

# NUMERIČKA SIMULACIJA PONAŠANJA AB RAMA SA MONTAŽNOM VEZOM RIGLE I STUBA USLED DINAMIČKOG OPTEREĆENJA

Danijel Kukaras<sup>1</sup>,  
Ljubomir Vlajić<sup>2</sup>

UDK:

**Rezime:** Rad prikazuje numeričko istraživanje ponašanja AB rama pri dejstvu horizontalnog opterećenja. Ponašanje konstrukcije se analizira za dve vrste horizontalnog opterećenja: linearno rastućeg do sloma konstrukcije i ciklično promjenjivog. Posebna pažnja je posvećena vezi stuba i grede pri čemu je ona u jednoj varijanti klasična-monolitna a u drugoj je montažna. Montažna veza pretstavlja spoj izveden primenom čeličnih podvezica i visokovrednih zavrtnjeva. Prikazano istraživanje je sprovedeno kao osnov za planiranje budućeg, eksperimentalnog, istraživanja u pravcu primene opisane montažne veze za poboljšanje ponašanja ramovskih AB konstrukcija pri dejstvu seizmičkih opterećenja i/ili kao metode za povećanje seizmičke otpornosti postojećih konstrukcija.

**Ključne reči:** AB ram, dinamičko opterećenje, montažni spoj, visokovredni zavrtnji, koeficijent trenja, sila pritezanja, nelinearna analiza betonskih konstrukcija.

## 1. UVOD

Numerička istraživanja prikazana u ovom radu predstavljaju deo doktorske disertacije prvog autora dok je drugi autor bio mentor pri izradi iste [1]. U radu se analizira mogućnost primene montažnog spoja AB elemenata rama izvedenog primenom čeličnih podvezica i visokovrednih zavrtnjeva na poboljšanje ponašanja AB rama pod dejstvom seizmičkog opterećenja. Rezultati dobijeni u ovom radu kao i ranija istraživanja autora pokazuju da je primena ovakvog spoja nosećih elemenata betonskih konstrukcija naročito primenjiva kod seizmičkog ojačanja postojećih konstrukcija. Veći broj istraživanja i rekonstrukcija objekata koja su u poslednje vreme sprovedena kod nas obuhvataju ojačanja AB konstrukcija, naročito stubova, za dejstva vertikalnih opterećenja [2], [6]. Primena predloženog načina spajanja elemenata je kompatibilno i upotpunjuje se sa navedenim ojačanjima AB stubova.

Prikazana dinamička analiza obuhvata deo rezultata uporedne numeričke simulacije dva armiranobetonska rama. Simulacija je sprovedena tako da je uzeto u obzir nelinearno ponašanje svih materijala u sklopu konstrukcije pri čemu je posebna pažnja posvećena nelinearnom ponašanju betona. Uzročnici nelinearnosti koji su obuhvaćeni ovim

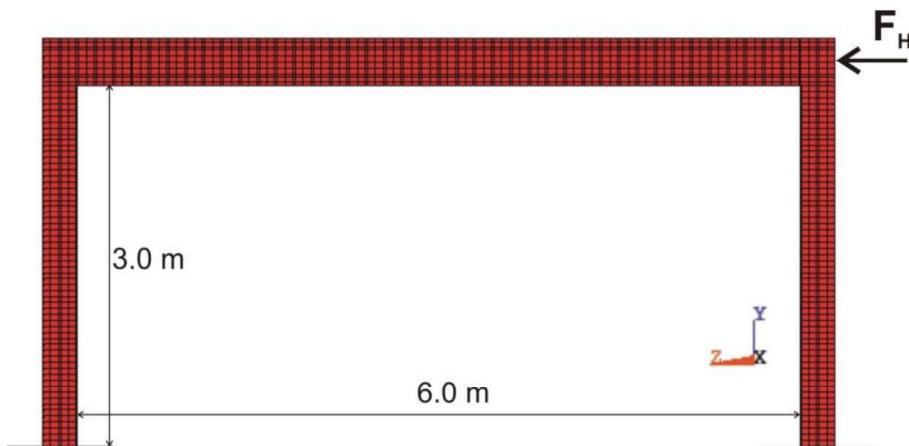
<sup>1</sup> Doc. dr Danijel Kukaras, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel: 554-300, e -mail: dkukaras@gmail.com

<sup>2</sup> Prof. dr Ljubomir Vlajić, dipl. inž. građ., Saobraćajni Institut CIP, Beograd

proračunima su: prsline i drobljenje betona, plastične deformacije betona i čelika, kao i efekti neravnina na unutrašnjosti prsline. 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. Takođe, kod simulacije rama sa montažnom vezom, uzeta je u obzir i veličina sile pritezanja, odnosno trenje na spoju čelične podvezice i AB konstrukcije. Detaljan prikaz teoretskih osnova ove numeričke simulacije je dat u literaturi [1], [3]. Međusobna razlika analiziranih ramova se ogleda u tome što je jedan oblikovan kao monolitan, dok je kod drugog spoj rigle i stuba izveden sa čeličnim podvezicama i upravno postavljenim visokovrednim prednapregnutim zavrtnjima. Cilj ove analize je da se, kroz numerički eksperiment, ispita mogućnost korišćenja ovakvog spoja kao elementa za disipaciju energije pomeranja konstrukcije. Analiza je inspirisana oblikom i načinom fukcionisanja predloženog spoja. Prema svom obliku ovaj spoj je u osnovi veoma sličan konstrukciji friкционih dampera. Danas su ovakvi damperi uglavnom izvedeni u potpunosti od čelika i koriste se za poboljšanje ponašanja konstrukcija pod dejstvom zemljotresa. Prednost ovakvih dampera se ogleda u činjenici da povećavaju sposobnost konstrukcije za disipaciju energije, a da pri tom ne menjaju značajno (10-20%) prirodne periode oscilovanja konstrukcije [4]. Ovi elementi se u konstrukciju najčešće ugrađuju kao dijagonalni štapovi od čeličnih profila sa frikcionim damperom na jednom kraju.

## 2. NUMERIČKI MODEL

Za potrebe ove dinamičke analize odabran je ram sa karakteristikama kakve se relativno često mogu naći u našoj visokogradnji, Slika 1.

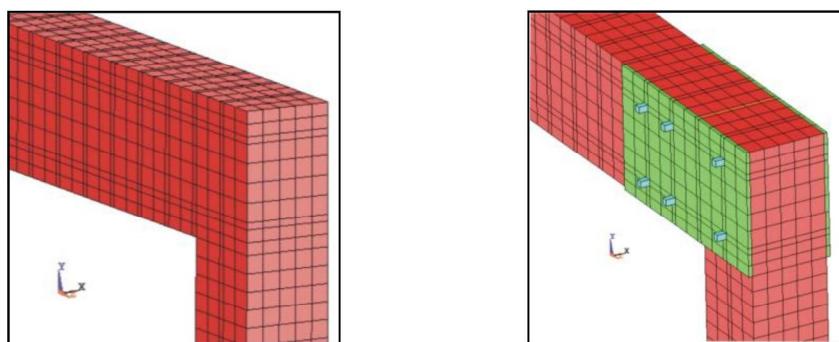


Slika 1. Numerički model

Poprečni preseci stubova su  $25 \times 25\text{cm}$ , dok je greda dimenzija  $25 \times 40\text{cm}$ . Pretpostavljeno je da je ram izveden od betona kvaliteta MB45, da je armatura stuba RA 400/500, te da je koeficijent armiranja stubova  $\mu=0.8\%$ , a grede  $\mu=0.5\%$  u obe zone. Granični momenti nosivosti ova dva preseka, prema PBAB '87, su sledeći: granični moment loma stuba je

$M_u=45.99$  kNm (uzimajući u obzir procenjenu silu pritiska od 100 kN) a granični moment loma grede je  $M_u=87.91$  kNm. Oba rama imaju iste karakteristike u odnosu na betonski deo konstrukcije, s tim što je spoj rigle i stuba kod spojenog rama izведен sa dve čelične podvezice i šest visokovrednih zavrtnjeva, Slika 2.

Postupak modeliranja geometrije i materijala, kao i sami proračuni, sprovedeni su na sličan način kako je to opisano u [1], [3].



Slika 2. Detalj spoja stuba i rigle kod monolitnog i kod spojenog rama

### 3. OPTEREĆENJE

Postupak proračuna je osmišljen tako da se monolitni ram optereti rastućom horizontalnom silom  $F_H$  kako bi se odredila maksimalna nosivost rama za takvo opterećenje. Položaj horizontalne sile  $F_H$  je dat na Slici 1, a funkcija prirasta sile je data na Slici 3.

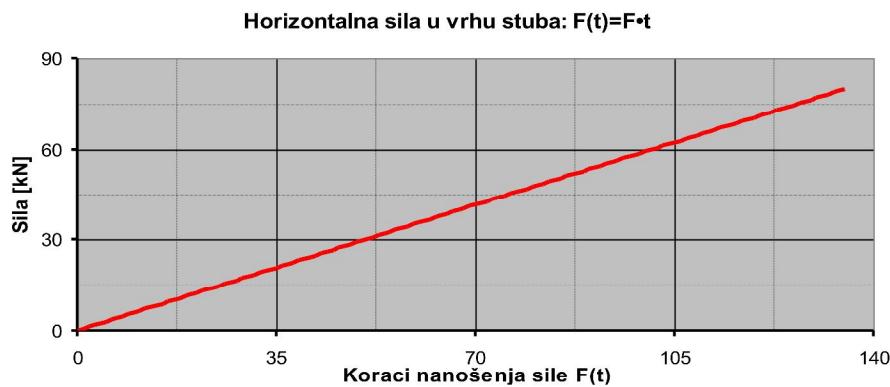
Nakon utvrđivanja maksimalne sile nosivosti ( $F_{H,max}$ ), spoj rigle i stuba je modeliran tako da dođe do njegovog proklizavanja ukoliko horizontalno opterećenje premaši vrednost sile  $F_{H,max}$  podeljene sa koeficijentom 1.5, koliko iznosi koeficijent sigurnosti za seizmička opterećenja. Podaci na osnovu kojih je oblikovan montažni spoj, kao što su koeficijent trenja i sila pritezanja visokovrednih zavrtnjeva su detaljno analizirani i prikazani u [1] i [5].

Ram koji je oblikovan sa takvim karakteristikama spoja je zatim opterećen sa sinusoidnim opterećenjem  $F_H(t)=F_0 \cdot \sin(\omega t)$ , gde je  $F_0=1.125 \cdot (F_{H,max}/1.5)$ . Odnosno, odabrana je takva funkcija opterećenja  $F_H(t)$  da su njeni maksimumi za 12.5 % veći od sile pri kojoj dolazi do proklizavanja spoja, Slika 4.

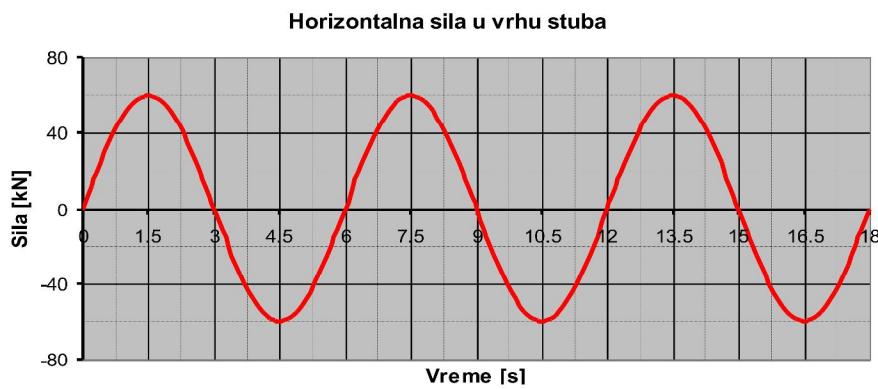
Prema rezultatima proračuna, maksimalna nosivost rama pri dejstvu koncentrisane horizontalne sile u vrhu stuba iznosi približno 80 kN.

Na osnovu toga se usvaja da projektovana sila pri kojoj dolazi do proklizavanja iznosi 53.33 (80/1.5), a da se aplicira sinusoidna sila  $F_H(t)=F_0 \cdot \sin(\omega t)$  gde je  $F_0=60$  kN. Na Slici 5 je data zavisnost sile  $F_H(t)$  i horizontalnog pomeranja vrha stuba.

Radi poređenja, na slici je data ista zavisnost za monolitni ram. Analiza oblika i površina koje zahvataju ove dve krive pokazuje da je sposobnost dissipacije energije spojenog rama praktično udvostručena a da maksimalna pomeranja nisu značajno povećana.

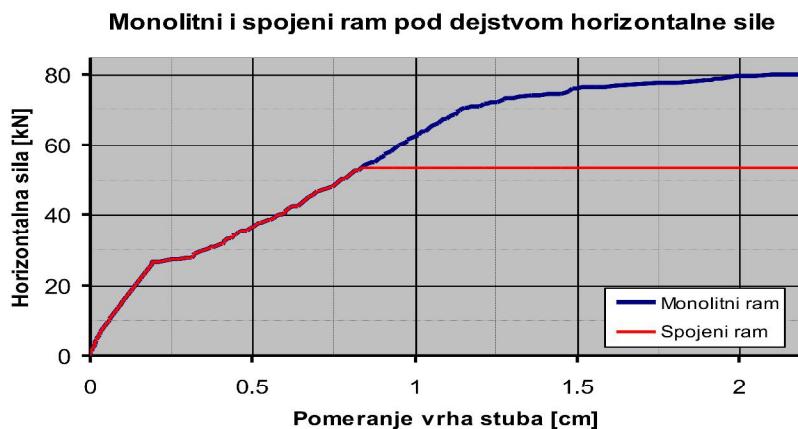


Slika 3. Funkcija povećanja horizontalne sile pri proračunu nosivosti AB rama

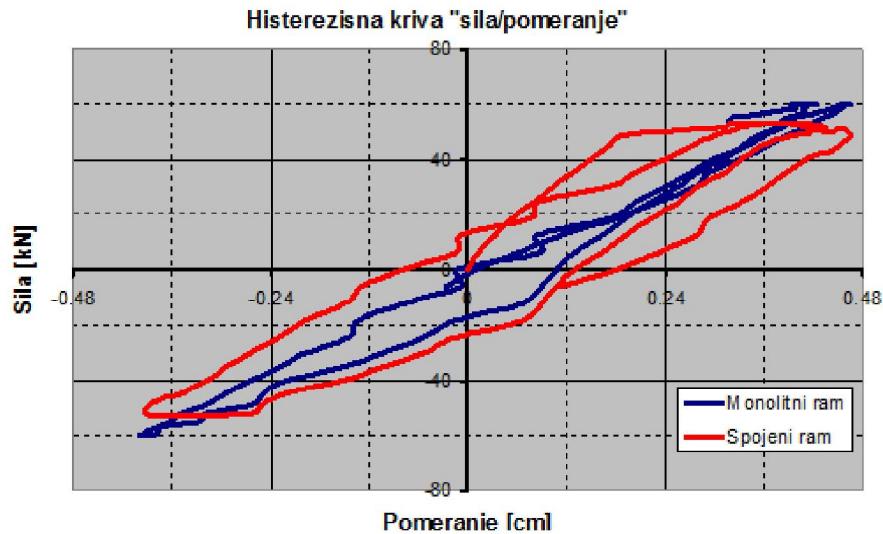


Slika 4. Funkcija promene veličine horizontalne sile  $F_H(t)=F_0 \sin(\omega t)$

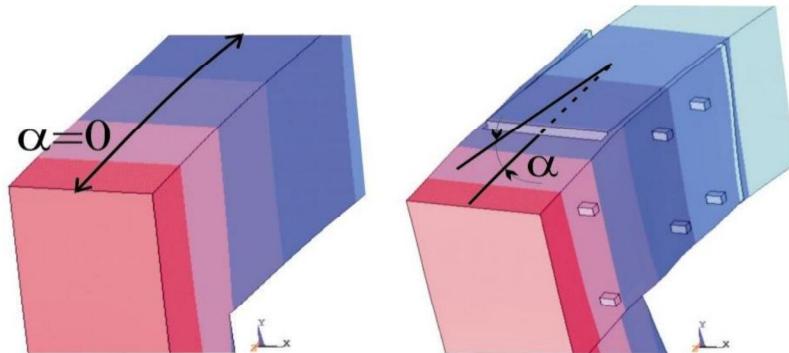
#### 4. REZULTATI PRORAČUNA



Slika 5. Dijagram zavisnosti pomeranja vrha stuba i horizontalne sile  $F_H$  za monolitni i za spojeni ram



Slika 5. Zavisnost sile  $F_H(t)$  i horizontalnog pomeranja vrha stuba



Slika 6. Prikaz detalja spoja pod opterećenjem za monolitni ram i za ram sa kontrolisanim proklizavanjem

U cilju bolje ilustracije ponašanja analiziranih ramova, na Slici 6 je dat detalj deformisanih oblika spoja ridle i stuba za: monolitni ram i za spojeni ram kod koga je proklizavanje dopušteno u kontrolisanoj meri.

## 5. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada prikazani su rezultati dinamičke analize sprovedene na odabranom AB ramu kod koga je spoj stuba i ridle baziran na primeni spoja sa čeličnim podvezicama i zavrtnjima postavljenim upravno na ravan nosača. Spoj je oblikovan tako da obezbedi proklizavanje pri unapred određenoj sili. Analiza histerezisne krive pomeranja vrha stuba u odnosu na intenzitet horizontalne sile pokazuje da ona zahvata približno dva puta veću površinu nego kriva monolitnog rama istih karakteristika. Na

osnovu ovog može da se zaključi da postoji mogućnost korišćenja ovakvog spoja kao elementa za disipaciju energije pomeranja konstrukcije i predloženi spoj sa visokovrednim zavrtnjima može, uz minimalna prilagođavanja, da doprinese poboljšanom ponašanju konstrukcije pod dejstvom zemljotresa. Ovakv način spajanja horizontalnih i vertikalnih elemenata AB rama može da upotpuni ojačanje AB stubova primenom čeličnih cevi i tako obezbedi opšte povećanje otpornosti postojećih AB konstrukcija kako za vertikalne tako i za horizontalne/seizmičke uticaje.

## LITERATURA

- [1] Kukaras, D.: Eksperimentalno – teorijska analiza i računsko modeliranje ponašanja montažnih nosača spojenih visokovrednim zavrtnjima, GF Subotica, **2008**.
- [2] Bešević M., Vlajić, Lj.: Sanacija adaptacija i dogradnja objekta u Nemanjinoj ulici br. 9 u Beogradu, Zbornik radova-DGKS- 13. Kongres, Zlatibor, **2010**.
- [3] Kukaras, D., Vlajić, Lj.: Spajanje AB i PB grednih elemenata sa visokovrednim zavrtnjima, Zbornik radova, Građevinski fakultet Subotica, Subotica, **2008**.
- [4] Chopra, A. K.: Dynamics of Structures: theory and applications to earthquake engineering, Prentice Hall, New Jersey, USA, **2000**.
- [5] Vlajić, Lj., Kukaras, D.: Koeficijenti trenja kod betonskih konstrukcija spojenih visokovrednim zavrtnjima, 12. Kongres DGKS, Vrnjačka Banja **2006**.
- [6] Vlajić, Lj., Bešević, M., Landović, A., Kukaras, D.: Numerička analiza nosivosti pritisnutih spregnutih stubova od armiranog betona, Izgradnja 64 (2010) 9-10/513-520, Beograd, **2010**.

## NUMERICAL SIMULATION OF RC FRAME WITH PREFABRICATED JOINT BETWEEN BEAM AND COLUMN UNDER DYNAMIC LOAD

**Summary:** The paper presents numerical research into behavior of RC frame under horizontal loads. Behavior of the structure was analyzed for two types of horizontal loads: one that is linearly increasing (until structure collapses) and one that is cyclic. Special attention was devoted to the joint between the beam and the column that was constructed either traditionally (cast in place) or as a prefabricated one. Prefabricated joint was designed with steel plates and high strength prestressed bolts. This research was conducted as a basis for planning a future, experimental, analysis of RC structure behavior under seismic loads and/or strengthening method for existing structures with inadequate seismic resistance.

**Key words:** RC frame, dynamic load, prefabricated joint, high strength prestressed bolts, friction coefficient, prestressing force, nonlinear analysis of concrete structures

# **EKSPERIMENTALNO-TEORIJSKA ANALIZA PONAŠANJA STUBOVA SPREGNUTOG PRESEKA OD ČELIKA I BETONA OPTEREĆENIH LOKALNOM SILOM PRITISKA**

Ljubomir Vlajić<sup>1</sup>,  
Aleksandar Landović<sup>2</sup>,  
Danijel Kukaras<sup>3</sup>

UDK:

**Rezime:** Rad sadrži prikaz eksperimentalnog istraživanja sprovedenog na stubovima spregnutog preseka opterećenih lokalnom silom pritiska. Poprečni presek stuba je čelična cev ispunjena betonom, dok je opterećenje u stub unošeno posredno preko čelične pločice. Dimenzije kvadratne pločice su varirane u tri vrednosti, a granična nosivost lokalno opterećenih stubova je upoređivane sa kontrolnim uzorcima koji su bili opterećeni preko celokupne površine poprečnog preseka. U radu je dat prikaz karakterističnih naponsko deformacijskih dijagrama.

**Ključne reči:** Spregnut presek, Cev ispunjena betonom, Lokalno opterećenje, Granična nosivost

## **1. UVOD**

Betonom ispunjene čelične cevi predstavljaju jedan od prvih tipova spregnutih konstrukcija. Stubovi spregnutog preseka pokazuju veoma dobra svojstva kada su u pitanju nosivost, krutost, duktilnost i otpornost na dejstvo požara. Betonom ispunjene čelične cevi, u odnosu na armiranobetonske stubove, pružaju strukturne prednosti zahvaljujući interakciji čelične cevi i betona. Lokalno izbočavanje čelične cevi sprečeno je ispunom od betona, a granična nosivost betona se povećava zahvaljujući efektu poprečnog utezanja koji mu obezbeđuje čelična cev. Formiranje efekta obruča izaziva pojavu biaksijalnog naponskog stanja u čeliku i triaksijalnog stanja napona u betonskom jezgru. Ukoliko opterećenje istovremeno deluje i na čeličnu cev i na betonsko jezgro, pri umerenom nivou opterećenja od  $(0.3 \div 0.5 f_p)$ , može doći do različitog bočnog širenja čelika i betona zbog različitog Poisson-ovog koeficijenta. U tom slučaju čelik će se više poprečno deformisati od betona što može imati za posledicu umanjeni efekat utezanja preseka. Ovaj efekat se može umanjiti načinom prenošenja opterećenja u stub.

<sup>1</sup> Naučni savetnik, prof. dr Ljubomir VLAJIĆ dipl.građ.inž., Saobraćajni institut CIP Beograd, Nemanjina 6/IV, tel. 011/361-8134, vlayoshi@yahoo.com

<sup>2</sup> Asistent mr Aleksandar LANDOVIĆ, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel:024/554-300, ladovic1@yahoo.com

<sup>3</sup> Docent dr Danijel KUKARAS, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel:024/554-300, dkukaras@gmail.com

Stubovi od čeličnih cevi ispunjenih betonom, zbog evidentnih prednosti, poslednjih godina sve više pronalaze primenu u građevinarstvu. Kada se betonom ispunjene čelične cevi koriste kao noseći stubovi kod mostova ili noseći elementi u visokogradnji, oni najčešće, na kontaktu sa drugim konstruktivnim elementima, nisu opterećeni preko čitavog poprečnog preseka, nego se sila u stub unosi preko nekog posrednog elementa, koji ne pokriva celu površinu poprečnog preseka.

Eksperimentalno-modelsko istraživanje prikazano u radu sprovedeno je na stubovima od kružnih čeličnih cevi ispunjenih betonom opterećenih lokalnom silom pritiska.

Ciljevi eksperimentalnog istraživanja bili su određivanje granične nosivosti stuba, u funkciji veličine površine preko koje se opterećenje unosi u stub, kao i registrovanje likalnog i globalnog ponašanja tokom ispitivanja i nakon dostizanja maksimalne eksploatacione nosivosti.

## 2. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Za izradu uzoraka upotrebljene su čelične cevi spoljašnjeg prečnika  $D_o=159mm$ , debljine zida  $t=2mm$  i dužine  $l=850mm$ . Odnos između prečnika i debljine zida cevi  $D_o/t = 79,5$  zadovoljava ograničenja određena evropskim i američkim standardima. Cevi su formirane postupkom hladnog valjanja i zavarivanja niskougljeničnog čeličnog lima. Mehaničke karakteristike čelika određene su eksperimentalnim putem na standardnim epruvetama za ispitivanje tankih limova. Tom prilikom utvrđene su sledeće vrednosti: granica razvlačenja  $\sigma_v=220MPa$ , granica kidanja  $\sigma_u=310MPa$ , modul elastičnosti  $E_s=207.5GPa$ . Cevi su ispunjene betonom u slojevima uz odgovarajuće ugrađivanje. Nakon očvršćavanja betona utvrđeno je poduzno skupljanje betona od oko 1-2mm, tako da je na vrhu stuba bilo potrebno izvršiti pripremu naležućih površina slojem cementnog maltera.

Sveža betonska mešavina spravljena je prema sledećoj recepturi

Cement: Beočin Profi  $575kg/m^3$ ,

Vodocementni faktor:  $W_c=0.45$

Agregat: drobljeni kamen Ljubovija,  $0\div4mm$   $550kg/m^3$ ,  $4\div11mm$   $930kg/m^3$ .

Mehaničke karakteristike očvrstog betona utvrđene su 6 meseci nakon betoniranja, tj. neposredno pred izvođenje samog eksperimenta, kako bi se dobili što tačniji podaci o ugrađenom betonu. Osobine betonskih uzoraka prikazane su u tabeli 1.

*Tabela 1. Mehaničke karakteristike očvrstog betona*

Čvrstoća na pritisak (Kocka $a=15cm$ )	$f_{b,k} [MPa]$	60.0
Čvrstoća na pritisak (Valjak $15\times30cm$ )	$f_{b,c} [MPa]$	48.44
Brzina ultrazvuka	$v [m/s]$	4290
Statički modul elastičnosti	$E_{b,st} [GPa]$	34.0
Dinamički modul elastičnosti	$E_{b,din.} [GPa]$	41.41

Eksperimentalno istraživanje je obuhvatilo ispitivanje 10 uzoraka čeličnih cevi ispunjenih betonom, kružnog poprečnog preseka. Prvu grupu su činili tri kontrolna uzorka stuba koji su bili opterećeni preko cele površine poprečnog preseka (100% od ukupne

površine). Drugu grupu od tri modela činili su uzorci stubova koji su bili opterećeni na 64% površine poprečnog preseka. Treću grupu modela činili su uzorci stubova sa 53% opterećene površine, dok su četvrtu grupu činili dva stubova opterećeni preko 38% od površine poprečnog preseka.

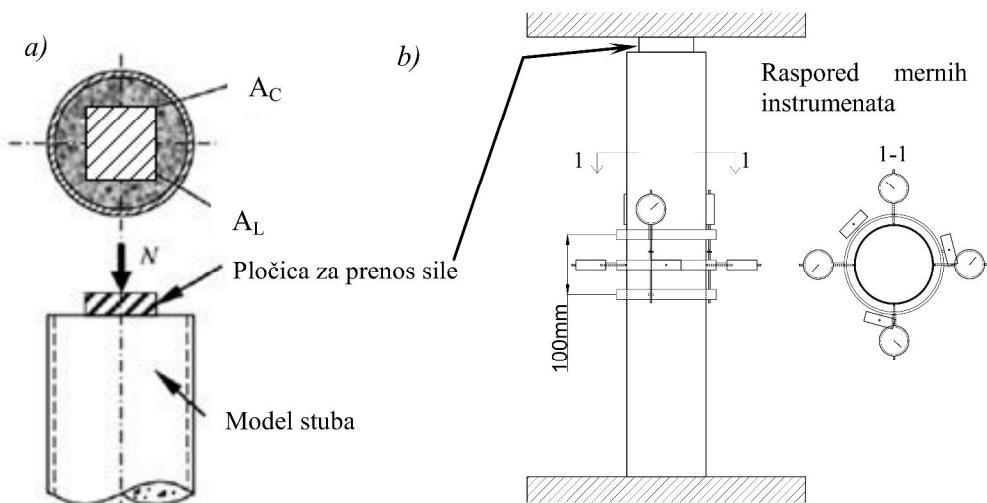
Merna mesta za registrovanje specifičnih deformacija locirana su na sredini dužine stuba i postavljena su simetrično u odnosu na uzdužnu osu. Ispitivanje stubova vršeno je pomoću hidraulične prese nosivosti 2000kN.

Uzorci stubova su postavljeni direktno na krutu čeličnu ploču mašine.

Koncentrisano opterećenje je naneseno na stub preko čelične pločice na gornjoj strani stuba.

Veličina pločice je varirana prema programu ispitivanja kako bi se utvrdili efekti lokalnog unosa opterećenja u stub. Odnos između ukupne površine betona ( $A_c$ ) i lokalno pritisнуте površine ( $A_L$ ), označen je sa  $\beta = A_c / A_L$ . Analizirani su sledeći odnosi površina  $\beta = 1.00$ ,  $\beta = 1.55$ ,  $\beta = 1.88$ ,  $\beta = 2.61$ .

Na slikama 1a i 1b dat je šematski prikaz opterećivanja stubova sa rasporedom mernih instrumenata.



Slika 1: Šematski prikaz opterećivanja stubova sa rasporedom mernih instrumenata

Na ispitivanim stubovima spregnutog poprečnog preseka na čelični plašt postavljen je ukupno sedam mernih instrumenta - ugibomera tačnosti  $p=1/1000mm$  (slika 1b). Tri ugibomera registrovali su vertikalne specifične deformacije, dok su poprečne deformacije registrovane sa četiri dilatomera (ugibomera). Uzorci su opterećivani kontinuirano sve do dostizanja granične nosivosti i loma stuba. Neposredno pred lom izvršeno je skidanje mernih instrumenata. Inkrement nanošenja opterećenja je usvojen kao vrednost jedne desetine procenjene nosivosti uzorka. Jedan interval sile je održavan tokom 2 do 3 min. Izvršeno je pažljivo registrovanje procesa nastanka i razvoja deformacija, maksimalno opterećenje kao i karakterističan oblik loma. Ispitivanje modela stubova izvršeno je u toku jednog dana pri identičnim uslovima.

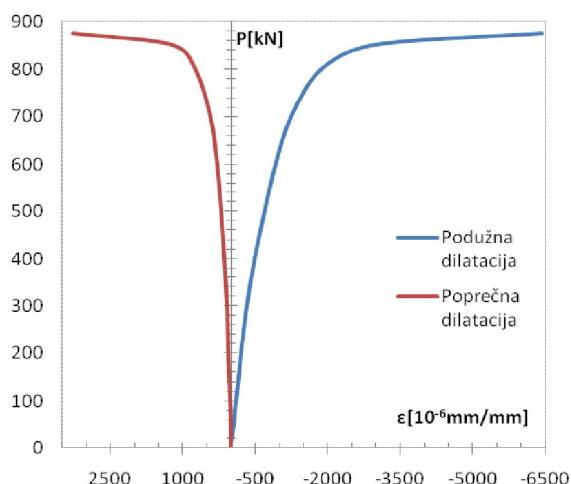
### 3. REZULTATI ISPITIVANJA

#### 3.1. Stubovi kontrolne grupe

Stubovi kontrolne grupe bili su opterećeni direktno, celom površinom poprečnog preseka, tj.  $\beta = A_C/A_L = 1,00$ .



Slika 2. Model kontrolnog stuba neposredno pre ispitivanja



Slika 3. Deformacijski odgovor stuba S1

Analizom prikazanih eksperimentalno dobijenih dijagrama uočava se da je ponašanje ispitovanog modela stuba linearno sve dok se on nalazi u oblasti eksplotacionog opterećenja, odnosno do  $\sim 600\text{ kN}$ . Preko ove granice izražen je nelinearano povećani rast deformacija u odnosu na prirast opterećenja. Ovakvo ponašanje je u skladu sa podacima iz literature, koji se odnose na ponašanje spregnutih stubova koji se sastoje od čelične cevi ispunjene betonom. Prilikom ispitivanja, svi uzorci iz ove grupe pokazali su gotovo identično ponašanje sve do loma.



Slika 4. Model stuba S1 nakon ispitivanja

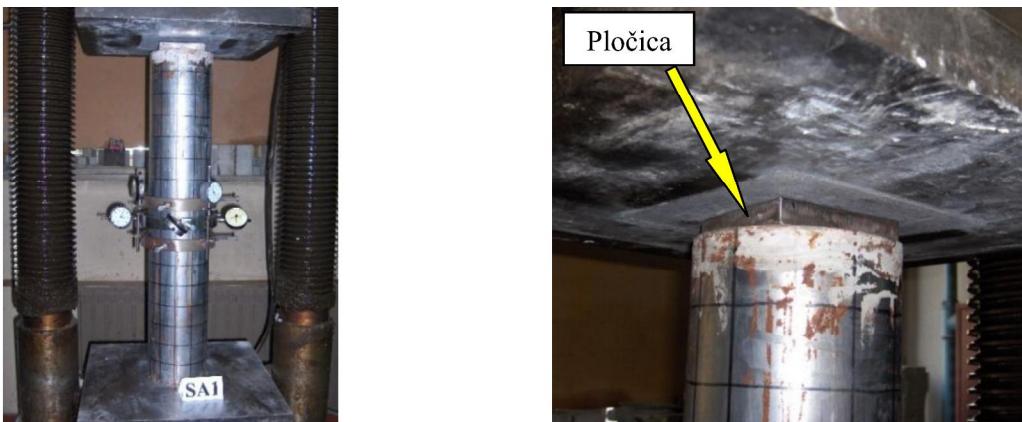
Do otkazivanja nosivosti, odnosno do loma dolazilo je usled lokalnog izbočavanja čeličnog plašta u zoni unosa sile. Nakon dostizanja napona tečenja u čeliku došlo je do velikih deformacija cevi, jer su efekti poprečnog utezanja betona čeličnim omotačem bili smanjeni usled direktnog nanošenja opterećenja na celokupni poprečni presek stuba.

Tabela 2. Srednja vrednost granične nosivosti stuba grupe S, sa odstupanjem  $\pm 10\text{kN}$

Model stuba S	Sila loma $P_u$ [kN]
Srednja vrednost	876

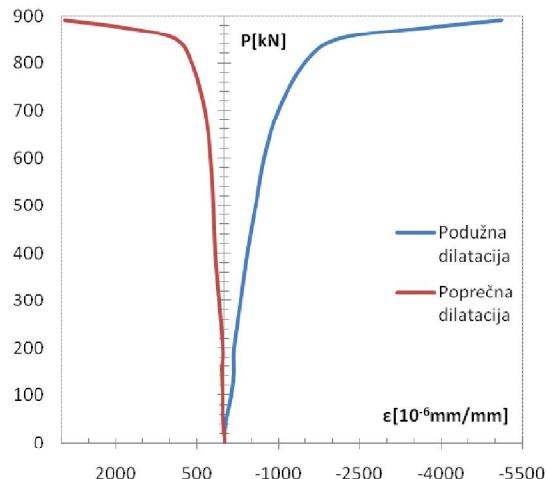
### 3.2. Stubovi grupe SA

Ispitivanje modela stubova grupe SA, prema fazama određenim programom ispitivanja, vršeno je sve do loma. Na taj način omogućeno je upoređenje sa rezultatima ispitivanja ostalih grupa stubova, kako bi se utvrdili efekti promene veličine površine preko koje se unosi sila u stub (veličina pločica). Tokom sprovođenja eksperimenta, kao i kod kontrolnih stubova, izvršeno je registrovanje podataka za svaki inkrement opterećenja, tj. za sve faze ispitivanja.

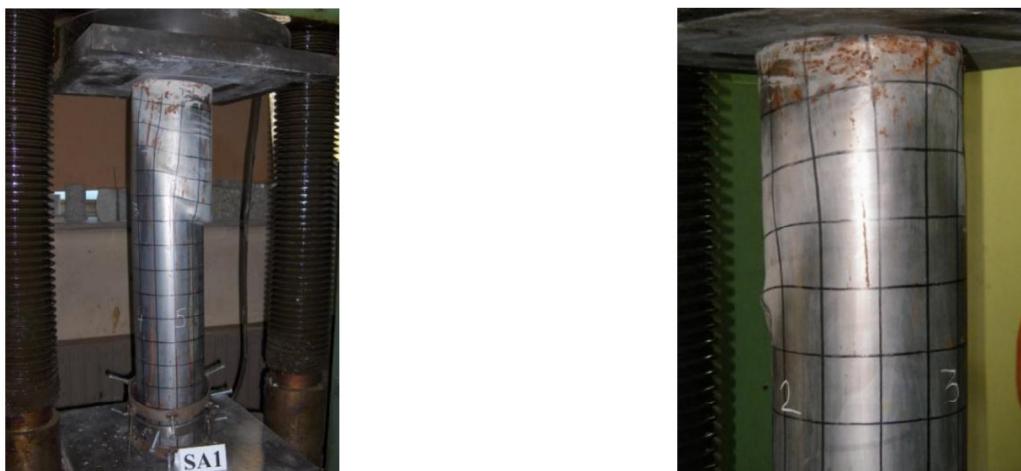


Slika 5. Model stuba grupe SA neposredno pre ispitivanja

Stubovi ove grupe opterećivani su posredno, preko čelične prenosne pločice dimenzija  $110 \times 110 \times 20\text{mm}$ . Ova prenosna pločica pokriva 64% površine poprečnog preseka stuba, tj.  $\beta = A_C/A_L = 1,55$ .



Slika 6. Deformacijski odgovor stuba SA1



Slika 7: Model stuba grupe SA nakon ispitivanja



Slika 8: Vrh stuba neposredno nakon ispitivanja

Tabela 3. Srednja vrednost granične nosivosti stuba grupe SA, sa odstupanjem  $\pm 12kN$

Model stuba SA	Sila loma $P_u$ [kN]
Srednja vrednost	892

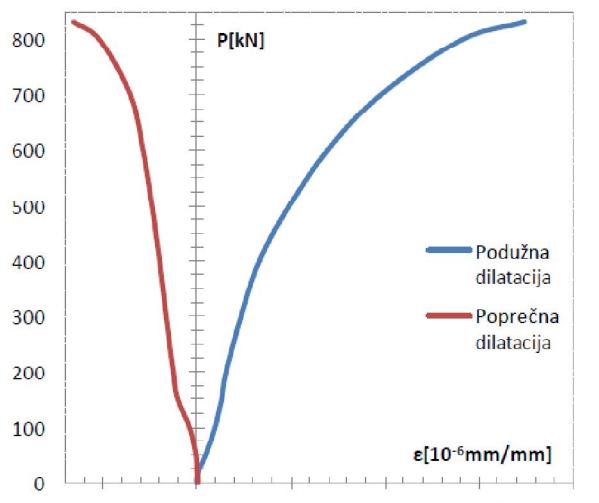
Prilikom ispitivanja svi uzorci stubova ove grupe pokazali su gotovo identično ponašanje sve do loma. Do loma, odnosno do gubitka nosivosti, dolazilo je bez izuzetka usled kombinacije lokalnog izbočavanja i drobljenja betona na mestu unosa sile pri vrhu stuba (slika 7 i 8). Na slici 7-a, odnosno na slici 7-b primetno je proširenje koje je nastalo usled tečenja čelika i drobljenja betonskog jezgra stuba.

Neposredno pred lom ( $P \sim 800kN$ ) došlo je do utiskivanja gornje čelične pločice, koja je služila za prenos opterećenja, u stub, tj. došlo je do prekoračenja lokalnog napona pritiska u betonu. Nakon potpunog utiskivanja čelične pločice (debljine 20mm) gornja ploča hidraulične prese je došla u kontakt sa celokupnom površinom na vrhu stuba. Od toga trenutka svi delovi preseka (betonska ispuna i cev) započeli su da opterećenje prenose istovremeno, što je imalo za posledicu dalje povećanje nosivosti. Prirast nosivosti nastavio se sve do dostizanja granice tečenja čelika cevi, što je dovelo do dostizanja drugog nivoa nosivosti, uz karakterističnu deformaciju vrha stuba. Drugi nivo nosivosti je neznatno viši od nosivosti pri utiskivanju pločice, a s obzirom da se sve odvija u oblasti neposredno pred lom, ovaj efekat nije ni bilo moguće direktno registrovati primjenom mernom tehnikom.

Nešto viša sila loma kod modela stubova opterećenih preko 64% površine preseka u odnosu na stub koji je bio opterećen preko cele površine je najverovatnije posledica izraženijeg efekta poprečnog utezanja betona čeličnom cevi.

### 3.3. Stubovi grupe SB

Stubovi ove grupe bili su opterećeni posredno, preko prenosne pločice dimenzija  $100 \times 100 \times 20mm$ . Ova prenosna pločica pokriva 53% površine poprečnog preseka stuba tj.  $\beta = A_C/A_L = 1,88$ .



Slika 9. Deformacijski odgovor stuba SB1

Do gubitka nosivosti, odnosno do loma kod uzoraka ove grupe dolazilo je usled kombinacije lokalnog izbočavanja i drobljenja betona, a zatim do utiskivanja čelične pločice za prenos opterećenja. Na slici 10-a, odnosno na slici 10-b primetno je proširenje gornjeg dela stuba koje je nastalo usled tečenja čelika i drobljenja betona na vrhu stuba.



*Slika 10: Model stuba grupe SB nakon ispitivanja*

*Tabela 4. Srednja vrednost granične nosivosti stuba grupe SB, sa odstupanjem  $\pm 15kN$*

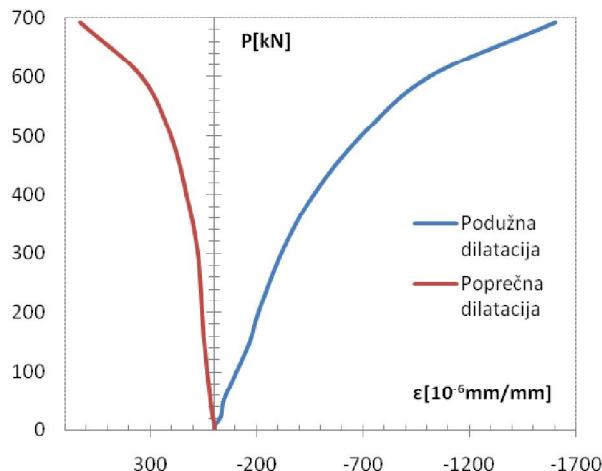
<b>Model stuba SB</b>	<b>Sila loma <math>P_u</math> [kN]</b>
Srednja vrednost	832

Slično kao i kod modela stubova prethodne grupe neposredno pred lom ( $P \sim 780kN$ ) došlo je do potpunog utiskivanja gornje čelične pločice, koja je služila za prenos opterećenja, u gornju površinu stuba. Nakon potpunog utiskivanja čelične pločice svi delovi preseka započeli su da opterećenje prenose istovremeno, što je imalo za posledicu dalje povećanje nosivosti. Uočeni prirast nosivosti nastavio se sve do dostizanja granice tečenja čelika cevi uz karakterističnu deformaciju vrha stuba.

### 3.4. Stubovi grupe SC

Modeli stubova grupe SC bili su opterećeni posredno, preko prenosne pločice dimenzija  $85 \times 85 \times 20mm$ . Prenosna pločica pokriva 38% površine poprečnog preseka stuba, pa je tako  $\beta = A_c/A_L = 2,61$ .

Slično kao i kod prethodnih grupa, svi uzorci stubova ove grupe pokazali su gotovo identično ponašanje sve do loma. Do gubitka nosivosti odnosno do loma, dolazilo je usled kombinacije lokalnog izbočavanja i drobljenja betona i utiskivanja čelične pločice za prenos opterećenja. Na slikama 12-a-b-c, uočava se prstenasto (radijalno) proširenje stuba koje je nastalo usled tečenja čelika i drobljenja na gornjoj površini betonskog jezgra stuba.



Slika 11. Deformacijski odgovor stuba SC1



Slika 12: model stuba grupe SC nakon ispitivanja

Tabela 5. Srednja vrednost granične nosivosti stuba grupe SC, sa odstupanjem  $\pm 15kN$

Model stuba SC	Sila loma $P_u$ [kN]
Srednja vrednost	692

Efekat dva nivoa nosivosti koji se javlja pri lokalno opterećenih stubova jasno je uočen i kod ove grupe modela stubova.

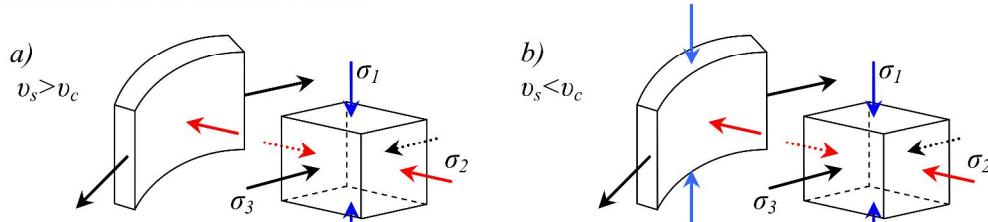
#### 4. ANALIZA REZULTATA EKSPERIMENTA

Kada se radi o kratkim stubovima bez izraženog uticaja izvijanja prvenstveno se nameće pitanje njihove nosivosti. Na spregnutim stubovima formiranim od čeličnih cevi

ispunjениh betonom sprovedena su eksperimentalna istraživanja i pri tome su utvrđeni najznačajniji parametri koji utiču na veličinu granične sile loma i uopšte na odgovor opterećenih stubova. Način unošenja sile u spregnuti stub je od velikog značaja kako bi se osigurala pravilna preraspodela napona po presecima. Pravilan unos opterećenja se ostvaruje bez nikakvog ili sasvim malog klizanja na kontaktu čelika i betona.

Na ponašanje stubova kod kojih se centrično opterećenje u stub unosi preko cele površine preseka u velikoj meri utiče razlika između vrednosti *Poisson*-ovog koeficijenta čelika cevi,  $v_s$ , i *Poisson*-ovog koeficijenta betonskog jezgra  $v_b$ . U početnoj fazi nanošenja opterećenja *Poisson*-ov koeficijent betona je niži od *Poisson*-ovog koeficijenta čelika, što ima za posledicu da se čelična cev, u radijalnom smeru, širi brže od betonskog jezgra, a samim tim čelik ne izaziva efekat utezanja betonskog preseka. *Poisson*-ov koeficijent betona ima konstantnu vrednost u području eksploatacionog opterećenja, što znači da se pri ovim vrednostima napona  $v$  nije funkcija tih napona. Povećanjem napona preko granice  $0,5f_b$  dolazi do pojave zakrivljenosti  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagrama, što znači da *Poisson*-ov koeficijent počinje da zavisi i od veličine napona.

Kada se opterećenje u stub unosi samo preko dela betonskog preseka, čelična cev prouzrokuje efekte utezanja betona od trenutka pojave bočnih deformacija jezgra. Transfer sile sa betonskog jezgra na čeličnu cev se odvija preko kontaktnih površina na granici dva materijala, tako da se u čeliku pored podužnih napona pritiska javljaju i poprečni naponi zatezanja. U slučaju ovakvog unosa sile u stub moguće je ustanoviti određenu povezanost između efekata utezanja betonskog jezgra i nosivosti veze na kontaktu između čelika i betona.



Slika 13: Naponska stanja u čeličnoj cevi i betonskom jezgru pri različitim nivoima opterećenja

Ovim konstatacijama može se objasniti razlog nešto više sile loma kod modela stubova opterećenih preko 64% površine preseka u odnosu na stub koji je bio opterećen preko cele površine. Stubovi opterećeni preko lokalne površine koja je manja za oko 50% ukupne površine betona imaju niže sile loma zbog prekoračenja lokalnog napona pritiska u betonu, nakon čega dolazi do utiskivanja čelične pločice za prenos opterećenja.

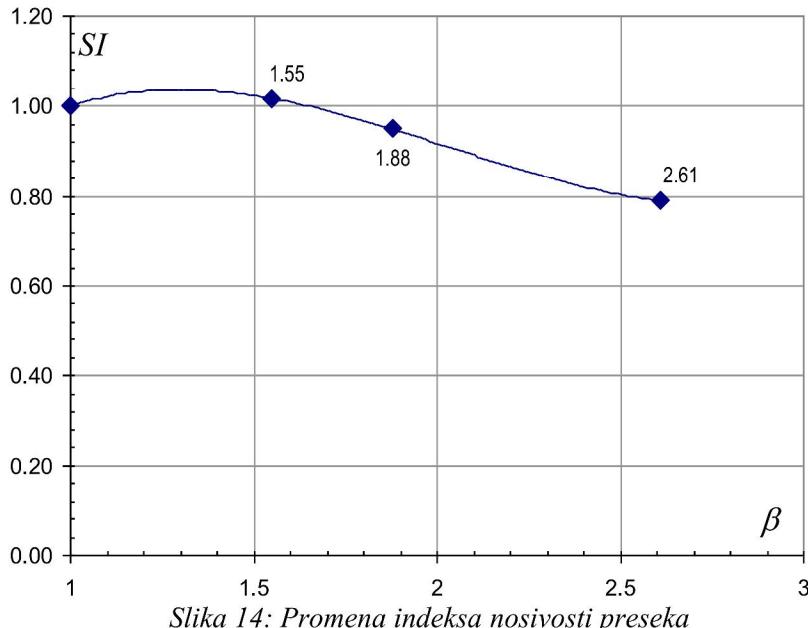
Graničnu nosivost kratkih, nevitkih stubova od čeličnih cevi ispunjenih betonom prvenstveno određuje napon tečenja čelika cevi, dok su stubovi u stanju da pretrpe veoma velike deformacije uz skoro potpuno održavanje nosivosti. Oblik globalne deformacije stuba pri lomu zavisi od načina unošenja opterećenja u stub, tj. zavisi od toga da li je stub opterećen preko celokupne površine poprečnog preseka ili je opterećen samo preko dela betonskog preseka. U slučaju unosa opterećenja samo preko lokalne površine betona, do gubitka nosivosti dolazi usled kombinacije lokalnog izbočavanja i drobljenja betona, dok kod stubova kod kojih se opterećenje unosi preko cele površine preseka, dolazi do pojave prestenastog izbočavanja zida cevi prema napolje u radijalnom pravcu (tzv. efekat "slonovog stopala").

Tabela 6: Srednje vrednosti sila loma po grupama ispitivanih stubova

Model stuba	Srednja sila loma $P_u$ [kN]
S	876
SA	892
SB	832
SC	692

Analiza nosivosti kod stubova na koje se opterećenje prenosi preko jednog dela površine betonskog jezgra može se iskazati preko indeksa nosivosti ( $SI$ ), koji je definisan odnosom izmerene granične aksijalne sile lokalno opterećenog stuba ( $N_{UL}$ ) i granične normalne sile stupa opterećenog preko celokupne površine poprečnog preseka ( $N_U$ ), odnosno:

$$SI = \frac{N_{UL}}{N_U}$$



Slika 14: Promena indeksa nosivosti preseka

Na slici 14. prikazane su vrednosti indeksa nosivosti  $SI$  u odnosu na koeficijent lokalno opterećene površine ( $\beta$ ). Moguće je uočiti da sa porastom vrednosti koeficijenta  $\beta$  dolazi do opadanja vrednosti indeksa nosivosti.

Prilikom koncipiranja programa eksperimentalnog istraživanja vodilo se računa o zahtevima kojima se obezbeđuje dovoljno tačna interpretacija ponašanja ispitivanih modela. Projektovana veličina modela i njihov broj predstavljaju bazu za opisivanje ponašanja stubova spregnutog preseka opterećenih lokalno centričnom silom pritiska u realnim uslovima. Pri tome, važno je napomenuti, da se nije moglo očekivati obuhvatanje svih uticajnih parametara od značaja za ispitivanu problematiku, ali svakako analizirana oblast predstavlja područje koje zaslužuje značajnu pažnju i dalji nastavak istraživanja.

## 5. ZAKLJUČCI

- Stubovi spregnutog preseka formiranih od čeličnih cevi ispunjenih betonom pokazuju znatno duktilnije ponašanje i u stanju su da pretrpe veće deformacije u odnosu na klasične armiranobetonske stubove.
- Na osnovu teorijsko-eksperimentalne analize deformacijskih dijagrama utvrđeno je da celokupni poprečni presek lokalno opterećenog stuba učestvuje u prijemu i prenosu opterećenja. Preraspodela opterećenja između pojedinih delova spregnutog preseka ostvaren je trenjem na kontaktu čelične cevi i betonskog jezgra.
- Pri svim nivoima opterećenja registrovano je formiranje efekta obruča, tj. pojava biaksijalnog naponskog stanja u čeliku.
- Odnos glavnih dilatacija čelične cevi je konstantan sve do opterećenja neposredno pred lom.
- Do gubitka nosivosti stuba dolazilo je uvek usled kombinacije lokalnog izbočavanja zida cevi i drobljenja betona bez obzira na to da li je opterećenje unošeno preko dela betonske površine ili preko celokupne površine preseka.
- Sila pri kojoj dolazi do potpunog gubitka nosivosti lokalno opterećenog stuba jednaka je sili pri kojoj dolazi do utiskivanja čelične pločice za prenos opterećenja u beton.
- Vrednosti sila loma stubova spregnutog preseka od čelika i betona direktno zavise od načina unosa opterećenja u stub. Lokalno opterećeni stubovi imaju nižu силу loma, a ona direktno zavisi od veličine pločice preko koje se vrši unos opterećenja.
- Stub opterećen preko celokupne površine poprečnog preseka imao je nešto nižu силу loma u odnosu na stub opterećen preko 64% površine preseka. Kod stubova opterećenih preko cele površine preseka sila pritiska se u čelični plasti unosi direktno, dok se kod lokalno opterećenih stubova sila pritiska u stub unosi putem preraspodele opterećenja između pojedinih delova preseka. Različit način unosa sile pritiska u čelični omotač dovodi i do različitih naponskih stanja u čeliku, koja direktno utiču na nosivost stuba.

## LITERATURA

- [1] Vlajić Lj., Kovačević T.: Ispitivanje efekata sprezanja Beton-Eksmal-Čelik u slučaju centrično pritisnutih stubova, Simpozijum, Savez društava građevinskih konstruktera Jugoslavije, Dubrovnik, **1989**, str. 296-303.
- [2] Vlajić Lj., Landović A.: Analiza mogućnosti ojačavanja armirano-betonskih stubova sprezanjem sa čeličnim cevima, 13. Kongres Društva građevinskih konstruktera Srbije, Zlatibor-Čigota, Srbija, **2010**, str. 433-438.
- [3] Vlajić Lj., Bešević M., Landović A., Kukaras D.: Numerical analysis of steel-concrete composite columns under axial load, Serbian journal Izgradnja 64 (9-10), **2010**, pp. 513-520.
- [4] Bešević M., Vlajić Lj., Sanacija adaptacija i dogradnja objekta u Nemanjinoj ulici br.9 u Beogradu, 13. Kongres DGKS, Zlatibor-Čigota, **2010**., str. 445-452.

- [5] Bilinc M.: Analiza ponašanja stubova spregnutog preseka od čelika i betona opterećenih lokalnom, centričnom silom pritiska, Diplomski rad, Građevinski fakultet Subotica, novembar **2010**, str. 74.
- [6] Bešević M., Landović A., Kukaras D., Truić T.: Analiza nosivosti spregnutih AB okruglih stubova sa krutim čeličnim pofilima, Zbornik radova Građevinskog fakulteta br.19, Subotica, **2010**.
- [7] Landović A.: Eksperimentalno – teorijska modelska analiza mogućnosti ojačanja centrično pritisnutih ab stubova sprezanjem sa čeličnim cevima, Magistarski rad, Građevinski fakultet Subotica, mart **2010**, str. 110.
- [8] Han Lin-Hai, Liu Wei, Yang You-Fu: Behaviour of concrete-filled steel tubular stub columns subjected to axially local compression, Journal of Constructional Steel Research 64, **2008**, pp. 377–387.
- [9] Sakino K.; Nakahara H., Morino S., Nishiyama I.: Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns, Journal of Structural Engineering, Vol. 130, No. 2, February **2004**, pp 180–188.
- [10] Yang You-Fu, Han Lin-Hai: Experiments on rectangular concrete-filled steel tubes loaded axially on a partially stressed cross-sectional area, Journal of Constructional Steel Research 65, **2009**, pp. 1617-1630.

## **EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF COMPOSITE STEEL AND CONCRETE COLUMNS LOADED WITH CONCENTRATED COMPRESSION FORCE**

**Summary:** The paper presents an overview of experimental research conducted on composite columns loaded with concentrated compression force. Cross section of columns consisted of steel tubes with concrete filling, while concentrated force was introduced through small square steel plate. Steel plates were chosen in three various dimensions and ultimate load capacity was compared against values obtained for representative column samples in which compression force was introduced over the whole column cross section. The paper shows specific stress-strain diagrams.

**Keywords:** Composite cross section, concrete filled tube, concentrated force, ultimate load capacity