

Primljen / Received: 5.1.2016.
Ispravljen / Corrected: 27.8.2016.
Prihvaćen / Accepted: 1.9.2016.

Dostupno online / Available online: 10.8.2017.

Utjecaj dužine cjevastog spoja na deformacijska svojstva injektiranih spojeva

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Feng Lin**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Tongji
Odjel za konstrukcije
Shanghai, Kina
lin_feng@tongji.edu.cn



Mr.sc. **Xiaobao Wu**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Tongji
Odjel za konstrukcije
Shanghai, Kina
xiaobaowu@126.com

Prethodno priopćenje

Feng Lin, Xiaobao Wu

Utjecaj dužine cjevastog spoja na deformacijska svojstva injektiranih spojeva

Provedeno je ispitivanje dvanaest injektiranih spojeva armaturnih šipki da bi se utvrdila njihova deformacijska svojstva pod vlačnim opterećenjem. Promjenjivi parametri tijekom ispitivanja bili su promjer i vrsta spojnih šipaka te veličina cjevastih spojeva. Izrađeni su, provjereni i korišteni odgovarajući modeli bazirani na metodi konačnih elemenata kako bi se odredio utjecaj dužine spoja na deformacijska svojstva injektiranih spojeva. Dužina spoja znatno je utjecala na način sloma i na deformacijska svojstva spojeva. Predložena je metoda poboljšanja deformacijskih svojstava određene vrste spoja primjenom kritične dužine spoja i načina loma šipke.

Ključne riječi:

injektirani spoj, cjevasti spoj, eksperimentalno istraživanje, numerička simulacija, deformacijska svojstva

Preliminary report

Feng Lin, Xiaobao Wu

Effect of sleeve length on deformation properties of grouted splices

Tests on 12 grouted splices were performed to investigate their deformation properties under tensile loading. Test variables included diameter and type of spliced bars and the size of splicing sleeves. Finite element method based models of the splices were built, verified and used to investigate the effect of sleeve length on the deformation properties of the grouted splices. The sleeve length significantly affected the failure modes and further affected the splices' deformation properties. A recommendation was proposed to maximize deformation properties of a specific splice by using a critical sleeve length associated with failure mode of bar fracture.

Key words:

grouted splice, sleeve connector, experimental study, numerical simulation, deformation performance

Vorherige Mitteilung

Feng Lin, Xiaobao Wu

Einfluss der Länge der röhrenförmigen Verbindung auf die Verformungseigenschaften der injizierten Verbindungen

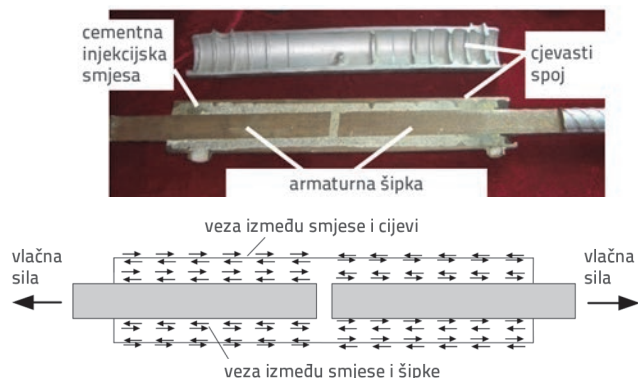
Durchgeführt wurde eine Untersuchung von zwölf injizierten Verbindungen von Bewehrungsstäben, um deren Verformungseigenschaften unter Zuglast festzustellen. Es wurden entsprechende Modelle angefertigt, überprüft und genutzt, die sich auf der Methode der endgültigen Elemente basieren, um den Einfluss der Länge der Verbindungen auf die Verformungseigenschaften der injizierten Verbindungen festzulegen. Die Länge der Verbindung hatte wesentlichen Einfluss auf die Art des Bruchs und die Verformungseigenschaften der Verbindungen. Empfohlen wurde eine Methode für die Verbesserung der Verformungseigenschaften einer bestimmten Verbindungsart durch Anwendung einer kritischen Verbindungslänge und Bruchart des Stabes.

Schlüsselwörter:

injizierte Verbindung, röhrenförmige Verbindung, experimentelle Untersuchung, numerische Simulation

1. Uvod

Injektirani se spojevi često koriste u betonskim konstrukcijama za povezivanje diskontinuiranih armaturnih šipki, naročito u slučaju predgotovljenih betonskih elemenata. Slika 1. prikazuje tipičnu konfiguraciju injektiranog cjevastog spoja armaturnih šipki (dalje u tekstu spominje se kao "spoj"). Dvije zasebne šipke zatvaraju se cjevastim spojem koji se zatim ispunjava injekcijskom smjesom. Tijekom izvođenja, šipke koje izviruju iz jednog montažnog elementa uvode se u spojni otvor šipki drugog montažnog elementa. Nakon toga se pomoću crpke za injektiranje pod niskim tlakom nanosi u spoj i oko šipaka neskupljajuća cementna injekcijska smjesa. Unutarnja strana cijevi je naborana da bi se dodatno povećala otpornost veze između injekcijske smjese i spoja. Na sredini spoja nalazi se graničnik koji omogućuje pravilno pozicioniranje dviju šipaka. Tako se postiže bočno učvršćenje u maloj zoni duž šipaka, tj. prijenos uzdužne sile s jedne šipke na drugu. Ovakvim spojem ne samo da se postiže čvrsta konstrukcijska veza već je i sam postupak ekonomičan, a može se provesti jednostavnije nego što je to slučaj kod drugih metoda povezivanja, kao što su spojevi s preklapom armature, zavareni spojevi i mehanički spojevi.



Slika 1. Prikaz tipičnog injektiranog spoja

Do sada su predložene razne vrste spojeva s nastavcima koji se odlikuju raznovrsnim geometrijskim i mehaničkim karakteristikama. Provedeni su i brojni eksperimenti kako bi se omogućilo što bolje razumijevanje mehaničkih karakteristika spojeva. Einea i dr. [1] analizirali su mogućnosti primjene jednostavnih i financijski povoljnih injektiranih spojeva izrađenih od standardnih čeličnih cijevi. Uzorci raznih svojstava i geometrijskih oblika ispitani su na vlačno naprezanje. Kako bi ocijenio njihovu pogodnost za povezivanje konstrukcijskih montažnih betonskih elemenata, Jansson [2] je ispitao dva patentirana spoja s ciljem istraživanja njihove nosivosti, otpornosti na proklizavanje i zamor te ponašanja pri puzanju. U novije su vrijeme Ling i dr. [3, 4] te Hosseini i Rahman [5] predložili seriju spojeva raznih konfiguracija, najčešće izvedenih od čeličnih cijevi standardne veličine, te su eksperimentalno ispitali njihova mehanička svojstva. Da bi izbjegli mala dopuštena odstupanja spojeva koji se koriste u tekućoj proizvodnji, Henin i Morcous

[6] predložili su nepatentirani spoj koji omogućuje potpuno iskorištavanje granične čvrstoće šipaka koje se upotrebljavaju u takvom spoju. Na temelju tih preliminarnih istraživanja, sadašnja osnovna znanja o mehaničkim svojstvima spojeve mogu se sažeti kako slijedi:

- Primjena raznih konfiguracija spojeva dovela je do vrlo raznolike situacije u pogledu usporedbe mehaničkih karakteristika pojedinih spojeva [1-6].
- Kod spojeva koji zadovoljavaju reagiraju tijekom ispitivanja te ispunjavaju zahtjeve normi kao što su ACI-318 [7], AC-133 [8] i BS8110-1 [9], zabilježena su dva načina otkazivanja nosivosti: lom šipke i popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke [2].
- Općenito uzevši, vrijednosti vlačnih čvrstoća šipaka u spoju bile su nešto niže od vlačnih čvrstoća korištenih šipaka. Ta razlika u čvrstoći mogla bi se objasniti neadekvatnim poravnanjem i pozicioniranjem ugrađenih šipaka [2, 4]. Takvo neadekvatno poravnanje i pozicioniranje dovodi do pojave sekundarnih momenata koji uzrokuju neravnomjerno raspoređivanje naprezanja po kritičnom presjeku šipaka. To nadalje dovodi do lokalnog i ranijeg popuštanja nego što je to slučaj kod isključivo onog opterećenja. Rezultat toga je smanjenje vlačne čvrstoće i pripadne relativne deformacije spojeva.
- Smatra se da su deformacijska svojstva spojeva nepovoljnija od svojstava u njima ugrađenih šipaka i to zbog relativno nepovoljnih deformacijskih svojstava spojnog segmenta [10]. Na žalost, još uvijek nisu dostupni potpuniji podaci o tom pitanju.

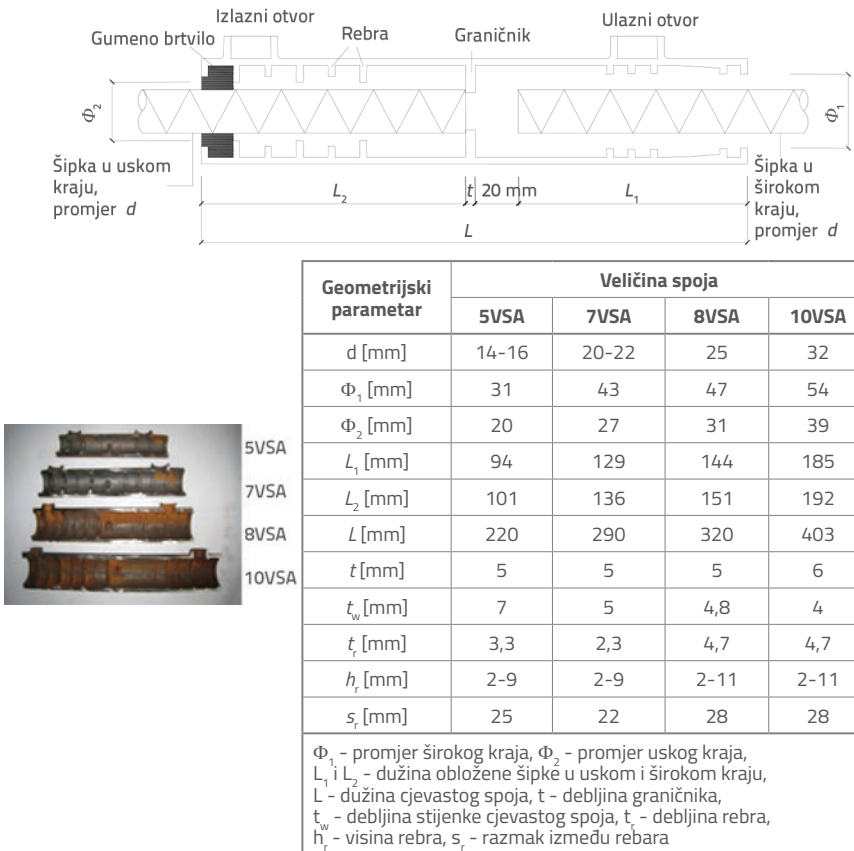
Iz navedenog se može zaključiti da su deformacijska svojstva spojeva i faktori koji na njih utječu slabije razjašnjeni od njihovih graničnih čvrstoća. Činjenica je da deformacijska svojstva bitno utječu na mehaničko ponašanje konstrukcijskih elemenata, naročito kada se spojevi koriste u zonama plastičnih zglobova [11]. Takvi nedostadni podaci stoga ne pridonose potpunom razumijevanju ponašanja konstrukcijskih komponenti kod kojih se koriste takvi spojevi.

Osnovni cilj ovog rada je istraživanje deformacijskih svojstava spojeva i njihovih utjecajnih faktora. Taj cilj je ostvaren pomoću eksperimentalnih ispitivanja i numeričkog modela utemeljenog na metodi konačnih elemenata. Također su na temelju rezultata istraživanja dane preporuke koje bi se mogle primijeniti u postupku projektiranja takvih proizvoda kako bi se poboljšala njihova deformacijska svojstva.

2. Eksperimentalni program

2.1. Materijali i pripremanje uzoraka

Spojevi korišteni u ovom ispitivanju sastojali su se od tri komponente: četiri veličine cjevastih spojeva (5VSA, 7VSA, 8VSA i 10VSA), injekcijske smjese, i armaturnih šipaka dvije kvalitete (HRB400 i HRB500). Cjevasti spojevi i injekcijska



Slika 2. Cjevasti spojevi korišteni u ovom ispitivanju

Tablica 1. Mehanička svojstva materijala injekcijske smjese

Tlačna čvrstoća* f_{cg} [MPa]	Modul elastičnosti E_g [$\times 10^4$ MPa]	Vlačna čvrstoća f_{tg} [MPa]	Granična deformacija	Konzistencija - slijeganje [mm]
84	2,9	3,5	0,0035	180-270

* prizma 70,7 \times 70,7 \times 230 mm

Tablica 2. Mehanička svojstva materijala armaturnih šipaka

Kvaliteta	Promjer d [mm]	Granica popuštanja f_{ys} [MPa]	Vlačna čvrstoća f_{us} [MPa]	Modul elastičnosti E_s [$\times 10^5$ MPa]	Relativna deformacija pri vlačnoj čvrstoći ϵ_{us}	Ukupna relativna deformacija na platou popuštanja* $\Delta\epsilon_{ys}$	β_m (f_{us}/f_{ys})
HRB400	14	532	656	1,89	0,12	0,022	1,23
	16	551	685	1,97	0,11	0,017	1,24
	20	427	569	1,79	0,15	0,016	1,33
	22	503	675	2,15	0,13	0,016	1,34
	25	519	657	2,13	0,12	0,019	1,27
	32	424	586	1,84	0,12	0,012	1,38
HRB500	14	605	741	2,11	0,12	0,017	1,22
	16	615	768	1,82	0,12	0,015	1,25
	20	619	765	2,18	0,11	0,012	1,24
	22	597	755	1,90	0,11	0,015	1,27
	25	571	733	2,00	0,12	0,015	1,28
	32	555	719	1,85	0,12	0,017	1,30

* Vruće valjane čelične šipke HRB400 i HRB500 imaju u svojim krivuljama naprezanje-deformacija približno horizontalan segment nakon popuštanja

smjesa proizvode se za tržište i dostupni su u prodaji. Cjevasti spojevi detaljno prikazani na slici 2. Četiri veličine spojeva, svaka s posebnim obilježjima i geometrijskim svojstvima, korištene su u kombinaciji s raznim promjerima šipaka. Cjevasti spojevi izrađeni od modularnog lijevanog željeza. Njihova mehanička svojstva navedena su u proizvođačkoj specifikaciji i udovoljavaju zahtjevima odgovarajućeg kineskog propisa [10]. Vlačna čvrstoća i pripadna relativna deformacija tog željeza iznosila su minimalno 600 MPa, tj. 3 %. Sferoidizacija modularnog željeza iznosila je minimalno 85 %, a tvrdoća prema Brinellu varirala je od 180 do 250 HB-a. Mehanička svojstva koja su materijali injekcijske smjese i armaturnih šipaka imali 28 dana nakon izrade uzoraka prikazana su u tablicama 1. i 2. Svi podaci iskazani u tablicama odnose se na tri uzorka i njihove srednje vrijednosti nakon ispitivanja. Čvrstoća šipaka kvalitete HRB500 bila je relativno visoka u odnosu na šipke kvalitete HRB400. Prilikom izvođenja spojeva, najprije su cjevasti nastavci položeni vertikalno uz drvene podupore

kao što je to prikazano na slici 3. Zatim je slijedilo pažljivo umetanje šipaka u cijevi s oba kraja, tako da obje šipke budu postavljene točno u predviđeni položaj. Da bi se spriječilo curenje injekcijske smjese, na uski kraj svakog cjevastog spoja ugrađeno je prstenasto gumeno brtvilo. Nakon toga je u cijev pomoću crpke ubrizgana injekcijska smjesa kroz ulazni otvor. Uzorci spojeva skinuti su s podupora nakon 24 sata i položeni na horizontalnu podlogu gdje su čuvani pri sobnoj temperaturi 28 dana do datuma ispitivanja.

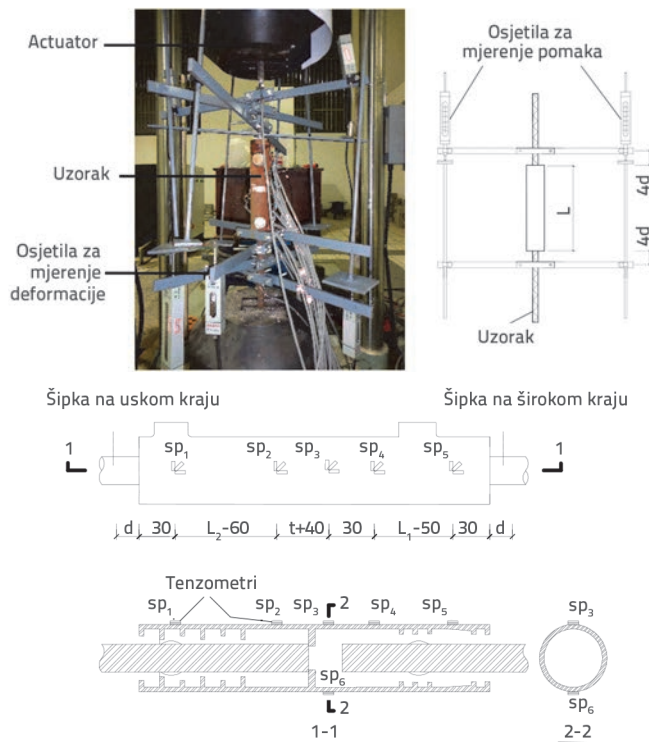


Slika 3. Uzorci injektiranog spoja

2.2. Odrednice ispitivanja

Tablica 3. sadrži podatke o 12 uzoraka koji su podvrgnuti vlačnom opterećenju, s dvije kvalitete armature za svaki od šest promjera. Za opterećenje uzorka do loma korišten je servohidraulični uređaj kapaciteta 500 kN, s točnosti od 2 kN. Slika 4. prikazuje postavke ispitivanja i raspored osjetila za mjerenje pomaka i relativnih deformacija. Mjereni su sljedeći parametri: sila opterećenja, relativna deformacija cjevastog spoja, relativna deformacija spoja unutar dužine mjerenja od L_4 ($L_4 = L + 8d$, gdje je L dužina cjevastog spoja dok je d promjer šipke). Tijekom nanošenja opterećenja sila se kontrolirala prirastom naprezanja od 30 MPa/s sve do popuštanja šipke, a onda se kontrolirao pomak prirastom relativne deformacije od 0,002 1/s. Vrijednosti opterećenja automatski je bilježio uređaj za prikupljanje podataka ugrađen na uređaju za ispitivanje. Relativne deformacije na svakom cjevastom spoju mjerene su pomoću elektrootpornih tenzometara sp_1 do sp_6 , koji su postavljeni uzdužno po vanjskoj površini uzorka. Za svaki su uzorak korištena po dva osjetila za mjerenje pomaka, točnosti 0,01 mm, a njihove su prosječne vrijednosti poslužile za određivanje relativnih deformacija. Za svaki se uzorak moglo izračunati relativno izduženje δ na temelju izduženja u i deformacije pri graničnom opterećenju L_T pomoću izraza (1):

$$\delta = \frac{u}{L_4} \text{ gdje je } u = L_T - L_4 \quad (1)$$



Slika 4. Postavke ispitivanja i raspored osjetila za mjerenje pomaka i relativnih deformacija

Tablica 3. Podaci ispitivanih uzoraka

Oznaka uzorka	Kvaliteta šipki	Promjer šipki [mm]	Veličina spoja
H400D14	HRB400	14	5VSA
H400D16		16	5VSA
H400D20		20	7VSA
H400D22		22	7VSA
H400D25		25	8VSA
H400D32		32	10VSA
H500D14	HRB500	14	5VSA
H500D16		16	5VSA
H500D20		20	7VSA
H500D22		22	7VSA
H500D25		25	8VSA
H500D32		32	10VSA

3. Rezultati ispitivanja i rasprava

3.1. Rezultati ispitivanja

Tablica 4. prikazuje rezultate ispitivanja: način loma, sile nosivosti, izduženje i relativno izduženje.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja

Oznaka uzorka	Sila nosivosti P_u [kN]	σ_u / f_{us}	Izduženje u [mm]	Relativno izduženje δ [%]	$\delta / \varepsilon_{us}$	Način loma
H400D14	88	0,87	20,3	6,1	0,53	Pucanje šipke
H400D16	126	0,91	20,8	6,0	0,56	Pucanje šipke
H400D20	187	1,04	38,5	8,6	0,55	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
H400D22	229	0,89	16,9	3,6	0,29	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
H400D25	303	0,94	22,9	5,8	0,47	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
H400D32	463	0,98	29,8	4,5	0,39	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
H500D14	104	0,91	18,4	5,5	0,46	Pucanje šipke
H500D16	136	0,88	13,7	3,9	0,33	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
H500D20	222	0,92	27,3	6,1	0,57	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
H500D22	249	0,87	16,3	3,5	0,31	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
H500D25	320	0,89	16,6	3,2	0,27	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
H500D32	549	0,90	20,1	3,0	0,26	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
Srednja vrijednost (koeficijent varijacije)		0,92 (0,055)	-	-	0,42 (0,29)	-

$\sigma_u = 4P_u / (\pi d^2)$, gdje je d promjer korištenih armaturnih šipki

Slika 5. prikazuje dva načina loma zabilježena tijekom ispitivanja: pucanje šipke i popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke što rezultira izvlačenjem šipke. Ta dva načina loma također su već prije opisana [1, 2, 4] tijekom analize dobro projektiranih proizvoda. U ispitivanju koje se ovdje opisuje nije došlo do vlačnog loma cjevastog spoja niti do popuštanja veze između injekcijske smjese i cjevastog spoja kao što je registrirano u radovima [1, 2, 4]. Tome je vjerojatno razlog činjenica da je otpornost veze između injekcijske smjese i cjevastog spoja bila relativno jaka u usporedbi s vrijednostima za vezu između smjese i šipke.

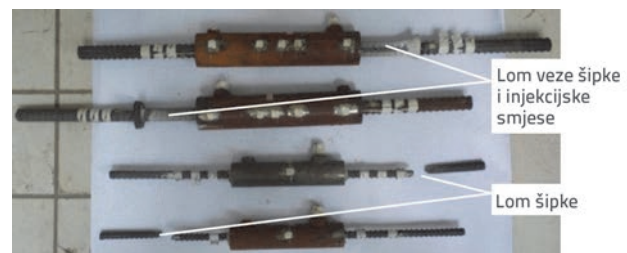
Naprezanja šipaka pri silama nosivosti iznosila su otprilike 92 % u odnosu na vlačnu čvrstoću spojnih šipaka. Osnovni razlozi tome su, kako je spomenuto u poglavlju 1., neadekvatno poravnanje i pozicioniranje ugrađenih šipki što je dovodilo do njihova pucanja [2, 4]. Što se tiče popuštanja veze između injekcijske smjese i šipke, tome je također pridonijela relativno slaba otpornost veze između injekcijske smjese i šipke.

Relativna izduženja δ prikazana u tablici 4. varirala su od 3,0 % do 8,6 %. Omjeri relativnih izduženja spojeva, δ , prema relativnim deformacijama šipaka pri vlačnoj čvrstoći, ε_{us} , varirali su od 0,26 do 0,57, pri čemu je prosječna vrijednost iznosila 0,42. To znači da su otpornosti spojeva na deformaciju bile znatno manje od otpornosti šipaka. Ovaj rezultat također pokazuje da se relativno slaba deformacijska svojstva spoja mogu pripisati segmentu cjevastog spoja [10]. Treba naglasiti da su točne vrijednosti δ i $\delta / \varepsilon_{us}$ varirale ovisno o odabranoj dužini. Međutim, zaključci koji se odnose na slabi dio spojeva ne ovise o odabranoj dužini.

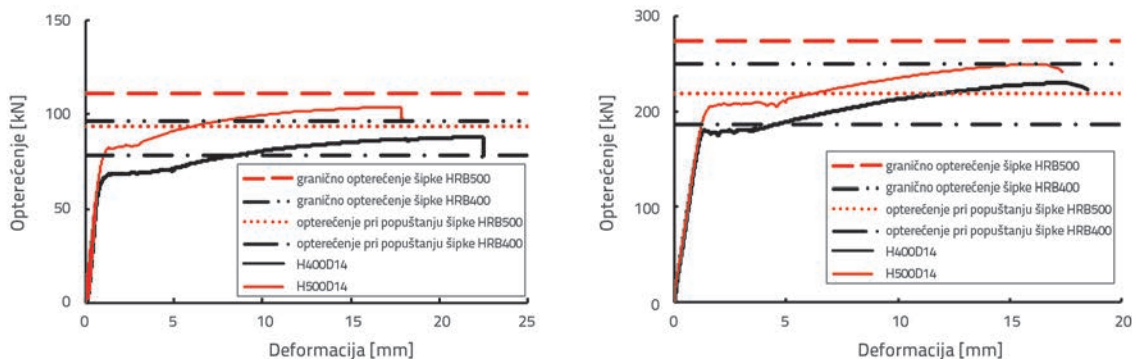
Na slici 6. prikazane su tipične krivulje sila-deformacija koje se odnose na uzorke H400D14 i H500D14 gdje je do sloma

došlo uslijed loma šipke, te odgovarajuće krivulje za uzorke H400D22 i H500D22 gdje je do sloma došlo popuštanjem veze između injekcijske smjese i šipke. Četiri horizontalne linije prikazane na toj slici označavaju granicu popuštanja, odnosno vlačnu čvrstoću za šipke HRB400 i HRB500. Na krivuljama možemo uočiti tri stadija: elastični stadij, stadij popuštanja te stadij očvršćivanja. Možemo zamijetiti da su karakteristike triju stadija tih krivulja primjenjive na oba načina sloma, jer su sve spojene šipke bile u stanju nakon popuštanja kada je došlo do otkazivanja uzoraka.

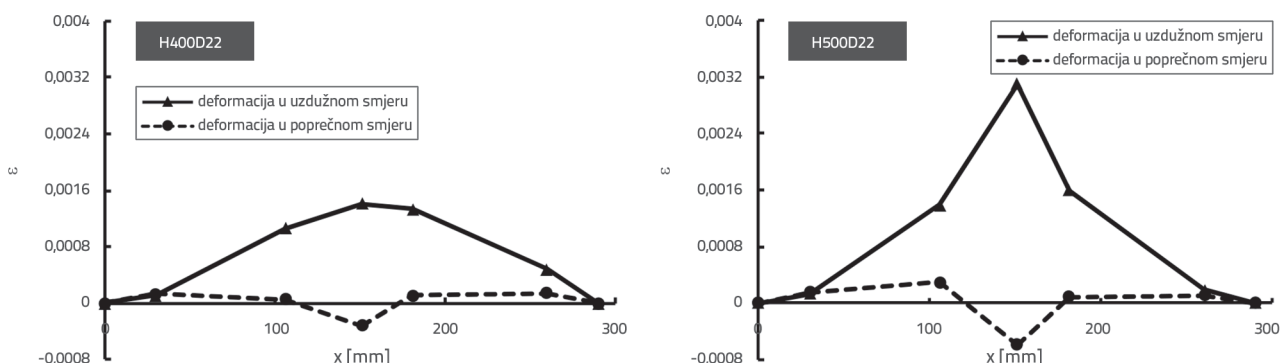
Slika 7. prikazuje reprezentativne vršne vrijednosti raspodjele deformacija cjevastih spojeva za uzorke H400D22 i H500D22. Vrijednosti na horizontalnoj osi označavaju udaljenosti od uskog dijela cjevastog spoja do točaka mjerenja. Rezultati pokazuju da su cjevasti spojevi u uzdužnom smjeru bili u vlaku. Vršne vrijednosti svakog uzorka nalazile su se na sredini, a postupno su se smanjivale prema krajevima cijevi. U poprečnom smjeru, deformacije su bile relativno male pa su cjevasti spojevi bili u vlaku ili u tlaku. Ove napomene objašnjene su u [3].



Slika 5. Dva registrirana načina sloma



Slika 6. Tipične krivulje sila - deformacija



Slika 7. Raspored vršnih relativnih deformacija po vanjskoj površini cjevastih spojeva uzoraka H400D22 i H500D22

3.2. Rasprava

Rezultati ispitivanja su pokazali da način loma utječe na deformacijska svojstva cjevastih spojeva. Kod loma šipke uz njihovo gotovo potpuno aktiviranje, tj. u slučaju uzoraka H400D14, H400D16, i H500D14, srednja vrijednost δ/ϵ_{us} , izvedena iz tablice 4., iznosila je 0,52. Međutim, u slučaju sloma zbog popuštanja na spoju između injekcijske smjese i šipke gdje šipke nisu dosegle svoju vrijednost granične deformacije, prosječna vrijednost δ/ϵ_{us} iznosila je 0,38. Ti rezultati su u skladu s mišljenjem da su deformacijska svojstva šipaka bolja od odgovarajućih svojstava segmenata cjevastog spoja [10]. Dakle, spojevi koji su popustili zbog loma šipaka isticali su se boljim deformacijskim svojstvima.

Osim toga, na način sloma bitno je utjecala i dužina cjevastog spoja u slučajevima kada su drugi faktori, tj. konfiguracija unutarnje površine i vrsta materijala cjevastog spoja, bili unaprijed definirani. U toj situaciji, za cjevasti je spoj određena minimalna dužina kako bi se postigao slom šipke i maksimalno poboljšala njena deformacijska svojstva. Drugim riječima, spojevi kod kojih je dužina cijevi bila veća od minimalne dužine također su bili podložni slomu šipke. Međutim, u tim je slučajevima dolazilo i do smanjenja dužine šipaka u vanjskom dijelu, što je dovodilo do pogoršanja ukupnih deformacijskih svojstava. Dodatna numerička provjera ovog nalaza iskazana je u poglavlju 4.

I konačno, svi su uzorci ispitani na zraku bez betonske obloge, što se razlikuje od stvarnih uporabnih uvjeta kada su spojevi

ugrađeni u beton i čine dio armiranobetonskih elemenata. Po mišljenju autora, okolni beton smanjuje utjecaje neadekvatnog poravnanja i pozicioniranja na mehanička svojstva čitavog spoja. Stoga je djelovanje spojeva i okolnog betona izrazito osnog karaktera, i može se reći da su rezultati prikazani u ovom radu na strani sigurnosti.

4. Numerička istraživanja

U ovom se poglavlju istražuje utjecaj dužine cjevastog spoja na deformacijska svojstva te se prikazuje pristup koji omogućuje maksimalno poboljšanje deformacijskih svojstava spoja. Za izradu modela konačnih elemenata korišten je program ANSYS.

4.1. Model konačnih elemenata

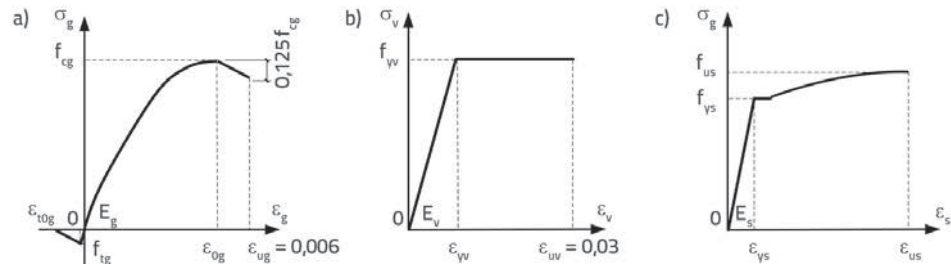
Za injekcijsku je smjesu korišten volumni element Solid65 s osam čvorova koji se obično primjenjuje za beton. Taj je element odabran zato što omogućuje modeliranje nelinearnog ponašanja materijala, što uključuje i pojavu pukotina u vlaknu te drobljenje u tlaku. Za cjevaste spojeve i šipke korišteni su volumni elementi s osam čvorova Solid45, odnosno gredni elementi Beam 188. Nelinearni *spring* elementi Combin39 korišteni su za modeliranje spoja injekcijske smjese i šipke u uzdužnom pravcu te poprečnog ograničenja šipaka zbog djelovanja smjese u radialnom smjeru. Uzduž cjevastog spoja određen je odnos sile i pomaka opruga na temelju modela predloženog u [12], jer su materijal i karakteristike ispitivanja iz tog rada bili slični

onima koji su prikazani u ovom radu. U radialnom su smjeru opruge postavljene s visokom vrijednošću krutosti, što je u skladu s modulom elastičnosti injekcijske smjese. Pretpostavljeno je savršeno prijanjanje između injekcijske smjese i cjevastog spoja, jer popuštanje veze između injekcijske smjese i cijevi nije zabilježeno u

ispitivanjima te je usvojena neznatna vrijednost klizanja između tih elemenata. Geometrijski su modelirane i rebrasto izvedene unutarnje površine cijevi. Dužina armaturnih šipaka koje izlaze iz cjevastog spoja iznosila je 4d na svakom kraju uzorka, što je u skladu s ispitivanjima.

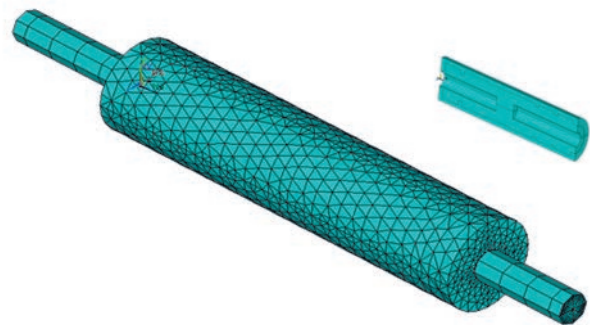
Ponašanje materijala injekcijske smjese, cjevastog spoja i šipke opisano je pomoću multilinearnih modela za kinematičko očvršćavanje. Krivulja naprezanja i deformacija za injekcijsku smjesu pod osnim opterećenjem, bazirana uglavnom na rezultatima ispitivanja, prikazana je na slici 8.a. Ponašanje te smjese pri slomu opisano je pomoću kriterija sloma William-Warnke s pet parametara. Koeficijenti prijenosa posmika za otvorene i zatvorene pukotine u smjesi usvojeni su prema uobičajenim vrijednostima i iznose 0,4 tj. 0,95. Model idealnog elastičnoplastičnog materijala prikazan na slici 8.b korišten je za cjevaste spojeve uz pretpostavljenu granicu popuštanja od 600 MPa i modul elastičnosti od $2,1 \times 10^5$ MPa [10]. Krivulja naprezanja i deformacija za armaturne šipke prikazana je na slici 8.c s parametrima koji su u skladu s rezultatima ispitivanja.

Jedna od poteškoća u modelu odnosila se na nemogućnost prikladnog ocjenjivanja utjecaja neadekvatnog poravnanja i pozicioniranja šipaka, što u velikoj mjeri negativno utječe na mehaničko ponašanje spojeva i teško se može precizno izmjeriti. U ovom je istraživanju pretpostavljeno da se utjecaj neadekvatnog poravnanja i pozicioniranja šipaka može na odgovarajući način opisati pomoću ekscentričnosti opterećenja, e , što također dovodi do smanjenja čvrstoće i deformacija. Probnim je proračunima definirana određena vrijednost ekscentričnosti opterećenja te je tako dobivena vrijednost primijenjena na sve uzorke. Na temelju te ideje provedeno je sljedeće: Prvo, uzorak H500D14 odabran je kao reprezentativan spoj jer je vrijednost σ_v/f_{us} iznosila 0,91, što je blisko srednjoj vrijednosti od 0,92 (tablica 4.). Drugo, ekscentričnosti opterećenja uzorka H500D14 povećale su se na vrijednost veću od 0 kako bi se dobilo simulirano granično opterećenje šipaka. Treće, ustanovljeno je da je simulirano granično opterećenje gotovo jednako ispitanoj opterećenju kada je vrijednost $e = 0,035 d$. I konačno, vrijednost $0,035 d$ usvojena je kao približna i pojednostavljena vrijednost ujednačene ekscentričnosti opterećenja koja se primjenjuje na sve uzorke. U proračunu je usvojeno da je uski kraj cijevnog



Slika 8. Krivulje naprezanja i deformacija za materijale podvrgnute jednoosnom opterećenju: a) injekcijska smjesa; b) cjevasti spoj; c) armaturna šipka

spoja fiksna, a osno opterećenje nanoseno je na širem kraju. Korišten je statički implicitni algoritam i metoda dužine luka. Definirani model konačnih elemenata prikazan je na slici 9.



Slika 9. Model konačnih elemenata za injektirane spojeve

4.2. Provjera modela

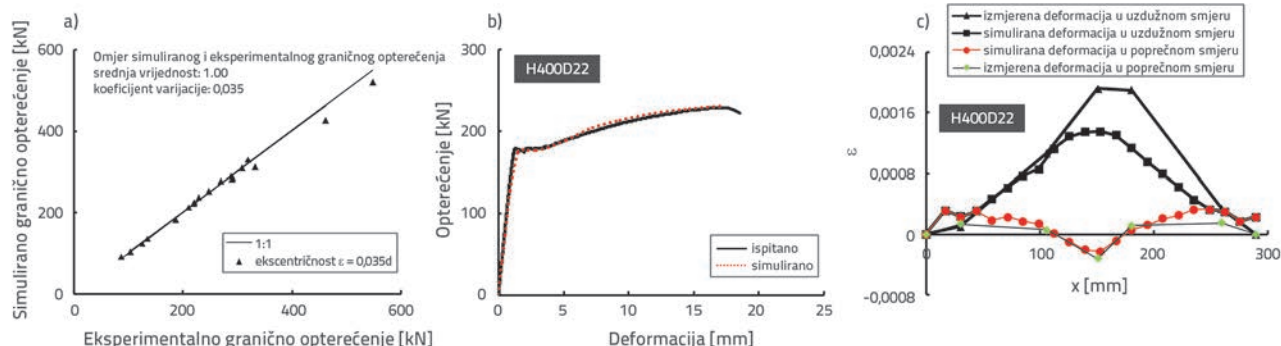
Provjera modela provedena je uspoređivanjem simulacija s rezultatima ispitivanja tako što su uspoređeni sljedeći parametri: način sloma, sila nosivosti, krivulja opterećenje - deformacija, te raspored deformacija po cjevastom spoju.

Simulirani načini popuštanja podudarali su se za sve uzorke s rezultatima ispitivanja, osim kod uzorka H400D16 s popuštanjem na vezi između injekcijske smjese i šipke. Usporedba simuliranih sila nosivosti s eksperimentalnim rezultatima prikazana je na slici 10.a. Odnosi simuliranih i eksperimentalnih opterećenja varirali su od 0,92 do 1,04. Srednja vrijednost bila je 1,0, a koeficijent varijacije iznosio je 0,035.

Na slici 10.b prikazana je tipična krivulja opterećenja-deformacije za uzorak H400D22, gdje se može uočiti dobra podudarnost eksperimenta i simulirane krivulje.

Na slici 10.c prikazana je simulirana i eksperimentalna raspodjela vršnih deformacija po vanjskoj površini cjevastog spoja za uzorak H400D22. Može se uočiti da su i uzdužne i poprečne deformacije dobro predviđene. Do razlika je vjerojatno došlo zato što model nije mogao realno simulirati rebra armature i pojavu pukotina u injekcijskoj smjesi.

U konačnici se može reći da je razvijeni model konačnih elemenata prikladno provjeren te da se može koristiti u analizi praktične primjene.



Slika 10. Usporedba rezultata simulacije s eksperimentalnim rezultatima: a) sile nosivosti; b) krivulja opterećenje - deformacija; c) raspodjela graničnih deformacija po vanjskoj površini spojeva

4.3. Primjena

U analizi utjecaja dužine cjevastog spoja na deformacijska svojstva spoja korišten je model konačnih elemenata. Potrebno je naglasiti sljedeće:

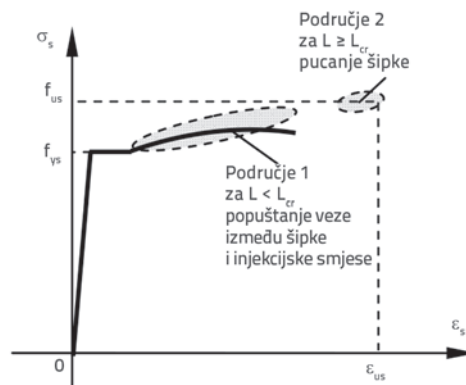
- Deformacijska svojstva segmenata cjevastog spoja bila su relativno loša u usporedbi sa svojstvima spojnih šipaka, kao što je potvrđeno u poglavlju 3.
- Pretpostavljeno je da se šipke pri sili nosivosti nalaze u stanju nakon popuštanja, što se pokazalo točnim za sve uzorke koji su bili podvrgnuti ispitivanju.

Kao primjer može nam poslužiti uzorak H400D14. U tablici 5. prikazan je utjecaj dužine cjevastog spoja na relativno izduženje, vlačnu čvrstoću i način sloma. Dužina cjevastog spoja smanjuje se u skladu s korakom smanjenja Δl i to u rasponu od $-2,0d$ do 0, pri čemu korak smanjenja iznosi $0,5d$. Stoga dužina svake šipke ugrađene u spoj varira za $\Delta l/2$. Ustanovljeno je da relativno izduženje, δ , dostiže svoju vršnu vrijednost kada način loma prijeđe sa sloma uslijed popuštanja veze smjese i šipke na slom uslijed pucanja šipke. Za određeni spoj, dužina spoja koja odgovara maksimalnom relativnom izduženju definira se kao kritična dužina spoja L_{cr} . Alternativno, kritična dužina spoja jednaka je minimalnoj dužini spoja kod loma uslijed pucanja šipke.

Koncept kritične dužine cjevastog spoja može se razmotriti i sa stajališta iskorištenosti materijala. Prije postizanja vrijednosti L_{cr} , vrijednosti δ i σ_u rastu s povećanjem dužine cjevastog spoja L . U tim slučajevima, naprezanja šipaka se nalaze u području 1 koje je prikazano na slici 11., što znači da čvrstoća šipaka nije dovoljno iskorištena prije loma uzorka. Nakon prekoračenja vrijednosti L_{cr} , vrijednost δ se smanjuje, a vrijednost σ_u ostaje gotovo konstantna. Kao posljedica, naprezanja šipke prelaze u područje 2 prikazano na slici 11., a šipke se koriste gotovo do njihove granične čvrstoće, što dovodi do poboljšanja deformacijskih svojstava spojeva.

Optimizacija spojeva ovdje je provedena analizom njihovih kritičnih dužina, kao što se može vidjeti u tablici 6. Usporedbom s numeričkim rezultatima bez optimizacije, ustanovljeno je da se relativno izduženje u prosjeku poboljšava za 33 % kada

se koriste kritične dužine cjevastih spojeva. U međuvremenu, naprezanja šipaka pri silama nosivosti povećala su se tek neznatno, što se može zanemariti. Osim toga, za uzorak H400D16, vrijednost L_{cr} ($L_{cr} = 228$ mm) bila je nešto veća od vrijednosti L ($L = 220$ mm) s greškom otprilike od 3,6 %. Kod uzorka H400D20 dobivena je neočekivano niska vrijednost L_{cr} što se vjerojatno može pripisati oscilacijama u ispitivanju materijala. Na kraju je usvojeno da kritična dužina spoja ima opće obilježje jer ne ovisi o ekscentričnosti opterećenja niti o izmjerenim dužinama.



Slika 11. Naprezanje šipke pri raznim načinima loma spoja

4.4. Preporuke za projektiranje spojeva

Metode koje se danas primjenjuju za projektiranje spojeva iskazuju određene nedostatke u vezi s deformacijskim svojstvima. Mnogi tipovi spojeva projektirani su tako da se njihova mehanička svojstva definiraju u skladu sa zadanim kriterijima prihvatljivosti [7-10]. U tim se kriterijima naglasak obično stavlja na čvrstoću, a zanemaruju se deformacijska svojstva. Međutim, kao što je dobro poznato, deformacijska svojstva spoja od presudne su važnosti za dobro ponašanje konstrukcije, tj. za postizanje dobrih svojstava glede apsorpcije energije. Zbog toga se sadašnji kriteriji za preuzimanje ne mogu smatrati potpuno pouzdanima kada se primjenjuju za ocjenjivanje spojeva u

Tablica 5. Utjecaj dužine cjevastog spoja na relativno izduženje i vlačnu čvrstoću uzorka H400D14

Dužina cjevastog spoja L [mm]	Δl [mm]	Ukupna dužina $L_u = L + 8d$ [mm]	Relativno izduženje δ [%]	σ_u [MPa]	Način popuštanja
192	-2,0d	304	2,9	555	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
199	-1,5d	311	4,7	588	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
206	-1,0d	318	5,8	594	Popuštanje veze između injekcijske smjese i šipke
213 (L_{cr})	-0,5d	325	6,4	597	Pucanje šipke
220 (ispitano)	0	332	6,3	597	Pucanje šipke

Tablica 6. Projekt optimalizacije spojeva prema kritičnoj dužini

Oznaka uzorka	Dužina cijevi kod ispitivanja L [mm]	Δl [mm]	Kritična dužina cijevi L_{cr} [mm]	Prije optimalizacije		Nakon optimalizacije		δ_{ao}/δ_{bo}	$\sigma_{u,ao}/\sigma_{u,bo}$
				Relativno izduženje δ_{bo} [%]	$\sigma_{u,bo}$ [MPa]	Relativno izduženje δ_{ao} [%]	$\sigma_{u,ao}$ [MPa]		
H400D14	220	-0,5d	213,00	6,3	597	6,4	597	1,02	1,00
H400D16	220	0,5d	228,00	6,1	584	6,6	619	1,08	1,06
H400D20	290	-2,0d	250,00	6,2	522	7,0	522	1,13	1,00
H400D22	290	0,5d	301,00	3,7	587	7,1	628	1,92	1,07
H400D25	320	0,5d	332,50	4,4	567	6,6	595	1,49	1,05
H400D32	403	0,5d	419,00	4,8	531	6,6	531	1,39	1,00
H500D14	220	-1,5d	199,00	5,2	668	5,9	668	1,13	1,00
H500D16	220	0,5d	228,00	5,4	651	7,1	684	1,31	1,05
H500D20	290	0,5d	300,00	4,6	706	5,2	720	1,11	1,02
H500D22	290	0,5d	301,00	5,9	676	6,3	690	1,06	1,02
H500D25	320	0,5d	332,50	4,1	646	6,6	672	1,61	1,04
H500D32	403	0,5d	419,00	4,2	628	7,0	647	1,66	1,03
Srednja vrijednost (koeficijent varijacije)				-	-	-	-	1,33 (0,22)	1,03 (0,02)

zonama plastičnog zgloba [12] ili u konstrukcijama koje se grade u seizmičkim područjima. Sve to upućuje na važnost metoda koje se bave poboljšanjem deformacijskih svojstava spojeva.

Jedna od preporuka za projektiranja predložena je i u okviru ovog istraživanja: kritične dužine cjevastih spojeva trebalo se koristiti u projektiranju da se poboljšaju deformacijska svojstva spojeva i ujedno uštedi u materijalu, to jest smanjeni troškovi.

5. Zaključak

U ovom je radu provedeno eksperimentalno ispitivanje i numerička simulacija da bi se odredile mogućnosti poboljšanja deformacijskih svojstava i njihov utjecaj na dužinu injektiranog cjevastog spoja. Na temelju postignutih rezultata mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Deformacijska svojstva spojeva kod kojih dolazi do loma šipke upućuju na relativno veliku otpornost prema deformacijama u odnosu na lom uslijed popuštanja spoja između injekcijske smjese i šipke. Zbog toga se lom šipke smatra povoljnijim načinom otkazivanja nosivosti od loma spoja između injekcijske smjese i šipke. Općenito uzevši, dužina cjevastog spoja jedan je od ključnih faktora koji utječe na način loma spoja.
- Uočeno je da za svaki spoj postoji kritična dužina cjevastog spoja, što se smatra značajnim za razumijevanje deformacijskog ponašanja spojeva. Spojevi s cijevima kritičnih dužina dovode do povećanja relativnog izduženja spoja.

Zahvala

Autori zahvaljuju obrazovnoj zakladi Kwang-Hua na financijskoj potpori.

LITERATURA

- [1] Einea, A., Yamane, T., Tadros, M.K.: Grout-filled pipe splices for precast concrete construction, *PCI Journal*, 40 (1995) 1, pp. 82–93, <https://doi.org/10.15554/pcij.01011995.82.93>
- [2] Jansson, P.O.: Evaluation of grout-filled mechanical splices for precast concrete construction, Michigan Department of Transportation MDOT, 2008.
- [3] Ling, J.H., Rahman, A.B.A., Ibrahim, I.S., et al.: Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load, *Construction and Building Materials*, 33 (2012), pp. 90–98, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.001>
- [4] Ling, J.H., Rahman, A.B.A., Ibrahim, I.S.: Feasibility study of grouted splice connector under tensile load, *Construction and Building Materials*, 50 (2014), pp. 530–539, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.010>
- [5] Hosseini, S.J.A., Rahman, A.B.A.: Analysis of spiral reinforcement in grouted pipe splice connectors, *Građevinar*, 65 (2013) 6, pp. 537–546.
- [6] Henin, E., Morcou, G.: Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction, *Engineering Structures*, 83 (2015), pp. 154–162.
- [7] American Concrete Institute: Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI-318), Farmington Hills, MI, USA, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.045>
- [8] ICC Evaluation Service, Inc.: Acceptance criteria for mechanical connector systems for steel reinforcing bars (AC-133). Birmingham, AL, USA, 2008.
- [9] British Standards BSI: Structural use of concrete – Part 1: code of practice for design and construction (BS8110-1:1997), British Standards Institution, London, UK, 1997.
- [10] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China: Technical specification for grout sleeve splicing of rebars (JGJ355-2015). China Architecture & Building Press, Beijing, PR China, 2015. (in Chinese)
- [11] Ameli, M.J., Parks, J.E., Brown, D.N., Pantelides, C.P.: Seismic evaluation of grouted splice sleeve connections for reinforced precast concrete column-to-cap beam joints in accelerated bridge construction. *PCI Journal*, 60 (2015) 2, pp. 80–103, <https://doi.org/10.15554/pcij.03012015.80.103>
- [12] Steuck, K.P., Eberhard, M.O., Stanton, J.F.: Anchorage of large-diameter reinforcing bars in ducts. *ACI Structural Journal*, 106 (2009) 4, pp. 506–513.