

Primljen / Received: 5.2.2020.

Ispravljen / Corrected: 19.9.2020.

Prihvaćen / Accepted: 27.1.2021.

Dostupno online / Available online: 10.12.2021.

Utjecaj karakteristika bliskih potresa na neelastični odziv višekatnice i analiza mjerenja intenziteta

Autori:

Mr.sc. **Ali A. Muhsin**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Al-Nahrain, Irak

Građevinski fakultet

aliabduwahid80@gmail.com

Autor za korespondenciju

Doc.dr.sc. **Hussam K. Risan**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Al-Nahrain, Irak

Građevinski fakultet

dr.hussamrisan@gmail.com

Prethodno priopćenje

Ali A. Muhsin, Hussam K. Risan

Utjecaj karakteristika bliskih potresa na neelastični odziv višekatnice i analiza mjerenja intenziteta

Studija je izrađena kako bi se ostvarila tri cilja: (1) usporedba neelastičnih odziva građevina na bliske i udaljene pobude, (2) istraživanje utjecaja odnosa impulsnog perioda i perioda konstrukcije te (3) ocjena niza mjerenja intenziteta (IM) za bliske potrese. Postojeća armiranobetonska zgrada s 35 katova analizira se u okviru prvoga i drugoga cilja, dok se u okviru trećega cilja analiziraju tri okvirne građevine s po 6, 13 i 20 katova. Rezultati pokazuju da kod bliske pobude može na građevinama doći do prekoračenja razine sposobnosti zaštite života. Osim toga, točnost mjerenja intenziteta u velikoj mjeri ovisi o periodu titranja građevine i o funkciji koja se rabi za izračunavanje vrijednosti IM.

Ključne riječi:

bliski potresi, neelastični odziv, impulsna perioda, mjerenje intenziteta

Research Paper

Ali A. Muhsin, Hussam K. Risan

Influence of near-fault characteristics on inelastic response of multi-storey building with intensity measurement analysis

This study is presented to achieve three objectives: (1) to compare between the inelastic responses of buildings under near and far fault excitations, (2) to investigate the effect of the pulse to structural period ratio, and (3) to evaluate a set of intensity measurements (IMs) in terms of near fault (NF) earthquakes. A real reinforced concrete building with 35 storeys is analysed in the scope of the first and second objectives, whereas the third objective involves three general-frame buildings consisting of 6, 13, and 20 storeys. Results show that the NF excitation can drive the building to exceed its life safety performance level. Furthermore, the accuracy of the IM highly depends on the vibration period of the building and the function used to calculate the IM.

Key words:

near-fault earthquakes, inelastic response, pulse period, intensity measurement

1. Uvod

Potresi koji se javljaju u blizini rasjednoga loma odlikuju se posebnim karakteristikama po kojima se razlikuju od pomaka tla koji se bilježe daleko od izvora loma. Potres se smatra bliskim ako je registriran unutar područja od 10 do 60 km od rasjeda [1]. Bliski se potresi prepoznaju po ograničenoj frekvenciji i visokoj amplitudi impulsa dugoga trajanja i mogu se, ali i ne moraju, zamijetiti u vremenskim zapisima ubrzanja, s time da su izrazito uočljivi u tragovima brzine. Usmjerenje i preostali pomak (eng. fling step) najznačajnije su pojave koje utječu na snagu bliskih potresa. Prva pojava uzrokuje impuls brzine u komponenti poprečnoj na rasjed, a druga pojava dovodi do impulsa pomaka u vremenskom zapisu pomaka.

U ranijim su studijama izvedeni važni zaključci koji u velikoj mjeri pomažu u dokazivanju karakteristika bliskih potresa. Tako su Ventura i dr. [2] istraživali utjecaj preostalog pomaka na nelinearni odziv visoke zgrade koja je modelirana kao konstrukcija s jednim stupnjem slobode s raznim periodima titranja i faktorima smanjenja čvrstoće. Rezultati su pokazali da odziv konstrukcije ovisi o odnosu između vremena podizanja i perioda konstrukcije. Osim toga, bliski pomaci s efektom preostalog pomaka znatno utječu na visoku zgradu, jer gibanje tla s preostalim pomakom dovodi do odziva koji je znatno veći nego u slučaju gibanja tla bez preostalog pomaka.

Razliku između spektara elastičnoga odziva bliskih i udaljenih potresa definirali su Anil K. Chopra i Chatpan Chintanapakdee [3]. Za dvije skupine potresa, 15 bliskih i 15 udaljenih, autori su istražili pseudoubrzanje, pseudobrzinu te spektar pomaka i linearnoga odziva. U slučaju bliskih potresa područja osjetljiva na ubrzanje i pomak znatno su šira, dok je područje osjetljivosti na brzinu uže nego kod udaljenih potresa. Zbog te pojave velik broj građevina reagira na kruti način na udare bliskih potresa. A. Elsheikh i A. Ghobarah [4] istražili su utjecaj impulsnih pomaka tla na ponašanje krutih i savitljivih okvirnih konstrukcija. Pritom su za odvajanje impulsa brzine od geološke buke rabljeni digitalni filteri. Autori su ustanovili da je odziv savitljive okvirne konstrukcije na filtrirane i nefiltrirane podatke gotovo identičan. Nasuprot tome, u slučaju krutih okvirnih konstrukcija uočena je znatna razlika između stvarnih i modificiranih zapisa. Ti rezultati pokazuju da impuls brzine u izuzetno velikoj mjeri utječe na ponašanje krutih okvirnih konstrukcija. Mahmood Hosseini i dr. [5] analizirali su pouzdanost odredaba IBC 2009 i ACI 318-2014 na temelju kojih bi se nakon bliskih potresa trebala osigurati razina sposobnosti zaštite života okvirnih konstrukcija. Na pet okvirnih građevina visine do 16 katova provedena je trokomponentna nelinearna dinamička analiza. Rezultati su pokazali da se spomenutim odredbama ne može pouzdano predvidjeti odziv građevina na udar bliskih potresa. Zato bliske pobude treba analizirati zasebice i pritom treba primijeniti odgovarajući analitički postupak. U studiji se također naglašava da se uobičajena metoda za određivanja faktora spektra odziva smatra zastarjelom. Kouros Talebi Jouneghani i dr. [6] analizirali su ponašanje dvodimenzionalnoga modela

šestokatne okvirne konstrukcije pri impulsnim pomacima. Ustanovili su da pomak u slučaju bliske pobude prekoračuje projektne zahtjeve za 30 %. Osim toga, konstrukcije na koje djeluju bliski pomaci trebaju biti duktilnije kako bi se mogle nositi s impulsnom brzinom. Mohsen Kohrangi i dr. [7] analizirali su kako oblik spektra odziva ubrzanja impulsnih pomaka utječe na odziv građevina. Analizirana je skupina potresa s impulsnim pomacima i bez njih s ekvivalentnim oblicima spektra odziva ubrzanja. Autori su ustanovili da se jačina bliskih potresa ne može predvidjeti samo na temelju oblika spektra te da je u tom smislu značajna detaljna analiza onih svojstava impulsa koja bitno utječu na intenzitet pomaka tla. Mohsen Gerami i Davood Abdollahzadeh [8] analizirali su utjecaj bliskih pomaka tla na zahtjeve i kapacitet elemenata i konstrukcija. Analizirali su pet čeličnih okvirnih konstrukcija otpornih na moment kako bi utvrdili njihovo ponašanje pod utjecajem dvadeset bliskih i udaljenih pobuda. Pritom je upotrijebljena nelinearna vremenska analiza. Ustanovili su da pomaci s dugim impulsima povećavaju osnu silu i savojni moment stupa te smanjuju savojnu čvrstoću i duktilnost. Uz to, zahtjevi glede savojne čvrstoće greda također su se povećali zbog djelovanja bliskih pomaka tla. Ghobarah [9] je istraživao mogućnosti idealiziranja impulsa za bliske pobude i u tom je smislu analizirao odgovarajuće amplitude i periode. Za to je upotrijebio četiri tipične armiranobetonske konstrukcije, a kao pobuda su mu poslužila četiri bliska potresa. Nelinearna dinamička analiza provedena je za stvarne zapise i za ekvivalentnu brzinu impulsa. Nakon uspoređivanja podataka o odzivu ustanovljeno je da se konstrukcija s dugim periodom ponaša otprilike isto pri obje vrste pobuda, dok su rezultati različiti kod konstrukcija sa srednjim i kratkim periodima. U prethodnim je studijama analiziran ograničen broj pomaka tla radi ispitivanja konkretnih slučajeva, što je uglavnom rezultiralo u uvjetno valjanim rezultatima. Osim toga, u većini postojećih studija upotrijebljene se tipične građevine i dvodimenzionalni modeli kojima se ne može prikladno opisati ponašanje složenih postojećih građevina. Zato je važno analizirati odziv stvarne građevine na široki raspon bliskih potresa raznih karakteristika kao što su mehanizam rasjeda, uvjeti na lokaciji, vršno ubrzanje tla (PGA) i magnituda. U ovoj se studiji istražuje velik broj bliskih potresa različitih svojstava radi provođenja detaljne analize ponašanja stvarnih trodimenzionalnih građevina pod utjecajem bliskih i udaljenih pobuda. Uz to se u radu provodi i statistička analiza kako bi se ocijenila skupina mjerenja intenziteta te ocijenila njihovih učinkovitost u mjerenju snage bliskih potresa.

2. Karakterizacija konkretnoga slučaja

Dva su slučaja odabrana za potrebe studije. U prvom se slučaju provodi usporedba neelastičnoga odziva građevine u slučaju bliskih i udaljenih pobuda, te se istražuje utjecaj odnosa periode impulsa i periode konstrukcija. U tom se primjeru (analizi slučaja) analizira stvarna armiranobetonska zgrada hotela izgrađena u gradu Al Sharjah u Ujedinjenim Arapskim Emiratima. Zgrada ima 35 katova, ukupna joj je visina 135 m, a tipična visina

Tablica 1. Svojstva materijala

Svojstvo materijala	Oznaka	Vrijednost	Napomene
Tlačna čvrstoća	f_c	50 MPa	Za prvu analizu slučaja, od prizemlja do 20. kata
Tlačna čvrstoća	f_c	40 MPa	Za prvu analizu slučaja, od 21. do 35. kata. Za sve okvirne konstrukcije u drugoj analizi slučaja
Modul elastičnosti betona	E_c	$4500\sqrt{f_c}$	Za sve elemente
Modul elastičnosti čelika	E_s	200000 MPa	Za sve elemente
Čvrstoća popuštanja	f_y	460 MPa	Za sve elemente
Gustoća betona	γ	25 kN/m ³	Za sve elemente
Granična deformacija betona	ϵ_{cu}	0,003	Za sve elemente

pojedinačnih katova iznosi 3,6 m. Zgrada je u vertikalnom presjeku nepravilna: visina je prvoga kata 4,65 m, dok je visina 18. i 32. kata 5,2 m. Tlocrtne su dimenzije građevine 31,3 m x 35,2 m. Građevina je projektirana na bočna opterećenja pomoću posmičnih zidova i jezgri nesimetrično raspoređenih po tlocrtu, kao što se to vidi na slici 1. U građevini je upotrijebljen sustav ravnih ploča s gredama izvedenima samo na vanjskim rubovima. Debljina je ploča 22 cm, osim na 18. katu, gdje je ta debljina 25 cm. Zgrada je simulirana kao trodimenzionalni model pomoću programa SAP2000 uz primjenu okvirnih elemenata i ljsaka, kao što je prikazano na slici 2. Granična tlačna čvrstoća svih betonskih elemenata do dvadesetoga kata iznosi 50 MPa, a 40 MPa za katove iznad njega.

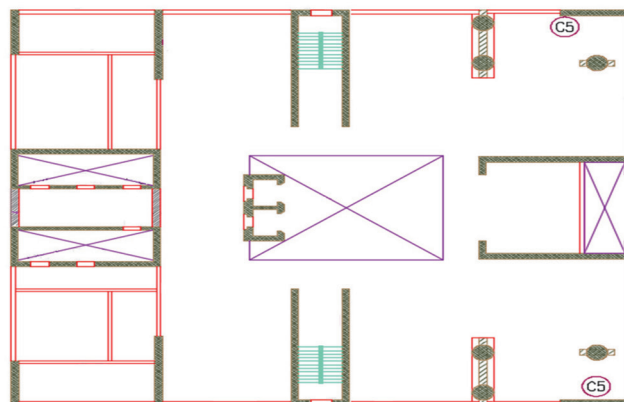
Za razliku od prvoga primjera, u drugom se ocjenjuje skupina mjerenja intenziteta (IM) za bliske potrese. Analiziraju se tipične okvirne građevine sa 6, 13 i 20 katova, a odabrane su konstrukcije konstrukcije s kratkim, srednjim i dugim periodima. Sve te građevine odlikuju se jednakim tlocrtom: široke su 6 m, s krilima 3 x 3, a tipična je visina pojedinačnih katova 3,6 m. Na slici 3. prikazan je trodimenzionalni model odabranih konstrukcija. Svojstva materijala i konstante odabranih primjera (analiza slučaja) prikazani su u tablici 1. Analizirane građevine ispituju se za dva slučaja opterećenja: gravitacijsko opterećenje i bočno seizmičko opterećenje. Izvor vibracija odabran je tako da predstavlja kritični slučaj spomenut u ASCE 7-10, točka 12.7, koji uključuje stalno opterećenje, dodatno opterećenje i 25-postotno korisno opterećenje. Stalno i korisno opterećenje koje se odnosi na odabrane zgrade prikazano je u tablici 2.

Za modeliranje građevina pomoću programa SAP2000 upotrijebljene su dvije vrste elemenata. Grede, stupovi i posmični zidovi prikazani su okvirnim elementom sa šest stupnjeva slobode na svakom kraju. Jezgri zid i ploča modelirani su pomoću ljskastoga elementa koji ima četiri spoja i šest stupnjeva slobode na svakome spoju. Bočna opterećenja prenose se definiranjem dijafragmi na svakoj etaži. Kako su dimenzije i svojstva presjeka definirani, kapacitet presjeka može se automatski izračunati pomoću programa SAP2000. Zatim se nelinearnost građevine može jednostavno definirati izvođenjem odnosa moment savijanja–zakrivljenost. U vezi s time, definiraju se plastični zglobovi na presjecima na

kojima je nanoseno opterećenje veće od kapaciteta presjeka. Na temelju toga podatka pretpostavlja se da se plastični zglobovi nalaze na krajevima greda i stupova.

Krutost stupova, greda, posmičnih zidova i ploča smanjena je redom za 0,7, 0,35, 0,35 i 0,25 kako bi se u obzir uzele pukotine na elementima. Za sve je oblike uzeto konstantno modalno prigušenje od 0,05.

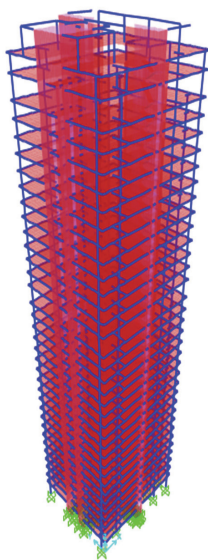
Modalna je analiza provedena na trodimenzionalnim modelima građevina uzimajući u obzir vibracije sa šest stupnjeva slobode, uključujući i tri translacije i tri rotacije u odnosu na osi globalnog smjera. U studiji je uzeto 12 modalnih oblika, što je u skladu sa zahtijevanim uvjetima točnosti. Karakteristike modalnih oblika građevine prikazane su u tablici 3.



Slika 1. Prikaz okvirne konstrukcije

Tablica 2. Opterećenje

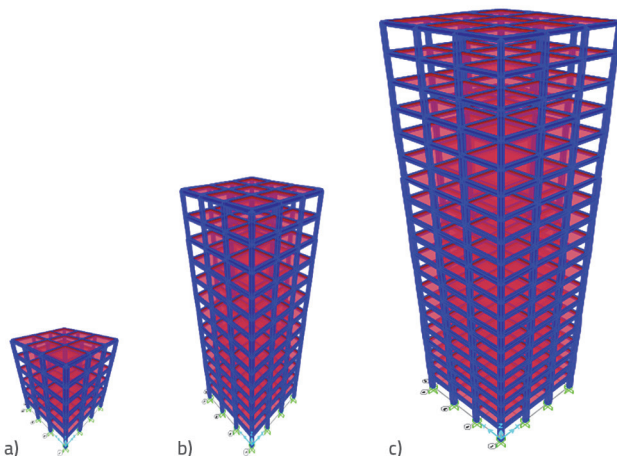
Opterećenje	Analiza slučaja 1	Analiza slučaja 2
Tipično korisno opterećenje [kN/m ²]	2	2,5
Korisno opterećenje za 18. kat [kN/m ²]	10	-
Tipično dodatno stalno opterećenje [kN/m ²]	3,2	1,68
Dodatno stalno opterećenje za 18. i 32. kat	3,4	-



Slika 2. Prostorni prikaz (SAP2000, analiza slučaja 1)

Tablica 3. Elastični periodi u sekundama

Modalni oblik br.	Broj katova			
	35	6	13	20
1	6,84	0,93	2,18	3,42
2	4,77	0,93	2,18	3,42
3	3,92	0,82	1,91	2,94
4	1,56	0,29	0,73	1,23
5	1,13	0,29	0,73	1,23
6	1,03	0,26	0,64	1,09
7	0,67	0,15	0,42	0,73
8	0,49	0,15	0,42	0,73
9	0,44	0,13	0,37	0,65
10	0,38	0,09	0,28	0,51
11	0,28	0,09	0,28	0,51
12	0,28	0,08	0,25	0,46



Slika 3. Prostorni prikaz (SAP2000, analiza slučaja 2): a) 6 katova; b) 13 katova; c) 20 katova

3. Ponašanje građevine

U ovom se poglavlju pojašnjava razlika u odzivu trodimenzionalne stvarne višekatne armiranobetonske građevine za slučajeve bliskih i udaljenih potresa s identičnom vrijednošću PGA. Ponašanje građevine određuje se u skladu s odredbama FEMA 356 [10] u kojima se granično stanje dijeli u tri razine ponašanja: trenutna useljivost, zaštita života i sprečavanje rušenja. Te se razine određuju na temelju relativnoga katnog pomaka u elastičnom i neelastičnom stanju. Granice za zgrade s betonskim zidovima navedene su u tablici 4.

3.1. Potresna pobuda

Zapisi potresa s brojnim parametrima mogu bitno utjecati na odziv konstrukcije, kao na primjer na mehanizam rasjeda i magnitudu pomaka tla. Kako bi se eliminirao utjecaj tih

Tablica 4. Ograničenje katnog pomaka za građevine s betonskim zidovima prema odredbama FEMA 356

Relativni katni pomak	Granično stanje		
	Trenutna useljivost (IO)	Zaštita života (LS)	Sprečavanje rušenja (CP)
Privremeni	0,5 %	1 %	2 %
Trajni	-	0,5 %	2 %

IO - Immediate Occupancy, LS - Life Safety, CP - Collapse Prevention

Tablica 5. Svojstva odabranih potresa

Potres	Postaja	Vrsta	M1	Rrup2 [km]	Trajanje [s]
Northridge, 1994.	Newhall - Fire Sta.	NF	6,69	05,92	15
Northridge, 1994.	Anaheim - W Ball Rd	FF	6,69	68,62	20
Kobe, 1995.	Port Island	NF	6,90	03,31	20
Kobe, 1995.	Chihaya	FF	6,90	49,91	30

M1 - Momentna magnituda potresa, Rrup2 - Najmanja udaljenost od rasjedne ravnine, NF - Near fault (potres blizak rasjedu), FF - Far fault (potres udaljen od rasjeda)

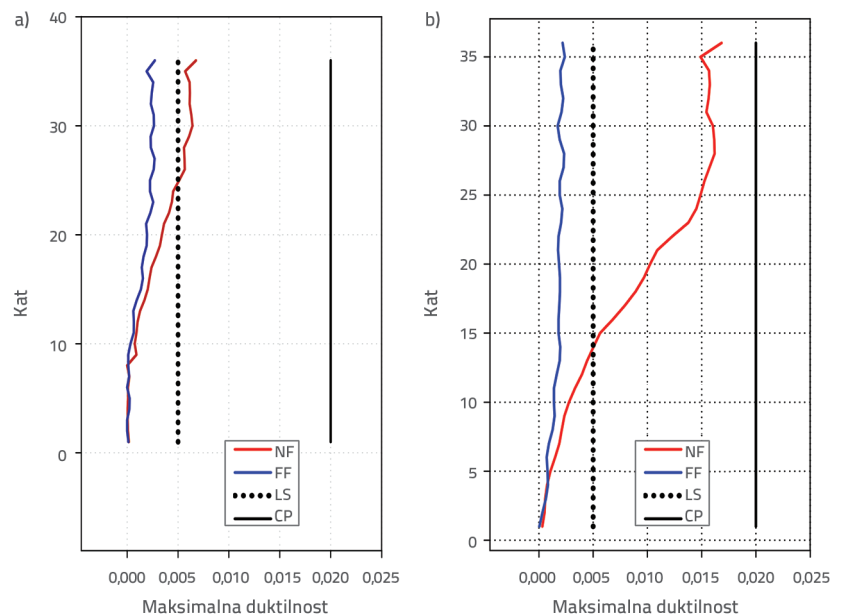
čimbenika i u središtu pozornosti zadržao utjecaj impulsa, bliske i udaljene pobude odabrane su za isti potres. Kako bi se ocijenilo ponašanje građevine, dva potresa su odabrana iz baze podataka o pomacima tla PEER (Pacific Earthquake Engineering Research) [11]. Odabrani potresi su potres Northridge (1994., SAD) i potres Kobe (Japan, 1995.). U tablici 5. prikazana su detaljna svojstva odabranih potresa. Oni su podešeni na 0,3 g te upotrijebljeni kao pobuda građevine u smjeru X.

3.2. Nelinearna analiza

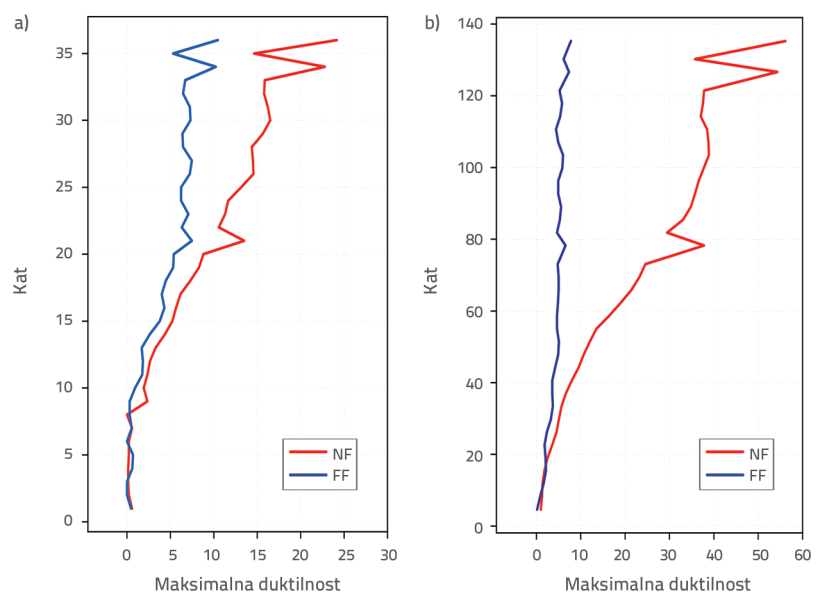
Nelinearnom analizom definiraju se plastični zglobovi na oba kraja greda i stupova. Smatra se da je granični kapacitet plastičnosti zgloba postignut kada deformacija betona na krajnjim vlaknima iznosi 0,003. Na slici 4. dana se usporedba maksimalnoga apsolutnog katnog pomaka i dozvoljenih katnih pomaka prema preporukama iz dokumenta FEMA 356. Oba slučaja udaljenih pobuda ispod su granica definiranih u normi, dok bliske pobude udovoljavaju zahtjevima za razinu sposobnosti zaštite života s maksimalnim razlikama od 30 % za potres Northridge i 108 % za potres Kobe. Na slici 5. vidi se zahtjev duktilnosti za svaki kat, koji se definira kao omjer maksimalnoga nelinearnog katnog pomaka i maksimalnoga pomaka između svih katova pri pojavi plastičnoga zgloba [12]. Prosječni zahtjevi duktilnosti za blisku i udaljenu pobudu iznose 8,5 i 4,3 za Northridge te 22,5 i 4,4 za potres Kobe.

Vrijednost posmične sile usvojena je praćenjem ponašanja posmičnoga zida 5 (C5). Slika 6. prikazuje maksimalne zahtjeve posmika za posmični zid 5 (C5) u odnosu na kapacitet posmičnoga presjeka. Maksimalni zahtjevi za blisku i udaljenu pobudu iznose 3,879 i 3,592 kN za potres Northridge, dok ti zahtjevi za potres Kobe iznose 5,312 i 2,324. Posmične sile primijenjene na najnižem i najvišem katu više su od posmičnih sila presjeka, osim u slučaju udaljene pobude za potres Kobe. Dakle, kritični omjeri kapaciteta i zahtjeva iznose 81 %, 77 % i 54 % za blisku pobudu Northridge, udaljenu pobudu Northridge i blisku pobudu Kobe.

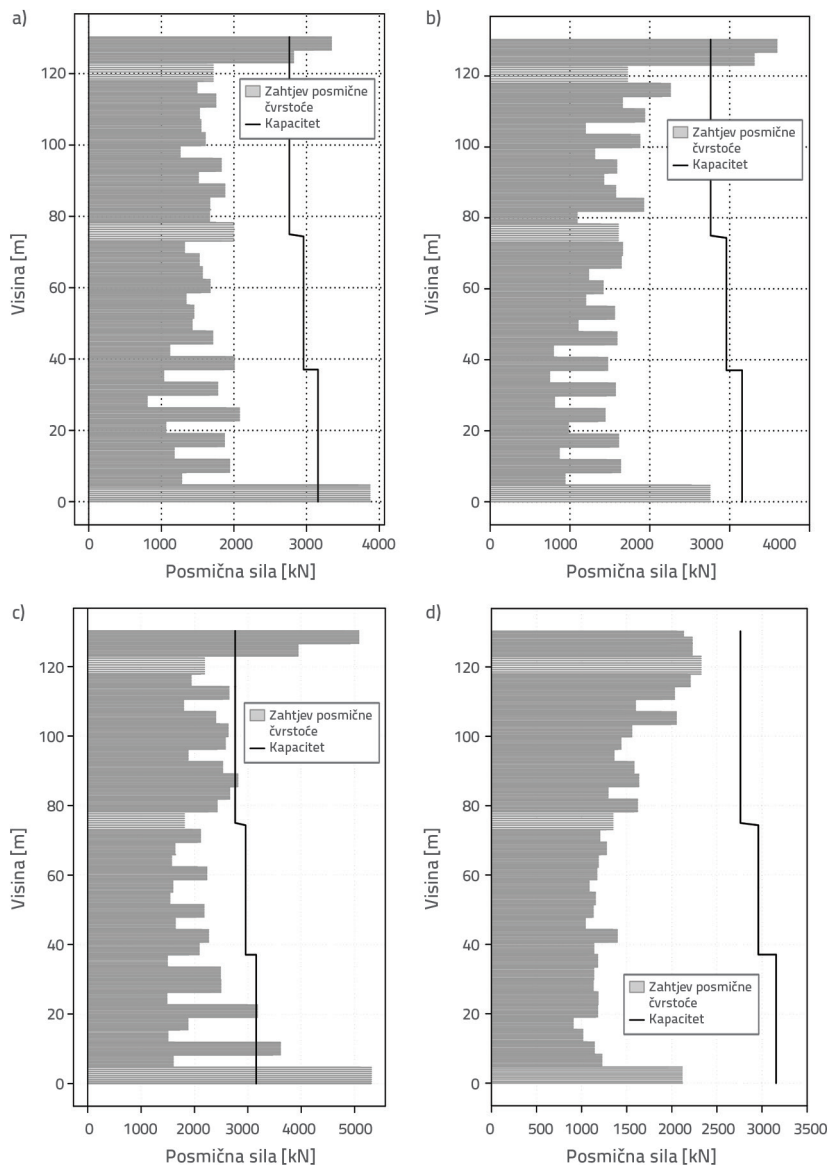
Slika 7. prikazuje maksimalni primijenjeni moment u odnosu na kapacitet popuštanja i plastičnosti stupa C5. Maksimalne su vrijednosti momenata za blisku i udaljenu pobudu 22,647 i 12,588 kNm za Northridge te 33,482 i 11,510 kNm za Kobe. Primijenjeni moment veći je od momenta popuštanja i plastičnosti u mnogim pozicijama uzduž visine definiranoga posmičnog zida. Na slici 8. prikazane su varijacije pomaka krova u vremenu. Maksimalni pomaci za blisku i udaljenu pobudu iznose 42,4 i 19,5 cm za potres Northridge te 121,8 i 22,3 cm za potres Kobe. U slučaju bliskih pobuda maksimalni



Slika 4. Maksimalni neelastični međukatni pomak: a) Northridge, maksimalni katni pomak; b) Kobe, maksimalni katni pomak



Slika 5. Maksimalni zahtjevi duktilnosti: a) Northridge, maksimalna duktilnost; b) Kobe, maksimalna duktilnost



Slika 6. Maksimalni posmik na posmičnom zidu 5: a) NF Northridge, maksimalni posmik; b) FF Northridge, maksimalni posmik; c) NF Kobe, maksimalni posmik; d) FF Kobe, maksimalni posmik (NF - potres blizak rasjedu, FF - potres udaljen od rasjeda)

Tablica 6. Prikaz broja i stanja plastičnih zglobova

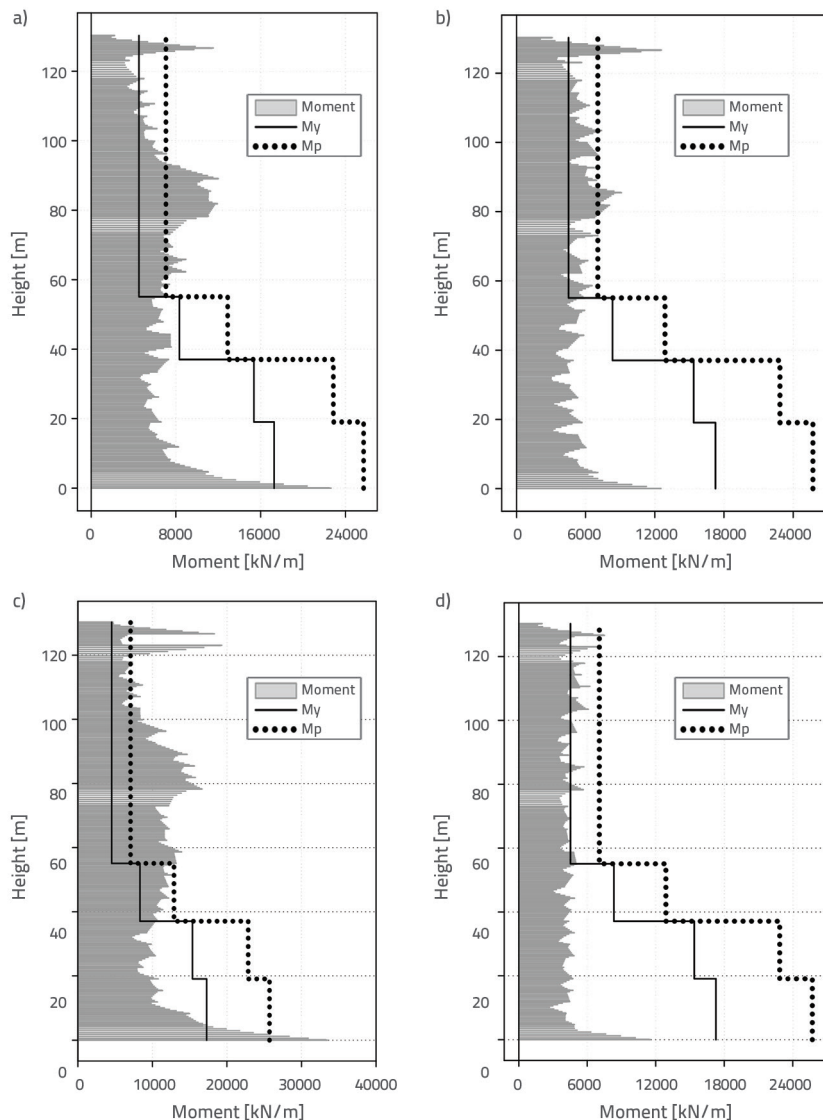
Potres	IO	IO-LS	LS-CP	> CP	Ukupno
NF Northridge	786	0	0	25	811
FF Northridge	571	1	0	12	584
NF Kobe	779	213	0	214	1206
FF Kobe	618	0	0	9	627

pomak na krovu dogodio se ranije nego kod udaljenih pobuda, što znači da je snažna ulazna energija koja se javlja na početku bliskih potresa posljedica efekta usmjerenja.

U tablici 6. dan je prikaz broja i stanja plastičnih zglobova na kraju svakoga potresa u odnosu na granična stanja potresa prema dokumentu FEMA 356. Ukupan broj plastičnih zglobova koje uzrokuje potres Northridge za bliske i udaljene pobude iznosi 811 i 584, dok je taj broj za slučaj potresa Kobe 1206 i 627 za bliske i za udaljene pobude.

Dakle, bliske pobude uzrokuju veći odziv i veću potrebu za pojačanjem u odnosu na udaljene seizmičke pobude, iako oba potresa imaju identične magnitude i PGA.

Usporedba linearnoga ponašanja i nelinearnoga odziva građevine prikazana je u tablici 7. U slučaju jakih pomaka tla, kao što je to slučaj kod bliskoga potresa Kobe, u kojem su prekoračena propisana ograničenja za međukatne pomake, nelinearnom se analizom dobiva odziv koji je veći od odziva dobivenoga linearnom analizom. Taj nalaz pokazuje da jaki pomaci tla uzrokuju znatno smanjenje ukupne krutosti građevine nakon granice popuštanja. To se smanjenje ne uzima u obzir u linearnoj analizi, prema kojoj se pretpostavlja da građevina može zadržati početnu krutost do završetka vibracija.

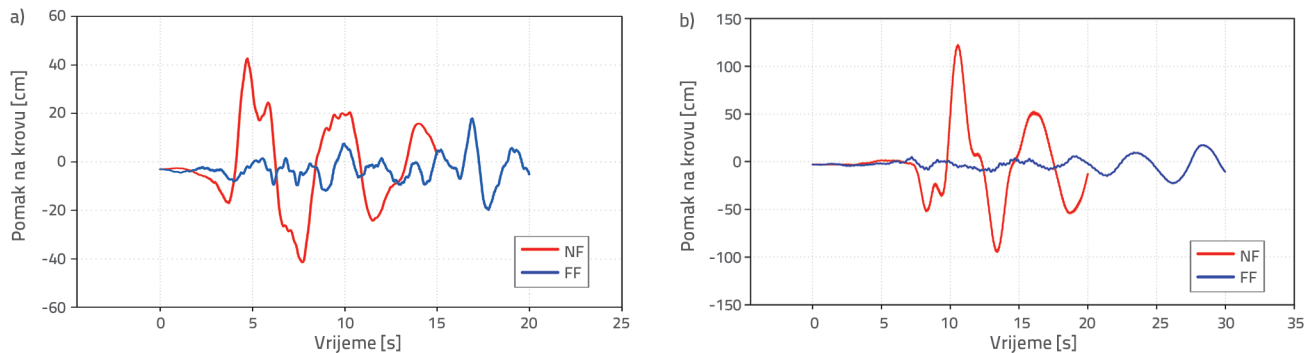


Slika 7. Maksimalni neelastični moment oko osi Y za posmični zid 5: a) NF Northridge, maksimalni moment; b) FF Northridge, maksimalni moment; c) NF Kobe, maksimalni moment; d) FF Kobe, maksimalni moment

4. Impulsni period

U slučaju bliskih pobuda impulsni period bitno utječe na ponašanje konstrukcije [1]. Odziv građevine povećava se usporedno s odnosom impulsnoga perioda i perioda konstrukcije (T_p/T_1), pristup 1. Kako bi se ovaj rezultat provjerio u odnosu na stvarnu građevinu primjenom trodimenzionalne analize analizira se odabrani konkretni slučaj (slučaj 1.) za dva zapisa identičnih potresa s dvije impulsne periode. Za ovo istraživanje odabran je potres koji je 1992. godine pogodio mjesto Landers u Kaliforniji. Odabrana su dva zapisa, Yermo Fire Station i Barstow, čiji omjeri (T_p/T_1) iznose 1,09 i 1,30. Ti su zapisi odabrani kako bi se ispitala dva stanja, (T_p/T_1) pristup 1 te više od 1. Tablica 8. prikazuje svojstva odabranih zapisa. Nelinearni je odziv za oba zapisa određen pri identičnim vrijednostima PGA za 0,3 g.

Na slici 9. prikazan je maksimalni međukatni pomaku odnosu na dozvoljene granice međukatnoga pomaka zadane u dokumentu FEMA 356. Oba zapisa u velikoj mjeri udovoljavaju zahtjevima glede tražene razine sposobnosti zaštite života s maksimalnim razlikama od 66 % za Yermo Fire Station i 33 % za Barstow. Maksimalni zahtjevi duktilnosti izračunani su i prikazani na slici 10. Zahtjevi duktilnosti imaju nekoliko "skokova" u građevini zbog prisustva mekoga kata. Ipak, prosječni zahtjevi duktilnosti iznose 17,7 za Yermo Fire Station i 15,4 za Barstow.



Slika 8. Vremenski zapis neelastičnih pomaka na krovu: a) Vremenski zapis neelastičnih pomaka na krovu; b) Vremenski zapis neelastičnih pomaka na krovu

Tablica 7. Prikaz analiziranih parametara

Potres	Maks. pomak na krovu [cm]		Maks. međukatni pomak		Maks. posmik [kN]		Maks. moment [kN.m]		Prosječna duktilnost
	Linearni	Nelinearni	Linearni	Nelinearni	Linearni	Nelinearni	Linearni	Nelinearni	Linearni
NF North.	50,6	42,4	0,007	0,006	1966	3879	19126	22647	8,5
FF North.	18,2	19,5	0,003	0,002	1288	3592	11349	12588	4,3
NF Kobe	117,4	121,8	0,014	0,016	2078	5312	22549	33482	22,5
FF Kobe	22,7	22,3	0,002	0,002	495	2324	4553	11510	4,4

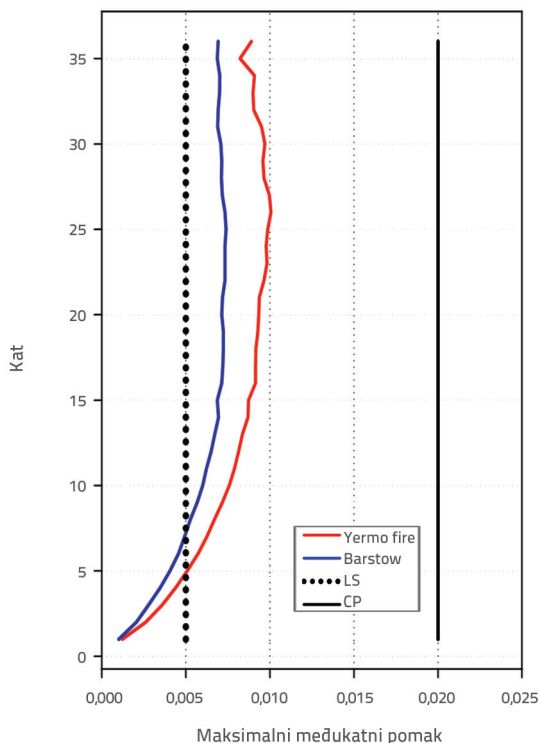
Tablica 8. Karakteristike zapisa

Potres	Postaja	M	Rrup [km]	Tp	Tp/T1
Landers	Yermo Fire Station	7,3	23,6	7,5	1,09
	Barstow		34,9	8,9	1,3

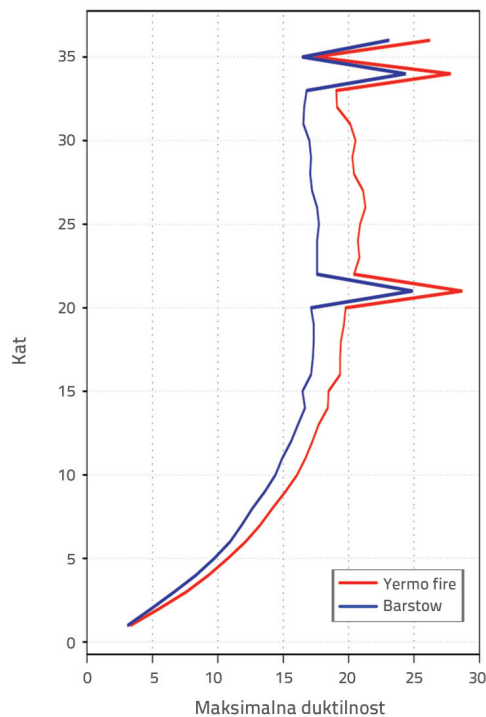
Slika 11. prikazuje dijagram posmičnih sila za C5 u odnosu na posmični kapacitet presjeka. Maksimalni zahtjevi u pogledu smicanja su 3,909 za Yermo Fire Station i 2,414 za Barstow. Posmični zahtjev koji nameće Yermo Fire Station postaje veći od posmične čvrstoće u nekoliko točaka s kritičnim omjerom kapaciteta i zahtjeva od 70 %. Slika 12. prikazuje raspodjelu momenata po visini stupa C5 oko globalne osi Y u odnosu na granice momenta popuštanja i plastičnosti.

U oba se slučaja postiže moment koji je veći od granice popuštanja. Međutim, maksimalni momenti nametnuti na lokacijama Yermo Fire Station i Barstow iznose 33,185 i 20.654 kN·m. Na slici 13. prikazan je vremenski zapis neelastičnoga pomaka na krovu. Iz toga se zapisa vidi da Yermo Fire Station i Barstow uzrokuju maksimalne pomake od 110,3 cm i 85,3 cm.

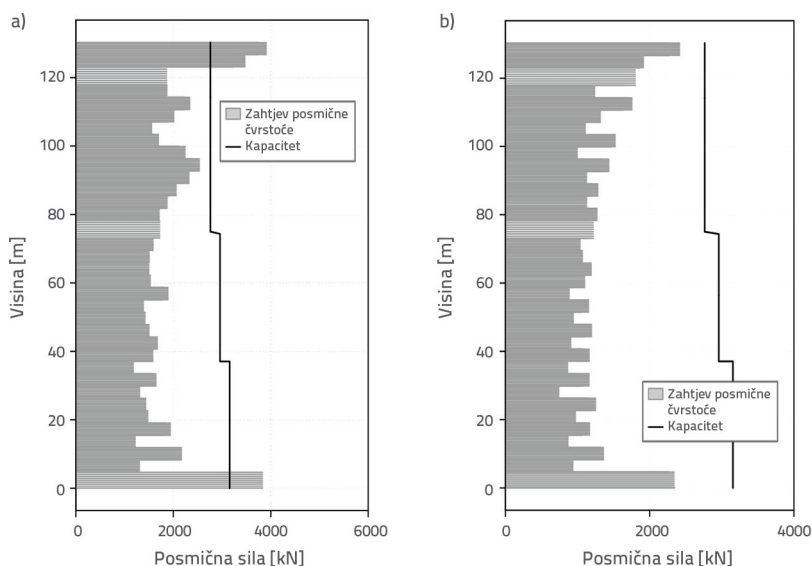
Tablica 9. prikazuje broj i stanje plastičnih zglobova postignutih po završetku oba potresa u odnosu na svaku granicu učinkovitosti prema preporukama FEMA 356. Rezultati jasno pokazuju da Yermo Fire Station uzrokuje znatno veću štetu sa 65 plastičnih zglobova na razini sprečavanja rušenja u usporedbi s pomacima na lokaciji Barstow s 15 plastičnih zglobova. U tablici 10. uspoređuju se linearni i nelinearni odzivi građevine podvrgnute djelovanju impulsnih potresa.



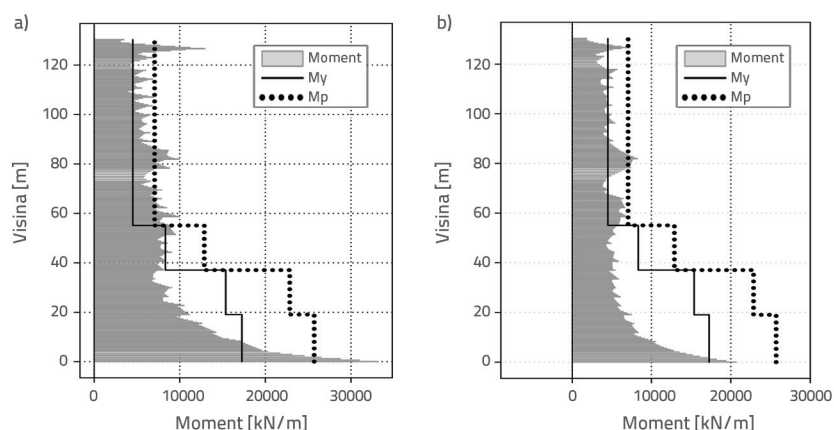
Slika 9. Maksimalni neelastični međukatni pomak



Slika 10. Maksimalna duktilnost



Slika 11. Maksimalni neelastični posmik: a) Yermo Fire Station, maksimalni posmik; b) Barstow, maksimalni posmik



Slika 12. Maksimalni neelastični moment: a) Yermo Fire Station, maks. Moment; b) Barstow, maks. moment

Tablica 9. Prikaz broja i stanja plastičnih zglobova

Potres	IO	IO-LS	LS-CP	> CP	Ukupno
Yermo Fire Station	868	51	0	65	984
Barstow	817	1	0	15	833

Tablica 10. Sažeti prikaz analiziranih parametara

Lokacija	Maks. pomak na krovu [cm]		Maksimalni međukatni pomak		Maksimalni posmik [kN]		Maksimalni moment [kN/m]		Prosječna duktilnost
	Linearni	Nelinearni	Linearni	Nelinearni	Linearni	Nelinearni	Linearni	Nelinearni	
Yermo Fire Station	102	108,5	0,01	0,01	1964	3830	19231	33185	17,7
Barstow	80,5	83,6	0,008	0,007	1404	2346	14390	20654	15,4

5. Mjerenja intenziteta

Mjerenje intenziteta (IM) pokazatelj je snage potresa, a njime se može predvidjeti šteta na konstrukciji nastala zbog pomicanja tla. Vršno je ubrzanje tla (PGA) parametar koji se često rabi za ocjenjivanje snage potresa. Iako se u seizmičkim propisima vrijednost PGA rabi za mjerenje projektirane čvrstoće, mjerenje intenziteta bliskih (NF) potresa ipak nije učinkovito. Zato su istraživači pokušali razviti parametre kojima se može mjeriti potencijalno oštećenje nakon snažnih potresa. U ovoj se točki istražuje učinkovitost predloženih postupaka IM kako bi se ustanovilo mogu li precizno opisati odziv AB građevine nakon bliskih potresa. Odabrano je šest parametara: intenzitet podizanja (eng. *arise intensity* - AI), gustoća specifične energije (eng. *specific energy density* - SED), kumulativna apsolutna brzina (eng. *cumulative absolute velocity* - CAV), maksimalna progresivna brzina (eng. *maximum incremental velocity* - MIV), intenzitet spektra ubrzanja (eng. *acceleration spectrum intensity* - ASI) i intenzitet spektra brzine (eng. *velocity spectrum intensity* - VSI). Ti se parametri mogu podijeliti u tri skupine: energija (AI, SED), brzina (CAV, MIV) i spektar (ASI, VSI). Odabrani parametri IM mogu se definirati na sljedeći način:

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} [a(t)]^2 dt \quad (1)$$

$$SED = \int_0^{t_d} [v(t)]^2 dt \tag{2}$$

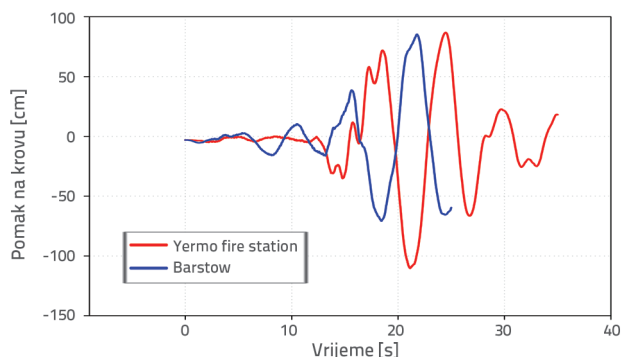
$$CAV = \int_0^{t_d} |a(t)| dt \tag{3}$$

$$ASI = \int_0^{0.5} S_a(t) dt (\xi = 0,05) \tag{4}$$

$$VSI = \int_0^{2.5} S_v(t) dt (\xi = 0,05) \tag{5}$$

gdje je ukupno vrijeme trajanja potresa, a(t) i v(t) trenutačno su ubrzanje i brzina, dok su S_a(t) i S_v(t) spektar trenutačnih ubrzanja i spektar brzina. MIV se može definirati kao maksimalna zona obuhvaćena vremenskim zapisom brzine između točaka nulte brzine [13].

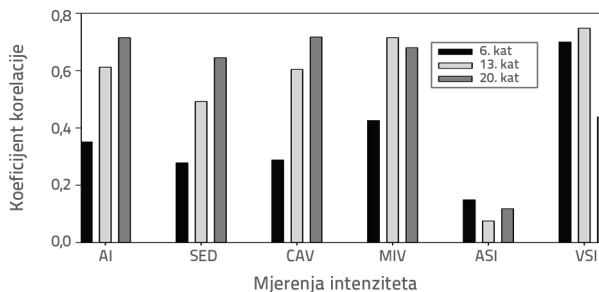
Iz baze podataka PEER odabrana je skupina od 90 bliskih potresa. Odabrani se zapisi spominju u tehničkom izvještaju za bazu podataka o pomacima tla PEER kao impulsni pomaci tla normalnih rasjeda [14]. Magnituda im varira od 5 do 7,6, a najmanja udaljenost od rasjedne ravnine varira od 0,1 km do 74,3 km.



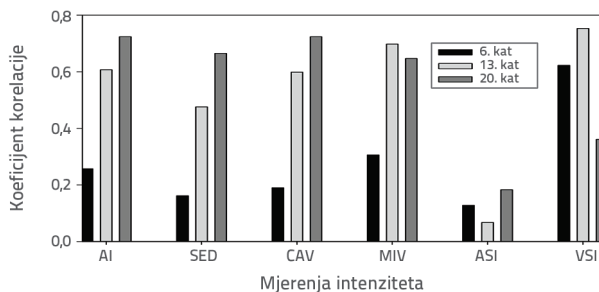
Slika 13. Vremenski zapis neelastičnoga pomaka na krovu

Nelinearni vremenski proračun provodi se za svaku građevinu (analiza slučaja 2) za 90 seizmičkih pobuda s istom vrijednošću PGA (0,3g); dakle, ukupno se analizira 270 slučajeva. IM se provodi ispitivanjem odnosa između tih mjerenja i maksimalnoga pomaka na krovu, maksimalnoga katnog pomaka te maksimalnoga posmika u bazi. Za analizu odnosa između odabranih varijabli usvojen je Pearsonov koeficijent linearne korelacije. Odnosi se opisuju kao savršeni, čvrsti, srednje čvrsti, slabi i nikakvi, što ovisi o vrijednosti koeficijenta korelacije. Korelacijski koeficijenti za odabrani IM i maksimalni pomak na krovu, maksimalni katni pomak i maksimalni posmik u bazi prikazani su na slikama 14. do 16. Odnos identičnih vrijednosti IM varira za istu građevinu u ovisnosti o parametrima odziva. Stoga, maksimalni pomak na krovu šesterokatnice dobiva najvišu korelaciju za sve vrijednosti IM. Korelacija maksimalnoga pomaka na krovu u skladu je s maksimalnim posmikom u osnovici za okvirnu građevinu s 13 katova. Međutim, maksimalni posmik

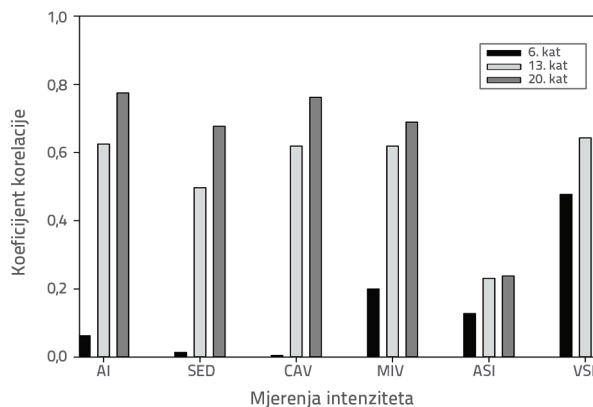
u osnovici okvirne građevine s 20 katova ima dominantan korelacijski odnos za čitav raspon analiziranih vrijednosti IM.



Slika 14. Koefficient korelacije za maksimalni pomak na krovu



Slika 15. Koefficient korelacije za maksimalni međukatni pomak



Slika 16. Koefficient korelacije za maksimalni posmik u bazi

Iako su vrijednosti AI i SED temeljene na mjerjenju energije, za AI se postiže najbolja korelacija za sve ispitane građevine. Razlog tome možda je činjenica da AI određuje energiju izravno iz vremenskoga zapisa ubrzanja, dok SED određuje energiju iz integriranoga vremenskoga zapisa ubrzanja. Osim toga, usporedba između vrijednosti IM temeljenih na brzini, a to su MIV i CAV, pokazuje da se pomoću MIV dobiva visoki stupanj korelacije kod građevina sa 6 i 13 katova, dok se kod CAV jaka veza ostvaruje kod građevine s 20 katova. Rezultati IM koji se odnose na spektar odziva (ASI i VSI) pokazuju da je VSI najtočnija vrijednost IM pri izračunavanju odziva građevina s kratkim i srednjim periodom. Međutim, za ASI se ostvaruje najslabija korelacija u odnosu na sve analizirane vrijednosti IM zato što je u slučaju ASI usredotočenost na intenzitetu spektra odziva

od 0,1 s i 0,5 s, što je izvan analiziranih perioda, dok se kod VSI intenzitet mjeri između 0,1 s i 2,5 s, što je unutar raspona građevina sa 6 i 13 katova. Građevina sa 6 katova ima najslabiju korelaciju s IM, osim kod VSI, zato što odziv građevina s kratkim periodom kontrolira područje spektra odziva koje je osjetljivo na ubrzanje, što bitno varira u ovisnosti o potresu koji se analizira.

6. Zaključak

U ovoj se studiji naglasak stavlja na važan segment u području seizmičkoga graditeljstva, a to su posebna svojstva bliskih potresa i njihov utjecaj na neelastični odziv višekratnih AB građevina. U radu je analizirano nekoliko slučajeva: postojeća AB višekratnica i niz građevina s uobičajenom okvirnom konstrukcijom. Analizom je obuhvaćen velik broj bliskih potresa kako bi se pokrio širok raspon karakteristika gibanja tla. Za ocjenu linearnoga i nelinearnoga ponašanja zanimljivih slučajeva proveden je trodimenzionalni vremenski proračun. U nastavku su prikazani zaključci i preporuke:

- Bliska gibanja tla karakteriziraju jači odzivi i veći zahtjevi čvrstoće nego što je to slučaj kod udaljenih potresa, što je uočljivo i kada obje vrste potresa imaju jednake vrijednosti magnitude i vršnog ubrzanja (PGA). Vrijednost PGA nije prikladna za mjerenje intenziteta bliskih potresa. Zbog toga građevine projektirane pomoću tradicionalnih metoda koje se temelje na spektru ubrzanja ne mogu na zadovoljavajući način podnijeti impulsne sile koje stvaraju bliski potresi.

- Rezultati ocjene razine učinkovitosti postojeće građevine s 35 katova nakon udara bliskih i udaljenih potresa pokazuju da pobude proizvedene bliskim potresom mogu u velikoj mjeri prekoračiti razinu sposobnosti zaštite života.
- Meki kat znatno utječe na ponašanje građevine s 35 katova nakon udara bliskih i udaljenih potresa. Ti udari dovode do velikoga i nagloga porasta međukatnoga pomaka te do porasta zahtjeva na krivuljama duktilnosti.
- Period impulsa gibanja tla bitno utječe na ponašanje građevine, zbog čega se može očekivati znatan odziv kao reakcija na približavanje perioda impulsa periodu vibracija građevine.
- Analiza vrijednosti IM u pogledu seizmičke energije pokazuje da je vrijednost AI točnija od vrijednosti SED. Taj zaključak vrijedi za sve ispitane građevine, uključujući i okvirne građevine sa 6, 13 i 20 katova.
- Usporedba vrijednosti MIV i CAV pokazuje da je vrijednost MIV pogodnija za građevine sa 6 i 13 katova, dok se vrijednost CAV pokazala vrlo točnom kod građevina s 20 katova.
- Ocjena vrijednosti ASI i VSI pokazuje da vrijednost VSI ima visoku preciznost ocjene IM u predviđanju odziva građevina s kratkim i srednjim periodima, dok vrijednost ASI dovodi do neodgovarajuće korelacije kod svih analiziranih vrijednosti IM.
- Vrijednosti IM nisu prikladne za predviđanje odziva građevina s kratkim periodima, koje se nalaze u području potresa osjetljivom na ubrzanje.

LITERATURA

- [1] Heydari, M., Mousavi, M.: The comparison of seismic effects of near-field and far-field earthquakes on relative displacement of seven-storey concrete building with shear wall, *Current World Environment*, 10 (2015) 1, pp. 0-46, <https://doi.org/10.12944/cwe.10.special-issue1.07>.
- [2] Ventura, C.E., Archila, M., Bebamzadeh, A., Liam Finn, W.D.: Large coseismic displacements and tall buildings, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20 (2011), pp. 85-99, <https://doi.org/10.1002/tal.739>.
- [3] Anil, K., Chintanapakdee, C.: Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30 (2001) 12, pp. 1769-1789, <https://doi.org/10.1002/eqe.92>.
- [4] Elshikh, A., Ghobarah, A.: Response of RC structures to near-fault records, *Emirates Journal for Engineering Research*, 9 (2004) 2, pp. 45-51.
- [5] Hosseini, M., Hashemi, B., Safi, Z.: Seismic design evaluation of reinforced concrete buildings for near-source earthquakes by using nonlinear time history analyses, *Procedia Engineering*, 199 (2017), pp. 176-181, doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.225.
- [6] Jouneghani, K., Hosseini, M., Rohanimanesh, M., Dehkordi, M.: Evaluation main parameters effects of near-field earthquakes on the behaviour of concrete structures with moment frame system, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11 (2017) 3, pp.10-23, <https://doi.org/10.12913/22998624/74135>.
- [7] Kohrangi, M., Vamvatsikos, D., Bazzurro, P.: Pulse-like versus non-pulse-like ground motion records: spectral shape comparisons and record selection strategies, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48 (2019) 1, pp. 46-64, <https://doi.org/10.1002/eqe.3122>.
- [8] Gerami, M., Abdollahzadeh, D.: Local and global effects of forward directivity, *GRAĐEVINAR*, 65 (2013) 11, pp. 971-985, <https://doi.org/10.14256/JCE.908.2013>.
- [9] Ghobarah, A.: Response of structures to near-fault ground motion. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada. 2004.
- [10] FEMA 356: Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [11] PEER: Pacific Earthquake Engineering Research Center, Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu>, 2018.

- [12] Annan, C.D., Youssef, M.A., El Naggar, M.H.: Seismic vulnerability assessment of modular steel buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, 13 (2009) 8, pp. 1065-1088, <https://doi.org/10.1080/13632460902933881>.
- [13] Ozmen, H.B., Inel, M.: Damage potential of earthquake records for RC building stock, *Earthquakes and Structures*, 10 (2016) 6, pp.1315- 1330, <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2016.10.6.1315>.
- [14] California Geological Survey-Strong Motion Instrumentation Program (CGS-SMIP) and (PEER), Technical Report for the PEER Ground Motion Database, beta version, October 2010.
- [15] Chopra, K., Anil, Ch.: *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Vol. 3. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445133:5\(752\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445133:5(752)), 2007.
- [16] Paz, M., Leigh, W.: *Structural Dynamics Theory and Computation*, Fifth Edition, Kluwer Academic Publisher, Boston/ London, 2004.
- [17] Clough, R., Penzien, J.: *Dynamics of Structures*, Third Edition, Computers & Structures, Inc., United States of America, 2003.