

# Eksperimentalno ispitivanje nosivosti oštećenih ab stupova

---

Kišić, Goran

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:618037>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-23**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Završni rad br. 237/GR/2015**

## **Eksperimentalno ispitivanje nosivosti oštećenih ab stupova**

**Goran Kišić, 4343/601**

Varaždin, listopad 2015. godine





# **Sveučilište Sjever**

**Odjel za graditeljstvo**

**Završni rad br. 237/GR/2015**

## **Eksperimentalno ispitivanje nosivosti oštećenih ab stupova**

**Student**

Goran Kišić, 4343/601

**Mentor**

Matija Orešković, dipl.ing.građ., predavač

Varaždin, listopad 2015. godine



## **Predgovor**

Danas, kad je pozornost u građevinarstvu usmjerena na nove tehnologije, nove materijale, potrebno je postaviti pitanje: što s objektima izgrađenim od betona normalne čvrstoće, njihovim konstruktivnim elementima, otpornošću, dugotrajnošću, te samom nosivošću. Kod objekata izgrađenih u prošlom stoljeću jasno su vidljivi određeni tipovi oštećenja kod kojih je razvidno da su nastali zbog kombinacije određenih faktora: dugotrajne eksploatacije konstrukcije, dugotrajnog kontinuiranog opterećenja, dinamičkih i na kraju kemijskih utjecaja. Osnovno pitanje kod ovako oštećenih strukturnih dijelova konstrukcije jest: može li te kako dugo taj konstruktivni element i dalje obnašati svoju (projektiranu) nosivu zadaću.

Kod osnovnih strukturnih elemenata takvih konstrukcija (stupovi, grede) i njihovih oštećenja primijećene su određene sličnosti. Te sličnosti je potrebno proučiti, sažeti i ispitati. Ovaj rad se bavi upravo time. Modeliranjem oštećenih elemenata, njihovim ispitivanjem i proučavanjem da bi se došlo do određenih zaključaka koji bi bili korisni pri daljnjem istraživanju oštećenih elemenata.

## **Sažetak**

Cilj rada je eksperimentalno ispitati nosive armiranobetonske elemente – stupove koji su oštećeni tijekom eksploatacije. U tu svrhu će se izraditi modeli ab stupova s unaprijed projektiranim oštećenjima. Ispitivanje će se provesti u zato stvorenim uvjetima, a modeli će biti tlačno opterećeni. Tijekom eksperimenta mijenjat će se veličina oštećenja, ekscentricitet sile te položaj sile u odnosu na površinu poprečnog presjeka modela.

Podaci koji će se obrađivati su veličina naprezanja (sile), deformacije i nosivost ispitanih modela. Potrebno je pronaći na koji način oštećenja i ostali parametri djeluju na ukupnu nosivost elementa.

*Ključne riječi:* ab stup, oštećenje, ekscentricitet, nosivost, naprezanje, deformacija

## Popis korištenih kratica

### Velika latinična slova

<i>A</i>	izvanredno djelovanje
<i>A</i>	ploština
<i>C</i>	konstanta
<i>E</i>	modul elastičnosti
<i>F</i>	sila, djelovanje
<i>G</i>	stalno djelovanje
<i>I</i>	moment tromosti
<i>M</i>	moment (općenito)
<i>N</i>	uzdužna sila
<i>P</i>	sila prednapinjanja
<i>Q</i>	promjenjivo djelovanje
<i>S</i>	unutarnje sile, sile i momenti
<i>V</i>	poprečna sila

### Velika latinična slova s indeksima

$A_c$	ploština betonskog presjeka
$A_s$	ploština presjeka čelika za armiranje u vlačnom području
$A_p$	ploština prednapetog kabla ili kablova
$A_{s1}$	ploština presjeka čelika za armiranje u vlačnom području
$A_{s2}$	ploština presjeka čelika za armiranje u tlačnom području
$A_{sw}$	ploština presjeka poprečne armature
$E_{cd}$	proračunski sekantni modul elastičnosti betona
$E_{cm}$	sekantni modul elastičnosti običnoga betona
$E_s$	modul elastičnosti čelika za armiranje ili čelika za prednapinjanje
$EQU$	ekvivalentnost
$I_c$	moment tromosti površine betonskog presjeka
$M_{Ed}$	proračunski moment savijanja od djelovanja
$N_{Ed}$	proračunska djelujuća uzdužna(aksijalna) sila (vlak ili tlak)
$ULS$	konačna granica stanja



### Mala latinična slova s indeksima

$a$	razmak
$\Delta a$	dodatak za sigurnost koji neki geometrijski podatak umanjuje ili povećava
$b$	ukupna širina presjeka ili širina pojasnice grede presjeka $\Gamma$ , $T$ ili $I$
$d$	proračunska visina (statička visina) presjeka
$b_w$	širina hrpta grede presjeka $\Gamma$ , $T$ ili $I$
$b_{eff}$	sudjelujuća širina pojasnice grede presjeka $\Gamma$ ili $T$
$f_c$	tlačna čvrstoća betona
$f_{cd}$	proračunska tlačna čvrstoća betonskog cilindra(valjka)
$f_{ck}$	karakteristična tlačna čvrstoća betonskog valjka starog 28 dana
$f_{cm}$	srednja tlačna čvrstoća betonskog valjka
$f_{ctk}$	karakteristična osna vlačna čvrstoća betona
$f_{ctm}$	srednja vrijednost osne vlačne čvrstoće betona
$f_p$	vlačna čvrstoća prednapetog čelika
$f_t$	vlačna čvrstoća čelika za armiranje
$f_{tk}$	karakteristična vlačna čvrstoća čelika za armiranje
$f_y$	granica popuštanja čelika za armiranje
$f_{yd}$	proračunska granica popuštanja čelika za armiranje
$f_{yk}$	karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje
$h$	ukupna visina presjeka
$l$	duljina, raspon
$l_{eff}$	proračunski raspon
$s$	razmak spona
$t$	promatrano vrijeme
$u$	opseg presjeka betona ploštine $A_c$
$x$	neutralna osna duljina (visina tlačnog područja)
$z$	krak unutarnjih sila

### Grčka slova s indeksima

$\gamma_s$	parcijalni koeficijent sigurnosti za armaturni čelik ili čelik za prednapinjanje
$\gamma_f$	parcijalni koeficijent sigurnosti za djelovanja bez uzimanja u obzir nesigurnosti modela
$\gamma_g$	parcijalni koeficijent sigurnosti za stalna djelovanja bez uzimanja u obzir nesigurnosti modela

$\gamma_m$	parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstva materijala uzevši u obzir samo nesigurnosti svojstava materijala
$\varepsilon_c$	tlačna deformacija betona
$\varepsilon_{c1}$	tlačna deformacija betona pri najvećem naprezanju betona $f_c$
$\varepsilon_{cu}$	krajnja tlačna deformacija betona
$\varepsilon_{s1}$	relativna deformacija vlačne armature
$\varepsilon_{s2}$	relativna deformacija tlačne armature
$\varepsilon_u$	deformacija armaturnog čelika ili čelika za prednapinjanje pri najvećem tlaku
$\varepsilon_{uk}$	karakteristična deformacija armaturnog čelika ili čelika za prednapinjanje pri najvećem opterećenju
$\mu$	koeficijent trenja između kablova i cijevi
$\rho$	gustoća betona osušenoga u sušilniku u $\text{kg/m}^3$
$\rho_1$	omjer armiranja uzdužnom armaturom
$\rho_w$	omjer armiranja poprečnom armaturom
$\sigma_c$	tlačno naprezanje u betonu
$\sigma_{cu}$	tlačno naprezanje betona pri krajnjoj deformaciji $\varepsilon_{cu}$
$\emptyset$	promjer čelične šipke za armiranje, natege ili cijevi za nategu

#### Mala grčka slova

$\alpha$	kut; omjer
$\beta$	kut; omjer
$\gamma$	parcijalni koeficijent sigurnosti
$\varepsilon$	deformacija
$\lambda$	vitkost
$\mu$	koeficijent trenja
$\nu$	Poissonov koeficijent
$\rho$	gustoća
$\sigma$	normalno naprezanje
$\tau$	posmično naprezanje

# Sadržaj

<b>1. UVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>2. PARAMETRI ISPITIVANJA .....</b>	<b>9</b>
2.1. KJUČNI ČIMBENICI EKSPERIMENTA .....	14
<b>3. MJERNI PRIBOR.....</b>	<b>17</b>
3.1. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE I SVOJSTVA MJERNE OPREME.....	17
3.2. INSTALACIJA TENZOMETRA NA ARMATURNI KOŠ .....	20
<b>4. KONSTRUKCIJA I BETONIRANJE MODELA.....</b>	<b>24</b>
4.1. MODELIRANJE OŠTEĆENJA .....	24
4.2. BETONIRANJE MODELA .....	25
4.3. SVOJSTVA MATERIJALA (BETONA) .....	32
<b>5. PROVEDBA EKSPERIMENTA .....</b>	<b>36</b>
<b>6. REZULTATI ISPITIVANJA .....</b>	<b>38</b>
6.1. ODNOSI NAPREZANJA I DEFORMACIJA, KARAKTER LOMA MODELA .....	38
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>47</b>
<b>8. LITERATURA.....</b>	<b>49</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>50</b>

## 1. Uvod

Stup je tipičan, jednostavan strukturni element, mnogo puta korišten u konstrukciji. Značajan je njegov utjecaj na duktilnost i ukupnu učinkovitost cijele konstrukcije. U posljednjih nekoliko desetljeća mnogi su autori radili različita istraživanja na ab stupovima. U najviše slučaja istraživanja su bila usmjerena na graničnu nosivost elementa, ponašanje stupa pri različitim tipovima naprezanja (tlačno, vlačno, posmično te kombinacije), te uloga i ograničenost armature obzirom na pojavu pukotina i samu nosivost elementa. Posebna se pažnja pridonosi istraživanjima stupova načinjenih od betona visoke čvrstoće ( $\geq 50 \text{ N/mm}^2$ ) zbog sve većih zahtjeva trajnosti te izdržljivosti, posebice u seizmološki nestabilnim područjima.

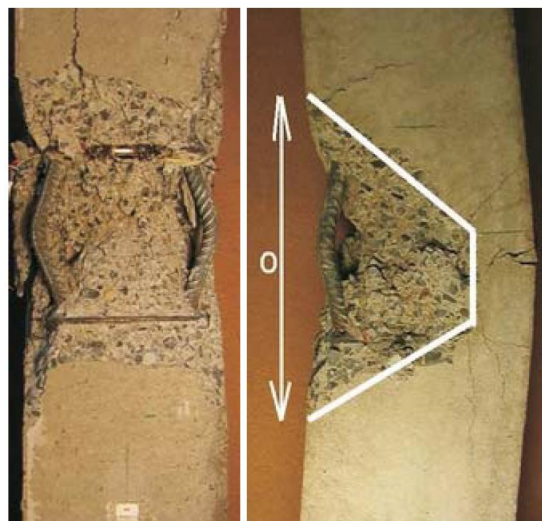
Većina ispitivanih aksijalno opterećenih stupova analizirana je do točke prijelomnog naprezanja (raskida uzorka) uz praćenje pojave i širenja pukotina pri određenom cikličkom opterećenju pa sve do krajnjeg loma.

Cilj prvih istraživanja na betonskim stupovima bio je predložiti dobar analitički model za opisivanje odnosa naprezanja-deformacija. Glavne varijable koje su se uzimale u obzir bile su dimenzije, čvrstoća betona te količina i razmak poprečne armature (vilica).

Ono što je posebno zamijećeno kod pregleda istraživanja jest tip oštećenja kod ispitanih uzoraka nakon loma. Uočeno je da je lom lokalnog tipa, određenog „klinastog“ tipa/izgleda, da se nalazi na ili približno sredini stupa te da je duljina tog oštećenog dijela 20-30 % ukupne duljine stupa.



(a)



(b)

*Slika 1. 1 Karakteristična oštećenja stupova naprezanih aksijalnom silom (Němeček J. i dr)*

No, za razliku od ispitanih primjeraka, primijećeni oštećeni stupovi u praksi i dalje nose, tj. uz sve „na oko“ vidljivo strukturno oštećenje još nisu dostigli granicu popuštanja, tj. prijelomno naprezanje!

Postavljaju se ova ključna pitanja:

- kolika je (još) njihova nosivost?
- koliki je njihov vijek trajanja pod stalnim opterećenjem?
- da li je cijela konstrukcija kritično ugrožena?
- da li je moguća i isplativa sanacija stupova?

Primarni fokus ovog eksperimentalnog programa je proučavanje ponašanja oštećenih armiranobetonskih stupova pod tlačnim opterećenjem. Eksperimentalni program sadrži ispitivanje 15 armiranobetonskih stupova (modela) podvrgnutih centričnoj i ekscentričnoj aksijalnoj sili (kompresiji), postepeno jednolično povećanoj sve do loma, tj. gubitka nosive sposobnosti modela. Detalji o ispitnim uzorcima, svojstvima materijala, izradi standardnih testnih uzoraka kocki i prizmi, detaljima opreme za testiranje i procedura ispitivanja prikazani su u ovom poglavlju.

Zadaća ovog eksperimentalnog ispitivanja jest odrediti stanje naprezanja-deformacija zadanih modela te utvrditi realnu nosivost ispitanih modela. Potrebno je odrediti parametre nosivosti i deformacija tlačno opterećenih eksperimentalnih modela.

Uz ispitivanje eksperimentalnih modela, potrebno je ispitati i parametre materijala koji se ugrađuje, lijevanjem kocki i prizmi, a sve po važećim pravilnicima (Eurokod).

## 2. Parametri ispitivanja

Za eksperimentalno ispitivanje stanja nosivosti, naprezanja-deformacija oštećenih armiranobetonskih stupova opterećenih tlačnom silom izvest će se 15 modela stupova ukupne visine 100 cm. Modeli su kružnog presjeka, promjera 30 cm. Osnovni parametri o kojima ovisi izgled modela i način ispitivanja su:

- dubina oštećenja,  $b$ ,
- ekscentričnost sile,  $e_0$ ,
- kut položaja sile u odnosu na osnovne osi presjeka,  $\gamma$ .

Dubina oštećenja definira karakter i jačinu oštećenosti, dok ekscentričnost i položaj sile definiraju karakter i način opterećenja elementa.

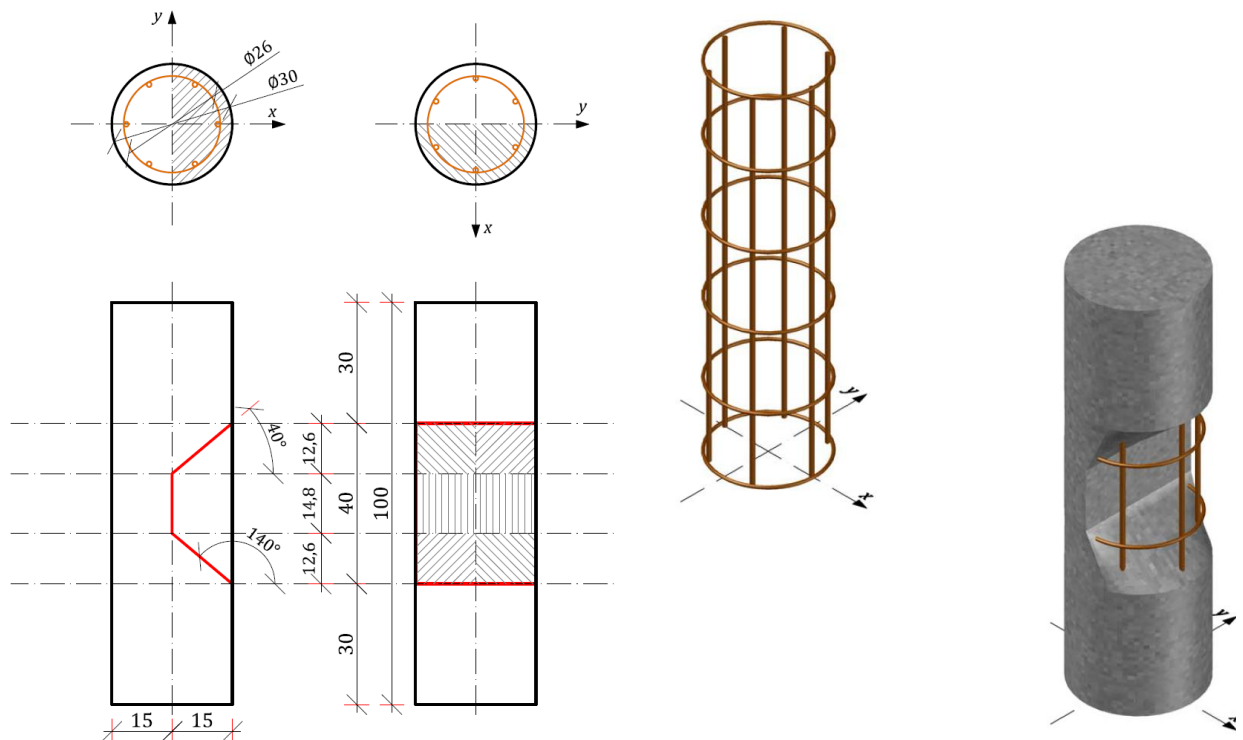
Svi eksperimentalni modeli visine su 100 cm, kružnog poprečnog presjeka promjera 30 cm. Ukupno je planirano 15 komada. Osnovna razlika u geometriji modela jest u dizajniranom oštećenju stupa, koje se nalazi na sredini stupa, a različite je dubine za pojedini model. Planirana su dva tipa (dubine) oštećenja:

oštećenje dubine radijusa  $R$

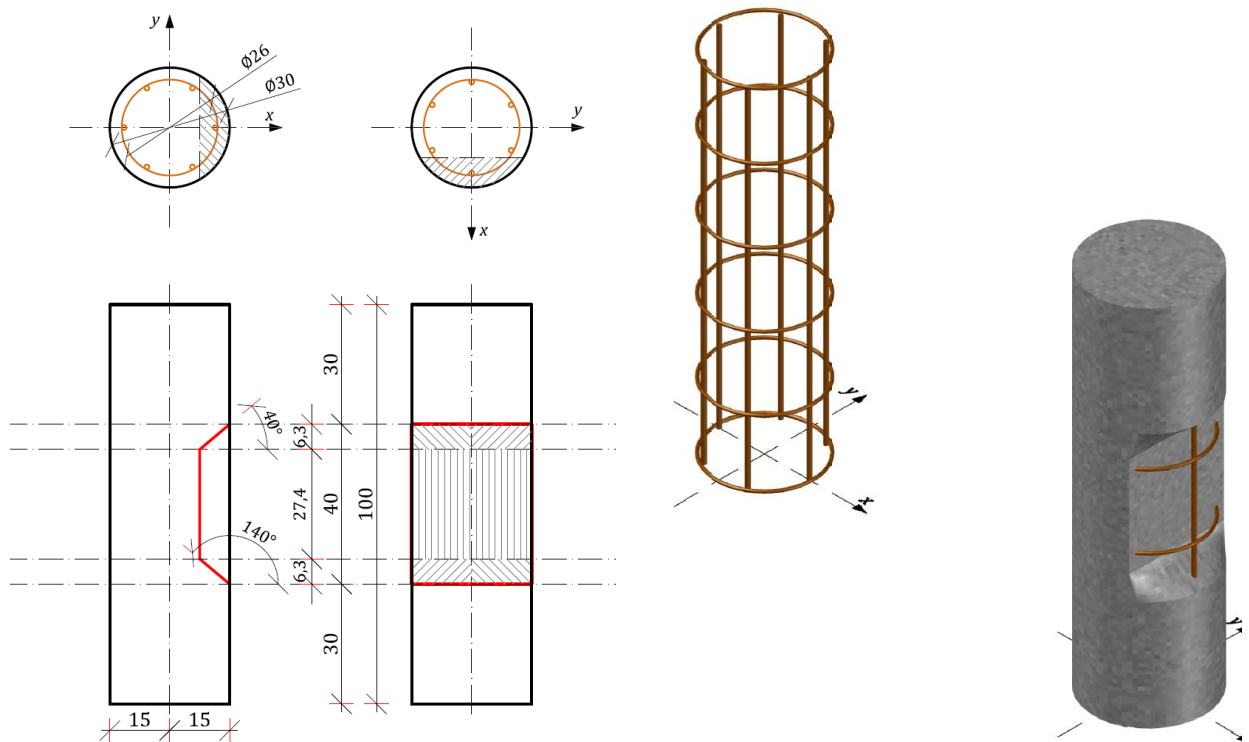
oštećenje dubine polovice radijusa,  $R/2$

model stupa bez oštećenja

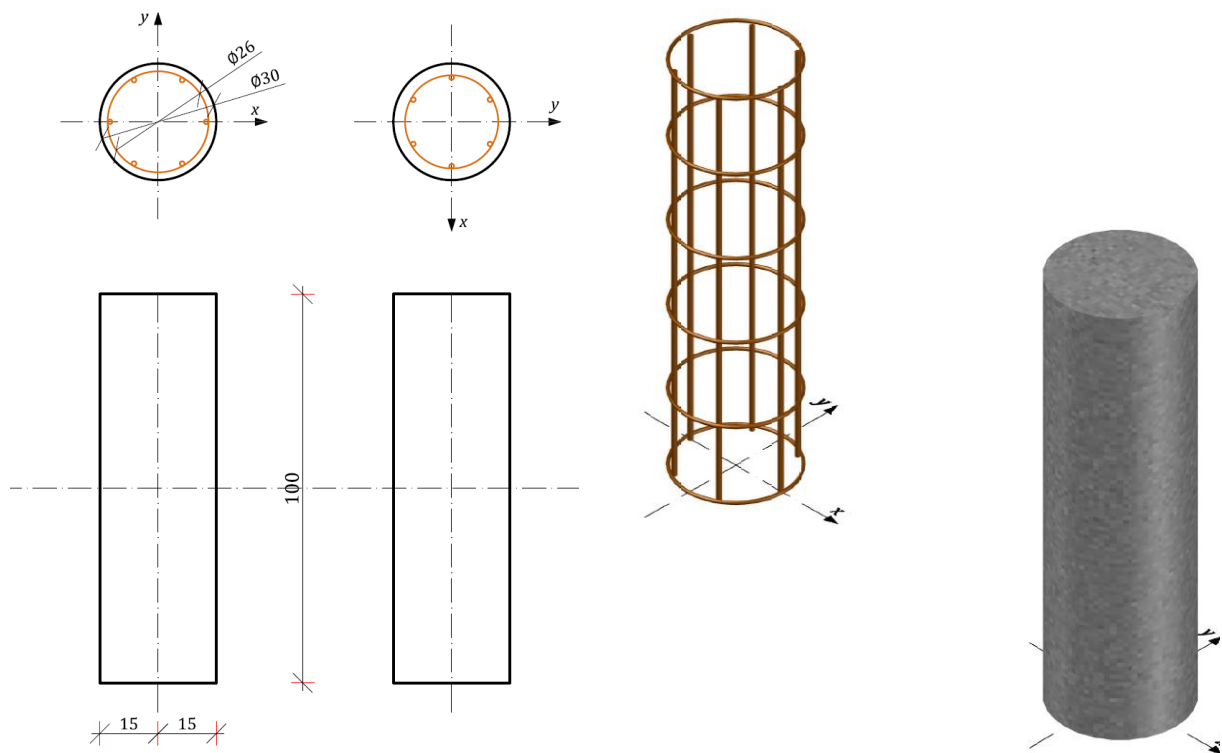
Osnovna tri tipa modela stupa obzirom na dizajnirana oštećenja, prikazani su s dimenzijama na slikama 2.1. – 2.3.



Slika 2. 1 Dizajn eksperimentalnog modela s oštećenjem dubine R



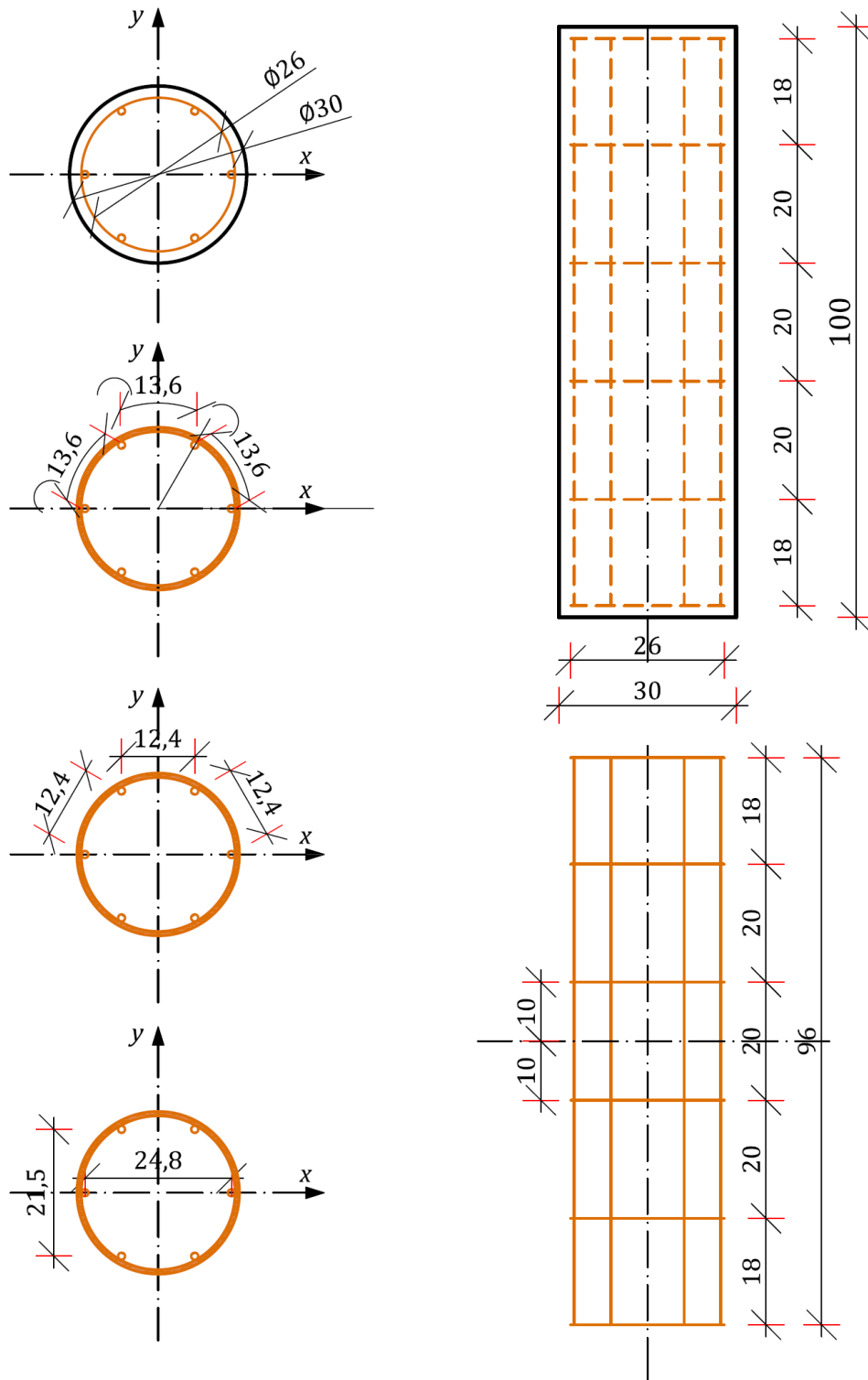
Slika 2. 2 Dizajn eksperimentalnog modela s oštećenjem dubine R/2



*Slika 2. 3Dizajn eksperimentalnog modela bez oštećenja*

Betoniranje će se izvesti betonom klase C 25/30 uz provjeru tlačne čvrstoće na uzetim uzorcima pri betoniranju. Armaturni koš izveden je od klase armature B500, uzdužna armatura profila  $\phi$  12 mm, dok su vilice načinjene od šipaka profila  $\phi$  8 mm. Nacrt armatura vidljiv je na slici 2.4.





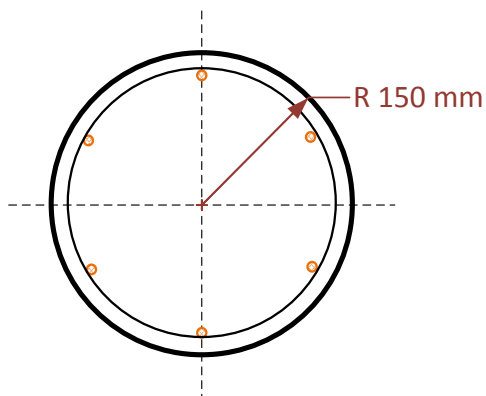
armatura	B500B
UZDUŽNA profil	$\Phi 12$ ( $6\Phi 12$ $6,79\text{cm}^2$ )
VILICE profil	$\Phi 8$ ( $\Phi 260\text{mm}$ , 6 kom)
zaštitni sloj	$c = 2$ cm

profil šipke	l [cm]	kom	$\Sigma l$ [m]	kg
$\Phi 12$	96	$6 \cdot 15 = 90$	88	$0,911/\text{m}$ $\Sigma 79$ kg
$\Phi 8$	$81,7$ ( $\Phi 26\text{cm}$ )	$6 \cdot 15 = 90$	75	$0,405/\text{m}$ $\Sigma 23$ kg

Slika 2. 4Nacrt armature eksperimentalnih modela s tablicama količina

Na odabir dimenzija eksperimentalnih obrazaca najviše ovisi u kojem području vitkosti se stup nalazi. Na slici 2.5(b) prikazan je odabran tip osiguranja krajeva elemenata (rubni uvjeti) na temelju kojeg proračunamo vitkost stupa.

(a)



Armiranje armaturom:

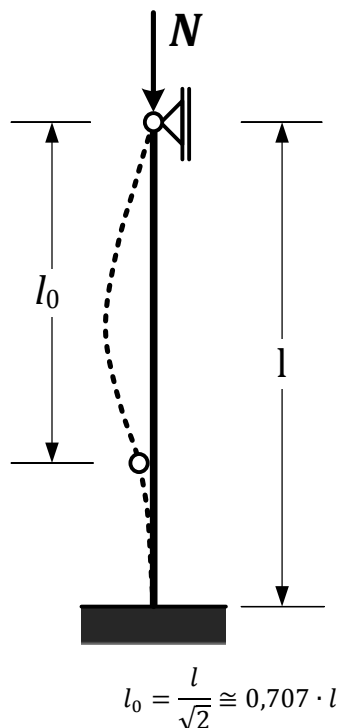
$\Phi 12$  ( $6\Phi 12 \cong 6,79 \text{ cm}^2$ )

Beton C25/30

Armatura B500B

Zaštitni sloj = 3cm

(b)



Slika 2. 5 Osnovne geometrijske karakteristike predloženog stupa

(a) geometrija poprečnog profila, način armiranja

(b) rubni uvjeti te duljina izvijanja

Prema trenutnim europskim normama (EC-2, EN) stupovi se smatraju kratkimi nije potreban proračun po teoriji II. reda ako povećanje momenta savijanja određenog teorijom I. reda zbog deformiranja nije veće od 10%. To je ispunjeno kada je zadovoljen uvjet:

$$\lambda \leq 25(\omega \cdot 0,9) \left( 2 - \frac{M_{01}}{M_{02}} \right) \quad (2.1)$$

gdje je:

$\omega$   $\frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}$ ; ako je  $A_s$  nepoznat,  $\omega$  uzimamo 0,1

$A_s$  površina armature u poprečnom presjeku elementa

$\lambda$  koeficijent vitkosti elementa (vitkost)

$M_{01}, M_{02}$  momenti prvog reda na krajevima

- ako su momenti 0, omjer se uzima 1,0

Provjera vitkosti stupa duljine  $l = 3,0 \text{ m}$ :

$$\lambda = \frac{l_0}{i} \leq \lambda_{max} \quad (2.2)$$

gdje je:

$l_0$  duljina izvijanja elementa

$i = \sqrt{\frac{I}{A_c}}$  polumjer tromosti u smjeru manjeg otpora izvijanja

Uvrštavanjem osnovnih parametara odabranog elementa duljine  $l=3,0\text{ m}$  dobivena je vitkost elementa  $28,0$  a što je manje od  $\lambda_{max} = 28,75$ .

Prema tome, možemo zaključiti da će stup visine  $3\text{ m}$  koji je predviđen za analizu imati vitkost manju od granične, samim time proračun po teoriji II. reda nije potreban, te takav stup možemo smatrati kratkim. Možemo zaključiti da naši testni obrasci mogu biti manje duljine od reprezentativne  $l=3,0\text{ m}$  jer se deformacije od savijanja mogu zanemariti. Zbog velike krutosti elementa na izvijanje, kritična se sila neće moći dostići pa će problem nosivosti biti problem graničnih naprezanja. Do sloma stupa doći će dostizanjem granične sile  $N_{Rd} \equiv N_{Sd}$ .

## 2.1. Ključni čimbenici eksperimenta

Postavljenim konceptom ispitivat će se oštećeni armiranobetonski stupovi kružnog presjeka uz praćenje tri osnovna faktora  $x_i$ :

dubina oštećenja,  $b(x_1)$

ekscentričnost sile,  $e_0(x_2)$

kut položaja sile u odnosu na osnovne osi presjeka,  $\gamma(x_3)$

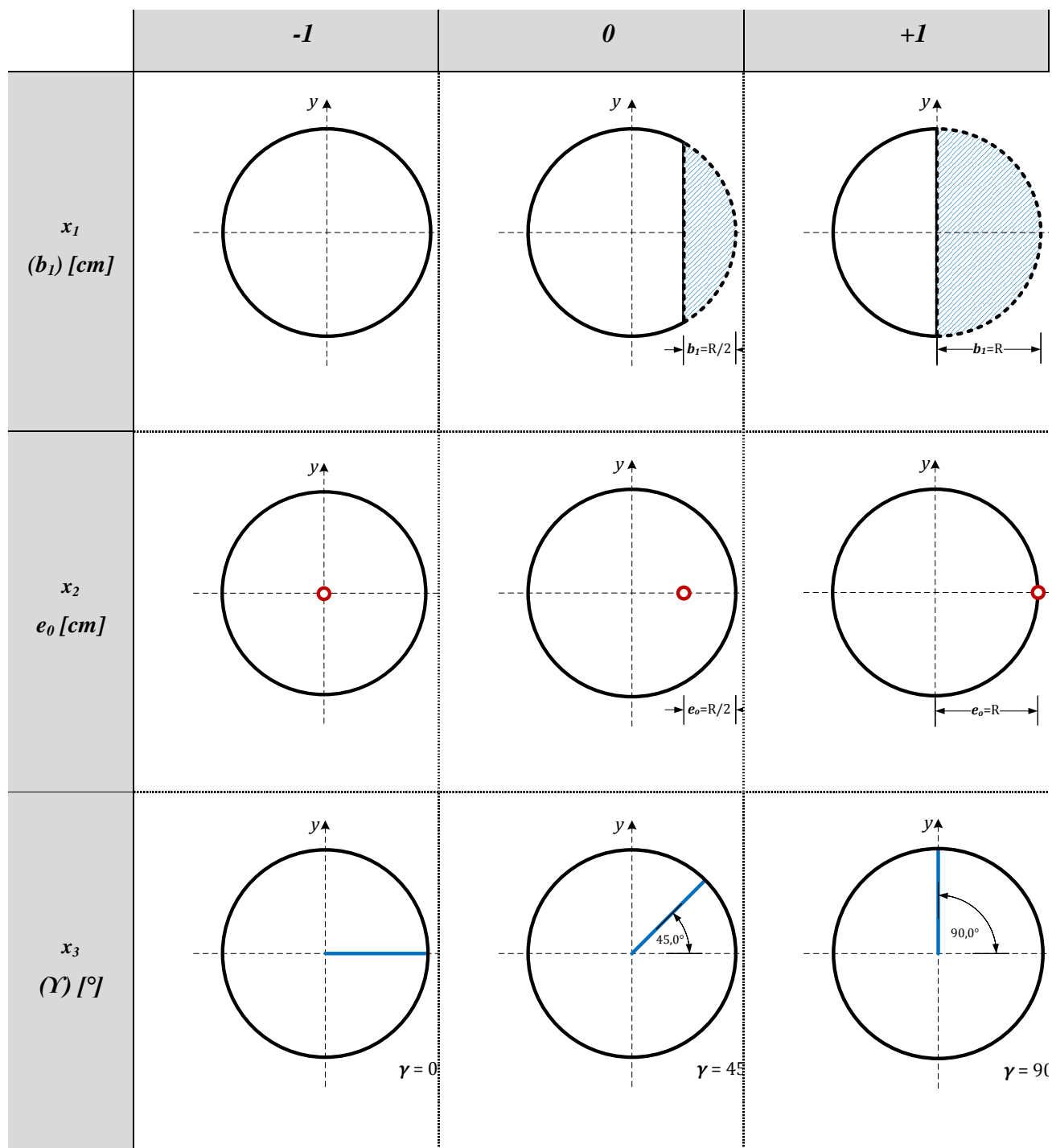
Svaki od osnovnih faktora ispitivat će se u tri izdvojena slučaja  $(-1, 0, +1)$ , tako da matrica planiranja izgleda ovako:

Tablica 2.1 Osnovni slučajevi planiranja eksperimenta

	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>
<b><math>x_1</math></b>	0	$R/2$	$R$
<b><math>x_2</math></b>	0	$R/2$	$R$
<b><math>x_3</math></b>	0	$45^\circ$	$90^\circ$

Svaki planirani slučaj (scenarij) definira promjenu položaja ili geometrije zadanog faktora. Predočeno skicom presjeka modela osnovni elementi planiranja eksperimenta mogu se prikazati na sljedeći način (Tablica 2.2):

Tablica 2.2 Grafički prikaz osnovnih slučajeva



Kombinacijom predstavljenih faktora dobit će se dobar statistički model za daljnju analizu temeljen na mjernim podacima dobivenim eksperimentom. Rezultati eksperimenta koristit će se kao ulazni podaci za analizu, a kako bi time zadovoljili određene statističke potrebe, definirana je matrica plana eksperimenta (Tablica 2.3). Njome je definiran točan izgled svakog eksperimentalnog modela, njegova geometrija te kombinacija djelovanja, tj. način i tip djelovanja tlačnog opterećenja (sile).

Tablica 2.3 Planiranje eksperimenta

Oznaka modela <i>u</i>	Kombinacija slučajeva		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
K1	+1	+1	0
K2	+1	-1	0
K3	-1	+1	0
K4	-1	-1	0
K5	+1	0	+1
K6	+1	0	-1
K7	-1	0	+1
K8	-1	0	-1
K9	0	+1	+1
K10	0	+1	-1
K11	0	-1	+1
K12	0	-1	-1
K13	0	0	0
K14	0	0	0
K15	0	0	0

Ovakvim pristupom dobit će se valjani rezultati za statističku obradu, a što je osobito važno, usporedit će se ponašanje oštećenih stupova (s različitim tipom oštećenja) s punim, neoštećenim stupovima pod stalnim opterećenjem.

### 3. Mjerni pribor

#### 3.1. Tehničke karakteristike i svojstva mjerne opreme

Za mjerenje deformacija koristit će se elektrootporni tenzometri za čelik i beton, različitih dimenzija s pratećom opremom (Slika 3.1).



(a)



(b)

Slika 3. HBM mjerna oprema

a) Kompletna mjerna oprema

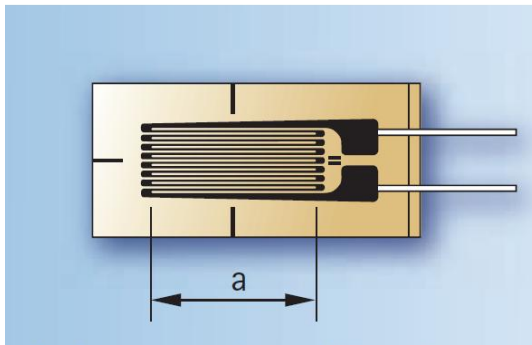
b) HBM univerzalno 8-kanalno pojačalo Quantum-X MX840-A

Specifikacije mjerenja pojačalom dane su u nastavku (Tablica 3.1):

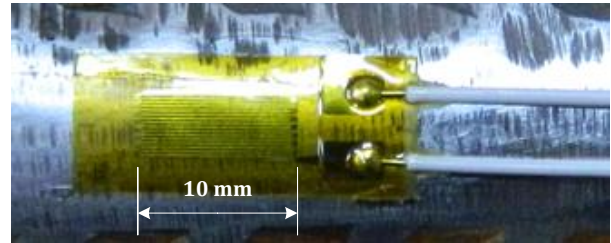
Tablica 3.1 Specifikacije mjerenja na „polumost“ na pojačalu HBM MX840A

5 mV/V CF strain gauge half bridge with 1 V or 2.5 V excitation (AC, effective)		
Accuracy class		0.1
Carrier frequency (sine)	Hz	4,800 ± 1.5
Bridge excitation voltage (effective)	V	1 and 2.5 (± 5 %)
Transducers that can be connected		strain gauge half bridges
Permissible cable length between MX840A and transducer	m	100
Measuring ranges		
at 2.5 V excitation	mV/V	± 5
at 1 V excitation	mV/V	± 10
Measurement frequency range (-3 dB)	kHz	0 ... 1.6
Transducer impedance		
at 2.5 V excitation	Ω	300 ... 1,000
at 1 V excitation	Ω	80 ... 1,000
Noise at 25 °C and 2.5 V excitation (peak to peak)		
with filter 1 Hz Bessel	μV/V	< 0.5
with filter 10 Hz Bessel	μV/V	< 0.7
with filter 100 Hz Bessel	μV/V	< 1
with filter 1 kHz Bessel	μV/V	< 4
Linearity error	%	< 0.02 of full scale
Zero drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	0.1 of full scale
Full-scale drift (2.5 V excitation)	% / 10 K	< 0.1 of measurement value

Za mjerenje deformacija koristit će se dva tipa elektrootpornih tenzometara, tenzometri za čelik te tenzometri za beton. Detaljne specifikacije tenzometara date su u nastavku.



a = aktivna duljina mjerne mreže



(b)

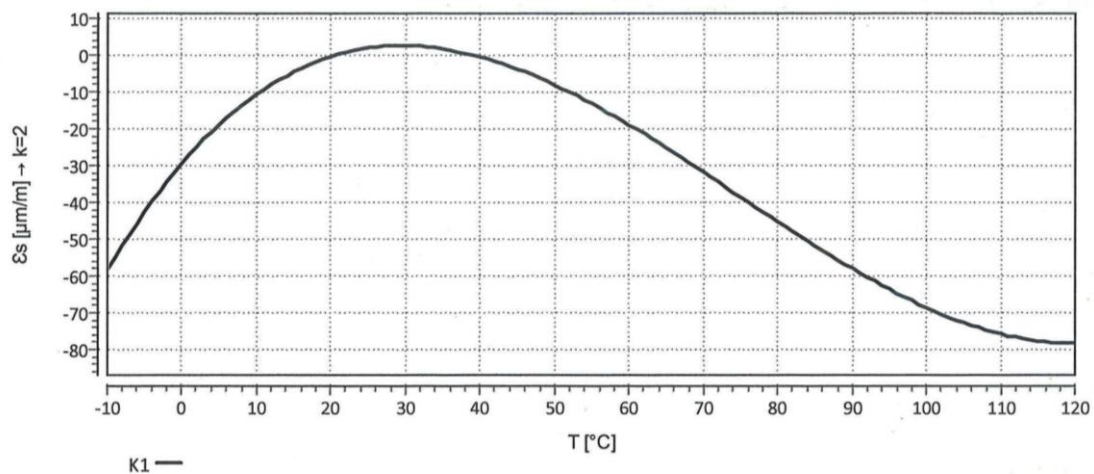
(a)

Slika 3. 2 Shema elotp. tenzometra

a) Shema s označenom duljinom mjerne mreže

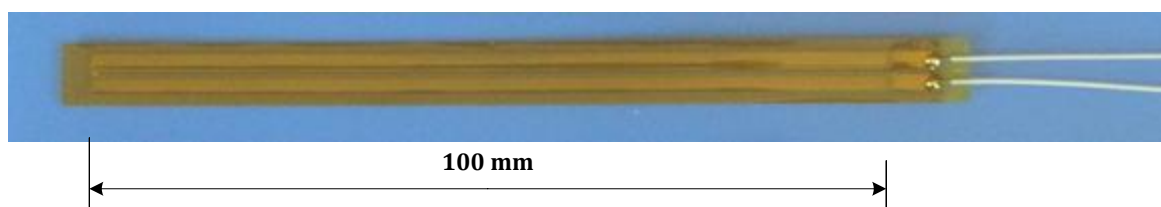
b) Tenzometar 6/120 LY41, mjernog otpora  $120\Omega$  za čelik

Otpor:	$120\Omega \pm 0.35\%$
koeficijent osjetljivosti tenzometra	$2.04 \pm 1.0\%$
Poprečna osjetljivost	0.3%
Tip	6/120 LY41
Temperaturni koeficijenti	$93 \pm 10 [10^{-6}/K]$ ( $-10^{\circ}C \dots +45^{\circ}C$ )
koeficijent toplinskog rastezanja	$\alpha = 10.8 [10^{-6}/K]$



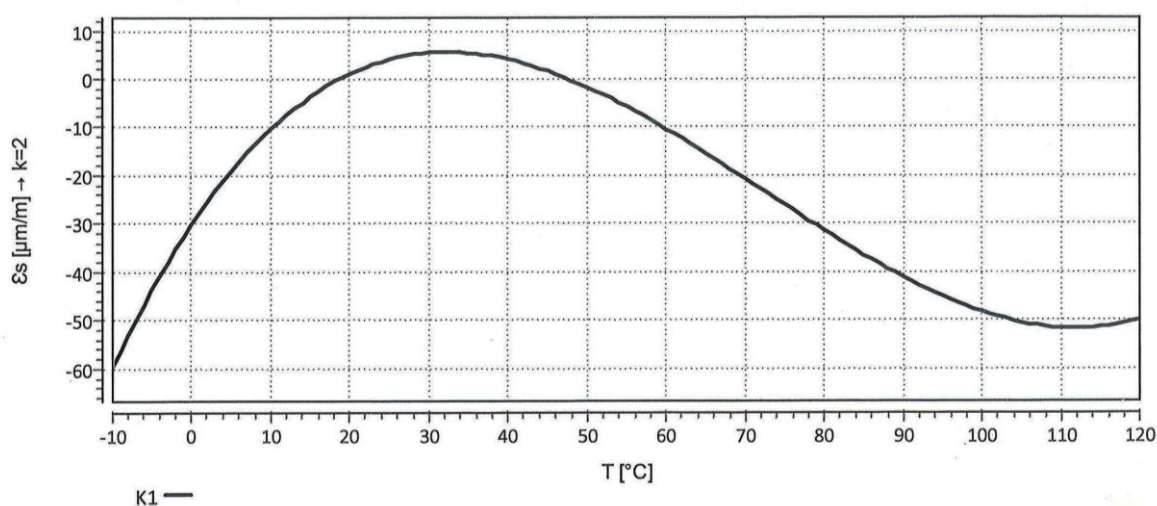
$$\epsilon_s(T) = -16.73 + 1.72 * T - 4.98E-02 * T^2 + 2.23E-04 * T^3 + 0.639 * (T-20) [\mu m/m] \pm 0.30 [\mu m/m/K]$$

Slika 3. 3 Deformacija tenzometra ovisno o promjeni temperature



Slika 3. 4 Tenzometar 6/120 LY41, mjernog otpora 120Ω za beton

Otpor:	$120\Omega \pm 0.35\%$
koeficijent osjetljivosti tenzometra	$2.08 \pm 1.0\%$
Poprečna osjetljivost	$-1.8\%$
Tip	100/120 LY41
Temperaturni koeficijenti	$93 \pm 10[10^{-6}/K]$ ( $-10^{\circ}C \dots +45^{\circ}C$ )
koeficijent toplinskog rastezanja	$\alpha = 10.8[10^{-6}/K]$



$$\epsilon_s(T) = -17.30 + 1.81 * T - 4.89E-02 * T^2 + 2.26E-04 * T^3 + 0.639 * (T-20) [\mu\text{m}/\text{m}] \pm 0.30 [\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}]$$

Slika 3. 5 Deformacija tenzometra ovisno o promjeni temperature

Ljepljenje tenzometara za armaturu obavljat će se jednokomponentnim brzovežećim ljepilom Z70. Z70 je hladno stvrdnjavajuće ljepilo od cyanacrylate. Stvrdnjavanje je moguće samo na vrlo malim ljepilom slojevima i na sobnoj temperaturi pod pritiskom palca. Vlažnost zraka treba biti između 40% i 70% kao katalizator procesa sušenja.

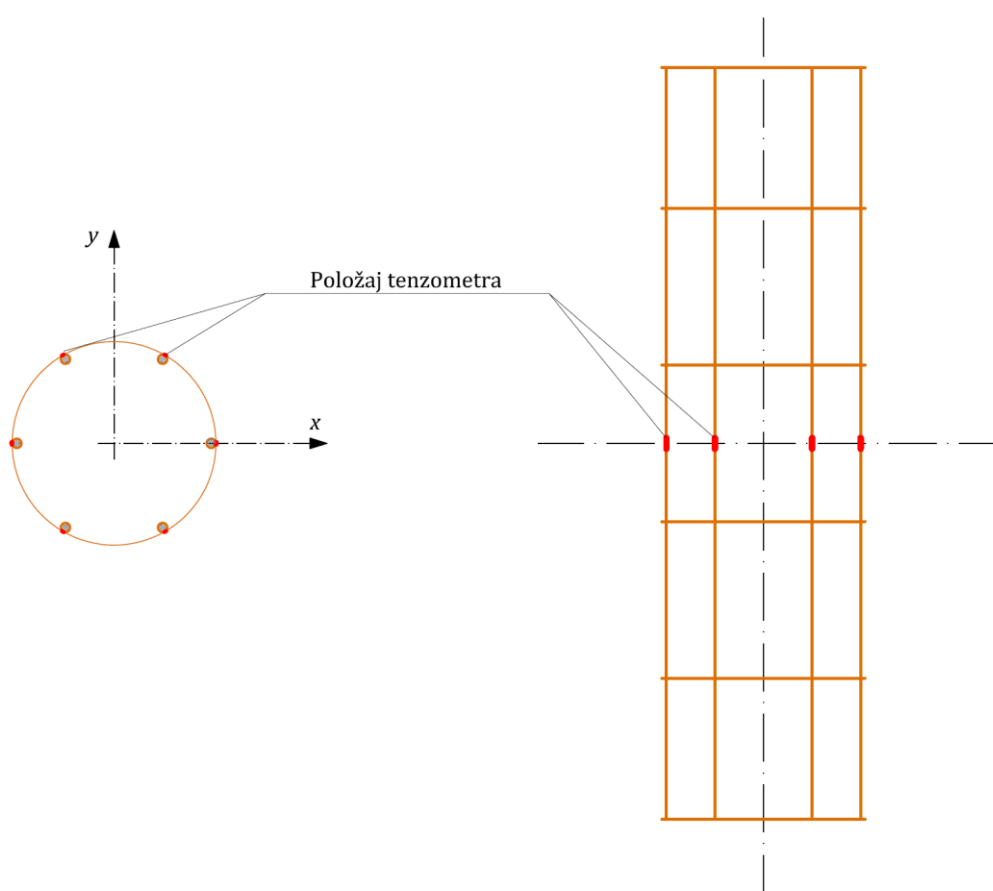
Ljepljenje tenzometara na beton obavljat će se sa dvokomponentnim ljepilom X60 koje se sastoji od tekućeg dijela (B) i praška (komponenta A). Za zaštitu tenzometara od vlage (onih ugrađenih u beton) koristit će se zaštitni kit AK22 na prirodnoj bazi kaučuka. Njegova osnovna prednost je da štiti od udara i vlage a da pritom ne stvrdnjava, tako da ne ometa mjerni proces.



Također će se za potpunu zaštitu koristiti dodatak plastelina, te ABM75, aluminijska folija debljine 0,05 mm obložena ljepljivim gnječivim spojem.

### 3.2. Instalacija tenzometra na armaturni koš

Tenzometre je potrebno instalirati na armaturne šipke prije betoniranja, kako bi se kasnije mogla mjeriti posebno deformacija armature, a onima koji će biti instalirani na beton (nakon betoniranja modela) mjerit će se samo deformacija betona. Na svaku šipku je potrebno zasebno instalirati (postaviti) tenzometar, s vanjske strane šipke (dio šipke prema zaštitnom sloju c). Tenzometri se postavljaju na sredini uzdužnog presjeka armaturnog koša (Slika 3.6) jer je to najkritičniji presjek i po njemu će doći do loma elementa.



Slika 3. 6 Shemapoložaja ljepljenja tenzometra na armaturni koš

Nakon formiranja armaturnih koševa, pošto je armatura rebrasta (B500), potrebno je izbrusiti mjesto na koje će se postaviti tenzometar. Prva faza je grubo brušenje kutnom brusilicom, a nakon toga fino poravnanje mjesta s brusnim papirom. Mjesto za postavljanje tenzometra mora biti što je moguće glađe, bez izbočina i neravnina (Slika 3.7).



(a)



(b)

*Slika 3. 7Izbrušena i pripremljena armaturna šipka*

Tako pripremljenu podlogu potrebno je detaljno do krajnosti očistiti od nečistoća. To se postiže RMS 1 sredstvom za čišćenje koje sadrži aceton i isopropanol. Potrebno je opetovano čistiti površinu do god na krpici za čišćenje primjećujemo prljave tragove. Nakon što je površina detaljno očišćena, takva je spremna za postavljanje, odnosno lijepljenje tenzometra. Na pripremljenu površinu kapne se jednokomponentno brzovežuće ljepilo Z70 te se tenzometar palcem pritisne na površinu. Tako pritisnut drži se cca 1 min i nakon toga pusti. Tenzometar je sada na mjestu, čvrsto zaljepljen (Slika 3.8). Ovisno o tipu tenzometra, razlikujemo one koje je još potrebno zalemiti na podložni terminal (Slika 2.13a) te one za koje terminal nije potreban, već se direktno leme na žice (Slika 2.13b). Nakon što je tenzometar postavljen i spojen žicama, obavezno je potrebno spojiti ga na pojačalo te provjeriti njegovu ispravnost i ispravnost instalacije. Ako je sve u redu, dobijemo graf deformacija tenzometra u realnom vremenu, kao što je prikazano na slici 3.9.



(a)

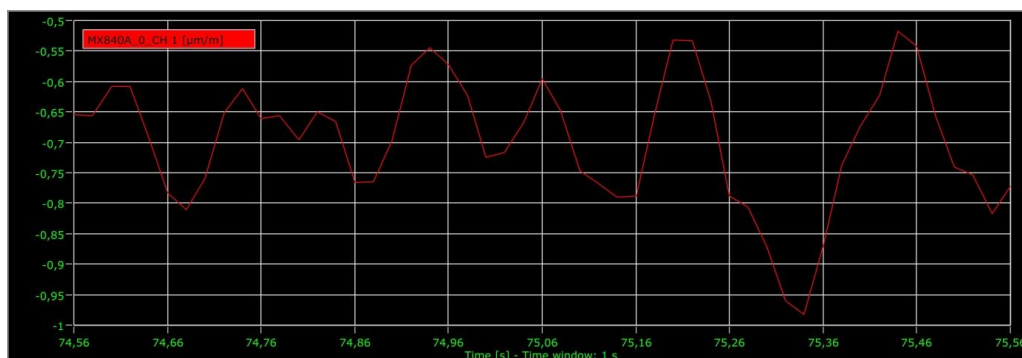


(b)

*Slika 3. 8Tenzometri zaljepljeni na armaturne šipke*

*(a) Tenzometar s podložnim terminalom*

*(b) Tenzometar bez podložnog terminala, direktno spajanje*



Slika 3. 9Graf kretanja deformacija tenzometra u realnom vremenu.

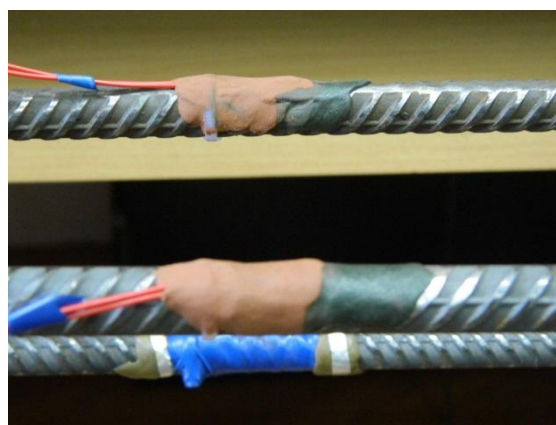
Krivulja na slici 2.14 prikazuje neopterećeni tenzometar, koji ne trpi nikakve deformacije od opterećenja. Deformacije koje su prikazane na grafu posljedica su temperaturnih razlika te vlažnosti zraka. Kada bi linija deformacija bila ravna crta, tada bismo znali da nešto s tenzometrom nije u redu. Ovo je pravilan izgled grafa neopterećenog tenzometra.

Nakon što je tenzometar ispitan i dokazano je da radi pravilno, potrebno ga je dobro izolirati kako bi ga se zaštitilo od mehaničkih oštećenja tijekom betoniranja, ali, što je još važnije, vlage u svježem betonu.

Izolacija i zaštita tenzometra provedena je sljedećim redoslijedom. Prvo je na tenzometar (i spoj žica obavezno) stavljena butilna masa AK22 radi mehaničke zaštite tenzometra te zaštite od vode. AK22 sastav je potpuno na prirodnoj bazi, ni na koji način ne šteti ni ne utječe na mjerne podatke, a njezina posebna prednost je u tome što ne skruti, već ostaje elastična, tako da se može pomicati zajedno s šipkom, tj tenzometrom te tako ne utječe na deformaciju tenzometra (Slika 2.15a). Nakon toga, na AK22 nanosi se sloj plastelina radi dodatne zaštite vodonepropusnosti(Slika 3.10b). Plastelin se tako umota u izolacijsku traku(Slika 3.10a) koja se na krajevima okruži aluminijskom folijom ABM75 radi dodatne vodonepropusne zaštite(Slika 3.11b).



(a)



(b)

Slika 3. 10Proces zaštite instaliranog tenzometra

(a) Nanesena zaštitna masa AK22

(b) Nanos plastelina preko AK22 radi dodatne zaštite od prodora vode



(a)



(b)

*Slika 3. 11 Proces zaštite instaliranog tenzometra*

*(a) Zaljepljena izolacijska traka*

*(b) Krajnja zaštita krajeva izolacijske trake aluminijskom folijom ABM75*

Tako pripremljen tenzometar odlično je zaštićen protiv mehaničkih oštećenja, a što je još važnije, zaštita je vodonepropusna.



*Slika 3. 12 Armaturni koš s instaliranim tenzometrima*

## 4. Konstrukcija i betoniranje modela

### 4.1. Modeliranje oštećenja

Pošto model stupa sadrži armaturu koja nakon ugradnje i betoniranja mora biti u netaknutom stanju, postavilo se pitanje kao dizajnirati i izvesti planirano oštećenje modela, a da pritom armatura, ali i sam beton ne zadobiju deformacije koje bi utjecale na rezultate eksperimenta. Osim toga, izvedbom oštećenja ne smiju se oštetiti instalirani tenzometri na armaturi.

Idejno rješenje pronašlo se u poliuretanskoj pjeni (tzv. pur-pjeni). Pur-pjena najčešće se koristi kao izolacijsko sredstvo kod ugradnje stolarije (prozora, vrata). U ovom slučaju predstavlja idealan materijal za modeliranje oštećenog dijela, jer nakon što ekspandira i stvrdne lako je obradiva, a istovremeno zadovoljavajuće čvrsta i nepropusna.

Armaturni koš s ugrađenim tenzometrima stavio se u okruglu plastičnu kanalizacijsku cijev (koja će kasnije poslužiti kao oplata pri betonaži) te se nakon točnog dimenzioniranja pošpricao pur-pijenom (Slika 4.1a). Važno je pur pijenu dodavati sloj po sloj, nakon što prethodni ekspandira. Time se sprječava „gušenje“ pjene kako ne bi ostala u tekućem stanju. Takvo stanje najbolje je ostaviti min 8 sati da pravilno očvrсне (Slika 2.186).



(a)



(b)

*Slika 4. 1 Modeliranje oštećenja stupa nanošenjem pur-pjene*

*(a) Nanošenje pur pjene*

*(b) Ekspandirana, očvrsla pur pjena*

Nakon što je pur-pjena očvrsla, pristupa se obradi pjene, tj. modelira se oštećenje, kako je dizajnom zamišljeno (Slika 4.2).



*Slika 4. 2Obrada pur pjene na željeni dizajnirani oblik*

Finalni proizvod spreman za betoniranje prikazan je slikom 4.3. Jasno je vidljiv tip oštećenja koje će betoniranjem model stupa poprimiti.



(a)



(b)

*Slika 4. 3Dovršeni model s dizajniranim oštećenjem*

*(a) Model s oštećenjem R/2.*

*(b) Model s oštećenjem R (Nedostatak pjene s vanjske strane nije bitan jer beton neće proći kroz vrhove oštećenja).*

## 4.2. Betoniranje modela

Betoniranje modela izvest će se betonom klase C25/30. Računska tlačna čvrstoća betona iznosi  $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.23 \text{ N/mm}^2$ . Betonira se gotovim industrijskim betonom u pogonu tvrtke „Zagorje-Tehnobeton“, Varaždin, Hrvatska. Kompletni sastav betona dan je u Tablici 4.1.

Tablica 4.1 Sastav betona

Sastojak	Masa agregata		
	%/1m <sup>3</sup>	kg/1m <sup>3</sup>	l/1m <sup>3</sup>
Agregat			
0-4	41,0	727,0	272,4
4-8	20,0	347,0	132,9
8-16	39,0	679,0	259,1
cement		340,0	112,6
voda		148,5	148,5
Zrak			55
Ukupno		2262	1000

Ukupno je dozirano 11,26 % cementa (8-16% ukupnog volumena) te 66,44% agregata (65-75% ukupnog volumena). U betonskoj smjesi korišteni su dodaci, plastifikator GleniumSky 510 te aerant Micro Air 340D koji su dozirani na masu cementa po Tablici 4.2.

Tablica 4.2 Doziranje dodataka betonu

Sastojak	Doziranje na masu cementa [%]	Suha tvar [%]
GleniumSky 510	0,60	24,34
Micro Air 340D	0,20	1,95

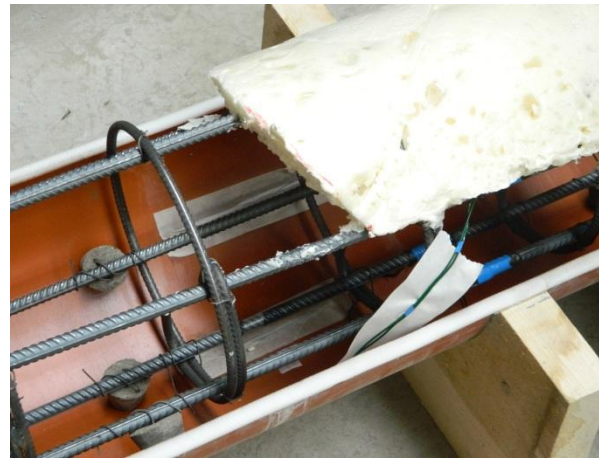
GleniumSKY510 je inovativni superplastifikator na temelju polikarboksilne etera (PCE) polimera. Njime se dobiva kvalitetna betonska mješavina, s ubrzanim razvojem čvrstoće te proširenom primjenjivošću, a sve bez sekundarnih, negativnih efekata.

Planirano je istovremeno na dan betonirati po 4 modela stupa, svaki put uzimajući po 3 testna uzorka kocki i 3 testna uzorka prizmi. Kocke su dimenzija 15 × 15 × 15 cm dok su prizme dimenzija 15 × 15 × 60 cm. Jedan dio kocki i prizmi ispitivat će se 28 dana nakon betoniranja, a drugi dio na dan ispitivanja modela stupa.

Za ovaj slučaj betoniranja izvedena je oplata od okruglih kanalizacijskih cijevi promjera  $\phi 300$  mm. Cijev je raspiljena na dva dijela radi lakše montaže armaturnog koša, prvenstveno zbog tenzometarskih žica koje je bilo potrebno zalijepiti po unutarnjoj površini oplata (Slika 4.4). Nakon toga oplata je zatvorena i dobro pričvršćena metalnim prstenima kako bi gotov model zadržao pravilan poprečni presjek po cijeloj svojoj duljini (Slika 4.5).



(a)



(b)

*Slika 4. 4 Priprema armaturnog koša za betoniranje*

*(a) Formirana oplata (prepiljena radi lakše montaže).*

*(b) Armaturni koš pripremljen u oplati. Tenzometarske žice zalijepljene na unutarnju površinu oplata.*



(a)



(b)

*Slika 4. 5 Formirana oplata spremljena za betonažu*

*(a) Obodno pričvršćivanje oplata*

*(b) Pogled u unutrašnjost oplata – armaturni koš na mjestu.*

Betonira se industrijski spremljenim betonom klase C25/30 spremljenim i miješanim u silosima tvrtke „Zagorje-Tehnobeton“. Beton se lagano strojno upuštao u oplatu kako se ne bi oštetili tenzometri. Za uklanjanje zraka iz betonske smjese koristio se strojni vibrator koji se montirao na posebnu armaturnu šipku radi točnijeg rada te da bi se spriječila oštećenja tenzometra i žica (Slika 4.6).





(a)



(b)

*Slika 4. 6 Betoniranje pripremljenog modela uz vibriranje*

Nakon dovršetka betoniranja, vrh modela ručno se izravnao zidarskom žlicom.



*Slika 4. 7 Poravnanje vrha stupa zidarskom žlicom*

Istovremeno uz betoniranje eksperimentalnih modela, uzeti su betonski uzorci (kocke i prizme) radi kasnijeg ispitivanja tlačne čvrstoće ugrađenog betona (Slika 4.8). Uzorci su uzeti za svako betoniranje posebno, po 3 kocke i 3 prizme te su skladišteni u vlažnoj komori kako bi zadovoljili svim uvjetima tijekom kasnijeg ispitivanja. Ispitivanja i provjera čvrstoće na uzorcima (koja se također provodila) nisu dio ovog Diplomskog rada.



(a)



(b)

*Slika 4. 8 Uzimanje uzoraka kocki i prizmi prilikom betoniranja stupova*

*(a) Kalupiranje te vibriranje uzoraka*

*(b) Skladištenje uzoraka u vlažnoj komori*

Dva dana nakon betoniranja oplata je maknuta te se gotov model stupa izvadio. Tada je ručno maknuta pur-pijena koja je predstavljala oštećenje te je stup kompletno očišćen (Slika 4.9)



(a)



(b)

*Slika 4. 9 Zabetoniran model izvađen iz oplata*

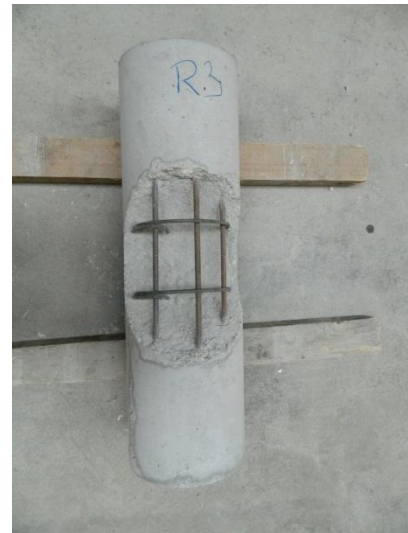
*(a) Model s pur-pjenom na mjestu oštećenja*

*(b) Čišćenje pur-pjene*

Nakon uklanjanja pur-pjene dobiveni su modeli stupova s oštećenjem kako je planirano prvotnim dizajnom i planom (Slika 4.10)



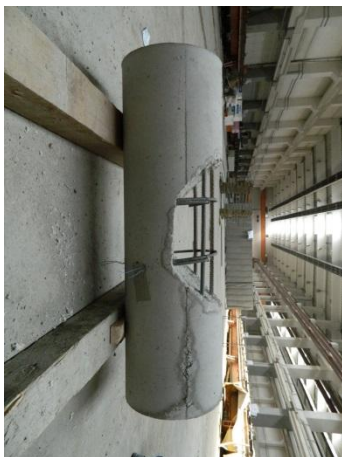
(a)



(b)

*Slika 4. 10 Zgotovljen model stupa s izvedenim oštećenjem*

Može se zaključiti da je oštećenje na modelima ispalo kako je i zamišljeno prvotnim dizajnom, dimenzije i nagibi oštećenja odgovaraju nacrtima, a samo oštećenje izgleda realno, te niti jedan dio stupa nije oštećen u procesu. U daljnjem slijedu slika prikazan je po primjerak modela s različitim tipovima oštećenja.



(a)



(b)



(c)

*Slika 4. 11 Tri tipa oštećenja modela stupa*

*(a) Model s oštećenjem R*

*(b) Model s oštećenjem R/2*

*(c) Model bez oštećenja*



*Slika 4. 12 Usporedni prikaz sa strane tri tipa oštećenja modela*



*Slika 4. 13 Usporedni prikaz sprijeda tri tipa oštećenja modela*

### 4.3. Svojstva materijala (betona)

Kod svakog betoniranja uzeta su po 3 uzorka kocki 15×15×15 cm i po 3 uzorka prizmi 15×15×60 cm, sve u skladu s važećim normama. Ideja je da se od svake serije uzoraka jedan dio ispita 28 dana od betoniranja (u skladu s pravilnikom) a drugi dio pri ispitivanju pripadajućih modela/stupova. Tablica s detaljima uzoraka dana je u nastavku.

Tablica 4.3 Popis uzoraka

Betoniranje	Popis modela/stupova	Oznaka uzorka kocki	Oznaka uzorka prizmi
I. BETONAŽA	R-1, R-2, R-3	K-I_1, K-I_2, K-I_3	P-I_1, P-I_2, P-I_3
II. BETONAŽA	R-4, O-1, O-2, O-3	K-II_1, K-II_2, K-II_3	P-II_1, P-II_2, P-II_3
III. BETONAŽA	O-4, R/2-1, R/2-2, R/2-3, R/2-4, R/2-5	K-III_1, K-III_2, K-III_3	P-III_1, P-III_2, P-III_3
IV. BETONAŽA	R/2-6, R/2-7	K-IV_1, K-IV_2, K-IV_3	P-IV_1, P-IV_2, P-IV_3

Da bi se uzorci kocki i prizmi lakše povezali s eksperimentalnim modelima, modeli su nazvani po tipu oštećenja (R, R/2, O), dok su uzorci nazvani prema tipu (kocka/prizma) te označeni rednim brojevima redosljedom betoniranja.

Ispitivanje uzoraka kocki i prizmi provedeno je u laboratoriju za beton tvrtke „Zagorje-Tehnobeton“, Varaždin, Hrvatska. Kocke su ispitane u automatskoj mehaničkoj preši (Slika 4.14) koja daje automatske podatke na ekran. Ručno se može regulirati tempo nanošenja sile, kao i intenzitet.



*Slika 4. 14 Automatska elektronička preša „Form-test“.*

Kako bi dobili što više podataka iz ispitivanja kocke, na prešu je dodatno instalirana mikroura koja će bilježiti pomake cilindra tijekom nanošenja sile (Slika 4.15)

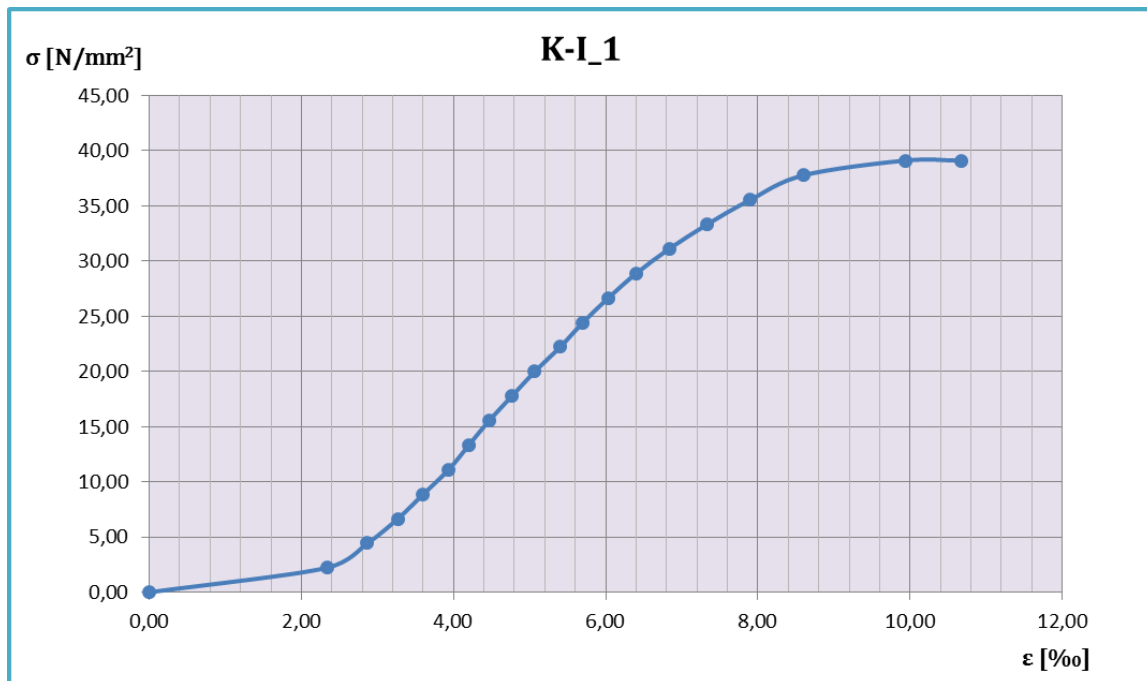


*Slika 4. 15 Instalirana mikroura za praćenje pomaka/deformacija*

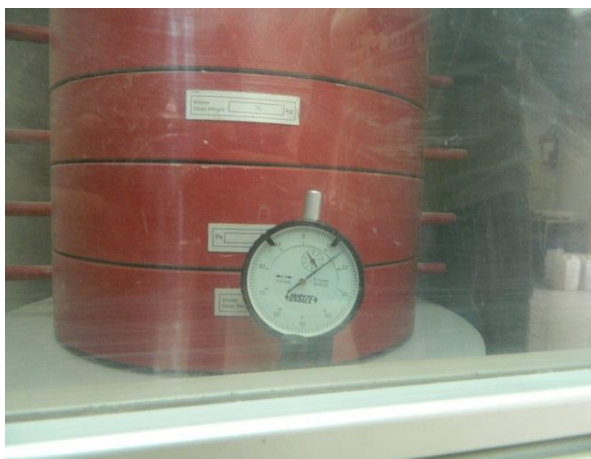
Na taj način dobit će se realni podaci stanja naprezanja-deformacija betonske kocke te konstruirati radni dijagram betona. ispitivanje probne kocke K-I\_2 prikazano je Tablicom 4.4 te dijagramom na slici 4.16.

*Tablica 4.4 Podaci ispitivanja probne kocke K-I\_2*

испытание пробы K-I_2				
P [kN]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta l$ [mm]	$\Delta l$ [m]	$\epsilon$ [%]
0,00	0,00	0,0000	0,000000	0,00
50,00	2,22	0,3500	0,000350	2,33
100,00	4,44	0,4300	0,000430	2,87
150,00	6,67	0,4900	0,000490	3,27
200,00	8,89	0,5400	0,000540	3,60
250,00	11,11	0,5900	0,000590	3,93
300,00	13,33	0,6300	0,000630	4,20
350,00	15,56	0,6700	0,000670	4,47
400,00	17,78	0,7150	0,000715	4,77
450,00	20,00	0,7600	0,000760	5,07
500,00	22,22	0,8100	0,000810	5,40
550,00	24,44	0,8550	0,000855	5,70
600,00	26,67	0,9050	0,000905	6,03
650,00	28,89	0,9600	0,000960	6,40
700,00	31,11	1,0250	0,001025	6,83
750,00	33,33	1,1000	0,001100	7,33
800,00	35,56	1,1850	0,001185	7,90
850,00	37,78	1,2900	0,001290	8,60
880,00	39,11	1,4900	0,001490	9,93
880,00	39,11	1,6000	0,001600	10,67



Slika 4. 16  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagram ispitivanja probne kocke K-I\_2



(a)



(b)

*Slika 4. 17 Ispitivanje probne kocke K-I\_2*

*(a) Tijek ispitivanja uz praćenje deformacija*

*(b) Puknuta probna kocka nakon ispitivanja*

Usporedbom dobivenih tlačnih čvrstoća ispitanih kocki možemo zaključiti da razlika koja postoji u vrijednostima je minimalna i prihvatljiva, dok beton klase C 25/30 pokazuje čvrstoća od cca 40 N/mm<sup>2</sup>. Veća čvrstoća od 30 je normalna i prihvatljiva, a rezultat je aditiva u beton.



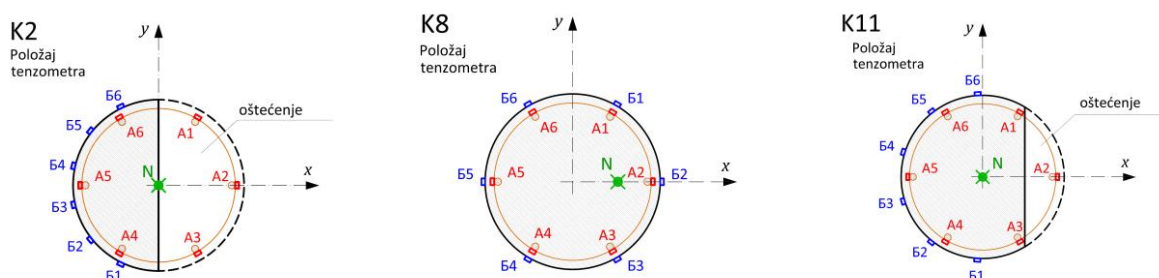
## 5. Provedba eksperimenta

U ovom poglavlju sažeto je prikazano ponašanje koncentrično i ekscentrično tlačno opterećenih oštećenih stupova na temelju autorovih opservacija tijekom provedbe testa, te snimljenih podataka mjerenja. Tipično ponašanje, uključujući skraćenje pri aksijalnom opterećenju, naprezanje i relativna deformacija zasebno betona a zasebno armaturnih šipki, kao i tip sloma (otkazivanja nosivosti) detaljno je prikazano u ovom poglavlju.



Slika 5.1 Postava aparature te priprema za početak ispitivanja

Na svaku šipku s vanjske strane zaljepio se na prije pripremljenu podlogu tenzometar. Ukupno 6 tenzometra postavilo se na armaturni koš u srednjem presjeku (uzdužnom) koša (slika 5.1). To je najkritičniji presjek u kojem se očekuje lom modela. Nakon betoniranja i konačne izrade modela, također će se na beton instalirati (zaljepiti) tenzometri, tako da će gotovi modeli i spremni za ispitivanje izgledati kako je prikazano na slici 5.2.



Slika 5.2 Shema modela za ispitivanje s označenim položajem tenzometara, oštećenjem i vanjskom silom (opterećenjem)

Sila se nanosi u razmacima od 50 kN, nakon čega se nekoliko minuta (cca 3) ostaje na toj sili te nakon toga nastavlja povećanje za sljedećih 50 kN. Deformacije se očitavaju u realnom vremenu preko tenzometara instaliranih na armaturu i beton (6 + 6 komada).

Nanošenje sile nastavlja se sve do gubitka nosivosti, odnosno pucanja modela. Tom prilikom očitava se maksimalna sila (nosivost elementa) nakon čega se daljnjim nanošenjem sile nastavlja deformacija (već raspucalog elementa). Daljnja deformacija poglavito je vidljiva u području oštećenja (lokalno savijanje šipki).

U većini slučajeva očitavanja deformacija nakon maksimalnog opterećenja nisu zabilježena u dijagramima, zbog eksplozivnog otkazivanja nosivosti modela.

## 6. Rezultati ispitivanja

Maksimalna nosivost zabilježena je kod centralno opterećenog neoštećenog modela (model K4 – 2100 kN), dok najmanju nosivost, prema očekivanjima ima model s najvećim oštećenjem i najvećim ekscentrom opterećenja (K1).

Rezultati provedenog eksperimenta prikazani su sljedećom tablicom (Tablica 6.1).

Tablica 6.1 Rezultati ispitivanja tlačno opterećenih ab modela

Oznaka modela	Kombinacija	Nosivost [kN]	Tlačna čvrstoća [MPa]	N/N <sub>ULT</sub>
K 1	+1 +1 0	530	21,09	0,25
K 2	+1 -1 0	550	17,51	0,26
K3	-1 +1 0	1000	39,79	0,48
K4	-1 -1 0	2100	44,56	1,00
K5	+1 0 +1	850	27,06	0,40
K6	+1 0 -1	850	27,06	0,40
K7	-1 0 +1	1430	45,52	0,68
K8	-1 0 -1	1400	44,56	0,67
K9	0 +1 +1	1000	39,79	0,48
K10	0 +1 -1	955	38,00	0,45
K11	0 -1 +1	1500	47,75	0,71
K12	0 -1 -1	1650	52,52	0,79
K13	0 0 0	1500	49,75	0,71
K14	0 0 0	1550	49,34	0,74
K15	0 0 0	1400	44,56	0,67

### 6.1. Odnosi naprezanja i deformacija, karakter loma modela

Tijekom ispitivanja 15 različitih modela primijećene su određene sličnosti pri ponašanju tijekom nanošenja i povećanja sile. Najveći utjecaj na karakter loma modela imala je dubina (veličina) oštećenja te ekscentricitet vanjske sile.

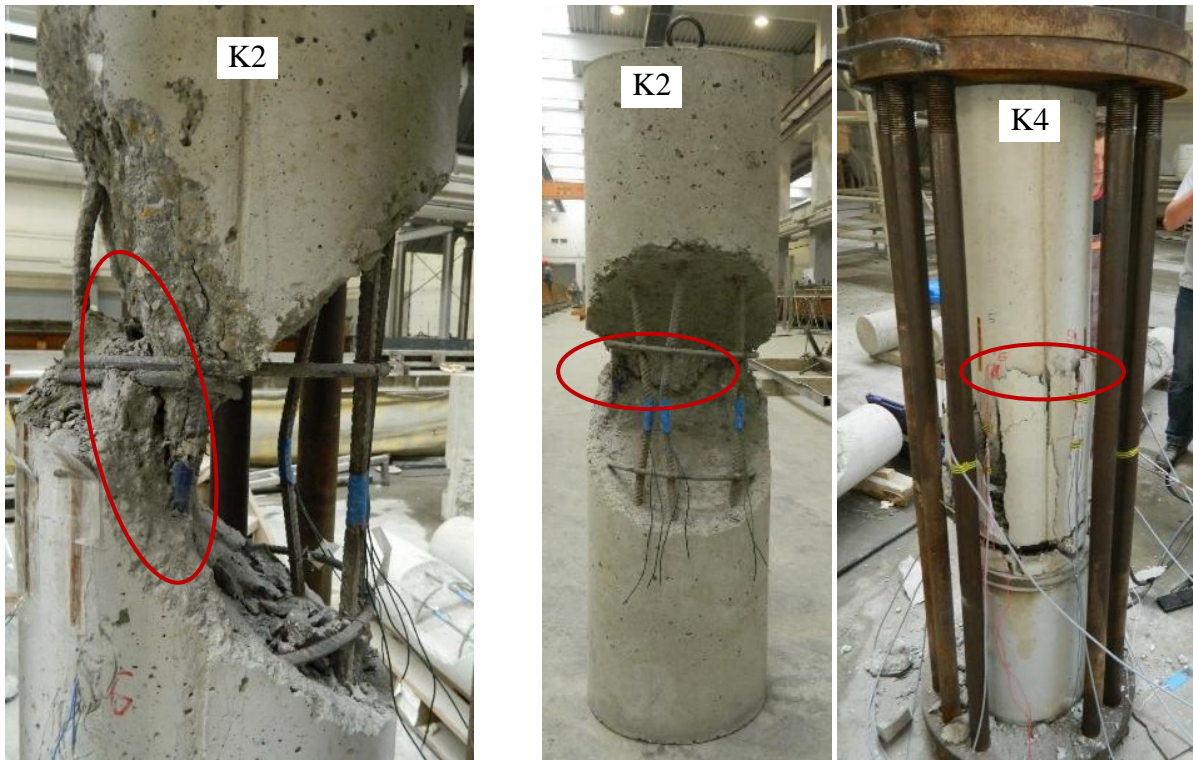
Dubina oštećenja utjecala je na samu nosivost modela. Tako su obrasci s najvećim oštećenjem R imali nosivost 27-43% u odnosu na neoštećene obrasce. Taj prostor između 27-43% dalje ovisi o položaju vanjske sile. Obrasci s oštećenjem R/2 pokazali su najveću ovisnost nosivosti o položaju vanjske sile. Njihov omjer nosive sile kretao se od 48 do čak 93% u odnosu na model bez oštećenja. Takav tip oštećenja (dubina oštećenja) javlja se kao najčešći slučaj u

praksi, tako da u tom slučaju najveću pažnju treba pridodati položaju vanjske sile, odnosno ekscentricitetu sile.

### ***Centralno naprezani modeli***

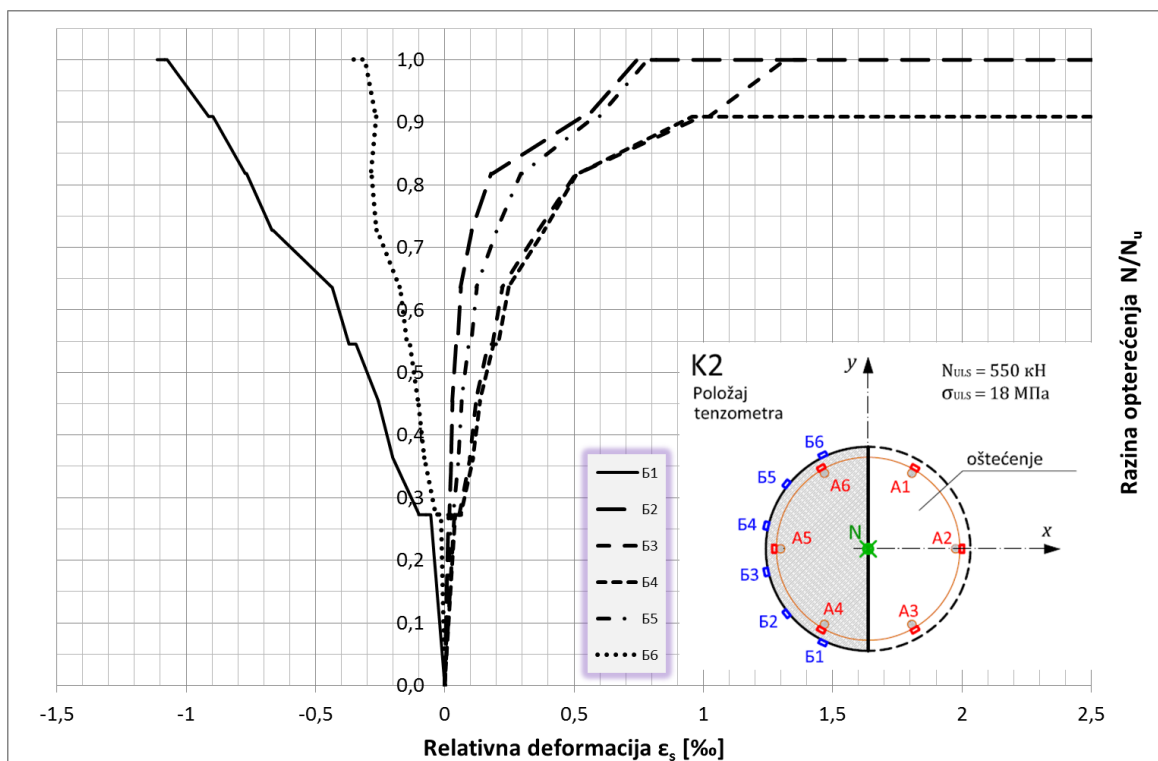
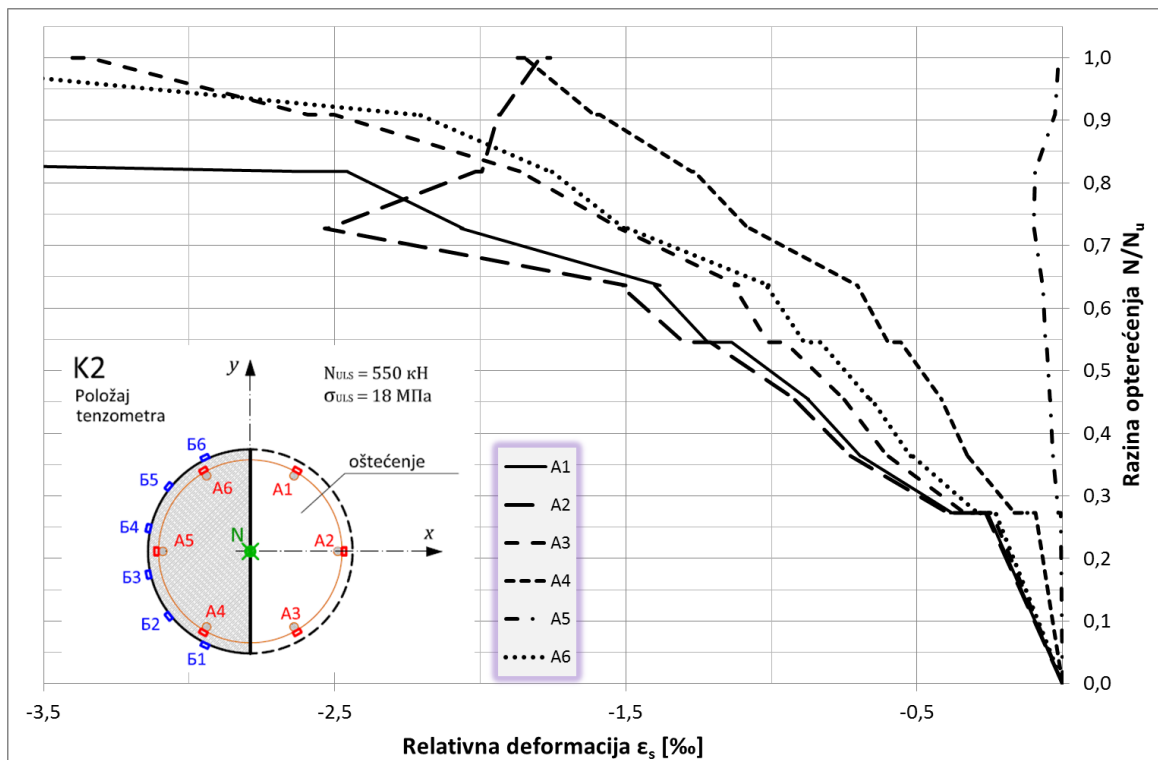
Koncentričnim opterećenjem ukupno su ispitana 4 modela (K2, K4, K11 i K12) od čega su po jedan bez oštećenja i s oštećenjem R, dok su dva modela oštećenja R/2.

Centralno naprezani modeli, kao što je i očekivani imaju najveću nosivost. Smanjenje njihove nosivosti najviše ovisi o tipu oštećenja. Cijeli presjek je tlačno opterećen.



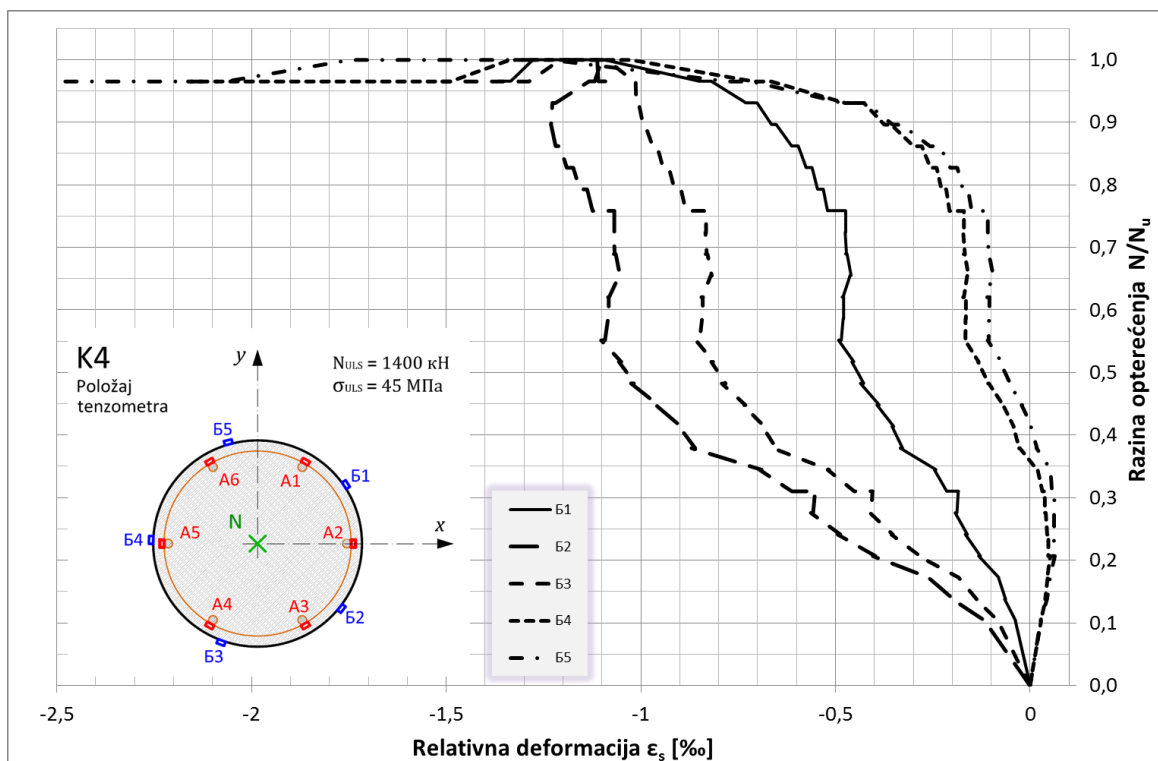
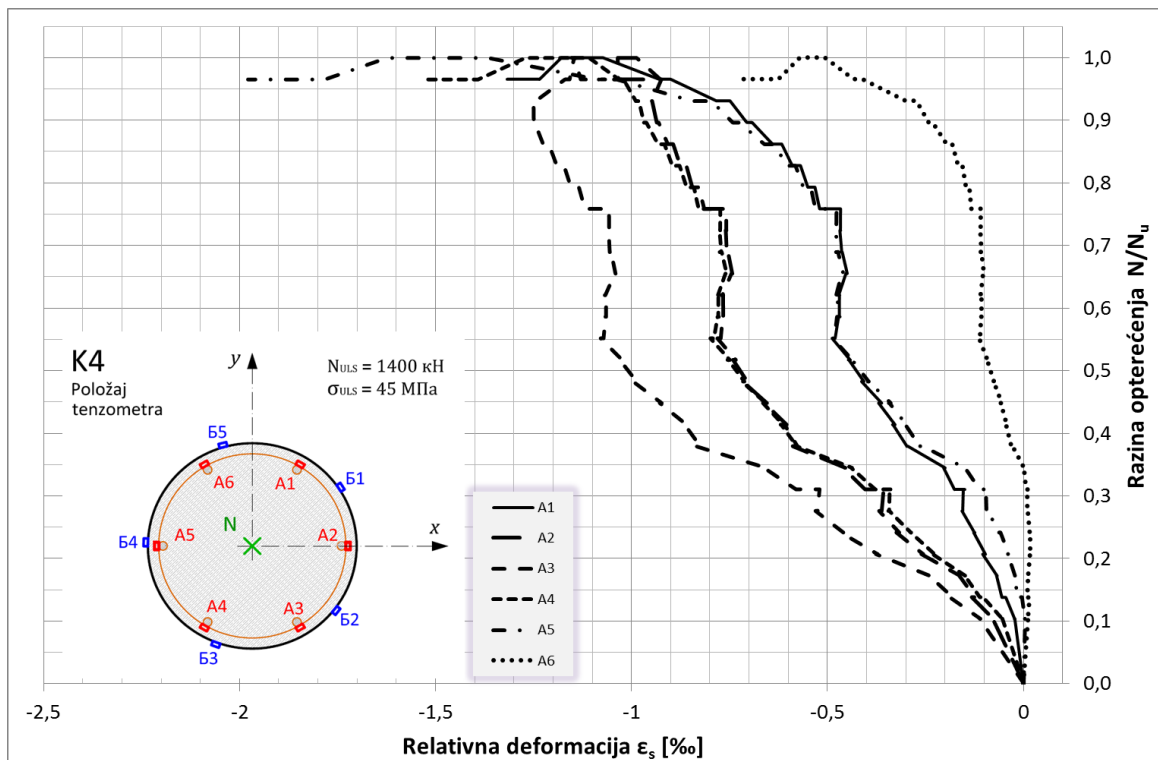
*Slika 6. 1Lom elementa u sredini uzdužnog presjeka*

Do gubitka nosivosti dolazi preko betona, odnosno armatura ne trpi maksimalna naprežanja jer presjek nije vlačno naprežan.



Slika 6. 2Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K2

Na dijagramu modela K4 lijepo se vidi kako deformacije armature prate deformaciju betona, što potvrđuje zajednički rad betona i armature (jedna od osnovnih pretpostavki betonskih konstrukcija).



Slika 6. 3Dijagram naprezanje-deformacija ispitnog modela K4

Tijekom eksperimenta te uvidom u dobivene podatke, moglo se zamijetiti:

- rezidualna nosivost ovisi najviše o tipu (dubini) oštećenja zbog samostalnih šipki koje nisu spojene s betonom
- kod modela s oštećenjem R rezidualna nosivost je najmanja, lokalno izvijanje šipke počinje dosta rano, već kod 0,5-0,6  $N/N_u$

- kod oštećenja R/2 najviše trpi samostalna šipka A2, početkom njezinog izvijanja blizu smo nosivosti stupa (peak loada)

- kod neoštećenih stupova nema vidljivih oštećenja sve do cca 0,9-0,95 Nu Nakon toga slijedi gubitak nosivosti te pucanje (spalling) betona uz nastavak lokalnog izvijanja šipki prema van. U tom dijelu rezidualna nosivost ima najveću ulogu te kod ovakvih modela je i najdulje trajala, što je i logično.

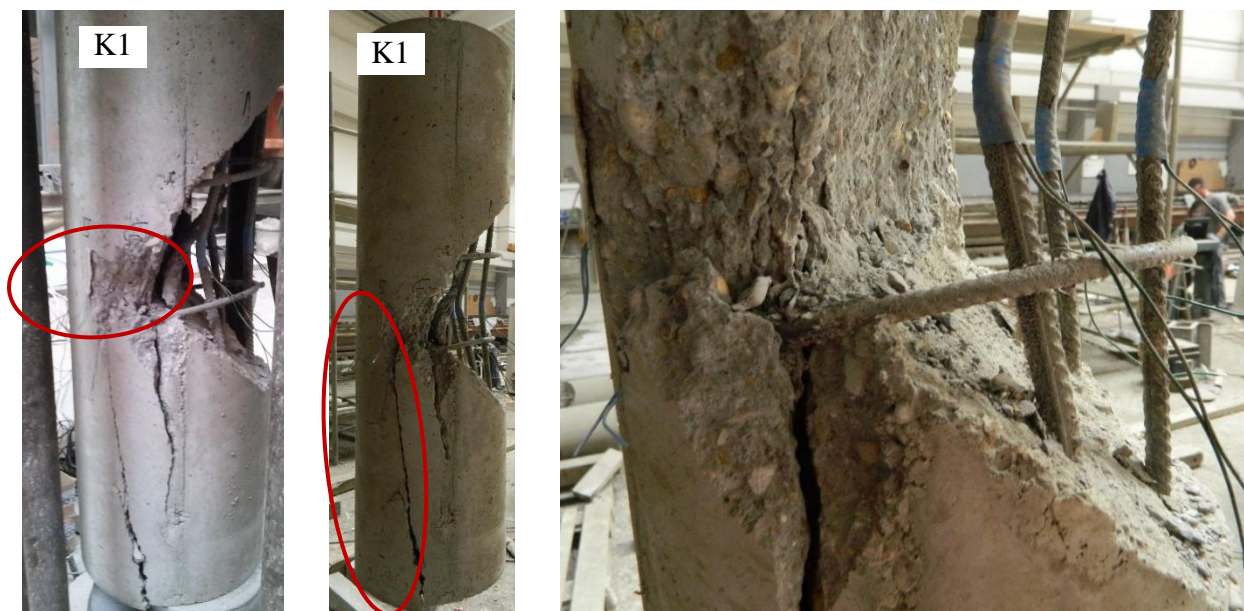
### ***Ekscentrično naprezani modeli***

Ekscentricitet sile se pokazao kao osnovni faktor (uz oštećenje) kod nosivosti stupova. Povećanjem ekscentriciteta znatno se smanjuje nosivost elementa, a što je još važnije, kritični poprečni presjek (u sredini modela) razdvojen je na tlačno područje i vlačno područje. Što je ekscentricitet veći, dolazi do većeg pomaka neutralne osi i smanjenja tlačne zone, što nikako ne pogoduje stupu pri nosivosti (neiskorištenost površine presjeka).

U slučajevima manjeg ekscentriciteta (R/2) nosivost elementa se smanjuje do 30% u odnosu na centralno opterećene modele.

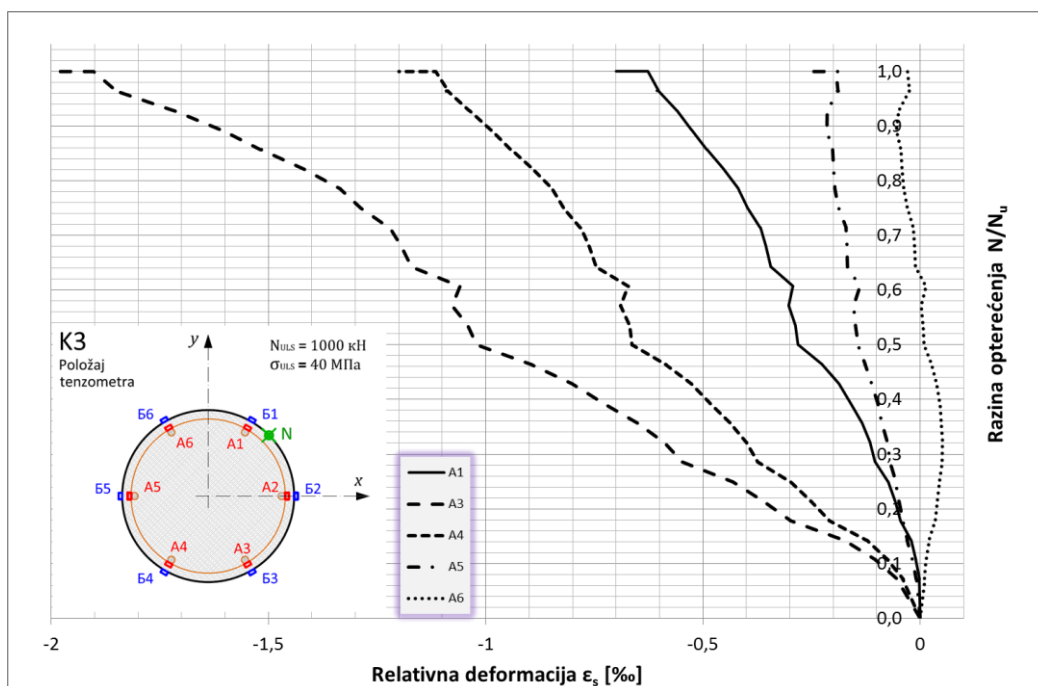
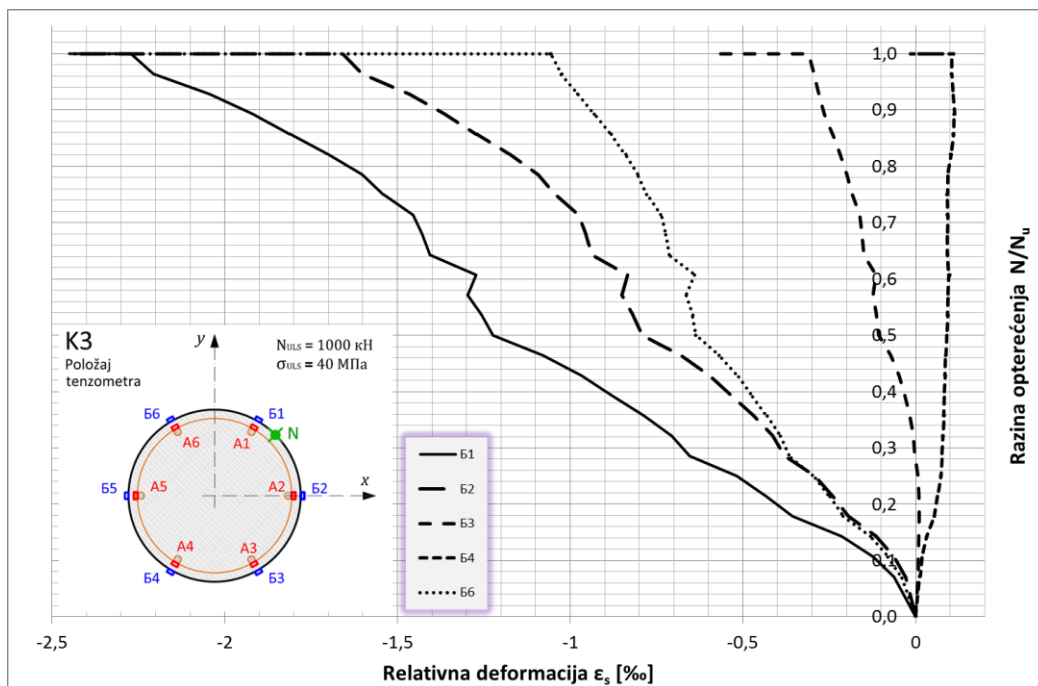
Na sljedećoj slici vidljiva je pojava vlačnih pukotina, odnosno kod loma elementa jasno je vidljiva linija koja razdvaja tlačnu i vlačnu zonu.

Na dijagramima se može primijetiti izvijanje armature (posebno one u oštećenju, „ogoljele“) koje nastaje puno ranije nego što dođe do gubitka nosivosti elementa.



*Slika 6. 4Slomljeni model stupa K1*

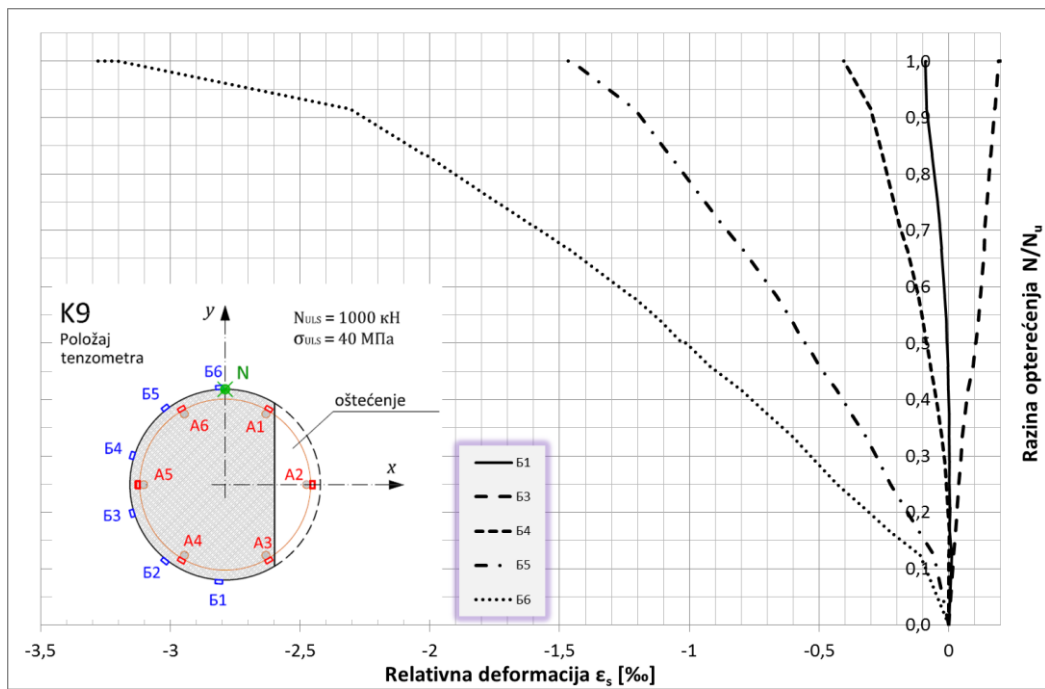
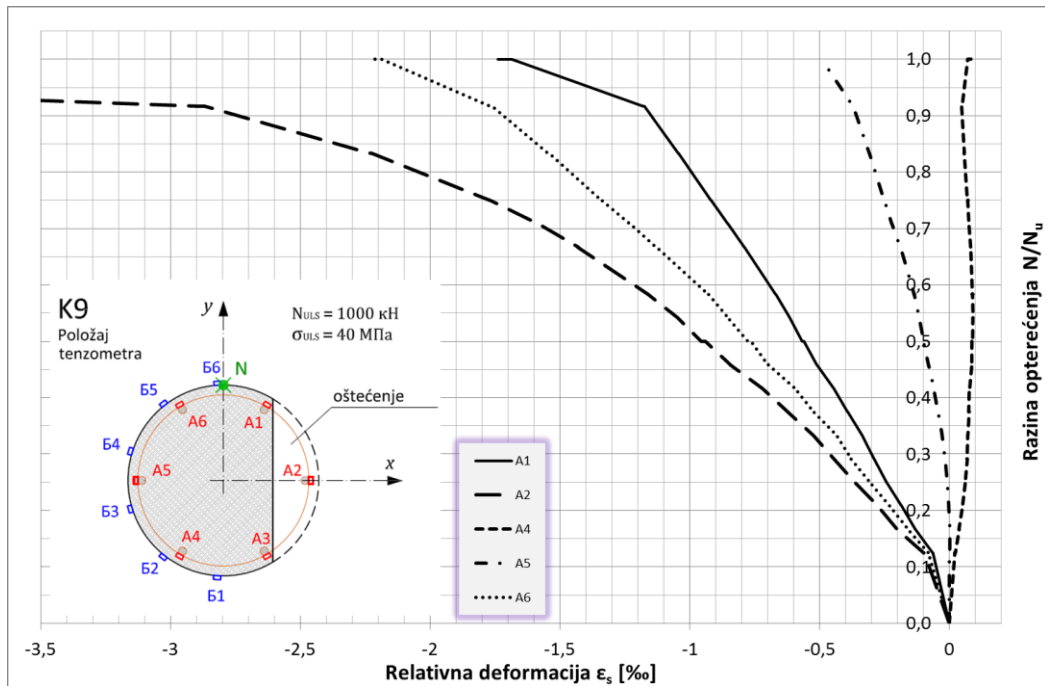
## Neoštećeni modeli



Slika 6. 5Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K3

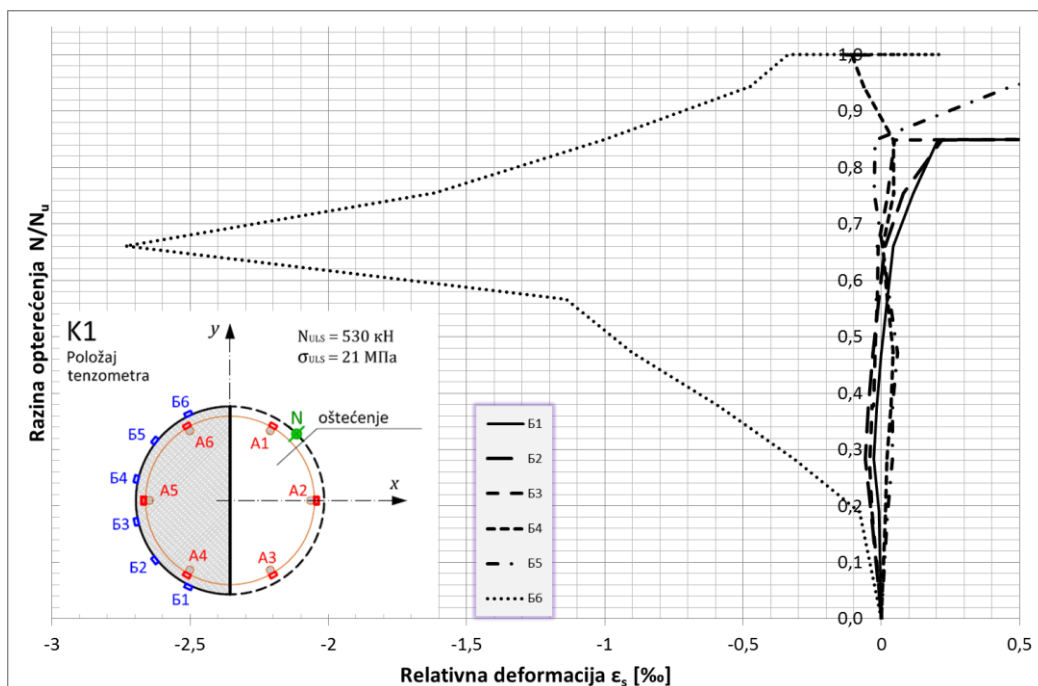
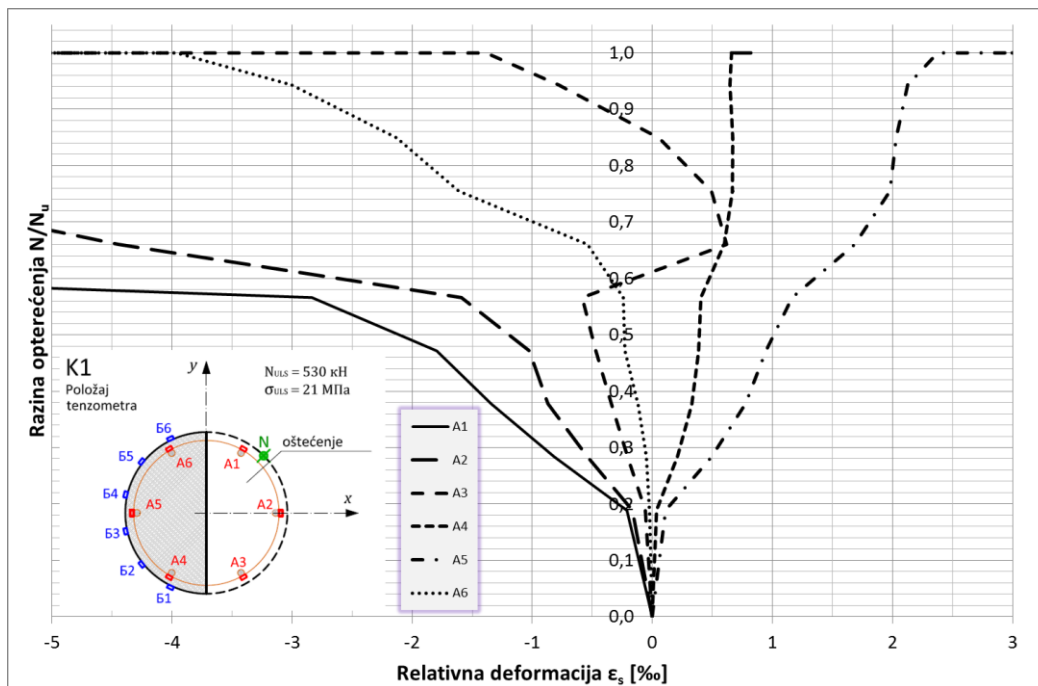


## Modeli oštećenja R/2

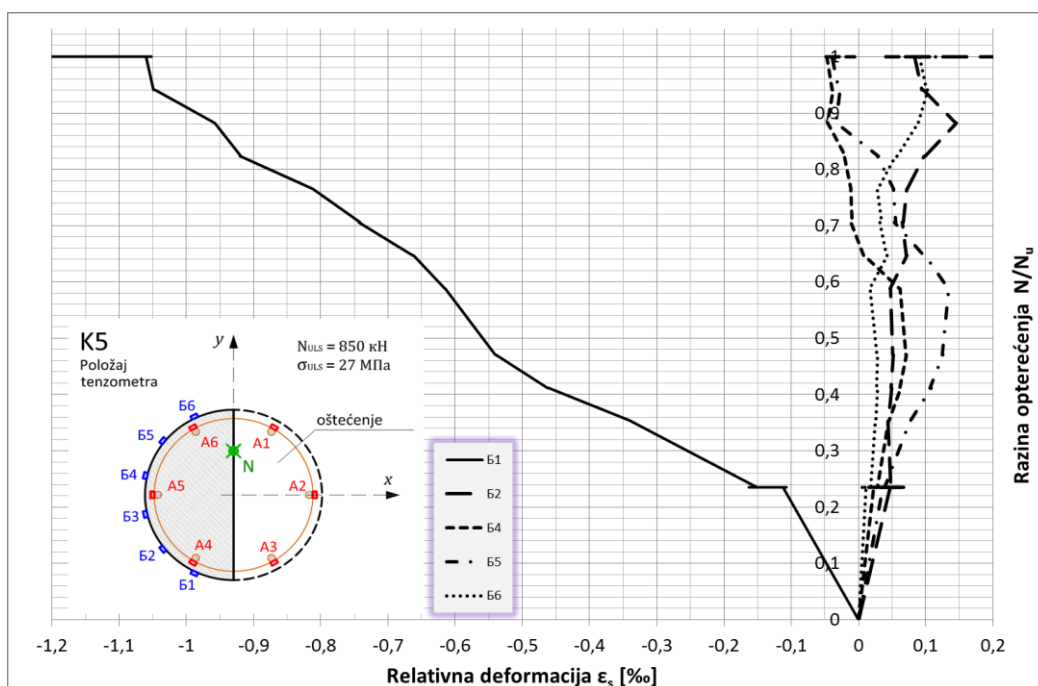
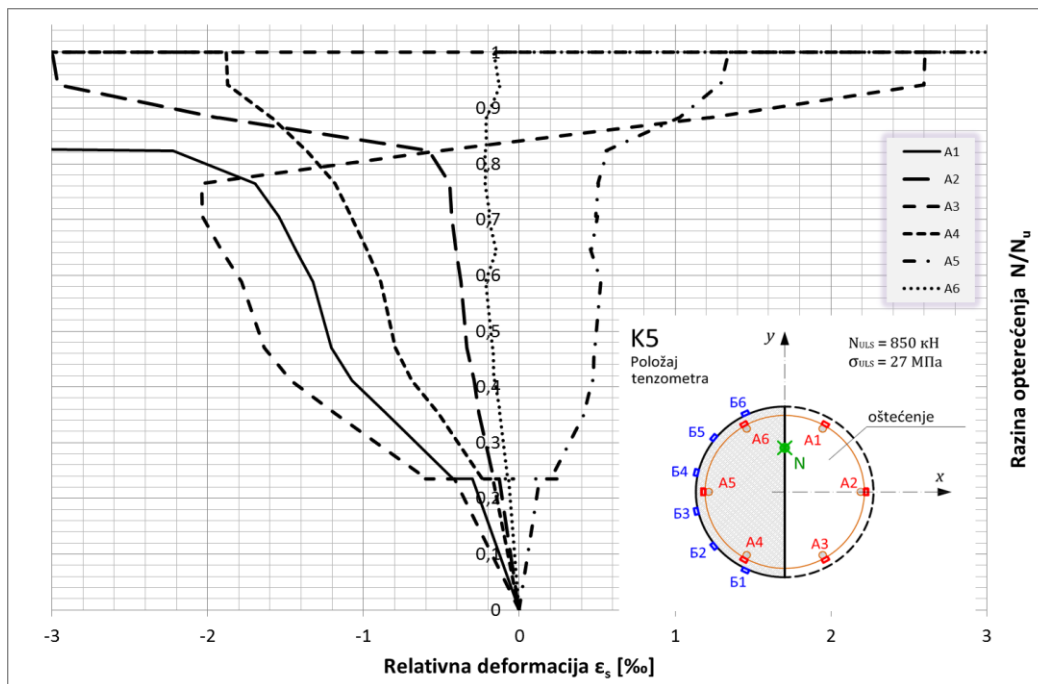


Slika 6. 6Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K9

# Modeli oštećenjaR



Slika 6. 7Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K1



Slika 6. 8Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K5

## 7. Zaključak

U varaždinskoj tvrtki sa dugogodišnjim građevinskim iskustvom (preko 60 godina) izvedena su eksperimentalna ispitivanja modela ab stupova s unaprijed projektiranim i modeliranim oštećenjima. Svrha ispitivanja bila je dobiti jasniji uvid u ponašanje armiranobetonskog elementa oštećenog tijekom eksploatacijskog perioda. Potreba za tim javlja se iz velike količine zgrada i konstrukcija izvedenih u prošlom stoljeću i starosti 20,50, čak i 100 godina na čijim je osnovnim elementima koji čine nosivi sklop konstrukcije primijećen niz oštećenja (najčešće mehaničkog tipa). Sva oštećenja imala su određenu sličnost (poglavito u geometriji i položaju).

Ispitivanjem je obrađeno 15 modela s različitim tipovima oštećenja, a također se mijenjao i položaj vanjske sile (opterećenja).

Tijekom ispitivanja primijećene su određene sličnosti pri ponašanju tijekom nanošenja i povećanja sile. Najveći utjecaj na karakter loma modela imala je dubina (veličina) oštećenja te ekscentricitet vanjske sile.

Dubina oštećenja utjecala je na samu nosivost modela. Tako su obrasci s najvećim oštećenjem  $R$  imali nosivost 27-43% u odnosu na neoštećene obrasce. Taj prostor između 27-43% dalje ovisi o položaju vanjske sile. Obrasci s oštećenjem  $R/2$  pokazali su najveću ovisnost nosivosti o položaju vanjske sile. Njihov omjer nosive sile kretao se od 48 do čak 93% u odnosu na model bez oštećenja. Takav tip oštećenja (dubina oštećenja) javlja se kao najčešći slučaj u praksi, tako da u tom slučaju najveću pažnju treba pridodati položaju vanjske sile, odnosno ekscentricitetu sile.

Centralno naprezani modeli, kao što je i očekivani imaju najveću nosivost. Smanjenje njihove nosivosti najviše ovisi o tipu oštećenja. Cijeli presjek je tlačno opterećen.

Kod modela s oštećenjima dolazi do pomaka (i nagiba!) neutralne osi te je dio poprečnog presjeka i vlačno naprezan. U tom dijelu sva naprezanja preuzima armatura. Povećanjem ekscentriciteta povećava se i vlačna zona, što svakako pridonosi znatnom smanjenju opće nosivosti elementa. Najmanju nosivost, prema očekivanjima ima model s najvećim oštećenjem i maksimalnom ekscentričnošću.

Do vidljivog savijanja armaturnih šipki (u oštećenom dijelu modela) dolazi kod ekscentrično opterećenih stupova već u ranijoj fazi ispitivanja (cca  $0,4 N_U$ ). To su modeli najmanje nosivosti i najmanje iskoristivosti površine poprečnog presjeka.

Do loma elementa (i gubitka nosivosti) dolazi preko betonskog presjeka, uz ranije savijanje armature, ovisno o načinu opterećivanja.

Nakon gubitka globalne nosivosti te daljnjim opterećivanjem elementa može se utvrditi da element i dalje može preuzeti određene sile, sve dok traje lokalno savijanje šipki i element kojega pridržava (greda, ploča) ne doživi znatnije deformacije te popusti.

Izvedeno eksperimentalno ispitivanje prikazalo je ovisnost oštećenja dijela elementa na njegovu globalnu nosivost. Pritom je također prikazano da oštećeni element nije za „odbaciti“, već i dalje može sudjelovati kao sastavni dio većeg sklopa (konstrukcije).

Daljnjim ispitivanjima i proučavanjima potrebno je utvrditi granicu prihvatljivih oštećenja elemenata, istražiti načine njihove sanacije te računskim putem (računskim modeliranjem) provesti ispitivanja koja bi dovela do novih saznanja u području oštećenih konstrukcija.

## 8. Literatura

- [1] Orešković, M. (2013.): Basic assumptions for the research of stress-deformation state of damaged reinforced concrete columns of circular cross-section, Technical journal, Vol. 7, No 3, ISSN 1864-6168 UDK 62 XI.2013. 263-268.
- [2] Klimenko Y.V., Orešković M., (2013.): By the study of damaged compressed concrete elements of circular cross section, XIV International scientific conference « Current Problems of Civil and Environmental Engineering « L'viv -Kosice- Rzeszow » 03-05 September 2013, Lviv, Ukraine, UDK 624. 012. 41, 2013.
- [3] Klimenko Y.V., Orešković M, Gultchuk T.M. (2013.): The results of experimental investigations of damaged rc columns of circular cross-section, Journal of Odessa state academy of civil engineering and architecture No 51 УДК 624. 012. 2, 2013.)
- [4] Orešković M. (2015.): Напряженно-деформированное состояние и прочность поврежденных сжатых железобетонных элементов круглого сечения, Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук, УДК 624.012.25, Одесса — 2015
- [5] Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, 2001.
- [6] RILEM TECHNICAL COMMITTEES: Damage classification of concrete structures. The state of the art report of RILEM Technical Committee 104-DCC activity, Materials and Structures/Matériaux et Constructions, , 24, 253-259, 1991.

## Popis slika

Slika 1. 1 Karakteristična oštećenja stupova napreznih aksijalnom silom (Němeček J. i dr) .....	7
Slika 2. 1 Dizajn eksperimentalnog modela s oštećenjem dubine R.....	10
Slika 2. 2 Dizajn eksperimentalnog modela s oštećenjem dubine R/2 .....	10
Slika 2. 3 Dizajn eksperimentalnog modela bez oštećenja .....	11
Slika 2. 4 Nacrt armature eksperimentalnih modela s tablicama količina .....	12
Slika 2. 5 Osnovne geometrijske karakteristike predloženog stupa.....	13
Slika 3. 1 HBM mjerna oprema .....	17
Slika 3. 2 Shema elotp. tenzometra.....	18
Slika 3. 3 Deformacija tenzometra ovisno o promjeni temperature.....	18
Slika 3. 4 Tenzometar 6/120 LY41, mjernog otpora 120Ω za beton .....	19
Slika 3. 5 Deformacija tenzometra ovisno o promjeni temperature.....	19
Slika 3. 6 Shema položaja ljepljenja tenzometra na armaturni koš.....	20
Slika 3. 7 Izbrušena i pripremljena armaturna šipka.....	21
Slika 3. 8 Tenzometri zalijepljeni na armaturne šipke.....	21
Slika 3. 9 Graf kretanja deformacija tenzometra u realnom vremenu. ....	22
Slika 3. 10 Proces zaštite instaliranog tenzometra .....	22
Slika 3. 11 Proces zaštite instaliranog tenzometra .....	23
Slika 3. 12 Armaturni koš s instaliranim tenzometrima.....	23
Slika 4. 1 Modeliranje oštećenja stupa nanošenjem pur-pjene .....	24
Slika 4. 2 Obrada pur pjene na željeni dizajnirani oblik .....	25
Slika 4. 3 Dovršeni model s dizajniranim oštećenjem .....	25
Slika 4. 4 Priprema armaturnog koša za betoniranje .....	27
Slika 4. 5 Formirana oplata spremljena za betonažu.....	27
Slika 4. 6 Betoniranje pripremljenog modela uz vibriranje .....	28
Slika 4. 7 Poravnanje vrha stupa zidarskom žlicom .....	28
Slika 4. 8 Uzimanje uzoraka kocki i prizmi prilikom betoniranja stupova.....	29
Slika 4. 9 Zabetoniran model izvađen iz oplata .....	29
Slika 4. 10 Zgotovljen model stupa s izvedenim oštećenjem .....	30
Slika 4. 11 Tri tipa oštećenja modela stupa .....	30
Slika 4. 12 Usporedni prikaz sa strane tri tipa oštećenja modela.....	31
Slika 4. 13 Usporedni prikaz sprijeda tri tipa oštećenja modela .....	31

Slika 4. 14 Automatska elektronička preša „Form-test“ .....	33
Slika 4. 15 Instalirana mikroura za praćenje pomaka/deformacija .....	33
Slika 4. 16 $\sigma$ - $\epsilon$ dijagram ispitivanja probne kocke K-I_2 .....	34
Slika 4. 17 Ispitivanje probne kocke K-I_2 .....	35
Slika 5. 1 Postava aparature te priprema za početak ispitivanja .....	36
Slika 5. 2 Shema modela za ispitivanje s označenim položajem tenzometara, oštećenjem i vanjskom silom (opterećenjem).....	36
Slika 6. 1 Lom elementa u sredini uzdužnog presjeka.....	39
Slika 6. 2 Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K2 .....	40
Slika 6. 3 Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K4 .....	41
Slika 6. 4 Slomljeni model stupa K1.....	42
Slika 6. 5 Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K3 .....	43
Slika 6. 6 Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K9 .....	44
Slika 6. 7 Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K1 .....	45
Slika 6. 8 Dijagram naprezanje-deformacija ispitanog modela K5 .....	46