

Primljen / Received: 10.3.2024.
Ispravljen / Corrected: 27.2.2025.
Prihvaćen / Accepted: 5.3.2025.
Dostupno online / Available online: 10.7.2025.

Seizmičko ponašanje teleskopski dijagonalno pridrzanog okvira

Autori:



Dr.sc. **Xiaowei Yang**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište Zhongyuan, Kina
Škola inteligentne gradnje i građevinarstva
yxw43@163.com
Autor za korespondenciju



Mr.sc. **Yiqiong Zhang**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište Zhongyuan, Kina
Škola inteligentne gradnje i građevinarstva
z0611yq@163.com



Mr.sc. **Mengyuan Li**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište Zhongyuan, Kina
Škola inteligentne gradnje i građevinarstva
lmy3977@163.com

Prethodno priopćenje

Xiaowei Yang, Yiqiong Zhang, Mengyuan Li

Seizmičko ponašanje teleskopski dijagonalno pridrzanog okvira

Istraženo je ponašanje teleskopskoga dijagonalnog elementa za pridržanje protiv izvijanja. Utvrđena je metoda projektiranja takvog elementa te su provedene numeričke simulacije metodom konačnih elemenata. Točnost simulacija potvrđena je usporedbom s postojećim eksperimentalnim rezultatima. Za analizu seizmičkog ponašanja konstrukcije okvira s teleskopskim dijagonalnim elementima za pridržanje protiv izvijanja primijenjena je metoda nelinearne dinamičke analize odziva. Rezultati su pokazali da pod djelovanjem jakih potresa, a u usporedbi s konvencionalnim okvirima s dijagonalnim ukrúčenjem, okvir s teleskopskim dijagonalnim elementima ima znatno puniji oblik petlje histereze koja pokazuje odnos ukupne posmične sile u razini temelja i pomaka vrha konstrukcije, pri čemu je kapacitet disipacije seizmičke energije povećan za 34 %, a ukupna posmična sila u razini temelja smanjena za 23 %. Maksimalni međukatni pomaci i maksimalni međukatni kutovi zaokreta smanjeni su za 20 %.

Ključne riječi:

okvirna konstrukcija, teleskopski dijagonalni element za pridržanje protiv izvijanja, nelinearna dinamička analiza odziva, seizmičko ponašanje

Research Paper

Xiaowei Yang, Yiqiong Zhang, Mengyuan Li

Seismic behavior of telescopic buckling braced frame structure

A telescopic buckling brace was investigated. The design method for the brace was established, and finite element simulations were conducted. The simulation accuracy was validated against the existing test results, and an elastoplastic dynamic time history analysis method was used to study the seismic performance of the telescopic buckling brace frame structure. The results showed that under the action of strong earthquakes, compared with ordinary braced frame structures, the shape of the base shear-vertex displacement hysteresis curve of the telescopic buckling frame structure was relatively full, the seismic energy dissipation capacity was increased by 34 %, and the base shear force of the structure was reduced by 23 %. The maximum floor displacement and the maximum story drift angle of the structure were reduced by 20 %.

Key words:

frame structure, telescopic buckling braced, elastoplastic dynamic time history analysis, seismic performance

1. Uvod

Konstrukcije pri djelovanju jakih potresa disipiraju seizmičku energiju deformacijama i prigušivačima. Zbog maloga vlastitog prigušenja konstrukcije jaki potresi dovode do smanjenja krutosti i nosivosti većine konstrukcijskih elemenata. Ugradnja prigušivača u odabrana kontrolirana mjesta unutar konstrukcije djelotvoran je i ekonomičan način za poboljšanje njezina seizmičkog ponašanja. Na taj se način omogućuje plastična deformacija prigušivača, čime se disipira većina seizmičke energije i sprječava oštećivanje osnovnih konstrukcijskih elemenata.

Tamahloult i sur. [1] proveli su analizu i projektiranje nelinearnoga seizmičkog odziva višekatnih zgrada izoliranih olovnogumenim ležajima pri djelovanju bliskih potresa. Rezultati su pokazali da sustav izolacije osigurava izvrsno seizmičko ponašanje uz zadovoljenje zahtjeva na posmičnu deformaciju i stabilnost. Kandemir i sur. [2] primijenili su tehniku valne koherencije za određivanje optimalne veličine viskoznih prigušivača te proveli detaljnu analizu njihove učinkovitosti u smanjenju utjecaja potresa. Zhou i sur. [3] istražili su ponašanje ugrađenih perforiranih kompozitnih čeličnih posmičnih zidova pod seizmičkim opterećenjem te su pokazali njihovu znatnu sposobnost disipacije energije.

Dijagonalni elementi za pridržanje protiv izvijanja (engl. *buckling-restrained braces* – BRB) prikladan su izbor za povećanje krutosti konstrukcije i disipaciju energije preko prigušivača. Clark i sur. [4] proveli su tri velika eksperimenta na BRB elementima, čime su dali tehničku osnovu za projektiranje i izvedbu prve zgrade s BRB sustavom u Sjedinjenim Američkim Državama. Luo i sur. [5] te Cheng i sur. [6] eksperimentalno i numerički pokazali su da BRB elementi mogu osigurati dostatnu horizontalnu krutost i stabilan kapacitet disipacije energije. Što je veći omjer poprečne nosivosti BRB elementa u odnosu na težinu konstrukcije, to je dulje vlastito razdoblje konstrukcije i izraženiji učinak BRB sustava.

Li i sur. [7] izradili su BRB elemente koristeći lokalni čelik Q235B te su eksperimentalno potvrdili njihovu krutost i sposobnost disipacije energije. Unatoč učinkovitosti, proizvodni proces tih elemenata relativno je složen. Baird i sur. [8] istražili su pasivne učinke disipacije energije kod U-oblikovanih čeličnih ploča korištenih kao povezani prigušivači izvijanja.

Na temelju tih istraživanja Chen i sur. [9] razvili su teleskopski dijagonalni element za pridržanje protiv izvijanja (ili bočno pridržanje) koristeći U-oblikovane čelične ploče. Međutim, takvi su prigušivači pokazali nedostatak u obliku asimetričnih sila pri recipročnome opterećenju nakon popuštanja. Kao zamjenu za U-oblikovane zakrivljene ploče u ovome se radu predlaže uporaba eliptičnih čeličnih cijevi raspoređenih

serijski i paralelno, čime se razvija teleskopski dijagonalni element za bočno pridržanje. Učinkovitost razvijenog elementa ocjenjuje se na temelju njegove sposobnosti pasivne disipacije seizmičke energije unutar konstrukcije.

2. Projektiranje teleskopske ukrute protiv izvijanja

2.1. Teleskopska ukruta protiv izvijanja

Osnovna konstrukcija teleskopskoga dijagonalnog elementa za bočno pridržanje prikazana je na slici 1. Priključne krajnje ploče s montažnim otvorima na obje strane povezane su s konstrukcijskim elementima, čime se omogućuje relativni pomak i ostvaruje sustav disipacije energije preko prigušivača bočnih sila. Kada je teleskopski dijagonalni element bio pod djelovanjem vlačnog ili tlačnog opterećenja, tada su priključne krajnje ploče na oba kraja uzrokovala relativno klizanje vanjske čelične ploče okvira i središnje ploče zahvaljujući eliptičnim čeličnim cijevima koje ih međusobno povezuju. Time se generirao pomak, a granica tečenja pri savijanju zakrivljenog dijela eliptične čelične cijevi učinkovito je iskorištena, što je omogućilo učinkovito prigušenje i disipaciju energije.

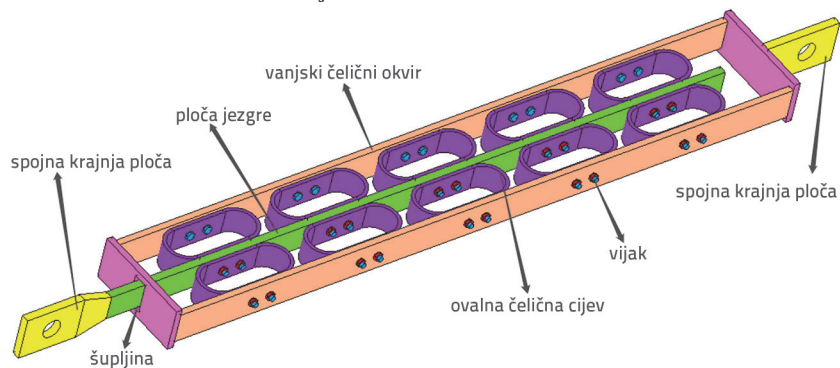
2.2. Teorijska analiza teleskopskoga dijagonalnog elementa

Kelly i sur. [10] izveli su sljedeće izraze za granični moment savijanja i nosivost zakrivljenoga dijela polukružne čelične ploče prikazane na slici 2.a):

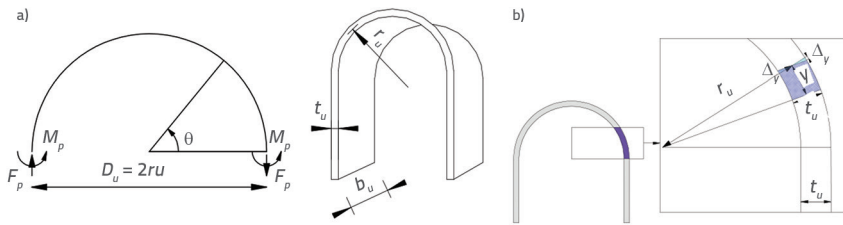
$$M_p = \frac{f_y b_u t_u^2}{4} \quad (1)$$

$$F_p = \frac{2M_p}{D_u} = \frac{f_y b_u t_u^2}{2D_u} \quad (2)$$

pri čemu je M_p moment savijanja u zakrivljenome dijelu, F_p sila popuštanja u zakrivljenome dijelu, f_y granica razvlačenja čelika, D_u promjer između središta debljine zakrivljenog dijela, b_u širina presjeka U-oblikovane čelične ploče, t_u debljina zakrivljenog dijela, a r_u radijus središta zakrivljenog dijela.



Slika 1. Struktura teleskopske ukrute



Slika 2. Mehanička analiza zakrivljenog dijela: a) shematski dijagram sila; b) shematski dijagram deformacije

Pod djelovanjem sile F_p polukružna čelična ploča podvrgnuta je deformaciji savijanja koja je bila u skladu s deformacijom ravne ploče. To znači da, kada vanjski rub zakrivljenog dijela prolazi kroz tlačnu ili vlačnu deformaciju (Δ_y), unutarnji rub zakrivljenoga dijela također mora proći vlačnu ili tlačnu deformaciju (Δ_y), a kako je to prikazano na slici 2.b). Iz geometrijskih odnosa proizlazi da je maksimalno istezanje jednako omjeru debljine i promjera:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{t_u}{D_u} \quad (3)$$

Pomak popuštanja (Δ) zakrivljenog dijela polukružne čelične ploče može se izračunati energetsom metodom prema Castiglianovome drugom teoremu [11]:

$$\Delta = \frac{\partial U}{\partial F} \quad (4)$$

Deformacijska energija U u izrazu (4) ponajprije nastaje uslijed savijanja i može se izračunati kao integral kvadrata momenta savijanja, Liu [11]:

$$U = \int_0^L \frac{M_p^2(x)}{2EI} \quad (5)$$

pri čemu je E modul elastičnosti čelika, a I moment inercije presjeka čelične ploče definiran kao $I = b_u t_u^3 / 12$.

Kao što je to prikazano na slici 2.a), moment savijanja ($M(\theta)$) zakrivljenog dijela pod kutom θ između polukružne čelične ploče i kraja dobiva se kako slijedi:

$$M(\theta) = F_p r_u (1 - \cos \theta) + F_p r_u \quad (6)$$

Uvrštavanjem izraza (5) i (6) u izraz (4) dobiva se sljedeći izraz za pomak popuštanja Δ_y :

$$\begin{aligned} \Delta_y &= \int_0^L \frac{\partial}{\partial F} \left[\frac{F_p r_u (1 - \cos \theta) + F_p r_u}{2EI} \right]^2 r_u \partial \theta \\ &= \frac{27\pi F_p D_u^3}{16E b_u t_u^3} = \frac{27\pi f_y D_u^2}{32Et_u} \end{aligned} \quad (7)$$

Zato se početna krutost (k_0) može definirati na sljedeći način:

$$k_0 = \frac{F_p}{\Delta_y} = \frac{16E b_u}{27\pi} \left(\frac{t_u}{D_u} \right)^3 \quad (8)$$

Grafična nosivost (F_b), pomak popuštanja (Δ_y) i početna krutost k_b teleskopskoga dijagonalnog elementa otpornog na izvijanje (prikazanog na slici 1.) određuju se kako slijedi:

$$F_b = 2nF_p = \frac{nf_y b_u t_u^2}{D_u} \quad (9)$$

$$\Delta_y = \frac{27\pi f_y D_u^2}{32Et_u} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} k_b &= \frac{32nEb_u}{27\pi} \left(\frac{t_u}{D_u} \right)^3 \\ &\approx \frac{1.2nEb_u}{\pi} \left(\frac{t_u}{D_u} \right)^3 \end{aligned} \quad (11)$$

pri čemu je n broj eliptičnih čeličnih cijevi.

Kako bi se omogućila učinkovita primjena prigušivača i spriječilo oštećivanje čelične ploče prekomjernom deformacijom i preopterećenjem, utvrđena su sljedeća ograničenja za grafičnu nosivost (F_u , koeficijent otvrdnjavanja iznosio je 1,4) i grafični pomak (Δ_u) čelika tijekom projektnih izračuna:

$$F_u = 1,4 F_b \quad (12)$$

$$\Delta_u = 3\Delta_y \quad (13)$$

Krivulja okvira sila – pomak temelji se na Ramberg-Osgoodovu modelu (Chegini, [12]):

$$\Delta = \frac{F}{k_0} \left[1 + \left(\frac{F}{F_y} \right)^{R-1} \right] \quad (14)$$

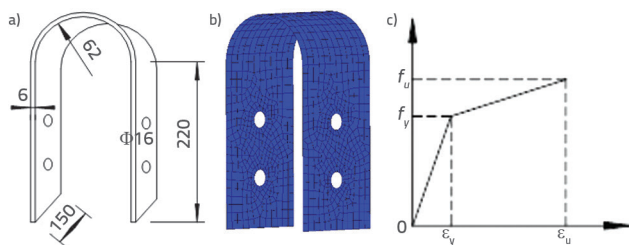
$$R = 7.1 \ln \left(\frac{t_u}{D_u} \right) + 29.5 \quad (15)$$

pri čemu je R bezdimenzijski parametar koji određuje oblik krivulje.

2.3. Eksperimentalna i numerička analiza

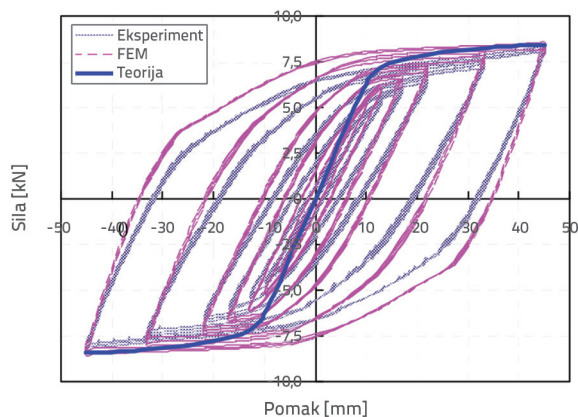
Kako bi se provjerila učinkovitost disipacije energije u petlji histerize teleskopske ukrute prikazane na slici 1., provedeni su eksperimenti primjenom ispitnog modela U-oblikovane čelične ploče [12] te numeričke simulacije polovine simetrične eliptične čelične cijevi. U modelu konačnih elemenata prikazanome na slici 3. radijus (r_u) U-oblikovane čelične ploče iznosio je 65 mm, debljina (t_u) 6 mm, širina (b_u) 150 mm, duljina (l_u) 220 mm, a promjer dvaju vijčanih otvora 16 mm. Čelik je modeliran primjenom bilinearnoga elastoplastičnog modela s očvršćenjem (slika 3.c)). Korišten je čelik kvalitete G300, modul elastičnosti

E iznosio je 205 GPa, Poissonov omjer ν bio je 0,3, granica razvlačenja f_y iznosila je 320 MPa, a koeficijent očvršćenja bio je 1,4.

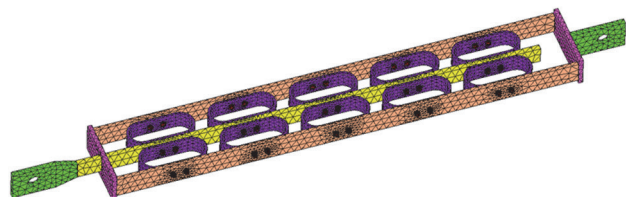


Slika 3. Čelična ploča u obliku slova U i model metode konačnih elemenata (FEM): a) čelična ploča u obliku slova U [12]; b) model FEM; c) odnos naprezanja i deformacije kod čelika

Rezultati proračuna prikazani su na slici 4. Ovojnice krivulje histereze dobivene eksperimentima, numeričkim simulacijama metodom konačnih elemenata i teorijskim proračunom u osnovi su podudarne. Teorijski proračun ovojnice može se koristiti za određivanje projektnih parametara elementa uz izostavljanje faktora $2n$ iz izraza (9) i (11). Dodatno, numerička analiza metodom konačnih elemenata može služiti kao zamjena za eksperimentalna ispitivanja u simulacijama. Zato je konačnim elementima izrađen numerički model teleskopskoga dijagonalnog elementa za bočno pridržanje prikazanog na slici 1., za potrebe numeričkih ispitivanja s niskim brojem ciklusa recipročnog opterećenja kao što je to prikazano na slici 5.

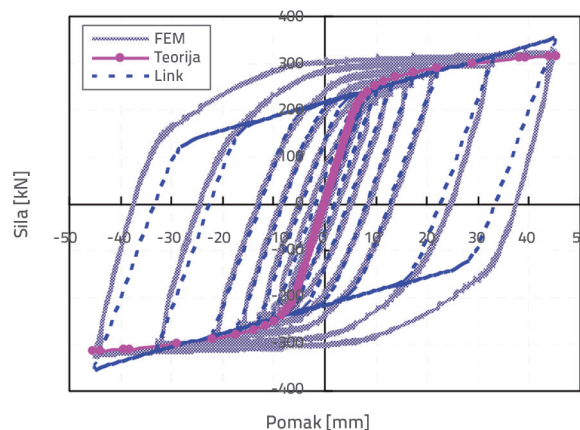


Slika 4. Usporedba krivulja dobivenih teorijskim proračunom, eksperimentom te numeričkim modelom



Slika 5. Numerički model (FEM) teleskopskog elementa za bočno pridržanje

Eliptična čelična cijev proizvedena je spajanjem dviju polukružnih čeličnih ploča promjera (D_p) od 120 mm, debljine (t_p) od 22 mm i širine (b_p) od 50 mm kroz čeličnu ploču duljine (l_p) 180 mm. Korišten je čelik kvalitete Q345, modul elastičnosti (E) čelika bio je 206 GPa, Poissonov omjer (ν) bio je 0,3, a granica razvlačenja (f_y) 345 MPa. Primijenjen je bilinearni elastoplastični model s očvršćenjem (slika 3.c), a koeficijent očvršćenja iznosio je 1,4. Rezultati proračuna prikazani su na slici 6. Rezultati analize metodom konačnih elemenata u velikoj su mjeri u skladu s teorijskom krivuljom dobivenom na temelju izraza (9) – (13). U programu SAP2000 (*SAP2000 Technical Guide and Engineering Application*, 2018.) teorijski parametri korišteni su za konfiguriranje Wenova plastičnog veznog elementa za simulaciju prigušivača kao što je to prikazano na slici 1. Odnos posmične krutosti prema elastičnoj krutosti postavljen je na 0,1, a eksponentni indeks postavljen je na vrijednost 6. Rezultati simulacije prikazani su na slici 6. Petlja histereze simulirana veznim elementom pokazuje sličan oblik kao rezultati numeričke analize metodom konačnih elemenata. U konstrukcijskome modelu umjesto prigušivača može se koristiti vezni element za proračune i simulacije.



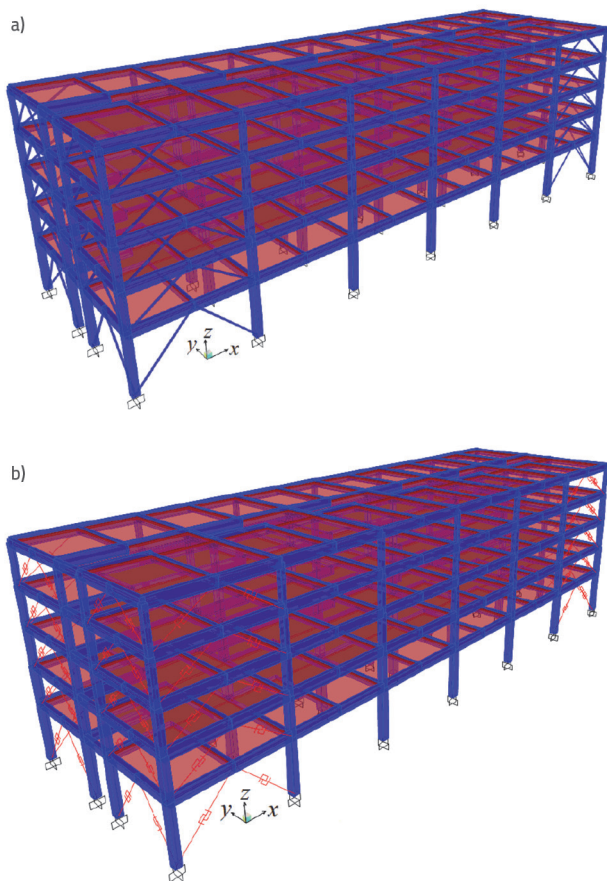
Slika 6. Usporedba histereznih krivulja sile i pomaka prigušnog uređaja, krivulje dobivene teorijskim proračunom i one dobivene numeričkim modelom

3. Seizmičko ponašanje konstrukcije okvira s teleskopskim dijagonalnim elementima za bočno pridržanje

3.1. Projektiranje teleskopskoga dijagonalnog elementa za bočno pridržanje

Projektirana je armiranobetonska okvirna konstrukcija s ukрутama na pet katova u skladu s kineskim normama za projektiranje građevinskih konstrukcija [14, 15]. Tlocrt konstrukcije uključivao je šest okomitih raspona s razmakom stupova od 9 m i tri vodoravna raspona s razmacima stupova od 6,9 m, 3,0 m i 6,9 m. Visina prizemlja bila je 4,5 m, dok su visine ostalih katova bile 3,0 m. Stalna opterećenja podova i krova iznosila su 5,5 kN/m², dok su promjenjiva opterećenja

podova i krova iznosila 3,5 kN/m² odnosno 2,0 kN/m². Klasa betona bila je C 25/30, a klasa armature HRB400. Seizmička razina zaštite konstrukcije odgovarala je osmome stupnju (0,2 g), kategorija tla bila je klasa II., a projektna skupina potresa bila je skupina 1. Folić i sur. [16] predstavili su novi pristup za ocjenu seizmičkog odziva petokatnih zgrada s okvirnim sustavom od armiranog betona (RC) primjenjujući europske norme i analizirajući različite modele indeksa oštećenja. Radi istraživanja seizmičkog ponašanja teleskopskih dijagonalnih elemenata unutar okvirnih konstrukcija, u ovome istraživanju dijagonalni elementi u gore navedenoj konstrukciji okvira od RC-a (model 1.) zamijenjeni su teleskopskim dijagonalnim elementima za bočno pridržanje, čime je formiran model 2. (prikazan na slici 7.). Za procjenu seizmičkog odziva obaju modela (modela 1. i 2.) pod djelovanjem triju seizmičkih zapisa primijenjena je nelinearna dinamička analiza odziva. U tim su modelima grede i stupovi okvira prikazani kao uslojeni gredni elementi, ukrute kao štapni elementi, međukatne ploče kao uslojeni plošni elementi, dok su prigušivači modelirani pomoću spojnih elemenata. Prve dvije prirodne frekvencije modela prikazanih u tablici 1. pokazale su slične temeljne periode, što upućuje na to da su bočne krutosti obaju modela u biti ekvivalentne.



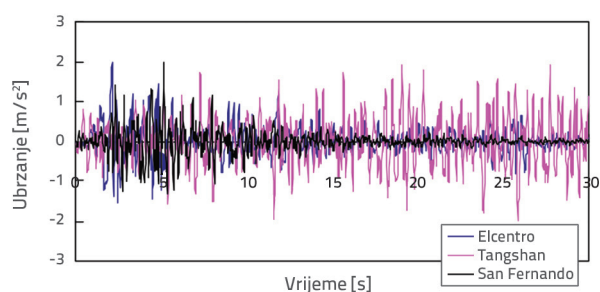
Slika 7. Modeli elasto-plastične analize: a) model 1.; b) model 2.

Tablica 1. Temeljni periodi modela 1. i 2.

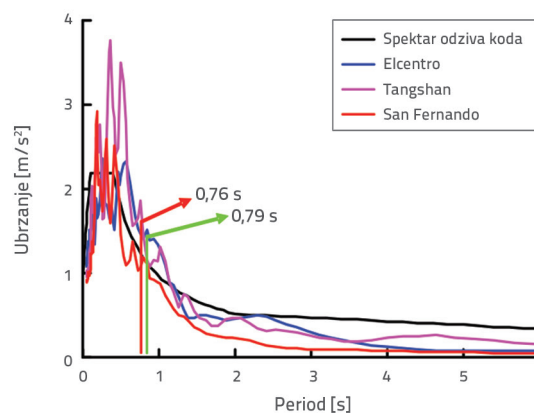
Model	Model 1.	Model 2.	Razlika [%]	
Temeljni period (s)	T_1	0,79	0,76	3,8
	T_2	0,74	0,72	2,7

3.2. Odabir seizmičkih zapisa

U skladu s normom za seizmičko projektiranje zgrada [15] odabrana su tri seizmička zapisa prikazana na slici 8. Usporedba spektra odziva seizmičkog vala i projektiranog spektra odziva prema normi pri omjeru prigušenja od 5 % u rasponu od 0,73 s do 0,8 s prikazana je na slici 9. Tri odabrana seizmička zapisa zadovoljila su relevantne zahtjeve propisane normom.



Slika 8. Krivulje vremenskog odziva triju seizmičkih valova



Slika 9. Spektar odziva, a (m/s²), koeficijent seizmičkog utjecaja

3.3. Seizmičko ponašanje konstrukcije okvira s teleskopskim dijagonalnim elementima za bočno pridržanje

3.3.1. Pomak etaža i međukatni kut zaokreta

Maksimalni pomaci etaža konstrukcije pod djelovanjem triju seizmičkih zapisa prikazani su na slici 10. Kao što je to prikazano na slici 10.a), pri djelovanju projektiranog potresa i najjačega očekivanog potresa (projektirane vrijednosti seizmičkog ubrzanja za dva stupnja vjerojatnosti prekoračenja unutar projektiranoga referentnog razdoblja od 50 godina: 10 % za

projektirani potres i 2 % za najjači očekivani potres) pomaci vrha konstrukcije u smjeru X za model 1. iznosili su 73,2 mm i 146,3 mm, dok su odgovarajuće vrijednosti za model 2. iznosile 56,1 mm i 115,8 mm. Vrijednosti za model 2. bile su niže za 23,4 % i 20,8 % u odnosu na model 1.

Kao što je to prikazano na slici 10.b), pri djelovanju projektiranog potresa i najjačega očekivanog potresa pomaci vrha konstrukcije

u smjeru Y za model 1. iznosili su 74,1 mm i 148,2 mm, dok su odgovarajuće vrijednosti za model 2. iznosile 59,8 mm i 120,6 mm. Vrijednosti za model 2. bile su niže za 19,3 % i 18,6 % u odnosu na model 1.

Maksimalni međukatni kutovi zaokreta konstrukcija pod djelovanjem triju seizmičkih zapisa prikazani su na slici 11. Kao što je to prikazano na slici 11.a), pri djelovanju projektiranog potresa i najjačega očekivanog potresa maksimalni međukatni kutovi zaokreta u smjeru X za model 1. iznosili su 0,0058 (1/172) i 0,012 (1/83), dok su odgovarajuće vrijednosti za model 2. iznosile 0,0045 (1/222) i 0,0092 (1/109). Vrijednosti za model 2. bile su smanjene za 22,4 % i 23,3 % u odnosu na model 1.

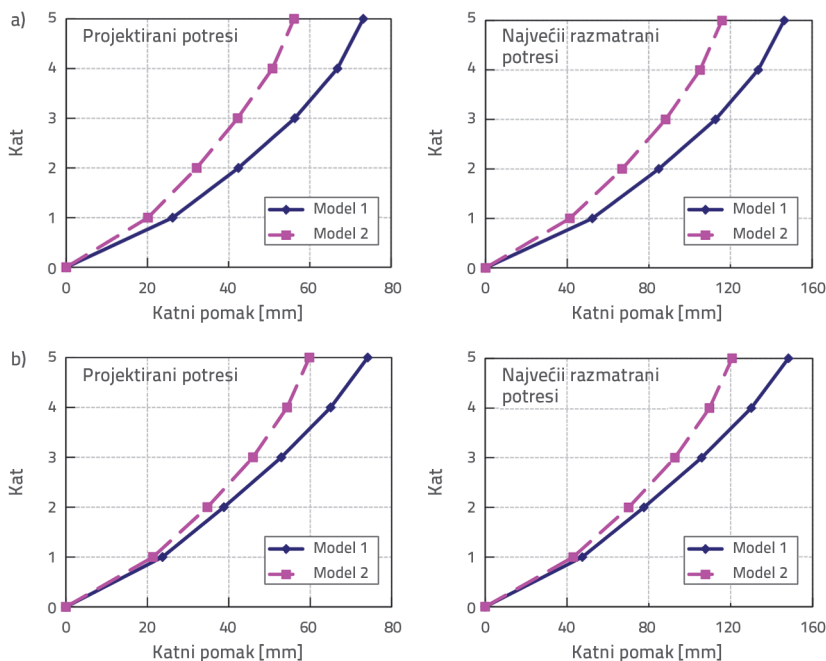
Kao što je to prikazano na slici 11.b), pri djelovanju projektiranog potresa i najjačega očekivanog potresa maksimalni međukatni kutovi zaokreta u smjeru Y za model 1. iznosili su 0,0054 (1/185) i 0,011 (1/91), dok su odgovarajuće vrijednosti za model 2. iznosile 0,0047 (1/213) i 0,0095 (1/105). Vrijednosti za model 2. bile su smanjene za 13 % i 13,6 % u odnosu na model 1.

Numerički rezultati pokazali su da teleskopski dijagonalni elementi za bočno pridržanje učinkovito smanjuju maksimalni pomak etaža i međukatne kutove zaokreta konstrukcije pri djelovanju projektiranoga i najjačega očekivanog potresa.

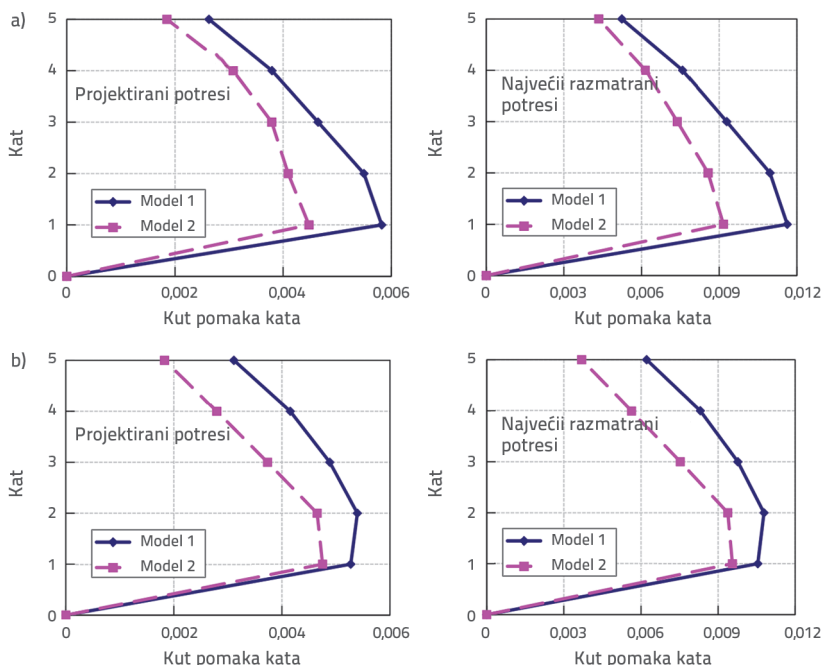
3.3.2. Krivulja ukupne posmične sile u razini temelja i pomaka vrha konstrukcije

Kao što je to prikazano na slikama 12. i 13., pod djelovanjem jakih potresa petlja histereze koja prikazuje odnos ukupne posmične sile u razini temelja i pomaka vrha konstrukcije za model 2. bila je punija u odnosu na model 1., a disipacija seizmičke energije bila je učinkovitija.

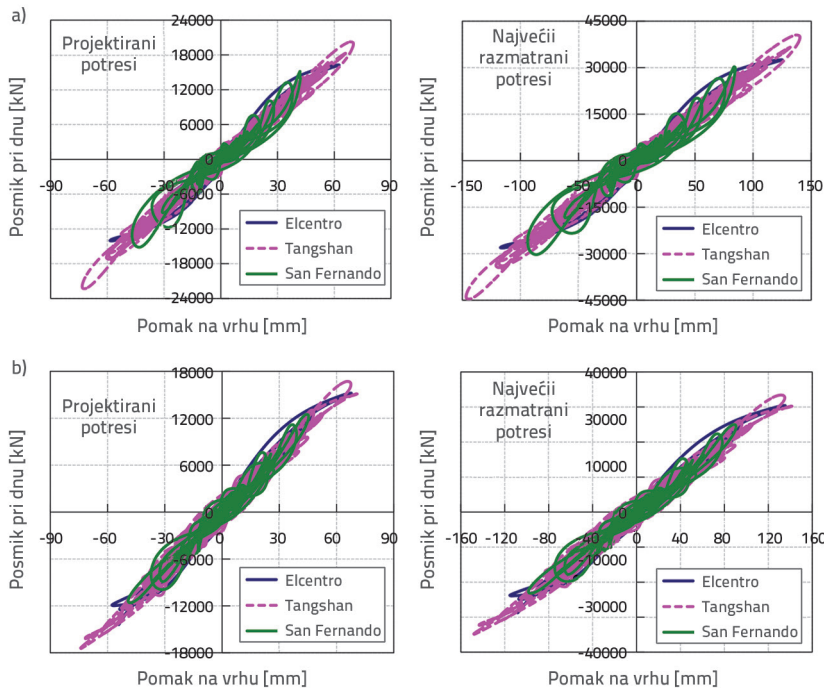
Pri djelovanju projektiranoga i najjačega očekivanog potresa maksimalne ukupne posmične sile u razini temelja u smjeru X za model 1. iznosile su 22.262 kN i 44.525 kN, dok su odgovarajuće vrijednosti za model 2. iznosile 13.611 kN i 26.091 kN. Vrijednosti za model 2. bile su niže za 38,8 % i 41,4 % u odnosu na model 1.



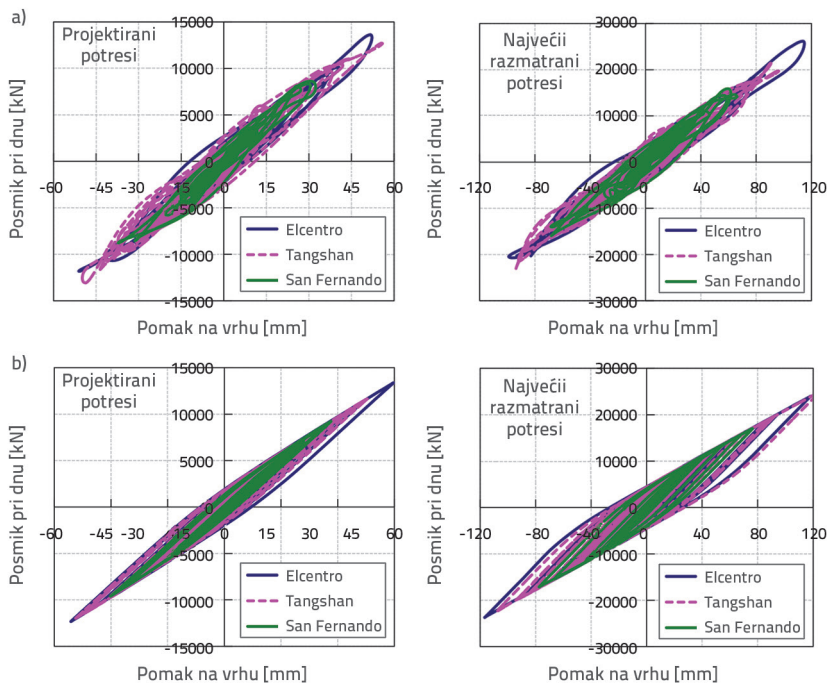
Slika 10. Maksimalni katni pomak pri djelovanju triju seizmičkih valova: a) smjer X; b) smjer Y



Slika 11. Maksimalni kut pomaka kata pri djelovanju triju seizmičkih valova: a) smjer X; b) smjer Y



Slika 12. Krivulja posmika pri dnu i pomaka na vrhu modela 1.: a) smjer X; b) smjer Y



Slika 13. Krivulja posmika pri dnu i pomaka na vrhu modela 2.: a) smjer X; b) smjer Y

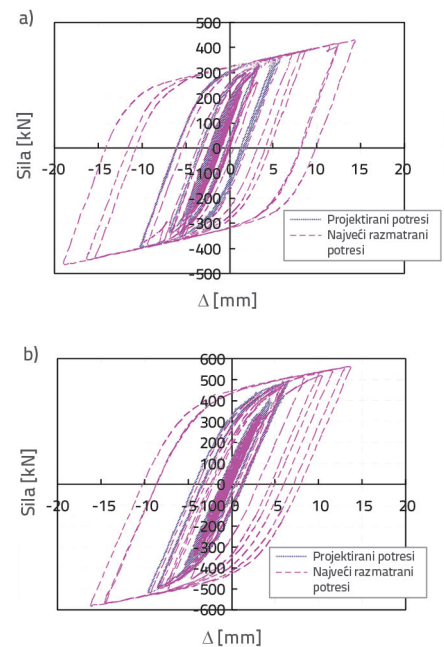
Pri djelovanju projektiranoga i najjačega očekivanog potresa maksimalne ukupne posmične sile u razini temelja u smjeru Y za model 1. iznosile su 17.445 kN i 34.889 kN, dok su odgovarajuće vrijednosti za model 2. iznosile 13.379 kN i 24.773 kN. Vrijednosti za model 2. bile su niže za 23,3 % i 29,0 % u odnosu na model 1. Numerički rezultati pokazuju da teleskopski dijagonalni elementi

prigušivanjem u smjeru X kod modela 1. iznosila je 64,9 % i 67,9 % ukupne unesene energije, dok su odgovarajuće vrijednosti za model 2. iznosile 88,5 % i 96,5 % ukupne unesene energije. Vrijednosti za model 2. bile su 36,4 % i 42,1 % više u odnosu na model 1. Pri djelovanju projektiranoga i najjačega očekivanog potresa disipacija energije prigušivanjem u smjeru Y kod modela

za bočno pridrzanje mogu učinkovito smanjiti seizmičku posmičnu silu konstrukcije pri djelovanju projektiranoga i najjačega očekivanog potresa.

3.3.3. Disipacija energije prigušivanjem u konstrukcijskome sustavu

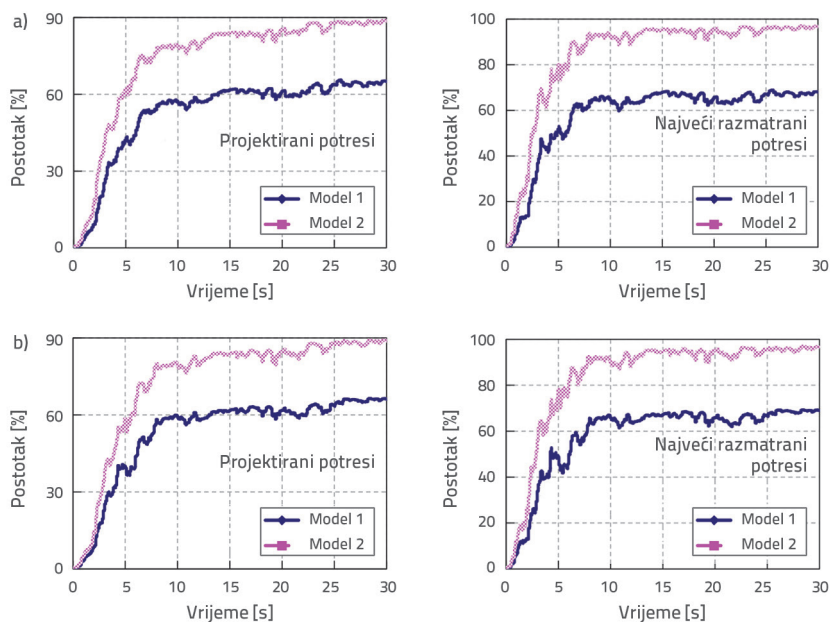
Petlja histereze sila – pomak prigušivača unutar konstrukcije pod djelovanjem seizmičkih zapisa prikazana je na slici 14. Pri djelovanju i projektiranog i rijetkog (najjačeg) potresa petlja histereze pokazuje robusno ponašanje, što upućuje na znatan kapacitet prigušivača za disipaciju seizmičke energije.



Slika 14. Histerezna krivulja sile i pomaka prigušivača: a) smjer X; b) smjer Y

Prosječni omjer disipirane energije prigušivanjem u odnosu na ukupnu unesenu energiju konstrukcije pod djelovanjem triju seizmičkih zapisa prikazan je na slici 15.

Pri djelovanju projektiranoga i najjačega očekivanog potresa disipacija energije prigušivanjem u smjeru X kod modela 1. iznosila je 64,9 % i 67,9 % ukupne unesene energije, dok su odgovarajuće vrijednosti za model 2. iznosile 88,5 % i 96,5 % ukupne unesene energije. Vrijednosti za model 2. bile su 36,4 % i 42,1 % više u odnosu na model 1. Pri djelovanju projektiranoga i najjačega očekivanog potresa disipacija energije prigušivanjem u smjeru Y kod modela



Slika 15. Prosječne vrijednosti omjera potrošnje energije prigušenja i ulazne energije: a) smjer X; b) smjer Y

1. iznosilo je 65,9 % i 68,8 % ukupne unesene energije, dok su odgovarajuće vrijednosti za model 2. iznosile 88,7 % i 96,4 % ukupne unesene energije. Vrijednosti za model 2. bile su za 34,6 % i 40,1 % više u odnosu na model 1. Numerički rezultati upućuju na to da teleskopski dijagonalni elementi za bočno pridržanje mogu imati važnu ulogu u prigušivanju i disipaciji energije.

4. Zaključak

U ovom je radu istražen teleskopski dijagonalni element za bočno pridržanje te je predložen njegov projektantski postupak. Točnost projektiranja potvrđena je analizom metodom konačnih elemenata u kombinaciji s postojećim eksperimentalnim podacima. Seizmičko ponašanje konstrukcija okvira s teleskopskim dijagonalnim elementima analizirano je metodom nelinearne dinamičke analize odziva. Glavni zaključci su sljedeći:

- Teorijska analiza i numeričke simulacije pokazale su da teleskopski dijagonalni element za bočno pridržanje može učinkovito iskoristiti savojno popuštanje zakrivljenog dijela eliptične čelične cijevi pri djelovanju tlačnih i vlačnih sila, čime ostvaruje izvrsnu učinkovitost u prigušivanju i disipaciji energije. Petlja histereze elementa jest robusna, a kapacitet

za disipaciju seizmičke energije znatan. Pod djelovanjem jakih potresa može se učinkovito smanjiti ukupna posmična sila u razini temelja i pomak vrha konstrukcije.

- Pri djelovanju projektiranoga i najjačega očekivanoga potresa, a u usporedbi s tradicionalnom okvirnom konstrukcijom od armiranog betona (model 1.), pomaci vrha i maksimalni međukatni pomaci konstrukcije u smjerovima X i Y znatno su smanjeni uporabom teleskopskih dijagonalnih elemenata (model 2.). To pokazuje da takav element učinkovito povećava horizontalnu krutost i poboljšava seizmičko ponašanje konstrukcije.
- Pod djelovanjem jakih potresa teleskopski dijagonalni element znatno smanjuje ukupnu posmičnu silu u razini temelja. Rezultati numeričkih simulacija pokazuju da je ukupna posmična sila za model 2.

smanjena za 38,8% u smjeru X i za 23,3% u smjeru Y u odnosu na model 1. To upućuje na to da element može učinkovito preuzimati i disipirati seizmičku energiju tijekom potresnih djelovanja, čime se smanjuje oštećenje konstrukcijskih elemenata.

- Pri djelovanju projektiranoga i najjačega očekivanog potresa udio energije disipirane prigušivanjem pomoću teleskopskih dijagonalnih elemenata u odnosu na ukupnu unesenu energiju bio je znatno veći nego kod tradicionalnih konstrukcija. Numerički rezultati pokazuju da je kapacitet disipacije energije prigušivanjem kod modela 2. bio za 36,4 % i 34,6 % veći u smjerovima X i Y u odnosu na model 1. To pokazuje da teleskopski dijagonalni elementi imaju važnu ulogu u disipaciji energije tijekom potresa, čime dodatno poboljšavaju seizmičko ponašanje konstrukcije.

Zahvala

Ovaj je rad financijski podržao Projekt otvorenog istraživačkog fonda Instituta za strukturno inženjerstvo Sveučilišta Shenzhen (SZURISE: 2019-05). Zahvaljujemo na stipendiji Državnog fonda za stipendije Istraživačkog instituta za strukturno inženjerstvo Sveučilišta Shenzhen.

LITERATURA

- [1] Tamahloult, M., Tiliouine, B.: 3D nonlinear seismic analysis and design of base-isolated buildings under near field ground motions, GRAĐEVINAR, 75 (2023) 5, pp. 483-493, <https://doi.org/10.14256/JCE.3548.2022>
- [2] Kandemir, E.C.: Alternate approach for calculating the optimum viscous damper size, GRAĐEVINAR, 75 (2023) 2, pp. 153-162, <https://doi.org/10.14256/JCE.3539.2022>

- [3] Zhou, Z., Cao, W., Liu, Y., Li, J.: Seismic behaviour of composite shear wall with steel reinforced concrete frame and embedded perforated-steel plate, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 5, pp. 383-392, <https://doi.org/10.14256/JCE.2770.2019>
- [4] Clark, P., Aiken, I., Kasai, K., Ko, E., Kimura, I.: Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices, in: *Proceedings of 68th Annual Convention*, Santa Barbara, CA, USA, 1999, pp. 355-71.
- [5] Luo, K., Cheng, S., Bai, X., Rong, W.: Analysis of mechanical behavior of the buckling restrained energy-dissipation braces (in Chinese), *Earthq Resist Eng Retrofit*, 29 (2007), pp. 23-27. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-8412.2007.02.005>
- [6] Cheng, G., Ye, L., Cui, H.: Study on the design method of buckling-restrained brace (in Chinese), *J Build Struct*, 29 (2008), pp. 40-48, <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6869.2008.01.006>
- [7] Li, G., Sun, F., Deng, Z., Guo, X., Jin, H.: Experimental study on the aseismic performance of buckling-restrained braces (in Chinese), *Build Struct*, 44 (2014), pp. 71-78.
- [8] Baird, A., Smith, T., Palermo, A., Pampanin, S.: Experimental and numerical Study of U-shape Flexural Plate (UFP) dissipators, in: *Proceedings of 2014 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference (NZSEE)*, Auckland, New Zealand, 2014, pp. P2.1-9.
- [9] Chen, Y., Palermo, A., Mashal, M.: Cyclic tests of an innovative seismic bracing member-multiple U-shaped flexural plates dissipater in: *Proceedings of 2020 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference (NZSEE)*, Auckland, New Zealand, 2020, pp. P2.1-189.
- [10] Kelly, J.M., Skinner, R.I., Heine, A.J.: Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures, *Bull N Z Soc Earthq Eng*, 5 (1972), pp. 63-88. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.5.3.63-88>
- [11] Liu, H.W.: *Mechanics of Materials* (in Chinese), 5th ed., Higher Education Press, Beijing, 2011.
- [12] Chegini, Z.: *Low-damage seismic design of bridge superstructures for accelerated bridge construction*, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2018.
- [13] Beijing Construction Information Solution Engineering Consulting, *SAP2000 Technical Guide and Engineering Application*, Chinese Version (in Chinese), China Communications Press, Beijing, 2018.
- [14] GB 50011-2010: *Code for seismic design of buildings* (in Chinese). Ministry of Housing and Urban-Rural Construction, General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine (2010).
- [15] GB 50010-2010: *Code for design of concrete structures* (in Chinese). Ministry of Housing and Urban-Rural Construction, General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine (2010).
- [16] Folić, R., Čokić, M., Folić, B., Brujić, Z.: Damage assessment, fragility, and vulnerability analysis of reinforced concrete building, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 6, pp. 591-606, <https://doi.org/10.14256/JCE.3623.2022Jeta>