

Primljen / Received: 19.10.2013.  
 Ispravljen / Corrected: 18.12.2013.  
 Prihvaćen / Accepted: 27.12.2013.

Dostupno online / Available online: 10.2.2014.

# Ispitivanje i ocjena armiranobetonskog spoja grede, stupa i ploče

## Autori:



Mr.sc. **Saddam M. Ahmed**, dipl.ing.građ.  
 Sveučilište Anna  
 Građevinski fakultet  
 Chennai, Indija

Sveučilište Mosul  
 Građevinski fakultet  
 Mosul, Irak  
 civilsaddam@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Umarani Gunasekaran**, dipl.ing.građ.  
 Sveučilište Anna  
 Građevinski fakultet  
 Chennai, Indija  
 umarani@annauniv.edu

Stručni rad

**Saddam M. Ahmed, Umarani Gunasekaran**

## Ispitivanje i ocjena armiranobetonskog spoja grede, stupa i ploče

Eksperimentalno istraživanje seizmičkog ponašanja identičnih podsklopova greda-stup obavljeno je ispitivanjem dvaju modela spoja u mjerilu 1:2, pri čemu jedan model ima ploču, a drugi nema. Kvalitativni model kojim se simulira sudjelovanje međukatne ploče razvijen je uspostavljanjem obrazaca pojave pukotina u ploči (linija popuštanja) i stanja deformacije u armaturi ploče. Na bazi kontrolnih rezultata zaključeno je da model spoja dovodi do boljeg predviđanja seizmičkog ponašanja te da taj model omogućava eksplicitno ocjenjivanje djelovanja ploče na spoj.

### Ključne riječi:

spoj grede i stupa, modeliranje, utjecaji ploče, rasterećenje grede, posmik spoja, cikličko opterećenje

Professional paper

**Saddam M. Ahmed, Umarani Gunasekaran**

## Testing and evaluation of reinforced concrete beam-column-slab joint

An experimental investigation of seismic behaviour of identical beam-column subassemblies was conducted by testing two half-scale joint models: one without a slab and the other with a slab. A qualitative model simulating participation of the floor slab was developed by establishing the slab crack patterns (yield lines) and the state of strain in slab bars. Based on the verification results, it was concluded that the joint model improves prediction of seismic behaviour, and that this model allows explicit evaluation of the slab effect on the joint.

### Key words:

beam-column joint, modelling, slab effects, beam relaxation, joint shear, cyclic loading

Fachbericht

**Saddam M. Ahmed, Umarani Gunasekaran**

## Prüfung und Bewertung der Stahlbetonverbindung von Balken, Stütze und Deckplatte

Experimentelle Untersuchungen des seismischen Verhaltens aus Balken und Stütze bestehender Einheiten wurden durch Versuche an zwei identischen, im Maßstab 1:2 angelegten Modellen der Verbindungen durchgeführt, zum einen mit, zum anderen ohne Betondeckplatte. Ein qualitatives Modell, das die Mitwirkung der Deckplatte simuliert, ist durch die Auswertung der Rissbildung im Beton und des Spannungszustandes im Bewehrungsstahl entwickelt worden. Aus den Prüfungsergebnissen folgend, verbessert das Modell der Verbindung die Vorhersage des seismischen Verhaltens und ermöglicht die explizite Ermittlung des Einflusses der Deckplatte.

### Schlüsselwörter:

Verbindung von Balken und Stütze, Modellierung, Deckeneinfluss, Balkenentlastung, Schublast in Verbindungen, zyklische Lasten

## 1. Uvod

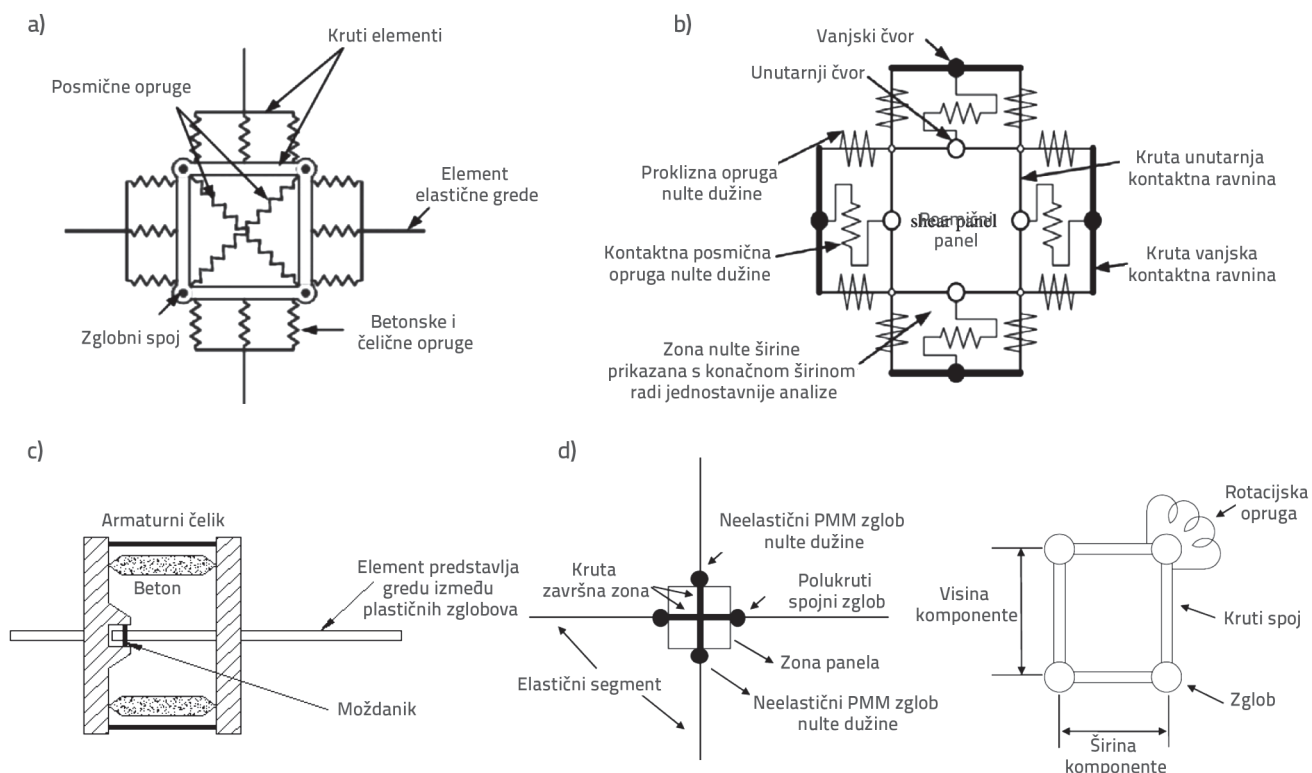
Za vrijeme jakih potresa ponašanje višekratnih armiranobetonskih okvirnih konstrukcija uglavnom ovisi o ponašanju podsklopova, tj. spojeva između greda i stupova. Uviđajući važnost razumijevanja ponašanja podsklopova, mnoge eksperimentalne studije veliko značenje pridaju ponašanju vanjskih [1] ili unutarnjih [2-4] spojeva između greda i stupova pod utjecajem cikličnog opterećenja. U većini prijašnjih studija ispitni su se podsklopovi uglavnom sastojali od spojeva s glavnim gredama bez ploče. Međutim, u stvarnoj konstrukciji ploča se obično ugrađuje monolitno s međukatnim gredama te ona zajednički djeluje s elementima koji su u kontaktu sa spojem. Nekoliko serija ispitivanja provedeno je na AB podsklopovima ploča-greda-stup pri čemu je ispitano sudjelovanje ploče u prihvaćanju bočnog opterećenja. Ispitivanja su provedena u malom i velikom mjerilu, pri čemu su korištene razne geometrije, rubni uvjeti, svojstva materijala, rasporedi armature greda i stupova te načini opterećenja [5-9]. Većina tih studija težište stavlja na istraživanje načina na koji međukatna ploča doprinosi povećanju savojne čvrstoće greda, čime se smanjuje omjer čvrstoće stupa i grede (kada je ploča u vlačnoj zoni presjeka grede). Neki autori predlažu da bi se zadovoljavajuće ponašanje spojeva moglo postići tako da se osigura određena minimalna širina međukatne ploče u fazi projektiranja spojeva između greda i stupova. Ta su ispitivanja u velikoj mjeri utjecala na propise o projektiranju. Stoga su preporučene razne odredbe kojima se u obzir uzima "vlačna pojasnica ploče" na podsklopovima grede i stupa. Takve odredbe primjerice su: ACI 352R [10], NZS 3101 [11] i CSA-A23.3 [12]. Međutim, istraživanja su se nedovoljno bavila utjecajem međukatnih ploča na posmično ponašanje spoja, iako neki istraživači navode da međukatne ploče mogu povećati zahtjeve za posmičnom otpornošću spojeva [9]. Zerbe i Durrani [13, 14] proveli su nekoliko eksperimentalnih analiza spojeva grede i stupa (kako unutarnjih tako i vanjskih) uključujući i ploče i poprečne grede podsklopova. Autori su uzeli u obzir doprinos ploča povećanju čvrstoće okvira. Ta su ispitivanja jasno pokazala da pojava "povećanja grede" stvarno postoji te da ona uzrokuje povećanje momenata savijanja i posmičnih sila u stupu. Ovu pojavu ("izduženje grede") prvi su opisali Fenwick i Fong [15]. Ona bitno utječe na čvrstoću i sveukupnu stabilnost armiranobetonskih okvirnih konstrukcija. U novije je vrijeme ta pojava jasno uočena tijekom potresa koji su zadesili Canterbury 2010. i 2011. godine [16]. Na osnovi eksperimentalnih istraživanja provedene su mnoge analitičke studije da bi se istražio utjecaj raznih parametara na seizmičko ponašanje zone spoja te predvidio odnos opterećenje-deformacija. Youssef i Ghobarah [17] modelirali su spoj (slika 1.a) s dvije dijagonalne translacijske opruge kojima se spajaju četiri suprotna kuta zone panela kako bi se simulirala posmična deformacija spoja. Na kontaktu greda/stup predviđeno je 12 opruga zbog

simuliranja svih ostalih oblika neelastičnog ponašanja. Za spajanje elemenata korišteni su elastični elementi. U ovom je modelu za svaku oprugu bio potreban zaseban konstitutivni model. Kontrola modela provedena je pomoću niza usporedbi s rezultatima eksperimentalnih mjerenja.

Lowes i Altoontash [18] razvili su element spoja (slika 1.b) koji predstavlja nelinearno ponašanje spoja i to uvođenjem konstitutivnih odnosa između materijalnih, geometrijskih i projektnih parametara. Element spoja ima četiri vanjska čvora, svaki s tri stupnja slobode, pa je tako spoj kompatibilan s tradicionalnim dvodimenzionalnim elementima grede i stupa. Parametri cikličnog odziva baždareni su na temelju eksperimentalnih podataka. Kasnije su Mitra i Lowes [19] poboljšali ovaj model izmjenom definicije elementa. Za simuliranje gubitka čvrstoće u spoju korišten je model tlačne potpore. Kim i LaFave [20] primijenili su statistički pristup za ocjenjivanje utjecaja nekih ključnih parametara na ponašanje spoja. Ti parametri su primjerice geometrija panela, tlačna čvrstoća betona, učvršćivanje zbog armature spoja, osno opterećenje stupa i vezivne karakteristike uzdužne armature. Zaključeno je da posmična čvrstoća panelskog spoja uglavnom ovisi o tlačnoj čvrstoći betona. Međutim, geometrija panela spoja samo u manjoj mjeri utječe na seizmičko djelovanje. Nakon određivanja bitnih parametara posmično-naponsko-deformacijskog ponašanja spoja, oni su predložili jednadžbu u kojoj je prikazana posmična čvrstoća u zoni spoja.

Kasnije su studije bile bazirane na složenijim nelinearnim modelima konačnih elemenata za precizno iskazivanje ponašanja unutarnjih spojeva te za izvođenje korisnih zaključaka iz numeričkih i eksperimentalnih usporedbi [21, 22]. Međutim, ti su pristupi zahtijevali više vremena za proračune, dobro definiranu mrežu konačnih elemenata, dostatan prostor za pohranjivanje rezultata i, iznad svega, te su metode bile ograničene na samo jedan spoj.

Općenito uzevši, sve te metode nisu uzimale u obzir izduženje grede niti utjecaj ploče na spoj. Fenwick i Davidson [23] predložili su jednostavan analitički model za izduženje grede u kojem se ne uzima u obzir djelovanje ploče, kao što se to vidi na slici 1.c. Složeni element postavljen je na kraj svake grede. Sastojao se od jednog čeličnog i jednog betonskog elementa na vrhu i na dnu presjeka. Analiziran je šesterokratni okvir s tri polja, s elementima produženja grede i bez njih. Zamijećene su očite promjene u raspodjeli sila između grede i stupova. Do većeg izduženja greda dolazilo je kod većih omjera debljine grede i katnih pomaka. Stoga je predloženo da je izduženje grede proporcionalno debljini grede i broju polja. Modeli koje su razvili drugi autori poput Shahrooza i dr. [24] uključuju utjecaj ploče i izduženje grede. Studija je ograničena samo na monolitno opterećenje i njome nije moguće simulirati promjene u histerezoj krivulji niti smanjenje krutosti podsklopa [25], s tim da je ipak postignuto povećanje čvrstoće zbog utjecaja ploče. Ostale vrlo složene modele koji uzimaju u obzir oba djelovanja razvili su Lao



Slika 1. Modeli spoja s više opruga: a) model spoja Youssefa i Ghojarah [17]; b) model spoja Lowesa i Altoontasha [18]; c) model izduženja grede [23]; d) model spoja Unala i Buraka [28]

[26] i Peng [27]. Tu se za simuliranje odziva vezne ploče koristi model podne konstrukcije. Vezna ploča modelirana je pomoću niza podupora koje su povezane paralelno i serijski radi simuliranja kako horizontalnog prijenosa posmika u ravni međukatne ploče tako i izvanravninskog savijanja međukatne ploče. Kako je model izuzetno složen, potrebni su opsežni proračuni. Također treba napomenuti da su, bez obzira na relativnu složenost modela, uočene određene razlike između analitičkih predviđanja i eksperimentalnih rezultata. Do pogrešaka je uglavnom dolazilo zbog neodgovarajućeg predočavanja izduženja plastičnih zglobova. Međutim, još uvijek se postavlja pitanje u kojoj se mjeri ovaj model može primijeniti na neodređene konstrukcije ili konstrukcije pod cikličnim opterećenjem.

U novije su vrijeme Unal i Burak [28] razvili analitički model radi predstavljanja cikličnog neelastičnog odziva armiranobetonskih spojeva. U modelu se panelski spoj razmatra kao kruta zona, a smatra se da su svi efekti posmičnog deformiranja uočeni u tim zonama grupirani kod rotacijskih opruga smještenih u četiri kuta spoja i između krutih veza, kako je to prikazano na slici 1.d. Da bi se ocijenila svojstva tih rotacijskih opruga, razvijen je parametarski model kojim se predviđa odnos posmične čvrstoće i deformacije na spoju, a u tu se svrhu analiziraju neke ranije eksperimentalne studije o armiranobetonskim podsklopovima spojeva greda i stupova pod utjecajem cikličnog opterećenja, te je u tom smislu izrađena i opsežna baza podataka. Da bi se uzela

u obzir prisutnost ploče, u analizu je uključena i efektivna širina grede definirana u ACI 318 [31], a armatura ugrađena u pojasnicu je implicitno uključena kao faktor indeksa ploče "SI". Nominalna savojna čvrstoća presjeka pojasnice izračunana je i podijeljena s čvrstoćom pravokutnog presjeka grede iste visine i širine hrpta:

$$\text{Indeks ploče (SI)} = \frac{M_n(\text{presjek s pojasnicom})}{M_n(\text{pravokutni presjek})} \quad (1)$$

Može se uočiti da se, općenito uzevši, seizmičko ponašanje podsklopova spoja grede i stupa može logički predvidjeti ne samo za sveukupni odziv međukatnog pomaka zbog bočnog opterećenja već i za odziv elementa.

Iz gornjeg se razmatranja vidi da izduženje grede i utjecaj ploče ipak mogu znatno utjecati na posmičnu čvrstoću okvira i na stupove, iako se ti parametri rijetko uzimaju u obzir pri analizi okvira.

Međutim, postojeći modeli ili nemaju realnu petlju ili su suviše složeni. Stoga se u ovom radu prvobitno analiziraju neki rezultati ispitivanja koji se odnose na dva uzorka podsklopova ispitana pod cikličnim opterećenjem, da bi se tako ocijenio utjecaj međukatne ploče na čvrstoću grede, čvrstoću stupa i na posmične zahtjeve za panelski spoj. Nakon toga se obavljaju numeričke simulacije bazirane na modelima konačnih elemenata koji su razvijeni pomoću programa RUAUMOKO-2D [29], da bi se tako primijenio jednostavan model za podsklop grede i stupa s razumnim baždarenjem

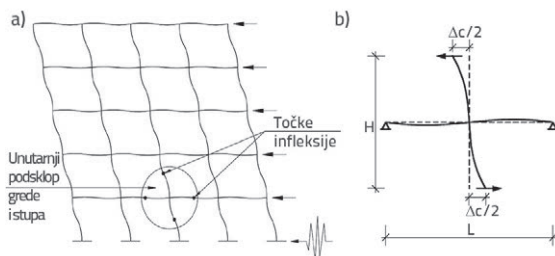
izdužena/rasterećenja grede i utjecaja ploče. Razvijeni model trebao bi simulirati nagli gubitak i pad krutosti pomoću očekivane histerezne petlje, dakle kao i kod armiranobetonskih konstrukcija. I, konačno, model bi trebao omogućiti usporedbu predložene proračunske metode s prijašnjim i sadašnjim rezultatima ispitivanja.

## 2. Eksperimentalni program

### 2.1. Projektiranje prototipa okvira

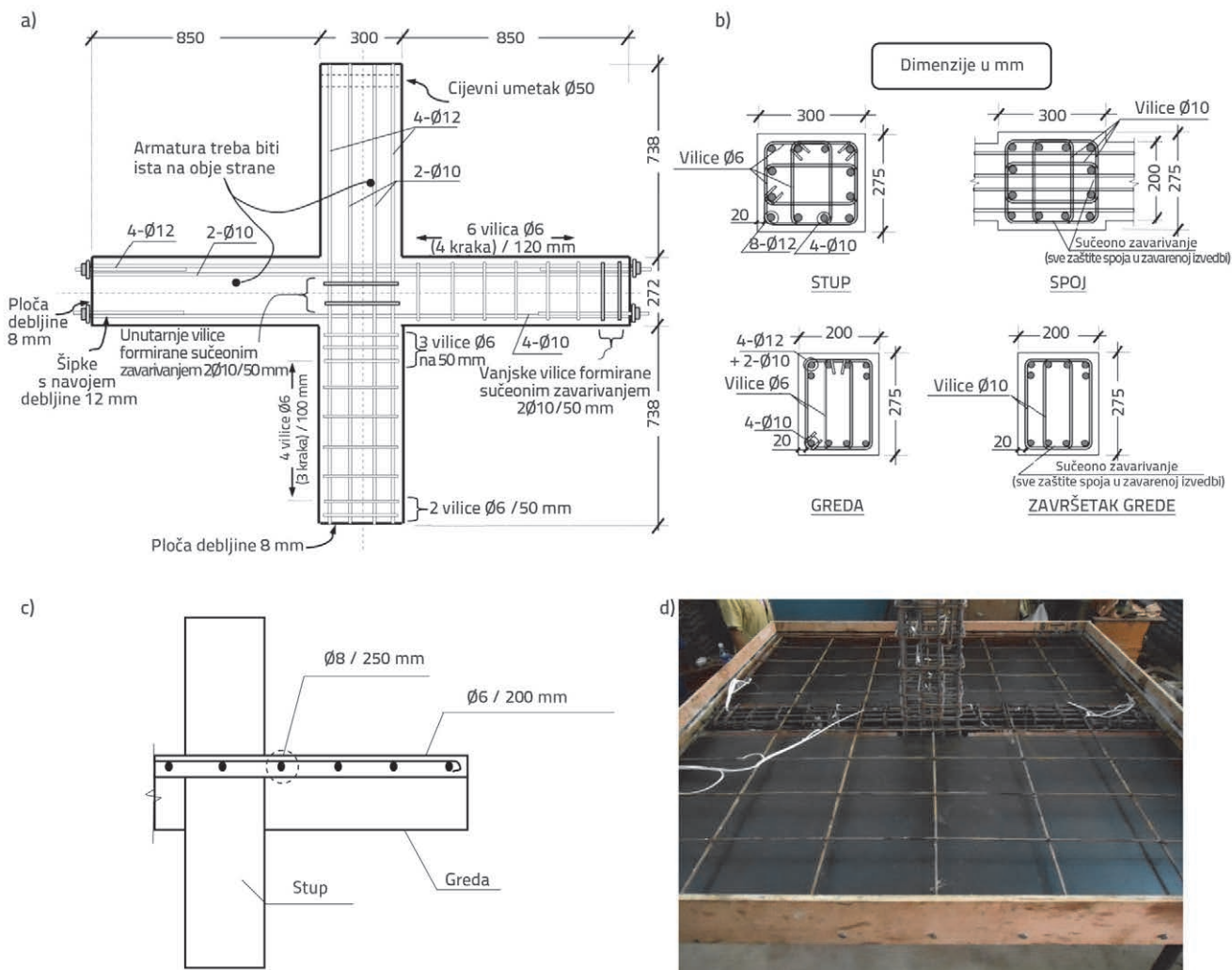
Dužina petokatnog prototipa zgrade iznosila je 27,6 m, a širina 20 m. Prototip je imao četiri obodna okvira kojima su se u uzdužnom smjeru premošćivala četiri polja. Okvirni sustavi u poprečnom smjeru nisu razmatrani u ovoj studiji. Pogled na obodni okvir dan je na slici 2.a. Raspon svakog polja iznosio je 6,9 m, a visina svakog kata 3,5 m, i to po čitavoj dužini zgrade. Tipični donji unutarnji podsklop, prikazan na slici 2.b, korišten je kod eksperimentalnih istraživanja. Prototipna konstrukcija projektirana je za zone visoke seizmičnosti, tj. za seizmičku

zonu IV, u skladu s propisom UBC [30], pri čemu je predviđena standardna namjena građevina te kategorija tla tipa D. Pretpostavljeno je da efektivna seizmička masa na svakom katu iznosi 590 t.



Slika 2. a) Prototip okvira pod utjecajem bočnog seizmičkog opterećenja; b) modeliranje unutarnjeg podsklopa grede i stupa

Elementi iste veličine korišteni su po čitavoj visini okvira. Sve grede i stupovi projektirani su tako da sve tečenje može nastati samo na razini gređa (u skladu s konceptom "jaki stup slaba gređa"), što je u skladu s većinom preporuka iz dokumenta



Slika 3. Detalji armature pokusnih uzoraka: a) detalji uzdužne armature (uzorci J, JS); b) detalji presjeka (uzorci J, JS); c) presjek u ploči (uzorak JS); d) pogled na armaturu (uzorak JS)

ACI-318 [31]. Proračun postupnog potiskivanja konstrukcije, s obrnutim trokutastim bočnim opterećenjima, proveden je da bi se odredili zahtjevi za okvir (okvir postiže projektirani pomak pri projektiranoj sili zadanoj u dokumentu UBC). Pretpostavljeno je da projektirani međukatni pomak iznosi 2 % prema propisu UBC (Točka 1630.10 [30]) te da odgovarajući posmik baze iznosi 2.000 kN.

## 2.2. Izrada uzoraka za ispitivanje

Ispitana su dva uzorka u mjerilu 1 : 2 pri čemu jedan uzorak ima ploču, a drugi nema. Svaki se uzorak sastojao od stupa te od dvije grede povezane sa stupom na suprotnim stranama, bez poprečnih greda. Na uzorcima je poprečni presjek stupova iznosio 275x300 mm, dok je visina grede iznosila 275 mm, a širina 200 mm. Geometrija i detalji armature pokusnih uzoraka prikazani su na slici 3. Oba uzorka odlikovala su se istom veličinom i armaturom greda, stupova te spoja grede i stupa, s tim da je prvi uzorak "J" izrađen bez međukatne ploče, dok je drugi uzorak "JS" imao ploču, monolitno izvedenu s gredom. Ukupne dimenzije ploče iznosile su 2,0 x 2,0 m, a prosječna debljina iznosila je 63 mm. Dimenzije armature ploče iznosile su  $\varnothing 6/25$  cm u paralelnom smjeru grede (uzdužni smjer) te  $\varnothing 8/25$  cm u poprečnom smjeru. Ugradnja betona za svaki uzorak izvedena je u jednom intervalu (slika 4.).



Slika 4. Izrada uzoraka za ispitivanje: a) ugradnja betona - uzorak JS; b) njega pokusnih uzoraka

Beton je pripremljen u skladu sa zahtjevima iz dokumenta ACI 301 [32]. Beton se sastojao od drobljenog kamena prerađenog iz prirodne stijene u skladu s normom ASTM C33 [33]. Agregat maksimalne veličine zrna od 10 mm, sa slijeganjem od 120 mm, korišten je da bi se armatura mogla vezati s betonom u zoni spoja te da se postigne minimalna debljina zaštitnog sloja od 20 mm.

Tablica 2. Svojstva armature

$\varnothing$ [mm]	$A_{sb}$ [mm <sup>2</sup> ]	Čvrstoća pri popuštanju, $f_y$ [MPa]	Deformacija pri popuštanju, $\epsilon_y$ [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	Vlačna čvrstoća, $f_u$ [MPa]	Izduženje [%]
6	34,9	469,3	2420	604,3	23,0
8	52,6	459,0	2300	578,4	18,0
10	79,2	451,1	2375	539,1	19,1
12	112,3	477,2	2330	603,2	10,9

Mokri pokrivači zasićeni vodom postavljeni su kada se beton stvrdnuo dovoljno za njegu uzoraka i kontrolnih uzoraka, kako je to prikazano na slici 4.b. Često zadavano vrijeme njege od 14 dana obično odgovara prosječnoj veličini od 70 % zadane tlačne čvrstoće prema ACI 301.

Prije ispitivanja uzoraka spoja određena su mehanička svojstva sastavnih materijala, tj. betona i čelika. U tu je svrhu kod svakog lijevanja uzoraka uzeto osam kontrolnih uzoraka betona. Ispitivanje kontrolnih uzoraka obavljeno je prema zahtjevima iz norme ASTM C39 [34]. U tablici 1. dan je sažeti prikaz aktualnih tlačnih čvrstoća betona nakon 28 dana te na sam dan ispitivanja. Tim su ispitivanjima dobivene praktički iste vrijednosti prosječne čvrstoće. Što se tiče čelika, dvanaest šipki promjera 6, 8, 10 i 12 mm podvrgnuto je ispitivanju vlačne čvrstoće pa su tako dobivene sljedeće vrijednosti: srednja čvrstoća pri popuštanju  $f_y$ , deformacija pri popuštanju  $\epsilon_y$ , vlačna čvrstoća  $f_u$  i granično izduženje  $\epsilon_u$ . Te su vrijednosti prikazane u tablici 2.

Tablica 1. Tlačna čvrstoća betona,  $f_c'$

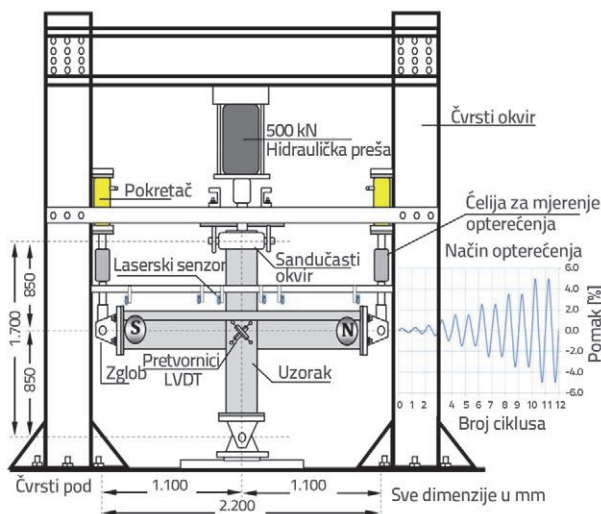
Tlačna čvrstoća [MPa]	Uzorak	
	J	JS
nakon 28 dana	44,89	37,06
na dan ispitivanja	50,55	44,83

## 2.3. Prikaz pokusa i način opterećenja

Ispitivanja su obavljena nanošenjem vertikalnog tlaka na krajeve greda, kako se to vidi na slici 5. Stup je povezan s univerzalnim zglobnim spojem na dnu te sa sandučastim okvirom (pomoću okretnog spoja) na vrhu. Kraj svake rubne grede povezan je s hidrauličkim aktuatorom od 250 kN pomoću zglobnog završetka. Tako su oba kraja greda i vrh i dno stupa zglobno povezani u plohi opterećenja kako bi se simulirale točke infleksije okvirne konstrukcije pod utjecajem bočnog seizmičkog opterećenja. Visina stupa kata od zgloba do zgloba (H) iznosila je 1,70 m, dok je dužina grede od zgloba do zgloba (L) iznosila 2,2 m. Ostavljeno je da rubovi međukatne ploče budu slobodni kako bi mogli preuzeti eventualne utjecaje membranskog djelovanja ploče, što bi moglo dovesti do dodatnog učvršćenja u zoni spoja. Sandučasti okvir instaliran



je na vrhu stupa kako bi se rotacije uzorka odvijale samo u uzdužnom smjeru. Jednoosni posmik statički je nanesen na krajevima grede pomoću hidrauličkih aktuatora.



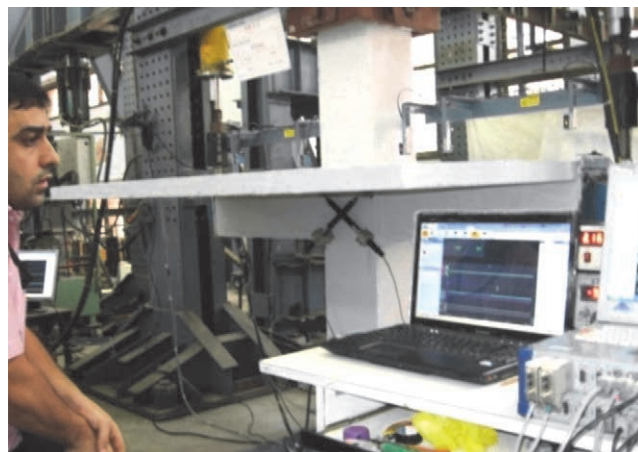
Slika 5. Prikaz pokusa i način opterećenja

Raspored kružnih pomaka koje je inicirao aktuator tijekom svakog ispitivanja prikazan je na slici 5. Pomak na krajevima grede povećavan je u intervalima od 0,25 % sve do pomaka od 1 % s jednim ciklusom u svakoj amplitudi pomaka, zatim s dva ciklusa za svaku amplitudu za pomake veće od 1 %, s korakom od 1 %. Ukupno je napravljeno 12 ciklusa nanošenja pomaka sve do ciklusa u kojem je pomak iznosio 5 %. Odabir različitih amplituda pomaka bio je uvjetovan očekivanim vrijednostima pojave pukotina i popuštanja pri pomaku, što je variralo od 1,0 do 2,0 %. Na taj je način omogućeno bolje praćenje pojave pukotina i popuštanja, što se događalo u početnom dijelu ispitivanja.

Uzdužna sila nanošena je standardnom hidrauličkom prešom na čeličnu kapicu koja se nalazila na vrhu stupa. Tijekom ispitivanja održavano je konstantno vertikalno opterećenje. Ispitivači su nanosili konstantno uzdužno nominalno tlačno opterećenje od 10 % nosivosti stupa da bi se postigla potrebna povezanost stupa sa spojem.

Za svaku vrstu ispitivanja pojedinog uzorka upotrijebljeni su uređaji: za mjerenje odziva grede upotrijebljeno je šest laserskih senzora smještenih iznad grede s pogreškom očitavanja manjom od 8 mm. Elektrootporni tenzometri postavljeni su na armaturne šipke i to na ključna mjesta u samom spoju i u blizini spoja. Deformacije na panelima spojeva detektirane su pomoću linearnih varijabilnih diferencijalnih transformatora (LVDT) postavljenih u obliku slova "x" na prednju stranu spoja. Senzori za mjerenje opterećenja postavljeni su između aktuatora i grede radi mjerenja sile. Korišteni su hidraulički aktuatori maksimalnog kapaciteta od +250/-100 kN s hodom od  $\pm 100$  mm. Za praćenje i kontrolu pomaka i povratnih signala sile poslužio je odgovarajući sustav za prikupljanje podataka (DEWE-43). Podaci su prikupljeni brzinom od 100 točaka po

sekundi (100 Hz). Upotrijebljeni uređaji prikazani su na slici 6., gdje se također vidi i oprema za ispitivanje.



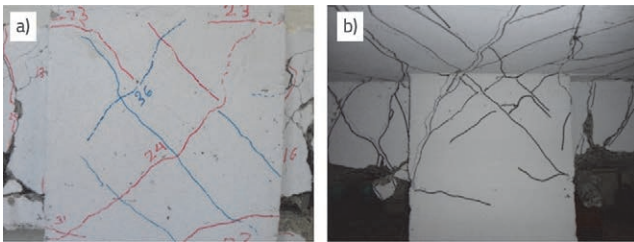
Slika 6. Pokus u fazi provedbe

### 3. Eksperimentalni rezultati

#### 3.1. Analiza pokusa

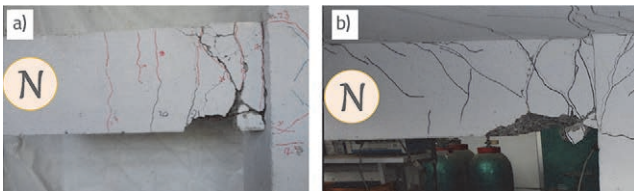
Oba su se uzorka ponašala duktilno, a uočeno je ponašanje po načelu "jak stup – slaba gređa" što se uglavnom i zahtijeva u propisima koji se odnose na duktilnost okvira. Na kontaktima između grede i stupa uočeni su plastični zglobovi sa sitnim pukotinama po čitavoj visini stupa, što znači da stup nije pretrpio značajnije deformacije zbog eventualne neelastičnosti.

U zoni panela (zona sjecišta grede i stupa) uočene su manje pukotine kod međukatnog pomaka od 1,5 %. Kod tog pomaka, širina je pukotina postupno rasla i tako su se formirale dijagonalne pukotine na oba lica spoja. Usporedbom pukotina na uzorku J s pukotinama na uzorku JS ustanovljene su bitne razlike, što upućuje na utjecaj međukatne ploče na mehanizam sloma. Panelska zona na uzorku J pretrpjela je manje deformacije te je zabilježena širina pukotina iznosila manje od 0,2 mm. S druge strane, velike su pukotine uočene na uzorku JS. Te pukotine širile su se sa spoja na ploču i njihova širina bitno je porasla na kontaktu između ploče i stupa, što je uzrokovano manjom deformacijskom sposobnosti spoja u odnosu na ploču. To znači da je ovaj dio spoja bio izložen velikim naprezanjima. Općenito uzevši, pukotine na spoju su se otvarale i zatvarale ovisno o promjeni smjera opterećenja. Betonska obloga ostala je neoštećena sve do završetka ispitivanja. Slika 7. pokazuje pukotine na spoju uočene na kraju ispitivanja na oba uzorka. Spoj se u oba uzorka dobro ponašao čak i kod velikih vrijednosti pomaka, pa gotovo i nije zabilježeno ljuškanje betona u samom spoju ili u njegovoj blizini. U zoni plastičnog zgloba grede, točke popuštanja uzoraka određene su pomoću krivulja opterećenja i pomaka, a kontrola je obavljena ispitivanjem popuštanja pojedinačnih šipki u gredi.



Slika 7. Pukotine na spoju nakon ispitivanja: a) uzorak J; b) uzorak JS

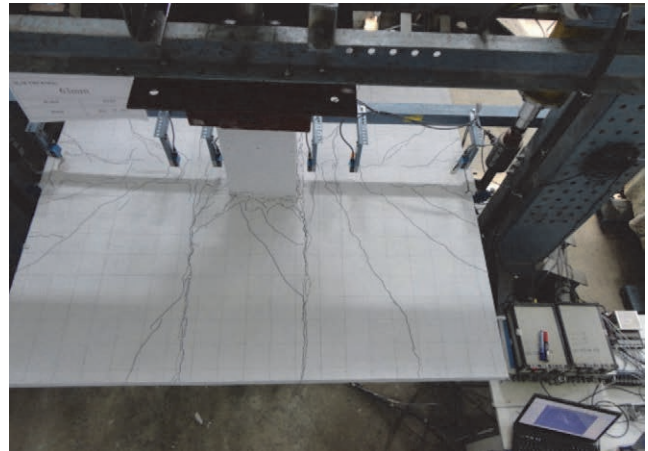
Prvo popuštanje armature u donjoj zoni armature grede dogodilo se tijekom ciklusa pomaka od 1,5 %, a većina armature je popustila tijekom ciklusa pomaka od 3,5 %. Popuštanje armature grede proširilo se do dužine koja je jednaka efektivnoj visini grede od lica stupa tijekom ciklusa pomaka od 3,5 %, što znači da se zglob grede razvio uz kontakt između grede i stupa. Pucanje i ljuškavanje betona uočeno je na dnu grede pored stupa u ciklusu pomaka od 5 %. Prvo su otkrivene četiri šipke promjera 10 mm u dnu sjeverne grede, a zatim je pojava otkrivanja armature zabilježena na južnoj gredi, na oba uzorka. Plastični zglobovi koji su se razvili na kontaktu između grede i stupa na kraju ispitivanja prikazani su na slici 8.



Slika 8. Konačno oštećenje na sjevernoj gredi: a) uzorak J; b) uzorak JS

Kod uzorka JS, pukotine su se tijekom ispitivanja otvarale i zatvarale na ploči pri pomacima do 1,5 %. Nakon toga uočava se početak popuštanja ploče, pa su tako pukotine pod kutom od oko 45° uočene kod ciklusa pomaka od 2,5 %. Širina tih

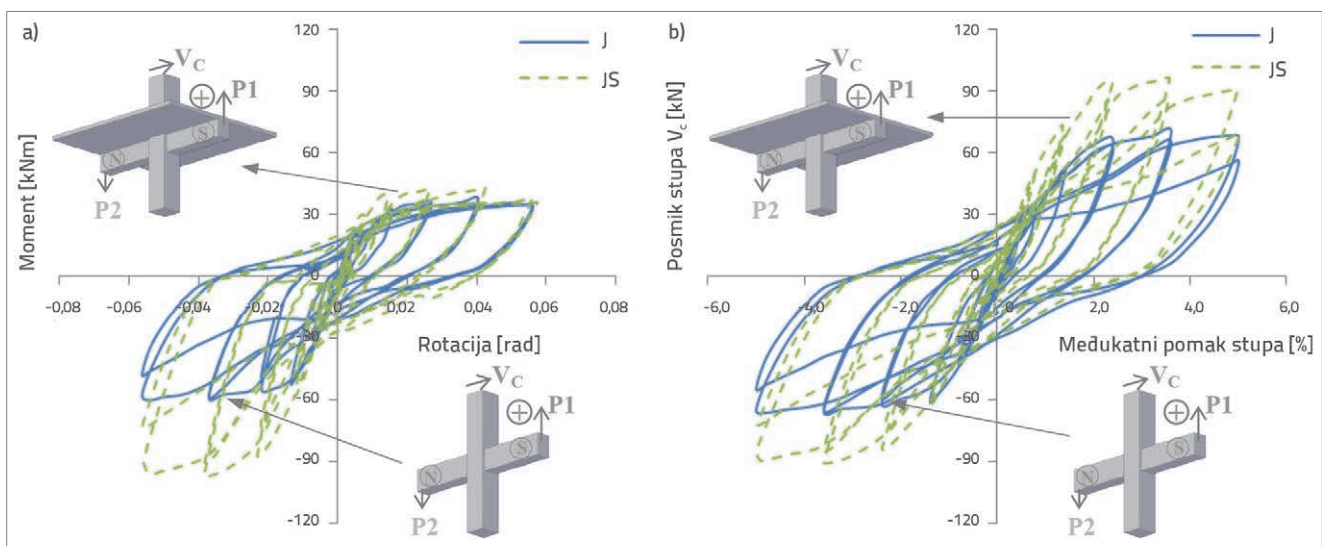
pukotina postupno se povećavala do kraja ispitivanja. Nešto veće pukotine (2,6 mm) pojavile su se na ploči u poprečnom smjeru. Općenito uzevši, te su pukotine po obliku i širini bile simetrične u pravcima S-J i I-Z. Čitav obrazac širenja pukotina po ploči uzorka JS prikazan je na slici 9.



Slika 9. Širenje pukotina po ploči uzorka JS

### 3.2. Odziv opterećenje-pomak

Rotacija grede izračunana je na osnovi očitavanja relativnih pomaka pomoću laserskog senzora na kraju grede te uz lice stupa. Histerezne krivulje momenata i rotacije grede (sjeverna greda) prikazane su za oba uzorka na slici 10.a. One su tipične jer pokazuju niži gubitak krutosti te slično ponašanje u smislu smanjenja krutosti i čvrstoće u tijeku opetovanih ciklusa pomaka pri istoj magnitudi. To se pripisuje činjenici da u zoni spoja nema proklizavanja. Jasno možemo vidjeti da čelik uzdužne ploče sudjeluje u otpornosti na savijanje, i to naročito u negativnom smjeru opterećenja (armatura ploče u vlaklu). Prisutnost međukatne ploče dovodi do povećanja otpornosti



Slika 10. Histerezne krivulje: a) momenta sjeverne grede i rotacije; b) posmika stupa i koeficijenta pomaka

grede na vlak i tlak, kao što se to vidi na slici 10.a, pa se stoga traži dodatna čvrstoća stupa u oba smjera opterećenja. Taj se koncept dokazuje rezultatima posmika i pomaka stupa koji su prikazani na slici 10.b.

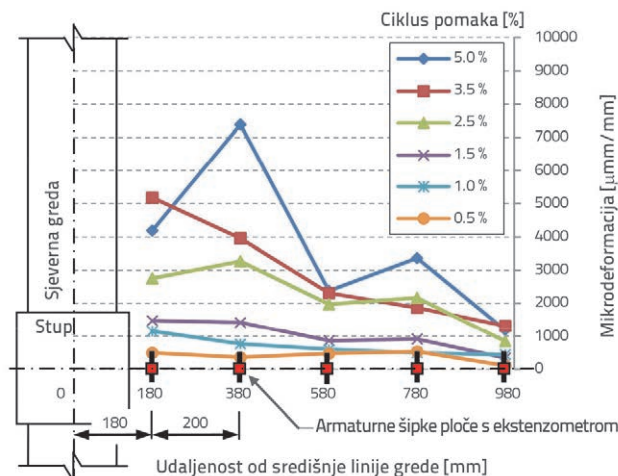
Obodne krivulje odnosa između momenta sjeverne grede i rotacije prikazane su za oba uzorka na slici 11.a. U ranom stadiju ispitivanja (do ciklusa pomaka od 1 %) oba uzorka pokazuju otprilike sličnu čvrstoću grede. Kod većih razina pomaka (iznad 1 %), brzina povećanja čvrstoće grede bitno raste kod uzorka JS u odnosu na uzorak J.

U usporedbi s uzorkom J, kod uzorka JS javljaju se veći momenti savijanja grede u oba smjera opterećenja. Izračunane su prosječne vrijednosti povećanja savojne čvrstoće grede za oba uzorka, te je provedena usporedba tih vrijednosti za uzorak s pločom (JS) i bez ploče (J). Ustanovljeno je da povećanje čvrstoće grede u negativnom smjeru opterećenja (ploča u vlak) iznosi 67,1 % za uzorak JS u odnosu na uzorak J, dok to povećanje u pozitivnom smjeru opterećenja (ploča u tlaku) iznosi 16,7 % za uzorak JS u odnosu na uzorak bez ploče. Usporedba obodnih krivulja odnosa između posmika stupa i koeficijenta pomaka prikazana je na slici 11.b. Također je provedena i usporedba povećanja otpora kata na posmik te je ustanovljeno da ploča povećava vlačnu otpornost kata za 33 % kod uzorka JS u odnosu na uzorak bez ploče.

### 3.3. Deformacija armature ploče

Uzorak JS ima pet uzdužnih šipaka ( $\phi 6$  mm). Na svakoj uzdužnoj šipki ploče postavljen je mjerac deformacije i to poprečno na središnju liniju stupa. Presjeci deformacija uzdužnih šipaka ploče u vršnim točkama pomaka prikazani su za razne cikluse na slici 12. Prije popuštanja, s porastom pomaka zabilježen je kontinuirani porast deformacije kod svih uzdužnih šipaka ploče. Stoga je jasno da utjecaj sudjelovanja ploče na savojnu čvrstoću grede i posmične zahtjeve na spoj

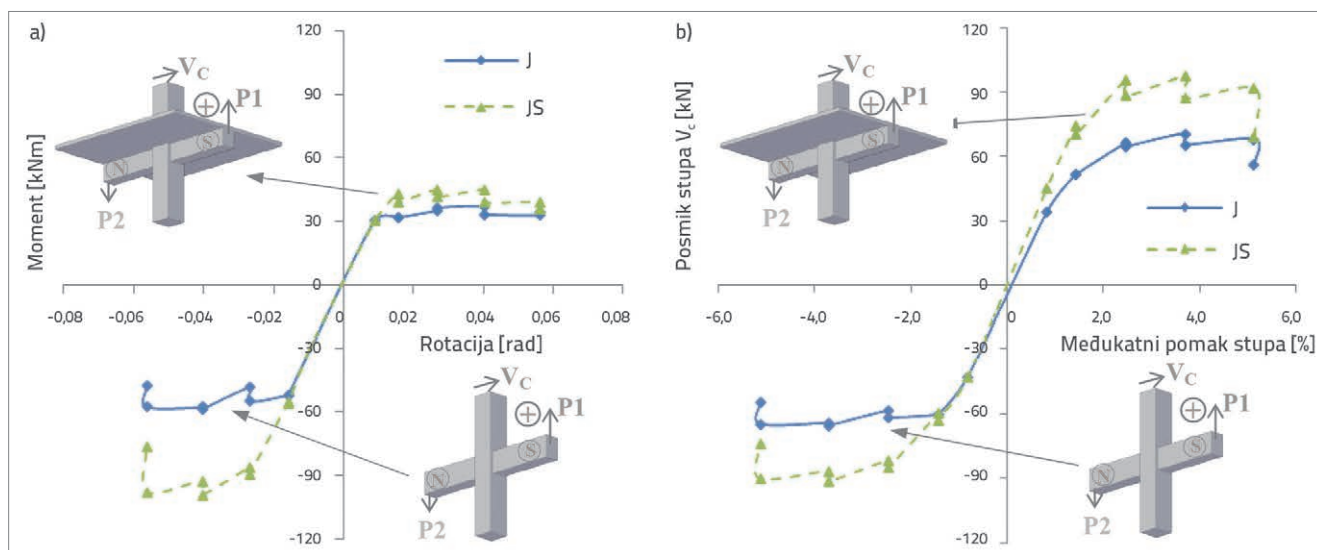
raste s povećanjem pomaka. Armaturna šipka ploče koja je najbliža rubu grede pretrpjela je najbrži porast deformacije. Šipke ploče počele su popuštati tijekom ciklusa pomaka od 2,5 %, a većina uzdužnih šipaka ploče popustila je kod pomaka od 3,5 %.



Slika 12. Odnos između profila deformacije armature ploče i ciklusa pomaka (%) za uzorak JS

### 3.4. Određivanje posmičnog naprezanja i deformacije spoja

U spoju grede i stupa, unutarnje tlačne ili vlačne sile u gredi dovode do velike vrijednosti posmika u panelskom spoju. Ne može li spoj izdržati takav posmik, tada u zoni panela dolazi do popuštanja. U svrhu praćenja ukupne posmične deformacije spoja u prosječnim vrijednostima, na lice spoja svakog uzorka instalirana su dva LVDT pretvornika u obliku slova "X". Uzimajući u obzir dva trokuta dobivena postavljanjem LVDT pretvornika, izmjerene su kutne promjene u svakom koraku,



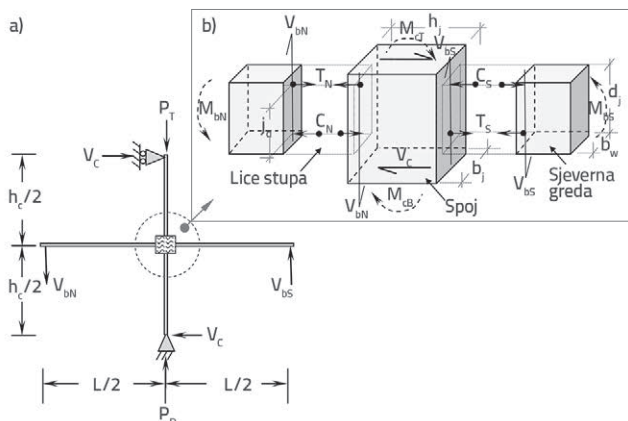
Slika 11. Obodne krivulje: a) sjeverna greda; b) stup



kao što se to vidi na slici 6. Zatim je posmična deformacija na spoju izračunana kao prosjek dviju kutnih promjena na licu panela. U ovoj se studiji za izračunavanje posmične deformacije na spoju koristi jednačba (2):

$$\phi_j = \frac{\sqrt{b^2 + h^2}}{2 \cdot b \cdot h} [\Delta_1 + \Delta_2] \quad (2)$$

gdje  $\phi_j$  (radian) predstavlja posmične deformacije na spoju, dok su  $b$  i  $h$  širina i visina panelske zone između dviju sidrenih točaka LVDT pretvornika.  $\Delta_1$  i  $\Delta_2$  su pomaci izmjereni pomoću LVDT pretvornika koji su postavljeni dijagonalno na panel. S druge strane, posmična čvrstoća spoja ocjenjuje se analizom ravnoteže horizontalnih sila u horizontalalnoj ravnini na polovici visine spoja, kao što se to vidi na slici 13.



Slika 13. Dijagrami slobodnog tijela: a) za tipični postav za ispitivanje unutarnjeg podslopa; b) spoj panela

Posmična sila spoja može se predstaviti putem vlačnih i tlačnih sila na licu spoja, kao vlačne sile koje djeluju na južnu i sjeverno lice panela. Stoga se efektivna horizontalna

posmična sila koja djeluje na panel spoja,  $V_{jh}$ , može izračunati kako slijedi:

$$V_{jh} = (T_N + C_S) - V_C \quad (3)$$

gdje je  $V_C$  posmična sila stupa koja se može procijeniti pomoću ravnoteže sila kod sila na kraju grede kao:

$$V_C(h_c) = V_{bN} \left[ \frac{L}{2} \right] + V_{bS} \left[ \frac{L}{2} \right] \quad (4)$$

dok se komponente vlaka ekvivalentnih sila na sjevernoj i južnoj gredi mogu izraziti kao:

$$T_N = \frac{M_{bN}}{j_d}; \quad C_S = \frac{M_{bS}}{j_d} \quad (5)$$

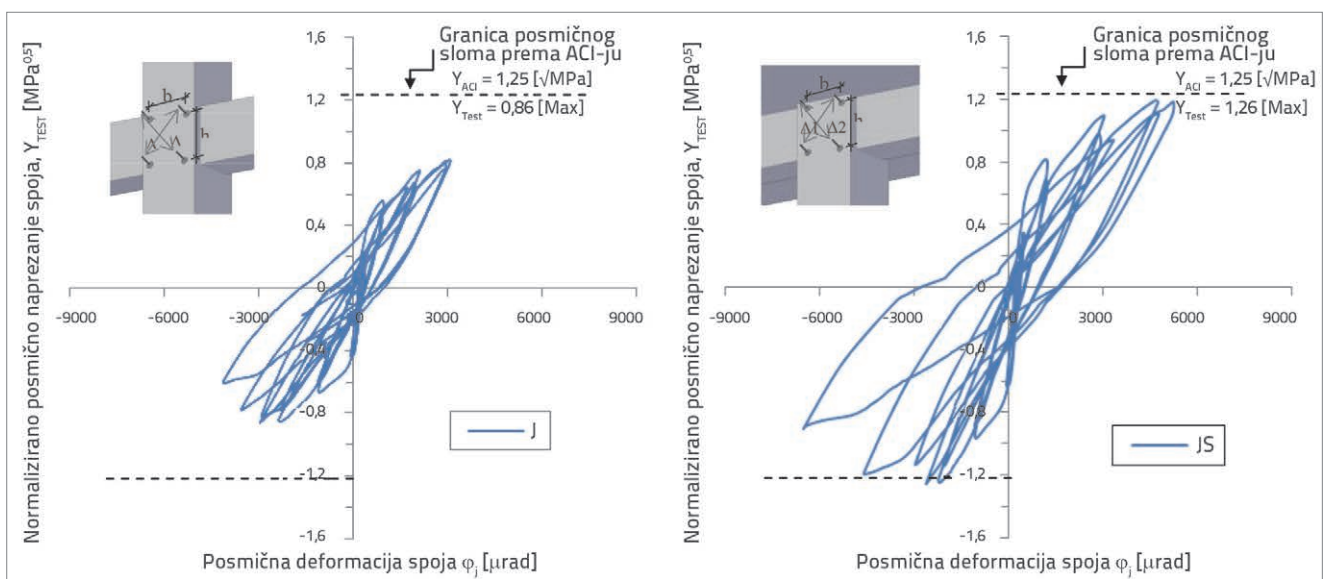
gdje su  $M_{bN}$  i  $M_{bS}$  momenti savijanja grede na spoju na sjevernom i južnom licu,  $j_d$  je momentni krak unutarnje grede na kontaktu sjeverne i južne grede/stupa ( $j_d = h_b - d' - d''$ ), a pretpostavljeno je da ta vrijednost iznosi 195 mm. Sada se posmična sila u spoju može izraziti kako slijedi:

$$V_{jh} = \left[ \left( \frac{M_{bN}}{j_d} \right) + \left( \frac{M_{bS}}{j_d} \right) \right] - [V_{bN} + V_{bS}] \left( \frac{L}{2 \cdot h_c} \right) \quad (6)$$

Kako su  $M_{bN}$ ,  $M_{bS}$  momenti savijanja grede na licu spoja koji su jednaki  $V_{bN} \times (L/2 - h_j/2)$ , i  $V_{bS} \times (L/2 - h_j/2)$ , njihovom zamjenom u jednačbi (6) posmična sila u spoju može se ponovno napisati kako slijedi:

$$V_{jh} = [V_{bN} + V_{bS}] \left( \frac{L - h_j}{2 \cdot j_d} - \frac{L}{2 \cdot h_c} \right) \quad (7)$$

gdje je  $L$  ukupna dužina grede (uključuje južnu i sjevernu gredu),  $h_j$  je visina panela spoja (visina stupa), a  $h_c$  je ukupna visina stupa (indeksi S i N oznake su za sjever i jug). Tada se posmično naprezanje na spoju,  $\tau_{jh}$ , može izračunati kako slijedi:



Slika 14. Odnos između normaliziranog posmičnog naprezanja spoja i posmične deformacije spoja za spojeve J i JS

$$T_{jh} = V_{jh} / A_{jh} \tag{8}$$

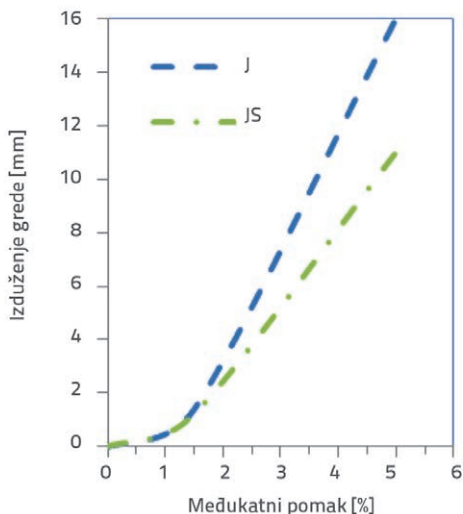
gdje  $A_{jh}$  predstavlja područje posmika efektivnog poprečnog presjeka, koje je izračunano na osnovi dokumenta ACI 352R-02 (Točka 4.3.1). Posmično naprezanje spoja može se normalizirati pomoću  $\sqrt{f'_c}$  (kvadratni korijen tlačne čvrstoće betona) kako slijedi:

$$Y_{Test} = T_{jh} / \sqrt{f'_c} \tag{9}$$

Na slici 14. prikazan je odnos normaliziranog posmičnog naprezanja spoja  $\gamma_{Test}$  i posmične deformacije spoja za oba uzorka. Može se zamijetiti da spoj u uzorku s pločom ima slične posmične deformacije spoja kod relativno sporog povećanja posmične deformacije u ranim fazama ispitivanja. Međutim, brzina povećanja raste kod ciklusa pomaka od 3,5 % i 5 %. U usporedbi s uzorkom JS, uzorak J odlikuje se manjom posmičnom deformacijom u spoju uslijed pomaka. Kod uzorka JS, maksimalne normalizirane vrijednosti posmika  $\gamma_{Test}$  bliske su faktoru posmične čvrstoće  $\gamma_{ACI}$  (1,25; seizmički spojevi povezani s dva nasuprotna vertikalna lica) koji se preporučuje u dokumentu ACI 352R [10]. Međutim, naprezanja su ispod te granice u slučaju spoja grede i stupa bez ploče (J). To znači da bi dodatno tlačno naprezanje djelovalo na spoj s dna grede, uz povećanje vlačnog naprezanja s vrha grede. Stoga međukatna ploča bitno povećava posmične deformacije i naprezanja spoja, kao što se to jasno može vidjeti na slici 14.

### 3.5. Eksperimentalna ocjena izduženja/rasterećenja grede

Jedan od faktora koji utječu na ponašanje podsklopova povezan je s ekspanzijom zona plastičnog zgloba i s posljedičnim izduženjem greda. U ovom istraživanju, izduženje glavnih greda vrlo malo je utjecalo na ponašanje spojeva kod pomaka manjih od 1,5 % (manjih od 1,5 mm kod oba uzorka).

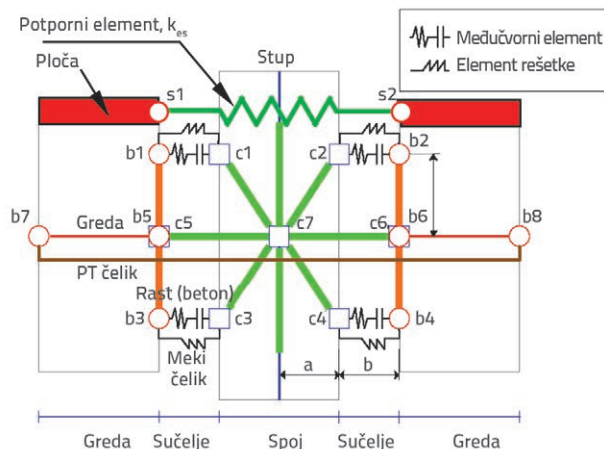


Slika 15. Izduženje/rasterećenje grede

U slučaju većih pomaka, izduženje greda bitno se povećalo zbog popriličnog širenja savojnih pukotina u gredama na obje strane stupa, kao što se to vidi na slici 15. Izduženje grede kod tih je uzoraka slično ili veće od vrijednosti izduženja koje se može naći u literaturi [14]. Ograničavajuće djelovanje međukatne ploče na izduženje glavnih greda vidljivo je na temelju manjih vrijednosti izduženja.

### 4. Izrada analitičkog modela

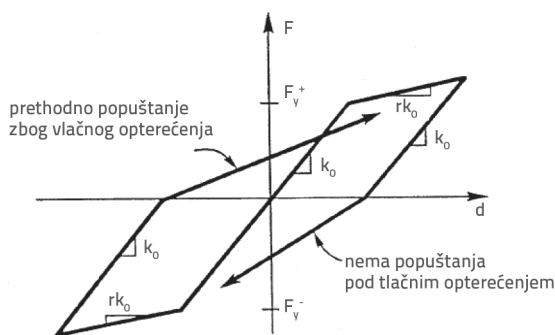
Model prikazan na slici 16. korišten je za simuliranje zone spoja između grede i stupa. Sličan model je prvobitno korišten za prikazivanje otvaranja pukotina i izduženja greda na spojevima između grede i stupa, pri čemu se nije u obzir uzimao utjecaj međukatne ploče u armiranobetonskim okvirnim i predgotovljenim sustavima, Kim i dr. [35], pa je stoga taj model modificiran za potrebe ove studije. Model je izrađen u programu RUAUMOKO-2D [29], a u njemu se koriste elementi iz standardne datoteke.



Slika 16. Izrada modela spoja

Čvorovi c1 do c7 odnose se na stup, a čvorovi b1 do b8 na gredu. U stupu, čvorovi c1 do c6 podređeni su glavnom čvoru (čvor c7), tako da se svih sedam čvorova kreće zajedno kao kruto tijelo. Čvorovi grede b2 i b4 na isti su način podređeni čvoru b6. Čvorovi s1 i s2 na gornjem licu grede uvode se radi spajanja elementa ploče. Deformacije spoja nisu modelirane. Momenti između grede i stupa prenose se horizontalnim vlačnim i tlačnim silama između parova čvorova, primjerice b2-c2. Čvorovi su u svakom paru spojeni s dva paralelna niza elemenata. Jedan je neelastični element rešetke koji simulira armaturu i pruža otpor osnim vlačnim ili tlačnim silama. Drugi je međučvorni element koji ima neelastična svojstva u tlaku, bez vlačne čvrstoće, pa stoga simulira ponašanje raspucanog betona i izduženje grede koje se povezuje s pojavom pukotina. Na slici se vide samo dva para čvorova na stranama stupa. U modelu se koristi deset ravnomjerno raspoređenih međučvornih elemenata kako bi se reproduciralo postupno odizanje koje se javlja u praksi. Posmik se prenosi po kontaktu

pa tako nastaju vrlo krute vertikalne opruge na čvorovima  $b_5 / c_5$  i  $b_6 / c_6$ . Element prednaprezanja (naknadno napeti čelik) korišten je samo za simulaciju naknadno napetog predgotovljenog elementa, ali ne i za sustav armiranog betona. Modeli s utjecajem i bez utjecaja ploče kontrolirani su uspoređivanjem prethodnih i postojećih rezultata ispitivanja. U svakoj komponenti svojstva su elemenata izravno povezivana s fizikalnim svojstvima. Grede i stupovi modelirani su pomoću elemenata okvira s četiri čvora [29] sa svojstvima raspucanog presjeka ( $I_e = 0.4 I_g$ ). Element rešetke mekog čelika s Cloughovom histerezom smanjenja krutosti [36], prikazan na slici 17., odabran je za definiranje odgovarajućih karakteristika sile – pomaka. Omjer između deformacija i ojačavanja čelika iznosi 0,02. Svojstvo krutosti mekog čelika definirano je na osnovi dužine popuštanja za koju je pretpostavljeno da predstavlja zbroj visine grede i dvostruke dužine sidrenja, prema dokumentu ACI 318-02 [31]. Svojstva betonskih međučvornih elemenata odabrana su na temelju dužine plastičnog zgloba [37] i idealno elastoplastične krivulje naprezanje – deformacija, gdje deformacija pri popuštanju iznosi 0,003 pri tlačnoj čvrstoći  $f_c'$ .



Slika 17. Cloughova histereza smanjenja krutosti

#### 4.1. Modeliranje ploče

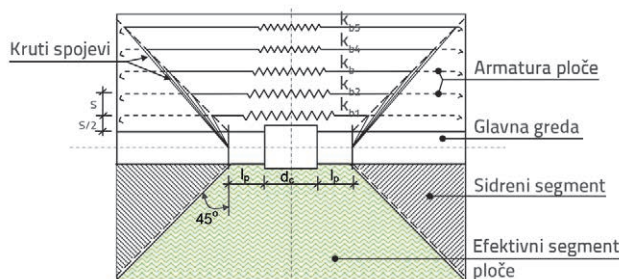
Velike vlačne deformacije razvijaju se u armaturi ploče u blizini uzdužne grede i smanjuju se povećanjem udaljenosti od grede. Taj trajni prijelaz prikazan je na slici 18. pomoću modificiranih višestrukoelastičnih opruga s krutim vezama. Tim krutim vezama spaja se kraj plastičnog zgloba grede s točkama u kojima uzdužne armaturne šipke ploče ulaze u cjelokupan efektivni segment ploče.

U ovom se modelu pojava pukotina pod kutom od  $45^\circ$  očekuje u efektivnom segmentu ploče između linija popuštanja. Smatra se da je efektivni čelik usidren izvan te zone. Elastične opruge između krutih veza odražavaju deformabilnost međukatnog sustava (zbog otvaranja pukotina) kada na njega djeluju ravninske vlačne sile. Svojstvo krutosti armature ploče ( $k_{bi} = EA/L_s$ ) izračunano je na osnovi dužine popuštanja svake šipke u efektivnoj širini i to kako slijedi:

$$L_s^{(i=1)} = (2l_p + d_c) + S \quad (10)$$

$$L_s^{(i=2, 3, \dots, n)} = L_s^{(i=1)} + 2S \cdot (i - 1) \quad (11)$$

gdje je  $l_p$  dužina plastičnog zgloba,  $S$  je razmak između uzdužnih armaturnih šipaka, a  $d_c$  je širina stupa. Krutost elementa ploče,  $k_{es}$ , jednaka je zbroju krutosti armaturnih šipaka ploče u efektivnom segmentu vlačne ploče. Pretpostavljeno je da je otpornost betona na vlačno naprezanje jednaka nuli te je za armiranje ploče prema Coughovoj histerezi smanjenja odabran element rešetke.



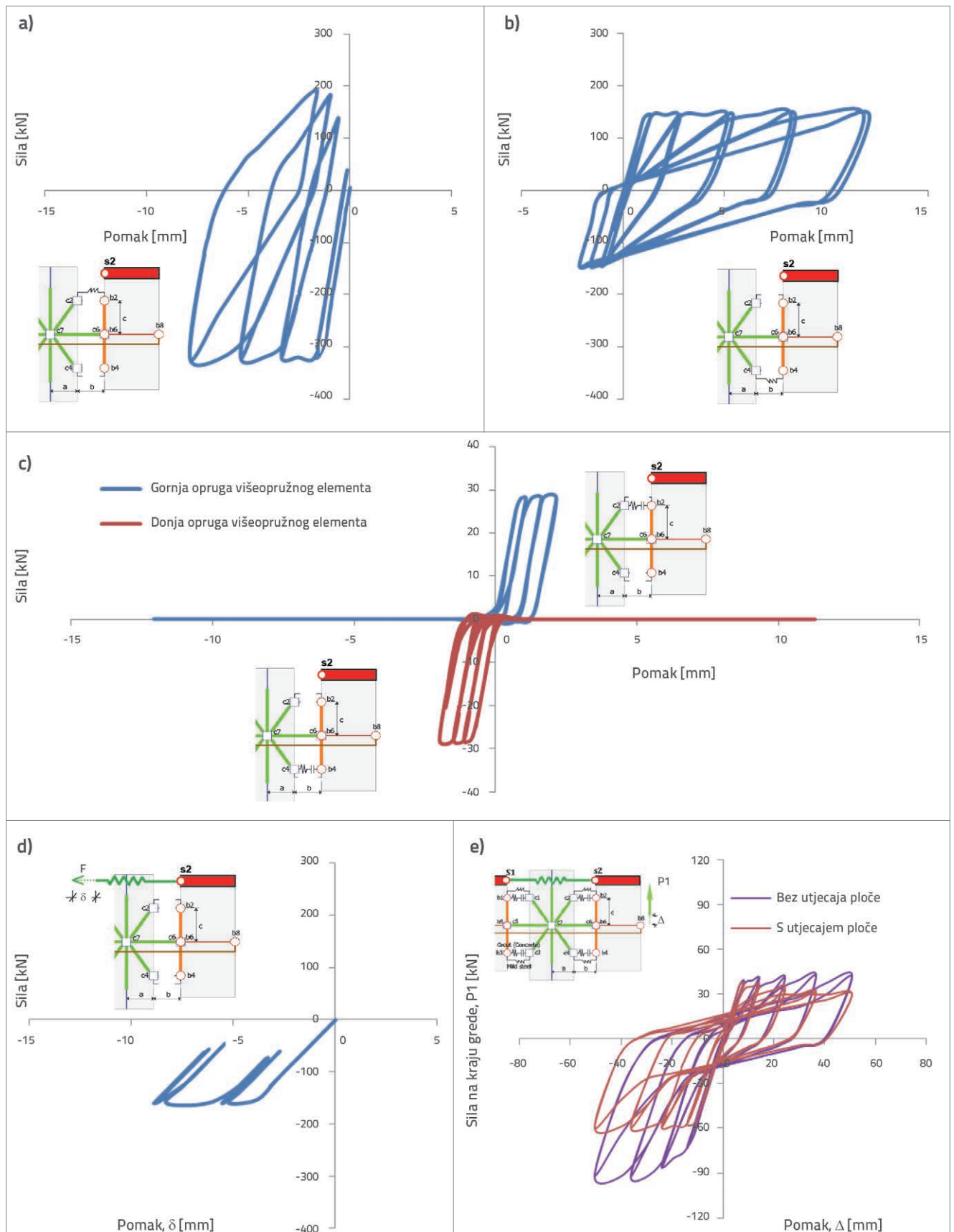
Slika 18. Model elementa ploče (prikaz jedne strane ekvivalentne armature ploče)

#### 4.2. Pojedinačni profili odziva

Složeno ponašanje spoja podijeljeno je na karakteristike opterećenja – deformacije triju važnih komponenta, a to su: deformacije armature (gornja i donja armatura), elementi višestruko-elastičnih opruga (beton) i element vlačne ploče. Odzivi svake pojedine komponente modela ispitani su da bi se dobila preliminarna ocjena općeg odziva podsklopa. Histerezni odziv sile/deformacija za tri osnovne komponente, korišten za simulaciju jednog ispitnog uzorka JS, prikazan je na slici 19. Histerezni odzivi gornje i donje armature od mekog čelika prikazani su na slikama 19.a i 19.b. Slika 19.c prikazuje odzive dviju odabranih višestrukoelastičnih opruga, sastavljenih od ukupno deset opruga, pri čemu je prva opruga na gornjem licu grede, a druga na donjem licu grede. Slika 19.d jasno pokazuje da se utjecajno područje elemenata ploče uglavnom nalazi u vlačnoj zoni. Slika 19.e prikazuje opći odziv podsklopa JS dobiven pomoću predloženog modela za oba slučaja, s utjecajem i bez utjecaja međukatne ploče. Na ovoj slici prikazan je kombinacija pojedinih odziva zbog tri komponente spoja.

#### 5. Kontrola i potvrda modela

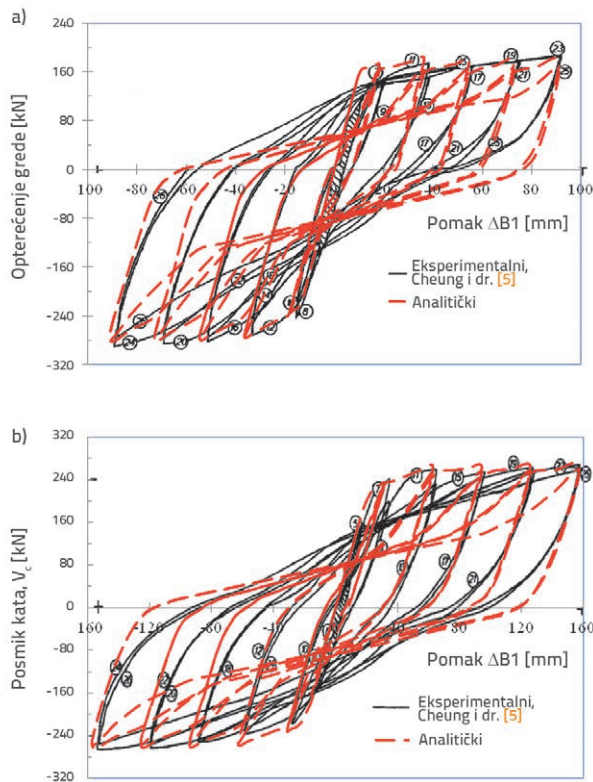
Kako bi se ispitala sposobnost predložene metode da predvidi histerezne petlje unutarnjih podsklopova ploča-greda-stup, model je najprije služio za ocjenjivanje podsklopova greda-stup s međukatnom pločom koje su prije ispitali Cheung i dr. [5], te Shin i LaFave [9]. Dobiveni rezultati prikazani su u istom mjerilu na slici 20., za eksperimente Cheunga i dr. [5] s dobrom podudarnošću u simuliranju odziva grede (slika 20.a) i stupa (slika 20.b). Na slici 21. vidi se podudarnost rezultata



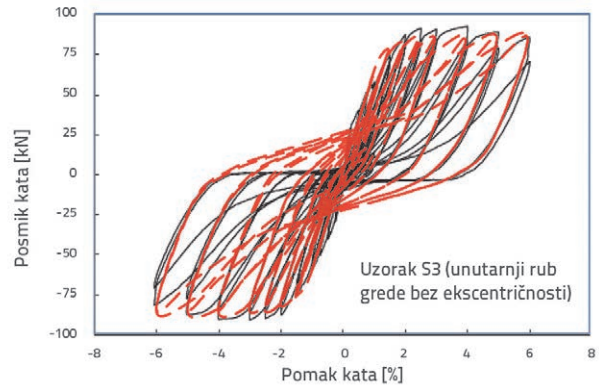
Slika 19. Pojedinačni profil odziva za modeliranje uzorka JS: a) odziv mekog čelika na vrhu; b) odziv mekog čelika na dnu; c) odziv višestruko-elastičnih opruga (betona); d) odziv vlačne ploče; e) odziv pomaka sile za sjevernu gredu



predloženog modela s rezultatima Shina i Lafavea [9] (uzorak S3, bez ekscentričnosti između središnjih linija glavne grede i stupa). Efekt gubitka krutosti (srednji dio svake histerezne petlje bio je relativno uzak) nije došao do izražaja zbog smanjenja krutosti i čvrstoće, a to se može pripisati gubicima uslijed proklizavanja armature u zoni spoja koje je zabilježeno tijekom ispitivanja. Međutim, opći su uvjeti bili isti.



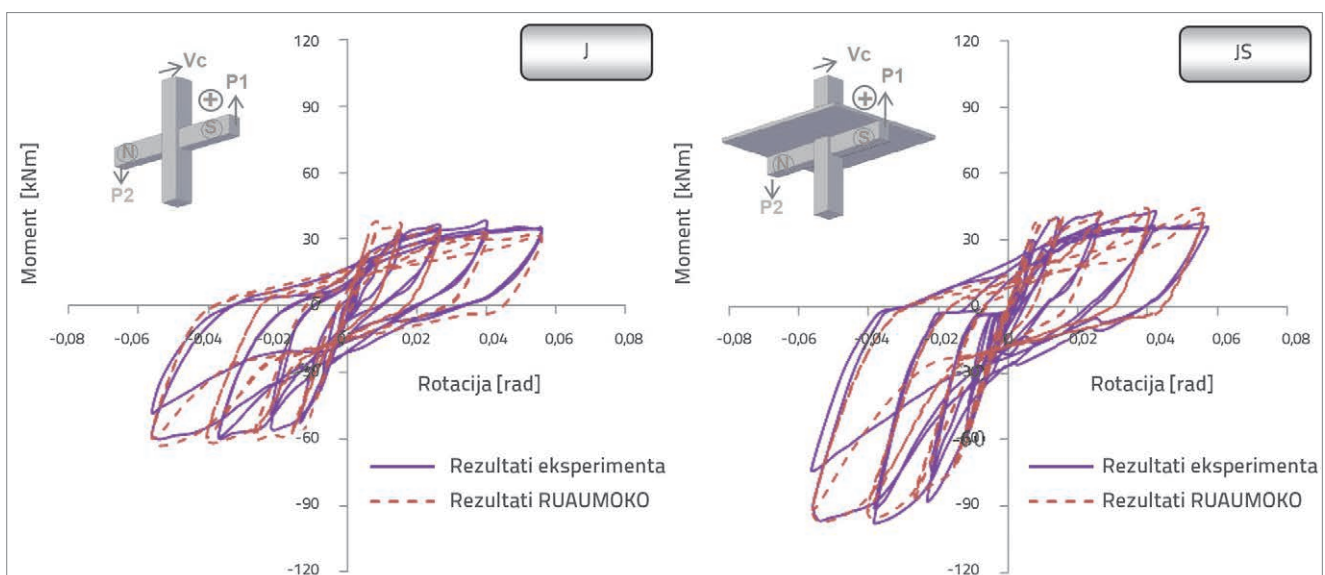
Slika 20. Provjera modela pomoću ispitivanja koja su obavili Cheung i dr. [5]: a) odnos opterećenja grede i pomaka grede; b) odnos katnog posmika i bočnog pomaka stupa



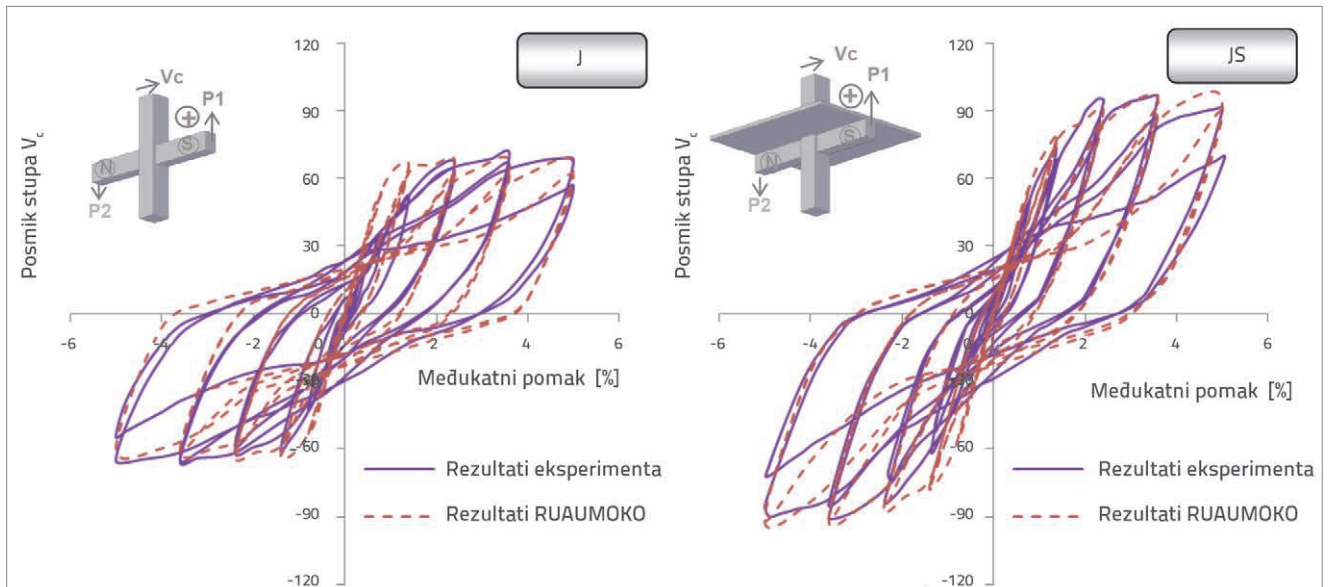
Slika 21. Provjera modela pomoću ispitivanja koja su obavili Shin i LaFave [9]

Stoga su rezultati postojećih ispitivanja podsklopova također korišteni i za baždarenje dvodimenzionalnih modela spoja. Usporedbe eksperimentalnih i numeričkih rezultata za oba modela, s pločom i bez nje, prikazani su na slikama 22. do 25. Usporedbe eksperimentalnih i analitičkih rezultata dovele su do sljedećih zaključaka:

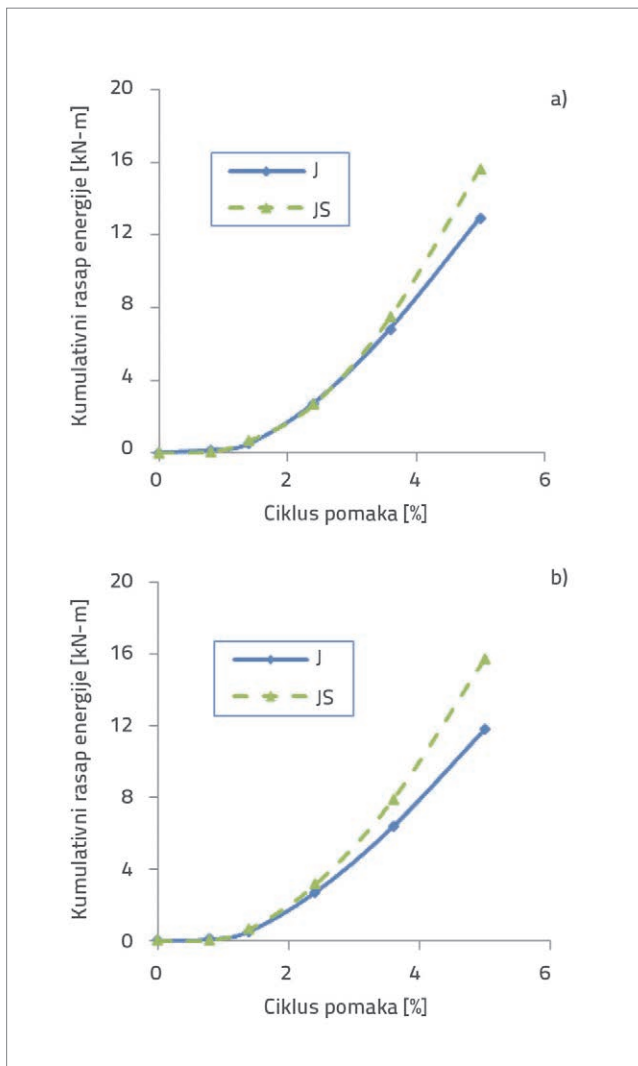
1. Uočena je zadovoljavajuća podudarnost između numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Najznačajniji rezultati su histerezne krivulje (slike 22. i 23.) nacrtane u istom mjerilu. Kako su izmjerene i računске vrijednosti pri cikličnom opterećenju gotovo jednake, čini se da je utjecaj elementa ploče na podsklopove značajan.
2. Modelom se može dovoljno precizno simulirati gubitak čvrstoće do kojeg dolazi kod nekih elemenata konstrukcije. Efekti gubitka krutosti koji utječu na globalno ponašanje uglavnom su uzrokovani popuštanjem armature i pojavom pukotina u betonu u zoni plastičnog zgloba.
3. Uglavnom se može reći da je izmjerena i izračunana kumulativna vrijednost rasapa energije, koja sadrži aspekte



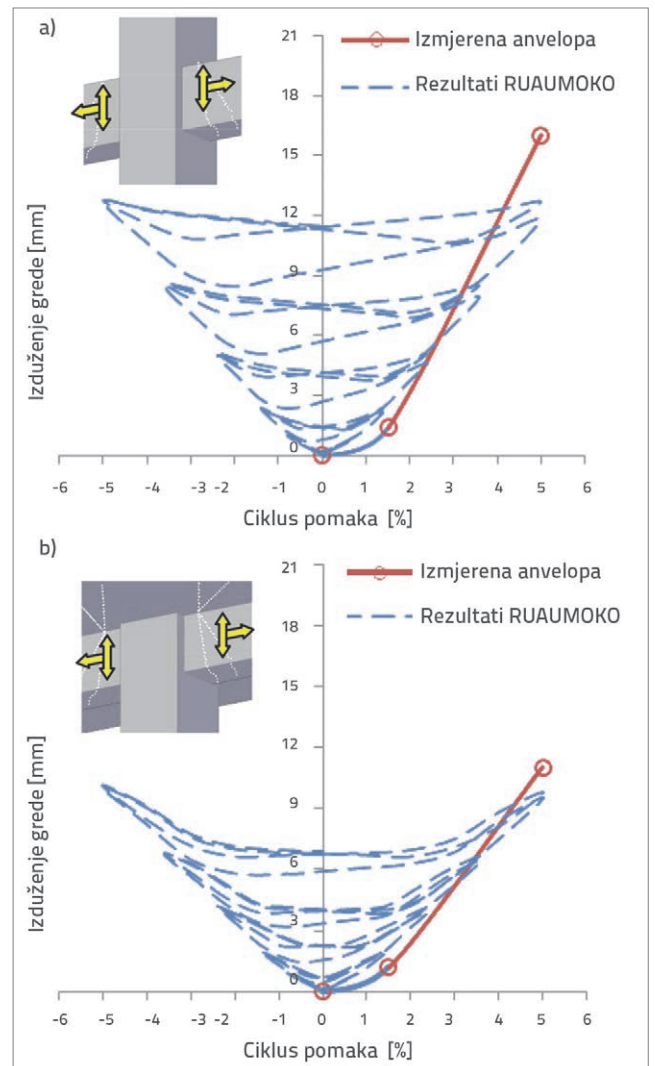
Slika 22. Simulacija odnosa histereznih petlji momenta savijanja grede i rotacije



Slika 23. Odnos simulacije histerezne petlje posmika stupa i međukatnog pomaka



Slika 24. Kumulativna vrijednost rasapa energije: a) eksperimentalno; b) analitički



Slika 25. Odnos izduženja/rasterećenja grede i međukatnog pomaka: a) uzorak J; b) uzorak JS

čvrstoće i deformabilnosti, jednaka (slika 24.), što potvrđuje da je model pouzdan.

4. Oba modela, s utjecajem i bez utjecaja ploče, mogu se koristiti za relativno precizno procjenjivanje utjecaja izduženja elementa (slika 25.). Osim toga, međukatna ploča može bitno umanjiti tu pojavu, naročito kod velikih deformacija (katni pomak > 1,5 %). Taj se efekt također može zamijetiti i u analizi okvira s više spojeva; međutim, izduženje glavnih greda djelomično je ograničeno vanjskim stupovima, što dovodi do osnovog tlaka u glavnim gredama.

## 6. Zaključak

U ovom je istraživanju obavljena eksperimentalna i analitička studija u svrhu istraživanja ponašanja podsklopova spoja unutarnje grede i stupa, s pločom i bez ploče. Tijekom izrade studije ustanovljeno je sljedeće:

- Međukatne ploče mogu bitno doprinijeti otpornosti konstrukcije na savijanje, a to se često ne uzima u obzir pri projektiranju bočnih opterećenja. Eksperimentalni rezultati pokazuju znatno povećanje negativnog momenta savijanja grede (67,1 %) te čvrstoće na savijanje u polju nosača (16,7 %). Povećanje otpornosti grede zbog prisutnosti ploče uvjetuje povećanje zahtjeva u vezi s posmikom stupa, i to u prosjeku za 33 % u oba smjera opterećenja. Veća čvrstoća grede uvjetuje veće zahtjeve u pogledu stupa, što može biti
- štetno jer se tako povećava mogućnost pojave mehanizma mekog kata ili popuštanja stupa uslijed posmika, ako se ne poduzmu odgovarajuće mjere.
- Posmično naprezanje horizontalnog panela spoja raste zbog djelovanja ploče, a u spoju to naprezanje preuzima tlačni kosnik. Međutim porast sile u kosniku može dovesti do tlačnog popuštanja kosnika. Stoga se pri analizi spoja treba uzeti u obzir povećanje čvrstoće grede zbog utjecaja ploče. Velika efektivna širina ploče može izazvati veliku vrijednost posmika kako u spoju tako i u gredi, što bi moglo dovesti do preranog popuštanja zbog posmika.
- Kod armiranobetonskih okvira izloženih bočnom cikličnom opterećenju, neelastično savijanje dovodi do povećanja dužine greda, što se naziva "izduženjem grede". To se izduženje povećava usporedno s porastom neelastične savojne deformacije. Tu treba napomenuti da međukatna ploča može znatno ublažiti tu pojavu, naročito kod većih deformacija (međukatni pomak > 1,5 %).
- Kao rezultat ove studije može se navesti da razvijeni model spoja omogućuje dovoljno precizno predviđanje rezultata ispitivanja te jednostavno predviđanje utjecaja ploče i izduženja grede, bez potrebe za složenim modeliranjem pomoću nelinearnih konačnih elemenata. Međutim, za precizno ocjenjivanje ponašanja podsklopa trebaju se razmotriti slučajevi s gubicima od proklizavanja u spoju.

## LITERATURA

- [1] Masi, A., Santarsiero, G., Nigro, D.: Cyclic tests on external RC beam-column joints: role of seismic design level and axial load value on the ultimate capacity, *Journal of Earthquake Engineering*, 17 (1), pp. 110-36, 2012.
- [2] Paulay, T., Park, R., Priestley, M.: Reinforced concrete beam-column joints under seismic actions, *ACI Structural Journal*, 75 (11), pp. 585-593, 1978.
- [3] Abdel-Fattah, B., Wight, K.: Study of moving beam plastic hinging zones for earthquake-resistant design of R/C buildings, *ACI Structural Journal*, 84 (1), pp. 31-39, 1987.
- [4] Xilin, L., Tonny, U., Sen, L., Fangshu, L.: Seismic behavior of interior RC beam-column joints with additional bars under cyclic loading, *Earthquakes and Structures*, 3 (1), pp. 37-57, 2012.
- [5] Cheung, P., Paulay, T., Park, R.: A reinforced concrete beam column joint of a prototype one-way frame with floor slab designed for earthquake resistance, *Research Report 87-6*, University of Canterbury, New Zealand, 1987.
- [6] French, W., Moehle, P.: Effect of floor slab on behavior of slab-beam-column connections, design of beam-column joints for seismic resistance, *ACI Structural Journal*, SP-123, pp. 225-258, 1991.
- [7] Alcocer, M., Jirsa, O.: Strength of reinforced concrete frame connections rehabilitated by jacketing, *ACI Structural Journal*, 90 (3), pp. 249-261, 1993.
- [8] Aycardi, L., Mander, J., Reinhorn, A.: seismic resistance of reinforced concrete frame structures designed only for gravity loads: Experimental performance of subassemblage, *ACI Structural Journal*, 91 (5), pp. 552-563, 1995.
- [9] Shin, M., LaFave, M.: Reinforced concrete edge beam-column-slab connections subjected to earthquake loading, *Magazine of Concrete Research*, 55 (6), pp. 273-291, 2004.
- [10] ACI-ASCE Committee 352R: Recommendations for design of beam-column connections in monolithic reinforced concrete structures, *Reported by Joint ACI-ASCE Committee 352R*, Detroit, 2002.
- [11] NZS 3101: New Zealand Standard-Model Building By-Laws Part, *New Zealand Standard Institute*; Wellington, New Zealand, 2006.
- [12] CSA-A23.3: Design of Concrete Structures. *Canadian Standards Association*, Ontario, Canada; 2004.

- [13] Durrani, J., Zerbe, E.: Seismic resistance of R/C exterior connections with floor slabs, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 113 (8), pp. 1850-1864, 1987.
- [14] Zerbe, E., Durrani, J.: Seismic response of connections in two-bay R/C frame subassemblies, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 115 (11), pp. 2829-2844, 1989.
- [15] Fenwick, R., Fong, A.: The behaviour of reinforced concrete beams under cyclic loading. *Research Report no.176*, Dept. of Civil Eng., Univ. of Auckland, New Zealand, 1979.
- [16] Elwood, J., Pampanin, S., Kam, Y.: 22 February 2011 Christchurch earthquake and implications for the design of concrete structures, in *Proc. International Symp. on Eng. Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, Tokyo, 2012.
- [17] Youssef M, Ghobarah A. Modelling of RC beam-column joints and structural walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 5 (1), pp. 93-111, 2001.
- [18] Lowes, L., Altoontash, A.: Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 129 (12), pp. 1686-1697, 2003.
- [19] Mitra, N., Lowes, L.: Evaluation, calibration, and verification of a reinforced concrete beam-column joint model, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 133 (1), pp. 105-120, 2007.
- [20] Kim, J., LaFave, M.: Key influence parameters for the joint shear behavior of reinforced concrete (RC) beam-column connections, *Engineering Structures*, 29, pp. 2523-2539, 2007.
- [21] Manfredi, G., Verderame, M., Lignola, P.: A F.E.M. model for the evaluation of the seismic behavior of internal joints in reinforced concrete frames. In: *14<sup>th</sup> World conference on earthquake engineering*, Beijing, China, 2008.
- [22] Sagbas, G., Vecchio, J., Christopoulos, C.: Computational modelling of the seismic performance of beam-column subassemblies, *Journal of Earthquake Engineering*, 15 (4), pp. 640-663, 2011.
- [23] Fenwick, R., Davidson, B.: Elongation in ductile seismic resistant reinforced concrete frames, in *Proc., Tom Paulay Symp., Farmington Hills, Mich., American Concrete Institute*, SP 157 (7), pp. 143-170, 1995.
- [24] Shahrooz, M., Pantazopoulou, J., Chern, P.: Modeling slab contribution in frame connections, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 118 (9), pp. 2475-2494, 1992.
- [25] MacRae, G., Umarani, C.: A concept for consideration of slab effects on building seismic performance, in *Proc. NZSEE New Zealand Society for Earthquake Engineering Conf.*, Christchurch, Paper no. 22, 2006.
- [26] Lau, D.: Influence of precast prestressed flooring on the seismic performance of reinforced concrete perimeter frame buildings, *Report Number 653*, Dept. of Civil and Envi. Engg., Univ. of Auckland, New Zealand, 2007
- [27] Peng, B.: Seismic performance assessment of reinforced concrete buildings with precast concrete floor systems, Ph.D. thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2009.
- [28] Unal, M., Burak, B.: Development and analytical verification of an inelastic reinforced concrete joint model, *Engineering Structures*, 52, pp. 284-294, 2013.
- [29] Carr, A.: Ruaumoko 2D: User Manual, computer program library, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2008.
- [30] UBC, Handbook to the uniform building code: An Illustrative Commentary. Whittier, California: International Conference of Building Officials, 1997.
- [31] ACI Committee 318: Building code requirements for reinforced concrete, American Concrete Institute, Detroit, 2002.
- [32] ACI Committee 301: Specifications for Structural Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 2002.
- [33] ASTM C33: Standard specification for concrete aggregates, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, 1989.
- [34] ASTM C39: Practice standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, 1989.
- [35] Kim, J., Stanton, J., MacRae, G.: Effect of beam growth on reinforced concrete frames, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 130 (9), pp. 1333-1342, 2004.
- [36] Otani, S.: Hysteresis models of the reinforced concrete for earthquake response analysis, *Journal of Faculty of Engineering*, 36 (2), pp. 407-441, 1981.
- [37] Priestley, M., Seible, F., Calvi, G.: *Seismic design and retrofit of bridges*, Wiley, New York, 1996.