

Primljen / Received: 19.12.2020.

Ispravljen / Corrected: 10.11.2021.

Prihvaćen / Accepted: 19.12.2021.

Dostupno online / Available online: 10.9.2022.

Procjena krivulje oštetljivosti čelične okvirne konstrukcije kod različitih potresa

Autori:



¹Doc.dr.sc. **Huihui Zhao**
zhaohuihui2020@126.com
Autor za korespondenciju



²**Xiaopeng Wang**, dipl.ing.građ.
zgzstd@126.com



³**Zhichun Fang**, dipl.ing.građ.
fzc@stdu.edu.cn



⁴**Siqi Wu**, dipl.ing.građ.
Wusiqi20210525@163.com



⁵**Mansour Afzal**, dipl.ing.građ.
Mansour.A@hotmail.com

¹ Strukovno i tehničko sveučilište Yuncheng, Kina
Odjel za arhitekturu i građevinarstvo

² Shanxi Yuncheng Construction Engineering Group, Kina

³ Sveučilište Shijiazhuang Tiedao, Kina
Građevinska škola

⁴ Sveučilište Shijiazhuang Tiedao, Kina
Prometna škola

⁵ Islamsko sveučilište Azad, Ardabil, Iran

Stručni rad

Huihui Zhao, Xiaopeng Wang, Zhichun Fang, Siqi Wu, Mansour Afzal

Procjena krivulje oštetljivosti čelične okvirne konstrukcije kod različitih potresa

Cilj je ovog istraživanja ispitati učinak dviju kategorija potresnih događaja na krivulju oštetljivosti čelične okvirne konstrukcije zgrade (građevine s različitim brojem katova) razmatranjem relativnog bočnog pomaka kao kriterija oštećenosti. Kategorije za opisivanje promjene relativnog bočnog položaja bile su blaga, umjerena, značajna i potpuna. Kako se povećava seizmički zahtjev, veća je vjerojatnost prekoračenja. Drugim riječima, ako maksimalno ubrzanje potresa raste, povećava se vjerojatnost prekoračenja (eng. probability of exceeding - PoE). Povećanja vršnog ubrzanja tla (PGA) povećat će PoE trokatne konstrukcije pri značajnom oštećenju. Krivulje oštetljivosti druge kategorije pokazuju pomak iz stanja mirovanja (postupni porast) u stanje stajanja (nagli porast) u usporedbi s potresima prve klase kod modela s pet katova. Sve veći broj katova utječe na povećanje PoE pri značajnom i teškom oštećenju i povećava vjerojatnost prekoračenja. Model sa sedam katova u značajnom načinu ima 10 i 15,5 % PoE veći od modela s pet i tri kata. Međutim, u stanju potpune oštećenosti, PoE u modelu s pet katova je 6 i 7 puta veća nego u modelu sa sedam i tri kata. Stoga se može zaključiti da je s povećanjem broja katova porasala PoE, što se može bolje uočiti pri značajnom stupnju oštećenja.

Ključne riječi:

krivulje oštetljivosti, čelične konstrukcije, vjerojatnost prekoračenja, inkrementalna dinamička analiza (IDA)

Professional paper

Huihui Zhao, Xiaopeng Wang, Zhichun Fang, Siqi Wu, Mansour Afzal

Assessment of fragility curve for steel frame construction under different categories of earthquakes

The aim of this study is to investigate the effect of two categories of earthquake events on the fragility curves of steel building construction (structures with different number of stories) by considering relative lateral displacement as a damage criterion. The categories used to describe the change in the relative lateral position were chosen to be slight, moderate, extensive, and complete. Increased seismic demand increases the probability of exceeding. In other words, the greater the maximum earthquake acceleration, the higher is the probability of exceeding (PoE). In a 3-story structure, the increase in PGA increases the PoE of the structure at extensive failure levels. The fragility curves for the 2nd category earthquakes show a shift from the sleeping mode (gradual increase) to the standing state (rapid increase) compared to the 1st-class earthquakes in the 5-story model. Increasing the number of stories increases the PoE of extensive and large failures. The PoE of the extensive mode in the 7-story model was 10 and 15.5 % higher than that in the 5- and 3-story models, respectively. However, for the complete damage state, the PoE in the 5-story model was 6 and 7 % more than that in the 7- and 3-story models, respectively. Therefore, it can be concluded that increasing the number of stories increases the PoE, but this increase is more evident for the extensive failure level.

Key words:

fragile curve, steel structure, probability of exceeding, incremental dynamic analysis (IDA)

1. Uvod

Razmatrani su opći zahtjevi za gradnju u smislu upravljanja rizikom od potresa, zaštite ljudi, konstrukcija i sigurnosti proizvodnje [1, 2]. Jedna od glavnih strategija u upravljanju potresnim rizikom je ublažavanje rizika, što proširuje cilj smanjenja seizmičke ranjivosti pogođenih građevina. Stoga uključivanje smjernica za seizmičku sanaciju omogućava stručnjacima i inženjerima da uzmu u obzir seizmičke kriterije u svojim projektima [3-5]. Jedan od važnih koraka tijekom predviđanja ponašanja konstrukcija prije potresa jest utvrđivanje prednosti i slabosti konstrukcija [6, 7].

Kao koristan alat predlažu se krivulje oštećljivosti (eng. *Fragility curve* - FRC) prije i poslije potresa [8]. Za statističku analizu različitih konstrukcija, primjenom teorije vjerojatnosti istražena je korelacija između intenziteta potresa i ranjivosti konstrukcija u statističkom obliku [9]. To je važno iz dva gledišta:

- S obzirom na statistički značajnu korelaciju između magnitude potresa i značajne štete od potresa, mogu se predvidjeti posljedice budućih potresa.
- Prepoznavanjem daljnjih nedostataka u projektiranju konstrukcija, moguće je poboljšati dodatne seizmičke propise i, u konačnici, povećati sigurnost konstrukcija [10].

FRC iskazuje vjerojatnost sloma koja odgovara određenom stanju oštećenosti na nekoliko razina seizmičkih gibanja tla. Zapravo, FRC opisuje mogući omjer između određene razine djelovanja potresa i stupnja oštećenosti [11]. Platforma OpenQuake prikupila je i objavila stotine eksperimentalnih i detaljnih funkcija ranjivosti i oštećljivosti kao dio globalnog potresnog modela (GEM) [12, 13]. Postoji nekoliko regija u cijelom svijetu u kojima funkcionalni modeli ranjivosti i oštećljivosti, unatoč porastu njihove dostupnosti u posljednjem desetljeću, nisu javno dostupni, kao što je prikazano na slici 1.

Za točno određivanje ovog odnosa učinkoviti parametar je ispravan odabir razina djelovanja potresa u području na kojem

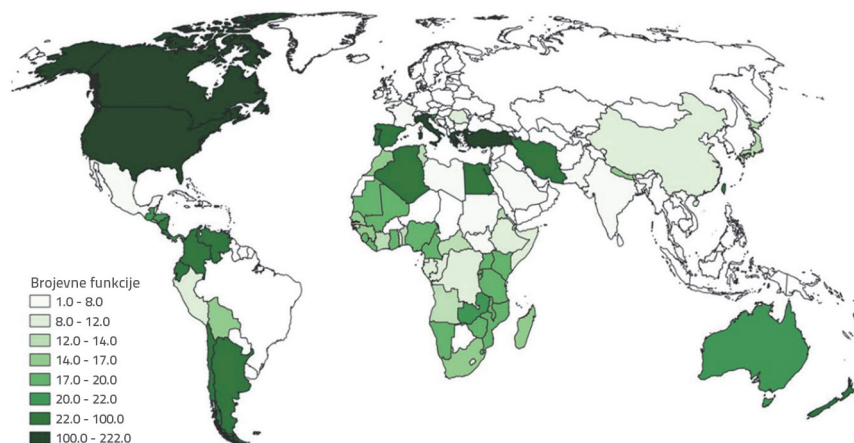
se nalazi konstrukcija [14, 15]. Neki pokazatelji, koji pokazuju jačinu potresa, prikladni za analizu oštećljivosti mogu biti: maksimalno ubrzanje tla (eng. *Peak Ground Acceleration* - PGA) [16], najveća brzina tla (eng. *Peak Ground Velocity* - PGV) [17] i najveći pomak tla (eng. *Peak Ground Displacement* - PGD) [18]. Te se krivulje mogu dobiti racionalnom regresijskom analizom stvarnih ili simuliranih podataka o šteti ili metodama numeričkog rješenja [19]. U posljednja dva desetljeća u znanstvenoj se zajednici naširoko koristi FRC za procjenu ponašanja građevina i rizika uzrokovanog potresom [20, 21]. Metoda krivulje sloma ima značajnu prednost s obzirom na jednostavan pristup; vrijednost krivulje sloma pokazatelj je ranjivosti konstrukcije i njezinih komponenti te omogućuje procjenu očekivane površine oštećenosti za određenu razinu djelovanja potresa [22].

Osnovni korak u procjeni potresnog rizika je procjena fizičkog sloma komponenata infrastrukture nakon potresnog događaja [23]. Mreže FRC-a komponenata nužni su ulazni podaci (*input*) za algoritam procjene sloma.

Te FRC također se primjenjuju ili za procjenu fizičkog sloma konstrukcije ili za procjenu troškova sanacije oštećenosti [24]. Godine 1985. American Applied Technology Group predstavila je niz procjena potresnog rizika u Kaliforniji. Razvijeno je više funkcija za procjenu štete za različite vrste zgrada i objekata te infrastrukturnih komponenti kao matrice štete. Udruga je 1991. godine u izvješću pod naslovom ATC - 25 uspjela djelomično nadoknaditi nedostatke [25]. Godine 2011. Marano i sur. [26] proveli su istraživanje dvije vrste betonskih građevina. U tom istraživanju analitička krivulja sloma dobivena je nasumičnom analitičkom metodom uz pomoć podataka i podataka HAZUS smjernica. Osim toga, istražen je i utjecaj stanja tla i utjecaj konstrukcijskih parametara kao što su tvrdoća, odnos elastične tvrdoće prema plastičnoj i konstrukcijska čvrstoća.

Nedavno su provedena opsežna istraživanja o seizmičkoj ranjivosti, procjeni rizika, probabilističkoj analizi seizmičkih zahtjeva (eng. *Probabilistic Seismic Demand Analysis* - PSDA), riziku od više opasnosti vezanom uz granično stanje rušenja i poboljšanoj krivulji oštećljivosti kroz regresijsku analizu

ili metode temeljene na simulaciji. Celik i Ellingwood [27] implementirali su simulaciju temeljenu na analizi pouzdanosti za određivanje seizmičkih krivulja oštećljivosti i stanja oštećenosti. Mojiri i dr. [28] proučavali su procjenu rizika seizmičke vjerojatnosti i probabilističku analizu potresnih zahtjeva (PSDA), AB modele koje su proučavali primjenom pobude generirane eksperimentalno potresnim stolovima i određivanjem razina seizmičkog zahtjeva krivulja oštećljivosti. Arabzadeh i Galal [29] proveli su istraživanje o osjetljivosti i učinku naknadne ugradnje vlaknima ojačanog polimera (FRP) na seizmičko rušenje sustava za različite



Slika 1. Broj funkcija oštećljivosti ili ranjivosti predstavljeno prema zemlji u OpenQuake-platformi

razine vlačnog učinka i pronašli praktičan raspored ojačanja FRP-om i naprednim krivuljama oštećljivosti. Faghihmaleki i sur. [30] proučili su probabilistički okvir za rizik od više opasnosti povezanih s graničnim stanjem rušenja G+8 AB momentnog okvira s posmičnim zidom koristeći s računalnim programom *Seismostruct* u uvjetima eksplozije i potresnog opterećenja i izradili su krivulje oštećljivosti. Huang i sur. [31] istraživali su analizu metode procjene gustoće vjerojatnosti (eng. *Probability Density Evaluation Method* - PDEM), metode analize dinamičke pouzdanosti i seizmičke oštećljivosti za izradu krivulja oštećljivosti.

Glede smanjenja potresnih rizika, istraživači su nedavno predložili mnoge pristupe u području ranjivosti uključujući metodu za procjenu potresnog rizika za urbane sredine koju je predložio HAZUS. Postoji još jedna metodologija za poboljšanje procjene ranjivosti u Europi, koja je nazvana projekt RISK_UE. Europska komisija smatra taj projekt glavnim razlogom za poboljšanje opće metode procjene seizmičkog rizika u europskim zemljama. To proizlazi iz nedostatka globalnog programa razvijenog u Europi i drugih razloga kao što je socioekonomski i politički učinak potresnih događaja koji su se dogodili u Turskoj, Ateni i Grčkoj, Mouroux i Le Brunu [32]. Iz tog razloga, a osim ovoga projekta, odobrene su još dvije standardne tehnike: razina 1 (LM1), koja se naziva metoda temeljena na indeksu ranjivosti (eng. *Vulnerability Index-based Method* - VIM) i prvobitno je razvijena u Italiji [33, 34], i razina 2 (LM2) koja se naziva metodom baziranom na spektru kapaciteta [35]. Metoda indeksa ranjivosti uspješno je provedena u različitim primjenama u europskim gradovima uključujući Barcelonu, Bitolu, Bukurešt, Cataniju, Nicu, Sofiju, Solun i druge gradove unutar Europske unije. Neki primjeri dovršene metodologije bili su u; Solunu Grčka [36], Barceloni, Španjolska [37], Mérida, Venezuela [38], na Azorima, Portugal [39], na otoku Lampedusi, Italija [40].

U ovom su istraživanju čelične okvirne konstrukcije od tri, pet i sedam katova modelirane u računalnom programu OpenSees i pod utjecajem deset potresnih zapisa u blizini rasjeda prema nelinearnoj dinamičkoj analizi. Izračun FRC-a

napravljen je na temelju inkrementalne dinamičke analize (IDA) i temelji se na vršnom ubrzanju tla (PGA). Parametar u ovom istraživanju temelji se na međukatnom pomaku. U ovom istraživanju deset potresnih zapisa razvrstano je u dvije grupe - s maksimalnim ubrzanjem od 0,4 i manje od 0,4 gravitacijskog ubrzanja, iz različitih dijelova svijeta koji su se dogodili na tlu tipa II, u rasponu od 0,1g do 1g u intervalima od 0,1g. Stoga, proizvedeno je 100 potresnih zapisa. Nacrane su FRC-e (krivulje oštećljivosti) za dvodimenzionalne okvire triju čeličnih konstrukcija, koje su zatim istražene i ispitane usporedbom dobivenih krivulja na temelju faktora koji utječu na FRC-e.

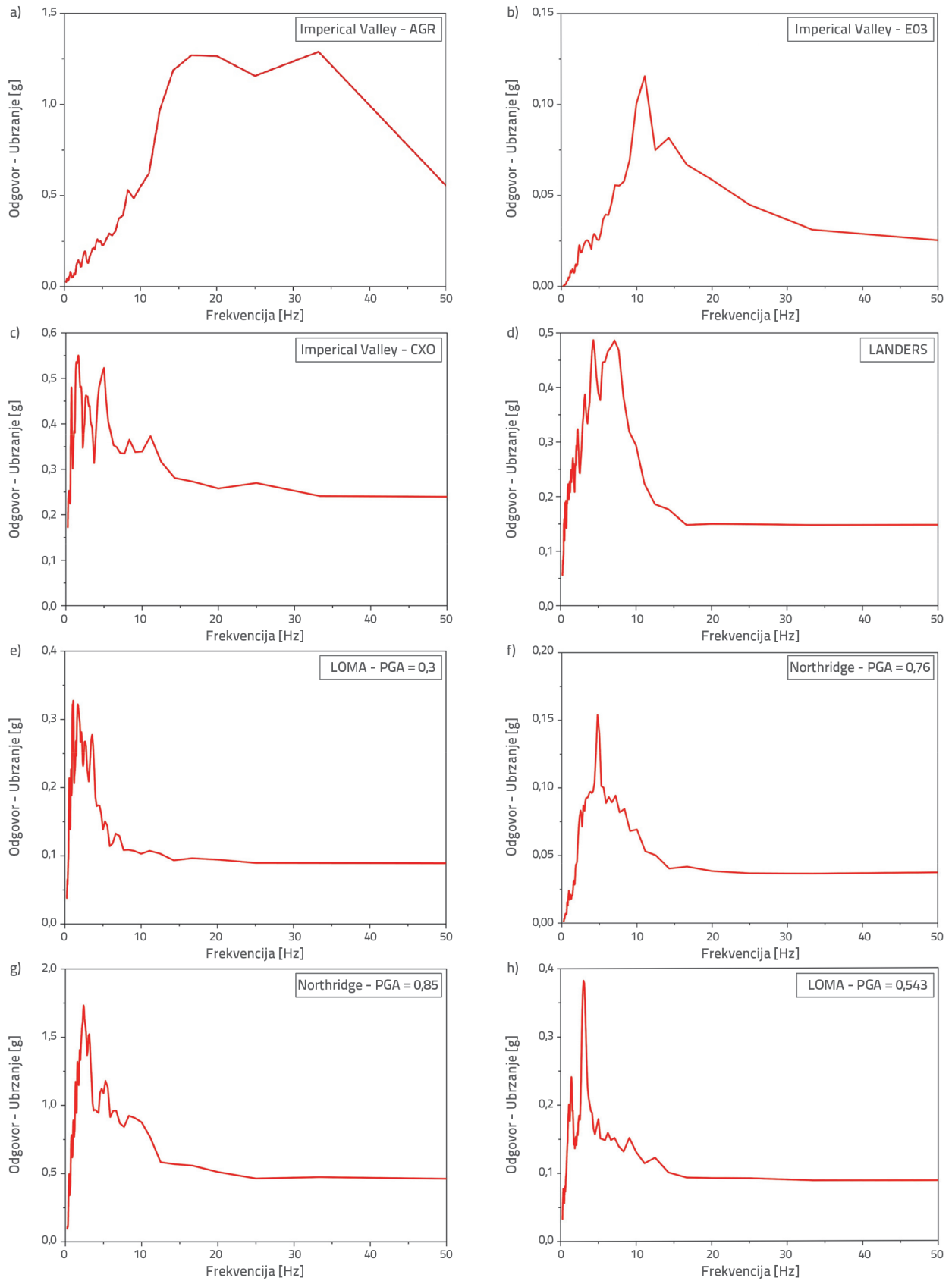
2. Metodologija

2.1. Modeliranje i odabir potresnih zapisa

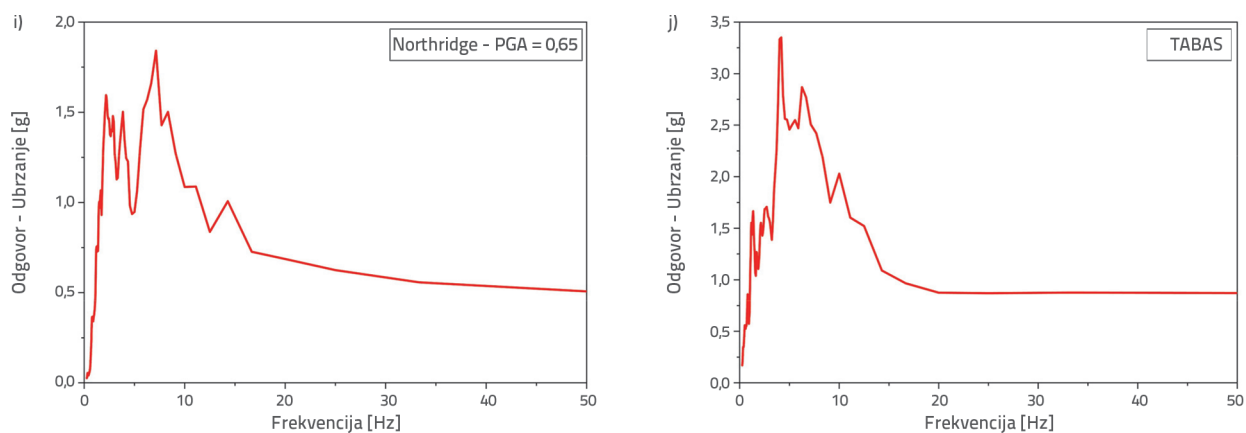
U ovom istraživanju, tri čelične okvirne konstrukcije različitih katnosti (3, 5 i 7 katova) modelirane su u računalnom programu OpenSees primjenom nelinearne dinamičke analize i pod djelovanjem deset potresnih zapisa u blizini rasjeda. Prikaz FRC-a izrađen je na temelju IDA-e i temelji se na PGA-u. Parametar proučavan u ovom istraživanju temelji se na vrijednostima međukatnih pomaka. Prema prethodnim istraživanjima, korištenje 10 do 20 potresnih zapisa obično ima prihvatljivu točnost kod procjene oštećenosti. Deset potresnih zapisa, izdvojeno iz Pacifičkog istraživačkog centra za potresno inženjerstvo, razvrstano je u dvije grupe (1. i 2. klase) s maksimalnim ubrzanjem većim od 0,4 i manjim od 0,4g koji su se dogodili na tlu tipa II. Ti su zapisi zatim dalje podijeljeni na 100 potresnih zapisa izdavanjem potresa u rasponu od 0,1g do 1g u intervalima od 0,1g. Specifikacije prve i druge klase zapisa, fizikalna svojstva i seizmička svojstva zgrade i presjeka glavnih stupova i greda prikazani su u tablicama 1. do 3. Također, izometrijski i tlocrtni prikaz zgrade s čeličnim okvirom od 3, 5 i 7 katova predložen je na slici 2.

Tablica 1. Specifikacije za izabrane rekordne potrese prve i druge klase

Klasa br.	Potresi				PGA [m/s ²]
	Ime	Magnituda	Trajanje [s]	Godina	
1. zapisi	Imperial Vally (AGR)	6,5	28,430	1979.	0,37
	Imperial Vally (E03)	6,5	11,025	1979.	0,22
	Imperial Vally (CXO)	6,5	39,995	1979.	0,27
	Landers	7,3	49,980	1992.	0,27
	Loma Prieta	6,9	25	1989.	0,3
2. zapisi	North ridge/Sj greben	6,7	29,980	1994.	0,76
	North Ridge	6,7	39,980	1994.	0,85
	Loma Prieta	6,9	39,985	1989.	0,543
	Loma Prieta	6,9	39,990	1989.	0,65
	Tabas	7,4	32,980	1978.	0,4



Slika 2. Spektri frekvencija razmatranih potresa: a) do e) 1. zapisi; f) do j) 2. zapisi



Slika 2. Spektri frekvencija razmatranih potresa: a) do e) 1. zapisi; f) do j) 2. zapisi (nastavak)

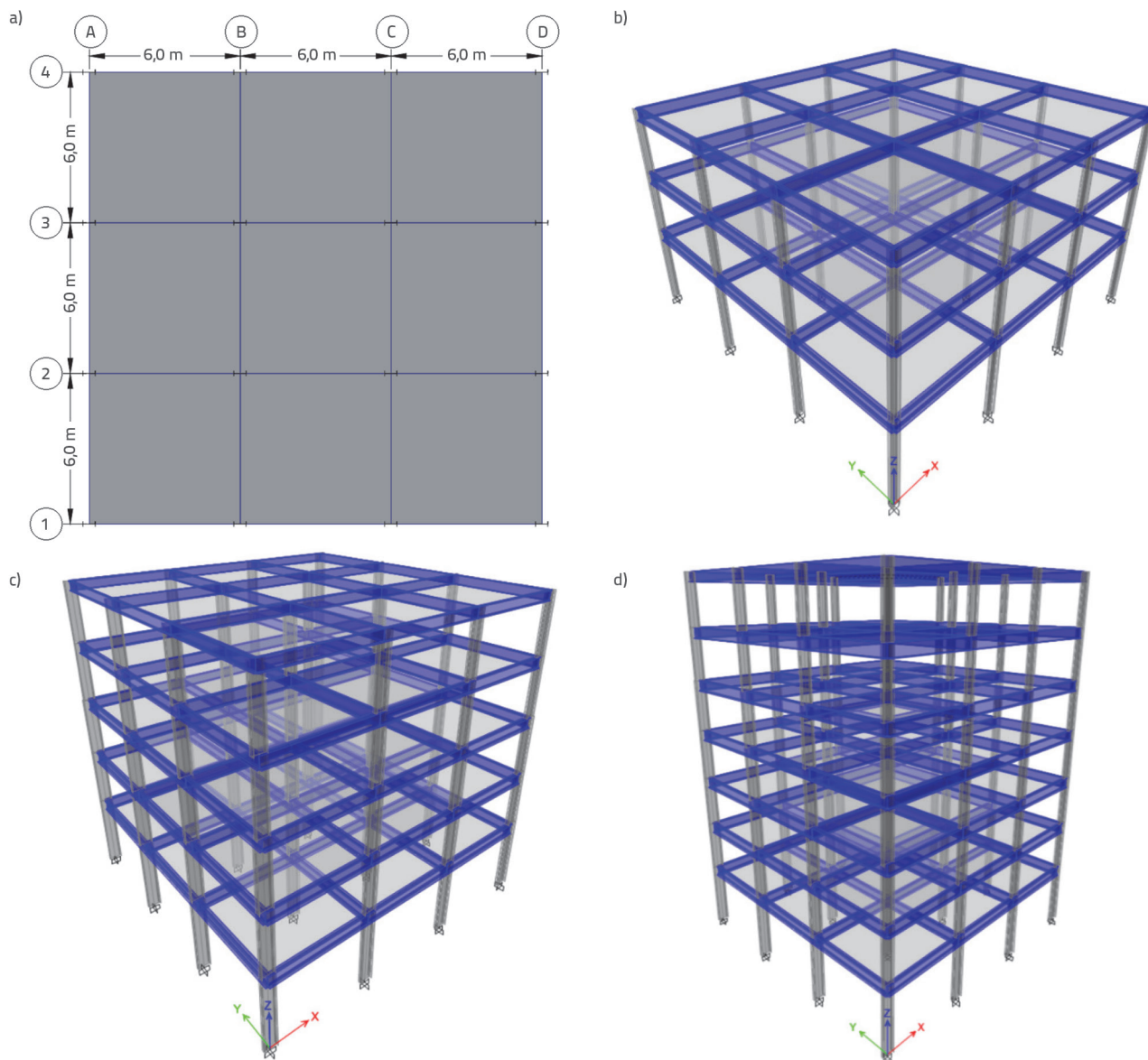
Sva primijenjena opterećenja i tip tla određeni su prema propisima za projektiranje Američkog društva građevinskih inženjera (ASCE) 7/10 (ASCE 2010). Stalna opterećenja uključuju vlastitu težinu greda, stupova, ploča i zidova. Smatra se da je debljina ploče te unutarnjih i vanjskih zidova 150 mm, 150 mm, odnosno 200 mm. U ovom ispitivanju upotrijebljen je beton uobičajene težine tlačne čvrstoće 30 MPa i čelik s granicom tečenja 360 MPa i modula elastičnosti 200 GPa. Krute membrane, koje predstavljaju međukatni sustav zgrade, zadane su ograničavanjem svih točaka na svakoj razini poda etaže u modelu. Također, spektri frekvencija razmatranih potresa prikazni su na slici 3.

Tablica 2. Svojstva modela

Parametar	Vrijednost
Vrsta čelika	Fe 415
Visina kata	4,5 i 3,5 m
Ukupna visina zgrade	11,5 m
	18,5 m
	25,5 m
Potresna zona	5
Faktor važnosti (I)	1
Vrsta tla	II
Stalno opterećenje	4 kN/m ²
Korisno opterećenje	2 kN/m ²

Tablica 3. Dijelovi glavnih stupova i greda

Model	Kat	Visina kata [m]	Dijelovi stupova i greda	
			Stup	Greda
3-katni	1	4,5	W12×87	W24×84
	2	3,5	W12×87	W24×84
	3	3,5	W12×87	W24×84
5-katni	1	4,5	W24×146	W27×94
	2	3,5	W24×131	W27×94
	3	3,5	W24×131	W24×84
	4	3,5	W24×117	W24×84
	5	3,5	W24×76	W21×93
7-katni	1	4,5	W24×146	W27×102
	2	3,5	W24×146	W27×102
	3	3,5	W24×131	W27×102
	4	3,5	W24×131	W27×94
	5	3,5	W24×131	W27×94
	6	3,5	W24×84	W27×94
	7	3,5	W24×76	W24×68



Slika 3. Prikazi modela: a) tlocrtni prikaz, b) 3D prikaz: 3-katni, c) 3D prikaz: 5-katni, d) 3D prikaz: 7-katni

2.2. Krivulje oštettljivosti

Krivulje potresne oštettljivosti uključuju dvije mogućnosti neovisnih vjerojatnosti. Jedan od tih pojmova je probablistički model potresnih zahtjeva. Vjerojatnije je da će drugi probablistički pojam biti značajan kod određene razine potresnog djelovanja nego specifični granični parametar inženjerskih zahtjeva te ga je moguće promotriti za određenu razinu potresnog djelovanja. Stanja konstrukcije građevine biraju se tako da se na odgovarajući način odražavaju u postupku proračuna i prikazuju se kapacitetom nosivosti (C). Ove mogućnosti su prikazane kao izraz (1).

$$\text{oštettljivost} = P[D \geq C | IM] = P[C - D \leq 0,0 | IM] \tag{1}$$

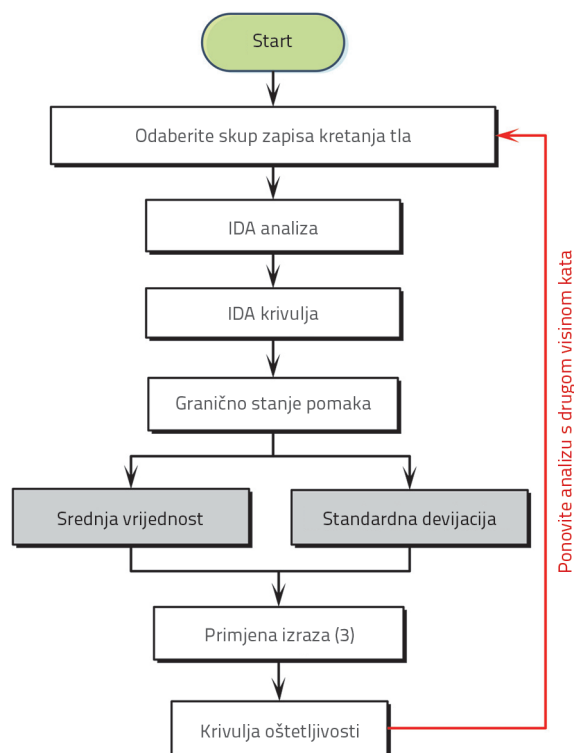
Kada je zahtjev potresna razina, a nosivost konstrukcije slijedi normalnu log-normalnu raspodjelu vjerojatnosti, izraz (1) oštettljivosti prikazan je kao izraz (2).

$$P[C - D \leq 0,0 | IM] = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{s_d}{s_c} \right)}{\sqrt{\beta_d | IM^2 + \beta_c^2}} \right] \tag{2}$$

gdje je β_c , $\beta_d | IM$ i s_d su standardna devijacija log-normalne raspodjele (disperzija) zahtjevana u kapacitetu, srednja vrijednost graničnog stanja ili potresnog kapaciteta i potresnog zahtjeva koji je funkcija IM-a. $\sqrt{\beta_d | IM^2 + \beta_c^2}$ u kombinaciji s HAZUS metodom postao je β_{sd} parametar. Odnos oštettljivosti je u

konačnici napisan kao izraz (3). Slika 4. prikazuje korake u razvoju krivulje oštećljivosti u ovom istraživanju.

$$P_f = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{S_d}{S_c} \right)}{\beta_{sd}} \right] \quad (3)$$



Slika 4. Postupak razvoja krivulje oštećljivosti

Stanja oštećenosti uvedena u uputama HAZUS-a za čelične zgrade s fleksibilnim okvirnim sustavima s visokim razinama raspoređena su sljedećim redoslijedom: djelomično oštećenje (malo), srednje oštećenje (umjereno) značajno oštećenje (značajno) i stanje potpunog oštećenja (potpuno). Brojčane vrijednosti za svako stanje oštećenosti prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Omjer međukatnih pomaka između dvije klase za svaku razinu oštećenosti na temelju HAZUS-a

Stanja oštećenosti	Građevina sa srednjim brojem katova	Građevina s velikim brojem katova
Malo (S)	0,004	0,003
Umjereno (M)	0,008	0,006
Znatno (E)	0,02	0,015
Potpuno (C)	0,0533	0,04

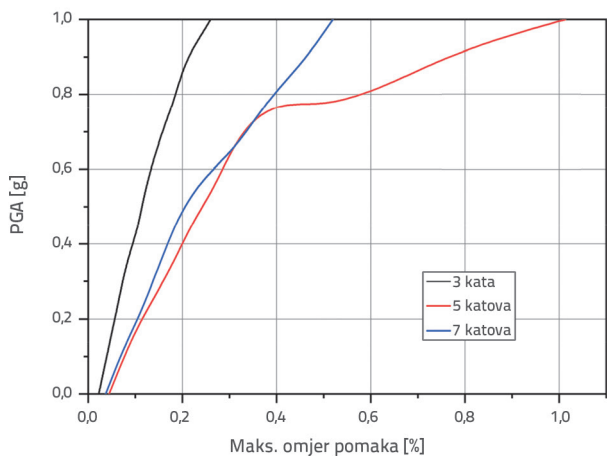
2.3. Inkrementalna dinamička analiza

Jedna od najnovijih metoda predstavljanja FRC-a je IDA. U toj se metodi konstrukcijski model postavlja za jedan ili više potresnih zapisa, a zatim skalira promjenom razina intenziteta. Nakon provedbe nelinearne dinamičke analize, izračunane su jedna ili više parametarskih krivulje odgovora prema razini potresnog djelovanja. U tim krivuljama pokriven je cijeli raspon ponašanja modela. Na kraju se konstrukcija može ocijeniti definiranjem stanja razmjera oštećenosti, a rezultati su izraženi kao kombinacija dobivenih krivulja analize. Nakon modeliranja i nanošenja opterećenja istraženih konstrukcija, ubrzanog kartiranja brzine primijenjenog na modele, te nakon izvođenja IDA za svaki model, dobiva se maksimalni iznos međukatnog pomaka, te se dobivene vrijednosti uspoređuju s kriterijima definiranim HAZUS kriterijem. Zatim, pomoću postojećih odnosa za izračunavanje vjerojatnosti sloma i potrebnih koeficijenata, dobiva se vjerojatnost pojavljivanja bilo kojeg stanja oštećenosti na bilo kojem katu za svaki model. Na kraju se izrađuje krivulja oštećljivosti na osnovi statističkih odnosa između podataka. Na svim grafovima (slike 5. do 7.) horizontalna os je najveći bočni pomak (%), a vertikalna os maksimalno ubrzanje uslijed gravitacije. Također, slike 8. do 10. predstavljaju rezultate međukatnih pomaka za zgrade od 3, 5 i 7 katova za specifične potrese. S_c i β_{sd} vrijednosti su prikazane u uputama HAZUS-a za različite vrste konstrukcije i različite vrste oštećenosti, koje su prikazane u tablici 5.

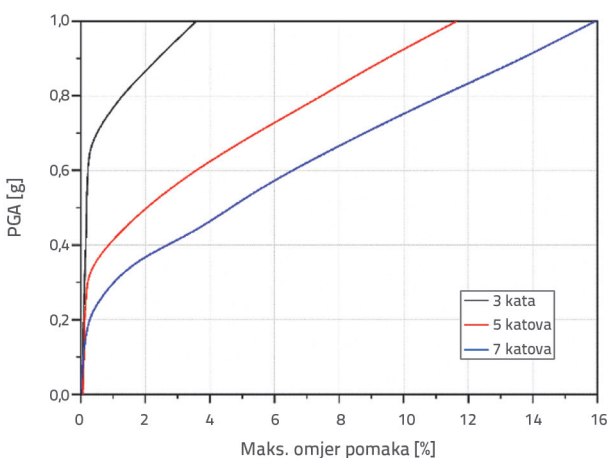
Za pripremu difrakcijske krivulje korištenjem vjerojatnosti, utvrđuje se vjerojatnost bilo kojeg stanja oštećenosti s obzirom

Tablica 5. Vrijednosti S_c i β_{sd} (upute HAZUS)

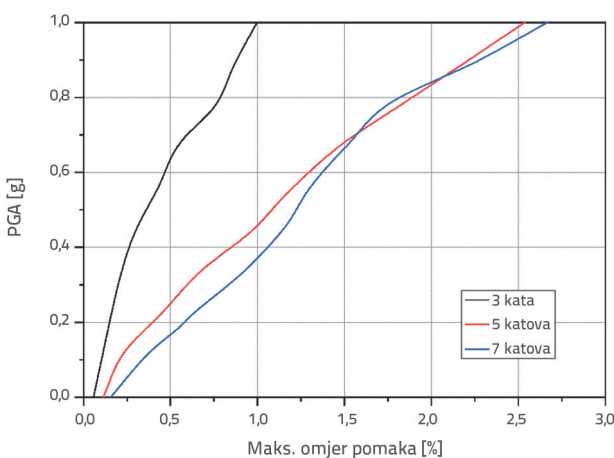
Tip	Malo		Umjereno		Značajno		Potpuno	
	S_c	β_{sd}	S_c	β_{sd}	S_c	β_{sd}	S_c	β_{sd}
S1L	1.3	0,80	2,59	0,76	6,48	0,69	17,28	0,72
S1M	2.16	0,65	4,32	0,66	10,80	0,67	28,80	0,74
S1H	3.37	0,64	6,74	0,64	16,85	0,65	44,93	0,67
C1L	0.9	0,81	1,8	0,84	5,40	0,86	14,40	0,81
C1M	1.5	0,68	3	0,67	9,00	0,68	24,00	0,81
C1H	2.16	0,66	4,32	0,64	12,96	0,67	34,56	0,78



Slika 5. IDA krivulje za građevine s 3, 5 i 7 katova za Imperial Vally

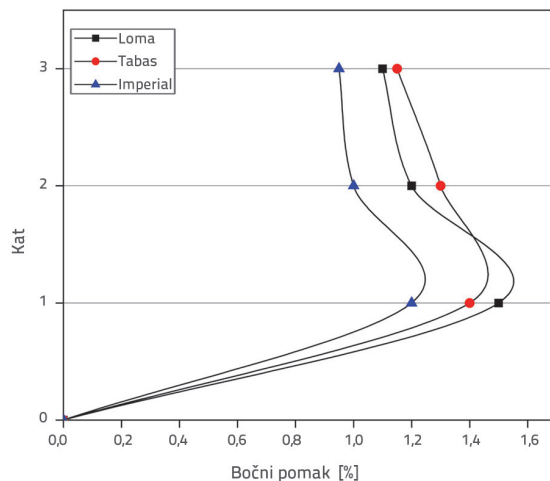


Slika 6. IDA krivulje za građevine s 3, 5 i 7 katova za Loma Prieta

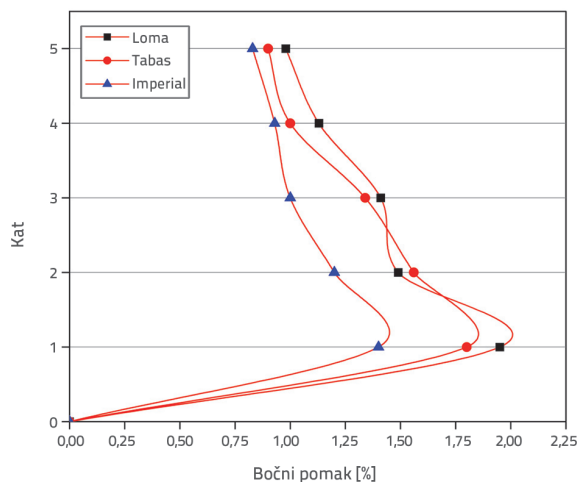


Slika 7. IDA krivulje za građevine s 3, 5 i 7 katova za Tabas

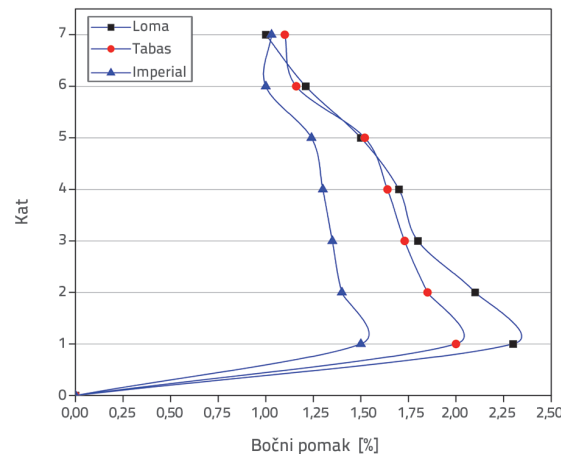
na broj analiza i izrađuje se difrakcijska krivulja s obzirom na vjerojatnosti i intenzitet kretanja Zemlje. Također, FRC-e su predstavljene na osnovi konceptata objašnjenih izrazom (3). Ova brojka je izvedena iz tablice 5. za svaki model i svako stanje oštećenosti. Umetanjem $ln(s_d)$, dobiva se numerička vrijednost za svako sljedeće stanje oštećenosti, a PGA vrijednost se određuje uzimanjem normalne raspodjele te vrijednosti. Vjerojatnost



Slika 8. Rezultati međukatnih pomaka za zgradu s tri kata



Slika 9. Rezultati međukatnih pomaka za zgradu s pet katova



Slika 10. Rezultati međukatnih pomaka za zgradu sa sedam katova

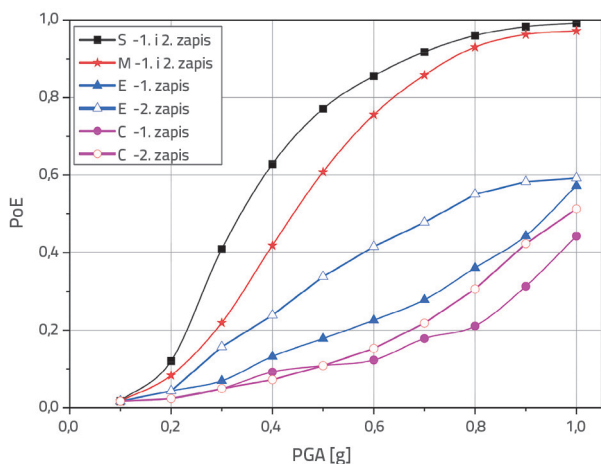
rušenja konstrukcije odabire se iz bilo kojeg stanja sloma. Na primjer, peterokatna građevina pod utjecajem prvorazrednih zapisa bila je pet puta u stanju malog oštećenosti, tri puta u stanju srednjeg oštećenosti, jedno opterećenje u stanju velikog oštećenosti i jedno opterećenje u potpunom oštećenju.

Tablica 6. Broj prekoračenja u četiri načina sloma prema prema prvim i drugim zapisima

Zapisi	Malo		Umjereno		Značajno		Potpuno	
	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
3 kata	4	4	4	4	1	2	0	2
5 katova	3	4	3	3	1	2	1	1
7 katova	3	4	4	4	3	3	1	0

3. Analiza modela

Za ispravno funkcioniranje konstrukcije, mogućnost konstrukcijskog sloma na bilo kojoj razini ponašanja trebala bi biti ispod 50 %, inače se svojstva konstrukcije ocjenjuju u nepoželjnom graničnom stanju. U ovom dijelu FRC-e za trokatni čelični model s po dva različita potresna događaja prikazani su na slici 11., za čelični model s pet katova na slici 12., a za čelični model sa sedam katova prikazan je na slici 13. U tablici 6. prikupljen je broj prekoračenja u četiri načina sloma pod prvim i drugim potresnim zapisom. U ovom istraživanju korištene su dvije različite kategorije zapisa za izradu FRC-a. Svrha ovog istraživanja je ispitati učinak dviju klasa potresa na FRC čeličnih okvira. Glavna razlika između broja zapisa prve klase i zapisa druge klase je u vršnom ubrzanju tla u ove dvije kategorije. Prema tome, dva skupa potresnih zapisa su pojava dva uzastopna potresna događaja i usporedba FRC-e za dva potresna događaja.



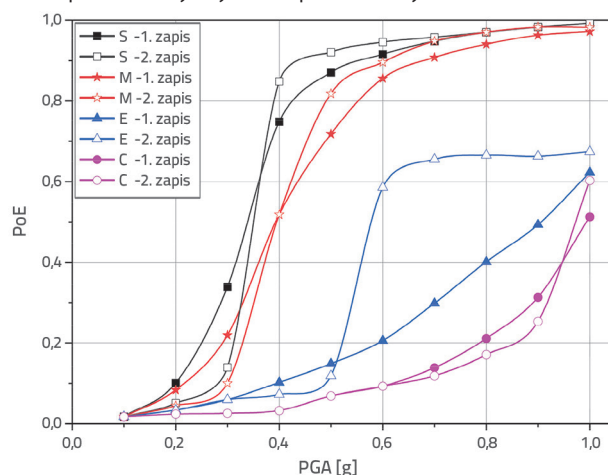
Slika 11. FRC trokatne konstrukcije prema prvim i drugim zapisima

Usporedbom slike 11. očito je da nema značajne razlike u dvije razine blagih i umjerenih razina oštećenosti FRC-a u drugom potresu (PGA jednak 0,85g) u usporedbi s prvim potresom (PGA jednak 0,35g). Drugim riječima, povećanje PGA ima mali utjecaj na vjerojatnost prekoračenja blage do umjerene razine oštećenja. Povećanja PGA povećat će PoE trokatne strukture pri značajnim razinama sloma.

Uočeno je da su se krivulje oštećljivosti ploča druge kategorije pomaknule iz stanja mirovanja u stanje stajanja (nagli

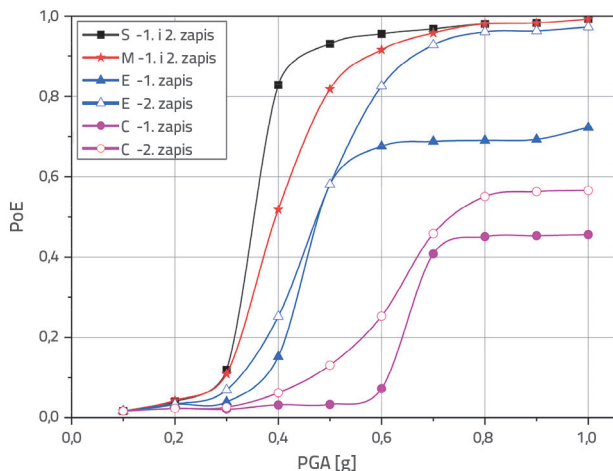
porast) u usporedbi s pločama prve klase. Dakle, radi se o povećanju broja razreda u odnosu na ono što se dogodilo u trokatnoj konstrukciji. Slijedom toga, može se zaključiti da se povećanjem broja katova može povećati vjerojatnost prekoračenja.

Usporedbom slike 12., uočava se da FRC-e pod utjecajem potresnog događaja druge klase imaju značajne razlike u blagim i u umjerenim razinama sloma u odnosu na one koje su pod utjecajem potresnog događaja prve klase. Drugim riječima, povećanje PGA do razine sloma povećala su vjerojatnost prekoračenja. Uočeno je da su se krivulje oštećljivosti za potrese druge kategorije pomaknule iz stanja mirovanja u stanje stajanja u usporedbi s onima za prvu klasu potresnih zapisa. U odnosu na trokatnu konstrukciju, kod peterokatne konstrukcije postoji određeno povećanje broja različitih oblika sloma uslijed promjene potresnog događaja iz prve u drugu klasu. Slijedom toga, može se zaključiti da se povećanjem broja katova povećava vjerojatnost prekoračenja.



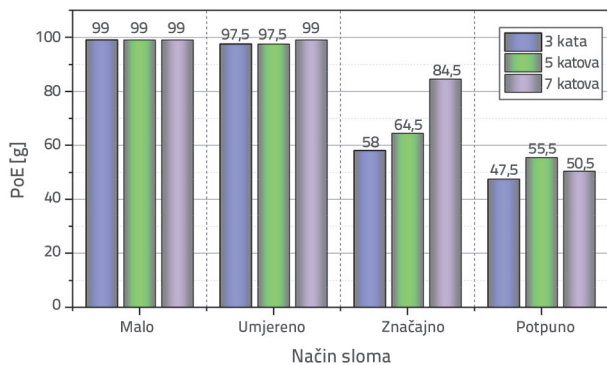
Slika 12. FRC peterokatne konstrukcije za zapise prve klase

Uspoređujući sliku 13, krivulje oštećljivosti (FRC) pod utjecajem drugoklasnog potresnog događaja, u usporedbi s prvoklasnim, znatno se razlikuju po razinama značajne oštećenosti. Drugim riječima, PGA povećava vjerojatnost prekoračenja, a u tri razine (blagi, umjereni i visoki) PoE se popela na 100 %. Uočeno je da pri maksimalnoj PoE potpuni slom iznosi 45 % kod potresnog događaja prve klase, a taj se iznos povećao za 13 % u slučaju potresnog događaja druge klase.



Slika 13. FRC sedmerokatne konstrukcije kod potresnih zapisa prve i druge klase

Na kraju, istražen je utjecaj broja katova na PoE uzimajući u obzir četiri načina sloma. Prema slici 14., povećanje broja katova utječe na PoE u značajnim i velikim oštećenjima i povećava vjerojatnost prekoračenja. Model sa sedam katova u značajnom stanju oštećenosti ima 10 i 15,5 % PoE veći od modela s pet odnosno tri kata. Međutim, u stanju potpunog oštećenosti, PoE u modelu s pet katova je 6 i 7 % veći od modela sa sedam i tri kata. Stoga se može zaključiti da se s povećanjem broja katova povećala PoE, a to je povećanje uočljivije kod značajne razine oštećenosti.



Slika 14. Usporedba PoE u četiri načina sloma za različitu katnost

4. Zaključak

Temeljem provedenih analiza, može se zaključiti sljedeće:

- Povećanjem seizmičkog zahtjeva veća je i vjerojatnost prekoračenja. Drugim riječima, povećava se vjerojatnost prekoračenja (PoE) ako maksimalno potresno ubrzanje postane veće.
- Za zgradu s tri kata nije bilo značajne razlike u krivuljama oštećljivosti (FRC) za dvije razine blagih i umjerenih razina oštećenosti pripotresima druge klase u odnosu na one prve klase. Međutim, za zgradu od pet katova, FRC pod djelovanje potresnih zapisa druge klase imaju značajne razlike u blagim i umjerenim razinama oštećenosti u odnosu na grupu prvog potresa. Štoviše, za model sa sedam katova, FRC ima značajno odstupanje pri velikim razinama oštećenosti.
- Drugim riječima, PGA povećan na dvije blage i srednje razine ima mali učinak na povećanje PoE za zgradu od tri kata. Ovaj je parametar također povećao PoE u tri razine (blaga, umjereni i visoka) vjerojatnosti na 100 %.
- Povećanja PGA povećat će PoE trokatne konstrukcije pri značajnim razinama oštećenosti. Krivulje oštećljivosti zapisa druge kategorije pomaknule su se iz stanja mirovanja u stanje stajanja u usporedbi sa zapisima prve kategorije u modelu s pet katova. Maksimalni PoE potpunog sloma je 45 % kod prvog potresa, a ovaj parametar se povećao za 13 % kod učinaka drugog potresa za potpuni slom.
- Povećanje broja katova utječe na PoE u značajnim i velikim oblicima sloma i povećava vjerojatnost prekoračenja. Model sa sedam katova u slučaju značajnog oštećenosti ima 10 i 15,5 % PoE veći od modela s pet5, odnosno tri kata. Međutim, u stanju potpune oštećenosti, PoE u modelu s pet katova je 6 i 7 % veći nego kod modela sa sedam i tri kata. Stoga se može zaključiti da je se s povećanjem broja katova, PoE povećao, zbog čega je porast očitiji na razini značajnog oštećenosti.

Zahvala

Ovaj je rad podržala Nacionalna znanstvena zaklada Kine / National Science Foundation of China (potpora br. 51978424)

LITERATURA

- [1] Sarkhani Benemaran, R., Esmaili-Falak, M., Katebi, H.: Physical and numerical modelling of pile-stabilised saturated layered slopes, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, (2020), pp. 1-16, <https://doi.org/10.1680/jgeen.20.00152>
- [2] Esmaili-choobar, N., Esmaili-falak, M., Roohi-hir, M., Keshtzad, S.: Evaluation of collapsibility potential at Talesh, Iran, *EJGE*, (2013), pp. 2561-2573.
- [3] Galanis, P., Sycheva, A., Mimra, W., Stojadinović, B.: A framework to evaluate the benefit of seismic upgrading, *Earthquake Spectra*, 34 (2018) 2, pp. 527-548, <https://doi.org/10.1193/120316EQS221M>
- [4] Esmaili-Falak, M., Katebi, H., Javadi, A.A.: Effect of Freezing on Stress-Strain Characteristics of Granular and Cohesive Soils, *Journal of Cold Regions Engineering*, 34 (2020) 2, pp. 05020001, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000205](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000205)
- [5] Esmaili-Falak, M., Katebi, H., Javadi, A., Rahimi, S.: Experimental investigation of stress and strain characteristics of frozen sandy soils-A case study of Tabriz subway, *Modares Civil Engineering journal*, 17 (2017) 3, pp. 13-23, <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-7658-en.html>
- [6] Ghobarah, A., Abou-Elfath, H., Biddah, A.: Response-based damage assessment of structures, *Earthquake engineering structural dynamics*, 28 (1999) 1, pp. 79-104, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199901\)28:1<79::AID-EQE805>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199901)28:1<79::AID-EQE805>3.0.CO;2-J)
- [7] Bakun, W.H., Aagaard, B., Dost, B., Ellsworth, W.L., Hardebeck, J.L., Harris, R.A., Michael, A.J.: Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake, *Nature*, 437 (2005) 7061, pp. 969-974, <https://doi.org/10.1038/nature04067>
- [8] Güneş, E.M., Altay, G.: Seismic fragility assessment of effectiveness of viscous dampers in R/C buildings under scenario earthquakes, *Structural Safety*, 30 (2008) 5, pp. 461-480, <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2007.06.001>
- [9] Guixin, S.B.Z.: Statistical analysis of the seismic vulnerability of various types of building structures in Wenchuan M8. 0 earthquake [J], *China Civil Engineering Journal*, 5 (2012).
- [10] Padgett, J.E.: Seismic vulnerability assessment of retrofitted bridges using probabilistic methods (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology), 2007, <http://hdl.handle.net/1853/14469>
- [11] Giordano, N., De Luca, F., Sextos, A.: Analytical fragility curves for masonry school building portfolios in Nepal, *Bulletin of Earthquake Engineering*, pp. 1-30, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00989-8>
- [12] D'ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T., Crowley, H., Silva, V.: Guidelines for analytical vulnerability assessment of low/mid-rise Buildings-Methodology. Vulnerability Global Component project, 2014.
- [13] Rossetto, T., Ioannou, I., Grant, D.N., Maqsood, T.: Guidelines for the empirical vulnerability assessment, 2014.
- [14] Benemaran, R.S., Esmaili-Falak, M.: Optimization of cost and mechanical properties of concrete with admixtures using MARS and PSO, *Computers and Concrete*, 26 (2020) 4, pp. 309-316, <https://doi.org/10.12989/cac.2020.26.4.309>
- [15] Esmaili Falak, M., Sarkhani Benemaran, R., Seifi, R.: Improvement of the Mechanical and Durability Parameters of Construction Concrete of the Qotursuyi Spa. *Concrete Research*, 13 (2020) 2, pp. 119-134, <https://doi.org/10.22124/JCR.2020.14518.1395>
- [16] Puteri, D.M., Affandi, A.K., Sailah, S., Hudayat, N., Zawawi, M.K.: Analysis of peak ground acceleration (PGA) using the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) method for Bengkulu earthquake of 1900-2017 period, In *Journal of Physics: Conference Series*, 1282 (2019) 1, IOP Publishing.
- [17] Darzi, A., Zolfaghari, M.R., Cauzzi, C., Fäh, D.: An Empirical Ground-Motion Model for Horizontal PGV, PGA, and 5 % Damped Elastic Response Spectra (0.01-10 s) in Iran An Empirical Ground-Motion Model, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109 (2019) 3, pp. 1041-1057, <https://doi.org/10.1785/0120180196>.
- [18] Pan, Y., Agrawal, A.K., Ghosn, M., Alampalli, S.: Seismic fragility of multi-span simply supported steel highway bridges in New York State. II: Fragility analysis, fragility curves, and fragility surfaces, *Journal of Bridge Engineering*, 15 (2010) 5, pp. 462-472, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000055](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000055)
- [19] Wang, Z., Zentner, I., Zio, E.: A Bayesian framework for estimating fragility curves based on seismic damage data and numerical simulations by adaptive neural networks, *Nuclear Engineering and Design*, 338 (2018), pp. 232-246, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.08.016>
- [20] Singh, S.K., Pérez-Campos, X., Ordaz, M., Iglesias, A., Kostoglodov, V.: Scaling of Peak Ground Displacement with Seismic Moment above the Mexican Subduction Thrust, *Seismological Research Letters*, 91 (2020) 2A, pp. 956-966, <https://doi.org/10.1785/0220190155>
- [21] Kehila, F., Remki, M., Kibboua, A., Bechtoula, H.: Developing seismic fragility curves for existing reinforced concrete structures in Algeria, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, pp. 1-16, 2020, <https://doi.org/10.1680/jstbu.19.00142>
- [22] Mieses, L.A., López, R.R., Saffar, A.: Development of fragility curves for medium rise reinforced concrete shear wall residential buildings in Puerto Rico, *Mecánica Computacional*, 26 (2007), pp. 2712-2727.
- [23] Caputo, A.C.: A model for probabilistic seismic risk assessment of process plants, In *Pressure Vessels and Piping Conference* (Vol. 50466, p. V008T08A025). American Society of Mechanical Engineers, 2016. <https://doi.org/10.1115/PVP2016-63280>
- [24] Jahangiri, V., Shakib, H.: Seismic risk assessment of buried steel gas pipelines under seismic wave propagation based on fragility analysis, *Bulletin of earthquake engineering*, 16 (2018) 3, pp. 1571-1605, <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0260-1>
- [25] Applied Technology Council (ATC): *Seismic Vulnerability and Impacts of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States*, 1991.
- [26] Marano, G.C., Greco, R., Morrone, E.: Analytical evaluation of essential facilities fragility curves by using a stochastic approach, *Engineering Structures*, 33 (2011) 1, pp. 191-201, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.10.005>.
- [27] Celik, O.C., Ellingwood, B.R.: Seismic risk assessment of gravity load designed reinforced concrete frames subjected to Mid-America ground motions, *Journal of structural engineering*, 135 (2009) 4, pp. 414-424, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:4\(414\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:4(414))
- [28] Mojiri, S., El-Dakhkhni, W.W., Tait, M.J.: Seismic fragility evaluation of lightly reinforced concrete-block shear walls for probabilistic risk assessment, *Journal of Structural Engineering*, 141 (2015) 4, pp. 04014116, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001055](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001055)

- [29] Arabzadeh, H., Galal, K.: Seismic collapse risk assessment and FRP retrofitting of RC coupled C-shaped core walls using the FEMA P695 methodology, *Journal of Structural Engineering*, 143 (2017) 9, pp. 04017096, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001820](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001820)
- [30] Faghihmaleki, H., Nejati, F., Mirzagoltabar-Roshan, A., Batebi-Motlagh, Y.: An evaluation of multi-hazard risk subjected to blast and earthquake loads in RC moment frame with shear wall, *Journal of Engineering Science and Technology*, 12 (2017) 3, pp. 636-647.
- [31] Huang, Y., Hu, H., Xiong, M.: Performance-based seismic fragility analysis of retaining walls based on the probability density evolution method, *Structure and Infrastructure Engineering*, 15 (2019) 1, pp. 103-112, <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1520906>
- [32] Mouroux, P., Le Brun, B.: Presentation of RISK-UE project, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4 (2006) 4, pp. 323-339, <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9020-3>
- [33] Benedetti, D., Petrini, V.: Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: un metodo di valutazione, A method for evaluating the seismic vulnerability of masonry buildings, *L'industria delle Costruzioni*, 149 (1984) 66-74.
- [34] Benedetti, D., Benzoni, G., Parisi, M.A.: Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 16 (1988) 2, pp. 183-201, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160203>
- [35] Milutinovic, Z.V., Trendafiloski, G.S.: Risk-UE an advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4: Vulnerability of Current Buildings, pp. 1-111, 2003.
- [36] Kappos, A.J., Panagopoulos, G., Penelis, G.G.: Development of a seismic damage and loss scenario for contemporary and historical buildings in Thessaloniki, Greece. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28 (2008) 10-11, pp. 836-850, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.10.017>
- [37] Lantada, N., Irizarry, J., Barbat, A.H., Goula, X., Roca, A., Susagna, T., Pujades, L. G.: Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method, *Bulletin of earthquake engineering*, 8 (2010) 2, pp. 201-229, <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9148-z>
- [38] Castillo, A., López-Almansa, F., Pujades, L.G.: Seismic risk analysis of urban non-engineered buildings: application to an informal settlement in Mérida, Venezuela, *Natural hazards*, 59 (2011) 2, pp. 891-916, <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9805-9>
- [39] Ferreira, T.M., Maio, R., Vicente, R.: Seismic vulnerability assessment of the old city centre of Horta, Azores: calibration and application of a seismic vulnerability index method, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15 (2017) 7, pp. 2879-2899, <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0071-9>
- [40] Cavaleri, L., Di Trapani, F., Ferrotto, M.F.: A new hybrid procedure for the definition of seismic vulnerability in Mediterranean cross-border urban areas, *Natural Hazards*, 86 (2017) 2, pp. 517-541, <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2646-9>.