



## EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA PREDNAPETIH KROVNIH NOSAČA

Dr.sc. **Radoslav Markić**, dipl.ing.građ.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

Prof. dr. sc. **Jure Radnić**, dipl.ing.građ., izv. prof. dr. sc. **Alen Harapin**, dipl.ing.građ.,

**Nikola Grgić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije,

Matice hrvatske 15, 21000 Split, Hrvatska

**Sažetak:** Izvršena su eksperimentalna ispitivanja utjecaja odnosa klasične i prednapete armature na ponašanje više tipova betonskih nosača do sloma. U radu su prikazani samo rezultati ispitivanja krovnog T nosača, izrađenog od betona visoke čvrstoće. Pri tome su za svaki inkrement opterećenja mjereni pomaci, pukotine u betonu, naprezanja u betonu na gornjem pojasu, naprezanja u klasičnoj armaturi donjeg i gornjeg pojasa te naprezanja u prednapetoj armaturi u sredini nosača. Na temelju dobivenih rezultata, izvedeni su zaključci o ponašanju nosača u graničnim stanjima nosivosti i uporabljivosti, u ovisnosti o odnosu klasične i prednapete armature.

**Ključne riječi:** eksperiment, betonski nosač, klasična armatura, prednapeta armatura, slom

## EXPERIMENTAL TESTS OF PRESTRESSED ROOF GIRDERS

**Abstract:** Experimental testings are done to investigate the effect of classical and prestressed reinforcement ratio on behavior of concrete beams up to failure. In this paper are presented only the results for T beam (roof beam), made by high strength concrete. For each load increment, in the middle of the span it is measured deflections, cracks, stresses in concrete and stresses in classical and prestressed reinforcement. Using experimental results, main conclusions are made according to ultimate and service limit state of beams in relation of classical and prestressed reinforcement ratio.

**Key words:** experiment, concrete beam, classical reinforcement, prestressed reinforcement, failure



## 1. UVOD

Ispitivanja ponašanja armiranobetonskih nosača s različitim odnosom prednapete i klasične armature, tj. s različitim stupnjem prednapinjanja, još uvijek su poželjna i aktualna. Ovo se odnosi na naponsko-deformacijska svojstva betona i prednapete armature, ali također i na tijek i promjenu naprezanja u klasičnoj armaturi te deformiranje (izdizanje i progibanje) i stanje pukotina od početka prednapinjanja nosača do njegove granične nosivosti (sloma).

U sklopu rada [1] izvršeno je eksperimentalno ispitivanje 5 tipova realnih montažnih armiranobetonskih nosača (šuplja međukatna ploča,  $\pi$  međukatni nosač,  $\perp$  međukatni nosač, T podrožnica i T međukatni nosač) raspona 6 - 10m, s više različitih odnosa prednapete i klasične armature. Naime, istraženi su slijedeći načini armiranja:

- Samo prednapeta armatura
- Pretežito prednapeta i manjim dijelom klasična armatura
- Podjednaka prednapeta i klasična armatura
- Pretežito klasična i manjim dijelom prednapeta armatura
- Samo klasična armatura

Kod toga je ukupna armatura usvojena tako da granična nosivost svih nosača pojedinog tipa bude podjednaka. Nosači su opterećivani dvjema koncentriranim silama blizu sredine raspona, koje su postupno povećavane do sloma nosača. Za svaki prirast sile, u sredini raspona nosača praćeno je:

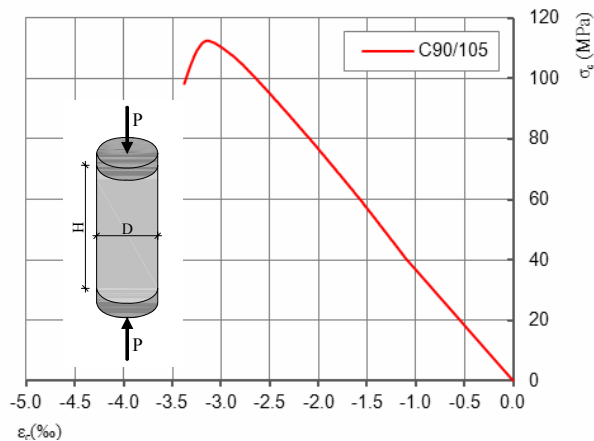
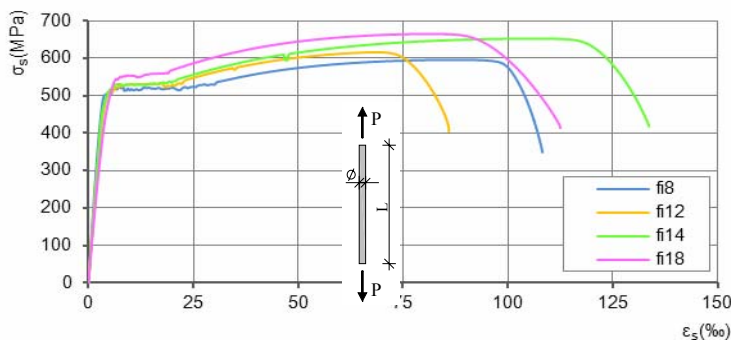
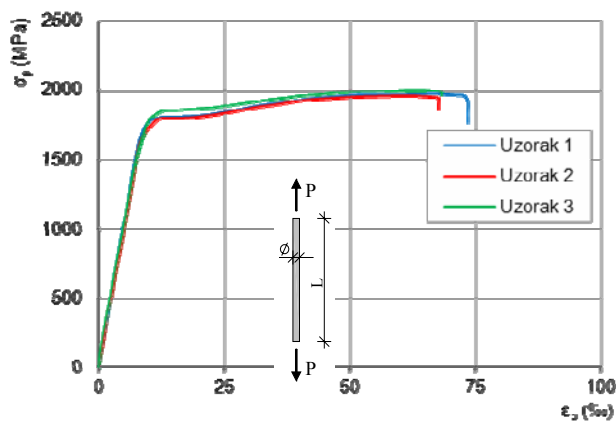
- Naprezanje (sila) u nategama,
- Naprezanje u vlačnoj i tlačnoj klasičnoj armaturi,
- Naprezanje u betonu na gornjem pojasu nosača,
- Pomak (progibanje i izdizanje),
- Položaj i širina pukotina u betonu

U ovom radu ukratko su prikazani samo rezultati ispitivanja jednog tipa nosača, odnosno T krovnog nosača (podrožnice). Na slici 1 prikazan je primjer krovne konstrukcije hale s takvim nosačima. U točki 2 prikazani su neki osnovni podaci predmetnog nosača, u točki 3 neki rezultati ispitivanja, a u točki 4 kratki komentar dobivenih rezultata. Na kraju su navedeni najvažniji zaključci istraživanja. Detaljan opis svih provedenih eksperimentalnih istraživanja, kao i prikaz razvijenog numeričkog modela za proračun klasično armiranih i prednapetih prostornih štapnih konstrukcija, može se naći u [1].

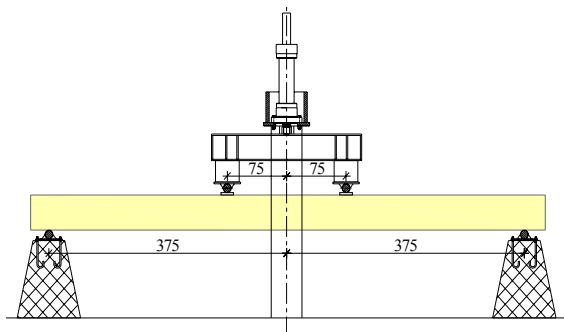


Slika 1. Primjer primjene T nosača u konstrukcijama hala



Slika 4. Dijagram  $\sigma_c$ - $\epsilon_c$  za beton u tlakuSlika 5. Dijagram  $\sigma_s$ - $\epsilon_s$  za betonski čelik B500BSlika 6. Dijagram  $\sigma_p$ - $\epsilon_p$  za prednapeti čelik Y1860S7

Prednapinjanje nosača izvršeno je pri starosti betona  $t=7$  dana. Nakon toga nosači su postavljeni na oslonce. Opterećivani su koncentriranim silama prema slici 7, u inkrementima do sloma, pri starosti betona  $t=60$  dana. Izgled nekih nosača nakon ispitivanja prikazan je na slici 8.



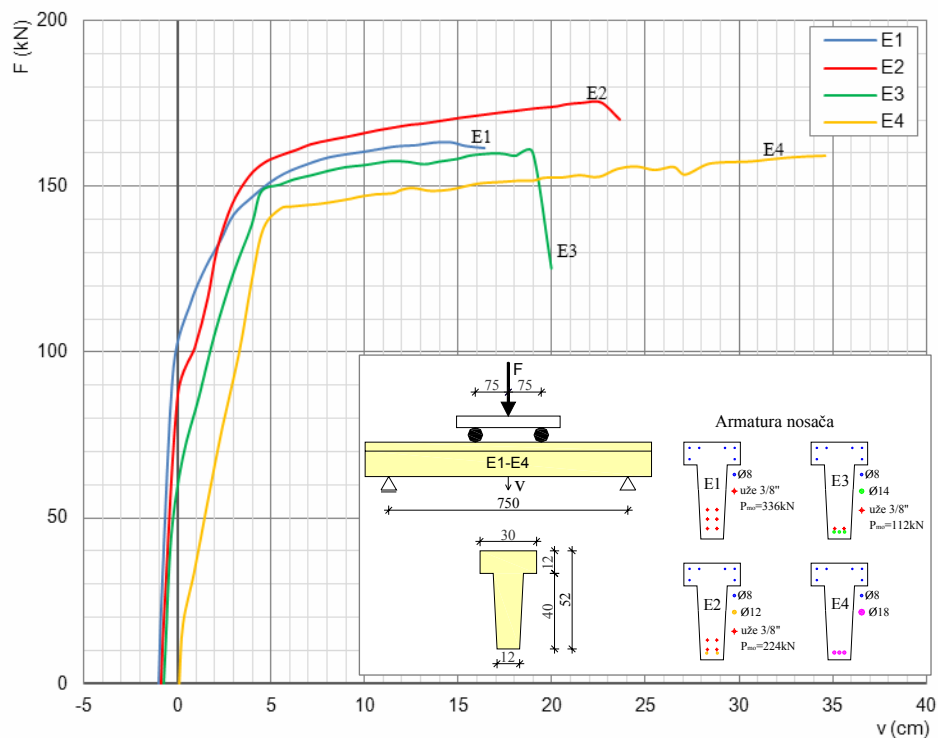
Slika 7. Shema opterećivanja nosača



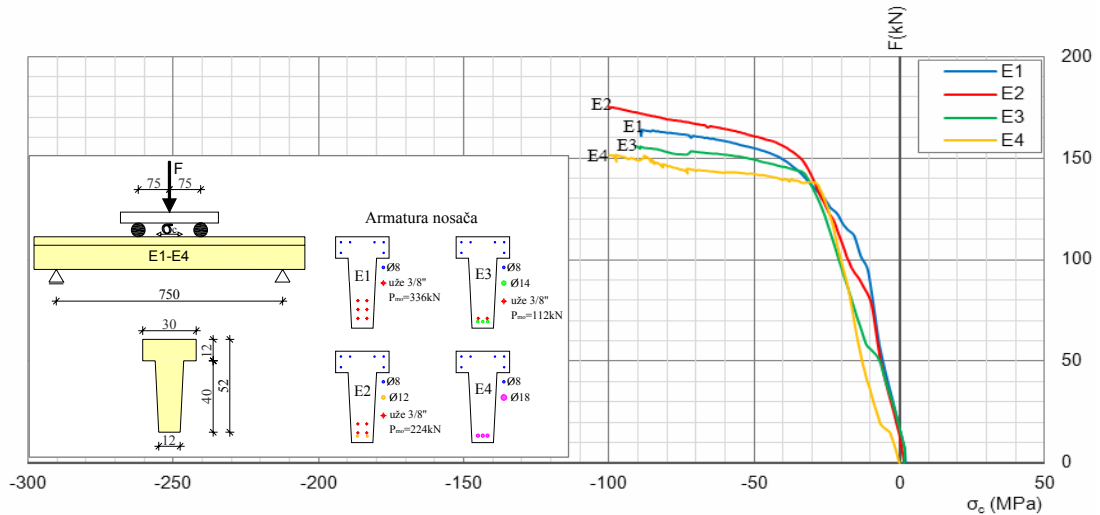
Slika 8. Fotografije nekih greda tip E u sredini raspona nakon sloma

### 3. REZULTATI ISPITIVANJA

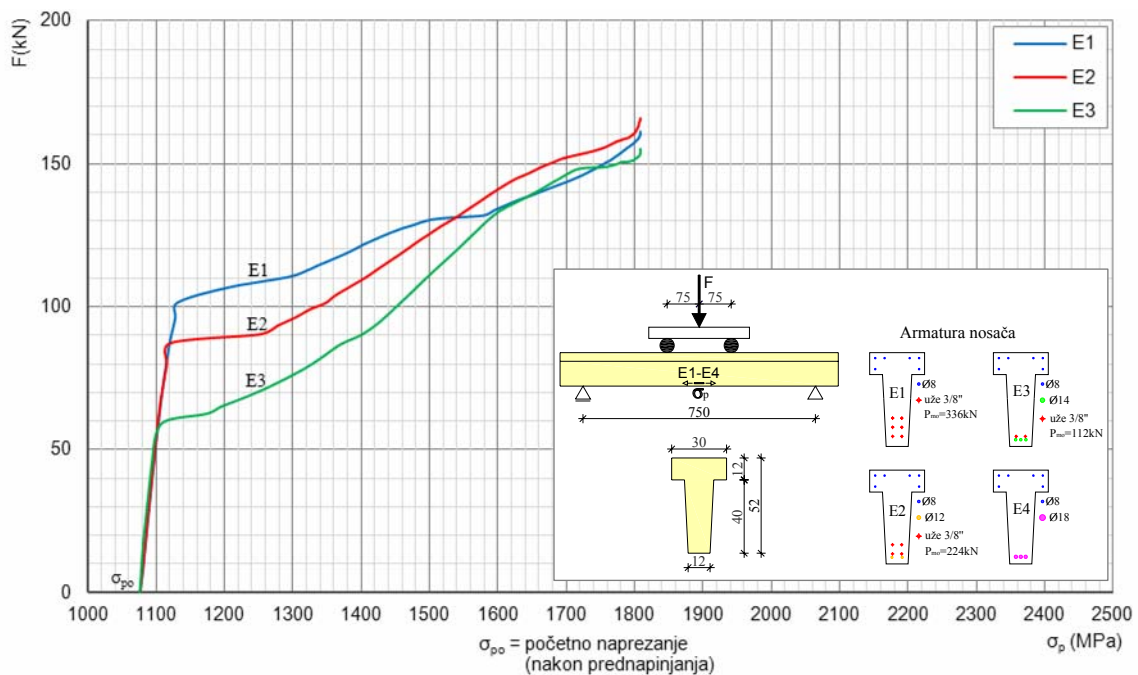
Prikazani su samo neki rezultati ispitivanja, a ostali se mogu naći u [1]. Na slici 9 prikazan je dijagram sila ( $F$ ) – pomak ( $v$ ) u sredini raspona.

Slika 9. Veza sila ( $F$ ) - pomak ( $v$ ) u sredini raspona za nosače tip E1-E4

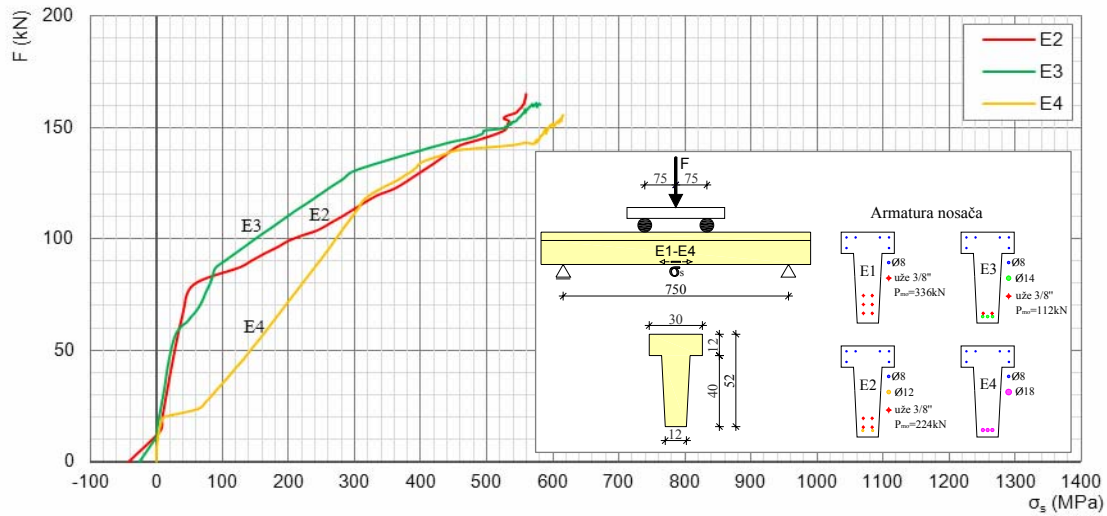
Na slikama 10 - 13 prikazani su dijagrami sila ( $F$ ) – naprezanje ( $\sigma$ ) za: beton na gornjem pojasu, prednapetu armaturu (natege) te klasičnu donju i gornju armaturu u sredini raspona.



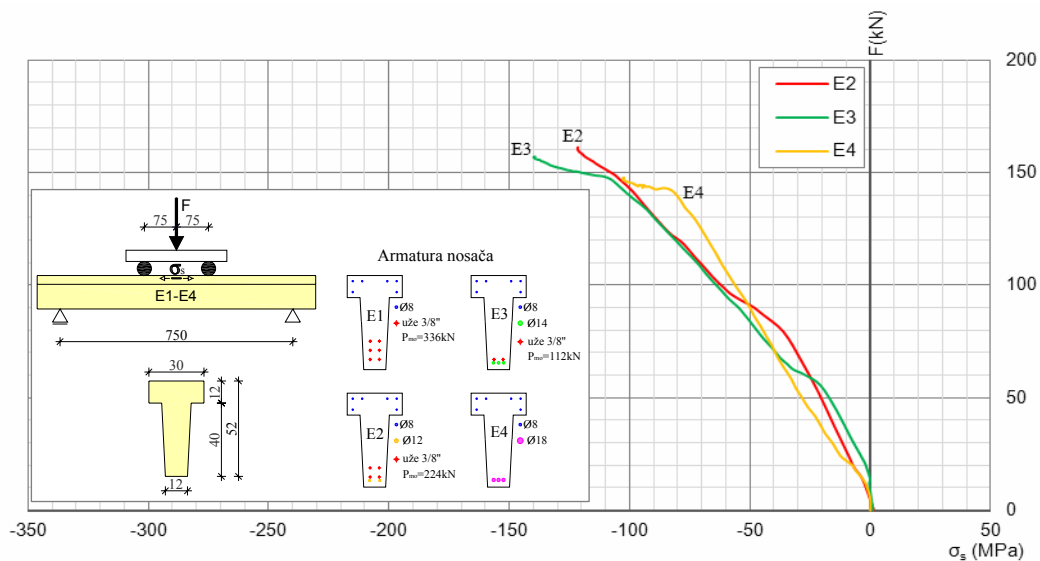
Slika 10. Veza sila ( $F$ ) – naprezanje ( $\sigma_c$ ) betona na gornjem pojasu u sredini raspona za nosače tip E1-E4



Slika 11. Veza sila ( $F$ ) – naprezanje ( $\sigma_p$ ) prednapete armature u sredini raspona za nosače tip E1-E4



Slika 12. Veza sila ( $F$ ) – naprezanje ( $\sigma_s$ ) klasične donje armature u sredini raspona za nosače tip E1-E4



Slika 13. Veza sila ( $F$ ) – naprezanje ( $\sigma_s$ ) klasične gornje armature u sredini raspona za nosače tip E1-E4

Na slici 14 prikazan je položaj i širine pukotina u sredini nosača ovisno o sili  $F$ . Za svaki podtip nosača označena je sila  $F_{cr}$  pri pojavi prve pukotine. Na slici 15 prikazane su ovisnosti pomaka, pukotina i naprezanja od veličine sile  $F$ . Dat je pregled ponašanja nosača sve do sloma, ovisno od odnosa armiranja prednapetom i klasičnom armaturom.





E1 $F_{cr}=96$ kN	E2 $F_{cr}=87,3$ kN	E3 $F_{cr}=60,3$ kN	E4 $F_{cr}=30,1$ kN
$F = 0$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 0$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 0$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 0$ kN; $w_c = 0$ mm
$F = 25$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 25$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 25$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 25$ kN; $w_c = 0$ mm
$F = 50$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 50$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 50$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 50$ kN; $w_c = 0,05$ mm
$F = 75$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 75$ kN; $w_c = 0$ mm	$F = 75$ kN; $w_c = 0,1$ mm	$F = 75$ kN; $w_c = 0,12$ mm
$F=100$ kN; $w_c$ $=0,02$ mm	$F=100$ kN; $w_c = 0,05$ mm	$F=100$ kN; $w_c = 0,16$ mm	$F=100$ kN; $w_c = 0,18$ mm
$F=125$ kN; $w_c$ $=0,15$ mm	$F=125$ kN; $w_c = 0,14$ mm	$F=125$ kN; $w_c = 0,23$ mm	$F=125$ kN; $w_c = 0,23$ mm

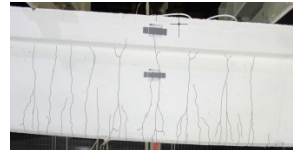




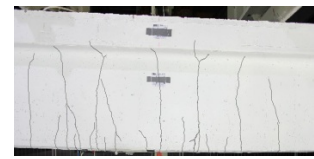
$F=150\text{kN};$   
 $w_c = 0,4\text{mm}$



$F=150\text{kN}; w_c =$   
 $0,25\text{mm}$



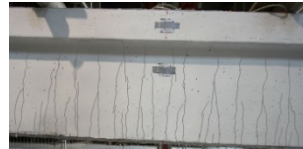
$F=150\text{kN}; w_c =$   
 $0,57\text{mm}$



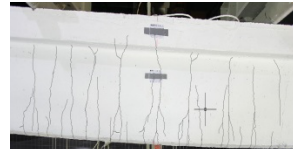
$F=150\text{kN}; w_c = 0,92\text{mm}$



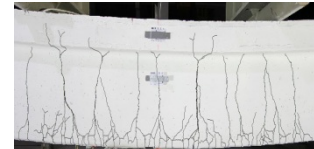
$F=163\text{kN};$   
 $w_c = 2,7\text{mm}$



$F=176\text{kN}; w_c = 2,2\text{mm}$



$F=160\text{kN}; w_c = 1,8\text{mm}$



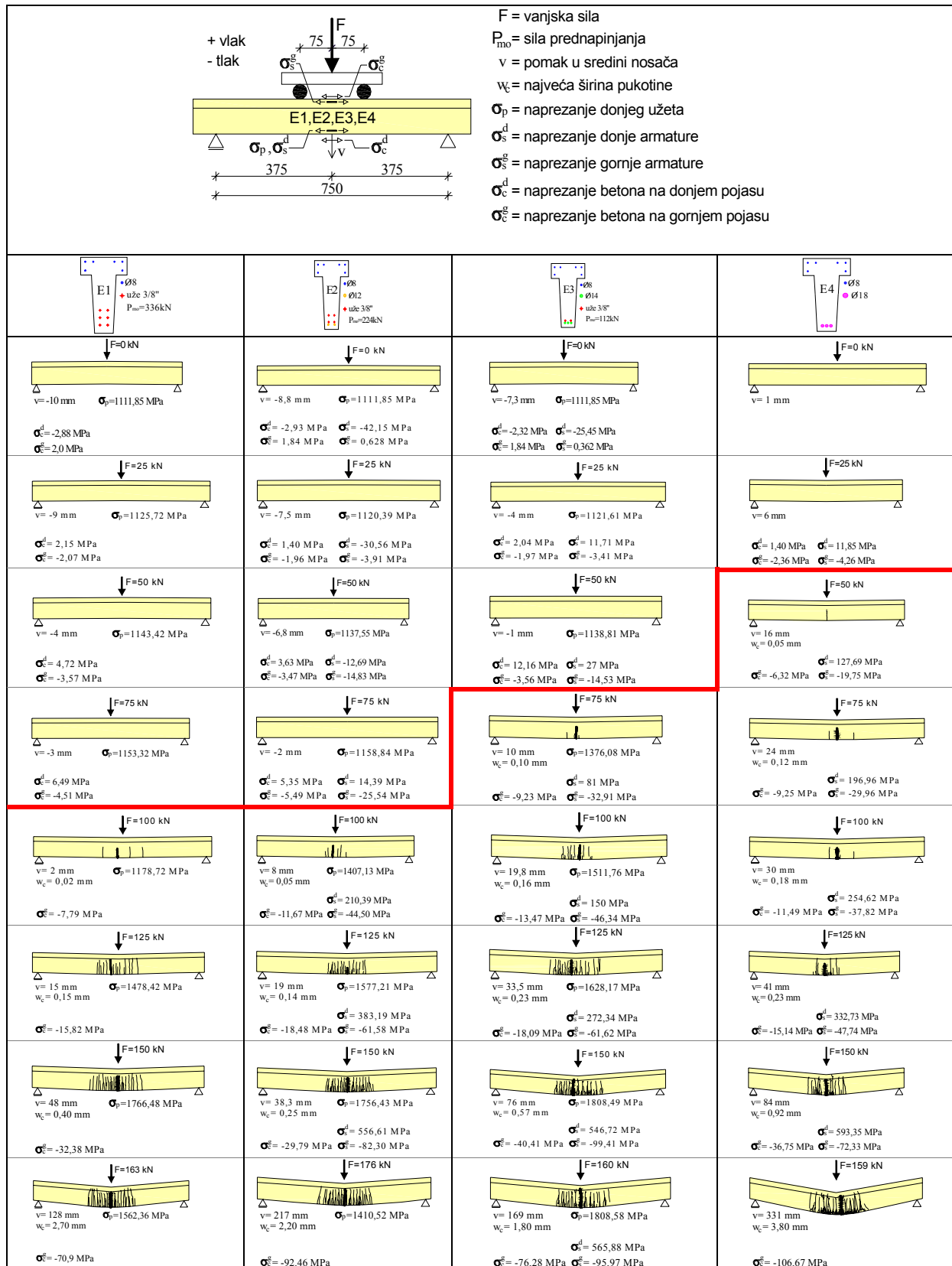
$F=159\text{kN}; w_c = 3,8\text{mm}$

$F_{cr}$ =sila pri pojavi prve pukotine

Slika 14. Položaj i širine pukotina u sredini nosača tip E u ovisnosti o sili F (fotografije)



Eksperimentalna istraživanja prednapetih krovnih nosača



Slika 15. Pomaci, pukotine i naprezanja nosača tip E u ovisnosti o sili F



#### 4. KRATAK KOMENTAR REZULTATA

Na temelju rezultata eksperimenta, mogu se izvesti neki kratki komentari:

- Ponašanje nosača do sloma značajno ovisi o odnosu klasične i prednapete armature.
- Do pojave prvih pukotina, svi nosači su se ponašali linearno elastično. Prirast naprezanja u betonu i armaturi te prirast pomaka bio je linearan.
- Ovisno o stupnju prednapinjanja, pojava prvih pukotina se razlikovala za sve nosače.
- Pojava prvih pukotina uzrokovala je blagu nelinearnost naprezanja u betonu i armaturi te pomacima.
- Od trenutka pojave prvih pukotina do početka tečenja vlačne armature, prirast naprezanja i pomaka je nelinearan.
- Pojavom početka tečenja u prednapetoj ili klasičnoj armaturi u donjem pojasu, došlo je do izrazite nelinearnosti naprezanja i pomaka. U ovom području došlo je do tečenja armature, te iskorištenja betona i čelika.
- Tlačna armatura u gornjem pojasu nosača je iskorištena do oko 15% vlačne čvrstoće.
- Slom svih nosača nastao je tečenjem armature donjeg pojasa i iskorištenjem nosivosti betona. Slom je bio popraćen drobljenjem betona u gornjem pojasu u sredini nosača.

#### 5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i analiza, mogu se donijeti slijedeći zaključci:

- Provedena opsežna i složena eksperimentalna ispitivanja 4 realna nosača većih (realnih) izmjera, dužine 8m, s različitim odnosima prednapete i klasične armature, tj. s različitim stupnjem prednapinjanja, predstavljaju doprinos poznavanju stvarnog ponašanja prednapetih betonskih konstrukcija. Dobiveni rezultati mogu poslužiti za verifikaciju budućih numeričkih modela simulacije ponašanja prednapetih betonskih nosača pod kratkotrajnim statičkim opterećenjem.
- Svi nosači su pokazali približno podjednaku graničnu nosivost, što pokazuje da sigurnost na slom nosača ne ovisi o odnosu prednapete i klasične armature.
- Odnos prednapete i klasične armature utječe na veličinu pomaka nosača. Za nosače armirane samo prednapetom armaturom i većim odnosom prednapete i klasične armature, nosači imaju početno izdizanje. Najmanje veličine progiba imaju nosači armirani samo prednapetom armaturom, a najveće veličine progiba nosači armirani samo klasičnom armaturom. Adekvatnim odnosom prednapete i klasične armature, odnosno veličinom sile prednapinjanja, utječe se na veličine početnih izdizanja nosača te konačnih progiba.
- Odnos prednapete i klasične armature utječe na pojavu, širinu i razmak pukotina u betonu. Stupnjem prednapinjanja  $k \geq 0.5$ , uvelike se poboljšava granično stanje raspucavanja nosača. Za nosače armirane samo prednapetom armaturom sila pri pojavi prve pukotine  $F_{cr}$  ima visoku vrijednost, blisku sili na granici početka tečenja armature  $F_{yp}$ . Kako se smanjuje odnos prednapete armature u odnosu na klasičnu, tako i sila pri pojavi prve pukotine ima manju vrijednost. Najmanju vrijednost dostiže za nosače armirane samo klasičnom armaturom.



## LITERATURA

1. R.Markić:“Utjecaj odnosa prednapete i klasične armature na ponašanje betonskih nosača”, Doktorska disertacija (mentor: prof.dr.sc. Jure Radnić, dipl.ing.građ.), Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, srpanj 2012. godine.
2. Eurokod 2 -- Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004+AC:2008)
3. HRN EN 13369:2004/A1:2008, Opća pravila za predgotovljene betonske elemente (EN 13369:2004/A1:2006)