

Primljen / Received: 2.12.2015

Ispravljen / Corrected: 15.3.2017.

Prihvaćen / Accepted: 4.7.2017.

Dostupno online / Available online: 10.7.2019.

Ocjena utjecaja aktivnog i pasivnog ovijanja na karakteristike savijanja betonom ispunjenih čeličnih cijevi

Autori:



Prof.dr.sc. **Morteza Naghipour**, dipl.ing. građ.
Tehnološko sveučilište Babol Noshirvani, Iran
Građevinski fakultet
m-naghi@nit.ac.ir



Doc.dr.sc. **Marzieh Nemati**, dipl.ing. građ.
Islamsko sveučilište Babol Azad, Iran
Građevinski fakultet
marziehnemati1362@gmail.com



Doc.dr.sc. **Javad Jalali**, dipl.ing. građ.
Tehnološko sveučilište Babol Noshirvani, Iran
Građevinski fakultet
javad.jalali@nit.ac.ir



Izv.prof.dr.sc. **Mahdi Nematzadeh**, dipl.ing. građ.
Sveučilište Mazandaran, Iran
Odjel za građevinarstvo
m.nematzadeh@umz.ac.ir

Izvorni znanstveni rad

Morteza Naghipour, Marzieh Nemati, Javad Jalali, Mahdi Nematzadeh

Ocjena utjecaja aktivnog i pasivnog ovijanja na karakteristike savijanja betonom ispunjenih čeličnih cijevi

U radu se analizira utjecaj aktivnog i pasivnog ovijanja na ponašanje pri savijanju betonom ispunjenih čeličnih cijevi. Dvanaest ovijenih uzoraka podvrgnuto je ispitivanju čvrstoće na savijanje u tri točke. Osnovni varijabilni parametri bili su: odnos promjera i debljine cijevi (20, 30 i 60), tlačna čvrstoća betonske jezgre (15 MPa i 45 MPa) i vrsta ovijanja (aktivno ili pasivno). Ispitana je savojna čvrstoća, apsorpcija energije, fleksibilnost i način popuštanja ovijenih uzoraka, isto kao i način pucanja betonske jezgre u točki sloma. Rezultati pokazuju da aktivno ovijanje dovodi do manje duktilnosti uzoraka koji se odlikuju većom čvrstoćom betonske jezgre.

Ključne riječi:

čelične cijevi ispunjene betonom, aktivno i pasivno ovijanje, savojna svojstva, apsorbirana energija

Original scientific paper

Morteza Naghipour, Marzieh Nemati, Javad Jalali, Mahdi Nematzadeh

Assessing influence of active and passive confinement on flexural behaviour of CFST beams

The aim of this study is to investigate the effect of active and passive confinement on the flexural behaviour of concrete-filled steel tubes. Three-point flexural test is carried out on twelve confined specimens. The main variable parameters are: tube diameter to thickness ratio (20, 30, and 60), compressive strength of concrete core (15 MPa and 45 MPa), and type of confinement (active or passive). The flexural capacity, energy absorption, flexibility and failure mode of confined specimens, as well as the cracking pattern of concrete core at failure point, are evaluated in this study. The results show that active confinement leads to lower ductile behaviour in specimens with higher strength of concrete core.

Key words:

concrete-filled steel tubes, active and passive confinement, flexural behaviour, absorbed energy

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Morteza Naghipour, Marzieh Nemati, Javad Jalali, Mahdi Nematzadeh

Bewertung des Einflusses der aktiven und passiven Ummantelung auf die Biegeeigenschaften von Stahlrohren mit Betonkern

Die Arbeit analysiert den Einfluss der aktiven und passiven Ummantelung auf die Biegeeigenschaften von Stahlrohren mit Betonkern. Zwölf ummantelte Proben wurden einer Biegefestigkeitsprüfung an drei Punkten unterzogen. Die grundlegenden variablen Parameter waren: das Verhältnis von Durchmesser und Dicke der Rohre (20, 30 und 60), die Druckfestigkeit des Betonkerns (15 MPa und 45 MPa) und die Art der Ummantelung (aktiv oder passiv). Die Biegefestigkeit, die Energieabsorption, die Flexibilität und die Art und Weise des Nachgebens der ummantelten Proben sowie die Art und Weise des Brechens des Betonkerns an der Bruchstelle wurden geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass die aktive Ummantelung zu einer geringeren Biegsamkeit der Proben führt, die durch die höhere Festigkeit des Betonkerns gekennzeichnet sind.

Schlüsselwörter:

Stahlrohre mit Betonkern, aktive und pasive Ummantelung, Biegeeigenschaften, absorbierte Energie

1. Uvod

Betonom ispunjene čelične cijevi (eng. *Concrete filled steel tubes* - CFST) često se koriste u visokogradnji i mostogradnji [1-10]. Mnoge studije pokazuju da CFST ima bolje konstrukcijske karakteristike od armiranog betona ili čeličnih profila [11-16]. Zajedničko djelovanje betona i čelika omogućuje povećanje tlačne čvrstoće betonske jezgre zbog učvršćujućeg djelovanja cijevi na beton. S druge strane, izvijanje cijevi se usporava zbog prisutnosti betonske jezgre [17, 18]. Osim spomenutih konstrukcijskih prednosti, spregnuti elementi imaju i neke druge pogodnosti kao što su duktilna deformacija, velika otpornost na seizmička djelovanja te dobre karakteristike glede prigušenja [4, 18].

U proteklom su razdoblju provedene brojne analize ponašanja spregnutih stupova i stupova-greda [12, 13, 18-42]. Rezultati dobiveni istraživanjem ponašanja stupova pokazuju da je nosivost tih profila mnogo veća od nosivosti običnih čeličnih ili betonskih profila [12, 13, 18-42]. Mnogi su istraživači analizirali i savojnu čvrstoću spregnutih profila [14, 16-18, 22, 31, 40, 41, 43-53]. Tako su Kang i dr. predložili novi spregnuti profil sastavljen od betona i čelika koji bi se koristio kao nosač za mostove. Lako se može izvesti, a i financijski je povoljniji od lijevanja betona i zavarivanja [50]. Rezultati koje su objavili Kang i dr. pokazuju da se nosači CFST ponašaju duktilno i da zadržavaju čvrstoću sve do prestanka opterećenja [50].

Istraživanja koja su o čvrstoći na savijanje profila CFST proveli Tomii i Sakino [54], Lu i Kennedy [43] te Kilpatrick i Rangan [28] upućuju na izuzetnu fleksibilnost tih profila. Isto tako, beton koji se koristi za ispunu mijenja način popuštanja cijevi u tlačnom pojasu, od unutarnjeg izvijanja do vanjskog izvijanja, pri relativno visokim opterećenjima [17]. Potrebno je napomenuti da rezultati koje navode Probst i dr. [14] te Prion i Boehme [31] pokazuju da kod vrlo tankih cijevi ovijanje nije dovoljno za razvoj plastične otpornosti betona kod lokalnog izvijanja stijenke cijevi. Prema rezultatima prethodnih ispitivanja [19, 31, 33], nije poznato osno opterećenje čelične cijevi koje bi omogućilo ovijanje betona. Međutim, utvrđeno je da su od tih elemenata najdjelotvorniji kružni profili, naročito za stupove kod kojih čelična cijev ima niski omjer duljine i promjera. Isto tako, Kilpatrick [28] je predložio koeficijent raspona posmika od 2,7 kako bi se mogao pratiti čitav prijenos opterećenja bez klizanja između čelične cijevi i betonske jezgre. Kako se vrijednosti D/t (omjer promjera i debljine) čeličnih cijevi bitno razlikuju u preporukama koje su objavile institucije poput AIJ [55], BS 5400 [56], EC4 [57] i LRFD-AISC [58], Elchalakani i dr. [44] ispitali su savojnu čvrstoću profila CFST s različitim vrijednostima D/t čeličnih cijevi. Rezultati prikazani u [44] pokazuju da betonska jezgra sprečava lokalno izvijanje cijevi kod vrijednosti D/t manjih od 40, s tim da se nekoliko plastičnih nabora javlja u neelastičnoj zoni uzoraka s odnosom D/t između 74 i 110. Također je ustanovljeno da za omjer D/t granica plastičnosti iznosi 112.

Koncept naknadnog napinjanja betonske jezgre prvi je put primijenjen na lučnom mostu Aurora [59]. Tuan [21] i Deng

[16] ispitali su utjecaj naknadnog napinjanja na ponašanje pri savijanju cijevi CFST. Oni su u okviru svog istraživanja u čeličnu cijev položili kabel visoke čvrstoće u svrhu naknadnog napinjanja betonske jezgre. Zatim je u cijev upumpan ekspandirani beton. Nakon otvrdnjavanja betona, kabel je zategnut te je tako u betonskom uzorku ostvarena tlačna sila [16, 59]. Rezultati prikazani u istraživanju Tuana i Denga [16, 21] pokazuju da naknadno napinjanje betonske jezgre dovodi do značajnog povećanja savojne čvrstoće profila.

Shawkat i dr. [18] ispitali su čvrstoću na savijanje spregnutih čeličnih profila i četvrtastih cijevi od polimera ojačanog vlaknima (eng. *Fibre Reinforced Polymer* - FRP) pri raznim koeficijentima raspona posmika. Oni su u svojoj studiji analizirali način pojave pukotina, mehanizam sloma i savojnu čvrstoću tih profila. S obzirom na kritični posmični raspon za oba materijala cijevi, oni su ustanovili da način pojave i veličina pukotina u velikoj mjeri ovisi o klizanju između betona i cijevi [18].

U svom istraživanju Nematzadeh i Naghipour promijenili su vrstu ovijanja s pasivnog na aktivno te su nanijeli početni tlak na svježu betonsku jezgru spregnutih profila [60-62]. Rezultati pokazuju da su zbog aktivnog ovijanja porasli parametri kao što su modul elastičnosti i tlačna čvrstoća betona [60-62].

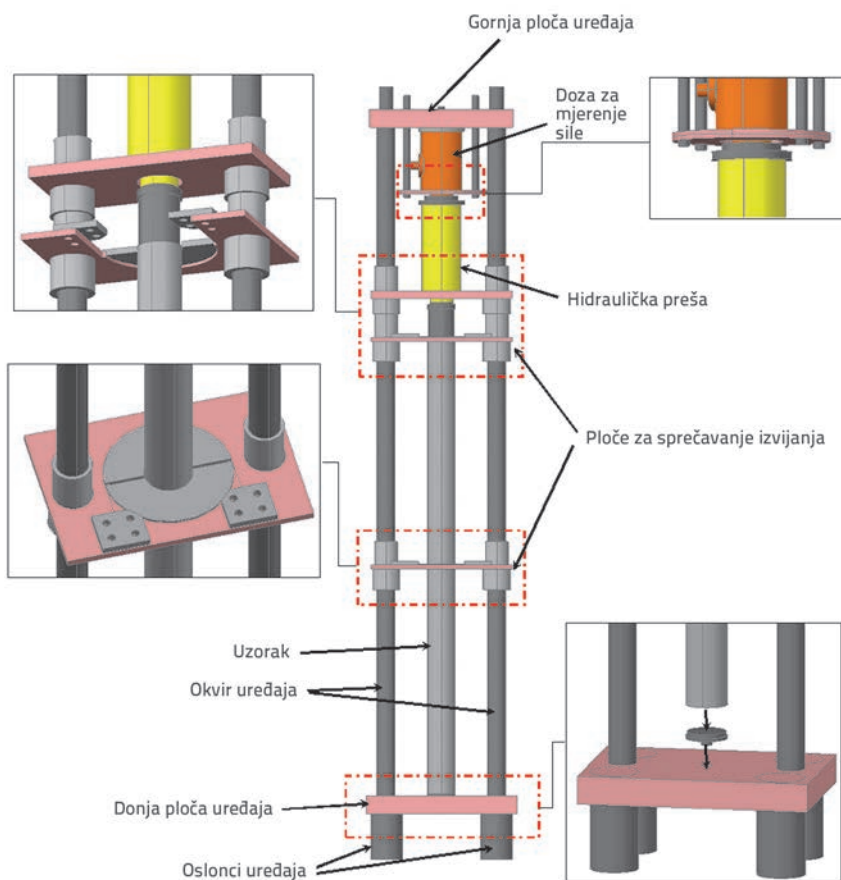
U ovom se radu eksperimentalnim putem određuje utjecaj aktivnog ovijanja na savojnu čvrstoću profila CFST pri statičkom opterećenju u tri točke. Osim toga, ocjenjuju se i utjecaji drugih parametara kao što su tlačna čvrstoća betonske jezgre, omjer D/t čelične cijevi te vrsta ovijanja. Na temelju rezultata ispitivanja sljedeće su vrijednosti određene u odnosu na spomenute parametre: savojna čvrstoća, apsorbirana energija, način sloma i pojava pukotina u trenutku popuštanja. Na kraju su uspoređeni eksperimentalni rezultati savojne čvrstoće uzoraka s rezultatima dobivenima prema normativnim dokumentima ACI 318, AISC i EC4.

2. Eksperimentalno istraživanje

2.1. Uređaj za prednapinjanje

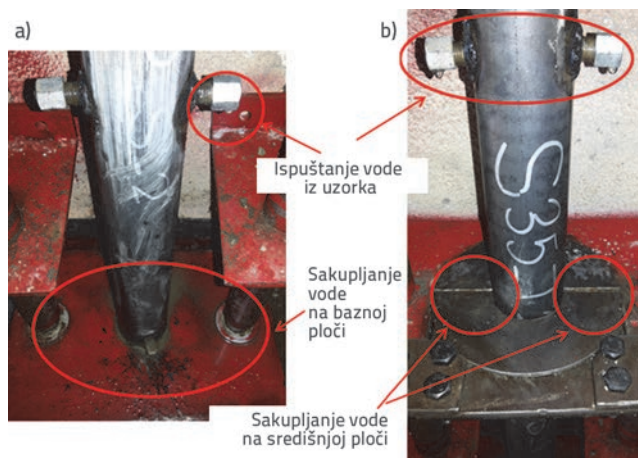
Projektiran je i izrađen odgovarajući uređaj za prednapinjanje kako bi se postiglo aktivno ovijanje cijevi (slika 1.). Čelične cijevi ispunjene svježim betonom položene su u uređaj. Zatim je nanoseno opterećenje na svježi beton. Voda koja je iz uzorka izašla zbog nanesenog tlaka ispuštena je na odgovarajućim točkama. Početni tlak nanosen na uzorak promijenio je stanje ovijanja uzorka s aktivnog na pasivno.

Uređaj za prednapinjanje projektiran je tako da se tlak može istovremeno nanositi samo na jedan uzorak. Tlak se na vrh cilindričnog uzorka nanosi pomoću hidraulične preše ugrađene na vrhu uređaja. Taj se tlak zatim prenosi po dužini uzorka što dovodi do ispuštanja viška vode (tj. vode koja nije korištena u hidrataciji) iz svježeg betona. Prema pokusima koji su provedeni na dodatnim uzorcima, tijekom postupka tlačenja betonska mješavina gubi otprilike 20 % vode. Za prikupljanje viška vode koriste se četiri ventila postavljena na odgovarajućim razmacima po dužini uzorka.



Slika 1. Detalji uređaja za prednapinjanje

Osim toga, voda može izlaziti kroz postojeći razmak između uređaja i uzorka. Svi su ventili opremljeni posebnim filterima tako da ništa osim vode ne može izaći. Razmak između uređaja i uzorka definiran je tako da onemogući izlaz bilo koje druge komponente betona. Voda ispuštena iz ventila na baznu ploču uređaja za prednapinjanje prikazana je na slici 2. Kao što se na toj slici vidi, ispuštena voda je čista. Čistoća ispuštene vode potvrđuje uspješnog rada posebno projektiranih filtera.



Slika 2. a) Voda ispuštena iz ventila; b) Voda nakupljena na baznoj ploči

Hidrauličnom se prešom nanosi pritisak sve dok voda ne prestane izlaziti iz uzorka. Zatim se uzorak vadi iz uređaja za prednapinjanje. Ispuštanje suvišne vode traje 15 do 25 minuta. Međutim, to vrijeme može varirati od uzorka do uzorka ovisno o jačini nanesenog tlaka i tlačnoj čvrstoći betona.

2.2. Uzorci

U ispitivanju je korišteno ukupno dvanaest jednostavno poduprtih uzoraka tipa CFST. Neto dužina svih uzoraka iznosila je 900 mm, a raspon je iznosio 660 mm. Uzorci su podijeljeni u dvije skupine. Aktivni su uzorci uvršteni u prvu skupinu a pasivni u drugu skupinu, kao što je to prikazano u tablici 1. Za aktivne je uzorke korišten početni tlak od 30 MPa.

Podaci o svim uzorcima prikazani su u tablici 1. Kao što se vidi u toj tablici, ime svakog uzorka sastoji se od tri dijela koji pojedinačno predstavljaju vrstu ovijanja, debljinu stijenke čelične cijevi i tlačnu čvrstoću betona. Prvi i drugi dio imena sastoji se i od slova i od broja. U prvom dijelu slovo "S" je kratica za "statički", što znači da je uzorak podvrgnut statičkom opterećenju. Broj označava tlačnu čvrstoću betonske jezgre izraženu u MPa. U drugom dijelu, slovo "T" označava debljinu, a broj pokazuje debljinu stijenke čelične cijevi u milimetrima. I, konačno, treći dio imena uzorka sastoji se od kratice "A" koja označava aktivno ovijanje, a slovo "P" pasivno ovijanje.

Tablica 1. Podaci o uzorcima

Vrsta ovijanja	Oznaka uzorka	f_c [MPa]	t [mm]	D/t	Vrijednost D/t prema AISC-u [63]
aktivno	S45-T1-A	45	1	60	111,1
	S45-T2-A	45	2	30	69,0
	S45-T3-A	45	3	20	79,0
	S15-T1-A	15	1	60	111,1
	S15-T2-A	15	2	30	69,0
	S15-T3-A	15	3	20	79,0
pasivno	S45-T1-P	45	1	60	111,1
	S45-T2-P	45	2	30	69,0
	S45-T3-P	45	3	20	79,0
	S15-T1-P	15	1	60	111,1
	S15-T2-P	15	2	30	69,0
	S15-T3-P	15	3	20	79,0

Kao što se može vidjeti u tablici 1., svaka se podskupina sastoji od tri različita uzorka, a svaki od njih ima drugačiju debljinu čelične cijevi (1, 2 i 3 mm). U ispitivanju su korištene različite debljine stijenki čeličnih cijevi kako bi se ispitaio utjecaj D/t čelične cijevi na savojnu čvrstoću uzoraka. Osim toga, svaka skupina ima i dvije različite vrijednosti tlačne čvrstoće betona (15 MPa i 45 MPa) kako bi se ocijenio utjecaj tlačne čvrstoće betonske jezgre na savojnu čvrstoću aktivnih i pasivnih uzoraka. Izračunavanjem površine čelika i betona svakog uzorka određen je postotak čelika za uzorke debljine stijenke od 1, 2 i 3 mm. Taj postotak iznosi 3,3 za debljinu stijenke od 1 mm, 6,6 za debljinu stijenke od 2 mm i 8,8 za deblju stijenke od 3 mm. Ispunjen je dakle minimalni zahtjev od 1 % iz preporuke AISC-a [63]. Osim toga, vrijednost D/t čelične cijevi svakog uzorka u skladu je s maksimalnim omjerom iz preporuke AISC-a [63].

Za sve je uzorke beton lijevan u uspravnom položaju. U prvoj je skupini lijevanje betona provedeno bez nabijanja i vibriranja: uzorci su postavljeni u uređaj za prednapinjanje. Međutim, u drugoj je skupini beton lijevan u tri sloja, a svaki od njih je nabijan. I, konačno, kako bi se izbjeglo hlapljenje vlage, oba su kraja cijevi umotana u najlon. Nakon toga su uzorci pripremljeni za ispitivanje čvrstoće na savijanje i to tako da su u uspravnom položaju čuvani na okolnoj temperaturi 28 dana. Potrebno je napomenuti da je pripremljeno i pet kockastih uzoraka, istovremeno s lijevanjem betona za glavne uzorke, kako bi se odredila tlačna čvrstoća betonske jezgre. Kockasti uzorci izvađeni su iz kalupa nakon dva dana te su zatim njegovani u uvjetima zasićenosti. Ispitivanje čvrstoće na savijanje spregnutih uzoraka i tlačno ispitivanje uzoraka oblika kocke provedeno je istoga dana.

2.3. Materijali

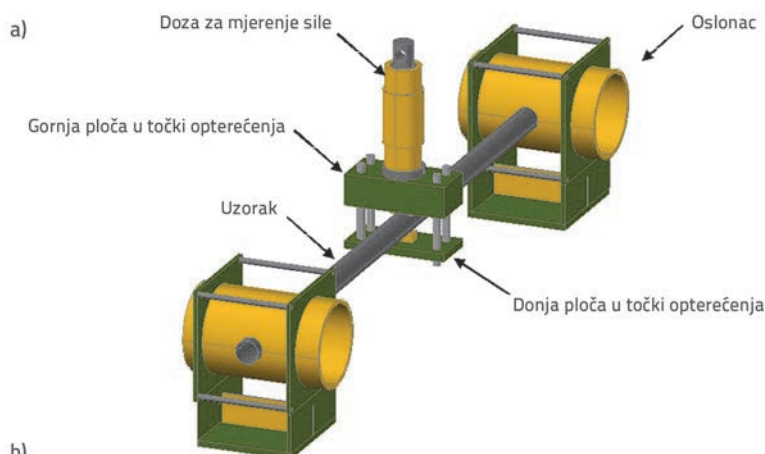
Receptura betona usvojena je na bazi norme Američkog instituta za beton [15]. Prema iranskom zakonu za beton [64], maksimalna veličina agregata ne smije prekoračiti 1/5 unutarnje strane betonskog kalupa. Stoga je promjer maksimalnog zrna agregata korištenog u mješavini iznosio 9,5 mm. Kao sitnozrnati agregat korišten je pijesak modula zrnatosti od 2,88. Kako je u ACI-jevoj normi predloženo maksimalno slijeganje od 100 mm za grede [15], za sve

je uzorke usvojena vrijednost slijeganja od 8 do 10 cm. U betonskoj mješavini nisu korišteni aditivi kako bi se izbjegao njihov eventualni utjecaj na ovijanje. Udio svakog materijala u betonskoj mješavini prikazan je u tablici 2.

U ovom su ispitivanju korištene čelične cijevi koje su bile dostupne na tržištu. Zbog ograničenja univerzalnog uređaja za ispitivanje (ispitivanje čvrstoće na savijanje), dužina svih uzoraka iznosila je 900 mm, a promjer im je iznosio 60 mm. Prema normi ASTM A370 [65], iz svake su cijevi uzeta tri uzorka u obliku utega kako bi se odredilo popuštanje i granična čvrstoća čeličnih cijevi. Prosječni su rezultati prikazani u tablici 3.

Tablica 3. Granica popuštanja i čvrstoća čeličnih cijevi

Debljina cijevi [mm]	Granica naprezanja [MPa]	Naprezanje pri popuštanju [MPa]
1	305	270
2	500	435
3	420	380



Slika 3. Opći prikaz uzorka i opreme: a) shematski prikaz; b) različiti prikazi eksperimenta

Tablica 2. Udjeli komponenata za 1 m³ betona

f_c [MPa]	v/c	Slijeganje [cm]	Voda [kg]	Cement [kg]	Sitnozrnati agregat [kg]	Krupnozrnati agregat [kg]
17,4	0,8	8-10	225,0	281,3	1117,6	661,2
44,2	0,38	8-10	225,0	592,1	806,7	661,2

2.4. Opis pokusa

Svi su uzorci ispitani na savijanje u tri točke. Za ispitivanje je korišten univerzalni uređaj STM 150 a primijenjena je metoda kontrole pomaka pri brzini od 2 mm/min. U zadanim su intervalima bilježene vrijednosti opterećenja i pomaka na sredini raspona. Opći izgled uzorka prikazan je na slici 3.

Kao što se može vidjeti na slici 3., oslonci su projektirani tako da se uzorak ponaša kao jednostavno poduprta greda. Osim toga, izrađena su i u točki opterećenja montirana dva čelična polukružna elementa kako bi se spriječila koncentracija napona u toj točki. Aktivni su uzorci položeni u uređaj za ispitivanja, pri čemu se pazilo da svi ventili budu u horizontalnom položaju. Ispitivanje je nastavljeno sve do naglog pada opterećenja.

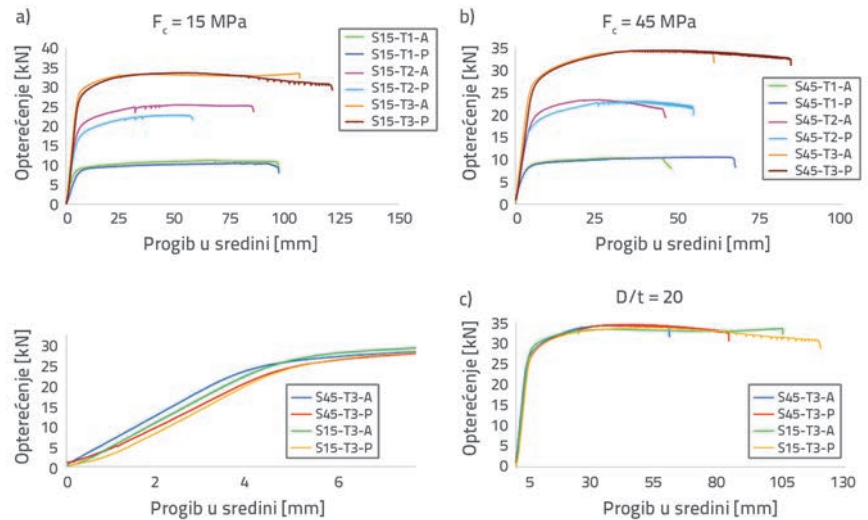
3. Rezultati i rasprava

3.1. Odnos opterećenja i progiba na način popuštanja

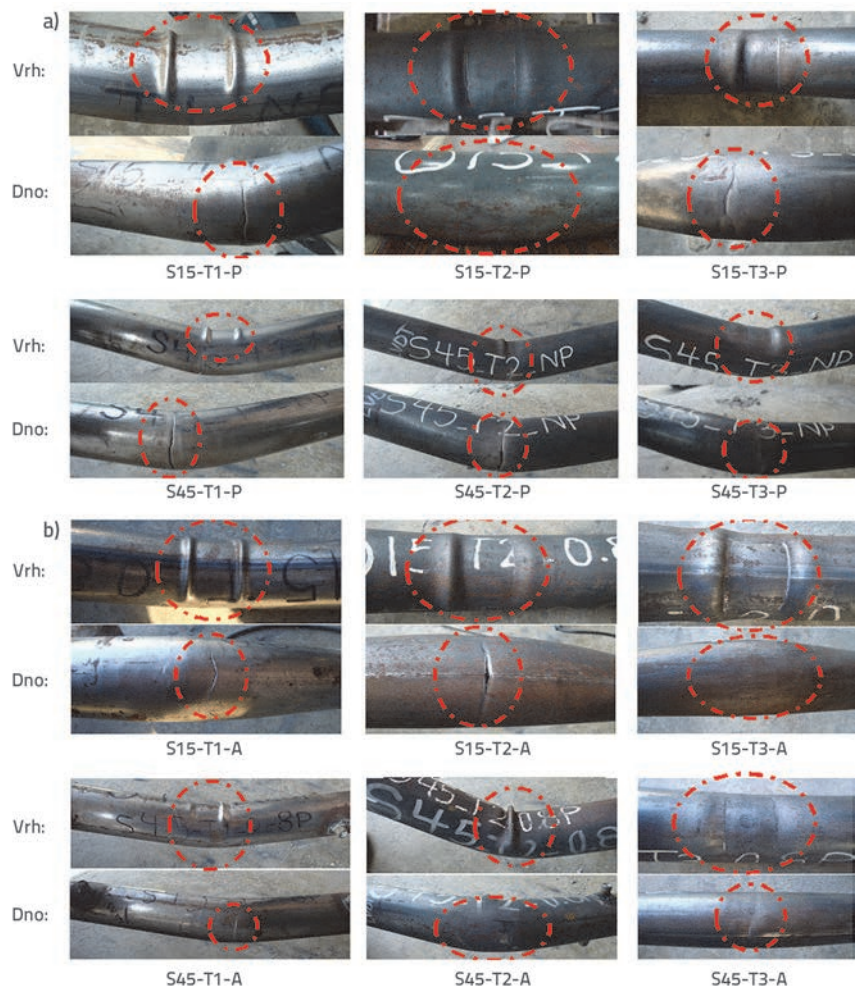
Slika 4. prikazuje dijagram opterećenja i ugiba na sredini raspona za sve uzorke. Kao što se može uočiti, sve spregnute grede popustile su izrazito duktilno.

Osim toga, uzorci su popuštali postupno, a u trenutku popuštanja nije zabilježen bilo kakav jasan znak ili zvuk. Slika 5. prikazuje način popuštanja svih uzoraka. Kao što se može uočiti, način popuštanja aktivnih uzoraka u skladnosti je s načinom popuštanja pasivnih uzoraka.

Kod svih uzoraka, do lokalnog izvijanja dolazi u tlačnoj zoni (vidi sliku 5.). U gornjem dijelu čeličnih cijevi dolazi do pojave nabora koji su uzrokovani lokalnim izvijanjem. Osim toga, do popuštanja dolazi i zbog pucanja cijevi u vlačnoj zoni. U uzorcima (S15-T3-A) i (S15-T2-P), dolazi do sloma zbog lokalnog izvijanja cijevi u tlačnoj zoni, dok kod drugih uzoraka do popuštanja dolazi zbog pucanja cijevi u vlačnoj zoni. Kod uzoraka s istom tlačnom čvrstoćom betona i s istom vrstom ovijanja, smanjenje vrijednosti D/t čelične cijevi dovodi do smanjenja visine ili broja nabora induciranih na gornjoj strani



Slika 4. Dijagram opterećenja i progiba na sredini raspona: a) uzorci s $f'_c = 15$ MPa; b) uzorci s $f'_c = 45$ MPa; c) uzorci s $D/t = 20$



Slika 5. Način popuštanja: a) pasivnih uzoraka; b) aktivnih uzoraka

uzoraka. Smanjenje lokalnog izvijanja čelične cijevi na gornjem dijelu ne ovisi o vrsti ovijanja. Uz to, lokalno izvijanje čelične cijevi smanjuje se kod svih uzoraka s povećanjem tlačne čvrstoće betona. I, na kraju, možemo zaključiti da vrsta ovijanja ne utječe na način popuštanja uzoraka.

3.2. Obrazac stvaranja pukotina

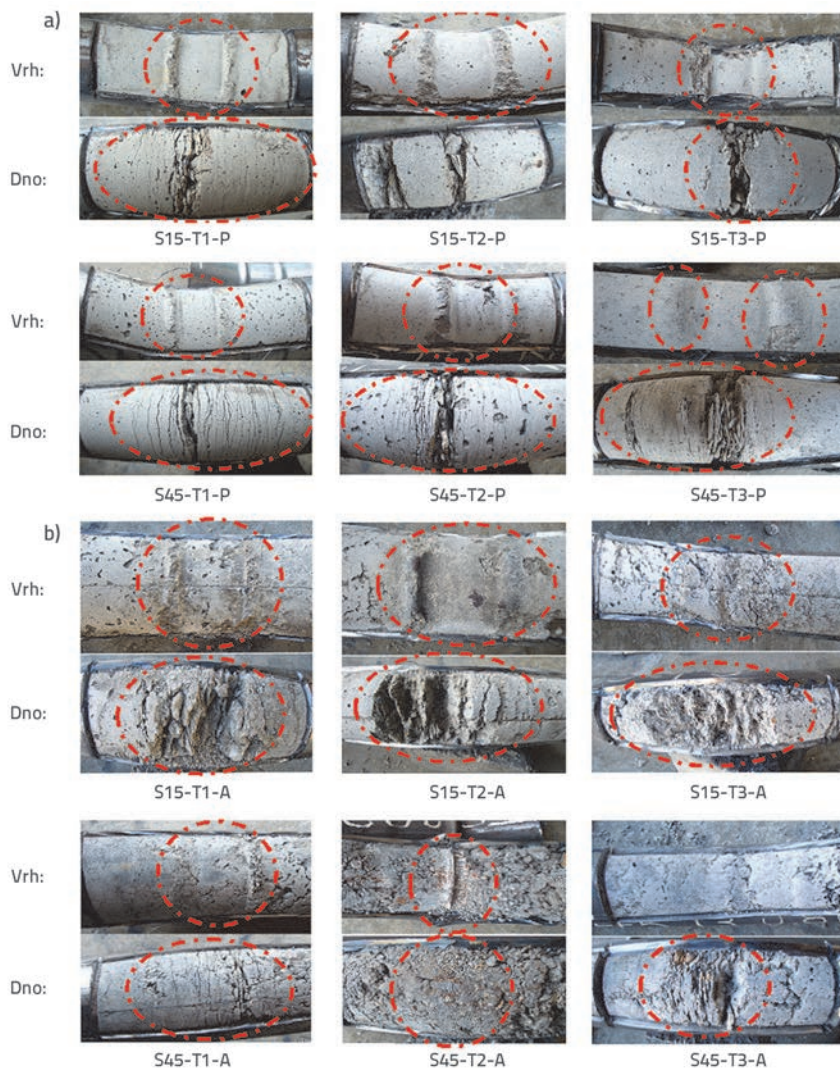
Nakon ispitivanja savojne čvrstoće, odrezani su dijelovi čelične cijevi u tlačnoj i vlačnoj zoni kako bi se ispitaio obrazac stvaranja pukotina u trenutku popuštanja (vidi sliku 6.). Popuštanje betona i način stvaranja pukotina u tlačnoj i vlačnoj zoni može se uočiti na slici 6.

Vrsta ovijanja smatra se utjecajnim faktorom u pogledu površine popuštanja betona u tlačnoj zoni. Stoga, u uzorcima s istom vrijednošću D/t čelične cijevi i s istom vrijednošću tlačne čvrstoće, pasivno ovijanje uzrokuje širu površinu sloma betona u odnosu na aktivno ovijanje. Tlačna čvrstoća betonske jezgre također utječe na površinu sloma betona, pa se tako površina sloma betona smanjuje s povećanjem tlačne čvrstoće betona. Vrijednost D/t čelične cijevi također je utjecajni parametar u odnosu na slom betona. Postoji izravna veza između vrijednosti D/t čelične cijevi i površine sloma betona, tj. što je manja vrijednost D/t čelične cijevi, to je manja i površina sloma betona.

Složeno djelovanje dviju vrsta materijala dovodi do popuštanja betonske jezgre, a to se popuštanje odvija u slojevima (vidi sliku 6.). Pri istoj tlačnoj čvrstoći betona i pri istoj vrijednosti D/t čelične cijevi, pukotine su se u uzorcima s aktivnim ovijanjem javljale u širem području u usporedbi s pukotinama kod pasivnih uzoraka. Međutim, dubina pukotina je kod aktivnih uzoraka bila manja od one kod pasivnih uzoraka. Osim toga, u istim uvjetima ovijanja i pri istoj vrijednosti D/t čelične cijevi, pri višoj tlačnoj čvrstoći betonske jezgre otvarale su se pliće pukotina koje su se prostirale po široj površini betonske jezgre. Vrijednost D/t čelične cijevi također je utjecala na raspored pukotina u uzorcima, pa je tako smanjenje vrijednosti D/t čelične cijevi uzrokovalo povećanje dubine pukotina, dok je površina betona s pukotinama ostala gotovo nepromijenjena.

3.3. Savojna čvrstoća i apsorbirana energija

Vrijednost apsorbirane energije (E_{abs}) svakog uzorka određena je izračunavanjem površine prema dijagramu opterećenja i pomaka.



Slika 6. Način popuštanja betona: a) pasivnih uzoraka; b) aktivnih uzoraka

Tablica 4. Eksperimentalni rezultati za aktivne i pasivne uzorke

Oznaka uzorka	P_{exp} [kN]	E_{abs} [kNm]	M_u [kNm]
$D/t = 60$			
S45-T1-A	11,3	1015,1	1,9
S45-T1-P	10,5	952,1	1,7
S15-T1-A	10,4	480,5	1,7
S15-T1-P	10,6	668,7	1,7
$D/t = 30$			
S45-T2-A	25,4	2115,7	4,2
S45-T2-P	22,8	1251,8	3,8
S15-T2-A	23,7	2609,2	3,9
S15-T2-P	23,1	1178,7	3,8
$D/t = 20$			
S45-T3-A	34,3	2839,2	5,7
S45-T3-P	34,4	1933,0	5,7
S15-T3-A	33,5	3809,0	5,5
S15-T3-P	33,6	4079,1	5,5

Eksperimentalne vrijednosti graničnog opterećenja (P_{exp}), graničnog momenta savijanja (M_u) i apsorbirane energije (E_{abs}) prikazane su za sve uzorke u tablici 4. Kao što možemo vidjeti u tablici 4., kada je $f'_c = 15$ MPa i $D/t = 30$, promjena u vrsti ovijanja s pasivnog na aktivno dovodi do istovremenog povećanja vrijednosti M_u i E_{abs} , dok u ostalim slučajevima takva pojava nije uočena. Dakle, najbolji rezultati za aktivno ovijanje dobivaju se kada je $D/t = 30$ i $f'_c = 15$ MPa. Pri vrijednosti $D/t = 20$ i pri različitoj tlačnoj čvrstoći betonske jezgre, promjena u vrsti ovijanja s pasivnog na aktivno ima suprotan učinak na savojnu čvrstoću uzoraka, tj. dovodi do smanjenja vrijednosti M_u i E_{abs} .

3.4. Parametarska studija

3.4.1. Vrsta ovijanja

Za ocjenjivanje utjecaja vrste ovijanja na savojnu čvrstoću, spregnuti su uzorci podijeljeni u tri skupine pri čemu je svaka skupina imala konstantnu vrijednost D/t čelične cijevi za pasivno i aktivno ovijanje, s dvije vrijednosti tlačne čvrstoće betona (kao podskupine). Na slici 7. prikazana je usporedba rezultata aktivnih uzoraka za M_u i E_{abs} s rezultatima M_u i E_{abs} pasivnih uzoraka (referentni uzorci).

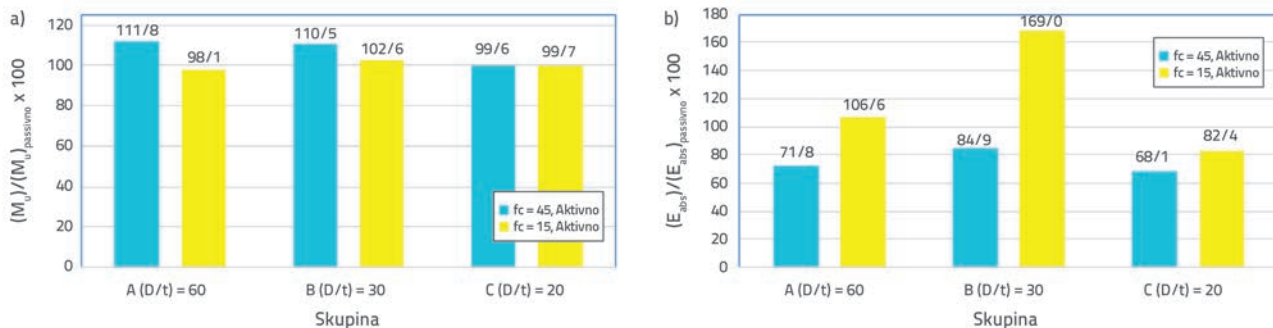
U skupini A, kod uzoraka s $f'_c = 45$ MPa, vrijednost M_u povećava se za 12 % kada se ovijanje promijeni s aktivnog na pasivno, pri čemu se vrijednost E_{abs} smanjuje za 28 %. Ipak, kod uzoraka s $f'_c = 15$ MPa, vrijednost E_{abs} povećava se za 7 % kod aktivnog ovijanja, pri čemu se M_u smanjuje za 2 %. U skupini B, kod uzoraka s $f'_c = 45$ MPa, vrijednost M_u povećava se nakon promjene ovijanja za 11 %, pri čemu se vrijednost E_{abs} smanjuje za 15 %. Promjena vrste

ovijanja bitno utječe na uzorke s $f'_c = 15$ MPa. Treba napomenuti da promjena vrste ovijanja ne samo da dovodi do 3-postotnog povećanja vrijednosti M_u već i do povećanje vrijednost E_{abs} za 69 %. U skupini C, promjena ovijanja dovodi do smanjenja vrijednosti M_u i E_{abs} . Jasno je da je kod uzoraka s $f'_c = 45$ MPa smanjenje vrijednosti E_{abs} veće u odnosu na uzorke s $f'_c = 15$ MPa. Može se također zaključiti da se kod aktivnog ovijanja najbolje ponašanje bilježi kod uzoraka $f'_c = 15$ MPa u skupini B. S druge strane, najgore se ponašanje bilježi kod uzoraka iz skupine C, a naročito kod uzoraka s $f'_c = 45$ MPa. U slučaju uzoraka s $f'_c = 45$ MPa, ugib u sredini raspona niži je (manje duktilno ponašanje) kod aktivnih uzoraka u odnosu na pasivne (vidi sliku 4.). Takav zaključak nije primjenjiv na uzorke s $f'_c = 15$ MPa.

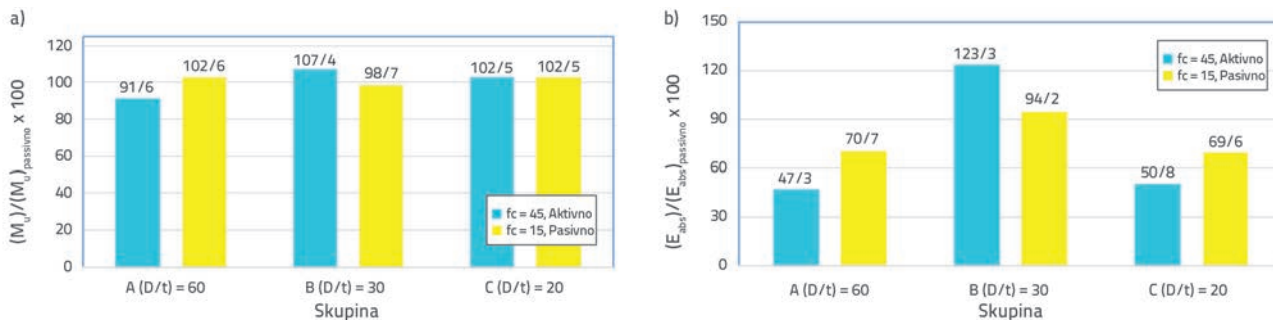
3.4.2. Tlačna čvrstoća betona

Na uzorcima se ispituje utjecaj tlačne čvrstoće betonske jezgre na odnos opterećenja i ugiba, M_u i E_{abs} . Svi se uzorci dijele u tri skupine. U svakoj je skupini vrijednost D/t čelične cijevi konstantna, a aktivni i pasivni uzorci smješteni su u zasebne podskupine.

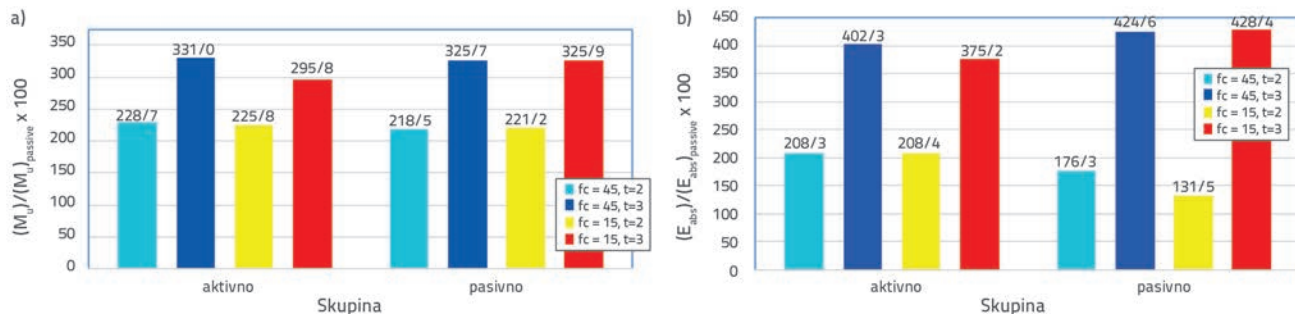
Uspoređivanjem uzoraka s različitim vrijednostima tlačne čvrstoće (slika 4.), može se uočiti da se progib u sredini raspona smanjuje s porastom tlačne čvrstoće. Čini se da je smanjenje središnjeg ugiba neovisno o vrsti ovijanja i debljini stijenke čelične cijevi. Kako bi se odredila varijacija vrijednosti M_u i E_{abs} pri povećanju tlačne čvrstoće betonske jezgre, postotak promjene M_u i E_{abs} kod uzoraka s $f'_c = 45$ MPa uspoređuje se s vrijednostima (M_u) i (E_{abs}) uzoraka s $f'_c = 15$ MPa (referentni uzorci), kako je to prikazano na slici 8.



Slika 7. Postotak varijacije – utjecaj vrste ovijanja: a) M_u ; b) E_{abs}



Slika 8. Postotak varijacije – utjecaj tlačne čvrstoće betonske jezgre: a) M_u ; b) E_{abs}



Slika 9. Postotak varijacije – utjecaj odnosa D/t čelične cijevi: a) M_u ; b) E_{abs}

Može se uočiti da u svim slučajevima, osim kod aktivnih uzoraka iz skupine B, povećanje tlačne čvrstoće betonske jezgre dovodi do nižih vrijednosti E_{abs} . U skupinama A i C, smanjenje vrijednosti E_{abs} zbog povećanja tlačne čvrstoće betona u aktivnim uzorcima značajnije je nego kod pasivnih uzoraka.

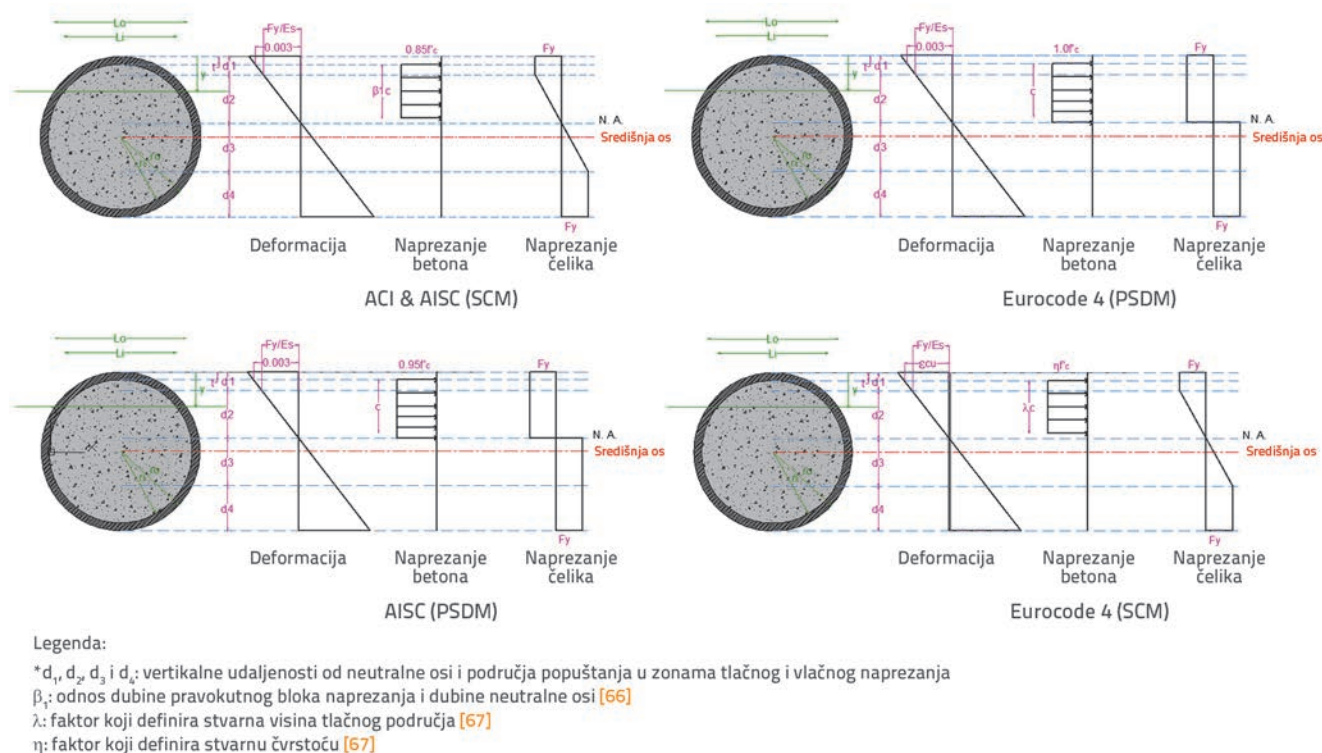
Što se tiče skupine B, može se zaključiti da vrijednost M_u aktivnih uzoraka donekle raste s porastom tlačne čvrstoće betonske jezgre, dok se vrijednost M_u pasivnih uzoraka smanjuje.

U skupini C, pad vrijednosti E_{abs} zbog povećanja čvrstoće betona iznosi otprilike 50 % kod aktivno ovijenih uzoraka, tj. otprilike 31 % kod pasivno ovijenih uzoraka. To znači da aktivno ovijanje dovodi do znatnijeg pada utjecaja vrijednosti E_{abs} u odnosu na pasivno ovijanje. Uz to, vrijednost M_u se povećava usporedo s povećanjem tlačne čvrstoće betonske jezgre, i to kako kod aktivno ovijenih tako i kod pasivno ovijenih uzoraka.

3.4.3. Odnos promjera i debljine (D/t) čelične cijevi

Kako bi se odredio utjecaj vrijednosti D/t na savojnu čvrstoću spregnutih uzoraka, svi su uzorci podijeljeni u dvije skupine: aktivno ovijanje i pasivno ovijanje.

Kao što se vidi na slici 9., vrijednost M_u bitno se povećava sa smanjenjem vrijednosti D/t čelične cijevi. Osim toga, može se uočiti da se uzorci duktilnije ponašaju pri manjim vrijednostima D/t čelične cijevi. Uz to, aktivni uzorak sa D/t = 30 i $f'_c = 45$ MPa odlikuje se nižim središnjim ugiбом u usporedbi s ostalim uzorcima. U okviru analize utjecaja vrijednosti D/t čelične cijevi na savojnu čvrstoću uzoraka, izračunan je postotak promjene vrijednosti M_u i E_{abs} za odnose D/t = 20 i 30 te je dobivena vrijednost uspoređena s uzorcima kod kojih je D/t = 60 (referentni uzorak), kao što se može vidjeti na slici 9.



Slika 10. Raspodjela deformacija i naprezanja po betonu i čeliku prema pretpostavkama iz propisa za projektiranje

Slika 9. pokazuje da se vrijednosti M_u i E_{abs} povećavaju sa smanjenjem vrijednosti D/t čelične cijevi. To upućuje na znatan utjecaj debljine cijevi na savojnu čvrstoću. Najveća promjena vrijednosti M_u zabilježena je kod aktivnih uzoraka sa $D/t = 20$ i $f'_c = 45$ MPa, dok je najveća promjena vrijednosti E_{abs} uočena kod pasivnih uzoraka sa $D/t = 20$ i $f'_c = 15$ MPa.

Osim toga, minimalno povećanje M_u iznosi 120 % tj. 30 % za E_{abs} , što upućuje na znatan utjecaj vrijednosti D/t na vrijednosti M_u i E_{abs} .

4. Analitičko istraživanje

4.1. Čvrstoća na savijanje

Savojna čvrstoća uzoraka CFST može se izračunati u skladu s nekoliko propisa. Izračunana savojna čvrstoća greda CFST varira ovisno o propisu za projektiranje koji je u konkretnom slučaju primijenjen. U normativnim se dokumentima i propisima savojna čvrstoća uzoraka CFST predviđa na temelju dvije metode: metode kompatibilnosti deformacija (eng. *strain compatibility method* - SCM) i metode plastične raspodjele naprezanja (na engl. *plastic stress distribution method*, PSDM). Metoda SCM primjenjuje se u normativnom dokumentu ACI-ja [66], a obje metode (SCM i PSDM) u pravilima AISC-a [63] i Eurocode 4 [57].

Svaki propis/normativni dokument sadrži drugačije pretpostavke i druge raspodjele naprezanja u betonu i čeliku, pa se stoga i vrijednosti savojne čvrstoće dobivene prema pojedinim propisima razlikuju. Raspodjela deformacija i naprezanja u betonu i čeliku, bazirana na tim metodama, prikazana je na slici 10. Usporedba proračunskih i eksperimentalnih rezultata za momente savijanja provedena je kako bi se ocijenila preciznost propisa u predviđanju savojne čvrstoće greda CFST.

Slika 11. prikazuje hodogram za izračunavanje momenta savijanja greda CFST. U prvom se koraku unose svojstva materijala (f'_c , F_y , e_{cu} i E_s) te geometrija profila (D_o i t). Zatim se odabire propis koji će se primijeniti za projektiranje. Nakon

toga počinje analiza profila. Algoritam se podešava u svrhu nalaženja neutralne osi profila. Neutralna se os određuje pomoću zahtjeva ravnoteže. Algoritam ponavlja postupak sve dok se ne udovolji zahtjevu ravnoteže. Nakon definiranja neutralne osi profila, izračunava se čvrstoća na savijanje pomoću odgovarajućih jednadžbi.

4.2. Usporedba

Kako su vrijednosti čvrstoće na savijanje aktivnih i pasivnih uzoraka prilično slične (vidi zaključke iz točke 3.3), te kako se sve jednadžbe iz propisa za projektiranje odnose na pasivne uzorke, preciznost jednadžbi iz pojedinih propisa provjerena je eksperimentalno samo za pasivne uzorke.

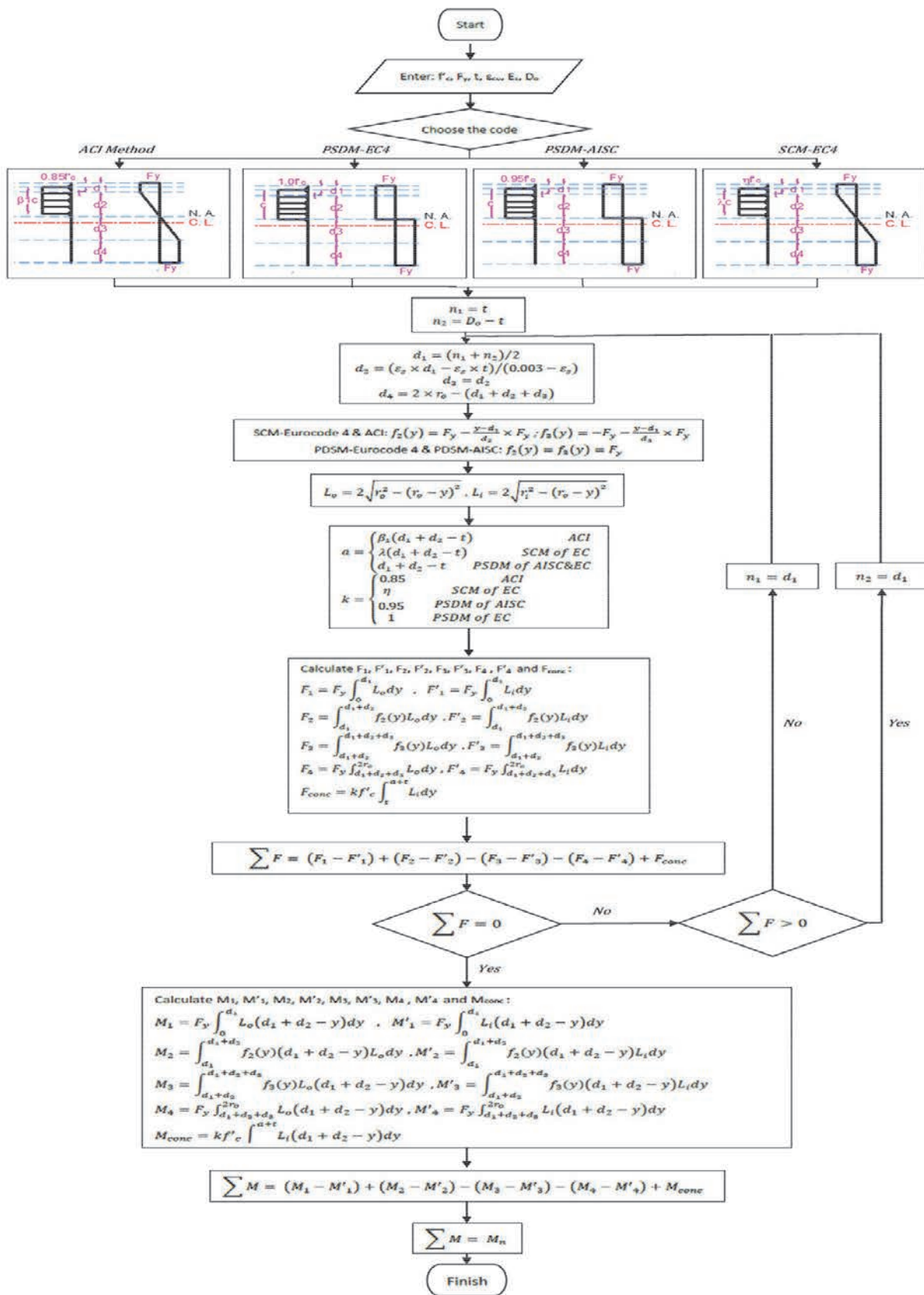
Predviđena čvrstoća na savijanje ($M_{r,c}$) uspoređena je s eksperimentalnim rezultatima ($M_{u,exp}$) pomoću različitih metoda, kako je to prikazano u tablici 5. Osim toga, u istoj su tablici za svaku metodu prikazane i srednje vrijednosti ($M_{u,exp}$) / ($M_{r,c}$). Rezultati jasno pokazuju da su sve te metode konzervativne.

Kao što se u tablici 5. vidi, eksperimentalni su rezultati kod većine uzoraka viši od predviđenih graničnih vrijednosti. Također se može uočiti da je dobra usklađenost postignuta za rezultate dobivene metodom PSDM u propisu EC4, sa srednjim odnosom od 1,1. Kod predviđanja koja se dobivaju pomoću drugih propisa izraženije je podcjenjivanje granične vrijednosti, što je naročito vidljivo kod metode SCM koja se primjenjuje u propisima ACI i AISC. Glavni razlog je činjenica da se u toj metodi za čvrstoću betona koristi faktor umanjenja 0,85. Bolja se predviđanja postižu za više tlačne čvrstoće betona, naročito za više vrijednosti D/t (vidi rezultate PSDM za EC4 i AISC u tablici 5.).

Može se uočiti da se analizom SCM prema propisima iz AISC-a i ACI-ja dobiva granična vrijednost koja je za otprilike 20 % niža od rezultata dobivenih ispitivanjem. Isto tako, metodom PSDM postiže se srednja vrijednost od 1,1 kada se koriste propisi AISC i EC4. Dakle, tim se propisima dobivaju najbolja predviđanja.

Tablica 5. Usporedba eksperimentalnih i izračunanih vrijednosti čvrstoće za grede CFST

Oznaka uzorka	Analiza ACI & AISC-SCM		Analiza AISC-PSDM		Analiza EC4-PDSM		Analiza EC4-SCM		$(M_{u,exp})$ [kNm]
	$(M_{u,exp}) / (M_{r,c})$ [kNm]	$(M_{r,c})$ [kNm]	$(M_{u,exp}) / (M_{r,c})$ [kNm]	$(M_{r,c})$ [kNm]	$(M_{u,exp}) / (M_{r,c})$ [kNm]	$(M_{r,c})$ [kNm]	$(M_{u,exp}) / (M_{r,c})$ [kNm]	$(M_{r,c})$ [kNm]	
S45-T1-P	1,7	1,0	1,7	1,0	1,7	1,0	1,7	1,0	1,7
S45-T2-P	3,5	1,1	3,8	1,0	3,8	1,0	3,6	1,1	3,8
S45-T3-P	4,6	1,2	4,9	1,2	4,9	1,2	4,7	1,2	5,7
S15-T1-P	1,4	1,2	1,5	1,1	1,5	1,1	1,5	1,2	1,7
S15-T2-P	3,1	1,2	3,4	1,1	3,4	1,1	3,2	1,2	3,8
S15-T3-P	4,2	1,3	4,4	1,2	4,5	1,2	4,2	1,3	5,5
Srednja vrijednost	1,18		1,11		1,10		1,16		



Slika 11. Hodogram za izračunavanje savojne čvrstoće greda CFST (betonom ispunjene čelične cijevi)

5. Zaključak

U ovom je radu provedeno eksperimentalno istraživanje čvrstoće na savijanje betonom ispunjenih čeličnih cijevi, i to kako za aktivne tako i za pasivne uvjete ovijanja. Ispitana je savojna čvrstoća dvanaest uzoraka CFST te je analiziran utjecaj triju varijabli: odnosa promjera i debljine cijevi, tlačne čvrstoće betona te vrste ovijanja. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

1. Svi aktivni i pasivni uzorci ponašali su se duktilno, a duktilnost uzoraka CFST smanjivala se s povećanjem tlačne čvrstoće betonske jezgre. Uzorci s $f'_c = 45$ MPa ponašali su se duktilnije pri pasivnom ovijanju u odnosu na aktivno ovijanje, a odnos promjera i debljine čelične cijevi nije utjecao na duktilnost uzoraka. Nije se, međutim, mogao uspostaviti siguran odnos između vrste ovijanja za $f'_c = 15$ MPa, a vrijednosti duktilnosti i aktivnog i pasivnog ovijanja varirale su ovisno o vrijednosti D/t čelične cijevi.
2. Popuštanje uzoraka CFST bilo je popraćeno lokalnim izvijanjem čelične cijevi u tlačnoj zoni i pucanjem u vlačnoj zoni. Osim toga, povećanje tlačne čvrstoće betonske jezgre dovelo je do smanjenja visine ili broja nabora generiranih u tlačnoj zoni čelične cijevi. Vrsta ovijanja vrlo je malo utjecala na način popuštanja uzoraka.
3. Betonska jezgra popustila je u zoni u kojoj je zabilježeno lokalno izvijanje čelične cijevi. Zona popucalog betona bila je izraženija u uzorcima s pasivnim ovijanjem u odnosu na uzorke s aktivnim ovijanjem. Osim toga, zona popucalog betona obrnuto je proporcionalna tlačnoj čvrstoći betonske jezgre, a izravan je odnos zabilježen između površine popucalog betona i vrijednosti D/t čelične cijevi.
4. Betonska jezgra popucala je u vlačnoj zoni svih aktivnih i pasivnih uzoraka. Vrsta ovijanja i tlačna čvrstoća betona

utjecale su na širenje i dubinu pukotina u betonskoj jezgri. Kod aktivnih uzoraka s $f'_c = 15$ MPa, popucalo područje u betonu bilo je šire u odnosu na odgovarajuće pasivne uzorke. Isto tako, kod uzoraka s $f'_c = 45$ MPa, betonske su pukotine bile dublje u pasivnim uzorcima u odnosu na aktivne. Kod svih je uzoraka vrijednost D/t čelične cijevi bila obrnuto proporcionalna dubini pukotina.

5. Apsorpcija energije aktivnih i pasivnih uzoraka CFST smanjivala se s povećanjem tlačne čvrstoće betona, s tim da je veće smanjenje uočeno kod aktivnih uzoraka. Osim toga, kod profila s niskim omjerom $D/t = 20$, apsorpcija energije bila je veća kod betona s $f'_c = 15$ MPa u odnosu na beton sa $f'_c = 45$ MPa. Također je zabilježeno da odnos D/t u vrlo velikoj mjeri utječe na količinu apsorbirane energije.
6. Najbolje karakteristike glede promjene ovijanja s pasivnog na aktivno zabilježeno je na uzorku s $D/t = 30$ i $f'_c = 15$ MPa, uz istovremeni rast apsorpcije energije i čvrstoće na savijanje. Osim toga, kod profila s niskim odnosom D/t ($D/t = 20$), promjena ovijanja s pasivnog na aktivno dovela je do istovremenog smanjenja čvrstoće na savijanje i apsorpcije energije. Stoga aktivno ovijanje i niska vrijednost D/t uzrokuju slabije ponašanje u odnosu na pasivno ovijanje.
7. Povećanje tlačne čvrstoće betonske jezgre dovodi do povoljnije savojne čvrstoće pasivno ovijenih uzoraka, dok je kod aktivno ovijenih uzoraka zabilježen obrnuto proporcionalan odnos između savojne čvrstoće i tlačne čvrstoće betona. Osim toga, obrnuto proporcionalan odnos uočen je između savojne čvrstoće i odnosa D/t , pa je tako odnos D/t čelične cijevi u velikoj mjeri utjecao na čvrstoću na savijanje.
8. Pokazalo se da je čvrstoća na savijanje definirana metodom PSDM prema propisima AISC i EC4 u skladu s rezultatima ispitivanja uzoraka CFST.

LITERATURA

- [1] Hosaka, T., Umehara, T., Nakamura, S., Nishiumi, K.: Design and experiments on a new rail way bridge system using concrete filled steel pipes, ASCCS Seminar, Concrete filled steel tubes- a comparison of international codes and practices, ASCCS seminar, Innsbruck, Austria (1997)
- [2] Liu, Z., Goel, S.C.: Cyclic load behavior of concrete-filled tubular braces, J Struct Div, ASCE, 114 (1988) 7, pp. 1488-506, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:7\(1488\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:7(1488))
- [3] Zhao, X.L., Grzebieta, R., Lee, C.: Void-filled cold-formed RHS braces subjected to large deformation cyclic axial loading, J Struct Eng. ASCE, 128 (2002) 6, pp. 746-753, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:6\(746\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:6(746))
- [4] Hajjar, J.: Concrete-filled steel tube columns under earthquake loads, J. Progress Struct, Engng Mater, 2 (2000) 1, pp. 1-10, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1528-2716\(200001/03\)2:1<1-10::AID-PSE9>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1528-2716(200001/03)2:1<1-10::AID-PSE9>3.0.CO;2-E)
- [5] Roeder, C.W.: Overview of Hybrid and composite systems for seismic design in the United States, Engng Struct, 20 (1998) 4-6, pp. 355-363, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00035-7)
- [6] Fukumoto, Y.: Structural stability design. steel and composite structures. Oxford, Pergamon, 1997.
- [7] Karbhari, V.M.: Structural characterization of fiber-reinforced composite short and medium span bridge systems, In: proceedings of European conference on Composite Materials (ECCM-8), pp. 35-42, 1998.
- [8] Fam, A., Pando, M., Filz, G., Rizakalla, S.: Precast composite piles for the route 40 bridge in Virginia using concrete-filled FRP tubes, PCI J, 48 (2003) 3, pp. 32-45, <https://doi.org/10.15554/pcij.05012003.32.45>
- [9] Fam, A., Greene, R., Rizkalla, S.: Field applications of concrete-filled FRP tubes for marine piles, Field application of FRP reinforcement: case studies, ACI special publication SP-215-9, pp. 161-180, 2003.

- [10] Bondi, R.: Concrete filled tubular flange Girder Bridge. *Modern Techniques in Bridge Engineering: Proceedings of 6th New York City Bridge Conference*, pp. 137-147, 2011, <https://doi.org/10.1201/b11340-14>
- [11] Webb, J., Beyton, J.J.: Composite concrete filled steel tube columns, In: *Proceeding of Structural Engineering Conference*, Adelaide: The Institution of Engineers Australia, pp. 181-185, 1990.
- [12] Han, L.H., Zhao, X.L., Tao, Z.: Tests and mechanics model of concrete-filled SHS stub columns, columns and beam-columns, *Steel & Composite Structures. An International Journal*, 1 (2001) 1, pp. 51-74, <https://doi.org/10.12989/scs.2001.1.1.051>
- [13] Neogi, P.K., Sen, H.K., Chapman, J.C.: Concrete filled tubular steel columns under eccentric loading, *Journal of Structural Engineering*, 47 (1969) 5, pp. 187-195.
- [14] Probst, A.D., Kang, T.H.K., Ramseyer, Ch, Kim, U.: Composite Flexural Behavior of Full-Scale Concrete-Filled Tubes without Axial Loads, *Journal of Structural Engineering*, pp. 1401-1412, 2010, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000241](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000241)
- [15] ACI Committee 211.1-91.: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, *ACI manual of concrete practice*, part 1. Michigan (USA): American concrete institute, pp.38, 2000
- [16] Deng, Y., Tuan, C., Zhou, Q., Xiao, Y.: Flexural strength analysis of non-post-tensioned and post-tensioned concrete-filled circular steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (2011), pp. 192-202, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.08.005>
- [17] Tomii, M., Sakino, K.: Elasto-plastic behavior of concrete filled square steel tubular beam-columns, *Transactions of Architectural Institute of Japan*, 280 (1979), pp. 111-120, https://doi.org/10.3130/aajsaxx.280.0_111
- [18] Shawkat, W., Fahmy, W., Fam, A.: Cracking patterns and strength of CFT beams under different moment gradients, *Composite Structures*, 84 (2008), pp. 159-166, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.07.005>
- [19] Knowles, R.B., Park, R.: Strength of concrete filled steel tubular columns, *Journal of Structural Division, ASCE*, 95 (1969), pp. 1565-1587.
- [20] Mei, H., Kiousis, P.D., Ehsani, M.R., Saadatmanesh, H.: Confinement effects on high strength concrete, *ACI structure journal*, 98 (2001) 4, pp. 548-553, <https://doi.org/10.14359/10297>
- [21] Christopher, Y., Tuan, M.: Flexural Behavior of Nonposttensioned and Posttensioned Concrete-filled Circular Steel Tubes. *Journal of Structural Engineering*, pp. 1057-1060, 2008, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:6\(1057\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:6(1057))
- [22] Furlong, R.W.: Strength of steel-encased concrete beam-columns, *Journal of Structural Division, ASCE*, 93 (1967) ST5, pp. 113-124.
- [23] Gardner, J., Jacobson, R.: Structural behavior of concrete filled steel tubes, *ACI Journal of Structural Division*, 64 (1967) 38, pp. 404-413.
- [24] Ge, H.B., Usami, T.: Strength analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 30 (1994), pp. 607-612, [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0143-974X(94)90003-5)
- [25] Han, L.H.: *Concrete filled steel tubular structures*, Peking, China, China Science Press, (2000) [in Chinese]
- [26] Han, L.H.: Tests on stub columns of concrete-filled RHS sections, *Journal of Constructional Steel Research- An International Journal*, 58 (2002) 3, pp. 353-372, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00059-1)
- [27] Kato, B.: Column curves of steel-concrete composite concrete columns, *Research Report No. 1/97*, School of Civil Engineering, University of Technology Western Australia, 1997.
- [28] Kilpatrick, A.E., Rangan, B.V.: Tests on high-strength composite concrete columns, *Research Report No. 1/97*, School of Civil Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Western Australia (1997)
- [29] Matsui, C., Tsuda, K., Ishibashi, Y.: Slender concrete filled steel tubular columns under combined compression and bending, *Structural Steel. PSSC95, Fourth Pacific Structural Steel Conference, Steel-concrete composite structures*. 3 (1995), pp. 29-36.
- [30] O Shea, M.D., Bridge, R.Q.: Behaviour of thin-walled box sections with lateral restraint, *Department of Civil Engineering Research, The University of Sydney. report No. R.*, pp. 739, 1997.
- [31] Prion, H.G.L., Boehme, J.: Beam-column behaviour of steel tubes filled with high strength concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21 (1994), pp. 207-218, <https://doi.org/10.1139/I94-024>
- [32] Rangan, B.V., Joyce, M.: Strength of eccentrically loaded slender steel tubular columns filled with high-strength concrete, *ACI Structural Journal*, 89 (1991) 6, pp. 676-681, <https://doi.org/10.14359/4137>
- [33] Schneider, S.P.: Axially loaded concrete-filled steel tubes. *Journal of structural Engineering, ASCE*, 124 (1998) 10, pp. 1125-1138, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:10\(1125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:10(1125))
- [34] Shakir-Khalil, H., Mouli, M.: Further tests on concrete-filled rectangular hollow-section columns, *Structural Engineer*, 68 (1990) 20, pp. 405-413.
- [35] Tomii, M., Yashimaro, K., Morishita, Y.: Experimental studies on concrete filled steel tubular stub column under concentric loading, *Proceedings of the international colloquium on stability of structures under static and dynamic loads*, Washington, SSR/ASCE, pp. 718-741, 1977.
- [36] Uy, B.: Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 126 (2000) 3, pp. 341-352, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:3\(341\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:3(341))
- [37] Uy, B.: Strength of short concrete filled high strength steel box columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 57 (2001) 2, pp. 113-134, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(00\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(00)00014-6)
- [38] Varma, A.H., Ricles, J.M., Sause, R., Lu, L.W.: Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 58 (2002) 5-8, pp. 725-758, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00099-2](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00099-2)
- [39] Wang, Y.C.: Tests on slender composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 49 (1999), pp. 25-41, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00202-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00202-8)
- [40] Han, L.H., Huo, J.S.: Concrete-filled HSS columns after Exposure to ISO-834 standard fire, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 129 (2003) 1, pp. 68-78, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:1\(68\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:1(68))
- [41] Uy, B.: Concrete-filled fabricated steel box columns for multistory buildings: behaviour and design, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1 (1998) 2,99. 150-158, <https://doi.org/10.1002/pse.2260010207>
- [42] Han, L.H., Yao, Gh.: Effects of pre-stress in the steel tube on the behavior of concrete-filled steel tubular beam-columns, *China Journal of Civil Engineering*, 36 (2003) 4, pp. 8-18 [in Chinese].

- [43] Lu, Y.Q., Kennedy, D.J.L.: The flexural behaviour of concrete-filled hollow structural sections, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21 (1994) 1, pp. 111-130, <https://doi.org/10.1139/I94-011>
- [44] Elchalakani, M., Zhao, X.L., Grzebieta, R.H.: Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending, *Journal of Constructional Steel Research*, 57 (2001) 11, pp. 1141-1168, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00035-9)
- [45] Han, L.H., Lu, H., Yao, G.H., Liao, F.Y.: Further study on the flexural behaviour of concrete-filled steel tubes, *Journal of Constructional Steel Research*, 62 (2006), pp. 554-565, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.09.002>
- [46] Han, L.H.: Flexural Behaviour of Concrete-Filled Steel Tubes, *Journal of Constructional Steel Research*, 60 (2004), pp. 313-337, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2003.08.009>
- [47] Elchalakani, M., Zaho, X.L., Grzebieta, R.: Concrete-filled steel circular tubes subjected to constant amplitude cyclic pure bending, *Engineering Structures*, 26 (2004), pp. 2125-2135, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.07.012>
- [48] Liao, F.Y., Han, L.H., He, Sh. H.: Behavior of CFST Short Column and Beam with Initial Concrete Imperfection: Experiments, *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (2011), pp. 1922-1935, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.06.009>
- [49] Uenaka, K., Kitoh, H.: Mechanical behavior of concrete filled double skin tubular circular deep beams, *Thin-Walled Structures*, 49 (2011) 2, pp. 256-263, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.10.005>
- [50] Kang, J.Y., Choi, E.S., Chin, W.J., Lee, J.W.: Flexural Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Members and Its Applications, *Steel Structures*, 7 (2007), pp. 319-324.
- [51] Kim, Y.H., You, S.K., Jung, J.H., Yoon, S.J.: Strengthening Effects of the Shear Key on the Flexural Behavior of Concrete Filled Circular Tube, *Steel Structures*, 6 (2006), pp. 183-190.
- [52] Hosaka, T., Umehara, T., Nakamura, S., Nishiumi, K.: Design and experiments on a new railway bridge system using concrete filled steel pipes, ASCCS seminar, Concrete filled steel tubes, A comparison of international codes and practice, Innsbruck, Austria, pp. 367-372, 1997.
- [53] Nakamura, S., Momiyama, Y., Hosaka, T., Homma, K.: New technologies of steel/concrete composite bridges, *Journal of civil engineering*, 58 (2002), pp. 99-130, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00030-X)
- [54] Tomii, M., Sakino, K.: Experimental studies on the ultimate moment of concrete filled square steel tubular beam-columns, *Translation AIJ*, 275 (1979), pp. 55-65, https://doi.org/10.3130/aijsaxx.275.0_55
- [55] Architectural Institute of Japan (AIJ). Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures, 1997
- [56] British Standard Institute: BS 5400. Part 5, Concrete and composite bridges, 1979.
- [57] Eurocode 4. Design of Composite steel and concrete structures, part 1.1: general rules and rules for buildings (together with United Kingdom National Application Document). DD ENV 1994-1-1, London W1A2BS, British Standards Institution, 1994.
- [58] AISC. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings, Chicago, American Institute of Steel Construction Inc, 1999.
- [59] Tuan, C.Y.: Aurora arch bridge-confined concrete system speeds construction of walkway span, *Concrete International*, 26 (2004) 4, pp. 64-67.
- [60] Nematzadeh, M., Naghipour, M.: Compressing fresh concrete technique and the effect of excess water content on physical-mechanical properties of compressed concrete, *Materials and Design*, 37 (2012), pp. 256-267, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.12.051>
- [61] Nematzadeh, M., Naghipour, M.: Compressive strength and modulus of elasticity of freshly compressed concrete, *Construction and Building Materials*, 34 (2012), pp. 476-485, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.055>
- [62] Naghipour, M., Nematzadeh, M., Jalali, J., Salari, A., Nemati, S.T.: Hardened density of freshly compressed concrete and its effect on mechanical properties, *European journal of environment and civil engineering*, 19 (2015) 6, pp. 733-755, <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.968743>
- [63] AISC: American Institute of Steel Construction, *Steel construction manual*, 13th Ed. Chicago, 2005.
- [64] Iranian concrete code. Management and Planning Organization of I.R. Iran, Technical Activities and Code Development Section, "Iranian Concrete Code (ABA)", Second Section, Second Edition, MPOrg Press, 1999.
- [65] ASTM A370-10: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA.) www.astm.org, 2010.
- [66] ACI 318: Building code requirements for structural concrete and commentary, American concrete institute, Farmington Hills. Mi. USA, 2014.
- [67] Eurocode 2: Design of concrete structures, part 1.1: general rules and rules for building, European committee for standardization, Brussels, Belgium, 2004.