

Primljen / Received: 3.10.2015.

Ispravljen / Corrected: 14.8.2016.

Prihvaćen / Accepted: 12.12.2016.

Dostupno online / Available online: 10.7.2017.

Eksperimentalno ispitivanje injektiranog prstenastog preklapnog spoja uslijed vlačnog opterećenja

Autori:



Mr.sc. **Yu Qiong**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Tongji, Kina
Institut za ispitivanje konstrukcija i
sprječavanje katastrofa
yiongyu2005@163.com



Mr.sc. **Xu Zhiyuan**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Tongji, Kina
Institut za ispitivanje konstrukcija i
sprječavanje katastrofa
zyxu_0908@163.com

Izvorni znanstveni rad

Yu Qiong, Xu Zhiyuan

Eksperimentalno ispitivanje injektiranog prstenastog preklapnog spoja uslijed vlačnog opterećenja

U radu se analizira izvođenje injektiranog prstenastog spoja koji je korišten za spajanje armaturnih šipki u predgotovljenim betonskim konstrukcijama. Ispitana su ukupno 63 uzorka, koja su se razlikovala po promjeru šipki i duljini spoja uslijed vlačnog opterećenja. Istraživanjem je obuhvaćena vrsta sloma, granična vrijednost vlačne čvrstoće te dijagram opterećenja i progiba uzorka. Preporučena su dva izraza za proračun prosječnog naprezanja prstenastog spoja i kritične duljine spoja.

Ključne riječi:

predgotovljena betonska konstrukcija, ovijanje prstenastog spoja, prokliznuće prijanjanja, duljina preklopa

Original scientific paper

Yu Qiong, Xu Zhiyuan

Experimental study of grouted sleeve lapping connector under tensile load

The performance of the grouted sleeve lapping connector that is used to connect reinforcement bars in a precast concrete structure is studied. A total of 63 specimens, varying in bar diameter and lap length, were tested under tensile load. The failure modes, ultimate tensile strength values and load-displacement curves of the specimens are discussed in the study. Two equations are proposed for calculating the average lapping bond stress and critical lap length.

Key words:

precast concrete structure, sleeve confinement, bond-slip; lap length

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Yu Qiong, Xu Zhiyuan

Experimentelle Untersuchung der injizierten ringförmigen überlappenden Verbindung aufgrund der Zuglast

In der Arbeit wird die Ausführung einer injizierten ringförmigen Verbindung analysiert, die für die Verbindung von Bewehrungsstäben in vorgefertigten Betonkonstruktionen verwendet wird. Getestet wurden insgesamt 63 Proben, die sich im Durchmesser der Stäbe und der Länge der Verbindung aufgrund der Zuglast unterscheiden. Mit der Untersuchung wurde die Art des Bruches, der Grenzwert der Zugfestigkeit sowie das Belastungs- und Durchbiegungsdiagramm der Probe umfasst. Empfohlen wurden zwei Ausdrücke für die Berechnung der Spannung der Ringverbindung und der kritischen Verbindungslänge.

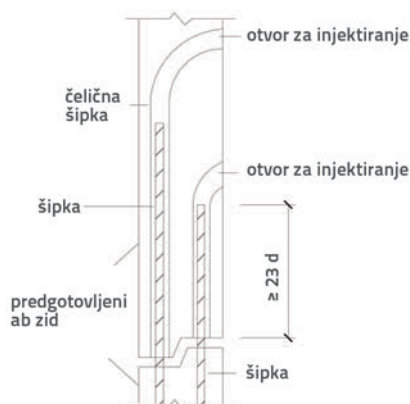
Schlüsselwörter:

vorgefertigte Betonkonstruktion, Einwickeln der Ringverbindung, Abgleiten der Adhäsion, Länge der Überlappung

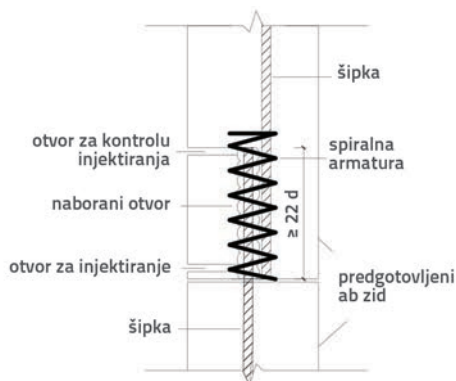
1. Uvod

Otkako su injektirani spojevi, koje je izumio Alfred A. Yee [1], 1960-ih primijenjeni za spajanje armaturnih šipki u predgotovljenim stupovima hotela na Havajima [2], uloženi su veliki naponi u razvitak spojeva armaturnih šipki montažnih nastavaka. Na temelju teorija koje su predstavljene u prethodnim istraživanjima [3-7], osmišljeni su injektirani spojevi kojima se armaturne šipke spajaju u liniji [1, 8-15]. Međutim, izvođenje spoja je bilo poprilično komplicirano, a proizvodnja poprilično skupa. Kako bi se poboljšalo ovijanje te smanjio razvoj pukotina, unutarnji promjer prstena je obično manjih dimenzija. Zbog pogreški u proizvodnji i izvedbi, armatura za izvedbu montažnih spojeva u nekim slučajevima, tijekom građenja, nije mogla biti umetnuta u konstrukciju.

Injektirane, metalne valovite cijevi [16] bile su druga vrsta spoja kojom se spajaju armaturne šipke u predgotovljenom betonu, kao što je prikazano na slici 1. Armaturne šipke od nižeg predgotovljenog betonskog posmičnog zida umetnute su u metalne, valovite cijevi gornjih predgotovljenih betonskih posmičnih zidova. Drugim riječima, injekcijska smjesa je izlivena u metalnu valovitu cijev i dva su zida spojena pomoću sidara između šipki i injekcijske smjese. Duljina sidra injektiranjem ugrađenih metalnih valovitih cijevi bila je predugačka.



Slika 1. Skica injektiranog prstenastog preklopnog spoj



Slika 2. Skica otvora za zapunjavanje kod povezivanja čeličnih šipki pomoću preklopa

Nastavak za zapunjavanje preklopa čeličnih šipki (slika 2.) osmislili su Jiang i suradnici [17]. Pokazalo se da je on prikladan za spajanje predgotovljenih armiranobetonskih konstrukcija [18]. Razvoj pukotina oko zone sidrenja je kontroliran okruživanjem preklopne zone poprečnom armaturom [19-21], ali duljina prekopa je i dalje bila prevelika.

Postavljanjem prstena u zonu preklopa, postizemo ovijenost uzduž preklapanih šipki [22-24], te ograničujemo širine pukotina. Na taj način duljina preklopa mogla bi se znatno smanjiti. Injektirani, prstenasti preklopni spoj [25] smješta dvije šipke, jednu uz drugu uz dovoljnu duljinu preklopa, kako bi se omogućio potpuni prijenos naprezanja preko injekcijske smjese s jedne na drugu šipku. Šuplja standardna cijev cilindričnog presjeka je postavljena oko preklopne spone kako bi osigurala zatvaranje injekcijske smjese te ograničila razvoj pukotina. Skica injektiranog prstenastog preklopnog spoja koji je korišten kao spona šipki u predgotovljenim betonskim zidovima, prikazana je na slici 3.



Slika 3. Skica injektirane prstenaste preklopne veze

U ovom je istraživanju injektirani prstenasti preklopni spoj eksperimentalno testiran na uzorcima s različitim promjerima šipki i duljinama preklopa. Analiziran je mehanizam prijenosa opterećenja i mehanička svojstva injektiranog prstenastog preklopnog spoja te je preporučena duljina spoja.

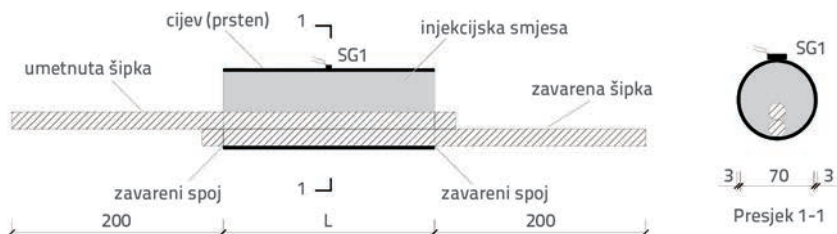
2. Eksperimentalni program

Program ispitivanja se sastojao od 63 injektirana prstenasta preklopna spoja s različitim promjerom šipki i različitom duljinom preklopa, kako bi se odredio utjecaj interakcije varijabli te ograničenje mehanizma.

2.1. Uzorci

Šuplja čelična cijev cilindričnog presjeka je točkastim zavarivanjem pričvršćena za armaturnu šipku koja je na slici 4. označena kao "zavarena šipka" (svrha točkastog zavarivanja jedne šipke za prsten jest fiksiranje čelične cijevi, simulirajući na taj način konstrukciju spoja u stvarnoj konstrukciji). Druga armaturna šipka, nazvana umetnuta šipka, stavljena je usporedno sa zavarenom šipkom.

Duljina preklopa šipki je jednaka duljini cijevi. Injekcijska smjesa koja se ne skuplja izlivena je u prsten kako bi usidrila dvije armaturne šipke. Radna svojstva injektirane, prstenaste, preklapne veze, u kojoj su šipke postavljene da drže jedna drugu, lošija su od spoja u kojemu postoji određeni prostor između dvije šipke. Budući da je injekcijske smjese bilo više između šipki i da je postignuto bolje mehaničko povezivanje injekcijske smjese i šipki, spriječeno je klizanje šipki u spoj. Detalji uzorka prikazani su na slici 4.



Slika 4. Detalji uzorka i položaj mjeraca deformacija (SG1), dimenzije u mm

Tablica 1. Dimenzije uzoraka

Cijev (prsten)	Promjer šipke d [mm]	Duljina preklopa, L [mm]		
		$8d$	$10d$	$12,5d$
Unutarnji promjer $D = 70$ mm debljina $s = 3$ mm	12	96	120	150
	14	112	140	175
	16	128	160	200
	18	144	180	225
	20	160	200	250
	22	176	220	275
	25	200	250	313

Dimenzije uzoraka dane su u tablici 1. Čelične cijevi unutarnjeg promjera 70 mm i debljine 3 mm, s normalnom čvrstoćom na razvlačenje od 235 N/mm², korištene su za spajanje susjednih šipki. Duljina prstena, L , je iznosila 8, 10 i 12,5 puta duljine promjera šipke, što je iznosilo od 12 mm do 25 mm. Svaka grupa s određenim promjerom šipke i odgovarajućom duljinom preklopa sadržavala je tri identična uzorka.

2.2. Svojstva materijala

Šipke za kontrolu s normalnom čvrstoćom na razvlačenje od 400 N/mm² testirane su kako bi se odredila svojstva materijala (tablica 2.). Slobodna duljina šipki za kontrolu između hvataljki je približno iznosila 350 mm. Početna brzina opterećenja iznosila je 2 kN/s. Nakon što je vrijednost vlačnog naprezanja premašila granicu popuštanja šipki, primijenjeno je

inkrementalno vlačno opterećenje stopom od 100 mm/min do sloma šipke. Čvrstoća na savijanje je iznosila 11,4 MPa, tlačna čvrstoća 62,9 MPa, a vlačna čvrstoća 4,63 MPa.

2.3. Postavke ispitivanja

Mjerač deformacija (SG1) je postavljen poprečno na prsten na sredini duljine preklopa kako bi se odredio granični tlak što ga je stvorio prsten na injekcijskoj smjesi koja ekscentrično okružuje cijelu duljinu spona, kako je prikazano na slici 4. Uzorci su ispitivani pod inkrementalnim vlačnim opterećenjem koje je generirano pomoću hidraulične kralice. Zavarena šipka je stegnuta za nepomični kraj, dok je umetnuta šipka učvršćena na opterećenom kraju, kako je prikazano na slici 5. Duljina uzorka između hvataljki je jednaka zbroju duljine preklopa i 200 mm. Način opterećenja uzorka je identičan kao kod kontrolnog uzorka. Zabilježene su krivulje opterećenja, pomaka i naprezanja.

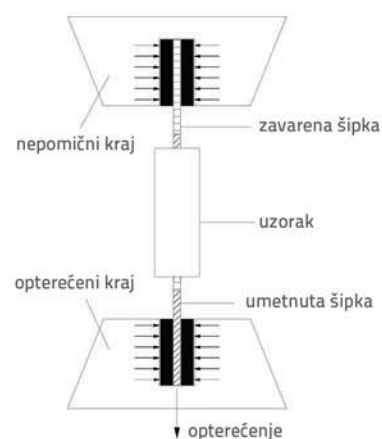
3. Rezultati ispitivanja

Poravnavanje susjednih zavarenih šipki i umetnutih šipki vodi do ekscentričnosti. Preciznije, zavarena i umetnuta šipka postavljene su tako da drže jedna drugu, ne u liniji (slika 6.a). Uslijed vlačnog

Tablica 2. Materijalna svojstva kontrolnih šipki

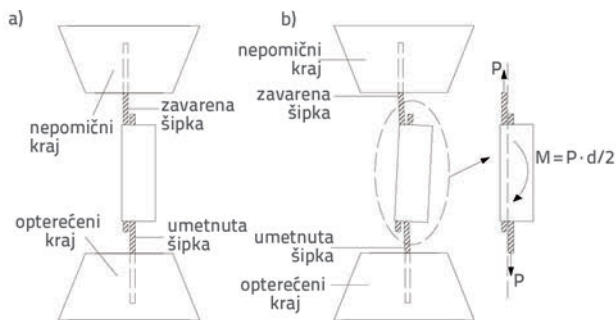
Promjer šipke, d [mm]	12	14	16	18	20	22	25
Prosječna granica razvlačenja, f_{vc} [N/mm ²]	423	418	407	452	421	444	448
Prosječna vlačna čvrstoća, f_{uc} [N/mm ²]	570	577	572	625	615	562	585

Napomena: f_{vc} i f_{uc} su definirani na temelju normalnog poprečnog presjeka šipke



Slika 5. Postavke ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka

naprezanja P , pojavljuje se moment savijanja na sredini linije $M = P \cdot d/2$. On vodi do rotacije prstena, kako je prikazano na slici 6.b.



Slika 6. Progib uzorka nakon ispitivanja: a) prije ispitivanja; b) nakon ispitivanja

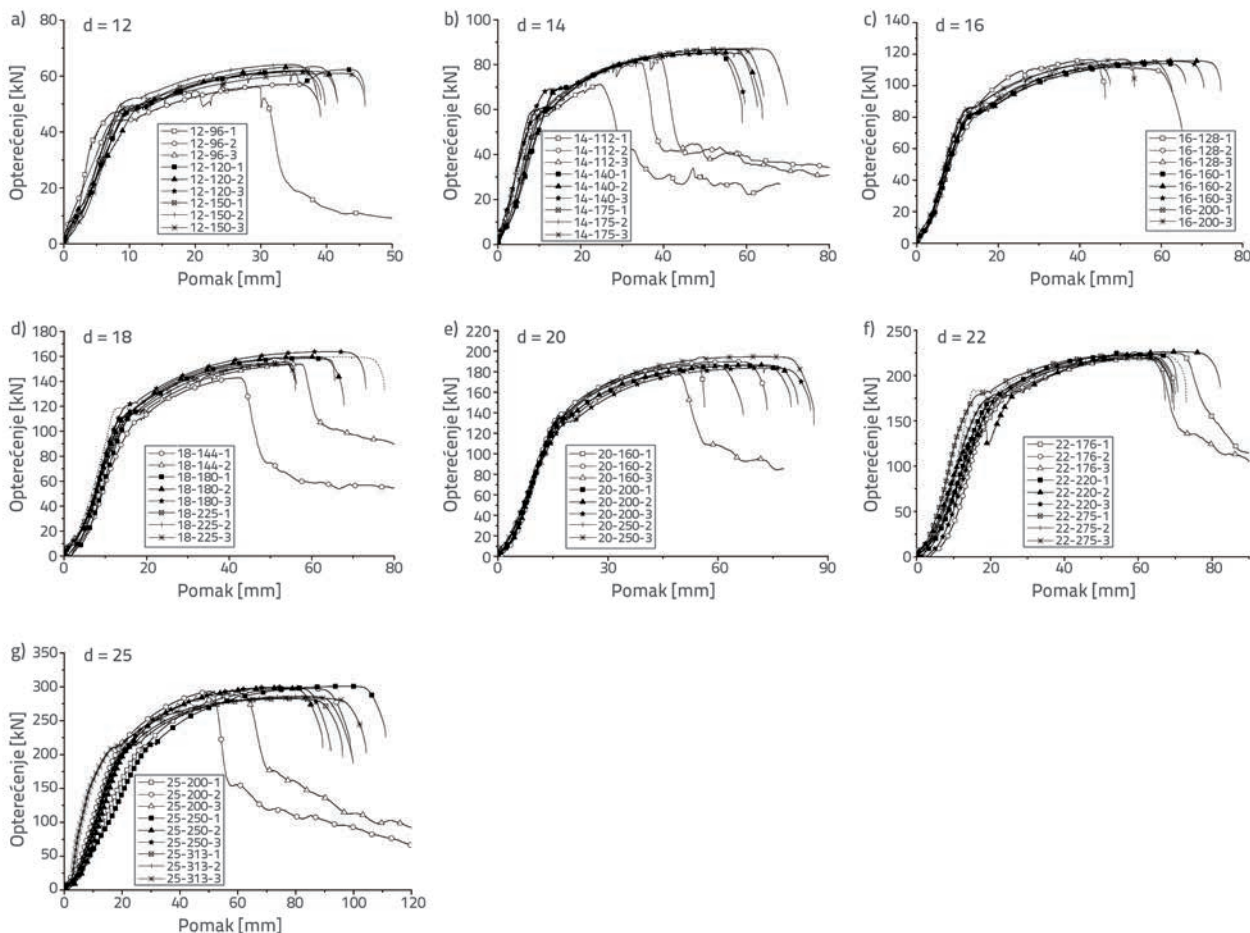
3.1. Krivulje opterećenje – pomak

Slika 7. prikazuje odnos opterećenja i pomaka uzoraka. Pomak uzoraka, nazvan pomak hvataljke uređaja, zabilježen je na računalu na koje je bio spojen uređaj. Mjerenje pomaka

je rezultiralo početnim konkavnim oblikom svih krivulja opterećenja i pomaka što je upozoravalo na proklizavanje šipki iz hvataljki. Vlačna čvrstoća je bila veća od čvrstoće na razvlačenje, a plastična deformacija razvijena s različitim stupnjevima, upućivala je na to da svi uzorci pokazuju loša duktilna svojstva.

Za uzorke s duljinom preklopa od 10 do 12,5 duljine promjera, veza šipka-injekcijska smjesa je nadmašila vlačnu nosivost preklapanih šipki, što je rezultiralo slomom šipki uslijed vlačnog naprezanja (slom ili točka zavarena ili umetnute šipke). Krivulja opterećenje-pomak kod ovih uzoraka je bio sličan kao i kod kraćih šipki uslijed naprezanja.

Slom šipke uslijed naprezanja i slom veze između šipke i injekcijske smjese su tipični oblici loma uzorka s duljinom preklopa jednakom 8 puta duljine promjera šipke. Za uzorke kod kojih je zabilježeno smicanje na mjestu između šipke i injekcijske smjese, vlačna čvrstoća preklapljenih šipki je bila veća negoli čvrstoća veze između šipke i injekcijske smjese. Izgled krivulje opterećenje – pomak uzoraka u kojima je zabilježen slom spoja šipke i injekcijske smjese razlikovao se od krivulje uzoraka koji su imali slom armaturne šipke uslijed vlačnog naprezanja. Naime. nakon što je vlačna čvrstoća



Slika 7. Krivulje "opterećenje – pomak" za promjere šipki u spoju od 12 do 25 mm

dosegnula graničnu vrijednost, krivulja je naglo promijenila oblik, a šipka je počela proklizavati. Kao posljedica toga, pojavili su se veliki pomaci s obzirom na malo smanjenje opterećenja, a umetnuta se šipka nije izvukla iz injekcijske smjese. U istoj seriji uzoraka pojavili su se različiti oblici sloma. Pokazalo se da je duljina preklopa od 8d kritična jer se tada slom kraćih šipki izvan prstena te slom šipke i injekcijske smjese mogu dogoditi istovremeno.

3.2. Oblici loma

Oblici loma svih uzoraka prikazani su u tablici 3. Slike 8.a i 9.a prikazuju tipične oblike sloma uzoraka: mjesto loma uslijed vlačnog naprezanja zavarene ili umetnute šipke te slom veze šipke i injekcijske smjese (umetnute ili zavarene šipke). Slom prstena uslijed vlačnog naprezanja te slom injekcijske smjese i prstena nije zabilježen. S izostankom uzdužnog učvršćenja, dio injekcijske smjese na dnu prstena je izvučen mehaničkim spajanjem između injekcijskih klinova i rebraste armature kad su šipke rastegnute i produljene, kao što je prikazano na slikama 8.b, 8.c, 9.b i 9.c. Uslijed ulekuća prstena, zavarena šipka se nagnula prema van i bila je istisnuta iz prstena, kao što je vidljivo na slici 8.b i slici 9.b. Injekcijska smjesa oko umetnute šipke je istisnuta i ljuštena se zbog nagiba umetnute šipke, što je prikazano na slikama 8.c i 9.c. Zbog toga, dubina ljuštenja injekcijske smjese na dnu prstena blizu opterećenog kraja je postala veća nego na dnu prstena blizu nepomičnog kraja.

3.3. Procjena čvrstoće i žilavosti

Granična vlačna nosivost P_u i granična vlačna čvrstoća f_u prikazane su u tablici 3. Granična vlačna čvrstoća uzoraka prekoračena slomom šipke (tablica 3.) približno je jednaka prosječnoj vlačnoj čvrstoći kontrolne šipke (tablica 2.) s istim promjerom šipke. Sljedeći prihvaćeni kriteriji za mehanički spoj su preporučeni propisom ACI-318 12.14.3.2 [26]: vlačna čvrstoća spoja f_u trebala bi biti barem 125 % nominalne čvrstoće na razvlačenja šipke u spoju, f_{yb} (400 N/mm²). Zbog toga, omjer čvrstoća R_s , koji je izražen pomoću izraza (1), trebao bi iznositi najmanje 1,25. Granična vlačna čvrstoća f_u je izračunana pomoću izraza (2).

$$R_s = \frac{f_u}{f_{y,b}} \quad (1)$$

$$f_u = \frac{4P_u}{\pi d^2} \quad (2)$$

Navedeni kriterij čvrstoće uzorka se smatra zadovoljenim ako je vrijednost R_s veća od 1,25. U suprotnom, kriterij nije zadovoljen. Primjerice, ako je vrijednost R_s uzorka 12-96-2 veća od 1,25, uzorak 12-96-2 zadovoljava kriterije. Vrijednost R_s i procjena čvrstoće svih uzoraka prikazane su u tablici 3. Duktilnost pomaka se definira kao

$$m = \delta_u / \delta_y \quad (3)$$

gdje je δ_u pomak kod kojega je postignuto vršno opterećenje (ili je bilo zadržano), a δ_y je pomak pri dostizanju granice popuštanja armature.



Slika 8. Slom šipke uslijed vlaka: a) slom šipke uslijed vlaka; b) oštećenje injekcijske smjese na dnu prstena blizu fiksnog kraja; c) oštećenje injekcijske smjese na dnu prstena blizu opterećenog kraja



Slika 9. Slom spoja šipke i injekcijske smjese: a) proklizavanje spojne šipke; b) oštećenje injekcijske smjese na dnu prstena blizu fiksnog kraja; c) oštećenje injekcijske smjese na kraju prstena blizu opterećenog kraja

Tablica 3a. Rezultati uzoraka uslijed vlačnog opterećenja, L/d = 8

L/d	Uzorak	P_u [kN]	Način sloma	P_u [MPa]	δ_y [mm]	δ_u [mm]	R_s	m	Čvrstoća	Žilavost
8	12-96-1 ^a	56,16	Slom spoja umetnute šipke i injekcijske smjese	495	7,9	28,3	1,24	3,58	N ^c	N
	12-96-2	57,11	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	505	11,1	36,5	1,26	3,30	Y ^c	N
	12-96-3	61,69	Slom umetnute šipke uslijed vlačnog naprezanja	546	7,6	37,3	1,37	4,91	Y	Y
	14-112-1	71,23	Slom spoja umetnute šipke i injekcijske smjese	465	12,1	25,1	1,16	2,07	N	N
	14-112-2	80,86	Slom spoja zavarene šipke i injekcijske smjese	525	12,8	33,8	1,31	2,64	Y	N
	14-112-3	83,27	Slom spoja zavarene šipke i injekcijske smjese	540	11,5	36,7	1,35	3,19	Y	N
	16-128-1	116,54	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	577	13,2	42,6	1,44	3,23	Y	N
	16-128-2	111,48	Slom spoja zavarene šipke i injekcijske smjese	555	17,2	57,5	1,39	3,35	Y	N
	16-128-3	113,57	Slom spoja zavarene šipke i injekcijske smjese	565	11,5	43,0	1,41	3,75	Y	N
	18-144-1	144,08	Slom spoja umetnute šipke i injekcijske smjese	566	-	-	1,42	-	Y	-
	18-144-2	142,78	Slom spoja umetnute šipke i injekcijske smjese	560	15,4	38,8	1,40	2,52	Y	N
	18-144-3	153,74	Slom spoja umetnute šipke i injekcijske smjese	605	16,7	55,8	1,51	3,34	Y	N
	20-160-1	186,07	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	590	16,8	51,6	1,48	3,07	Y	N
	20-160-2	189,79	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	605	15,1	64,3	1,51	4,26	Y	Y
	20-160-3	179,03	Slom spoja umetnute šipke i injekcijske smjese	570	20,6	48,9	1,43	2,37	Y	N
	22-176-1	224,43	Slom spoja umetnute šipke i injekcijske smjese	590	25,0	68,7	1,48	2,75	Y	N
	22-176-2	221,19	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	580	19,7	60,4	1,45	3,07	Y	N
	22-176-3	219,24	Slom spoja umetnute šipke i injekcijske smjese vlačnog naprezanja	575	22,2	61,4	1,44	2,77	Y	N
	25-200-1	297,90	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	605	25,2	86,2	1,51	3,42	Y	N
	25-200-2	293,04	Slom spoja umetnute šipke i injekcijske smjese	595	19,6	48,9	1,49	2,49	Y	N
25-200-3	294,56	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	600	19,1	57,8	1,50	3,03	Y	N	

Tablica 3b. Rezultati uzoraka uslijed vlačnog opterećenja, L/d = 10

L/d	Uzorak	P_u [kN]	Način sloma	P_u [MPa]	δ_y [mm]	δ_u [mm]	R_s	m	Čvrstoća	Žilavost
10	12-120-1	62,30	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	551	12,1	44,2	1,38	3,65	Y	Y
	12-120-2	63,41	Slom spoja zavarene šipke i injekcijske smjese	561	12,1	38,5	1,40	3,18	Y	N
	12-120-3	61,69	Slom spoja zavarene šipke i injekcijske smjese	546	11,6	35,4	1,37	3,05	Y	N
	14-140-1	85,40	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	555	15,7	51,9	1,39	3,31	Y	N
	14-140-2	85,40	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	555	13,5	56,5	1,39	4,19	Y	Y
	14-140-3	85,11	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	553	13,2	54,0	1,38	4,09	Y	Y
	16-160-1	113,87	Slom spoja zavarene šipke i injekcijske smjese	565	12,8	60,2	1,41	4,70	Y	Y
	16-160-2	115,77	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	575	12,4	70,7	1,44	5,70	Y	Y
	16-160-3	115,47	Slom spoja zavarene šipke i injekcijske smjese	575	13,5	65,7	1,44	4,87	Y	Y
	18-180-1	158,89	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	625	13,7	60,2	1,56	4,39	Y	Y
	18-180-2	159,62	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	625	12,4	59,6	1,56	4,81	Y	Y
	18-180-3	163,74	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	645	12,6	65,6	1,61	5,21	Y	Y
	20-200-1	186,00	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	590	16,1	70,7	1,48	4,39	Y	Y
	20-200-2	186,42	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	595	15,1	72,3	1,49	4,79	Y	Y
	20-200-3	183,64	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	585	18,2	76,8	1,46	4,22	Y	Y
	22-220-1	224,99	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	590	17,8	62,9	1,48	3,53	Y	N
	22-220-2	226,35	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	595	-	73,5	1,49	-	Y	-
	22-220-3	223,97	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	590	17,2	57,4	1,48	3,34	Y	N
	25-250-1	300,87	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	615	26,3	99,4	1,54	3,78	Y	N
	25-250-2	298,14	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	605	16,7	75,8	1,51	4,54	Y	Y
25-250-3	299,37	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	610	17,7	79,9	1,53	4,51	Y	Y	

Tablica 3c. Rezultati uzoraka uslijed vlačnog opterećenja, L/d = 12,5

L / d	Uzorak	P_u [kN]	Način sloma	P_u [MPa]	δ_y [mm]	δ_u [mm]	R_s	m	Čvrstoća	Žilavost
12,5	12-150-1	62,08	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	549	10,0	35,6	1,37	3,56	Y	N
	12-150-2	64,11	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	568	8,6	34,6	1,42	4,02	Y	Y
	12-150-3	60,97	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	540	9,3	41,5	1,35	4,46	Y	Y
	14-175-1	87,10	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	565	10,3	55,2	1,41	5,36	Y	Y
	14-175-2	87,13	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	565	11,0	64,5	1,41	5,86	Y	Y
	14-175-3	86,89	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	565	11,6	58,4	1,41	5,03	Y	Y
	16-200-1	115,18	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	575	10,9	56,1	1,44	5,15	Y	Y
	16-200-2	117,01	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	582	-	-	1,46	-	Y	-
	16-200-3	116,66	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	580	12,3	49,6	1,45	4,03	Y	
	18-225-1	159,60	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	625	13,3	51,9	1,56	3,90	Y	N
	18-225-2	156,04	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	615	13,3	51,0	1,54	3,83	Y	N
	18-225-3	156,36	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	615	10,6	49,5	1,54	4,67	Y	Y
	20-250-1	187,61	Slom umetnute šipke uslijed vlačnog naprezanja	600	-	-	1,50	-	Y	-
	20-250-2	187,07	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	595	13,5	56,7	1,49	4,20	Y	Y
	20-250-3	194,73	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	620	15,5	76,6	1,55	4,94	Y	Y
	22-275-1	222,87	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	585	17,4	59,4	1,46	3,41	Y	N
	22-275-2	220,52	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	581	17,8	58,9	1,45	3,31	Y	N
	22-275-3	218,99	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	575	17,9	61,2	1,44	3,42	Y	N
	25-313-1	282,53	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	575	18,9	81,3	1,44	4,30	Y	Y
	25-313-2	286,12	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	585	22,5	86,2	1,46	3,83	Y	N
25-313-3	283,75	Slom zavarene šipke uslijed vlačnog naprezanja	580	16,2	95,0	1,45	5,86	Y	Y	

^a Uzorak 12-96-1 je uzet kao primjer, promjer šipke je 12 mm, duljina spoja je 96 mm, broj 12-96 serije 1.

^b Izraz "-" znači da vrijednost nije dobivena u ispitivanju

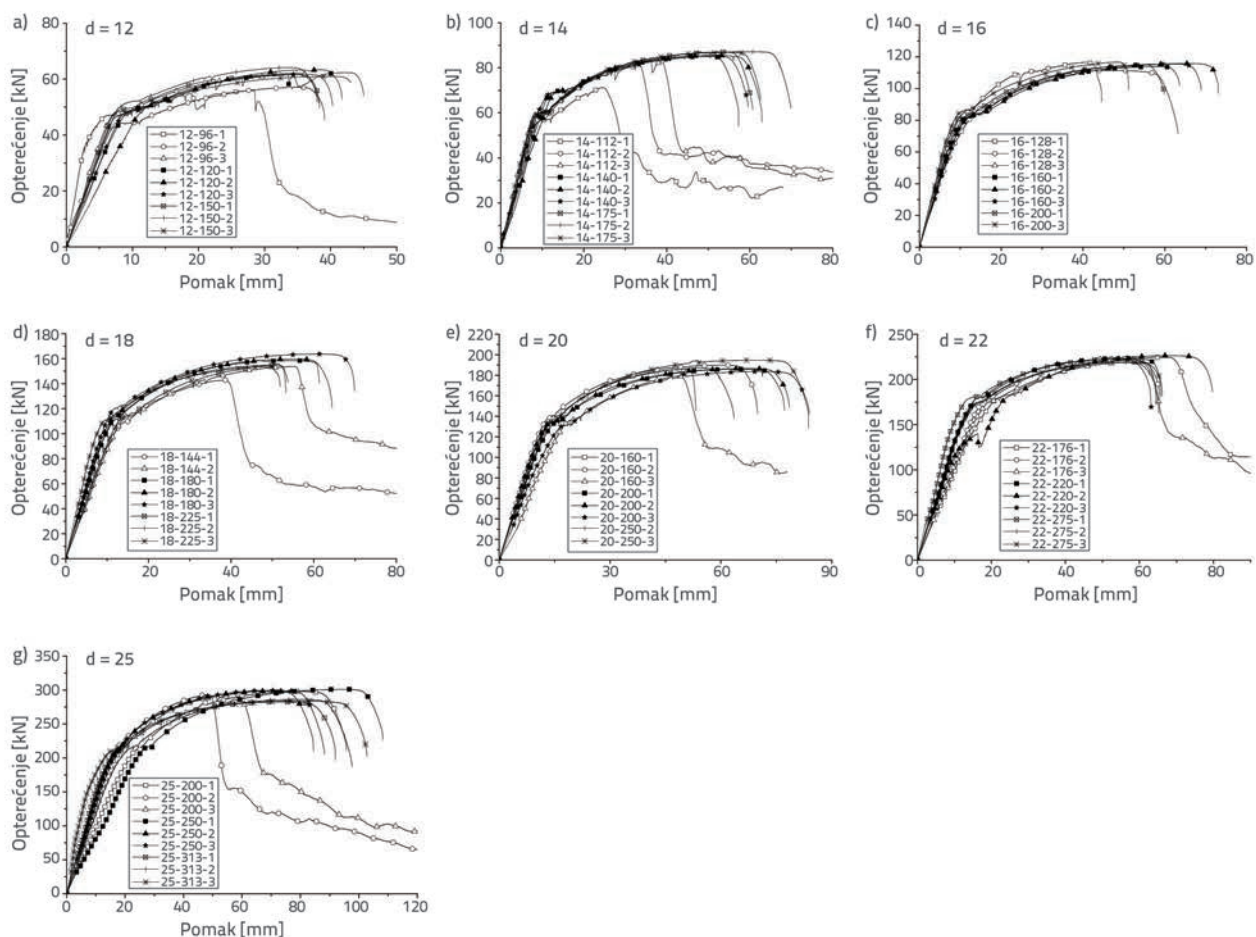
^c Označavanje uzoraka: izraz "Y" označava da uzorak zadovoljava kriterije, dok izraz "N" označava da kriteriji nisu zadovoljeni

Kako bi se odredila preciznija vrijednost faktora žilavosti iz prezentiranih rezultata ispitivanja, krivulje opterećenje-pomak su pomaknute nalijevo za vrijednost koja je definirana presjekom početnog elastičnog nagiba s apscisom pomaka. Na taj način je dobivena korigirana krivulja opterećenje-pomak (slika 10.). Vrijednosti δ_u i δ_v su dobivene iz nove krivulje opterećenja i pomaka. Prema preporukama dobivenim u radu [27], duktilnost konstrukcija u regijama umjerenih seizmičkih aktivnosti treba iznositi minimalno 4,0. Vrijednost m veća od 4,0 upućuje na to da žilavost uzorka zadovoljava kriterije, a ako je manja od te vrijednosti, tada kriterij procjene nije zadovoljen. Primjerice, ako je vrijednost m uzorka 12-96-3 veća od 4,91, uzorak 12-96-3 zadovoljava kriterije. Vrijednost m i žilavost uzorka prikazane su u tablici 3. Kao što možemo vidjeti u tablici 3., zbog rotacije prstena, vrijednost m gotovo svih uzoraka čija je duljina 8 puta veća od promjera šipke (tablica 3.a) i uzoraka čija je duljina 10 i 12,5 puta veća od promjera šipke manja je od 4,0 (tablice 3.b i 3.c). Zbog toga je nužno testirati seizmičko ponašanje predgotovljenih betonskih zidova s vertikalnim ojačanjima koji su spojeni injektiranim prstenastim preklpnim vezama kako bi se odredila svojstva takvog spoja u konstrukcijama.

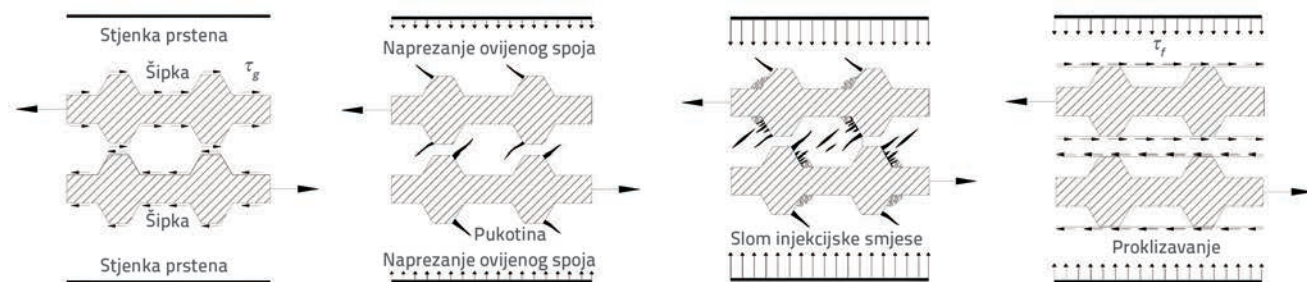
4. Ponašanje injektiranog prstenastog preklpnog spoja

4.1. Mehanizam prijenosa opterećenja

Istraživanje spojnih sila koje su proveli Lutz i Gergely 1967. godine pokazalo je da spoj deformiranih šipki čine tri komponente: kemijska adhezija, trenje i mehanička veza betona i armaturene šipke [28]. U početku, veza između armaturnih šipki i injekcijske smjese ovisi o procesu kemijske adhezije τ_g , a vrijednost ograničenog naprezanja u prstenu iznosi gotovo nula, kao što se može vidjeti na slici 11.a. Na mjestima gdje se pojavljuje smicanje između šipke i injekcijske smjese, trenje i mehanička veza između injekcijske smjese i rebra armature sprečavaju da šipka isklizne iz injekcijske smjese. Šipke razdvajaju injekcijsku smjesu djelovanjem uklještenja. Kao posljedica toga pojavljuju se dijagonalne pukotine iznad rebara šipki i razvijaju se s povećavanjem sile čupanja. U isto vrijeme, ograničeno naprezanje nastalo u stjenci prstena djeluje na zaustavljanje razvoja pukotina. Proces je prikazan na slici 11.b. Zbog ograničenja naprezanja, formacija raspulalih



Slika 10. Korigirane krivulje "opterećenje – pomak" za promjere šipki u spoju od 12 do 25 mm



Slika 11. Mehaniizam prijenosa opterećenja u injektiranom, prstenastom, preklopnom spoju: a) kemijska adhezija; b) dijagonalne pukotine uz šipku; c) slom injekcijske smjese; d) proklizavanje armaturne šipke

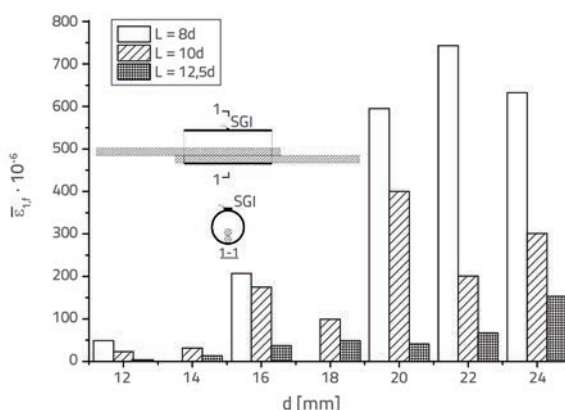
pukotina prikazanih u istraživanjima [29-30] ne pojavljuje se u injektiranom, prstenastom preklopljenom spoju. Kako se vrijednost sile čupanja povećava, pukotine se razvijaju i rastu u duljinu, širinu i postaju brojnije. Kada je injekcijska smjesa slomljena u "kompaktni prah", počinje se smještati ispred šipki [31] (slika 11.c). Ravni oblici klizanja su uočeni odmah nakon ohrapvljene površine injekcijske smjese između rebastih šipki - u trenutku kada je sila čupanja jednaka nosivosti veze između šipke i injekcijske smjese te kada ograničeno naprezanje dosegne svoj maksimum. Nakon toga šipka isklizne iz injekcijske smjese. Proces je prikazan na slici 11.d. Naprezanje ovijenog spoja u svim prije spomenutim fazama postaje otporno na kontrolirano razdvajanje injekcijske smjese i, posljedično tome, poboljšava mehaničku vezu između injekcijske smjese i rebara šipki. Na taj način, vlačna čvrstoća injekcijskog, prstenastog, preklopnog spoja znatno je poboljšana.

4.2. Mehanička svojstva

Za određene raspone duljine preklopa vlačna se nosivost povećava s povećavanjem duljine preklopa. Kao što je uočeno u uzorku 18-144-1 i u uzorcima iz serije 18-180-1, prosječna granična vlačna nosivost P_d se povećava sa 144,08 kN na 158,89 kN kada se duljina preklopa povećava sa 144 mm na 180 mm. Kako se duljina preklopa povećava, više rebara šipki sudjeluje u povezivanju s ohrapvljenom površinom injekcijske smjese. Kao rezultat toga, veća ukupna posmična površina ohrapvljena rebra sudjeluje u otpornosti na silu čupanja te se ostvaruje veća vrijednost naprezanja prianjanja u prstenu [24].

U uzorcima s istim promjerom šipki, u kojima se dogodio slom šipki, granična vlačna čvrstoća je uglavnom bila ista (kao što je prikazano u tablicama 3.a, 3.b i 3.c). Kako se povećava duljina preklopa, prosječna se maksimalna vrijednost poprečnog vlačnog naprezanja u prstenu $\bar{\epsilon}_{1,r}$ mjereno pomoću SG1, smanjuje. Ako se uzorci s promjerom šipke od 20 mm uzmu kao primjer, vrijednosti dobivene ispitivanjem uzoraka serija 20-160, 20-200, 20-250 iznosile su: 595×10^{-6} , 400×10^{-6} i 41×10^{-6} . Kako se povećava duljina preklopa, više rebara šipki je aktivno u spajanju s ohrapvljenom površinom injekcijske smjese, što dovodi do smanjenja prosječne čvrstoće prianjanja. Kao posljedica toga, ovijanje spoja zida ostvareno prstenastim spojem se umanjuje, što rezultira smanjenjem vrijednosti. Variranje parametara $\bar{\epsilon}_{1,r}$ s

L prikazano je na slici 12. Sve vrijednosti su manje od 1000×10^{-6} , što znači da prsten osigurava određenu granicu sigurnosti.



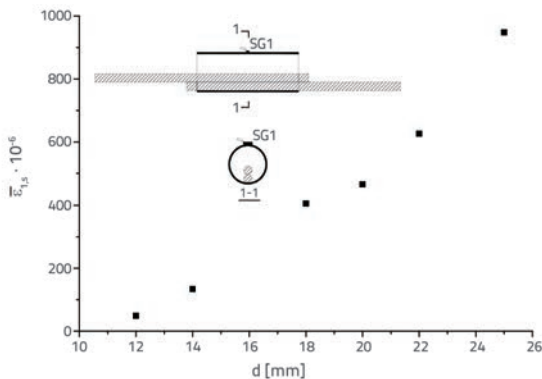
Slika 12. Varijacije parametara $\bar{\epsilon}_{1,r}$ i L uzorka koji je popustio uslijed sloma šipke

Na slici 13. je prikazana varijacija prosječne maksimalne, poprečne, vlačne sile na prstenu $\bar{\epsilon}_{1,r}$ s parametrom d koji se odnosi na nedostatke u uzorcima zbog sloma u vezi šipka-injekcijska smjesa. S unutarnjim promjerom prstena koji je nepromjenjiv, povećavanje promjera šipke vodi do povećavanja naprezanja ovijanja nastalih od prstenastog spoja zida, što odgovara povećanju vrijednosti $\bar{\epsilon}_{1,r}$. To se može objasniti pomoću dva uvjeta:

- povećanje efektivne površine prstena s obzirom na površinu injekcijske smjese omogućava prstenastom spoju zida veće odupiranje razdvajanju injekcijske smjese
- smanjenje svojstva upijanja naprezanja injekcijske smjese s ograničavanjem dopuštene deformabilnosti, što je osigurano tankim slojem injekcijske smjese koja okružuje snop šipki, pa to na kraju rezultira osjetljivošću prstena na razdvajanje injekcijske smjese tijekom širenja [24].

Mehanička svojstva se mogu također objasniti na osnovi teorije: u osnosimetričnim problemima mehanike kontinuuma, odnosi naprezanja i pomaka su izraženi u polarnim koordinatama: $\epsilon_r = du_r/d_r$ i $\epsilon_\theta = u_r/r$, gdje izraz u_r označava radijalni pomak, a r označava promjer od osno simetrične linije [32]. U prstenu s konstantnim promjerom, šipka veće dimenzije zauzima manju površinu injektirane smjese u radijalnom tlaku i kružnom

naprezanju; kružno naprezanje je uravnoteženo s ovijanjem koje je omogućuje prsten. Stoga, razvija se manja udaljenost između šipke i ovijanja (r) te veća vrijednost deformacije, ε_θ .



Slika 13. Varijacije u odnosu na promjer šipke d u uzorcima sa slomom spoja šipka - injektirana smjesa

4.3. Analiza naprezanja u preklonom spoju

Prosječno granično naprezanje prstenastog spoja τ_u u uzorcima koji su imali slom spoja injektirane smjese i šipke definirano je kao granična vlačna nosivost podijeljena s produktom opsega i duljinom preklopa, izraz (4).

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi d L} \quad (4)$$

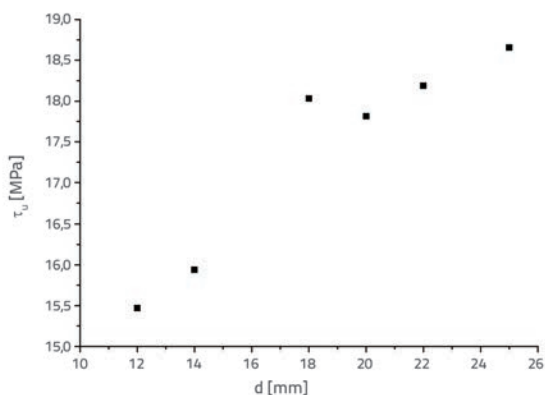
Za uzorke sa slomom šipke i injekcijske smjese, vrijedi izraz (5):

$$L = 8 d \quad (5)$$

Izraz (6) je dobivena kombinacijom izraza (4) i (5):

$$\tau_u = \frac{1}{8\pi} \frac{P_u}{d^2} \quad (6)$$

Parametri koji su korišteni u ispitivanju primijenjeni su u izrazu (6), pa je određena varijacija parametra τ_u i promjera d , kao što je prikazano na slici 14.



Slika 14. Varijacija τ_u s promjerom d u uzorcima sa slomom spoja injekcijska smjesa – šipka

Može se uočiti da se prosječno granično naprezanje preklonog spoja, τ_u povećava kako se povećava promjer šipke, d . Kako se povećava promjer šipke, povećava se i naprezanje ovijanja prstenastog spoja zida, što dovodi do povećavanja prosječnog graničnog naprezanja prijanjanja prijelopa τ_u .

Na temelju rezultata ispitivanja, svojstva spoja ovise o vlačnoj čvrstoći injektirane smjese, promjeru šipke, vanjskom promjeru čelične cijevi i duljini preklopa. Jednadžba 7 objašnjava međuodnos prosječnog konačnog naprezanja u preklonom spoju τ_u vlačne čvrstoće injektirane smjese R_t relativnu duljinu prstena, d/L i relativni promjer šipke, d/D . Izvedena je metodom linearne regresije kako bi odredila svojstva spoja.

$$\tau_u = \left(3.86 \frac{d}{D} - 17.51 \frac{d}{L} + 4.90 \right) R_t \quad (7)$$

gdje je izraz τ_u prosječno konačno naprezanje u preklonom spoju (N/mm^2), R_t je vlačna čvrstoća injektirane smjese (N/mm^2), d je promjer šipke (mm), D je unutarnji promjer prstena (mm), a L je duljina preklopa (mm).

Za verifikaciju, parametri koji su korišteni u ispitivanju su primijenjeni u izrazu (7), a eksperimentalni rezultati su analizirani u odnosu na predviđene rezultate kako bi se odredila pouzdanost empirijske jednadžbe, kao što je prikazano u tablici 4. Zaključeno je da predložena jednadžba osigurava pouzdana predviđanja, a omjer pouzdanosti R_r iznosi približno 1,0.

Tablica 4. Usporedba izračunanih i eksperimentalnih vrijednosti prosječnog naprezanja u prstenastom spoju

Uzorak	R_t [MPa]	d/D	d/L	$(\tau_u)_{exp}$	$(\tau_u)_{cal}$	R_r
12-96	4,63	0,17	0,125	15,46	15,65	0,99
14-112		0,20	0,125	15,93	16,16	0,99
18-100*		0,26	0,18	12,69	12,73	1,00
18-144		0,26	0,125	18,01	17,18	1,05
18-150*		0,26	0,12	17,32	17,59	0,98
20-160		0,29	0,125	17,83	17,69	1,01
22-176		0,31	0,125	18,20	18,20	1,00
25-200		0,36	0,125	18,66	18,94	0,98

* Podaci za uzorak 18-100 i 18-150 su dobiveni iz prethodnih ispitivanja

5. Preporučena duljina preklopa

Kritična duljina preklopa l , važan je parametar za projektiranje injektiranog, prstenastog, preklonog spoja. Pri duljini l , kada se vlačni lom šipke dogodi izvan prstena i u isto vrijeme dođe do istiskivanja šipke iz injekcijske smjese, nosivost spoja između šipke i injekcijske smjese jednaka je vlačnoj nosivosti preklapanih šipki, što slijedi i iz izraza (8) i (9).

$$\tau_{u,l} \pi d l = f_{u,b} \frac{1}{4} \pi d^2 \quad (8)$$

$$\tau_{u,l} = \left(3.86 \frac{d}{D} - 17.51 \frac{d}{l} + 4.90 \right) R_t \quad (9)$$

U tim izrazima $\tau_{u,l}$ je prosječno granično naprezanje u preklopnom spoju u kritičnoj duljini preklopa (N/mm^2), d je promjer šipke (mm), l je kritična duljina preklopa (mm), $f_{u,b}$ je granična vlačna čvrstoća armaturne šipke (N/mm^2), D je unutarnji promjer prstena (mm), R_t je vlačna čvrstoća injektirane smjese (N/mm^2). Kombinacijom izraza (8) i (9) nastaje izraz (10):

$$l = \frac{\frac{f_{u,b}}{R_t} + 70.04}{\frac{15.44}{D} + \frac{19.6}{d}} \quad (10)$$

Zamjenom varijabli $f_{u,b}$, R_t , D i d u izrazu (10) s testnim vrijednostima, dobivena je vrijednost kritične duljine preklopa l . Rezultati su prikazani u tablici 5.

Duljina preklopa u uzorcima koji su imali slom istiskivanjem šipke iz injektirane smjese manja je od l , dok je duljina preklopa uzoraka kod kojih je došlo do pucanja šipke veća od l . Dakle, sudeći po rezultatima prikazanim u tablici 3., različite vrijednosti mogu biti postignute da bi se odredile vrijednosti l , kako je prikazano u tablici 5.

Tablica 5. Procjena kritične duljine cjevastog spoja (mm)

d	$L_{\text{izračunano}}$	$L_{\text{raspon (od - do)}}$	$L_{\text{preporučeno}}$
12	105	96 - 120	120
14	122	112 - 140	140
16	136	< 128	160
18	159	144 - 180	180
20	171	160 - 200	200
22	174	176 - 220	220
25	198	200 - 250	250

Približno sve izračunane vrijednosti nalaze se u rasponu vrijednosti dobivenih eksperimentalnim putem, osim vrijednosti za šipke promjera 16 mm, 136 mm, koje su veće od maksimalne vrijednosti odgovarajućeg raspona (128 mm). Također, izračunane vrijednosti za promjer šipki 22 mm i 25 mm neznatno su manje od minimalnih vrijednosti u odgovarajućem rasponu, što pokazuje na visoku pouzdanost izraza (9).

Svi uzorci s duljinom spoja 10 i 12,5 puta većom od promjera šipke zadovoljavaju kriterij čvrstoće. Štoviše, svojstva spoja su slabija u uzorcima u kojima su armaturne šipke postavljene jedna kraj

druge. Na temelju eksperimentalnih rezultata i opisanih analiza, preporučena duljina injekcijskog, prstenastog, preklopnog spoja treba biti 10 puta veća od promjera preklopljene šipke, kao što je prikazano u tablici 5.

6. Zaključak

U usporedbi s kraćom šipkom pod naprezanjem, zbog progiba uzoraka, tražena vrijednost granice tečenja uzorka nije postignuta za vrijeme savijanja uzorka. Vrijednost vlačnog naprezanja uzorka koji je popustio zbog sloma šipke bila je blizu prosječne vrijednosti vlačnog naprezanja kontrolne šipke s istim promjerom. Svi uzorci čija je duljina preklopa 10 i 12,5 puta veća od promjera šipke zadovoljavaju kriterij da vlačna čvrstoća snopa mora iznositi najmanje 125 % čvrstoće na razvlačenje spojenih šipki (ACI-318 12.14.3.2).

Slom šipke uslijed vlačnog opterećenja te slom spoja šipke i injektirane smjese tipični su oblici sloma za injektirani, prstenasti preklopni spoj. Oblici sloma poput proklizavanja injekcijske smjese iz prstena i slom prstena uslijed vlačnog opterećenja nisu prikazani. U uzorcima s istim promjerima šipki u kojima se dogodio slom šipki, poprečno ovijanje osigurano prstenastim spojem zida se smanjuje kako se povećava duljina preklopa. U uzorcima u kojima se pojavio slom spoja šipke i injektirane smjese, povećanjem promjera šipke povećava se i naprezanje ovijanja generirano prstenastim spojem zida, a prosječno granično naprezanje pristanja preklopnog spoja se povećava kako se povećava promjer šipke. Izraz (7), koji je primijenjen za određivanje kritičnog naprezanja preklopnog spoja i izraza (10), kojim se određuje kritična duljina preklopa, omogućuju osnovu za projektiranje i procjenu injektiranog, prstenastog, preklopnog spoja. Uzimajući u obzir prednosti učinaka ovijanja koje omogućuje prstenasti spoj, preporučena duljina preklopa može se smanjiti za 10 duljina promjera šipke, što je približno 20 % duljine vlačnog preklopa koju preporučuje ACI-318 (najmanje 50 puta promjer šipke).

S obzirom na to da je ispitivanje provedeno na injekcijskoj smjesi određene kvalitete, to jest čvrstoća na savijanje, tlačne i vlačne čvrstoće koje iznosile su 11,4 N/mm^2 , 62,9 N/mm^2 i 4,63 N/mm^2 , a unutarnji promjer prstena iznosio je 70 mm, s debljinom stjenke od 3 mm, rezultati su primjenjivi samo za određenju kvalitetu injekcijske smjese i isto takvu prstenastu geometriju. Zbog problema koji su zabilježeni tijekom ispitivanja spojeva (primjerice rotacije spoja tijekom vlačnog opterećenja), nužno je ispitati seizmičko ponašanje predgotovljenih betonskih zidova s vertikalnim ojačanjima koji su spojeni s injektiranim, prstenastim, preklopnim spojem kako bi se procijenila svojstva takvih spojeva u konstrukcijama.

LITERATURA

- [1] Yee, A.A.: Splice sleeve for reinforcing bars. US Pat. 3,540,763; 1968.
- [2] New precast prestressed system saves money in Hawaii hotel. PCI Journal, 18 (1973) 3, pp.10-13.
- [3] Ling, J.H., Abd. Rahman, A.B., Ibrahim, I.S., Abdul Hamid, Z.: 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., Abd. Rahman, A.B., 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] Alias, A., Zubir, M.A., Shahid, K.A., Rahman, A.B.A.: Structural Performance of Grouted Sleeve Connectors with and without Transverse Reinforcement for Precast Concrete Structure, Procedia Engineering, 53 (2013), pp.116-123, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.017>
- [6] Hosseini, S., Abd. Rahman, A.B.: Analysis of spiral reinforcement in grouted pipe splice connectors. Građevinar, 65 (2015) 6, pp. 537-546, <https://doi.org/10.14256/JCE.1163.2014>
- [7] Sayadi, A.A., Rahman, A.B.A., Jumaat, M.Z.B., Johnson Alengaram, U., Ahmad, S.: The relationship between interlocking mechanism and bond strength in elastic and inelastic segment of splice sleeve, Construction and Building Materials, 55 (2014), pp. 227-237, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.020>
- [8] Gregel, J.J., Colarusso, L.J.: Reinforcing bar splice and method. US Pat. 6,532,711; 2003.
- [9] Albrigo, J., Ricker, E. D., Colarusso, L.J.: Reinforcing bar splice and system for forming precast concrete members and structures. US pat. 5,468,524; 1995.
- [10] Yee, A.A.: Splice sleeve for reinforcing bars with cylindrical shell. US Pat. 4,627,212; 1986.
- [11] Yee, A.A.: Wire cage-type splice sleeve for reinforcing bars. US Pat. 3,552,787; 1971.
- [12] Mochizuki, H., Nihei, T.: Mortar grout splice sleeve for reinforcing bars. US Pat. 5,974,761; 1999.
- [13] Albrigo, J., Ricker, E.D., Colarusso, L.J.: Method of forming concrete structures with a grout splice sleeve which has a threaded connection to a reinforcing bar, US pat. 5366671, 1994.
- [14] Dahl, K.L.: High strength grouted pipe coupler. US Pat.6,679,024; 2004.
- [15] Lancelot III, H.B.: Combination mechanical/grout sleeve coupling for concrete reinforcement bars, US pat. 5383740 A, 1995.
- [16] Chen, Y.G., Liu, J.B., Guo, Z. X., Zhang, J.X.: Test on seismic performance of precast shear wall with reinforcements grouted in holes and spliced indirectly in horizontal connections, Journal of Harbin Institute of Technology, 45 (2013) 6, pp. 83-89.
- [17] Jiang, H., Zhang, H., Liu, W., Yan, H.: Experimental study on plug-in filling hole for steel bar lapping of precast concrete, Journal of Harbin Institute of Technology, 43 (2011) 10, pp. 18-23.
- [18] Zhang, H.S.: Experimental study on plug-in filling holes for lap-joint of steel bar of PC concrete structure, Harbin Institute of Technology, 2009.
- [19] Eligehausen, R., Popov, E.P., Bertero, V.V.: Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations, University of California, 1982.
- [20] Soroushian, P., Choi, K.B., Park, G.H., Aslani, F.: Bond of Deformed Bars to Concrete: Effects of Confinement and Strength of Concrete, ACI Material Journal, pp. 227-232, 1991.
- [21] Rizkalla, S.H., Hwang, L.S., El Shahawi, M.: Transverse reinforcement effect on cracking behaviour of R.C. members; Canadian Journal of Civil Engineering, 10 (1983) 4, pp. 566-581.
- [22] Einea, A., Yamane, T., Tadros, M.K.: Grout-filled pipe splices for precast concrete construction, Precast/Prestress Concrete Institute Journal, 40 (1995) 1, pp. 82-93.
- [23] Loh, H.Y.: Development of grouted splice sleeve and its performance under axial tension, Universiti Teknologi Malaysia, 2008.
- [24] Ling, J.H.: Behaviour of grouted splice connection in precast concrete wall subjected to tensile, shear and flexural loads, Universiti Teknologi Malaysia, 2011.
- [25] Yu, Q.: A new confined lapping sleeve. CN 204238449 U, 2015.
- [26] Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, 2011.
- [27] Soudki, K.A., Rizkalla, S.H., Leblanc, B.: Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part1: mild steel connections, PCI Journal, 41 (1995) 1, pp. 78-96.
- [28] Lutz, L.A., Peter, G.: Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete, ACI Journal, 64 (1967) 10, pp.711-721.
- [29] Tastani, S.P., Brokalaki, E., Panatazopoulou, S.J.: State of bond along lap splices, Journal of Structural Engineering, 2015, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001243](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001243)
- [30] Orangun, C.O., Jirsa, J.O., Breen, J. E.: A reevaluation of test data on development length and splices, ACI Journal Proceedings, 74 (1977) 3, pp. 114-122.
- [31] Tepfers, R.: Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars, Magazine of Concrete Research, 31 (1979) 106, pp. 3-12.
- [32] Tastani, S., Pantazopoulou, S.: Behavior of corroded bar anchorages, ACI Structural Journal, 104 (2007) 6, pp. 756-766.