešava pri relativno niskim procentima armiranja i neojačane i ojačane grede.

Lom betona, prije tečenja čelika: Kada imamo veoma visoke procenete armiranja, doći će do loma pritisnutog betona prije otkazivanja armature i prije loma FRP ojačanja. Ovaj tip loma je krt i nepoželjan.

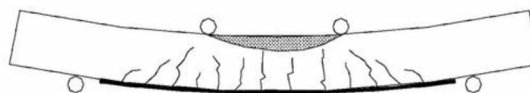
Tečenje čelika, praćeno lomom FRP ojačanja: U slučaju niskog procenta armiranja i unutrašnje i spoljašnje armature, lom na savijanje se može javiti usljed tečenja čelika, praćeno lomom FRP ojačanja, a sve to prije loma betona. Da bi se ovakav lom dogodio FRP ojačanje mora biti dobro usidreno.

Smičući lom: Ovaj tip loma je karakterističan za betonske grede koje nijesu propisno armirane za osiguranje od smicanja. U slučaju kada je moment nosivosti grede povećan spoljašnjim FRP ojačanjem, moguće je da greda prije dostigne nosivost na smicanje nego na savijanje.

Tečenje čelika u presjecima bez FRP ojačanja: Za grede ojačane veoma kratkim trakama, tečenje čelika može dospjeti do mjesta na gredi gdje nema FRP ojačanja, a gdje se pojavila prslina u betonu, pri čemu dolazi do formiranja plastičnog zgloba na krajevima ojačanja. Pri tome se ne gubi veza između betona i FRP ojačanja.



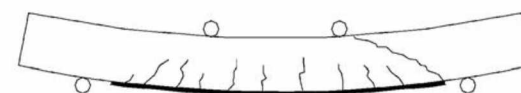
(a)



(b)



(c)



Slika 3.3 Mehanizam loma grede bez gubitka veze betona i FRP ojačanja [40]:

(a) lom pritisknutog betona; (b) lom FRP trake; (c) lom usljed smicanja

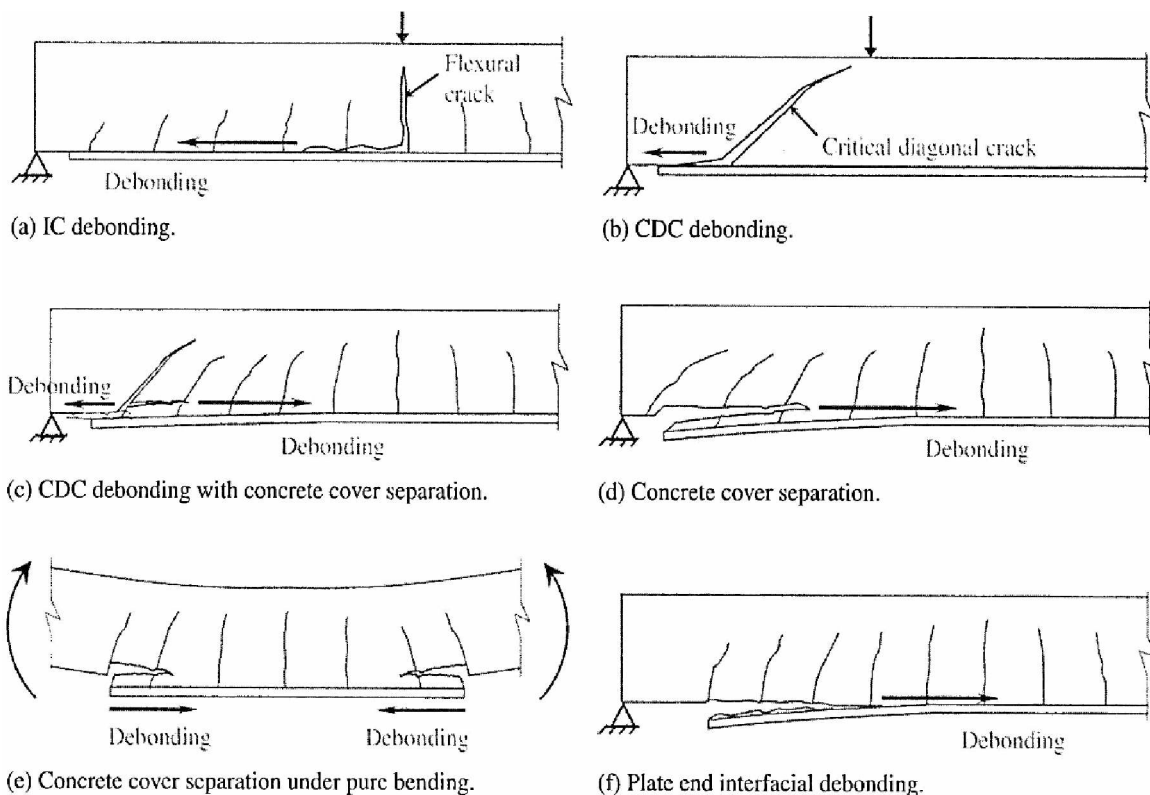
3.3.2. Lom koji nastaje usljed gubitka veze betona i kompozita

Lomovi ovog tipa su najčešće zastupljeni, a opet nijesu u potpunosti shvaćeni, uglavnom zbog visokih troškova ponovljenih eksperimentalnih istraživanja. Zbog toga raste broj analitičkih istraživanja. Ovaj tip loma je karakterističan za grede ojačane kratkim trakama, i po svojoj prirodi je veoma krt.

3.3.2.1. Lom koji nastaje odvajanjem FRP ojačanja od betona

Ovaj tip loma prikazan je na slici 3.4:

- (a) odvajanje u središnjem rasponu;
- (b) odvajanje izazvano kritičnom dijagonalnom prslinom;
- (c) lom izazvan kritičnom dijagonalnom prslinom uz odvajanje zaštitnog sloja betona;
- (d) lom usljed odvajanja zaštitnog sloja betona;
- (e) odvajanje zaštitnog sloja betona usljed čistog savijanja;
- (f) odvajanje na krajevima ojačanja



Slika 3.4 Mehanizam loma grede usljed odvajanja FRP ojačanja [8]

Pravilnici se zasnivaju na sljedećim tipovima loma:

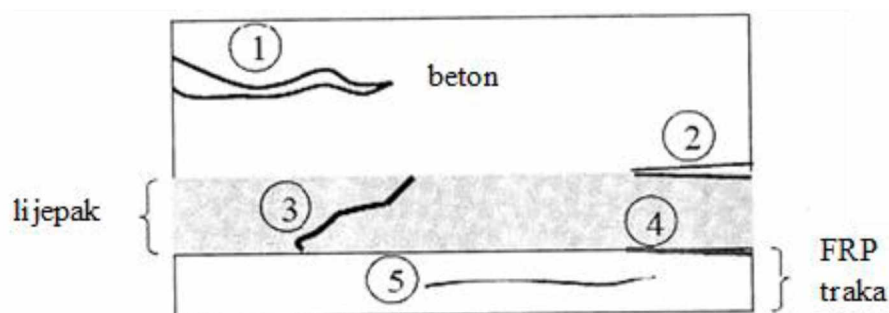
Odvajanje u središnjem rasponu: Ovaj tip loma uzrokovan je prenošenjem napona smicanja sa FRP ojačanja na beton. Počinje od prsline nastale usljed savijanja u zoni najvećih uticaja. Smatra se u određenoj mjeri duktilnim lomom, jer se greda dovodi do tog nivoa koji omogućava tečenje čelične armature, uz prisustvo velikih deformacija.

Odvajanje na krajevima ojačanja: Ovaj tip loma takođe je uzrokovan prenošenjem napona smicanja sa FRP ojačanja na beton. Počinje na krajevima FRP ojačanja, i pri tom se sloj betona odvaja zajedno sa FRP trakom. Količina betona koja se odvaja se kreće od nekoliko milimetara do cijelog zaštitnog sloja.

U cilju sprječavanja loma usljed odvajanja, razvijene su različite metode, kao što su U-sidrenja, L-ploče i sidrenja zavrtnjevima. Međutim, ovim metodama se samo osigurava veza na krajevima elementa. Prsline nastale usljed savijanja ili smicanja mogu izazvati odvajanje FRP ojačanja unutar središnjeg raspona elementa.

3.3.2.2. Lom koji nastaje u zoni interakcije betona i FRP ojačanja

Ovaj tip loma nastaje odvajanjem dva elementa ili lomom unutar nekog od slojeva ostvarene veze (slika 3.5):



Slika 3.5 Mehanizam loma u zoni interakcije betona i FRP ojačanja

- 1: Lom u betonu duž oslabljenog dijela ili na kontaktu sa čeličnom armaturom;
- 2: Lom usljed razdvajanja na spoju beton-lijepak;
- 3: Lom unutar sloja lijepka;
- 4: Lom usljed razdvajanja na spoju FRP-lijepak;
- 5: Lom usljed odvajanja FRP ojačanja.

Ovakvi tipovi loma sprečavaju iskorišćenje punog potencijala FRP materijala. Lomovi tipa 1 i 4 su najzastupljeniji, dok se ostali tipovi javljaju rjeđe, što naročito važi u slučajevima kada je izbor materijala i njihova primjena u skladu sa određenim standardima i procedurama.

Kada je betonska greda sa spoljašnjim FRP ojačanjem izložena savijanju, tada betonski sloj na kontaktnoj površini s lijepkom biva izložen velikim naponima zatezanja i smicanja. Zbog njih se i dešava odvajanje FRP materijala od betona. Najslabiji dio veze predstavlja sloj betona koji joj je najbliži. Zone visoke koncentracije napona obuhvataju i krajeve FRP ojačanja, kao i mjesta oko prslina nastalih usljed savijanja i smicanja. To su ujedno i mjesta gdje počinje odvajanje FRP materijala.

Iz navedenog se može zaključiti da do razdvajanja u FRP ojačanim elementima može doći u samom materijalu, kao i na kontaktnim površinama upotrijebljenih materijala, po putanji koja iziskuje najmanju količinu energije. Usljed naglog gubitka veze dolazi do lomova konstrukcija katastrofalnih razmjera. Obezbeđivanjem dobrog prijanjanja kompozitnog materijala za betonsku površinu sprečava se preuranjeni i nagli gubitak nosivosti ojačanih elemenata.

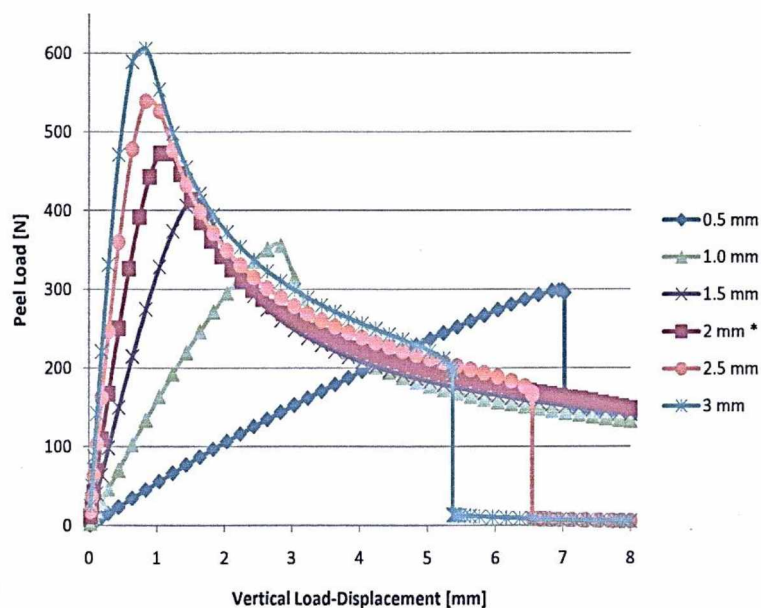
3.4. Ispitivanje uticaja parametara na ponašanje ojačanih greda

Kroz obimna eksperimentalna i teorijska istraživanja sprovedena širom svijeta, ispitivan je uticaj brojnih parametara na mehanizam/tip loma, i izvedeni su značajni zaključci u pogledu njihovog doprinosa nosivosti ojačanog elementa.

3.4.1. Debljina FRP ojačanja

U radu [41] autori su istraživali spoljašnje ojačanje armirano-betonskih greda lamelama od karbonskih vlakana (CFRP). Došli su do zaključka da lamele pozitivno utiču na prsline u betonu, što doprinosi povećanju nosivosti i trajnosti konstrukcije, a to su ujedno i osnovni ciljevi kod ojačavanja. Takođe zaključuju da dodavanje lamela, odnosno povećanje debljine ojačanja, smanjuje duktilnost grede. Ta redukcija duktilnosti dešava se kod svih nivoa opterećenja i veća je ukoliko je lamela deblja.

Uticaj debljine ojačanja na porast graničnog opterećenja pri lomu (P_{max}) vidi se na slici 3.6. U istraživanju prikazanom u radu [31] modelirano je šest različitih debljina FRP ojačanja: 3 mm, 2.5 mm, 2.0 mm (kontrolni uzorak), 1.5 mm, 1.0 mm i 0.5 mm.

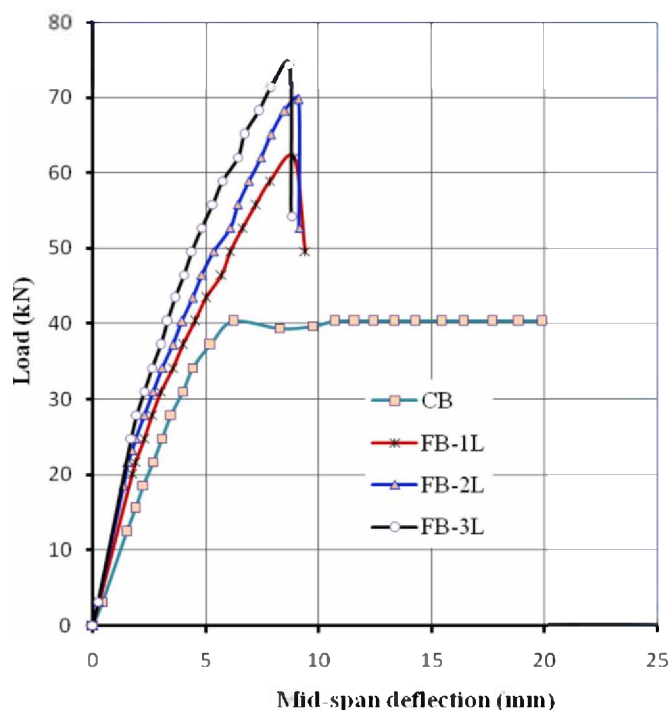


Slika 3.6 Zavisnost graničnog opterećenja i ugiba grede od debljine ojačanja po Holmeru [31]

Što je tanje ojačanje, kompozitna greda postaje fleksibilnija. Nakon dostizanja graničnog opterećenja, FRP počinje da se odvaja od betonske podloge. Kod modela sa debljinom ojačanja od 0.5 mm odvajanje je nastalo pri sili od 299 N. Međutim kod ovog modela do pojave prve prsline dolazi tek pri ugibu od skoro 7 mm. Nasuprot njemu, kod modela sa debljim ojačanjem značajno se povećava nosivost. Međutim, na slici 3.6 uočava se odvajanje cijele trake pri ugibu od 5.3 mm (za traku debljine 3 mm), odnosno pri ugibu od 6.54 mm (za traku debljine 2.5 mm). Ove podatke treba imati u vidu pri odabiru debljine ojačanja.

Uticaj debljine lamele na ponašanje ojačanih greda ispitivan je i u radu [23]. Ispitivanje je izvršeno na pet prostih greda dimenzija 15x20cm i raspona 1.90 m, ojačanih lamelama različitih debljina. Prva greda je neojačana, kontrolna (CB), a tri su ojačane lamelama od 1, 2 i 3 sloja (FB-1L, FB-2L i FB-3L). Posljednja greda je ojačana sa jednoslojnom lamelom, koja je na krajevima ukrućena U-trakama (FB-1LU). Povećanje graničnog opterećenja iznosilo je 54%, 73% i 85% za grede FB-1L, FB-2L i FB-3L, respektivno, u

odnosu na gredu CB. Povećanje nosivosti na savijanje kod grede FB-1LU iznosilo je 82% u odnosu na gredu CB, a 23% u odnosu na gredu FB-1L bez poprečnog ukrućenja. Dobijeni rezultati potvrđuju značajan uticaj koji debljina lamele i njena poprečna ukrućenja imaju na ponašanje ojačanih greda (slika 3.7).



Slika 3.7 Zavisnost graničnog opterećenja i ugiba grede od debljine ojačanja po Sobuzu [23]

Autori rada [37] došli su do zaključka da će se kod slabo armiranih presjeka ojačanih tankim FRP trakama javiti lom usljed njihovog kidanja. Povećanjem debljine traka za ojačanje, mehanizam loma se manifestuje kroz naglo odvajanje cijele trake ili njenih krajeva. Do sličnih zaključaka došli su i u radu [42]. Autori su ukazali na neophodan oprez prilikom povećanja debljine ojačanja, jer se lom pomjera ka krajevima grede, uz povećanje normalnih i smičućih napona.

3.4.2. Širina FRP ojačanja

U radu [40] prikazan je uticaj širine FRP ojačanja na tip loma grede. Šira traka omogućava bolje iskorišćenje njene čvrstoće, redukuje napon na kontaktu beton-FRP, i time obezbjeđuje veću nosivost greda na savijanje. Duktilnost greda je veća kod primjene širih

traka, i može biti veća nego kod neojačanih. Dakle, sa porastom širine ojačanja raste i duktilnost, sve dok mehanizam loma ne pređe u lom usljed središnjeg odvajanja, i to bez daljeg porasta duktilnosti. Šira traka će, u slučaju nepromjenljive krutosti elementa, uvijek obezbijediti veću nosivost [43].

3.4.3. Dužina FRP ojačanja

Položaj veze FRP-beton utiče na deformaciju odvajanja. Ukoliko je veza ostvarena isključivo u zoni savijanja, doći će do pojave velikih deformacija, pa će do odvajanja doći kasnije, nego u slučaju da je ta veza ostvarena u zoni savijanja i smicanja, gdje bi bila izložena aksijalnom naponu zatezanja i naponu smicanja [11]. Zaključuje da je dužina ojačanja parametar koji igra značajnu ulogu kod mehanizma loma ojačanih greda.

Rezultati istraživanja rada [43] ukazali su na to da povećanje dužine CFRP ojačanja, bilo da se radi o ojačanju na smicanje ili savijanje, povećava kapacitet nosivosti grede. U slučaju kada se ojačavanje vrši kratkim trakama, maksimalne vrijednosti napona su na krajevima trake, dok duže trake dopuštaju tečenje čelične armature i na taj način izazivaju veće napone pod dejstvom koncentrisanog opterećenja.

3.4.4. Debljina lijepka za ojačanje

U radu [31] izvršeno je 5 testova, sa debljinama lijepka od 0.5, 1, 1.2 (kontrolni uzorak), 2 i 3 mm. S obzirom da je lijepak dio ojačanja, njegov uticaj na graničnu nosivost pri odvajanju je sličan uticaju od FRP materijala, mada ne u tolikoj mjeri.

Granična nosivost pri odvajanju, P_{max} , raste sa povećanjem debljine lijepka. Nasuprot tome, što je debljina lijepka manja, to je kompozitna greda duktilnija. Testirani modeli su ostvarili nosivost od 414 N (debljina lijepka 0.5 mm) do 640 N (debljina lijepka 3 mm), i time dokazali da veća debljina lijepka kod FRP ojačanja obezbjeđuje veću nosivost ojačane grede. Ovi rezultati se podudaraju sa istraživanjima drugih naučnika [44]. Debljina lijepka, međutim, nema značajan uticaj na veličinu ugiba. To znači da se, bez obzira na razlike u nosivostima ovih modela, širenje prslina odvija pri približno istim veličinama ugiba. Kod modela sa lijepkom debljine 2 i 3 mm pri određenom ugibu dolazi

do potpunog odvajanja FRP trake. Stoga, bez obzira na želju za povećanjem nosivosti, treba biti oprezan pri nanošenju sloja lijepka velike debljine, jer se time dobijaju krući sistemi, kod kojih se širenje prslina odvija znatno bržim tempom.

3.4.5. Čvrstoća betona

Porast čvrstoće betona odlaže odvajanje CFRP traka i povećava deformaciju na mjestu veze. Ona ima značajan uticaj na granično opterećenje ojačanih elemenata [11].

U radu [31] izvršena je parametarska analiza, u kojoj je ispitivano 6 modela sa različitim čvrstoćama betona, od 6.9 do 41.4 MPa. Pri promjenama čvrstoće od 13.8 do 21.4 MPa, došlo je do porasta nosivosti od 15.7%. Međutim za veći raspon čvrstoće od 21.4 do 41.4 MPa, taj porast je iznosio samo 11.7%. Kao što je i ranije zaključeno, krući materijali će formirati jaču vezu i tako se bolje oduprijeti početnom odvajanju. Većim čvrstoćama betona odgovara manji ugib na mjestu potpunog odvajanja.

3.4.6. Modul elastičnosti

3.4.6.1. Uticaj modula elastičnosti betona

Uticaj ovog parametra je isti kao i prethodnog, s obzirom da su čvrstoća betona i njegov modul elastičnosti u direktnoj zavisnosti.

3.4.6.2. Uticaj modula elastičnosti FRP materijala

Postoji mnogo različitih vrsta FRP materijala sa različitim modulom elastičnosti. Normalne karbonske trake imaju modul elastičnosti između 155 i 170 GPa, a staklene oko 41 GPa. Upoređujući trake sa visokim modulom elastičnosti (oko 300 GPa) sa kontrolnim uzorcima (139 GPa), registruje se povećanje nosivosti od samo 12.8% iako je krutost udvostručena. Dolazi i do smanjenja ugiba prije pojave širenja prslina i to u iznosu od 30% [31]. Sljedeća uporedna analiza razmatrala je staklenu traku (41 GPa) i karbonsku traku (300 GPa), gdje je došlo do povećanja krutosti za više od 700%. U ovom slučaju nosivost je porasla za 33%, a zabilježena je redukcija ugiba od 54%. Ovako mali doprinos modula elastičnosti FRP materijala povećanju nosivosti sistema potvrdio je rezultate

nekih ranijih istraživanja [45]. Autori ovog rada došli su do zaključka da sa porastom krutosti FRP materijala za ojačanje, dolazi do neznatnog povećanja nosivosti veze, uz smanjenje duktilnosti sistema.

3.4.7. Procenat armiranja

3.4.7.1. Uticaj procenta armiranja čelika

Utvrđen je izuzetan uticaj podužne čelične armature na karakter veze FRP-beton, kao i na vrstu loma. Njeno prisustvo mijenja mehanizam loma od trapeznog (za nearmirane uzorke), do skoro horizontalnog duž čelične armature ili malo ispod nje, za armirane uzorke [11].

Parametarska analiza, izvršena u radu [26], ukazala je na to da povećanje mehaničkog procenta armiranja čelikom sa 0.013% na 0.032% smanjuje doprinos ojačanja sa 98% na 26%, u odnosu na kontrolnu gredu.

U radu [46] ispitivan je doprinos spoljašnjeg ojačanja nosivosti elementa, a u funkciji procenta armiranja. U slučaju niskog procenta armiranja čelikom (1%) to povećanje je iznosilo od 26 do 50%, dok je u slučaju visokog procenta armiranja (1.5%) to povećanje iznosilo od 17 do 33%.

3.4.7.2. Uticaj procenta armiranja FRP materijala

Utvrđeno je da na povećanje nosivosti utiču: površinska zastupljenost kompozita, procenat armiranja, kao i veza postignuta između FRP ojačanja i betona. Porast procenta armiranja kompozitom rezultira smanjenjem deformacije veze CFRP-beton [11].

Ispitivan je odnos između površine poprečnog presjeka kompozita i površine armature radi utvrđivanja uticaja tog parametra na povećanje nosivosti i na mehanizam loma [6]. Jako armirani presjeci doživljavaju manje ugibe, ali je doprinos graničnoj nosivosti od FRP ojačanja manji. U ovom slučaju lom nastaje usljed drobljenja pritisnutog betona, koje je praćeno pojavom smičućih prslina između čelične armature i FRP ojačanja. Gubitak nosivosti kod slabo armiranih greda će se desiti kao rezultat odvajanja FRP ojačanja.

3.4.8. Prisustvo prslina

Prisustvo prslina ima značajan uticaj na čvrstoću veze između betona i FRP materijala. Ta čvrstoća opada i za 25% ukoliko su na mjestu ojačanja registrovane prsline. Čvrstoća betona na zatezanje utiče na brzinu pucanja i širenje prslina, što uzrokuje početak razdvajanja na mjestu ojačanja.

Odnos s/l_e je dobar indikator uticaja prslina u elementu, gdje s predstavlja rastojanje između prslina, a l_e efektivnu dužinu veze [7]. Ako je $s/l_e < 2$, prisustvo većeg broja prslina pojačava razdvajanje i to 50-60% u odnosu na slučaj sa jednom prslinom. Ovo se dešava kod elemenata čija je visina poprečnog presjeka manja od 50 cm. Ako je $s/l_e > 4$, prisustvo većeg broja prslina ne utiče na vrijednost granične deformacije, zato što je rastojanje između prslina suviše veliko, pa se ponašanje elementa može predvidjeti modelirajući samo jednu prslinu. Ovaj slučaj je prisutan kod elemenata visine veće od 1-1.5 m, opterećenih na savijanje (mostovski nosači).

3.4.9. Fleksibilno lijepljenje

Kod veze FRP-beton, koja je ostvarena sistemom fleksibilnog lijepljenja, potrebna je znatno veća dužina sidrenja da bi se u potpunosti ostvarila nosivost veze. Uz dovoljno dugo ankerovanje, ovaj sistem vezivanja postiže bolju nosivost na izvlačenje (čupanje).

Ojačanje ostvareno normalnim ili fleksibilnim lijepljenjem pokazuje značajne razlike u ponašanju ostvarene veze. Sistem fleksibilnog lijepljenja ima nižu krutost veze, ali može da ublaži lokalnu koncentraciju napona i podnese veliko međupovršinsko proklizavanje. Na taj način se može značajno poboljšati granična nosivost ojačanih greda u odnosu na normalno lijepljenje, te na još efikasniji način iskoristiti visoka vrijednost čvrstoće FRP materijala, koja je inače jedna od njegovih bitnih prednosti.

Mehanizam loma kod ovako ojačanih greda se mijenja od odvajanja FRP trake do odlamanja zaštitnog sloja betona. Ovaj tip loma je uglavnom izazvan tečenjem čelične amature, a rjeđe koncentracijom napona na kontaktnim površinama FRP-beton. Znači da sistem ojačanja fleksibilnim lijepkom izaziva duktilan lom. Takođe, ovaj sistem ima jednaku, pa čak i bolju otpornost na zamor od sistema sa normalnim lijepkom. Međutim, sve prednosti ovog sistema mogu biti poništene upotrebom velike količine FRP

materijala, kao i kod kraćih raspona opterećenih na smicanje. Zaključujemo da je primjena ojačanja upotrebom fleksibilnog lijepka naročito poželjna kod vitkih armirano-betonskih elemenata velikih raspona. Ovako spregnut sistem na efikasan način postiže visoke čvrstoće FRP materijala i opstaje kao cjelina sve do loma, koji je duktilan.

U radu [45] ostvaren je porast granične nosivosti od 29% (sistem sa jednom trakom) i 36% (sistem sa dvije trake) za uzorke sa fleksibilnim lijepljenjem, u odnosu na obične lijepkove. Maksimalne deformacije u CFRP trakama su porasle skoro duplo ukoliko se umjesto jedne trake koriste dvije. Međutim, porast nosivosti je zanemarljiv kada postavimo tri trake (8%), čak je dobijena granična nosivost u ovom slučaju manja nego u sistemu sa dvije trake.

Mehanizam loma T-greda ojačanih sa CFRP trakama, pri čemu je veza ostvarena fleksibilnim lijepljenjem, manifestovao se kroz drobljenje pritisnutog betona, nakon tečenja armature [45]. Nije došlo do odvajanja CFRP ojačanja, iako je njegova maksimalna deformacija dostigla 80% od granične deformacije za CFRP. Grede su održale svoj integritet, sve do drobljenja betona, nakon čega je, iz sigurnosnih razloga, ispitivanje prekinuto. Korišćenje sistema fleksibilnog lijepljenja rezultiralo je povećanjem granične nosivosti u iznosu od 14.6%.

3.4.10. Krutost FRP ojačanja

Aksijalna krutost sistema FRP-lijepak ima značajnu ulogu u savijanju ojačanih betonskih greda. Što je sistem fleksibilniji to je veća strukturna čvrstoća sistema. Eksperimentalno je potvrđeno da su kruta ojačanja (trake, lamele) više sklona lomu usljed odvajanja, nego fleksibilna [7].

Međuprostorna krutost ima veliku ulogu u prenosu napona, nivou pada opterećenja nakon početka odvajanja, kao i na cjelokupnu duktilnost pri lomu. Međutim, povećanje krutosti CFRP ojačanja dovodi do povećanja granične nosivosti ojačanog elementa samo do određenog nivoa, nakon čega ona opada [43]. Visoka krutost FRP ojačanja donje strane grede je i glavni razlog nastanka smičućeg loma (duž vlakana). Ova visoka krutost povećava smicanje između betona i FRP trake. Analizom ponašanja greda ojačanih FRP materijalom niske krutosti uočeno je da odvajanje FRP ojačanja i drobljenje betona nastaju skoro istovremeno [36].

3.4.11. Vrsta opterećenja

Ojačane armirano-betonske grede se bolje ponašaju pod ravnomjernim opterećenjem nego pod koncentrisanim, jer ono ne izaziva diskontinuitet u sili ploče duž raspona. Taj diskontinuitet je odgovoran za odvajanje FRP trake u središnjem rasponu, a pri koncentrisanom opterećenju [40]. Međutim, u slučaju kraćih traka za ojačanje, mehanizam loma je sličan u oba slučaja opterećenja – odvajanje trake na krajevima. Kada se za ojačanja armirano-betonskih greda koriste duže trake, njihov lom se dešava zbog iskorišćenja nosivosti trake i njenog pucanja.

3.5. Dimenzionisanje na savijanje presjeka ojačanih FRP materijalom

3.5.1. Dimenzionisanje prema Pravilniku ACI 440.2R-08

Ovaj metod uzima u obzir krutost FRP materijala, karakteristike vezujućeg materijala, čvrstoću betona i ispucalost elementa, pa tako daje dobru procjenu čvrstoće elementa pri lomu usljed savijanja, eksperimentalno potvrđenu. Da bi koncept bio na strani sigurnosti potrebno je izvršiti proračun za svaki karakterističan slučaj, uzimajući u obzir tip sistema za ojačanje (FRP + vezivo + betonska površina), kao i najkritičniju kombinaciju opterećenja.

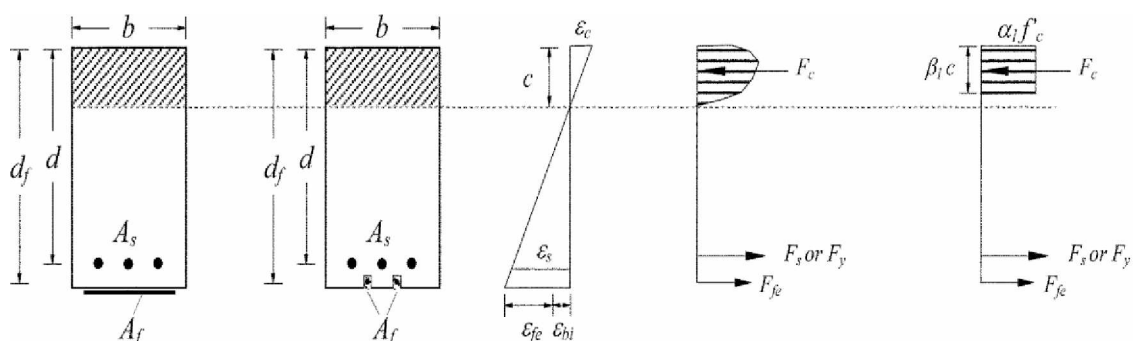
Pri određivanju dimenzija FRP trake/lamele, potrebno je poznavati dimenzije grede koju treba ojačati, količinu zategnute i pritisnute armature, kao i kvalitet upotrijebljenog materijala. Takođe treba poznavati raspoložive dimenzije i mehaničke karakteristike trake i lijepka (epoksidna smola), kao i ostale podatke od proizvođača. Debljina sloja lijepka se u ovome dijelu proračuna zanemaruje. Proračun je sproveden za pravougoni poprečni presjek, ali se može proširiti i na grede T ili I-presjeka.

Pretpostavke:

- Deformacije u čeliku i betonu su direktno proporcionalne rastojanju od neutralne ose. To znači da ravni presjeci ostaju ravni i nakon opterećenja (Bernoullijeva hipoteza).
- Ne postoji klizanje između FRP ojačanja i betona.

- Smičuća deformacija u sloju lijepka je zanemarljiva zbog male debljine lijepka.
- Maksimalna deformacija u pritisnutom betonu iznosi 3‰.
- Čvrstoća betona na zatezanje je zanemarljiva.
- Radni dijagram FRP materijala je linearan do loma.

Važno je naglasiti da mnoge od ovih pretpostavki ne odražavaju stvarno ponašanje materijala, mada su neke usvojene zbog pojednostavljenja proračuna. Tako će se, na primjer, javiti smičuća deformacija u sloju lijepka, koja će izazvati navedeno klizanje. Međutim, pojednostavljenja kod navedenih pretpostavki u ovom slučaju neće značajno uticati na tačnost proračuna.



Slika 3.8 Dijagram raspodjele deformacija i napona u pravougaonom presjeku u graničnom stanju nosivosti na savijanje [47]

Postupak proračuna

Proračun kojim se dolazi do graničnog stanja nosivosti (GSN) treba da zadovolji kompatibilnost deformacija i ravnotežu sila i da se odnosi na dominantni mehanizam loma.

Predstavljena je iterativna procedura poznata pod nazivom proba-greška:

- Pretpostavi se rastojanje od pritisnute ivice do neutralne ose c ;
- Sračuna se deformacija u svim materijalima, koristeći svojstvo kompatibilnosti;
- Sračunaju se odgovarajući naponi u upotrijebljenim materijalima;
- Izvrši se provjera da li je zadovoljena ravnoteža sila;
- Ako rezultante unutrašnjih sila nijesu u ravnotežnom stanju, treba promijeniti položaj neutralne ose, pa postupak ponoviti.

Karakteristike materijala, date od strane proizvođača, uglavnom ne uzimaju u obzir dugotrajnu izloženost uticajima spoljašnje sredine. Ti uticaji mogu znatno redukovati graničnu čvrstoću na zatezanje, pa su uvedeni u izraze kroz redukциони faktor usljed dejstva spoljašnjih uticaja - C_E (tabela 3.1).

Tabela 3.1 Vrijednosti redukcionog faktora C_E za različite vrste materijala [47]

Uslovi izloženosti	Tip ojačanja	Redukcioni faktor usljed dejstva spoljašnjih uticaja, C_E :
Unutrašnja upotreba	karbonski	0.95
	stakleni	0.75
	aramidni	0.85
Spoljašnja upotreba (mostovi, pristaništa, otvorene garaže)	karbonski	0.85
	stakleni	0.65
	aramidni	0.75
Agresivna sredina (hemijska postrojenja i sistemi otpadnih voda)	karbonski	0.85
	stakleni	0.50
	aramidni	0.70

Pri proračunu ojačanog armirano-betonskog presjeka na savijanje, treba se pridržavati sljedećeg algoritma:

1. Određivanje karakteristika upotrijebljenog FRP materijala

Granična čvrstoća na zatezanje dobija se iz sljedećeg izraza: $f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^*$

Analogno bi trebalo redukovati i deformaciju pri lomu: $\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^*$

S obzirom da se FRP materijal ponaša elastično do loma, modul elastičnosti materijala možemo odrediti iz Hukovog zakona. On ne podliježe uticaju okolne sredine, kao što se vidi iz sljedećeg izraza:

$$E_f = f_{fu} / \varepsilon_{fu}$$

2. Određivanje površine potrebnog FRP ojačanja

Površina potrebnog FRP ojačanja izračunava se po formuli:

$$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f$$

gdje je:

n - broj FRP slojeva; t_f - debljina FRP sloja; w_f - širina FRP sloja

3. Utvrđivanje stvarnog stanja deformacija

Proračun se vrši uz pretpostavku da je greda napukla, i da jedino stalno opterećenje djeluje u vrijeme ojačavanja.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL} \cdot (d_f - k \cdot d)}{I_{cr} \cdot E_c}$$

gdje su:

M_{DL} - moment od stalnog opterećenja;

d_f - efektivno rastojanje FRP ojačanja;

I_{cr} - moment inercije betonskog presjeka sa prslinom;

E_c - modul elastičnosti betona;

k - odnos položaja neutralne ose i položaja armature, mjereno od najopterećenijeg pritisnutog vlakna;

d - rastojanje od najopterećenijeg pritisnutog vlakna do težišta zategnute armature.

4. Utvrđivanje deformacije FRP sistema

Pravilnik ACI 440.2R-08 je usvojio model za odvajanje FRP ojačanja, koji je sličan modelu predloženom u radu [48]. Model ograničava efektivnu deformaciju u FRP lameli, u cilju izbjegavanja prslina na mjestu veze, koje bi dovele do loma usljed odvajanja lamele.

Granična vrijednost efektivne deformacije u FRP lameli data je izrazom:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \cdot \varepsilon_{fu}$$

gdje je:

ε_{fd} - deformacija pri odvajanju FRP ojačanja;

ε_{fu} - deformacija pri lomu FRP ojačanja;

f'_c - propisana pritisna čvrstoća betona;

E_f - modul elastičnosti FRP ojačanja.

5. Procjena položaja neutralne ose c

Usvaja se realna vrijednost za c :

$$c = 0,2 \cdot d$$

Konačna vrijednost se usvaja nakon provjere ravnoteže unutrašnjih sila.

6. Određivanje efektivnog nivoa deformacija u FRP ojačanju

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

Ukoliko je ova nejednakost zadovoljena, doći će do loma po betonu. U suprotnom bi došlo do loma po FRP traci.

7. Određivanje deformacija u čeličnoj armaturi

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

8. Određivanje nivoa napona u čeliku i u FRP ojačanju

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}$$

9. Određivanje rezultante unutrašnjih sila i provjera ravnoteže sila:

Ravnoteža sila se potvrđuje provjerom pretpostavljene veličine c :

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot b}$$

Koeficijenti α_1 i β_1 se računaju na osnovu paraboličnog dijela radnog dijagrama betona:

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon_c' \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c'^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c'^2} \quad \beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon_c' - 2 \cdot \varepsilon_c}$$

gdje je ε_c' deformacija koja odgovara naponu f_c' :

$$\varepsilon_c' = \frac{1.7 \cdot f_c'}{E_c}$$

10. Korekcija veličine c kroz iteracije, dok ravnoteža sila ne bude zadovoljena

Koraci 6-9 se ponavljaju nekoliko puta sa različitim vrijednostima c , dok ravnoteža sila ne bude zadovoljena.

11. Određivanje čvrstoće na savijanje komponenti sistema za ojačanje

Doprinos čelika čvrstoći na savijanje:

$$M_{ns} = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$$

Doprinos FRP ojačanja čvrstoći na savijanje:

$$M_{nf} = A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$$

12. Određivanje čvrstoće na savijanje ojačanog presjeka

Projektna čvrstoća na savijanje, koja predstavlja nominalnu čvrstoću elementa pomnoženu sa koeficijentom redukcije čvrstoće, treba biti veća od potrebnog momenta, pomnoženog sa koeficijentima sigurnosti [49]:

$$\phi \cdot M_n \geq M_u$$

gdje je:

$$\phi = \begin{cases} 0.9 & \text{za } \varepsilon_t \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25 \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{za } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \\ 0.65 & \text{za } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

Koeficijent redukcije ima vrijednost 0.9 kod duktilnih presjeka i 0.65 kod krutih presjeka, gdje ne dolazi do tečenja čelične armature. Između ova dva ekstrema postoji linearni prelaz.

Vrijednost nominalne čvrstoće na savijanje elementa sa spoljnim FRP ojačanjem:

$$M_n = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$$

Imajući u vidu tačku 11, dobijamo traženu čvrstoću na savijanje ojačanog presjeka:

$$\phi \cdot M_n = \phi \cdot (M_{ns} + \psi_f \cdot M_{nf})$$

Preporučena vrijednost dodatnog redukcionog faktora za FRP iznosi $\psi_f = 0.85$.

13. Provjera nivoa napona u čeliku

Sračunati napone u čeliku i provjeriti da li su u granicama dozvoljenih:

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{k \cdot d}{3} \right) \right] \cdot (d - k \cdot d) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot \left(d - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d - k \cdot d) + A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d_f - k \cdot d)}$$

$$f_{s,s} \leq 0.8 \cdot f_y$$

14. Provjera nivoa napona u FRP ojačanju

$$f_{f,s} = f_{s,s} \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \cdot \left(\frac{d_f - k \cdot d}{d - k \cdot d} \right) - \varepsilon_{bi} \cdot E_f$$

Na osnovu ovog izraza dobija se nivo napona u FRP ojačanju, pod određenim opterećenjem, a u okviru elastičnog ponašanja elementa.

Pretpostaviti da je totalno korisno opterećenje nepromjenljivo. Zatim ovaj napon uporediti sa dopuštenim naponom usljed tečenja i cikličnog opterećenja (tabela 3.2).

Tabela 3.2 Vrijednosti dopuštenih napona za različite tipove ojačanja [47]

Vrsta opterećenja	Tip ojačanja		
	GFRP	AFRP	CFRP
Dugotrajno + ciklično	$0.20 f_{f,u}$	$0.30 f_{f,u}$	$0.55 f_{f,u}$

15. Proračun potrebnih U-profila za ojačanje podužnih lamela

Ovaj proračun je dat u radu [3], a predstavlja pojednostavljenje proračuna iz aktuelnog Pravilnika [47].

Na osnovu svega do sada navedenog, jasno je da FRP trake U-profila mogu značajno redukovati potrebnu dužinu lamele na zategnutoj strani presjeka.

Početna dužina podužne FRP lamele definisana je formulom:

$$l_{dp} = \frac{f_{pu} \cdot t_p \cdot b_p}{k \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w}$$

gdje je:

f_{pu} - čvrstoća na zatezanje lamele,

t_p - debljina lamele,

b_p - širina lamele,

k - faktor čvrstoće veze,

f'_c - pritisna čvrstoća betona i

b_w - širina rebra grede.

Usvaja se $k = 0.17$, pa veličina $0.17 \cdot \sqrt{f'_c}$ predstavlja prosječni napon u vezi.

Pretpostavlja se da određivanje dužine lamele prati isti zakon kao i određivanje dužine čelične armature. To znači da dužina lamele treba biti $l_{dp} + l'$ od mjesta gdje je potrebna njena puna snaga, odnosno l' od mjesta u kom nije potrebno osiguranje od savijanja.

$$l' = \max \begin{cases} h \\ l/16 \end{cases}$$

gdje je: h ukupna visina grede, a l raspon grede.

Ukoliko je $l_{dp}/l_p < 1$, poprečna ukrućenja nijesu potrebna; ukoliko je $l_{dp}/l_p > 1$, poprečna ukrućenja su potrebna na dužini l_p , gdje je l_p dužina lamele.

3.5.2. Dimenzionisanje prema Pravilniku CEB-FIP 2001

Dimenzionisanje se zasniva na konceptu sigurnosti u odnosu na granična stanja. Dimenzionisanje prema graničnim stanjima (GS) podrazumijeva:

- Provjeru graničnog stanja upotrebljivosti (GSU);
- Provjeru graničnog stanja nosivosti (GSN);
- Utvrđivanje iznenadnih (slučajnih) situacija - udar, požar, vandalizam i zemljotres.

3.5.2.1. Postupak proračuna armirano-betonskog elementa ojačanog spoljašnjim FRP ojačanjem

- Za element prije ojačanja odrediti računске momente (za GSN i GSU);
- Iz momenta upotrebljivosti M_o prije ojačanja odrediti početnu deformaciju ϵ_o krajnjeg zategnutog betonskog vlakna;
- Pretpostaviti da je ostvareno potpuno dejstvo ojačanja, pa iz računskog momenta nakon ojačanja sračunati traženi poprečni presjek kompozita, koji će zadovoljiti GSN. Dokazati da je postignuta potrebna duktilnost;
- Sračunati ugibe u GSU. Ukoliko su maksimalni ugibi prekoračeni, odrediti odgovarajuću površinu FRP ojačanja koja će zadovoljiti propisane vrijednosti;

- Sračunati napone u betonu, čeliku i FRP materijalu, za GSU. Ukoliko su dozvoljeni naponi prekoračeni, odrediti odgovarajući FRP poprečni presjek koji će zadovoljiti propisane vrijednosti;
- Dokazati da je veza ostvarena ojačanjem dovoljna za kontrolu širine prslina u GSU. Ukoliko je neophodno, povećati širinu FRP ojačanja, ili, ukoliko je već usvojena maksimalna vrijednost, onda povećati debljinu FRP ojačanja;
- Sračunati zaostalu smičuću silu koja izaziva smičiću pukotinu, a time i otkazivanje veze FRP-beton, prema GSN. Ukoliko je ovaj mehanizam loma dominantan, sračunati nove dimenzije FRP ojačanja;
- Provjeriti da li dolazi do loma usljed odvajanja ojačanja, bilo da je u pitanju odvajanje na krajevima ili duž same trake. Ukoliko dođe do tog tipa loma, sprovesti postupak ankerovanja;
- Provjeriti adheziju FRP ojačanja i betona na kraju ankerovanja;
- Utvrditi moguće iznenadne situacije;
- Provjeriti otpornost na smicanje ojačanog elementa. Obezbijediti ojačanje protiv smicanja, ukoliko je potrebno.

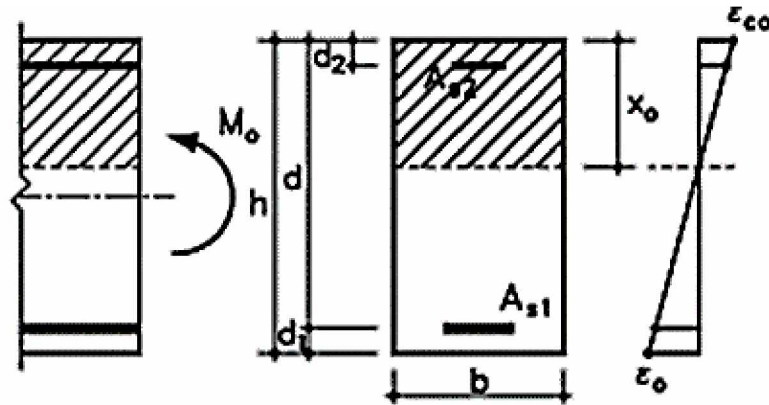
3.5.2.2. Proračun prema graničnom stanju upotrebljivosti (GSU)

Proračun se sprovodi linearno-elastičnom analizom. Za stanje eksploatacije (nakon izvršene sanacije) zahtijeva se ograničenje napona u betonu, čeliku i karbonskim trakama:

$$\begin{aligned}\sigma_c &\leq 0.45 \cdot f_{ck} && \text{za kvazi stalno opterećenje;} \\ \sigma_c &\leq 0.6 \cdot f_{ck} && \text{za rijetke kombinacije opterećenja;} \\ \sigma_s &\leq 0.8 \cdot f_{yk} && \text{za rijetke kombinacije opterećenja;} \\ \sigma_f &\leq \eta \cdot f_{fk} && \text{za kvazi stalno opterećenje } (\eta=0.8 \text{ za CFRP, } \eta=0.5 \text{ za AFRP, } \eta=0.3 \text{ za GFRP}).\end{aligned}$$

Stanje prije ojačavanja

Proračun početne deformacije u presjeku neposredno prije ojačanja zasniva se na teoriji elastičnosti. Ako na kritični betonski presjek u trenutku njegovog ojačavanja djeluje korisni moment M_o bez koeficijenata sigurnosti, moguće je sračunati odgovarajuće deformacije u presjeku.



Slika 3.9 Presjek prije ojačanja - raspodjela dilatacija

S obzirom da je $M_0 \geq M_{cr}$, gdje je M_{cr} momenat pri pojavi prve prsline, proračun se zasniva na proračunu presjeka sa prslinom.

Položaj neutralne linije presjeka sa prslinom ($M_0 \geq M_{cr}$):

$$\frac{1}{2} \cdot b x_0^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_0 - d_2) = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_0)$$

gdje je $\alpha_s = E_s / E_c$.

Dilatacija pritisnute ivice betona je:

$$\varepsilon_{c0} = \frac{M_0 \cdot x_0}{E_c \cdot I_{c0}}$$

Za $M_0 \geq M_{cr} \Rightarrow I_{c0} = I_{02}$ pa je momenat inercije preseka sa prslinom:

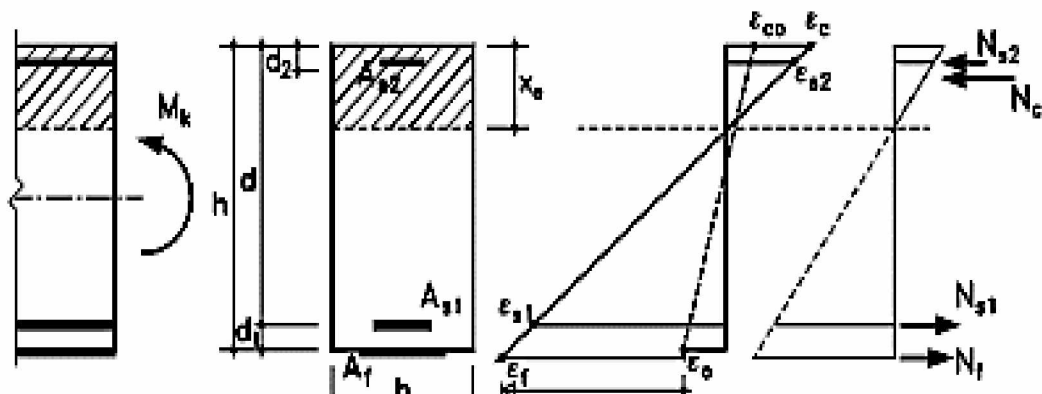
$$I_{02} = \frac{b x_0^3}{3} + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_0 - d_2)^2 + \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_0)^2$$

Na osnovu principa kompatibilnosti deformacija, deformacija u najzategnutijem vlaknu u betonu jednaka je početnoj aksijalnoj deformaciji na mjestu predviđenom za ojačanje:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0} \cdot \frac{h - x_0}{x_0}$$

Ukoliko je $M_0 < M_{cr}$, tada njegov uticaj na proračun ojačanog elementa može biti zanemaren.

Stanje nakon ojačavanja



Slika 3.10 Presjek sa prslinom - dilatacije i unutrašnje sile

Položaj neutralne linije (težišna linija aktivnog preseka):

$$\frac{1}{2} \cdot b x_e^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_e - d_2) = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_e) + \alpha_f \cdot A_f \cdot \left[h - \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) \cdot x_e \right]$$

gdje je: $\alpha_f = E_f / E_c$

Napon u betonu na pritisnutoj ivici preseka:

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2} \cdot b x_e \cdot \left(h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot \frac{(x_e - d_2)}{x_e} \cdot (h - d_2) - \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot \frac{(d - x_e)}{x_e} \cdot (h - d)}$$

Sa uprošćenjima $A_{s2} \approx 0$ i $h/d \approx 1.1$, slijedi:

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_e \cdot \left(1.05d - \frac{x_e}{3} \right)}; \quad \text{odnosno:} \quad \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \approx \frac{M_0}{M_k} \cdot \frac{x_e}{x_0},$$

pa je napon u armaturi: $\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_c \cdot \frac{d - x_e}{x_e} \leq 0.8 \cdot f_{yk}$,

i napon u FRP ojačanju: $\sigma_f = E_f \cdot \left(\varepsilon_c \cdot \frac{h - x_e}{x_e} - \varepsilon_0 \right) \leq \eta \cdot f_{fk}$.

Proračun ugiba u GSU, korišćenjem pojednostavljene CEB bilinearne metode, daje zadovoljavajuću tačnost.

Srednji ugib se računa iz izraza:

$$a = a_1 (1 - \zeta_b) + a_2 \zeta_b$$

gdje su a_1 i a_2 ugibi presjeka bez prsline i sa prslinom, respektivno, a ζ_b koeficijent preraspodjele:

$$\zeta_b = 0, \quad \text{za } M_k < M_{cr}$$
$$\zeta_b = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_k}\right)^{n/2}, \quad \text{za } M_k > M_{cr},$$

gdje je:

β_1 - koeficijent kojim se uzima u obzir vrsta armature,

β_2 - koeficijent kojim se uzima u obzir vrsta opterećenja.

Primjenom teorije elastičnosti, a uzevši u obzir momenat koji djeluje na presjek prije ojačavanja – M_o , dobijamo:

$$a_1 = k_M l^2 \frac{M_k}{E_c I_1}$$
$$a_2 = k_M l^2 \left(\frac{M_o}{E_c I_{o2}} + \frac{M_k - M_o}{E_c I_2} \right), \quad M_k > M_o$$

gdje su:

$E_c I_1$ - krutost pri savijanju za presjek bez prsline,

$E_c I_2$ - krutost pri savijanju za presjek sa prslinama,

k_M - koeficijent koji zavisi od vrste opterećenja,

I_{o2} - moment inercije presjeka sa prslinama, prije ojačavanja.

3.5.2.3. Proračun prema graničnom stanju nosivosti (GSN)

Ojačani armirano-betonski element mora dostići granično stanje loma na duktilan način, dakle, bez loma po betonu, loma po CFRP i bez loma na vezi. Da bi se obezbijedio takav lom, definisana su određena ograničenja:

- ograničenje visine pritiskute zone betona
 $x/d \leq 0.45$, za beton kvaliteta C35/45 i nižeg;
 $x/d \leq 0.35$, za beton višeg kvaliteta od C35/45.

- ograničenje dilatacije pri lomu vlakana FRP
 $\varepsilon_{fu,c} \geq 5\text{‰}$, za beton kvaliteta C35/45 i nižeg;
 $\varepsilon_{fu,c} \geq 7\text{‰}$, za beton višeg kvaliteta od C35/45.

U zavisnosti od sadejstva betona i FRP ojačanja, razlikuju se dva tipa loma.

1) Lom usljed punog sadejstva između betona i FRP ojačanja

Kada postoji puno sadejstvo betona i FRP vlakana lom nastaje kao simultani ili kao lom zatezanjem (zajedno čelik i vlakna ili pojedinačan lom) ili lom po pritisnutom betonu.

Tečenje čelika, praćeno lomom betona - Kao što je ranije naglašeno, ovaj vid loma je najpoželjniji. Dolazi do simultanog loma betona i zategnute armature, bez kidanja FRP ojačanja. Elementi proračuna dati su na slici 3.11.

Položaj neutralne ose x računa se na osnovu kompatibilnosti deformacija i ravnoteže unutrašnjih sila:

$$0.85 \cdot \psi \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x + A_{S2} \cdot E_S \cdot \varepsilon_{S2} = A_{S1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_f$$

gdje je $\psi = 0.8$.

Pri tome vrijednost $E_S \cdot \varepsilon_{S2}$ ne smije prekoračiti vrijednost f_{yd} .

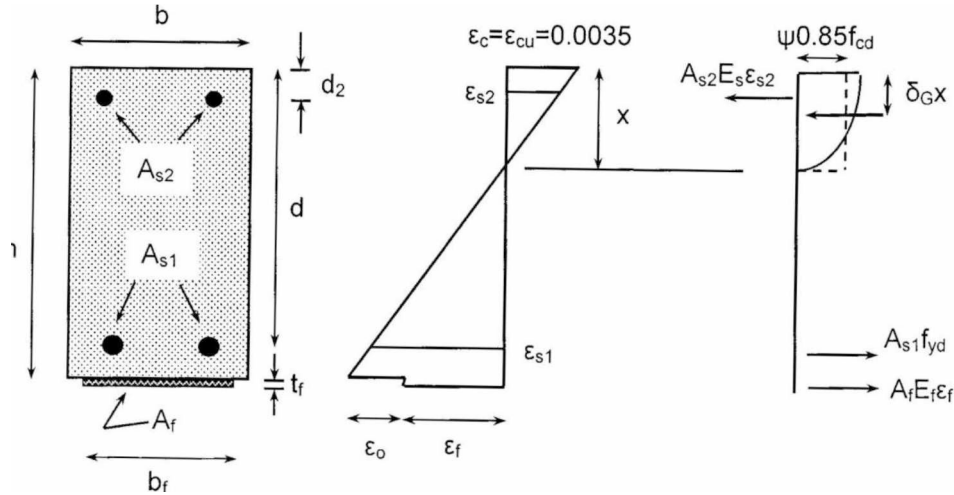
Dilatacija u zategnutoj armaturi: $\varepsilon_{S2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$

Dilatacija u FRP ojačanju: $\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0$

Proračunski granični moment nosivosti ojačanog presjeka:

$$M_{Rd} = A_{S1} \cdot f_{yd} \cdot (d - \delta_G x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \delta_G x) + A_{S2} \cdot E_S \cdot \varepsilon_{S2} \cdot (\delta_G x - d_2)$$

gdje je $\delta_G = 0.4$.



Slika 3.11 Analiza GSN presjeka pri savijanju – dijagram dilatacija i napona

Da bi gornji izrazi bili validni, potrebno je provjeriti tačnost sljedećih pretpostavki:

- Došlo je do tečenja zategnute čelične armature;
- Deformacije u FRP materijalu su ograničene graničnom deformacijom, ε_{fud} .

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d-x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}; \quad \varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud}$$

Tečenje čelika, praćeno lomom FRP ojačanja - Ova vrsta loma je teoretski moguća, mada je veća vjerovatnoća da će prije doći do odvajanja nego do loma FRP ojačanja.

Prethodni izrazi važe i u ovom slučaju, ali sa izmijenjenim oznakama. Zamijeniti ε_{cu} sa

ε_c , ε_f sa ε_{fud} , a za ψ i δ_G važe izrazi:

$$\psi = \begin{cases} 1000 \cdot \varepsilon_c \cdot \left(0.5 - \frac{1000}{12} \cdot \varepsilon_c\right), & \varepsilon_c \leq 0.002 \\ 1 - \frac{2}{3000 \cdot \varepsilon_c}, & 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases}$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000 \cdot \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - 1000 \cdot \varepsilon_c)}, & \varepsilon_c \leq 0.002 \\ \frac{1000 \cdot \varepsilon_c \cdot (3000 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2000 \cdot \varepsilon_c \cdot (3000 \cdot \varepsilon_c - 2)}, & 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases}$$

2) Lom usljed gubitka sadejstva između betona i FRP ojačanja

Kada ne postoji sadejstvo betona i vlakana, lom nastaje gubitkom veze na većoj dužini elementa (*peeling-off*) i to:

- na samoj vezi betona i FRP ojačanja (ali najčešće kroz beton);
- kao posledica pojave prslina od savijanja ili od smicanja;
- kao posledica neravne površine betona (valovitost površine izaziva skretne sile na vezi betona i FRP ojačanja).

Odvajanje trake izazvano smičućim prslinama - Ovaj tip loma još uvijek nije u potpunosti objašnjen. Njegova tumačenja se zasnivaju na određenim eksperimentalnim istraživanjima [50], a oslanja se na Evrokod 2 [51]. Smatra se da se ovaj tip loma može izbjeći određenim modifikacijama u pogledu smičuće čvrstoće betona i odgovarajućeg koeficijenta armiranja podužnom armaturom:

$$\tau_{Rk} = 0.15 \cdot f_{ck}^{1/3} \quad \rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \cdot \frac{E_f}{E_s}}{bd}$$

U slučaju pada nosivosti na smicanje ispod zahtijevanog nivoa, potrebno je izvršiti ojačanje na smicanje.

Odvajanje trake na krajevima ojačanja i na mjestima prslina usljed savijanja

Postoji više pristupa koji se bave ovim tipom odvajanja:

- Provjera krajeva ojačanja, ograničenje deformacija u FRP traci

Ovaj postupak uključuje dva nezavisna koraka: Prvo se vrši provjera smičućih napona na krajevima ojačanja, a zatim je potrebno ograničiti veličinu deformacije u FRP traci, kako bi se izazvao lom što dalje od ojačanja. Ovaj postupak je, zbog svoje jednostavnosti, često primjenjivan u nacrtima mnogih pravilnika. On, međutim, predstavlja grubo uprošćavanje stvarnog ponašanja, s obzirom da deformacija FRP trake nije konstanta, već zavisi od velikog broja parametara, kao što su odnos moment-smicanje, deformacija čelične armature, kao i propagacija prslina.

- Provjera krajeva ojačanja i prenosa sile duž kontakta FRP-beton

Ovaj pristup [52], kao i prvi, predlaže dva nezavisna koraka koja treba preduzeti. Prvo se vrši provjera krajeva ojačanja na proklizavanje usljed smicanja na kontaktnoj površini

FRP-beton. Zatim se provjerava da li je smičući napon duž cijele kontaktne površine manji od kritičnog (smičuće čvrstoće betona). Ovaj pristup se pokazao jednostavan i primjenljiv u praksi.

- Odvajanje krajeva trake usljed smicanja

Primijenjen je koncept fiktivnog raspona smicanja [53] kako bi se sračunala otpornost na smicanje ojačanih greda. Ovaj koncept predstavlja pojednostavljen inženjerski pristup razmatranog problema.

- Odvajanje izazvano neravnomjernošću betonske podloge

Ovaj problem nije ispitan u dovoljnoj mjeri. Eksperimentalni dokazi upućuju na potrebu usvajanja određenih pravila praktičnog izvođenja, kao i ograničenja hrapavosti betonske površine, čime bi se izbjegao ovaj tip odvajanja.

3.6. Ponašanje ojačanih armirano-betonskih greda opterećenih na savijanje u toku vremena

3.6.1. Deformacije betona u toku vremena

3.6.1.1. Uvod u reologiju betona

Reologija je nauka koja se bavi ponašanjem materijala tokom vremena. Ona proučava veze između napona i deformacija materijala u funkciji od vremena. Višestruko korisna u praktičnoj primjeni, naročito kod izučavanja materijala složenijih sastava i svojstava i omogućava bolje razumijevanje interakcije pojedinih komponenti materijala [54].

Jedan od bitnih zadataka reologije je da opiše vremenske deformacije materijala pomoću odgovarajućih matematičkih modela sa što manjim brojem promjenljivih. Najznačajniji korak u rješavanju tog zadatka predstavlja pronalaženje analitičkih veza između komponenata tenzora deformacija i komponenata tenzora napona. Svrha je potpuno praktične prirode, što znači da se dobijene veze koriste u donošenju zaključaka o ponašanju materijala i konstrukcija tokom vremena. Reologija se u prvom redu oslanja na rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava pojedinih materijala s jedne strane, a na postavke i rezultate teorijske mehanike kontinuuma s druge strane [55].

3.6.1.2. Skupljanje i tečenje betona

Pod deformacijama betona zavisnim od vremena podrazumijevaju se skupljanje i tečenje betona. Karakteristično za ove deformacije je to da se odigravaju veoma sporo, što znači da se radi o dugotrajnim deformacijama, pa i eksperimentalno ispitivanje traje dugo.

Proračun ukupnih vremenskih deformacija opterećenog betona, primjenom postojećih metoda proračuna, zasniva se na zasebnom proračunu deformacija skupljanja i deformacija tečenja, pri čemu njihov zbir predstavlja ukupnu vremensku deformaciju. Ovaj pristup je, za praktičnu primjenu, dovoljno tačan i prihvatljiv. Međutim, treba imati u vidu činjenicu da su tečenje i skupljanje betona međusobno zavisne veličine, tj. prisustvo skupljanja utiče na promjenu deformacije tečenja. Tačna vrijednost deformacije tečenja se može odrediti oduzimanjem deformacija skupljanja neopterećenog betona od poznatih ukupnih deformacija opterećenog betona, pod istim klimatskim uslovima.

Skupljanje betona je deformacija smanjenja zapremine betona u funkciji vremena, nezavisna od spoljnog opterećenja, a nastaje usljed složenog procesa hidratacije i kristalizacije cementa. Ova deformacija se, u konstantnim uslovima okolne sredine, u toku vremena, monotono povećava i asimptotski približava konačnoj vrijednosti skupljanja. Sam proces skupljanja je u početku intenzivniji, a kasnije sve sporiji.

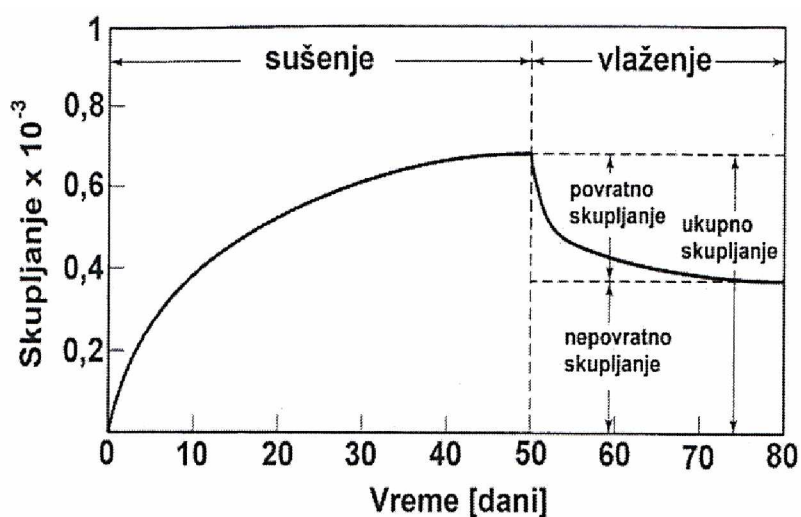
Ukupna deformacija skupljanja sastoji se od:

- skupljanja usljed kontrakcije produkata hidratacije (hidrataciono skupljanje);
- skupljanja usljed isparavanja vode u periodu vezivanja cementa - plastično skupljanje;
- skupljanja usljed isparavanja vode u periodu očvršćavanja cementne paste, odnosno nakon završetka procesa vezivanja (hidrauličko skupljanje).

Plastično skupljanje je, u odnosu na ostale vrste skupljanja, najveće, ali se dešava u vrijeme kada je betonska masa još uvijek u određenoj mjeri fluidna. Ova deformacija se odvija vrlo brzo, u prvih nekoliko časova i, pošto se odigrava u okviru mase svježeg betona, nije od značaja u odnosu na naponska stanja konstrukcije.

Hidraulično skupljanje se odvija sve dok se ne uspostavi ravnoteža između vlažnosti sredine i vlažnosti betona, što će se desiti tek nakon završetka procesa hidratacije.

Prilikom razmatranja hidrauličkog skupljanja cementne paste, pa prema tome i betona, treba imati u vidu činjenicu da je dio ukupnog skupljanja nepovratan (ireverzibilan). To je skupljanje koje je inače najveće, a nastaje prilikom prvog sušenja. U realnim uslovima, usljed promjene vlažnosti sredine u kojoj se nalazi, beton može biti izložen naizmjeničnom sušenju i vlaženju. Tipično ponašanje betona prilikom sušenja i kvašenja prikazano je na slici 3.12. Generalno posmatrano, ukupno skupljanje je proces koji se u početku odvija relativno brzo da bi se kasnije, u veoma dugom vremenskom periodu, deformacije smanjivale i asimptotski težile nekoj konačnoj vrijednosti. Skupljanje se nikakvim mjerama ne može eliminisati, ali se može znatno ublažiti kvašenjem sve dok beton ne postigne min 70% predviđene marke betona, a najmanje u toku prvih 7 do 10 dana. Stoga se može zaključiti da je njega mladog betona veoma važna preventiva za nastanak ranog skupljanja.



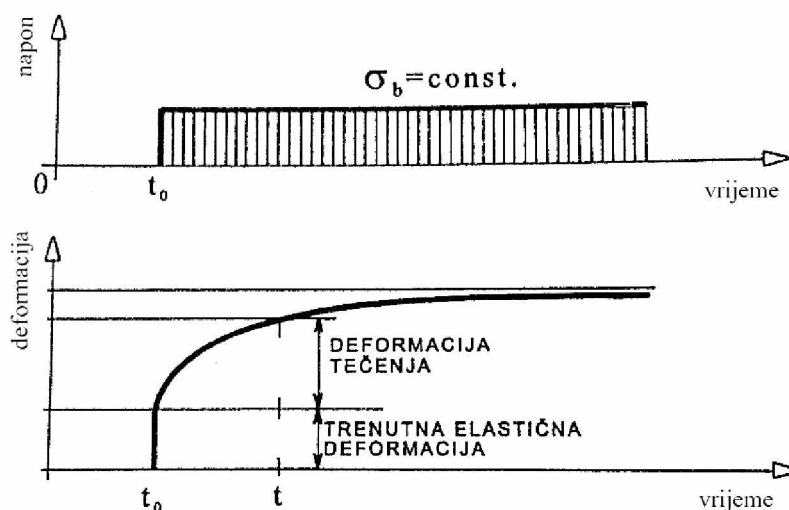
Slika 3.12 Tipično ponašanje betona tokom očvršćavanja

Treba naglasiti da kod klasičnog armiranog betona skupljanje nema naročiti značaj, jer se armatura suprotstavlja skraćenju betona, dok daleko veći značaj ima kod prednapregnutog betona.

Pod terminom **tečenje betona** podrazumijeva se pojava postepenog porasta elastičnih deformacija betona koje nastaju u trenutku opterećenja, pod daljim djelovanjem konstantnog dugotrajnog opterećenja u toku vremena. Razlikujemo dvije komponente tečenja opterećenog betona:

- osnovno tečenje, koje se javlja bez uticaja razmjene vlažnosti sa okolnom sredinom (uravnoteženo stanje vlažnosti);
- tečenje prouzrokovano procesom sušenja betona.

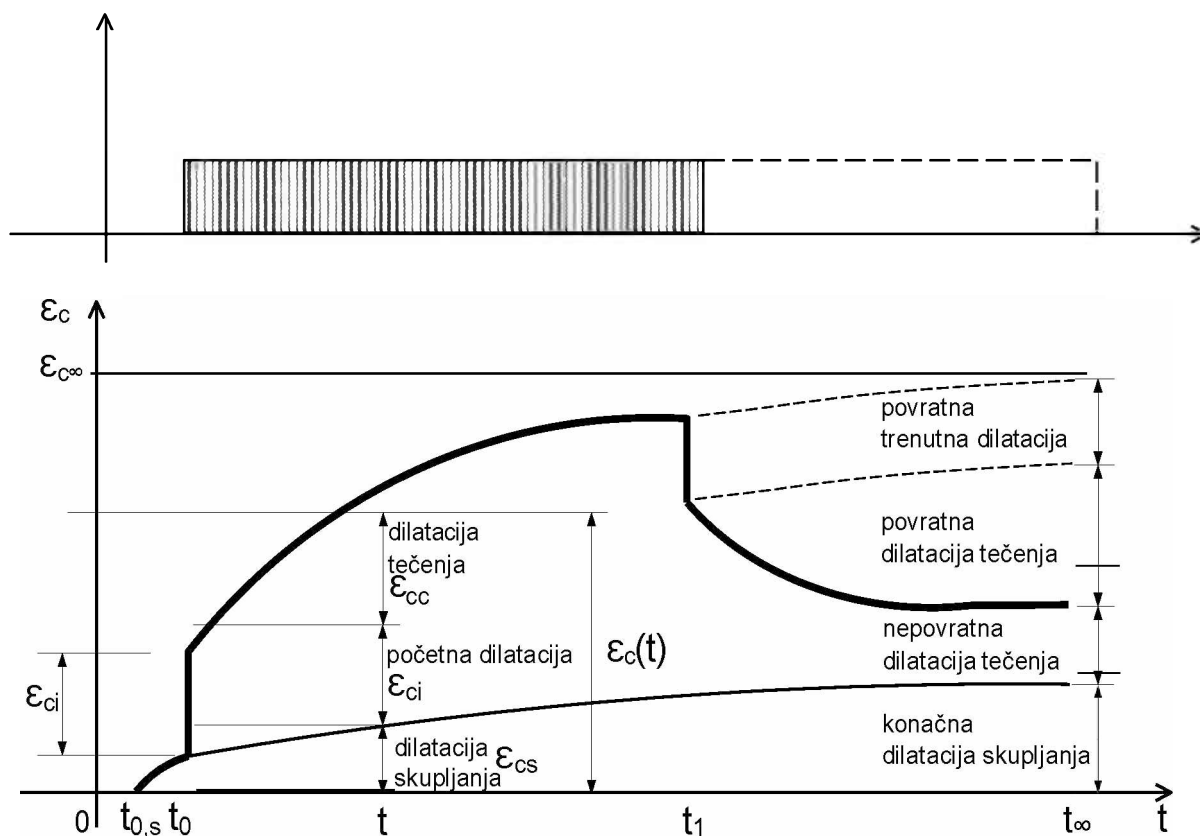
Konačne deformacije tečenja mogu dostići vrijednosti i nekoliko puta veće od trenutnih. I tečenje betona se, kao i skupljanje, u početku odvija brzo, a tokom vremena brzina deformacije se značajno smanjuje i na kraju asimptotski teži konačnoj vrijednosti (sl. 3.13).



Slika 3.13 Tečenje betona pri konstantnom opterećenju

Na slici 3.14 prikazane su vremenske deformacije betonskog elementa, koji je prvih t_s dana održavan u vlažnom stanju, a zatim je, u trenutku vremena t_0 , izložen dejstvu opterećenja. Kao što je već rečeno, u tom trenutku se javlja trenutna, elastična deformacija. Ona u toku vremena opada, mada se veoma često, iz praktičnih razloga, njena promjena u toku vremena, pri dejstvu konstantnog opterećenja, zanemaruje. Samim tim bi deformaciju tečenja, koja se javlja za vrijeme dejstva tog opterećenja, trebalo sračunati kao dodatnu deformaciju na elastičnu deformaciju u posmatranom trenutku t , a ne na elastičnu deformaciju u trenutku opterećenja t_0 . Isprekidana linija na slici predstavlja dalji tok dilatacija, za slučaj da nema rasterećenja, tj. da konstantan napon djeluje u beskonačno dugom vremenskom intervalu. Međutim, ukoliko se, nakon perioda djelovanja opterećenja, koji je trajao od trenutka t_0 do t_1 , uzorak rastereti, biće registrovana trenutna elastična povratna deformacija. Njena vrijednost je manja od trenutne elastične deformacije zbog većeg modula elastičnosti koji beton ima pri većoj starosti.

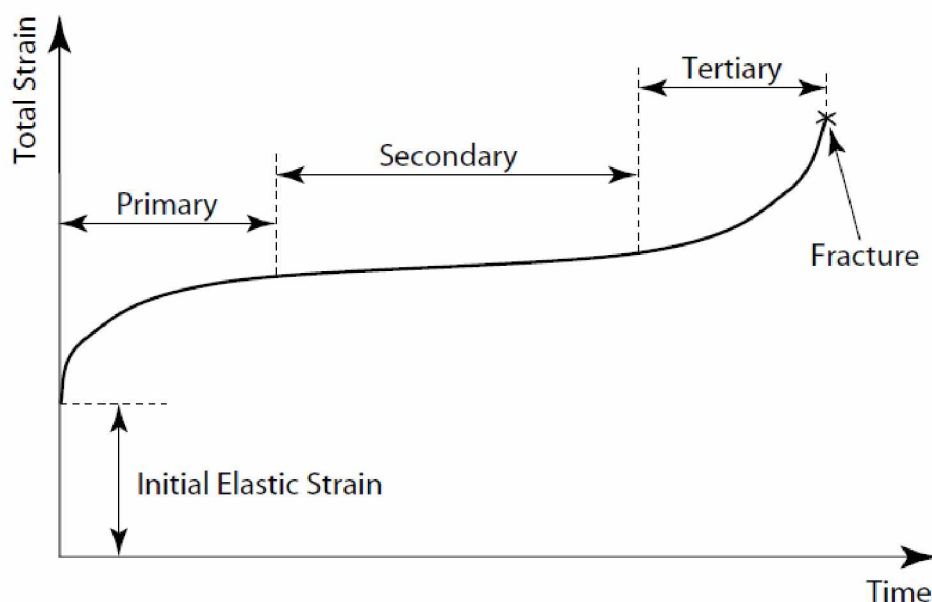
Trenutna povratna deformacija je praćena i vremenski zavisnom povratnom deformacijom, koja se naziva povratna deformacija tečenja, a koja asimptotski teži nekoj konačnoj vrijednosti. Jedan dio deformacije tečenja ostaje nepovratan, i naziva se još zaostala, plastična ili ireverzibilna deformacija tečenja. Dakle, tečenje betona se sa starošću znatno smanjuje, ali i veoma stari betoni to svojstvo zadržavaju, zbog čega se beton i opisuje kao viskoelastoplastičan materijal sa izraženom osobinom starenja [56].



Slika 3.14 Prikaz ukupnih deformacija pod konstantnim naponom

Na slici 3.15 prikazana je vremensko-deformacijska kriva za materijal koji je izložen konstantnom dugotrajnom opterećenju.

Deformacija koja se javlja u trenutku nanošenja opterećenja je primarno elastična, ali može da sadrži i neelastičnu komponentu. Nakon toga se mogu javiti tri nivoa tečenja.



Slika 3.15 Kriva tečenja materijala za nivoe napona iznad eksploatacionih [51]

Prvi nivo je primarno tečenje gdje materijal u toku kratkog vremenskog perioda doživljava brzi prirast deformacije. Kada taj prirast u funkciji vremena opadne na neku minimalnu vrijednost, znači da se materijal nalazi u zoni sekundarnog tečenja (tzv. stalno tečenje) i označava zonu nepromjenljivog tečenja tj. brzina deformacije postaje praktično konstantna. Obično se sekundarno tečenje aproksimira pravom linijom i predstavlja zonu kada se konstrukcija nalazi u upotrebi. Poslednji nivo, tercijarno tečenje javlja se u slučaju izloženosti izuzetno visokim nivoima napona (većim od 40-45% čvrstoće). Tada deformacije tečenja teže beskonačno velikim vrijednostima, koje se vrlo često završavaju lomom materijala. Ovaj nivo tečenja može i ne mora da postoji, zavisno od toga da li ima ili nema prirasta napona i kojeg su nivoa ti naponi. Za radne nivoe napona (40-45% čvrstoće) može se javiti značajno sekundarno tečenje, a tercijarno tečenje gotovo da ne postoji. Vremensko-deformacijska kriva za taj slučaj definiše se kao postepeno povećanje deformacija u funkciji vremena pod stalnim naponima.

Iz priloženog se zaključuje da deformacija tečenja zavisi od starosti, pa se samim tim i koeficijent tečenja mijenja slično promjeni deformacije tečenja, tj. u funkciji je od vremena i nezavistan je od nanešenog opterećenja. Poznavanje koeficijenta tečenja omogućava brzo određivanje deformacije tečenja u proizvoljnom trenutku vremena t .

3.6.1.3. Faktori koji utiču na deformacije betona u toku vremena

Vremenski tok i konačne vrijednosti deformacija skupljanja i tečenja zavise od niza faktora od kojih su najznačajniji nivo opterećenja i vremenski interval u kojem se ove deformacije posmatraju. Na deformacije betona u toku vremena takođe utiču i količina i vrsta cementa i vodocementni faktor, granulometrijski sastav, način ugrađivanja i dužina trajanja njegovanja betona, relativna vlažnost i temperatura okolne sredine, kao i oblik i dimenzije poprečnog presjeka betonskog elementa.

- Posebno značajan uticaj na konačne vrijednosti deformacije skupljanja i tečenja betona imaju uslovi spoljašnje sredine, a naročito relativna vlažnost i temperatura. Beton koji se u procesu starenja suši, ima veći prirast vremenskih deformacija u odnosu na beton koji je bio izložen veoma vlažnoj sredini [57]. Samim tim, deformacija tečenja može biti dva do tri puta veća u slučaju izloženosti betona relativnoj vlažnosti od 50%, nego u slučaju kada je relativna vlažnost 100%. Povećanje tečenja kod betona koji se suši koja predstavlja deformaciju tečenja tokom očvršćavanja.
- Pored relativne vlažnosti bitan uticaj na deformacije skupljanja i tečenja betona ima i temperatura. Ukoliko ona varira dolazi do povećanja tečenja, bez obzira da li se radi o zagrijavanju ili hlađenju. Eksperimentalnim istraživanjima utvrđeno je da pri povećanim temperaturama deformacije tečenja dostižu veće nivoe nego pri nižim temperaturama. Ovo je, prije svega, posljedica gubitka vode iz betona pri višim temperaturama.
- Oblik i dimenzije betonskog elementa imaju veliki uticaj na ukupnu deformaciju skupljanja i tečenja betona. Kod većih dimenzija elemenata, deformacije skupljanja i tečenja su manje jer se isparavanje vode iz betona odigrava sporo, i vrlo često ne u potpunosti.
- Betoni koji koriste cement sa dodacima, kao i cemente sa finijim mlivom, imaju veće vrijednosti vremenskih deformacija. U slučaju korišćenja većih količina cementa, takođe se povećavaju skupljanje i tečenje betona.
- Pri većim vodocementnim faktorima dobijaju se betoni manje kompaktnosti, što posebno utiče na povećanje skupljanja nakon procesa završetka vezivanja cementa.

- Takođe, pravilno i efikasno ugrađivanje utiče na smanjenje brzine prirasta deformacija mladog betona, čime se obezbijuje dobra kompaktnost betona, a samim tim i smanjenje konačnih vrijednosti deformacija skupljanja i tečenja betona.
- Pogodan granulometrijski sastav agregata omogućava izradu betona optimalne kompaktnosti, uz korišćenje umjerenih količina cementa. Takav beton će imati smanjene vrijednosti vremenskih deformacija.
- Njegovanje betona, koje podrazumijeva vlaženje betona u prvim danima nakon ugrađivanja, ima poseban uticaj na skupljanje betona. Na ovaj način beton se u toku očvršćavanja konstantno nalazi u vlažnoj sredini, čime se odlaže pojava skupljanja za vrijeme kada će mu mehaničke karakteristike biti značajno veće. Dakle, pojava napona zatezanja usljed skupljanja odlaže se za kasniji period, kada će beton ostvariti dovoljan prirast čvrstoće na zatezanje i bez pojave prslina prihvatiti naprezanja nastala usljed procesa neravnomjernog skupljanja.
- Pored gore navedenih parametara, od kojih zavise i skupljanje i tečenje betona, za krajnju vrijednost i vremenski tok deformacije tečenja naročito je bitna starost betona u vrijeme kada je prvi put opterećen, kao i trajanje i intezitet opterećenja.

3.6.1.4. Deformacije betona u toku vremena prema Pravilniku Evrokod 2

Za definisanje ponašanja betona potrebno je poznavati njegove vremenski zavisne deformacije - skupljanje i tečenje. Ove uticaje treba uzeti u obzir samo kada su od značaja, na primjer u proračunu graničnih stanja ravnoteže-stabilnosti, kada su značajni uticaji drugog reda. U ostalim slučajevima o uticajima skupljanja i tečenja u graničnom stanju nosivosti ne mora se voditi računa, pod uslovom da su duktilnost i kapacitet rotacije elemenata dovoljni.

Skupljanje betona

Ukupna dilatacija skupljanja ε_{cs} sastoji se od dvije komponente:

- dilatacije skupljanja tokom očvršćavanja ε_{cd} i
- sopstvene dilatacije skupljanja ε_{ca}

tj. važi izraz: $\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$

Dilatacija skupljanja tokom očvršćavanja ε_{cd} odigrava se sporo, s obzirom da zavisi od protoka vode kroz očvrslu beton. Njena konačna vrijednost iznosi:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$$

gdje je:

$\varepsilon_{cd,0}$ - nespriječeno skupljanje tokom očvršćavanja;

k_h - koeficijent koji zavisi od nominalne dimenzije poprečnog presjeka h_0 .

Promjena dilatacije skupljanja u toku vremena tokom očvršćavanja data je izrazom:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$$

gdje je:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{1 - t_s + 0.04 \sqrt{h_0^3}}$$

gdje t_s predstavlja starost betona na početku skupljanja tokom očvršćavanja (u danima).

Sopstvena dilatacija skupljanja ε_{ca} javlja se u toku očvršćavanja betona i njen najveći dio se odigrava prvih dana nakon betoniranja. Ona je linearna funkcija čvrstoće betona i od naročitog značaja je kada se novi beton ugrađuje na kontaktu sa očvrslim betonom.

Dobija se iz izraza:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty)$$

gdje je:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp[-0.2 \cdot t^{0.5}]$$

gdje je t izraženo u danima.

Iz prethodnog se može zaključiti da se dio deformacije skupljanja javlja i u toku njegovanja betona i zavisi od čvrstoće betona pri pritisku.

Konačne vrijednosti dilatacije skupljanja prema Pravilniku Evrokod 2 su neznatno veće od onih dobijenih prema Pravilniku BAB 87. Ukupna dilatacija, u proizvoljnom trenutku

vremena t , za beton koji je izložen konstantnom dugotrajnom opterećenju σ_c od trenutka t_0 i koji je prestao da se njeguje u trenutku t_s , može se izračunati pomoću izraza:

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_{el}(t, t_0) + \varepsilon_{cc}(t, t_0) + \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca}(t)$$

gdje je:

$\varepsilon(t, t_0)$ - ukupna dilatacija u betonu u trenutku vremena t ,

$\varepsilon_{el}(t, t_0)$ - trenutna elastična dilatacija,

$\varepsilon_{cc}(t, t_0)$ - dilatacija tečenja u intervalu vremena $(t-t_0)$,

$\varepsilon_{cd}(t, t_s)$ - dilatacija skupljanja tokom očvršćavanja u intervalu vremena $(t-t_s)$,

$\varepsilon_{ca}(t)$ - sopstvena dilatacija skupljanja u trenutku vremena t ,

ili:

$$\varepsilon(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} + \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} \cdot \varphi(t, t_0) + \varepsilon_{cd}(t, t_s) + \varepsilon_{ca}(t)$$

Tečenje betona

Konačna vrijednost dilatacije tečenja betona $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ u vremenu $t = \infty$, pri konstantnom naponu pritiska σ_c , kojem je beton izložen u starosti t_0 , data je izrazom:

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c}$$

Mjeru tečenja predstavlja koeficijent tečenja $\varphi(t, t_0)$, koji je funkcija tangentskog modula elastičnosti betona E_c :

$$E_c = 1.05 \cdot E_{cm}$$

gdje je E_{cm} sekantni modul elastičnosti betona starosti 28 dana i definiše se prema izrazu:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0.3}$$

gdje je f_{cm} srednja vrijednost čvrstoće betona starosti 28 dana:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)}$$

gdje je f_{ck} karakteristična čvrstoća betona pri pritisku betonskog cilindra dimenzija 15/30 cm pri starosti betona od 28 dana.

Vrijednosti modula elastičnosti u gornjoj jednačini važe za slučaj betona sa kvarcnim agregatom. Za agregate od krečnjaka te vrijednosti treba smanjiti za 10%, a za agregate od pješčara za 30%. Za bazaltne agregate date vrijednosti treba povećati za 20%.

Vrijednost modula elastičnosti u proizvoljnom trenutku vremena t , izračunava se po izrazu:

$$E_{cm}(t) = \left[\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right]^{0.3} \cdot E_{cm}$$

gdje je $f_{cm}(t)$ srednja vrijednost čvrstoće betona u proizvoljnom trenutku vremena t i može biti određena iz srednje čvrstoće betona poslije 28 dana f_{cm} :

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm},$$

pri čemu je:

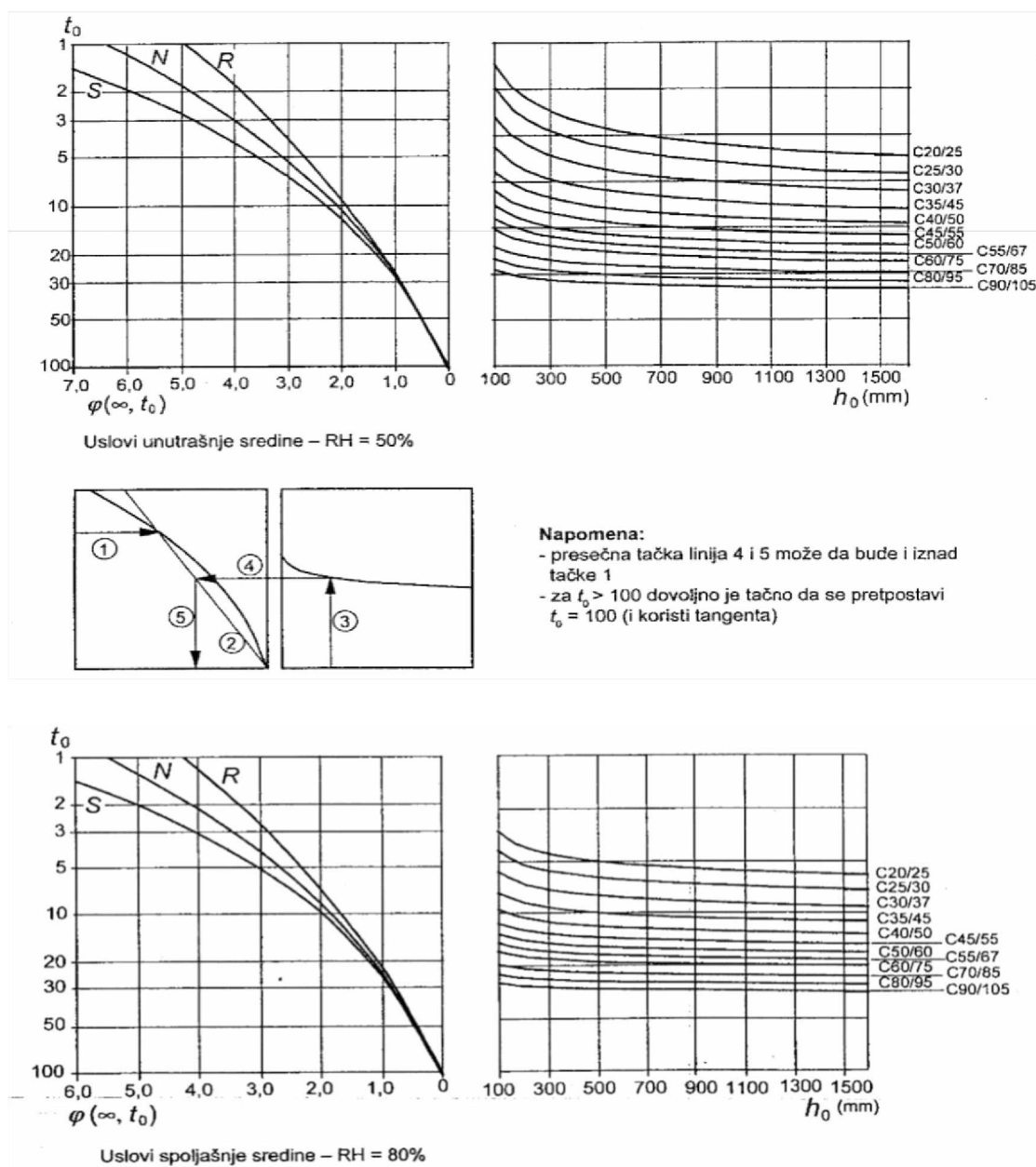
$$\beta_{cc}(t) = \exp \left[s \cdot \left(1 - \sqrt{28/t} \right) \right]$$

gdje je s u funkciji od vrste cementa: $\begin{cases} 0.2 - \text{za klasu R} \\ 0.25 - \text{za klasu N} \\ 0.38 - \text{za klasu S} \end{cases}$

Kada se ne zahtijeva velika tačnost, može se smatrati da koeficijent tečenja odgovara vrijednostima sa slike 3.16, pod uslovom da beton u trenutku opterećenja, u starosti t_0 , nije izložen naponu pritiska većem od $0.45 f_{ck}(t_0)$, koji praktično odgovaraju najvećim naponima pri eksploatacionim opterećenjima.

Konačne vrijednosti koeficijenta tečenja prema Pravilniku Evrokod 2 su manje od vrijednosti prema Pravilniku BAB 87.

Vrijednosti date na ovoj slici važe za temperature sredine između -40°C i $+40^{\circ}\text{C}$ i za srednju relativnu vlažnost vazduha $\text{RH} = 40\text{-}100\%$.



Slika 3.16 Određivanje koeficijenta tečenja za beton u normalnim uslovima sredine

U slučaju kada se zahtijeva precizniji proračun, koeficijent tečenja se može sračunati prema izrazu:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0)$$

gdje je φ_0 nominalna vrijednost koeficijenta tečenja, koja se određuje iz izraza:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

gdje je φ_{RH} koeficijent kojim se uzima u obzir uticaj relativne vlažnosti na nominalnu vrijednost koeficijenta tečenja:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \sqrt[3]{h_0}}; \quad \text{za } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \sqrt[3]{h_0}} \alpha_1 \right] \alpha_2; \quad \text{za } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

Korišćene su sljedeće oznake:

RH - relativna vlažnost sredine

α_1 i α_2 - koeficijenti kojima se uzima u obzir uticaj čvrstoće betona:

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.7} \quad \alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.2}$$

$h_0 = 2A_c/u$ - nominalna dimenzija poprečnog presjeka (srednja debljina presjeka)

A_c - površina poprečnog presjeka betona;

u - obim dijela presjeka koji je izložen sušenju;

$\beta(f_{cm})$ - koeficijent kojim se uzima u obzir uticaj relativne čvrstoće betona na nominalnu vrijednost koeficijenta tečenja:

$$\beta(f_{cm}) = 16,8 / \sqrt{f_{cm}}$$

$\beta(t_0)$ - koeficijent kojim se uzima u obzir uticaj starosti betona u trenutku opterećenja na nominalnu vrijednost koeficijenta tečenja:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}} \quad (*)$$

$\beta_c(t, t_0)$ - koeficijent kojim se definiše dijagram tečenja u zavisnosti od vremena nakon opterećenja:

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0.3}$$

gdje je:

$(t - t_0)$ - stvarno vrijeme trajanja opterećenja;

β_H - koeficijent koji zavisi od relativne vlažnosti i nominalne veličine elementa:

$$\beta_H = 1.5 \cdot [1 + (0.012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \leq 1500; \quad \text{za } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$$

$$\beta_H = 1.5 \cdot [1 + (0.012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500; \quad \text{za } f_{cm} > 35 \text{ MPa}$$

gdje je α_3 koeficijent kojim se uzima u obzir uticaj čvrstoće betona: $\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0.5}$

Uticaj vrste cementa na koeficijent tečenja betona može da se uzme u obzir modifikovanjem starosti u trenutku opterećenja t_0 u izrazu (*):

$$t_0 = t_{0,T} \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0.5$$

gdje je $t_{0,T}$ - starost betona u trenutku opterećenja, korigovana zbog uticaja temperature;

$$\alpha - \text{stepen koji zavisi od vrste cementa:} \quad \alpha = \begin{cases} -1 & \text{za cement klase S} \\ 0 & \text{za cement klase N} \\ 1 & \text{za cement klase R} \end{cases}$$

Kada je napon pritiska u betonu u starosti t_0 , veći od $0.45 f_{ck}(t_0)$, potrebno je uzeti u obzir nelinearnost tečenja. Tako veliki naponi mogu nastati, na primjer, pri prethodnom zatezanju u prefabrikovanim betonskim elementima, na nivou kablova za prethodno naprežanje. Tada se koeficijent $\varphi(t, t_0)$ zamjenjuje odgovarajućim nominalnim nelinearnim koeficijentom tečenja:

$$\varphi_k(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \exp[1.5 \cdot (k_\sigma - 0.45)]$$

gdje je:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_c}{f_{ck}(t_0)}; \quad \sigma_c - \text{napon pritiska};$$

$f_{ck}(t_0)$ - karakteristična vrijednost čvrstoće betona pri pritisku u trenutku opterećenja.

3.6.1.5. Deformacije FRP materijala u toku vremena prema Pravilniku CEB-FIP Bulletin 2007

FRP materijal se, kao kompozitni materijal, značajno razlikuje od čelika u pogledu dugotrajnih karakteristika, pa je veoma važno razumjeti to ponašanje i nova saznanja primjeniti pri projektovanju betonskih elemenata ojačanih FRP materijalom.

Ovaj materijal se, kao što je poznato, sastoji od matrice (vezivne smole) i vlakana. U slučaju izloženosti dejstvu dugotrajnog opterećenja može doživjeti iznenađan lom, i to nakon dostizanja granice izdržljivosti. Ovaj fenomen, poznat kao lom usljed tečenja, odnosi se na sve strukturne materijale. On zavisi od vrste vlakana. Najmanju podložnost lomu usljed tečenja pokazuju karbonska vlakna, aramidna su umjereno osjetljiva, a staklena najosjetljivija. Stoga, orijentacija vlakana, kao i njihov zapreminski udio imaju značajan uticaj na ponašanje FRP materijala prilikom tečenja.

Poznato je da većina materijala doživljava početak tečenja kada su izloženi značajnim opterećenjima, i to pri temperaturama koje prelaze 40% njihove temperature topljenja [58].

Početna elastična deformacija kompozita dobija se pomoću izraza:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E_{fl}V_f + E_m(1-V_f)}$$

gdje su:

E_{fl} i E_m - modul elastičnosti vlakana u podužnom pravcu i modul elastičnosti matrice;

V_f - učešće vlakana po zapremini u kompozitnom materijalu.

Pri pojavi tečenja u matrici, aplicirani napon se progresivno prenosi na vlakna, sve dok ona ne prime cjelokupan napon. U tom trenutku deformacija vlakana, a samim tim i kompozitnog materijala, može biti određena na sljedeći način:

$$\varepsilon_{\infty} = \frac{\sigma}{E_{fl}}$$

Ova vrijednost dostiže se asimptotski, s obzirom da nivo tečenja u matrici opada kako se ona oslobađa napona, a ravnotežno stanje se samim tim nikad ne dostiže.

Koeficijent tečenja može se odrediti linearizacijom krive tečenja usljed napona upravno na vlakna u dijagram čije su ose deformacija i logaritam vremena ($\varepsilon - \log t$). Prikazani na ovaj način, mnogi polimerni materijali pokazuju skoro linearnu zavisnost.

Ukupna deformacija se može prikazati sljedećim izrazom:

$$\varepsilon(t) = \beta \cdot \log t + \varepsilon_0$$

gdje je β koeficijent tečenja: $\beta = \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$

Neka eksperimentalna istraživanja ukazuju na nepostojanje loma usljed tečenja ukoliko je dugotrajno opterećenje ograničeno na 60% čvrstoće pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja [59]. Postoji značajan broj radova na ovu temu, ali se jako mali broj odnosi na ispitivanja duža od 100 časova [60].

Takođe trajnost ovih ojačanja nije do sada dovoljno ispitana, pa čak teži da bude i kompleksnija od korozije čelika, zato što na degradaciju materijala utiču komponente kompozitnog materijala.

3.6.2. Deformacije armirano-betonskih greda ojačanih FRP materijalom u toku vremena

Pravilnik ACI 318-05 prepoznaje značaj i početne i deformacije tečenja, ali ne uzima u obzir nivo dugotrajnog opterećenja, zato što smatra da će konstrukcija biti izložena samo radnom nivou napona. Međutim, samo ojačavanje konstrukcije ukazuje na mogućnost nanošenja i većeg opterećenja. Na osnovu navedenog jasno je da ovaj Pravilnik precjenjuje vrijednost dugotrajne deformacije, sračunavajući je na sljedeći način:

$$\Delta_t = \frac{S}{1 + 50\rho'} \cdot \Delta_i$$

gdje je:

ρ' - koeficijent armiranja pritisnutom armaturom: $\rho' = \frac{A'_s}{b \cdot d}$

Δ_i - početna deformacija u trenutku nanošenja dugotrajnog opterećenja;

Δ_t - vremenska deformacija usljed tečenja i skupljanja;

S - vremenski zavistan koeficijent.

$$S = \begin{cases} 2.0 & (5 \text{ i više godina}) \\ 1.4 & (12 \text{ mjeseci}) \\ 1.2 & (6 \text{ mjeseci}) \\ 1.0 & (3 \text{ mjeseca}) \end{cases}$$

Pravilnik ACI 318-05 precjenjuje vrijednosti koeficijenta S , pa je zato u radu [4] dat predlog njegove korekcije:

$$S = \begin{cases} 1.3 & (5 \text{ i više godina}) \\ 1.1 & (18 \text{ mjeseci}) \\ 1.0 & (12 \text{ mjeseci}) \\ 0.8 & (6 \text{ mjeseci}) \\ 0.6 & (3 \text{ mjeseca}) \\ 0.4 & (1 \text{ mjesec}) \end{cases}$$

Preporučene vrijednosti dobijene su ispitivanjem na gredama izloženim visokim nivoima konstantnog opterećenja, u trajanju od 1 godine. Vrijednosti date za period duži od godine, dobijene su ekstrapolacijom eksperimentalnih rezultata.

Deformacija tečenja data je izrazom:

$$\Delta_{cr} = k_r \cdot \varphi_t \cdot \Delta_i; \quad \text{gdje je } k_r = \frac{0.85}{1 + 50\rho'}$$

Usvaja se granična vrijednost koeficijenta tečenja $\varphi_t = 1.6$, za prosječne uslove.

Koeficijent tečenja će se, za period do 5 godina, računati iz izraza: $\varphi_t = \frac{1.6}{2} \cdot S$

Upoređivanjem rezultata eksperimentalnog i teorijskog ispitivanja, dolazi se do zaključka da je ACI model pogodan za procjenu dugotrajnih deformacija betonskih greda opterećenih u granicama radnih napona. Međutim, njegovim odredbama potcjenjuju se deformacije greda izloženih visokim nivoima napona, ukoliko se koristi koeficijent tečenja 1.6.

Provjera nivoa napona u FRP ojačanju

U Pravilniku ACI 440.2R-08 je dat izraz za dobijanje nivoa napona u FRP ojačanju, pod određenim opterećenjem, a u okviru elastičnog ponašanja elementa.

$$f_{f,S} = f_{s,S} \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \cdot \left(\frac{d_f - k \cdot d}{d - k \cdot d} \right) - \varepsilon_{bi} \cdot E_f$$

Postupak provjere nivoa napona je sledeći:

- Pretpostaviti da je totalno korisno opterećenje nepromjenljivo.
- Ovaj napon uporediti sa dopuštenim naponima usljed dugotrajnog i cikličnog opterećenja, koji su bezbjedni za konstrukciju (tabela 3.2).

3.6.3. Analiza prethodnih eksperimentalnih istraživanja

Iako je ponašanje ojačanih betonskih konstrukcija pod kratkotrajnim opterećenjem izazvalo značajno interesovanje u svijetu konstruktora, to nije bio slučaj kada je riječ o dugotrajnim deformacijama. Zato su podaci na tu temu prilično oskudni.

Ranija istraživanja na ispitivanju reoloških svojstava betonskih uzoraka ojačanih kompozitnim materijalom, u uslovima ubrzanog starenja ne daju dobre rezultate u poređenju sa istraživanjima u prirodnim uslovima starenja, pa stoga, pri reološkom modeliranju, nije moguće preuzeti materijalne parametre, kojim se kvantifikuje njihovo naponsko-deformacijsko ponašanje. Pregledom literature je zaključeno da je tečenje usljed prirodnog starenja materijala znatno manje istraženo, vjerovatno usljed neposjedovanja odgovarajućih laboratorija za tu namjenu. U tu svrhu bi bilo neophodno intenzivirati rad na eksperimentalnoj analizi vremenskog ponašanja ovih elemenata, i to u uslovima prirodnog starenja materijala.

Utvrđeno je i da se najveći broj radova na ispitivanju ponašanja ojačanih betonskih greda na dugotrajna opterećenja, odnosi na ispitivanja na modelima, tj. uzorcima umanjenih dimenzija [52], i to najčešće na gredama pravougaonog poprečnog presjeka [15].

U ovom poglavlju izvršena je analiza određenog broja rezultata dosadašnjih naučnih istraživanja iz predmetne oblasti.

- U radu [5] utvrđen je uticaj dugotrajnog opterećenja na nosivost ojačanih greda. Ono izaziva pojavu deformacija tečenja betona u pritisnutoj zoni, kao i deformaciju tečenja u CFRP lameli, i one su plastičnog karaktera nakon rasterećenja. Kada se grede ponovo kratkotrajno opterete, deformacije rastu i to počevši od zaostale deformacije od dugotrajnog opterećenja. To utiče na pad nosivosti tih uzoraka u odnosu na one koji su bili izloženi samo kratkotrajnom opterećenju.

- Eksperimentalno istraživanje sprovedeno nad ispucalim gredama ojačanim CFRP lamelama, dovelo je do saznanja da je porast nosivosti ojačanih greda u odnosu na kontrolnu manji kada se ojačavaju dok su pod dejstvom dugotrajnog ravnomjernog opterećenja nego kada su neopterećene [61].
- Tečenje ojačane betonske grede izaziva značajan porast aksijalne sile u FRP lameli, a takođe i porast smicanja i vertikalnih ivičnih normalnih napona u sloju lijepka. Ovi naponi izazivaju lom usljed odvajanja ojačanja, a njihov porast tokom vremena usljed tečenja je od izuzetnog značaja za projektovanje sistema ojačanja greda. Tečenje u sloju lijepka redukuje te ivične napone u lijepku, a u manjoj mjeri i deformacije i aksijalne sile. Stoga, u nekim slučajevima, viskoelastični lijepak može imati povoljan uticaj na ponašanje ojačanih greda [62].
- U radu [4] ispitano je 26 greda dimenzija 100x150x1800 mm sa i bez CFRP ojačanja, uz varijaciju procenta armiranja, pri čemu su glavni razmatrani parametri bili različite šema ojačanja i različiti nivoi dugotrajnog opterećenja. Nanešeno opterećenje održavano je konstantnim u periodu od 1 godine, a kretalo se u granicama od 59 do 78% graničnog opterećenja neojačane grede. Ovako visoke vrijednosti su primjenjene da bi se utvrdilo maksimalno dugotrajno opterećenje koje može biti nanijeto, a da ne dođe do loma usljed tečenja. Autori su došli do zaključka da, pri navedenom nivou opterećenja, ojačane grede doživljavaju manje dugotrajne deformacije nego neojačane. Takođe je zaključeno i da spoljašnje ojačanje povećava graničnu nosivost grede, smanjuje širinu prslina i redukuje njihovo širenje, ali da nema značajan uticaj na dugotrajne deformacije ojačanih greda.
- Ispitivan je uticaj pritiskute čelične armature i zaključeno je da je ona veoma efikasna u smanjenju dugotrajnih deformacija prostih greda. Njen uticaj je izraženiji kod betona normalne čvrstoće, nego kod betona visoke čvrstoće [63].
- Autori rada [64] razvili su teorijski model ponašanja FRP ojačanih konstrukcija na savijanje, primjenom metode konačnih elemenata. Oni su došli do zaključka, koji je kontradiktoran sa prethodnim eksperimentalnim istraživanjima, a to je da različita debljina lamele nema uticaj na vremensko ponašanje ojačanih konstrukcija.
- Proučavano je vremenski zavisno ponašanje armirano-betonskih konstrukcija, spolja ojačanih FRP lamelama. Zaključeno je da povećanje procenta armiranja FRP materijalom smanjuje kako trenutnu, tako i deformaciju tečenja [65].

3.7. Opšti zaključak o dosadašnjim istraživanjima

Na osnovu brojnih eksperimentalnih istraživanja, sprovedenih u posljednje dvije decenije, došlo se do sljedećih zaključaka:

- Spoljašnje ojačanje armirano-betonskih greda može se uspješno sprovesti upotrebom CFRP traka i lamela.
- Kod primjene lamela dokazano je da, sa povećanjem broja slojeva u lameli, raste i nosivost i krutost.
- Značajna poboljšanja u pogledu nosivosti postignuta su poprečnim ojačanjem krajeva FRP trake, pa se odvajanje ojačanja događalo neposredno pred konačni lom. Utvrđeno je povećanje nosivosti u odnosu na gredu sa podužnim ojačanjem, i to 12-35% kod ojačanja greda pravougaonog presjeka, odnosno 5-50% kod ojačanja T-greda i I-nosača.
- Eksperimentalno je utvrđen pad duktilnosti u gredama ojačanim CFRP lamelama, koji je iznosio i do 70% u odnosu na kontrolnu gredu. Međutim, ovaj nedostatak je umanjen sistemom ankerovanja na krajevima lamela, pomoću traka U-profila. Na taj način se izbjegava odvajanje lamele od betonske podloge.
- U pogledu šeme prslina, rasprostranjenije ali manje prsline uočene su kod ojačanih u odnosu na neojačane grede, a taj efekat je još veći kod ankerovanja sistemom U-traka.

Na mehanizam loma utiču brojni parametri, pa je naročita pažnja posvećena ispitivanju njihovog uticaja. Zaključeno je sljedeće:

- Povećanjem debljine FRP trake za ojačanje, kao i debljine lijepka, povećava se granična nosivost trake.
- Porast granične nosivosti biće izazvan i povećanjem modula elastičnosti kako betona, tako i FRP materijala, dok zanemarljiv uticaj ima povećanje modula elastičnosti lijepka.

Istražujući ponašanje ojačanih konstrukcija u toku vremena, autori su došli do sljedećih zaključaka:

- Spoljašnje ojačanje povećava graničnu nosivost grede, smanjuje širinu prslina i redukuje njihovo širenje. Međutim, ono nema značajan uticaj na tečenje pritisnutog

betona, odnosno na dugotrajne deformacije ojačanih greda pri radnim nivoima napona, ali ima uticaja na konačno tečenje pri višim nivoima napona.

- Povećanje procenta armiranja FRP materijalom smanjuje kako trenutnu, tako i deformaciju tečenja.
- Trenutna deformacija je proporcionalna nivou napona, a dugotrajna je obrnuto proporcionalna čvrstoći betona na pritisak.
- Porast deformacija je intenzivniji u početku opterećivanja i vremenom se redukuje.
- Nivo nanešenog dugotrajnog opterećenja, kao i pritisna čvrstoća betona su glavni faktori koji utiču na nivo tečenja, a samim tim i na dugotrajne deformacije.

4. SOPSTVENO EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

4.1. Uvod

Ovaj rad nastao je kao rezultat eksperimentalnog istraživanja, sprovedenog u cilju utvrđivanja doprinosa FRP materijala povoljnijem ponašanju ojačanih konstrukcija u eksploatacionim uslovima.

Pregledom literature utvrđeno je da su podaci o eksperimentalnom ispitivanju ojačanih uzoraka realnih dimenzija veoma oskudni i da se najveći broj ispitivanja vršio na umanjenim modelima, uglavnom pravougaonog poprečnog presjeka. Ove činjenice su opredijelile pravac sopstvenog istraživanja. U tu svrhu je i izvršeno ojačavanje uzoraka napravljenih prije više od 10 godina. U pitanju su armirano-betonske grede T presjeka, realnih dimenzija, ojačane karbonskim trakama na donjoj, zategnutoj ivici rebra. One su ispitivane na dejstvo koncentrisanog kratkotrajnog i ravnomjernog kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja. Utvrđen je uticaj oba tipa opterećenja kao i različitih dužina ojačanja, kako na mehanizam loma ispitivanih uzoraka, tako i na redukciju njihovih graničnih nosivosti, veličine ugiba, širine prslina i sl. Donešeni zaključci su upoređeni sa istraživanjima drugih autora. Dobijeni su korisni rezultati koji, pored ostalog, mogu dobro poslužiti u savremenoj inženjerskoj praksi.

4.2. Materijali upotrijebljeni u eksperimentu

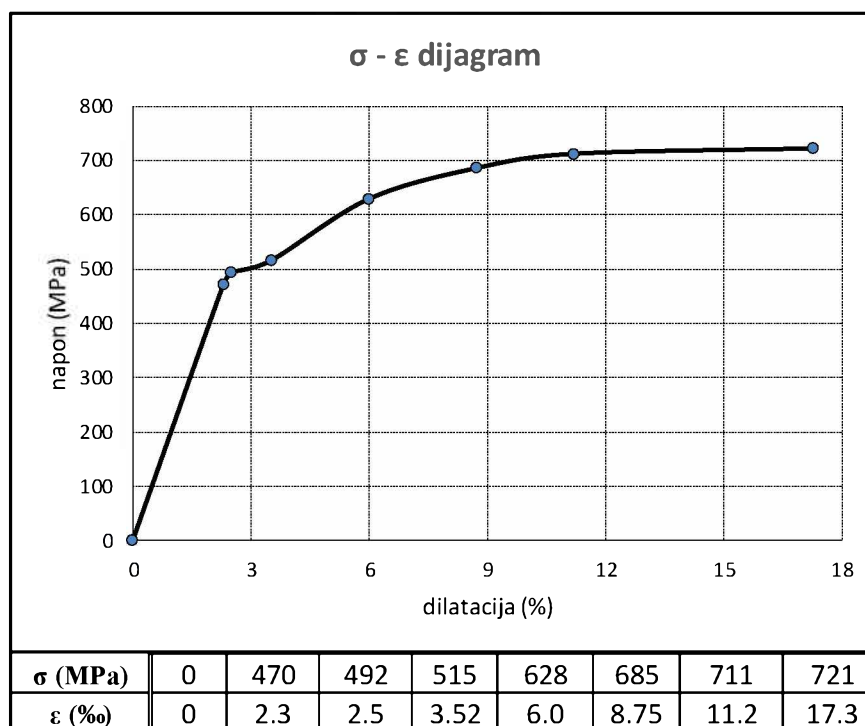
4.2.1. Karakteristike upotrijebljene armature

Za armiranje eksperimentalnih modela u podužnom pravcu korišćena je armatura B500B, a u poprečnom uzengije GA 240/360. Upotrijebljeni betonski čelik je uzet iz Željezare „Nikšić“. U tabeli 4.1. su prikazane osnovne geometrijske i fizičko-mehaničke karakteristike upotrijebljenih profila.

Tabela 4.1 Karakteristike upotrijebljenog betonskog čelika

B500B	ϕ (mm)	E_a (GPa)	σ_v (MPa)	σ_{max} (MPa)	δ_m (%)
	22	205	515	721	17.3
GA 240/360	ϕ (mm)	E_a (GPa)	σ_v (MPa)	σ_{max} (MPa)	δ_m (%)
	6	207	252	383	25.0

Karakteristični radni dijagram ($\sigma_a - \varepsilon_a$) upotrijebljenog betonskog čelika prikazan je na slici 4.1. Ovaj dijagram dobijen je ispitivanjem na statistički mjerodavnom uzorku, uzimajući u obzir probabilistički pristup utvrđivanja fizičko-mehaničkih karakteristika materijala. Veličina statističkog uzorka je $n=15$, za određenu vrstu betonskog čelika.

Slika 4.1 Karakteristični radni dijagram čelika B500B (ϕ 22mm)

4.2.2. Karakteristike upotrijebljene karbonske trake

Geometrijske i mehaničke karakteristike karbonske trake date su u tabeli 4.2.

Tabela 4.2 Karakteristike upotrijebljene karbonske trake

Vrsta materijala	Dimenzije poprečnog presjeka (debljina / širina) (mm)	Dužina trake (m)	Čvrstoća na zatezanje (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)	Sadržaj vlakana (%)
CFRP traka	1.2 / 50	4 ili 6	3300	165	65-70

Građevinska kompanija „Sintek“ iz Skoplja, Republika Sjeverna Makedonija, izvršila je pripremu betonske površine, nabavku traka i njihovo postavljanje.



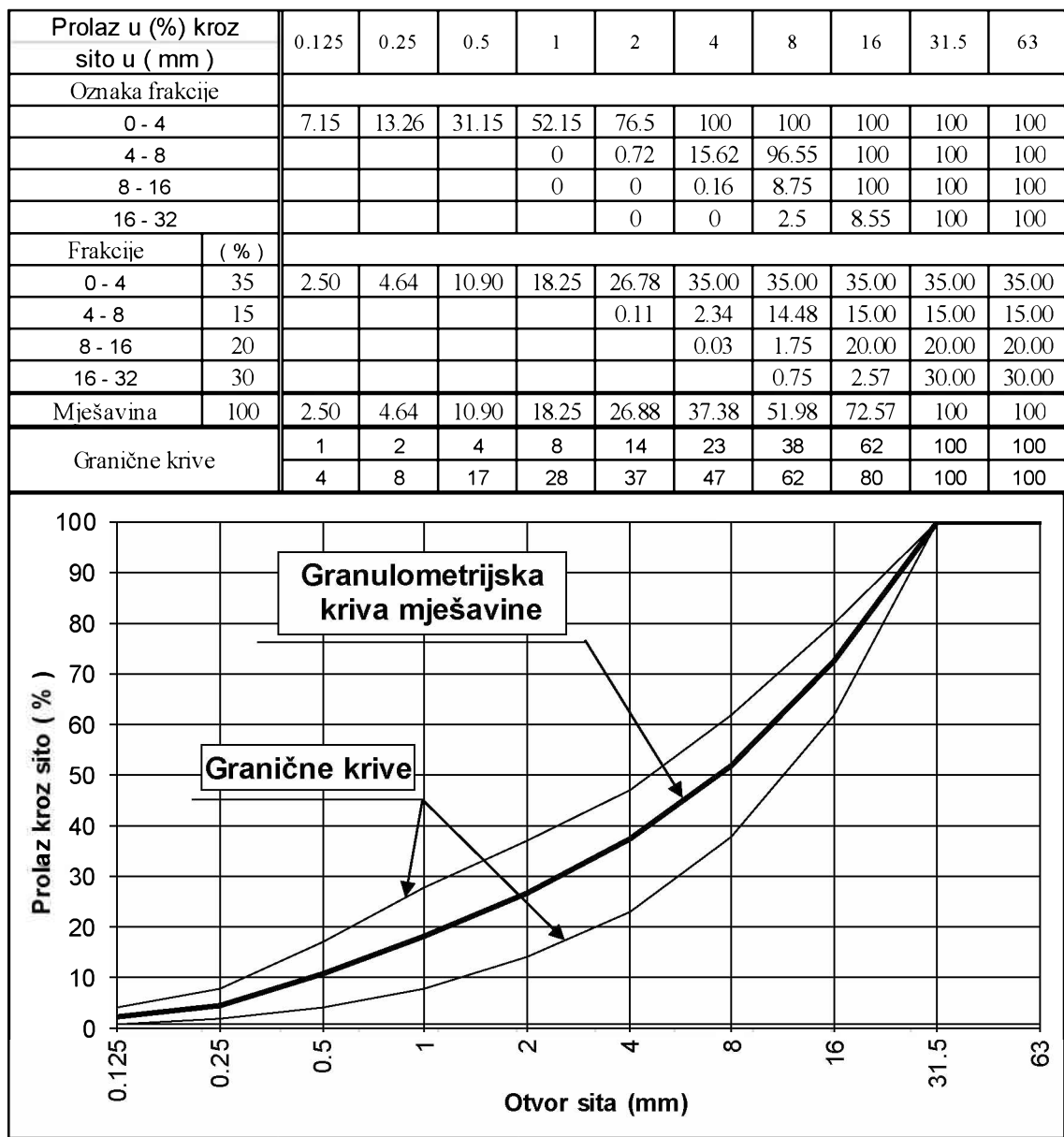
Slika 4.2 Rolna CFRP trake

4.2.3. Karakteristike komponenti betonske mješavine

4.2.3.1. Agregat za spravljanje betona

Za izradu betonske mješavine korišćen je agregat iz rijeke Gračanice, sa separacije „Mehanizacija i programat“, Nikšić. Agregat je ispiran, drobljen i separisan u četiri frakcije (0/4, 4/8, 8/16 i 16/32) u fabrici betona.

Za svaku frakciju agregata, prije proizvodnje betonske mješavine, uzimani su reprezentativni uzorci i vršena su standardna ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika agregata. Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava agregata, kao i receptura za spravljanje betonske mješavine prikazani su na slici 4.3.



Slika 4.3 Granulometrijski sastav mješavine agregata

Rezultati ostalih karakteristika upotrijebljenog agregata prikazani su u tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Karakteristike upotrijebljenog riječnog agregata

Frakcije agregata (mm)	0-4	4-8	8-16	16-32
Specifična masa (kg/m^3)	2670	2685	2685	2700
Zapreminska masa u rastresitom stanju	1490	1490	1380	1408
Zapreminska masa u zbijenom stanju (kg/m^3)	1840	1700	1670	1650
Upijanje vode (%)	0.25	0.15	0.15	0.10
Oblik zrna po Fery-u	0.37			
Sadržaj slabih zrna	nema			
Sadržaj grudvi gline	nema			
Sadržaj lakih čestica	nema			
Sadržaj organskih materija	nema			
Habanje po Los Angeles-u	22.0			
Drobljivost u cilindru	24.0			
Sadržaj čestica ispod 0.09 mm	4.50	0.10	0.10	0.05

4.2.3.2. Cement za spravljanje betona

Cement koji je upotrijebljen za spravljanje betonske mješavine, za betoniranje eksperimentalnih modela, uzet je od proizvođača cementa „CEMEX“, Republika Hrvatska, sa oznakom CEM II/B-M (S-LL) 42.5 N.

Rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika upotrijebljenog cementa prikazani su u tabeli 4.4. Za spravljanje 1 m^3 betona dozirana je količina cementa od 360 kg sa vodocementnim faktorom $\omega = 0.50$.

Tabela 4.4 Karakteristike upotrijebljenog cementa

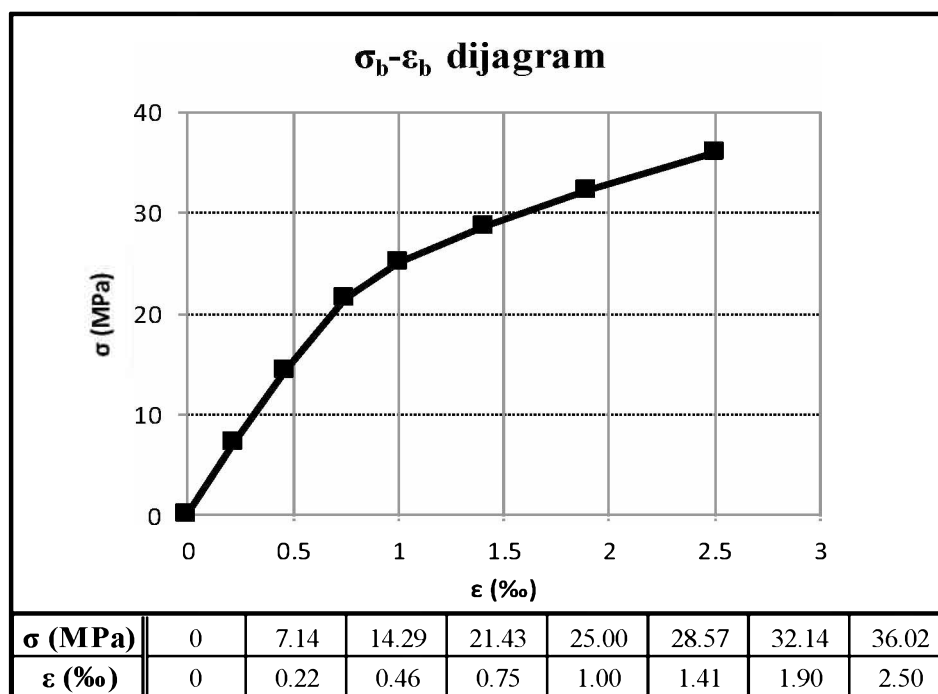
Fizičko-mehaničke karakteristike cementa	
Voda za standardnu konzistenciju (%)	27.6
Početak vezivanja (minuta)	190
Kraj vezivanja (minuta)	270
Stalnost zapremine (da/ne)	da
Finoća mliva po Blaine-u (cm^2/gr)	4000
Čvrstoća pri pritisku poslije 2 dana (MPa)	23.0
Čvrstoća pri pritisku poslije 28 dana (MPa)	48.0

4.2.3.3. Voda za spravljanje betona

Upotrijebljena voda za spravljanje betonske mješavine za betoniranje eksperimentalnih modela uzeta je iz gradskog vodovoda Nikšić.

4.2.4. Karakteristike upotrijebljenog betona

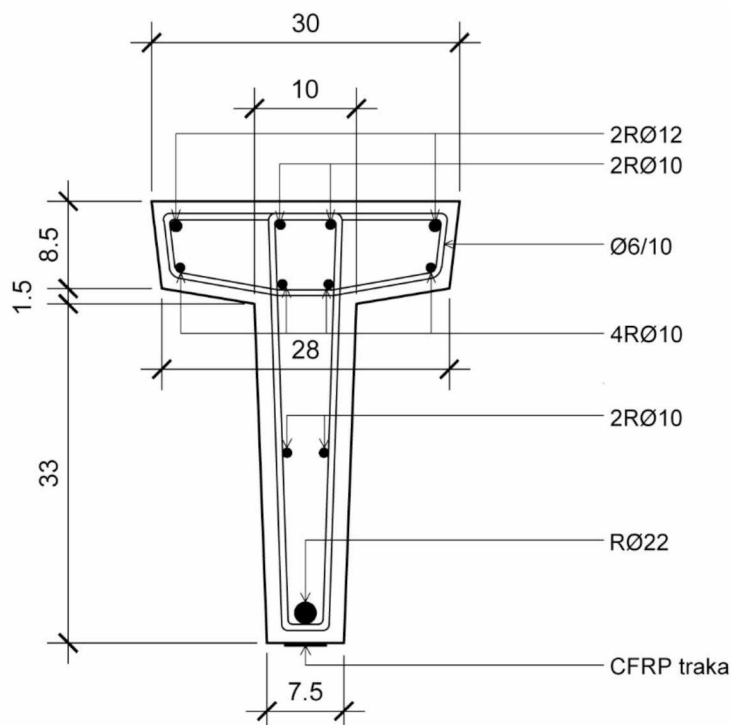
Za izradu eksperimentalnih modela korišćen je beton srednje klase čvrstoće. Karakteristični radni dijagram ($\sigma_b - \varepsilon_b$) upotrijebljenog betona prikazan je na slici 4.4. Usvojeni dijagram dobijen je obradom rezultata ispitivanja na 6 cilindričnih uzoraka serije I. Rezultati ispitivanja uzoraka obje serije, kao i radni dijagram betona za seriju II dati su u Prilogu E.



Slika 4.4 Karakteristični radni dijagram betona

4.3. Eksperimentalni modeli

Za ispitivanje nosivosti izrađeno je deset armirano-betonskih uzoraka sistema proste grede, raspona 7.5 m. Grede su T-presjeka, visine 43 cm, izrađene od betona klase C25/30.



Slika 4.5 Poprečni presjek ispitivanih uzoraka (u cm)

Za armiranje uzoraka upotrijebljena je rebrasta čelična armatura B500B, i to podužna prečnika 22 mm u zategnutoj zoni i 12 mm u pritiskutoj zoni, dok su uzengije bile prečnika 6 mm, postavljene na rastojanju od 10 cm (slika 4.5).

Spravljanje betona je izvršeno u fabrici betona „Mehanizacija i programat“ - Nikšić, na čijem je platou izvršeno betoniranje greda i svih kontrolnih betonskih uzoraka. Grede su betonirane u dvije serije sa razmakom od 7 dana. Iz svake serije uzeta su po 42 kontrolna uzorka (12 kocki ivice 15 cm, 6 cilindara dim. 15/15 cm, 18 cilindara dim. 15/30 cm i 6 prizmi dim. 10/10/40 cm). Svi kontrolni uzorci betonirani su u standardnim čeličnim kalupima, a za ugrađivanje betona u kalupe korišćen je pervibrator sa prečnikom igle od 25 mm.

Betonska mješavina za izradu modela i kontrolnih uzoraka projektovana je sa istim karakteristikama u pogledu granulometrijskog sastava, vrste i količine cementa, kao i vodocementnog faktora. Konzistencija svježeg betona kontrolisana je za svaku mješavinu na mjestu ugrađivanja i konstatovana je plastična konzistencija sa slijeganjem konusa od oko 12 cm.

Njegovanje svih greda i kontrolnih betonskih uzoraka obavljeno je na isti način. Nakon ugrađivanja, beton je održavan 24 sata u uslovima visoke relativne vlažnosti i na temperaturi od oko 20°C, poslije čega su modeli oslobođani od bočnih oplata. U narednih 5 dana nastavljeno je njegovanje, uz održavanje visoke vlažnosti, pri čemu su registrovane manje varijacije temperature spoljašnje sredine. Grede su, nakon 28 dana starosti, zajedno sa kontrolnim betonskim uzorcima, dopremljene u Laboratoriju za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Podgorici. Tamo su, opterećene sopstvenom težinom, čuvane do ispitivanja.

4.4. Tehnologija izvođenja radova na ojačanju

Proračunom je ustanovljeno da elementi ne posjeduju dovoljnu količinu armature za prihvatanje dodatnih uticaja i da ih treba ojačati. Rješenje je dato u vidu ojačanja karbonskim trakama na donjoj zategnutoj strani presjeka. Karbonske trake praktično ne povećavaju visinu presjeka, a na veoma efikasan način povećavaju njegovu nosivost. Na ovaj način se osim povećanja visine presjeka izbjegava i ugrađivanje dodatne armature koju bi nakon obijanja betona trebalo povezati sa postojećom armaturom.

Procedura ojačavanja podrazumijeva: pripremu površine, lijepljenje karbonskih traka na pripremljene površine i kontrolna ispitivanja.

Uslovi koje je potrebno ispuniti prije lijepljenja karbonskih traka:

- Površine na koje se lijepe trake moraju biti ravne ili blago talasaste - ohrapavljene pjeskarenjem ili brušenjem, što se postiže njihovom prethodnom pripremom.
- Pri primjeni karbonskih traka postoji i uslov da se one mogu lijepiti samo za betonske elemente dovoljno visokih mehaničkih karakteristika. Zato je potrebno, prije nanošenja lijepka, primijeniti tzv. „pull-off“ test na minimalno tri uzorka, kojim se

utvrđuje stvarna čvrstoća betona na zatezanje kao i kvalitet pripremljene podloge. Čvrstoća dobijena na ovaj način treba da iznosi minimalno 1.5 MPa.

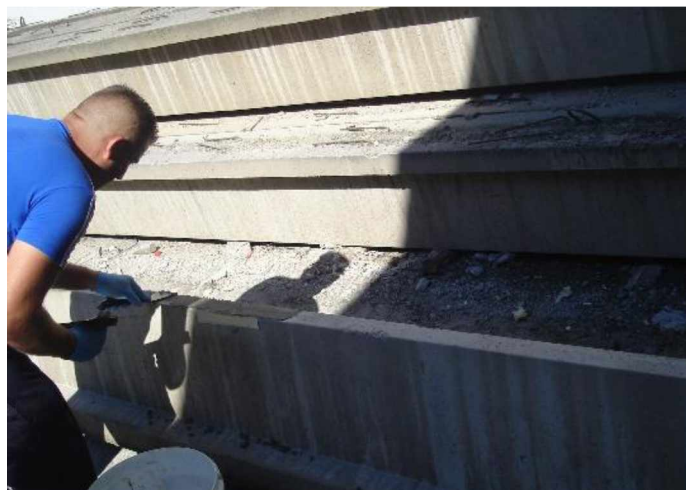
- Površinska vlažnost betona pri lijepljenju karbonskih traka može da iznosi najviše 4%.
- Radovi na lijepljenju smiju se izvoditi samo na temperaturama većim od 10°C.
- Podrazumijeva se primjena samo materijala (traka i lijepkova) koji imaju potvrdu podobnosti za datu namjenu. U obzir dolaze isključivo materijali koji su garantovano kompatibilni, što znači da se mogu primjenjivati samo trake i lijepkovi istog proizvođača. U ovom eksperimentu korišćen je materijal firme „SINTEK“ iz Skoplja, Republika Sjeverna Makedonija. Karakteristike upotrijebljenog materijala date su u njihovim atestima.

Utvrđeno je da je konstrukciju potrebno prethodno izravnati, pa je na prethodno očišćenu i izglachu površinu (slika 4.6), nanijet sloj za izravnavanje (*leveling mortar S2*), proizvod firme „Sintek“ iz Skoplja (slika 4.7). Riječ je o trokomponentnom epoksidnom malteru, namijenjenom za pripremu i nivelisanje betonskih i armirano-betonskih podloga, prije ojačavanja karbonskim trakama.



Slika 4.6 Priprema betonske podloge (brušenje)

Nakon nanošenja ove podloge izvršen je „pull-off“ test (slika 4.8). Prosječna čvrstoća betona na zatezanje dobijena na 3 uzorka iznosila je 1.71 MPa, čime je potvrđen dobar kvalitet betona i ostvaren uslov za primjenu FRP ojačanja.



Slika 4.7 Nanošenje sloja maltera za nivelaciju



Slika 4.8 Aparatura za izvođenje testa i izgled uzorka nakon loma

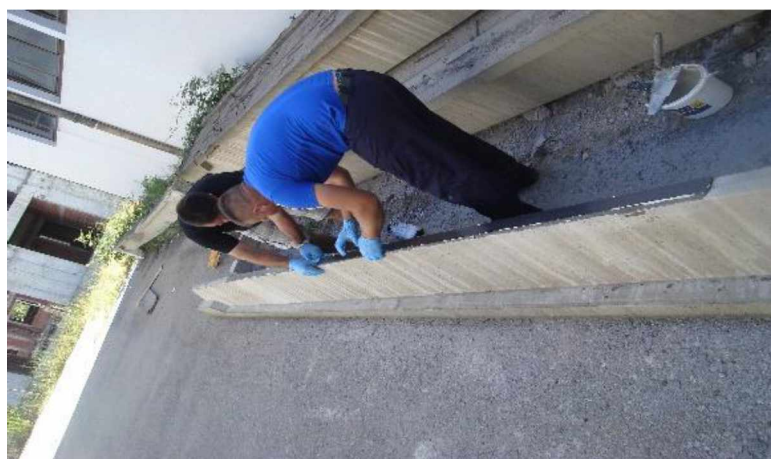
Na sloj za izravnavanje nanijet je sloj lijepka (*primer C*), takođe proizvod firme „Sintek“ (slika 4.9). To je dvokomponentni materijal na bazi polimer cementa, koji ima ulogu da obezbijedi dobro prijanjanje karbonske trake za beton.

Zatim je na tako pripremljenu betonsku površinu postavljena karbonska traka, širine 50 mm i debljine 1.2 mm. Ona je zalijepljena na rebro T-presjeka, sa donje strane, i to u središnjem rasponu, na dužini od 4 m, odnosno 6 m, bez upotrebe poprečnog ukrućenja (slika 4.10).

U toj zoni gdje je koncentracija najvećih napona, uočene su najveće prsline pri ispitivanju kontrolnog, neojačanog uzorka na kratkotrajno opterećenje.



Slika 4.9 Nanošenje sloja lijepka na karbonsku traku



Slika 4.10 Postavljanje karbonske trake

Trake su postavljane počevši sa jednog kraja ka drugom, nanošenjem dovoljnog pritiska pomoću gumenog valjka kako bi se istisnuo višak lijepka, koji je zatim uklonjen sa traka. Svi uzorci su njegovani najmanje 3 dana da bi se ostvarilo odgovarajuće prijanjanje. Obezbjedivanje veze između betona i FRP trake je neophodno za uspješno ojačanje [32].

4.5. Tok eksperimenta

Geodetsko nivelisanje vršeno je dan prije ispitivanja odgovarajućeg modela. Eksperimentalni modeli su zatim postavljeni na betonske oslonce (slika 4.11). Nakon toga vršeno je postavljanje mjernih instrumenata prema utvrđenoj šemi.



Slika 4.11 Postavljanje na oslonce ojačanih armirano-betonskih greda za ispitivanje

Za ispitivanje jednog modela bio je potreban jedan dan, pri čemu je nanošenje opterećenja do loma trajalo oko 4 sata, pa se može smatrati da je aplicirano opterećenje kratkotrajnog karaktera. Prije početka eksperimenta vršeno je tzv. nulto očitavanje na instrumentima pri tehničkom nivou opterećenja od 5 kN. Nakon toga opterećenje je nanošeno u početku u inkrementima od 10 kN, a zatim je, u fazi prije loma, ovaj inkrement smanjen na 5 kN, čak i na 1 kN u nekim slučajevima. Na ovaj način dobija se dobar pregled stanja napona i deformacija ispitivanog modela. Brzina nanošenja opterećenja iznosila je oko 2 kN/s. Mjerenja su vršena oko 5 minuta poslije nanošenja opterećenja radi eventualnog stabilizovanja deformacija. S obzirom na dužinu trajanja opterećenja, pri kasnijim inkrementima je po potrebi vršena korekcija aplicirane sile pritiska. Registrovan je

maksimalni pad sile od 0.25% u posmatranom intervalu, što se kod ovog ispitivanja može zanemariti.

Svi podaci su direktno unošeni u računar u pripremljene tabele korišćenjem programskog paketa Excel. Tako je bilo omogućeno vršenje kontrole izmjerenih vrijednosti tokom eksperimenta. Svi izmjereni podaci su čuvani u štampanoj i elektronskoj formi na eksternim uređajima. Istog dana vršena je demontaža polomljenog uzorka (slika 4.12), kontrola ispravnosti uređaja i mjerne tehnike za ispitivanje, kao i sve potrebne pripreme za postavljanje sljedeće grede za ispitivanje. Na ovaj način ispitana su 2 kontrolna i 4 ojačana uzorka.



Slika 4.12 Demontirani uzorak nakon loma

Opterećenje na preostale četiri grede zadržano je konstantnim tokom 6 mjeseci. U ovom periodu vršena su stalna očitavanja potrebnih podataka radi proučavanja efekata tečenja betona, prema tačno utvrđenom programu za sve grede. Ova mjerenja su bila intenzivnija u prvoj nedjelji i prvom mjesecu, dok je registrovanje podataka kasnije značajno redukovano, uglavnom na 7 ili 14 dana.

Nakon isteka 6 mjeseci izvršena je analiza dobijenih rezultata. Kako je utvrđeno da primjenjeni nivo opterećenja nije značajnije uticao na deformacije tečenja, samo su dvije grede ispitane do loma, dok su preostale dvije grede dodatno opterećene većim nivoom

opterećenja u trajanju od 4 mjeseca. Nakon isteka tog perioda nastavljeno je opterećivanje predmetnih greda do loma, kao kod kratkotrajno ispitivanih modela, iz razloga sigurnosti opreme i osoblja. Gabariti predmetnih uzoraka i njihova težina (1.2 tone), kao i specifičan teret kojim su opterećivane prilikom ispitivanja (tegovi po 500 kg) iziskivali su dodatan oprez kod svih učesnika u eksperimentu, posebno kada se greda približavala lomu. Međutim i sam proces postavljanja uzoraka na oslonce, zatim nanošenje opterećenja, kao i demontaža uzoraka nosili su određeni stepen rizika.

4.6. Program eksperimentalnog istraživanja

Eksperimentalno istraživanje sprovedeno je u laboratoriji Građevinskog fakulteta u Podgorici, korišćenjem postojeće opreme. Programom je predviđeno ispitivanje nosivosti deset armirano-betonskih uzoraka sistema proste grede, raspona 7.5 m. Dvije grede nijesu ojačavane i korišćene su kao kontrolne, a preostalih osam su ojačane sa donje strane karbonskim trakama.

Program eksperimentalnih istraživanja je sadržao sljedeće aktivnosti:

- Prethodna ispitivanja koja se odnose na provjeru funkcionisanja kompletne opreme, mjerne tehnike i uređaja za ispitivanje, kao i na provjeru mogućnosti realizacije ovakvog eksperimenta uključujući i ispitivanje vremenskih deformacija.
- Ispitivanje serije standardnih kontrolnih betonskih uzoraka (kocke, cilindri i prizme) pod uticajem kratkotrajnog opterećenja za određivanje naponsko-deformacijskih karakteristika betona.
- Ispitivanje serije standardnih kontrolnih uzoraka armature koja je korišćena u eksperimentu za određivanje naponsko-deformacijskih karakteristika.
- Ispitivanje serije standardnih kontrolnih cilindara pod uticajem dugotrajnog opterećenja za određivanje naponsko-deformacijskih karakteristika betona u toku vremena.
- Ojačavanje karbonskim FRP trakama 8 armirano-betonskih greda realnih dimenzija.
- Ispitivanje 6 uzoraka pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja do loma (2 kontrolne i 4 ojačane grede).

- Ispitivanje 4 uzorka na uticaj dugotrajnog opterećenja u trajanju od 6 mjeseci za sve grede i dodatna 4 mjeseca za dvije grede koje su naknadno opterećene većim nivoom opterećenja.

Za svaku armirano-betonsku gredu utvrđen je zaseban program eksperimentalnog ispitivanja, koji je sadržao dispoziciju modela, mjernih mjesta i opterećenja, kao i način registrovanja podataka. Svi modeli pod dejstvom kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja ispitani su u Laboratoriji za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Podgorici. Sva kontrolna mjerenja na uzorcima od betona i armature obavljena su u istoj laboratoriji.

4.6.1. Aparatura za ispitivanje

4.6.1.1. Aparatura za ispitivanje kontrolnih uzoraka

Sva ispitivanja kontrolnih betonskih uzoraka i uzoraka armature sprovedena su prema procedurama koje su utvrđene u naučno-istraživačkom programu.

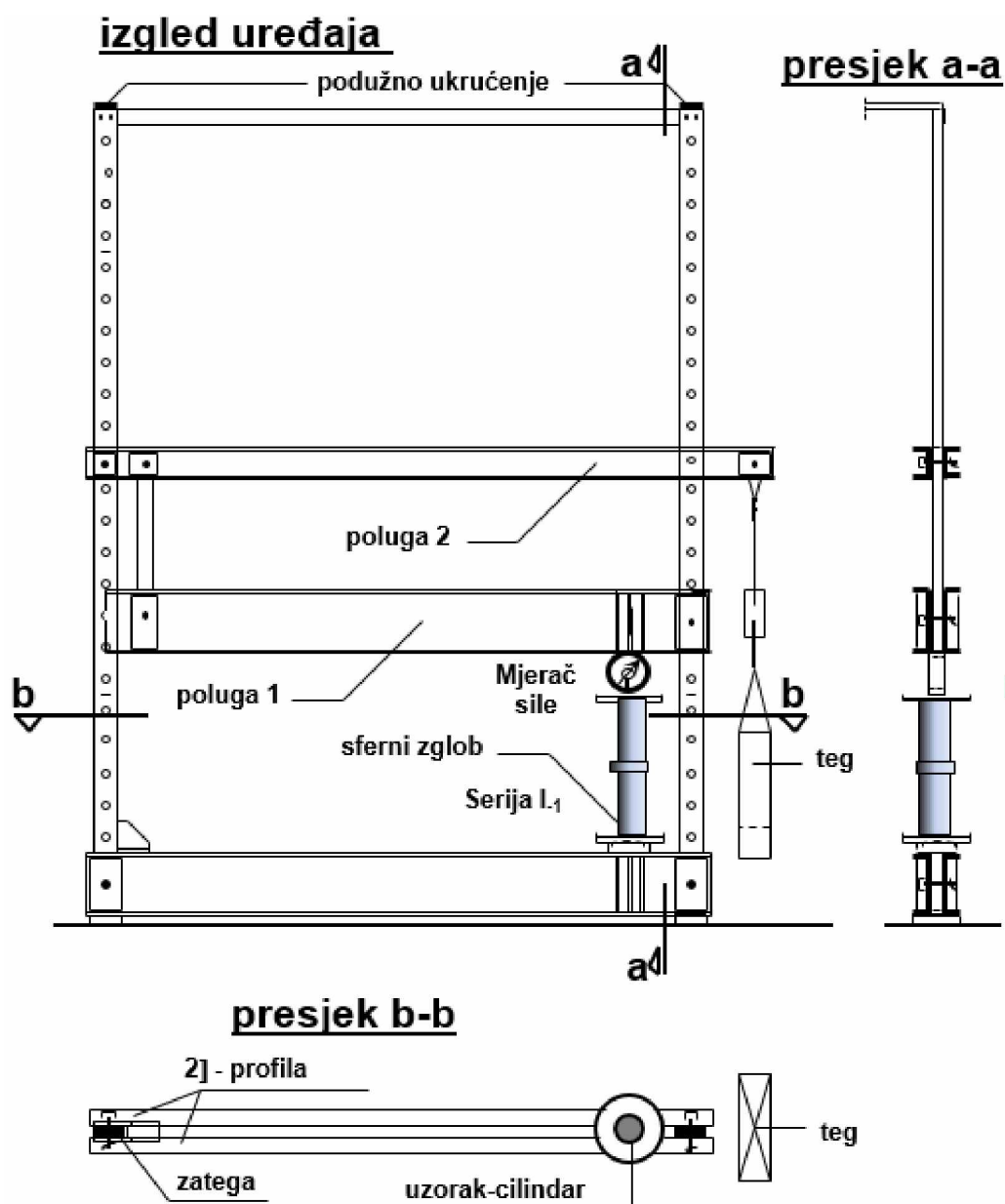
Za utvrđivanje mehaničkih karakteristika na kontrolnim betonskim uzorcima (čvrstoća pri pritisku, čvrstoća na zatezanje pri cijepanju, radni dijagram, modul elastičnosti) korišćena je hidraulična presa nosivosti 250 tona (slika 4.13a).



Slika 4.13 Laboratorijska oprema: a) hidraulična presa; b) kidalica

Za utvrđivanje mehaničkih karakteristika na kontrolnim uzorcima armature (granica velikih izduženja, granica kidanja, ukupno relativno izduženje, radni dijagram čelika, modul elastičnosti) korišćena je laboratorijska kidalica kapaciteta 100 tona (slika 4.13b).

Ispitivanje reoloških karakteristika očvrslog betona sprovedeno je nestandardnim postupkom u realnim termo-higrometrijskim uslovima koji su vladali tokom ispitivanja u laboratoriji Građevinskog fakulteta. Pri ispitivanju tečenja korišćeni su posebni uređaji kojima se održava konstantna sila pritiska tokom vremena (slika 4.14).



Slika 4.14 Uređaj za ispitivanje tečenja betona

Uređaji su konstruisani na principu dvostruke poluge, tako da se dejstvo mrtvog tereta multiplicira do projektovane vrijednosti sile pritiska pri kojoj se prati deformacijsko stanje ispitivanog uzorka. Uređaj je univerzalan i korekcijama oslonačkih zona mogu se ispitivati i različiti konstrukcijski elementi. Laboratorija raspolaže sa 12 ovakvih uređaja kod kojih se masom do 1000 kg može aplicirati sila pritiska do 1500 kN. Ispitivanje koeficijenta tečenja betona izvršeno je na po 6 uzoraka oblika cilindra iz obje serije. Mjerenje dilatacija obavljeno je mehaničkim dilatomjerima osjetljivosti 1/1000 mm, na tri pozicije cilindra na mjernoj bazi od 150 mm. Istovremeno, preko mehaničkog mjerača sile sa komparaterima, koji je prethodno baždaren u hidrauličnoj presi, kontrolisana je veličina spoljašnjeg opterećenja. Ispitivanje tečenja betona obavljeno je pod opterećenjem od 55-85% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, što predstavlja relativno veliko eksploataciono opterećenje. Ono je na sve ispitivane cilindre nanijeto pri velikoj starosti i održavano je konstantnim tokom narednih 10 mjeseci.

4.6.1.2. Aparatura za nanošenje kratkotrajnog opterećenja

Uzorci su postavljeni na betonske oslonce, na rasponu od 7.5 metara. Opterećenje je nanošeno na dva načina: kao koncentrisano, preko hidraulične prese (slika 4.15) i kao ravnomjerno, preko čeličnih tegova težine 5 kN (slika 4.16).

Koncentrisano opterećenje nanošeno je na grede kao statičko, monotono rastuće od nule do loma, u inkrementima. Brzina nanošenja svakog inkrementa bila je 5 kN/min.



Slika 4.15 Ispitivanje greda opterećenih koncentrisanom silom

Nanošenje drugog tipa opterećenja sprovedeno je u koracima od po 10 kN, postavljanjem tegova od po 5 kN simetrično, počevši od sredine grede ka njenim krajevima. Ovo opterećenje bilo je uglavnom ravnomjerno podijeljeno, jer je neposredno prije loma na sredinu raspona grede nanošena dodatna koncentrisana sila, u inkrementima, do loma. Ispitivanje je izvršeno na ovaj način zbog bezbjednosti i ograničenja opreme i sistema za ispitivanje ovih greda.



Slika 4.16 Ispitivanje grede pod dejstvom ravnomjernog opterećenja

4.6.1.3. Aparatura za nanošenje dugotrajnog opterećenja

Isti princip opterećivanja sproveden je kao i u slučaju ispitivanja pod dejstvom kratkotrajnog ravnomjernog opterećenja.

4.6.2. Mjerna tehnika

4.6.2.1. Mjerenja na kontrolnim uzorcima

Eksperimentalna istraživanja praćena su ispitivanjem serije standardnih kontrolnih uzoraka za utvrđivanje mehaničkih karakteristika ugrađenog betona i armature za svaku seriju greda, i to:

za beton:

- čvrstoća betona pri pritisku,
- čvrstoća betona na zatezanje pri cijepanju,
- modul elastičnosti betona,
- radni dijagram betona,
- koeficijent tečenja betona;

za armaturu:

- granica razvlačenja,
- čvrstoća pri zatezanju,
- modul elastičnosti
- standardno izduženje δ (%) na mjernoj bazi od 10ϕ ,
- radni dijagram čelika.

Naznačena ispitivanja vršena su prema posebnom programu, koji je utvrđen prije početka ispitivanja armirano-betonskih greda i kontrolnih betonskih uzoraka. Ovaj program istraživanja je realizovan u cjelini.

Najvažnije karakteristike betona, dobijene ispitivanjem kontrolnih betonskih uzoraka, prikazane su u tabeli 4.5.

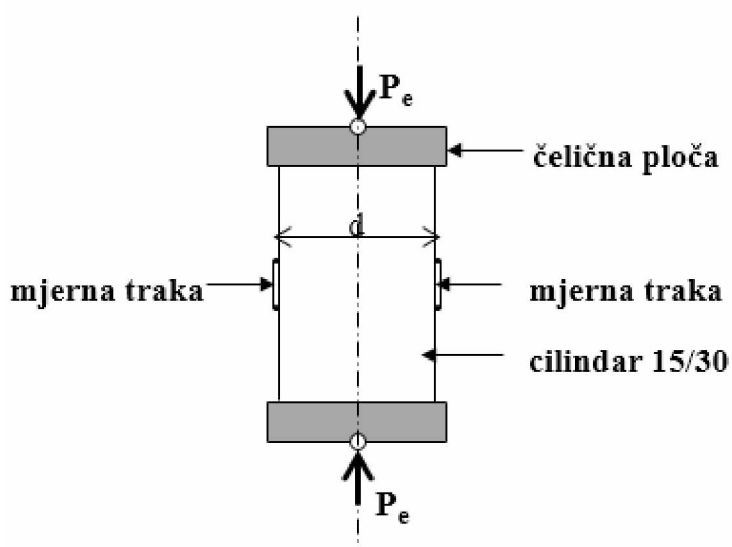
Tabela 4.5 Fizičko-mehaničke karakteristike betona

Karakteristična vrijednost ispitivanog svojstva betona		Oblik / broj uzoraka	Serija	
			I	II
čvrstoća betona pri pritisku	f_p (MPa)	kocka / n=12	36.02	41.27
čvrstoća betona na čisto zatezanje	f_z (MPa)	prizma / n=6	3.71	4.04
čvrstoća betona na zatezanje pri savijanju	f_{zs} (MPa)	prizma / n=6	3.66	3.97
čvrstoća betona na zatezanje pri cijepanju	f_{zc} (MPa)	cilindar / n=6	4.14	4.43
modul elastičnosti betona	E_b (GPa)	cilindar / n=6	32.45	36.05

Najvažnije karakteristike upotrijebljenog betonskog čelika i njegov radni dijagram, dobijeni ispitivanjem kontrolnih uzoraka, prikazani su na slici 4.1 i u tabeli 4.1 (poglavlje 4.2.1).

Tečenje betona ispitivano je prema šemi na standardnim uzorcima, u istim laboratorijskim uslovima u kojima su bile ispitne grede (slika 4.17).

Rezultati mjerenja koeficijenta tečenja prikazani su u tabeli 6.2. i u Prilozima B3 i B4.



Slika 4.17 Mjerenja koeficijenta tečenja na kontrolnim cilindrima

4.6.2.2. Mjerenja na gredama

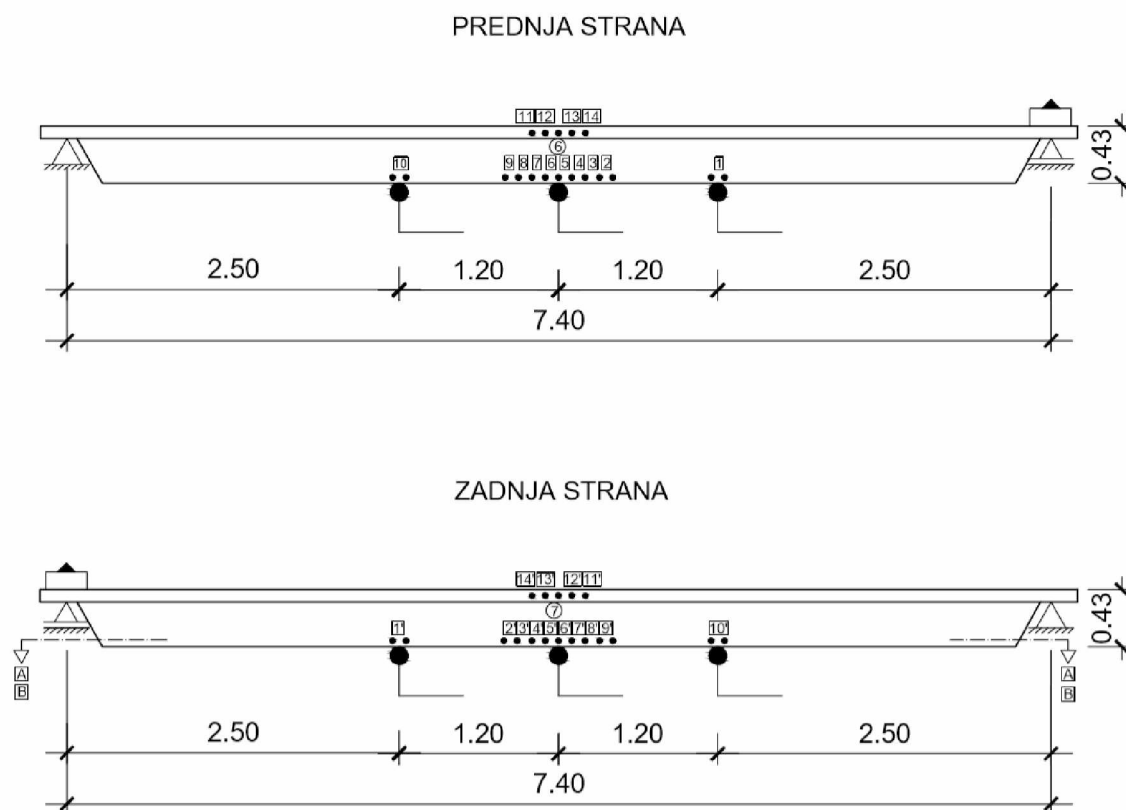
Za svaku gredu su vršena sljedeća mjerenja:

- Dilatacije u betonu, deformetrom „Pfender“ prema utvrđenoj šemi i pomoću mjernih traka.
- Dilatacije u karbonskoj traci po njenoj cijeloj dužini pomoću mjernih traka.
- Deformacije grede (ugibi) komparaterima prema utvrđenoj šemi.
- Ugao rotacije na krajevima grede pomoću klinomjera prema utvrđenoj šemi.
- Mjerenje širine prslina za svaki inkrement sile.

Mjerenja su vršena nakon nanošenja opterećenja u inkrementima, sve do loma.

Tri ugibomjera, osjetljivosti 1/1000 mm, korišćena su za mjerenje ugiba, od kojih jedan postavljen u sredinu raspona, a ostali na ≈ 250 cm od oslonaca (slika 4.18).

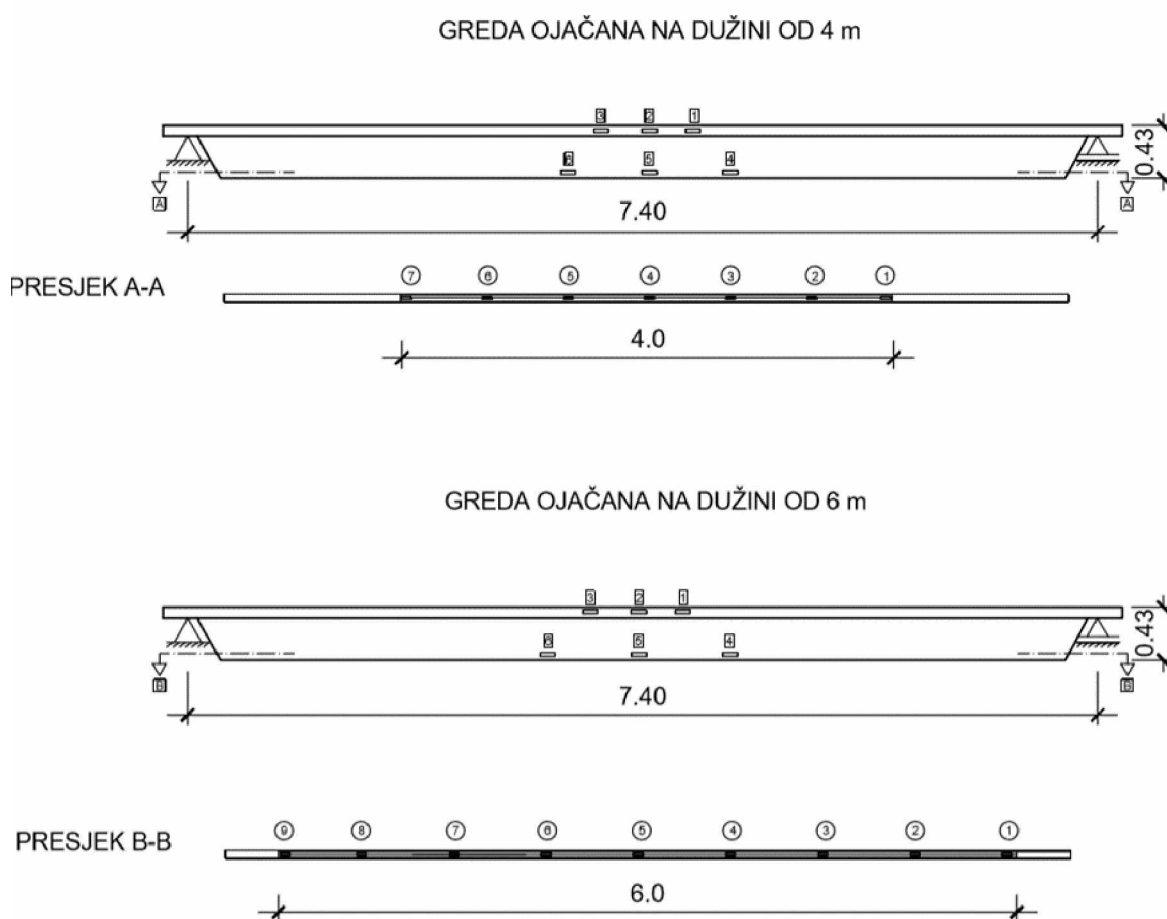
Za mjerenje dilatacija u betonu korišćen je mehanički deformetar tipa „Pfender“, preciznosti 1/1000 mm. Napravljena je šema mjernih mjesta, na međusobnom rastojanju od 100 mm (slika 4.18). Za fiksiranje mjernih mjesta na površini betona korišćen je specijalni dvokomponentni lijepak proizvođača „Hotinger“ iz Njemačke. Na pritisnutom betonu, na bočnim stranama flanše postavljena su po 4 mjerna mjesta, a na zategnutoj strani, uz donju ivicu rebra po 10 mjernih mjesta, tako da je ukupan broj mjernih mjesta iznosio 28. Na taj način postignuto je tzv. „opasivanje presjeka“, pri čemu jedan od dobijenih podataka uvijek predstavlja kontrolni na osnovu kojeg se može ustanoviti greška izmjerenih veličina. Prosječni rezultati mjerenja sa obje strane grede usvojeni su kao mjerodavni.



Slika 4.18 Šematski prikaz ispitivane grede i mjerne aparature

Za mjerenje dilatacija u betonu, u pogledu mjerne tehnike, korišćene su i mjerne trake tipa PL-120-11-3LT, proizvođača TML iz Japana. One su postavljene u obje zone betona - na pritisnuti dio ploče, kao i uz donju ivicu zategnute strane rebra. Tokom ovog ispitivanja mjerene su i dilatacije u karbonskoj traci, pa su za tu svrhu upotrijebljene mjerne trake tipa BFLA-5-8, istog proizvođača TML iz Japana (slika 4.19).

Za očitavanje rezultata ispitivanja korišćen je TML uređaj – mjerni most TDS 303. Registrovan je prirast opterećenja, zajedno sa odgovarajućim deformacijama, kako bi se utvrdilo naponsko-deformacijsko ponašanje greda.



Slika 4.19 Položaj mjernih traka na betonu i na karbonskim trakama

Mjerenja rotacije oslonaca vršeno je klinomjerom postavljenim na jednom osloncu grede.

Praćenje pojave i razvoja prslina vršeno je vizuelnim putem, dok je za njihovo mjerenje u kritičnim presjecima korišćena lupa tipa Zeiss, sa tačnošću od 0.025 mm (slika 4.20).

Mapa prslina je propisno izvedena, za svaki inkrement, počevši od trenutka nastanka prve prslina pa sve do loma, dok je odgovarajuće opterećenje zapisivano na površini grede.



Slika 4.20 Mjerenje širine prslina

4.6.2.3. Ostala mjerenja

Vršeno je mjerenje početnih ugiba ispitivanih uzoraka u sredini raspona, nastalih usljed dejstva sopstvene težine. Mjerenja su izvršena neposredno prije nanošenja opterećenja. Rezultati mjerenja prikazani su u tabeli 4.6.

Tabela 4.6 Početni ugibi greda

Greda	G1a	G1b	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
Ugib (cm)	1.20	1.05	1.10	1.10	1.35	1.25	1.15	1.20	1.30	1.05

Vršeno je redovno mjerenje temperature i vlažnosti sredine u laboratoriji u kojoj su smješteni uređaji za ispitivanje i ispitni modeli, odnosno gdje je u cjelini obavljen eksperiment. Podaci o ovim parametrima dobijeni su instrumentima koji su bili u laboratorijskom neosunčanom dijelu na visini 1.20 m od kote poda. Podaci dobijeni u Hidrometeorološkom zavodu u Podgorici neznatno se razlikuju zbog odgovarajućih standardnih uslova mjerenja. Izmjereni direktni rezultati dilatacija tokom vremena na gredama, ukazuju na vrlo mala kolebanja dilatacija usljed promjena vlažnosti i temperature sredine, koja su očekivana s obzirom da se radi o starim modelima.

4.7. Rezultati ispitivanja

4.7.1. Rezultati ispitivanja greda opterećenih kratkotrajnim opterećenjem

U tabeli 4.7 date su karakteristike predmetnih greda i rezultati dobijeni njihovim ispitivanjem.

Tabela 4.7 Karakteristike greda ispitivanih na kratkotrajno opterećenje

Oznaka grede	Tip ojačanja	Vrsta opterećenja	Granična nosivost P (kN) / q (kN/m')	Granični momenat savijanja M_u (kNm)	^c Porast graničnog momenta savijanja (%)	Ugib u (cm)	^a Dilatacija u zategnutom betonu ϵ_{max} (‰)	Dilatacija u pritisnutom betonu ϵ_{max} (‰)	Dilatacija karbonske trake ϵ_{max} (‰)	Širina prslina α_{max} (mm)	Tip loma
G1a	neojačana	koncentrisano	35.0	65.6	/	7.96	13.46	6.79	/	3.00	lom po betonu na savijanje
G2	CFRP (l=4m)	koncentrisano	67.0	125.5	91.3	6.80	6.53	7.59	6.59	0.75	kritična dijagonalna prslina + lom po betonu na savijanje
G3	CFRP (l=6m)	koncentrisano	74.0	138.7	111.4	7.80	8.17	7.96	7.45	0.55	kritična dijagonalna prslina + lom po betonu na savijanje
G1b	neojačana	^b ravnomjerno	9.2	76.9	/	9.40	11.88	5.11	/	2.50	lom po betonu na savijanje
G4	CFRP (l=4m)	^b ravnomjerno	13.5	119.4	55.3	9.00	6.29	1.17	6.15	0.90	lom po zaštitnom sloju betona, a djelimično duž trake
G5	CFRP (l=6m)	^b ravnomjerno	14.1	128.8	67.5	11.10	7.88	1.41	7.20	0.80	lom po betonu na savijanje
^a izmjerene vrijednosti date su za presjek sa prslinom ^b pretežno ravnomjerno opterećenje ^c porast je dat u odnosu na kontrolne grede G1a i G1b											

U tabeli su prikazane maksimalne vrijednosti karakterističnih veličina za šest ispitivanih greda, a pojedinačni rezultati dati su u tabelama u Prilogu A.

Dimenzije svih greda su bile iste, a osim dužine ojačanja variran je i način opterećivanja. Usljed toga javile su se značajne razlike u graničnim nosivostima, deformacijama ugibima, kao i tipu loma. Te razlike su naročito izražene u odnosu na kontrolne, neojačane grede, a takođe i između samih greda.

U Prilogu A1 prikazani su rezultati mjerenja za sve ispitivane grede, dok su u Prilogu A2 dati samo obrađeni podaci za crtanje dijagrama. Svaka tabela Priloga A1 ima u zaglavlju oznaku modela sa datumom ispitivanja i izmjerenim termo-higrometrijskim parametrima. Zatim je prikazan raspon grede, dužina ojačanja i veličina nanijetog opterećenja. Pored podataka dobijenih mjerenjem i njihovom obradom, prikazana je i starost modela pri dugotrajnom ispitivanju. Iako se ovi podaci mogu prikazati u odgovarajućim grupnim tabelama, ovakva prezentacija je neophodna radi lakšeg sagledavanja pojedinih uticajnih parametara, karakteristika ispitivanih modela i podataka koji su dobijeni mjerenjem. Treba napomenuti da, zbog velikog obima podataka, nijesu obuhvaćeni svi inkrementi kako bi se na prikladan način prikazao dijagram sa odgovarajućim izmjerenim podacima. Ovi podaci se čuvaju u laboratoriji Građevinskog fakulteta u Podgorici i mogu biti uvijek na raspolaganju zainteresovanim istraživačima.

4.7.2. Rezultati ispitivanja greda opterećenih dugotrajnim opterećenjem

U tabeli 4.8 date su karakteristike predmetnih greda i rezultati dobijeni njihovim ispitivanjem. Prikazane su maksimalne vrijednosti karakterističnih veličina za četiri ispitivane grede, a pojedinačni rezultati dati su u tabelama u Prilozima B1 i B2. Dimenzije svih greda su bile iste, a osim dužine ojačanja variran je i nivo dugotrajnog opterećenja.

Tabela 4.8 Karakteristike greda ispitivanih na dugotrajno opterećenje

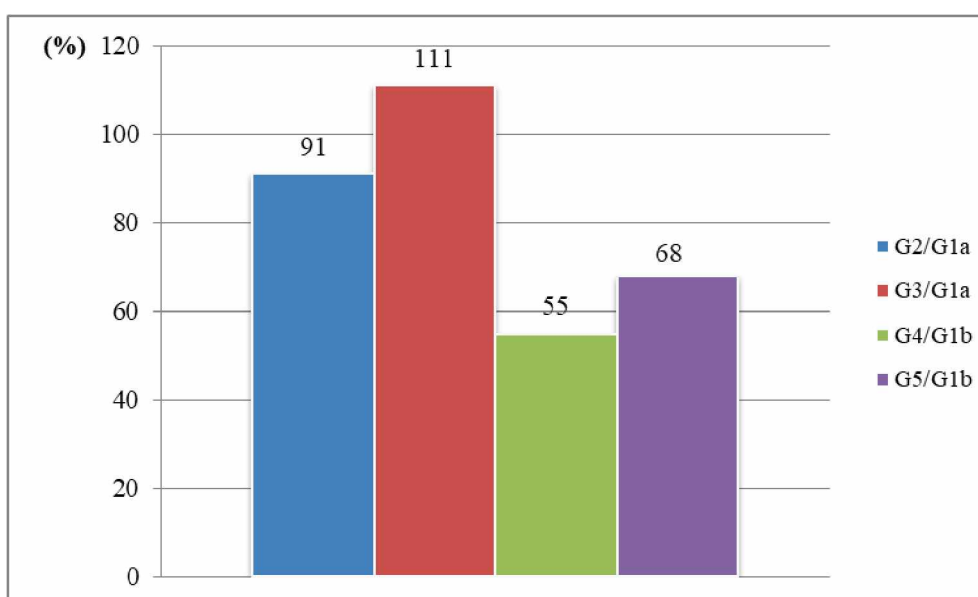
Oznaka grede	Tip ojačanja	Vrsta opterećenja (nivo opterećenja)	Granična nosivost q (kN/m' + P (kN)	Granični moment savijanja M_u (kNm)	ϵ Porast graničnog momenta savijanja (%)	Ugib u (cm)	^a Dilatacija u zategnutom betonu ϵ_{max} (‰)	Dilatacija u pritisnutom betonu ϵ_{max} (‰)	Dilatacija karbonske trake ϵ_{max} (‰)	Širina prslina a_{max} (mm)	Tip loma
G1b	neojačana	^b ravnomjerno	8+4	76.9	/	9.40	11.88	5.11	/	2.50	lom po betonu na savijanje
G6	CFRP (l=6m)	^b ravnomjerno (55%)	10+34	134.0	74.30	9.1	8.34	1.72	7.12	1.20	lom po betonu na savijanje
G7	CFRP (l=4m)	^b ravnomjerno (60%)	10+29	125.0	62.50	7.90	8.41	1.26	7.65	1.35	lom po zaštitnom sloju betona, a djelimično duž trake
G8	CFRP (l=6m)	^b ravnomjerno (55%→75%)	10+28.5	121.0	60.99	11.60	10.18	1.64	8.04	1.55	lom po betonu na savijanje
G9	CFRP (l=4m)	^b ravnomjerno (60%→85%)	10+26	117.0	54.70	9.80	9.43	1.23	7.45	1.75	lom po zaštitnom sloju betona, a djelimično duž trake
^a izmjerene vrijednosti date su za presjek sa prslinom ^b pretežno ravnomjerno opterećenje; nivo opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost greda ojačanih trakom iste dužine ispitanih pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja ^c porast je dat u odnosu na kontrolnu gredu G1b											

5. ANALIZA REZULTATA DOBIJENIH DEJSTVOM KRATKOTRAJNOG OPTEREĆENJA

5.1. Granična nosivost greda

Granične nosivosti svih ispitivanih greda, kao i njima odgovarajući momenti savijanja dati su u tabeli 4.7.

Evidentan je porast graničnih momenata za sve grede u odnosu na kontrolne: 91-111% za dejstvo koncentrisanog i 55-68% za dejstvo ravnomjernog opterećenja (slika 5.1).



Slika 5.1 Odnos graničnih momenata savijanja ojačanih i kontrolnih greda

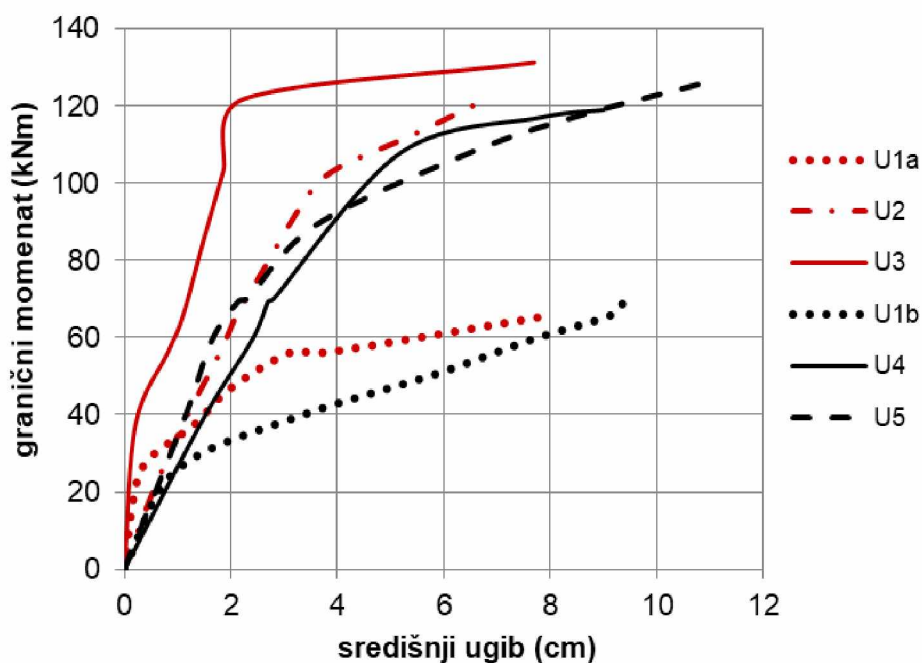
Dakle, tip opterećenja ima očekivan uticaj na veličinu prirasta graničnih momenata u odnosu na kontrolne grede. Međutim, razlika u prirastu između ojačanih greda je veoma mala. Za dužinu trake 4 m prirast iznosi 5% u korist koncentrisanog opterećenja, odnosno 8% za dužinu trake 6 m. Za ravnomjerno opterećenje dobija se prirast 8% u korist duže trake, a za koncentrisano 11%. Ovim se potvrđuje zaključak rada [66] da dužina ojačanja nema značajnijeg uticaja na graničnu nosivost grede.

U Prilogu F je prikazan postupak dimenzionisanja poprečnog presjeka armirano-betonske grede ojačane CFRP trakom, prema Pravilniku ACI 440.2R-08.

5.2. Ugibi u sredini grede

Kontrolna greda G1a, ispitivana koncentrisanom silom, doživjela je značajan središnji ugib od približno 8 cm, pri relativno malom graničnom momentu. Pri tom istom momentu, ojačane grede G2 i G3 doživjele su ugibe od 2.1 i 1.1 cm, respektivno. Ove grede su imale malo smanjenje konačnih ugiba u poređenju sa kontrolnom gredom G1a ali usljed dejstva skoro dvostruko većeg graničnog momenta.

Greda G4 je doživjela skoro isti ugib kao kontrolna greda G1b, dok je kod grede G5 prisutno povećanje ugiba od 18%, mada u oba slučaja pod uticajem značajno većeg graničnog momenta. Sa dijagrama 5.2. vidi se da su krive porasta ugiba za grede G2 i G4 skoro paralelne, kao i one za grede G3 i G5. Konačne vrijednosti ugiba imale su porast od 32% ($l=4\text{m}$), odnosno 42% ($l=6\text{m}$), za grede izložene ravnomjernom opterećenju. Veći ugibi (15-23%) registrovani su kod greda ojačanih dužim trakama.



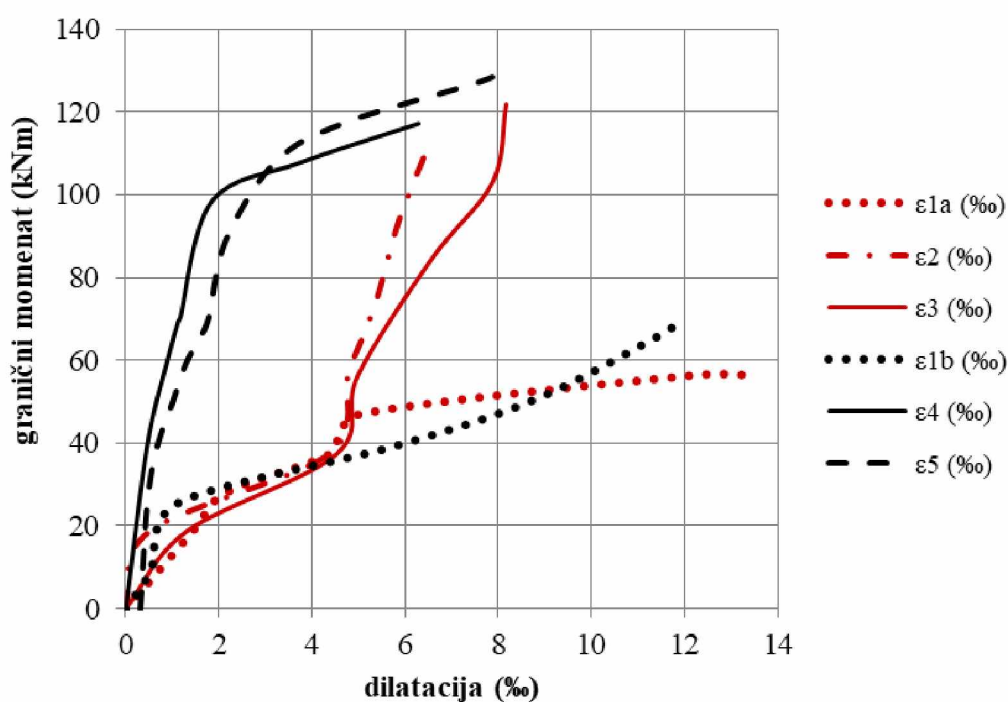
Slika 5.2 Veličine ugiba ispitivanih greda

5.3. Deformacije u betonu

5.3.1. Deformacije u zategnutom betonu

Dijagram dilatacija 5.3. formiran je na osnovu mjerenja na mjestima na kojima mjernom dužinom nije obuhvaćena vidljiva prslina, osim eventualnih mikroprrlina koje nijesu uočene.

Na dijagramu je evidentan uticaj spoljašnjeg ojačanja na smanjenje deformacija, naročito kod greda G2 i G3, opterećenih koncentrisanim opterećenjem.



Slika 5.3 Dilatacije u zategnutoj zoni betona

One se do nekog momenta od oko 50 kNm ponašaju skoro identično sa kontrolnom gredom G1a, nakon čega u toj gredi dolazi do velikog porasta dilatacija, pri neznatnom povećanju opterećenja. Nasuprot tome, u gredama G2 i G3 sa povećanjem opterećenja i pojavom prvih prslina dolazi do smanjenja prirasta dilatacija u zategnutoj zoni, iznad karbonske trake. Njihove konačne dilatacije razlikuju se za 25% u korist grede ojačane dužom trakom (G3), uz neznatnu razliku u njihovim graničnim momentima.

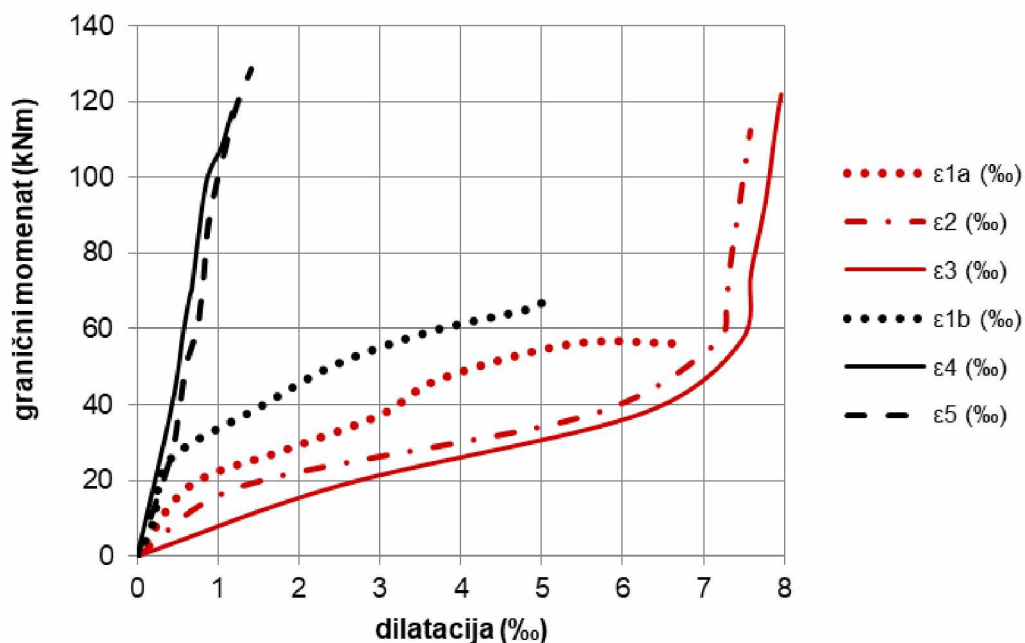
Grede G4 i G5, opterećene ravnomjernim opterećenjem, ponašaju se takođe veoma slično, gotovo elastično do određene granice. Nakon toga, deformacije rastu mnogo brže u odnosu na opterećenje. Konačne deformacije greda G4 i G5 se takođe razlikuju za 25% u korist grede ojačane dužom trakom (G5).

Kod greda G2 i G4, ojačanih trakama od 4m, konačne deformacije greda su skoro identične. Ovo važi i za grede G3 i G5, ojačane trakama dužine 6m.

Smanjenje deformacija u odnosu na kontrolne grede je značajno, naročito pri upotrebi kraćih traka. Ono je skoro nezavisno od tipa opterećenja i iznosi 1.6-2 puta kod greda opterećenih na dejstvo koncentrisanog opterećenja i 1.5-1.9 puta za dejstvo ravnomjernog opterećenja. Redukcija deformacija praćena je velikim porastom graničnih momenata u oba slučaja.

5.3.2. Deformacije u pritisnutom betonu

Iz dijagrama 5.4. je lako uočljivo da su dilatacije u pritisnutoj zoni zavisne od vrste opterećenja. Naime, sve tri grede koje su ispitane koncentrisanim opterećenjem (G1a, G2 i G3) ponašaju se slično: veliki prirast deformacija za mali prirast graničnog momenta.

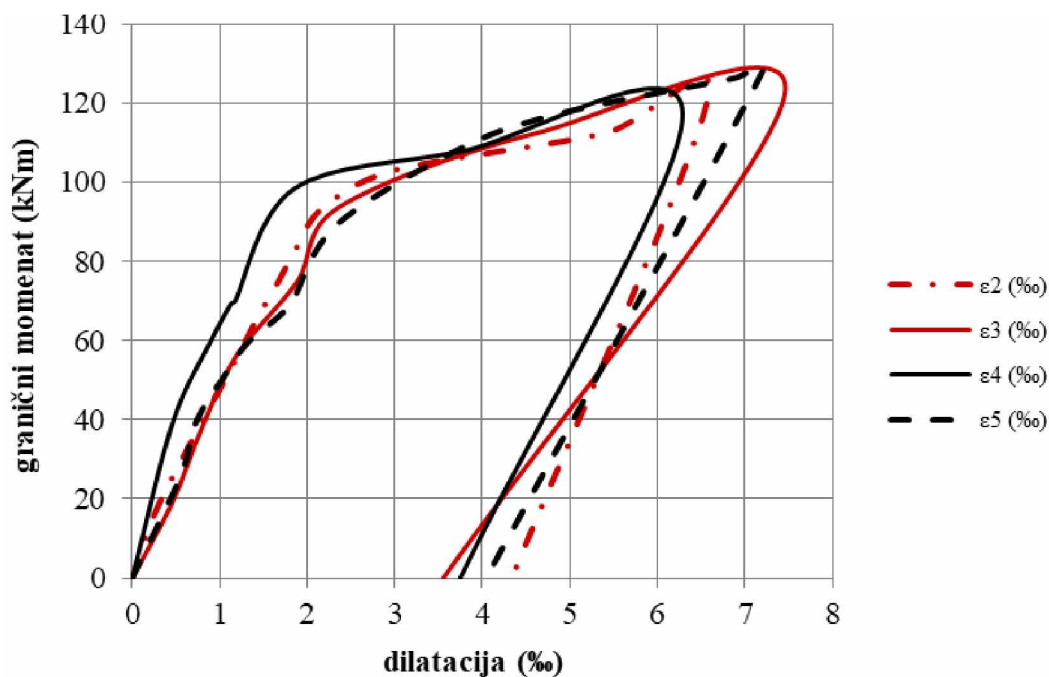


Slika 5.4 Dilatacije u pritisnutoj zoni betona

Kod ojačanih greda, nakon dostizanja vrijednosti maksimalne dilatacije kontrolne grede G1a, tj. oko 7‰, očigledan je porast smičućih napona u betonu, kada se skoro zaustavlja dalji prirast deformacija u pritisnutom betonu. Veza između sile i dilatacije je skoro linearna, a porast krajnje dilatacije iznosi samo 12%, odnosno 17%, za grede G2 i G3, opterećene koncentrisanim opterećenjem, u odnosu na krajnju dilataciju kontrolne grede G1a. Veličine dilatacija greda G2 i G3 su nekoliko puta veće nego dilatacije greda G4 i G5. Ove grede, opterećene ravnomjernim opterećenjem, doživljavaju izuzetno mali prirast dilatacija pri velikom prirastu graničnog momenta. Njihovo ponašanje je skoro identično, a krajnje dilatacije im se razlikuju za 20%.

5.3.3. Deformacije karbonske trake

Slika 5.5. prikazuje deformacije u karbonskim trakama različitih dužina, koje nastaju za vrijeme opterećivanja ojačanih greda sa dva tipa opterećenja, kao i nakon rasterećenja. Može se zaključiti da su ove deformacije nezavisne od oba parametra - i od dužine trake i od tipa opterećenja. Najveće deformacije javile su se u sredini trake svih ispitivanih greda. Na krajevima traka deformacije su zanemarljive. Registrovane su značajne zaostale deformacije nakon rasterećenja, koje iznose 51-66% od veličine konačnih deformacija.



Slika 5.5 Dilatacije u karbonskim trakama

5.4. Prsline u betonu

Pojava i razvoj prsline su praćeni detaljno, a njihova mapa je propisno izvedena, za svaki inkrement, počevši od trenutka nastanka prve prsline pa sve do loma.

Kod neojačane grede ispitane pod dejstvom koncentrisanog opterećenja prve prsline su se javile pri sili od 25 kN (kontrolna greda G1a), dok su se kod ojačanih greda one pojavile pri sili od 30 kN odnosno 40 kN (grede G3 i G2, respektivno).

Prve prsline kod neojačane grede opterećene ravnomjernim opterećenjem javile su se pri sili od oko 20 kN (kontrolna greda G1b), dok su se kod ojačanih greda one pojavile pri sili od oko 40 kN (grede G4 i G5).

Širina graničnih prsline se neznatno razlikuje kod svih ojačanih greda, dok je, u poređenju sa kontrolnom gredom G1a, značajno redukovana i to do 5.5 puta (greda G3). Širina prsline kod greda opterećenih ravnomjernim opterećenjem bila je 20 - 45% veća nego kod greda pod uticajem koncentrisanog opterećenja.

Šema prsline data je u Prilogu C1. Broj prsline kod ojačanih greda bio je očekivano veći. Razmak između prsline bio je 20 - 23 cm kod kontrolnih greda, 17 - 20 cm kod greda opterećenih koncentrisanim opterećenjem i 16 - 18 cm kod greda opterećenih ravnomjernim opterećenjem.

U graničnom stanju loma pod dejstvom koncentrisanog opterećenja evidentirane su kose prsline koje su očigledno posljedica prirasta smičućih napona. Naime, zbog značajne vrijednosti zatežuće sile u CFRP traci, došlo je do promjene naponsko-deformacijskog stanja u uskoj oblasti oko sredine grede, na dužini od oko $0.1l \approx 75\text{cm}$.

5.5. Mehanizam loma grede

Analizom tipova loma u gredama G1a - G5 (tabela 4.7), jasno je da spoljašnje ojačanje armirano-betonskih greda mijenja njihov mehanizam loma. Izabrani geometrijski parametri, kao i njihovi relativni odnosi, imaju značajan uticaj na formiranje mehanizma loma.

Spoljašnje ojačanje CFRP trakama dovodi do značajnog povećanja granične nosivosti na savijanje. To utiče na porast smičućih napona, koji se odražava na sliku mehanizma loma, koja se razlikuje od uobičajenih koje se javljaju kod ispitivanja na umanjenim uzorcima.

Ispitivanje grede G4 je samo djelimično potvrdilo ranije zaključke iz radova [11], [33], [43], a koji se odnose na uticaj dužine ojačanja na tip loma. Autori ovih radova tvrdili su da će uzorci ojačani kraćom trakom prije doživjeti lom usljed njenog odvajanja u odnosu na uzorke ojačane dužom trakom. Prema njihovim istraživanjima, u slučaju kada se za ojačanja armirano-betonskih greda koriste duže trake, lom se dešava zbog iskorišćenja nosivosti trake i njenog pucanja. Slična situacija desila se i kod predmetnog ispitivanja, prilikom loma grede G4. Njega je izazvala kritična dijagonalna prslina (KDP) koja se pojavila na kraju trake i koja je sa porastom opterećenja rasla i širila se ka sredini grede. Na taj način izazvala je djelimično odvajanje trake, i to uglavnom zajedno sa zaštitnim slojem betona (slika 5.6). Takođe je došlo do značajnog mrvljenja betona u pritisnutoj zoni, kao posljedica naglog loma.



Slika 5.6 KDP kao uzročnik loma i izgled grede nakon loma

U slučaju greda G3 i G5, ojačanih dužim trakama, došlo je do loma po betonu, pa nije u potpunosti iskorišćen kapacitet trake.

Kada je u pitanju uticaj vrste opterećenja na tip loma, zaključci ovog istraživanja odstupaju od zaključaka prethodnih istraživanja. Naime, smatralo se da je u slučaju kraćih traka za ojačanje mehanizam loma greda sličan u oba slučaja opterećenja – odvajanje trake na krajevima. Armirano-betonske grede ojačane dužim trakama su se uglavnom

bolje ponašale pod ravnomjernim opterećenjem nego pod koncentrisanim jer ono ne izaziva diskontinuitet u sili ploče duž raspona. Taj diskontinuitet je odgovoran za odvajanje ili pucanje FRP trake u središnjem rasponu pri koncentrisanom opterećenju, dok su uzorci opterećeni ravnomjernim opterećenjem doživljavali lom uglavnom usljed iskorišćenja nosivosti betona [40].

Kod predmetnog ispitivanja desila se obrnuta situacija, uzevši u obzir da je greda G2 ispitana na dejstvo koncentrisanog, a greda G4 na dejstvo ravnomjernog opterećenja.

5.6. Zaključna razmatranja

Nakon sprovedenog sopstvenog ispitivanja uzoraka izloženih dejstvu kratkotrajnog opterećenja, moguće je donijeti određene zaključke u vezi uticaja ispitivanih parametara.

5.6.1. Granični momenat savijanja

Spoljašnje ojačanje armirano-betonskih greda dovelo je do značajnog povećanja graničnih momenata savijanja u odnosu na momente kontrolnih, neojačanih greda. Ovaj zaključak se posebno odnosi na grede izložene uticaju koncentrisanog opterećenja. Međutim, nijedan od dva razmatrana parametra (tip opterećenja i dužina ojačanja) nije imao značajniji uticaj na granične momente savijanja ojačanih greda.

Proračun kapaciteta nosivosti poprečnog presjeka prema Pravilniku ACI 440.2R–08, ne daje zadovoljavajuće poklapanje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima. Prosječni moment nosivosti dobijen eksperimentom je za 20% veći od računskog. Proračunom se pokazuje da je presjek predimenzionisan CFRP trakom, kod koje su naponi iskorišćeni svega oko 25%. Imajući u vidu da se u praktičnim rješenjima najčešće usvaja nešto veće ojačanje od sračunatog/potrebnog, može se zaključiti da se korišćenjem ovog proračuna dobijaju zadovoljavajući rezultati koji su na strani sigurnosti.

5.6.2. Ugibi

Ojačavanje greda CFRP trakama doprinosi redukciji veličine ugiba u poređenju sa kontrolnom gredom. Kod nekih greda konačni ugibi su dostigli ugibe kontrolnih greda, dok su kod drugih postojale varijacije u redukciji, ali koje su uvijek bile praćene značajnim porastom nosivosti kritičnog poprečnog presjeka.

Veće vrijednosti konačnih ugiba zabilježene su kod greda ojačanih dužim trakama, kao i kod greda izloženih ravnomjernom opterećenju. Time je dokazana tvrdnja prethodnih istraživača da kraće ojačanje dopušta manje ugibe od dužih ojačanja [33].

5.6.3. Deformacije

Ovim ispitivanjem dokazano je da spoljašnje CFRP ojačanje redukuje veličinu deformacija u zategnutom betonu u poređenju sa kontrolnom gredom, nezavisno od načina opterećivanja. Takođe je dokazano da duže ojačanje dopušta veće deformacije u zategnutom betonu, i to u istom iznosu (25%) za dejstvo oba tipa opterećenja. Stoga se može zaključiti da uticaj tipa opterećenja nije od većeg značaja kada je riječ o deformacijama u zategnutom betonu.

Uticaj tipa opterećenja je očigledan u pritisnutom betonu, uzevši u obzir da su deformacije u gredama opterećenim koncentrisanim opterećenjem nekoliko puta veće od onih koje se javljaju u gredama opterećenim ravnomjernim opterećenjem. Razmatran je i uticaj dužine ojačanja na veličinu deformacija u pritisnutom betonu. Sa porastom dužine trake javlja se neznatna razlika u konačnim deformacijama, bez obzira na tip opterećenja.

Deformacije u karbonskim trakama su veoma slične za sve grede, skoro nezavisne od uticaja razmatranih parametara.

5.6.4. Prsline

Praćenjem razvoja prslina, potvrđen je zaključak prethodnih ispitivanja da spoljašnje ojačanje vrši značajnu redukciju širine prslina. Kao što se i očekivalo, broj prslina kod ojačanih greda bio je veći ali je njihova širina bila znatno manja.

Kod neojačanih - kontrolnih greda širina i međusobni razmak prslina su u očekivanim granicama, dok su kod ojačanih greda one nešto niže od tih vrijednosti.

Spoljašnje CFRP ojačanje takođe redukuje negativne efekte koje imaju armaturne šipke velikih prečnika na propagaciju prslina.

5.6.5. Mehanizam loma

Nakon završenog sopstvenog eksperimentalnog ispitivanja na modelima u prirodnoj veličini i sprovedene analize rezultata, a naročito uticaja dužine ojačanja na tip loma, došlo se do zaključka da nije potrebno koristiti poprečna ukrućenja, kao ni povećavati dužinu trake jer nema naznaka da će doći do njenog potpunog odvajanja, kao što se dešavalo u ranijim eksperimentalnim istraživanjima [10], [31].

Takođe je zaključeno da je, u slučaju spoljašnjeg ojačavanja greda, dovoljno koristiti CFRP trake čija je dužina jednaka polovini grede, jer nema značajnih povećanja nosivosti pri ojačavanju dužim trakama. Ovo se odnosi na slučaj ispitivanja na savijanje prostih greda, kada se ne očekuje porast opterećenja koje bi povećalo granični momenat savijanja za više od 60%.

Na osnovu svega navedenog, treba naglasiti da se ojačavanje armirano-betonskih greda određene starosti može izvršiti uspješno, brzo i jednostavno CFRP trakama, zahvaljujući njihovim dobrim karakteristikama i brojnim prednostima. Pri tome se održava zahtijevani nivo nosivosti i upotrebljivosti elementa koji se ojačava.

6. ANALIZA REZULTATA DOBIJENIH DEJSTVOM DUGOTRAJNOG OPTEREĆENJA

Problem granične nosivosti armirano-betonskih greda, pri dejstvu dugotrajnog konstantnog opterećenja, u uslovima nivoa napona od 55% do 85% čvrstoće na kratkotrajno opterećenje, bio je predmet proučavanja u ovom radu. Sve četiri grede su opterećene ravnomjernim opterećenjem po cijeloj dužini, u trajanju od 6 mjeseci. Ovo opterećenje iznosilo je 55%, odnosno 60% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, za grede ojačane dužom, odnosno kraćom trakom. Nakon analize rezultata na kraju tog perioda, bilo je evidentno da predmetni uzorci ne reaguju značajno na taj nivo opterećenja, što je bilo očekivano, s obzirom da su grede bile stare 10 godina u trenutku ojačavanja i proces tečenja betona se u najvećoj mjeri završio.

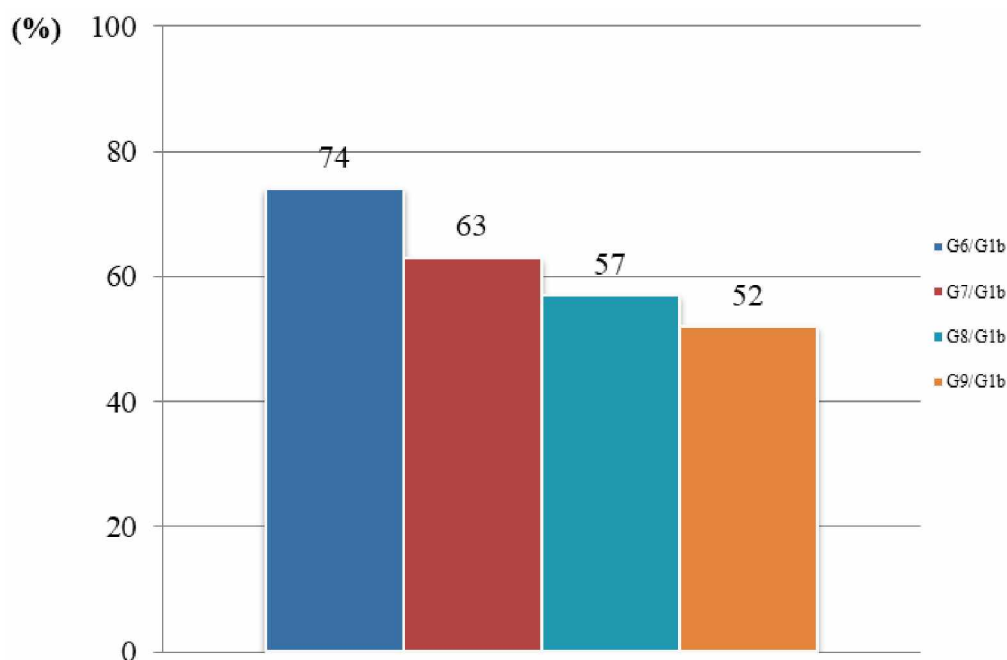
Što se tiče vremenskih deformacija karbonskih traka, poznato je da su one, u poređenju sa staklenim ili aramidnim, najmanje podložne tečenju. Kako je poznato da efikasnost spoljašnjeg ojačanja slabi sa porastom nivoa opterećenja [67], ono je u sljedećoj fazi povećano na 75-85% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, u zavisnosti od dužine trake. Ovo opterećenje održavano je konstantnim u trajanju od 4 mjeseca, sve do stabilizacije procesa.

Na osnovu rezultata ispitivanja sprovedenog na 4 uzorka mogu se sa dovoljnom pouzdanošću donijeti određeni zaključci u pogledu razmatranih veličina. U nastavku ovog poglavlja prikazana je analiza rezultata ispitivanja, sa posebnim osvrtom na uticaj dva parametra - dužine ojačanja i nivoa opterećenja.

6.1. Ponašanje ojačanih AB greda u funkciji graničnog momenta

6.1.1. Granična nosivost greda

Granične nosivosti svih ispitivanih greda, kao i njima odgovarajući momenti savijanja dati su u tabeli 4.8. Evidentan je porast graničnih momenata za sve ispitane grede koje su bile izložene dugotrajnom ravnomjernom opterećenju, u odnosu na kontrolnu gredu G1b: 52-63% kod greda ojačanih na dužini od 4m i 57-74% kod greda ojačanih na dužini od 6m (slika 6.1).



Slika 6.1 Odnos graničnih momenata savijanja ojačanih i kontrolnih greda

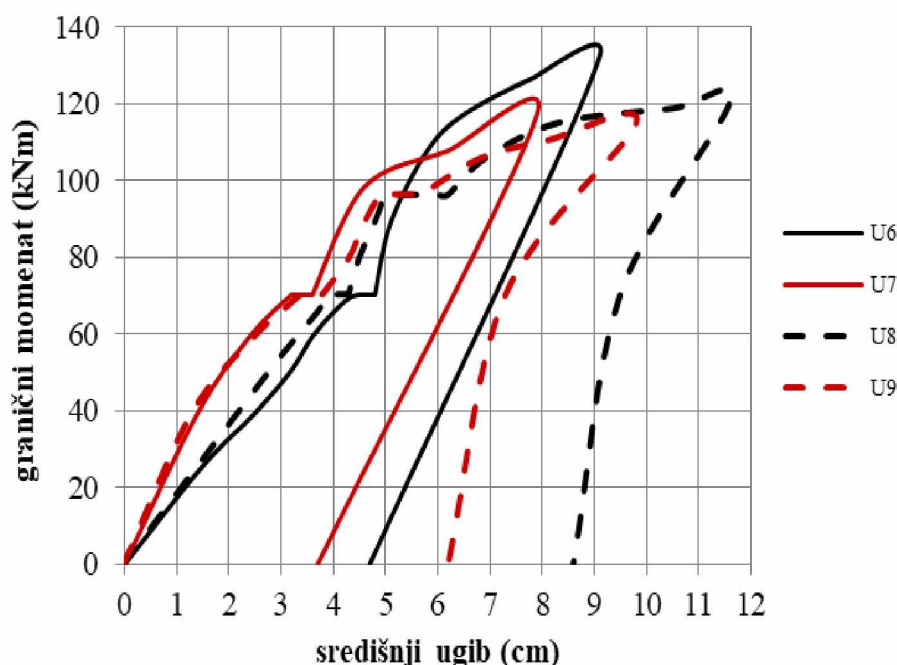
Međutim, relativna razlika u porastu je veoma mala između ojačanih greda i iznosi 3.4-7% u korist greda ojačanih dužim trakama. Manji pad nosivosti (2-6%) je zabilježen kod greda opterećenih većim nivoom dugotrajnog opterećenja (G8 i G9). Do sličnog zaključka došli su i autori rada [68].

6.1.2. Ugibi u sredini grede

Veća razlika u veličini krajnjih ugiba greda G6 i G7 i greda G8 i G9 je posljedica specifičnosti u opterećivanju greda G8 i G9. One su, naime, bile dugotrajno opterećene većim teretom, što je rezultiralo i većim konačnim ugibima, i to 27% i 24%, respektivno.

Kao i kod ispitivanja usljed dejstva kratkotrajnog opterećenja, i u ovom slučaju su veći ugibi registrovani kod greda ojačanih dužim trakama (G6 i G8). Ta razlika iznosi 15% i 18%, u zavisnosti od nivoa opterećenja.

Zaostale, plastične deformacije su velike kod svih greda, naročito kod onih ojačanih dužim trakama. One iznose 52% i 74% od konačne vrijednosti ugiba za grede G6 i G8. Sa dijagrama 6.2 jasno se uočava uticaj nivoa opterećenja na veličinu zaostalih deformacija (greda G8), kao i efekti usljed otkidanja karbonske trake (greda G9).



Slika 6.2 Veličine ugiba ispitivanih greda

U Prilogu G prikazan je proračun ugiba grede pri dejstvu dugotrajnog opterećenja. Postupak je sproveden za neojačanu gredu (Prilog G1) i za gredu ojačanu CFRP trakom (Prilog G2).

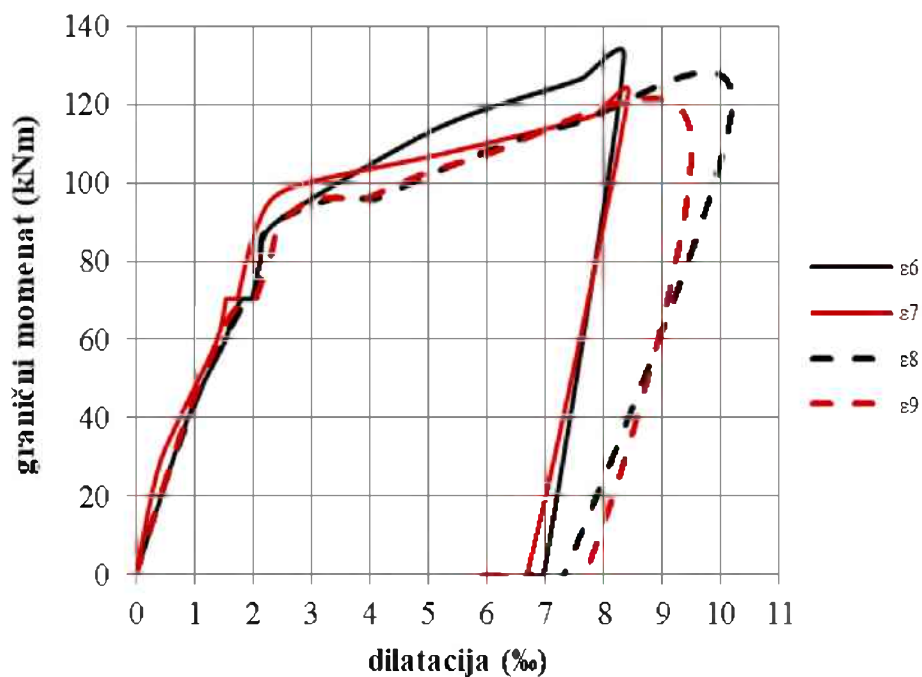
6.1.3. Deformacije u betonu

6.1.3.1. Deformacije u zategnutom betonu

Sve ispitivane grede ponašaju se skoro identično. Nakon dostizanja graničnog momenta od oko 90 kNm, evidentan veliki porast deformacija pri neznatnom povećanju opterećenja.

Konačne deformacije greda G6 i G7 opterećenih manjim nivoom opterećenja neznatno se razlikuju. Kod greda G8 i G9 koje su izložene većem dugotrajnom opterećenju, javlja se razlika od 8% u veličini krajnjih deformacija, a u korist grede ojačane dužom trakom (G8). Usljed porasta nivoa opterećenja, ove grede doživljavaju 22% odnosno 12% veće deformacije, respektivno, u odnosu na grede ojačane CFRP trakama iste dužine.

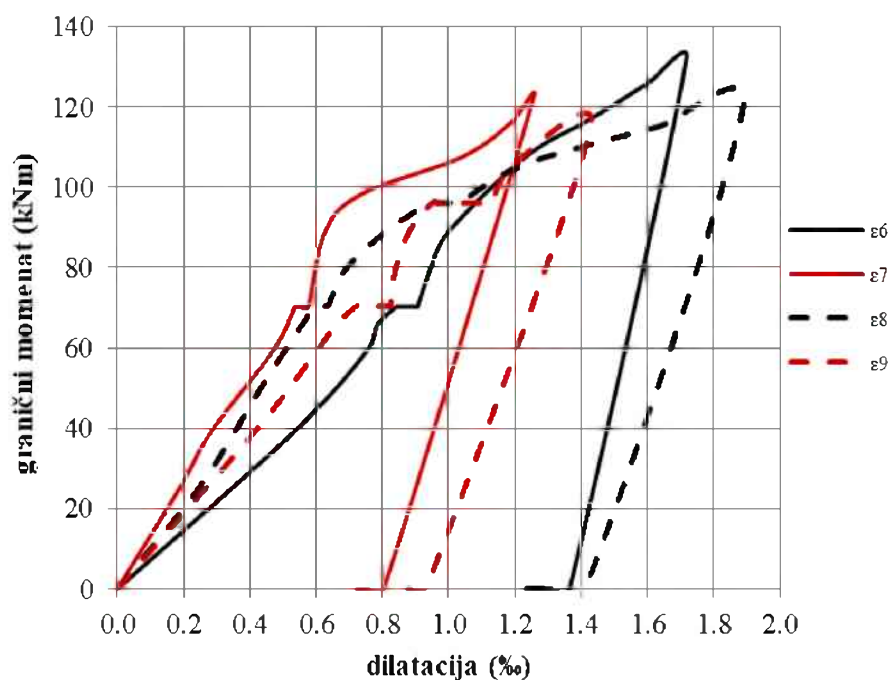
Zaostale deformacije su velike kod svih greda, naročito kod onih opterećenih većim nivoom opterećenja (slika 6.3), što se može konstatovati kao stabilizacija naponsko-deformacijskog stanja tokom vremena.



Slika 6.3 Dilatacije u zategnutoj zoni betona

6.1.3.2. Deformacije u pritisnutom betonu

Iz dijagrama 6.4 vidi se da se sve grede ponašaju slično, pri čemu se uočava značajan uticaj dužine ojačanja na krajnje deformacije u pritisnutoj zoni betona.

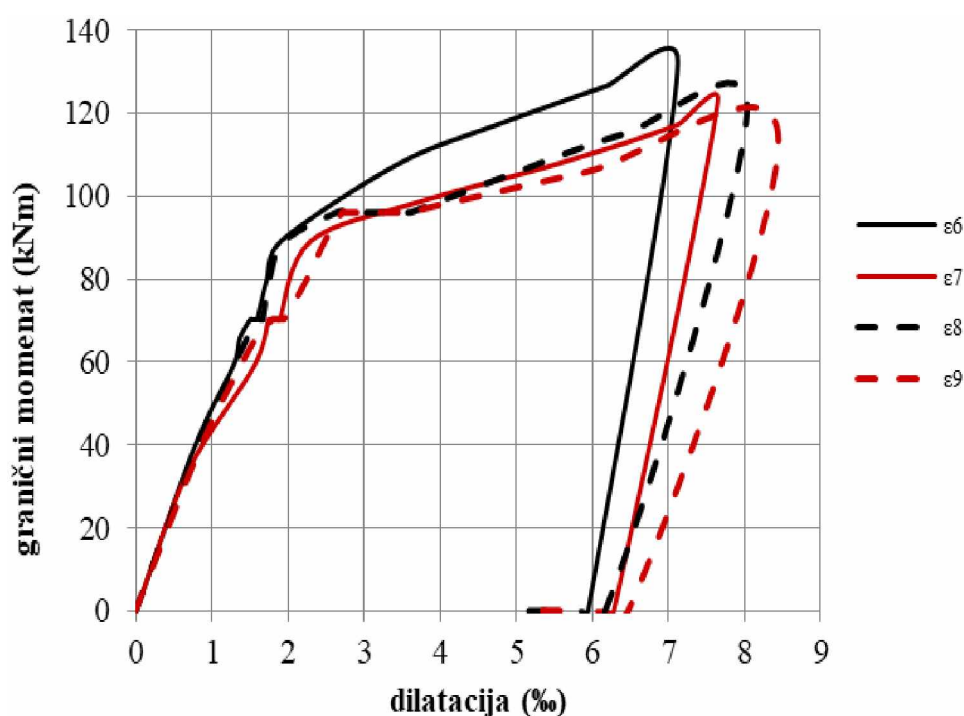


Slika 6.4 Dilatacije u pritisnutoj zoni betona

One su kod greda ojačanih dužim trakama (G6 i G8) veće za 32-37%. Uticaj povećanja nivoa dugotrajnog opterećenja odražava se na porast ovih deformacije za 10-14%.

6.1.3.3. Deformacije karbonske trake

Najveće deformacije, kao što je očekivano, javile su se u sredini trake svih greda. Na krajevima traka deformacije su zanemarljive. Kraće trake su podložnije uticaju dugotrajnog opterećenja. Veći nivo opterećenja utiče na povećanje deformacija i kraćih i dužih karbonskih traka (slika 6.5). Kod svih greda registrovane su značajne zaostale deformacije nakon rasterećenja. Ovo se može tumačiti simultanim efektima zaostalog naponsko-deformacijskog stanja od sopstvene težine i tečenja u karbonskoj traci.



Slika 6.5 Dilatacije u karbonskim trakama

6.1.4. Prsline u betonu

Pojava i razvoj prsline praćeni su detaljno, a njihova mapa je propisno izvedena za svaki inkrement, počevši od trenutka nastanka prve prsline pa sve do loma. Kod greda ispitanih na dugotrajno opterećenje prve prsline pojavile su se pri sili od 45 kN kod greda ojačanih kraćim trakama, odnosno 50-55 kN kod greda ojačanih dužim trakama. Tokom vremena

nije došlo do značajnog formiranja novih većih prslina, već samo do širenja starih i to uglavnom pri većim nivoima opterećenja. Srednji razmak između prslina bio je u rasponu od 16 do 18 cm. Uticaj dugotrajnog opterećenja ogleda se u povećanju kritičnih dijagonalnih prslina koje su bile uzročnici loma kod greda ojačanih kraćim trakama. Šema prslina data je u Prilogu C2.

6.1.5. Mehanizam loma grede

Dužina ojačanja je parametar koji igra značajnu ulogu u jačini veze traka-beton, a samim tim i kod mehanizma loma ojačanih greda [21], [40]. Rezultati nekih istraživanja ukazali su na to da povećanje dužine CFRP ojačanja, bilo da se radi o ojačanju na smicanje ili savijanje, povećava kapacitet nosivosti grede [34], [43]. Takođe je utvrđeno da efikasnost same tehnike ojačavanja greda opterećenih na savijanje zavisi od ovog parametra, imajući u vidu da je najčešći tip loma u ovim gredama bio usljed odvajanja trake [10].

Ispitivanje greda G7 i G9 potvrdilo je zaključke iz radova [11], [33], [43], a koji se odnose na uticaj dužine ojačanja na tip loma. Autori ovih radova tvrdili su da će uzorci ojačani kraćom trakom prije doživjeti lom usljed njenog odvajanja u odnosu na uzorke ojačane dužom trakom. Prema njihovim istraživanjima, u slučaju kada se za ojačanja armirano-betonskih greda koriste duže trake, njihov lom se dešavao zbog iskorišćenja nosivosti trake i njenog pucanja. Slična situacija desila se i u predmetnom ispitivanju (sl. 6.6 i 6.7).



Slika 6.6 Lom grede G7



Slika 6.7 KDP kao uzročnik loma i odvajanje CFRP trake grede G9

Usljed loma greda ojačanih kraćim trakama došlo je do njihovog djelimičnog odvajanja, i to uglavnom zajedno sa zaštitnim slojem betona.

U slučaju greda G6 i G8, ojačanih dužim trakama, došlo je do loma po betonu, pa nije u potpunosti iskorišćen kapacitet primijenjenog ojačanja (slika 6.8).



Slika 6.8 Lom grede G6

6.1.6. Zaključna razmatranja

Nakon sprovedenog sopstvenog ispitivanja uzoraka u prirodnoj veličini, izloženih dejstvu ravnomjernog dugotrajnog opterećenja, moguće je donijeti zaključke u vezi uticaja ispitivanih parametara.

6.1.6.1. Granični momenat savijanja

Kod greda ojačanih dužim trakama uočava se relativno mali porast kapaciteta nosivosti, u odnosu na grede ojačane kraćim trakama. Granična nosivost ojačanih greda je niža pri većem nivou dugotrajnog opterećenja.

6.1.6.2. Ugibi

Na veličinu krajnjih ugiba značajan uticaj imaju oba razmatrana parametra – dužina ojačanja i nivo dugotrajnog ravnomjernog opterećenja. Najveći ugib doživjela je greda ojačana dužom trakom, opterećena većim nivoom opterećenja.

Na osnovu proračuna ugiba prikazanog u Prilogu G, dat je predlog za ograničavanje ugiba na veličinu $l/150$ umjesto $l/300$.

6.1.6.3. Deformacije

Dužina trake ima značajan uticaj kod veličine deformacija u pritisnutom betonu, ali zanemarljiv kod deformacija u zategnutom betonu. Međutim, evidentan je porast ovih deformacija usljed porasta nivoa dugotrajnog opterećenja, dok na deformacije u pritisnutoj zoni betona ovaj parametar nema značajan uticaj.

Deformacije u karbonskim trakama su veoma slične za sve grede, skoro nezavisne od uticaja razmatranih parametara.

6.1.6.4. Prsline

Na momenat pojave prve prsline utiče dužina CFRP trake. Kod greda ojačanih kraćom trakom prsline su se pojavile ranije nego kod greda ojačanih dužom trakom. Dužina ojačanja, međutim, nema značajan uticaj na širinu graničnih prslina, kao ni na sliku prslina. Povećanje nivoa dugotrajnog opterećenja izaziva povećanje širine graničnih prslina.

6.1.6.5. Mehanizam loma

Nakon završenog eksperimentalnog ispitivanja ojačanih armirano-betonskih greda na dejstvo dugotrajnog opterećenja, sprovedena je analiza rezultata gdje je, između ostalog, razmatran uticaj dužine ojačanja na tip loma. Zaključeno je da je potrebno koristiti CFRP trake dužine veće od polovine grede kako bi izbjegli lom usljed odvajanja trake, koji je nepoželjan. Efekat prijanjanja nije razmatran, ali u ovom slučaju ne bi bio od značaja, s obzirom da se prilikom odvajanja lom desio djelimično i po zaštitnom sloju. CFRP trake dužine 6 metara, što čini 80% raspona grede, pokazale su se kao dobar izbor pri formiranju povoljnog mehanizma loma. One su doživjele veće ugibe od greda ojačanih kraćim trakama, ali nije došlo do odvajanja trake već se desio lom po pritisnutom betonu.

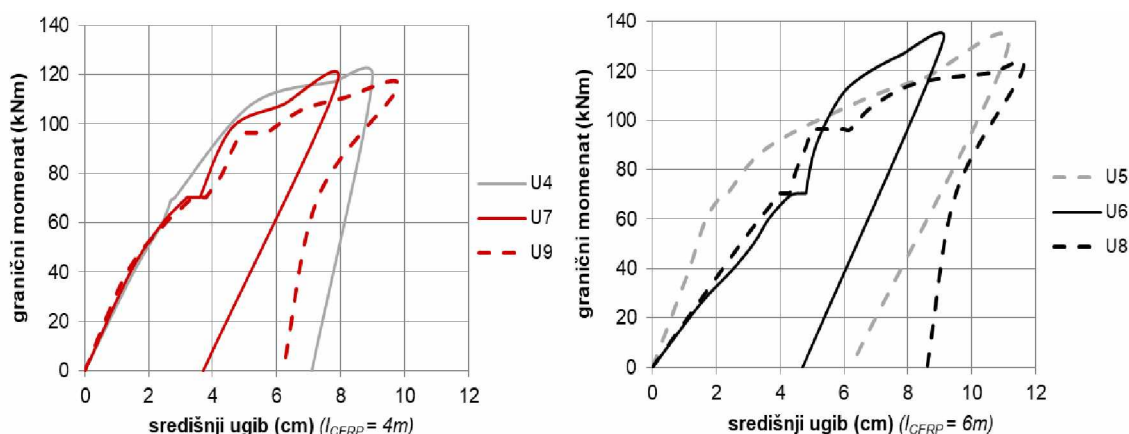
6.2. Uporedna analiza rezultata dobijenih dejstvom kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja

Vršeno je poređenje rezultata dobijenih ispitivanjem greda G4 i G5, opterećenih kratkotrajnim ravnomjernim opterećenjem i greda G6 - G9, opterećenih dugotrajnim ravnomjernim opterećenjem.

6.2.1. Granična nosivost greda

Usljed dejstva oba razmatrana tipa opterećenja, dolazi do povećanja granične nosivosti ojačanih greda u odnosu na kontrolne. Razlika u prirastu nosivosti je veoma mala između ojačanih greda ali je ipak izraženija kod greda ojačanih dužim trakama. Porast nosivosti je skoro nezavistan od dužine trajanja opterećenja, s obzirom da iznosi 5-8% pri dejstvu kratkotrajnog, odnosno 4-7% pri dejstvu dugotrajnog opterećenja, u korist greda ojačanih dužim trakama.

6.2.2. Ugibi



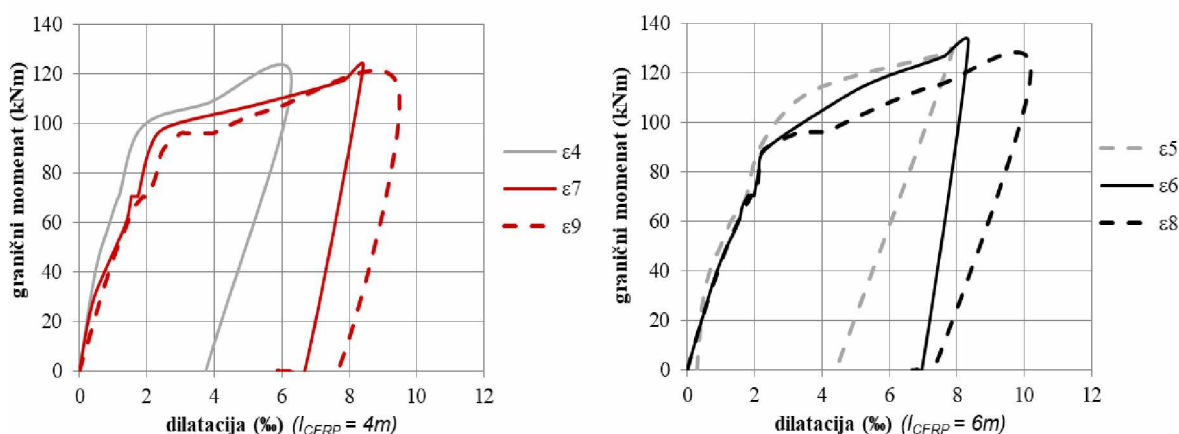
Slika 6.9 Uporedna analiza veličine ugiba ispitivanih greda

Dužina trajanja opterećenja nema značajan uticaj na ponašanje greda ojačanih kraćom trakom, ali intenzitet tog opterećenja ima. Povećanje nivoa napona izaziva i povećanje prirasta ugiba tokom vremena. Ovo povećanje nije od naročitog značaja kod ojačanja dužom trakom (slika 6.9).

Veći ugibi registrovani su kod greda ojačanih dužim trakama i u slučaju dejstva kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja, uz odgovarajući prirast nosivosti.

Izrazito veliki zaostali ugibi kod kratkotrajno opterećene grede G4 posljedica su „brzine loma“. Naime, nagli lom koji je nastao odvajanjem trake istovremeno je uzrokovao i lom pritisnutog betona, što se odrazilo na veličinu plastičnih deformacija.

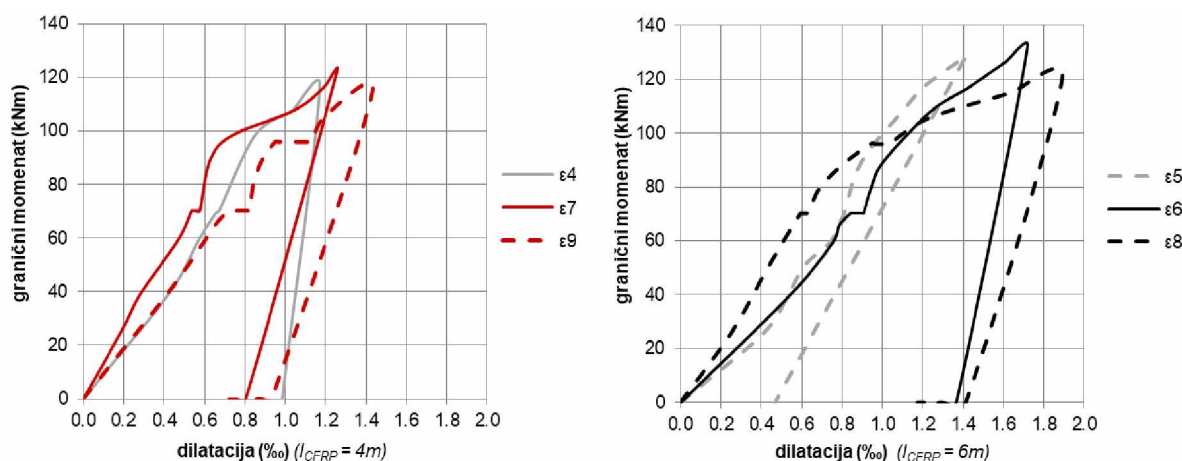
6.2.3. Deformacije u zategnutom betonu



Slika 6.10 Uporedna analiza veličine dilatacija u zategnutom betonu

Sve grede se ponašaju slično, skoro pravolinijski, do postizanja dilatacije od oko 2‰ pri graničnom momentu od oko 90 kNm. Grede ojačane dužom trakom se do tog nivoa opterećenja ponašaju skoro identično, nakon čega dolazi do naglog porasta dilatacija. Sa dijagrama 6.10 može se zaključiti da je uticaj nižeg nivoa dugotrajnog opterećenja na dilatacije u zategnutom betonu ojačanih greda zanemarljiv. Uticaj dužine ojačanja je od značaja kod određivanja konačne vrijednosti dilatacije u zategnutom betonskom presjeku pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja i uzrokovao je razliku od oko 25% u korist duže trake. Kod dilatacija pod dejstvom dugotrajnog opterećenja ova razlika je mala i iznosi svega 8%, takođe u korist grede ojačane dužom trakom. Dužina ojačanja nije značajan parametar kod određivanja dilatacija u zategnutom betonu, kao što je to slučaj kod ispitivanja na kratkotrajno opterećenje. Sa porastom dužine ojačanja rastu i dilatacije u zategnutom betonu. Konačne vrijednosti dilatacije su veće kod ispitivanja na dejstvo dugotrajnog opterećenja i to čak 50% kod greda ojačanih dužom trakom i opterećenim većim nivoom opterećenja (slika 6.10).

6.2.4. Deformacije u pritisnutom betonu

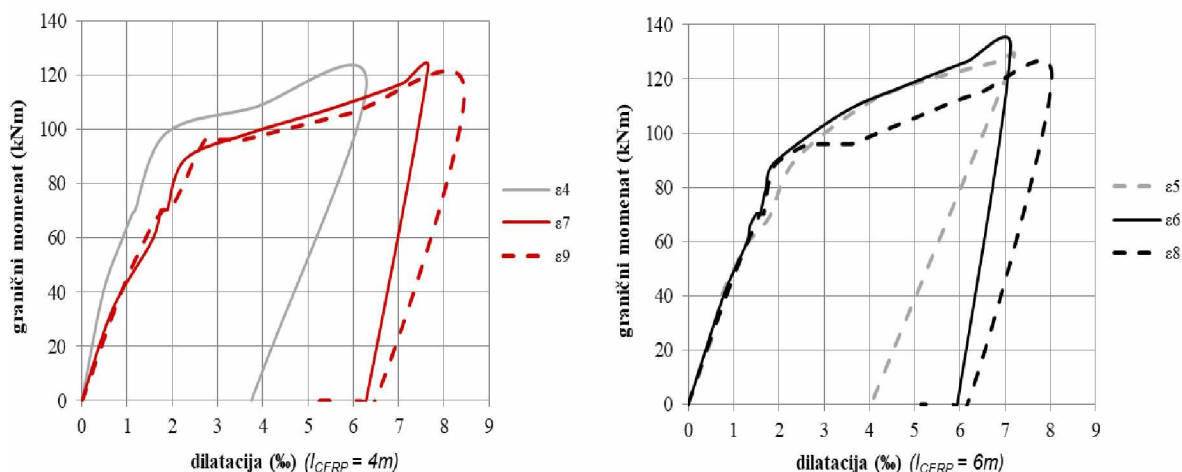


Slika 6.11 Uporedna analiza veličine dilatacija u pritisnutom betonu

Dužina trake ima značajan uticaj kod veličine deformacija u pritisnutom betonu. Sa porastom dužine ojačanja rastu i dilatacije u pritisnutom betonu. Konačne dilatacije su veće kod ispitivanja na dejstvo dugotrajnog opterećenja i to značajno kod greda ojačanih dužom trakom. One rastu sa porastom nivoa opterećenja (slika 6.11).

6.2.5. Deformacije karbonske trake

Dugotrajno opterećenje ima značajniji uticaj na veličinu dilatacija kraćih karbonskih traka, dok se kod dužih traka odražava uglavnom na veličinu zaostalih (trajnih) dilatacija. Kod nanošenja većih nivoa opterećenja dolazi do porasta dilatacija kod svih ispitivanih CFRP traka (slika 6.12).



Slika 6.12 Uporedna analiza veličine dilatacija karbonskih traka

6.2.6. Prsline u betonu

Slika prslina je ostala stabilna u oba slučaja tj. usljed dejstva kratkotrajnog i dugotrajnog ravnomjernog opterećenja. Nije došlo do značajnog formiranja novih većih prslina tokom vremena, već samo do širenja starih i to uglavnom pri većim nivoima opterećenja.

6.3. Ponašanje ojačanih armirano-betonskih greda usljed vremenskih deformacija

6.3.1. Uvod

U ovom poglavlju prezentirani su eksperimentalni rezultati nekih značajnijih ispitivanja na dugotrajno opterećenje. Posebna pažnja se poklanja analizi rezultata ispitivanja armirano-betonskih elemenata usljed dugotrajnog dejstva konstantnog, ravnomjernog opterećenja. Zaključeno je da deformacije nastale usljed dugotrajnog opterećenja mogu uticati na pojavu tzv. „odloženog loma“, tj. pojavu deformacija tečenja u pritisnutoj zoni betona i u kompozitnom materijalu. Ove deformacije su plastičnog karaktera nakon rasterećenja. Kada se grede ponovo kratkotrajno opterete, deformacije rastu i to počevši od zaostale deformacije od dugotrajnog opterećenja. To utiče na pad nosivosti tih uzoraka u odnosu na one koji su opterećivani samo kratkotrajno [5].

U radu [4] različiti nivoi dugotrajnog opterećenja kretali su se u granicama od 59% do 78% nosivosti neojačane grede. Autori su došli do zaključka da, pri navedenom nivou opterećenja, ojačane grede doživljavaju manje dugotrajne deformacije nego neojačane. Takođe je zaključeno i da spoljašnje ojačanje nema značajan uticaj na dugotrajne deformacije ojačanih greda, što je potvrđeno i drugim istraživanjima [69]. Međutim, ovaj zaključak važi, uglavnom, za tečenje pritisnutog betona pri radnim nivoima napona.

Male vrijednosti dugotrajnih deformacija kod ojačanih elemenata su posljedica uticaja pritisnute čelične armature. Naime, raniji istraživači su zaključili da je ona veoma efikasna u smanjenju dugotrajnih deformacija prostih armirano-betonskih greda [63], [70].

Povećanje procenta armiranja FRP materijalom smanjuje kako trenutnu, tako i deformaciju tečenja [65]. Autori rada [71] potvrdili su taj zaključak, mada samo u pogledu deformacija tečenja.

Ponašanje usljed tečenja ojačanih betonskih elemenata ispitivano je i u radovima [72] i [73]. Autori su zaključili da FRP ojačanje povoljno utiče na ponašanje uzoraka izloženih tečenju. Takođe ističu da se upotrebom različitih lijepkova može postići željeno ponašanje ispitivanih uzoraka. Nažalost, na našem tržištu još uvijek nije prisutan dobar

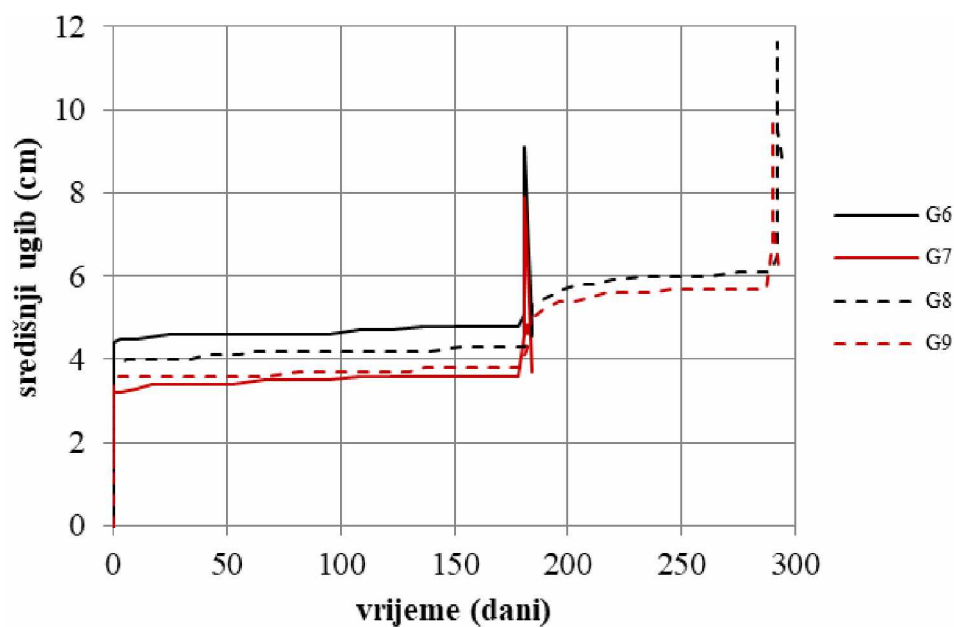
izbor lijepkova, jer je i sama tehnika ojačavanja konstrukcija kod nas u početnoj fazi, mada je u svijetu aktuelna već više decenija.

Međutim, u radu [52] došlo se do suprotnog zaključka. Naime, autor tvrdi da je ponašanje ojačanih greda pod konstantnim opterećenjem uglavnom praćeno tečenjem pritisnutog betona, a da ne zavisi od vremenskih karakteristika upotrijebljenog lijepka, kako se smatralo. Taj zaključak je izveden ispitivanjem na dugotrajno konstantno dejstvo neojačane i CFRP ojačana grede, pri čemu su one doživjele slično i proporcionalno tečenje. Autor takođe tvrdi da je kod ovih ispitivanja, pored deformacija tečenja, značajan i nivo opterećenja, jer može izazvati lom usljed tečenja CFRP materijala, čak i pri vrijednostima koje su niže od njegove nosivosti na kratkotrajno opterećenje. Ovaj kompozitni materijal uglavnom izdržava dugotrajno opterećenje do 80% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, dok su za ostale FRP materijale ovi nivoi opterećenja znatno niži [74], [75]. Nivo dopuštenog napona zavisi od izabranog sistema ojačanja, orijentacije vlakana, kao i zapreminskog učešća vlakana u kompozitnom materijalu.

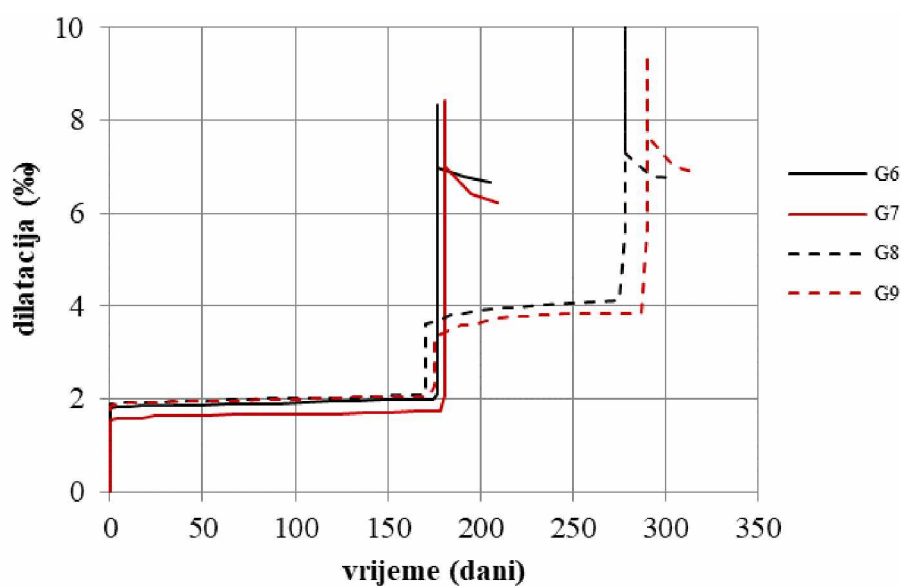
6.3.2. Rezultati ponašanja ojačanih uzoraka usljed vremenskih deformacija

U ovom radu izvršeno je ispitivanje ponašanja armirano-betonskih greda ojačanih karbonskim trakama, u toku vremena. Cilj je bio utvrditi uticaj spoljašnjeg ojačanja starijih modela na konačno tečenje pri većim nivoima napona. Poznato je da se tečenje betona sa starošću znatno smanjuje, ali i veoma stari betoni to svojstvo zadržavaju. S obzirom da se u ovom radu vrši ojačavanje starih konstruktivnih elemenata, a imajući u vidu da su vremenske deformacije same trake veoma male, tečenje se uglavnom ne uzima u obzir kod dimenzionisanja CFRP spoljašnje ojačanih betonskih elemenata [52].

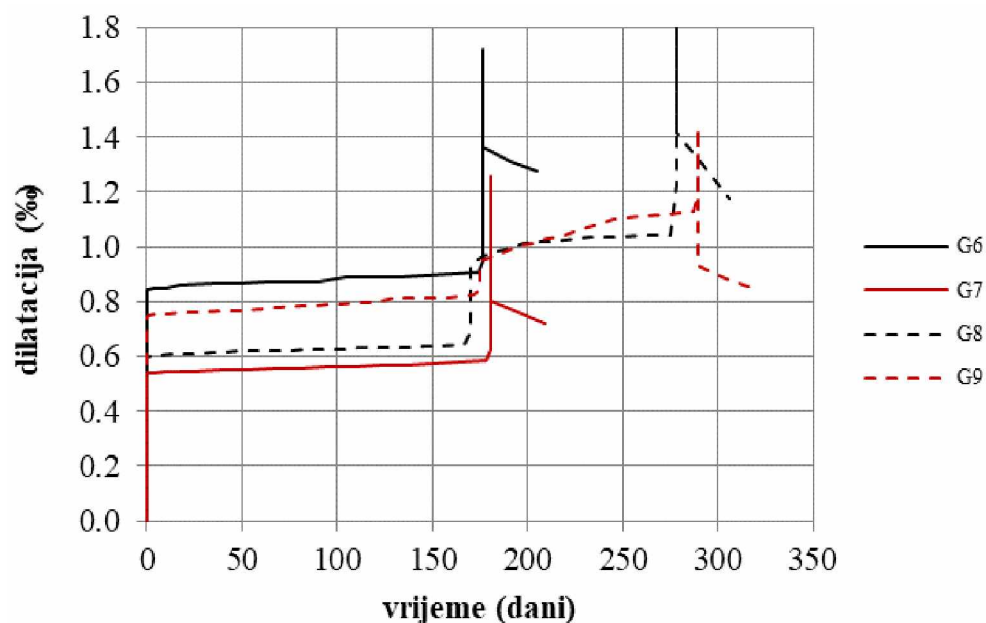
Rezultati navedenog ispitivanja predstavljeni su dijagramima 6.13 – 6.16, dok su odgovarajuće tabele date u Prilogu B2.



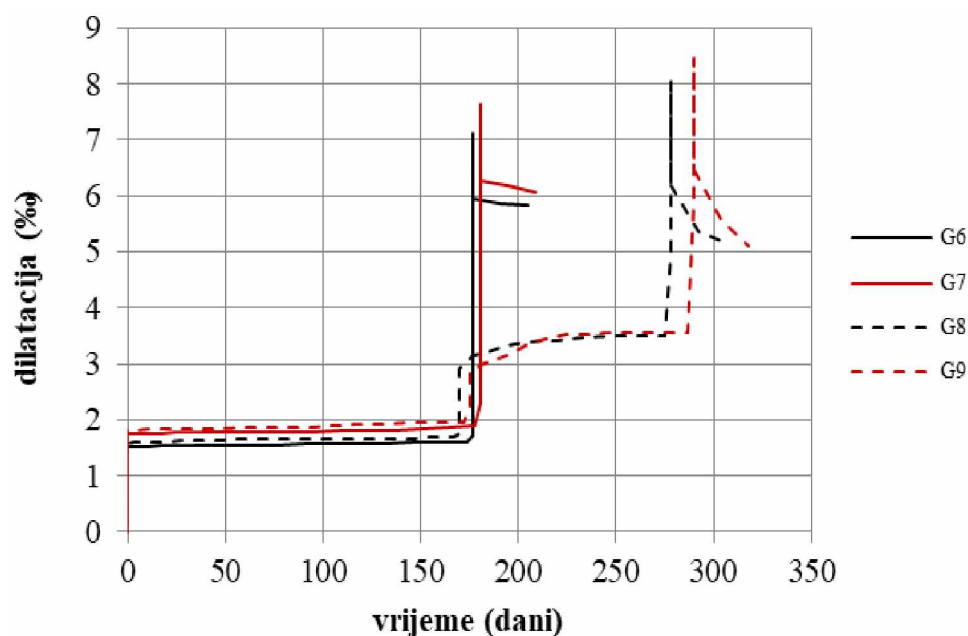
Slika 6.13 Dijagram ugiba u toku vremena



Slika 6.14 Dijagram dilatacija u zategnutom betonu u toku vremena



Slika 6.15 Dijagram dilatacija u pritisnutom betonu u toku vremena



Slika 6.16 Dijagram dilatacija u karbonskoj traci u toku vremena

6.3.3. Analiza rezultata sopstvenog eksperimentalnog istraživanja

Analizom zaključaka prethodnih istraživanja odlučeno je da će se predmetno ispitivanje vršiti opterećivanjem sa 55%, odnosno 60% nosivosti na kratkotrajno opterećenje ojačanih greda, za grede ojačane dužom, odnosno kraćom trakom.

Sve četiri grede (G6-G9) opterećene su ravnomjerno podijeljenim teretom po cijeloj dužini, u trajanju od 6 mjeseci. U ovom periodu vršena su stalna očitavanja potrebnih podataka radi proučavanja efekata tečenja betona, prema tačno utvrđenom programu za sve grede. Nakon analize rezultata na kraju tog perioda, bilo je evidentno da uzorci ne reaguju značajno na ovaj nivo opterećenja. Porast ugiba iznosio je svega 9-12%, porast deformacija u zategnutom betonu 9-13%, porast deformacija u pritisnutom betonu svega 7-11%, dok su vremenske deformacije karbonskih traka za 6 mjeseci porasle 6-8% (tabela 6.1). Stoga su samo dvije grede ispitane do loma, dok su preostale dvije grede u sljedećoj fazi dodatno opterećene većim nivoom opterećenja. To opterećenje iznosilo je 75% i 85% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, što je blizu gornje granice dozvoljenih napona kod ojačanja karbonskim trakama.

U trenutku nanošenja dodatnog opterećenja javila se i dodatna trenutna elastična deformacija. Nakon toga se u praksi mogu javiti tri karakteristična slučaja tečenja, kao što je opisano u tački 3.6.1.2. Međutim, u predmetnom eksperimentu ne postoji prvi slučaj, tj. primarno tečenje. Naime, kako se radi o uzorcima starim više od 10 godina, beton je taj brzi prirast deformacije, tzv. tečenje tokom očvršćavanja i trajanja dejstva od sopstvene težine, doživio za taj period. Sa dijagrama se jasno uočava zona nepromjenljivog tečenja kada je brzina deformacije postala praktično konstantna, ali veoma mala. Prirast svih razmatranih veličina u funkciji vremena ima minimalnu vrijednost. To ukazuje na činjenicu da se materijal nalazi u zoni sekundarnog - stalnog tečenja, ali ipak ne dolazi do loma. U ovom slučaju deformacije tečenja su imale postepeni, blagi porast i težile su ka konačnim vrijednostima. Iako su predmetni uzorci bili izloženi izuzetno visokim naponima, kojim se smatraju oni iznad 40-45% čvrstoće, nije se javilo tercijarno tečenje. Grede su na taj način bile opterećene 4 mjeseca, sve do stabilizacije procesa. Analizom ponašanja modela u toku vremena zaključeno je da nema indikacija da daljim zadržavanjem opterećenja može doći do porasta deformacija, koji bi eventualno izazvao lom materijala. Nakon isteka predviđenog perioda nastavljeno je opterećivanje modela do loma na isti način kao kod ispitivanja na dejstvo kratkotrajnog opterećenja.

Iz dijagrama 6.13 - 6.16 vidi se da konstantno dugotrajno opterećenje izaziva pojavu deformacije tečenja betona, kao i deformaciju tečenja u CFRP trakama. Prirast ovih

deformacija je vrlo mali kada se radi o nižim nivoima napona. Tek se kod dvije grede naknadno opterećene većim nivoima opterećenja (G8 i G9) registruje nešto veći porast deformacija, koji takođe nije značajan u tolikoj mjeri da bi negativno uticao na ponašanje predmetnih modela. Ovakav rezultat je i očekivan, uzevši u obzir starost uzoraka koji se ojačavaju, kao i činjenicu da CFRP doživljava zanemarljivo tečenje u odnosu na ostale FRP materijale.

Tabela 6.1 Maksimalne dilatacije greda u toku vremena

Ugibi	$\varepsilon_{el,1}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,1}$ (‰)	$\varepsilon_{el,2}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,2}$ (‰)	$\varepsilon_{el,pov}$ (‰)	$\varphi_{teč,1}$	$\varphi_{teč,2}$
G6	4.40	0.40	/	/	4.40	0.09	/
G7	3.20	0.40	/	/	4.20	0.12	/
G8	3.90	0.40	1.00	0.80	3.00	0.10	0.24
G9	3.40	0.40	1.10	0.80	3.60	0.12	0.27

Dilatacije u zategnutom betonu	$\varepsilon_{el,1}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,1}$ (‰)	$\varepsilon_{el,2}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,2}$ (‰)	$\varepsilon_{el,pov}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,pov}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,nep}$ (‰)	$\varphi_{teč,1}$	$\varphi_{teč,2}$
G6	1.81	0.18	/	/	1.37	0.30	6.66	0.10	/
G7	1.54	0.20	/	/	1.40	0.79	6.22	0.13	/
G8	1.89	0.18	1.54	0.51	2.87	0.55	6.77	0.09	0.20
G9	1.84	0.20	1.29	0.52	1.77	0.80	6.86	0.11	0.33

Dilatacije u pritisnutom betonu	$\varepsilon_{el,1}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,1}$ (‰)	$\varepsilon_{el,2}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,2}$ (‰)	$\varepsilon_{el,pov}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,pov}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,nep}$ (‰)	$\varphi_{teč,1}$	$\varphi_{teč,2}$
G6	0.84	0.06	/	/	0.35	0.09	1.27	0.08	/
G7	0.54	0.05	/	/	0.45	0.08	0.72	0.09	/
G8	0.59	0.05	0.30	0.11	0.48	0.24	6.77	0.08	0.17
G9	0.74	0.08	0.13	0.18	0.50	0.09	0.85	0.11	0.30

Dilatacije u karbonskoj traci	$\varepsilon_{el,1}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,1}$ (‰)	$\varepsilon_{el,2}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,2}$ (‰)	$\varepsilon_{el,pov}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,pov}$ (‰)	$\varepsilon_{teč,nep}$ (‰)	$\varphi_{teč,1}$	$\varphi_{teč,2}$
G6	1.50	0.09	/	/	1.18	0.10	5.85	0.06	/
G7	1.74	0.15	/	/	1.37	0.22	6.06	0.08	/
G8	1.58	0.09	1.23	0.61	1.87	1.02	6.77	0.06	0.25
G9	1.80	0.15	0.92	0.69	1.97	1.37	5.11	0.08	0.31

Parametri od kojih zavisi tečenje betona, razmatrani u tački 3.6.1.3, uglavnom se odnose na mlad beton. Zaključeno je da je za krajnju vrijednost i vremenski tok deformacije tečenja bitna starost betona u vrijeme kada je prvi put opterećen, kao i trajanje i intenzitet opterećenja. Samim tim, i koeficijent tečenja se mijenja slično promjeni deformacije tečenja, tj. u funkciji je od vremena i nezavistan je od nanešenog opterećenja.

6.3.4. Ispitivanje tečenja starih betonskih uzoraka

Ispitivanje vremenskih deformacija starog betona je za obje serije praćeno na po 6 kontrolnih betonskih cilindara dimenzija 15/30 cm, u istim termohigrometrijskim uslovima u laboratoriji gdje su ispitivane grede – modeli. Za prvu seriju usvojena je vrijednost konstantnog napona pritiska od $0.55 f_b$, kako bi se simuliralo slično naponsko stanje u maksimalno pritisnutom presjeku ispitivanih greda. Može se smatrati da je ovo naponsko stanje još uvijek u linearnom dijelu radnog dijagrama betona.

Uzorci su opterećeni u parovima u uređajima za dugotrajno opterećenje (slika 4.13), pri čemu je održavana konstantna sila pritiska, koja se mogla kontrolisati preko mehaničkih mjerača sile. Elastične deformacije i deformacije tečenja mjerene su pomoću mjernih traka, koje su postavljane duž tri izvodnice, tako da su, gledano u osnovi, raspoređene pod uglom od 120° . Dodatno je, radi kontrole, vršeno mjerenje mehaničkim deformetrom „Montetoyo“, osjetljivosti 1/1000mm, sa digitalnim očitavanjem. Očitavanje deformacija vršeno je prilikom nanošenja opterećenja, zatim narednog dana, a nakon toga na svakih sedam dana u prvom mjesecu. Kasnije je očitavanje vršeno jednom mjesečno, a nakon 6 mjeseci uzorci su opterećivani do loma u hidrauličnoj presi. Pretpostavlja se da je skupljanje starih betonskih uzoraka u cjelini okončano.

Obradom rezultata ispitivanja dobijene su srednje vrijednosti dilatacija i prosječna vrijednost koeficijenta tečenja starog betona (tabela 6.2).

Potpuno ista procedura sprovedena je na drugoj seriji, s tim što je nakon šest mjeseci povećano opterećenje do nivoa od oko $0.85 f_b$, a mjerenje deformacija nastavljeno još četiri mjeseca, kada su uzorci ispitivani do loma u hidrauličnoj presi. Ovaj nivo naprezanja svakako pripada nelinearnom dijelu radnog dijagrama betona.

Tabela 6.2 Rezultati ispitivanja tečenja na kontrolnim betonskim cilindrima

	P₀ (kN)	P_e (kN)	σ = const (MPa)	E_b (t₀) (GPa)	ε_{el} (‰)	ε_{t,max} (‰)	φ_t (t=6mj.)	φ_t (t=10mj.)
Seriya I	10	350	19.8	32.45	0.61	0.15	0.24	/
Seriya II	10	400+210	22.6+12.0	36.05	0.66+0.44	0.15/0.33	0.25	0.27

Upoređujući rezultate prirasta vremenskih deformacija na gredama i na kontrolnim uzorcima, mogu se konstatovati skoro dva puta veće vrijednosti kod kontrolnih betonskih uzoraka u odnosu na deformacije dobijene na gredama. Treba imati na umu da su stare grede već u toku „eksploatacije“ (dejstvo sopstvene težine) bile izložene uticajima vremenskih deformacija, a kontrolni betonski uzorci samo deformacijama skupljanja betona. Može se dakle zaključiti da su deformacije tečenja kod greda djelimično obavljene, čime se mogu objasniti veće deformacije tečenja kontrolnih betonskih uzoraka.

U oba slučaja su, međutim, ove deformacije male, tako da se grubo može računati povećanje usljed deformacija tečenja starih uzoraka za svega 10% u odnosu na elastične deformacije.

Izmjerene dilatacije na gredama tokom vremena, vrlo malo se mijenjaju usljed svakodnevnih ambijentalnih promjena temperature i vlažnosti, što je i očekivano budući da se radi o starim modelima.

Na osnovu naučnih istraživanja i ispitivanja autora [76], [77] na realnim armirano-betonskim elementima u istoj laboratoriji i sličnim uslovima, permanentna promjena termo–higrometrijskih uslova se pokazala kao parametar sa zanemarljivim uticajem na konačne vrijednosti vremenskih deformacija.

Pri tome se u oba slučaja, jasno uočava trend prirasta vremenskih deformacija, koji je razumljivo izraženiji kod mlađih uzoraka.

6.3.5. Zaključna razmatranja

Ovim eksperimentom potvrđeni su zaključci ranijih istraživanja koji su ukazivali na nepostojanje loma usljed vremenskih deformacija greda ojačanih CFRP materijalom ukoliko je dugotrajno opterećenje ograničeno na 60% graničnog dejstva kratkotrajnog opterećenja [59]. Ovo istraživanje pomjera tu granicu na 75-85%, u zavisnosti od dužine ojačanja. Takođe, tvrdnja da povećanje procenta armiranja FRP materijalom smanjuje kako trenutnu tako i deformaciju tečenja [65], u predmetnom slučaju bi značila da su navedene deformacije manje kod greda ojačanih dužim trakama. Ti zaključci su djelimično potvrđeni, jer su grede ojačane dužim trakama doživjele manje deformacije tečenja ali ne i trenutne (elastične) deformacije. Samo su u slučaju mjerenja dilatacija u karbonskim trakama oba zaključka potvrđena.

Opsežnim ispitivanjem na dugotrajna dejstva dokazano je da za armirano-betonske grede određene starosti, ojačane karbonskim trakama minimalne dužine 0.8l, ne postoji opasnost da u toku vremena, u eksploatacionim uslovima, mogu biti dovedene u granično stanje loma. Ukoliko se još uzme u obzir inertnost CFRP materijala na kombinovani uticaj sredine i mehaničkog dejstva, preporučuje se njegova upotreba naročito u slučajevima kada konstrukcija, u oštrim uslovima sredine, treba da ponese značajan teret [52]. Ovi zaključci važe samo u slučaju ravnomjernog opterećenja, dok bi u slučaju koncentrisanog tereta bilo poželjno koristiti dodatna poprečna ojačanja.

7. NUMERIČKA ANALIZA OJAČANIH GREDA

7.1. Uvod u numeričku analizu primjenom programskog paketa ANSYS

Programski paket ANSYS koristili su mnogi istraživači za modelovanje armirano-betonskih konstrukcija primjenom metode konačnih elemenata (MKE). ANSYS predstavlja najrasprostranjenije softversko rješenje u raznim industrijskim oblastima, a broj modula za rješavanje različitih inženjerskih problema putem numeričkih simulacija daje mogućnost za najobimniju analizu, kako mehanike deformabilnih tijela (solida), tako i mehanike fluida i elektromagnetne analize.

ANSYS je korišćen kod ispitivanja armirano-betonskih konstrukcija ojačanih FRP lamelama, uglavnom za analizu strukturnog ponašanja greda i mostova [78]. Metodologija zastupljena u ovom radu je ujedno i najčešće primjenjivana, i u njoj se za modelovanje betona, armature i FRP lamele koriste elementi SOLID65, LINK8 i SOLID46, respektivno. Slični primjeri se mogu naći i u radovima [79], [80] i [81]. Dodatna vrijednost dosadašnjih istraživanja ogleda se u komparativnoj analizi rezultata numeričke simulacije sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. Uočava se da se najčešće upoređuju nosivost, odnos ponašanja sila-ugib, kao i raspored prslina u graničnom stanju loma. Generalni zaključak je da numerički model sa nelinearnim ponašanjem na nivou materijalnih karakteristika relativno tačno predviđa ponašanje i odgovor ispitivanih armirano-betonskih greda i spojeva greda sa stubom.

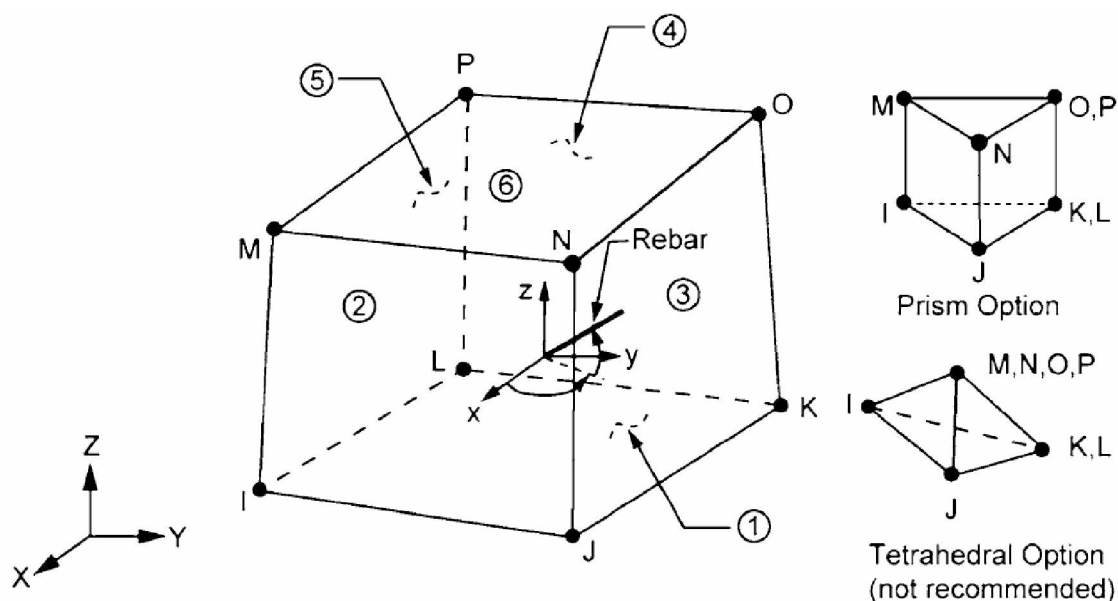
Vezano za pristup modelovanja FRP trake, uočava se i alternativna metodologija koja podrazumijeva primjenu konačnih elemenata tipa ljuske [82], [83]. Ovaj pristup donekle pojednostavljuje numeričku formulaciju, dok sa druge strane realistično predviđa koncentraciju napona u betonu na krajevima FRP traka, što je potvrđeno eksperimentom.

7.1.1. Beton

U razmatranoj verziji programskog paketa ANSYS [84] postoje dva načina za modelovanje betonskog elementa. Novi proračunski kapaciteti odnose se na primjenu *Microplane* modela koji se zasniva na konceptu energije loma. Međutim, zbog

nedovoljno dostupnih literaturnih izvora i naučnih radova koji primjenjuju ovu metodologiju, u okviru disertacije korišćen je klasični pristup, koji postoji u programu više decenija u modifikovanom obliku.

SOLID65 je element koji se koristi za 3D modelovanje krutih tijela sa ili bez armature. Ovaj element se kida pri zatezanju i lomi pri pritisku. Element je definisan pomoću 8 čvorova sa po tri stepena slobode u svakom: translatorno u x , y i z pravcu. Na slici 7.1 prikazana je geometrija elementa SOLID65. Najviše tri različite vrste armature se mogu definisati kao ekvivalentna razmazana armatura (*smeared reinforcement*), tj. ravnomjerno raspoređena armatura u svakom pravcu, određena procentualno u odnosu na površinu poprečnog presjeka šipki i njihov razmak. SOLID65 je u stanju da se plastično deformiše i da teče.



Slika 7.1 Konačni element SOLID65 [84]

ANSYS koristi William-Warnke kriterijum loma. Funkcija loma ima pet parametara, koji se koriste kod određivanja putanje napona zatezanja i pritiska, a samim tim i pojave prslina i loma, u skladu sa definisanim radnim dijagramom materijala. Ovi parametri, neophodni za definisanje William-Warnke površine loma su:

- f_t - jednoaksijalna granična čvrstoća na zatezanje,
- f_c - jednoaksijalna granična čvrstoća na pritisak,

- f_{cb} - biaksijalna granična čvrstoća na pritisak,
- f_1 - triaksijalna čvrstoća na pritisak utegnutog elementa (*compressive meridian*) i
- f_2 - triaksijalna čvrstoća na pritisak utegnutog elementa (*tensile meridian*).

Svih pet ulaznih parametara su neophodni za definisanje površine loma (kao i okolno hidrostatsko naponsko stanje na kojima su bazirani parametri f_1 i f_2), dok ANSYS može stvoriti površinu loma sa minimum dvije konstante - jednoaksijalnom čvrstoćom na zatezanje i na pritisak. Za ostale parametre, ANSYS koristi zadate vrijednosti iz istraživanja [85].

Matrica krutosti betona je u linearnom stanju definisana na sljedeći način:

$$[D^c] = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} (1 - \nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1 - \nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1 - \nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1 - 2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1 - 2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1 - 2\nu)}{2} \end{bmatrix}$$

gdje su:

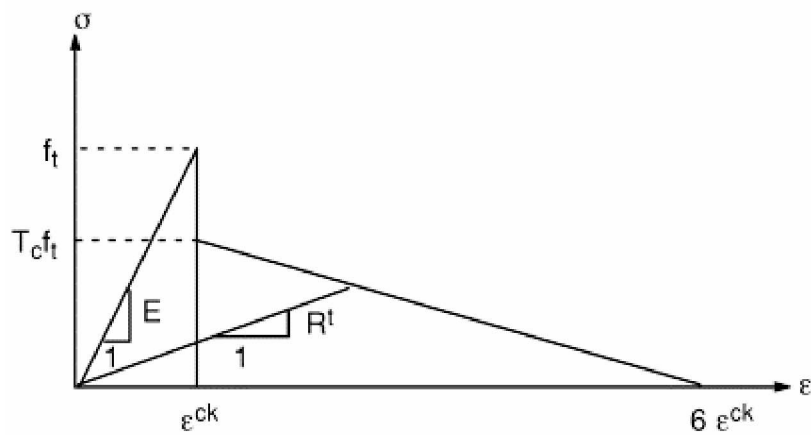
E i ν - Young-ov modul elastičnosti betona i Poisson-ov koeficijent, respektivno.

Ova relacija predstavlja generalizaciju ortotropne zavisnosti napona i dilatacija na nivo izotropnog materijala.

Sa druge strane, matrica krutosti u slučaju nelinearne zavisnosti elementa koji gubi nosivost u jednom pravcu, definisana je sa:

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1 + \nu)} \begin{bmatrix} \frac{R^t(1 + \nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{bmatrix}$$

gdje su R^t nagib, tj. sekantni modul definisan na slici 7.2, a β_t predstavlja koeficijent transfera smicanja (konstanta C1 u opciji TBDATA elementa SOLID65).



Slika 7.2 Ponašanje betona u ispucalom stanju [86]

Na slici 7.2, T_c predstavlja multiplikator koji služi za kontrolu modela krutosti, i isti djeluje kao multiplikator relaksacije napona.

U slučaju zatvaranja prsline, naponi pritiska upravni na ravan prsline prenose se u pravcu pružanja prsline, i tada je zavisnost definisana primjenom koeficijenta β_c (konstanta C2 u opciji TBDATA). U tom slučaju matrica krutosti postaje:

$$[D_c^{ek}] = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} (1 - \nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1 - \nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1 - \nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1 - 2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1 - 2\nu)}{2} \end{bmatrix}$$

Za lom koji nastaje u dva pravca matrica krutosti se transformiše:

$$[D_c^{ek}] = E \begin{bmatrix} \frac{R^I}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R^I}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1 + \nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1 + \nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1 + \nu)} \end{bmatrix}$$

dok za zatvaranje u oba pravca ova matrica postaje:

$$[D_c^{ek}] = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} (1 - \nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1 - \nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1 - \nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1 - 2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1 - 2\nu)}{2} \end{bmatrix}$$

Uočava se da gornja matrica sadrži sve dijagonalne elemente pa je, u slučaju kada se dešava prostorno zatvaranje prsline (u sva tri pravca), ponašanje potpuno identično površinskoj formulaciji.

Sa druge strane, krutost elementa ispucalog u tri pravca definiše se matricom:

$$[D_c^{ck}] = E \begin{bmatrix} \frac{R^I}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R^I}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R^I}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} \end{bmatrix}$$

Status pukotine/prsline definisan je dilatacijama integracionih tačaka, pri čemu važi:

$$\epsilon_{ck}^{ck} = \begin{cases} \epsilon_x^{ck} + \frac{\nu}{1-\nu} (\epsilon_y^{ck} + \epsilon_z^{ck}) & \text{- ukoliko nema pojave prsline;} \\ \epsilon_x^{ck} + \nu \epsilon_z^{ck} & \text{- ukoliko se prsline pojavi u y pravcu;} \\ \epsilon_x^{ck} & \text{- ukoliko se prsline pojavi u y i z pravcu.} \end{cases}$$

gdje su: ϵ_x^{ck} , ϵ_y^{ck} , and ϵ_z^{ck} - komponente dilatacija u pravcu pružanja prsline.

Procedura je iterativna i kada se pojavi pukotina u integracionoj tački, status se tretira kao otvoren u sledećoj iteraciji.

Iz svega navedenog, zaključuje se da ANSYS tretira William-Warnke funkciju kao površinski, a ne prostorni lom. Prije loma ponašanje je elastično, a nakon loma pri zatezanju ili drobljenja pri pritisku materijal potpuno propada i gubi kompletnu krutost. Za pravac prostiranja prsline nosivost na zatezanje se isključuje, a kada se prsline zatvori pritisak upravno na prsline prenosi se sa jednog na drugi element u pravcu pružanja prsline. Kao što se vidi iz prikazanih relacija, pojava prsline definisana je jedinstvenim svojstvom materijala a to je zatezna čvrstoća betona. Ovo naime predstavlja i najveći

nedostatak ove metodologije, jer je jasno da dostizanjem granične čvrstoće na zatezanje element gubi nosivost, što u slučaju prebrzog ili presporog nanošenja opterećenja dovodi do divergencije numeričkog postupka. Osim toga, i veličina elementa igra izuzetno važnu ulogu u postizanju veće tačnosti. Opšte priznato pravilo u metodi konačnih elemenata da, za granične uslove definisane geometrijom koja ne vodi ka singularnim rješenjima, povećanje broja konačnih elemenata vodi ka tačnijem rješenju, ovdje nije validno. Tako se u praktičnim problemima javlja potreba za uvođenjem fiktivnih krutosti ispucalih elemenata, čime se omogućava konvergencija nelinearnog rješenja (već navedena opcija KEYOPT(7)=1 kojom se uvodi multiplikator modela krutosti Tc). Dakle, da bi se razmotrila krutost usljed zatezanja, treba uzeti u obzir i relaksaciju napona nakon pojave prsline, kao što je prikazano na slici 7.2, a vrijednost koeficijenta Tc usvaja se na osnovu inženjerske procjene, bez jasno definisanih pravila o vrijednosti ovog parametra. U disertaciji je ovaj koeficijent variran u iznosu od 0.1 do 0.3. Kako ovaj parametar utiče na vrijednost granične nosivosti, njegovom varijacijom moguće je izvesti dodatne zaključke vezane za kalibraciju numeričkih modela.

Koeficijenti transfera smicanja za otvorene i zatvorene prsline (β_c i β_t) imaju vrijednost između nula i jedan, gdje nula definiše glatku pukotinu sa potpunim gubitkom prenosa smicanja, a vrijednost jedan pretpostavlja da gubici u prenosu smicanja ne postoje (aggregate effect). Iako navedene relacije navode na to da ovi parametri igraju izuzetno važnu ulogu u samom ponašanju materijala, ne postoji univerzalno pravilo kako bi se isti mogli usvojiti, već samo preporuka [87]. Ova preporuka je usvojena u disertaciji, tako da je koeficijent transfera smicanja za otvorenu pukotinu usvojen u iznosu 0.3, a za zatvorenu prslinu 0.9. Uočava se da i ovdje postoji potencijal za dalje istraživanje u cilju kalibracije numeričkih modela.

Pretpostavlja se da je ponašanje betona prije loma, usljed zatezanja odnosno drobljenja pri pritisku, linearno elastično. I pored toga, plastično ponašanje i/ili tečenje moguće je kombinovati sa osnovnim svojstvima betona, kako bi se obezbijedilo nelinearno ponašanje do loma. U tom slučaju se uglavnom za plastično ponašanje betona koristi model Von-Mises ili Drucker-Prager [88]. Ovakav pristup nije primijenjen o ovom radu.

Treba napomenuti i da je ponašanje betona nakon loma praćeno fenomenom razmekšavanja materijala. Za beton je dostupno nekoliko modela razmekšavanja,

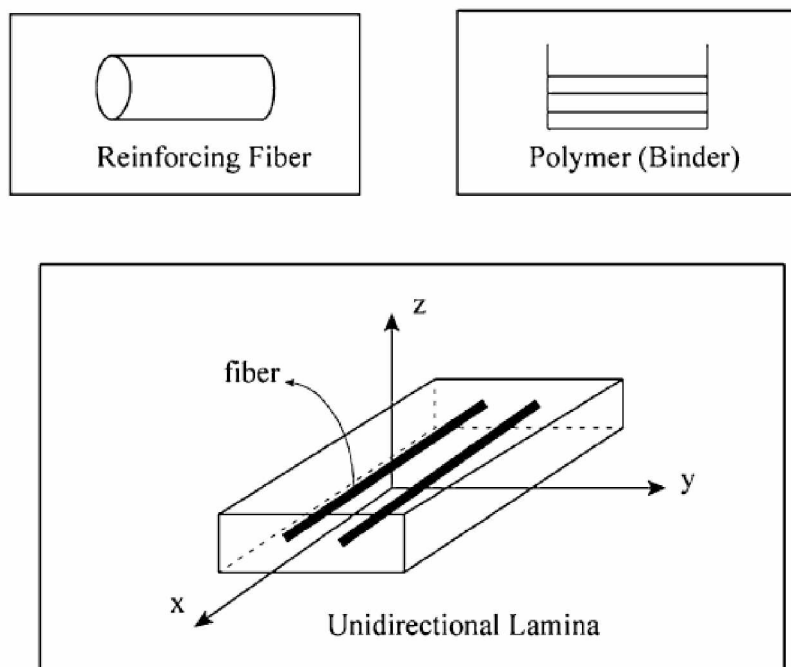
međutim isti su implementirani samo u verziji sa eksplicitnim numeričkim postupkom. U implicitnoj verziji ANSYS-a nije moguće razmatrati ovaj fenomen.

7.1.2. Čelična armatura

Postoje dvije varijante za modelovanje armaturnih šipki u ANSYS-u: razmazana i diskretna. Kad se koristi razmazana opcija, armatura se definiše kao dio betonskog elementa SOLID65, kako je to prikazano na slici 7.1. Razmazane šipke se u svakom pravcu ponašaju slično kao jednoosni materijal. Druga opcija je da se armaturne šipke modeluju kao zasebni element, pričvršćen na betonski element. Ako treba modelovati zasebne armaturne šipke u ANSYS-u, predlažu se LINK, BEAM i COMBIN elementi. Među njima su najviše korišćeni jednoaksijalni zatezno-pritisni 2-čvorni elementi LINK8 i LINK180. Von-Mises kriterijum plastičnosti se uglavnom koristi za metale poput čelika. U cilju omogućavanja numeričke konvergencije, materijalne karakteristike čelika se uglavnom modeluju u vidu bilinearne zavisnosti napona i dilatacija. U predmetnom radu, podužne šipke grede modelovane su korišćenjem diskretnog LINK180 elementa, a uzengije su modelovane pomoću razmazane armature. S obzirom na pretpostavku da ne postoji proklizavanje čelika unutar betonskog presjeka, primijenjena je permanentna veza čelika sa betonom.

7.1.3. FRP kompoziti

FRP kompoziti su anizotropni materijali. Šema FRP kompozita prikazana je na slici 7.3. Kao što se vidi, jednosmjerna lamela ima tri ortogonalne ravni svojstava materijala (tj. ravni $x - y$, $x - z$ i $y - z$). Koordinatne ose xyz nazivaju se glavnim koordinatama materijala, pri čemu su vlakna paralelna osi x , a upravna na y i z ose.

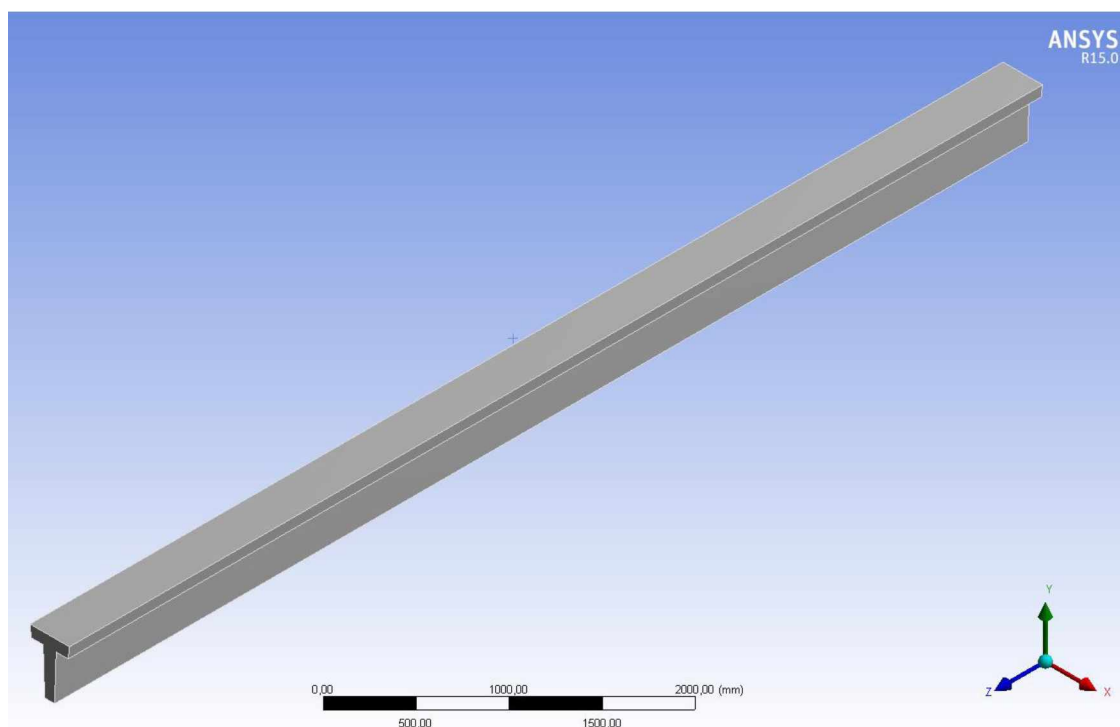


Slika 7.3 Šema jednosmjernog FRP kompozita

Kao što je ranije u tekstu objašnjeno, SOLID46, SHELL41 i SHELL99 se najčešće koriste za modelovanje FRP kompozita. Iako takav pristup nije uobičajen, elementi za ojačavanje se unutar matrice mogu definisati kao diskretni SOLID elementi. Formulacija čitavog presjeka primjenom elemenata SHELL181 i SHELL281 predstavlja takođe numeričku formulaciju koja je veoma bliska pretpostavkama analitičkog modela klasične teorije slojevitih kompozita (CLPT). U slučaju nosača sa većom debljinom, mogu biti primijenjeni elementi SOLID185, SOLID186 kao i SOLSH190. Ne treba zaboraviti da se ovi elementi u numeričkom smislu približavaju teorijskim pretpostavkama Teorije smicanja I i II reda slojevitih kompozita. Uz odgovarajuću formulaciju u skladu sa Opštom teorijom slojeva (*Generalized Layerwise Theory*), isti su podložni „shear-locking“ efektu. Međutim, uvođenje velikog broja dodatnih stepeni slobode (do 13 po elementu) u velikoj mjeri utiče na performanse proračunskog modela. Kako su za materijal koji je primijenjen u eksperimentu poznate materijalne karakteristike ekvivalentnog sloja, to je suvišna primjena slojevitih shell ili solid elemenata sa kontaktnim spojem. Stoga je u ovom radu primijenjena diskretizacija putem elementa SOLID46 uz definisanje slijepljenog spoja sa betonskim presjekom primjenom MPC (*Multi-Point Constraint*) formulacije.

7.2. Geometrija i definisanje mreže konačnih elemenata

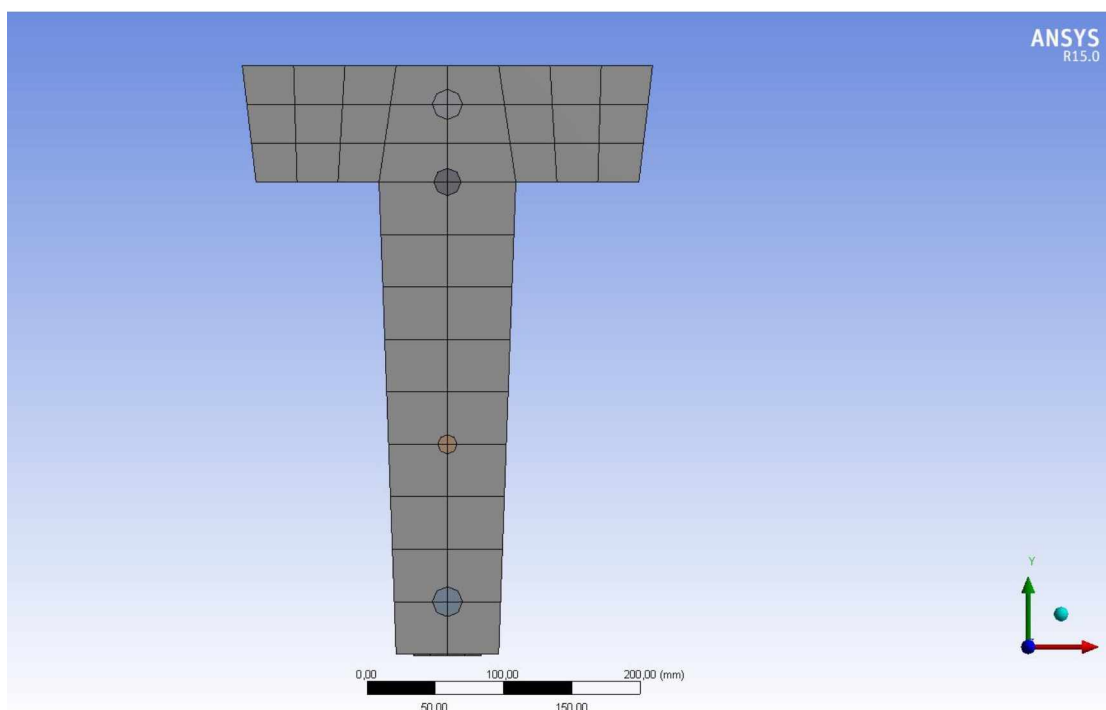
Za definisanje geometrije korišćen je program Design Modeler u sklopu ANSYS programskog paketa (slika 7.4). Ovaj program je pogodan zbog mogućnosti definisanja parametara i zavisnosti pojedinih geometrijskih veličina. Sa druge strane, alternativa je moguća u primjeni modula SpaceClaim ili bilo kog 3D orijentisanog CAD softvera, pri čemu se importovanje geometrije uglavnom sprovodi korišćenjem STEP, ACIS ili PARASOLID formata.



Slika 7.4 Geometrija nosača

Diskretizacija armature sprovedena je u pojednostavljenom obliku, koncentrisanjem armature ekvivalentne površine u osovину poprečnog presjeka betonskog elementa. Ovo je sprovedeno iz razloga omogućavanja kompatibilnosti deformacija, jer pravilna proračunska procedura podrazumijeva definisanje mreže konačnih elemenata armature i betonskog presjeka sa zajedničkim čvorovima. Kao što se vidi na slici 7.5 element SOLID46 ne pojeđuje unutrašnje čvorove, pa bi pravilno definisanje mreže konačnih elemenata bilo prilično otežano. U slučaju predmetne geometrije, broj konačnih elemenata bi eksponencijalno rastao ukoliko bi se stvarni položaj armature modelovao

unutar presjeka. Sa druge strane, za probleme čistog savijanja, ovakav pristup ne utiče značajno na ponašanje grednog elementa, a u velikoj mjeri pozitivno utiče na proračunske performanse. Ne treba zaboraviti da se u ovom slučaju radi o iterativnom postupku sa definisanom materijalnom nelinearnošću betona i mogućnošću pojave prslina i loma, a ove osobine same po sebi zahtijevaju izuzetno ekstenzivnu proračunsku proceduru. Stoga je svako inženjerski razumno pojednostavljenje opravdano.



Slika 7.5 Izgled poprečnog presjeka nosača

7.3. Analiza rezultata dobijenih primjenom programskog paketa ANSYS

ANSYS se nije pokazao kao najbolji odabir programa za modelovanje betona. Glavni razlog kod donošenja ovog zaključka je što se proračun zasniva na vrlo „primitivnom“ modelu William-Warnkea, koji podrazumijeva potpuni gubitak nosivosti ispucalog elementa. U cilju dostizanja konvergencije moguće je aktivirati fiktivnu krutost elementa. Pri tom se primjenjuje faktor koji inženjer sam mora da odredi, tj. da definiše koliko nosi „ispucali element“, kako bi se u koracima, tj. iterativno riješio problem. Međutim, u jednom trenutku, pri većim opterećenjima, ova opcija ne može da nadomijesti pojavu

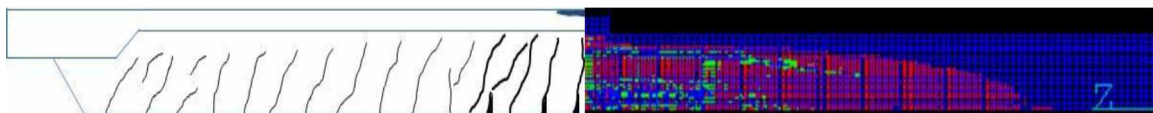
prslina i lom u većoj zoni. Čak i dodavanje sile malog reda veličine dovodi do eksponencijalnog rasta ugiba.

Moguće imperfekcije od geometrijskih idealizovanih veličina modela, čak iako su napravljeni u strogo kontrolisanim laboratorijskim uslovima, mogu imati efekta na adekvatnu simulaciju. Određena odstupanja koja se jave nijesu za zabrinutost, s obzirom da se konstruktivni elementi projektuju sa koeficijentima sigurnosti.

7.3.1. Analiza slike prslina

Na slikama 7.6 i 7.7 prikazani su modeli neojačane grede G1a i grede G2, ojačane na dužini od 4 metra. Na lijevoj polovini slike vidi se raspored prslina i pukotina pri lomu dobijen eksperimentom, a na drugoj, desnoj polovini prikazana je slika prslina i pukotina dobijena numeričkom simulacijom.

Crvenom bojom označene su prsline, a lom je označen zelenom/plavom bojom.



Slika 7.6 Šema prslina za gredu G1a



Slika 7.7 Šema prslina za gredu G2

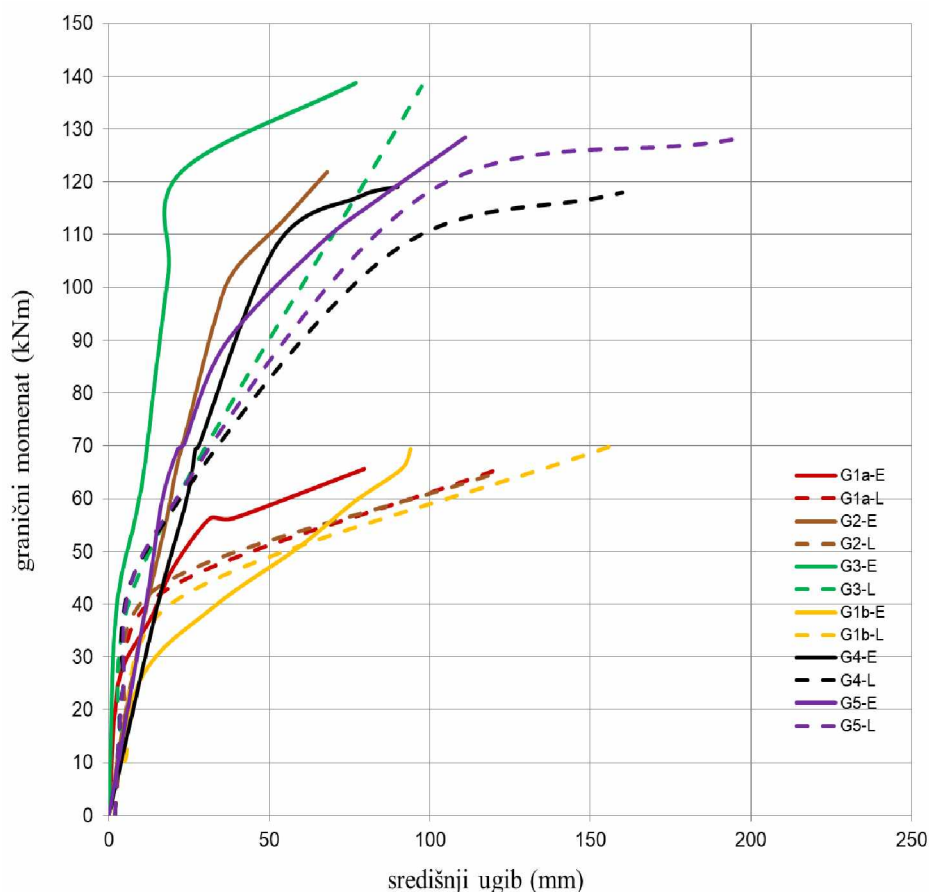
Evidentno je dobro poklapanje eksperimentalnih i numeričkih rezultata. To poklapanje je bolje kod neojačanih nego kod ojačanih greda. Korektno poklapanje je prisutno kod analize stanja prslina na krajevima traka, gdje je prisutna velika koncentracija napona.

U Prilogu C3 date su slike sa prikazom rasporeda prslina i pukotina u stanju loma za sve grede u punoj dužini.

7.3.2. Analiza dijagrama ugiba

Modeliranje je izvršeno korišćenjem linearne i nelinearne analize. Na osnovu dobijenih rezultata (Prilog D1) analizirani su ugibi iz ova dva modela. Na dijagramu 7.8 prikazani su rezultati linearne analize, a na dijagramu 7.9 rezultati dobijeni na modelu sa nelinearnim materijalnim karakteristikama. Istovremeno su na ovim dijagramima prikazane eksperimentalno dobijene vrijednosti ugiba, radi preglednije komparacije, odnosno uporedne analize. Korišćene su oznake: E – za eksperimentalno dobijene veličine ugiba, L – za rezultate dobijene linearnom analizom i N – za rezultate dobijene nelinearnom analizom.

Linearni model uključuje linearnu zavisnost napona i deformacija, tj. konstantnu vrijednost modula elastičnosti. Kod ovog modela se pri maksimalnom ugibu iz eksperimenta, dešavao progresivni gubitak nosivosti u većoj zoni, usljed čega je u cilju stabilizacije numeričkog postupka za veći broj elemenata definisana fiktivna krutost opcijom KEYOPT(7)=1.

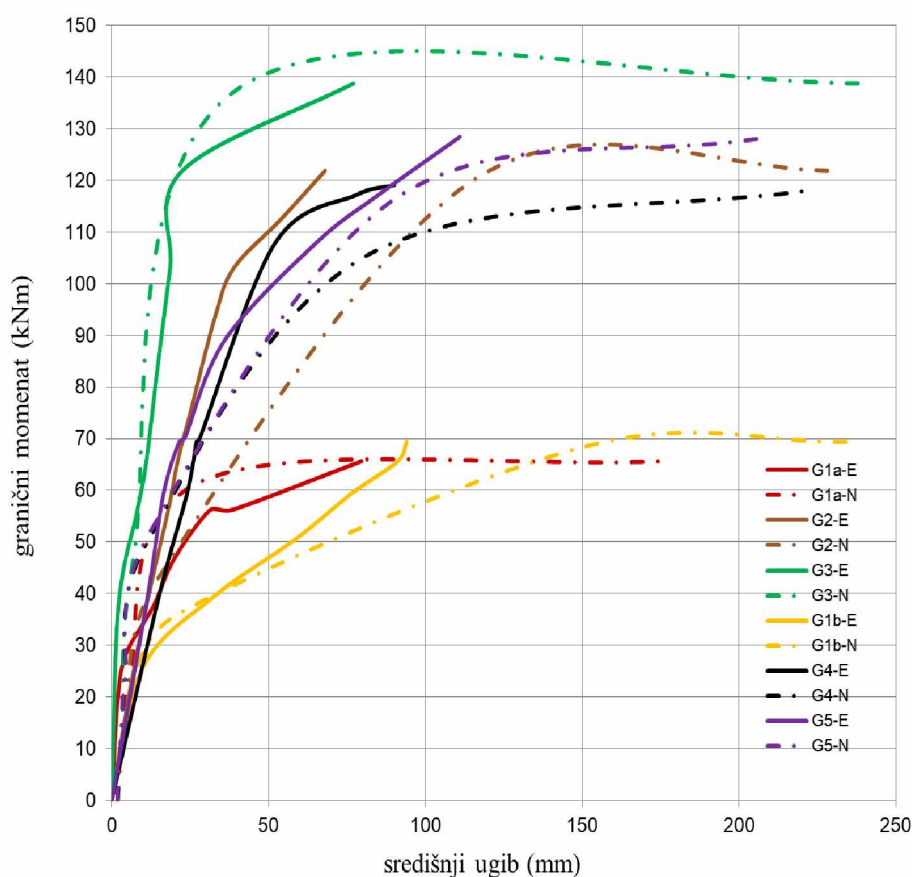


Slika 7.8 Dijagrami ugiba za linearni model

Kod pojedinih linearnih modela nije došlo do potpunog loma što se vidi i sa grafika toka ugiba, a i sa prikazanih slika. Može se konstatovati da kod pojedinih greda ne postoji jasan prelaz u tečenje, tj. krive su zaobljene na prelazu ka graničnom stanju loma, dok se ostale ponašaju krto do loma. Bolje poklapanje rezultata uočava se kod greda opterećenih ravnomjernim opterećenjem (G4 i G5).

Nelinearni model uključuje znatno veći broj elemenata. Nelinearne deformacije određene su na osnovu σ - ϵ dijagrama dobijenog na kontrolnim tijelima materijala korišćenih u eksperimentu. U svakom narednom koraku se karakteristike mijenjaju, tako da u iterativnom postupku kod određenih elemenata dolazi do prekoračenja graničnog stanja napona. Takav element dobija fiktivnu krutost i ponaša se kao da je izgubio nosivost, tj. teče.

Sa prikazanih dijagrama se može uočiti da je, kao i kod linearnog modela, poklapanje eksperimentalnih i numeričkih rezultata u prihvatljivim granicama, naročito kod greda opterećenih ravnomjernim opterećenjem.

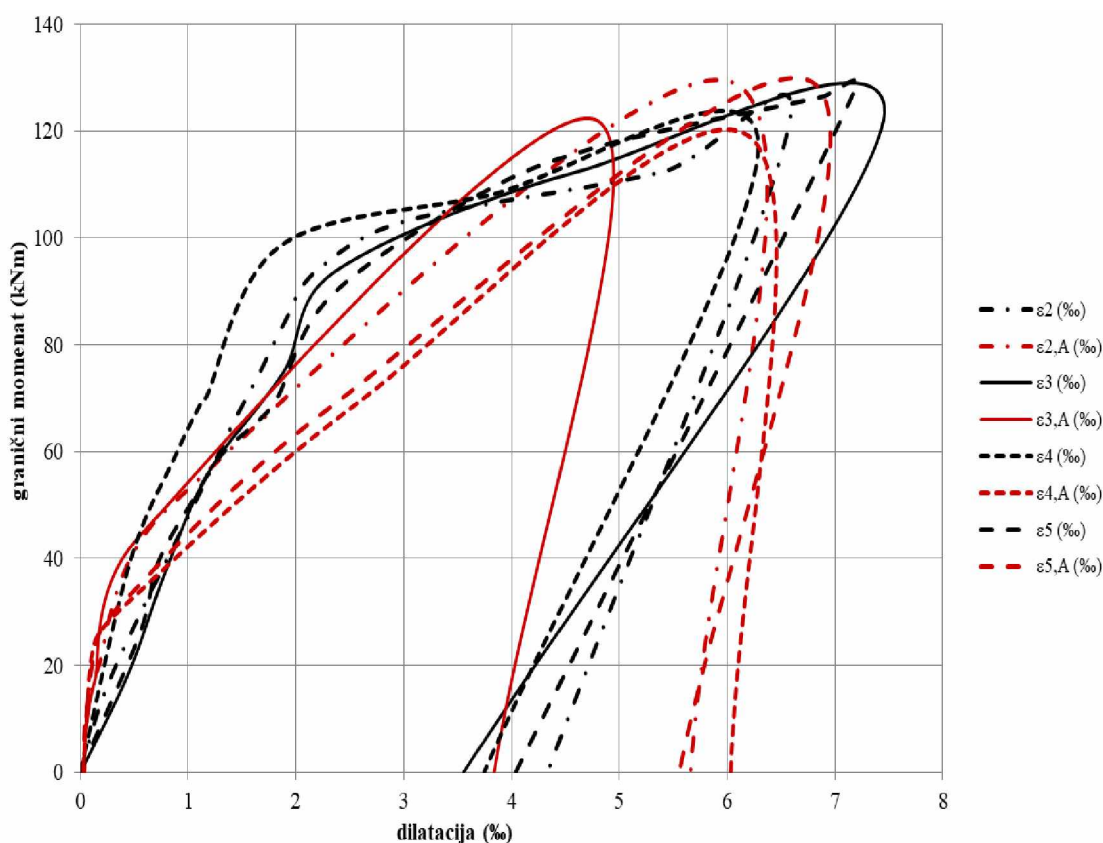


Slika 7.9 Dijagrami ugiba za nelinearni model

7.3.3. Analiza dilatacija u karbonskoj traci

Uniformni rezultati dobijeni ispitivanjem dilatacija u karbonskim trakama ukazuju na njihov elasto-plastični karakter (Prilog D2). Eksperimentalno dobijene veličine dilatacija prikazane su crnom bojom, dok su rezultati dobijeni pomoću programskog paketa ANSYS prikazani crvenom bojom.

Dobijene vrijednosti plastičnih deformacija iz simuliranog modela su značajno veće u odnosu na rezultate eksperimenta.



Slika 7.10 Dijagrami dilatacija karbonskih traka

7.4. Krićka analiza razmatranih parametara

Prilikom planiranja i izvođenja bilo kog eksperimenta logično je izvršiti odgovarajuće modeliranje, kako bi se definisali glavni uticajni parametri i izvršila verifikacija dobijenih rezultata. Budući da je u računarskom modeliranju neophodno uvoditi

određena pojednostavljenja, očekivane su razlike u vrijednostima karakteristika kojima se opisuje naponsko-deformacijsko stanje posmatranog elementa.

Glavni razlozi zbog kojih se javljaju određena odstupanja u rezultatima:

- Geometrija presjeka T-elementa je nepovoljna za modeliranje zbog projektovanih odstupanja od horizontalnih i vertikalnih ravni, koja su neophodna pri skidanju oplata;
- Geometrijska pojednostavljenja koja su uvedena kod modeliranja armature;
- Parametri nelinearnosti betona koji se usvajaju iskustveno;
- Materijalne karakteristike koje su stohastičke prirode;
- Imperfekcije koje su neminovne kod modela realnih dimenzija.

Naznačeni razlozi, koji mogu imati i aditivni karakter, neminovno će dovesti do pomenutih odstupanja. Ovo je posebno izraženo ako se imaju na umu brojni uticajni parametri ovakvog jednog multikompozitnog sistema.

Nesavršenost numeričkog postupka, približne vrijednosti svojstava upotrijebljenih materijala i veliki broj pretpostavki ima uticaja na dobijeni naponsko-deformacijski odgovor. Primijenjeni nelinearni modeli armirano-betonskih ojačanih elemenata, u zavisnosti od određenog problema, uvode odgovarajuće empirijske parametre, koji moraju biti sračunati za specifične proračunske situacije [89].

Numeričke metode su veoma zahtjevne i dugotrajne kada se vrši simulacija vremenski zavisnog ponašanja konstrukcija, jer je potrebno koristiti najmanji mogući korak kako bi se dobilo odgovarajuće rješenje. Analitička rješenja su se pokazala kao mnogo efikasnija [24]. Tečenje betona i FRP ojačanja odvija se u mnogo dužem vremenskom periodu u poređenju sa tečenjem lijepka [90], tako da se najčešće samo lijepak modelira kao viskoelastični materijal. Vremenske karakteristike FRP materijala i ojačane grede se zanemaruju u cilju pojednostavljenja postupka. Stoga su ovakva viskoelastična rješenja validna samo u slučaju procjene napona i deformacija u ograničenom vremenskom periodu.

8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Potreba za ojačavanjem armirano-betonskih konstrukcija je veoma aktuelna ne samo u svijetu već i kod nas. Naime, posljednjih par decenija do pada nosivosti armirano-betonskih i prednapregnutih konstrukcija, a time i do potrebe za ojačanjem, dolazi zbog korozije betona i ugrađenog čelika, naročito u agresivnoj sredini kao što je blizina mora, te zbog različitih mehaničkih, hemijskih i fizičkih dejstava na konstrukciju. Korozija predstavlja neizbježnu pojavu u ljudskom okruženju, s obzirom da trenutno skoro polovina svjetske populacije živi na bliskoj udaljenosti od obale, prosječno oko 150 kilometara. Korozija u određenim uslovima sredine može dovesti do uništenja konstruktivnog elementa, vodeći ka velikim popravkama i troškovima rekonstrukcija.

Rekonstrukcija objekta je kompleksan zadatak i za projektante i za izvođače, u nekim slučajevima čak i zahtjevniji od izgradnje nove konstrukcije. Jedan od problema je izbor materijala za rekonstrukciju. Takođe i način na koji će oni biti upotrijebljeni ne smije uticati na eksploataciju konstrukcije koja se ojačava. Upotreba CFRP kompozitnog materijala kao spoljašnjeg ojačanja dala je više nego zadovoljavajuće rezultate i dobra rješenja za navedene probleme.

U ovoj disertaciji istraživao je i eksperimentalno analiziran rijedak slučaj ojačanja armirano-betonskih elemenata. Naime, iako su CFRP trake za spoljašnje ojačanje u svijetu u upotrebi već decenijama, detaljnim pregledom literature uočen je mali broj eksperimenata sprovedenih na uzorcima stvarnih dimenzija i značajne starosti. Činjenica da se ojačanje u eksploataciji uglavnom primjenjuje na baš takvom tipu uzoraka, poslužila je kao osnovna ideja za ovo istraživanje. Budući da se u većini istraživanja ojačavaju grede jednostavnog pravougaonog presjeka, primjena CFRP traka kao spoljašnjeg ojačanja greda T-presjeka pokazala se kao logičan izbor. Ispitivanje sprovedeno na dejstvo dugotrajnog opterećenja u stvarnim vremenskim okvirima dalo je dodatni značaj ovoj disertaciji.

Nakon sprovedenog sopstvenog ispitivanja uzoraka izloženih dejstvu dva tipa kratkotrajnog opterećenja i dva nivoa dugotrajnog opterećenja, moguće je donijeti određene zaključke koji se odnose na ponašanje ovih sistema i ispitivane uticajne

parametre. Pri tome su varirane dvije različite šeme ojačanja, kako bi se došlo do optimalnih rješenja.

Odgovor ovako definisanih sistema analiziran je preko osnovnih naponsko–deformacijskih efekata i njihove komparacije sa neojačanim kontrolnim uzorcima. S obzirom na dugogodišnji eksploatacioni period, stanje napona i deformacija do momenta ojačanja nije bilo predmet ove analize.

Granični momenat savijanja

- Spoljašnje ojačanje armirano-betonskih greda dovodi do značajnog povećanja kapaciteta nosivosti. Vrijednosti graničnih momenata savijanja u kritičnom presjeku se skoro dupliraju u odnosu na momente kontrolnih, neojačanih greda. Ovaj porast je značajniji kod greda izloženih uticaju koncentrisanog opterećenja, u odnosu na grede pod dejstvom ravnomjernog opterećenja.
- Efikasnost primijenjenog sistema ojačanja zavisi od dužine CFRP trake. Korišćenjem duže trake porast nosivosti u odnosu na kontrolnu gredu veći je nego kod upotrebe kraćih traka. Taj porast je veći i pri dejstvu kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja, mada nije značajan.
- Granična nosivost ojačanih greda niža je pri većem nivou dugotrajnog opterećenja.
- Proračun prema Pravilniku ACI 440.2R–08 za određivanje kapaciteta nosivosti analiziranog poprečnog presjeka, ne daje zadovoljavajuće poklapanje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima, ali daje rezultate koji su na strani sigurnosti.

Ugibi

- Ojačavanje greda CFRP trakama doprinosi redukciji veličine ugiba u poređenju sa kontrolnom gredom.
- Veće vrijednosti konačnih ugiba zabilježene su kod greda ojačanih dužim trakama.
- Grede izložene dejstvu ravnomjernog opterećenja doživljavaju veće konačne ugibe od onih pod dejstvom koncentrisanog opterećenja.
- Ugibi rastu sa porastom nivoa dugotrajnog opterećenja.

Deformacije

- Spoljašnje CFRP ojačanje redukuje veličinu dilatacija u zategnutom betonu u poređenju sa kontrolnom gredom.
- Duže ojačanje dopušta veće dilatacije u zategnutom betonu, i to za dejstvo oba tipa opterećenja – kratkotrajnog i dugotrajnog.
- Dužina trake za ojačanje ima veći uticaj kod dilatacija u pritisnutom betonu, nego u zategnutom betonu.
- Dilatacije u pritisnutom betonu značajno su veće u gredama opterećenim koncentrisanim opterećenjem u odnosu na one opterećene ravnomjernim opterećenjem.
- Veći nivo dugotrajnog opterećenja uzrokuje veće vrijednosti dilatacija u zategnutom betonu, dok na dilatacije u pritisnutoj zoni betona ovaj parametar nema značajniji uticaj.
- Dilatacije u karbonskim trakama greda pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja skoro su nezavisne od dužine trake i od tipa opterećenja.
- Dugotrajno opterećenje ima značajniji uticaj na veličinu dilatacija kraćih karbonskih traka, a sa povećanjem nivoa opterećenja dolazi do porasta dilatacija u karbonskim trakama svih ispitivanih greda.

Prsline

- Rasprostranjenije prsline, ali manjih širina uočene su kod ojačanih greda u odnosu na neojačane – kontrolne grede.
- Dužina ojačanja nema značajan uticaj na širinu graničnih prslina, kao ni na sliku prslina, ali je njihova dubina nešto manja. Evidentna je pojava dijagonalnih prslina na krajevima kraćih traka, koje sa porastom opterećenja postaju glavni uzročnici loma ojačanih greda. Karakteristično je da se, u ovom slučaju, lom manifestuje odlamanjem trake sa dijelom zaštitnog sloja betona.
- Povećanje nivoa dugotrajnog opterećenja izaziva povećanje širine graničnih prslina.

Mehanizam loma

- Na osnovu naponsko–deformacijskog odgovora za slučaj dejstva kratkotrajnog opterećenja, kada se ne očekuje porast graničnog momenta savijanja za više od 60%, moglo bi se zaključiti da je dovoljno koristiti CFRP traku čija je dužina jednaka polovini grede i da nije potrebno koristiti poprečna ukrućenja.
- Rezultati eksperimentalnog ispitivanja na dejstvo dugotrajnog opterećenja, ukazuju na potrebu primjene karbonske trake dužine najmanje 0,8l. Kako bi izbjegli lom usljed odvajanja kraćih traka, poželjna bi bila upotreba poprečnih ukrućenja.

Deformacije u toku vremena

- Spoljašnje ojačanje nema značajan uticaj na tečenje pritisnutog starog betona, odnosno na dugotrajne deformacije ojačanih greda pri radnim nivoima napona, ali ima uticaja na konačno tečenje pri većim nivoima napona.
- Porast deformacija nakon opterećivanja intenzivniji je u početku, a vremenom dolazi do stabilizacije procesa.
- Primjena dužih traka kod ojačavanja greda smanjuje kako trenutnu, tako i deformaciju tokom vremena u karbonskim trakama, dok u betonu dolazi do smanjenja samo deformacije tečenja.
- Nivo nanešenog dugotrajnog opterećenja je glavni faktor koji utiče na nivo tečenja, a samim tim i na dugotrajne deformacije. Grede ojačane dužim trakama podložnije su uticaju većih nivoa dugotrajnog opterećenja sa stanovišta porasta ugiba i deformacija u pritisnutom betonu.
- Usljed dejstva dugotrajnog opterećenja nivoa 55–60% od nosivosti na kratkotrajno opterećenje, evidentirano je povećanje deformacija tokom vremena za oko 10%. Usljed dejstva dugotrajnog opterećenja većeg nivoa (75–85% od nosivosti na kratkotrajno opterećenje) evidentirano je povećanje deformacija tokom vremena u intervalu od 17–33%.

Dobijeni eksperimentalni rezultati su djelimično u saglasnosti sa rezultatima i zaključcima drugih autora. Razlike postoje, uglavnom zbog toga što su ispitivanja sprovedena na modelima realnih dimenzija. Takođe, nije moguće upoređivati uticaj tečenja na ponašanje starih i novih greda, tako da su odstupanja u očekivanim granicama.

Generalno se može zaključiti da se ojačanjem armirano-betonskih greda karbonskim trakama značajno povećavaju elastična svojstva ovog sistema, tako da bi se veće vrijednosti dobijenih deformacija u graničnom stanju loma trebale analizirati sa ovog aspekta.

Kriterijum loma bi mogao biti definisan preko dopuštenog ugiba, a koji bi bio veći u odnosu na vrijednosti date u propisima za armirano-betonske konstrukcije. Analizom graničnih ugiba, dobijenih u ovom eksperimentu, može se za kriterijum loma umjesto veličine $l/300$ predložiti veća veličina (do $l/150$). Ovaj prijedlog je proizašao iz proračuna ugiba, a koji predstavlja autorovu modifikaciju izraza iz Pravilnika BAB'87 i daje zadovoljavajuće rezultate za konkretan problem.

Rezultati numeričke analize primjenom programskog paketa Ansys, pokazuju zadovoljavajuću saglasnost sa sopstvenim eksperimentalnim podacima. Nešto slabije poklapanje plastičnih dilatacija u karbonskim trakama, može biti rezultat analize date u zaključnim razmatranjima iz prethodnog poglavlja.

Ovim istraživanjem dokazano je da neće doći do loma usljed vremenskih deformacija ojačanih prostih armirano-betonskih greda T-presjeka značajne starosti i nakon dugogodišnje eksploatacije. Ovaj zaključak važi ukoliko se za ojačanje koriste CFRP trake minimalne dužine $0.8l$, a pri tom je dugotrajno ravnomjerno opterećenje ograničeno na 85% nosivosti na kratkotrajno opterećenje. To znači da ove grede mogu biti izložene navedenom nivou dugotrajnog ravnomjernog opterećenja, bez opasnosti da u eksploatacionim uslovima mogu biti dovedene u granično stanje loma.

Ojačanje armirano-betonskih elemenata karbonskim materijalima ima brojne prednosti u odnosu na tradicionalne sisteme sanacije konstrukcija, bez obzira na primijenjeni sistem i ekonomski aspekt. Specifičan slučaj istraživani u ovoj disertaciji predstavlja doprinos ovoj tezi.

LITERATURA

- [1] **Folić, R.** and **Malešev, M.** (2005) Održavanje i sanacija konstrukcija, *Materijali i konstrukcije*, 48 (4) pp. 62-80.
- [2] **Hag-Elsafi, O.**, **Alampalli, A.** and **Kunin, J.** (2001) Applications of FRP laminates for strengthening of a reinforced-concrete T-beam bridge structures, *Journal of Composite Structures*, 52 (3-4) pp. 453-466.
- [3] **Smith, S.T.** and **Teng, J.G.** (2002) FRP strengthened RC beams I, *Engineering Structures*, 24 (4) pp. 385-395.
- [4] **Chami, Al.G.**, **Theriault, M.** and **Neale, K.W.** (2009) Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 23 (4) pp. 1640–1652.
- [5] **Valivonis, J.**, **Skuturna, T.** and **Daugevičius, M.** (2010) The load-carrying capacity of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre composite in the tension zone subjected to temporary or sustained loading, *The 10th International Conference „Modern building materials, structures and techniques“*, Vilnius, Lithuania.
- [6] **Gao, B.**, **Leung, C.K.Y.** and **Kim, J.K.** (2007) Failure diagrams of FRP strengthened RC beams, *Composite Structures*, 77 (4) pp. 493–508.
- [7] **Casas, R.J.** and **Pascual, J.** (2007) Debonding of FRP in bending: Simplified model and experimental validation, *Construction and Building Materials*, 21 (10) pp. 1940–1949.
- [8] **Yao, J.** and **Teng, J.G.** (2007) Plate end debonding in FRP-plated RC beams - I: Experiments, *Engineering Structures*, 29 (10) pp. 2457–2471.
- [9] **Da Silva Duarte, P.C.F.** (2011) Reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates: an experimental study on the effect of crack repair, *Licentiate Dissertation*, Instituto Superior Tecnico, Universidade Tecnica di Lisboa, Lisbon.
- [10] **Obaidat, Y.T.**, **Heyden, S.**, **Dahlblom, O.**, **Abu-Farsakh, G.** and **Abdel-Jawad, Y.** (2011) Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates, *Construction and Building Materials*, 25 (2) pp. 591-597.
- [11] **Kotynia, R.** (2009) Bond between composite materials and concrete in reinforced concrete members strengthened with CFRP composites, *Report N° 16*, Department of concrete structures, Technical University of Lodz, Poland.

- [12] Lee, S. and Moy, S. (2007) Prediction of flexural strength of RC beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer, *Science and Engineering of Composite Materials*, 14 (3) pp. 169-180.
- [13] Sim, J. (2006) Structural performance of concrete T-beam bridge strengthened with fiber reinforced plastics, CFS, GFRP and AFS, *Science and Engineering of Composite Materials*, 13 (1) pp. 1-11.
- [14] Ramos, G., Casas, J.R. and Alarcón, A. (2015) Normalized Test for Prediction of Debonding Failure in Concrete Elements Strengthened with CFRP, *Journal of Composites for Construction*, 10 (6) pp. 509-519.
- [15] Mukhlesur, R.M. and Zamin, J.M. (2013) The Effect of CFRP Laminate Length for Strengthening the Tension Zone of the Reinforced Concrete T-Beam, *International Journal of Scientific Research and Reviews IJSRR*, 2 (3) pp. 1-16.
- [16] Hollaway, L.C. (2010) A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties, *Construction and Building Materials*, 24 (12) pp. 2419-2445.
- [17] CEB-FIP BULLETIN 40 (2007) *FRP reinforcement in RC structures*, Technical report, Switzerland: *fib* – International federation for structural concrete.
- [18] Malek, A.M. and Saadatmanesh, H. (1996) Physical and mechanical properties of typical fibers and resins, *Proceedings 1st Conference on Composites In Infrastructure*, Tucson, Arizona, pp. 68-79.
- [19] CEB-FIP BULLETIN 14 (2001) *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, Technical report, Switzerland: *fib* – International federation for structural concrete.
- [20] Ibell, T., Darby, A. and Denton, S. (2009) Research issues related to the appropriate use of FRP in concrete structures, *Construction and Building Materials*, 23 (4) pp. 1521-1528.
- [21] Karbhari, VM. (2003) Durability of FRP composites for civil infrastructure myth, mystery or reality, *Advances in Structural Engineering*, 6 (3) pp. 243-255.
- [22] Grace, N.F., Sayed, G.A., Soliman, A.K. and Saleh K.R. (1999) Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates, *ACI Structural Journal*, 96 (5) pp. 865-875.

- [23] **Sobuz**, H.R., Ahmed, E., Hasan, S. and Uddin, A. (2011) Use of carbon fiber laminates for strengthening reinforced concrete beams in bending, *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 2 (1) pp. 67-84.
- [24] **Zhang**, C. (2011) Mechanics and subcritical cracking of FRP-concrete interface, *A Dissertation*, Department of Civil, Construction and Enviromental Engineering, University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama.
- [25] **Bank**, L.C. (2006) *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, New Jersey: Wiley.
- [26] **Khaloo**, A.R. and Gharachorlou, A. (2005) Numerical analysis of RC beams flexurally strengthened by CFRP laminates, *Iranian Journal of Civil Engineering*, 3 (1) pp. 1-9.
- [27] **Karusena**, W., Hardeo, P. and Bosnich, G. (2002) Rehabilitation of concrete beams by externally bonding fiber composite reinforcement, *Proceedings of the ACUN-4 International Composites Conference*, Sydney, Australia, pp. 222-226.
- [28] **Kachlakev**, D. and Mc Curry, D. (2000) Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates, *Composites Part B: Engineering*, 31 (6) pp. 445-452.
- [29] **Toutanji**, H., Zhao, L. and Zhang, Y. (2006) Flexural behaviour of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix, *Engineering Structures*, 28 (4) pp. 557-566.
- [30] **Tomičić**, I. (2001) Ojačavanje armirano-betonskih greda nemetalnim lamelama, *Građevinar*, 53 (10) pp. 641-649.
- [31] **Holmer**, N.P.(2010) Parametric Study of the Bond Between Fiber Reinforced Polymers and Concrete using Finite Element Analysis, *Master's thesis*, Marquette University, Wiskonsin, USA.
- [32] **Sen**, R., Shahawy, M., Mullins, G. and Spain, J. (1999) Durability of carbon fiber-reinforced polymer/epoxy/concrete bond in marine environment, *ACI Structural Journal*, 96 (6) pp. 906-914.
- [33] **Shit**, T. (2011) Experimental and numerical study on behavior of externally bonded RC T-beams using GFRP composites, *Master's Thesis*, Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Rourkela.

- [34] **Malek, A.M., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R** (1998) Prediction of failure load of RC beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end, *ACI Structural Journal*, 95 (2) pp. 142-152.
- [35] **Wang, Y-C. and Hsu, K.** (2009) Design recommendations for the strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite plates, *Composite structures*, 88 (2) pp. 323-332.
- [36] **Corrales, J.J.P.** (1997) Finite element evaluation of the effects of lateral anchorage strips on the behavior of CFRP-strengthened RC beams, *Master thesis*, University of Central Florida Orlando, Florida.
- [37] **Sharif, A., Al-Sulaimani, G.J., Basunbul, I.A., Baluch, M.H. and Ghaleb, B.N.** (1994) Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates, *ACI Structural Journal*, 91 (2) pp. 160-166.
- [38] **Kim, Y., Quinn, K., Satrom, N., Garcia, J., Sun, W., Ghannoum, M.W. and Jirsa, O.J.** (2011) Shear Strengthening of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets and Anchors, *Technical report*, Center for transportation research, The University of Texas at Austin.
- [39] **Eshwar, N., Ibell, T. and Nanni, A.** (2003) CFRP strengthening of concrete bridges with curved soffits, *Proceedings of the 10th International conference and exhibition – Structural faults and repair conference*, London.
- [40] **Thomsen, H., Spacone, E., Limkatanyu, S. and Camata, G.** (2004) Failure Mode Analyses of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymers, *Journal of Composites for Construction*, 8 (2) pp. 123-131.
- [41] **Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R.** (1991) RC beams strengthened with GFRP plates, *Journal of Structural engineering*, 117 (11) pp. 3417-3433.
- [42] **Rahimi, H. and Hutchinson, A.** (2001) Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates, *Journal of Composites for Construction*, 5 (1) pp. 44-56.
- [43] **Obaidat, Y.T.** (2010) Structural retrofitting of reinforced concrete beams using carbon fibre reinforced polymer, *Licentiate Dissertation*, Lund University, Sweden.

- [44] **Chen, F.** and **Qiao, P.** (2009) Debonding analysis of FRP-concrete interface between two balanced adjacent flexural cracks in plated beams, *International Journal of Solids and Structures*, 46 (13) pp. 2618-2628.
- [45] **Dai, J.G.**, **Ueda, T.**, **Sato, Y.** and **Ito, T.** (2005) Flexural strengthening of RC beams using externally bonded FRP sheets through flexible adhesive bonding, *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, pp. 205-213.
- [46] **Ceroni, F.** (2010) Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials, *Construction and Building Materials*, 24 (9) pp. 1547-1559.
- [47] **ACI 440.2R-08** (2008) *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- [48] **Chen, J. F.** and **Teng, J. G.** (2001) Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete, *Journal of Structural Engineering*, 127 (7) pp. 784-791.
- [49] **ACI 318-05** (2005) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- [50] **Blaschko, M.** (1997) Strengthening with CFRP, *Münchner Massivbau Seminar*, TU München (in German).
- [51] **Eurocode 2** (2004) Design of Concrete Structures Part 1-1: *General Rules and Rules for Buildings*, CEN, EN 1992-1-1.
- [52] **Matthys, S.** (2000) Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement, *PhD thesis*, Department of Structural Engineering, Faculty of Applied Sciences, Ghent University, Belgium.
- [53] **Jansze, W.** (1997) Strengthening of reinforced concrete members in bending by externally bonded steel plates, *PhD dissertation*, TU Delft, The Netherlands.
- [54] **Neville A.M.**, **Dilger W.H.**, **Brooks J.J.** (1983) *Creep of plain and structural concrete*, New York: Construction Press.
- [55] **Rzanicin, A.** (1974) *Teorija puženja materijala*, Beograd: Građevinska knjiga.
- [56] **PBAB '87** (1995) *Pravilnik o tehničkim normativima za beton i armirani beton*, Beograd: Građevinska knjiga.
- [57] **Muravljev, M.** (2015) *Tehnologija betona*, Beograd: Građevinska knjiga.

- [58] Hull, D. and Clyne, T.W. (1996) *An Introduction to Composite Materials*, 2nd edition, Cambridge: Cambridge University Press.
- [59] Budelman, H. and Rostasy, F.S. (1993) Creep Rupture Behaviour of FRP Elements for Prestressed Concrete-Phenomenon, Results and Forecast Models, *Proceedings of ACI International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete structures*, Vancouver, pp. 87-100.
- [60] ACI 440.1R-06 (2006) *Guide for the Design and Construction of concrete reinforced with FRP bars*, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- [61] Arduini, M. and Nanni, A. (1997) Behavior of Precracked RC beams strengthened with carbon FRP Sheets, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 1 (2) pp. 63-70.
- [62] Hamed, E. and Bradford, M.A. (2010) Creep in concrete beams strengthened with composite materials, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 29 (6) pp. 951-965.
- [63] Washa, G.W. and Fluck, P.G. (1952) Effect of Compressive Reinforcement on the Plastic Flow of Reinforced Concrete Beams, *Journal of the American Concrete Institute*, 49 (10) pp. 89-108.
- [64] Shin, Y.S. and Lee, C. (2003) Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load, *ACI Structural Journal*, 100 (2) pp. 231-239.
- [65] Pelvris, N. and Triantafillou, T.C. (1994) Time-Dependent Behavior of RC Members Strengthened with FRP Laminates, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120 (3) pp. 1016-1042.
- [66] Jaiswal, M. and Ramtekkar, G. (2017) Experimental Study of Reinforced (RC) beams Strengthened by Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP): Effect of Beam Size and Length of CFRP, *International Journal of Applied Engineering Research*, 12 (24) pp. 14075-14081.
- [67] Daugevičius, M., Valivonis, J. and Marčiukaitis, G. (2012) Deflection analysis of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer under long-term load action, *Journal of Zhejiang University-Science A*, 13 (8) pp. 571-583.
- [68] Wang, W. and Guo, L. (2006) Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load, *International Journal of Solids and Structures*, 43 (6) pp. 1372-1387.

- [69] **Cho, D.**, Jeong, H. and Han, K. (2018) Residual Strength and Deformation Recovery of RC Beams strengthened with FRPs Plates under the Sustained Load, *Polymers & Polymer Composites*, 26 (1) pp. 119-126.
- [70] **Paulson, K.A.**, Nilson, A.H. and Hover, K.C. (1991) Long-term deflection of high-strength concrete beams, *Materials Journal*, American Concrete Institute, 88 (2) pp. 197–206.
- [71] **Jung, S-Y.**, Kim, N.-II and Shin, D.K. (2007) Viscoelastic behavior on composite beam using nonlinear creep model, *Steel and Composite Structures*, 7 (5) pp. 355-376.
- [72] **Stierwalt, D.D.** and Hamilton, H.R.III (2005) Creep of concrete masonry walls strengthened with FRP composites, *Construction and building materials*, 19 (3) pp. 181-187.
- [73] **Savoia, M.**, Ferracuti, B. and Mazzotti, C. (2005) Creep deformation of fiber reinforced plastics - plated reinforced concrete tensile members, *Journal of composites for construction*, 9 (1) pp. 63-72.
- [74] **Rostasy, F.** (1992) Fiber Composite Elements and Techniques as Non-Metallic Reinforcement of Concrete, *Technical Report - Evaluation of potentials and production techniques of FRP*, BRITE Project 4142/BREU-CT 91 0515.
- [75] **Yamaguchi, T.**, Nishimura, T. and Uomoto, T. (1998) Creep Model of FRP Rods Based on Fibre Damaging Rate, *Proceedings 1st International Conference on Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction*, Sherbrooke, Canada.
- [76] **Vujović, P.** (1999) Uticaj vremenskih deformacija na granična stanja AB ploča napregnutih u svojoj ravni, *Doktorska disertacija*, Beograd.
- [77] **Zejak, R.** (2002) Prilog analizi vitkih armirano-betonskih elemenata sa kosim savijanjem, *Doktorska disertacija*, Beograd.
- [78] **Kachlakev, D.**, Miller, T., Yim, S., Chansawat, K. and Potisuk, T. (2001) Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates, *Final Report SPR 316*, Oregon department of transportation, USA.
- [79] **Alhaddad, M.S.**, Siddiqui, N.A., Abadel, A.A., Alsayed, S.H. and Al-Salloum, Y.A. (2012) Numerical investigations on the seismic behavior of FRP and TRM Upgraded RC exterior beam-column joints, *Journal of Composites for Construction*, 16 (3) pp. 308-321.

- [80] **Parvin**, A. and Granata, P. (2000) Investigation on the effects of fiber composites at concrete joints, *Composites Part B Engineering*, 31 (6) pp. 499-509.
- [81] **Mahini**, S.S. and Ronagh, H.R. (2011) Web-bonded FRPs for relocation of plastic hinges away from the column face in exterior RC joints, *Composite Structures*, 93 (10) pp. 2460-2472.
- [82] **Hawileh**, R.A., Naser, M.Z. and Abdalia, J.A. (2009) Finite element simulation of reinforced concrete beams externally strengthened with short-length CFRP plates, *Composites Part B Engineering*, 45 (1) pp. 1722-1730.
- [83] **Mirmiran**, A., Zagers, K. and Yuan, W. (2000) Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites, *Finite Elements in Analysis and Design*, 35 (1) pp. 79-96.
- [84] **ANSYS** (2012) *Workbench User's Guide*, Release 14.5, ANSYS, Inc.
- [85] **William**, K.J. and Warnke, E.P. (1974) Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete, *In proceedings of the International Assoc. for Bridge and Structural Engineering*, Bergamo, Italy: ISMES Press.
- [86] **ANSYS** (1999) *Theory Reference*, Release 5.6, ANSYS, Inc.
- [87] **Luo**, R-d. (2008) Values of shear transfer coefficients of concrete element Solid 65 in Ansys, *Journal of Jiangsu University*, 29 (2) pp. 169-172.
- [88] **Drucker**, D., Prager, W. and Greenberg, H. (1952) Extended limit design theorems for continuous media, *Quarterly of Applied Mathematics*, 9 (4) pp. 381-389.
- [89] **Džolev**, I., Rašeta, A., Lađinović, Đ., Radujković, A. and Starčev-Ćurčin, A. (2019) Influence of tensile stress softening in nonlinear concrete modelling, *18th International Symposium of MASE at Ohrid*, North Macedonia, pp. 1234-1242.
- [90] **Choi**, K., Meshgin, P. and Reda Taha, M.M. (2007) Shear creep of epoxy at the concrete-FRP interfaces, *Composites Part : Engineering*, 38 (5) pp. 772-780.

PRILOG A

Rezultati ispitivanja greda pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja

PRILOG A1

Podaci očitani na instrumentima za mjerenje deformacijskog stanja greda pri kratkotrajnom opterećenju

PRILOG A2

Rezultati mjerenja deformacijskog stanja greda pri kratkotrajnom opterećenju u karakterističnom presjeku u sredini

Prilog A1: GREDA G1a

<i>Oznaka grede</i>	<i>Datum ispitivanja</i>	<i>l (m)</i>	<i>l_{CFRP} (m)</i>	<i>Vrsta opterećenja</i>		<i>Mu (kNm)</i>	<i>Tip loma</i>	<i>T (°C)</i>	<i>W (%)</i>
G1a	10.10.2014.	7.5	/	koncentrisana sila		65.6	na savijanje	21	93
UGIBI	Mu (kNm)	0	19	28	38	47	56	60	65
	Č	-143	37	292	1176	1857	3002	3720	7817
	ΔČ	0	180	435	1319	2000	3145	3863	7960
	u (cm)	0.00	0.18	0.44	1.32	2.00	3.15	3.86	7.96
PRSLINE U BETONU (kritični presjek)	Mu (kNm)	0	19	28	38	47	56	60	65
	a (mm)	/	/	/	/	/	0.3	0.6	3.0
DILATACIJE U ZATEGNUTOM BETONU	Mu (kNm)	0	19	28	38	47	56	60	
	1	0	1.01	1.87	3.94	4.55	8.96	11.12	
	2	0	0.85	1.48	3.25	5.17	9.61	10.83	
	3	0	1.44	2.18	4.41	5.02	12.19	13.46	
	4	0	1.26	2.36	4.48	6.21	9.23	12.66	
	5	0	0.91	1.75	4.04	5.99	8.81	11.09	
	6	0	1.30	2.88	4.15	6.47	10.05	12.22	
DILATACIJE U PRITISNUTOM BETONU	Mu (kNm)	0	19	28	38	47	56	60	
	1	0	0.96	2.38	3.44	4.15	5.31	6.18	
	2	0	0.66	1.83	3.02	3.75	5.40	6.79	
	3	0	0.45	1.55	2.69	3.23	4.66	5.75	
	4	0	0.61	1.63	2.92	4.05	5.21	6.01	
	5	0	0.39	1.34	2.55	3.48	4.87	5.62	
	6	0	0.52	1.70	3.18	3.82	5.48	6.29	

Prilog A1: GREDA G2

<i>Oznaka grede</i>	<i>Datum ispitivanja</i>	<i>l (m)</i>	<i>l_{CFRP} (m)</i>	<i>Vrsta opterećenja</i>			<i>Mu (kNm)</i>	<i>Tip loma</i>				<i>T (°C)</i>	<i>W (%)</i>
G₂	28.10.2014.	7.5	4.0	koncentrisana sila			125.5	KDP+lom na savijanje				19	60
UGIBI	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	75	94	103	113	122	0	
	Č	11704	11699	11693	11686	11683	11679	11671	11665	11650	11636	11668	
	ΔČ	0	5	11	18	21	25	33	39	54	68	36	
	u (cm)	0.0	0.5	1.1	1.8	2.1	2.5	3.3	3.9	5.4	6.8	3.6	
PRSLINE U BETONU (kritični presjek)	Mu (kNm)	19	28	38	47	56	66	75	84	94	103	113	
	a (mm)	/	/	/	/	/	/	0.45	0.50	0.60	0.65	0.75	
DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI	Mu (kNm)	0	19	56	66	75	84	94	103	113	122	0	
	1	0	0.05	0.20	0.20	0.23	0.25	0.26	0.26	0.26	0.24	0.02	
	2	0	0.17	0.87	1.05	1.25	1.44	1.63	1.82	2.06	2.68	1.15	
	3	0	0.31	1.21	1.43	1.67	1.90	2.19	3.01	5.42	6.59	4.34	
	4	0	0.15	0.80	1.02	1.22	1.41	1.60	1.77	2.00	2.34	0.74	
	5	0	0.05	0.15	0.15	0.16	0.15	0.15	0.14	0.16	0.17	0.05	
DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	75	84	94	103	113	122	
	1	0	0.44	1.74	2.45	3.60	4.05	4.43	4.66	4.79	4.91	5.17	
	2	0	0.49	1.91	3.02	4.36	4.85	5.29	5.48	5.61	5.84	6.11	
	3	0	0.51	4.37	4.77	5.09	5.40	5.62	5.87	5.99	6.13	6.53	
	4	0	0.43	1.22	2.80	4.15	4.37	4.98	5.14	5.30	5.77	6.07	
	5	0	0.59	1.83	2.64	3.58	4.46	4.99	5.27	5.46	5.68	6.34	
DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	75	84	94	103	113	122	
	1	0	1.33	5.61	7.16	7.29	7.33	7.39	7.46	7.51	7.56	7.59	
	2	0	1.31	2.26	2.89	3.47	3.85	4.11	5.60	7.19	7.37	7.49	
	3	0	0.48	1.23	2.56	3.02	4.44	5.08	6.95	7.03	7.19	7.34	
	4	0	0.64	1.55	2.69	3.56	4.17	5.52	6.89	7.03	7.17	7.41	

Prilog A1: GREDA G3

<i>Oznaka grede</i>	<i>Datum ispitivanja</i>	<i>l (m)</i>	<i>l_{CFRP} (m)</i>	<i>Vrsta opterećenja</i>		<i>Mu (kNm)</i>	<i>Tip loma</i>					<i>T (°C)</i>	<i>W (‰)</i>
G3	15.11.2014.	7.5	6.0	koncentrisana sila		138.7	KDP+lom na savijanje					14	73
UGIBI	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	84	94	103	122	137	0	
	Č	220	228	241	302	330	367	382	406	445	990	630	
	ΔČ	0	8	21	82	110	147	162	186	225	770	410	
	u (cm)	0.00	0.08	0.21	0.82	1.10	1.47	1.62	1.86	2.25	7.70	4.10	
PRSLINE U BETONU (kritični presjek)	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	75	84	94	103	122	137	
	a (mm)	/	/	/	/	/	/	/	0.35	0.40	0.50	0.55	
DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	84	94	103	113	122	0	
	1	0	0.11	0.23	0.26	0.27	0.27	0.29	0.32	0.35	0.36	0.13	
	2	0	0.19	0.33	0.68	1.39	1.65	1.72	1.85	2.01	3.12	1.25	
	3	0	0.45	0.79	1.19	1.44	1.89	2.36	3.01	4.63	7.45	3.56	
	4	0	0.09	0.26	0.70	0.98	1.22	1.75	1.91	2.18	2.55	1.05	
	5	0	0.12	0.36	0.82	1.29	1.48	2.31	2.85	3.16	3.64	1.57	
DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	84	94	103	122			
	1	0	0.51	1.68	2.84	3.68	4.11	4.29	4.70	5.01			
	2	0	0.62	2.11	2.95	3.36	4.48	5.02	5.33	6.18			
	3	0	1.32	4.54	4.98	5.23	6.56	7.07	7.88	8.17			
	4	0	0.58	1.65	2.19	2.96	3.87	4.65	6.21	6.95			
	5	0	0.42	1.56	2.81	3.62	4.15	4.76	6.06	7.22			
	6	0	0.81	1.93	3.05	3.71	4.60	5.51	6.47	7.14			
DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	84	94	103	122			
	1	0	2.52	6.22	7.45	7.52	7.59	7.65	7.77	7.81			
	2	0	1.11	1.86	2.55	3.13	3.68	4.25	5.89	6.55			
	3	0	0.89	1.45	2.84	4.01	4.95	5.62	6.33	7.23			
	4	0	0.58	1.21	2.03	2.76	3.41	4.67	6.12	6.88			

Prilog A1: GREDA G1b

<i>Oznaka grede</i>	<i>Datum ispitivanja</i>	<i>l (m)</i>	<i>l_{CFRP} (m)</i>	<i>Vrsta opterećenja</i>		<i>Mu (kNm)</i>	<i>Tip loma</i>	<i>T (°C)</i>	<i>W (%)</i>
G1b	17.01.2016.	7.5	/	ravnomjerno podijeljeno		76.9	na savijanje	6	14
UGIBI	Mu (kNm)	0	26	39	51	59	66	69	
	Č	110	1090	3350	5990	7750	9230	9510	
	ΔČ	0	980	3240	5880	7640	9120	9400	
	u (cm)	0.00	0.98	3.24	5.88	7.64	9.12	9.40	
PRSLINE U BETONU (kritični presjek)	Mu (kNm)	0	26	39	51	59	66	69	
	a (mm)	/	/	/	0.40	0.55	0.80	2.50	
DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU	Mu (kNm)	0	9	26	39	51	65	69	
	1	0	0.38	0.95	3.66	6.16	8.45	9.96	
	2	0	0.54	1.13	5.80	8.80	11.30	11.88	
	3	0	0.29	0.82	4.23	7.41	10.02	10.76	
	4	0	0.65	1.09	5.54	8.20	10.68	11.53	
	5	0	0.44	0.87	4.05	7.38	9.55	11.16	
	6	0	0.71	1.24	4.93	7.87	9.91	11.35	
DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU	Mu (kNm)	0	26	39	51	59	66	69	
	1	0	0.37	1.43	2.56	3.77	4.62	5.04	
	2	0	0.25	1.12	1.94	3.03	4.57	4.90	
	3	0	0.41	1.51	2.45	3.62	4.89	5.11	
	4	0	0.60	1.85	2.33	3.84	4.32	4.79	
	5	0	0.28	0.95	1.84	2.93	3.77	4.63	
	6	0	0.45	1.23	1.75	2.88	3.81	4.55	

Prilog A1: GREDA G4

Oznaka grede	Datum ispitivanja	l (m)	l_{CFRP} (m)	Vrsta opterećenja		M_u (kNm)	Tip loma		T (°C)	W (%)
G4	16.06.2016.	7.5	4.0	ravnomojerno podijeljeno		119.4	lom po zašt.sloju betona i duž trake		28	70
UGIBI	Mu (kNm)	0	39	59	69	70	108	117	119	0
	Č	285	435	525	555	565	805	1065	1185	1000
	ΔČ	0	150	240	270	280	520	780	900	715
	u (cm)	0.00	1.50	2.40	2.70	2.80	5.20	7.80	9.00	7.15
PRSLINE U BETONU (kritični presjek)	Mu (kNm)		39	59	65	69	70	98	108	117
	a (mm)	oslonac	/	/	/	/	/	0.3	0.8	2.0
		polje	/	/	/	/	/	0.5	0.9	/
DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI	Mu (kNm)	0	39	59	69	70	98	108	117	0
	1	1	279	495	88	72	35	20	307	37
	2	4	631	1130	1428	1491	2031	2264	3006	154
	3	5	718	1243	1549	1614	2454	4071	5519	256
	4	3	749	1258	1563	1634	2643	4761	6150	2247
	5	0	688	1209	1502	1566	2200	2577	4531	4040
	6	0	527	1040	1330	1392	1882	2090	2367	3970
DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU	Mu (kNm)	0	39	59	69	70	98	108	117	0
	1	3	708	1210	1494	1533	2231	4264	5589	-
	2	0	641	1090	1365	1437	-	-	-	-
	3	0	655	1080	1335	1385	2039	2401	2580	-
	4	5	464	887	1130	1174	1853	3764	6290	3747
	5	2	661	1114	1352	1398	2154	3486	3952	1484
	6	1	701	1122	1332	1377	1826	2221	2640	-
DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU	Mu (kNm)	0	39	59	69	70	98	108	117	0
	1	4	185	333	419	446	673	884	1047	900
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	17	311	459	542	575	760	855	947	829
	4	13	332	459	534	551	707	861	977	-
	5	14	425	571	656	674	850	1038	1170	985
	6	7	322	447	525	540	680	770	876	-

Prilog A1: GREDA G5

Oznaka grede	Datum ispitivanja	<i>l</i> (m)	<i>l_{CERP}</i> (m)	Vrsta opterećenja	<i>M_u</i> (kNm)	Tip loma	<i>T</i> (°C)	<i>W</i> (%)
G ₅	02.09.2016.	7.5	4.0	ravnomjerno podijeljeno	128.8	na savijanje	31	55

UGIBI	<i>M_u</i> (kNm)	0	39	59	69	70	89	108	117	127	0
	Č	250	363	415	465	484	610	900	1100	1350	870
	AČ	0	113	165	215	234	360	650	850	1100	620
	u (cm)	0.00	1.13	1.65	2.15	2.34	3.60	6.50	8.50	11.00	6.20
	PRSLINE U BETONU (kritičjesi)	0	39	59	66	69	70	89	108	117	127

DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI	<i>a</i> (mm)	/	/	0.45	0.50	0.55	0.55	0.60	0.70	0.75	0.80
	<i>M_u</i> (kNm)	0	26	39	51	59	66	70	89	108	117
	1	18	29	38	62	105	181	255	83	46	36
	2	108	188	247	400	569	803	950	1099	1232	1293
	3	147	267	355	610	862	1147	1305	1585	1818	1916
	4	225	385	504	781	1034	1295	1447	1793	2158	2734
	5	365	549	726	1036	1308	1643	1826	2319	3668	4815
	6	285	428	627	924	1181	1545	1718	2134	3308	4443
	7	155	240	389	677	954	1267	1440	1806	2161	2424
	8	88	125	191	332	525	782	924	1116	1296	1394
	9	16	22	34	57	110	91	88	88	81	75
	10	8	12	18	26	34	43	52	61	70	79

DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU	<i>M_u</i> (kNm)	0	26	39	51	59	66	70	89	108	117	127	128	0
	1	248	398	505	778	1015	1257	1416	1786	2117	2709	2870	3052	1306
	2	251	390	539	803	1034	1298	1443	1852	2755	3164	5732	6107	3346
	3	204	324	498	726	951	1202	1347	1695	3105	3920	4751	4891	2712
	4	124	212	285	458	633	773	862	1089	1350	1651	4716	5126	2654
	5	397	635	229	1130	1408	1707	1894	2376	3823	4527	6326	6608	3784
	6	305	456	671	1020	1288	1593	1776	2144	3196	4643	7401	7876	4429

DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU	<i>M_u</i> (kNm)	0	26	39	51	59	66	70	89	108	117	127	128	0
	1	227	331	408	528	617	688	729	818	911	984	1082	1098	392
	2	286	420	528	669	771	871	914	1022	1154	1243	1361	1384	498
	3	234	330	414	525	610	736	777	893	1095	1206	1375	1411	468
	4	85	125	159	227	288	389	432	523	626	712	856	881	207
	5	100	139	178	244	304	401	442	534	664	772	900	919	231
	6	95	136	183	253	315	427	468	565	758	854	1008	1039	284

Prilog A2: UGIBI

G_{1a}	P (kN)	0	10	15	20	25	30	32	35
	Mu (kNm)	0	19	28	38	47	56	60	66
	U _{1a} (cm)	0.00	0.18	0.44	1.32	2.00	3.15	3.86	7.96

G_2	P (kN)	0	10	20	30	35	40	50	55	60	65
	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	75	94	103	113	122
	U ₂ (cm)	0.0	0.5	1.1	1.8	2.1	2.5	3.3	3.9	5.4	6.8

G_3	P (kN)	0	20	30	35	45	55	65	70
	Mu (kNm)	0	38	56	66	84	103	122	131
	U ₃ (cm)	0.00	0.21	0.82	1.10	1.47	1.86	2.25	7.70

G_{1b}	P (kN)	0	15	25	35	45	55	65
	Mu (kNm)	0	26	39	51	59	66	69
	U _{1b} (cm)	0.00	0.98	3.24	5.88	7.64	9.12	9.40

G_4	P (kN)	0	25	45	65	75	90	95	100
	Mu (kNm)	0	39	59	69	70	98	108	117
	U ₄ (cm)	0.00	1.50	2.40	2.70	2.80	5.20	7.80	9.00

G_5	P (kN)	0	25	45	65	75	85	95	100	105
	Mu (kNm)	0	39	59	69	70	89	108	117	127
	U ₅ (cm)	0.00	1.13	1.65	2.15	2.34	3.60	6.50	8.50	11.10

Prilog A2: DILATACIJE U ZATEGNUTOM PRESJEKU BETONA

G_{1a}	P (kN)	0	10	15	20	25	30	32	35
	Mu (kNm)	0	19	28	38	47	56	60	66
	ε_{1a} (‰)	0	1.44	2.18	4.41	5.02	12.19	13.46	/

G_2	P (kN)	0	10	20	30	35	40	50	65	67
	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	75	94	122	126
	ε_2 (‰)	0.00	0.51	4.37	4.77	5.09	5.40	5.87	6.53	/

G_3	P (kN)	0	10	20	30	45	55	65	74
	Mu (kNm)	0	19	38	56	84	103	122	139
	ε_3 (‰)	0.00	1.32	4.54	4.98	6.56	7.88	8.17	/

G_{1b}	P (kN)	0	5	15	25	35	55	65	71
	Mu (kNm)	0	9	26	39	51	65	69	69
	ε_{1b} (‰)	0.00	0.54	1.13	5.80	8.80	11.30	11.88	/

G_4	P (kN)	0	25	45	65	75	90	95	100
	Mu (kNm)	0	39	59	69	70	98	108	117
	ε_4 (‰)	0.01	0.46	0.89	1.13	1.17	1.85	3.76	6.29

G_5	P (kN)	0	15	25	35	45	55	75	85	95	100	105	106
	Mu (kNm)	0	26	39	51	59	66	70	89	108	117	127	128
	ε_5 (‰)	0.31	0.46	0.67	1.02	1.29	1.59	1.78	2.14	3.20	4.64	7.40	7.88

Prilog A2: DILATACIJE U PRITISNUTOM PRESJEKU BETONA

G_{1a}	P (kN)	0	10	15	20	25	30	32	35
	Mu (kNm)	0	19	28	38	47	56	60	66
	ε_{1a} (‰)	0	0.66	1.83	3.02	3.75	5.40	5.94	6.79

G_2	P (kN)	0	10	20	30	35	40	50	65
	Mu (kNm)	0	19	38	56	66	75	94	122
	ε_2 (‰)	0.00	1.33	5.61	7.16	7.29	7.33	7.46	7.59

G_3	P (kN)	0	10	20	30	40	50	60	65
	Mu (kNm)	0	19	38	56	75	94	113	122
	ε_3 (‰)	0.00	2.52	6.22	7.45	7.59	7.77	7.89	7.96

G_{1b}	P (kN)	0	5	15	25	35	45	55	65	71
	Mu (kNm)	0	9	26	39	51	59	66	69	69
	ε_{1b} (‰)	0	0.21	0.41	1.51	2.45	3.62	4.89	5.11	/

G_4	P (kN)	0	25	45	65	75	90	95	100
	Mu (kNm)	0	39	59	69	70	98	108	117
	ε_4 (‰)	0.00	0.43	0.57	0.66	0.67	0.85	1.04	1.17

G_5	P (kN)	0	15	25	35	45	55	75	85	95	105	106
	Mu (kNm)	0	26	39	51	59	66	70	89	108	127	128
	ε_5 (‰)	0.00	0.41	0.53	0.61	0.74	0.78	0.81	0.89	1.10	1.38	1.41

Prilog A2: DILATACIJE U KARBONSKIM TRAKAMA

G_2	P (kN)	0	10	30	35	40	45	50	55	60	65	0
	Mu (kNm)	0	19	56	66	75	84	94	103	113	122	0
	ε_2 (‰)	0.00	0.31	1.21	1.43	1.67	1.90	2.19	3.01	5.42	6.59	4.34

G_3	P (kN)	0	10	20	30	40	50	60	65	0
	Mu (kNm)	0	19	38	56	75	94	113	122	0
	ε_3 (‰)	0.00	0.45	0.79	1.19	1.89	2.36	4.63	7.45	3.56

G_4	P (kN)	0	25	45	65	75	90	95	100	0
	Mu (kNm)	0	39	59	69	70	98	108	117	0
	ε_4 (‰)	0.00	0.46	0.89	1.13	1.17	1.85	3.76	6.29	3.75

G_5	P (kN)	0	15	25	35	45	55	75	85	95	100	105	106	0
	Mu (kNm)	0	26	39	51	59	66	70	89	108	117	127	128	0
	ε_5 (‰)	0.00	0.55	0.73	1.04	1.31	1.64	1.83	2.32	3.67	4.82	6.89	7.20	4.04

PRILOG B

Rezultati ispitivanja greda pod dejstvom dugotrajnog opterećenja

PRILOG B1

Podaci očitani na instrumentima za mjerenje deformacijskog stanja greda pri dugotrajnom opterećenju

PRILOG B2

Rezultati mjerenja deformacijskog stanja greda pri dugotrajnom opterećenju u karakterističnom presjeku

PRILOG B3

Podaci očitani na instrumentima za mjerenje tečenja na kontrolnim cilindrima

PRILOG B4

Rezultati ispitivanja tečenja na kontrolnim cilindrima

Prilog B1: GREDA G6

Oznaka grede	<i>l</i> (m)	<i>l</i> _{CFRP} (m)	Vrsta opterećenja	* Nivo opterećenja	<i>Mu</i> (kNm)	Tip loma	Starost pri lomu (dani)	<i>T</i> (°C)	<i>W</i> (%)
G6	7.5	6.0	dugotrajno ravnomjerno podijeljeno	55%	134.0	lom po betonu na savijanje	177	12	68

PRSLINE U BETONU (kritični presjek)	<i>Mu</i> (kNm)	0	59	66	69	70	89	108	117	127	132
	<i>a</i> (mm)	/	/	/	0.30	0.45	0.55	0.75	0.80	0.90	1.20

Datum ispitiv.	** t (dani)	Mu (kNm)	DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI									DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU						DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU					
22.09.16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22.09.16	0	39	22	394	572	792	763	870	600	317	19	729	753	740	755	678	873	536	267	488	191	249	417
22.09.16	0	59	27	781	1136	1315	1284	1466	1121	706	20	1253	1234	1206	1320	1132	1518	754	422	692	296	362	437
22.09.16	0	66	28	810	1193	1385	1359	1574	1231	834	25	1327	1298	1290	1390	1179	1632	784	446	725	312	379	448
22.09.16	0	70	29	930	1341	1543	1501	1765	1385	987	29	1490	1420	1477	1505	1226	1809	842	495	786	346	414	447
25.09.16	3	70	29	942	1357	1564	1522	1781	1402	1010	29	1499	1441	1481	1519	1233	1826	846	497	797	348	416	445
02.10.16	10	70	29	943	1359	1569	1525	1792	1405	1012	29	1505	1458	1483	1522	1245	1839	850	499	802	351	417	452
09.10.16	17	70	29	946	1360	1577	1531	1802	1406	1016	31	1514	1462	1483	1523	1251	1846	861	500	807	352	419	458
23.10.16	34	70	29	946	1360	1581	1534	1815	1410	1017	32	1518	1467	1490	1527	1256	1860	867	507	817	355	422	461
06.11.16	48	70	29	948	1363	1584	1541	1822	1416	1021	32	1521	1471	1492	1528	1261	1872	867	511	820	359	425	461
20.11.16	62	70	30	949	1366	1589	1545	1828	1418	1023	32	1527	1475	1494	1528	1263	1880	869	513	828	362	426	462
04.12.16	76	70	30	949	1367	1595	1547	1831	1424	1023	34	1532	1479	1497	1530	1269	1882	870	514	829	363	426	467
18.12.16	90	70	32	949	1382	1603	1562	1840	1424	1028	36	1532	1490	1499	1536	1274	1893	874	517	833	380	429	472
01.01.17	104	70	34	950	1389	1613	1578	1855	1427	1034	37	1540	1512	1517	1559	1276	1916	888	538	837	384	431	480
15.01.17	118	70	50	951	1392	1632	1611	1858	1427	1034	41	1558	1544	1538	1577	1291	1940	890	540	839	385	436	495
29.01.17	132	70	51	951	1395	1636	1620	1871	1429	1036	43	1587	1553	1552	1590	1305	1961	892	541	839	388	437	499
12.02.17	146	70	51	953	1395	1639	1648	1874	1433	1037	43	1591	1562	1564	1603	1318	1969	895	546	844	391	440	507
26.02.17	160	70	53	955	1396	1640	1666	1882	1433	1037	47	1602	1567	1567	1605	1327	1978	900	547	848	395	442	509
12.03.17	174	70	50	955	1398	1644	1694	1886	1435	1038	48	1604	1570	1567	1611	1330	1985	906	551	853	399	443	509
15.03.17	177	80	52	968	1439	1714	1716	1929	1473	1044	50	1717	1690	1678	1707	1420	2119	945	574	729	421	464	523
15.03.17	177	89	52	1018	1557	1876	1898	2120	1588	1116	54	1894	1872	1838	1853	1562	2325	1001	627	786	477	507	564
15.03.17	177	108	51	1165	1803	2363	3451	3471	1855	1313	57	2348	3552	3018	2408	3229	4376	1236	863	1087	626	665	721
15.03.17	177	117	53	1236	1944	3522	4743	4463	2050	1399	61	3561	4557	4328	4331	4774	5676	1432	1044	1292	730	764	804
15.03.17	177	127	51	1312	2187	4599	6183	5744	2514	1472	65	4722	4977	5816	5432	6692	7618	1613	1197	1448	818	847	882
15.03.17	177	132	49	1369	2983	5372	7121	6455	2878	1499	77	5566	5321	6614	5982	7323	8340	1718	1282	1558	884	914	932
18.03.17	177	0	43	952	2177	4428	5942	5363	2175	1110	53	4692	4389	5699	4931	6141	6966	1365	954	1177	549	679	705
01.04.17	191	0	33	912	2102	4392	5867	5312	2105	1086	41	4606	4268	5618	4859	6101	6785	1308	911	1112	522	619	680
15.04.17	205	0	31	899	2085	4377	5845	5292	2090	1069	30	4538	4215	5555	4800	5889	6662	1274	878	1096	501	576	671

* nivo opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost grede pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja

** vrijeme prošlo od početka ispitivanja

Prilog B1: GREDA G7

Oznaka grede	<i>l</i> (m)	<i>l</i> _{CFRP} (m)	Vrsta opterećenja	* Nivo opterećenja	<i>Mu</i> (kNm)	Tip loma	Starost pri lomu (dani)	<i>T</i> (°C)	<i>W</i> (%)
G7	7.5	4.0	dugotrajno ravnomjerno podijeljeno	60%	125.0	lom po zaštitnom sloju betona i duž trake	181	29	75

PRSLINE U BETONU (kritični presjek)	<i>Mu</i> (kNm)	0	26	39	59	69	70	89	108	117	123
	<i>a</i> (mm)	/	/	/	0.30	0.55	0.70	0.85	1.10	1.20	1.35

Datum ispitivanja	** <i>t</i> (dani)	<i>Mu</i> (kNm)	DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI							DILATACIJA U ZATEGNETOM BETONU						DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU					
			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30.12.16.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30.12.16.	0	26	128	398	457	493	439	356	158	415	529	366	355	463	611	211	191	117	203	237	201
30.12.16.	0	39	228	715	772	849	763	645	227	729	806	579	729	771	1038	322	284	182	304	334	292
30.12.16.	0	59	254	1393	1392	1561	1455	1295	241	1365	1411	1186	1372	1469	1912	547	470	336	474	495	446
30.12.16.	0	0	279	1573	1547	1741	1625	1430	260	1539	1560	1334	1539	1638	2113	590	503	369	526	542	492
02.01.17.	3	3	284	1596	1557	1755	1646	1434	263	1566	1561	1345	1561	1651	2131	593	505	372	530	546	498
09.01.17.	10	9	284	1599	1565	1758	1650	1437	265	1593	1563	1348	1573	1655	2133	595	507	372	533	547	499
16.01.17.	17	16	284	1601	1571	1759	1651	1440	269	1663	1567	1349	1587	1657	2135	597	507	372	534	549	499
23.01.17.	24	23	287	1600	1573	1767	1654	1444	269	1720	1569	1362	1642	1667	2150	598	508	384	537	551	504
06.02.17.	38	36	288	1604	1579	1773	1659	1452	278	1726	1571	1367	1646	1669	2151	602	517	389	544	554	506
20.02.17.	52	49	301	1604	1579	1774	1661	1455	279	1731	1578	1370	1650	1672	2151	607	520	391	545	562	511
06.03.17.	66	62	305	1605	1581	1777	1663	1459	280	1734	1580	1376	1656	1679	2154	613	528	393	550	564	515
20.03.17.	80	75	305	1611	1582	1778	1664	1460	280	1738	1582	1379	1659	1680	2158	614	533	399	552	567	517
03.04.17.	94	88	305	1613	1587	1789	1670	1463	286	1764	1583	1383	1663	1685	2160	619	536	401	554	568	517
17.04.17.	108	101	308	1616	1593	1793	1675	1464	287	1767	1588	1392	1666	1687	2160	628	537	401	555	571	520
01.05.17.	122	114	311	1616	1593	1794	1675	1470	287	1773	1590	1396	1680	1695	2182	632	542	409	560	572	520
15.05.17.	136	128	312	1628	1607	1807	1688	1476	290	1780	1591	1406	1697	1711	2198	634	545	415	561	574	522
29.05.17.	150	141	312	1655	1639	1839	1716	1505	297	1798	1594	1415	1707	1728	2211	639	549	417	561	574	523
12.06.17.	164	154	314	1670	1666	1859	1768	1521	297	1812	1624	1433	1721	1739	2219	640	552	422	563	575	525
26.06.17.	178	263	315	1689	1682	1888	1763	1536	298	1839	1637	1452	1737	1750	2230	642	553	430	563	576	526
29.06.17.	181	269	338	1936	1987	2287	2067	1775	322	2195	1980	1711	2074	2107	2573	725	627	491	639	649	588
29.06.17.	181	269	355	2088	2335	3684	2348	1923	360	2552	2698	1995	2599	3484	2806	813	740	565	731	783	673
29.06.17.	181	269	370	2268	4194	5544	3626	2070	384	3847	3719	3419	5359	5447	3443	982	1047	642	924	955	775
29.06.17.	181	269	389	2778	5777	7117	5163	2252	417	5990	4636	4730	7831	7063	5067	1119	1202	725	1070	1071	870
29.06.17.	181	269	405	3312	6188	7647	5848	2406	461	6502	4997	5588	8414	7577	5762	1162	1258	777	1118	1108	914
29.06.17.	181	0	155	1336	4594	6280	2428	441	223	5268	4012	4526	6681	6127	4691	848	804	522	762	819	631
13.07.17.	195	0	131	1288	4266	6172	2107	437	174	4955	3820	4288	6224	5847	4445	814	760	497	705	783	605
27.07.17.	209	0	120	1044	4013	6061	2065	422	151	4732	3666	4104	6010	5772	4381	765	721	459	679	760	584

* nivo opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost grede pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja

** vrijeme prošlo od početka ispitivanja

Prilog B1: GREDA G8

Oznaka grede	<i>l</i> (m)	<i>l</i> _{CFRP} (m)	Vrsta opterećenja	* Nivo opterećenja	<i>Mu</i> (kNm)	Tip loma	Starost pri lomu (dani)	<i>T</i> (°C)	<i>W</i> (%)
G8	7.5	6.0	dugotrajno ravnomjerno podijeljeno	55%→75%	121.0	lom po betonu na savijanje	278	27	61

PRSLINE U BETONU (kritični presjek)	<i>Mu</i> (kNm)	0	26	39	51	59	66	70	96	106	115	121
	<i>a</i> (mm)	/	/	/	/	0.30	0.40	0.70	1.10	1.25	1.35	1.55

Datum ispitiv.	<i>** t</i> (dani)	Mu (kNm)	DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI									DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU						DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU					
07.12.16.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
07.12.16.	0	26	25	196	222	398	525	368	285	149	66	254	406	232	484	554	463	192	251	241	242	312	100
07.12.16.	0	51	32	549	833	1035	1087	1065	838	489	229	666	909	605	1300	1202	1265	365	438	445	442	520	213
07.12.16.	0	70	26	984	1366	1583	1597	1557	1363	910	254	1013	1385	932	2076	1887	1742	509	595	572	553	629	269
10.12.16.	3	70	29	990	1371	1587	1588	1559	1374	914	251	1014	1389	946	2092	1893	1748	510	600	572	554	627	269
13.12.16.	6	70	31	1000	1381	1588	1574	1551	1407	915	251	1016	1402	980	2096	1902	1751	526	616	577	564	634	270
20.12.16.	13	70	31	1002	1392	1588	1575	1561	1423	917	251	1019	1422	997	2096	1905	1756	527	624	581	564	634	274
27.12.16.	20	70	31	1006	1396	1590	1579	1563	1428	918	251	1019	1434	1002	2099	1905	1766	529	625	584	565	635	280
03.01.17.	27	70	32	1024	1401	1597	1582	1570	1438	926	251	1020	1443	1011	2102	1910	1768	535	631	590	568	638	284
10.01.17.	34	70	28	1049	1416	1610	1594	1581	1451	935	252	1024	1479	1023	2104	1913	1772	534	632	592	575	640	287
17.01.17.	41	70	29	1053	1444	1636	1622	1608	1478	957	252	1034	1499	1043	2107	1930	1780	522	636	593	577	646	287
24.01.17.	48	70	29	1056	1447	1641	1625	1611	1481	962	252	1034	1499	1046	2115	1936	1784	528	642	598	581	648	290
31.01.17.	55	70	29	1066	1450	1645	1628	1616	1485	967	252	1036	1504	1049	2115	1939	1784	528	648	600	589	654	292
07.02.17.	62	70	28	1075	1465	1656	1640	1627	1497	974	254	1042	1528	1063	2119	1945	1793	520	655	603	602	656	292
14.02.17.	69	70	27	1083	1472	1667	1649	1635	1504	982	254	1045	1531	1064	2121	1949	1793	520	657	603	609	657	296
21.02.17.	76	70	27	1088	1479	1675	1659	1647	1513	994	258	1048	1536	1065	2128	1958	1795	529	664	608	611	659	301
28.02.17.	83	70	27	1089	1480	1679	1666	1650	1518	999	259	1058	1542	1070	2133	1966	1795	530	669	608	614	660	309
14.03.17.	97	70	29	1096	1484	1681	1670	1655	1518	1001	260	1071	1548	1074	2136	1978	1797	533	670	611	615	660	311
21.03.17.	104	70	28	1101	1492	1685	1677	1659	1521	1005	262	1085	1551	1078	2147	1992	1798	535	672	613	621	663	311
28.03.17.	111	70	28	1112	1496	1688	1683	1662	1528	1007	262	1094	1555	1078	2149	1999	1802	536	677	614	622	666	314
11.04.17.	125	70	30	1114	1505	1689	1690	1667	1529	1011	265	1102	1557	1091	2150	2014	1804	548	680	616	626	667	315
18.04.17.	132	70	28	1115	1508	1695	1699	1672	1533	1017	266	1119	1560	1093	2155	2029	1804	550	684	619	628	667	317
25.04.17.	139	70	27	1118	1512	1698	1704	1675	1536	1019	268	1121	1563	1095	2157	2034	1807	555	685	627	630	673	320

* nivo opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost grede pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja

** vrijeme prošlo od početka ispitivanja

<i>Oznaka grede</i>	<i>l (m)</i>	<i>l_{CFRP} (m)</i>	<i>Vrsta opterećenja</i>	<i>* Nivo opterećenja</i>	<i>Mu (kNm)</i>	<i>Tip loma</i>	<i>Starost pri lomu (dani)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>W (%)</i>
G8	7.5	6.0	dugotrajno ravnomjerno podijeljeno	55%→75%	121.0	lom po betonu na savijanje	278	27.6	61

<i>Datum ispitiv.</i>	<i>** t (dani)</i>	<i>Mu (kNm)</i>	DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI									DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU						DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU					
02.05.17.	146	70	29	1122	1520	1699	1710	1677	1538	1022	268	1122	1565	1098	2157	2038	1808	557	691	629	632	678	321
09.05.17.	153	70	27	1126	1526	1707	1716	1686	1544	1028	270	1128	1566	2005	2160	2054	1809	562	699	632	639	679	322
23.05.17.	167	70	28	1129	1531	1725	1734	1690	1553	1033	274	1135	1586	2014	2169	2065	1815	571	711	642	648	687	345
26.05.17.	170	80	30	1138	1577	1816	1759	1736	1601	1051	277	1251	1694	2130	2280	2120	1932	633	755	707	674	715	377
26.05.17.	170	89	32	1206	1690	2041	1951	1825	1730	1132	277	1436	1881	2328	2428	2284	2111	681	814	760	722	769	421
26.05.17.	170	96	31	1277	1802	2888	2670	1955	1843	1194	280	1682	2234	2891	2758	3384	3088	766	948	891	801	844	496
02.06.17.	177	96	32	1282	1845	3014	2805	2358	1895	1213	282	1730	2599	3033	2861	3523	3229	804	965	930	835	862	537
09.06.17.	184	96	33	1288	1868	3259	3057	2622	1928	1228	280	1827	2884	3195	2914	3705	3455	841	981	948	849	873	544
16.06.17.	191	96	31	1295	1886	3469	3295	2814	1955	1235	282	1895	3258	3317	2955	3839	3703	862	994	966	857	886	551
23.06.17.	198	96	35	1301	1913	3592	3451	2955	1963	1239	281	1915	3440	3455	2976	3893	3892	877	1015	978	864	890	557
30.06.17.	205	96	35	1318	1918	3604	3580	3130	1977	1242	282	1922	3481	3488	2983	3947	4101	885	1018	990	869	898	560
07.07.17.	212	96	33	1329	1921	3617	3588	3141	1984	1244	282	1926	3485	3505	2988	3958	4162	889	1021	994	872	906	563
14.07.17.	219	96	32	1333	1926	3621	3594	3156	1988	1247	279	1934	3490	3516	2990	3973	4188	892	1026	998	875	909	565
21.07.17.	226	96	31	1338	1928	3627	3601	3163	1989	1247	284	1938	3495	3524	2993	3985	4205	896	1029	999	877	911	566
28.07.17.	233	96	34	1341	1929	3630	3604	3175	1991	1248	284	1941	3502	3531	2995	3991	4218	899	1033	1002	878	915	570
11.08.17.	247	96	32	1344	1931	3632	3605	3180	1992	1250	280	1944	3510	3538	2998	4002	4227	901	1035	1005	880	916	572
25.08.17.	261	96	33	1350	1931	3635	3609	3184	1994	1250	277	1945	3514	3540	2999	4006	4231	903	1035	1008	880	918	574
08.09.17.	275	96	30	1352	1933	3636	3611	3188	1996	1252	284	1947	3516	3544	3002	4111	4234	905	1036	1009	881	919	577
11.09.17.	278	106	27	1428	2021	4955	4991	4208	2216	1336	280	3185	4602	4785	4968	5584	5476	###	1230	1197	975	1006	640
11.09.17.	278	115	36	1508	2255	6385	6433	5559	2776	1424	282	4351	5103	6192	6148	7428	7604	###	1635	1366	1068	1091	724
11.09.17.	278	121	29	1615	3612	7924	8038	6925	3456	1494	281	5879	6077	7653	7581	8658	8893	###	1892	1592	1225	1221	844
11.09.17.	278	0	22	1118	2191	6039	6017	5078	2083	1022	274	4005	4408	5863	5453	6830	6844	897	1133	945	803	836	586
25.09.17.	292	0	20	1095	2145	5996	4733	4922	1931	1014	268	3866	4388	5849	5430	6794	6831	863	1098	929	794	808	579
09.10.17.	306	0	18	1077	2110	5957	4571	4884	1918	989	269	3825	4350	5825	5406	6765	6809	835	1074	914	775	769	562

* nivo opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost grede pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja

** vrijeme prošlo od početka ispitivanja

Prilog B1: GREDA G9

Oznaka grede	<i>l</i> (m)	<i>l</i> _{CFRP} (m)	Vrsta opterećenja	* Nivo opterećenja	<i>Mu</i> (kNm)	Tip loma	Starost pri lomu (dani)	<i>T</i> (°C)	<i>W</i> (%)
G9	7.5	4.0	dugotrajno ravnomjerno podijeljeno	60%→82%	115.0	lom po zaštitnom sloju betona i duž trake	290	10	49

PRSLINE U BETONU (kritični presjek)	<i>Mu</i> (kNm)	0	26	39	51	59	66	70	96	106
	<i>a</i> (mm)	/	/	/	0.25	0.50	0.85	1.05	1.50	1.75

Datum ispitiv.	** t (dani)	<i>Mu</i> (kNm)	DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI							DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU						DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU			
16.03.17.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.03.17.	0	39	237	523	769	852	779	576	245	663	854	861	864	788	840	418	291	383	322
16.03.17.	0	59	267	1030	1336	1390	1287	1125	469	1193	1409	1510	1507	1243	1349	604	422	528	426
16.03.17.	0	66	279	1208	1516	1583	1465	1312	531	1355	1598	1728	1708	1394	1522	660	465	574	462
16.03.17.	0	70	283	1394	1707	1802	1657	1503	579	1506	1871	1954	1880	1539	1731	721	512	619	499
17.03.17.	1	70	283	1408	1727	1812	1664	1510	581	1510	1898	1967	1894	1541	1746	729	514	628	501
20.03.17.	4	70	285	1409	1731	1818	1672	1523	583	1513	1905	1969	1899	1544	1751	731	519	633	503
27.03.17.	11	70	285	1409	1735	1826	1680	1538	583	1515	1912	1970	1902	1545	1768	732	519	634	509
03.04.17.	18	70	285	1412	1738	1837	1683	1543	586	1520	1919	1973	1905	1547	1763	734	521	639	510
10.04.17.	25	70	284	1415	1744	1844	1695	1551	588	1525	1928	1974	1906	1547	1770	736	523	640	516
24.04.17.	39	70	287	1419	1749	1845	1701	1555	591	1527	1939	1978	1915	1550	1774	740	523	642	520
01.05.17.	46	70	289	1420	1755	1847	1707	1567	592	1530	1945	1979	1917	1555	1782	743	524	645	522
15.05.17.	60	70	289	1422	1762	1850	1713	1568	592	1531	1946	1985	1926	1557	1788	744	525	645	526
22.05.17.	67	70	289	1426	1762	1851	1716	1570	594	1536	1959	1987	1933	1561	1790	749	525	647	528
05.06.17.	81	70	289	1428	1764	1856	1717	1574	595	1540	1978	1990	1938	1562	1793	751	527	648	532
12.06.17.	88	70	282	1442	1795	1870	1734	1592	595	1544	1993	2002	1992	1569	1805	762	534	650	532
19.06.17.	95	70	294	1447	1803	1877	1742	1599	600	1546	1997	2005	2007	1573	1809	765	537	652	535
26.06.17.	102	70	295	1456	1812	1886	1751	1608	601	1546	1999	2006	2022	1581	1812	768	537	656	537
03.07.17.	109	70	295	1475	1835	1903	1772	1629	602	1549	2007	2013	2039	1586	1823	773	542	662	537
10.07.17.	116	70	295	1480	1845	1909	1778	1638	602	1550	2023	2026	2049	1586	1832	792	553	669	538
17.07.17.	123	70	295	1490	1857	1921	1791	1651	602	1552	2028	2032	2065	1589	1840	802	561	678	540
24.07.17.	130	70	296	1495	1863	1929	1799	1658	601	1558	2036	2041	2072	1596	1848	814	570	690	541
07.08.17.	144	70	296	1503	1871	1937	1808	1667	603	1563	2036	2042	2080	1599	1852	817	574	696	542

* nivo opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost grede pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja

** vrijeme prošlo od početka ispitivanja

<i>Oznaka grede</i>	<i>l (m)</i>	<i>l_{CFRP} (m)</i>	<i>Vrsta opterećenja</i>	<i>* Nivo opterećenja</i>	<i>Mu (kNm)</i>	<i>Tip loma</i>	<i>Starost pri lomu (dani)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>W (%)</i>
G9	7.5	4.0	dugotrajno ravnomjerno podijeljeno	60%→82%	115.0	lom po zaštitnom sloju betona i duž trake	290	10	49

<i>Datum ispitiv.</i>	<i>** t (dani)</i>	<i>Mu (kNm)</i>	DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI							DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU						DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU			
21.08.17.	158	70	299	1511	1888	1940	1814	1681	603	1568	2038	2043	2084	1602	1857	820	577	703	542
04.09.17.	172	70	299	1521	1892	1954	1824	1686	604	1575	2041	2047	2095	1607	1859	825	582	709	544
07.09.17.	175	80	312	1555	2008	2245	1996	1741	622	1707	2278	2192	2235	1811	2005	841	623	751	576
07.09.17.	175	89	325	1712	2120	2486	2105	1932	638	1855	2460	2381	2489	1939	2278	883	655	777	601
07.09.17.	175	96	344	1930	2461	2717	2398	2067	666	2070	2998	2694	2745	2215	2465	950	687	800	641
14.09.17.	182	96	346	1935	2488	2749	2401	2071	681	2109	3144	2721	2759	2154	2467	966	695	808	651
21.09.17.	189	96	346	1944	2540	2874	2488	2086	689	2177	3175	2741	2765	2308	2472	981	709	811	656
28.09.17.	196	96	347	1998	2787	2899	2603	2117	695	2431	3868	2757	2772	2838	2479	1004	725	847	695
05.10.17.	203	96	351	2043	2842	3509	2664	2153	705	2469	3896	2760	2775	2859	2481	1011	732	869	702
12.10.17.	210	96	351	2063	2866	3511	2692	2176	711	2477	3908	2775	2776	2863	2487	1029	750	876	710
19.10.17.	217	96	352	2065	2871	3513	2703	2182	714	2478	3912	2782	2781	2863	2495	1038	758	883	716
25.10.17.	224	96	352	2079	2890	3526	2726	2204	719	2480	3914	2789	2784	2865	2499	1055	778	903	726
01.11.17.	231	96	352	2082	2901	3534	2742	2220	721	2484	3928	2805	2786	2867	2504	1073	792	917	737
08.11.17.	238	96	355	2089	2909	3540	2749	2229	722	2487	3929	2807	2788	2873	2513	1084	804	929	743
15.11.17.	245	96	357	2097	2915	3548	2759	2238	724	2490	3933	2815	2788	2874	2523	1100	818	944	752
29.11.17.	259	96	357	2112	2930	3555	2769	2248	727	2492	3935	2818	2789	2877	2534	1112	834	956	761
13.12.17.	273	96	358	2118	2937	3560	2776	2256	729	2496	3940	2829	2795	2881	2545	1115	835	959	763
27.12.17.	287	96	357	2129	2939	3568	2782	2259	733	2497	3950	2836	2798	2883	2548	1130	837	963	770
30.12.17.	290	106	381	2286	4428	5888	4008	2415	770	3863	5677	3650	5432	5653	3267	1198	906	1096	948
30.12.17.	290	115	404	2805	5912	8446	5326	2633	795	4124	8013	5057	7956	7208	4933	1431	1089	1213	1166
30.12.17.	290	0	163	1021	2380	6477	1925	689	304	2166	6320	4105	6301	5697	3745	933	755	814	784
13.01.18.	304	0	140	914	1986	5563	1859	645	266	1884	6005	3854	6110	5444	3427	882	678	766	680
27.01.18.	318	0	129	888	1744	5111	1775	631	248	1767	5863	3709	6008	5399	3291	847	652	731	666

* nivo opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost grede pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja

** vrijeme prošlo od početka ispitivanja

Prilog B2: UGIBI

GREDA G6	t (dani)	0	0	0	0	0	0	3	10	24	38	52	66	80	94	108	122	136	150	164	178	181	181	181
	P(kN)	0.0	15.0	25.0	45.0	65.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	85.0	95.0	100.0
	Mu (kNm)	0.0	25.6	39.4	59.4	69.4	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	89.1	107.8	117.2
	ε ₆	73.0	71.5	70.5	69.4	69.2	68.6	68.5	68.5	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4	68.3	68.3	68.2	68.2	68.2	68.2	67.9	67.2	66.5
	U6 (cm)	0.0	1.5	2.5	3.6	3.8	4.4	4.5	4.5	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.7	4.7	4.8	4.8	4.8	4.8	5.1	5.8	6.5
	t (dani)	181	181	184																				
	P(kN)	105.0	108.0	0.0																				
	Mu (kNm)	126.6	132.2	0.0																				
	ε ₆	65.2	63.9	68.3																				
U6 (cm)	7.8	9.1	4.7																					
GREDA G7	t (dani)	0	0	0	0	3	10	17	24	38	52	66	80	94	108	122	136	150	164	178	181	181	181	184
	P(kN)	0.0	25.0	45.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	90.0	95.0	100.0	0.0
	Mu (kNm)	0.0	39.4	59.4	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	98.4	107.8	117.2	0.0
	ε ₇	73.0	71.6	70.6	69.8	69.8	69.7	69.6	69.6	69.6	69.6	69.5	69.5	69.5	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	68.4	66.8	65.1	67.9
	U7 (cm)	0.0	1.4	2.4	3.2	3.2	3.3	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	4.6	6.2	7.9	3.7
GREDA G8	t (dani)	0	0	0	0	3	6	13	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83	97	104	111	125	132	139
	P (kN)	0.0	35.0	55.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
	Mu (kNm)	0.0	50.6	65.6	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3
	ε ₈	73.5	70.7	69.8	69.6	69.6	69.5	69.5	69.5	69.5	69.5	69.4	69.4	69.4	69.3	69.3	69.3	69.3	69.3	69.3	69.3	69.3	69.3	69.3
	U8 (cm)	0.0	2.8	3.7	3.9	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1	4.1	4.1	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
	t (dani)	153	167	181	184	184	184	191	198	205	212	219	233	247	261	275	289	292	292	292	292	292	292	295
	P (kN)	75.0	75.0	75.0	80.0	85.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	95.0	100.0	102.0	103.0	75.0	0.0	
	Mu (kNm)	70.3	70.3	70.3	79.7	89.1	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	105.6	115.0	118.8	120.6	70.3	0.0	
	ε ₈	69.2	69.2	69.2	69.0	68.7	68.2	68.0	67.8	67.7	67.7	67.6	67.5	67.5	67.5	67.4	67.4	67.0	65.2	63.0	61.9	64.0	64.9	
U8 (cm)	4.3	4.3	4.3	4.5	4.8	5.3	5.5	5.7	5.8	5.8	5.9	6.0	6.0	6.0	6.1	6.1	6.5	8.3	10.5	11.6	9.5	8.6		
GREDA G9	t (dani)	0	0	0	0	0	1	4	11	18	25	39	46	60	67	81	88	95	102	109	116	123	130	137
	P (kN)	0.0	25.0	45.0	55.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
	Mu (kNm)	0.0	39.4	59.4	65.6	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3
	ε ₉	74.0	72.7	71.5	71.0	70.6	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.3	70.2
	U9 (‰)	0.0	1.3	2.5	3.0	3.4	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.8
	t (dani)	151	165	179	182	182	182	189	196	203	210	217	224	231	238	245	259	273	287	290	290	290	290	293
	P (kN)	75.0	75.0	75.0	80.0	85.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	95.0	97.5	100.0	75.0	0.0
	Mu (kNm)	70.3	70.3	70.3	79.7	89.1	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	96.3	105.6	110.4	115.0	70.3	0.0
	ε ₉	70.2	70.2	70.2	69.7	69.4	69.1	68.8	68.6	68.6	68.5	68.4	68.4	68.4	68.4	68.3	68.3	68.3	68.3	67.2	65.9	64.2	66.7	67.8
U9 (‰)	3.8	3.8	3.8	4.3	4.6	4.9	5.2	5.4	5.4	5.5	5.6	5.6	5.6	5.6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	6.8	8.1	9.8	7.3	6.2

Prilog B2: DILATACIJE U ZATEGNUTOM PRESJEKU BETONA

GREDA G6	t (đani)	0	0	0	0	0	3	10	17	34	48	62	76	90	104	118	132	146	160	174					
	P (kN)	0	25	45	55	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75					
	Mu (kNm)	0	39	59	66	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70					
	ε6	0	873	1518	1632	1809	1826	1839	1846	1860	1872	1880	1882	1893	1916	1940	1961	1969	1971	1985					
	ε6 (%σ)	0.00	0.87	1.52	1.63	1.81	1.83	1.84	1.85	1.86	1.87	1.88	1.88	1.89	1.92	1.94	1.96	1.97	1.97	1.99					
	t (đani)	177	177	177	177	177	177	177	191	205															
	P (kN)	80	85	95	100	105	108	0	0	0															
	Mu (kNm)	80	89	108	117	127	132	0	0	0															
	ε6	2119	2325	4376	5676	7618	8340	6966	6785	6662															
ε6 (%σ)	2.12	2.33	4.38	5.68	7.62	8.34	6.97	6.79	6.66																
GREDA G7	t (đani)	0	0	0	0	0	3	10	17	24	38	52	66	80	94	108	122	136	150	164	178				
	P (kN)	0	15	25	45	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75				
	Mu (kNm)	0	26	39	59	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70				
	ε7	0	355	729	1372	1539	1561	1573	1587	1642	1646	1650	1656	1659	1663	1666	1680	1697	1707	1721	1737				
	ε7 (%σ)	0.00	0.36	0.73	1.37	1.54	1.56	1.57	1.59	1.64	1.65	1.65	1.66	1.66	1.66	1.67	1.68	1.70	1.71	1.72	1.74				
	t (đani)	181	181	181	181	181	181	195	209																
	P (kN)	85	90	95	100	103	0	0	0																
	Mu (kNm)	89	98	108	117	123	0	0	0																
	ε7	2074	2599	5359	7831	8414	7011	6420	6224																
ε7 (%σ)	2.07	2.60	5.36	7.83	8.41	7.01	6.42	6.22																	
GREDA G8	t (đani)	0	0	0	0	3	6	13	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83	97	104	111	125	132	139	146
	P (kN)	0	15	35	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
	Mu (kNm)	0	26	51	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
	ε8	0	554	1202	1887	1893	1905	1910	1913	1930	1939	1945	1958	1966	1978	1992	1999	2003	2008	2014	2016	2024	2029	2034	2042
	ε8 (%σ)	0.00	0.55	1.20	1.89	1.89	1.91	1.91	1.91	1.93	1.94	1.95	1.96	1.97	1.98	1.99	2.00	2.00	2.01	2.01	2.02	2.02	2.03	2.03	2.04
	t (đani)	153	167	170	170	170	177	184	191	198	205	212	219	226	233	247	261	275	278	278	278	292	306		
	P (kN)	75	75	80	85	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	95	100	103	0	0	0	0	
	Mu (kNm)	70	70	80	89	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	106	115	121	0	0	0	
	ε8	2064	2065	2120	2284	3605	3692	3813	3839	3893	3947	3958	3973	3985	4015	4055	4081	4111	5584	7428	10180	7310	6794	6765	
ε8 (%σ)	2.06	2.07	2.12	2.28	3.61	3.69	3.81	3.84	3.89	3.95	3.96	3.97	3.99	4.02	4.06	4.08	4.11	5.58	7.43	10.18	7.31	6.79	6.77		
GREDA G9	t (đani)	0	0	0	0	0	1	4	11	18	25	39	46	60	67	81	88	95	102	109	116	123	130	144	
	P (kN)	0	25	45	55	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	
	Mu (kNm)	0	39	59	66	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	
	ε9	0	854	1409	1598	1838	1861	1882	1912	1919	1928	1939	1945	1946	1959	1978	1993	1997	1999	2007	2023	2028	2036	2036	
	ε9 (%σ)	0.00	0.85	1.41	1.60	1.84	1.86	1.88	1.91	1.92	1.93	1.94	1.95	1.95	1.96	1.98	1.99	2.00	2.00	2.01	2.02	2.03	2.04	2.04	
	t (đani)	158	172	175	175	175	182	189	196	203	210	217	224	231	238	245	259	273	287	290	290	290	304	318	
	P (kN)	75	75	80	85	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	95	100	0	0	0	
	Mu (kNm)	70	70	80	89	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	106	115	0	0	0	
	ε9	2038	2041	2278	2460	3332	3456	3575	3598	3666	3728	3769	3789	3796	3811	3828	3840	3847	3851	5677	9431	7658	7005	6863	
ε9 (%σ)	2.04	2.04	2.28	2.46	3.33	3.46	3.58	3.60	3.67	3.73	3.77	3.79	3.80	3.81	3.83	3.84	3.85	3.85	5.68	9.43	7.66	7.01	6.86		

Prilog B2: DILATACIJE U PRITISNUTOM PRESJEKU BETONA

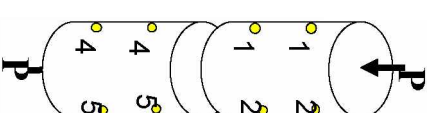
GREDA G6	t (đani)	0	0	0	0	0	3	10	17	34	48	62	76	90	104	118	132	146	160	174	177	177	177	177	177	
	P (kN)	0	25	45	55	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	80	85	95	100	105	108
	Mu (kNm)	0	39	59	66	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	80	89	108	117	127	132
	ε6	0	536	754	784	842	846	850	861	867	867	869	870	874	888	890	892	895	900	906	945	1001	1236	1432	1613	1718
	ε6 (‰)	0.00	0.54	0.75	0.78	0.84	0.85	0.85	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.89	0.89	0.89	0.90	0.90	0.91	0.95	1.00	1.24	1.43	1.61	1.72
	t (đani)	177	191	205																						
	P (kN)	0	0	0																						
	Mu (kNm)	0	0	0																						
	ε6	1365	1308	1274																						
	ε6 (‰)	1.37	1.31	1.27																						
GREDA G7	t (đani)	0	0	0	0	0	3	10	17	24	38	52	66	80	94	108	122	136	150	164	178	181	181	181	181	181
	P (kN)	0	15	25	45	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	85	90	95	100	103
	Mu (kNm)	0	26	39	59	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	89	98	108	117	123
	ε7	0	191	284	470	536	539	542	544	547	548	552	555	558	559	562	566	570	573	582	586	627	740	1047	1202	1258
	ε7 (‰)	0.00	0.19	0.28	0.47	0.54	0.54	0.54	0.54	0.55	0.55	0.55	0.56	0.56	0.56	0.56	0.57	0.57	0.57	0.58	0.59	0.63	0.74	1.05	1.20	1.26
	t (đani)	181	195	209																						
	P (kN)	0	0	0																						
	Mu (kNm)	0	0	0																						
	ε7	804	760	721																						
	ε7 (‰)	0.80	0.76	0.72																						
GREDA G8	t (đani)	0	0	0	0	3	6	13	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83	97	104	111	125	132	139	146	
	P (kN)	0	15	35	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	
	Mu (kNm)	0	26	51	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	
	ε8	0	251	438	594	600	605	608	610	611	612	614	618	620	621	621	623	624	628	629	631	631	632	632	635	
	ε8 (‰)	0.00	0.25	0.44	0.59	0.60	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.64	
	t (đani)	153	167	170	170	170	177	184	191	198	205	212	219	226	233	247	261	275	278	278	278	278	292	306		
	P (kN)	75	75	80	85	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	95	100	103	0	0	0		
	Mu (kNm)	70	70	80	89	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	106	115	121	0	0	0		
	ε8	635	641	691	814	937	965	981	994	1011	1016	1019	1026	1029	1033	1036	1039	1044	1230	1635	1892	1413	1298	1174		
	ε8 (‰)	0.64	0.64	0.69	0.81	0.94	0.97	0.98	0.99	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.23	1.64	1.89	1.41	1.30	1.17		
GREDA G9	t (đani)	0	0	0	0	0	1	4	11	18	25	39	46	60	67	81	88	95	102	109	116	123	130	144	158	172
	P (kN)	0	25	45	55	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	
	Mu (kNm)	0	39	59	66	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	
	ε9	0	418	604	660	744	749	752	757	760	762	765	768	773	779	783	784	787	789	793	796	802	812	814	816	824
	ε9 (‰)	0.00	0.42	0.60	0.66	0.74	0.75	0.75	0.76	0.76	0.76	0.77	0.77	0.77	0.78	0.78	0.78	0.79	0.79	0.79	0.80	0.80	0.81	0.81	0.82	0.82
	t (đani)	175	175	175	182	189	196	203	210	217	224	231	238	245	259	273	287	290	290	290	304	318				
	P (kN)	80	85	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	95	100	0	0	0				
	Mu (kNm)	80	89	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	106	115	0	0	0				
	ε9	841	883	950	966	981	1004	1011	1029	1038	1055	1073	1084	1100	1112	1115	1130	1198	1431	933	882	847				
	ε9 (‰)	0.84	0.88	0.95	0.97	0.98	1.00	1.01	1.03	1.04	1.06	1.07	1.08	1.10	1.11	1.12	1.13	1.20	1.43	0.93	0.88	0.85				

Prilog B2: DILATACIJE U KARBONSKIM TRAKAMA

GREDA G6	t (dani)	0	0	0	0	0	3	10	17	34	48	62	76	90	104	118	132	146	160	174	177	177	177	177	177		
	P (kN)	0	25	45	55	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	80	85	95	100	105	108	
	Mu (kNm)	0	39	59	66	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	80	89	108	117	127	132	
	ε6	0	763	1284	1359	1501	1522	1525	1531	1534	1541	1545	1552	1560	1568	1575	1583	1588	1591	1594	1716	1898	3451	4743	6183	7121	
	ε6 (%)	0.00	0.76	1.28	1.36	1.50	1.52	1.53	1.53	1.53	1.54	1.55	1.55	1.56	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59	1.72	1.90	3.45	4.74	6.18	7.12	
	t (dani)	177	191	205																							
	P (kN)	0	0	0																							
	Mu (kNm)	0	0	0																							
	ε6	5942	5867	5845																							
	ε6 (%)	5.94	5.87	5.85																							
GREDA G7	t (dani)	0	0	0	0	0	3	10	17	24	38	52	66	80	94	108	122	136	150	164	178	181	181	181	181	181	
	P (kN)	0	15	25	45	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	85	90	95	100	103	
	Mu (kNm)	0	26	39	59	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	89	98	108	117	123	
	ε7	0	493	849	1561	1741	1755	1758	1759	1767	1773	1774	1777	1778	1789	1793	1794	1807	1839	1859	1888	2287	3684	5544	7117	7647	
	ε7 (%)	0.00	0.49	0.85	1.56	1.74	1.76	1.76	1.76	1.76	1.77	1.77	1.77	1.78	1.78	1.79	1.79	1.79	1.81	1.84	1.86	1.89	2.29	3.68	5.54	7.12	7.65
	t (dani)	181	195	209																							
	P (kN)	0	0	0																							
	Mu (kNm)	0	0	0																							
	ε7	6280	6172	6061																							
	ε7 (%)	6.28	6.17	6.06																							
GREDA G8	t (dani)	0	0	0	0	3	6	13	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83	97	104	111	125	132	139	146	153	
	P (kN)	0	15	35	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	
	Mu (kNm)	0	26	51	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	
	ε8	0	525	1087	1583	1588	1594	1601	1609	1617	1625	1633	1640	1645	1649	1651	1654	1655	1658	1660	1662	1665	1667	1670	1672	1674	
	ε8 (%)	0.00	0.53	1.09	1.58	1.59	1.59	1.60	1.61	1.62	1.63	1.63	1.64	1.65	1.65	1.65	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	
	t (dani)	170	170	170	177	184	191	198	205	212	219	226	233	247	261	275	278	278	278	278	278	292	306				
	P (kN)	80	85	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	95	100	103	103	0	0	0				
	Mu (kNm)	80	89	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	106	115	121	121	0	0	0			
	ε8	1759	1951	2905	3152	3218	3295	3352	3374	3396	3421	3451	3468	3485	3501	3511	4991	6433	8038	8038	6171	5373	5147				
	ε8 (%)	1.76	1.95	2.91	3.15	3.22	3.30	3.35	3.37	3.40	3.42	3.45	3.47	3.49	3.50	3.51	4.99	6.43	8.04	8.04	6.17	5.37	5.15				
GREDA G9	t (dani)	0	0	0	0	0	1	4	11	18	25	39	46	60	67	81	88	95	102	109	116	123	130	144	158	172	
	P (kN)	0	25	45	55	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	
	Mu (kNm)	0	39	59	66	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	
	ε9	0	852	1390	1583	1802	1812	1818	1826	1837	1844	1845	1847	1850	1851	1856	1870	1877	1886	1903	1909	1921	1929	1937	1940	1954	
	ε9 (%)	0.00	0.85	1.39	1.58	1.80	1.81	1.82	1.83	1.84	1.84	1.85	1.85	1.85	1.85	1.86	1.87	1.88	1.89	1.90	1.91	1.92	1.93	1.94	1.94	1.95	
	t (dani)	175	175	175	182	189	196	203	210	217	224	231	238	245	259	273	287	290	290	290	290	304	318				
	P (kN)	80	85	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	95	100	100	0	0	0				
	Mu (kNm)	80	89	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	106	115	115	0	0	0				
	ε9	2245	2486	2874	3012	3095	3188	3334	3410	3468	3515	3534	3540	3548	3555	3560	3568	5888	8446	8446	6477	5563	5111				
	ε9 (%)	2.25	2.49	2.87	3.01	3.10	3.19	3.33	3.41	3.47	3.52	3.53	3.54	3.55	3.56	3.56	3.57	5.89	8.45	8.45	6.48	5.56	5.11				

Prilog B3.1 - SERIJA I

VREMENSKE DEFORMACIJE BETONA														
datum	01.03.18.	01.03.18.	02.03.18.	08.03.18.	15.03.18.	22.03.18.	01.04.18.	02.05.18.	01.06.18.	01.07.18.	01.08.18.	01.09.18.		
T (°C)	1	1	6	11	11	5	13	22	25	27	31	28		
W (%)	86	86	82	78	66	81	68	65	54	51	49	36		
P (kN)	P ₀	P _e	dani						mjeseci					
			1	7	14	21	1	2	3	4	5	6		
serija	TEČENJE BETONA													
mj. mjesto														
1-1	954	890	881	880	879	879	878	874	873	873	870	870		
2-2	870	808	800	801	798	797	795	795	792	791	792	792		
3-3	965	915	908	907	908	907	906	905	904	904	903	904		
4-4	580	524	520	521	519	518	517	515	515	516	515	515		
5-5	620	565	560	559	558	557	555	556	554	553	552	552		
6-6	675	608	605	603	600	601	597	597	595	594	595	595		
1-1	848	786	785	781	782	780	779	776	775	775	776	775		
2-2	879	815	809	810	808	806	802	801	800	797	801	800		
3-3	918	856	850	849	848	849	846	844	842	843	843	843		
4-4	757	689	682	682	683	680	679	675	674	673	673	674		
5-5	815	758	751	750	749	748	748	746	746	747	745	745		
6-6	655	590	582	580	579	582	580	578	578	577	578	578		
1-1	715	650	644	643	644	642	642	640	641	639	638	638		
2-2	667	605	598	598	595	593	591	591	590	588	589	588		
3-3	720	660	650	651	650	648	645	642	642	643	642	643		
4-4	485	420	408	409	407	408	405	405	406	402	402	402		
5-5	680	623	613	611	610	610	609	607	608	608	609	608		
6-6	516	450	441	442	440	438	438	438	437	436	436	435		
σ (MPa)	s ₀	s _e	dani						mjeseci					
mj. mjesto														
(1-1; 4-4) _{sr}	723	660	653	653	652	651	650	648	647	646	646	646		
(2-2; 5-5) _{sr}	755	696	689	688	686	685	683	683	682	681	681	681		
(3-3; 6-6) _{sr}	742	680	673	672	671	671	669	667	666	666	666	666		
sredina	TEČENJE BETONA													



$A = 176,71 \text{ cm}^2$

Prilog B3.2 - SERIJA II

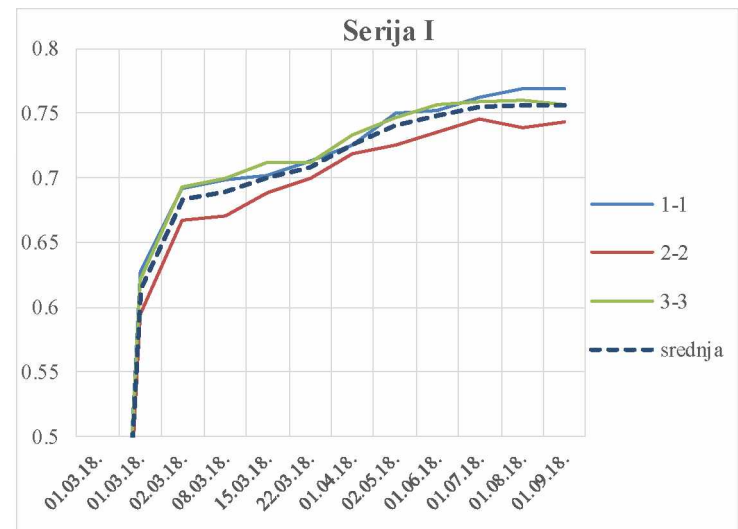
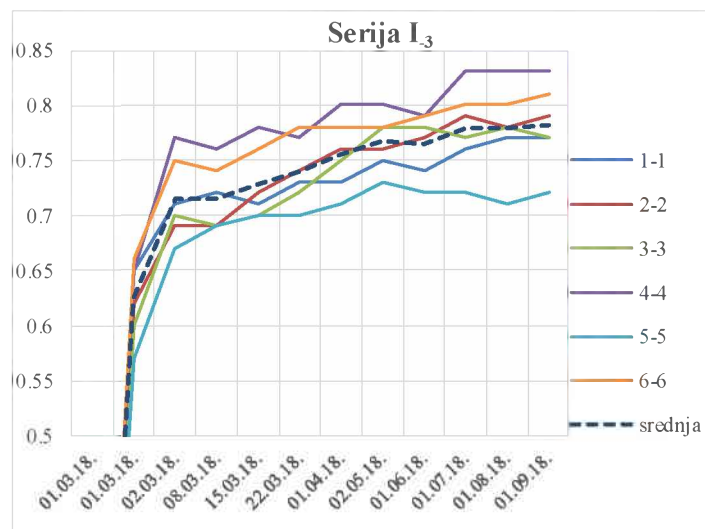
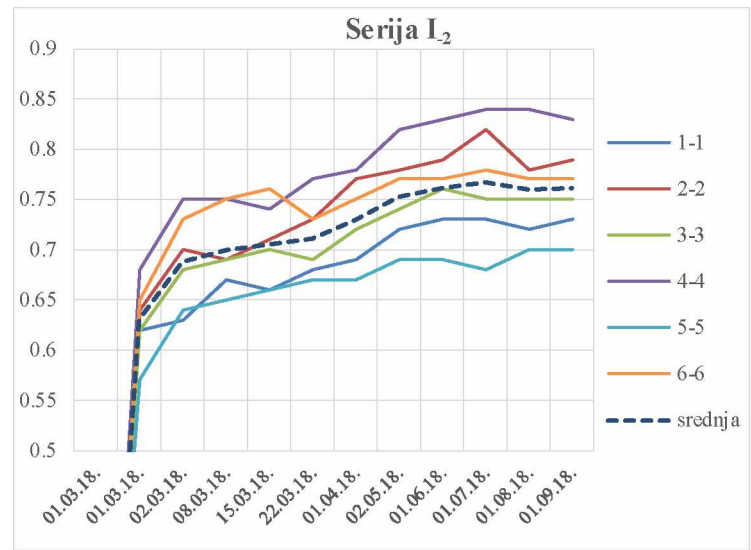
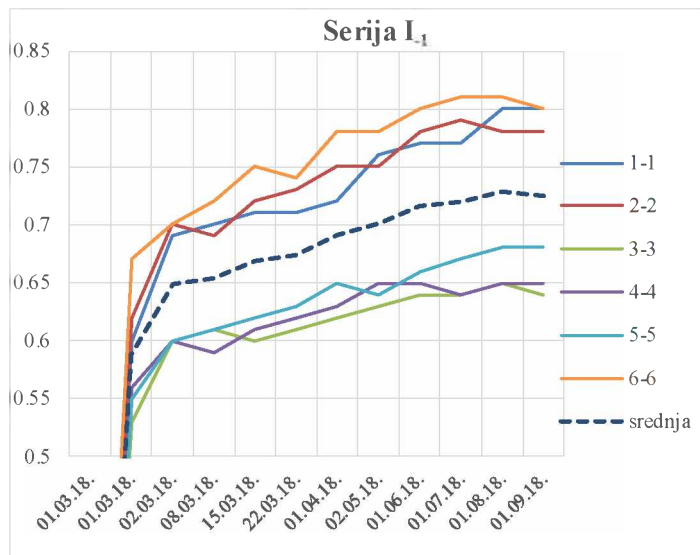
VREMENSKE DEFORMACIJE BETONA																		
datum		01.03.18	01.03.18	02.03.18	08.03.18	15.03.18	22.03.18	01.04.18	02.05.18	01.06.18	01.07.18	01.08.18	01.09.18	01.09.18	01.10.18	01.11.18	01.12.18	02.01.19
T (°C)		1	1	6	11	11	5	13	22	25	27	31	28	28	20	17	7	2
W (%)		86	86	82	78	66	81	68	65	54	51	49	36	36	59	70	76	69
serija	P (kN)	P ₀	P _e	dani				mjeseci										
				1	7	14	21	1	2	3	4	5	6	6	7	8	9	10
	mj.mjesto	TEČENJE BETONA																
Serija II ₁	1-1	957	892	885	883	882	882	881	879	878	876	875	875	834	830	828	825	823
	2-2	880	811	806	804	803	803	800	798	796	794	793	792	751	748	747	745	744
	3-3	988	922	916	915	913	912	912	910	910	908	907	907	868	866	865	864	864
	4-4	601	533	529	527	525	523	522	521	521	520	518	517	489	487	486	486	485
	5-5	647	584	581	580	577	575	574	574	573	571	570	570	521	518	516	515	514
	6-6	666	598	592	589	586	585	585	583	583	582	581	581	548	546	545	544	544
Serija II ₂	1-1	827	755	747	745	744	742	741	741	739	738	738	737	700	695	693	690	688
	2-2	852	788	785	783	782	780	779	777	776	776	774	773	737	731	727	724	723
	3-3	909	848	844	841	840	838	837	835	834	834	833	833	796	792	787	784	782
	4-4	770	708	706	705	703	702	701	698	696	695	695	694	642	639	635	628	625
	5-5	844	774	768	766	764	763	761	760	759	757	757	756	724	718	714	711	707
	6-6	639	573	566	563	562	559	558	556	555	554	554	552	511	507	505	501	498
Serija II ₃	1-1	701	632	625	624	623	621	621	620	619	618	617	617	583	578	575	572	570
	2-2	694	625	618	616	615	613	612	610	609	609	608	607	559	554	551	547	544
	3-3	741	678	670	667	665	664	662	660	659	657	656	656	613	607	603	598	597
	4-4	503	442	436	433	432	429	427	426	423	422	421	421	372	370	366	363	361
	5-5	671	610	602	598	596	595	593	591	588	587	587	586	548	541	537	534	533
	6-6	549	484	475	471	469	468	466	465	465	464	464	463	428	424	421	417	414
sredina	σ (MPa)	s ₀	s _e	dani				mjeseci										
				1	7	14	21	1	2	3	4	5	6	6	7	8	9	10
	mj.mjesto	TEČENJE BETONA																
	(1-1;4-4) _{sr}	727	660	655	653	652	650	649	648	646	645	644	644	603	600	597	594	592
	(2-2;5-5) _{sr}	765	699	693	691	690	688	687	685	684	682	682	681	640	635	632	629	628
	(3-3;6-6) _{sr}	749	684	677	674	673	671	670	668	668	667	666	665	627	624	621	618	617

A = 176,71 cm²

P ₀ = 10 kN	max P _e = 390 kN	max P = 610 kN	Δσ = 22,07 MPa	ε _{el} = 0,66 ‰	φ _{sr, fikt.} = 0,27 (t=10 mj.)
σ ₀ = 0,57 MPa	max σ _e = 22,6 MPa	max σ = 34,6 MPa	E = 36,05 GPa	φ _{sr} = 0,25 (t=6 mj.)	

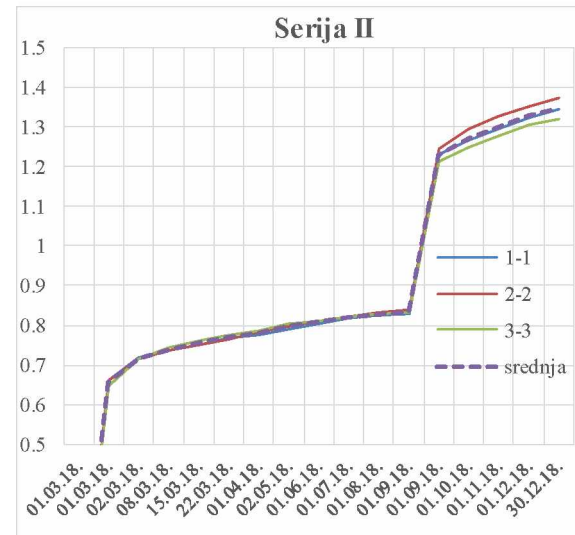
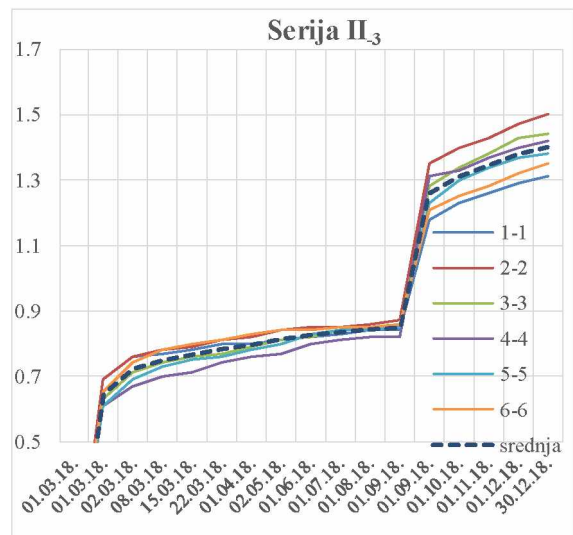
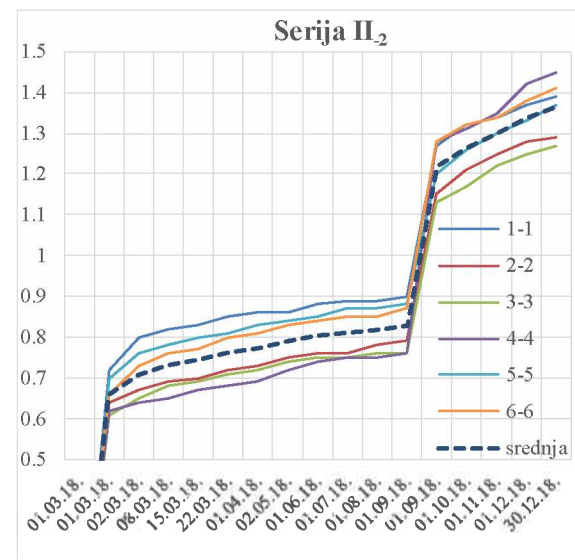
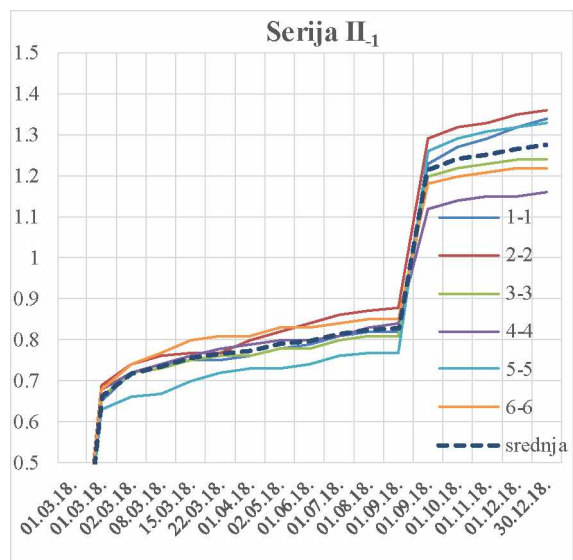
Prilog B4.1 - SERIJA I

01.03.18.	01.03.18.	02.03.18.	08.03.18.	15.03.18.	22.03.18.	01.04.18.	02.05.18.	01.06.18.	01.07.18.	01.08.18.	01.09.18.
0	0.60	0.69	0.70	0.71	0.71	0.72	0.76	0.77	0.77	0.80	0.80
0	0.62	0.70	0.69	0.72	0.73	0.75	0.75	0.78	0.79	0.78	0.78
0	0.53	0.60	0.61	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	0.64	0.65	0.64
0	0.56	0.60	0.59	0.61	0.62	0.63	0.65	0.65	0.64	0.65	0.65
0	0.55	0.60	0.61	0.62	0.63	0.65	0.64	0.66	0.67	0.68	0.68
0	0.67	0.70	0.72	0.75	0.74	0.78	0.78	0.80	0.81	0.81	0.80
0	0.59	0.65	0.65	0.67	0.67	0.69	0.70	0.72	0.72	0.73	0.73
0	0.62	0.63	0.67	0.66	0.68	0.69	0.72	0.73	0.73	0.72	0.73
0	0.64	0.70	0.69	0.71	0.73	0.77	0.78	0.79	0.82	0.78	0.79
0	0.62	0.68	0.69	0.70	0.69	0.72	0.74	0.76	0.75	0.75	0.75
0	0.68	0.75	0.75	0.74	0.77	0.78	0.82	0.83	0.84	0.84	0.83
0	0.57	0.64	0.65	0.66	0.67	0.67	0.69	0.69	0.68	0.70	0.70
0	0.65	0.73	0.75	0.76	0.73	0.75	0.77	0.77	0.78	0.77	0.77
0	0.63	0.69	0.70	0.71	0.71	0.73	0.75	0.76	0.77	0.76	0.76
0	0.65	0.71	0.72	0.71	0.73	0.73	0.75	0.74	0.76	0.77	0.77
0	0.62	0.69	0.69	0.72	0.74	0.76	0.76	0.77	0.79	0.78	0.79
0	0.60	0.70	0.69	0.70	0.72	0.75	0.78	0.78	0.77	0.78	0.77
0	0.65	0.77	0.76	0.78	0.77	0.80	0.80	0.79	0.83	0.83	0.83
0	0.57	0.67	0.69	0.70	0.70	0.71	0.73	0.72	0.72	0.71	0.72
0	0.66	0.75	0.74	0.76	0.78	0.78	0.78	0.79	0.80	0.80	0.81
0	0.63	0.72	0.72	0.73	0.74	0.76	0.77	0.77	0.78	0.78	0.78
0	0.63	0.69	0.70	0.70	0.71	0.73	0.75	0.75	0.76	0.77	0.77
0	0.60	0.67	0.67	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75	0.74	0.74
0	0.62	0.69	0.70	0.71	0.71	0.73	0.75	0.76	0.76	0.76	0.76
0	0.61	0.68	0.69	0.70	0.71	0.73	0.74	0.75	0.76	0.76	0.76



Prilog B4.2 - SERIJA II

01.03.18.	01.03.18.	02.03.18.	08.03.18.	15.03.18.	22.03.18.	01.04.18.	02.05.18.	01.06.18.	01.07.18.	01.08.18.	01.09.18.	01.09.18.	01.10.18.	01.11.18.	01.12.18.	30.12.18.
0	0.65	0.72	0.74	0.75	0.75	0.76	0.78	0.79	0.81	0.82	0.82	1.23	1.27	1.29	1.32	1.34
0	0.69	0.74	0.76	0.77	0.77	0.80	0.82	0.84	0.86	0.87	0.88	1.29	1.32	1.33	1.35	1.36
0	0.66	0.72	0.73	0.75	0.76	0.76	0.78	0.78	0.80	0.81	0.81	1.20	1.22	1.23	1.24	1.24
0	0.68	0.72	0.74	0.76	0.78	0.79	0.80	0.80	0.81	0.83	0.84	1.12	1.14	1.15	1.15	1.16
0	0.63	0.66	0.67	0.70	0.72	0.73	0.73	0.74	0.76	0.77	0.77	1.26	1.29	1.31	1.32	1.33
0	0.68	0.74	0.77	0.80	0.81	0.81	0.83	0.83	0.84	0.85	0.85	1.18	1.20	1.21	1.22	1.22
0	0.67	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80	0.81	0.83	0.83	1.21	1.24	1.25	1.27	1.28
0	0.72	0.80	0.82	0.83	0.85	0.86	0.86	0.88	0.89	0.89	0.90	1.27	1.32	1.34	1.37	1.39
0	0.64	0.67	0.69	0.70	0.72	0.73	0.75	0.76	0.76	0.78	0.79	1.15	1.21	1.25	1.28	1.29
0	0.61	0.65	0.68	0.69	0.71	0.72	0.74	0.75	0.75	0.76	0.76	1.13	1.17	1.22	1.25	1.27
0	0.62	0.64	0.65	0.67	0.68	0.69	0.72	0.74	0.75	0.75	0.76	1.28	1.31	1.35	1.42	1.45
0	0.70	0.76	0.78	0.80	0.81	0.83	0.84	0.85	0.87	0.87	0.88	1.20	1.26	1.30	1.33	1.37
0	0.66	0.73	0.76	0.77	0.80	0.81	0.83	0.84	0.85	0.85	0.87	1.28	1.32	1.34	1.38	1.41
0	0.66	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	1.22	1.27	1.30	1.34	1.36
0	0.69	0.76	0.77	0.78	0.80	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.84	1.18	1.23	1.26	1.29	1.31
0	0.69	0.76	0.78	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.85	0.86	0.87	1.35	1.40	1.43	1.47	1.50
0	0.63	0.71	0.74	0.76	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.85	1.28	1.34	1.38	1.43	1.44
0	0.61	0.67	0.70	0.71	0.74	0.76	0.77	0.80	0.81	0.82	0.82	1.31	1.33	1.37	1.40	1.42
0	0.61	0.69	0.73	0.75	0.76	0.78	0.80	0.83	0.84	0.84	0.85	1.23	1.30	1.34	1.37	1.38
0	0.65	0.74	0.78	0.80	0.81	0.83	0.84	0.84	0.85	0.85	0.86	1.21	1.25	1.28	1.32	1.35
0	0.65	0.72	0.75	0.77	0.78	0.80	0.81	0.83	0.84	0.84	0.85	1.26	1.31	1.34	1.38	1.40
0	0.66	0.72	0.74	0.75	0.77	0.78	0.79	0.81	0.82	0.83	0.83	1.23	1.27	1.29	1.33	1.35
0	0.66	0.71	0.74	0.75	0.77	0.78	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	1.25	1.30	1.33	1.35	1.37
0	0.65	0.72	0.74	0.76	0.78	0.79	0.81	0.81	0.82	0.83	0.83	1.21	1.25	1.28	1.31	1.32
0	0.66	0.72	0.74	0.75	0.77	0.78	0.80	0.81	0.82	0.83	0.83	1.23	1.27	1.30	1.33	1.35



PRILOG C

Slika prslina

PRILOG C1

Slika prslina u gredama ispitanim pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja

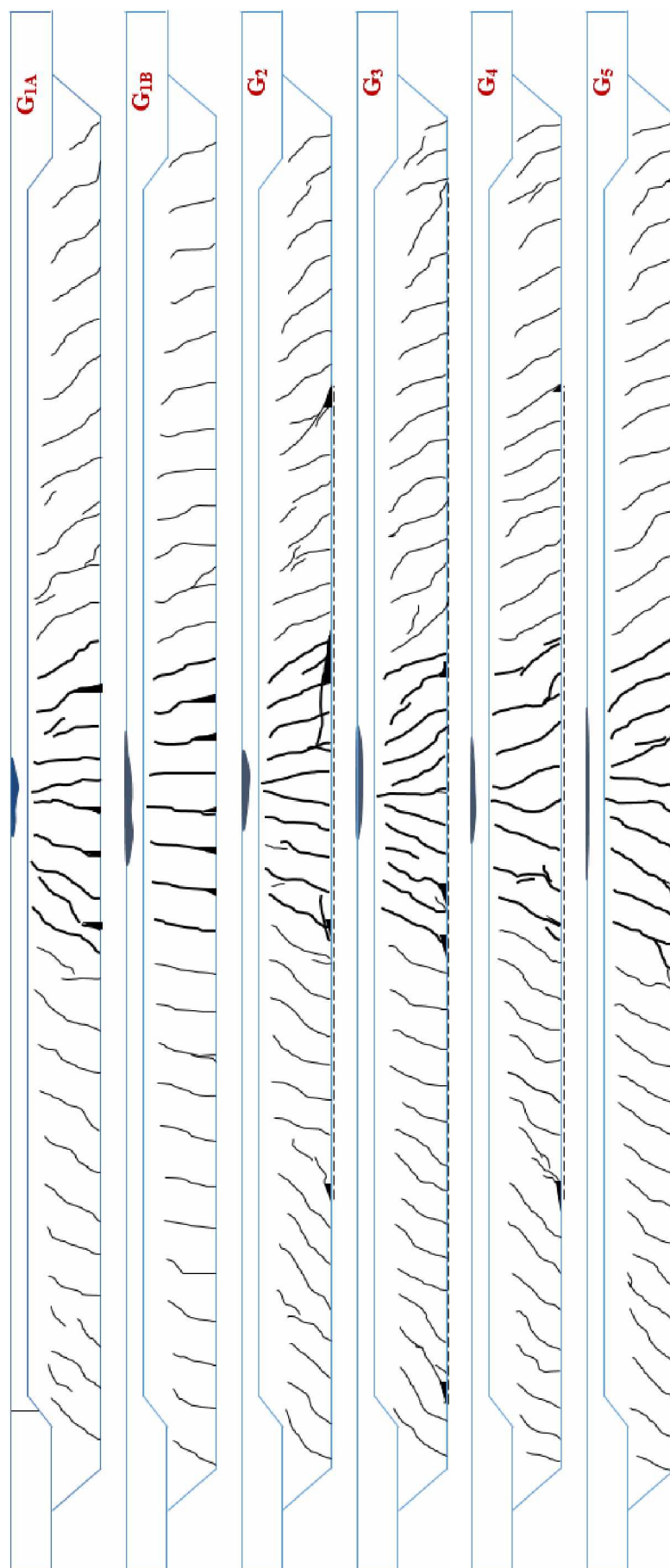
PRILOG C2

Slika prslina u gredama ispitanim pod dejstvom dugotrajnog opterećenja

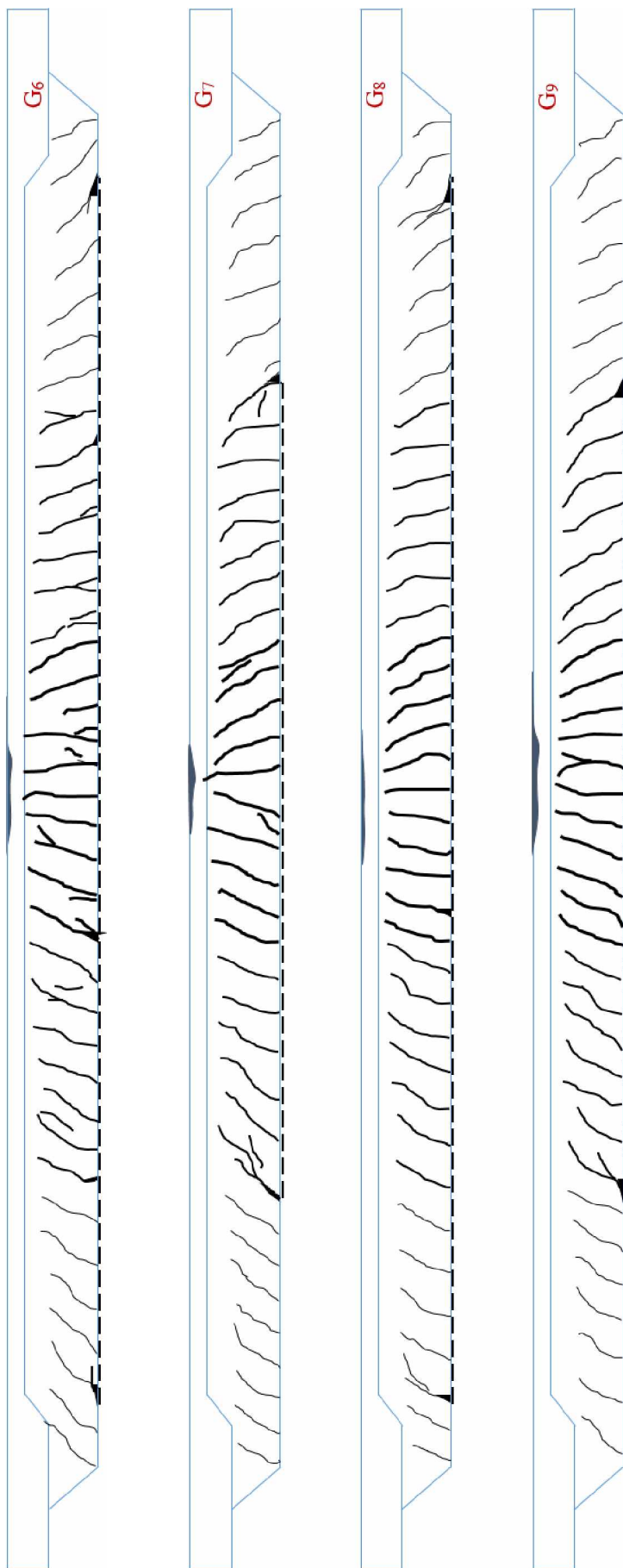
PRILOG C3

Komparativna analiza slike prslina sa rezultatima dobijenim pomoću programskog paketa ANSYS

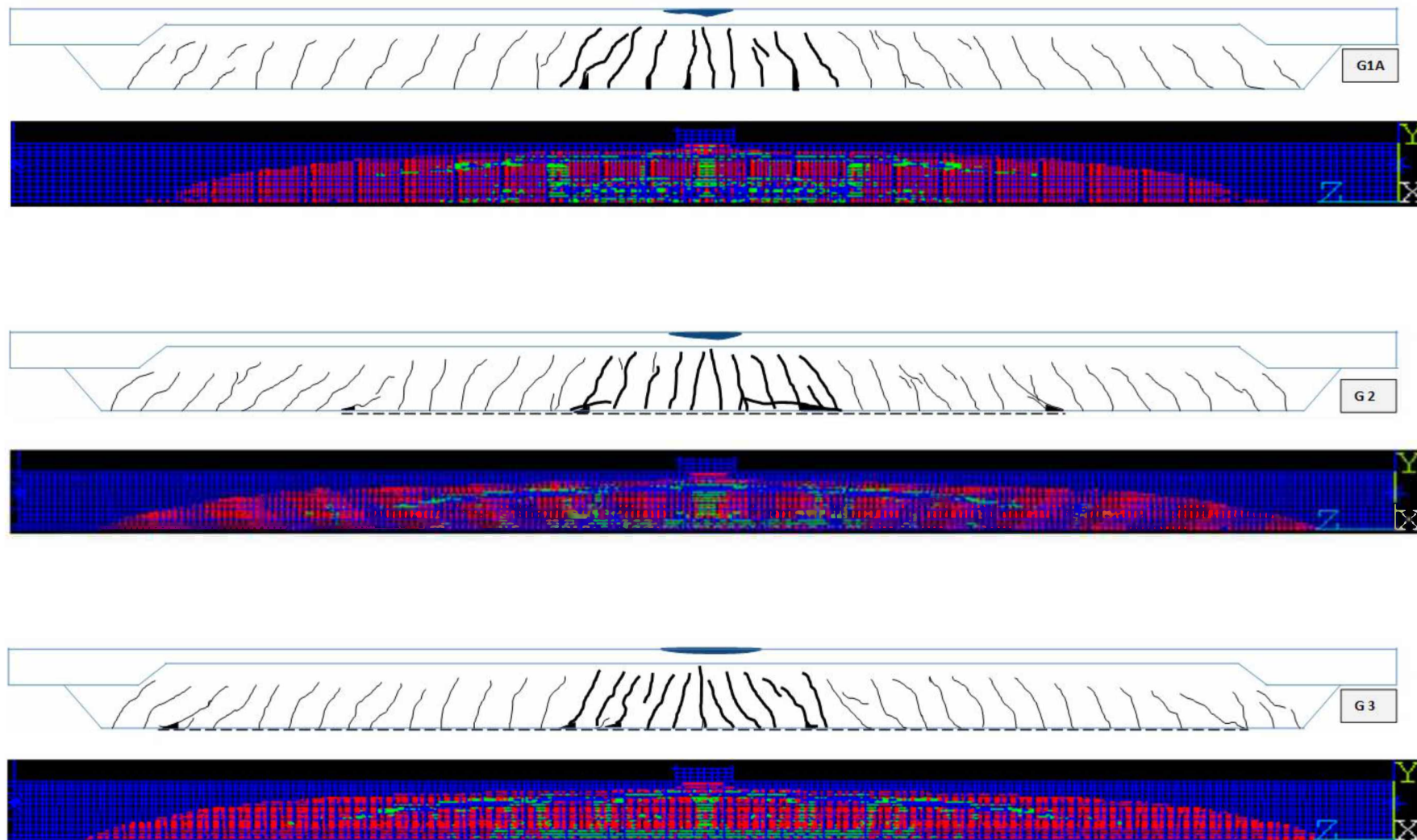
PRILOG C1



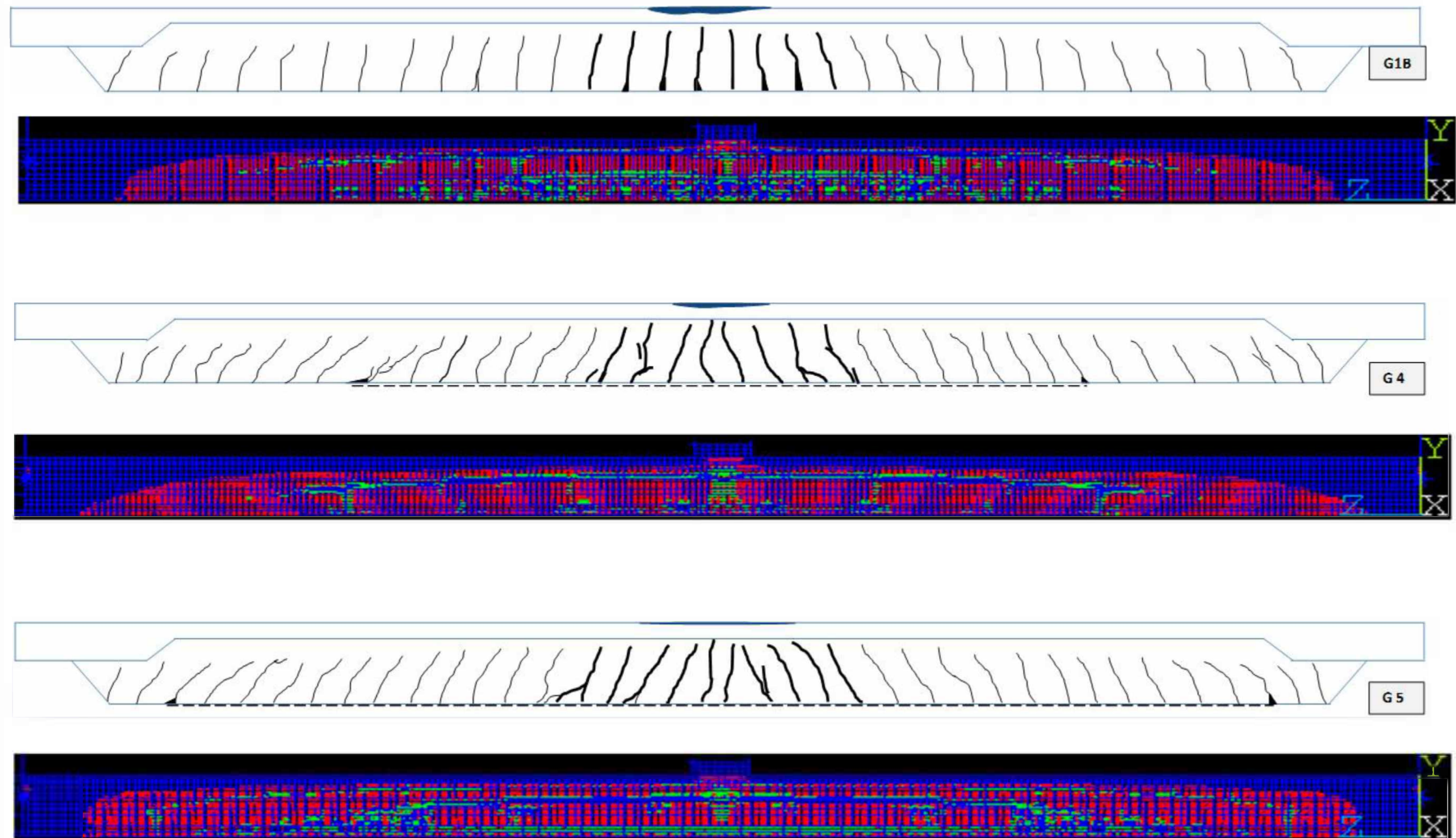
PRIOLOG C2



PRILOG C3 - Slika prslina u gredama opterećenim koncentrisanim opterećenjem



PRILOG C3 - Slika prslina u gredama opterećenim ravnomjernim opterećenjem



PRILOG D

**Komparativna analiza eksperimentalnih
i rezultata dobijenih primjenom programskog paketa ANSYS**

PRILOG D1

Komparativna analiza ugiba

PRILOG D2

Komparativna analiza dilatacija u karbonskoj traci

Prilog D1: UGIBI GREDA OPTEREĆENIH KONCENTRISANIM OPTEREĆENJEM

Eksperiment	P (kN)	0	10	15	20	25	30	30	35
	Mu (kNm)	0.00	18.75	28.13	37.50	46.88	56.25	56.25	65.63
	U _{1a} (mm)	0.00	1.80	4.40	13.20	20.00	31.50	38.60	79.60
Ansys nelinearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	4.33	9.76	22.67	61.98	65.63		
	U _{1a} (mm)	1.82	2.48	3.16	5.64	29.47	175.39		
Ansys linearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	8.38	16.75	41.88	65.63			
	U _{1a} (mm)	1.82	3.07	4.57	15.74	121.50			

Eksperiment	P (kN)	0	10	20	30	35	40	50	55	60	65
	Mu (kNm)	0.00	18.75	37.50	56.25	65.63	75.00	93.75	103.13	112.50	121.88
	U ₂ (mm)	0.00	5.00	11.00	18.00	21.00	25.00	33.00	39.00	54.00	68.00
Ansys nelinearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	8.64	17.29	43.21	121.00	121.88				
	U ₂ (mm)	1.79	3.09	4.61	14.94	117.66	232.52				
Ansys linearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	8.64	17.29	43.21	64.99					
	U ₂ (mm)	1.79	3.09	4.64	15.28	121.39					

Eksperiment	P (kN)	0	20	30	35	45	55	65	74
	Mu (kNm)	0.00	37.50	56.25	65.63	84.38	103.13	121.88	138.75
	U ₃ (mm)	0.00	2.10	8.20	11.00	14.70	18.60	22.50	77.00
Ansys nelinearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	9.92	10.57	46.43	138.00	138.75		
	U ₃ (mm)	1.82	2.63	3.44	6.77	40.96	241.75		
Ansys linearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	9.92	10.57	46.43	138.00			
	U ₃ (mm)	1.82	2.79	3.82	9.94	97.41			

Prilog D1: UGIBI GREDA OPTEREĆENIH RAVNOMJERNIM OPTEREĆENJEM

Eksperiment	P (kN)	0	15	25	35	45	55	65
	Mu (kNm)	0.00	25.63	39.38	50.63	59.38	65.63	69.38
	U _{1b} (mm)	0.00	9.80	32.40	58.80	76.40	91.20	94.00
Ansys nelinearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	8.54	17.07	35.69	68.54	69.37	
	U _{1b} (mm)	1.78	3.26	5.27	20.06	151.16	235.09	
Ansys linearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	9.86	10.72	40.79	70.00		
	U _{1b} (mm)	1.78	3.26	5.33	21.13	156.97		

Eksperiment	P (kN)	0	25	45	65	75	95	100	101
	Mu (kNm)	0.00	39.38	59.38	69.38	70.00	107.81	117.19	119.06
	U ₄ (mm)	0.00	15.00	24.00	27.00	28.00	52.00	78.00	90.00
Ansys nelinearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	13.73	23.47	49.67	105.89	118.12		
	U ₄ (mm)	1.79	2.98	4.17	10.93	82.40	222.52		
Ansys linearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	13.73	23.47	49.67	106.00	118.00		
	U ₄ (mm)	1.79	2.98	4.17	11.08	86.71	160.10		

Eksperiment	P (kN)	0	25	45	65	75	85	95	100	106
	Mu (kNm)	0.00	39.00	59.38	69.38	70.31	89.06	107.81	117.19	128.44
	U ₅ (mm)	0.00	11.30	16.50	21.50	23.40	36.00	65.00	85.00	111.00
Ansys nelinearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	14.07	24.13	51.33	116.93	128.1			
	U ₅ (mm)	1.78	3.02	4.27	11.6	91.42	206.1			
Ansys linearne materijalne karakteristike	Mu (kNm)	0.00	14.07	24.13	51.33	116.9	128.1			
	U ₅ (mm)	1.78	3.02	4.32	12.19	96.68	194.80			

Prilog D2: DILATACIJE U KARBONSKOJ TRACI

Mu (kNm)	0.0	18.8	56.3	65.6	75.0	84.4	93.8	103.1	112.5	121.9	0
ε_2 (‰)	0.00	0.31	1.21	1.43	1.67	1.90	2.19	3.01	5.42	6.59	4.34
Mu (kNm)	0.00	9.90	19.80	49.60	128.80	0.00					
$\varepsilon_{2,A}$ (‰)	0.03	0.06	0.17	0.82	6.07	5.66					

Mu (kNm)	0.0	18.8	37.5	56.3	75.0	93.8	112.5	121.9	0
ε3 (‰)	0.00	0.45	0.79	1.19	1.89	2.36	4.63	7.45	3.56
Mu (kNm)	0.00	8.70	17.41	43.52	121.86	0.00			
ε3,A (‰)	0.03	0.05	0.14	0.52	4.80	3.84			

Mu (kNm)	0.0	39.4	59.4	69.4	70.3	98.4	107.8	117.2	0
ε4 (‰)	0.00	0.46	0.89	1.13	1.17	1.85	3.76	6.29	3.75
Mu (kNm)	0.00	10.20	24.70	31.30	69.30	118.50	0		
ε4,A (‰)	0.03	0.05	0.13	0.41	2.58	6.24	6.035		

Mu (kNm)	0.0	25.6	39.4	50.6	59.4	65.6	70.0	89.1	107.8	117.2	126.6	128.4	0
ε_5 (‰)	0.00	0.55	0.73	1.04	1.31	1.64	1.826	2.32	3.67	4.82	6.89	7.20	4.04
Mu (kNm)	0.00	9.80	25.10	30.90	69.60	128.40	0						
$\varepsilon_{5,A}$ (‰)	0.03	0.05	0.16	0.35	2.40	6.84	5.560						

PRILOG E

Radni dijagram betona

PRILOG E1

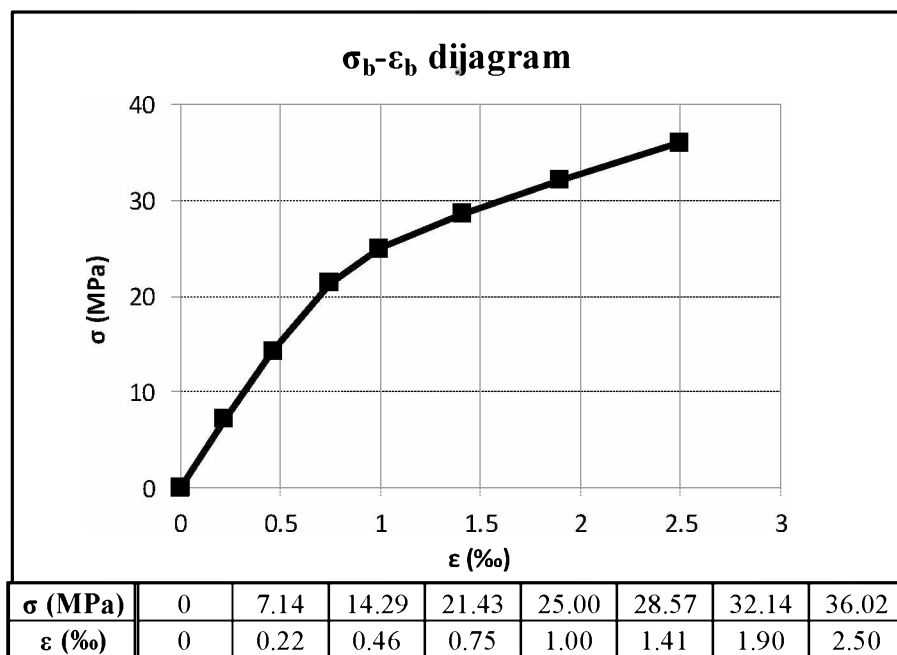
Radni dijagram betona dobijen na kontrolnim tijelima serije I

PRILOG E2

Radni dijagram betona dobijen na kontrolnim tijelima serije II

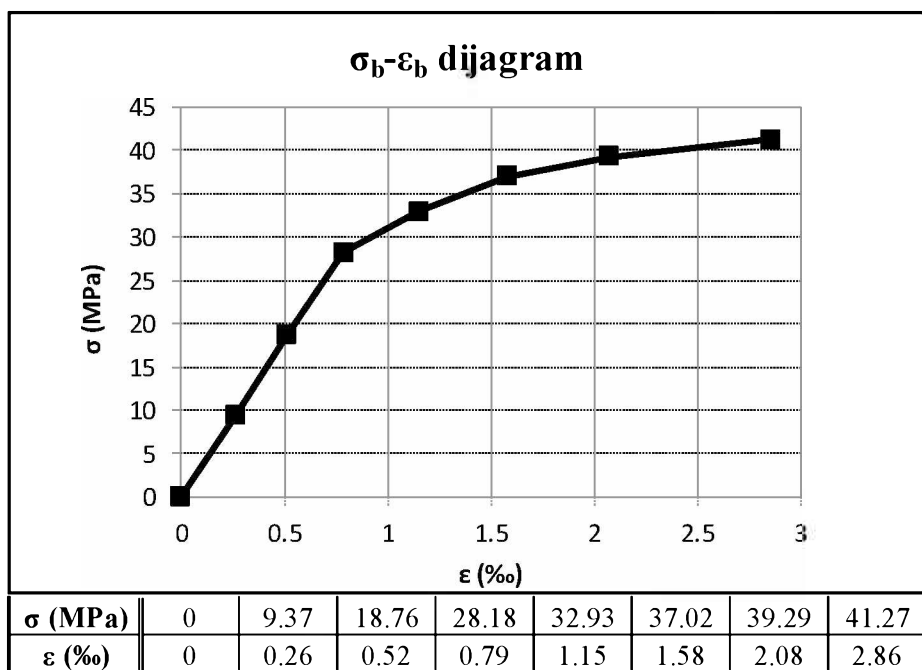
Prilog E1: RDB serije I

P (kN)	0	161	322	482	562	643	723	810
σ (MPa)	0.00	7.14	14.29	21.43	25.00	28.57	32.14	36.02
ϵ_1	335	365	401	450	484	522	616	/
ϵ_2	472	504	547	591	638	651	706	/
ϵ_3	456	493	524	559	589	724	795	/
$\Delta\epsilon_1$	0	30	66	115	149	187	281	/
$\Delta\epsilon_2$	0	32	75	119	166	179	234	/
$\Delta\epsilon_3$	0	37	68	103	133	268	339	/
$\Delta\epsilon_{sr}$	0	33	70	112	149	211	285	/
ϵ (‰)	0	0.22	0.46	0.75	1.00	1.41	1.90	2.5



Prilog E2: RDB serije II

P (kN)	0	211	422	634	741	833	884	929
σ (MPa)	0.00	9.37	18.76	28.18	32.93	37.02	39.29	41.27
č1	281	315	358	447	451	502	586	/
č2	364	404	449	461	532	616	679	/
č3	408	453	478	499	589	647	722	/
$\Delta\check{c}1$	0	34	77	166	170	221	305	/
$\Delta\check{c}2$	0	40	85	97	168	252	315	/
$\Delta\check{c}3$	0	45	70	91	181	239	314	/
$\Delta\check{c}sr$	0	40	77	118	173	237	311	/
ε (‰)	0	0.26	0.52	0.79	1.15	1.58	2.08	2.86



PRILOG F

Dimenzionisanje na savijanje poprečnog presjeka ojačanih greda pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja

Dimenzionisanje na savijanje presjeka ojačanih CFRP materijalom prema Pravilniku ACI 440.2R-08

$C_E = 0,95$ za unutrašnju namjenu, u slučaju ojačavanja karbonskim materijalom

$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^*$	$C_E = 0,95; f_{fu}^* = 3300 \text{ MPa}$	$f_{fu} = 3135 \text{ MPa}$
$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^*$	$E_f = 165 \text{ GPa};$ $\varepsilon_{fu}^* = 3,3 / 165 = 20 \text{ ‰}$	$\varepsilon_{fu} = 19 \text{ ‰}$
$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f$	$n = 1; t_f = 0,12 \text{ cm}; w_f = 5 \text{ cm}$	$A_f = 0,6 \text{ cm}^2$
$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL} \cdot (d_f - k \cdot d)}{I_{cr} \cdot E_c}$	$d_f = 43,06 \text{ cm}; d = 38 \text{ cm};$ $I_{cr} = 1639,4 \text{ cm}^4; E_c = 32,45 \text{ GPa}$ $k = \frac{I_{b2}}{d_f - a} = \frac{14,57}{38,06} = 0,38$	$\varepsilon_{bi} = 5,5 \text{ ‰}$
$\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f_c'}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_{fu}$	$f_c' = 0,7 \cdot 36,02 = 25,21 \text{ MPa}$	$\varepsilon_{fd} = 0,0146 = 14,6 \text{ ‰}$ $\varepsilon_{fd} < 0,9 \cdot 19 = 17,1 \text{ ‰}$
$\varepsilon_c' = \frac{1,7 \cdot f_c'}{E_c}$	$E_c = 32,45 \text{ GPa}$	$\varepsilon_c' = 1,321 \text{ ‰}$
$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon_c' - 2 \cdot \varepsilon_c}$ $\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon_c' \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c'^2}$	$\varepsilon_c = 3,0 \text{ ‰};$ $\varepsilon_c' = 1,321 \text{ ‰}$	$\beta_1 = 1,186$ $\alpha_1 = 0,465$
I iteracija: $c = 0,2 \cdot d = 0,2 \cdot 38 = 7,6 \text{ cm}$		
$\varepsilon_{fe} = 0,003 \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$	Napomena: ε_{bi} se može zanemariti, zato što je greda u trenutku ojačavanja bila okrenuta naopako.	$\varepsilon_{fe} = 0,014 = 14 \text{ ‰}$ $\varepsilon_{fe} < 14,6 \text{ ‰}$
$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right)$		$\varepsilon_s = 0,012 = 12 \text{ ‰}$
$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y$	$E_s = 205 \text{ GPa}$	$f_s = 2460 \text{ MPa} \geq 500 \text{ MPa}$ Usvaja se $f_s = 500 \text{ MPa}$
$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}$	$E_f = 165 \text{ GPa}$	$f_{fe} = 2310 \text{ MPa}$
$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot b}$	$b = 30 \text{ cm}$	$c = 7,90 \text{ cm}$

II iteracija: $c = 7,90$ cm	$\varepsilon_{fe} = 0.003 \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right)$	$\varepsilon_{fe} = 13,35 \text{ ‰}$
	$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}$	$f_{fe} = 2203 \text{ MPa}$
$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b}$	$f_{fe} = 2203 \text{ MPa}$	$c = 7,75 \text{ cm}$
<i>Napomena: Iterativni postupak se ponavlja sve dok se ne uspostavi ravnoteža sila u presjeku.</i>		
VII iteracija: $c = 7,79$ cm	$\varepsilon_{fe} = 0.003 \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right)$	$\varepsilon_{fe} = 13,57 \text{ ‰}$
	$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}$	$f_{fe} = 2240 \text{ MPa}$
$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b}$	$f_{fe} = 2240 \text{ MPa}$	$c = 7,8 \text{ cm}$
$F_c = \alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b \cdot c$ $F_s = A_s \cdot f_s$ $F_f = A_f \cdot f_{fe}$	$F_c = 325,3 \text{ kN}$ $F_s = 190 \text{ kN}$ $F_f = 134,4 \text{ kN}$	$F_c \approx F_s + F_f$ $325,3 \approx 324,4$ <i>Ravnoteža sila u presjeku je zadovoljena.</i>
$M_{nS} = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$	<i>Usvojeni položaj neutralne ose:</i> $c = 7,80 \text{ cm};$ $\beta_1 = 1,186$	$M_{nS} = 63,41 \text{ kNm}$
$M_{nf} = A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$		$M_{nf} = 51,66 \text{ kNm}$
$\phi \cdot M_n = \phi \cdot (M_{nS} + \psi_f \cdot M_{nf})$	$\phi = 0,9; \psi_f = 0,85$	$\phi \cdot M_n = 96,6 \text{ kNm}$ $M_n = 107,3 \text{ kNm}$
$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{k \cdot d}{3} \right) \right] \cdot (d - k \cdot d) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot \left(d - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d - k \cdot d) + A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d_f - k \cdot d)}$ $f_{s,s} \leq 0.8 \cdot f_y$		$f_{s,s} = 426,2 \text{ MPa}$ $f_{s,s} > 0,8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa}$ <i>Naponi u čeliku su prekoračeni.</i>
$f_{f,s} = f_{s,s} \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \cdot \left(\frac{d_f - k \cdot d}{d - k \cdot d} \right) - \varepsilon_{bi} \cdot E_f$ $f_{f,s} \leq 0,55 f_{f,u}$		$f_{f,s} = 416,7 \text{ MPa}$ $f_{f,s} < 0,55 \cdot 3135 = 1724,3 \text{ MPa}$ <i>Presjek je predimenzionisan CFRP trakom.</i>

PRILOG G

Proračun ugiba greda pod dejstvom dugotrajnog opterećenja

PRILOG G1

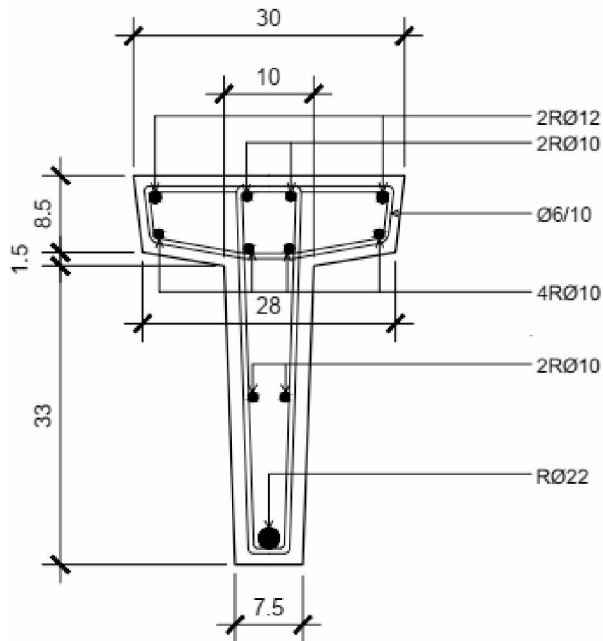
Proračun ugiba neojačanih greda

PRILOG G2

Proračun ugiba ojačanih greda

PRILOG G1 Proračun ugiba neojačanih greda

Izgled poprečnog presjeka ispitivanih AB greda



$b = 7,5 \text{ cm}$	$A_b = 513,75 \text{ cm}^2$
$d = 43 \text{ cm}$	$A_a = 3,8 \text{ cm}^2$
$b_2 = 30 \text{ cm}$	$E_b = 36,05 \text{ GPa}$
$d_2 = 8,5 \text{ cm}$	$E_a = 205 \text{ GPa}$
$y_{a_2} = 36,1 \text{ cm}$	$I_b = 86567,1 \text{ cm}^4$
$l = 7,5 \text{ m}$	$M_{rD} = 9,42 \text{ kNm}$
$G_{1a} \text{ (konc.opt.)}$	$M = q \cdot l/4 =$
$q = 35 \text{ kN}$	$65,63 \text{ kNm}$
$G_{1b} \text{ (ravn.opt.)}$	$M = q \cdot l^2/8 =$
$q = 9,2 \text{ kN/m}$	$64,69 \text{ kNm}$

Početni ugib $v_M^I(t_0)$ za stanje I		
$n = E_a/E_b$		$n = 6,32$
$A_i^I = A_b + n \cdot A_a$		$A_i^I = 537,8 \text{ cm}^2$
$\beta_2 = b_2/b; \delta_2 = d_2/d$		$\beta_2=4; \delta_2=0,198$
$y_{b_2} = \frac{d}{2} \cdot \frac{1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_2^2}{1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_2}$		$y_{b_2} = 15,08 \text{ cm}$
$y_{i_2}^I = y_{b_2} + (y_{a_2} - y_{b_2}) \cdot \frac{n \cdot A_a}{A_i^I}$		$y_{i_2}^I = 16,02 \text{ cm}$
$I_i^I = I_b + A_b \cdot (y_{a_2} - y_{b_2}) \cdot (y_{i_2}^I - y_{b_2})$		$I_i^I = 96702 \text{ cm}^4$
$k_a^I = I_b / I_i^I$		$k_a^I = 0,8952$
Greda G_{1a} opterećena koncentrisanim opterećenjem	$v_b = \frac{q \cdot l^3}{48 \cdot E_b \cdot I_b}$	$v_b = 10,95 \text{ mm}$
	$v_M^I = k_a^I \cdot v_b$	$v_M^I(t_0) = 9,80 \text{ mm}$
Greda G_{1b} opterećena ravnomjernim opterećenjem	$v_b = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{E_b I_b}$	$v_b = 13,49 \text{ mm}$
	$v_M^I = k_a^I \cdot v_b$	$v_M^I(t_0) = 12,08 \text{ mm}$

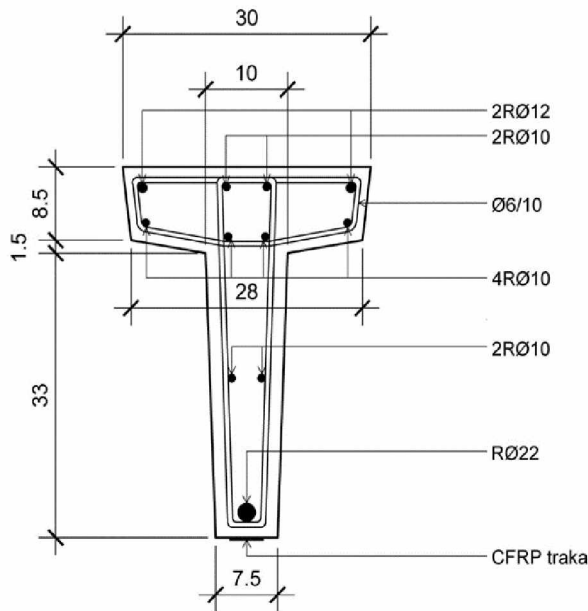
Početni ugib $v_M^{II}(t_0)$ za stanje II		
$x^{II} = \frac{(b_2 - b) \cdot d_2 + n \cdot A_a}{b} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{(b_2 - b) \cdot b \cdot d_2^2 + 2b \cdot n \cdot A_a \cdot y_{a_2}}{[(b_2 - b) \cdot d_2 + n \cdot A_a]^2}} \right)$		$x^{II} = 6,96 \text{ cm}$
$A_b^{II} = b \cdot x^{II} + (b_2 - b) \cdot d_2$		$A_b^{II} = 243,4 \text{ cm}^2$
$\delta_2^{II} = d_2 / x^{II}$		$\delta_2^{II} = 1,222$
$y_{b_2}^{II} = \frac{x^{II}}{2} \cdot \frac{1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_2^{II^2}}{1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_2^{II}}$		$y_{b_2}^{II} = 4,08 \text{ cm}$
$I_b^{II} = \frac{b \cdot x^{II^3}}{12} \cdot \left[1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_2^{II^3} + \frac{3 \cdot (\beta_2 - 1) \cdot \delta_2^{II} \cdot (1 - \delta_2^{II})^2}{1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_2^{II}} \right]$		$I_b^{II} = 1386,4 \text{ cm}^4$
$I_i^{II} = I_b^{II} + A_b^{II} \cdot (y_{a_2} - y_{b_2}^{II}) \cdot (y_{i_2}^{II} - y_{b_2}^{II}); y_{i_2}^{II} = x^{II} = 6,96 \text{ cm}$		$I_i^{II} = 23783,5 \text{ cm}^4$
$k_a^{II} = I_b / I_i^{II}$		$k_a^{II} = 3,64$
Greda G _{1a}	$v_M^{II}(t_0) = k_a^{II} \cdot v_b$	$v_M^{II}(t_0) = 39,86 \text{ cm}$
	$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \cdot \frac{M_{rD}}{M}; \beta_1=1; \beta_2=1$	$\zeta_b = 0,856$
	$v_M(t_0) = (1 - \zeta_b) \cdot v_M^I(t_0) + \zeta_b \cdot v_M^{II}(t_0)$	$v_M(t_0) = 35,54 \text{ mm}$
Greda G _{1b}	$v_M^{II}(t_0) = k_a^{II} \cdot v_b$	$v_M^{II}(t_0) = 49,11 \text{ cm}$
	$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \cdot \frac{M_{rD}}{M}; \beta_1=1; \beta_2=1$	$\zeta_b = 0,854$
	$v_M(t_0) = (1 - \zeta_b) \cdot v_M^I(t_0) + \zeta_b \cdot v_M^{II}(t_0)$	$v_M(t_0) = 43,72 \text{ mm}$

Ugib u toku vremena $v_M^I(t_\infty)$ za stanje I		
$\chi(t_\infty, t_0) = 0,8; \varphi(t_\infty, t_0) = 2,5$		
$E_b^*(t_\infty) = \frac{E_b}{1 + \chi(t_\infty, t_0) \cdot \varphi(t_\infty, t_0)}$		$E_b^*(t_\infty) = 10,82 \text{ GPa}$
$n^* = E_a / E_b^*(t_\infty)$		$n^* = 18,95$
$A_i^{I*} = A_b + n^* \cdot A_a$		$A_i^{I*} = 585,8 \text{ cm}^2$
$y_{i_2}^{I*} = y_{b_2} + (y_{a_2} - y_{b_2}) \cdot \frac{n^* \cdot A_a}{A_i^{I*}}$		$y_{i_2}^{I*} = 17,66 \text{ cm}$
$I_i^{I*} = I_b + A_b \cdot (y_{a_2} - y_{b_2}) \cdot (y_{i_2}^{I*} - y_{b_2})$		$I_i^{I*} = 114479,6 \text{ cm}^4$
$k_\varphi^I = 1 - \frac{n^*}{I_i^{I*}} \cdot [A_a \cdot (y_{a_2} - y_{i_2}^I)(y_{a_2} - y_{i_2}^{I*})]$		$k_\varphi^I = 0,767$
Greda G _{1a}	$v_M^I(t_\infty) = k_a^I \cdot [1 + k_\varphi^I \cdot \varphi(t_\infty, t_0)] \cdot v_b$	$v_M^I(t_\infty) = 28,60 \text{ mm}$
Greda G _{1b}		$v_M^I(t_\infty) = 35,24 \text{ mm}$

Ugib u toku vremena $v_M^{II}(t_\infty)$ za stanje II		
$A_i^{II*} = A_b^{II} + n^* \cdot A_a$		$A_i^{II*} = 315,5 \text{ cm}^2$
$y_{i_2}^{II*} = y_{b_2}^{II} + (y_{a_2} - y_{b_2}^{II}) \cdot \frac{n^* \cdot A_a}{A_i^{II*}}$		$y_{i_2}^{II*} = 11,39 \text{ cm}$
$I_i^{II*} = I_b^{II} + A_b^{II} \cdot (y_{a_2} - y_{b_2}^{II}) \cdot (y_{i_2}^{II*} - y_{b_2}^{II})$		$I_i^{II*} = 58351,2 \text{ cm}^4$
$k_\varphi^{II} = 1 - \frac{n^*}{I_i^{II*}} \cdot [A_a \cdot (y_{a_2} - y_{i_2}^{II})(y_{a_2} - y_{i_2}^{II*})]$		$k_\varphi^{II} = 0,1114$
Greda G _{1a}	$v_M^{II}(t_\infty) = k_a^{II} \cdot [1 + k_\varphi^{II} \cdot \varphi(t_\infty, t_0)] \cdot v_b$	$v_M^{II}(t_\infty) = 50,96 \text{ mm}$
	$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \cdot \frac{M_{rD}}{M}; \beta_1=1; \beta_2=0,5$	$\zeta_b = 0,928$
	$v_M(t_\infty) = (1 - \zeta_b) \cdot v_M^I(t_\infty) + \zeta_b \cdot v_M^{II}(t_\infty)$	$v_M(t_\infty) = 49,35 \text{ mm}$
Greda G _{1b}	$v_M^{II}(t_\infty) = k_a^{II} \cdot [1 + k_\varphi^{II} \cdot \varphi(t_\infty, t_0)] \cdot v_b$	$v_M^{II}(t_\infty) = 62,79 \text{ mm}$
	$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \cdot \frac{M_{rD}}{M}; \beta_1=1; \beta_2=0,5$	$\zeta_b = 0,927$
	$v_M(t_\infty) = (1 - \zeta_b) \cdot v_M^I(t_\infty) + \zeta_b \cdot v_M^{II}(t_\infty)$	$v_M(t_\infty) = 60,78 \text{ mm}$

PRILOG G2 Proračun ugiba ojačanih greda

Izgled poprečnog presjeka ispitivanih AB greda



$b = 7,5 \text{ cm}$	$A_b = 513,75 \text{ cm}^2$
$d = 43 \text{ cm}$	$A_a = 3,8 \text{ cm}^2$
$b_2 = 30 \text{ cm}$	$A_f = 0,6 \text{ cm}^2$
$d_2 = 8,5 \text{ cm}$	$E_b = 36,05 \text{ GPa}$
$y_{a_2} = 36,1 \text{ cm}$	$E_a = 205 \text{ GPa}$
$y_{a_{2f}} = 40 \text{ cm}$	$E_f = 165 \text{ GPa}$
	$I_b = 86567,1 \text{ cm}^4$
$l = 7,5 \text{ m}$	$M_{rD} = 9,42 \text{ kNm}$
$G_2, G_3 \text{ (konc.opt.)}$	$M = q \cdot l/4$
$q = 35 \text{ kN}$	$= 65,63 \text{ kNm}$
$G_4 - G_9 \text{ (ravn.opt.)}$	$M = q \cdot l^2/8$
$q = 9,2 \text{ kN/m}$	$= 64,69 \text{ kNm}$

Početni ugib $v_{Mf}^l(t_0)$ za stanje I		
$n = E_a/E_b; n_f = E_f/E_b$		$n = 6,32; n_f = 5,08$
$A_{if}^l = A_b + n \cdot A_a + n_f \cdot A_f$		$A_{if}^l = 540,8 \text{ cm}^2$
$\beta_2 = b_2/b; \delta_2 = d_2/d$		$\beta_2 = 4; \delta_2 = 0,198$
$y_{b_2} = \frac{d}{2} \cdot \frac{1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_2^2}{1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_2}$		$y_{b_2} = 15,08 \text{ cm}$
$y_{i_{2f}}^l = y_{b_2} + (y_{a_2} - y_{b_2}) \cdot \frac{n \cdot A_a}{A_{if}^l} + (y_{a_{2f}} - y_{b_2}) \cdot \frac{n_f \cdot A_f}{A_{if}^l}$		$y_{i_{2f}}^l = 16,16 \text{ cm}$
$I_{if}^l = I_b + A_b \cdot (y_{a_2} - y_{b_2}) \cdot (y_{i_2}^l - y_{b_2}) + A_b \cdot (y_{a_{2f}} - y_{b_2}) \cdot (y_{i_{2f}}^l - y_{b_2})$		$I_{if}^l = 110517,2 \text{ cm}^4$
$k_{af}^l = I_b / I_{if}^l$		$k_{af}^l = 0,7833$
Greda G _{1a} opterećena koncentrisanim opterećenjem	$v_b = \frac{q \cdot l^3}{48 \cdot E_b \cdot I_b}$	$v_b = 10,95 \text{ mm}$
	$v_{Mf}^l = k_{af}^l \cdot v_b$	$v_{Mf}^l(t_0) = 8,58 \text{ mm}$
Greda G _{1b} opterećena ravnomjernim opterećenjem	$v_b = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{E_b I_b}$	$v_b = 13,49 \text{ mm}$
	$v_{Mf}^l = k_{af}^l \cdot v_b$	$v_{Mf}^l(t_0) = 10,57 \text{ mm}$

Početni ugib $v_{Mf}^{II}(t_0)$ za stanje II		
$x_f^{II} = \frac{(b_2 - b) \cdot d_2 + n \cdot A_a + n_f \cdot A_f}{b} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{(b_2 - b) \cdot b \cdot d_2^2 + 2b \cdot n \cdot A_a \cdot y_{a_2} + 2b \cdot n_f \cdot A_f \cdot y_{a_{2f}}}{\left[\left((b_2 - b) \cdot d_2 + n \cdot A_a + n_f \cdot A_f \right)^2 \right]}} \right)$		$x_f^{II} = 7,33 \text{ cm}$
$A_{bf}^{II} = b \cdot x_f^{II} + (b_2 - b) \cdot d_2$		$A_{bf}^{II} = 246,2 \text{ cm}^2$
$\delta_{2f}^{II} = d_2 / x_f^{II}$		$\delta_{2f}^{II} = 1,16$
$y_{b_{2f}}^{II} = \frac{x_f^{II}}{2} \cdot \frac{1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_{2f}^{II^2}}{1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_{2f}^{II}}$		$y_{b_{2f}}^{II} = 4,12 \text{ cm}$
$I_{bf}^{II} = \frac{b \cdot x_f^{II^3}}{12} \cdot \left[1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_{2f}^{II^3} + \frac{3 \cdot (\beta_2 - 1) \cdot \delta_{2f}^{II} \cdot (1 - \delta_{2f}^{II})^2}{1 + (\beta_2 - 1) \cdot \delta_{2f}^{II}} \right]$		$I_{bf}^{II} = 1412,2 \text{ cm}^4$
$I_{if}^{II} = I_{bf}^{II} + A_b^{II} \cdot (y_{a_2} - y_{b_2}^{II}) \cdot (y_{i_2}^{II} - y_{b_2}^{II}) + A_{bf}^{II} \cdot (y_{a_{2f}} - y_{b_{2f}}^{II}) \cdot (y_{i_{2f}}^{II} - y_{b_{2f}}^{II});$ $y_{i_2}^{II} = x_f^{II} = 7,33 \text{ cm}$		$I_{if}^{II} = 29770,4 \text{ cm}^4$
$k_{af}^{II} = I_b / I_{if}^{II}$		$k_{af}^{II} = 2,91$
Grede G ₂ i G ₃	$v_{Mf}^{II}(t_0) = k_{af}^{II} \cdot v_b$	$v_{Mf}^{II}(t_0) = 31,84 \text{ cm}$
	$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \cdot \frac{M_{rD}}{M}; \beta_1=1; \beta_2=1$	$\zeta_b = 0,856$
	$v_{Mf}(t_0) = (1 - \zeta_b) \cdot v_{Mf}^I(t_0) + \zeta_b \cdot v_{Mf}^{II}(t_0)$	$v_{Mf}(t_0) = 28,50 \text{ mm}$
Grede G ₄ - G ₉	$v_{Mf}^{II}(t_0) = k_{af}^{II} \cdot v_b$	$v_{Mf}^{II}(t_0) = 39,23 \text{ cm}$
	$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \cdot \frac{M_{rD}}{M}; \beta_1=1; \beta_2=1$	$\zeta_b = 0,854$
	$v_{Mf}(t_0) = (1 - \zeta_b) \cdot v_{Mf}^I(t_0) + \zeta_b \cdot v_{Mf}^{II}(t_0)$	$v_{Mf}(t_0) = 35,06 \text{ mm}$

Ugib u toku vremena $v_{Mf}^I(t_\infty)$ za stanje I		
$\chi(t_\infty, t_0) = 0,8; \varphi(t_\infty, t_0) = 2,5$		
$E_b^*(t_\infty) = \frac{E_b}{1 + \chi(t_\infty, t_0) \cdot \varphi(t_\infty, t_0)}$	$E_b^*(t_\infty) = 10,82 \text{ GPa}$	
$n^* = E_a/E_b^*(t_\infty); \quad n_f^* = E_f/E_b^*(t_\infty)$	$n^* = 18,95;$ $n_f^* = 15,25$	
$A_{if}^{I*} = A_b + n^* \cdot A_a + n_f^* \cdot A_f$	$A_{if}^{I*} = 594,9 \text{ cm}^2$	
$y_{i2f}^{I*} = y_{b2} + (y_{a2} - y_{b2}) \cdot \frac{n^* \cdot A_a}{A_{if}^{I*}} + (y_{a2f} - y_{b2}) \cdot \frac{n_f^* \cdot A_f}{A_{if}^{I*}}$	$y_{i2f}^{I*} = 18,05 \text{ cm}$	
$I_{if}^{I*} = I_b + A_b \cdot (y_{a2} - y_{b2}) \cdot (y_{i2}^{I*} - y_{b2}) + A_b \cdot (y_{a2f} - y_{b2}) \cdot (y_{i2f}^{I*} - y_{b2})$	$I_{if}^{I*} = 152479,5 \text{ cm}^4$	
$k_{\varphi f}^I = 1 - \frac{n^*}{I_{if}^{I*}} \cdot [A_a \cdot (y_{a2} - y_{i2}^I)(y_{a2} - y_{i2}^{I*})] - \frac{n_f^*}{I_{if}^{I*}} \cdot [A_f \cdot (y_{a2f} - y_{i2f}^I)(y_{a2f} - y_{i2f}^{I*})]$	$k_{\varphi f}^I = 0,7356$	
Grede G ₂ i G ₃	$v_{Mf}^I(t_\infty) = v_{Mf}^I(t_0) \cdot [1 + k_{\varphi f}^I \cdot \varphi(t_\infty, t_0)]$	$v_{Mf}^I(t_\infty) = 24,35 \text{ mm}$
Grede G ₄ - G ₉		$v_{Mf}^I(t_\infty) = 30,01 \text{ mm}$

Ugib u toku vremena $v_{Mf}^{II}(t_\infty)$ za stanje II		
$A_{if}^{II*} = A_{bf}^{II} + n^* \cdot A_a + n_f^* \cdot A_f$		$A_{if}^{II*} = 327,4 \text{ cm}^2$
$y_{i2f}^{II*} = y_{b2}^{II} + (y_{a2} - y_{b2}^{II}) \cdot \frac{n^* \cdot A_a}{A_{if}^{II*}} + (y_{a2f} - y_{b2f}^{II}) \cdot \frac{n_f^* \cdot A_f}{A_{if}^{II*}}$		$y_{i2f}^{II*} = 12,40 \text{ cm}$
$I_{if}^{II*} = I_{bf}^{II} + A_{bf}^{II} \cdot (y_{a2f} - y_{b2f}^{II}) \cdot (y_{i2f}^{II*} - y_{b2f}^{II})$		$I_{if}^{II*} = 74540,6 \text{ cm}^4$
$k_{\varphi f}^{II} = 1 - \frac{n^*}{I_{if}^{II*}} \cdot [A_a \cdot (y_{a2} - y_{i2}^{II})(y_{a2} - y_{i2}^{II*})] - \frac{n_f^*}{I_{if}^{II*}} \cdot [A_f \cdot (y_{a2f} - y_{i2f}^{II})(y_{a2f} - y_{i2f}^{II*})]$		$k_{\varphi f}^{II} = 0,0007$
Grede G ₂ i G ₃	$v_{Mf}^{II}(t_\infty) = v_{Mf}^{II}(t_0) \cdot [1 + k_{\varphi f}^{II} \cdot \varphi(t_\infty, t_0)]$	$v_{Mf}^{II}(t_\infty) = 31,90 \text{ mm}$
	$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \cdot \frac{MrD}{M}; \quad \beta_1=1; \quad \beta_2=0,5$	$\zeta_b = 0,928$
	$v_{Mf}(t_\infty) = (1 - \zeta_b) \cdot v_{Mf}^I(t_\infty) + \zeta_b \cdot v_{Mf}^{II}(t_\infty)$	$v_{Mf}(t_\infty) = 31,35 \text{ mm}$
Grede G ₄ - G ₉	$v_{Mf}^{II}(t_\infty) = v_{Mf}^{II}(t_0) \cdot [1 + k_{\varphi f}^{II} \cdot \varphi(t_\infty, t_0)]$	$v_{Mf}^{II}(t_\infty) = 39,31 \text{ mm}$
	$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \cdot \frac{MrD}{M}; \quad \beta_1=1; \quad \beta_2=0,5$	$\zeta_b = 0,927$
	$v_{Mf}(t_\infty) = (1 - \zeta_b) \cdot v_{Mf}^I(t_\infty) + \zeta_b \cdot v_{Mf}^{II}(t_\infty)$	$v_{Mf}(t_\infty) = 38,64 \text{ mm}$
$v_M(t_\infty) > v_u$ $v_u = l / 300 = 750/300 = 2,5 \text{ cm} = 25 \text{ mm}$		Granični ugib je prekoračen.

PRILOG H

Spisak slika

Slika 2.1 Radni dijagrami FRP materijala za spoljašnje ojačanje	11
Slika 2.2 Uzorak trake-lamele prije i nakon ispitivanja na zatezanje	20
Slika 2.3 Ojačanje greda i ploča na savijanje i smicanje	21
Slika 3.1 Načini ojačavanja konstrukcijskih elemenata	26
Slika 3.2 Zavisnost veličine ugiba od opterećenja	29
Slika 3.3 Mehanizam loma grede bez gubitka veze betona i FRP ojačanja	31
Slika 3.4 Mehanizam loma grede usljed odvajanja FRP ojačanja	32
Slika 3.5 Mehanizam loma u zoni interakcije betona i FRP ojačanja	33
Slika 3.6 Zavisnost graničnog opterećenja i ugiba od debljine ojačanja po Holmeru	35
Slika 3.7 Zavisnost graničnog opterećenja i ugiba od debljine ojačanja po Sobuzu	36
Slika 3.8 Dijagram raspodjele deformacija i napona u GSN pri savijanju	43
Slika 3.9 Presjek prije ojačanja - raspodjela dilatacija	52
Slika 3.10 Presjek sa prslinom - dilatacije i unutrašnje sile	53
Slika 3.11 Analiza GSN presjeka pri savijanju – dijagram dilatacija i napona	56
Slika 3.12 Tipično ponašanje betona tokom očvršćavanja	60
Slika 3.13 Tečenje betona pri konstantnom opterećenju	61
Slika 3.14 Prikaz ukupnih deformacija pod konstantnim naponom	62
Slika 3.15 Kriva tečenja materijala za nivoe napona iznad eksploatacionih	63
Slika 3.16 Određivanje koeficijenta tečenja za beton u normalnim uslovima sredine ...	69
Slika 4.1 Karakteristični radni dijagram čelika B500B (ϕ 22mm)	80
Slika 4.2 Rolna CFRP trake	81
Slika 4.3 Granulometrijski sastav mješavine agregata	82
Slika 4.4 Karakteristični radni dijagram betona	84
Slika 4.5 Poprečni presjek ispitivanih uzoraka	85
Slika 4.6 Priprema betonske podloge (brušenje)	87
Slika 4.7 Nanošenje sloja maltera za nivelaciju	88
Slika 4.8 Aparatura za izvođenje testa i izgled uzorka nakon loma	88
Slika 4.9 Nanošenje sloja lijepka na karbonsku traku	89

Slika 4.10 Postavljanje karbonske trake.....	89
Slika 4.11 Postavljanje na oslonce ojačanih armirano-betonskih greda za ispitivanje ...	90
Slika 4.12 Demontirani uzorak nakon loma	91
Slika 4.13 Laboratorijska oprema: a) hidraulična presa; b) kidalica	93
Slika 4.14 Uređaj za ispitivanje tečenja betona	94
Slika 4.15 Ispitivanje greda opterećenih koncentrisanom silom	95
Slika 4.16 Ispitivanje greda pod dejstvom ravnomjernog opterećenja	96
Slika 4.17 Mjerenja koeficijenta tečenja na kontrolnim cilindrima	98
Slika 4.18 Šematski prikaz ispitivane grede i mjerne aparature.....	99
Slika 4.19 Položaj mjernih traka na betonu i na karbonskim trakama.....	100
Slika 4.20 Mjerenje širine prslina	101
Slika 5.1 Odnos graničnih momenata savijanja ojačanih i kontrolnih greda	105
Slika 5.2 Veličine ugiba ispitivanih greda	106
Slika 5.3 Dilatacije u zategnutoj zoni betona	107
Slika 5.4 Dilatacije u pritisknutoj zoni betona	108
Slika 5.5 Dilatacije u karbonskim trakama	109
Slika 5.6 KDP kao uzročnik loma i izgled grede nakon loma.....	111
Slika 6.1 Odnos graničnih momenata savijanja ojačanih i kontrolnih greda	116
Slika 6.2 Veličine ugiba ispitivanih greda	117
Slika 6.3 Dilatacije u zategnutoj zoni betona	118
Slika 6.4 Dilatacije u pritisknutoj zoni betona	118
Slika 6.5 Dilatacije u karbonskim trakama	119
Slika 6.6 Lom grede G7	120
Slika 6.7 KDP kao uzročnik loma i odvajanje CFRP trake grede G9	121
Slika 6.8 Lom grede G6	121
Slika 6.9 Uporedna analiza veličine ugiba ispitivanih greda	124
Slika 6.10 Uporedna analiza veličine dilatacija u zategnutom betonu	124
Slika 6.11 Uporedna analiza veličine dilatacija u pritisknutom betonu.....	125
Slika 6.12 Uporedna analiza veličine dilatacija karbonskih traka	126
Slika 6.13 Dijagram ugiba u toku vremena	129
Slika 6.14 Dijagram dilatacija u zategnutom betonu u toku vremena	129
Slika 6.15 Dijagram dilatacija u pritisknutom betonu u toku vremena	130

Slika 6.16 Dijagram dilatacija u karbonskoj traci u toku vremena.....	130
Slika 7.1 Konačni element SOLID65	137
Slika 7.2 Ponašanje betona u ispucalom stanju	139
Slika 7.3 Šema jednosmjernog FRP kompozita	144
Slika 7.4 Geometrija nosača.....	145
Slika 7.5 Izgled poprečnog presjeka nosača.....	146
Slika 7.6 Šema prslina za gredu G1a	147
Slika 7.7 Šema prslina za gredu G2	147
Slika 7.8 Dijagrami ugiba za linearni model	148
Slika 7.9 Dijagrami ugiba za nelinearni model	149
Slika 7.10 Dijagrami dilatacija karbonskih traka	150

PRILOG I

Spisak tabela

Tabela 2.1 Karakteristike vlakana	8
Tabela 2.2 Karakteristike polimerne matrice	9
Tabela 2.3 Karakteristike FRP materijala	10
Tabela 2.4 Karakteristike CFRP traka za ojačanje i poređenje sa čelikom	10
Tabela 3.1 Vrijednosti redukcionog faktora C_E za različite vrste materijala	44
Tabela 3.2 Vrijednosti dopuštenih napona za različite tipove ojačanja	49
Tabela 4.1 Karakteristike upotrijebljenog betonskog čelika	80
Tabela 4.2 Karakteristike upotrijebljene karbonske trake	81
Tabela 4.3 Karakteristike upotrijebljenog riječnog agregata	83
Tabela 4.4 Karakteristike upotrijebljenog cementa	83
Tabela 4.5 Fizičko-mehaničke karakteristike betona	97
Tabela 4.6 Početni ugibi greda	101
Tabela 4.7 Karakteristike greda ispitivanih na kratkotrajno opterećenje	102
Tabela 4.8 Karakteristike greda ispitivanih na dugotrajno opterećenje	104
Tabela 6.1 Maksimalne dilatacije greda u toku vremena	132
Tabela 6.2 Rezultati ispitivanja tečenja na kontrolnim betonskim cilindrima	134

BIOGRAFIJA AUTORA

Mr Nataša Kopitović Vuković, rođena je 17. jula 1975. godine u Podgorici, gdje je završila osnovnu školu i gimnaziju. Dobitnik je diplome Luča za osnovnu i srednju školu.

Diplomirala je na konstruktivnom smjeru Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore u julu 2001. godine. Magistarski rad pod nazivom „Uporedna analiza granične nosivosti elemenata od prethodno napregnutog betona, prema našim propisima i prema Evrokodu 2” odbranila je 2008. godine, na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore, pod mentorstvom prof. dr Radenka Pejovića. Doktorske studije upisala je na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore i položila sve predviđene ispite sa prosječnom ocenom A. Njeno doktorsko istraživanje je usmjereno ka primjeni novih materijala i tehnologija u građevinarstvu.

Od 01.04.2003. godine radi na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore, gdje je, u zvanju saradnika, samostalno održavala vježbanja na brojnim predmetima na Katedri za materijale i konstrukcije. Angažovana je na osnovnim i specijalističkim studijama konstruktivnog smjera, kao i studijskog programa Menadžment u građevinarstvu. Takođe je dugi niz godina bila angažovana i kao saradnik na Arhitektonskom fakultetu.

Od početka angažovanja, Nataša Kopitović Vuković je radila i kao saradnik u Laboratoriji za ispitivanje materijala i konstrukcija.

Objavila je veći broj radova, izlaganih na naučnim i stručnim skupovima u zemlji i inostranstvu.

U okviru CEEPUS razmjene nastavnog kadra, boravila je na Tehničkom Univerzitetu u Beču, kao istraživač na projektu.

Oblavljala je funkciju koordinatora za međunarodnu saradnju Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore (2 studijske godine).

Bila je član komisija za odbranu velikog broja diplomskih radova.

Objavila je veći broj radova, izlaganih na naučnim i stručnim skupovima u zemlji i inostranstvu.

Član je Inženjerske komore Crne Gore .

Član je tima za izradu Evrokodova.

Član je Tehničkog komiteta Instituta za standardizaciju.

Član je Grupe za ocjenu i nadzor (GON) Tijela za sertifikaciju građevinskih proizvoda (IG CERT).

Aktivno se koristi engleskim jezikom.

Udata je i ima dva sina.

Izjava o autorstvu

Potpisana Nataša Kopitović Vuković

Broj indeksa/upisa 103/08

Izjavljujem

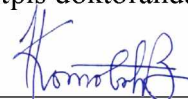
da je doktorska disertacija pod naslovom

Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod dugotrajnim opterećenjem

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija ni u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedila autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

U Podgorici, 14. 05. 2020. godine

Potpis doktoranda



Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Nataša Kopitović Vuković

Broj indeksa/upisa 103/08

Studijski program Građevinarstvo

Naslov rada Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima
pod dugotrajnim opterećenjem

Mentor Prof. dr Radomir Zejak

Potpisana Mr Nataša Kopitović Vuković

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, naziv disertacije i datum odbrane rada.

U Podgorici, 14. 05. 2020. godine

Potpis doktoranda



Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore pohrani moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod dugotrajnim opterećenjem

koja je moje autorsko djelo.

Disertaciju sa svim priložima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

U Podgorici, 14. 05. 2020. godine

Potpis doktoranda

