

SPAJANJE AB I PB GREDNIH ELEMENATA SA VISOKOVREDNIM ZAVRTNJIMA

Danijel Kukaras¹,
Ljubomir Vlajić²

UDK: 691.328.1/.2:621.8.02.031

Rezime: Istraživanja prikazana u ovom radu predstavljaju deo doktorske disertacije prvog autora dok je drugi autor bio mentor pri izradi iste. Rad obuhvata eksperimentalno numeričku analizu ponašanja armiranobetonskih (AB) i prednapregnutih betonskih (PB) nosača koji su spojeni visokovrednim (VV) zavrtnjima u pravcu i upravno na pravac podužne ose nosača pod dejstvom statičkog opterećenja do loma. Cilj ovih istraživanja je bio sticanje boljeg uvida u ponašanje nosača spojenih primenom visokovrednih prednapregnutih zavrtnjeva.

Ključne reči: Visokovredni zavrtnji, AB i PB grede, spajanje, koeficijent trenja, sila pritezanja, nelinearna analiza betonskih konstrukcija.

1. UVOD

U radu su prikazana eksperimentalna i numerička istraživanja mogućnosti spajanja armiranobetonskih i prednapregnutih betonskih konstrukcija primenom visokovrednih zavrtnjeva. Kvalitet zavrtnja, sila pritezanja i koeficijent trenja između tarnih površina u spoju su izdvojeni kao posebno važni parametri pri određivanju nosivosti spoja. Prvi parametar je definisan standardima pa može da se tretira kao poznat. Kada je u pitanju sila pritezanja, osim unošenja sile, neophodno je imati u vidu i reološke karakteristike betona. Ove osobine betona utiču na promenu sila u visokovrednim zavrtnjima tokom vremena, čak i u uslovima kada nema promene spoljnjih sila. Ispitivanja vršena u ovom radu su obuhvatala ponašanje spojenih konstrukcija pri kratkotrajnom opterećenju pa reološke karakteristike betona nisu bile od značaja ali je važno da se napomene da je ovoj problematici posvećena posebna pažnja kroz tekuća i buduća istraživanja autora ovog rada. O trećem parametru, koeficijentu trenja na tarnim površinama, kod montažnih betonskih konstrukcija može se, generalno uzevši, samo uslovno govoriti. Naime, uslovi proizvodnje montažnih AB konstrukcija diktiraju skoro uvek primenu izravnavajućeg – intermedijalnog sloja kojim se kompenzuju izvođačke imperfekcije. Takođe, veoma je teško u tom slučaju razlučiti uticaj trenja od uticaja adhezije.

¹ dr Danijel Kukaras, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel: 554-300, e-mail: dkukaras@gmail.com

² dr Ljubomir Vlajić, dipl. inž. građ., Saobraćajni Institut CIP, Beograd

S obzirom na sve to, eksperimentalna ispitivanja zauzimaju centralno mesto u ovom radu i podeljena su u dve veće celine: bazna ispitivanja koeficijenta trenja i ispitivanja greda u prirodnoj veličini.

Rezultati baznih ispitivanja predstavljaju sumirane rezultate ispitivanja ponašanja spoja betona i čelika na tri glavne grupe uzoraka sa devet varijanata spoja na ukupno 26 probnih tela. Dimenzije uzoraka, karakteristike visokovrednih zavrtnjeva i način obrade tarnih površina su određeni tako da u što većoj meri podražavaju stvarne karakteristike spojeva montažnih greda za koje se smatralo da imaju najveće mogućnosti u praktičnoj primeni.

Ispitivanje greda u prirodnoj veličini imalo je za cilj analizu ponašanja dva osnovna tipa spoja. Kod prvog su visokovredni zavrtnji u spoju postavljeni upravno na podužnu osu nosača, a kod drugog visokovredni zavrtnji su paralelni podužnoj osi nosača. Za ispitivanje prvog tipa spoja izrađene su i ispitane četiri armiranobetonske grede raspona četiri metra. Sve grede su imale iste karakteristike osnovnog betonskog preseka pri čemu su dve bile monolitne, a dve su bile izvedene sa spojem. Svrha monolitnih greda je bila da posluže kao osnov za ocenu ponašanja spojenih greda. Drugi tip spoja je ispitivan na gredi raspona šest metara koja je bila sastavljena od dve adheziono prednapregnute grede.

Numerička analiza prikazana u ovom radu je imala dva cilja. Osnovni cilj je bio da se verifikuju rezultati eksperimenata dok je drugi cilj bio da se oceni podobnost odabranih metoda za kompleksnije teorijske analize. U skladu sa tim, odabrana su dva pravca modeliranja: formiranje modela u trodimenzionalnom prostoru i formiranje modela u ravni. Osnov oba pristupa je metod konačnih elemenata uz primenu kompleksnih postupaka kojima se uzima u obzir složeno nelinearno ponašanje svih materijala od kojih su nosači sačinjeni. U analizama su obuhvaćene nelinearnosti koje su posledica: pojave prslina u betonu, plastične deformacije betona pri pritisku i plastične deformacije čelika. Modeliranje veze napona i deformacija kod zategnutog betona je vršeno na dva različita načina.

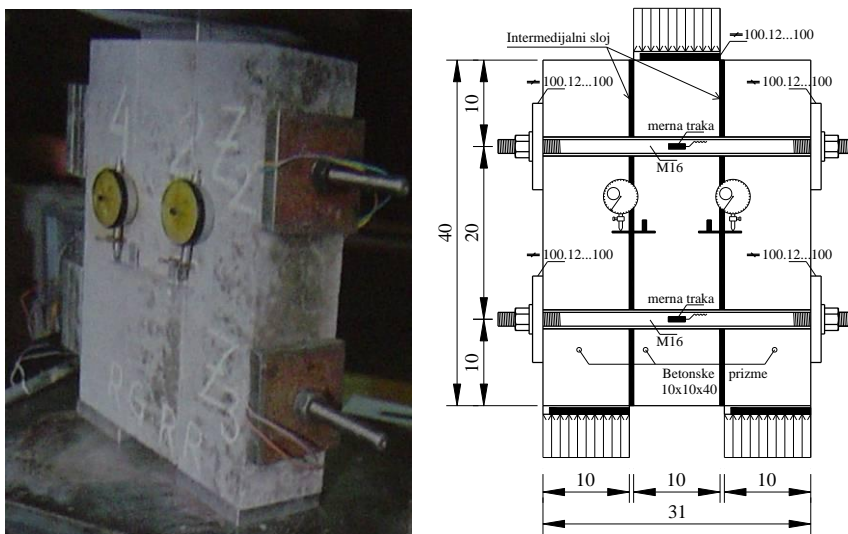
2. KOEFICIJENTI TRENJA

Osnovni cilj ovog dela eksperimentalnih ispitivanja je određivanje koeficijenta trenja kao jednog od osnovnih parametara neophodnih za proračun spojeva montažnih armiranobetonskih i prednapregnutih nosača visokovrednim zavrtnjima. Dimenzije uzoraka na kojima je koeficijent trenja utvrđivan, karakteristike visokovrednih zavrtnjeva, vrsta i način obrade tarnih površina su određeni tako da u što većoj meri podražavaju stvarne karakteristike spojeva koji su predmet daljih ispitivanja. Utvrđivanje koeficijenta trenja je vršeno na modifikovanim modelima „standardnog modela za ispitivanje moždanika“ koji je razvijen u Švajcarskom federalnom institutu za ispitivanje materijala (EMPA). Uzorci su opterećivani tako da se u njima izazove smicanje tarnog spoja i njegovo proklizavanje. Ovde je važno ponoviti da je kod ovih spojeva proklizavanje rezultat savladavanja zajedničkog dejstva sile trenja i adhezije koja se javlja u tarnim spojevima. Na osnovu ovoga je možda ispravnije govoriti o odnosu smičućeg i normalnog napona u spoju u trenutku proklizavanja spoja nego o koeficijentu trenja kako je on definisan u fizici. Ipak, ovakva upotreba termina „koeficijent trenja“ je odmaćena pa je on tako korišćen i u ovom radu.

Uzorci prve grupe, trenje "beton-beton", su formirani od tri standardne betonske prizme koje su spojene sa po dva visokovredna zavrtnja. Ispitano je četiri serije ovakvih uzorka pri čemu je svaka serija imala drugačiji intermedijalni sloj. Po tri uzorka su formirana sa sledećim intermedijalnim slojevima:

- suvi spoj, bez dodatne obrade tarnih površina,
- spojnice od cementnog maltera debljine 0,5 cm,
- spojnice od malteksa debljine 0,5 cm,
- spojnice od epoksidne smole.

Izgled karakterističnog, formiranog, uzorka za ispitivanje prve grupe je dat na Slici 1:

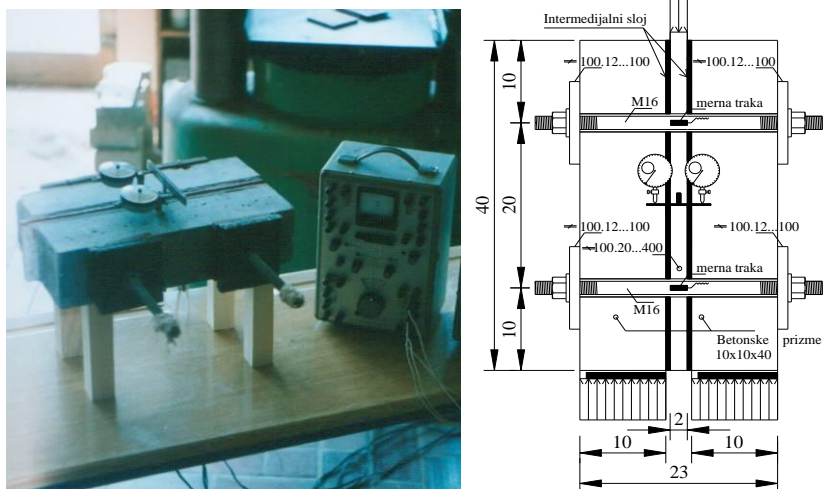


Slika 1. Fotografija i šema uzorka grupe 1

Uzorci druge grupe, trenje "beton-čelik", su formirani od dve betonske prizme dimenzija 10x10x40 cm, između kojih je postavljena čelična ploča debljine 20 mm. Uzorci su utegnuti sa po dva visokovredna zavrtnja M16 mm. Po tri uzorka su formirana sa sledećim intermedijalnim slojevima:

- spojnice od ispekarenih čeličnih ploča i cem. maltera debljine 0,5 cm,
- spojnice od ispekarenih čeličnih ploča koje su zaštićene antikorozivnim slojem koji je sušen 24 časa i cementnim malterom debljine 0,5 cm,
- spojnice od ispekarenih čeličnih ploča koje su zaštićene antikorozivnim slojem koji je potpuno osušen i cementnim malterom debljine 0,5 cm.

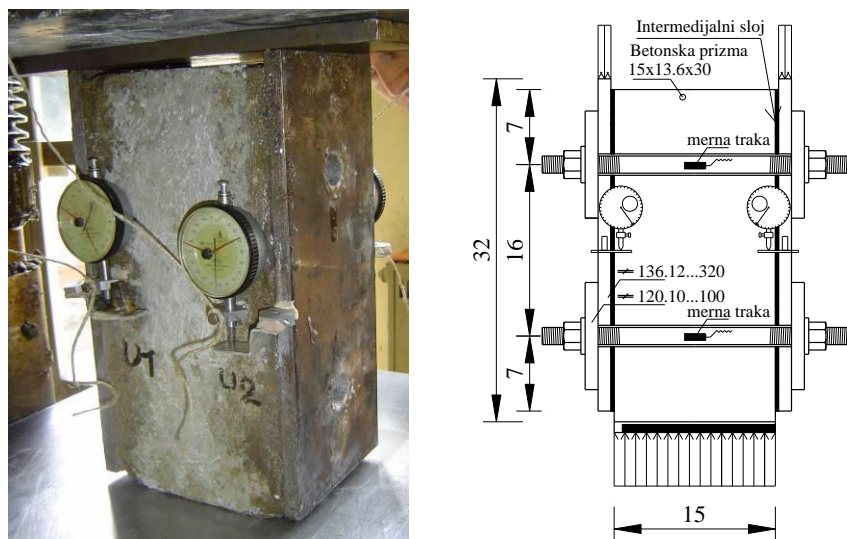
Izgled karakterističnog, formiranog, uzorka za ispitivanje druge grupe je dat na Slici 2:



Slika 2. Fotografija i šema uzorka grupe 2

Uzorci treće grupe, trenje "beton-čelik", su formirani od dve čelične ploče debljine 12 mm između kojih je jedna betonska prizma dimenzija 15x13,6x30 cm. Za utezanje su korišćeni visokovredni zavrtnji M20 mm. Ukupno je ispitano šest uzoraka sa intermedijalnim slojevima izrađenim od epoksidnog lepka. Tri uzorka su utegnuta sa VV zavrtnjima a dva su ispitana bez VV zavrtnjeva u cilju određivanja adhezije koja je postignuta primenom epoksida.

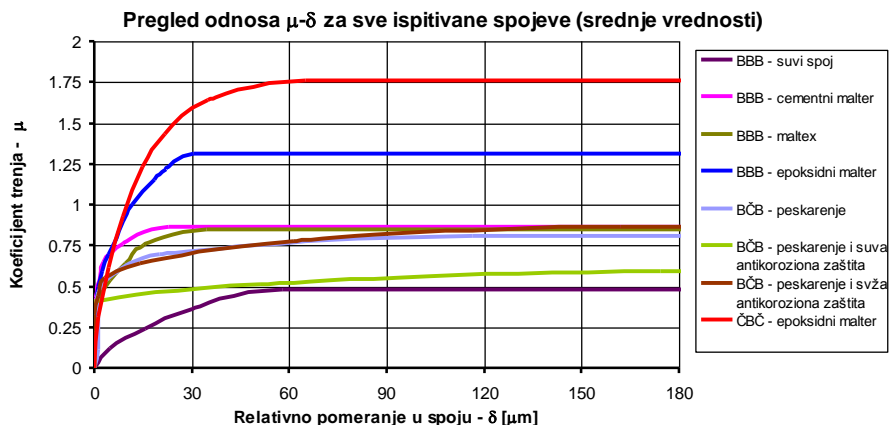
Izgled karakterističnog, formiranog, uzorka za ispitivanje treće grupe je dat na Slici 3:



Slika 3. Fotografija i šema uzorka grupe 3

Rekapitulacija rezultata ispitivanja koeficijenta trenja kod betonskih konstrukcija spojenih visokovrednim zavrtnjima je data na Slici 4 i u Tabeli 1.

Slika 4 predstavlja odnos koeficijenta trenja (ili, tačnije, odnos smičuće sile u spoju i sile pritezanja zavrtnjeva) i relativnog pomeranja tarnih površina za sve ispitane uzorke.



Slika 4. Srednje vrednosti zavisnost μ - δ za sve ispitivane uzorke

Tabela 1, predstavlja prikaz srednjih vrednosti koeficijenata trenja po grupama i vrstama obrade tarnih površina.

Grupa uzoraka		Obrada spojnika	Koeficijent trenja μ
1	beton-beton-beton „BBB“	suvi spoj	0.593
		cementni malter	0.942
		malteks	0.859
		epoksidna smola	1.378
2	beton-čelik-beton „BČB“	cementni malter	0.820
		cementni malter + sveži antikorozioni premaz	0.947
		cementni malter + suvi antikorozioni premaz	0.632
3	čelik-beton-čelik „ČBČ“	epoksid	1.811
		epoksid bez visokovrednih zavrtnjima	* - lom po betonu

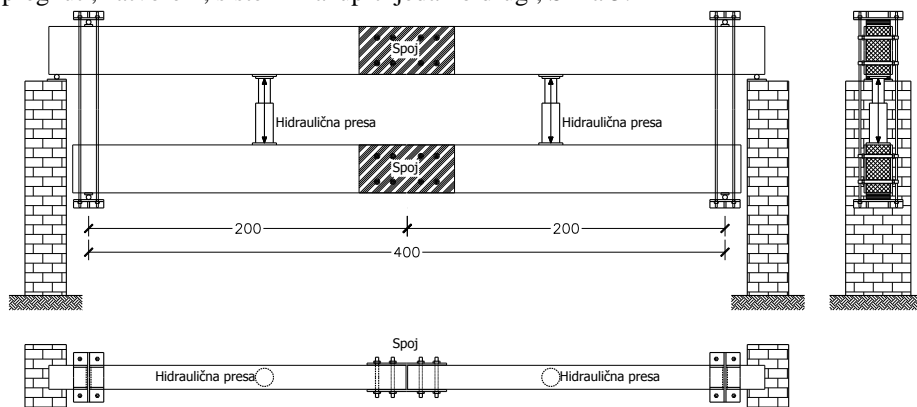
Tabela 1. Rekapitulacija eksperimentalno utvrđenih koeficijenata trenja - μ

Rezultati ispitivanja na uzorcima kod kojih su primenjeni visokovredni zavrtnji su pokazali da je najmanja prosečna vrednost koeficijenta trenja kod ovakvih spojeva $\mu=0.593$ odnosno istog je reda veličine kao i najveće vrednosti koje su ustanovljene za spojeve u čeličnim konstrukcijama. U nekim slučajevima vrednost koeficijenta trenja je znatno veća i iznosi $\mu=1.811$. Pokazalo se da je otkazivanje, odnosno lom veze “čelik-epoksid-beton” uslovljen karakteristikama betona kao osnovnog materijala koji se spaja. Ovo upućuje na to da spoj neće izazvati smanjenje nosivosti kod nosača spojenih na ovakav način, te da se sa sigurnošću može računati na pouzdanost ovakvog načina spajanja montažnih armiranobetonskih nosača.

Efikasnost spoja je u direktnoj vezi sa koeficijentom trenja i adhezije. Koeficijent trenja zavisi od načina izvođenja spoja odnosno od karakteristika slojeva i tarnih površina koje se nalaze u spoju. Izuzetno visoka sila pri kojoj je došlo do proklizavanja spoja kod uzoraka sa visokovrednim zavrtnjima ukazuje na to da je unosom sile pritiska poboljšano ponašanje betona, dok koeficijent trenja od 1.811 ukazuje da epoksidna smola višestruko poboljšava prenos sile iz visokovrednih zavrtnjeva u vezu. Po završetku ispitivanja utvrđeno je da je pad sile u zavrtnjima kao posledica proklizavanja spoja neznatan, osim u slučajevima kada je došlo do potpunog sloma uzorka. Na osnovu rezultata eksperimentalnog istraživanja prikazanih u ovom radu može da se zaključi da je upotreba visokovrednih zavrtnjeva za spajanje montažnih armiranobetonskih nosača neosporno moguća.

3. GREDE SPOJENE VV ZAVRTNJIMA KOJI SU UPRAVNI NA NJENU PODOŽNU OSU

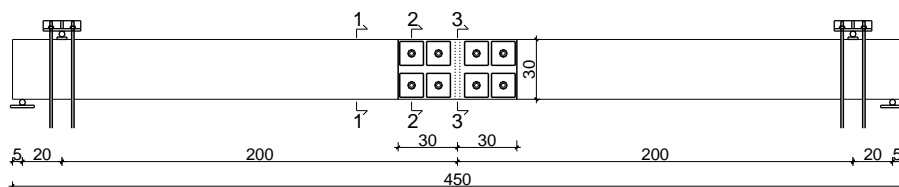
Ispitivanje spoja kod koga su zavrtnji postavljeni upravno na podužnu osu nosača je sprovedeno na ukupno četiri AB grede raspona 4.0 m. Dve grede su izvedene spajanjem greda od po 2.0 m preko spoja sa čeličnim podvezicama i VV zavrtnjima. Preostale dve grede su izvedene kao monolitne grede od 4.0 m sa istim geometrijskim karakteristikama kao i spojene grede i služile su kao „reperne“ grede za procenu efikasnosti predloženog spoja. Nosači su ispitivani simultano, tako što su bili povezani na osloncima čineći jedan spregnuti, zatvoreni, sistem i razuprti jedan o drugi, Slika 5.



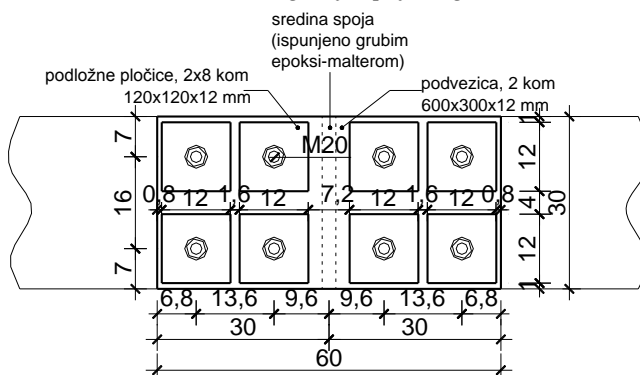
Slika 5. Dispozicija nosača pri eksperimentalnom ispitivanju

Sile su aplicirane preko dve hidarulične prese koje su postavljene na 90 cm levo i desno od sredine grede. Prese su bile spojene na jednu pumpu kako bi se osigurala jednakost sila u obe prese a sama sila je kontrolisana preko dinamometra. Opterećenje je nanošeno u fazama do loma pri čemu su vršena su ispitivanja opštih i lokalnih deformacija. Takođe su izvršena i ispitivanja karakteristika ugrađenog betona koja su obuhvatala određivanje pritiskne čvrstoće i čvrstoće na zatezanje preko standardnih betonskih kocki i ispitivanja pritiskne čvrstoće i poasonovog koeficijenta preko betonskih prizmi koje su bile opremljene mernim trakama za praćenje vertikalnih i horizontalnih deformacija tokom opterećivanja u presi.

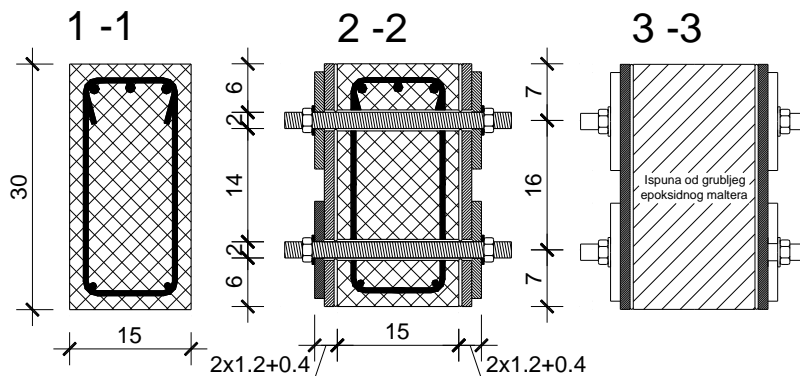
Geometrijske karakteristike gornje spojene grede su date na Slikama 6-8:



Slika 6. Skica gornje spojene grede



Slika 7. Šema spoja sa podvezicom i visokovrednim zavrtnjima



Slika 8. Poprečni presezi spojene grede



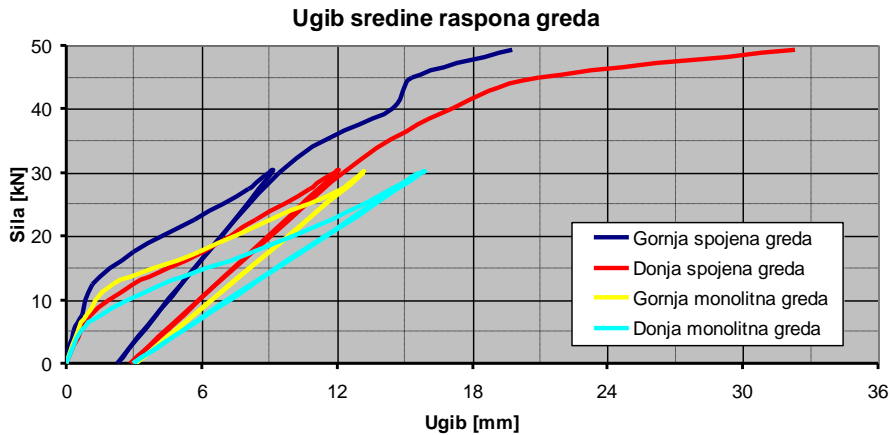
Slika 9. Spojeni nosači tokom ispitivanja

Uporedna analiza rezultata pokazuje da su se obe grupe nosača ponašale na sličan način uz zapažanje da su spojene grede pokazale nešto veću krutost od monolitnih. Tabela prikaz osnovnih rezultata je dat u Tabeli 2.

Radi jasnijeg pregleda tendencija prirasta ugiba u sredini grede na Slici 10 su uporedno dati grafovi za sve četiri grede.

Uporedni prikaz karakterističnih rezultata ispitivanja				
Posmatrana veličina pri sili P=30 kN		Monolitne grede	Spojene grede	Razlika [%]
0		1	2	3=(2-1)/1
$u_{y,max}$ [mm]	Gornja greda	13.17	9.46	-28.17
	Donja greda	15.76	12.27	-22.15
$\sigma_{b,max}$ [kN/cm ²]	Gornja greda	-1.91	-1.78	-6.81
	Donja greda	-2.40	-2.57	7.08
$\sigma_{a,max}$ [kN/cm ²]	Gornja greda	42.63	39.33	-7.74
	Donja greda	41.66	46.69	12.07
α_{max} [']	Gornja greda	34.08	30.30	-11.09
	Donja greda	38.58	33.14	-14.10

Tabela 2. Uporedni prikaz karakterističnih rezultata sa procentualno izraženim razlikama



Slika 10. Prirast pomeranja tokom ispitivanja spojenih i monolitnih greda

Uporedni grafovi pokazuju da može da se napravi paralela, kako za ponašanje greda unutar jedne grupe, tako za ponašanje greda između dve ispitivane grupe. Ako se posmatraju ugibi greda unutar svake od grupa vidi se da su ugibi gornjih greda manji od ugiba donjih greda za približno 20 %. Sa druge strane, ako se posmatraju ugibi gornjih odnosno donjih greda između dve grupe može da se zaključi da su ugibi spojenih greda manji za približno 25 %. Takođe, i kod monolitnih i kod spojenih greda važi „fazno kašnjenje“ pojavljivanja ugiba na gornjim gredama u odnosu na ugibe donjih greda. Ovo kašnjenje odgovara vrednosti sile koja neutrališe opterećenje usled sopstvene težine greda. Tokom ispitivanja spojenih greda do loma nije registrovano nikakvo relativno pomeranje čeličnih podvezica i betona spoja. Ovim se pokazuje da spoj funkcioniše prema predviđanjima i da je ovakvo spajanje armiranobetonskih nosača pouzdano.

Činjenica da su ugibi spojenih greda manji od ugiba monolitnih greda, odnosno da je veća krutost spojenih nosača tokom ispitivanja, svedoči o tome da se presek u spoju ponašao kao potpuno spregnut presek. U prilog tome govori i analiza napona koji su registrovani u čeličnim podvezicama prema čemu je, pri opterećenju $P=30$ kN, deo momenta savijanja koji prima sama podvezica:

- naponi u čeličnoj podvezici gornje grede:

$$\sigma_{n,\min}^d = -3.84 \text{ kN} / \text{cm}^2; \sigma_{n,\max}^g = 5.11 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

⇒ odgovarajući moment savijanja: $M = 16.11 \text{ kNm}$

- naponi u čeličnoj podvezici donje grede:

$$\sigma_{n,\min}^d = -4.49 \text{ kN} / \text{cm}^2; \sigma_{n,\max}^g = 5.36 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

⇒ odgovarajući moment savijanja: $M = 17.73 \text{ kNm}$

- računski moment koji deluje na ceo presek pri sili $P=30$ kN ⇒ $M = 33.0 \text{ kNm}$

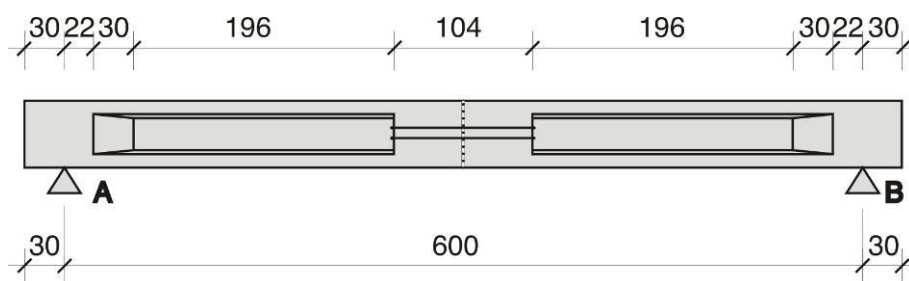
Ovaj proračun pokazuje da u samoj sredini spoja, gde prazan prostor između dve polovine spojene grede ispunjava samo epoksidni malter, podvezica prima oko 51 % od ukupnog momenta savijanja u tom preseku. Time se dokazuje da deo sile prima i sloj ispunje između dve polovine grede. Ako se, osim ovog, uzme u obzir i da je odnos momenata inercije betonskog preseka i čelične podvezice praktično 1:1 sve ukazuje na ispravnost zaključka o formiranju potpuno spregnutog preseka u spoju.

4. GREDE SPOJENE VV ZAVRTNJIMA KOJI SU PARALELNI NJENOJ PODUŽNOJ OSI

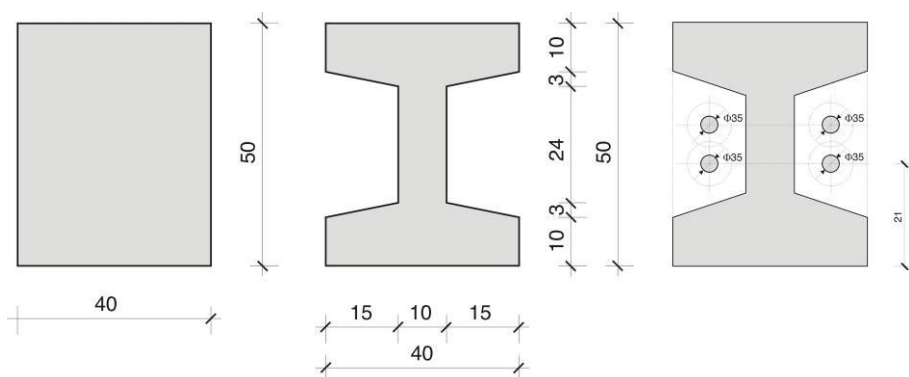
Ideja za sprovođenje ovog ispitivanja je potekla od prof. dr Ljubomira Vlajića, još pre 1984. Od tada do 2008. godine ovo istraživanje ima, može se reći, neobičnu sudbinu o čemu je više napisano u literaturi [1].

Na ličnu inicijativu profesora Vlajića i na osnovu njegovih instrukcija Građevinsko preduzeće „Sveta Mladenović“ iz Velike Plane je 1984. godine pristupilo izradi opitnog nosača. Za potrebe ispitivanja spoja sa zavrtanjima paralelnim podužnoj osi nosača, izrađen je jedan model kod koga su dve armiranobetonске adhezioni prednapregnute grede raspona 3.0 m spojene u jedan nosač raspona 6.0 m. Eksperimentalno ispitivanje ovako spojene grede je izvršeno 1990., deo numeričke analize (ravanski model) je urađen 1993. od strane dr N. Ojdrovića, 2000-te godine su rezultati ovih istraživanja i analiza sumirani u diplomskom radu V. Tešanovića i, konačno, 2008. u doktoratu prvog autora ovog rada je sprovedena analiza prostornog numeričkog modela i poređenje svih dotadašnjih eksperimentalnih i numeričko-teorijskih rezultata ovog istraživanja.

Statički sistem i geometrijske karakteristike ispitivane grede su date na Slikama 11 i 12:



Slika 11. Statički sistem ispitivane grede



Slika 12. Geometrijske karakteristike poprečnih preseka

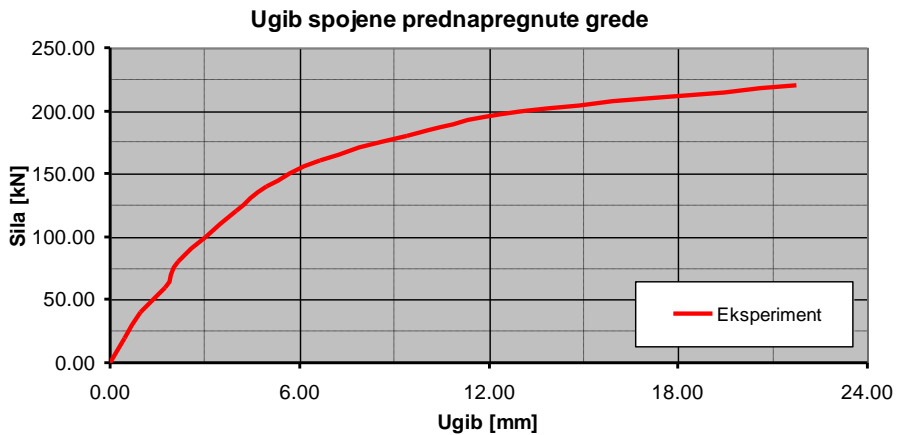


Slika 13. Fotografija spojene grede neposredno pre ispitivanja

Greda je opterećivana sa dve koncentrisne sile u trećinama raspona. Maksimalna zbirna vrednost ovih sila za radno stanje grede je iznosila 60 kN. Stoga je predviđeno da se opterećivanje vrši u fazama do maksimalne zbirne sile od 180 kN, pri čemu je inkrement sile 20 kN. U trenutku dostizanja sile od 180 kN nosač se u svemu ponašao prema očekivanjima, te je odlučeno da se nastavi sa još dve faze nanošenja opterećenja, do 220 kN. Stanje nosača pri opterećenju od 220 kN je bilo takvo da se ova sila mogla proglasiti za maksimalnu nosivost grede iako nosač još uvek nije doživeo slom. Od daljeg opterećivanja nosača se odustalo najviše iz bezbednosnih razloga. Detaljan prikaz rezultata ispitivanja čitalac može da pronađe u literaturi [1] dok se ovde daju samo karakteristični delovi:

Naponi u preseku 1-1 [kN/cm ²]					
Opterećenje	Zavrtnji		Beton		
	Gornji red	Donji red	Gore	Težište	Dole
20 kN	-0.037	+0.084	-0.102	-0.004	+0.061
40 kN (prvi)	-0.079	+0.184	-0.1995	0	+0.133
40 kN (drugi)	-0.110	+0.173	-0.203	0	+0.145
60 kN (prvi)	-0.137	+0.237	-0.308	+0.004	+0.212
60 kN (drugi)	-0.158	+0.284	-0.320	0	+0.222
80 kN	-0.131	+0.473	-0.455	+0.011	+0.264
100 kN	+0.063	+1.034	-0.620	+0.049	+0.322
120 kN	+0.389	+1.754	-0.828	+0.088	+0.343
140 kN	+0.777	+2.693	-1.038	+0.116	+0.317
160 kN	+1.659	+4.037	-1.251	+0.182	+0.298
180 kN	+3.034	+6.395	-1.648	+0.245	+0.182
200 kN (prvi)	+4.678	+8.432	-2.039	+0.252	+0.103
200 kN (drugi)	+4.778	+8.615	-2.014	+0.255	+0.117
220 kN	+6.542	+11.125	-2.329	+0.242	+0.805

Tabela 3. Naponi u preseku 1-1 (presek 26 cm levo od sredine nosača)



Slika 14. Dijagram prirasta merenih ugiba u sredini optinog nosača

Rezultati prikazanog ispitivanja su potvrdili da je dugim visokovrednim zavrtnjima postavljenim paralelno sa podužnom osom nosača moguće efikasno spajanje armiranobetonkih prednapregnutih nosača. Eksperimentalno je dokazano da je koeficijent sigurnosti u odnosu na lom ovako spojenog nosača veći od $\eta=3.0$. Maksimalno naneto opterećenje je iznosilo 220 kN što je 3.67 puta više od radnog opterećenja uz napomenu da nosač ni tada nije doživeo potpuni slom. Prema tome koeficijent sigurnosti se približio vrednosti $\eta=4.0$ što je značajno veće od zahteva za ovakve konstrukcije. Pri maksimalnom nanesenom opterećenju izmereni ugib na sredini nosača je iznosio $u_y=21.74$ mm, odnosno $1/276$ njegovog raspona. Praćenje sila u visokovrednim zavrtnjima je pokazalo prirast od 5 % za uslove radnog opterećenja (60 kN). Nakon ove faze opterećenja sile u zavrtnjima su pokazale brži rast koji je, pri 180 kN iznosio 29 %. Sve vreme trajanja eksperimenta nosač se ponašao u potpunosti prema očekivanjima što je povećalo stepen poverenja u ovako spojene konstrukcije.

5. NUMERIČKA SIMULACIJA PONAŠANJA SPOJENIH GREDA

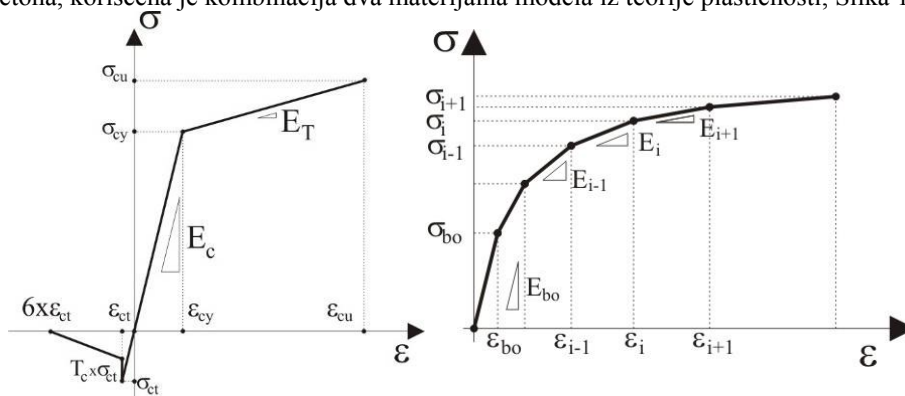
Iako eksperimentalno ispitivanje konstrukcija predstavlja težište istraživanja ovog rada, značajna pažnja je posvećena i numeričkoj simulaciji. Ovakva koncepcija istraživanja je motivisana namerom da se, koliko je to moguće, deo budućih eksperimentalnih ispitivanja zameni ispitivanjima na numeričkim modelima.

Prikazana su dva načina modeliranja, u jednom su analizirani modeli u trodimenzionalnom prostoru, dok se u drugom radilo o ravanskim modelima nosača. U obzir je uzeto složeno nelinearno ponašanje svih materijala od kojih su izvedene ispitivane grede pri čemu je posebna pažnja posvećena nelinearnom ponašanju betona. Uzročnici nelinearnosti koji su obuhvaćeni ovim proračunima su: prslina i drobljenje betona, plastične deformacije betona i čelika, kao i efekti neravnina na unutrašnjosti prslina. Pretpostavljeno je da je veza između armaturnih šipki i betona takva da nema

mogućnosti proklizavanja, a pošto je u ovom istraživanju naglasak na kratkotrajnim efektima opterećenja, uticaji tečenja, skupljanja i temperaturne promene nisu analizirani.

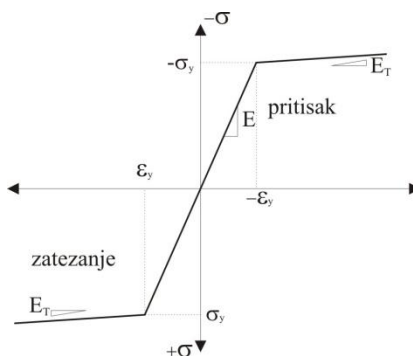
TRODIMENZIONALNO MODELIRANJE NOSAČA

Za simulaciju materijalnog modela, odnosno jednoosijalne zavisnosti napona i dilatacija betona, korišćena je kombinacija dva materijalna modela iz teorije plastičnosti, Slika 15.



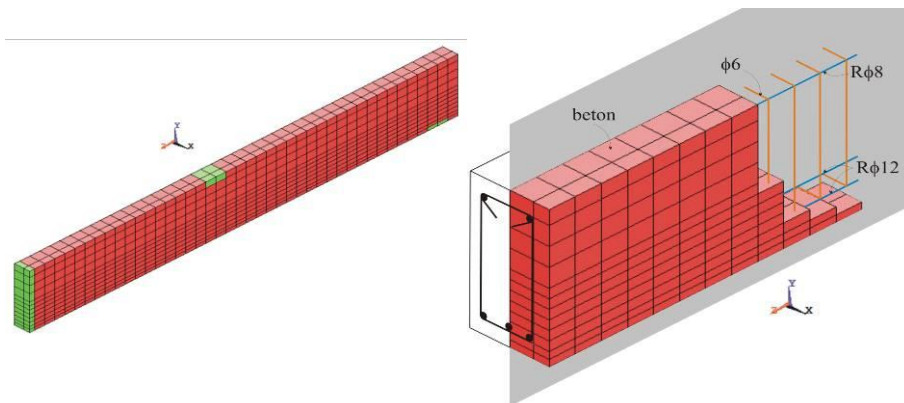
Slika 15. a) Pojednostavljena zavisnost napona i dilatacija betona pri jednoosijalnom zatezanju i pritisku, b) Multilinearni elastoplastični model materijala

Za ponašanje čelika usvojen je elastoplastični materijalni model baziran na bilinearnom elastoplastičnom materijalu sa izotropnim ojačanjem i fon Mizesovim uslovom tečenja, Slika 16.

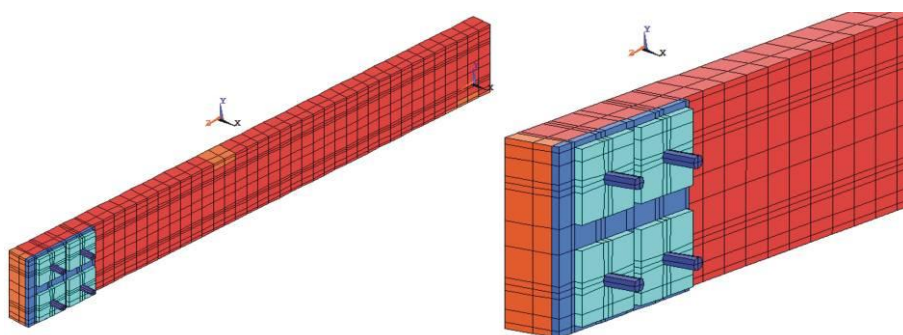


Slika 16. Bilinearni elastoplastični model čelika (armature)

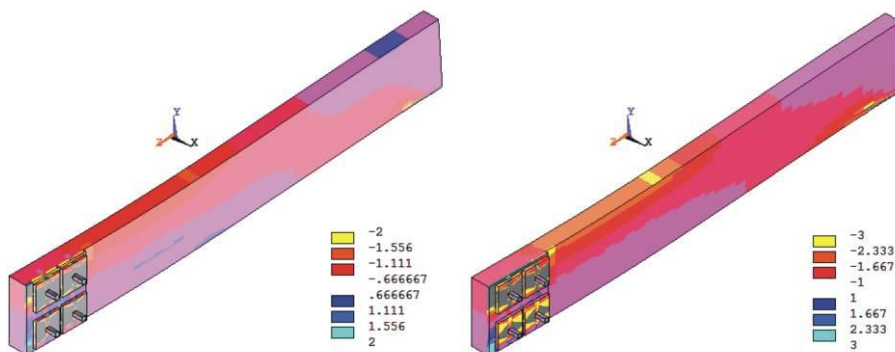
Izrada trodimenzionalnih numeričkih modela grede je podrazumevala formiranje modela, uz pomoć konačnih elemenata, koji je geometrijski identičan stvarnoj gredi. Slike 17-22 prikazuju izgled gotovih modela.



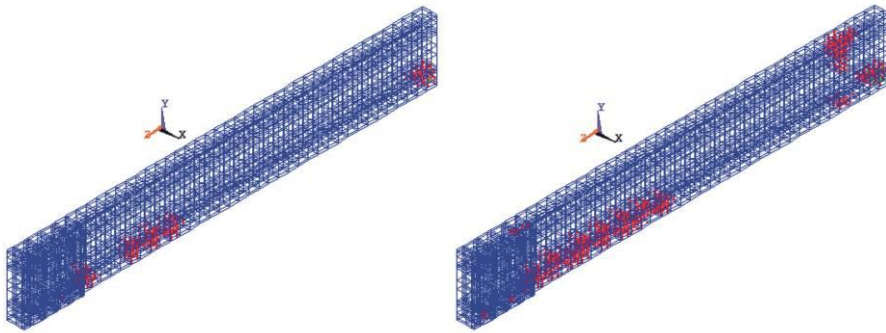
Slika 17. Izometrijski prikaz polovine AB nosača i detalj sa naznakama karakteristika poprečnog preseka



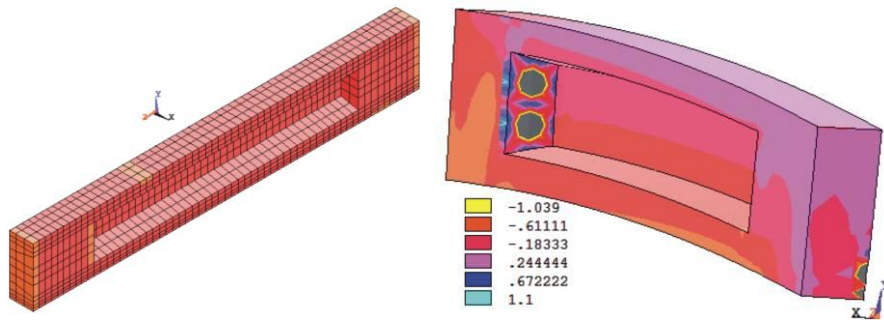
Slika 18. Izometrijski prikaz jedne polovine spojene AB grede i detalj spoja.



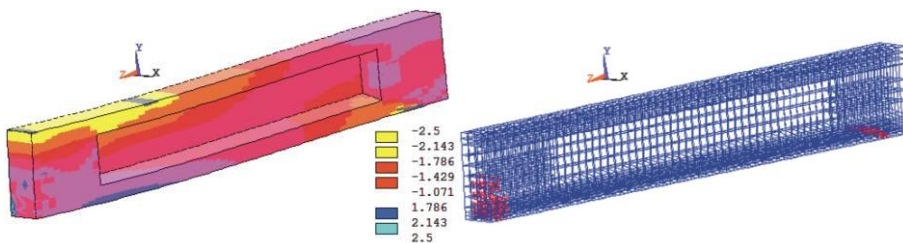
Slika 19. Normalni naponi u AB gredi usled sile $P=30 \text{ kN}$ i $P_{max}=46.97 \text{ kN}$



Slika 20. Prikaz pojave prslina na AB gredi usled sile $P=30\text{ kN}$ i $P_{\max}=46.97\text{ kN}$



Slika 21. Izometrija numeričkog modela polovine PB grede i slika normalnih napona sa položajem visokovrednih zavrtnjeva



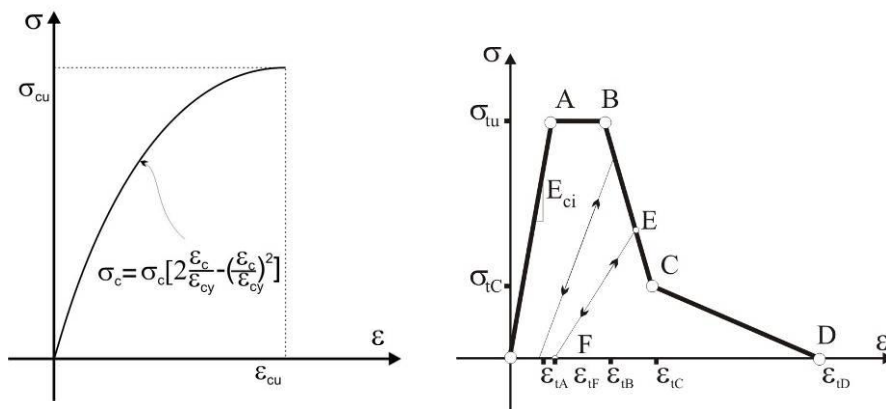
Slika 22. Slika normalnih napona i odgovarajuća slika prslina na PB gredi usled dejstva maksimalnog opterećenja pri sili od $P=220\text{ kN}$

MODELIRANJE NOSAČA U RAVNI

Numerička analiza PB nosača u ravni je sprovedena na programskom paketu „ConcreteMac“. Autor programa je dr Nebojša Ojdrović [3]. U okviru ovog rada, program je prikazan samo informativno i to u onom delu koji je od značaja za analizirani nosač.

Za nelinearnu analizu betonskih konstrukcija programski se uzimaju u obzir sledeće nelinearnosti: formiranje prslina u zategnutoj zoni preseka, sadejstvo zategnutog betona između prslina, nelinearna veza napona i deformacija za čelični deo preseka (zatezanje i pritisak) i za beton (pritisak).

Veza napona i deformacija za pritisnuti beton je aproksimirana Hognestadovom jednačinom, Slika 23.a), dok je ta veza za zategnuti beton modelirana na originalan način, Slika 23.b), predložen od strane prof. Bransona i dr Ojdrovića [4].

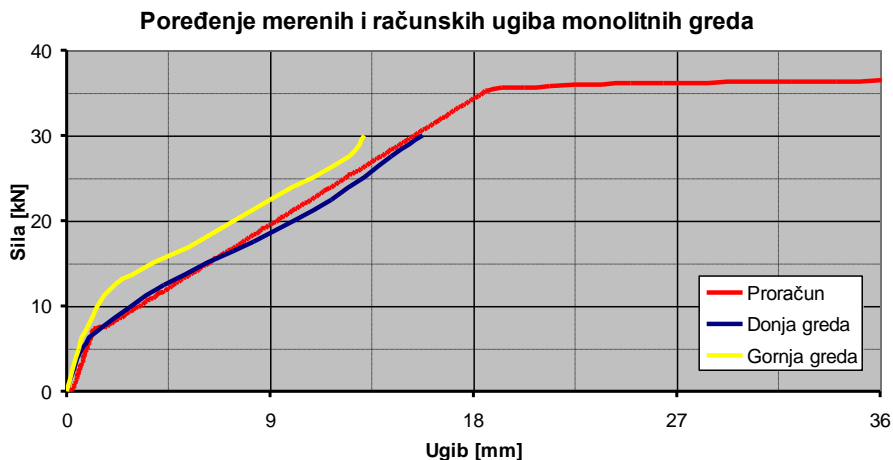


Slika 23. Materijalni modeli: a) Veza σ - ϵ za pritisnuti betona - Hognestadova jednačina, b) σ - ϵ dijagram betona pri zatezanju [36]

Veza napona i deformacija mekog čelika i čelika za prednaprezanje je aproksimirana bilinearnim dijagramom čiji je opšti oblik prikazan na Slici 16, sa adekvatnim karakterističnim vrednostima napona i dilatacija.

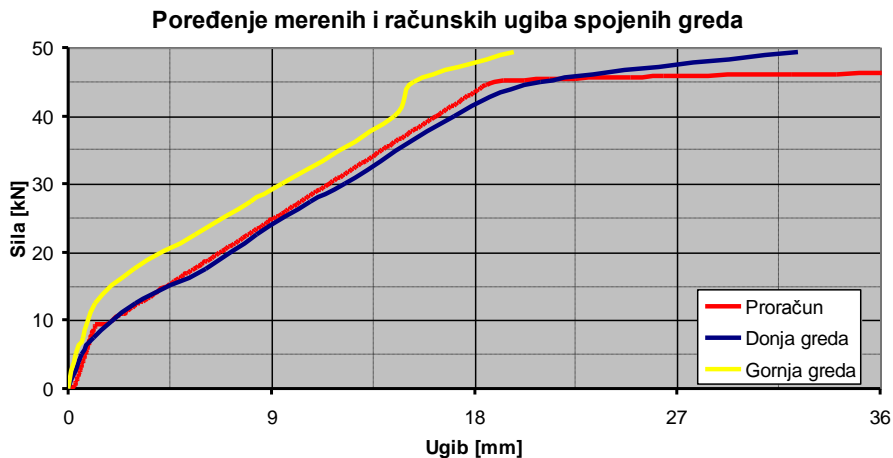
POREĐENJE REZULTATA EKSPERIMENTALNE I NUMERIČKE ANALIZE

Ocena uspešnosti numeričkih simulacija je vršena na osnovu usporedbe rezultata tih simulacija sa rezultatima merenja na odgovarajućim nosačima. Ugib sredine nosača tokom nanošenja opterećenja je odabran kao osnovni parametar koji pokazuje koliko verno numerička simulacija može da predvidi ponašanje nosača koji su bili tema ovog rada.



Slika 24. Uporedni prikaz računskog i merenih dijagrama „sila/ugib“ za monolitne armiranobetonske grede

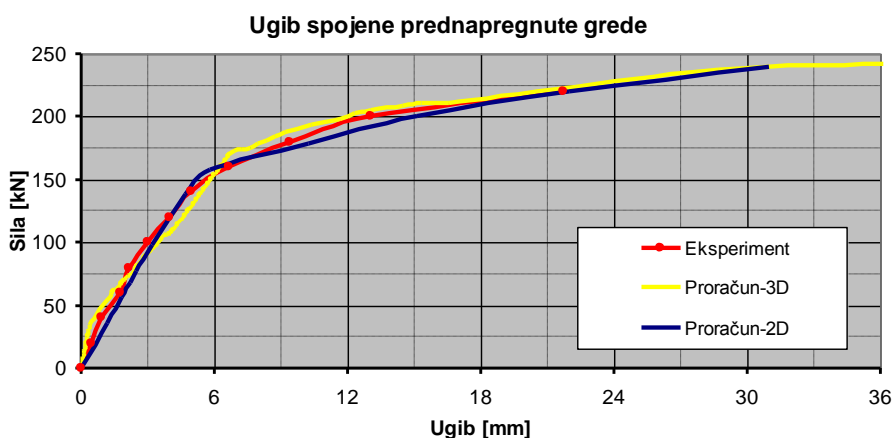
Na Slici 24 je dat uporedni prikaz ugiba sredine monolitnih armirano betonskih greda koje su obrađivane u ovom radu. U numeričkoj simulaciji greda je prvo bila opterećena sopstvenom težinom, a potom i koncentrisanim silama u istom smeru. U skladu sa tim, ovi rezultati su uporedivi sa ugibima koji su tokom eksperimenta izmereni na donjoj gredi. Već se na prvi pogled može videti da postoji veoma dobra saglasnost između numeričkih i merenih vrednosti. Obe grede se ponašaju praktično na isti način u fazama pre i posle pojave prve prsline. U samom trenutku pojave prsline, kod numeričkih rezultata postoji deo dijagrama koji je u veoma kratkom vremenskom intervalu horizontalan, odnosno pokazuje prirast pomeranja bez prirasta sile. Ovo predstavlja fazu u kojoj dolazi do promene poprečnog preseka i nagle preraspodele sila sa većeg na manji presek. Kako se radi o kratkotrajnoj pojavi nije ju bilo moguće zabeležiti mehaničkim mernim instrumentima tokom eksperimenta. U numeričkoj simulaciji opterećivanje ovih greda je sprovedeno do loma greda. Proračun je pokazao da bi došlo do loma greda pri velični koncentrisanih sila od 37.10 kN. Ovaj podatak nije ispitivan tokom eksperimenata jer je, zbog budućih ispitivanja, opterećivanje greda obustavljeno neposredno pre potpunog sloma. Saglasnost rezultata proračuna i eksperimenta pokazuju da je izvesno da bi i eskperiment pokazao sličnu vrednost sile loma. Ova tvrdnja je potkrepljena poređenjem rezultata kako spojenih, tako i prenapregnute grede.



Slika 25. Uporedni prikaz računskog i merenih dijagrama sila/ugib za spojene armiranobetonske grede

Slika 25 predstavlja poređenje eksperimentalno i računski dobijenih ugiba spojenih armiranobetonskih greda. Kao i kod monolitnih greda, zbog načina opterećivanja, uporedivi su mereni ugibi donje opritne grede i numerički dobijeni ugibi. I u ovom slučaju dobijena je veoma dobra saglasnost eksperimenta i numeričke simulacije. Rezultati se praktično poklapaju do momenta potpunog loma grede. Računski dobijena maksimalna sila je iznosila 46.99 kN, dok je tokom eksperimenta lom proglašen pri vrednosti sile od 49.35 kN. Procentualno, proračun je pokazao 4.79 % manju silu loma. Nakon dostizanja sile loma, razlike u dijagramu su nešto izraženije. Ovo može da se objasni oblikom veze napona i deformacija armature. Nakon dostizanja granice velikih izduženja u armaturi, obe konstrukcije (numerički model i opritna greda) ponašaju se u skladu sa oblikom svoje veze napona i deformacija. U nedostatku eksperimentalno utvrđene veze napona i deformacija ugrađene armature usvojena je mala vrednost modula plastičnosti, pa je zato i krajnja sila loma nešto manja. Uključivanjem stvarne veze σ - ϵ za armaturu i ovaj deo proračuna bi bio veran eksperimentu.

Saglasnost rezultata numeričkih simulacija sa eksperimentom je vidljiva i kod spojene prednapregnute grede. Pored merenih, Slika 26 predstavlja i ugibe dobijene proračunom na ravanskom i na prostornom modelu grede. Veoma dobra saglasnost numeričkih i eksperimentalnih ugiba važi za sve faze opterećenja konstrukcije. Prema proračunu na trodimenzionalnom modelu ukupna sila pri kojoj dolazi do loma nosača je procenjena na 241.97 kN. Proračun na ravanskom modelu ovu silu predviđa za praktično istu vrednost, odnosno 240 kN. Ove vrednosti, kao i oblici sva tri dijagrama na Slici 196 ukazuju na ispravnost odluke da se, zbog opasnosti od naglog loma, u eksperimentu obustavi dalje opterećivanje nosača pri sili od 220 kN.



Slika 26. Uporedni prikaz računskog i merenih dijagrama sila/ugib za spojene prednapregnute grede

6. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada prikazana su eksperimentalna i numerička istraživanja mogućnosti spajanja armiranobetonskih i prednapregnutih betonskih konstrukcija primenom visokovrednih zavrtnjeva.

Istraživanja su podeljena na dve osnovne grupe: eksperimentalno ispitivanje i numerička analiza.

Izdvojena su tri osnovna faktora koji su od presudnog značaja za efikasnost veze montažnih betonskih nosača koja je izvedena primenom visokovrednih prednapregnutih zavrtnjeva: kvalitet zavrtnja, veličina sile u zavrtnju i koeficijent trenja između tarnih površina u spoju.

Kvalitet zavrtnja je predmet postojećih propisa, te može da bude tretiran kao poznat i pouzdan parametar veze. Sila pritezanja zavrtnjeva je ključni faktor spoja i nju je moguće aplicirati sa potrebnom preciznošću. Pad sile u zavrtnjima, pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja tokom ispitivanja, kao posledica proklizavanja spoja je

neznatan osim u slučajevima kada je došlo do potpunog sloma uzorka. Uticaj reoloških osobina betona na trajnu silu u zavrtnjima nije posebno analiziran u ovom radu i neophodna su dalja istraživanja ove problematike. Efikasnost spojeva koji se predlažu u ovom radu je u direktnoj vezi sa koeficijentom trenja i adhezijom među površinama spoja. Koeficijent trenja zavisi od načina izvođenja spoja, odnosno od karakteristika slojeva i tarnih površina koje se nalaze u spoju. Bazna eksperimentalna ispitivanja u sklopu ovog rada su podrazumevala opterećivanje uzoraka tako da se u njima izazove smicanje tarnog spoja i njegovo proklizavanje. Kako je proklizavanje ovih spojeva rezultat savladavanja celokupne sile trenja i adhezije u tarnim spojevima, koeficijent trenja je definisan kao odnos ukupnog smičućeg i normalnog napona u trenutku proklizavanja spoja. Kod uzoraka formiranih primenom epoksida je utvrđeno koliki je deo sile koji se odupire proklizavanju posledica trenja, a koliki posledica adhezije. Spoj na uzorcima bez visokovrednih zavrtnjeva je otkazao kada je sila bila priližno 30% od sile koja se javila na istim uzorcima sa visokovrednim zavrtnjima, pri čemu je lom bez izuzetka nastupio po betonu. Ovaj eksperiment je pokazao da je adhezija između betona i čelika, primenom epoksidne smole, veća od smičuće čvrstoće betona. Najmanji utvrđeni koeficijent trenja iznosi 0.593, odnosno istog je reda veličine kao i najveće vrednosti kod spojeva u čeličnim konstrukcijama. U spojevima tipa „čelik-epoksid-beton” je utvrđena najveća vrednost koeficijenta trenja i ona iznosi 1.811. Otkazivanje, odnosno lom ove veze je određen preko karakteristika betona kao osnovnog materijala koji se spaja. Formalno govoreći lom same veze (spoja) nije ni postojao. Ovo upućuje na to da spoj neće izazvati smanjenje nosivosti kod nosača spojenih na ovakav način, te da se sa sigurnošću može računati na pouzdanost ovakvog načina spajanja montažnih armiranobetonkih nosača. U tom smislu, ovo je snažan argument u prilog primene epoksidnog lepka u ovakvim spojevima kad god je to moguće.

Ispitvanjem armiranobetonkih greda spojenih primenom čeličnih podvezica i visokovrednih zavrtnjeva do loma je dokazano da je ovakav način spajanja moguć i da su nosači dobijeni tim spajanjem pouzdani. Usporedna analiza merenih rezultata monolitnih i spojenih greda je pokazala da su krutosti spojenih greda veće od krutosti repernih monolitnih greda. Ugibi monolitnih greda pri opterećenju koje je blisko opterećenju loma su u proseku za 25 % veći nego ugibi spojenih greda.

Tokom ispitivanja greda do loma ni u jednoj fazi nije registrovano nikakvo relativno pomeranje između čeličnih podvezica i betona u spoju. Takođe, u zoni podvezica nisu registrovane prsline u betonu. Analiza napona i deformacija elemenata u spoju ukazuje na formiranje potpuno spregnutog preseka "čelik-beton" u zoni spoja, što je u saglasnosti sa manjim deformacijama spojenih greda. Dokaz ovoga se vidi u veličini napona u sredini čelične podvezice, na mestu gde je prekid betonskih greda ispunjen grubim epoksidnim malterom, koji pokazuju da podvezica prima 51% od ukupnog momenta savijanja tog preseka. Ovi rezultati ukazuju na to da je moguće izvesti armiranobetonke grede sa spojem, pri čemu su usvojeni elementi u spoju manjih dimenzija.

Efikasnost spoja je potvrđena i ispitivanjem prednapregnutih greda spojenih dugim visokovrednih zavrtnjima postavljenim paralelno sa podužnom osom nosača. Sve vreme eksperimenta nosač se ponašao u potpunosti prema očekivanjima i dokazano je da je koeficijent sigurnosti u odnosu na lom ovako spojenog nosača veći od $\eta=3.67$, uz napomenu da nosač čak ni tada nije doživeo potpuni slom. Pri maksimalnom nanesenom

opterećenju odnos izmerenog ugiba na sredini nosača i raspona nosača je 1/276. Praćenje sila u visokovrednim zavrtnjima je pokazalo prirast od 5 % za uslove radnog opterećenja, dok je za tri puta veće opterećenje prirast sile iznosio 29 %.

Numerička analiza ispitivanih nosača je u potpunosti potvrdila sve eksperimentalno dobijene rezultate. Poređenje eksperimenta i numeričke simulacije je pokazalo da između rezultata dobijenih na jedan ili na drugi način praktično nema razlike. Poređenjem dva načina modeliranja nosača, ravanski i prostorni, dolazi se do zaključka da oba daju izuzetno dobra predviđanja u slučaju analiziranih nosača. Međusobne razlike ovih proračuna se ogledaju u obimnosti rezultata koje svaki od njih daje. U slučaju prostornog modela rezultati su takve prirode da se čak i u detaljima mogu porediti sa eksperimentom, dok su rezultati ravanskog modela manje opsežni. Sa druge strane prostorni model je neuporedivo zahtevniji u smislu utroška vremena i računarske opreme. Na osnovu ovoga može da se zaključi da je prostorni model pogodniji za kompleksnija naučna istraživanja, dok je ravanski model pogodniji za praktičnu primenu.

Kao krajnji zaključak ovog rada može da se navede da je ovo eksperimentalno-teorijsko istraživanje povećalo stepen poverenja u ovako spojene konstrukcije i u visokovredne zavrtnje kao sredstva spajanja betonskih nosača i time dalo podršku nastavku istraživanja u tom pravcu.

LITERATURA

- [1] Kukaras, D.: Eksperimentalno-teorijska analiza i računsko modeliranje ponašanja montažnih nosača spojenih visokovrednim zavrtnjima, GF Subotica, Subotica 2008.
- [2] Vlajić, Lj., "Ponašanje spojeva sa visokovrednim zavrtnjima pri eksploatacionom i graničnom opterećenju", Građevinski fakultet, Univerzitet u Nišu, Niš, 1993.
- [3] Ojdrović, N., „Unified procedure for the nonlinear finite element analysis of concrete structure based on a new model for tension stiffening“, doktorska disertacija, University of Iowa, Iowa, 1988.
- [4] Branson, D.E., Ojdrović, N., „Novi model za sadejstvo zategnutog dela betonskog preseka“, Simpozijum SDGKJ, Dubrovnik, 1989.
- [5] Bangash, M. Y. H., Concrete and Concrete Structures: Numerical Modeling and Applications, Elsevier Science Publishers Ltd., London, England, 1989.
- [6] Vlajić, Lj., Kukaras, D., „Koeficijenti trenja kod betonskih konstrukcija spojenih visokovrednim zavrtnjima“, 12. Kongres Jugoslovenskog društva građevinskih konstruktera, Vrnjačka Banja 2006.
- [7] Branković, Z., Diplomski rad, Građevinski fakultet Subotica, 1992
- [8] Dautović, I., Rukopisi - eksperimentalni rad, Građevinski fakultet Subotica, 1995
- [9] Kašić, R., Diplomski rad, Građevinski fakultet Subotica, 2004
- [10] Pakvor, A., Vlajić, Lj., Ojdrović, N., Ostojić, D., „Eksperimentalna istraživanja pri projektovanju betonskih konstrukcija“, Monografija „Savremene betonske konstrukcije“, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1994.

JOINTS IN RC AND PRESTRESSED CONCRETE BEAMS CONSTRUCTED WITH PRESTRESSED BOLTS

Summary: *Research shown in this paper represents a part of the doctoral thesis made by the first author while the second author was the mentor during preparation of this thesis. Research includes experimental and numerical analysis of the behavior of reinforced concrete (RC) and prestressed concrete beams whose joints were constructed with prestressed bolts positioned perpendicular and parallel to the longitudinal axes of the beam under the influence of the trial loads until failure. The aim of this research was to acquire a better insight into behavior of beams joined with prestressed bolts.*

Key words: *Prestressed bolts, RC and prestressed concrete beams, joints, friction coefficient, prestressing force, nonlinear analysis of concrete structures*