Primljen / Received: 23.7.2019.
Ispravljen / Corrected: 31.10.2019.
Prihvaćen / Accepted: 10.5.2020.
Dostupno online / Available online: 10.6.2022.

Seizmičko ponašanje spregnutih posmičnih stijena s AB okvirom ojačanim čelikom i ugrađenom perforiranom čeličnom pločom

Autori:

Dr.sc. **Zhongyi Zhou**, dipl.ing.građ.
Kineska uprava za potrese
Glavni laboratorij za potresno inženjerstvo i vibracije, Institut za tehničku mehaniku
zzyhui@163.com

Prof.dr.sc. **Wanlin Cao**, dipl.ing.građ.
Sveučilište tehničkih znanosti u Beijingu, Kina
Građevinski fakultet
wlcao@bjut.edu.cn

Dr.sc. **Yan Liu**, dipl.ing.građ.
Sveučilište sjeverne Kine za znanost i tehnologiju
Arhitektonski fakultet
liuyan66166@163.com

Dr.sc. **Jianhua Li**, dipl.ing.građ.
Tehnički fakultet Huzhou, Kina
Institut građevinarstva
xjbnljh@126.com
Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Zhongyi Zhou, Wanlin Cao, Yan Liu, Jianhua Li

Seizmičko ponašanje spregnutih posmičnih stijena s AB okvirom ojačanim čelikom i ugrađenom perforiranom čeličnom pločom

U radu se ispituje pet uzoraka posmičnih stijena raznih dimenzijskih i konstrukcijskih karakteristika kako bi se istražilo seizmičko ponašanje spregnute posmične stijene s armiranobetonskim okvirom ojačanim čelikom i ugrađenom perforiranom čeličnom pločom. Osim toga, niskociklično opterećenje se nanosi na uzorke s koeficijentom posmične zone od 1,5. Eksperimentalni podaci koriste se za analizu nosivosti, krutosti, duktilnosti, histerezne energije i karakteristika otkazivanja spomenutih uzoraka. Rezultati pokazuju da se spregnuta posmična stijena s armiranobetonskim okvirom ojačanim čelikom i ugrađenom čeličnom pločom odlikuje većom nosivošću, boljom duktilnošću, sporijim padom krutosti te većom sposobnošću rasapa energije u usporedbi s običnim armiranobetonskim posmičnim zidom. Osim toga, primjenom ugrađenih čeličnih ploča odgovarajuće debljine poboljšava se i seizmičko ponašanje spregnutih posmičnih stijena. Analizom čeličnih ploča iste debljine utvrđeno je da se uzorci s čeličnim vezicama seizmički bolje ponašaju od uzoraka sa zavarenim svornjacima. U završnom je dijelu razvijen računalni model za izračunavanje nosivosti CSW-a. Usporedba pokazuje dobru podudarnost rezultata proračuna i rezultata dobivenih mjerenjem.

Ključne riječi:
armiranobetonski okvir ojačan čelikom, ugrađena čelična ploča, spregnuta posmična stijena, seizmičko ponašanje, proračun nosivosti

Research Paper

Zhongyi Zhou, Wanlin Cao, Yan Liu, Jianhua Li

Seismic behaviour of composite shear wall with steel reinforced concrete frame and embedded perforated-steel plate

Experiments are conducted on five shear wall specimens of varying design and structural measures in order to investigate seismic behaviour of a composite shear wall with the steel-reinforced concrete frame and an embedded perforated-steel plate. In addition, low-cyclic load is applied on test specimens that have a shear span ratio of 1.5. Using the experimental data, the bearing capacity, stiffness, ductility, hysteretic energy, and failure characteristics of five specimens are analysed. The results show that the composite shear wall (CSW) with the steel reinforced concrete frame (SRCF) and embedded steel plate (ESP) has higher bearing capacity, better ductility, slower degradation of stiffness, and higher energy dissipation capacity, as compared to an ordinary reinforced concrete shear wall. Moreover, its seismic behaviour can be improved by using the ESP of an appropriate thickness. For the ESPs of identical thickness, the results show that the specimen that uses steel ties exhibits better seismic behaviour than those using welding studs. Finally, a computing model that can calculate the bearing capacity of the CSWs is developed. A comparison of calculated and measured results shows that the results are close to each other.

Key words:
steel reinforced concrete frame, embedded steel plate, composite shear wall, seismic behaviour, bearing capacity calculation

1. Uvod

U područjima visoke seizmičnosti, posmične stijene s čeličnom ispunom (eng. *steel plate shear walls* - SPSW) značajan su sustav za bočno preuzimanje opterećenja kod visokih i vrlo visokih građevina, i to prije svega zbog njihove visoke inicijalne krutosti, visoke sposobnosti deformiranja, zadovoljavajuće plastičnosti i stabilnih histereznih svojstava [1-4]. Međutim, u slučaju tradicionalnih nepridržanih SPSW-a, horizontalno opterećenje lako može uzrokovati izbočivanje, pad krutosti kao i ozbiljno suženje histerezne petlje. Takve pojave mogu umanjiti sposobnost SPSW stijena u pogledu rasapa energije. Neki su istraživači proveli eksperimentalne studije i teoretske analize izbočivanja SPSW-a. S.J. Chen je istraživao utjecaj odnosa širine i debljine ploča od čelika s niskom granicom popuštanja na njihovo izbočivanje uslijed posmika [5]. M. Elgaaly je opisao analitičke modele kojima se može točno predvidjeti ponašanje posmičnih stijena u postkritičnoj domeni, i to za slučaj kako monotonih tako i cikličnih opterećenja [6]. K.C. Tsai je prikazao eksperimentalne i analitičke rezultate za četiri velike posmične stijene s čeličnom ispunom (SPSW). Tijekom tih ispitivanja, provedenih u Državnom centru za seizmička istraživanja (eng. *National Centre for Research on Earthquake Engineering* - NCREE), utvrđeno je da predložena pridržanja djelotvorno smanjuju magnitudu zvuka uslijed izbočivanja te izbočivanje SPSW stijena u slučaju velikih međukatnih pomaka [7]. Gui i dr. analizirali su SPSW stijene sa spriječenim izbočivanjem kako bi odredili njihovo elastično ponašanje i krutost pridržane betonske ploče [8]. Na temelju eksperimenata s nanošenjem niskocikličnog opterećenja, Lu i dr. analizirali su karakteristike i modelirali povratne sile armiranobetonskih posmičnih stijena s čeličnim pločama. Uz to su razvili i jednadžbe za izračunavanje otpornosti na posmik [9]. Sun i dr. istraživali su oblike posmičnog otkazivanja, krajnju nosivost i duktilnost spregnutih armiranobetonskih posmičnih stijena s čeličnim pločama izvedenih s raznim tipovima spojeva. Oni su razvili i jednadžbe za izračunavanje posmične otpornosti spregnutih posmičnih stijena pridržanih u posmičnom presjeku [10]. Na temelju kvazistatičkog ispitivanja, Jiang i dr. proveli su analizu spregnutih posmičnih stijena sa skrivenim stupovima obostrano postavljenima te sa centrično ugrađenom čeličnom pločom. Oni su također analizirali i nosivost, histerezno ponašanje, deformabilnost i oblike otkazivanja svakog uzorka. Uz to, razni istraživači proveli su eksperimentalne studije i teoretske analize cjelokupnog seizmičkog ponašanja spregnutih posmičnih stijena sa stupovima od čeličnih cijevi ispunjenih betonom te s ugrađenim čeličnim pločama [11-16]. S. M. Tian je ispitivao metodu proračuna u kojoj su posmični vijci korišteni u spregnutim armiranobetonskim posmičnim stijenama ojačanima čeličnim pločama [17].

U spomenutim studijama naglasak se stavlja na cjelokupno seizmičko ponašanje spregnutih armiranobetonskih posmičnih stijena s ugrađenim čeličnim elementima. U njima se ipak rijetko istražuje utjecaj debljine ploče i način spajanja čelične ploče i betona na seizmičko ponašanje spregnutih posmičnih stijena s armiranobetonskim okvirom ojačanim čelikom i s ugrađenom čeličnom pločom. Stoga se u ovom radu razmatra spregnuta posmična stijena sastavljena od AB okvira ojačanog čelikom, ugrađene perforirane čelične ploče i betona. Armatura je postavljena okomito i uzdužno na obje strane ugrađene čelične ploče. Za spajanje armirajuće strukture koriste se čelične vezice koje se provlače kroz otvore u ploči. Na taj način spregnuta posmična stijena koristi prednosti kako AB okvira ojačanog čelikom tako i posmične stijene s čeličnom pločom. S jedne strane, otvori na ploči mogu se koristiti za podešavanje omjera krutosti ugrađene čelične ploče i okvira kako bi se izbjegao pad krutosti u histereznoj petlji elemenata čelične stijene povećavajući i razinu sigurnosti. S druge strane, provlačenjem vezica kroz otvore mogu se spojiti dvije armaturne mreže, čime se povećava integritet konstrukcije. U radu se ispituje pet uzoraka na koje se nanosi niskociklično opterećenje. Na temelju rezultata ispitivanja sustavno se analizira utjecaj raznih proračunskih parametara i konstrukcijskih mjera (s raznim vrstama spojeva) na seizmičko ponašanje spregnutih posmičnih stijena s armiranobetonskim okvirima ojačanim čelikom i s ugrađenim čeličnim pločama. Rezultati provedenih analiza mogu se u inženjerskoj praksi koristiti kao tehnička podrška za ovu vrstu konstrukcija.

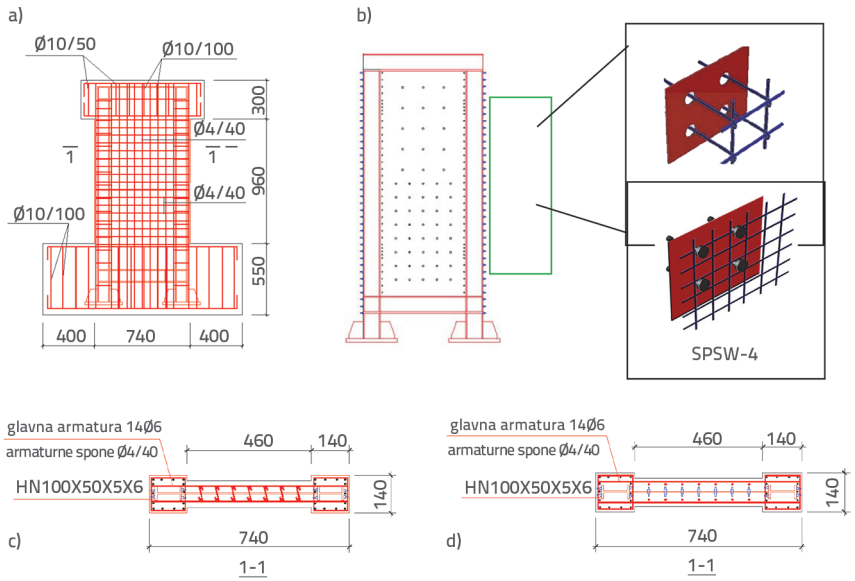
2. Eksperimenti

2.1. Dimenzioniranje uzoraka

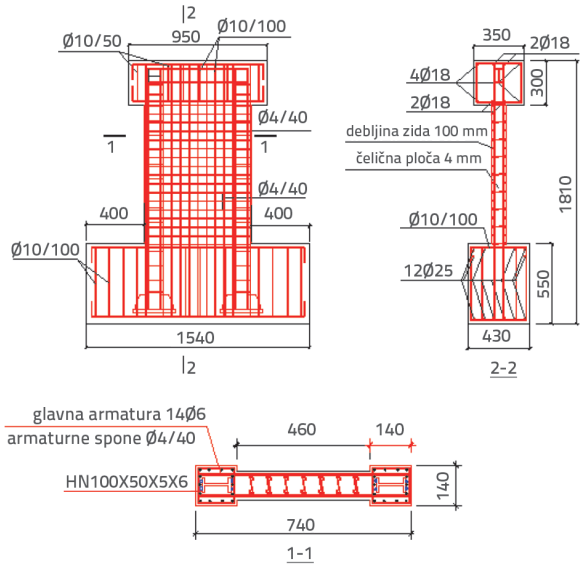
Uzorci su jednakih dimenzija a izvedeni su u mjerilu 1 : 5. Debljina uzoraka iznosi 100 mm a visina 1810 mm, s ukupnom visinom presjeka od 740 mm, od čega svijetla visina zida iznosi 460 mm. Uzorci su podijeljeni u tri skupine. U prvu skupinu ulaze tri uzorka spregnutih posmičnih stijena s AB okvirom ojačanim čelikom i s ugrađenom perforiranom čeličnom pločom (posmična stijena s otvorima skrivenima unutar presjeka armiranobetonskog okvira ojačanog čelikom). Debljina ugrađene perforirane čelične ploče iznosi 2 mm (uzorak SPSW-1), 4 mm (uzorak SPSW-2) i 6 mm (uzorak SPSW-3). Ugrađene perforirane čelične ploče s vanjskim su betonom spojene čeličnim vezicama, a taj se postupak provodi u nekoliko koraka. Najprije se u čeličnoj ploči izvode otvori promjera 10 mm. Zatim se kroz te otvore provlače čelične vezice kako bi se armirajuća struktura učvrstila s jedne i druge strane ploče. Čelične vezice zapravo su čelične šipke Ø12 koje se spajaju na pozicijama otvora. Razmak vezica iznosi 120 mm na gornjoj polovici ploče, tj. 80 mm na donjoj polovici ploče. U drugoj se skupini nalazi samo jedan uzorak spregnute posmične stijene s armiranobetonskim okvirom ojačanim čelikom i s ugrađenom čeličnom pločom (uzorak SPSW-4). Ugrađena čelična ploča debljine 4 mm usidrena je u armirani beton pomoću svornjaka koji su zavareni na ploču. Svornjaci su vijci M3 i postavljaju se na svakih 40 mm. S vanjske strane svornjaka nalazimo obične čelične mreže. U treću skupinu također ulazi samo jedan uzorak spregnute posmične stijene s AB okvirom ojačanim čelikom i s običnim armiranim betonom (uzorak RCSW-5) [18]. Slike 1. i 2. prikazuju geometrijske dimenzije i ugrađenu armaturu za pet analiziranih uzoraka.

Tablica 1. Mehanička svojstva armature i čeličnih komponenata korištenih u ispitivanjima

Čelične komponente	Granica popuštanja [GPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Duktilnost [%]	Modul elastičnosti [GPa]
Čelična ploča debljine 2 mm	221,5	359,7	27,3	206
Čelična ploča debljine 4 mm	273,8	406,3	23,4	203
Čelična ploča debljine 6 mm	278,2	405,5	24,4	209
Čelični „H" element	315,0	450,0	31,5	191
Armatura Ø6	536,0	591,0	30,0	177
Pocinčana čelična žica Ø3	206,5	241,5	11,5	196
Pocinčana čelična žica Ø4	343,5	390,0	20,7	196
Hladno vučena armatura Ø4	669,0	836,0	7,5	206



Slika 1. Prikaz uzoraka SPSW-1, SPSW-2, SPSW-3 i SPSW-4: a) Geometrijske dimenzije i postavljena armatura; b) Ugrađena čelična ploča; c) Presjek 1-1 za SPSW-1, SPSW-2 i SPSW-3; d) Presjek 1-1 za SPSW-4



Slika 2. Geometrijske dimenzije i postavljena armatura uzoraka RCSW-5

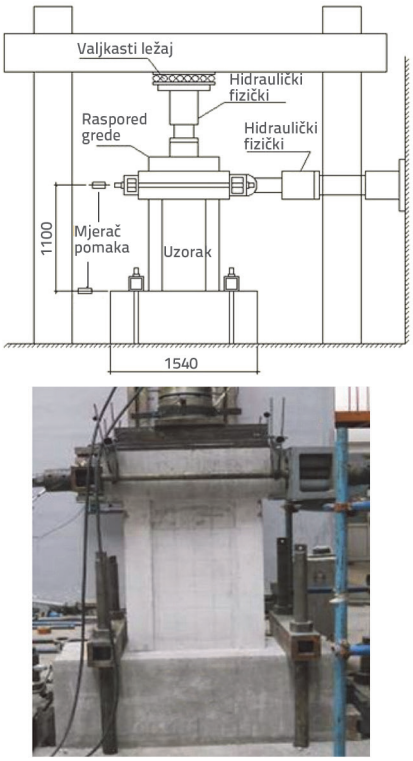
2.2. Mehanička svojstva

Izmjerena tlačna čvrstoća betonskih kocaka uzoraka SPSW-1 i SPSW-4 iznosi 46,7 MPa a modul elastičnosti iznosi 31,3 GPa. Izmjerena tlačna čvrstoća betonskih kocaka uzoraka SPSW-2, SPSW-3 i RCSW-5 iznosi 48,1 MPa, a njihov modul elastičnosti iznosi 32,8 GPa. Mehanička svojstva armature i čeličnih komponenata korištenih u ispitivanjima prikazana su u tablici 1.

2.3. Nanošenje opterećenja u toku eksperimenata

Postav ispitivanja opterećenja prikazan je na slici 3. Ispitivanja su provedena kombiniranjem unosa opterećenja kontroliranog silom i kontroliranog pomakom, tj. opterećenje je kontrolirano silom prije , a pomakom nakon popuštanja uzoraka. Horizontalno ciklično opterećenje nanošeno je pomoću hidrauličkog aktuatora, a hidrauličke preše korištene su za nanošenje vertikalnog opterećenja. U elastičnom području, horizontalno ciklično opterećenje povećavano je u koracima od po 20 kN, uz jedno ponavljanje na svakom stupnju. Na svakoj razini opterećenja, ciklično se opterećenje sastojalo od pozitivnog i negativnog opterećenja. Nakon što je uzorak ušao u plastično područje, opterećenje je nanošeno do pomaka pri dosezanju granice popuštanja Δy ili do vrijednosti od 0,5 Δy. Na početku eksperimenta na uzorke je nanošeno trajno vertikalno opterećenje od 870 kN, uz razinu uzdužnog tlaka od 0,45. Zatim su na raznim razinama nanošena niskociklična bočna opterećenja.

Sustav za prikupljanje podataka IMP korišten je za pohranjivanje rezultata dobivenih vrijednosti sila, pomaka i relativnih deformacija. Sustav je također automatski crtao histerezne krivulje opterećenje-pomak. Pukotine na uzorku definirane su i opisivane ručnim postupkom.



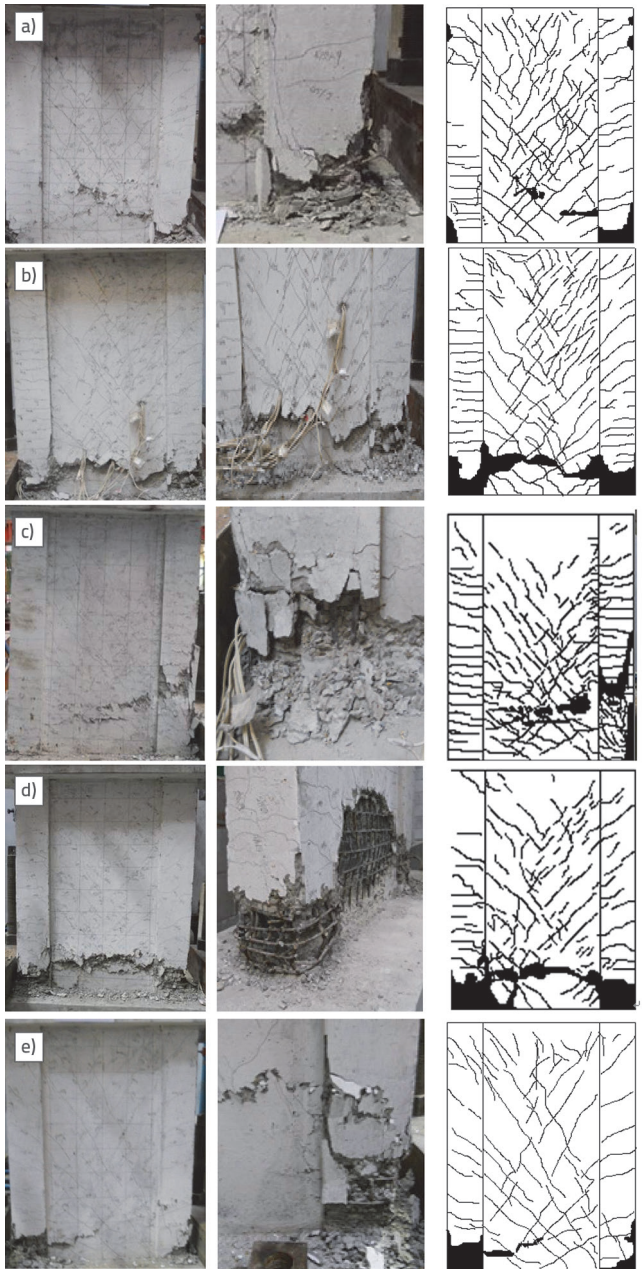
Slika 3. Postav eksperimentalnog ispitivanja: shema ispitivanja (gore), prikaz uzorka pri ispitivanju (dolje)

3. Rezultati i rasprava

3.1. Rezultati ispitivanja

Mehanizmi otkazivanja pet analiziranih uzoraka prikazani su na slici 4. Može se uočiti sljedeće:

1. U usporedbi s AB posmičnom stijenom (RCSW-5), pukotine u spregnutoj posmičnoj stijeni s armiranobetonskim okvirom ojačanim čelikom i s ugrađenom čeličnom pločom (SPSW-1, 2, 3 i 4) su dijagonalne, ravnomjernije raspoređene i relativno slabo razvijene. U uzorku (SPSW-2) u kojem se kao posmični spoj koriste čelične vezice, pukotine su gušće i rasprostranjenije u odnosu na pukotine u uzorku u kojem se kao spoj koriste zavareni svornjaci.
2. Kod svih pet uzoraka, do tlačnog sloma u početku dolazi na dnu betonskih bočnih stupova i to s vanjske strane. Općenito uzevši, vertikalne se pukotine najprije javljaju na vanjskoj strani bočnih stupova, nakon čega dolazi do ljuštenja vanjskog betona. Zatim dolazi do savijanja uzdužne armature, a nakon toga slijedi izvijanje čeličnih pojasnica te do širenja pukotina. Na kraju dolazi do drobljenja čitavog poprečnog presjeka betona što dovodi do otkazivanja uzorka.
3. S povećanjem debljine ugrađene čelične ploče uočava se tendencija pomicanja pukotina prema donjim i srednjim segmentima stijene. Drobljenje betona se postupno širilo prema gore sve do otprilike trećine visine stupa (slike 4.a do 4.c). U srednjim dijelovima stupova dolazi do dodatnog opterećenja uslijed djelovanja vlačnih sila koje generira ugrađena čelična ploča. Ta pojava negativno djeluje na nosivost ugrađene čelične ploče.
4. Pukotine koje se vide na slici 4.b malo su gušće i ravnomjernije raspoređene od pukotina koje se uočavaju na slici 4.d, iako se i jedne i druge šire prema istom obrascu prostiranja.



Slika 4. Načini otkazivanja analiziranih uzoraka: a) SPSW-1; b) SPSW-2; c) SPSW-3; d) SPSW-4; e) SPSW-5

3.2. Nosivost

Tablica 2. prikazuje vrijednosti opterećenja pri raspucavanju, opterećenja pri popuštanju i karakterističnog opterećenja, koje su izmjerene na pet analiziranih uzoraka. U usporedbi s

Tablica 2. Vrijednosti opterećenja pri raspucavanju, prividnog opterećenja pri popuštanju i graničnog opterećenja izmjerene za pet analiziranih uzoraka

Uzorci	Opterećenje pri raspucavanju, F_c [kN]	F_c Relativna magnituda	Opterećenje pri popuštanju, F_y [kN]	F_y Relativna magnituda	Krajnje opterećenje, F_u [kN]	F_u Relativna magnituda
SPSW-1	150,5	1,03	469,2	1,33	706,5	1,23
SPSW-2	201,9	1,38	604,0	1,72	782,2	1,36
SPSW-3	155,1	1,06	624,4	1,77	772,5	1,34
SPSW-4	206,4	1,41	552,9	1,57	763,2	1,33
RCSW-5	146,7	1,00	352,0	1,00	574,6	1,00

F_c - opterećenje pri raspucavanju, F_y - opterećenje pri popuštanju, F_u - krajnje opterećenje, μ_{yu} - koeficijent popuštanja (F_y / F_u).

Tablica 3. Reprezentativni rasap energije za pet analiziranih uzoraka

Uzorak	**EP** [kNmm]	**Δ**
SPSW-1	27463	1,78
SPSW-2	35510	2,30
SPSW-3	22186	1,44
SPSW-4	32768	2,12
RCSW-5	15426	1,00

EP je reprezentativni rasap energija, a **Δ** je relativni rasap energije uzorka, tj, odnos između reprezentativnog rasapa energije spregnute posmične stijene s AB okvirom ojačanim čelikom i s ugrađenom čeličnom pločom i spregnute posmične stijene s AB okvirom ojačanim čelikom i običnim armiranim betonom.

vrijednostima za RCSW-5, kod uzoraka SPSW-1, SPSW-2, SPSW-3 i SPSW-4 opterećenje pri raspucavanju veće je za (redom) 3 %, 38 %, 6 % i 41 %, opterećenje pri popuštanju veće je za (redom) 33 %, 72 %, 77 % i 57 %, a krajnje opterećenje veće je za (redom) 23 %, 36 %, 34 % i 33 %. Osim toga, uzorak SPSW-2 ima najvišu krajnju nosivost kod četiri uzorka spregnute posmične stijene s čeličnim okvirom ojačanim čelikom i s ugrađenom čeličnom pločom. To nam govori da debljina ugrađene čelične ploče utječe na nosivost spregnute posmične stijene, iako nosivost nije proporcionalna s debljinom ploče. Drugim riječima, primjenom ploče odgovarajuće debljine može se poboljšati seizmičko ponašanje spregnutih posmičnih stijena. Osim toga, uzorak posmične stijene s ugrađenom perforiranom čeličnom pločom (EPSP), uzorak SPSW-2, ima nešto višu krajnju nosivost od uzorka SPSW-4 s ugrađenom čeličnom pločom u kojem se koriste zavareni svornjaci. Dakle, konstrukcija s čeličnim vezicama u ugrađenoj perforiranoj čeličnoj ploči čvršća je od konstrukcije sa zavarenim svornjacima.

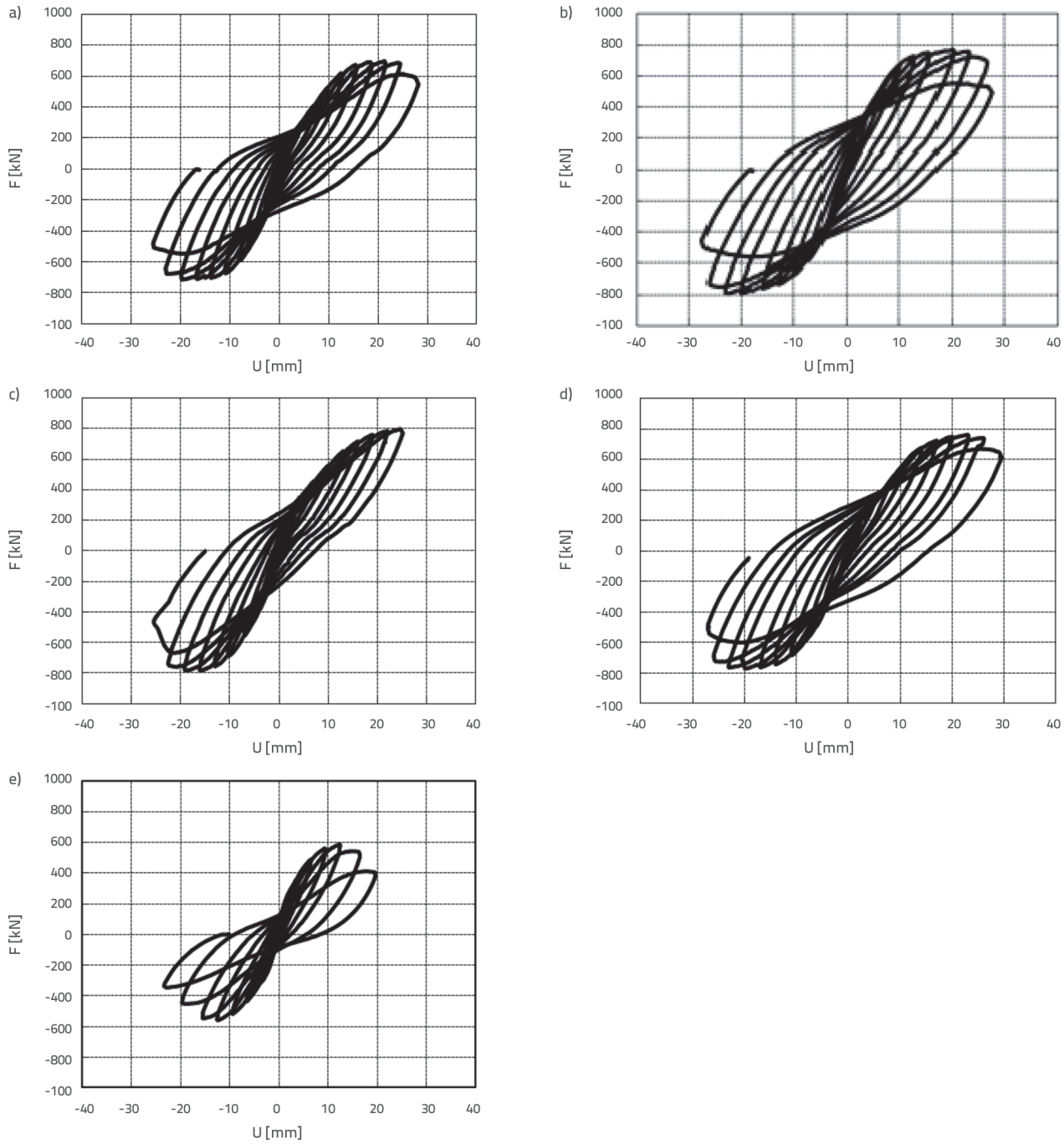
Opterećenje pri raspucavanju označava vrijednost opterećenja koja odgovara krivulji opterećenja – pomaka (skeletna krivulja) kada se skup ravnomjerno raspoređenih i sitnih pukotina prvi put pojavi u određenom rasponu stijena, a na skeletnoj se krivulji bilježi nagla promjena.

3.3. Histereza i rasap energije

Slika 5. prikazuje histerezne krivulje za pet analiziranih uzoraka. U usporedbi s RCSW-5, histerezne petlje su kod SPSW-1, SPSW-2, SPSW-3 i SPSW-4 šire i pokrivaju veće područje. To pokazuje da spregnute posmične stijene s ugrađenom čeličnom pločom imaju veću sposobnost rasapa energije. Uz to je histerezna petlja uzorka SPSW-2 najšira i pokriva najveće područje. To znači da se seizmičko ponašanje spregnutih posmičnih stijena s AB okvirom ojačanim čelikom i ugrađenom čeličnom pločom može poboljšati ako se koristi ploča odgovarajuće debljine. U usporedbi sa SPSW-4, uzorak SPSW-2 ima nešto veću nosivost, širu histereznu petlju te veću sposobnost rasapa energije. To upućuje na bolje seizmičko ponašanje uzoraka s čeličnim vezicama u ugrađenim perforiranim čeličnim pločama u odnosu na ugrađene čelične ploče u kojima se koriste zavareni svornjaci.

U tablici 3. daje se prikaz reprezentativnog rasapa energije za pet analiziranih uzoraka. Područje obuhvaćeno vanjskom histereznom krivuljom definira se kao područje reprezentativnog rasapa energije. Dakle, reprezentativni rasap energije samo je dio stvarnog rasapa energije.

Kao što se vidi iz tablice 3., vrijednosti rasapa energije za SPSW-1, SPSW-2, SPSW-3 i SPSW-4 veće su za 78 %, 130 %,



Slika 5. Histerezne krivulje za pet analiziranih uzoraka: a) SPSW-1; b) SPSW-2; c) SPSW-3; d) SPSW-4; e) SPSW-5

44 % i 112 % od odgovarajuće vrijednosti za RCSW-5. Uzorci s pločom debljine 4 mm (SPSW-2 i SPSW-4) odlikuju se većom sposobnošću rasapa energije. Dakle, seizmičko ponašanje spregnutih posmičnih stijena s AB okvirom ojačanim čelikom i s ugrađenom čeličnom pločom može se poboljšati ako se koristi ugrađena čelična ploča odgovarajuće debljine, iako seizmičko ponašanje nije u potpunosti povezano s debljinom. Osim toga, u usporedbi s uzorkom SPSW-4, uzorak SPSW-2 ima veću sposobnost rasipanja energije. To znači da je seizmičko ponašanje uzoraka s čeličnim vezicama u ugrađenoj perforiranoj čeličnoj ploči povoljnije u odnosu na uzorke u kojima se koriste zavareni svornjaci.

3.4. Osnovna krivulja i duktilnost

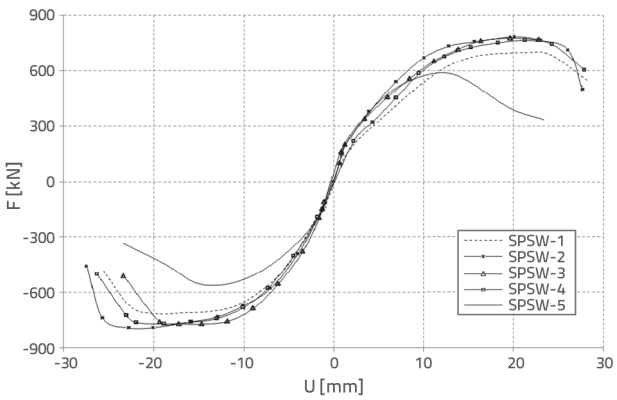
U tablici 4. prikazan je pomak pri raspucavanju, pomak pri popuštanju i krajnji pomak za pet analiziranih uzoraka. U usporedbi s RCSW-5, pomaci pri raspucavanju uzoraka SPSW-1,

Tablica 4. Vrijednosti pomaka pri raspucavanju, pomaka pri popuštanju i krajnjeg pomaka za pet analiziranih uzoraka

Uzorak	Pomak pri raspucavanju Uc [mm]	Relativna vrijednost Uc	Pomak pri popuštanju Uy [mm]	Relativna vrijednost Uy	Maksimalni elastoplastični pomak Ud [mm]	Relativna vrijednost Ud	μ	Relativne vrijednosti μ	θ_p
SPSW-1	1,26	0,91	6,74	1,27	26,46	1,53	3,93	1,21	1/42
SPSW-2	1,57	1,14	7,28	1,37	26,96	1,55	3,70	1,13	1/41
SPSW-3	1,24	0,90	8,74	1,64	22,60	1,30	2,59	0,79	1/49
SPSW-4	1,69	1,22	7,89	1,48	25,53	1,47	3,24	0,99	1/43
RCSW-5	1,38	1,00	5,32	1,00	17,35	1,00	3,26	1,00	1/64

Uc - pomak pri raspucavanju koji odgovara opterećenju pri raspucavanju Fc, Uy - pomak pri popuštanju koji odgovara opterećenju pri popuštanju Fy, Ud - maksimalni elastoplastični pomak koji odgovara graničnom opterećenju spuštenom na 85 %, θp - kut elastoplastičnog pomaka (Ud / H), H - udaljenost od vrha stope do središta grede za unos opterećenja, μ - koeficijent duktilnosti (Ud / Uy).

SPSW-2, SPSW-3 i SPSW-4 približno su jednaki, pomaci pri popuštanju veći su za 27 %, 37 %, 64 % i 48 %, a maksimalni elastoplastični pomaci veći su za 53 %, 55 %, 30 % i 47 %. Kod četiri uzorka s ugrađenom čeličnom pločom, koeficijent duktilnosti postupno se smanjuje s povećanjem debljine čelične ploče. To znači da krutost raste a deformabilnost uzoraka se smanjuje usporedo s povećanjem debljine ploče. Kutovi elastoplastičnog pomaka uzoraka SPSW-1, SPSW-2 SPSW-3 i SPSW-4 veći su od 1/50, dok taj kut kod uzorka RCSW-5 iznosi 1/64, što znači da spregnute posmične stijene s AB okvirom ojačanim čelikom i s ugrađenom čeličnom pločom imaju veću duktilnost i sposobnost elastoplastičnog deformiranja u odnosu na obične AB posmične zidove. U usporedbi s SPSW-4, uzorak SPSW-2 ima veći koeficijent duktilnosti, iako su im vrijednosti krajnjeg pomaka podjednake. To pokazuje da je konstrukcija s čeličnim vezicama u ugrađenoj čeličnoj ploči čvršća od konstrukcije u kojoj se koriste zavareni svornjaci.

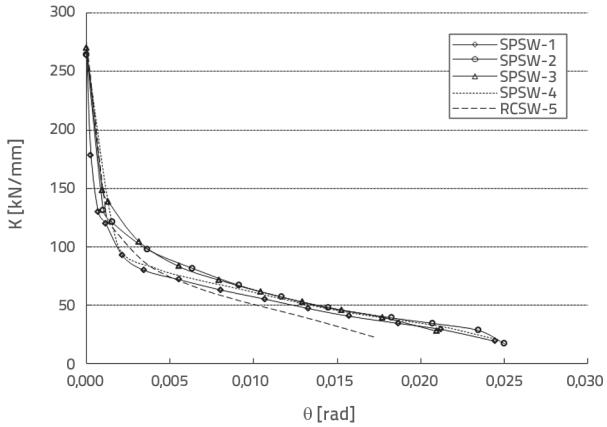


Slika 6. Osnovna krivulja

Kao što se vidi na slici 6., osnovna krivulja dobiva se spajanjem vršne točke na histereznoj krivulji u svakom ciklusu, što odražava promjene u pomaku uzorka u ovisnosti o opterećenju. U usporedbi s uzorkom RCSW-5, uzorci SPSW-1, SPSW-2, SPSW-3 i SPSW-4 imaju veću nosivost, manji pad krutosti, veći elastoplastični pomak, veću deformabilnost i značajno povoljnije seizmičko ponašanje. Osim toga, seizmičko ponašanje posmičnih stijena može se poboljšati ako se koristi odgovarajuća debljina ploče. To se može vidjeti na uzorcima SPSW-2 i SPSW-4 koji imaju nešto veću nosivost i duktilnost u odnosu na ostale uzorke. Vrijednosti nosivosti i duktilnosti uzorka SPSW-2 više su od odgovarajućih vrijednosti uzorka SPSW-4. To upućuje na povoljnije seizmičko ponašanje uzoraka u kojima se u ugrađenoj perforiranoj čeličnoj ploči koriste čelične vezice u odnosu na čelične ploče u kojima se koriste zavareni svornjaci. I, konačno, može se uočiti (npr. na slici 6.) da svi uzorci osim uzorka SPSW-5 imaju vrlo slične osnovne krivulje.

3.5. Pad krutosti

Tijekom ispitivanja opetovanim niskocikličnim opterećenjem, krutost uzoraka postupno se smanjuje usporedo s porastom broja ciklusa opterećenja. Kao što se može vidjeti na slici 7., trend promjena krutosti opisuje se krivuljom K - θ. Može se vidjeti da kod svih pet uzoraka, bez obzira na činjenicu da su vrijednosti njihovih inicijalnih krutosti podjednake, dolazi do postupnog pada krutosti, što dovodi do velikih krajnjih kutova pomaka. To pokazuje njihovu prikladnu duktilnost i veliku seizmičku otpornost. Osim toga, krutost uzoraka povećava se s povećanjem debljine ugrađenih čeličnih ploča. Nagib krivulje pada krutosti raste, što dovodi do pada duktilnosti. Uzorak SPSW-2 s ugrađenom čeličnom pločom debljine 4 mm odlikuje se relativno ravnom krivuljom pada krutosti, tj. krutost se prilično sporo smanjuje s porastom kuta pomaka. To znači da se seizmičko ponašanje posmičnih stijena može poboljšati ako se koristi ploča odgovarajuće debljine. Napomena: K na slici 7. je sekantna krutost na vrhu histerezne krivulje koja odgovara vršnom opterećenju u svakom ciklusu; θ je kut pomaka točke opterećenja pri vršnom opterećenju u svakom ciklusu.



Slika 7. Krivulje pada krutosti

4. Izračunavanje nosivosti spregnute posmične stijene

Eksperimentalni rezultati pokazuju da je otkazivanje savijanjem, uzrokovano velikom ekscentričnom tlačnom silom, glavni oblik otkazivanja analiziranih uzoraka. Kako uzorci otkazuju zbog savijanja, najznačajniji je zapravo moment savijanja na dnu stupova. U vlačnoj zoni, kako armatura i čelični profil u bočnom stupu dosežu granicu popuštanja, isto se stanje javlja i kod glavnine vertikalne armature i čelične ploče ugrađene u posmičnu stijenu. Osim toga, ugrađena čelična ploča može se smatrati vertikalno raspoređenom armaturom. Pri izračunavanju nosivosti spregnute posmične stijene, u obzir se uzima samo vlačna armatura i čelična ploča u određenom području unutar vlačne zone. To područje je udaljenost (h_w-1,5x) od ruba vlačne zone, gdje je hw ukupna visina poprečnog presjeka dok je x visina tlačne zone betona. Armatura i čelična ploča, koji se nalaze u blizini neutralne osi, mogu se zanemariti jer armatura preuzima manja naprezanja, a čelična ploča zauzima malu površinu. U tlačnoj se zoni vertikalno raspoređena armatura ne uzima zbog male površine poprečnog presjeka te sklonosti izvijanju. Međutim, u obzir se uzima tlačno naprezanje čelične ploče, koja je s obje strane omeđena vanjskim betonom, jer se smatra da do izvijanja ne dolazi prije popuštanja ploče. Do popuštanja armature u bočnom stupu pod tlakom i čelične ploče dolazi uslijed tlačnog naprezanja. Sljedeće su osnovne pretpostavke usvojene u proračunu nosivosti spregnutih posmičnih stijena:

- Poprečni presjek je ravan a vlačno djelovanje betona u vlačnoj zoni je zanemarivo.
- Krivulja naprezanje-deformacija betona u tlaku određena je prema sadašnjim propisima za projektiranje betonskih konstrukcija, tj. za parabolu vrijedi ε_c < 0,002 a za horizontalnu liniju se usvaja 0,002 ≤ ε_c <0,0033. Krajnja relativna deformacija betona u tlaku iznosi 0,0033 a standardna tlačna čvrstoća betona f_{ck} jednaka je maksimalnom tlačnom naprezanju.
- Armatura ima linearno elastični odnos naprezanje-deformacija prije popuštanja, a čvrstoća popuštanja odgovara naprezanju nakon popuštanja.

U proračunu se koriste izrazi od (1) do (8):

$$N = f_y' A_s' + f_a' A_a' - f_y A_s - f_a A_a' - N_{sw} - N_{aw} + N_c \tag{1}$$

$$N\left(e_0 + h_w - \frac{h_w}{2}\right) = f_y' A_s' \left(h_{w0} - a_s'\right) - M_{sw} - M_{aw} + M_c \tag{2}$$

$$N_c = f_c \left(b_c - b_w\right) h_c' + f_c b_w x \tag{3}$$

$$N_{sw} = \left(h_w - 1{,}5x - h_c\right) b_w f_{yw} \rho_w \tag{4}$$

$$N_{aw} = \left(h_w - 1{,}5x - h_c\right) t f_{aw} \tag{5}$$

$$M_c = f_c b_c' h_c' \left(h_{w0} - \frac{h_c}{2}\right) + f_c b_w \left(x - h_c'\right)\left(h_{w0} - \frac{h_c}{2} - \frac{x}{2}\right) \tag{6}$$

$$M_{sw} = \frac{1}{2}\left(h_w - 1{,}5x - h_c\right)^2 b_w f_{yw} \rho_w \tag{7}$$

$$M_{aw} = \frac{1}{2}\left(h_w - 1{,}5x - h_c\right)^2 t f_{aw} \tag{8}$$

gdje je x visina tlačne zone u zidu; f_{yw} je vlačna čvrstoća vertikalne armature raspoređene u zidu; f_y i f_y' su vlačna tj. tlačna čvrstoća uzdužne armature u bočnim stupovima; f_a i f_a' su vlačna, tj. tlačna čvrstoća čelika u bočnim stupovima; A_s i A_s' označavaju ukupne površine uzdužne vlačne, tj. tlačne armature u skrivenim bočnim stupovima; A_a i A_a' su ukupne površine vlačnog, tj. tlačnog čelika u bočnim stupovima; f_c je tlačna čvrstoća betona; N je uzdužna

Tablica 5. Usporedba izmjerenih i izračunanih vrijednosti nosivosti

Uzorak	Izmjerena nosivost [kN]	Proračunata nosivost [kN]	Relativna pogreška [%]
SPSW-1	706,48	695,75	-1,52
SPSW-2	782,18	745,31	-4,71
SPSW-3	772,54	795,41	2,96
SPSW-4	763,20	739,61	-3,09
RCSW-5	416,06	411,17	-1,18

sila; h_w i b_w označavaju ukupnu visinu poprečnog presjeka zida, tj. debljinu zida; h_c i h_c' označavaju visine poprečnih presjeka vlačnih tj. tlačnih bočnih stupova; e_0 je ekscentričnost; a_s i a_s' označavaju udaljenost od rezultantnih točaka uzdužne vlačne, tj. tlačne armature u bočnim stupovima pa do susjednog ruba poprečnog presjeka; h_{w0} je udaljenost od vanjskog ruba jedne strane posmičnog zida do središnje osi stupa na drugoj strani; a ρ_w je koeficijent armiranja za vertikalnu armaturu raspoređenu po posmičnom zidu.

Nosivost uzorka na horizontalnu silu izračunava se kako slijedi:

$$F = Ne_0 / H \tag{9}$$

$$e_0 = M / N \tag{10}$$

gdje je H udaljenost od točke unosa horizontalnog opterećenja do vrha stope modela.

Na temelju izmjerene čvrstoće armature i betona, tablica 5. prikazuje izračunane maksimalne nosivosti za pet analiziranih uzoraka. Usporedba proračunskih i izmjerenih vrijednosti nosivosti upućuje na dobru podudarnost rezultata (tablica 5.).

5. Zaključak

U usporedbi s običnim armiranobetonskim posmičnim stijenama, spregnute posmične stijene s AB okvirom ojačanim čelikom i ugrađenom čeličnom pločom karakterizira veća nosivost, povoljnija duktilnost, manji pad krutosti, veća sposobnost rasipanja energije te povoljnije seizmičko ponašanje. Iako seizmičko ponašanje spregnutih posmičnih stijena s AB okvirom ojačanim čelikom i ugrađenom čeličnom pločom nije proporcionalno s debljinom ugrađene čelične ploče, to se ponašanje ipak može poboljšati ugradnjom čelične ploče odgovarajuće debljine. Pri istoj debljini čelične ploče, uzorci s čeličnim vezicama odlikuju se boljim seizmičkim ponašanjem u odnosu na uzorke u kojima se koriste zavareni svornjaci. Na temelju rezultata ispitivanja izrađen je model za izračunavanje nosivosti spregnutih posmičnih stijena s AB okvirom ojačanim čelikom i ugrađenom čeličnom pločom. Usporedbom eksperimentalnih i proračunskih vrijednosti nosivosti utvrđena je dobra podudarnost tih rezultata. Također je utvrđeno da se proračunske vrijednosti nosivosti odlikuju visokom marginom sigurnosti.

Zahvala

Ovo istraživanje provedeno je uz potporu Znanstveno-istraživačkog fonda Instituta za tehničku mehaniku Kineske uprave za potrese (potpora br. 2016B10), Znanstvenotehnološkog fonda za mlade istraživače na visokim školama i sveučilištima u pokrajini Hebei (QN2019076) i Znanstvenoistraživačkog poticajnog fonda za postdoktorske istraživače u pokrajini Heilongjiang (potpora br. LBH-Q15146). Autori zahvaljuju na dodijeljenim potporama. Zhongyi Zhou je proveo ispitivanja i izvršio analize podataka. Wanlin Cao je predložio temu ovog rada i razvio eksperimentalna ispitivanja. Yan Liu je analizirao podatke dobivene tijekom ispitivanja, a Jianhua Li je proveo eksperimente i napisao ovaj rad.

LITERATURA

[1] Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.L., Elwi, A.E.: Cyclic test of four-story steel plate shear wall, Journal of Structural Engineering, 124 (1998) 2, pp. 112-120.

[2] Zhao, Q., Astaneh-Asl, A.: Cyclic behaviour of traditional and innovative composite shear walls, Journal of Structural Engineering, 130 (2004) 2, pp. 271-284.

[3] Rahai, A., Hatami, F.: Evaluation of composite shear wall behaviour under cyclic loadings, Journal of constructional steel research, 65 (2009) 7, pp. 1528-1537.

[4] Hossain, K.M.A., Wright, H.D.: Performance of double skin-profiled composite shear walls - experiments and design equations, Canadian Journal of civil engineering, 31 (2004) 2, pp. 204-217.

[5] Chen, S.J., Jhang, C.: Experimental study of low-yield-point steel plate shear wall under in-plane load, Journal of Constructional Steel Research, 67 (2011) 6, pp. 977-985.

[6] Elgaaly, M., Caccese, V., Du, C.: Postbuckling behaviour of steel-plate shear walls under cyclic loads, Journal of Structural Engineering, 119 (1993) 2, pp. 588-605.

[7] Tsai, K.C., Lin, Y.C., Lin, C.H.: Seismic responses and design of steel plate shear wall, Progress in Steel Building Structures, 9 (2007) 5, pp. 19-25.

[8] Guo, Y., Zhou, M., Dong, Q., Wang, X.: Experimental study on three types of steel plate shear walls under cyclic loading, Journal of Building Structures, 32 (2011) 1, pp. 17-29.

[9] Lu, X., Gan, C., Wang, W.: Study on seismic behaviour of steel plate reinforced concrete shear walls, Journal of Building Structures, 5 (2009), pp. 013.

[10] Sun, J.C., Xu, P.F., Xiao, C.Z., Sun, H.Z., Wang, C.K.: Experimental study on shear behaviour of steel plate-concrete composite wall, Building Structure, 6 (2008), Paper 002.

[11] Jiang, D.Q., Xiao, C.Z., Chen, T., Xu, P.F.: Experimental study of the compression-bending behaviour of highstrength concrete steel composite shear walls, China Civil Engineering Journal, 45 (2012) 3, pp. 17-25.

[12] Zhang, W.J., Cao, W.L., Dong, H.Y., Zhang J.W.: Performance of co-work between steel plate with studs and outer reinforced concrete in shear wall, Journal of Beijing University of Technology, 38 (2012) 6, pp. 828-834.

[13] Cao, W.L., Wang, Y., Dong, H.Y., Zhang, W.J.: Shaking table test study on shear walls with concrete-filled steel tube columns and embedded steel-plate, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 31 (2011) 2, pp. 75-81.

[14] Cao, W.L., Li, G., Zhang, J.W., Zhang, W.J., Geng, H.X.: Seismic behaviour of steel-plate shear walls with concrete filled steel tube columns and different ratio of height to sectional thickness of the walls, Journal of Beijing university of technology, 36 (2010) 8, pp. 1059-1068.

[15] Zhang, J.W., Cao, W.L., Dong, H.Y., Li, G., Zhang, W.J.: Experimental study on seismic performance of steel-plate shear walls with concrete filled steel tube columns and different constructional measures, Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 31 (2011) 4, pp. 450-456.

[16] Zhang, W.J., Cao, W.L., Dong, H.Y., Zhang, J.W., Xu, F.F.: Seismic test and analysis of embedded steel plate concrete shear walls in the exterior bay of a concrete filled square steel tube column frame, Structural engineers, 29 (2013) 1, pp. 130-135.

[17] Tian, S.M.: Rsearch on design method of shear studs in steel plate-concrete shear walls, Building Structure, 6 (2016), pp. 61-66+84.

[18] Code for design of composite structures. JGJ 138 - 2016, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC.