

Primljen / Received: 1.10.2018.

Ispravljen / Corrected: 24.5.2019.

Prihvaćen / Accepted: 10.6.2019.

Dostupno online / Available online: 10.12.2019.

Ispitivanja rubnih spojeva greda-stup postojećih AB konstrukcija na djelovanje potresa

Autori:



¹Izv.prof.dr.sc. **Turgay Cosgun**
costur@istanbul.edu.tr



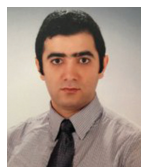
²Dr.sc. **Cumhuri Cosgun**
cosgun@marshall.edu



³**Abdulrauf Kanishka**, dipl.ing.grad.
ab.raufk@gmail.com



⁴Doc.dr.sc. **Atakan Mangir**
amangir@medipol.edu.tr



¹Izv.prof.dr.sc. **Baris Sayin**
barsayin@istanbul.edu.tr
Autor za korespondenciju



⁵Izv.prof.dr.sc. **Ahmet Murat Türk**
murat.turk@iku.edu.tr

¹Istanbulsko sveučilište Cerrahpasa, Turska Građevinski fakultet

²Sveučilište Marshall, SAD Fakultet informacijskih tehnologija i inženjerstva

³Istanbulsko sveučilište, Turska Institut za poslijediplomske studije znanosti i inženjerstva

⁴Istanbulsko sveučilište Medipol, Turska Fakultet tehničkih i prirodnih znanosti

⁵Istanbulsko sveučilište Kultur, Turska Građevinski fakultet

Prethodno priopćenje

Turgay Cosgun, Cumhuri Cosgun, Abdulrauf Kanishka, Atakan Mangir, Baris Sayin, Ahmet Murat Türk

Ispitivanja rubnih spojeva greda-stup postojećih AB konstrukcija na djelovanje potresa

U radu su izneseni prijedlozi za poboljšanje svojstava spojeva greda-stup postojećih AB konstrukcija uslijed potresnog djelovanja. Analizirana je uporaba betona niske čvrstoće, glatkog armaturnog čelika bez spona u spojevima te je ispitano ponašanje spojeva u uvjetima pod cikličnim opterećenjem. U okviru eksperimentalnog istraživanja proizvedeno je i ispitano pet uzoraka s različitim rasporedom armature. Na temelju rezultata zaključeno je da su kritični parametri koji određuju svojstva postojećih konstrukcija, raspored spona u spojevima i upotreba kuka za sidrenje uzdužne armature koje su savijene pod kutom od najmanje 90°.

Ključne riječi:

spoj AB greda-stup, beton niske čvrstoće, ciklično opterećenje, eksperimentalno ispitivanje

Research Paper

Turgay Cosgun, Cumhuri Cosgun, Abdulrauf Kanishka, Atakan Mangir, Baris Sayin, Ahmet Murat Türk

Seismic load tests on exterior beam-column connections of existing RC structures

Suggestions for improving seismic performance of beam-column connections of the existing RC structures are presented in this paper. The use of low-strength concrete with plain bars without stirrups in joints is analysed, and behaviour of joints in the aforementioned conditions under cyclic load is investigated. Five specimens with different reinforcement configurations were produced and tested in the experimental process. Based on results, it was concluded that critical parameters for the performance of existing structures are: stirrup arrangement in joints, and the use of at least 90-degree hooks in longitudinal reinforcement of beams.

Key words:

RC beam-column joint, low-strength concrete, cyclic load, experimental study

Vorherige Mitteilung

Turgay Cosgun, Cumhuri Cosgun, Abdulrauf Kanishka, Atakan Mangir, Baris Sayin, Ahmet Murat Türk

Untersuchung der Balken-Pfeiler-Kantenverbindung bei bestehenden Stahlbetonkonstruktionen bei Erdbeneinwirkung

In der Abhandlung werden Empfehlungen zur Verbesserung der Eigenschaften der Balken-Pfeiler-Verbindungen bestehender Stahlbetonkonstruktionen aufgrund von Erdbeben gegeben. Analysiert wird die Verwendung von niedrigfestem Beton, glattem bewehrten Stahl ohne Klemmen in den Verbindungen und es wurde das Verhalten der Verbindungen unter zyklischen Belastungsbedingungen untersucht. Im Rahmen der experimentellen Untersuchung wurden fünf Proben mit unterschiedlicher Bewehrungsanordnung hergestellt und getestet. Aufgrund der Ergebnisse kam man zu dem Schluss, dass die kritischen Parameter, welche die Eigenschaften der bestehenden Konstruktion festlegen, die Anordnung der Klemmen in den Verbindungen und die Verwendung von Haken für die Verankerung der Längsbewehrung sind, die in einem Winkel von mindestens 90° gebogen sind.

Schlüsselwörter:

Balken-Pfeiler-Verbindung aus Stahlbeton, niedrigfester Beton, zyklische Belastung, experimentelle Untersuchung

1. Uvod

U suvremenim i razvijenim zemljama uporaba visokokvalitetnih betona i rebraste armature kod građevina od armiranog betona (AB) vrlo je česta, posebno u zemljama sklonim potresima. Međutim, kvaliteta betona koja se primjenjuje za građevinske konstrukcije zemalja u razvoju niža je od one u razvijenim zemljama. Korištenje običnog glatkog čelika napuštena je prije mnogo godina u brojnim razvijenim zemljama širom svijeta. Iako se u novoizgrađenim građevinama ne preferira glatka armatura, takva se armatura još uvijek nalazi u većini postojećih građevina. Upravo je u tijeku značajan broj istraživanja koja se odnose na popravak i ojačanje AB konstrukcijskih elemenata. Međutim, zajedničko je mišljenje da većina istraživanja možda ne vrijedi za postojeće građevine zbog niske čvrstoće betona i glatkog čelika. Stoga su svojstva, ovisno o fondu građevina, važna za istraživanja koja uključuju navedene tipične točke primjene.

Postoje i neka eksperimentalna istraživanja u literaturi koja se bave spojevima greda-stup podstandardnih armiranobetonskih zgrada i nekih metoda poboljšanja s novim materijalima i tehnikama [1, 2]. U tim je istraživanjima učinak kompozita od polimera ojačanih karbonskim vlaknima (FRP) za ojačavanje spojeva greda-stup prikazan kroz 3D ispitivanje okvira (četiri trodimenzionalna armiranobetonska okvira u punoj veličini) koji predstavljaju podstandardne betonske građevine. Neka analitička predviđanja seizmičkih svojstava prikazana su s postojećom seizmičkom procjenom i smjernicama za ojačanje te uspoređena s rezultatima ispitivanja. Kao što je navedeno u srodnim studijama, složenost problema i raznolikost parametara čine predmet istraživanja inženjerskim izazovom. Realan prikaz stvarnih kvaliteta materijala (tj. betona niske čvrstoće), detalja ojačanja (tj. upotreba glatkih šipki, raspored posmične armature i sidrenje šipki grede), vrste nedostataka i povezani oblici sloma glavna su pitanja koja treba riješiti.

Svojstvo okvirnih konstrukcija ne ovisi samo o pojedinim konstrukcijskim elementima već i o cjelovitosti spojeva. Ako se građevina nalazi u zoni bez potresa i projektirana je samo za gravitacijska opterećenja, provjera izvedbe spojeva često nije kritična i stoga se obično ne provodi. Međutim, u dosadašnjim su potresima zabilježeni katastrofalni slomovi povezani sa spojevima, osobito u posljednjih nekoliko potresa u Turskoj [3-5]. Spoj greda-stup prolazi kroz ozbiljnu degradaciju krutosti i čvrstoće kad je izložen potresnim opterećenjima. Jedna od osnovnih pretpostavki proračuna okvira jest ta da su spojevi dovoljno jaki oduprijeti se vanjskim djelovanjima (momenti, uzdužne i poprečne sile) koja nastaju pri opterećenju, te da prenesu sile iz jednog konstrukcijskog elementa na drugi (grede na stupove). Također se pretpostavlja da su spojevi kruti i da se elementi, koji se spajaju u spoju, deformiraju (rotiraju) pod istim kutom [6]. U većini slučajeva spojevi okvirnih konstrukcija izloženi su opterećenjima u potresnom okruženju. Stoga su spojevi ključne zone u smislu učinkovitog prijenosa sila i momenata kroz spojne elemente kao što su grede i stupovi. Dakle, spoj greda-stup u nekom višekatom okviru prenosi opterećenja

i momente s krajeva greda na stupove. Spoj greda-stup se definira kao dio stupa unutar dubine najdublje grede koja ulazi u stup [7]. Na ponašanje spoja greda-stup utječe nekoliko varijabli koje uključuju čvrstoću betona, raspored armature spoja, veličinu i količinu armature grede i stupa, uzdužno opterećenje u stupu te vezu između betona i uzdužnih šipki u gredi i stupu.

U većini postojećih građevina u Turskoj spojevi greda-stup nemaju dovoljno uzdužne armature, beton je niske čvrstoće te je ugrađena glatka armatura. U literaturi nalazimo ograničen broj istraživanja u kojima se ispituje ponašanje ovog tipa spoja greda-stup u postojećim građevinama. Stoga ponašanje ovih vrsta konstrukcijskih elemenata nije dobro definirano ni poznato. U ovom istraživanju nastojalo se ispitati ponašanje spojeva AB-stupa i grede pod utjecajem cikličnih i konstantnih uzdužnih opterećenja.

Od 1960-ih provedena su brojna istraživanja kako bi se razumjelo ponašanje stup - greda pod utjecajem potresa. Prva istraživanja na spojevima greda-stup proveli su Hanson i Connor [8], a njihovi su rezultati kasnije poboljšani u [9-12]. Najnovija istraživanja spojeva greda-stup proveli su Kim i sur., Choi i Kim, Joyklad i sur. i Kim i Yu [13-16]. Budući da nedostaju istraživanja koja se fokusiraju na ponašanje područja spoja greda - stup te uzimajući u obzir nedostake i pogreške u primjenama u Turskoj, još je uvijek važno pitanje mogu li se rezultati dobiveni za konstrukcije u razvijenim zemljama potvrditi uporabom podataka o zgradama. Naime, istraživanja vezana uz ponašanje spojeva greda-stup s obzirom na djelovanje potresa provedena posljednjih godina predstavljaju značajnu prednost za izvršenje tog zadatka.

Hanson i Connor [8] proveli su jedno od početnih eksperimentalnih istraživanja u vezi sa spojem greda i stupa. Ehsani i Wight [17] primijetili su da poprečne grede imaju dodatno poprečno djelovanje na spoj i utjecali su na ponašanje spoja u njihovim eksperimentima. U istraživanju Pessiki i drugi [18], nije bilo poprečne armature postavljene u području spoja, a kontinuirana armatura bila je smještena na donji dio područja spoja. Kao rezultat ispitivanja, otkrivene su znatne posmične pukotine u području spoja pri slomu. S druge strane, ispitivanja provedena na području spoja s kontinuiranom uzdužnom gredom utvrdila su da je migrator došao do točke odvajanja uzdužne armature pod cikličnim opterećenjima. Kaku i Asakusa [19] primijetili su da je većina spojnog područja zamaknuta kad su izmjerene posmične sile greda na uzorcima, a te posmične sile iznosile su manje od 0,5 %. Kad posmična deformacija prelazi 0,8 %, nađeno je naglo povećanje posmične deformacije. Beres i drugi [20] uočili su da je otpornost na posmik u betonu u području spoja znatno veća nego što je izračunana jednadžbom danom u ACI-ASCE 352R [21].

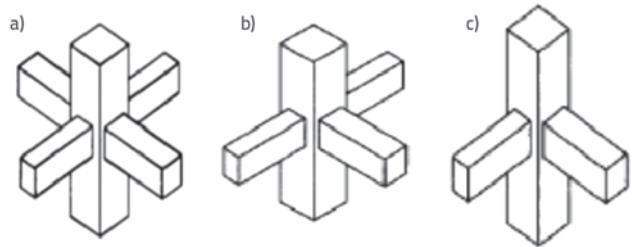
Tsonos i sur. [22] ispitali su dvadeset uzoraka pune veličine kako bi odredili izgled armiranih rubnih spojeva grede i stupa. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja pokazali su da je upotreba kose armature, koja se preklapa u području spoja, jedna od najučinkovitijih metoda koje se mogu primijeniti za povećanje potresne otpornosti vanjskog područja spoja. Higazy i drugi [23] u eksperimentima su ispitali šest spojeva

normalne i visoke čvrstoće kako bi otkrili svojstva unutarnjeg spojnog područja pod niskim uzdužnim pritiskom i uzdužnim povlačenjem. Prosječni pritisak od 42 MPa uočen je na točkama čvora visoke čvrstoće. Također je primijećeno da uzdužno opterećenje utječe na ponašanje područja spoja pri djelovanju malog uzdužnog opterećenja na stup, a došlo je i do smanjenja duktilnosti, čvrstoće čvora na posmik i smanjenja kapaciteta rasipanja energije, posebno u slučaju skupljanja.

Tsonos [24] je istraživao tri područja spajanja stup-nosač koja su sadržavala uzdužnu užad u području spajanja. Rezultati ispitivanja uspoređeni su s rezultatima uzoraka izrađenih uz pomoć uzdužne kombinirane opreme za smicanje prema odredbama CEB, Eurokoda 8 i NZS 3101 [25-27]. Usporedna procjena pokazala je da je uzdužna armatura učinkovita za povećanje protupotresne otpornosti područja spoja. Vrlo je malo analitičkih modela s obzirom na to da su deformacije rijetke zbog posmika i odvajanja, što se javlja u području spoja. Do sada je predloženo samo nekoliko modela. Ponašanje područja spoja greda-stup najprije su opisali Park i Paulay [28], a kasnije su Paulay i drugi [29] detaljno razradili to ponašanje. Pessiki i drugi [18] primijetili su da je većina analitičkih okvira uzimala područje spoja kao potpuno kruto pa su predstavili alternativni pristup. Hoffmann i drugi [30] su neizravno riješili pitanje ispitivanja problema modeliranja područja spoja s podešavanjem svojstava okvirnih elemenata spojenih tim čvorom. Posmična nosivost u području spoja se smanjuje smanjivanjem nosivosti savojnih elemenata. Formulacija prikazana u ACI-ASCE 352R [21] primijenjena je u analizi za izračunavanje nosivosti područja spoja. Isti je pristup primijenjen za problem pucanja u središnjem području spoja uzdužne armature u AB gredi.

Diskontinuitet uzdužne armature se analizira u izračunu ekvivalentnog momenta za kapacitet torzijskog momenta - moment savijanja u trenutku kada se uzdužna armatura počne odvajati (eng. *peel*). Bracci i drugi [31] predložili su model koji se temelji na načelu smanjenja krutosti stupova i greda množenjem momenata inercije i nekih koeficijenata. Koeficijenti su izvedeni iz inženjerskog pristupa ili eksperimentalnih rezultata. U tom pristupu, koji su predložili Hoffmann i drugi [30], zajednički problem riješen je neizravno. Fleury i drugi [32] predstavili su model koji uključuje armaturu, beton i adhezijsko ponašanje. U literaturi postoje i modeli konačnih elemenata i prošireni modeli koji razmatraju posmične sile i sile prijanjanja pri prijanjanju-odvajanju [33, 34]. Hegger i drugi [35] predložili su model za procjenu posmične čvrstoće i oblika pomaka područja spojeva koji nisu predviđeni za seizmičko djelovanje. Hwang i drugi [36] istraživali su učinke posmične armature koja je postavljena u području spoja na posmični kapacitet zone spoja.

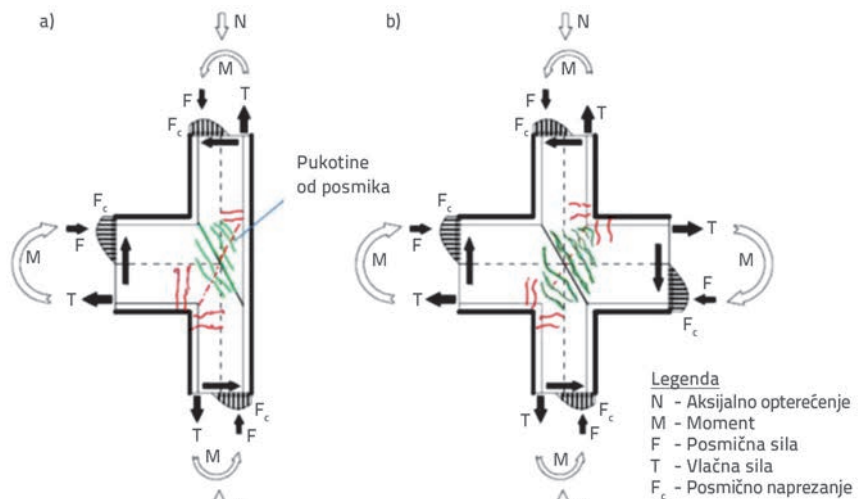
Na slici 1. prikazana su tri spoja greda-stup s unutarnjim, vanjskim i kutnim spojevima. Kako bi se osigurala učinkovitost okvirnog sustava, koji se sastoji od stupova i greda, na željenoj razini, potrebno je prikladno projektirati spojno područje. Važan dio oštećenja izazvanih potresom nastaje u spojevima ili susjednim zonama. Zbog gubitka čvrstoće ili krutosti u spojevima greda-stup, može doći do velikog bočnog pomaka u okviru i posljedice drugog reda koji uzrokuju mogući slom sustava.



Slika 1. Područje spoja greda-stup u AB konstrukcijama: a) unutarnji; b) rubni; c) kutni [37]

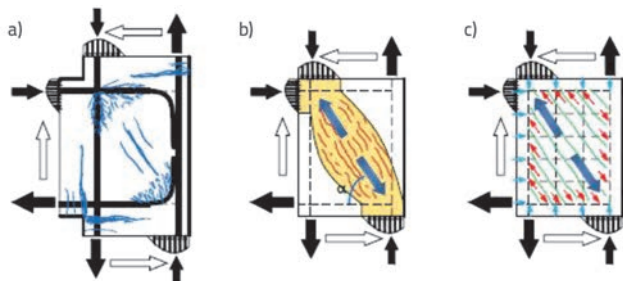
Obvezno treba izraditi složene modele odvajanja i smicanja za spojne zone [28, 38, 39]. Slika 2. prikazuje unutarnje sile koje se javljaju u području spoja uslijed potresnog djelovanja.

Tlačne i vlačne sile nastale u stupu i gredi prenose se tlačnim i vlačnim naprezanjima koja se javljaju u spojevima, a to je prikazano na slici 2. Detalji armature u području spoja, omjer h_b/h_c (visina poprečnog presjeka greda/visina poprečnog presjeka stupa) prikazuju omjer uzdužnog opterećenja i kako količina spona u spojevima greda-stup utječe na naprezanja koja se pojavljuju u spojevima. Paulay i drugi [29] predložili su mehanizme posmičnog prijenosa spoja kao što je prikazano na slici 3., poznate kao mehanizmi dijagonalnih štapova i rešetke. Smatrali su da čvrstoća dijagonalnog štapa regulira čvrstoću spoja prije pucanja. Kad se posmična sila u spoju poveća, pojavljuje se dijagonalno pucanje u jezgri spoja, a armatura u



Slika 2. Unutarnje sile pod potresnim djelovanjem: a) Kutni spojevi greda-stup; b) Unutarnji spojevi greda-stup [40]

spojevima izložena je opterećenjima, i na kraju, spoj propada drobljenjem betona u jezgri spoja. NZS 3101 [41] zahtijeva veliku količinu poprečne armature u spoju kako bi preuzela dominantni udio posmika u spoju pomoću mehanizma rešetke, oslanjajući se na dobar prijenos naprezanja duž uzdužne armature [42].



Slika 3. Opterećenja i mehanizmi prijenosa: a) Bočno opterećenje; b) Mehanizam dijagonalnog štapa; c) Mehanizam rešetke [40]

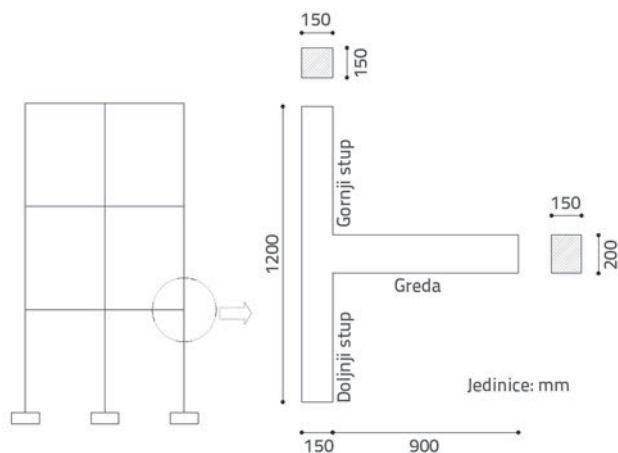
ACI 318 i ACI 352 pretpostavljaju značajna pogoršanja veza armaturnih šipki i betona u spojevima [3, 7]. Zbog toga se unutarnjim posmičnim silama odupire samo dijagonalni tlačni štap od betona. U skladu s tim uloga poprečne armature je ograničenje jezgre betona. Ovi neusklađeni koncepti vezani za funkciju poprečne armature dovode do različite potrebe za sponama, kao i nejednakosti u kriterijima detaljnog opisa [36]. Stvarno ponašanje konstrukcija moglo bi proizaći iz kombinacije mehanizama dijagonalnih štapova i rešetki sa slabljenjem veze uzdužne armature do određenog stupnja tijekom cikličnog opterećenja [6].

2. Materijali i metode

2.1. Izvedba uzoraka

U eksperimentalnom istraživanju izvedena je serija ispitivanja rubnih spojeva greda-stup. Ukupno je napravljeno pet područja spoja greda-stup u stvarnoj veličini od betona male čvrstoće, a ta područja predstavljaju područja spoja s armaturom od čelika kvalitete S220, što bi negativno utjecalo na ponašanje pojedinih elemenata. Ispitana su svojstva pet uzoraka koji imaju različit raspored armature u područjima spoja uslijed djelovanja potresa. Budući da su područja spoja greda-stup uzoraka područja spajanja, spojevi su izvedeni tako da budu slabi dok

su druga područja smatrana jakima, u postupku projektiranja i izrade planova armature prema kriterijima raporeda armature. Ispitivanja su provedena pod cikličnim statičkim opterećenjima, u kojima je uzdužno opterećenje stupa tijekom ispitivanja ostalo konstantno (10 % nosivosti stupa). Položaj i količina armature te čvrstoća uzoraka određeni su s obzirom na sadašnji fond građevina u Turskoj. Postojeće građevine općenito imaju glatke šipke (klasa S220) i nemaju odgovarajući raspored spona u područjima spoja. Detalji i opći pregled uzoraka prikazani su u tablici 1. i na slici 4.



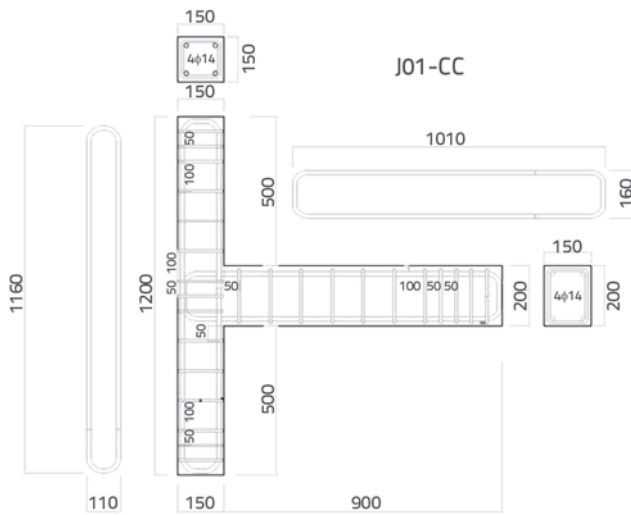
Slika 4. Shematski prikaz uzoraka za eksperimentalno ispitivanje

Predviđeni mehanizam popuštanja (sloma) određen je prekoračenjem posmičnog kapaciteta područja spoja ili proklizavanjem uzdužne armature prije dostizanja otpornosti grede na savijanja. Detalji armature uzoraka prikazani su na slikama 5. do 7.

Pripremljeni uzorci za ispitivanje bili su poprečnih presjeka grede 150 mm x 200 mm i stupa 150 mm x 150 mm. Kod uzoraka stupova i greda, kao uzdužna armatura korištene su glatke šipke 4Ø14. Kao posmična armatura korištene su rebraste šipke promjera 8 mm. Razmak spona bio je 100 mm u gredama i stupovima. Međutim, smanjen je na 50 mm u zonama oslonca. Uzorci su proizvedeni od betona niske kvalitete (tlačne čvrstoće) zato što je to stvarna kvaliteta betona u postojećim konstrukcijama. Tlačna ispitivanja provedena su na valjkastim uzorcima dobivenim prije proizvodnje ispitnih uzoraka tlačnom prešom (kapacitet: 2000 kN) u laboratoriju.

Tablica 1. Detalji o uzorku

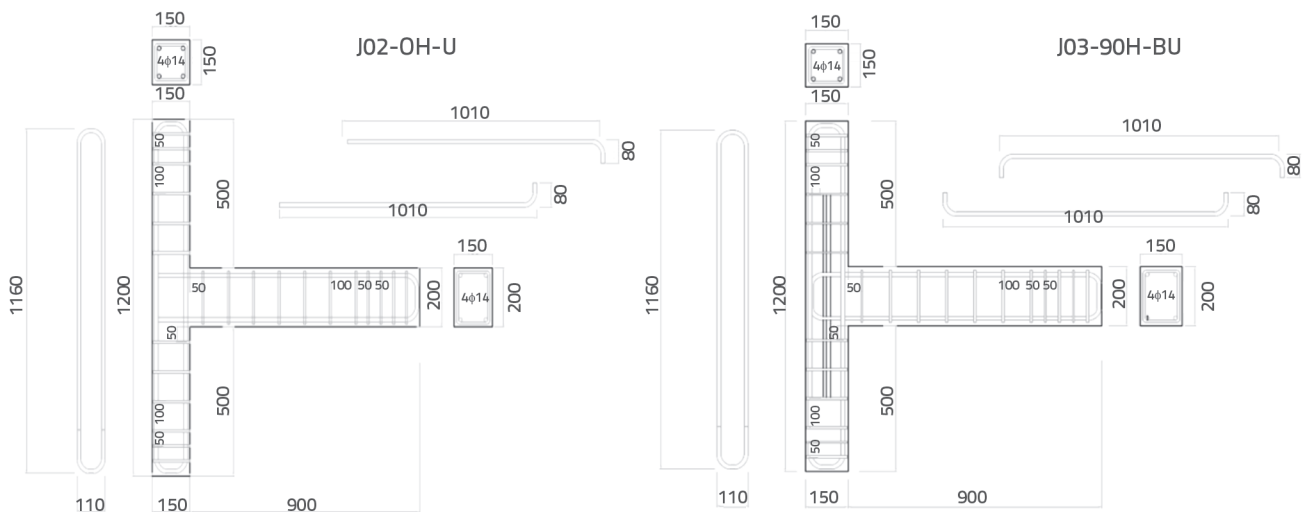
Uzorak	Oznaka	Detalji spoja
J01 (Referenca)	J01-CC	Područje kutnog spoja je zatvoreno (C), a uzdužna armatura grede su gore i dolje monolitno međusobno povezane (C).
J02	J02-OH-U	Nesidreno (OH) i nezatvoreno spojno područje (U)
J03	J03-90H-BU	90° sidreno spojno područje (90H), 2Ø12 armatura u sredini, područje spoja horizontalno zatvoreno sponama
J04	J04-90H-CH	90° sidreno spojno područje (90H) područje spoja (CH) horizontalno zatvoreno sponama
J05	J05-90H-CV	90° sidreno spojno područje (90H) područje spoja okomito zatvoreno (CV) sponama



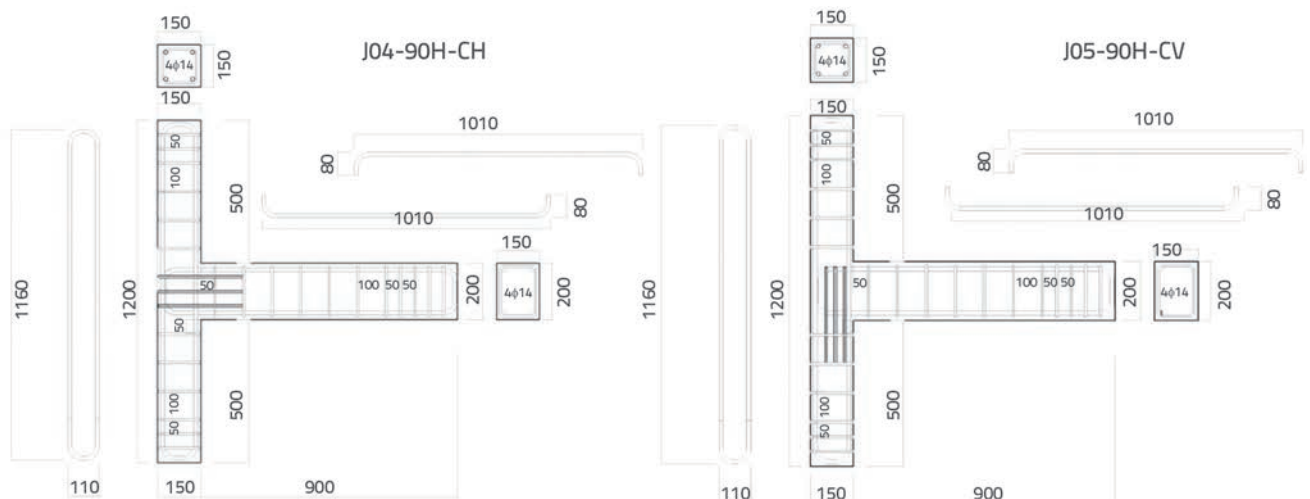
Slika 5. Detalji armature kontrolnog uzorka J01

U tablici 2. prikazani su rezultati standardne tlačne čvrstoće valjkastih uzoraka nakon 28 dana (100 mm × 200 mm). Također, u tablici su prikazane i ostale karakteristike betonske smjese. Kako bi se osiguralo da beton koji se koristi u izradi uzoraka ima željenu tlačnu čvrstoću, određeni su odgovarajući omjeri smjese i dobivena je prosječna betonska tlačna čvrstoća uzoraka od 9 MPa za sve uzorke. Željena čvrstoća je odabrana ispod 10 MPa zbog postojećeg fonda građevina u Turskoj. Postojeće konstrukcije male čvrstoće općenito imaju prosječnu tlačnu čvrstoću betona oko 10 MPa.

Vlačna ispitivanja čelične rebraste armature provedena su u laboratorijskim uvjetima pomoću Amsler uređaja za vlačna ispitivanja (kapacitet: 200 kN) u skladu s turskom normom [43]. Tim vlačnim ispitivanjima dobivene su prosječne vlačne čvrstoće armaturnih šipki koje se koriste kao pojačanja u uzorcima od 276 MPa za glatke šipke i 444 MPa za rebraste šipke. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na uzdužnoj i poprečnoj armaturi prikazani su u tablici 3.



Slika 6. Detalji armature uzoraka J02 i J03



Slika 7. Detalji armature uzoraka J04 i J05

Tablica 2. Rezultati tlačnog ispitivanja uzoraka betona i omjera betonske smjese

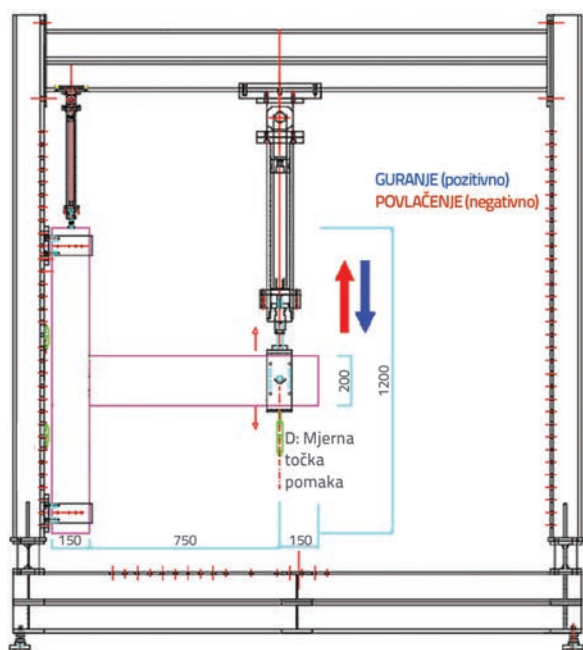
Uzorak	Opterećenje pri slomu [kN]		Naprezanje [MPa]		Brzina opterećenja [kN/s]
BCJ1	73,9		9,4		4,7
BCJ2	67,0		8,5		4,7
BCJ3	70,6		9,0		4,7
Prosječna tlačna čvrstoća betona:			9,0		
Sastav i udjeli u betonskoj smjesi [kg/m ³]					
Beton	Cement	Voda	Sitni agregati	Krupni agregati	Visoko učinkovita primjesa za reduciranje vode
Normalna težina	165	231	1414	271	1,8
Veličina agregata (promjer):			d < 9 mm	10 mm < d < 40 mm	

Tablica 3. Rezultati vlačnih ispitivanja uzdužne i poprečne armature

Tip armature	Masa/visina [kg/m]	Izmjereni promjer [mm]	Granica čvrstoće [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Čvrstoća pri slomu [MPa]	Jednoliko izduženje [%]	Postotak izduženja pri lomu [%]	Modul elastičnosti [MPa]
Glatka	1,26	14,3	284	425	275	28,1	42,7	212340
	1,26	14,3	287	449	299	18,0	40,0	211320
	1,39	15,0	258	386	247	9,0	42,7	212340
Rebrasta	0,38	7,9	552	665	560	11,6	27,5	208450
	0,37	7,7	398	622	537	14,8	25,6	208970
	0,38	7,9	382	588	520	13,0	25,0	209320

2.2. Priprema za ispitivanje

Ispitna oprema sastoji se od čeličnih profila i ploča pričvršćenih na laboratorijski pod visokovrijednim vijcima. Shematski prikaz eksperimentalnog ispitivanja prikazan je na slici 8.



Slika 8. Opći izgled ispitne opreme

Uzorci su ispitani pod konstantnim uzdužnim i cikličnim opterećenjima s fiksnom osi i promjenom smjera spajajući gornji i donji dio stupa na ispitni uređaj s jednostavnim (zglobnim) osloncem. Greda je postavljena vodoravno u uređaj za ispitivanje. Zbog toga se opterećenja primjenjuju u okomitom smjeru, što omogućuje povlačenje prema gore i potiskivanje prema dolje. Sustav opterećenja i ispitni uzorak prikazani su na slici 9.



Slika 9. Sustav opterećenja

Tijekom potresa konstrukcijski su elementi izloženi dinamičkim silama savijanja i posmika, kao i promjenjivim uzdužnim silama. Međutim, slučaj je teško simulirati u laboratorijskim uvjetima, a pri ispitivanjima se primjenjuju statička opterećenja. Glavna prednost statičkog ispitivanja je u tome što se ponašanje

opterećenja može promatrati korak po korak i u širokom rasponu vremena, pa se ponašanje i oštećenje elemenata mogu detaljno pratiti i zabilježiti. Zbog toga su ciklusi opterećenja izvedeni postupnom zamjenom uzorka. Tijekom ispitivanja vertikalna su opterećenja, koja se primjenjuju za izazivanje momenata savijanja i posmične sile, provedena pomoću računalno upravljanih hidrauličkog softvera UTEST. Ciklično vertikalno opterećenje primijenjeno je na poprečni presjek grede od 150 mm x 200 mm. Hidraulični uređaj za opterećivanje imao je kapacitet opterećenja od 100 kN kako bi osigurao guranje i povlačenje te kapacitet pomaka od 300 mm. Sva ispitivanja provedena su uz kontrolu pomaka, a raspon pomaka hidrauličkog UTEST uređaja za opterećenje u upravljačkom sustavu definiran je kao $\pm 52,5$ mm. Opterećenja su nanosena i u smjeru pritiskanja i u smjeru povlačenja. Štoviše, nožice uzorka koje se nalaze na krajevima stupa uzorka u nosačima osiguravaju uvjete kliznog oslonca u sustavu opterećenja. Uzorak, doza za mjerenje sile i hidraulička dizalica služili su za nanošenje uzdužnog opterećenja. Koriste se nosači od lima koji mogu zadovoljiti uzdužno opterećenje u tri zone stupa. Zatim je opterećenje hidrauličkog plašta upotrijebljeno za nanošenje uzdužne sile kojom će se opteretiti uzorak. Na početku faze projektiranja, pretpostavljena je tlačna čvrstoća betona od 10 MPa, a uzdužno opterećenje izračunano je prema izrazu (1). Gdje su n , N , f_c' , b i h uzdužni omjer opterećenja, uzdužno opterećenje, tlačna čvrstoća betona, širina i visina stupa.

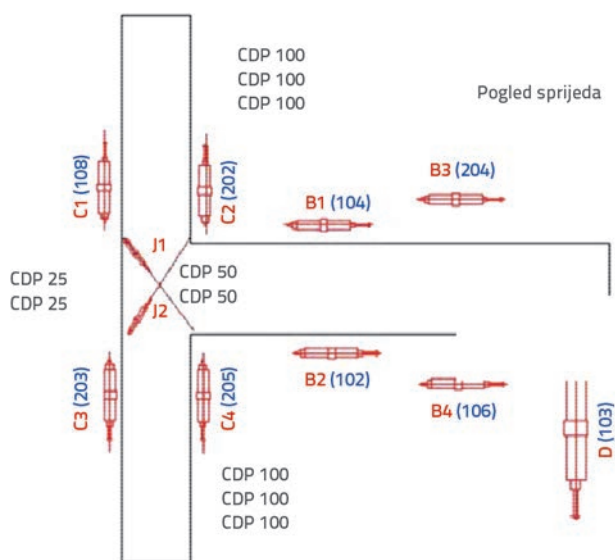
$$n = \frac{N}{f_c' \cdot b \cdot h} \quad (1)$$

Uzdužna sila je ostvarena pomoću hidrauličkog pistona kapaciteta 100 kN. Tijekom ispitivanja na uzorak je primijenjeno konstantno uzdužno opterećenje od 22,5 kN. To uzdužno opterećenje odgovara 10 % uzdužnog kapaciteta opterećenja prema čvrstoći betona od 9 MPa. Tijekom ispitivanja razina uzdužnog opterećenja provjerena je pomoću UTEST uređaja za opterećenje (CLP-100CMP) kapaciteta 100 kN postavljenog između uzorka i dizalice, a uzdužno opterećenje je održavano na 22,5 kN pomoću pistona. Kako bi se uzdužno opterećenje na uzorku jednoliko rasporedilo, na kraju uzorka gdje je nanosena uzdužna sila postavljen je ravni čelični lim (150 mm x 150 mm) debljine 10 mm, a uvjeti kliznog oslonca također su ostvareni pomoću čeličnog mehanizma postavljenog na krajeve stupova uzorka (slika 10.).

Mjerni sustav se sastoji od uređaja za mjerenje deformacija, mjernih uređaja Novotechnic i Opkon za mjerenje pomaka, UTEST uređaja za opterećenje i unutarnje doze za mjerenje sile. Podaci iz tih uređaja prikupljaju se na tri TESTBOX-1001 uređaja za prikupljanje podataka. Podaci su zatim prebačeni na računalo radi obrade. Na svaki uzorak postavljeno je jedanaest uređaja za mjerenje pomaka. Imena i mjesta mjerača pomaka prikazani su na slici 11. Svaki mjerač pomaka prikazan je s pripadajućom oznakom.



Slika 10. Točka nanošenja uzdužnog opterećenja (gore) i kliznih oslonaca na krajevima uzorka (dolje)



Slika 11. Mjerna mjesta za mjerenje pomaka na ispitnom uzorku

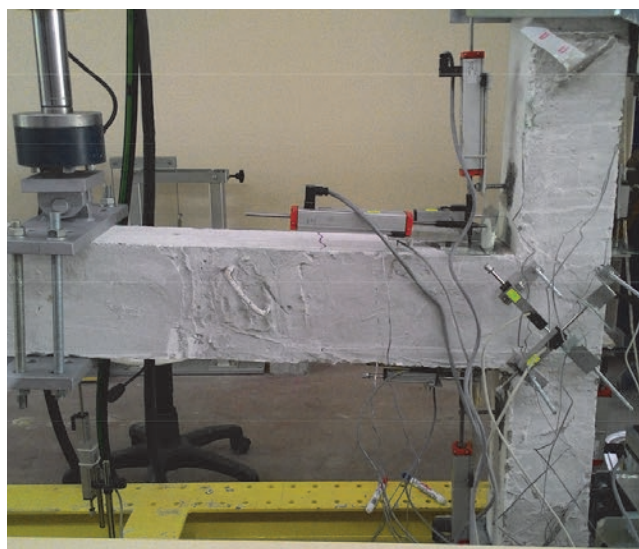
Mjerači pomaka postavljeni su na različita mjesta na stupovima i gredama, s mjernim područjem od 100 mm i 25 mm kako bi se odredile prosječne zakrivljenosti poprečnog presjeka i kako bi se provjerilo proklizavanje uzdužne armature. Mjerači su razvrstani

Tablica 4. Položaji i funkcije uređaja za mjerenje pomaka

Uređaj za mjerenje pomaka (maks dužina mjerenja) [mm]	Položaj	Funkcija
D (150)	Dno kraja grede	Okomit pomak grede
C1 (25)	Gornji stup	Moment savijanja u gornjem stupu
C2 (100)		
C3 (25)	Donji stup	Moment savijanja u donjem stupu
C4 (100)		
B1 (100)	Na vrhu grede	Moment savijanja u gredi
B3 (100)	Na dnu grede	
B2 (100)		
B4 (100)		
J1 (50)	Na području spoja	Dijagonalne mjere područja spoja
J2 (50)		

kao tip C (C1, C2, C3 i C4), tip B (B1, B2, B3 i B4) i tip J (J1 i J2). Tipovi predstavljaju mjesta na kojima se tipovi C, B, J nalaze na stupu, gredi i spoju. Karakteristike i lokacije senzora za mjerenje pomaka na uzorcima prikazani su u tablici 4.

Senzori za mjerenje pomaka pričvršćeni su na uzorke metalnim pločama i vijcima u obliku slova L (promjer: 5 mm). Ugrađena duljina vijaka u betonu je 7 cm. Dva mjerna uređaja postavljena su na područje spoja pod kutom od 45 stupnjeva kako bi se dobile posmične deformacije u zoni spoja. Hidraulični piston opremljen je dozom za mjerenje sile i uređajem za mjerenje pomaka. S obzirom na to da se ispitivanje obavljalo kontrolom pomaka, uređaj je za vrijeme ispitivanja upravljao preko spomenutog senzora za mjerenje pomaka. Glavni se pomak također provjerava i mjernim uređajem (D) smještenim na donjem kraju grede. Prethodno spomenuta mjerna mjesta za mjerenje pomaka i postavke ispitivanja nalaze se na slici 12.

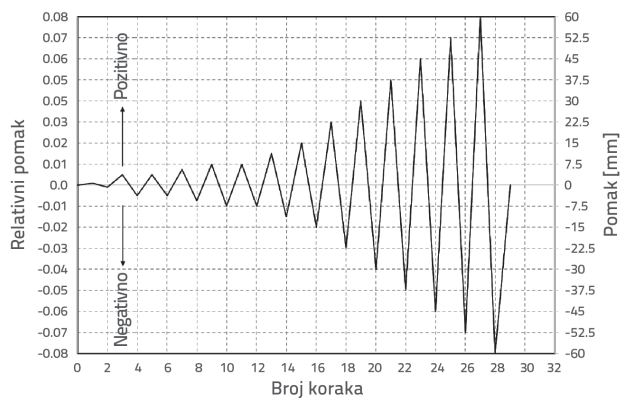


Slika 12. Postavke ispitivanja i mjerni uređaji za mjerenje pomaka

2.3. Analiza opterećenja uzoraka

Ispitivanja su provedena kao statička ispitivanja s kontrolom pomaka. Uzorci su opterećivani cikličnim vertikalnim pomacima kako bi se simuliralo potresno opterećenje. Budući da je eksperimentalno ispitivanje bilo planirano u koracima, vrednovani su mehanički odziv i stanje svakog uzorka nakon čega je izvršen je sljedeći korak opterećenja. Ovakav pristup omogućio je točno promatranje i procjenu ponašanja uzorka, kao što je mehanizam nastanka oštećenja.

Stoga je postignuto ispitivanje stanja oštećenosti uzorka između opterećenja, a vrijeme nije predstavljalo ograničenje za taj proces ispitivanja. Koraci opterećenja određeni su odabirom određenih vrijednosti relativnog pomaka. Ispitna brzina pistonu iznosila je 0,05 m/s. Uzorak i plan opterećenja prikazani su na slici 13., odnosno u tablici 5. Završni koraci plana opterećenja nisu mogli biti dovršeni u ispitivanjima nekih uzoraka zbog velikog oštećenja nastalog u područjima spojeva. Relativni pomak od "0,08" postignut je samo u ispitivanju prvog uzorka.



Slika 13. Povijest cikličnog opterećenja

Tablica 5. Plan ispitnog opterećenja

Koraci	Pomak [mm]	Relativni pomak
0	0	0
1-2	±0,75	0,001
3-6	±3,75	0,005
7-8	±5,625	0,0075
9-12	±7,5	0,01
13-14	±11,25	0,015
15-16	±15	0,02
17-18	±22,5	0,03
19-20	±30,0	0,04
21-22	±37,5	0,05
23-24	±45,0	0,06
25-26	±52,5	0,07
27-28	±60,0	0,08
29	0	0

Mjerno područje: 750 mm

3. Rezultati i rasprava

Odnos eksperimentalnog vertikalnog opterećenja, pomaka i relativnog pomaka (eng. *drift ratio* - DR) određeni su korištenjem vrijednostima opterećenja dobivenih pomoću doze za mjerenje sile, uređajem za nanošenje opterećenje i vrijednostima pomaka izmjerenih na vrhu grede. Karakteristike uzoraka prikazane su kao odnos opterećenje - pomak. Eksperimentalne vertikalne nosivosti (maksimalno opterećenje dobiveno tijekom ispitivanja) i odgovarajući relativni pomak uzoraka prikazani su u tablici 6. Svrha je ove tablice prikazati čvrstoću i konstrukcijska svojstva područja spoja uzoraka.

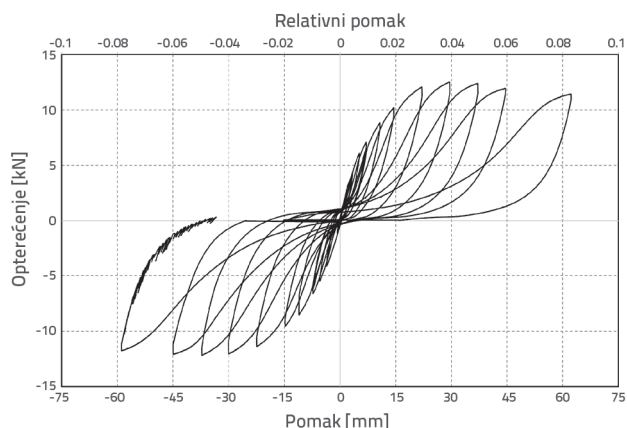
Tablica 6. Relativni pomak pri maksimalnom opterećenju

Uzorak	Smjer guranja maks. opterećenje [kN]	Relativni pomak	Smjer povlačenja maks. opterećenje [kN]	Relativni pomak
J01	12,49	3,88	-12,13	-4,90
J02	5,42	2,97	-5,60	-2,96
J03	9,47	2,90	-10,40	-3,90
J04	12,60	3,66	-12,99	-4,00
J05	8,76	3,44	-10,58	-3,34

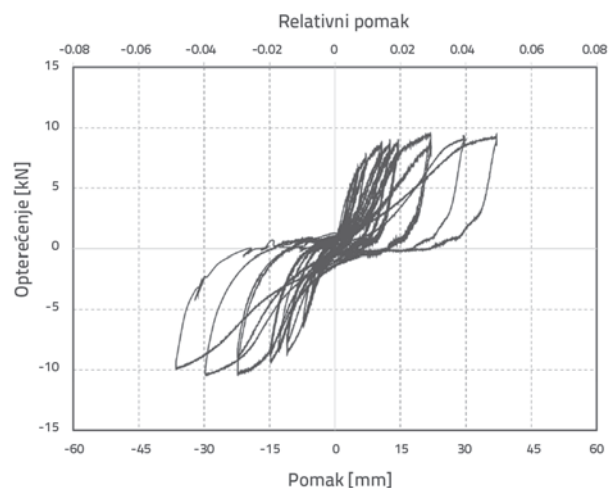
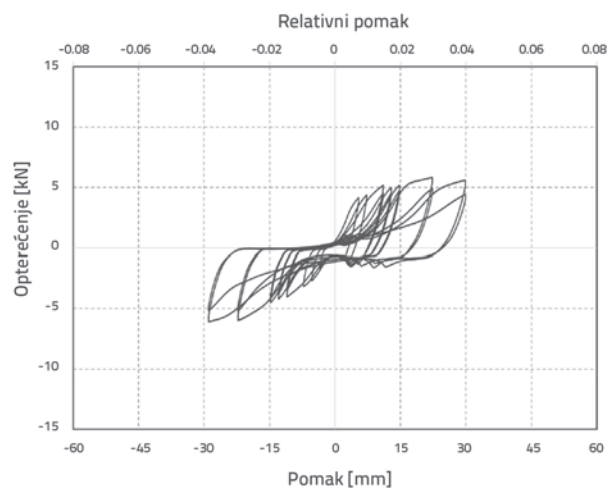
3.1. Odnos opterećenja, pomaka i relativnog pomaka

Za sve uzorke, u dijelu gdje se javlja prva nagnuta posmična pukotina u području spajanja, zabilježene su vrijednosti izduženja i skraćivanja u fazama guranja i povlačenja. Iako se širine nagnutih posmičnih pukotina povećavaju u području spoja, vrijednosti skraćivanja nastavljaju se u skladu s podacima

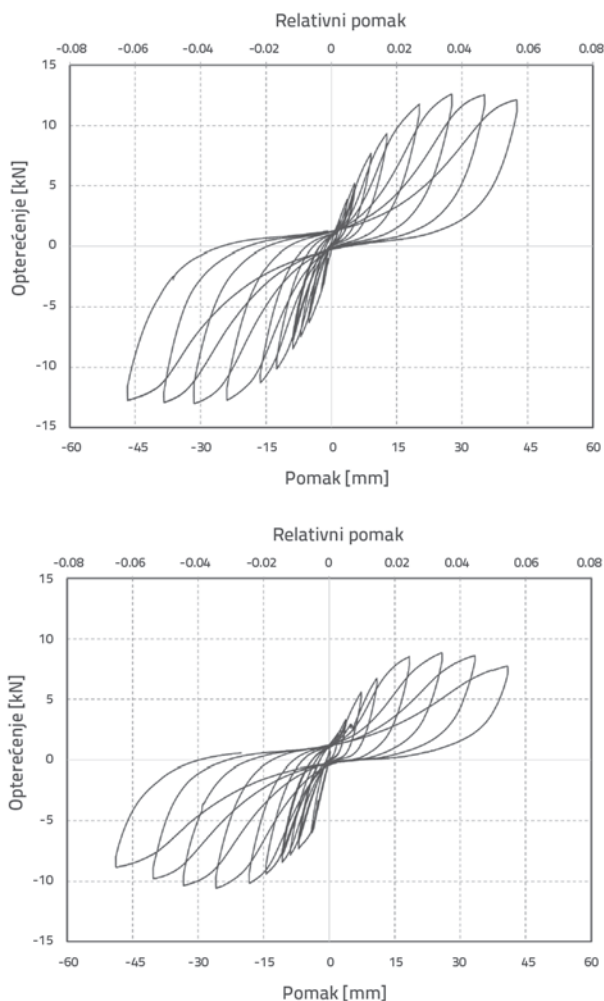
o izduženju. Krivulje histereze prikazuju odnose opterećenja i pomaka / DR izmjerenih kako je prikazano na slikama 14. do 16. Osim toga, vršne točke anvelope krivulja kapaciteta svih uzoraka prikazane su na slici 17. Jasno je da je početna krutost svih ispitnih uzoraka bila gotovo jednaka, osim uzoraka J02 i J05.



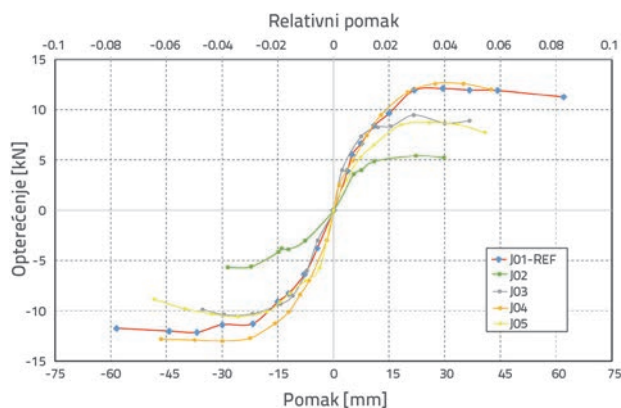
Slika 14. Odnos opterećenja naspram pomaka /relativnog pomaka za uzorak J01



Slika 15. Odnos opterećenja naspram pomaka/relativnog pomaka za uzorke J02 (gore) i J03 (dolje)



Slika 16. Odnos opterećenja naspram pomaka/relativnog pomaka za uzorke J04 (gore) i J05 (dolje)



Slika 17. Anvelopa cikličkog dijagrama sila - pomak/relativni pomak

Za uzorak J01 primijećeno je da kao posljedica naknadnih pomaka, pukotine u području spoja nisu bile u skladu i konzistentne s grafičkim prikazom dobivenim koncentracijom i povećanjem širine. Ocjenjujući anvelopu svih krivulja ovog eksperimenta, utvrđeno je da je maksimalna vrijednost opterećenja od 12,3 kN

ostvarena pri 4-postotnom DR. Osim toga, važno je napomenuti da nosivost uzorka nije pala ispod razine od 10 kN za pritiskanje i povlačenje, čak je i relativni pomak bio 8 %. Čini se da zahtjevi J01 daju uvjete koji su opisani za područja povezivanja u turskom seizmičkom propisu [43]. Stoga su, prema rezultatima ispitivanja, relevantni uvjeti iznimno važni za područja spoja. Za uzorak J02 uočeno je da su koncentracija i povećanje širina pukotina pokazali da je korelacija pogoršana. Uzimajući u obzir anvelopu svih krivulja eksperimenta, utvrđeno je da je maksimalna vrijednost opterećenja 5,6 kN za 2,96 % DR. U uzorku J03 uočeno je da je korelacija između koncentracije i povećanja širina pukotina u području spoja određena kao djelomično pogoršana. Prema anvelopi ovog eksperimenta, zabilježena je maksimalna vrijednost opterećenja od 10,4 kN za relativni pomak od 3,9 %. Utvrđeno je da su za uzorak J04 koncentracija i povećanje širina pukotina bili sukladni i pokazali su korelaciju. Osim toga, utvrđeno je maksimalno opterećenje od 12,99 kN za relativni pomak od 4 %. Također je primijećeno da kapacitet opterećenja uzorka nije pao ispod 10 kN pri pritiskanju i povlačenju za relativne pomake od čak 6 %. Za uzorak J05 uočeno je da, kao posljedica naknadnih pomaka, koncentracije i povećanja širine u području spoja pukotina nisu bile u skladu niti konzistentne, korelacija nije pronađena. Uzimajući u obzir anvelopu krivulja iz eksperimenta, utvrđeno je da maksimalno iznosi opterećenje 10,58 kN za relativne pomake od 3,34 %. U ispitivanjima su zabilježene sljedeće praktične implikacije i rezultati:

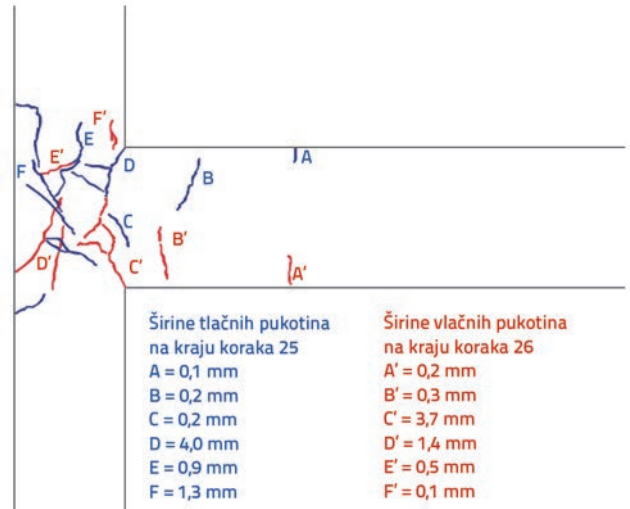
- J01 je referentni uzorak s detaljima opisanim za područje spoja u turskom seizmičkom propisu [40], nije došlo do proklizavanja uzdužne armature grede, ali je beton lokalno zdrobljen u području spajanja.
- Uzorak J02 je najslabiji uzorak u smislu armiranja, beton je bio lokalno zdrobljen pri relativnom pomaku od 0,0297, te je uočeno proklizavanje uzdužne armature. Razdvajanje od 6 mm dogodilo se na mjestu gdje su područje spoja i površina grede bili razdvojeni.

Za uzorak J03 primijećeno je da je beton lokalno zdrobljen pri relativnom pomaku od 0,039 u području spoja, a uzdužna armatura grede je skliznula. Površina grede i područje spajanja pokazali su razdvajanje od 15 mm i 12 mm za guranje i povlačenje. Za uzorak J04 utvrđeno je da je beton lokalno zdrobljen kod relativnog pomaka od 0,04 u području spoja, a uzdužna armatura grede je skliznula. Područje spajanja i površina grede razdvojeni su za 2,7 mm, a također se vidi i slom ispod kuke za sidrenje u području spoja. Ocjenjujući uzorak J05, uočeno je da je beton lokalno smrvljen u području spoja pri relativnom pomaku od 0,0344, a armatura uzduž grede je skliznula. Štoviše, područje spajanja i površina grede razdvojeno su za 3,2 mm, a na površini spoja vidljivo je odlamanje zaštitnog sloja betona.

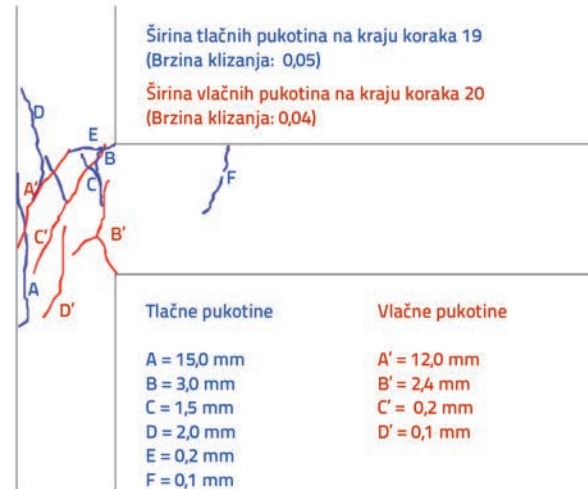
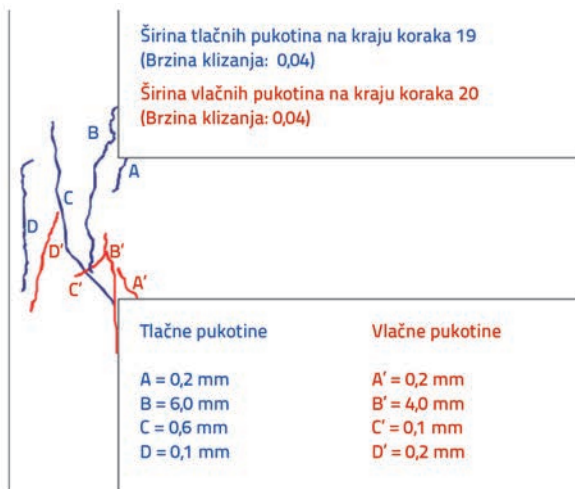
3.2. Oblici sloma (popuštanja) uzoraka

Ciklusi pritiskanja i povlačenja na prednjoj i stražnjoj strani uzoraka doveli su do različitih pukotina. Osim toga, shematski je

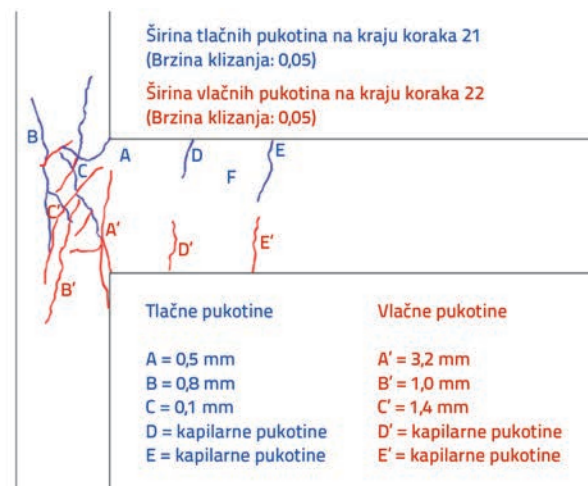
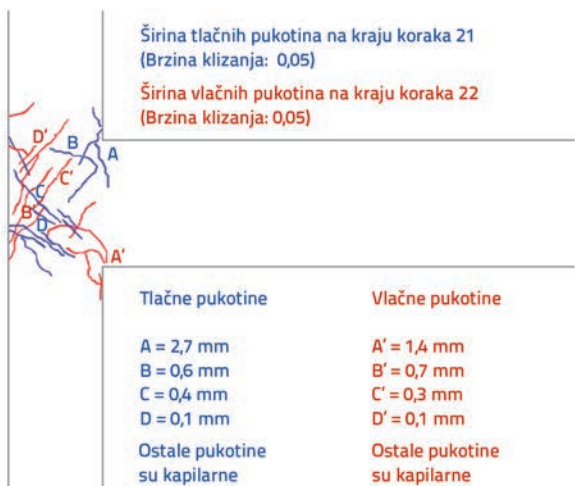
prikazana pojava oštećenja prilikom ispitivanja kako bi se dobio uvid u stvarni mehanizam popuštanja u područjima spoja. Sve pukotine su obrađene na ispucalim površinama, a širina pukotina se određuje mjerenjem okomite udaljenosti između dvije plohe pukotine od najveće točke pukotine. Oblici i specifikacije popuštanja kao što su oblik, položaj i dimenzije za pet uzoraka prikazani su na slikama 18. do 20. Zabilježene širine pukotina nalaze se na kraju svakog koraka, a predstavljaju najkritičnije stanje u području spoja prije završetka ispitivanja. Plava boja označava smjer guranja, a crvena smjer povlačenja. Na temelju ocjene ponašanja spojeva utvrđeno je da karakteristike pukotina koje se javljaju na spoju stupa i grede ovise o razini nanesenog pomaka. Pukotine zabilježene tijekom ispitivanja mogu se svrstati u dvije kategorije: pukotine od savijanja i posmične pukotine. Klasifikacija, lokacija i kratak opis pukotina prikazani su u tablici 7.



Slika 18. Položaj, oblik i dimenzije pukotina za uzorak J01



Slika 19. Položaj, oblik i dimenzije pukotina za uzorke J02 (lijevo) i J03 (desno)



Slika 20. Položaj, oblik i dimenzije pukotina za uzorke J04 (lijevo) i J05 (desno)

Tablica 7. Tipovi pukotina i položaji na uzorku

Tip pukotine	Uzorak									
	J01		J02		J03		J04		J05	
	Guranje	Povlačenje	Guranje	Povlačenje	Guranje	Povlačenje	Guranje	Povlačenje	Guranje	Povlačenje
Savojna pukotina u uzdužnoj gredi	A, B, C	A', B'	A	A'	C, F	A', C', D'			D, E	D', E'
Gornja savojna pukotina u zoni spoja	D		B		B		A		A	
Donja savojna pukotina u zoni spoja		C'		B'		B'		A'		A'
Kosa posmična pukotina u zoni spoja	E, F	D', E', F'	C, D	C', D'	A, D, E		B, C, D	B', C', D'	B, C	B', C'

4. Zaključak

U ovom istraživanju nastojalo se eksperimentalno ispitati ponašanje spojeva greda i stupova AB konstrukcija pod cikličnim opterećenjem. Vjeruje se da će rezultati ovog istraživanja pomoći u razumijevanju ponašanja područja spoja postojećih AB konstrukcija male čvrstoće kako bi se odlučilo o potrebnoj metodi procjene i ojačanja. Drugim riječima, rezultati ispitivanja pokazuju nedostatke konstrukcija koje treba uzeti u obzir u procesu ocjenjivanja. Također, rezultati ovog istraživanja mogu pomoći i pri određivanju dijelova koji bi također trebali biti ojačani.

Ispitano je pet uzoraka kako bi se istražili rubni spojevi AB greda i stupova te kako bi se analiziralo ponašanje i odgovor spojeva greda-stup, koji su podvrgnuti cikličnom opterećenju. Promjene u karakteristikama područja spoja analizirane su kako bi se dobio uvid u mehanizam popuštanja pod cikličnim opterećenjima. Navedeni su i oblici popuštanja (sloma) spojeva rubnih spojeva greda-stup proizvedenih od betona male čvrstoće, različite dispozicije armature i nekoliko različitih konfiguracija. Kao rezultat ispitivanja, otkrivena je važnost rasporeda posmične armature u spojevima koji se sastoje od betona male čvrstoće i nužnosti sidrenja uzdužne armature kukama pod 90°. Nadalje, utvrđeno je da horizontalna upotreba spona u području spoja povećava svojstva bolje od vertikalne primjene.

Značajno smanjenje krutosti do kojeg dolazi zbog pojave pukotina važan je parametar koji treba uzeti u obzir, a potrebno je osigurati i prijanjanje i stezanje armaturnih šipki greda i stupova. Osim toga, najvažnije je osigurati potrebnu posmičnu čvrstoću u području spoja pomoću posmične armature kako bi se povećala duktilnost. S tim u vezi predlažu se sljedeća načela izvedbe i preporuke za procjenu i ojačanje:

- Čvrstoća područja spoja ne smije biti manja od spojnih elemenata. Tako bi se izbjegao popravak područja spoja zbog oštećenja. Osim toga, postiže se izbjegavanje mehanizma koji značajno smanjuje krutost i čvrstoću konstrukcijskog sustava.
- Potrebno je spriječiti smanjenje čvrstoće AB stupova koja slabi u području spoja. Zone spoja greda-stup treba smatrati nastavkom stupova, te se stoga u tim kritičnim područjima moraju nastaviti spona stupova.
- U procjeni postojećih betonskih konstrukcija male čvrstoće treba razmotriti ponašanje zajedničkih područja. To se može postići smanjenjem krutosti grede i stupova u analizama ili modeliranju područja spoja sa sličnim nedostacima.
- Područja spoja također bi trebala uzeti u obzir u postupcima rekonstrukcije i ojačanja. Rezultati pokazuju da ojačanje samo grede ili stupova neće pomoći u poboljšanju svojstava konstrukcijskih sustava. Važno je osigurati odgovarajuću posmičnu čvrstoću i duktilnost u području spoja odgovarajućom metodom ojačanja u slučaju djelovanja potresa.

LITERATURA

- [1] Cosgun, C., Comert, M., Demir, C., Ilki, A.: Seismic Retrofit of Joints of a Full-Scale 3D Reinforced Concrete Frame with FRP Composites, *Journal of Composites for Construction-ASCE*, 23 (2019) 2, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000923.
- [2] Cosgun, C., Comert, M., Demir, C., Ilki, A.: FRP Retrofit a Full Scale 3D RC Frame, 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Roma-Italy, 2012.
- [3] Tapan, M., Comert, M., Demir, C., Sayan, Y., Orakcal, K., Ilki, A.: Failures of structures during the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011., Edremit (Van) earthquakes in Turkey, *Engineering Failure Analysis*, 34 (2013), pp. 606-628
- [4] Cosgun, C., Dindar, A.A., Seckin, E., Onen, Y.H.: Analysis of building damage caused by earthquakes in Eastern Turkey, *Građevinar*, 65 (2013) 1, pp. 743-752
- [5] Cosgun, C., Mangir, A.: Earthquake Performance of Collapsed School Building under Van-Tabanlı (Mw=7.2) Earthquake, *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 4 (2018) (4), pp. 159-175, doi: <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2018.04.004>
- [6] Subramanian, N.: Design of RC beam column joints, *The Masterbuilder*, (2015), pp. 136-148

- [7] ACI-ASCE Committee 352: Recommendation for design of beam-column joints in monolithic reinforced concrete structures, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 37, 2002.
- [8] Hanson, N.W., Connor, H.W.: Seismic Resistance of Reinforced Concrete Beam- Column Joints, *Journal of the Structural Division - ASCE*, 93 (1967), pp. 533–560
- [9] Zhang, L., Jirsa, J.O.: A study of shear behavior of reinforced concrete beam- column joints, PMFSEL Report 82–1, University of Texas, Austin, USA, 1982.
- [10] Sarsam, K.F., Phipps, M.E.: The shear design of in situ reinforced concrete beam- column joints subjected to monotonic loading, *Magazine of Concrete Research*, 37 (1985) 130, pp. 16–28
- [11] Pantazopoulou, S., Bonacci, J.: Consideration of questions about beam-column joints, *Acı Structural Journal*, 89 (1992) 1, pp. 27–36
- [12] Hwang, J., Lee, H.J.: Analytical model for predicting shear strengths of exterior reinforced concrete beam-column joints for seismic resistance, *Acı Structural Journal*, 96 (1999) 5, pp. 846–857
- [13] Kim, J., LaFave, J.M., Song, J.: Joint shear behaviour of reinforced concrete beam- column connections. *Magazine of Concrete Research*, 61 (2009) 2, pp. 119–132
- [14] Choi, H., Kim, J.: Progressive collapse-resisting capacity of RC beam-column subassemblage, *Magazine of Concrete Research*, 63 (2011) 4, pp. 297–310
- [15] Joyklad, P., Pimanmas, A., Dhakal, R.P.: Cyclic performance of beam-column joints with extended column fixed at base. Part I: experimental investigation, *Magazine of Concrete Research*, 64(2012) 9, pp. 807–80
- [16] Kim, J., Yu, J.: Analysis of reinforced concrete frames subjected to column loss, *Magazine of Concrete Research*, 64 (2012) 1, pp. 21–33
- [17] Ehsani, M.R., Wight, J.K.: Effect of beams and slab on behavior of reinforced concrete beam-to-column connections, *Acı Structural Journal*, 82 (1986) 2, pp. 188–195
- [18] Pessiki, S.P., Conley, C.H., Gergely, P., White, R.N.: Seismic behavior of lightlyreinforced- concrete column and beam-column joint details, Technical Report NCEER- 90-0014, National Centre for Earthquake Engineering Research, 1990.
- [19] Kaku, T., Asakusa, H.: Ductility estimation of exterior beam column subassemblage in reinforced concrete frames, *ACI Special Publication: Design of Beam-Column Joints for Seismic Resistance*, ACI, Farmington Hills, Michigan, pp. 167–186, 1991.
- [20] Beres, A., El-Borgi, S., White, R., Gergely, P.: Experimental results of repaired and retrofitted beam-column joint tests in lightly RC frame building, Technical Report NCEER-92-0025, National Centre for Earthquake Engineering Research, 1992.
- [21] ACI-ASCE Committee-352: Recommendations for design of beam-column joints in monolithic reinforced concrete structures, ACI 352R-76, *ACI Journal*, 73 1976 (7), pp. 375–393
- [22] Tsonos, A.G., Tegos, I.A., Penelis, G.: Seismic resistance of type 2 exterior beamcolumn joints reinforced with inclined bars, *Acı Structural Journal*, 89 (1992) 1, pp. 3–12
- [23] Higazy, E.M.M., Elnashai, A.S., Agbabian, M.S.: Behavior of beam column connections under axial column tension, *Journal of Structural Engineering*, 1996, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:5(501)
- [24] Tsonos, A.G.: Effect of vertical hoops on the behavior of reinforced concrete beamto- column connections, *European Association for Earthquake Engineering, Journal of Earthquake Engineering*, 14 (2000) 2, pp. 13–26
- [25] CEB: Model code for seismic design of concrete structures, *Bulletin d'Information CEB*, No.165, Lausanne, 1985.
- [26] Eurocode-8: Design of structures for earthquake resistance. British standard, EN 1998-1:2004, 2004.
- [27] NZS-3101: Concrete Structures Standard – The design of concrete structures and Commentary on the design of concrete structures, Standards Association of New Zealand, Parts 1 and 2, Wellington, 1982.
- [28] Park, R., Paulay, T.: Reinforced concrete structures. John Wiley & Sons, Inc., Newyork, 1975, pp. 769
- [29] Paulay, T., Park, R., Priestley, M.J.N.: Reinforced Concrete Beam-Column Joints under Seismic Actions, *ACI Structural Journal*, 75 (1978) 11, pp. 585–93
- [30] Hoffmann, G.W., Kunnath, S.K., Mander, J.B., Reinhom, A.M.: Gravity-loaddesigned reinforced concrete buildings: Seismic evaluation of existing construction and detailing strategies for improved seismic resistance. Technical Report NCEER92-0016, National Centre for Earthquake Engineering Research, 1992.
- [31] Bracci, J.M., Reinhom, A.M., Mander, J.B.: Seismic resistance of R/C frame structures designed only for gravity loads, Part III experimental performance and analytical study of structural model, Technical Report NCEER-92-0029, National Centre for Earthquake Engineering Research, 1992.
- [32] Fleury, F., Reynouard, J-M., Merabet, O.: Multicomponent model of reinforced concrete joints for cyclic loading, *Journal of mechanical Engineering*, 10 (2000), doi: 1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:8(804)
- [33] Pantazopoulou, S.J., Bonacci, J.F.: On earthquake-resistant reinforced concrete frame connections, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21 (1994) 2, pp. 307–328
- [34] Elmorsi, M.S.E.: Analytical modeling of reinforced concrete beam column connections for seismic loading, PhD thesis, McMaster University, Ontario, Canada, 1998.
- [35] Hegger, J., Sherif, A., Roeser, W.: Nonseismic design of beam-column joints, *ACI Structural Journal*, 100 (2003) 5, pp. 654–664
- [36] Hwang, S.J., Lee, H.J., Liao, T.F., Wang, K.C., Tsai, H.H.: Role of hoops on shear strength of reinforced concrete beam-column joints, *ACI Structural Journal*, 102 (2005) 3, pp. 445–453
- [37] Celep, Z., Kumbasar, N.: Introduction to Earthquake Engineering and Earthquake- Resistant Structure design, Istanbul, Turkey, 2000.
- [38] Paulay, T., Priestley, M.J.N.: Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, John Wiley and Sons, New York, pp. 744, 1992.
- [39] Paulay, T., Park, R.: Joints of reinforced concrete frames designed for earthquake resistance, Research Report 84-9, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1984.
- [40] Coşgun, C.: Retrofit of 3D Reinforced Concrete Beam-Column Joint with FRP, PhD thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, 2013.
- [41] NZS-3101: Concrete Structures Standard, Part 1: The Design of Concrete Structures, Part 2: Commentary on The Design of Concrete Structures, Standards Council of New Zealand, Wellington, 2006.
- [42] Kitayama, K., Otani, S., Aoyama, H.: Development of Design Criteria for RC Interior Beam-Column Joints, *ACI SP-123 Design of Beam-Column Joints for Seismic Resistance*, James O. Jirsa, Editor, American Concrete Institute, Michigan, 1991, pp. 97–123
- [43] Turkish Earthquake Code (TEC): Specification for buildings to be built in earthquake regions, Ministry of Public Works and Settlement, Government of the Republic of Turkey, Ankara, 2007.