

NUMERIČKO-EKSPERIMENTALNA ANALIZA NOSIVOSTI CENTRIČNO PRITISNUTIH AB STUBOVA

Aleksandar Landović¹
Miroslav Bešević²

UDK: 624.166 : 004.4 ANSYS

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2016.016

Rezime: U radu su prikazani rezultati računskog simuliranja ponašanja centrično pritisnutih kratkih AB stubova. Nelinearna analiza sprovedena je na numeričkom modelu razvijenom pomoću metode konačnih elemenata. Svi delovi preseka, beton i armatura, modelirani su sa eksperimentalno određenim mehaničkim karakteristikama. Rezultati računске analize upoređeni su sa rezultatima dobijenim na eksperimentalnim modelima stubova. Modeliranjem stubova primenom računarskog softvera može se veoma dobro proceniti njihova granična sila i ponašanje kroz sve faze opterećenja.

Ključne reči: AB stub, računska analiza, MKE, nelinearna analiza

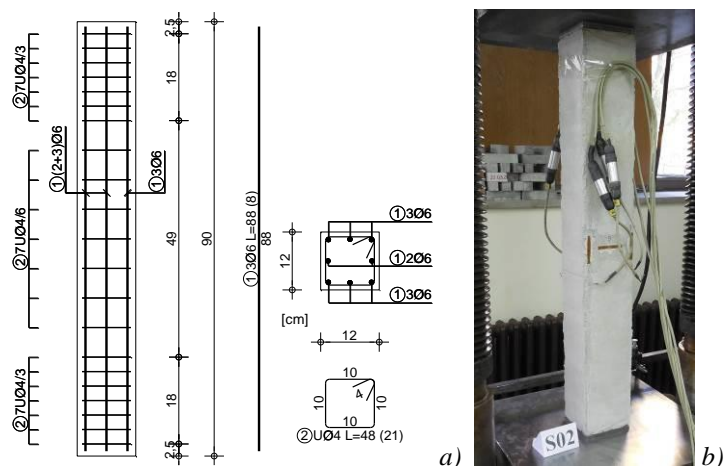
1. UVOD

Predmet rada je numeričko-eksperimentalna analiza ponašanja modela aksijalno pritisnutih armiranobetonskih stubova pri eksploatacionom i graničnom opterećenju. Za globalnu analizu ponašanja stubova korišćena je metoda konačnih elemenata uz primenu računarskog softvera. Uvođenjem u proračun karakteristika materijala koje su eksperimentalno utvrđene, omogućeno je sprovođenje tačnijeg MKE proračuna radi kasnijeg upoređenja nosivosti i ponašanja sa eksperimentalno ispitivanim stubovima. Detaljni prikaz ispitivanja dat je u [1].

Analizirani su modeli centrično pritisnutih AB stubova kvadratnog poprečnog preseka dimenzija 12/12cm, visine 90cm. Uzorci su izrađeni od betona klase C35/45, glavne armature 8Ø6 i uzengija UØ4/6, odnosno UØ4/3, u zoni unosa sile, kao što je to prikazano na slici 1-a. Kvalitet čelika upotrebljenog za izradu armature odgovara hladno vučenoj žici $f_y/f_u=500/560$. Karakteristike betona određene su ispitivanjem standardnog cilindra. Pritisna čvrstoća betona je iznosila $f_c=38.6\text{MPa}$, dok je statički modul elastičnosti $E_c=27.4\text{GPa}$. Na slici 1-b prikazan je model AB stuba neposredno pre ispitivanja.

¹ mr Aleksandar Landović, dipl.inž. građ., Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Srbija, tel: 024 554 300, e – mail: landovic@gf.uns.ac.rs

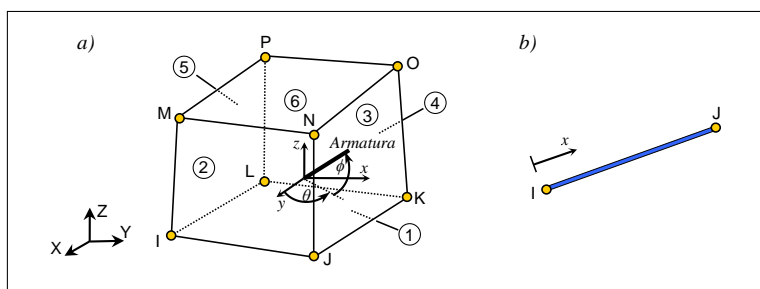
² dr Miroslav Bešević, dipl.inž. građ., Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Srbija, tel: 024 554 300, e – mail: miroslav.besevic@gmail.com



Slika 1. a) Usvojene dimenzije modela, b) Model neposredno pre ispitivanja

2. MODELIRANJE

Modeliranje metodom konačnih elemenata omogućava da se, uz primenu odgovarajućeg softvera, prikaže što je moguće realnije stanje testiranog modela. Na ovaj način je moguće, pravilnim formiranjem modela, izvršiti proveru svih parametara bez potrebe za izradom skupih i komplikovanih eksperimentalnih modela. U konkretnom primeru modeliranje je izvršeno primenom računarskog softvera ANSYS 14.5 [2]. Analiza metodom konačnih elemenata predstavlja pokušaj da se, na osnovu poznavanja ulaznih parametara, što je moguće realnije opiše odgovor posmatranog sistema. Usvojeni model je takvih dimenzija da se rezultati dobijeni numeričkom analizom mogu direktno preneti na realne modele bez uvođenja korekcija prema zakonu sličnosti [3]. Svi elementi preseka, beton i armatura, modelirani su sa eksperimentalno određenim mehaničkim karakteristikama. Osnovni principi za simuliranje ponašanja eksperimentalnih modela i izbor konačnih elemenata izvršen je prema [4], [5] i [6].



Slika 2. Konačni elementi: a) SOLID65, b) LINK180

Delovi modela simulirani su odgovarajućim ANSYS konačnim elementima [2]. Modeliranje betona izvršeno je SOLID65 konačnim elementom sa osam čvorova. Ovim 3D

elementom modeliraju se materijali sa izraženim nelinearnim ponašanjem, kao što su beton ili kamen, uz mogućnost analize nastanka i razvoja prslina pri zatezanju, kao i drobljenja usled sila pritiska, plastičnog ponašanja i tečenja. Armatura u AB stubu modelirana je elementom LINK180. Element je definisan sa dva čvora i površinom poprečnog preseka, a namenjen je modeliraju aksijalno zategnutih ili pritisnutih štapova. Konačni elementi sa oznakama čvorova prikazani su na slici 2.

Svi materijali upotrebljeni u eksperimentalnom istraživanju opisani su odgovarajućim računskim modelom uzimajući u obzir i nelinearno ponašanje. Čelik, tj. armatura, opisan je bilinearnim elastičnim–idealno plastičnim modelom bez ojačanja. U tabeli 1 prikazane su korišćene vrednosti modula elastičnosti ($E_{x,s}$), napona na granici tečenja/razvlačenja (f_y), *Poisson*-ovog koeficijenta (μ_s) i tangentnog modula elastičnosti (E_T).

Tabela 1. Osobine čelika

Čelik	$E_{x,s}$ [kN/cm ²]	f_y [kN/cm ²]	μ_s [-]	E_T [kN/cm ²]
Armatura	21000	50	0.3	0

Beton od kojeg su izrađeni AB stubovi opisan je sa tri računski modela, i to kao linearno izotropan, multilinearo izotropan i osobinama specifičnim za opis betona. Mehaničke karakteristične betona prikazane su u tabeli 2. Date su vrednosti za jednoaksijalnu čvrstoću na pritisak (f_c) i zatezanje (f_r), statički modul elastičnosti ($E_{x,c}$) i *Poisson*-ov koeficijent (μ_c).

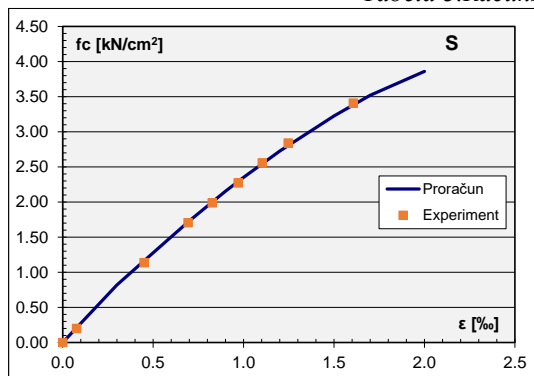
Tabela 2. Osobine betona

Beton	f_c [kN/cm ²]	$E_{x,c}$ [kN/cm ²]	f_r [kN/cm ²]	μ_c [-]
AB stub	3.86	2740	0.385	0.2

Nelinearno ponašanje betona opisano je pomoću multilinearog modela. Naponsko-deformacijski dijagram, dobijen ispitivanjem na standardnim cilindrima, aproksimiran je kvadratnom parabolom uz visok stepen korelacije, a zatim su određene računski vrednosti napona za usvojene dilatacije. Početni nagib računskog dijagrama odgovara modulu elastičnosti ($E_{x,c}$) iz linearne analize, što zahteva sam program [2]. Zavisnost između napona i dilatacija betona modela stuba prikazana je na slici 3. Na dijagramu su uporedno prikazane i eksperimentalne vrednosti. U pratećoj tabeli prikazane su vrednosti napona i dilatacija, kao i odgovarajući sekantni modul elastičnosti koji su korišćeni u računskoj analizi.

Pored podataka za opis elastičnog i nelinearnog ponašanja betona, potrebno je definisati i dodatne osobine karakteristične za opisivanje plastičnog ponašanja betona (*Non-metal Plasticity/Concrete*). Koeficijent kojim se opisuje prenos smičućih sila kroz prslinu (β) usvojen je kao $\beta t=0.3$ za otvorenu, odnosno $\beta t=1.0$ za zatvorenu prslinu [4]. Pored pomenutih parametara, potrebno je definisati još i jednoaksijalni napon zatezanja (f_r), kojim se određuje nastanak prslina, kao i jednoaksijalni napon loma pri pritisku, koji određuje slom konačnog elementa usled drobljenja betona. Lom betona usled čistog pritiska se uglavnom ne može desiti, jer se, zbog *Poisson*-ovog koeficijenta, u poprečnom pravcu javljaju naponi zatezanja koji dovode do nastanka prslina, odnosno do loma uzorka [4]. Iz tog razloga je opcija loma konačnog elementa usled drobljenja betona isključena iz analize (*UniaxialCrushinStress*= - 1).

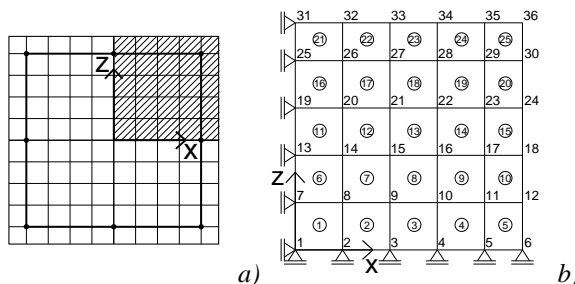
Tabela 3. Računske vrednosti napona i dilatacija betona



	ϵ [mm/mm]	f_c [kN/cm ²]	E_x [kN/cm ²]
0	0	0	0
1	0.0003	0.822	2740
2	0.0005	1.277	2554
3	0.0007	1.731	2473
4	0.0009	2.153	2392
5	0.0010	2.352	2352
6	0.0012	2.725	2271
7	0.0015	3.225	2150
8	0.0017	3.518	2069
9	0.0020	3.860	1930

Slika 3. Naponsko-deformacijski dijagram betona

Računski model sastoji se od zapreminskih elemenata sa fizičko-mehaničkim karakteristikama betona, kao i od linijskih elemenata sa karakteristikama podužne i poprečne armature. Za model stuba formirana je mreža konačnih elemenata samo za jednu četvrtinu stuba s obzirom na dve ose simetrije poprečnog preseka koje se poklapaju sa globalnom x i z osom. Modelirana četvrtina stuba na slici 3-a prikazana je osenčeno. Granični uslovi oslanjanja definisani su tako da je kod čvorova na osi simetrije sprečeno pomeranje upravno na osu. Čvorovima AB stuba u preseku na donjem delu sprečeno je pomeranje u podužnom pravcu (pravac globalne y ose). Ovakav tip modeliranja uspešno je primenjen u [7], [3] i [8]. Na slici 3-b prikazana je usvojena mreža konačnih elemenata AB stuba sa oznakama čvorova i elemenata po poprečnom preseku. Raspored konačnih elemenata po vertikalnim slojevima stuba formiran je tako da se opiše tačan visinski položaj uzengija.



Slika 4. Poprečni presek modela sa mrežom konačnih elemenata

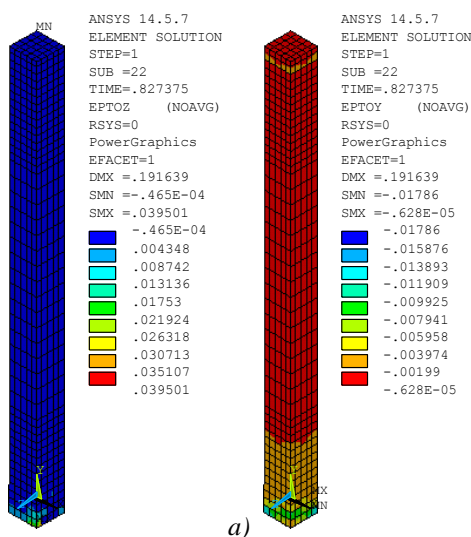
Veza između linijskih i zapreminskih 3D elemenata ostvarena je u čvorovima mreže. Stub je modeliran sa ukupno 1419 konačnih elemenata. Prikazana mreža elemenata predstavlja optimalno rešenje s obzirom na dimenzije modela.

Opterećenje na model stuba je usvojeno kao jednako podeljen pritisak (p) koji deluje po površini prenosne pločice na vrhu AB stuba. Granično opterećenje svakog modela određeno je primenom analize koja je obuhvatala materijalne i geometrijske nelinearno-

sti. Opterećenje je na model je naneto u koracima – inkrementima uz primenu *Newton-Raphson-ovg* postupka proračuna. Primenjena je opcija *TimeStepping=On* čime se obezbeđuje optimalna veličina koraka. Za model je definisan broj koraka, kao i maksimalni i minimalni broj podkoraka. Na ovaj način omogućeno je adekvatno opisivanje nelinearnog ponašanja modela. Svaki model je proračunat sa različitim brojem početnog i maksimalnog koraka, kako bi se konvergencija rezultata mogla potvrditi kroz više nezavisnih proračuna.

3. REZULTATI PRORAČUNA

Vrednost sile koja je korišćena u analizi napona i deformacija usvojena je tako da se rezultati proračuna direktno mogu porediti sa karakterističnim vrednostima izmerenih tokom eksperimenta. Granično stanje određeno je iz nelinearne analize, i obuhvatalo je analizu stanja napona, deformacija i specifičnih dilatacija, silu loma i stanje prslina. Kvalitativna promena naponskog stanja može se sagledati sa prikazanih slika, s obzirom na to da su veličine napreznja označene različitim bojama.

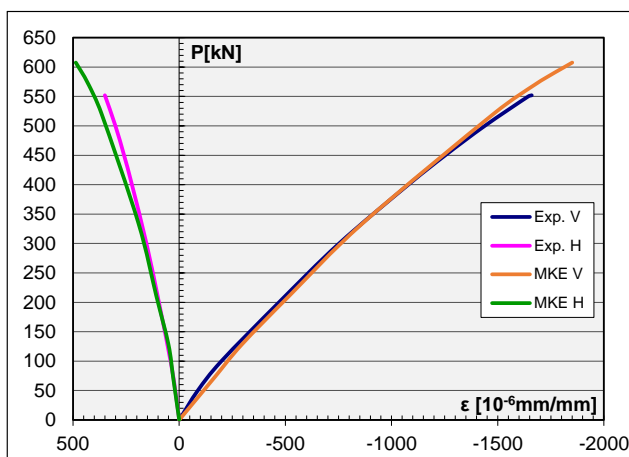


Slika 5. Stanje totalnih dilatacija za model stub pri graničnom opterećenju

Nelinearna analiza izvršena je za opterećenje ravnomernim pritiskom $p=5.1kN/cm^2$ koji odgovara sili od $P=734.4kN$, što je znatno više od sile loma iz eksperimenta. Primenom *TimeStep* procedure određeno je granično opterećenje za $Time=0.8274$. Ovaj inkrement opterećenja ekvivalentan je računskoj graničnoj sili od $P_n=0.8274 \times 734.4=607.6kN$. Zbir elastične i plastične komponente za specifične dilatacije betona predstavljen je kao totalna vrednost. Stanje podužnih dilatacija (ϵ_y) prikazano je na slici 5-a, dok je na slici 5-b prikazano stanje poprečnih dilatacija (ϵ_z).

Uporedni prikaz specifičnih dilatacija dobijenih eksperimentalnim i računskim putem prikazan je na slici 6. Analizirane su podužne (V) i poprečne (H) dilatacije za model

stuba S02. Posmatrani stub imao je nešto nižu graničnu silu, ali je i pored toga uočeno izuzetno dobro poklapanje računskih (MKE) i eksperimentalnih ($Exp.$) vrednosti. Sa dijagrama se vidi da je kroz sve faze opterećenja odstupanje između vrednosti vrlo malo. U domenu eksploatacionih stanja model u oba slučaja ima gotovo linearno ponašanje.



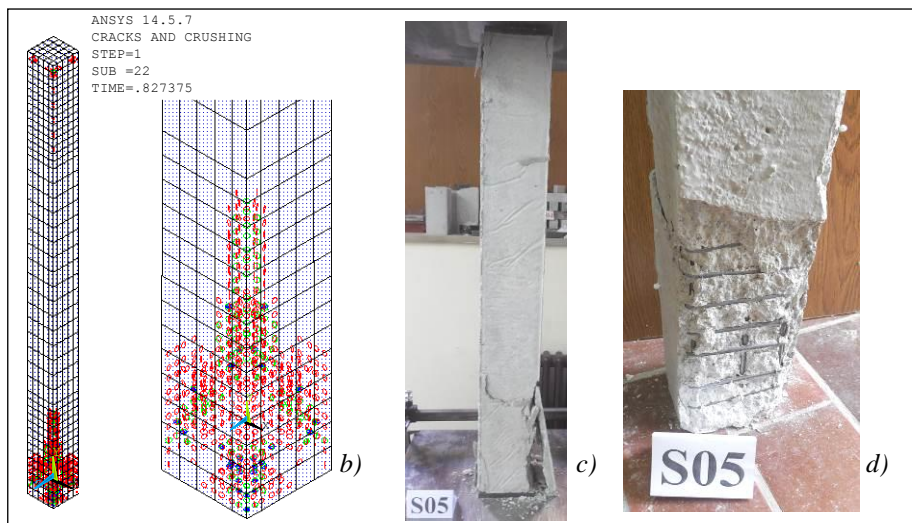
Slika 6. Dijagrami promene sile i specifičnih dilatacija betona za model stuba S02

U tabeli 4 prikazane su vrednosti graničnih sila AB stubova dobijene eksperimentalnim putem, njihova srednja vrednost (P_{Exp}), računaska granična sila (P_{MKE}), kao i odnos između eksperimentalne i računске vrednosti. Analizirana su dva slučaja. U prvom slučaju analizirane su vrednosti za svih pet registrovanih sila, dok su u drugom slučaju iz rezultata izdvojene dve najniže izmerene sile. Uočava se da je u oba slučaja odstupanje između računске i srednje vrednosti eksperimentalnih rezultata u granicama od $\pm 3\%$, što predstavlja izuzetno dobro poklapanje vrednosti.

Tabela 4. Granične sile stubova

Uzorak	S01	S02	S03	S04	S05	P_{Exp} [kN]	P_{MKE} [kN]	P_{Exp}/P_{MKE}	%
P_u [kN]	616	552	552	624	616	592.0	607.6	0.97	-3
P_u [kN]	616	-	-	624	616	618.7	607.6	1.02	+2

Stanje prslina pri lomu na računskom modelu prikazano je na slici 7-a i b, dok se na slici 7-c i d vidi donji deo modela stuba S05 neposredno nakon eksperimenta. Uočava se veoma dobro poklapanje rasprostiranja prslina po visini uzorka kod eksperimentalnog i računskog modela. Važno je napomenuti da prikazan računski model predstavlja četvrtinu realnog stuba. Pojava prvih prslina uočena je pri inkrementu opterećenja za $Time=0.7094$. Ovo opterećenje odgovara računskoj sili od $P=521kN$. Prilikom eksperimentalnog ispitivanja prve podužne prslina u betonu registrovane su pri sili od $P=500kN$, što je, takođe, veoma bliska vrednost.



Slika 6. Dijagrami promene sile i specifičnih dilatacija betona za model stuba S02

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu svega prikazanog može se zaključiti kako je model AB stuba izuzetno dobro moguće modelirati računarskim softverom ANSYS i da se zaključci iz numeričke analize mogu adekvatno primeniti na realnim modelima. Elastičnom analizom vrlo dobro se može proceniti ponašanje AB stuba pri eksploatacionim uslovima, što ne bi zahtevalo značajniji utrošak vremena i računarskih resursa.

Primenom nelinearne analize može se veoma pouzdano odrediti granična sila, kao i ponašanje modela kroz sve faze opterećenja. Na formiranim računskim uzorcima vrlo lako se mogu varirati pojedini parametri kako bi se utvrdio njihov uticaj na nosivost i naponsko-deformacijski odgovor modela [9]. Na ovaj način mogla bi se izvršiti provera svih parametara iz analize bez potrebe za izradom eksperimentalnih modela, a takođe, moglo bi se ponuditi optimalno rešenje za stub neke složene realne konstrukcije. Numeričko određivanje graničnih stanja nelinearnom analizom realnije prikazuje ponašanje modela pri svim nivoima opterećenja, ali to iziskuje znatno složenije modeliranje, kao i veći utrošak računarskog vremena.

LITERATURA

- [1] Landović, A.: *Eksperimentalno – teorijska modelska analiza mogućnosti ojačanja centrično pritisnutih AB stubova sprežanjem sa čeličnim cevima*, Doktorska disertacija - U fazi uvda javnosti, Građevinski fakultet Subotica, **2016**.
- [2] ANSYS Inc. – ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, release 14.5, **2012**.
- [3] Doran, B.: Numerical simulation of conventional RC columns under concentric loading, *Materials and Design*, **2009.**, vol. 30, pp. 2158–2166.

- [4] Kachlakev, D., Miller, T., Yim, S., Chansawat, K., Potisuk, T.: *Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with frp laminates*, Final Report SPR 316 - Oregon Department of Transportation, **2001**.
- [5] Kukaras D., Vlajić, Lj.: Spajanje AB i PB grednih elemenata sa visokovrednim zavrtanjima, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Subotica*, **2008.**, vol. 17, str. 7-28.
- [6] Wolanski, A.J.: *Flexural behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis*, Master of Science Thesis, Marquette University, Milwaukee, WI, **2004**.
- [7] Vlajić, Lj., Bešević, M., Landović, A., Kukaras, D.: Numerička analiza nosivosti pritisnutih stubova od armiranog betona i čelika, *Izgradnja*, **2010.**, vol. 64 br. 9-10, str. 513-520.
- [8] Ellobody, E., Young, B., Lam, D.: Behaviour of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns, *Journal of Constructional Steel Research*, **2006.**, vol. 62, pp. 706–715.
- [9] Landović, A., Bešević, M., Kukaras, D.: Analiza nosivosti stuba spregnutog preseka u funkciji osnovnog materijala, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Subotica*, **2014.**, vol. 24, str. 69-75.

NUMERICAL-EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF AXIALLY COMPRESSED RC COLUMNS

Summary: *This paper presents the results of computer simulated behavior of axially compressed short reinforced concrete (RC) columns. Nonlinear analysis was conducted on numerical model developed by finite element method. All parts of cross section, concrete and reinforcement bars, are modeled with experimentally determined mechanical characteristics. Results of numerical analysis were compared with results obtained on experimental column models. Bearing capacity and behavior of RC columns thru all phases of loading can be accurately determined by computer software.*

Keywords: *RC column, numerical analysis, FEM, nonlinear analysis*