

Primljen / Received: 17.6.2022.

Ispravljen / Corrected: 17.12.2022.

Prihvaćen / Accepted: 26.12.2022.

Dostupno online / Available online: 10.6.2023.

3D nelinearna seizmička analiza i projektiranje izoliranih zgrada pri gibanjima tla s plitkim žarištem

Autori:



Mohammed Tamahloult, dipl.ing.građ.

Laboratorij za potresno inženjerstvo i dinamiku konstrukcija

Nacionalna politehnička škola, Alžir

Odjel za građevinarstvo

mohammed.tamahloult@g.enp.edu.dz



Prof.dr.sc. **Boualem Tiliouine**, dipl.ing.građ.

Laboratorij za potresno inženjerstvo i dinamiku konstrukcija

Nacionalna politehnička škola, Alžir

Odjel za građevinarstvo

boualemtiliouine@gmail.com

Autor za korespondenciju

Stručni rad

Mohammed Tamahloult, Boualem Tiliouine

3D nelinearna seizmička analiza i projektiranje izoliranih zgrada pri gibanjima tla s plitkim žarištem

Učinkovitost izoliranih zgrada tijekom prošlih potresa potvrdio je prikladnost izolatora od gumenog ležišta s olovnom jezgrom (LRB). Kako bi se procijenila učinkovitost takvih izolatora, za tri komponente snimljene tijekom potresa u Northridgeu 1994. godine, na trima postajama s udaljenostima od seizmičkog rasjeda na 5.54, 11.39, 17.82 i 6.7 Mw, razvijeni su 3D modeli višekatne zgrade s fiksnom bazom i modeli s pridruženom izoliranom bazom. U ovom se radu dotičemo važnih pitanja u vezi s analizom i projektiranjem izoliranih zgrada pod utjecajem gibanja tla s plitkim žarištem pri razinama predviđenog potresa (engl. *Design Basis Earthquake* - DBE) i najjačega mogućeg potresa (engl. *Maximum Capable Earthquake* - MCE). Rezultati pokazuju da, iako su uvjeti posmične deformacije i stabilnosti ispunjeni, ključno je zadovoljiti zahtjeve uvjeta izvlačenja (engl. *rollout*) zbog velikog pomaka izolatora na razini MCE uz korištenje dodatnih viskoznih prigušivača za poboljšanje željene učinkovitosti izolacije.

Ključne riječi:

gibanja tla s plitkim žarištem, izolirane zgrade, 3D nelinearni odgovor na potres, LRB izolatori, seizmička konstrukcija, provjere stabilnosti

Professional paper

Mohammed Tamahloult, Boualem Tiliouine

3D nonlinear seismic analysis and design of base-isolated buildings under near field ground motions

The structural performance of base-isolated buildings during past earthquakes confirmed the suitability of Lead Rubber Bearing (LRB) isolators. To assess the effectiveness of such isolators, 3D base-fixed and associated base-isolated models of a multi-story building are performed for three components recorded at each of the three stations with the closest distances to the seismic fault of approximately 5.54, 11.39, and 17.82 km during the 6.7 Mw Northridge earthquake in 1994. In this study, we discuss important issues regarding the analysis and design of base-isolated buildings under near-field ground motions at both the Design Basis Earthquake (DBE) and Maximum Capable Earthquake (MCE) levels. The results demonstrate that although the shear strain and stability conditions are fulfilled, it is crucial to satisfy the rollout condition requirements because of the large isolator displacement at MCE level while utilising supplemental viscous dampers to improve the desired efficiency of isolation.

Key words:

near field ground motions, base-isolated buildings, 3D nonlinear earthquake response, LRB isolators, seismic design, stability checks

1. Uvod

Učinkovitost izoliranih zgrada tijekom prošlih potresa potvrdio je prikladnost gumenog ležaja s olovnom jezgrom (engl. *Lead Rubber Bearing* - LRB) kao učinkovitog izolatora. Zgrade koje su sadržavale seizmičke izolatore pokazale su se boljima tijekom potresa s plitkim žarištem koji su se dogodili 1994. godine u Northridgeu i 1995. godine u Kobeu, čime je potvrđena učinkovitost seizmičkih izolatora, primjer [1, 2]. Seizmička gibanja tla zabilježena u blizini rasjeda imaju različite karakteristike od gibanja tla s dubokim žarištima i znatno se razlikuju u svom utjecaju na neelastični odziv višekatnih zgrada, primjeri [3, 4]. U literaturi [5] predlažu se čimbenici modifikacije u blizini rasjeda koji su relativno usporedivi s onima iz UBC97, kineskih i tajvanskih pravila seizmičkog projektiranja konstrukcija koje imaju duge ili kratke periode titranja.

Laminirani gumeni ležajevi, titrajni sustav izložen trenju (engl. *Friction Pendulum System*) i teflonsko-čelični tarni ležajevi (engl. *Teflon-Steel friction bearings*) neki su od uobičajeno prihvaćenih sustava za seizmičku izolaciju građevine. Osim toga, usporedivi su s drugim izolacijskim uređajima i poznati su po svojoj dugovječnosti, ekonomičnosti i boljoj kontroli nad svojim svojstvima [6].

Mogu izdržati velike težine zbog svoje vertikalne krutosti. Međutim, horizontalno su vrlo fleksibilni, što omogućuje konstrukciji da se ponaša kao kruto tijelo tijekom potresa [7]. Jedinstveni zakon o gradnji (UBC97) [8] predviđa da se gornje konstrukcije izoliranih zgrada ponašaju elastično uslijed predviđenog potresa (DBE), za razliku od ponašanja pod najjačim mogućim potresom (MCE). LRB ležajevi dobivaju se umetanjem olovne jezgre u laminirane elastomerne ležajeve i mogu pružiti visoke razine prigušenja i početnu krutost. Za prikaz mehaničkih svojstava ležaja s olovnom jezgrom najčešće se koriste bilinearni modeli [9, 10].

Alhan i Öncü-Davas [11] predložili su metodologiju koja može na odgovarajući način identificirati optimalne kriterije izolacijskog sustava, uključujući razdoblje izolacije i karakteristični omjer sila, koji su nužni za ispunjavanje cilja izvedbe u području s plitkim žarištem.

Prema Mayesu i Naeimu [12], svaki potpuni postupak projektiranja trebao bi osigurati sljedeće:

- da ležajevi sigurno podnose maksimalna gravitacijska uporabna opterećenja tijekom trajanja konstrukcije
- da će ležajevi osigurati pomak perioda i histerezno prigušenje tijekom jednog ili više predviđenih potresa.

Učinak ležajeva ocjenjuje se pod vlastitom težinom, stalnim, i potresnim opterećenjima i svim drugim primjenjivim uvjetima opterećenja.

Međutim, duge impulse amplitude velike brzine i pomaka mogu uzrokovati velike pomake seizmičkog izolatora konstrukcije, dok se izolacijski uređaji deformiraju ili lome pri gibanju tla u blizini rasjeda, prema Providakis [13]. Stoga su u ovom radu stabilnost izolacijskog sustava građevine i seizmičko opterećenje na

udaljenosti od rasjeda u području s plitkim žarištem presudni za projektiranje izolacijskog sustava građevine temeljenog na LRB-u [14].

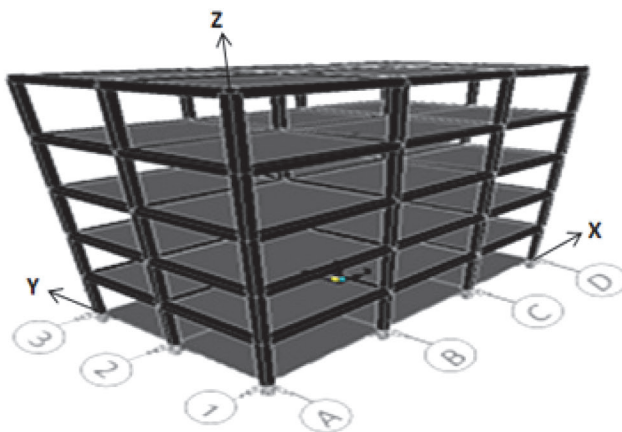
S obzirom na to, potrebno je provjeriti stabilnost i posmičnu deformaciju izolacijskog sustava kako bi se osmislilo pouzdano oblikovanje, primjenom procjene globalnog seizmičkog odziva ne samo na razini DBE, već i na, što je najvažnije, razini MCE. U ovom radu, 3D nelinearne seizmičke analize modela s fiksnom bazom i modela 3D višekatnica s izolacijskim sustavom ležajeva tipa LRB izvedene su za tri različita gibanja tla s plitkim žarištem, zabilježena na svakoj od tri postaje s različitim najbližim udaljenostima od aktivnog seizmičkog rasjeda tijekom potresa u Northridgeu jačine $6,7 M_w$, kako bi se ispitala seizmička izvedba i učinkovitost izolacijskog sustava građevine oblikovanog prema Zakonu UBC97.

Nadalje, raspravljena su važna pitanja u vezi s analizom i projektiranjem izoliranih zgrada pri gibanju tla s plitkim žarištem na razinama DBE i MCE. Osim toga, numerička izvedba dviju metoda analize za rješavanje 3D nelinearne dinamičke jednadžbe gibanja proučavanih modela višekatnih konstrukcija istražene su Newmarkovim algoritmom i algoritmom brze nelinearne analize (engl. *Fast Nonlinear Analysis* - FNA). Naposljetku su razvijeni zaključci i preporuke inženjerske važnosti za izvođenje pouzdanih i učinkovitih analiza i projektiranja nelinearnih izolacijskih sustava građevine na razinama DBE i MCE.

2. Primjer konstrukcije i seizmički parametri za projektiranje

2.1. Primjer konstrukcije

Razmatrana zgrada s petokatnim okvirom pravilnog je tlocrta i visine $15 \times 8 \text{ m}^2$ s tri raspona u uzdužnom smjeru i dva raspona u poprečnom smjeru, kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Primjer 3D konstrukcije okvira

Presjeci greda su $40 \times 30 \text{ cm}$, $30 \times 30 \text{ cm}$ za sve stupove i visine od 3 m. Ležajevi su ugrađeni između temelja i gornje konstrukcije. Gornja konstrukcija postavljena je na izolacijski sustav koji se sastoji od LRB-ova postavljenih ispod svakog stupa i spojenih

Tablica 1. Karakteristike potresnih komponenti primjenjenih za 3D nelinearnu dinamičku analizu i oblikovanje LRB izolatora

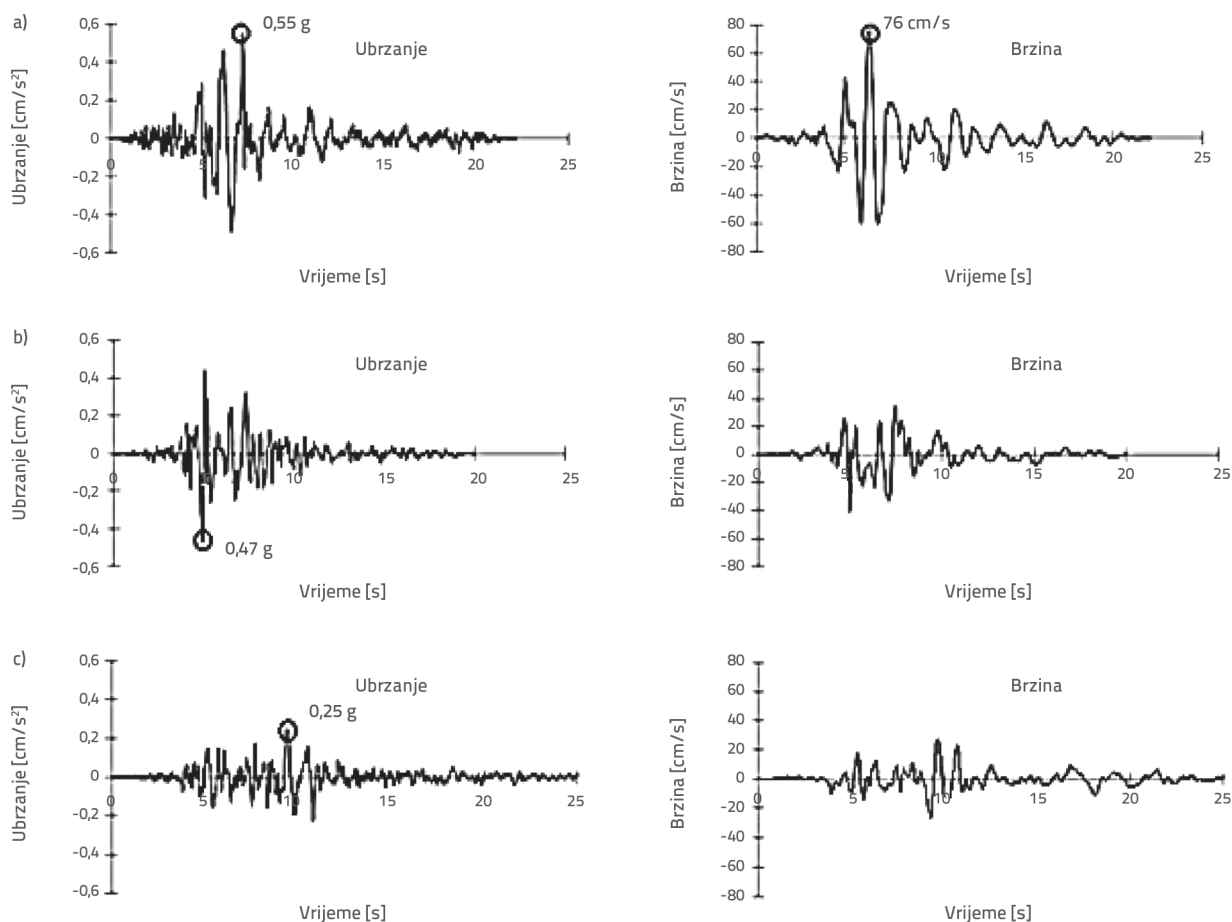
Seizmička pojava	Postaja	Najbliža udaljenost [km]	Komponenta	PGA [g]	PGV [cm/s]	PGD [cm]
17. siječnja 1994. potres u Northridgeu jačine 6,7 M_w	Pardee	5,54	NORTHR_PAR-L	0,55	76,03	14,43
			NORTHR_PAR-T	0,3	54	11,06
			NORTHR_PAR-UP	0,38	11,10	0,48
	Canyon	11,39	NORTHR_LOS270	0,471	41,106	14,56
			NORTHR_LOS000	0,403	44,361	11,26
			NORTHR_LOS-UP	0,303	18,531	5,34
	Hollywood	17,82	NORTHR_WIL180	0,25	27,018	5,46
			NORTHR_WIL090	0,135	12,737	4,85
			NORTHR_WIL-UP	0,151	11,695	3,98

na krutu temeljnu ploču od 10 cm. Na istoj slici prikazan je i raspored izolatora. Ukupna težina konstrukcije je 7510 kN. Modul elastičnosti svakog elementa okvira je $2,48 \times 10^7$ kN/m². Period titranja konstrukcije s fiksnom bazom duž glavnog smjera X (dobiveno pomoću programa SAP2000) iznosi $T_x = 1,03$ s. Pretpostavlja se da je prigušenje gornje konstrukcije konstantno za svaki oblik titranja i da iznosi 5 %. Konstrukcija je izgrađena na tipu profila tla koji odgovara krutom profilu tla S_D i nalazi se u području unutar seizmičke zone 4 (faktor, $Z = 0,4$ kako

je navedeno u tablici 1.), gdje aktivni rasjedi koji mogu proizvesti potrese velike magnitude imaju visoku stopu seizmičke aktivnosti (seizmički izvor klase A prema tablici 16-U UBC97).

2.2. Karakteristike gibanja tla s plitkim žarištem

Za procjenu učinkovitosti izolacijskih sustava s LRB-ovima primjenjuju se tri komponente gibanja tla zabilježene na svakoj od tri postaje s različitim najbližim udaljenostima od seizmičkog



Slika 2. Ubrzanje u plitkom žarištu i zapis brzine u funkciji vremena komponenti uzdužnog gibanja tla zabilježene na postajama Pardee, Canyon i Hollywood tijekom potresa jačine 6,7 M_w u Northridgeu

rasjeda od približno 5,54, 11,39 i 17,822 km tijekom potresa u Northridgeu 1994. jačine 6,7 Mw. Uzdužne, poprečne i vertikalne komponente seizmičkih gibanja tla zabilježene na svakoj od tri postaje istovremeno se primjenjuju u glavnim X, Y, i Z smjerovima konstrukcije. U ovom radu prikazujemo samo rezultate smjera X. Tablica 1 prikazuje karakteristike triju komponenata gibanja tla zabilježenih na svakoj od tri postaje koje su korištene za projektiranje izolatora. Ubrzanje i brzina komponenti uzdužnog gibanja tla prikazani su na slici 2. Nadalje, postoji značajan impuls brzine od 76 cm/s u komponenti uzdužnog gibanja tla zabilježen na postaji Pardee. Na postajama Canyon i Hollywood nisu zabilježeni značajni impulsi brzine u komponentama uzdužnog gibanja tla. Vršna ubrzanja za komponente uzdužnog gibanja tla zabilježena na postajama Pardee, Canyon i Hollywood iznose 0,55, 0,47, odnosno 0,25 g.

3. Postupci izvedbe izolatora

3.1. Kriteriji pomaka

Samo se jedan tip LRB-a koristi u području baze za vanjske i unutarnje baze stupova. LRB izolacijski sustav trebao bi osigurati učinkovito razdoblje T_D izolirane konstrukcije (procjenjuje se da je $T_D = 2,00$ s), koje je veće od trostrukog perioda elastične fiksne baze T_{code} [$T_{code} = c_t(h_n)^{3/4} = 0,073(15)^{3/4} = 0,55$ s] konstrukcije, izračunanog prema UBC97 formuli 30-8 (tj. $T_D = 2$ s $>$ $3T_{code} = 3 \times 0,55 = 1,66$ s). Osim toga, izolacijski sustav treba osigurati ključan omjer prigušenja od otprilike 15 % (UBC 97 formula 65-3). Projektirani pomak izolacijskog sustava duž glavne vodoravne osi na razini predviđenog potresa (DBE) izračunava se pomoću UBC97 formule (58-1):

$$D_D = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) C_{vD} T_D \tag{1}$$

Seizmički koeficijent C_{vD} dobiva se iz tablice 16-R Zakona UBC97 uzimajući u obzir faktor blizine izvora N_v ($C_{vD} = 0,64 N_v$) dobiven iz tablice 16-T. N_v je faktor blizine izvora koji ovisi o blizini konstrukcije i aktivnosti poznatih rasjeda, kako je

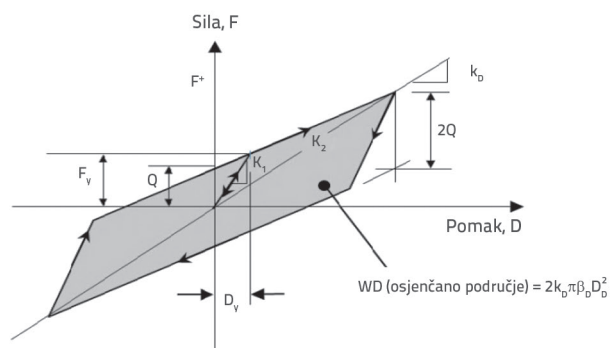
dobiveno iz tablice 16-T Zakona UBC 97. Koeficijent prigušenja $B_D = 1,35$ dobiva se iz tablice A-16-C uz pretpostavku omjera prigušenja $\beta_D = 0,15$. Ukupni projektirani pomak, D_{TD} elemenata izolacijskog sustava mora uključivati dodatni pomak zbog stvarne i slučajne torzije, kako je propisano formulom (58-5) Zakona UBC97:

$$D_{TD} = \left[1 + \frac{(12e)}{b^2 + d^2} y \right] D_D \tag{2}$$

pri čemu su b i d najkraća i najduža tlocrtna dimenzija konstrukcije; e je stvarna ekscentričnost ($e_{actual} = 0$) plus 5 % slučajne ekscentričnosti ($e_{accidental} = 8 \times 0,05$) = 0,4 m, y je udaljenost između središta krutosti izolacijskog sustava i promatranog elementa mjereno okomito na smjer razmatranog potresnog opterećenja. Za elemente na rubovima konstrukcije paralelne sa smjerom potresnog opterećenja koristi se vrijednost $y = 4$ m.

3.2. Bilinearni histerezni model izolatora

Nelinearno ponašanje izolatora idealizirano je bilinearnim modelom sila-deformacija, koji odražava mehanička svojstva ležajeva karakterizirana s tri glavna konstrukcijska parametra: elastična krutost (K_1), krutost nakon popuštanja (K_2) i karakteristična čvrstoća (Q), primjeri [8, 15, 16]. W_D je disipacija energije po ciklusu, mjerena površinom koju zatvara petlja krivulje sila-deformacija, kao što je prikazano na slici 3.



Slika 3. Bilinearni model izolacijske jedinice

Tablica 2. Svojstva bilinearnog modela LRB izolatora na razini DBE

1994., potres u Northridgeu jačine 6,7 Mw	N_v	C_{vD}	T_D [s]	D_D [cm]	k_D [kN/m]	W_D	D_v [m]	Q [kN]	K_2 [kN/m]	K_1 [kN/m]
Postaja Pardee	1,52	0,977	2	36	837,30	102,03	0 0,008 0,01225	70,99 72,60 73,50	640,05 635,57 633,07	6400,5 6355,7 6330,7
Postaja Canyon	1,14	0,73	2	27	837,30	51,38	0 0,0075 0,0091	50,33 51,85 52,20	640,12 634,15 632,79	6401,2 6341,5 6327,9
Postaja Hollywood	1	0,64	2	24	837,30	39,49	0 0,0055 0,0080	44,12 45,23 45,77	640,12 635,15 632,80	6401,2 6351,5 6328,0

Odabrano je bilinearno ponašanje jer je primjenjivo za većinu izolacijskih sustava koji se koriste u praksi. Svojstva izolatora za sve slučajeve zabilježenih gibanja tla s plitkim žarištem u sustavu okvira projektiranom prema UBC 97, navedena su u tablici 2. nakon postupka konvergencije parametara modela.

Kao što je prikazano u tablici 2., projektirani pomak D_D raste s povećanjem vrijednosti faktora blizine izvora N_V i seizmičkog koeficijenta C_{VD} . Osim toga, projektirani pomak $D_D = 36$ cm mnogo je veći na lokaciji postaje Pardee (tj. postaje koja je najbliža aktivnom seizmičkom rasjedu) nego na lokacijama ostalih postaja. Nadalje, disipacija energije W_D značajno je porasla u pomacima u blizini rasjeda na lokaciji postaje Pardee, što upozorava na snažno slabljenje karakteristika seizmičkih gibanja tla. Stoga je ključno uzeti u obzir faktor blizine izvora.

4. Nelinearne dinamičke analize i procjene seizmičke pouzdanosti konstrukcije

U ovom odjeljku istražen je nelinearni seizmički odziv 3D višekatne konstrukcije (slika 1.) pod tri komponente ubrzanja gibanja tla zabilježene na svakoj od tri postaje s različitim najbližim udaljenostima od seizmičkog rasjeda tijekom potresa u Northridgeu. Provedena je dinamička analiza u vremenskoj domeni za konstrukciju s fiksnom i izoliranom bazom. Gornji dio konstrukcije modeliran je kao elastična okvirna konstrukcija.

Gornji dio konstrukcije i baza modelirani su s tri stupnja slobode: X , Y , i stupanj rotacije po katu pridružen središtu mase. Katovi su beskonačno kruti u ravnini [17]. Svi izolacijski elementi LRB-a povezani su u razini baze kroz krutu ploču u razini temelja. LRB ležaj modeliran je kao LINK, u prikladnom formatu za program SAP2000 [18]. SAP2000 nelinearni kod konačnih elemenata koristi se za dobivanje dinamičkih odgovora u diskretnim vremenskim intervalima. Newmarkova metoda nelinearne izravne integracije (NDI) s parametrima $\alpha = 0,5$ i $\beta = 0,25$ (tj. koristeći metodu bezuvjetno stabilnog prosječnog ubrzanja) i metoda brze nelinearne analize [19] primjenjuju se za integraciju

jednadžbi dinamičke ravnoteže gibanja. Procjene seizmičkog učinka uključuju apsolutna ubrzanja i pomake gornjeg kata, maksimalni pomak baze i poprečnu potresnu silu. Kriterij izvedbe definiran je na sljedeći način:

- relativni pomak (P_1) baze u odnosu na tlo također predstavlja deformacije izolatora $P_1 = \max(|d_b|)$, pri čemu je d_b relativni pomak baze u odnosu na tlo
- omjer vršnog pomaka krova (P_2) definira se kao $P_2 = \max(|d_s - d_b|/H)$, pri čemu je d_s relativni pomak krova u odnosu na tlo, a H je ukupna visina zgrade
- vršna vrijednost ubrzanja petog kata (P_3) definira se kao $P_3 = \max(|a_s|)$, pri čemu je a_s ukupno ubrzanje petog kata
- vršna poprečna potresna sila prikazana je pomoću $P_4 = \max(|V_b|)$ pri čemu je V_b poprečna potresna sila konstrukcije.

Seizmičko ponašanje izolacijskog sustava procijenjeno je usporedbom rezultata dinamičkog odziva izolirane zgrade u odnosu na zgradu s fiksnom bazom. Tablica 3. sažima rezultate koji pokazuju prednosti izolacije osnove građevine, zajedno s odgovarajućim komentarima predstavljenim u poglavljima od 4.1 do 4.4.

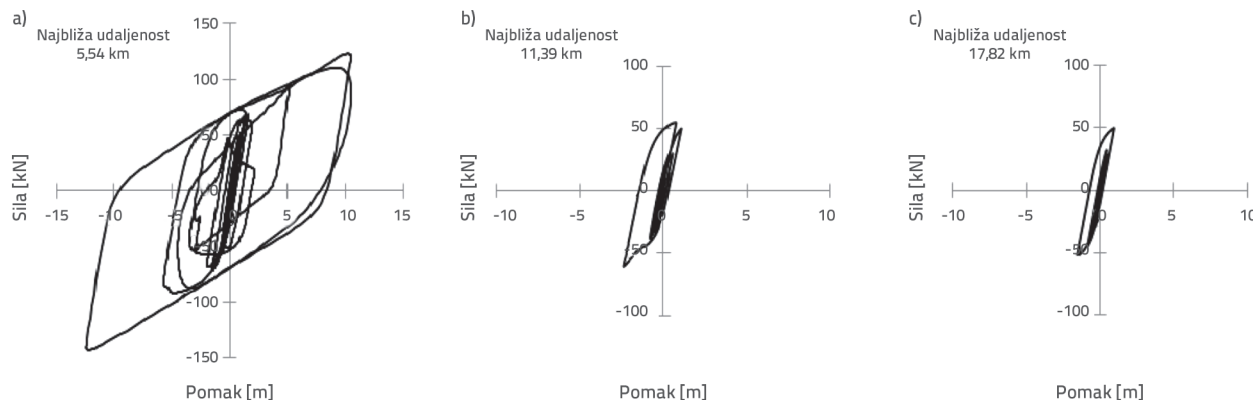
Rezultati prikazani u tablici 3. pokazuju da seizmička izolacija konstrukcije *istovremeno* smanjuje seizmičko međukatno smicanje i ubrzanje kata, suprotno osnovnom konceptu duktilnosti smanjenja šteta od potresa i poboljšanja strukturnih performansi građevinskih konstrukcija. Također se pokazuje da je FNA algoritam učinkovitiji od Newmarkove metode izravne vremenske integracije za gotovo isti stupanj točnosti.

4.1. Odziv pomaka baze

Utvrđeno je da maksimalni pomaci baze konstrukcije u smjeru X iznose 14,20 cm, 4,34 cm i 2,99 za 3D ulazne komponente gibanja tla, zabilježene na postajama Pardee, Canyon i Hollywood tijekom potresa u Northridgeu 1994. godine jačine $6,7M_w$.

Tablica 3. Seizmičko ponašanje građevina s fiksnom bazom te izoliranih građevina i numeričke metode analize

Procjena seizmičkog ponašanja	Metoda analize	Northridge Pardee zapis		Northridge Canyon zapis		Northridge Hollywood zapis	
		Fiksna baza	Izolirana baza	Fiksna baza	Izolirana baza	Fiksna baza	Izolirana baza
(P_1) Pomak baze [cm]	NDI	0	12,92	0	2,99	0	2,07
	FNA	0	14,20	0	4,34	0	2,99
(P_2) Omjer najvećeg katnog pomaka vrha [%]	NDI	3,31	1,00	0,858	0,60	0,69	0,53
	FNA	3,33	1,00	0,859	0,60	0,69	0,53
(P_3) Ubrzanje najvišeg kata [m/s^2]	NDI	20,13	6,61	5,50	3,10	3,90	2,49
	FNA	20,15	5,53	5,50	2,73	3,90	2,37
(P_4) Poprečna potresna sila [kN]	NDI	6462	1697	1624	737,8	1414	624
	FNA	6459	1791	1583	842	1421	679
CPU vrijeme [s]	NDI	464	389	211	334,48	201	260
	FNA	4	6	5	6	4	7



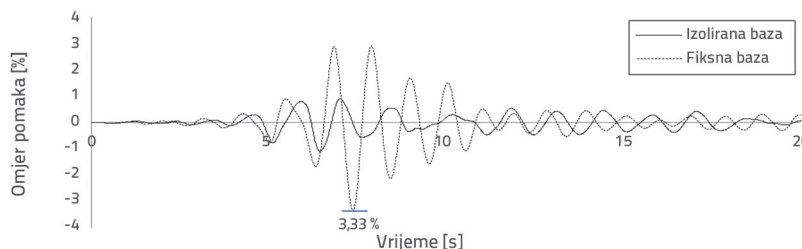
Slika 4. Krivulje deformacije sile seizmičkog izolatora za 3D ulazne komponente ubrzanja gibanja tla zabilježene na postajama: a) Pardee, b) Canyon, c) Hollywood tijekom potresa jačine 6,7 Mw 1994. u Northridgeu

To su redom 42 %, 17 % i 13,5 % predviđenog projektiranog pomaka izračunanog prema UBC97 (vidi tablicu 2.), što upućuje na znatan stupanj konzervativizma u oblikovanju za svojstva materijala i karakteristike gibanja tla s plitkim žarištem odabranih u ovom radu. Slika 4. prikazuje tipične dijagrame ponašanja sile pomaka izolatora u tri različita slučaja komponenata ubrzanja gibanja tla zabilježenih na postajama Pardee, Canyon i Hollywood. Slike pokazuju da karakteristike sila-pomaka sile izolatora variraju za različite slučajeve gibanja tla s plitkim žarištem koje karakteriziraju tri najbliže udaljenosti od seizmičkog rasjeda (5,54, 11,39 i 17,82 km) i odgovarajuće razine PGA (0,55, 0,47 i 0,25g). Područje petlje histereze širi se u slučaju gibanja tla zabilježenog na postaji Pardee, tj. stanici najbližoj seizmičkom rasjedu. Petlje histereze postaju uske i blisko raspoređene u središnjoj zoni za pomake tla zabilježene na dvjema udaljenijim postajama Canyon i Hollywood. Izračunani vršni pomaci za sve slučajeve manji su od polovice projektiranih pomaka predviđenih pomoću UBC97. Nadalje, seizmički građevinski propisi nameću znatan stupanj konzervativizma u projektiranju jer različiti potresi na istoj lokaciji imaju različite učestalosti i izazivaju različite periode konstrukcije s različitim stupnjevima intenziteta. Nadalje, pretpostavka bilinearnog ponašanja napravljena u fazi projektiranja prema UBC97 prihvatljiva je.

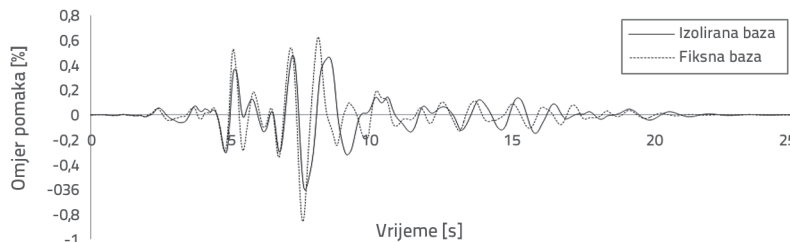
4.2. Odziv međukatnog pomaka

Odziv međukatnog pomaka važan je parametar za procjenu performansi izolacijskog sustava. Usporedba

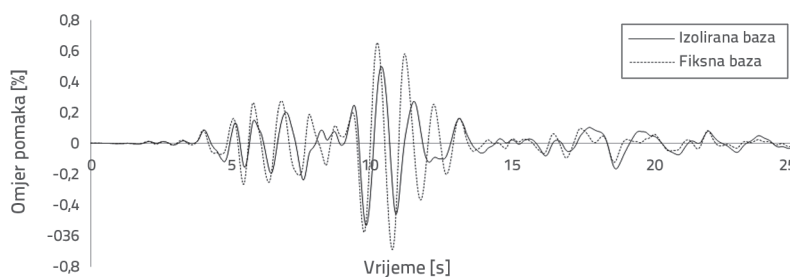
međukatnog pomaka za zgradu s fiksnom i izoliranom bazom za tri slučaja gibanja tla s plitkim žarištem zabilježena na postajama Pardee, Canyon i Hollywood tijekom potresa u Northridgeu 1994. prikazana je na slikama 5. do 7. Katni pomaci izolirane zgrade smanjeni su na približno 68 %, 30 % i 20 % u usporedbi sa zgradom s fiksnom bazom na postajama Pardee, Canyon i Hollywood.



Slika 5. Omjer odziva katnog pomaka za potres u Northridgeu 1994. jačine od 6,7 Mw (postaja Pardee)



Slika 6. Omjer odziva katnog pomaka za potres u Northridgeu 1994. jačine 6,7 Mw (postaja Canyon)

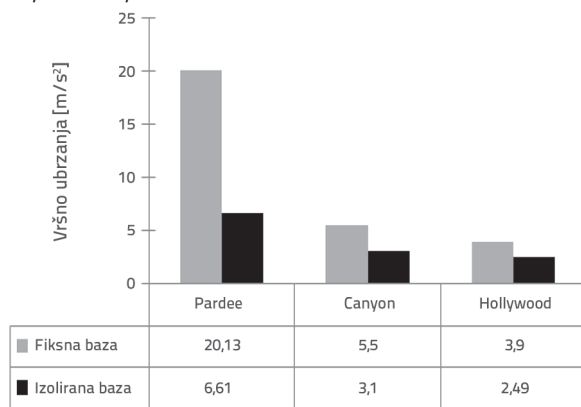


Slika 7. Omjer odziva katnog pomaka za potres u Northridgeu 1994. jačine 6,7 Mw (postaja Hollywood)

Nadalje, omjer međukatnog pomaka za zgradu s fiksnom bazom pri gibanju tla s plitkim žarištem zabilježenom na postaji najbližoj seizmičkom rasjedu (postaja Pardee) iznosi 3,33 % i premašuje maksimum dopušten prema UBC97 (tj. katni pomak ne bi trebao premašiti iznos koji je 0,020 puta veći od visine kata).

4.3. Odziv apsolutnog ubrzanja

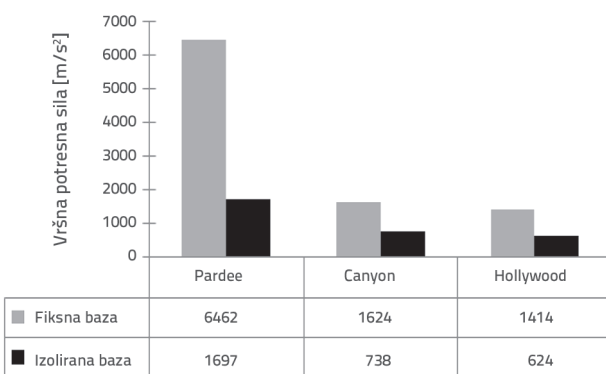
Vršna apsolutna ubrzanja gornjeg kata za izoliranu zgradu i zgradu s fiksnom bazom podvrgnutu gibanjima tla s plitkim žarištem zabilježena na postajama Pardee, Canyon i Hollywood tijekom potresa u Northridgeu 1994. prikazana su na slici 8. Vršna apsolutna ubrzanja gornjeg kata izolirane zgrade smanjuju se za približno 67 %, 43 %, odnosno 36 % odgovarajućih vrijednosti zgrade s fiksnom bazom na postajama Pardee, Canyon i Hollywood.



Slika 8. Odziv vršnog ubrzanja

4.4. Odziv poprečne potresne sile zgrade u razini temelja

Smjer X vršne poprečne potresne sile izolirane baze i zgrade s fiksnom bazom za tri slučaja gibanja tla s plitkim žarištem zabilježena na postajama Pardee, Canyon i Hollywood tijekom potresa u Northridgeu 1994. prikazan je na slici 9.



Slika 9. Odziv poprečne potresne sile zgrade u razini temelja

Vršne poprečne potresne sile prenesene na gornju konstrukciju izolirane zgrade iznose približno 26 %, 45 % i 44 % njihovih

vrijednosti fiksne baze za gibanja s plitkim žarištem zabilježena na postajama Pardee, Canyon i Hollywood. Vršna poprečna potresna sila smanjena je s $P_4 = 6462$ kN na $P_4 = 1697$ kN za gibanje s plitkim žarištem zabilježeno je na postaji najbližoj seizmičkom rasjedu (postaja Pardee).

5. Geometrijsko oblikovanje, posmična deformacija i provjere stabilnosti

5.1. Idejno geometrijsko oblikovanje

Sljedeći koraci dovode do postizanja preliminarnog geometrijskog oblika, prema [12, 20]:

- odaberite modul posmika G ($G = 1,06$ MN/m²) i maksimalnu posmičnu deformaciju, ($\gamma_{max} = 100$ %)
- postavite faktor oblika $S = 20$, primjer [21]
- izračunajte:
 - ukupnu debljinu gume, $t_r = d_g / \gamma_{max}$
 - površinu poprečnog presjeka, $A = k_d t_r / G$ i ϕ i potrebni promjera ležaja
 - debljinu sloja gume, $t(t = \phi / 4S)$ i broj slojeva gume, ($N = t_r / t$)
 - površinu olovne jezgre; $A_p = Q / f_{py}$ ($f_{py} = 8,82$ MN/m² je granica popuštanja olovne jezgre pri smicanju)
 - veličinu izolatora h : $h = t_r + (N-1) t_s + 2 \times 2,5$ cm.

(Pretpostavlja se da su pokrovne ploče debljine 2,5 cm, t_s : debljina čeličnog lima).

5.2. Posmična deformacija i provjere stabilnosti

Zahtjevi za posmičnu deformaciju i uvjeti provjere stabilnosti izolatora moraju biti zadovoljeni pri razini najjačega mogućeg potresa (MCE). Uključujući dodatni pomak zbog stvarne i slučajne torzije, ukupni maksimalni pomak, D_{TM} (UBC97 formula 58-6):

$$D_{TM} = \left[1 + \frac{(12e)}{b^2 + d^2} y \right] D_M \quad (3)$$

pri čemu je

$$D_M = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2} \right)}{B_M} C_{VM} \cdot T_M \quad (4)$$

gdje je:

- D_M - maksimalni pomak povezan s efektivnim razdobljem T_M
- C_{VM} - seizmički koeficijent (tablica A-16-G),
- N_V - faktor plitkog žarišta,
- B_M - odgovarajući koeficijent prigušenja (tablica A-16-C) i učinkovito razdoblje T_M pri maksimalnom pomaku D_M koji se pretpostavlja da će biti jednak 2,6 s.

Odabrani gumeni slojevi trebali bi zadovoljiti očekivanja pod vertikalnim opterećenjem P_{DL+LL} [22]:

$$\gamma_{c,DL+LL} = \frac{6SP_{DL+LL}}{AE_c} < \frac{\zeta_b}{3} \tag{5}$$

pri čemu je $\gamma_{c,DL+LL}$ posmična deformacija uslijed okomitog opterećenja P_{DL+LL} (D_L - stalno opterećenje, L - povremeno opterećenje), S je faktor oblika = 20, ζ_b je istezanje gume pri pucanju = 500 % i E_c modul stišljivosti kompozita guma-čelik = 203365 N/cm².

$$\sigma_c = \frac{P_{DL+LL}}{A} \leq \sigma_{cr} = \frac{GS\phi}{2.5t_r} \tag{6}$$

Kako bi se spriječilo da ležaj postane nestabilan, prosječno tlačno naprezanje σ_c ležaja mora biti manje od prethodno postavljenog odstupanja σ_{cr} [23]. Veličina olovne jezgre mora osigurati početnu krutost i sposobnost rasipanja energije ležaju [24]:

$$1,25 \leq \frac{H_p}{d_p} \leq 5 \tag{7}$$

pri čemu je H_p efektivna visina olovne jezgre, d_p je promjer olovne jezgre.

Treba zadovoljiti uvjet posmične deformacije uključujući učinak potresa [22, 25-27]:

$$\gamma_{sc} + \gamma_{eq} + \gamma_{sr} \leq 0,75\zeta_b \tag{8}$$

$$\gamma_{sc} = \frac{6SP_{DL+LL+EQ}}{E_c A_{re}} \tag{9}$$

$$\gamma_{eq} = \frac{D_{TM}}{t_r} \tag{10}$$

$$\gamma_{sr} = \frac{\phi^2 \theta}{2tt_r} \tag{11}$$

γ_{sc} , γ_{eq} i γ_{sr} su posmične deformacije pod pritiskom, potresom i rotacijom.

$P_{DL+LL+EQ}$ je kombinacija stalnog opterećenja, povremenog opterećenja i potresnog opterećenja, A_{re} smanjena površina presjeka ležaja $\leq \phi^2(\beta - \sin\beta)/4$, pri čemu je $\beta = 2\cos^{-1}(DM/\phi)$, a θ je kut zakretanja ležaja izazvan potresom, $\theta = \left[\frac{(12e)}{(b^2 + d^2)} \right] D_M$.

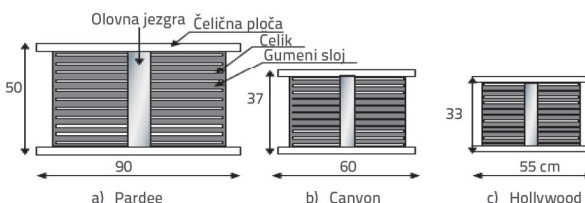
Kako bi se izbjeglo izvlačenje ležaja [22], pomak ležaja pod potresnim opterećenjem treba ispunjavati sljedeći uvjet:

$$D_{TM} \leq \delta_{roll-out} = \frac{P_{DL+LL+EQ} \cdot \phi}{P_{DL+LL+EQ} + K_2 h} \tag{12}$$

pri čemu je $d_{roll-out}$ odgovarajući pomak pri izvlačenju.

5.3. Rezultati geometrijskog oblikovanja, posmične deformacije i provjere stabilnosti na razini MCE

Značajni učinci čimbenika plitkog žarišta na rezultate geometrijskog oblika i odgovarajuće dinamičke karakteristike LRB izolatora, te zahtjevi za posmičnom deformacijom i uvjeti provjere stabilnosti na razini MCE prikazani su u tablicama 4 i 5. Učinci gibanja s plitkim žarištem zabilježeni na tri postaje s različitim najbližim udaljenostima od seizmičkog rasjeda tijekom potresa u Northridgeu 1994., koji djeluju na geometrijski oblik LRB izolatora također su prikazani na slici 10.



Slika 10. Oblici LRB izolatora u skladu s gibanjima tla s plitkim žarištem zabilježenima na postajama Pardee, Canyon i Hollywood tijekom potresa u Northridgeu 1994. jačine 6,7 Mw (cm)

Nadalje, oni pokazuju važnost uključivanja učinaka parametra najbliže udaljenosti i torzije na maksimalni ukupni pomak na razini MCE.

Tablica 4. Učinci čimbenika s plitkim ležištem na rezultate geometrijskog oblikovanja i dinamičke karakteristike LRB izolatora na razini MCE

1994, potres u Northridgeu jačine 6,7 Mw	N_v^*	C_{VM}	D_{TM} [cm]	Posmična deformacija γ_{max}	Debljina gume $t_r = D_{TM} / \gamma_{max}$ [cm]	Promjer ležaja, ϕ [cm]	Ukupna visina izolatora, h [cm]	Površina olovne jezgre, A_p [cm ²]	Efektivna horizontalna krutost, k_D [kN/m]	Efektivno razdoblje, T_D [s]
postaja Pardee	1,52	1,17	60	100 %	35	90	50	79	1872	1,33
postaja Canyon	1,14	0,89	45	100 %	26	60	37	55	1113	1,73
postaja Hollywood	1	0,80	41	100 %	22	55	33	51	1067	1,77

*Izračunato na temelju linearne interpolacije (vidi Tablicu 16-T UBC 97)

Tablica 5. Posmična deformacija i provjere stabilnosti na razini MCE

1994. potres u Northridgeu jačine 6.7 M _w	(1) Uvjet posmične deformacije $\gamma_{cdL+LL} < \frac{\zeta_b}{3}$ izraz (5)	(2) Uvjet stabilnosti $\sigma_c \leq \sigma_{cr}$		(3) Uvjet veličine olovne jezgre $\frac{H_p}{dp} \leq 5$ izraz (7)	(4) Uvjet posmične deformacije za potresno opterećenje $\leq 0.75\zeta_b$ izraz (8)	(5) Uvjet izvlačenja $D \leq \delta_{roll-out}$ [m] izraz (12)
		σ_c [MPa]	σ_{cr} [MPa]			
postaja Pardee	0,15 < 1,67	2,52	14,50	3,80 < 5	2,25 < 3,75	0,60 < 0,64
postaja Canyon	0,17 < 1,67	3,51	16,08	3,22 < 5	2,26 < 3,75	0,45 < 0,49
postaja Hollywood	0,21 < 1,67	4,24	16,86	3,01 < 5	2,32 < 3,75	0,41 < 0,45

Tablica 4. pokazuje da su za gibanje tla s plitkim žarištem, koje je zabilježeno na postaji Pardee, uočene velike vrijednosti promjera, visine i horizontalne efektivne krutosti izolatora (stoga mali efektivni period), što otežava postizanje željene učinkovitosti seizmičke izolacije. Nadalje, tablica 5. pokazuje da, iako postoji značajan stupanj konzervativizma u uvjetima posmične deformacije i stabilnosti, teško je postići granice sigurnosti u odnosu na uvjete izvlačenja ($D_{TM} \approx \delta_{roll-out}$). U takvom slučaju, dodatne strategije prigušenja ili druge izolacijske strategije temeljene na odgovarajućim kombinacijama LRB-ova s drugim vrstama izolatora (kao što su viskozni fluidni prigušivači, gumeni ležajevi s visokim prigušenjem (engl. *High Damping Rubber Bearings*) itd. mogu se koristiti za poboljšanje željene učinkovitosti izolacije, primjeri [13, 28].

6. Dodatni viskozni prigušivači

U ovom je istraživanju umetnuto je 12 dodatnih nelinearnih viskoznih fluidnih prigušivača (engl. *nonlinear fluid viscous damper* – NFVD) paralelno s LRB izolatorima duž glavnih tj. X i Y smjerova zgrade kako bi se poboljšala željena učinkovitost izolacije i ograničili veliki pomaci izolatora na razini MCE. Ponašanje nelinearnog fluidnog viskoznog prigušivača idealizirano je kao čisti prigušivač, kao što je prikazano u konstitutivnom izrazu (13), prema [29, 30]:

$$F_D = C_{NFVD} \times V^\alpha \quad (13)$$

Izraz (14) navodi odnos između izlazne sile prigušivača i brzine, pri čemu su C_{NFVD} i α konstanta prigušenja i eksponent brzine.

Vrijednost alfa jednaka 1,0 predstavlja linearne prigušivače, a vrijednosti različite od 1,0 označavaju nelinearne prigušivače. Specifikacije za alfu obično iznose od 0,3 do 1,0; što je niži eksponent to je učinkovitije viskozno prigušenje za disipaciju seizmičke energije. Dodatni koeficijent prigušenja C_{NFVD} može se izračunati na osnovi ukupne krutosti $k = 12 \times 932 = 11184$ kN/m (svaki od oblikovanih izolatora daje 932 kN/m u slučaju gibanja tla zabilježenog na postaji Pardee) i ukupne težine $w = 7510$ kN kako slijedi:

$$C_{NFVD} = 2\zeta_{NFVD}wm = 2\zeta_{NFVD}\sqrt{km} \quad (14)$$

Nadalje, razmatraju se dvije različite vrijednosti dodatnog prigušenja $\zeta_{NFVD} = 15\%$ i $\zeta_{NFVD} = 20\%$.

U glavnom smjeru X:

- za dodatno prigušenje $\zeta_{NFVD} = 20\%$

$$12 C_{NFVD} = 2\zeta_{NFVD}\sqrt{km} = 2 \cdot 0,2\sqrt{11184 \times 7510}$$

$$C_{NFVD} = 96$$

Sličan izračun može se primijeniti za glavni smjer građenja, točnije smjer Y.

Rezultati geometrijskog dizajna nakon dodavanja dodatnog prigušenja uz izolatore pokazuju važnu ulogu dodatnog prigušenja u smanjenju ukupnog maksimalnog pomaka D_{TM} tako da veći B_M smanjuje D_{TM} što omogućuje korištenje ležaja manjeg promjera (vidi tablicu 6.). Nadalje, u slučaju gibanja tla s plitkim žarištem zabilježenog na postaji najbližoj seizmičkom

Tablica 6. Učinci dodatnog prigušenja na rezultate geometrijskog oblikovanja i dinamičke karakteristike LRB izolatora na razini MCE ($\zeta_{NFVD} = 20\%$)

1994. potres u Northridgeu jačine 6,7 Mw	Pardee zapis 5,54 km		Canyon zapis 11,39 km		Hollywood zapis 17,82 km	
	Bez NFVD	$\zeta_{NFVD} 20\%$	Bez NFVD	$\zeta_{NFVD} 20\%$	Bez NFVD	$\zeta_{NFVD} 20\%$
C_{VM}	1,17	1,17	0,89	0,89	0,8	0,8
B_M	1,35	1,8	1,35	1,8	1,35	1,8
D_{TM} [cm]	60	45	45	34	41	31
Promjer ležaja, \varnothing [cm]	90	55	60	44	55	41
Ukupna visina izolatora h [cm]	50	37	37	30	33	26
Efektivno razdoblje T_0 [s]	1,3	1,89	1,69	1,99	1,73	2

Tablica 7. Učinci dodatnog prigušenja na odziv gornje konstrukcije na razini MCE ($\zeta_{NFVD} = 20\%$)

Procjena seizmičke učinkovitosti	1994. potres u Northridgeu jačine 6,7 Mw					
	Pardee zapis		Canyon zapis		Hollywood zapis	
	Bez NFVD	ζ_{NFVD} (20 %)	Bez NFVD	ζ_{NFVD} (20 %)	Bez NFVD	ζ_{NFVD} (20 %)
Pomak baze [cm]	9,54	5,65	3,71	2,13	2	1,86
Vršni omjer katnog pomaka [%]	1,33	1,08	0,56	0,43	0,55	0,4
Poprečna potresna sila [kN]	2607	2244	1000	817	825	741

rasjedu (postaji Pardee), dodavanjem dodatnog prigušenja za iznos od 20 %, povećan je faktor B_M s 1,35 na 1,8, smanjen je ukupni maksimalni pomak D_{TM} sa 60 cm na 45 cm, što omogućuje smanjenje promjera ležaja na 60 cm, uz poboljšanje konstrukcijskih performansi.

Slično tome, dodatno prigušenje smanjuje odziv gornjeg dijela konstrukcije za slučaj gibanja tla s plitkim žarištem s najmanjom najbližom udaljenošću od seizmičkog izvora. Postaja Pardee u tablici 7. pokazuje da dodatno prigušenje s količinom od 20 % smanjuje vršne vrijednosti osnovnog pomaka, a vršni pomak, omjer pomaka vrha i osnovno smicanje do 40 %, 19 %, odnosno 13 %, u usporedbi s odgovarajućim vrijednostima u odsutnosti dodatnog prigušenja.

7. Zaključak

Nelinearne seizmičke analize 3D modela višekatne konstrukcije s fiksiranim i seizmički izoliranim bazama provedene su za tri komponente gibanja tla s plitkim žarištem, zabilježene na svakoj od tri postaje s različitim najbližim udaljenostima od seizmičkog rasjeda približno od 5,54, 11,39 i 17,82 km tijekom potresa 1994. u Northridgeu jačine 6,7 M_w za procjenu učinkovitosti izolacijskih sustava s LRB-om. Za dobivanje rješenja jednadžbi gibanja primjenjena je Newmarkova metoda i metoda brze nelinearne analize.

Numerički rezultati pokazuju da disipacija energije izolatora znatno opada kako se najbliža udaljenost od seizmičkog izvora

povećava, što upozorava na snažno slabljenje karakteristika seizmičkih gibanja tla ukupnog proračunskog pomaka izolatora. Nadalje, izlazni rezultat na razini predviđenog potresa (DBE) pokazuje učinkovitost izolacijskog sustava, a istovremeno i smanjenje seizmičkog odziva u smislu ubrzanja kata, međukatnog pomaka i poprečne potresne sile.

Međutim, uključivanje učinaka plitkog žarišta i torzije, povećava pomak ležaja pri gibanju tla s plitkim žarištem s najmanjom najbližom udaljenošću od seizmičkog izvora kako bi se finalizirao geometrijski oblik i potvrdila stabilnost ležaja pod potresnim opterećenjem pri razini najjačega mogućeg potresa (MCE) koju zahtijeva UBC 97. Stoga, iako su posmična deformacija pod stalnim, povremenim i potresnim opterećenjima i uvjeti stabilnosti ispunjeni, ključno je zadovoljiti zahtjeve uvjeta izvlačenja zbog velikog pomaka izolatora na razini MCE uzrokovanim dugim periodom i impulsom velike amplitude brzine, što upućuje na potrebu primijenjene posebnih odredbi (dodatni nelinearni viskozni fluidni prigušivači) za poboljšanje željene učinkovitosti izolacije.

Uporaba dodatnih nelinearnih viskoznih fluidnih prigušivača uz LRB izolatore smanjuje odziv gornjeg dijela konstrukcije na gibanja tla s plitkim žarištem s najmanjom najbližom udaljenošću od seizmičkog izvora, što omogućuje manje promjere ležaja i poboljšanje strukturnog ponašanja.

Štoviše, isti stupanj točnosti i algoritam za brzu nelinearnu analizu (FNA) na numeričkoj razini uvelike nadmašuju Newmarkovu nelinearnu izravnu integracijsku metodu i preporučuju se za nelinearne analize seizmičkog odziva izoliranih 3D zgrada.

LITERATURA

- [1] Nagarajaiah, S., Xiaohong, S.: Response of base-isolated USC hospital building in Northridge earthquake, *Journal of Structural Engineering*, 126 (2000), pp. 1177–1186
- [2] Pan, P., Zamfirescu, D., Nakashima, M., Nakayasu, N., Kashiwa, H.: Base-isolation design practice in Japan: Introduction to the post-Kobe approach, *Journal of Earthquake Engineering*, 9 (2005) 1, pp. 147–171, <https://doi.org/10.1080/13632460509350537>
- [3] Muhsin, A.A., Risan, H.K.: Influence of near-fault characteristics on inelastic response of multi-storey building with intensity measurement analysis, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 11, pp. 1081–1092, <https://doi.org/10.14256/JCE.2898.2020>
- [4] 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>
- [5] Yaghmaei-Sabegh, S., Mohammad-Alizadeh, H.: Improvement of Iranian Seismic Design Code Considering the Near-Fault Effects, *IJE TRANSACTIONS C*, 25 (2012) 2, pp. 147–157, <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2012.25.02c.08>
- [6] Deb, S.K.: Seismic base isolation: An Overview, *Current Science*, 87 (2004) 10, pp. 1426–1430, <https://doi.org/10.1002/9780470172742>
- [7] Koo, G., Lee, J., Lee, H., Yoo, B.: Stability of laminated rubber bearings and its application to seismic isolation, *KSMJ Journal*, 13 (1999) 8, pp. 595–604, <https://doi.org/10.1007/BF03184553>
- [8] UBC: Structural engineering design provisions, *Proceedings of the uniform building code, International Conference of Building Officials*, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:10\(1177\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:10(1177))

- [9] Pan, P., Ye, L.P., Shi, W., Cao, H.Y.: Engineering practice of seismic isolation and energy dissipation structures in China, doi: org/10.1007/s11431-012-4922-6
- [10] Cheng, F., Jiang, H., Lou, K.: Smart structures innovative systems for seismic response control, 1st Edition, Francis and Taylor group, Boca Raton, USA, 2008.
- [11] Alhan, C., Öncü-Davas, S.: Performance Limits of Seismically isolated buildings under near-field earthquakes, *Engineering Structures*, 116 (2016), pp. 83–94, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.043>
- [12] Mayes, R.L., Naeim, F.: Design of Structures with Seismic Isolation, 2nd Edition, Springer, Boston, USA, 2001., <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1693-4>
- [13] Providakis, C.P.: Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations, *Engineering Structures*, 30 (2008), pp. 1187–1198
- [14] Han, X., Warn, G.P., Kasalanati, A.: Dynamic stability testing of isolation systems composed of elastomeric bearings and implications for design, *Structures Congress*, (2013), pp. 2140–2150, doi: org/10.1061/9780784412848.187
- [15] Park, Y.J., Wen, Y.K., Ang, A.H.S.: Random vibration of hysteretic systems under bi-directional ground motions *Earthquake, Engineering & Structures Dynamics*, 14 (1986) 4, pp. 543–557, <https://doi.org/10.1002/eqne.4290140405>
- [16] Mori, A., Moss, P.J., Carr, A.J., Cooke, N.: Behaviour of lead-rubber bearings, *Structural Engineering and Mechanics*, 6 (1998) 1, pp. 1–15
- [17] Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M., Constantinou, M.C.: Nonlinear dynamic analysis of 3D base-isolated structures, *Journal of Structural Engineering*, 117 (1991) 7: pp. 2035–205, [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:7\(2035\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:7(2035))
- [18] Computers and Structures: SAP2000 Static and dynamic finite element analysis of structures, https://www.academia.edu/27943857/SAP2000_Integrated_Finite_Element_Analysis_and_Design_of_Structures_BASIC_ANALYSIS_REFERENCE,1.1.2022.
- [19] Wilson, E.L.: Three-dimensional static and dynamic analysis of structures, Berkeley, CA, Computers and Structures Inc, 2002.
- [20] Kelly, J.M.: Earthquake-Resistant Design with Rubber, (2nd Edition), Springer-Verlag, London, 1997., <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0971-6>
- [21] Kelly, J.M.: Earthquake-Resistant Design with Rubber, Springer-Verlag, New York, 1993., <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3359-9>
- [22] American Association of State Highway & Transportation Officials AASHTO: Subcommittee on Bridges, Guide Specifications for Seismic Isolation Design, 2010.
- [23] Naeim, F., Kelly, J.M.: Design of seismic isolated structures: From theory to practice, (1st Edition), John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, USA, 1999.
- [24] Yang, Y., Chang, Kuo., Yau, J.: Base isolation, *Earthquake Engineering Handbook*, CRC Press, Washington DC, 2003.
- [25] Higashino, M., Okamoto, S.: Response Control and Seismic Isolation of Building, 1st edition, Taylor and Francis, London, 2006.
- [26] Buckle, I.G., Liu, H.: Critical loads of elastomeric isolators at high shear strain, *Proceedings of the 3rd U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges*, National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York, Buffalo, NY, 1994.
- [27] Buckle, I.G., Liu, H.: Experimental determination of critical loads of elastomeric isolators at high shear strain, *NCEER Bull*, 8 (1994) 3, pp. 1–5
- [28] Ladjel, Y., Toumi, Z.M.: Comportement dynamique non-linéaire d'un pont-caisson a-symétrique: étude de diverses stratégies d'isolation parasismique, *Engineer's Thesis*, Ecole Nationale Polytechnique Algiers, Algeria, 2016.
- [29] Constantinou, M.C., Symans, M.D.: Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers, *The Structural Design of Tall Buildings*, 2 (1993) 2, pp. 93–132, <https://doi.org/10.1002/tal.4320020203>
- [30] Deringöl, A.H., Güneyisi, E.M.: Influence of nonlinear fluid viscous dampers in controlling the seismic response of the base-isolated buildings, *Structures*, 34 (2021), pp. 1923–1941, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.106>.