

Primljen / Received: 13.4.2025.

Ispravljen / Corrected: 27.7.2025.

Prihvaćen / Accepted: 30.8.2025.

Dostupno online / Available online: 10.11.2025.

Eksperimentalno istraživanje seizmičkog ponašanja adaptivnih prigušivača

Autori:

¹Dr. sc. **Xiaowei Yang**yxw43@163.com

Autor za korespondenciju

¹Mr. sc. **Yiqiong Zhang**z0611yq@163.com²Prof. dr. sc. **Kaihai Luo**nile-fisher@hotmail.com¹Mr. sc. **Cong Zhao**lmy3977@163.com¹Mr. sc. **Mengyuan Li**z7613c@163.com¹ Tehnološko sveučilište Zhongyuan, Kina
Fakultet inteligentne gradnje i građevinarstva² Kineska akademija za istraživanje u
građevinarstvu, Peking, Kina
Institut za istraživanje potresa u inženjerstvu

Prethodno priopćenje

Xiaowei Yang, Yiqiong Zhang, Kaihai Luo, Cong Zhao, Mengyuan Li

Eksperimentalno istraživanje seizmičkog ponašanja adaptivnih prigušivača

Kako bi se odgovorilo na izazove ireverzibilne plastične deformacije konstrukcija pri tradicionalnome projektiranju potresne otpornosti zgrada i znatnog smanjenja krutosti postojećih metalnih prigušivača, u ovome se radu predlaže adaptivni prigušivač s osloncem, temeljen na višestupanjskoj deformaciji uzrokovanoj savijanjem čelične ploče u obliku slova "X". Uvođenjem mehanizma kontakta predloženi adaptivni prigušivači omogućuju usklađeno trošenje energije čeličnih ploča u obliku slova "X" u različitim fazama, čime se postižu superpozicija krutosti i postupno popuštanje. Primjenom niskocikličkih ponovljenih pseudostatičkih ispitivanja i numeričkih simulacija konačnih elemenata sustavno su ispitana histerezna svojstva, obrasci smanjenja krutosti i kapaciteti trošenja energije uzoraka. Iz rezultata ispitivanja vidljivo je da s povećanjem pomaka adaptivni prigušivač uzastopno aktivira višestupanjske jedinice za trošenje energije, pri čemu histerezna krivulja pokazuje karakteristike više vrhova. Ekvivalentni koeficijent viskoznog prigušenja pokazuje stupnjevite promjene s povećanjem pomaka. Osim toga proces smanjenja krutosti uzrokovan je kontaktnim mehanizmom i slijedi naizmjenični razvoj obrazaca degradacije i poboljšanja kako bi se učinkovito uravnotežili zahtjevi za trošenjem energije i zadržavanjem krutosti. Ovo istraživanje pruža teorijsku osnovu za novi adaptivni uređaj za trošenje energije za projektiranje potresne otpornosti konstrukcija.

Ključne riječi:

adaptivni prigušivač, višestupanjsko trošenje energije, superpozicija krutosti, seizmičko ponašanje

Research Paper

Xiaowei Yang, Yiqiong Zhang, Kaihai Luo, Cong Zhao, Mengyuan Li

Experimental study on seismic performance of adaptive damper

To address the challenges of irreversible structural plastic deformation in traditional building seismic designs and the significant stiffness degradation of existing metal dampers, this study proposes an adaptive damper support based on multistage X-shaped steel plate bending deformation. By implementing a contact mechanism, the proposed adaptive damper enables the coordinated energy dissipation of X-shaped steel plates at different stages, thereby achieving stiffness superposition and staged yielding. Using low-cycle repeated pseudo-static tests and finite element numerical simulations, the hysteretic characteristics, stiffness degradation patterns, and energy dissipation capacities of the specimens were systematically investigated. The results demonstrate that as the displacement increases, the adaptive damper sequentially activates multi-stage energy-dissipating units, with the hysteretic curve exhibiting multi-peak characteristics. The equivalent viscous damping coefficient shows stage-wise fluctuations with increasing displacement. Further, the stiffness degradation process is triggered by the contact mechanism, and follows an alternating evolution pattern of degradation and enhancement to effectively balance the requirements for energy dissipation and stiffness retention. This study provides a theoretical basis for a novel adaptive energy-dissipating device for structural seismic designs.

Key words:

adaptive damper, multi-step energy dissipation, stiffness superposition, seismic performance

1. Uvod

Nosivost i mehanizam deformacije tradicionalnih građevinskih konstrukcija omogućuju im da izdrže potresne sile. Međutim, kao posljedica jakih potresa mogu se pojaviti znatne zaostale deformacije i oštećenja elemenata, što predstavlja ozbiljan izazov za obnovu i rekonstrukciju nakon potresa. Ovim su se pitanjima bavila prethodna istraživanja [1, 2], pri čemu su neka od njih pokazala znatno smanjenje oštećenja konstrukcije primjenom tehnologija trošenja energije i kontrole vibracija [3, 4]. Te se tehnologije oslanjaju na strateški postavljene prigušivače kojima se apsorbira potresna energija i smanjuje dinamički odziv konstrukcije. Slijedeći pionirski koncept projektiranja metalnih prigušivača s izvijanjem postignut je znatan napredak [5], uključujući razvoj različitih metalnih prigušivača s izvijanjem, koji optimiraju izvedbu i proširuju primjenu u građevinarstvu, a istodobno uspostavljaju čvrste temelje za daljnji tehnološki napredak [6–9].

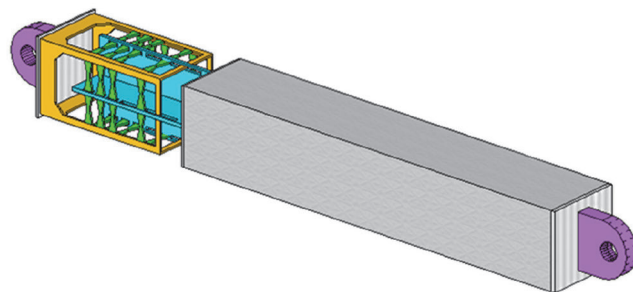
Prigušivači s plastičnom deformacijom metala pri savijanju široko se koriste zbog svoje izvanredne duktilnosti i snažnih sposobnosti trošenja energije [10–13]. Ti uređaji, osobito trokutasti i čelični prigušivači u obliku slova "X", detaljno su istraživani [14–19], pri čemu je dokazano da postižu ravnomjernu raspodjelu naprezanja preko presjeka zahvaljujući savijanju izvan ravnine, čime se poboljšava trošenje energije. Međutim, oni uglavnom pokazuju jednofazno svojstvo trošenja energije, s početnom krutošću koja se brzo smanjuje nakon dostizanja granice popuštanja, što može dovesti do znatnih zaostalih deformacija pod stalnim vanjskim opterećenjima.

Kako bi se prevladala ograničenja jednofaznih prigušivača, uvedeni su dvofazni kompozitni prigušivači koji učinkovito smanjuju plastičnu deformaciju pri različitim razinama potresnog opterećenja. Inovacije u tome području obuhvaćaju dvofazni sustav trošenja energije [20], koji se sastoji od tarnog prigušivača ploča, spojenog na čeličnu gredu H-profila, dvofaznog oslonca za ograničenje izvijanja [21], radijalnih kontaktnih serijskih koncentričnih prigušivača izvijanja od kratkih čeličnih cijevi [22], prstenastih prigušivača od metala s postupnim popuštanjem [23] i dvofaznog oslonca s ograničenjem izvijanja metalnih prigušivača [24]. Iako takva rješenja poboljšavaju očuvanje krutosti tijekom procesa trošenja energije, nakon druge faze krutost se može smanjiti, što pri rijetkim i iznimno rijetkim potresima može rezultirati znatnim zaostalim deformacijama. Zato je razvoj novih višestupanjskih metalnih prigušivača s izvijanjem od presudne važnosti za osiguravanje višerazinske zaštite nosive konstrukcije pri potresima različitih intenziteta. Najnovija istraživanja o primjeni uređaja za trošenje energije u mostovima i zgradama dodatno su osnažila praktične temelje te tehnologije. Ristic i sur. [25] te Ristic i sur. [26] proveli su dinamička ispitivanja na modelima mostova s izolacijom, ojačanim novim vertikalnim uređajima s višestrukim otvorima (V-MG) i horizontalnim uređajima S-oblika (HS), čime je potvrđena njihova učinkovitost u smanjenju potresnih oštećenja mostova. Zhang i sur. [27] istražili su mehanizme trošenja

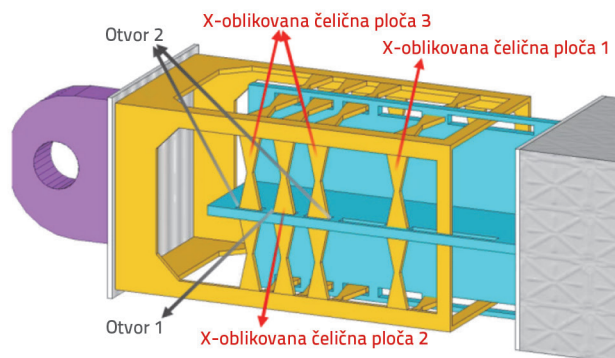
potresne energije u izolacijskim sustavima između katova te dali teorijsku osnovu za optimiranje njihovih svojstava. Dang i sur. [28] istraživali su metode projektiranja i primjene posmičnih zidova opremljenih tarnim prigušivačima za trošenje energije u građevinarstvu, ističući praktični potencijal tarnih uređaja za trošenje energije u građevinskim konstrukcijama.

U ovom se radu predlaže adaptivni sustav prigušivača s osloncem, koji je prikazan na slikama 1. i 2. Kako bi se prevladala ograničenja dvofaznih kompozitnih prigušivača, predloženi adaptivni prigušivači imaju tri stupnja trošenja energije, pri čemu se kao elementi za trošenje primjenjuju čelične ploče u obliku slova "X" u kombinaciji s trima različitim kontaktnim uređajima. Tijekom početnih malih aksijalnih deformacija čelična ploča u obliku slova "X" 1 sudjelovala je u trošenju energije savijanjem. Povećanjem aksijalnog pomaka kontaktni mehanizam pokrenuo je deformaciju uzrokovanu savijanjem u čeličnoj ploči u obliku slova "X" 2, pri čemu se pokreću akumulacija krutosti i daljnje trošenje energije. Kontinuirana aksijalna deformacija uzrokovala je to da čelična ploča u obliku slova "X" 3 uđe u stanje trošenja energije putem sličnog mehanizma, što je rezultiralo dodatnim nakupljanjem krutosti. Dizajn prigušnog uređaja omogućuje mu prilagodbu promjenama pomaka, a istodobno učinkovito troši energiju i povećava krutost.

Ovaj rad pruža sveobuhvatan opis strukture i principa rada prigušivača. Nadalje, prikazana je procjena i usporedba karakteristika krutosti i trošenja energije triju različitih uzoraka s trošenjem energije tijekom niskocikličnih recipročnih pseudostatičkih ispitivanja i numeričke simulacije metodom konačnih elemenata.



Slika 1. Shematski prikaz adaptivnog prigušivača

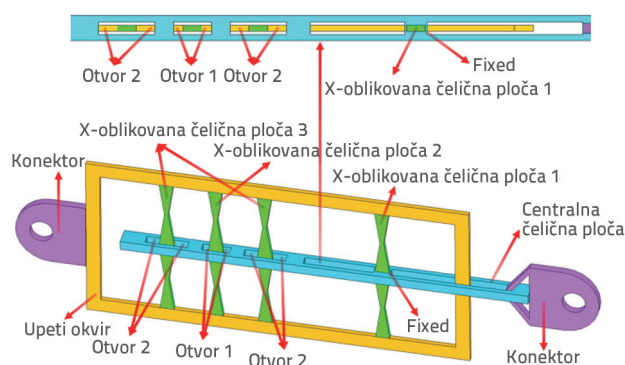


Slika 2. Shematski prikaz komponente potrošnje energije

2. Adaptivni prigušivači: izrada i principi rada

2.1. Izrada prigušivača

Na temelju strukturne simetrije odabrana je jednostrana komponenta za trošenje energije te su eksperimentalno istraženi njezina krutost i svojstvo trošenja energije. Struktura je prikazana na slici 3. Trošenje energije uglavnom se postiže savijanjem i deformacijom čelične ploče u obliku slova "X". U središnjoj čeličnoj ploči predviđeni su razmaci prema položaju čelične ploče u obliku slova "X" kako bi se omogućile funkcije superpozicije potrošnje energije i krutosti drugog i trećeg reda.



Slika 3. Grafički prikaz strukture adaptivnog prigušivača

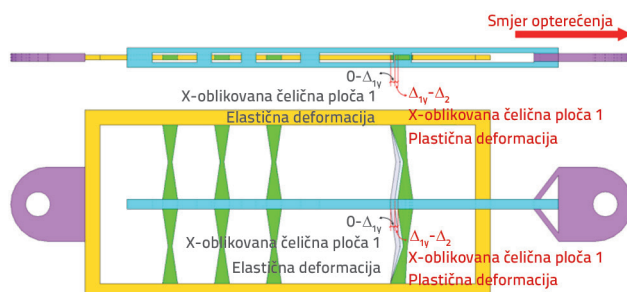
2.2. Princip rada prigušivača

Radni proces čeličnih ploča u obliku slova "X" unutar adaptivnog prigušivača može se podijeliti u dvije faze: elastičnu fazu i fazu popuštanja s očvršćenjem. Proces trošenja energije cijelog prigušivača podijeljen je u tri faze, a shematski prikazi koji ilustriraju deformaciju u svakoj fazi trošenja energije prikazani su na slikama 4. do 6. Promatrajući jedan smjer opterećenja, radni proces adaptivnog prigušivača analizira se na sljedeći način:

- Kao što je to prikazano na slici 4., u prvoj fazi trošenja energije, kada središnja čelična ploča doživi manji aksijalni pomak pod djelovanjem vanjskih sila, fiksna čelična ploča 1 u obliku slova "X" ulazi u stanje elastoplastične deformacije kako bi se postiglo trošenje energije. Ostale čelične ploče u obliku slova "X" ostale su nepomične zbog predviđenih razmaka.
- Kao što je to prikazano na slici 5., tijekom druge faze trošenja energije, s povećanjem pomaka središnje čelične ploče, ograničenja uzrokovana rupama i razmacima u središnjoj čeličnoj ploči aktiviraju kontaktni mehanizam na razmaku 1. Zato čelična ploča 2 u obliku slova "X", smještena na razmaku 1, zajedno s čeličnom pločom 1 u obliku slova "X" podliježe elastoplastičnoj deformaciji, što olakšava trošenje energije. Ta koordinirana deformacija rezultira povećanom krutošću komponente za trošenje energije.

Kao što je to prikazano na slici 6., u trećoj fazi trošenja energije, s povećanjem pomaka središnje čelične ploče aktivirao se

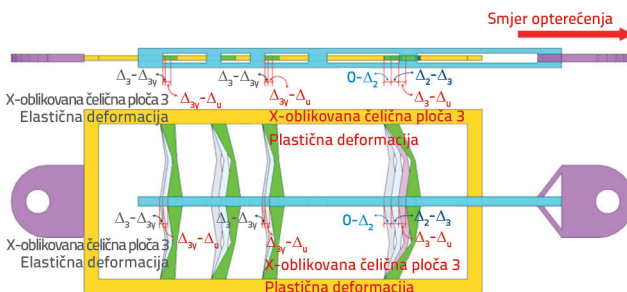
kontaktni mehanizam na razmaku 2. U čeličnoj ploči 3 u obliku slova "X" na razmaku 2 javljaju se deformacije i zajedno s čeličnim pločama 1 i 2 u obliku slova "X" na razmaku 1 prolazi kroz elastoplastičnu deformaciju, pri čemu se troši energija. Sila prigušenja dodatno se povećala, a krutost je nastavila rasti, učinkovito sprječavajući smanjenje krutosti prigušivača.



Slika 4. Početna faza rada prigušivača



Slika 5. Uključivanje prigušivača drugog reda u radnoj fazi

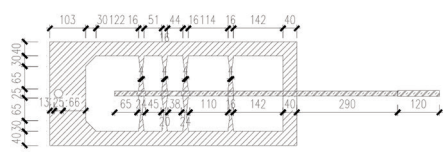


Slika 6. Aktivacija prigušivača trećeg reda u operativnoj fazi

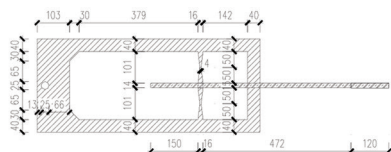
3. Izrada uzoraka i ispitivanje

3.1. Izrada uzoraka

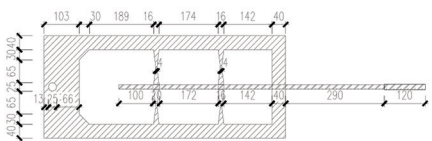
Za istraživanje krutosti i svojstava trošenja energije adaptivnog prigušivača pod niskocikličnim recipročnim pseudostatičkim opterećenjem izrađen je uzorak adaptivnog prigušivača kao što je to prikazano na slici 7. Za usporedna ispitivanja prigušivači prvog i drugog reda projektirani su onako kako je to prikazano na slikama 8. i 9. Glavna razlika između triju prigušivača jest u konfiguraciji čeličnih ploča u obliku slova "X". Ostali elementi konstrukcije ostali su nepromijenjeni. Debljina vanjskoga čeličnog okvira i čeličnih ploča u obliku slova "X" iznosila je 10 mm, dok su učinkoviti razmaci u razmacima 1 i 2 iznosili 2 odnosno 4 mm.



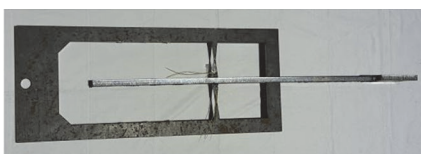
Slika 7. Veličina i fizički dijagram adaptivnog prigušivača (D-3)



Slika 8. Veličina i fizički prikaz prigušivača prvog reda (D-1)



Slika 9. Veličina i fizički prikaz dvofaznog prigušivača (D-2)



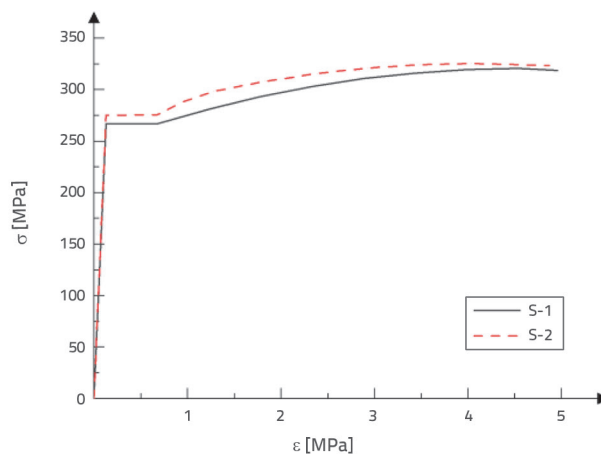
Slika 10. Uzorak čelične ploče

3.2. Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala

Za ispitne uzorke odabran je čelik Q235. Kako bi se utvrdila njegova precizna mehanička svojstva [29], dvije čelične ploče nasumično su odabrane iz osnovnog materijala za izradu uzoraka (slike 10. i 11.). Nakon toga ispitana su mehanička svojstva uzoraka. Krivulja naprezanja i deformacije izvedena iz ispitivanja prikazana je na slici 12. Mehanička svojstva materijala prikazana su u tablici 1.



Slika 11. Ispitivanje vlačnih svojstava čelika u skladu sa standardom



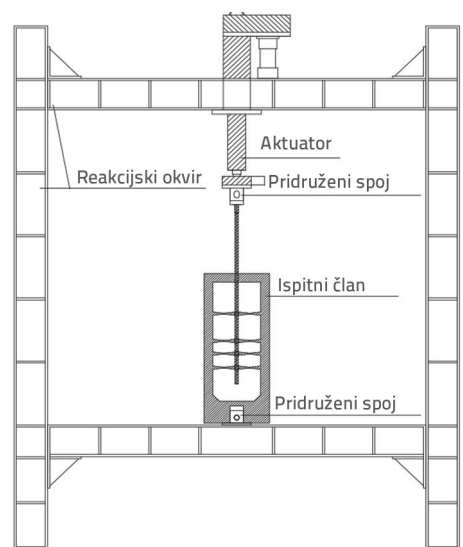
Slika 12. Odnos naprezanja i deformacije kod čelika

3.3. Eksperimentalna oprema i sustav opterećenja

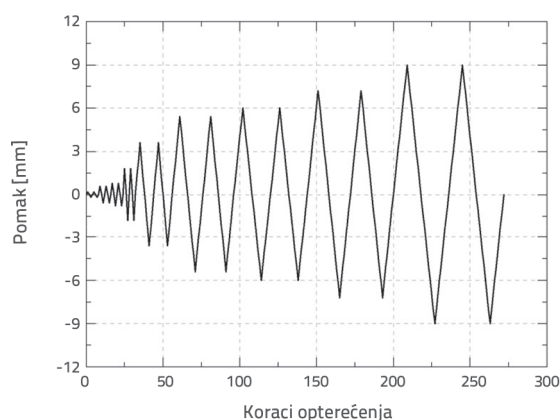
Uređaj za opterećenje prikazan je na slici 13. Na ispitnome uzorku provedeno je pseudostatičko ispitivanje niskocikličnim recipročnim opterećenjem primjenom sustava za opterećenje pomakom prikazanog na slici 14. Uvjeti ispitivanja prikazani su na slici 15.

Tablica 1. Mehanička svojstva čelika

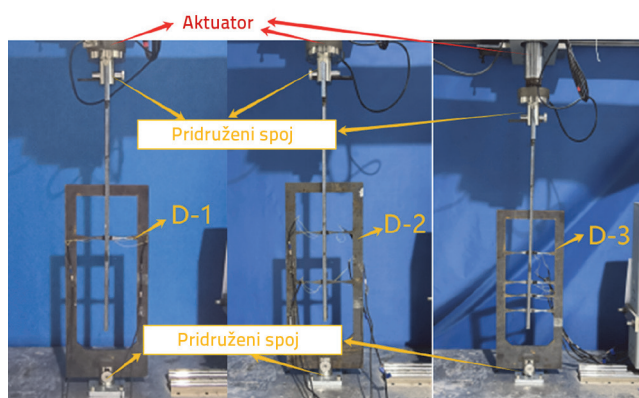
Uzorak	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E_s [N/mm ²]	ν
S-1	271	320	$2,04 \times 10^5$	0,3
S-2	275	325	$2,10 \times 10^5$	0,3
Prosječna vrijednost	273	322,5	$2,07 \times 10^5$	0,3



Slika 13. Uređaj za opterećenje



Slika 14. Sustav opterećenja



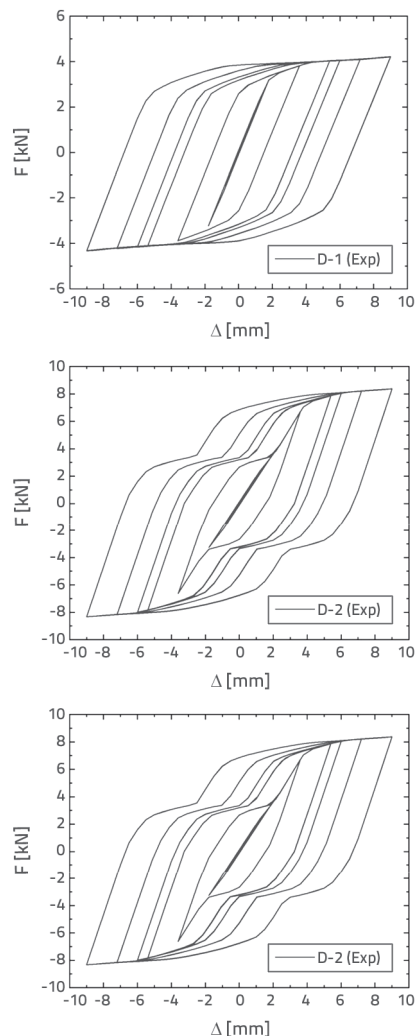
Slika 15. Prikaz ispitivanja uzoraka D-1, D-2 i D-3

4. Adaptivni prigušivači: izrada i principi rada

4.1. Histerezne krivulje ispitnog uzorka

Histerezne krivulje sile i pomaka dobivene tijekom ispitivanja s komponentama prigušivača prikazane su na slici 16. Histerezne

krivulje pokazuju da uzorak D-1 ima jasno izražene bilinearne značajke, uzorak D-2 pokazuje dvostupanjsko trošenje energije, dok uzorak D-3 iskazuje istaknute višestupanjske učinke disipacije energije.



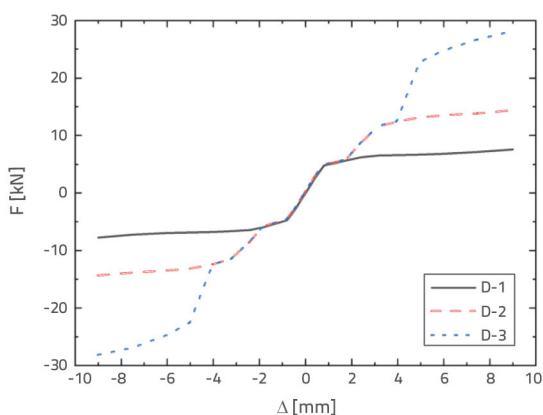
Slika 16. Histerezna krivulja ispitnog uzorka

Taj se fenomen javlja jer s povećanjem aksijalnog pomaka središnje čelične ploče pod vanjskim opterećenjem i popuštanjem čelične ploče 1 u obliku slova "X" kretanje središnje ploče ograničeno je predviđenim razmakom, čime se aktivira kontaktni mehanizam u razmaku 1. U toj fazi čelična ploča 2 u obliku slova "X" međusobno djeluje s fiksnom čeličnom pločom 1 u obliku slova "X", čime se povećavaju sila prigušenja i krutost. Kako čelična ploča 2 u obliku slova "X" ulazi u elastoplastičnu deformaciju i pridružuje se zajedničkom procesu trošenja energije, tako se površina unutar histerezne petlje povećava, čime se dodatno poboljšava kapacitet trošenja energije. S daljnjim povećanjem vanjskog opterećenja pomak središnje čelične ploče nastavlja se povećavati, pokrećući kontaktni mehanizam u razmaku 2. Tada čelična ploča 3 u obliku slova "X" međusobno djeluje s čeličnim pločama 2 i 1 u obliku slova

"X", povećavajući silu prigušenja i krutost. Elastoplastična deformacija čelične ploče u obliku slova "X" 3 potiče njezino sudjelovanje u kombiniranome trošenju energije, pri čemu se dodatno povećavaju površina obuhvaćena histereznom petljom i kapacitet trošenja energije. Uzastopna aktivacija čeličnih ploča u obliku slova "X" omogućila je prigušivaču da se ponaša adaptivno, s faznim popuštanjem i višestupanjskim trošenjem energije.

4.2. Skeletna krivulja ispitnog uzorka

Skeletne krivulje dobivene u ispitivanju s komponentama prigušivača prikazane su na slici 17. Skeletna krivulja uzorka D-1 pokazuje približno bilinearna elastoplastična svojstva. Skeletna krivulja uzorka D-2 pokazuje dvofazna svojstva: s povećanjem pomaka središnje čelične ploče raste sila prigušenja, a krutost se povećava. Skeletna krivulja uzorka D-3 pokazala je očekivana svojstva u tri faze. S daljnjim povećanjem pomaka središnje čelične ploče sila prigušenja nastavila se povećavati, a krutost se povećala za dva stupnja, što pokazuje superiorna adaptivna svojstva.



Slika 17. Skeletna linija uzorka

4.3. Krivulja smanjenja krutosti ispitnog uzorka

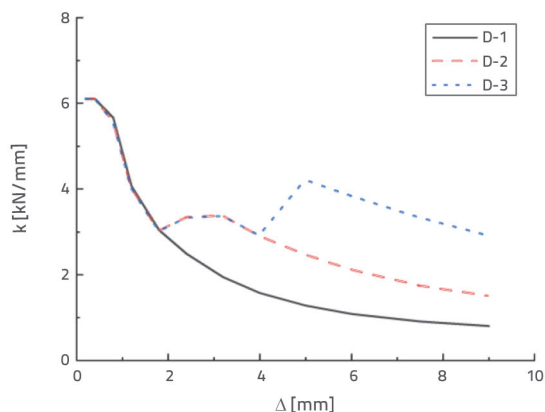
Krutost uzorka može se prikazati sekantnom krutošću, a sekantna krutost k_i izračunava se prema izrazu (1) (JGJ101-2015) [29]:

$$k_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (1)$$

gdje su $+F_i$ i $-F_i$ vrijednosti opterećenja u i -tim pozitivnim i reverzibilnim vršnim točkama, a $+\Delta_i$ i $-\Delta_i$ pomaci u i -tim pozitivnim i reverzibilnim vršnim točkama.

Krivulje smanjenja krutosti uzoraka prigušivača prikazane su na slici 18. Prije aktivacije kontaktnog mehanizma, s povećanjem pomaka središnje čelične ploče, trendovi smanjenja krutosti svih triju uzoraka bili su slični. Međutim, s daljnjim povećanjem pomaka središnje ploče uzorak D-1, opremljen samo jednom

čeličnom pločom u obliku slova "X" kao elementom za trošenje energije, pokazao je kontinuirano smanjenje krutosti nakon trošenja energije. Kod uzorka D-2 aktivacija kontaktnog mehanizma pokrenula je čeličnu ploču 2 u obliku slova "X" u razmaku 1, koja je zatim surađivala s čeličnom pločom 1 u obliku slova "X". Ta interakcija povećava silu prigušenja i uzrokuje inicijalni oporavak krutosti, što rezultira trendom krutosti karakteriziranim početnim smanjenjem, a zatim povećanjem. Uzorak D-3, opremljen dvama kontaktnim mehanizmima, aktivirao je mehanizme u razmacima 1 i 2 kako je rastao pomak središnje čelične ploče, pri čemu su se postupno aktivirale čelične ploče 2 i 3 u obliku slova "X" da bi surađivale s fiksnom čeličnom pločom 1 u obliku slova "X". Važno je istaknuti to da se pri aktiviranju čelične ploče 3 u obliku slova "X" sila prigušenja znatno povećala, a krutost je prošla kroz složeni proces početnog smanjenja, nakon čega je uslijedilo povećanje. U konačnici je taj proces rezultirao dvostrukim povećanjem krutosti, čime je dokazana superiorna prilagodljivost prigušivača.



Slika 18. Krivulje smanjenja krutosti uzoraka

4.4. Sposobnost trošenja energije ispitnog uzorka

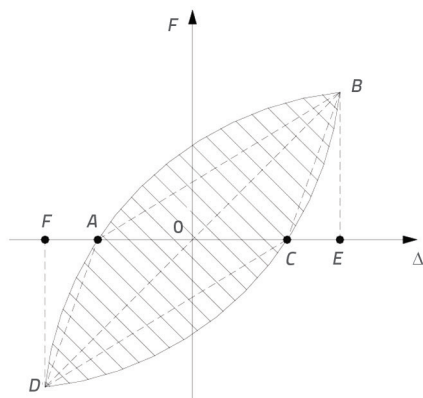
Sposobnost trošenja energije ispitnog uzorka može se odrediti površinom zatvorenom analitičkom histereznom krivuljom deformacije i opterećenja (JGJ101-2015) [29]. Taj se indeks obično procjenjuje pomoću ekvivalentnoga koeficijenta viskoznog prigušenja ζ i izraza (2) na sljedeći način:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{(\Delta ABC + \Delta CDA)}}{S_{(\Delta OBE + \Delta ODF)}} \quad (2)$$

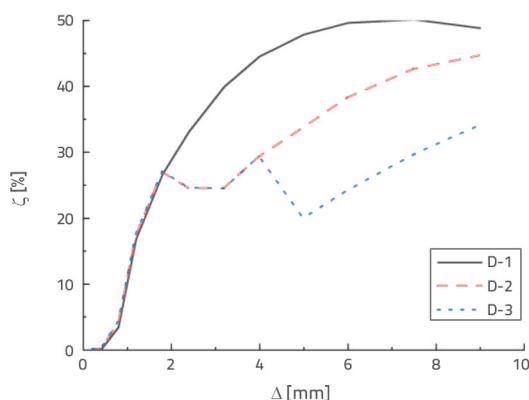
gdje $S_{(\Delta ABC + \Delta CDA)}$ označava površinu zatvorenu histereznom krivuljom na slici 21., a $S_{(\Delta OBE + \Delta ODF)}$ zbroj površina trokuta OBE i trokuta ODF na slici 19.

Kao što je to prikazano na slici 20., s povećanjem pomaka središnje čelične ploče ekvivalentni koeficijent viskoznog prigušenja ζ uzorka D-1 brzo se stabilizira nakon što čelična ploča 1 u obliku slova "X" prođe kroz elastoplastičnu deformaciju, u konačnici dosežući vrijednost od 50 % pri najvećemu pomaku ispitnog opterećenja. Za uzorak D-2 njegov ekvivalentni koeficijent viskoznog prigušenja ζ najprije se brzo

povećava, a zatim lagano smanjuje. Razlog tome je što je čelična ploča 2 u obliku slova "X" pri prvome uključivanju prošla samo elastičnu deformaciju, nije učinkovito trošila energiju, čime se smanjila površina obuhvaćena histereznom petljom. Po prelasku u elastoplastičnu deformaciju ζ se ponovno povećava na 44,3 %. Sličan se trend opaža i kod uzorka D-3. ζ se u početku brzo povećava, ali zatim blago opada jer čelična ploča 2 u obliku slova "X" u fazi početnog pokretanja prolazi samo kroz elastičnu deformaciju. Kako se pomak središnje čelične ploče dodatno povećava, tako čelična ploča 2 u obliku slova "X" doživljava elastoplastičnu deformaciju, što ponovno dovodi do povećanja ζ . Međutim, ζ se zatim smanjuje kada čelična ploča 3 u obliku slova "X" pri početnome pokretanju podliježe elastičnoj deformaciji. Tek nakon što i čelična ploča 3 u obliku slova "X" prijeđe u elastoplastičnu deformaciju, ζ naglo se povećava i naposljetku stabilizira pri 34 %.



Slika 19. Petlja histerezne krivulje

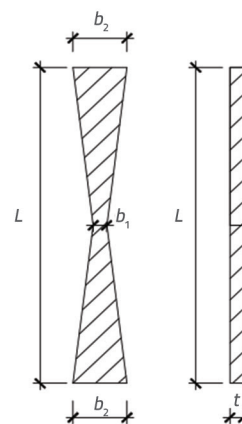

 Slika 20. Krivulje ekvivalentnoga koeficijenta viskoznog prigušenja ζ

Navedeni rezultati upućuju na to da u višestupanjskim prigušivačima sa serijski spojenim kontaktnim čeličnim pločama u obliku slova "X" čelične ploče u obliku slova "X", aktivirane kontaktnim mehanizmom, pokazuju nedovoljan kapacitet trošenja energije tijekom faze elastične deformacije. Zato je, kada je pomak premašio pomak pri granici popuštanja prigušivača s jednom čeličnom pločom u obliku slova "X", njegova sposobnost trošenja energije bila slabija u usporedbi s prigušivačima iste vrste temeljenima na izvijanju čelične ploče u obliku slova "X".

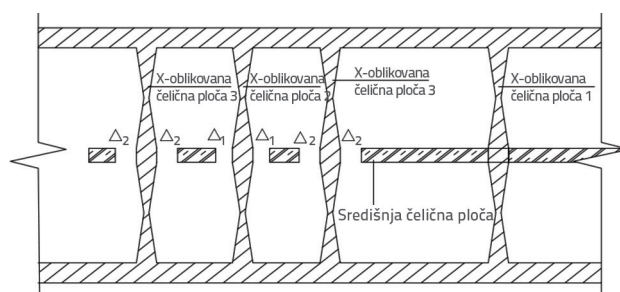
5. Simuliranje prigušivača metodom konačnih elemenata

5.1. Model konačnih elemenata

Kako bi se sveobuhvatno ispitala seizmička svojstva prigušivača tog tipa, primijenjena je istraživačka metodologija koja kombinira ispitivanje komponenti s numeričkim simulacijama pomoću metode konačnih elemenata (FEM). Takvim pristupom analizirani su obrasci utjecaja čeličnih ploča u obliku slova "X" različitih dimenzija (slika 21., tablica 2.) i kontaktnih razmaka različitih veličina (slika 22., tablica 3.) na seizmičko ponašanje prigušivača, što je dovelo do izrade ukupno 25 FEA modela. Kao što je to prikazano na slikama 23.-25., na temelju podataka ispitivanja materijala i projektnih parametara modeli konačnih elemenata diskretizirani su korištenjem heksaedarskih čvrstih elemenata tipa 7. Komponente s obje strane kontaktnog razmaka definirane su kao kontaktna tijela. Na lijevu stranu okvira primijenjena su translacijska ograničenja u tri smjera, a sinkrono recipročno opterećenje ostvareno je pomoću povezanih elemenata na desnome kraju središnje čelične ploče. Odabran je čelik Q235, s materijalnim svojstvima definiranim na sljedeći način: modul elastičnosti $E = 206 \text{ GPa}$, Poissonov omjer $\nu = 0,3$ i granica popuštanja $f_y = 273 \text{ MPa}$. Za opis ponašanja materijala korišten je elastoplastični bilinearni model s koeficijentom očvršćivanja od 1,3. Usporedba histereznih krivulja dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem i numeričkim simulacijama (slika 26.) pokazala je dobru usklađenost, čime je potvrđena učinkovitost FEM pristupa u simulaciji rada prigušivača.



Slika 21. Shematski prikaz parametara veličine čelične ploče tipa X



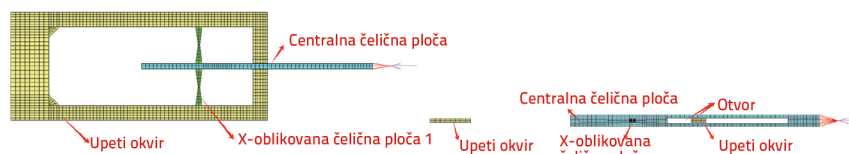
Slika 22. Shematski prikaz kontaktnog razmaka

Tablica 2. Utjecaj veličine X-ploče

Broj modela		Veličina X-ploče [mm]										F_{2y} / F_{1y}	F_{3y} / F_{2y}
		b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	t	L	Δ_1	Δ_2		
Grupa D-1F	D-1FA	4	12	-	-	-	-	10	50	-	-	-	-
	D-1FB	4	14	-	-	-	-	10	50	-	-	-	-
	D-1FC	4	16	-	-	-	-	10	50	-	-	-	-
	D-1FD	4	18	-	-	-	-	10	50	-	-	-	-
	D-1FE	4	20	-	-	-	-	10	50	-	-	-	-
Grupa D-2F	D-2FA	4	16	4	12	-	-	10	50	3	-	0,66	-
	D-2FB	4	16	4	14	-	-	10	50	3	-	0,80	-
	D-2FC	4	16	4	16	-	-	10	50	3	-	1	-
	D-2FD	4	16	4	18	-	-	10	50	3	-	1,07	-
	D-2FE	4	16	4	20	-	-	10	50	3	-	1,21	-
Grupa D-3F	D-3FA	4	16	4	16	4	12	10	50	3	6	1	1,32
	D-3FB	4	16	4	16	4	14	10	50	3	6	1	1,60
	D-3FC	4	16	4	16	4	16	10	50	3	6	1	2
	D-3FD	4	16	4	16	4	18	10	50	3	6	1	2,15
	D-3FE	4	16	4	16	4	20	10	50	3	6	1	2,42

Tablica 3. Utjecaj kontaktnog razmaka

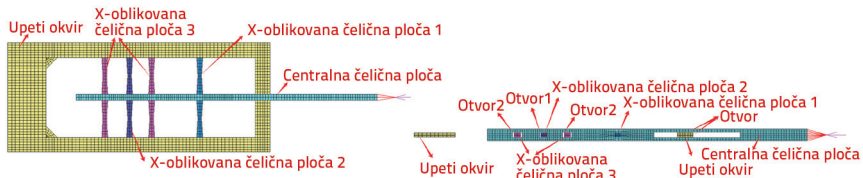
Broj modela		Veličina X-ploče [mm]										Δ_1 / Δ_{1y}	Δ_2 / Δ_{2y}
		b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	t	L	Δ_1 (Razmak 1)	Δ_2 (Razmak 2)		
Grupa D-2	D-2A	4	16	4	16	-	-	10	50	1	-	0,5	-
	D-2B	4	16	4	16	-	-	10	50	2	-	1	-
	D-2C	4	16	4	16	-	-	10	50	3	-	1,5	-
	D-2D	4	16	4	16	-	-	10	50	4	-	2	-
	D-2E	4	16	4	16	-	-	10	50	5	-	2,5	-
Grupa D-3	D-3A	4	16	4	16	4	16	10	50	3	4	1,5	2
	D-3B	4	16	4	16	4	16	10	50	3	5	1,5	2,5
	D-3C	4	16	4	16	4	16	10	50	3	6	1,5	3
	D-3D	4	16	4	16	4	16	10	50	3	7	1,5	3,5
	D-3E	4	16	4	16	4	16	10	50	3	8	1,5	4



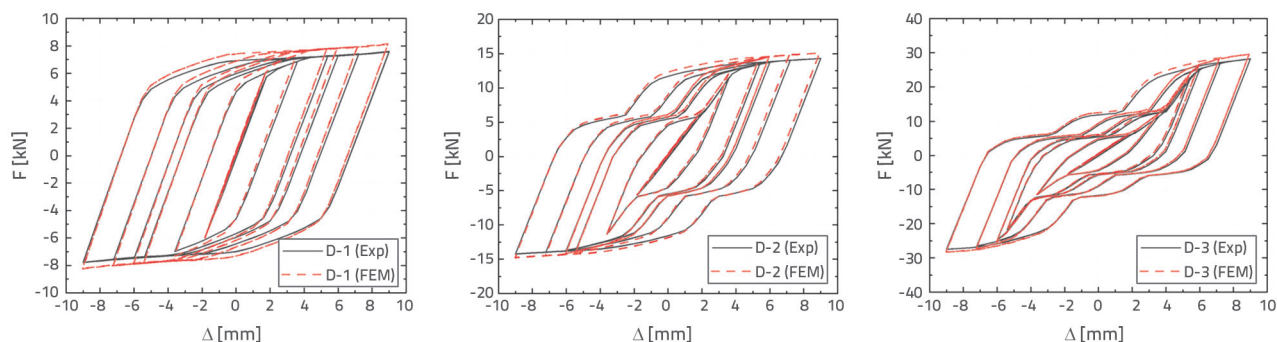
Slika 23. Model konačnih elemenata D-1



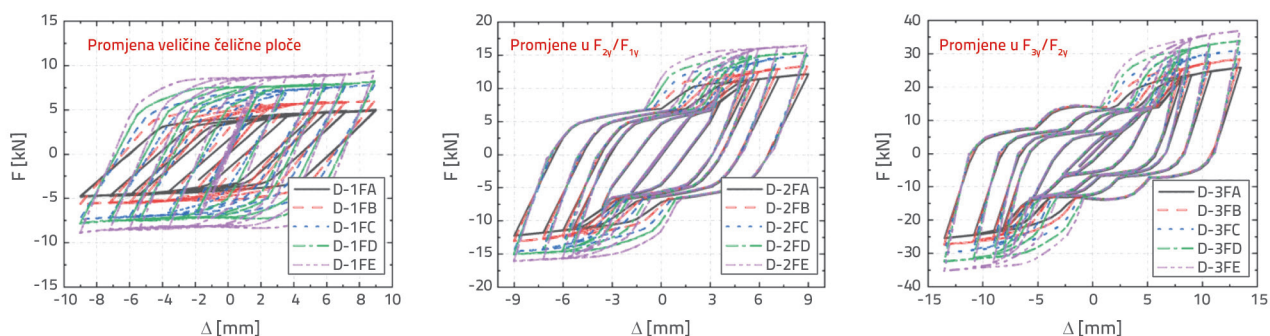
Slika 24. Model konačnih elemenata D-2



Slika 25. Model konačnih elemenata D-3



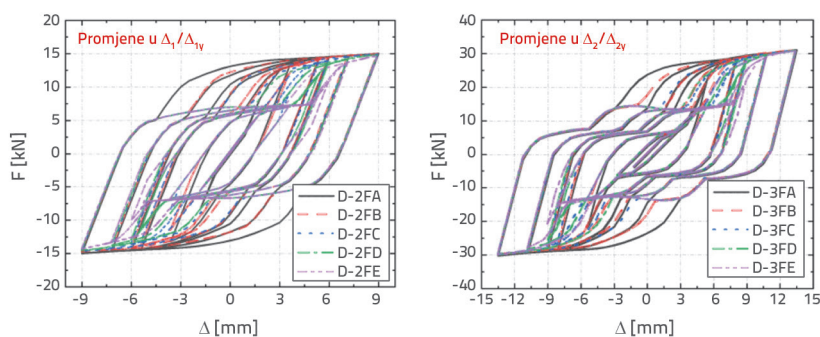
Slika 26. Usporedba FEM simulacije i rezultata ispitivanja



Slika 27. Histerezna krivulja s promjenama veličine prigušivača

5.2. Histerezna krivulja

Histerezne krivulje za prigušivače različitih dimenzija prikazane su na slici 27. U skupini D-1F histerezne krivulje pokazuju jasno izražene bilinearne značajke, pri čemu se površina obuhvaćena krivuljom povećava s povećanjem dimenzija čeličnih ploča u obliku slova "X". U odnosu na njih, krivulje za D-2F i D-3F pokazuju svojstva višestupanjskih faza. Točnije, unutar skupine D-2F, pri promjeni dimenzija čelične ploče 2 u obliku slova "X", površina obuhvaćena drugim stupnjem histerezne krivulje povećavala se s porastom omjera F_{2y}/F_{1y} , gdje F_{1y} i F_{2y} označavaju sile pri popuštanju čeličnih ploča 1 i 2 u obliku slova "X". Slično tome, u skupini D-3F promjena dimenzija čelične ploče 3 u obliku slova "X" dovela je do povećanja površine obuhvaćene trećim stupnjem histerezne krivulje s porastom omjera F_{3y}/F_{2y} , gdje F_{3y} označava silu pri popuštanju čelične ploče 3 u obliku slova "X". Histerezne krivulje prigušivača pri različitim dimenzijama kontaktnog razmaka prikazane su na slici 28. Histerezne krivulje za skupine D-2 i D-3 pokazuju izražena višestupanjska histerezna svojstva. U skupini D-2 pri promjeni dimenzije kontaktnog razmaka svojstva drugog stupnja histerezne krivulje postaju sve izraženija s povećanjem omjera Δ_1/Δ_{1y} , gdje Δ_{1y} označava pomak pri popuštanju čelične ploče 1 u obliku slova

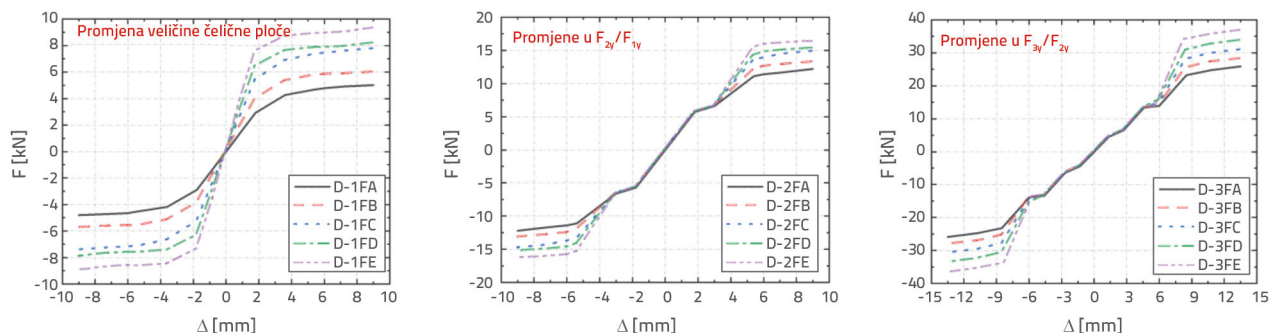


Slika 28. Histerezna krivulja s promjenama kontaktnog razmaka

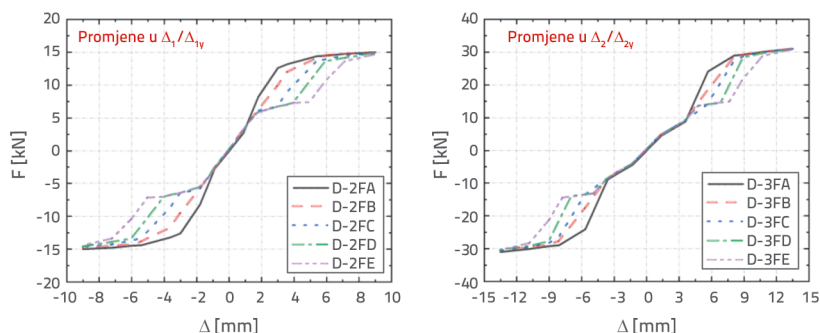
"X", dok se istodobno površina obuhvaćena drugim stupnjem krivulje smanjuje. U skupini D-3 pri promjeni kontaktnog razmaka Δ_2 i povećanju omjera Δ_2/Δ_{2y} , gdje Δ_{2y} označava pomak pri popuštanju čelične ploče 2 u obliku slova "X", svojstva trećeg stupnja histerezne krivulje postaju izraženija, dok se površina obuhvaćena trećim stupnjem postupno smanjuje.

5.3. Skeletna krivulja

Na slici 29. prikazane su skeletne krivulje prigušivača za različite dimenzije. Među njima skeletna krivulja skupine D-1F pokazuje tipična bilinearne svojstva, pri čemu se početna krutost povećava s povećanjem dimenzija čelične ploče 1 u obliku slova "X". Nasuprot tome skeletne krivulje skupine D-2F i D-3F iskazuju izražena višestupanjska histerezna svojstva. Konkretno, u



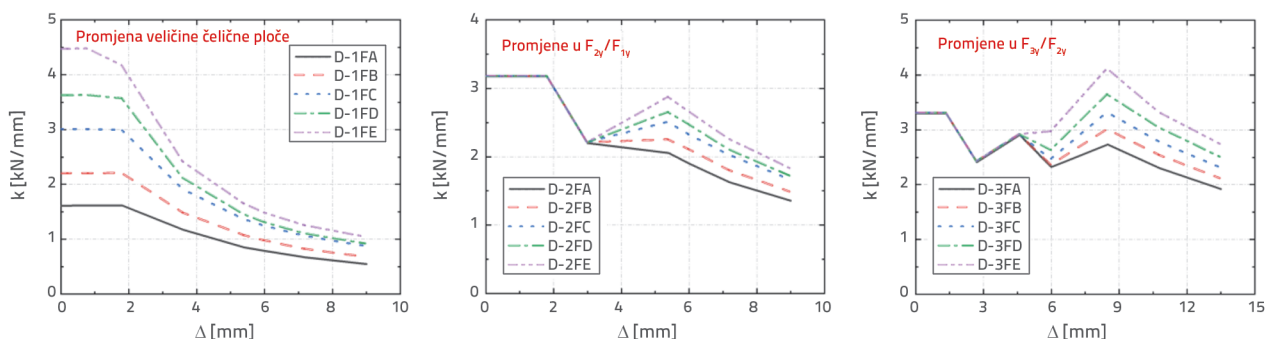
Slika 29. Skeletna krivulja s promjenama u veličini prigušivača



Slika 30. Skeletna krivulja prikazuje promjene u kontaktnome razmaku

skupini D-2F pri promjeni dimenzija čelične ploče 2 u obliku slova "X" krutost drugog stupnja povećavala se s rastom omjera F_{2y}/F_{1y} . U skupini D-3F prilagodbom dimenzija čelične ploče 3 u obliku slova "X" krutost trećeg stupnja pokazala je uzlazni trend s porastom omjera F_{3y}/F_{2y} .

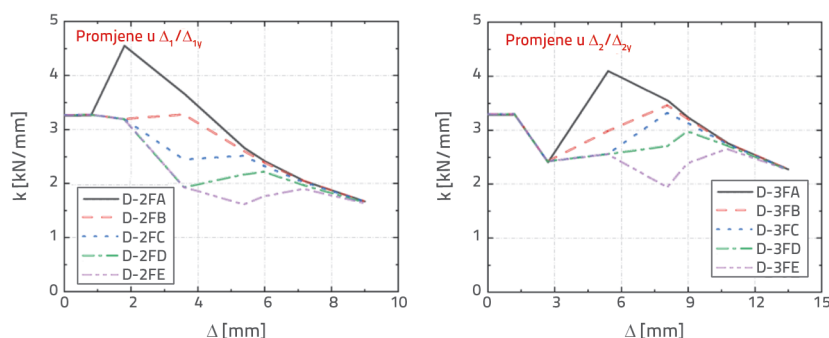
Na slici 30. prikazana su svojstva skeletne krivulje prigušivača pri različitim kontaktnim razmacima. U skupini D-2, pri podešavanju dimenzije kontaktnog razmaka Δ_1 , svojstva drugog stupnja sustava postaju izraženija s povećanjem omjera Δ_1/Δ_{1y} , dok krutost drugog stupnja pokazuje silazni trend. U skupini D-3, pri promjeni dimenzije kontaktnog razmaka Δ_2 , svojstva trećeg stupnja postaju sve uočljivija s rastom omjera Δ_2/Δ_{2y} , iako krutost trećeg stupnja istodobno pokazuje opadajući trend.



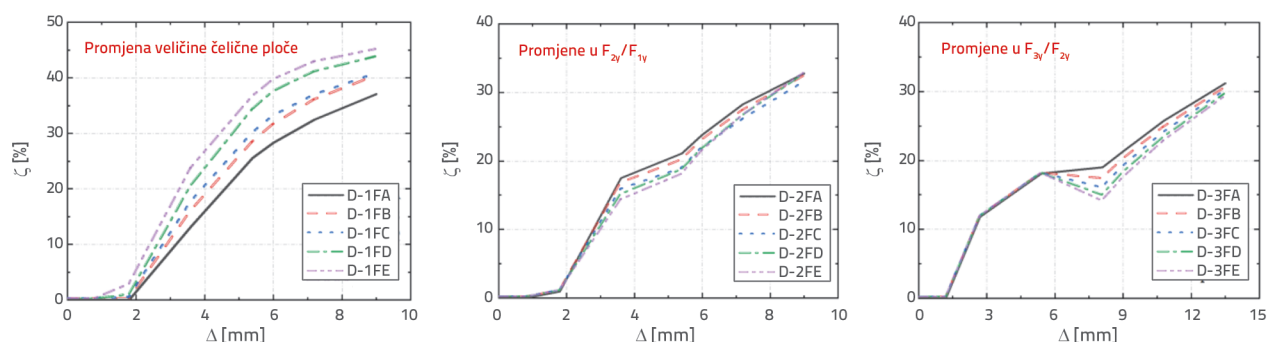
Slika 31. Krivulja smanjenja krutosti s promjenama veličine prigušivača

5.4. Krivulja smanjenja krutosti

Na slici 31. prikazana je krivulja smanjenja krutosti prigušivača pod utjecajem promjena u dimenziji. U skupini D-1F, koja je bila opremljena samo jednim kompletnom čeličnim pločom u obliku slova "X" kao elementima za trošenje energije, krutost je tijekom cijelog procesa trošenja energije pokazivala stalni trend smanjenja. Važno je da se s povećanjem geometrijskih dimenzija čelične ploče 1 u obliku slova "X" početna krutost prigušivača znatno poboljšala. U skupini D-2F evolucija krutosti tijekom početne faze opterećenja pomakom (prije aktivacije kontaktnog mehanizma) bila je vrlo slična onoj u skupini D-1F. Kada čelična ploča 1 u obliku slova "X" dosegne granicu popuštanja i uđe u fazu smanjenja krutosti, daljnje povećanje pomaka aktivira kontaktni mehanizam u razmaku 1. Time se uključuje čelična ploča 2 u obliku slova "X", koja zatim uspostavlja koordinirani rad s čeličnom pločom 1. Sila prigušenja znatno se povećava, uz istodobno izraženo pojačanje krutosti, što predstavlja jasno uočljiv fenomen povećanja krutosti. Intenzitet tog povećanja krutosti dodatno raste s porastom omjera F_{2y}/F_{1y} . Skupina D-3F primjenjuje dvostruki kontaktni mehanizam. Tijekom postupnog povećanja pomaka promjena krutosti pri aktivaciji kontaktnog mehanizma u razmaku 1 bila je

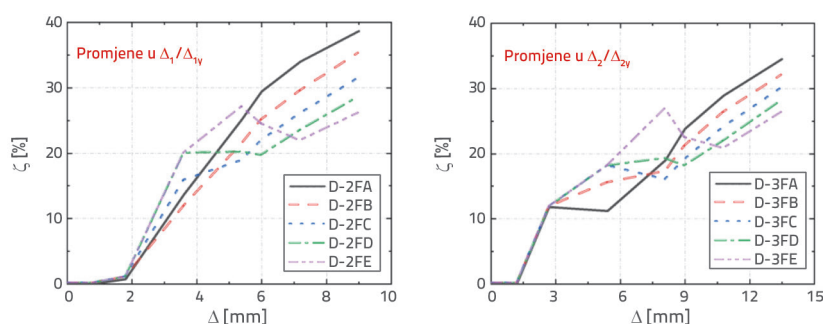


Slika 32. Krivulja smanjenja krutosti uz promjene kontaktnog razmaka


 Slika 33. Krivulje ekvivalentnoga koeficijenta viskoznog prigušenja ζ pri promjenama dimenzija prigušivača

slična onoj u skupini D-2F. Kako se pomak dodatno povećava i doseže prag aktivacije kontaktnog mehanizma u razmaku 2, tako se aktivira čelična ploča 3 u obliku slova "X". Nakon toga ploča usklađeno djeluje zajedno s fiksiranom središnjom čeličnom pločom 1 i prethodno povezanom čeličnom pločom 2 te usklađuje rad svih triju elemenata. Ta usklađenost dovodi do ponavljanja povećanja sile prigušenja i daljnjeg povećanja krutosti, što označava drugi izraženi porast krutosti. Stupanj toga drugog povećanja krutosti slično se povećavao s povećanjem omjera F_{3y}/F_{2y} .

Krivulje smanjenja krutosti prigušivača pri različitim parametrima kontaktnog razmaka prikazane su na slici 32. U skupini D-2, nakon aktivacije kontaktnog mehanizma, čelična ploča 2 u obliku slova "X" u razmaku 1 uključila se u koordinirani rad s čeličnom pločom 1 tijekom rada. To je dovelo do povećanja sile prigušenja uz istodobno povećanje krutosti; no, s porastom omjera Δ_1/Δ_{1v} , povećanje krutosti u drugoj fazi postupno se smanjuje. Skupina D-3 bila je opremljena dvostrukim kontaktnim mehanizmom. Kako se pomak dalje povećavao, tako su se kontakti mehanizmi u razmacima 1 i 2 aktivirali postupno, pri čemu su se sukcesivno uključivale čelične ploče 2 i 3 u obliku slova "X". Te su ploče zatim sudjelovale u radu zajedno s čeličnom pločom u obliku slova "X" 1 pričvršćenom u sredini. Međutim, kako omjer Δ_2/Δ_{2y} raste, tako se učinak povećanja krutosti trećeg stupnja postupno smanjuje.


 Slika 34. Krivulje ekvivalentnoga koeficijenta viskoznog prigušenja ζ pri promjenama kontaktnog razmaka

postupnog povećanja u tri faze: početno ubrzano povećanje, postupni prelazak u srednjoj fazi i ubrzani rast u kasnoj fazi. Važno je istaknuti da s porastom omjera F_{2y}/F_{1y} ekvivalentna sposobnost trošenja energije sustava pokazuje ujednačen trend smanjenja. Odgovor ζ uzoraka iz skupine D-3F također slijedi trostupanjski model rasta "brzo-sporo-brzo", pri čemu je faza sporog rasta pretežno koncentrirana u rasponu pomaka drugog stupnja. S povećanjem omjera F_{3y}/F_{2y} sposobnost trošenja energije uzorka u rasponu pomaka trećeg stupnja postupno se povećavala.

Kao što je to prikazano na slici 34., s povećanjem pomaka opterećenja ekvivalentni koeficijent viskoznog prigušenja ζ skupine D-2 pokazuje tipičan obrazac brzoga početnog povećanja, nakon čega slijedi blagi naknadni pad. To svojstvo

5.5. Sposobnost trošenja energije

Kao što je to prikazano na slici 33., s povećanjem pomaka ekvivalentni koeficijent viskoznog prigušenja ζ uzoraka u skupini D-1F pokazuje izražena nelinearna svojstva rasta, dok čelična ploča 1 u obliku slova "X" prolazi elastoplastičnu deformaciju, pri čemu se trend rasta dodatno pojačava s povećanjem dimenzija te ploče. Za uzorke iz skupine D-2F evolucija ζ slijedi obrazac

postaje izraženije kako se povećava omjer Δ_1/Δ_{1V} . Kod skupine D-3 obrazac promjene ζ sličan je onome u skupini D-2, pri čemu se javlja brzo početno povećanje, nakon čega slijedi kratko smanjenje. To se objašnjava ponajprije time što je čelična ploča 2 u obliku slova "X" pri prvome uključivanju u ranoj fazi opterećenja ostala u elastičnoj deformaciji i nije učinkovito doprinijela trošenju energije. Kako se pomak nastavio povećavati, a čelična ploča 2 u obliku slova "X" prelazila u elastoplastičnu deformaciju, tako se ζ privremeno vraćao u prvotni oblik. Međutim, budući da čelična ploča 3 pri početnome pokretanju ostaje u elastičnoj fazi deformacije, fazni učinak smanjenja površine njegove histerezne krivulje dovodi do sekundarnog smanjenja koeficijenta ζ . Tek kada čelična ploča 3 u obliku slova "X" prijeđe u elastoplastičnu fazu deformacije, koeficijent prigušenja dostiže stabilan i kontinuiran rast. Važno je istaknuti da se to svojstvo sve više očituje s porastom omjera Δ_2/Δ_{2V} .

Prethodno navedene analize ispitivanja prigušivača i numeričkih simulacija otkrivaju sljedeće ključne zaključke. Kod prigušivača serije D-1 prvog reda s povećanjem geometrijskih dimenzija čeličnih ploča u obliku slova "X" njihova sposobnost trošenja energije i početna krutost pokazuju rastući trend, iako krutost nakon popuštanja naglo opada. Za prigušivače serije D-2 drugog reda sposobnost trošenja energije općenito se neznatno smanjila s povećanjem omjera granice popuštanja F_{2V}/F_{1V} . Kada omjer F_{2V}/F_{1V} prelazi vrijednost 1, tada uključivanje čelične ploče 2 u obliku slova "X" nakon popuštanja ploče 1 može vratiti, pa čak i nadmašiti početnu krutost prigušivača. Osim toga s povećanjem omjera Δ_1/Δ_{1V} sposobnost trošenja energije znatno se smanjuje pri uključivanju ploče 2, a učinak superpozicije krutosti postaje slabiji u odnosu na početno stanje. Međutim, kada je omjer Δ_1/Δ_{1V} manji od 1,5, tada i učinak superpozicije krutosti i sposobnost trošenja energije pokazuju bolje rezultate. Za adaptivne prigušivače serije D-3 sposobnost trošenja energije pokazala je krajnje ukupno smanjenje uz povećanje omjera granice popuštanja F_{3V}/F_{2V} . Kada omjer F_{3V}/F_{2V} prelazi vrijednost 2, tada primjena čelične ploče 3 u obliku slova "X", nakon popuštanja ploča 1 i 2, vraća početnu krutost prigušivača na početnu razinu ili je čak premašuje. Istodobno, s povećanjem omjera Δ_2/Δ_{2V} sposobnost trošenja energije znatno opada pri uključivanju ploče 3, a efekt superpozicije krutosti slabi u odnosu na početno stanje. Međutim, kada je omjer Δ_2/Δ_{2V} manji od 3, tada i učinak superpozicije krutosti i sposobnost trošenja energije pokazuju povoljne rezultate.

LITERATURA

- [1] Shmerling, A., Levy, R., Reinhorn, A.M.: Seismic retrofit of frame structures using passive systems based on optimal control, *Structural Control and Health Monitoring*, 25 (2018) 1, pp. e2038, <https://doi.org/10.1002/stc.2038>
- [2] Xue, Q., Wu, C.W., Chen, C.C., et al.: Post-earthquake loss assessment based on structural component damage inspection for residential RC buildings, *Engineering Structures*, 31 (2009) 12, pp. 2947–2953, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.07.022>
- [3] Jaissee, S., Yue, F., Ooi, Y.H.: A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications, *Engineering Structures*, 235, (2021), Paper 112022, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112022>
- [4] Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S. et al.: Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments, *Journal of structural engineering*, 134 (2008) 1, pp. 3–21, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(3))

6. Zaključak

Na temelju kombinirane istraživačke metodologije koja integrira niskocikličke ponovljene pseudostatičke testove i numeričke simulacije pomoću metode konačnih elemenata u ovom je radu provedeno sustavno istraživanje seizmičkog ponašanja novoga adaptivnog prigušivača. Glavni zaključci su sljedeći:

- Adaptivni prigušivač ostvaruje višestupanjsko trošenje energije i superpoziciju krutosti putem faznog savijanja čeličnih ploča u obliku slova "X" raspoređenih u tri faze. Mehanizam aktivacije kontaktnog razmaka omogućuje postupno povećanje sile prigušenja s porastom pomaka, što rezultira histereznom krivuljom s višestrukim vrhovima.
- Krivulje smanjenja krutosti pokazuju da, nakon početnog smanjenja krutosti, adaptivni prigušivač doživljava oporavak krutosti nakon aktivacije kontaktnog mehanizma, što dovodi do usklađivanja dinamičke krutosti. Ta značajka učinkovito rješava problem neprestanog smanjenja krutosti kod tradicionalnih prigušivača.
- Ekvivalentni koeficijent viskoznog prigušenja adaptivnog prigušivača doseže najvišu vrijednost pri najvećemu pomaku. Međutim, zbog utjecaja elastične deformacije naknadno primijenjenih čeličnih ploča u obliku slova "X" dolazi do privremenog smanjenja sposobnosti trošenja energije. Optimiranje geometrijskih parametara čeličnih ploča u obliku slova "X" može ublažiti smanjenje učinkovitosti trošenja energije.
- Rezultati numeričke simulacije metodom konačnih elemenata pokazali su dobru podudarnost s eksperimentalnim krivuljama, potvrđujući učinkovitost adaptivnog prigušivača u višestupanjskome trošenju energije i regulaciji krutosti. Ti rezultati pružaju pouzdanu znanstvenu osnovu za primjenu predloženog prigušivača kao oslonca za trošenje energije temeljenog na pomaku u projektiranju potresne otpornosti nosivih okvira.

Zahvala

Autori zahvaljuju financijskoj podršci dobivenoj u sklopu istraživačkog projekta Kineske akademije za građevinske znanosti (br. 20220122330730021). Stavovi, rezultati, zaključci ili preporuke izneseni u ovome radu mišljenja su autora i ne odražavaju nužno stavove naručitelja ispitivanja.

- [5] Kelly, J.M., Skinner, R.I., Heine, A.J.: Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 5 (1972) 3, pp. 63-88, <https://doi.org/10.5459/bnzsee.5.3.63-88>
- [6] Farajiani, F., Elyasigorji, F., Elyasigorji, S. et al.: Effect of U-shaped metallic dampers on the seismic performance of steel structures based on endurance-time analysis, *Buildings*, 14 (2024) 5, Paper 1368, <https://doi.org/10.3390/buildings14051368>
- [7] Kandemir, E.C., Jankowski, R.: Effect of soil on the capacity of viscous dampers between adjacent buildings, *Građevinar*, 75 (2023), pp. 329-342, <https://doi.org/10.14256/JCE.3597.2022>
- [8] Ghasemi Jouneghani, H., Haghollahi, A., Mortazavi, M.: Pushover analysis for estimating seismic demand of elliptic braced moment resisting frames, *Građevinar*, 74 (2022) 11, pp. 941-955, <https://doi.org/10.14256/JCE.2311.2017>
- [9] Nižić, A., Meštrović, D.: Seismic dampers in engineering structures, *Građevinar*, 63 (2011) 07, pp. 661-667.
- [10] Zhou, Z., Chen, Y., Yam, M.C. et al.: Experimental investigation of a high strength steel frame with curved knee braces subjected to extreme earthquakes, *Thin-Walled Structures*, 185 (2023). Paper 110596, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110596>
- [11] Ke, K., Chen, Y., Zhou, X. et al.: Experimental and numerical study of a brace-type hybrid damper with steel slit plates enhanced by friction mechanism, *Thin-Walled Structures*, 182 (2023), Paper 110249, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110249>
- [12] Hu, S., Wang, W., Lu, Y.: Explainable machine learning models for probabilistic buckling stress prediction of steel shear panel dampers, *Engineering Structures*, 288 (2023). Paper 116235, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116235>
- [13] Chen, Y., Chen, C., Jiang, H., et al.: Study of an innovative graded yield metal damper, *Journal of Constructional Steel Research*, 160 (2019), pp. 240-254, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.05.028>
- [14] Bergman, D.M., Goel, S.C.: Evaluation of cyclic experimenting of steel plate devices for added damping and stiffness, Report No. UMCE87-10, The University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, 1987.
- [15] Martinez-Romero, E.: Experiences on the use of supplementary energy dissipators on building structures, *Earthquake spectra*, 9 (1993) 3, pp. 581-625, <https://doi.org/10.1193/1.1585731>
- [16] Perry, C.L., Fierro, E.A., Sedarat, H., et al.: Seismic upgrade in San Francisco using energy dissipation devices, *Earthquake Spectra*, 9 (1993) 3, pp. 559-579, <https://doi.org/10.1193/1.1585730>
- [17] Xia, C., Hanson, R.D.: Influence of ADAS element parameters on building seismic response, *Journal of Structural Engineering*, 118 (1992) 7, pp. 1903-1918, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1992\)118:7\(1903\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1992)118:7(1903))
- [18] Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P., et al.: Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction, *Earthquake spectra*, 9 (1993) 3, pp. 505-528, <https://doi.org/10.1193/1.1585727>
- [19] Oh, S.H., Kim, Y.J., Ryu, H.S.: Seismic performance of steel structures with slit dampers, *Engineering structures*, 31 (2009) 9, pp. 1997-2008, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.03.003>
- [20] Balendra, T., Yu, C.H., Lee, F.L.: An economical structural system for wind and earthquake loads, *Engineering Structures*, 23 (2001) 5, pp. 491-501, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00061-4)
- [21] Sun, J., Pan, P., Wang, H.: Development and experimental validation of an assembled steel double-stage yield buckling restrained brace, *Journal of Constructional Steel Research*, 145 (2018), pp. 330-340, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.03.003>
- [22] Cheraghi, A., Zahrai, S.M.: Cyclic experimenting of multilevel pipe in pipe damper, *Journal of Earthquake Engineering*, 23 (2019) 10, pp. 1695-1718, <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1387191>
- [23] Chen, Y., Chen, C., Jiang, H., et al.: Study of an innovative graded yield metal damper, *Journal of Constructional Steel Research*, 160 (2019), pp. 240-254, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.05.028>
- [24] Li, G.Q., Sun, Y.Z., Jiang, J., et al.: Experimental study on two-level yielding buckling-restrained braces, *Journal of Constructional Steel Research*, 159 (2019), pp. 260-269, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.04.042>
- [25] Ristic, J., Behrami, R., Brujić, Z., Ristic, D., Hristovski, V.: Method for upgrading isolated bridges with novel V gaped devices: Seismic experiments of models, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024) 9, pp. 789-802, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.3937.2024>
- [26] Ristic, J., Ristic, D., Hristovski, V.: Upgrading of isolated bridges with uniform gapped HS devices: Seismic experiments, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 12, pp. 1047-1058, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.3580.2022>
- [27] Zhang, S., Zhang, C., Ju, X., Xiong, Y.: Study on seismic dissipation mechanism of inter-story isolation structure based on phase, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 10, pp. 969-978, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.3643.2022>
- [28] Dang, B., Li, T., Wang, S., Zhan, M.: Design method and engineering application of shear wall with friction energy dissipation damper, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 4, pp. 277-289, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.2742.2019>
- [29] JGJ101-2015.: Specification for seismic experiment of building (in Chinese). Ministry of Housing and Urban-Rural Construction, 2015.