

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Biškup, Dorotea

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:254830>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-16**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Dorotea Biškup

**PRIMJENA SEIZMIČKE IZOLACIJE U
PROTUPOTRESNOJ IZGRADNJI I OBNOVI
ZGRADA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Dorotea Biškup

APPLICATION OF SEISMIC ISOLATION FOR EARTHQUAKE-RESISTANT CONSTRUCTION AND RETROFITTING OF BUILDINGS

MASTER THESIS

Zagreb, 2024.

Dorotea Biškup

**PRIMJENA SEIZMIČKE IZOLACIJE U
PROTUPOTRESNOJ IZGRADNJI I OBNOVI
ZGRADA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: dr. sc. Anđelko Vlašić

Komentor: dr. sc. Dominik Skokandić

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Dorotea Biškup

(Ime i prezime)

0082060914

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

Application of seismic isolation for earthquake-resistant construction and retrofitting of buildings

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

18.09.2024.

Mentor:

Anđelko Vlašić

Potpis mentora:

Komentor:

Dominik Skokandić



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja:

DOROTEA BIŠKUP, 0082060914

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

18.09.2024.

Potpis:

Dorotea Biškup



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja:

DOROTEA BIŠKUP, 90333945031

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

ANĐELKO VLAŠIĆ

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

26.09.2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

18.09.2024.

Potpis:

Dorotea Biškup

SAŽETAK

U ovom radu navedene su metode zaštite građevina od potresnog djelovanja s posebnim naglaskom na primjenu seizmičke izolacije, odnosno seizmičkih izolacijskih ležajeva koji podrazumijevaju disipaciju energije od potresa, čime se smanjuje ubrzanje tla, povećava vlastiti period te smanjuju međukatni pomaci. Time se značajno smanjuju oštećenja uzrokovana potresom. Rad obuhvaća razvoj ideje seizmičke izolacije kroz povijest i njezinu primjenu u svijetu. Detaljno su opisane osnovne vrste seizmičkih izolacijskih ležajeva te njihovo ponašanje i sastavni dijelovi, a spomenuti su i ostali tipovi antiseizmičkih uređaja. U radu su navedeni i različiti pristupi dokazivanja učinkovitosti seizmičke izolacije, uključujući računalno modeliranje, praktično ispitivanje te promatranje i mjerenje tijekom potresa. Rad se osvrće na osnovne kriterije dizajna i korake u projektiranju seizmički izoliranih konstrukcija. Provedena je usporedba ponašanja konstrukcije sa i bez seizmičke izolacije čiji rezultati potvrđuju zaključke iz dosad provedenih istraživanja.

Ključne riječi: seizmička izolacija; potres; vlastiti period; ležajevi; krutost; prigušenje

SUMMARY

This paper outlines the methods of protecting buildings from seismic actions, with a particular focus on the application of seismic isolation, specifically seismic isolation bearings. These bearings dissipate earthquake energy, reducing ground acceleration, increasing the natural period and decreasing inter-story drifts. As a result, earthquake-induced damage is significantly reduced. The paper covers the historical development of seismic isolation and its global application. The main types of seismic isolation bearings, their behaviour and components are described in detail, along with a mention of other types of anti-seismic devices. Various approaches to proving the effectiveness of seismic isolation are discussed, including computer modeling, practical testing and observation and measurement during earthquakes. Additionally, the paper addresses key design criteria and steps in designing seismically isolated structures. A comparison of the behaviour with and without seismic isolation was conducted, confirming conclusions from previous research.

Key words: seismic isolation; earthquake; natural period; bearings; stiffness; damping

SADRŽAJ RADA

SAŽETAK.....	4
SUMMARY.....	4
SADRŽAJ RADA.....	5
1 Uvod.....	7
2 Seizmička izolacija.....	11
2.1 Povijest i razvoj seizmičke izolacije.....	15
2.1.1 Seizmička izolacija u Japanu.....	17
2.1.2 Seizmička izolacija u Sjedinjenim Američkim Državama.....	20
2.1.3 Seizmička izolacija u Europi.....	21
2.2 Tipovi i dijelovi seizmičkih izolatora.....	22
2.2.1 Klizni ležajevi.....	23
2.2.2 Elastomerni ležajevi.....	28
2.3 Učinkovitost seizmičke izolacije.....	31
2.3.1 Računalno modeliranje.....	32
2.3.2 Praktično ispitivanje.....	32
2.3.3 Promatranja i mjerenja tijekom potresa.....	33
3 Ostali antiseizmički uređaji.....	35
4 Dinamičko ponašanje izoliranih konstrukcija.....	37
5 Projektni kriteriji.....	43
5.1 Parametri za projektiranje seizmičke izolacije.....	43
5.2 Koraci pri projektiranju izoliranih konstrukcija.....	48
5.2.1 Provedba projektiranja izoliranih konstrukcija.....	50
5.2.2 Izvijanje i stabilnost elastomernog ležaja.....	54
5.2.3 Vertikalno opterećenje i horizontalna krutost.....	56
5.2.4 Veliki bočni pomaci.....	57
5.3 Projektiranje izolacije u podnožju prema HRN EN 1998-1.....	58

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

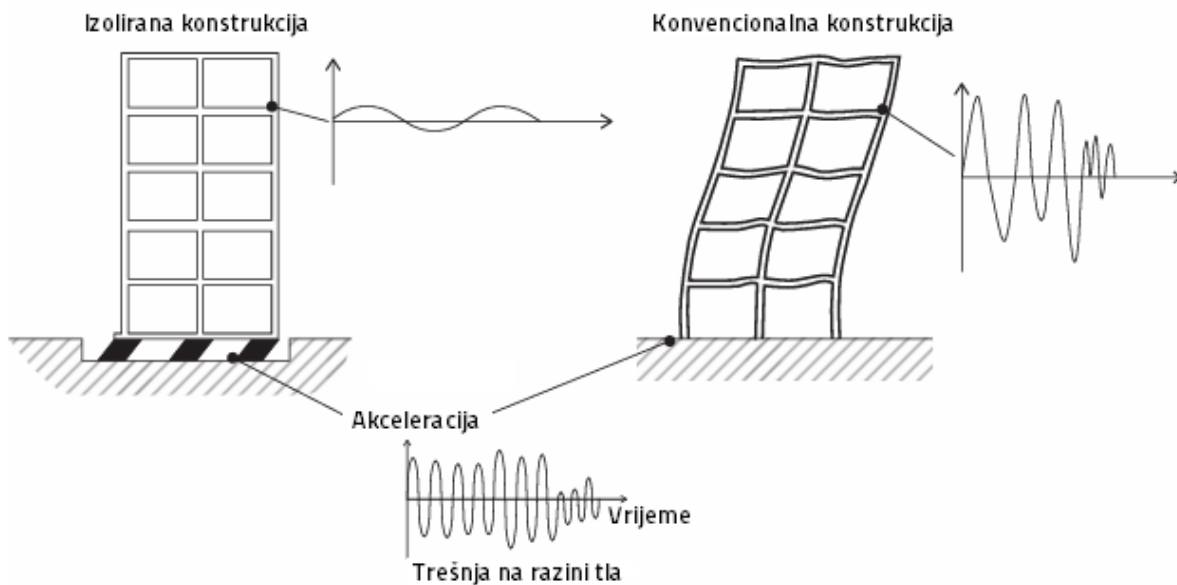
6	Primjeri seizmičke izolacije kod projektiranja i obnove (<i>case studies</i>)	62
6.1	Gradnja <i>New de Young</i> muzeja sa seizmičkom izolacijom u San Franciscu	62
6.2	Seizmičko naknadno opremanje bolničkog centra u Avellinu (Italija)	64
7	Primjer i usporedba ponašanja konstrukcije sa i bez seizmičke izolacije.....	68
7.1	Odabir ležajeva.....	71
7.2	Utjecaj izolatora na frekvencijske karakteristike	73
8	Zaključak.....	80
9	POPIS LITERATURE.....	82
10	POPIS SLIKA.....	86
11	POPIS TABLICA	90

1 Uvod

Nedavni potresi na području Hrvatske potaknuli su hrvatske inženjere na razmišljanje o zaštiti građevina prilikom potresnog djelovanja, odnosno o svođenju oštećenja građevine na najmanju moguću mjeru. Potres je nepredvidivo i snažno prirodno djelovanje te uzrokuje imovinske gubitke pa čak u nekim slučajevima dovodi i do ljudskih žrtava. Najopasniji su u gusto naseljenim područjima gdje građevine nisu sagrađene prema pravilima i propisima protupotresne gradnje. Inženjeri moraju prilagoditi način projektiranja gibanju tla. Kod primjene seizmičke izolacije odvaja se cijela ili dio konstrukcije od tla kako bi se smanjio seizmički odgovor tog dijela konstrukcije tijekom potresa, odnosno konstrukcija se izolira od horizontalne komponente gibanja tla koncentrirajući pomake na izolacijsku razinu (Ghasemi, Talaeitaba, 2020). Kod konvencionalne konstrukcije javljaju se međukatni pomaci i najveća ubrzanja na gornjim katovima, dok izolirane konstrukcije deformacije doživljavaju prvenstveno u podnožju, unutar izolacijskog sustava, a ubrzanja po visini zgrade relativno su jednaka (Chatzidaki, 2011).

Najpopularnija metoda seizmičkog ojačanja konstrukcija je dodavanje posmičnih zidova i podupirača što povećava krutost i bočnu nosivost konstrukcije. S porastom krutosti, raste i čvrstoća što dovodi do većih sila u neduktilnim elementima i temeljima. Zbog veće krutosti, smanjuje se temeljni period, seizmičko opterećenje na konstrukciju se povećava. Dakle, skraćivanje perioda konstrukcije vodi ka povećanju seizmičkog zahtjeva za konstrukciju. Seizmička izolacija i disipatori energije pokazali su se kao dvije glavne učinkovite metode za smanjenje dinamičkih odgovora kada su konstrukcije izložene potresu, bez povećanja njihove globalne krutosti. Izolacija temelja produljuje prirodni period što prikazuje slika 1.1. Tako se smanjuje ubrzanje preneseno u dio konstrukcije koji se nalazi iznad izolacijskog sustava (Ferraioli, Mandara, 2017).

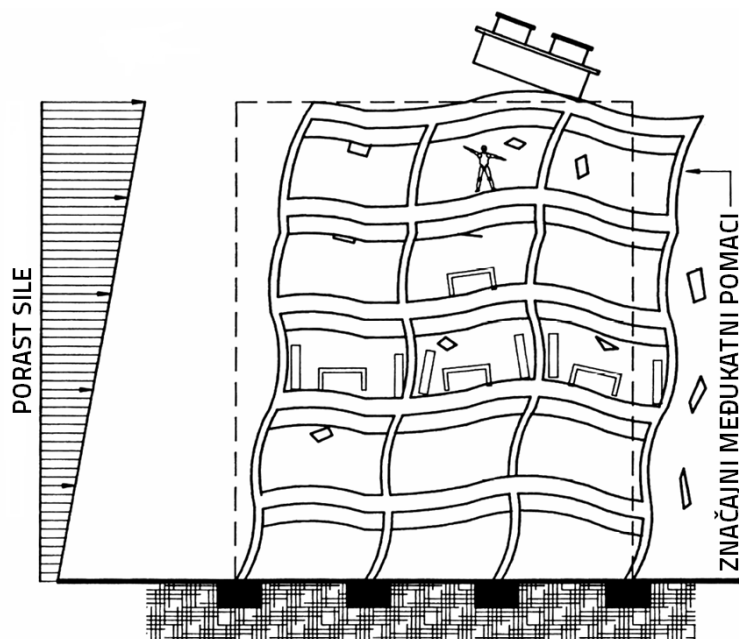
Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



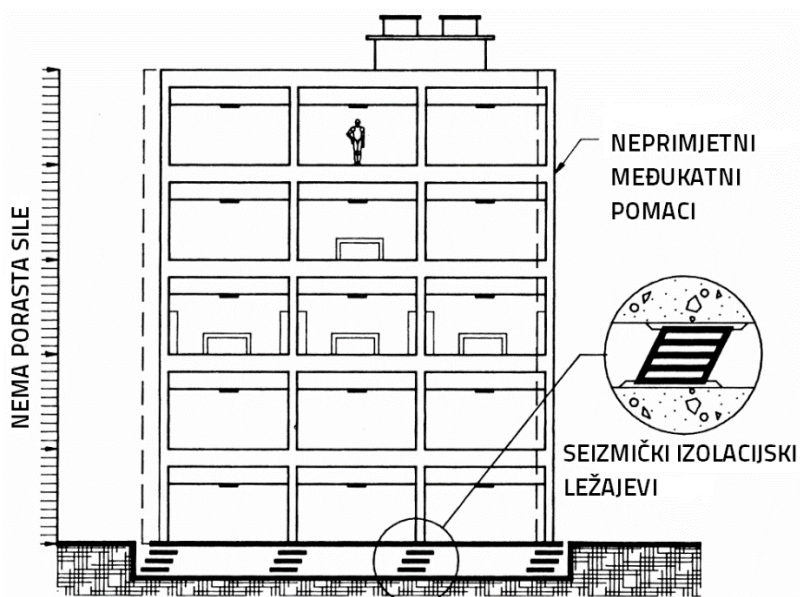
Slika 1.1 Odgovor izolirane i konvencionalne konstrukcije na potresnu silu
(Charleson, Guisasola, 2017.)

Kod standardnih metoda ojačanja konstrukcija, prilikom djelovanja potresne sile, namještaj se prevrće i razbijaju prozori, dolazi do osjećaja neugodnosti i panike kod ljudi te su nakon potresa potrebni popravci. Kod seizmički izoliranih konstrukcija, seizmički se izolatori ponašaju kao jastuci koji pretvaraju snažnu trešnju u blago podrhtavanje što čini konstrukciju sigurnom i ugodnom za život (*Oiles corporation*, n.d.). Slika 1.2 i slika 1.3 prikazuju usporedbu ponašanja konstrukcije u potresu sa i bez seizmičke izolacije.

Primjena seizmičke izolacije
u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 1.2 Ponašanje konstrukcije na fiksnim temeljima pri djelovanju seizmičke sile, s visinom raste utjecaj bočne sile, veliki su međukatni pomaci (Mayes, Naeim, 2001.)



Slika 1.3 Ponašanje konstrukcije s izolacijskim sustavom pri djelovanju seizmičke sile, nema povećanja utjecaja bočne sile s visinom, međukatni pomaci su minimalni (Mayes, Naeim, 2001.)

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Jedna od prednosti ovakvog protupotresnog ojačavanja postojećih konstrukcija je neovisnost radova na ugradnji izolacije od korištenja zgrade, zgrada se može koristiti tijekom ugradnje izolatora.

U ovom radu opisan je princip funkcioniranja seizmičke izolacije te su navedene neke od prednosti i mana. Opisana je primjena seizmičke izolacije kroz povijest te primjena u različitim dijelovima svijeta. Dani su primjeri osnovnih seizmičkih izolatora te način na koji funkcioniraju. Budući da ležajevi koji disipiraju energiju nisu jedina sredstva za smanjenje ubrzanja konstrukcije, nabrojani su i opisani dodatni antiseizmički uređaji. Navedena su tri osnovna načina kako se dokazuje učinkovitost seizmičke izolacije; računalnim modeliranjem, praktičnim ispitivanjima, te mjerenjima i praćenjem tijekom potresa.

Zbog dinamičke prirode potresa kojem se konstrukcija mora suprotstaviti, opisuje se dinamička osnova seizmičke izolacije te značenje ključnih parametara potresa i izolacijskih ležajeva. U poglavlju 5 predstavljeni su projektni kriteriji te postupci koji se primjenjuju pri projektiranju. To uključuje osnovne korake u procesu projektiranja, analizu izvijanja i stabilnosti elastomernih ležajeva, odnos vertikalnih opterećenja i horizontalne krutosti te utjecaj velikih bočnih pomaka na cjelokupnu stabilnost.

Opisani su primjeri primjene seizmičke izolacije kod gradnje i kod obnove, odnosno naknadne ugradnje u postojeću konstrukciju. Predstavljena je usporedba ponašanja seizmički izolirane i neizolirane zgrade u potresu te interpretirani dobiveni rezultati.

2 Seizmička izolacija

Konstrukcije otporne na potres mogu se kategorizirati u dvije osnovne skupine, a to su krute i fleksibilne konstrukcije. Kod krutih konstrukcija, metoda koja se primjenjuje za savladavanje ekstremnih opterećenja pri dnu zgrade je smanjenje međukatnih pomaka uz pomoć dijagonalnih ukrućenja, ugradnja posmičnih zidova i dr. U fleksibilnim konstrukcijama, kao što su temeljno izolirane konstrukcije, glavni cilj je smanjenje pobude upotrebom izolatora i prigušivača. Postavljanjem zgrade na izolatore sprječava se veći dio horizontalne inercijske sile u podnožju (*base shear*) koje tlo prilikom potresa prenosi na konstrukciju. To dovodi do smanjenja akceleracije poda i međukatnih pomaka (Ferraioli, Mandara, 2017).

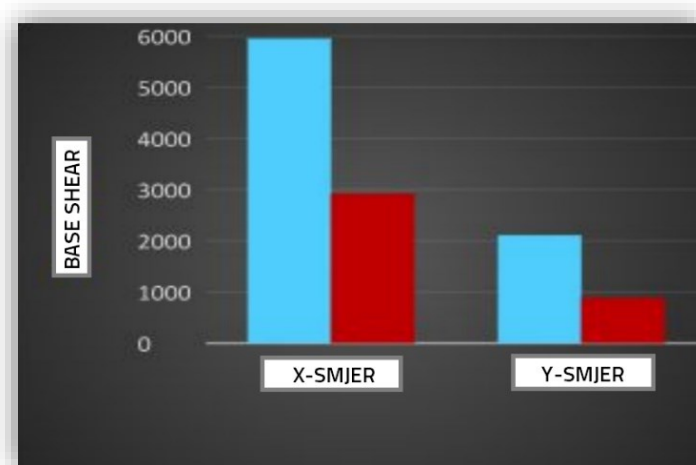
Cilj seizmičke izolacije je dakle smanjenje energije koja se prenosi gibanjem tla u konstrukciju. Izolacija mora biti sposobna smanjiti ili čak ukloniti oštećenja na nosivim i nenosivim elementima konstrukcije. Rezultat uporabe izolacije je spašavanje ljudskih života i svojstava konstrukcije (Hussain, Hafeez, 2016).

Osnovni zadatak seizmičke izolacije je izolirati konstrukciju od seizmičkog gibanja tla pa time i štetnih učinaka potresa. Tehnologija seizmičke izolacije omogućuju zgradama da se pomiču prilikom potresnog djelovanja, a da se očuva strukturalni integritet (Ferraioli, Mandara, 2017). Idealno bi bilo kada bi se tlo i temelji izolirane zgrade pomicali u svim smjerovima, a da pritom ne prenose kinetičku energiju na gornji dio konstrukcije. Nadalje, seizmički bi ležajevi osim horizontalnih opterećenja trebali preuzimati i vertikalna pa se izolacijski ležajevi postavljaju ispod nosivih zidova i stupova zgrade. Gornji dio konstrukcije, koji stoji na izolacijskim ležajevima, mogao bi se pomaknuti i više od graničnog pomaka, ovisno o trajanju potresa i njegovom intenzitetu, što bi oštetilo ležajeve. No uvijek se osigurava sila vraćanja ili sila obnavljanja. Ona kontinuirano vraća zgradu u početni položaj te štiti ležajeve od gubitka sposobnosti pomicanja tijekom dugotrajne trešnje. Za postizanje maksimalnog stupnja seizmičke izolacije, zgrada bi trebala ležati na površini bez trenja, no tada bi sve horizontalne sile, čak i sile vjetra, mogle horizontalno pomicati zgradu, što nikako nije poželjno jer bi zgrada mogla pretjerano kliziti i stanari bi mogli patiti od tzv. „morske bolesti“. Sustav seizmičke izolacije mora spriječiti kretanje tijekom naleta vjetra. Prigušenje je jedna od najvažnijih karakteristika sustava seizmičke izolacije. Ono što su amortizeri kod automobila, to su prigušivači kod zgrada. Oni smanjuju relativno

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

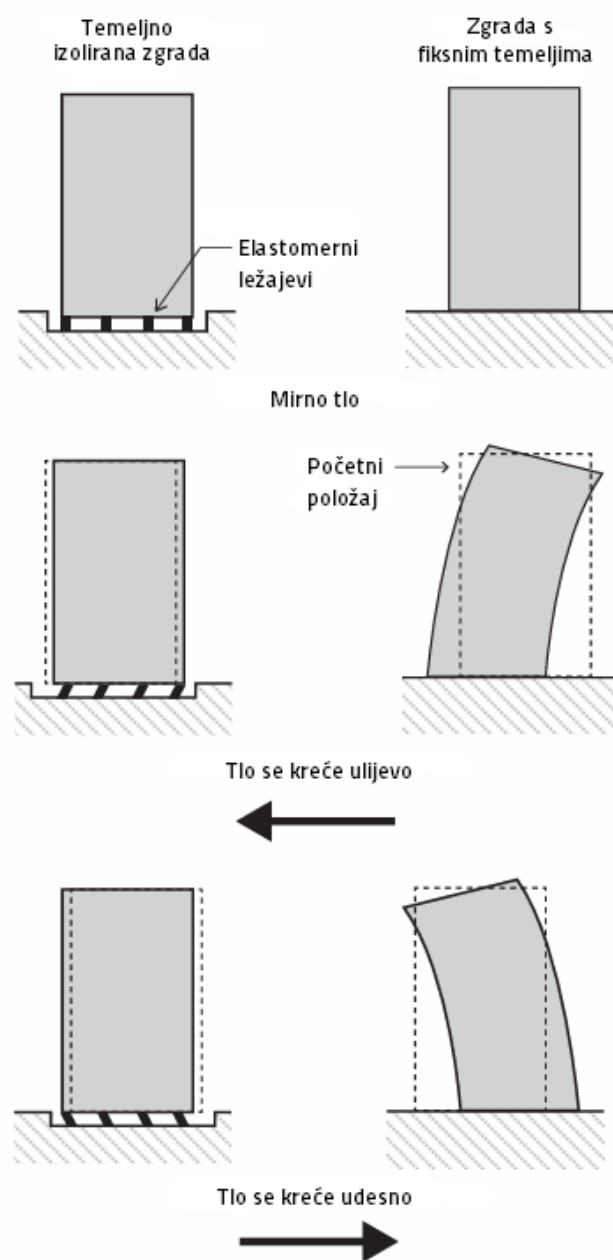
horizontalno kretanje između nadgradnje i temelja. Zahvaljujući njima, ležajevi se mogu dizajnirati na puno manje pomake što smanjuje i cijenu samih ležajeva (Charleson, Guisasola, 2017).

Hussain i Hafeez, godine 2016., objavili su istraživanje u kojem je napravljena usporedba ponašanja 12-katne armiranobetonske okvirne konstrukcije sa ležajevima od gume i olova (LRB - *Lead Rubber Bearings*) i sa fiksnim temeljima. Proveli su nelinearnu *pushover* analizu. Zaključili su da je sustav izolacije bitan za smanjenje smicanja temelja, smanjenja međukatnih pomaka te ubrzanja poda. Osim toga, primijećeno je i da se s porastom visine kata od dna konstrukcije povećava bočni pomak u zgradi s fiksnim temeljima u usporedbi s izoliranom zgradom. Usporedbom maksimalne sile u podnožju zgrade (*base shear*) s fiksnim temeljima i izolacijskim ležajevima dobiveno je smanjenje od 51% u x-smjeru i 58% u y-smjeru kod temeljno izolirane zgrade, slika 2.1 prikazuje rezultat (Hussain, Hafeez, 2016).



Slika 2.1 Rezultati usporedbe *base shear*-a u 2 smjera kod zgrade s fiksnom bazom (plavo) i temeljno izolirane zgrade (crveno) (Hussain, Hafeez, 2016)

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 2.2 Usporedba pomicanja izolirane zgrade i zgrade na fiksnim temeljima u odnosu na početni položaj (Charleson, Guisasola, 2017.)

Slika 2.2 prikazuje razliku u pomicanju zgrade na izolacijskim ležajevima i konvencionalne zgrade, vidljivo je kako izolacija smanjuje ubrzanje tla u podnožju zgrade te kako su međukatni pomaci smanjeni ili čak uklonjeni.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Što se tiče torzije, studija provedena od strane Tena-Colunga i Zambrana-Rojas pokazala je da veći ekscentricitet sustava temeljne izolacije ima negativniji učinak pomaka baze nego ekscentricitet konstrukcije iznad ležaja (Ferraioli, Mandara, 2017).

Prednosti seizmičke izolacije očituju se već u fazi projektiranja, omogućujući poboljšane arhitektonske značajke i smanjenje konstrukcijskih elemenata zbog manje potrebe za duktilnošću. Najbitnija prednost je smanjenje strukturalnih oštećenja prilikom potresnog djelovanja budući da je zgrada izolacijskim ležajevima odvojena od tla, a energiju gibanja apsorbiraju ležajevi. Seizmička izolacija pogodna je i za naknadnu ugradnju budući da se prilikom radova na ugradnji ne ometa funkcionalnost zgrade. Psihološki aspekt je isto tako važan, seizmička izolacija u zgradama umanjuje ljudske traume prilikom potresa te je manja vjerojatnost ozljede stanara (Charleson, Guisasola, 2017).

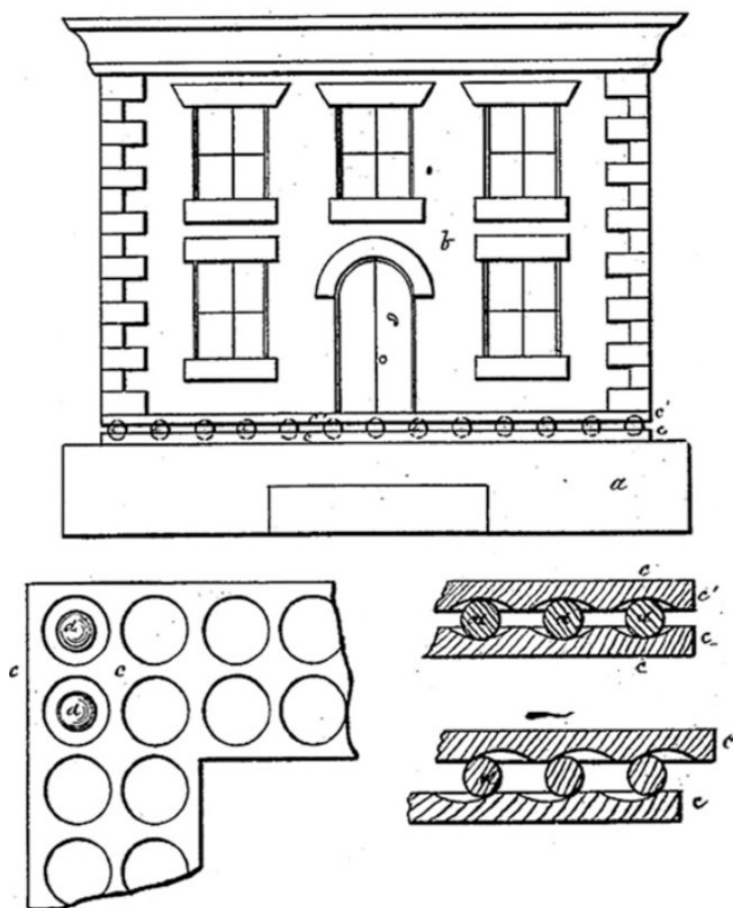
Mana je što seizmička izolacija mora biti postavljena isključivo na stabilnom tlu te se moraju izbjegavati lokacije blizu rasjeda. Zgrade blizu epicentra mogu doživjeti čak i vertikalna ubrzanja što može dovesti do nepredviđenih oštećenja. Nadalje, primjena seizmičke izolacije može biti ograničena prisutnošću susjednih zgrada. Jer bi oštećenje susjedne zgrade moglo oštetiti i izoliranu ili uništiti izolacijski sustav. Cijena je također jedan od razloga zašto seizmička izolacija nema široku primjenu u Hrvatskoj, pa i svijetu. Izolacijski sustavi zahtijevaju redovito održavanje, potrebno je kontrolirati izolacijske uređaje radi korozije, nečistoća te svojstava materijala i funkcionalnosti sustava (Charleson, Guisasola, 2017).

Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija provodi se prema Eurokodu 8, u njemu su obuhvaćena opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade. Konkretno, u poglavlju 10 dana su posebna pravila za izolaciju u podnožju konstrukcija (Hrvatski zavod za norme, 2011).

Budući da su različiti rizici od potresa diljem svijeta, tako je i razvoj i zastupljenost seizmički izoliranih zgrada različita. U nastavku će biti navedeni primjeri izvedenih konstrukcija na nekima od seizmički najaktivnijih područja.

2.1 Povijest i razvoj seizmičke izolacije

Ideja seizmičke izolacije potječe još iz davne 1870. kad je Jules Touaillon iz San Francisca osmislio patent za poboljšanu metodu gradnje zgrada otpornih na potres. Izolacijski sustav na kojem je stajala zgrada sastojao se od niza konkavnih sfernih površina okrenutih jedna prema drugoj koje su odvojene sfernim kuglama (Slika 2.3). Touaillon je objasnio da "... Gornja površina ploče c i donja površina ploče c' imaju udubljenja u obliku sfernog segmenta s radijusom znatno većim od radijusa kugli ... spomenuta težina će uzrokovati da se ploče c i c' i kugle vrate u svoj izvorni relativni položaj" (Makris, 2018).



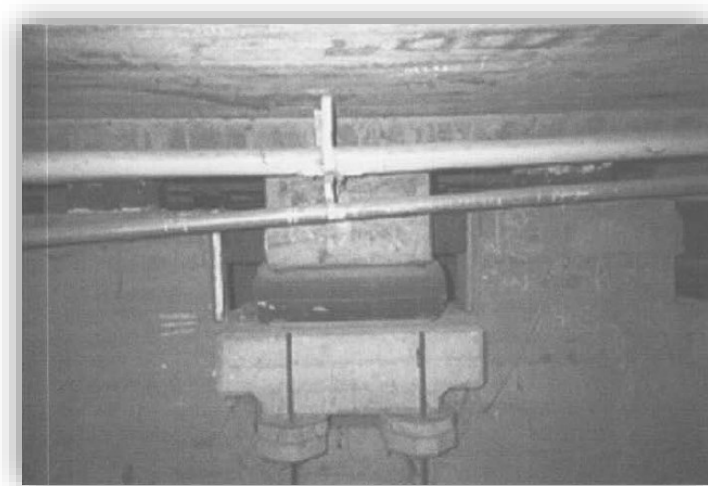
Slika 2.3 Seizmički izolirana konstrukcija Julesa Touaillona iz 1870. godine (Makris, 2018.)

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Godine 1885. japanski profesor John Milne predstavio je svoj eksperiment u kojem je sagradio drvenu kućicu na kuglama u željeznim pločama s rubovima poput tanjura na vrhovima pilota. Nije bio zadovoljan ponašanjem konstrukcije pod utjecajem vjetra te je predstavio novu verziju eksperimenta u kojem je smanjio promjer kugli te je konstrukcija postigla stabilnost pod djelovanjem vjetra i potresa (Naeim, Kelly, 1999).

Šest godina nakon, 1891. godine, Kawai iz Japana predložio je sistem kuće na drvenim trupcima u nekoliko slojeva uzdužno i poprečno (Ismail, 2017). Kasnije, 1909. godine, engleski liječnik J.A. Calantarients predložio je novu tehniku građenja konstrukcija otpornijih na potrese odvajanjem zgrade od temelja konstrukcije slojem pijeska ili talka, no došao je do zaključka da su zbog velikih pomaka između zgrade i temelja potrebne posebne veze za plinske, vodovodne i kanalizacijske instalacije (Makris, 2018).

Evidentno je kako ni jedan od prijedloga danih prije 1960. godine nije izveden, a najvjerojatniji razlozi su nedostatak praktičnosti i povjerenja inženjerske struke u uspješnost njihove izvedbe. 1930-ih godina dolazi se do ideje da se gornji katovi višekatne zgrade zaštite projektiranjem vrlo fleksibilnih stupova prizemlja, kako bi oni popuštanjem u potresu apsorbirali energiju. Dokazalo se da je koncept nepraktičan zbog prevelikih pomaka i velikih opterećenja na stupove. Druga ideja bila je uporaba gumenog izolacijskog sustava postavljenog na temelj. Godine 1969. izgrađena je armiranobetonska trokatna škola u Makedoniji poduprta blokovima od tvrde gume (slika 2.4). Blokovi su bili sastavljeni od gume, bez čeličnih pločica, te zbog težine zgrade ispupčeni u stranu (Ismail, 2017).



Slika 2.4 Ležajevi korišteni na školi u Makedoniji (Naeim, Kelly, 1999.)

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Daljnijim razvojem nastali su laminirani gumeni ležajevi, 1970-ih godina, te su se počeli primjenjivati u praksi. Oni su armirani, odnosno ojačani slojevima čelika, te stoga vrlo kruti u vertikalnom smjeru kako bi podnijeli težinu konstrukcije, ali vrlo fleksibilni u horizontalnom smjeru kako bi se omogućilo bočno pomicanje kod seizmičkog pomicanja tla. Početkom 1980-ih razvijale su se nove tehnologije gume te je nastala tzv. guma s visokim prigušenjem (HDR – *high damping rubber*). Kasnije su se izolacijskim sustavima dodavale mehaničke komponente kao što su valjci, opruge, klizne ploče. Za primjenu elastomernih ležajeva u praksi bio je također bitan razvoj pouzdanog *software*-a za računalnu analizu, korištenje potresnih stolova te razvoj vještina seizmologa u procjeni kretanja tla na određenoj lokaciji (Ismail, 2017).

2.1.1 Seizmička izolacija u Japanu

Otpornost na seizmička djelovanja japanskim inženjerima prioritet je prilikom projektiranja građevina. Oni su spremni razmotriti skuplje projekte budući da projektiraju sa većom seizmičkom otpornošću nego američki i europski inženjeri jer su u Japanu potresi češća pojava. Svakom usporedbom seizmički izoliranih i susjednih konvencionalnih neizoliranih zgrada dobiveno je da je odziv izolirane puno povoljniji, osobito kod gibanja tla s velikom akceleracijom (Naeim, Kelly, 1999).

Japanski otok nalazi se na mjestu gdje dolazi do kontakta i sudaranja triju tektonskih ploča, a to su; euroazijska, pacifička i filipinska. Rezultat toga je oslobađanje velike količine energije u vidu jakih potresa. Najjači potres u povijesti Japana zabilježen je 2011. godine jačine 9,0 po Richteru. Prema procjeni poginulo je oko 15 889 ljudi, a približno 127 290 građevina se u potpunosti srušilo. Japanska vlada nakon Drugog svjetskog rata uvela je niz strogih mjera za gradnju konstrukcija otpornih na potrese. Danas u Japanu postoji tri sistema gradnje za zaštitu od potresa, to su; seizmički otporne konstrukcije, ugradnja seizmičkih prigušivača i ugradnja seizmičke izolacije (Subramanian, 2023).

Japanski inženjeri mogu birati značajke konstrukcija otpornih na potrese ovisno o lokaciji i namjeni, uključujući:

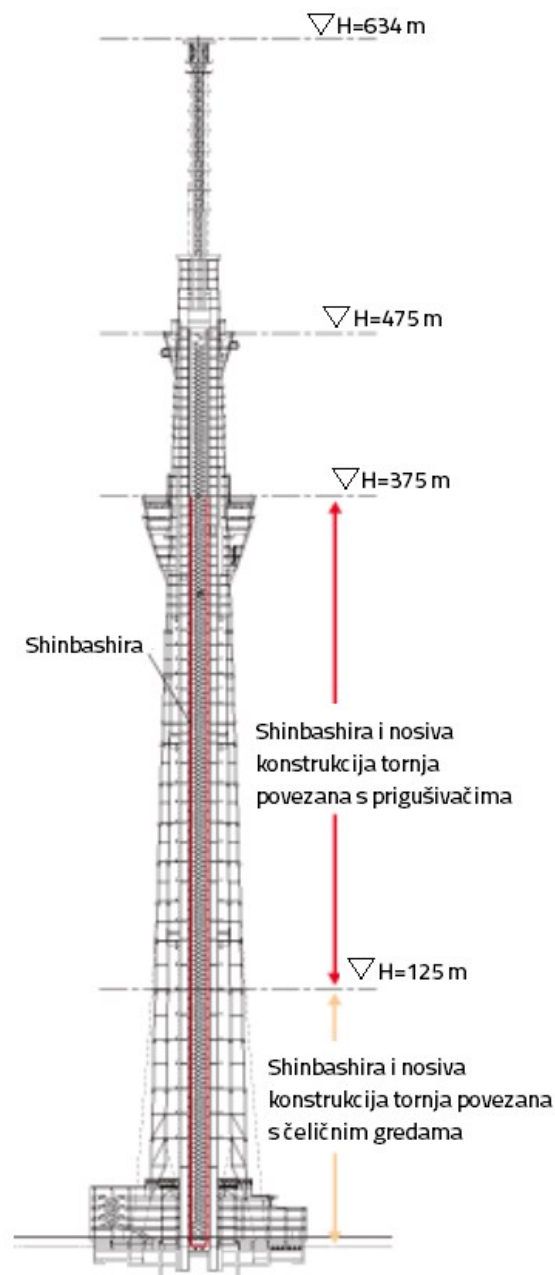
- upotrebu čeličnog okvira s čeličnom jezgrom za razliku od betonske jezgre koja je uobičajena u drugim dijelovima svijeta
- upotrebu dijagonalnih prigušivača, čeličnih nosača i stupova

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

- prigušivači između katova
- ukrućenja protiv izvijanja
- mnoge nove zgrade u Japanu povezane su s japanskim sustavom ranog upozoravanja koji može upozoriti ljude do 30 sekundi prije nego što nastupi potres

Primjeri izvedenih konstrukcija s inovativnim rješenjima otpornosti na potres su: *Tokyo's Sky Tree*, *Skinjuku Mitsui Building* i *Air Danshin's* „levitirajuće“ kuće.

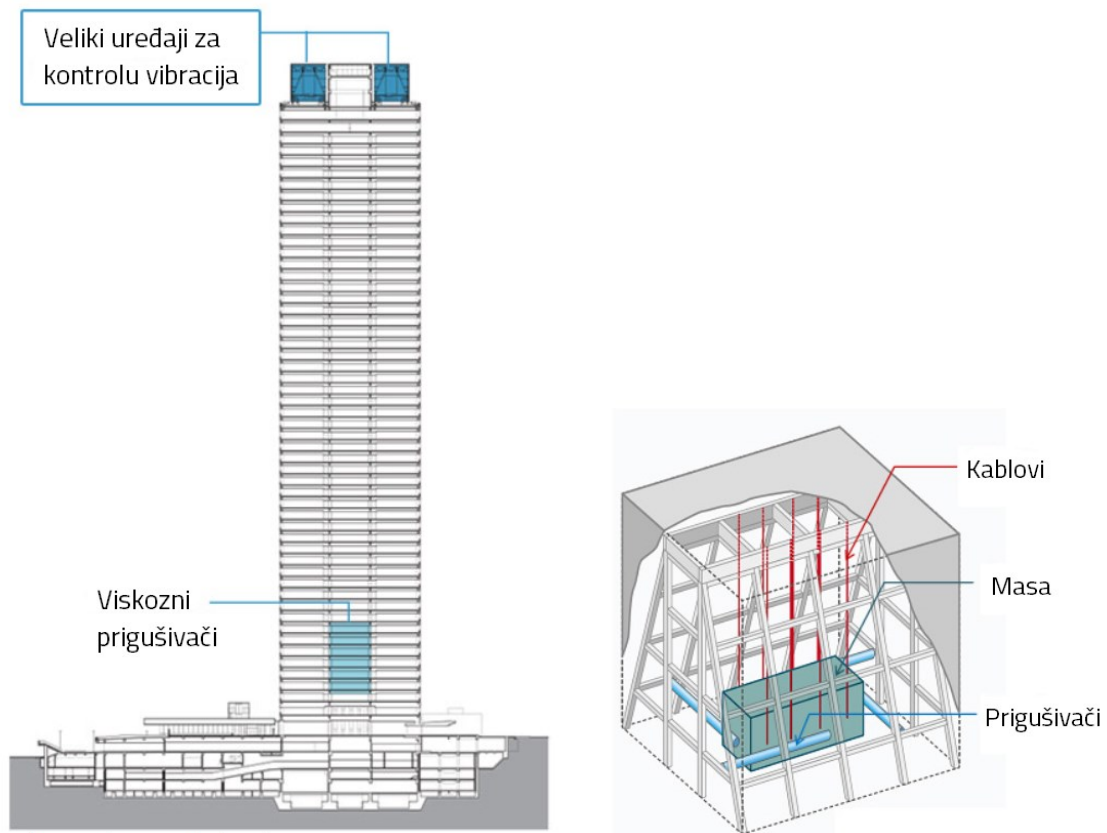
Tokyo's Sky Tree toranj (slika 2.5) izgrađen je 2012. godine, visok je 634 metra te je jedna od seizmički najotpornijih građevina u Japanu. Toranj u sredini ima stup koji smanjuje vibracije od potresa te prigušivače na samom vrhu, uz snažne temelje i prigušivače pri dnu. Taj središnji stup naziva se „*shinbashira*“. Prilikom potresa, on se pomiče neovisno o pomicanju konstrukcije kako bi održao težište što bliže centru. U potresu 2011. godine magnitude 9,0 po Richteru toranj je ostao neoštećen (Subramanian, 2023).



Slika 2.5 Prikaz konstrukcije *Tokyo's Sky Tree* (*Hightlight Japan*, 2011.)

Kod *Skinjuku Mitsui* nebodera nekoliko njihala težine 300 tona ugrađeno je na krov, ona se njišu pri potresu ili jakim vjetrovima što pomaže u suzbijanju bočnog pomicanja zgrade (slika 2.6).

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 2.6 *Skinjuku Mitsui* neboder, dijelovi uređaja postavljenog na vrh zgrade za kontrolu vibracija, sastoji se od njihala (kablova i masa) i prigušivača (*Mitsui Fudosan Co., Ltd., Kajima Corporation, 2013.*)

„Levitirajuće“ kuće osmišljene od strane japanske tvrtke *Air Danshin's*, a karakteristične su po tome što su opremljene detektorom potresa. Kad se detektira potres kompresor upuhuje zrak ispod zgrade da ju podigne do tri centimetara iznad temelja što omogućava ljuľljanje zgrade te izbjegavanje oštećenja (Subramanian, 2023).

2.1.2 Seizmička izolacija u Sjedinjenim Američkim Državama

Prva temeljno izolirana konstrukcija u SAD-u, a ujedno i prva građevina u svijetu izvedena na izolatorskim ležajevima od prirodne gume visokog prigušenja je zgrada *Foothill Communities Law and Justice Center* u južnoj Kaliforniji. Zgrada je locirana u neposrednoj blizini rasjeda San Andreas, poznatog po svojoj sposobnosti generiranja iznimno snažnih

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

potresa. Sastoji se od 4 etaže, a postavljena je na 98 izolacijskih ležajeva. Posmična krutost ležajeva je visoka pri malim deformacijama, ali kako se deformacija povećava, krutost se smanjuje za faktor od oko 4 do 5. Tako za mala opterećenja od vjetera ili potresa slabog intenziteta, sustav ima veliku horizontalnu krutost i kratki period. Porastom opterećenja, dolazi do smanjenja krutosti i produljenja perioda. Kad potresno opterećenje prijeđe maksimalno prihvatljivu vrijednost, opet dolazi do povećanja krutosti. Isti sustav visokog prigušenja usvojen je pri izvedbi *Fire Command and Control Facility* u Los Angeles-u. Izvedena je tako da izolacija pruža minimalnu razinu zaštite u slučaju jakih potresa, garantira samo da se konstrukcija neće srušiti, dok su manja oštećenja moguća (Naeim, Kelly, 1999). *Emergency Operations Center* u Los Angeles-u, *Traffic Management Center for Caltrans* blizu San Diega te brojne bolnice još su neki od primjera temeljno izoliranih konstrukcija u Kaliforniji. Tamo su i brojne velike građevine obnovljene korištenjem temeljne izolacije, kao što su *Oakland City Hall* i *San Francisco City Hall* (Ismail, 2017).

2.1.3 Seizmička izolacija u Europi

Što se tiče Europe, seizmička izolacija najviše se proučava i primjenjuje u Italiji. Nove interese za seizmičku izolaciju izazvali su jaki potresi od 1997. do 2017. godine koji su uzrokovali ogromne štete. Teže oštećeni objekti su srušeni i rekonstruirani s temeljnom izolacijom, a zgrade s manjim oštećenjima naknadno su opremljene izolacijskim sustavima (Salvatori, 2023). Neki od primjera seizmički izoliranih konstrukcija su: *Administration Center of National Telephone Company*, kompleks s pet zgrada po sedam etaža (Naeim, Kelly, 1999), zgrada škole *Giacomo Matteotti* u gradu Gubbio, troetažna zgrada (Barone, Vetturini, 2023).

U Grčkoj se seizmička izolacija izvodi uglavnom na mostovima i na građevinama od vitalnog značaja čija se funkcionalnost ne smije narušiti tijekom i nakon ekstremnog potresa. Kao na primjer centralizirani spremnici za ukapljeni plin na otoku Revinthosa nedaleko od Atene. Za ovaj projekt, zahtjevi za nosivost postavljeni su na najvišoj razini ikad u povijesti seizmičke izolacije. Umjesto elastomernih, za ovaj projekt boljim rješenjem pokazali su se klizni ležajevi (slika 2.7).

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 2.7 Prikaz ležajeva spremnika za ukapljeni plin (LNG - liquefied natural gas) na otoku Revinthosa u Grčkoj tijekom gradnje (Christovasilis, 2006.)

Još jedan primjer seizmički izolirane konstrukcije je *Onassis House of Letters and Arts*, to je armirano betonska konstrukcija za koju su odabrani izolatori tipa tarnog njihala postavljeni ispod ploče prizemlja, iz ekonomskih razloga. Konstrukcija ima jedinstveni oblik i dinamičko ponašanje (Kostikas et al., 2018).

2.2 Tipovi i dijelovi seizmičkih izolatora

Seizmički otporne konstrukcije suprotstavljaju se potresu koristeći krutost stupova, greda i zidova koji čine okvir. Budući da se konstrukcija izravno odupire energiji potresa, zgrada doživljava velike deformacije. Kod takvih konstrukcija potrebno je slijediti koncept „jakih stupova i slabih greda“ te popustljivih spojeva, kako bi se postigla duktilnost.

Kod seizmički izoliranih konstrukcija koristi se najnovija tehnologija temeljne izolacije. Razvijeno je nekoliko vrsta izolacijskih ležajeva (Subramanian, 2023).

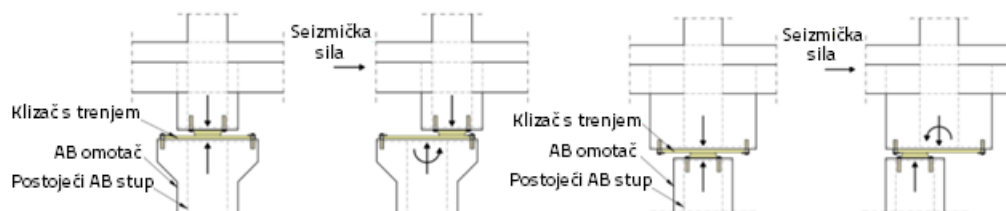
Izolacijski ležajevi dijele se u dvije osnovne skupine, a to su: klizni i elastomerni (gumeni) ležajevi. Postoje razne varijacije ovih dviju vrsta ležajeva, a moguća je i njihova kombinacija.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

U neke konstrukcije ugrađuju se seizmički prigušivači, tzv. damperi. Oni apsorbiraju energiju potresa. Zbog njih su deformacije na okviru mnogo manje, a u slučaju oštećenja, lako ih je popraviti ili zamijeniti.

2.2.1 Klizni ležajevi

Klizni ležajevi jednostavan su mehanizam seizmičke izolacije, oni slojevima materijala s određenim koeficijentom trenja ograničavaju akceleraciju. Sile koje se mogu prenositi ograničene su na umnožak koeficijenta trenja i težine. Klizno kretanje osigurava fleksibilnost, a krivulja sila-pomak ima pravokutan oblik optimalan za ekvivalentno viskozno prigušenje. Obično se za klizne ležajeve koriste sferne i ravne površine za klizanje (Chatzidaki, 2011). Kod kliznih izolatora ekscentricitet aksijalnog opterećenja izaziva dodatni moment ovisno o načinu na koji je montiran seizmički uređaj; ako je klizač postavljen na dnu donjeg ustroja, dodatni moment djeluje na potkonstrukciju, u obrnutom slučaju dodatni moment djeluje na gornju strukturu (slika 2.8.) (Trocchio, Zaccari i dr.,2023).

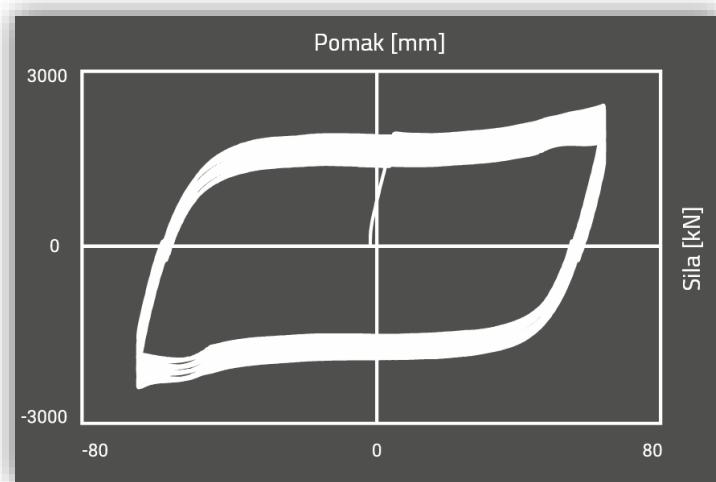


Slika 2.8 Pojava momenta drugog reda zbog ekscentričnosti aksijalnog opterećenja kod kliznog ležaja (Trocchio, Zaccari i dr.,2023.)

Sustavi čistog trenja najstariji su i najjednostavniji sustavi klizne izolacije. Klizni spoj odvaja gornji i donji ustroj i radi po principu trenja. Kad su bočna opterećenja mala, konstrukcija se ponaša kao konvencionalna, sa fiksnim temeljima, jer te sile nisu dovoljno velike za savladavanje statičke sile trenja i uzrokovanje pomaka u horizontalnom smjeru. Međutim, kad se pojave bočne sile od potresa, dolazi do mobilizacije klizne sile, a statička sila trenja je prekoračena. Ubrzanja u strukturi smanjena su kroz disipaciju energije, kroz trenje kojim se dobije Coulomb-ovo prigušenje. Ovi sustavi zahtijevaju održavanje ležajeva kako bi koeficijent trenja ostao sačuvan (Chatzidaki, 2011). Ovo su sustavi sa ravnim površinama trenja, a često dolaze u kombinaciji sa čeličnim histereznim i/ili viskoznim prigušivačima.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Rezultat ponašanja njihove kombinacije je visoki kapacitet disipacije energije. Histereznu petlju ravnih kliznih izolacijskih sustava sa čeličnim histereznim prigušivačima prikazuje slika 2.9 (FIPMEC katalog proizvoda).

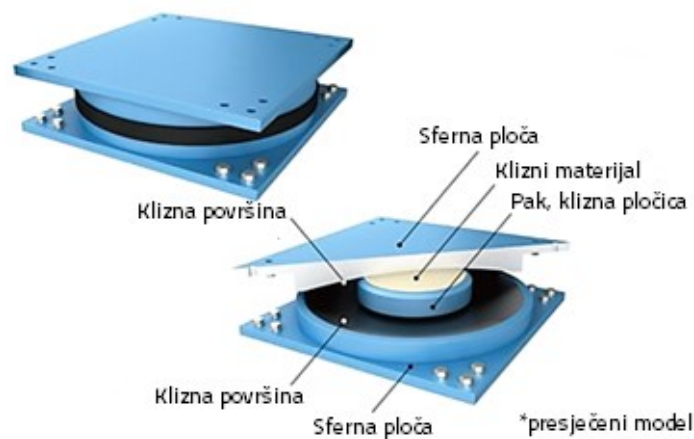


Slika 2.9 Eksperimentalna histerezna petlja ravnog kliznog ležaja sa čeličnim histereznim prigušivačima (FIPMEC katalog proizvoda)

Sustavi trenja njihala (*Friction Pendulum System Bearing – FPS*) najrašireniji su klizni izolacijski sustavi u SAD-u. Koncept ovog sustava je djelovanje njihala, dakle kao alate za seizmičko izoliranje koriste geometriju i gravitaciju. Gornja konstrukcija izolirana je od donje ležajem koji se sastoji od zglobnog klizača oslonjenog na vrh konveksne površine s niskim koeficijentom trenja. Kod jačih seizmičkih sila, one prevladaju silu trenja i zglobni nosač pomiče se po konveksnoj površini. U slučaju da je trenje između ležaja i dijela koji se kreće toliko malo da se može zanemariti, sustav će funkcionirati kao jednostavno njihalo. Coulomb-ovo prigušenje, koje proizlazi iz kliznog trenja, omogućava stalno rasipanje energije (Chatzidaki, 2011). Slika 2.10 i slika 2.11 prikazuju sustav ležaja s trenjem njihala te njegovo ponašanje prilikom potresnog opterećenja. Ova vrsta ležajeva pogodna je za manje opterećene zgrade te za naknadnu ugradnju kod protupotresnog ojačanja jer nije potrebno puno prostora za ugradnju (*Oiles Corporation*, katalog proizvoda).



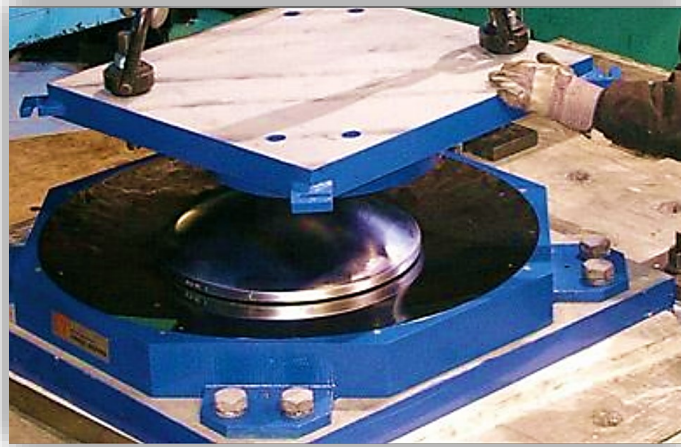
Slika 2.10 Ležaj seizmičke izolacije s trenjem njihala (Sarkisian, et al. 2013.)



Slika 2.11 Dijelovi FPS ležaja (Oiles Corporation, katalog proizvoda)

Klizni izolacijski ležaj njihala (Sliding Isolation Pendulum Bearings – SIP) (slika 2.12), može se opisati kao sferni ležaj s mogućnošću kretanja u svim smjerovima. Potresom izazvan horizontalni pomak prilagođava se klizanjem, nastala energija pretvara se u toplinu ili se pohranjuje kao potencijalna energija. Također omogućuje vraćanje gornjeg dijela konstrukcije pomoću vlastite težine u centralni položaj klizne zakrivljene površine. Ovi ležajevi ispunjavaju četiri zahtjeva seizmičke izolacije, a to su: prijenos vertikalnih opterećenja, horizontalni pomak, disipacija energije te centriranje (Chatzidaki, 2011).

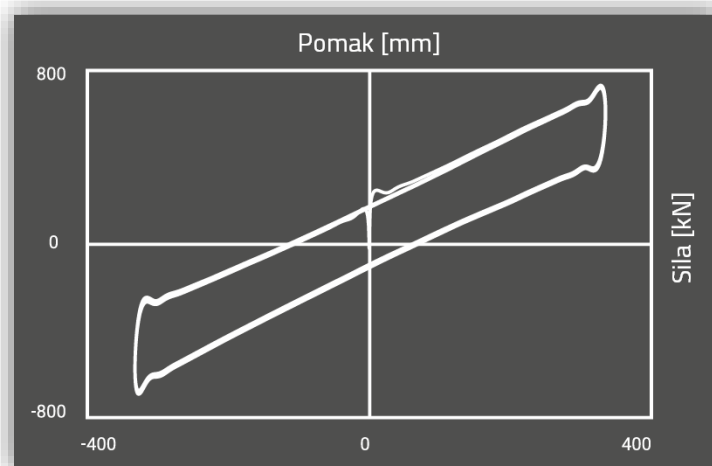
Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 2.12 Klizni izolacijski ležaj njihala (Chatzidaki, 2011)

Parametri bilinearnog zakona ponašanja ovise o radijusu zakrivljenosti površine te koeficijentu trenja.

Slika 2.13 prikazuje histerezu kliznog izolacijskog ležaja koji funkcionira po principu njihala (FIPMEC katalog proizvoda).

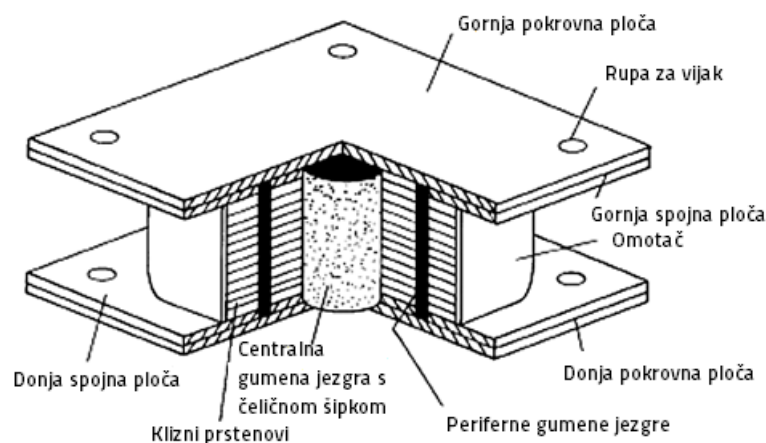


Slika 2.13 Eksperimentalna histerezna petlja kliznog izolacijskog ležaja po principu njihala (FIPMEC katalog proizvoda)

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Dakle, kod kliznih ležajeva zakrivljene površine ili izolacijskih ležajeva koji rade po principu njihala, period oscilacija ovisi o radijusu zakrivljenosti površine, gotovo je neovisan o masi konstrukcije. Materijal od kojega se izrađuje klizna površina je polietilen ultra visoke molekularne mase, upravo zbog njegovih iznimnih svojstava u smislu nosivosti, stabilnosti, trajnosti, otpornosti na habanje te ostalih svojstava. Najvažniji parametar pri modeliranju konstrukcije na zakrivljenim kliznim ležajevima je učinkovitost dinamičkog trenja. Faktor trenja ovisan je o tlaku, odnosno vertikalnom opterećenju. Oni su u obrnutom omjeru, faktor trenja se smanjuje kako se vertikalno opterećenje povećava. Takvi ležajevi dizajniraju se za vrijednosti pomaka od 100 do 400 mm (FIPMEC katalog proizvoda).

Sustav trenja elastične baze (*Resilient Friction Base System – R-FBI*) dizajniran je da prevladava probleme povezane s visokim koeficijentom trenja između nehrđajućeg čelika i teflona uslijed velikih brzina kretanja. Ležaj se sastoji od slojeva tako da je brzina mala i održava se niski koeficijent trenja. U sredini se nalazi gumena jezgra koja doprinosi vraćanju u početni položaj, ali ne nosi vertikalno opterećenje. U tu gumenu jezgru umetnuta je čelična šipka koja poboljšava preraspodjelu pomaka među slojevima gume (Chatzidaki, 2011). Primjer opisane vrste ležaja prikazuje slika 2.14.

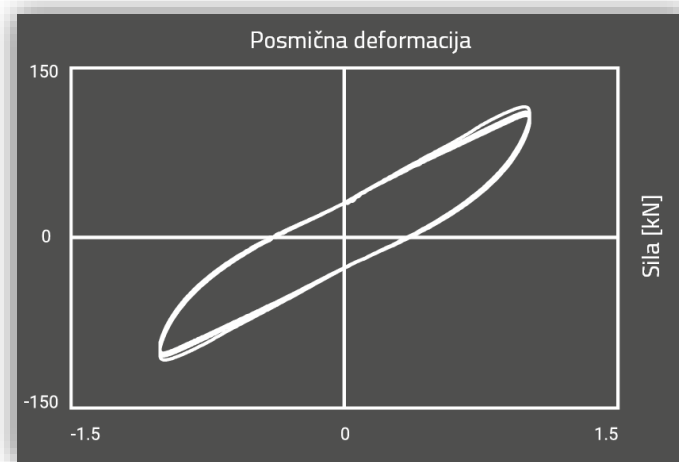


Slika 2.14 Ležaj s trenjem elastične baze (Mostaghel, Khodaverdian, 1987.)

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

2.2.2 Elastomerni ležajevi

Elastomerni ležajevi sastoje se od slojeva gume i željeza, guma osigurava lateralnu fleksibilnost dok željezo pruža vertikalnu krutost. Karakteristika ove vrste izolacije je što je horizontalno gibanje povezano s ljuljanjem, tako da čisto horizontalno gibanje tla uzrokuje vertikalna ubrzanja po principu njihala. Prvi puta prirodna guma koristila se kao protupotresna izolacija 1969. godine u Skopju (Chatzidaki, 2011). Odgovarajući kapacitet prigušenja, niska horizontalna krutost i visoka vertikalna krutost, omogućuju povećanje temeljnog perioda vibracija konstrukcije. Slika 2.15 prikazuje eksperimentalnu histereznu petlju elastomernog ležaja pri frekvenciji 0,5 Hz (FIPMEC katalog proizvoda). Elastomerni ležajevi koriste se kod mostova već više od 100 godina, postavljaju se na stupove i upornjake prvenstveno radi mogućnosti pomicanja kod temperaturnih promjena (Charleson, Guisasola, 2017).



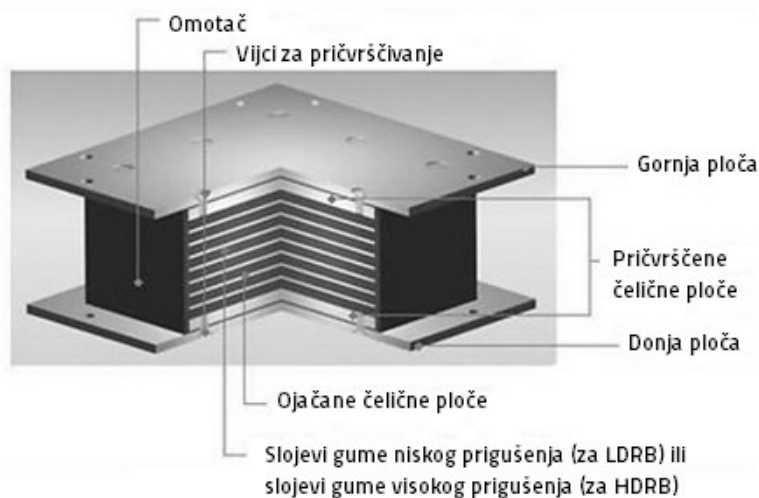
Slika 2.15 Histerezna petlja elastomernog ležaja (FIPMEC katalog proizvoda)

Ležajevi od prirodne ili sintetičke gume niskog prigušenja (*Low-Damping Natural Rubber Bearings – LDRB*) sastoje se od dvije završne čelične ploče, mnogo tanjih čeličnih podložaka te gume. Podložci osiguravaju vertikalnu krutost te sprječavaju ispupčenje gume, no ne doprinose horizontalnoj krutosti. Ponašanje materijala kod smicanja je linearno do posmičnih deformacija iznad 100%, s prigušenjem u rasponu 2-3% kritičnog. Neke od prednosti ovih ležajeva su: jednostavnost izrade i modeliranja, njihov odziv nije jako osjetljiv

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

na brzinu opterećenja, povijest opterećenja, na temperaturu te starenje. Glavni je nedostatak potreba za uređajima za prigušenje. Ono se može donekle kontrolirati poboljšanjem svojstava elastomera, no obično je potrebno dodatno vanjsko prigušenje kao što su viskozni te histerezni prigušivači (Chatzidaki, 2011).

Ležajevi od prirodne gume visokog prigušenja (*High-Damping Natural Rubber Bearings – HDRB*) razvijeni su sa ciljem uklanjanja potrebe za dodatnim prigušnim elementima. Dinamička svojstva ove vrste ležajeva osjetljiva su na uvjete opterećenja. Gumeni ležajevi s visokim prigušenjem skloni su promjeni ponašanja (smanjenju krutosti i prigušenja) tijekom početnih ciklusa gibanja, no povećanjem broja ciklusa dolazi do stabilizacije, a početna svojstva ležaja se vraćaju (Chatzidaki, 2011). Kod ove vrste ležajeva značajna je varijacija modula posmika kod manjih posmičnih naprezanja, što omogućuje da se spriječe prekomjerni pomaci kod dinamičkih pobuda niskog intenziteta (FIPMEC katalog proizvoda). Slika 2.16 prikazuje dijelove ležaja od prirodne gume niskog i visokog prigušenja,



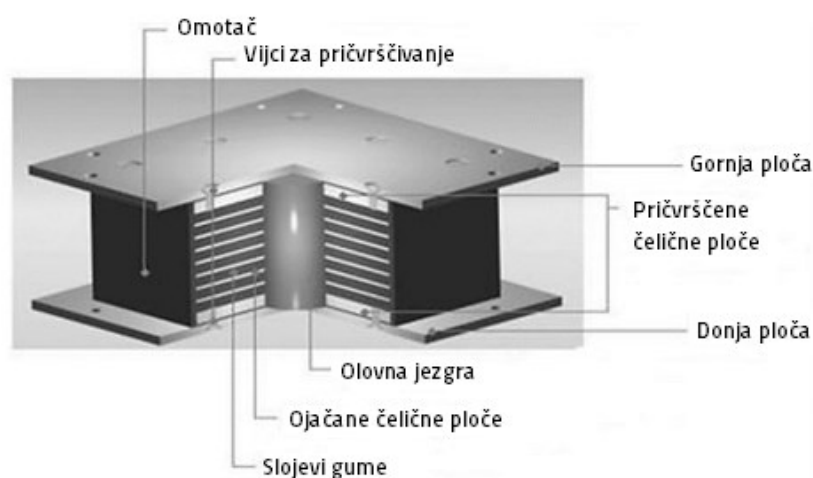
Slika 2.16 Dijelovi gumenog ležaja (Roy, Dash, 2018.)

Za smjese gume od kojih se izrađuju elastomerni ležajevi efektivni modul smicanja iznosi između 0,4 MPa i 1,4 MPa, a ekvivalentni viskozni koeficijent prigušenja iznosi od 10% do 15%, ovisno o zahtjevima projektanta (FIPMEC katalog proizvoda).

Ležajeve od olova i gume (*Lead-Rubber Bearings - LRB*) izumio je 1975. godine Bill Robinson na Novom Zelandu. Njihova je struktura slična gumenim ležajevima s niskim prigušenjem, ali sadrže olovni čep u sredini koji povećava početnu krutost ležaja jer pruža otpor

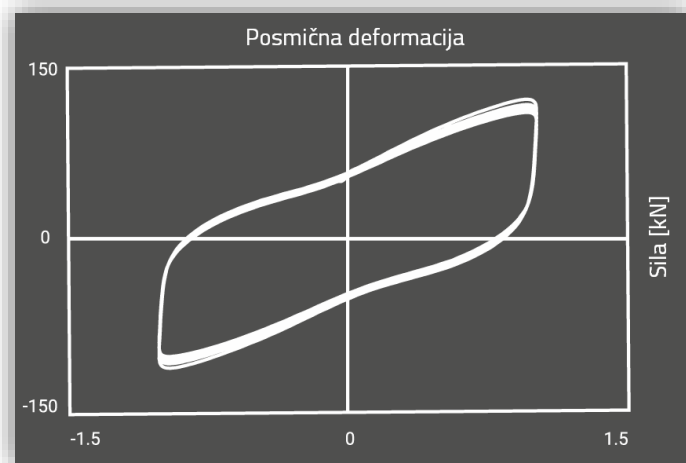
Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

opterećenju vjetra te povećava kapacitet disipacije energije ležaja. Dijelove ove vrste ležaja prikazuje slika 2.17. Kad se primijeni sila i nakon što olovo popusti, dolazi do raspršivanja energije kroz oscilacije. Budući da se olovo rekristalizira pri normalnim temperaturama, zamor olova nije problem. Promjer središnjeg čepa olova je obično 15-33% ukupnog promjera ležaja (Chatzidaki, 2011). Konstitutivno ponašanje ovih ležajeva, koje je obično bilinearно, može se modelirati kao linearno ili nelinearno. Slika 2.18 prikazuje eksperimentalnu petlju LRB ležaja pri frekvenciji od 0,5 Hz (FIPMEC katalog proizvoda).



Slika 2.17 Dijelovi ležaja od olova i gume (Satya Sapath, Dash, 2018.)

Navedena vrsta ležaja ima četiri osnovne funkcije seizmičke izolacije: izolacijska funkcija nošenja težine zgrade dok se slobodno giba u horizontalnom smjeru, mehanizam vraćanja zgrade u prvobitni položaj od horizontalnog pomaka, funkcija prigušenja koja apsorbira energiju potresa i smanjuje podrhtavanje zgrade te inicijalna funkcija koja sprječava pomake zgrade uzrokovane opterećenjem vjetra (Chatzidaki, 2011).



Slika 2.18 Histerezna petlja gumenog ležaja s olovnim trnom (FIPMEC katalog proizvoda)

Disipacija energije omogućuje postizanje ekvivalentnog viskoznog prigušenja do 30%, tj. dva puta više od standardnih elastomernih ležajeva. Ta disipacija postiže se popuštanjem olovnog čepa. Ležajevi se proizvode u različitim dimenzijama, za vrijednosti maksimalnog pomaka od 100 do 400 mm (FIPMEC katalog proizvoda).

2.3 Učinkovitost seizmičke izolacije

Učinkovitost moderne seizmičke izolacije u početku temeljila se na računalnom modeliranju i laboratorijskim ispitivanjima. Ti počeci primjene nove tehnologije u građevinarstvu zahtijevale su povjerenje u teoriju seizmičke izolacije i računalne analize. Danas se učinkovitost samo nastavlja potvrđivati, kako virtualno, tako i u stvarnom svijetu. Seizmička izolacija testirana je na brojnim stvarnim potresima različitih intenziteta (Charleson, Guisasola, 2017). U narednim podnaslovima opisana su tri različita pristupa dokazivanju učinkovitosti seizmičke izolacije.

2.3.1 Računalno modeliranje

Građevinski inženjeri izrađuju složene računalne modele konstrukcije sa izolacijskim sustavom koje podvrgavaju različitim zapisima potresa kako bi se simuliralo snažno podrhtavanje koje je očekivano projektnim potresom. Nastoji se što točnije predvidjeti odziv izolirane konstrukcije, a detaljan projekt može se dovršiti kada se odrede varijable kao što su maksimalni pomak na izolacijskoj razini te maksimalne sile unutar nadgradnje (Charleson, Guisasola, 2017).

2.3.2 Praktično ispitivanje

U početku je praktično testiranje bilo ključna komponenta za dokazivanje učinkovitosti, no testiranje samih ležajeva bilo je izazovno jer su se trebale simulirati velike gravitacijske sile koje djeluju na ležajeve i dinamička gibanja koja se javljaju tijekom velikih potresa. No otkako su dostupni hidraulički potresni stolovi, testiranje je dovedeno na višu razinu i mogu se testirati cijele zgrade, a ne samo ležajevi. Najvećim potresnim stolom na svijetu smatra se *E-Defense*, koji izlaže trešnji betonske i čelične zgrade do 5 katova (Charleson, Guisasola, 2017).

U jednom testu čelične okvirne zgrade mase 500 tona na spomenutom potresnom stolu napravljena je usporedba dva izolacijska sustava, sa elastomernim i sa zakrivljenim ležajevima. Elastomerni sustav imao je veće prigušenje ubrzanja poda pri manjem ubrzanju tla, dok je sustav sa zakrivljenim kliznim ležajevima bio učinkovitiji pri većim ubrzanjima tla.

Drugim testiranjem istraživana je seizmička učinkovitost izolirane i fiksne četverokatne betonske zgrade. Temelji testa bili su blizina rasjeda te dugi periodi koji se očekuju na lokacijama s mekim tlima. Glavni cilj bio je sprječavanje oštećenja namještaja i opreme. Za potrese blizu rasjeda seizmička izolacija pokazala se vrlo učinkovitom, maksimalno ubrzanje u seizmički izoliranoj zgradi bilo je 1/10 onih u zgradi s fiksnim temeljima. No kad su zgrade bile podvrgnute potresnim vibracijama dugih perioda, učinkovitost izolacije znatno se smanjila. Došlo je do rezonancije potresa s fleksibilnim izolacijskim sustavom. Konstrukcija sa seizmičkom izolacijom i dalje je bolja opcija od one sa fiksnim temeljima budući da je maksimalno ubrzanje u izoliranoj zgradi doseglo samo 66% onoga u zgradi s

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

fiksni temeljima iako izolacijski sustav nije mogao smanjiti prijenos ubrzanja tla na nadgradnju.

Ovi testovi ukazali su na to da učinkovitost seizmičke izolacije ovisi o dinamičkim svojstvima potresnih valova. Valove uvjetuje udaljenost od epicentra i karakteristike mekoće i dubine tla. Zbog toga su bitne konzultacije s geotehničkim i seizmološkim stručnjacima prije odluke o ugradnji seizmičke izolacije (Charleson, Guisasola, 2017).

2.3.3 Promatranja i mjerenja tijekom potresa

Ova metoda pokazuje učinkovitost seizmičke izolacije u stvarnom potresu. Usporedbom ponašanje zgrade sa i bez izolacije bavila su se brojna istraživanja. Rezultati su pokazali da je ubrzanje vrha zgrade izolirane konstrukcije bilo manje od maksimalnog ubrzanja tla u usporedbi s fiksnom zgradom čiji je krov doživio veće ubrzanje. Izolirane zgrade doživjele su minimalna ili nikakva oštećenja, dok su konvencionalne zgrade pretrpjele ogromne štete. U nekim slučajevima nađeni su neispravni pokretni zglobovi, a uzroci toga su nedostatak održavanja, loša konstrukcija ili problemi sa samim spojevima. No pri potresu nisu srušeni komadi namještaja što stanare čini sigurnijima. U Japanu se provodi najviše istraživanja i daje izvješća o promatranim i izmjerenim performansama. Jedan od primjera zgrade u Japanu na kojoj su provedena mjerenja tijekom potresa je glavna zgrada *Shimizu Corporation Institute of Technology* u Tokyo-u (slika 2.19). Izolacija od potresnog djelovanja uključuje 6 ležajeva od olova i gume postavljenih na stupove prizemlja. Rezultati mjerenja pokazali su da su se ležajevi deformirali za 90 mm. Utjecaj maksimalnog ubrzanja tla smanjen je za 52% na drugom katu i 55% na zadnjem katu (Charleson, Guisasola, 2017).



Slika 2.19 Glavna zgrada *Shimizu Corporation Institute of Technology* u Tokyo-u izolirana sa 6 olovno-gumenih ležajeva (Charleson, Guisasola, 2017).

3 Ostali antiseizmički uređaji

Fluidni viskozni prigušivači uređaji su cilindričnog oblika, oni koriste reakcijsku silu tekućine prisiljene da teče kroz sustav ventila ili otvor. Zakon sila-brzina za ovu vrstu prigušivača nelinearan je, a opisuje se formulom: $F = C v^\alpha$,

gdje F označava silu, C je konstanta prigušenja, a v je brzina te $\alpha = 0,15$.

Fluidni opružni prigušivači uređaji su koji kombiniraju funkcije opruge i prigušivača, a funkcioniraju prema zakonu: $F = F_0 + Kx + C v^\alpha$,

Gdje je F_0 je prednaponska sila, odnosno unaprijed primijenjena sila, K je prigušenje, C je konstanta prigušenja i $\alpha = 0,15$.

Sila F_0 može biti korisna za sprječavanje pomaka od horizontalnih sila.

Čelični histerezni prigušivači koriste izvore disipacije energije kroz histerezno ponašanje čeličnih elemenata različitih oblika. Govori se o čeličnim elementima koji su dizajnirani takvi da osiguravaju stabilne krivulje histereze.

Amortizeri („buffers“) sastoje se od elastomernih diskova koji su vulkanizirani između čeličnih limova. Oni djeluju dvostrano. Diskovi su uvijek pod tlakom bez obzira na smjer kretanja.

Uređaji s memorijom oblika djeluju aksijalno, oni iskorištavaju superelastična svojstva legura s memorijom oblika. Ovi uređaji ograničavaju maksimalno opterećenje koje se prenosi na konstrukciju te imaju snažnu sposobnost vraćanja u prvobitni položaj.

Elastomerni viskoznoelastični prigušivači sastavljeni su od jednog ili više slojeva elastomera koji su izloženi posmiku, kombinacija elastomera daje visoko prigušenje. Obično se ugrađuju u ukrute okvirne konstrukcije.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Šok transmiteri pružaju krutu povezanost kod dinamičkih djelovanja, a njihova je reakcija na pomake malih brzina zanemariva. Misli se na pomake kao što su oni nastali temperaturnim promjenama. Šok transmiteri vrlo su korisni kad se zbog dinamičkih opterećenja očekuje promjena ponašanja konstrukcije.

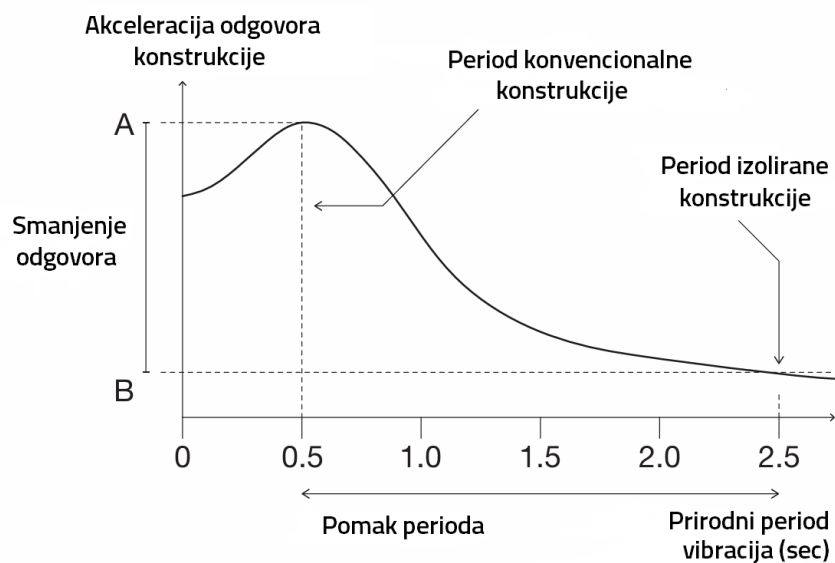
Vođeni ležajevi i ograničeni ležajevi uređaji su koji ne prenose vertikalna opterećenja i moment savijanja. Oni pružaju stalno ograničenje u jednom ili dva horizontalna smjera, što znači da su omogućene rotacije i vertikalno pomicanje.

Mehanički osigurači sprječavaju relativno kretanje između povezanih dijelova ispod unaprijed određene sile, ali nakon što se veličina zadane sile premaši, dolazi do loma elemenata koji se „žrtvuju“. Kretanje je omogućeno u jednom ili više smjerova (FIPMEC katalog proizvoda).

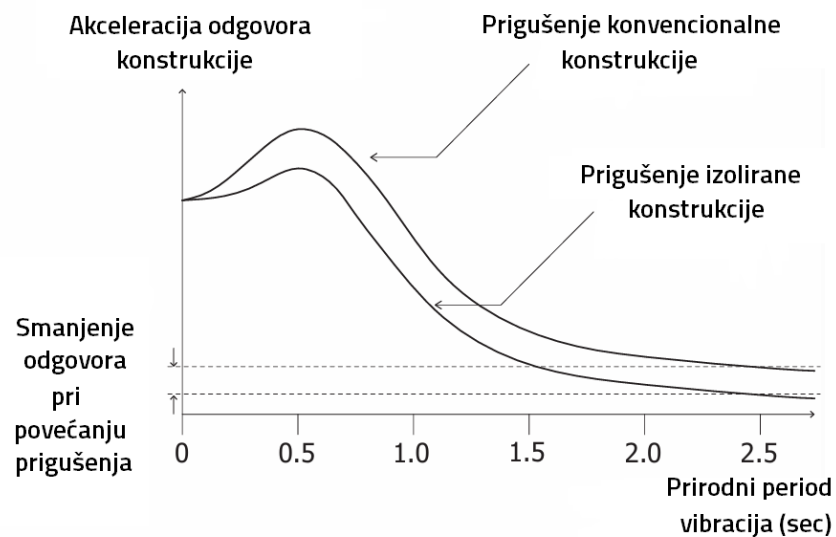
4 Dinamičko ponašanje izoliranih konstrukcija

Da bi se razumjela teorijska osnova seizmičke izolacije, potrebno je pojasniti dinamičke karakteristike potresa. Velik dio energije potresa sadržan je u visokofrekventnim vibracijama, one mogu dovesti do rezonancije kod zgrada koje imaju prirodnu frekvenciju u istom rasponu. Trajanje jednog kompletnog ciklusa vibracije zgrade tijekom potresa naziva se prirodni period vibracije. Naglo potresena zgrada ima svoju prirodnu frekvenciju, odnosno njoj inverzan prirodni period. Spektar odziva je grafikon horizontalnog ubrzanja odgovora konstrukcija u odnosu na rastuće prirodne periode. Spektri odziva, iako su različiti za svaki potres i uvjete tla, pokazuju da za periode dulje od 0,5 sekundi ubrzanje odgovora konstrukcije opada (slika 4.1). Što bi značilo da je zgrada koja ima dulji period, manje kruta, odnosno fleksibilnija je. Izolirana zgrada može se slobodno kretati, ali se vraća u početni položaj kroz horizontalno djelovanje izolacijskih ležajeva. Seizmička izolacija čini zgradu fleksibilnom te uvodi „pomak perioda“ koji je ključni faktor u učinkovitosti seizmičke izolacije za smanjenje ubrzanja same konstrukcije, a iznosi između dvije i tri sekunde. Nadalje, prigušenje smanjuje rezonanciju, apsorbira dinamičku energiju i smanjuje amplitude vibracija, smanjuje akceleraciju odgovora konstrukcije što prikazuje spektar odziva (slika 4.2), (Charleson, Guisasola, 2017).

Primjena seizmičke izolacije
u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 4.1 Spektar odziva koji prikazuje odnos akceleracije odgovora konstrukcije i prirodnog perioda konstrukcije (Charleson, Guisasola, 2017.)

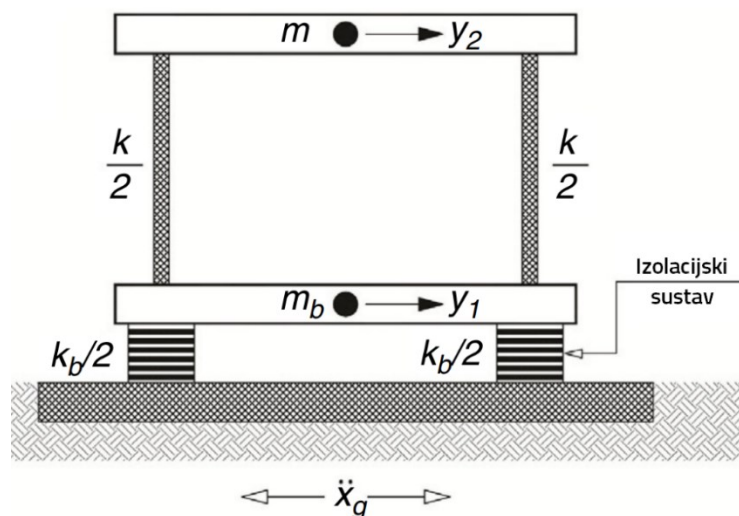


Slika 4.2 Usporedba spektra odziva konvencionalne i izolirane konstrukcije (Charleson, Guisasola, 2017.)

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Cilj seizmičke izolacije je odvojiti konstrukciju od tla te time zaštititi od štetnih učinaka potresa pri čemu funkcionalni zahtjevi tijekom uporabe moraju ostati zadovoljeni. S odvajanjem konstrukcije od vodoravnih komponenti gibanja tla dobije se osnovna frekvencija konstrukcije koja je niža u usporedbi s fiksno temeljenom konstrukcijom te prevladavajućom frekvencijom gibanja tla. U prvom modu seizmički izolirane konstrukcije dolazi do deformacije samo izolacijskog sustava, a viši modovi uključuju deformacije konstrukcije iznad izolacije. Sustav izolacije prenosi energiju kroz dinamičku aktivnost sustava (Ismail, 2017).

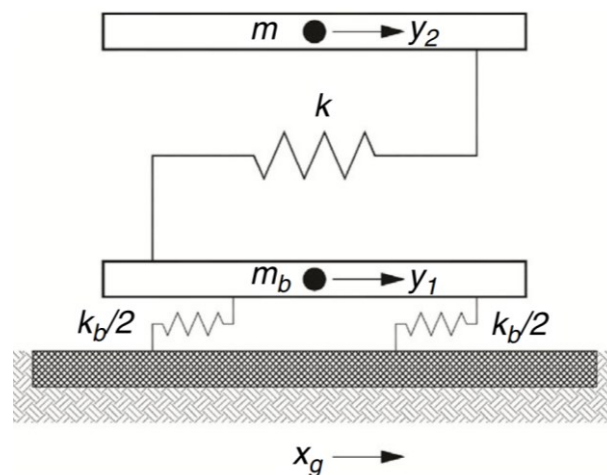
Taj učinak nije ovisan o prigušenju, ali prigušenje pomaže u smanjenju rizika od moguće pojave rezonancije. Značenje korištenja seizmičkih temeljnih izolatora bit će opisano razmatranjem djelovanja linearne konstrukcije s jednom etažom. Navedeni sustav nema prigušenje, a ležajevi imaju horizontalnu krutost k_b (slika 4.3).



Slika 4.3 Jednoetažna linearna konstrukcija bez prigušenja na fleksibilnim ležajevima (Ismail, 2017.)

Ležajevi su povezani temeljom koji predstavlja krutu horizontalnu dijafragmu mase m_b iznad ležajeva (Slika 4.4).

Primjena seizmičke izolacije
 u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 4.4 Statički sustav jednoetažne linearne konstrukcije bez prigušenja na fleksibilnim ležajevima (Ismail, 2017.)

Sustav je idealiziran kao sustav opruga-masa s dva stupnja slobode (2DOF). Popratne jednadžbe gibanja su:

$$m_b \ddot{y} + k(y_1 - y_2) + k_b(y_1 - x_g) = 0 \quad (4.1.a)$$

$$m \ddot{y}_2 + k(y_2 - y_1) = 0 \quad (4.1.b)$$

U navedenim izrazima m predstavlja glavnu masu, k je krutost konstrukcije iznad izolatora, y_1 je pomak temelja, y_2 pomak glavne mase te x_g predstavlja pomak tla dok je \ddot{x}_g ubrzanje tla.

Relativni pomaci definiraju se kao:

$$x_1 = y_1 - y_g \quad (4.2.a)$$

$$x_2 = y_2 - y_g \quad (4.2.b)$$

gdje je x_1 pomak temeljnog izolatora u odnosu na tlo, a x_2 pomak vrha konstrukcije.

Dobije se da je:

$$m_b \ddot{x}_1 - kx_2 + x_1(k + k_b) = -m_b \ddot{x}_g \quad (4.3.a)$$

$$m \ddot{x}_2 + kx_2 + kx_1 = -m \ddot{x}_g \quad (4.3.b)$$

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Ako razmotrimo poseban slučaj gdje je masa m_b vrlo mala i stoga se izjednačuje s nulom, jednadžbe (4.3.a i 4.3.b) postaju:

$$-kx_2 + (k + k_b)x_1 = 0 \quad (4.4.)$$

Iz toga proizlazi da je:

$$x_1 = \left(\frac{k}{k + k_b} \right) x_2 \quad (4.5.)$$

Taj pomak x_1 predstavlja pomak temeljnog izolatora u odnosu na tlo. Ako krutost ležajeva k_b ide u beskonačnost (odnosno ako je ležaj vrlo krut), x_1 ide u nulu. Nadalje, ako je k_b jednako k , onda je x_2 dvostruko veći od x_1 . Idealna izolacija postigla bi se ako bi krutost k_b išla prema nuli jer bi tada x_1 bio jednak x_2 što znači da nema međukatnih pomaka, nastala bi savršena vibracija konstrukcije kao krutog tijela te potpuna horizontalna odvojenost konstrukcije od tla. Uvrštavanjem jednadžbe (4.5.) u jednadžbu (4.3.b) dobije se jednadžba gibanja ovoga sustava opruga-masa:

$$m\ddot{x}_2 + \left[1 - \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{k_b}{k} \right)} \right) \right] kx_2 = -m\ddot{x}_g \quad (4.6.)$$

Modifikacija vlastite frekvencije vibracija sustava bitan je učinak prisutnosti temeljnih izolatora, u ovom sustavu vlastita frekvencija titranja je:

$$\omega_{nb} = \sqrt{\frac{k}{m} \left[1 - \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{k_b}{k} \right)} \right) \right]} = C_1 \omega_n \quad (4.7.)$$

gdje C_1 predstavlja vlastitu frekvenciju temeljno izoliranog sustava, a definirana je kao:

$$C_1 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.8.)$$

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Prirodni period vibracije je:

$$T_{nb} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m} \left[1 - \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{k_b}{k} \right)} \right) \right]}} = C_2 T_n \quad (4.9.)$$

jer je:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_{nb}} \quad (4.10.)$$

dobije se odnos:

$$C_2 = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{k_b}{k} \right)} \right) \right]}} = \frac{1}{C_1} \quad (4.11.)$$

Značenje krute konstrukcije, odnosno one na fiksnim temeljima može se pokazati kroz jednadžbu (4.7). Ako je krutost k_b mnogo veća od k , tada član u nazivniku, $1 + \left(\frac{k_b}{k} \right)$, postaje jako velik i ω_{nb} se približava vlastitoj frekvenciji krutih sustava $\sqrt{\frac{k}{m}}$ i prirodnom periodu vibracija krutih sustava T_n .

Slučaj kada je krutost k_b manji od k od značaja je za temeljno izoliranu konstrukciju. Ako bi krutost k_b bila izuzetno mala, tada bi frekvencija ω_{nb} išla u nulu, a prirodni period vibracija T_{nb} bio bi beskonačan što opisuje potpuno izoliranu konstrukciju (Ismail, 2017).

5 Projektni kriteriji

5.1 Parametri za projektiranje seizmičke izolacije

Projektni kriteriji u kontekstu seizmičke izolacije odnose se na parametre i uvjete koje je potrebno uzeti u obzir prilikom projektiranja građevine kako bi se osigurala njihova otpornost na potrese.

Pored uobičajenih izazova projektiranja, seizmička izolacija sa sobom nosi dodatne probleme dizajna i oblikovanja detalja. Neke od stavki koje zahtijevaju dogovor između inženjera i arhitekta su; kako i gdje će se zgrada izolirati, dizajn i detaljna razrada ležajeva s obzirom na maksimalne horizontalne pomake dobivene dinamičkim analizama od strane inženjera, odabir razmaka i dimenzija strukturalnih i nestrukturalnih komponenti s obzirom na dobivene međukatne pomake (Charleson, Guisasola, 2017).

Ključni parametri koje je potrebno navesti kad se govori o seizmičkoj izolaciji su:

- prirodni period vibracija (T) – bitan za razumijevanje kako će zgrada reagirati na seizmičke sile
- ubrzanje tla (a_g) – maksimalno očekivano ubrzanje tla tijekom potresa, preuzima se iz seizmičke karte
- spektar odgovora – grafički prikaz ubrzanja u funkciji perioda vibracija, pokazuje kako će zgrada reagirati na različite frekvencije potresa
- učinci prigušenja – količina energije koja se apsorbira tijekom potresa, obično je izražena kao postotak kritičnog prigušenja
- horizontalni pomak – očekivani pomak zgrade u horizontalnom smjeru tijekom potresa
- materijali i dimenzije izolacijskih ležajeva – svojstva materijala i dimenzije ležajeva ovisno o potrebnom kapacitetu pomaka

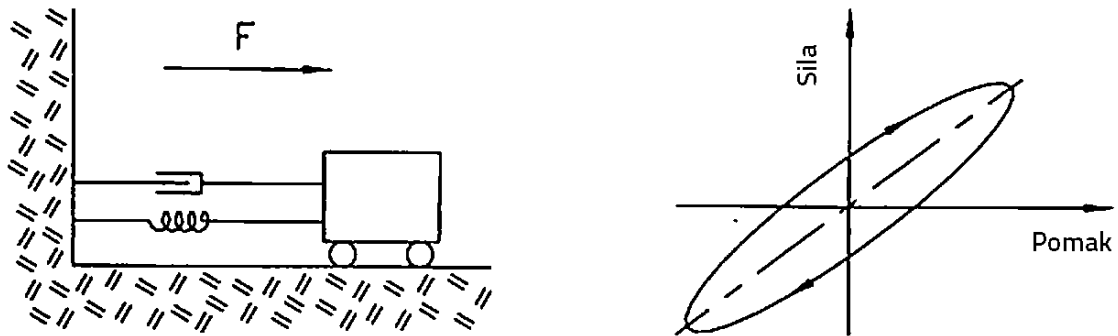
Prilikom projektiranja uzimaju se u obzir dvije razine seizmičke opasnosti, a to su: projektni potres (*Design Basis Earthquake* – DBE), ta razina ima 10% vjerojatnosti da će biti premašena u 50 godina (povratni periodom od 475 godina) i opisuje se kao rijedak događaj, druga razina

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

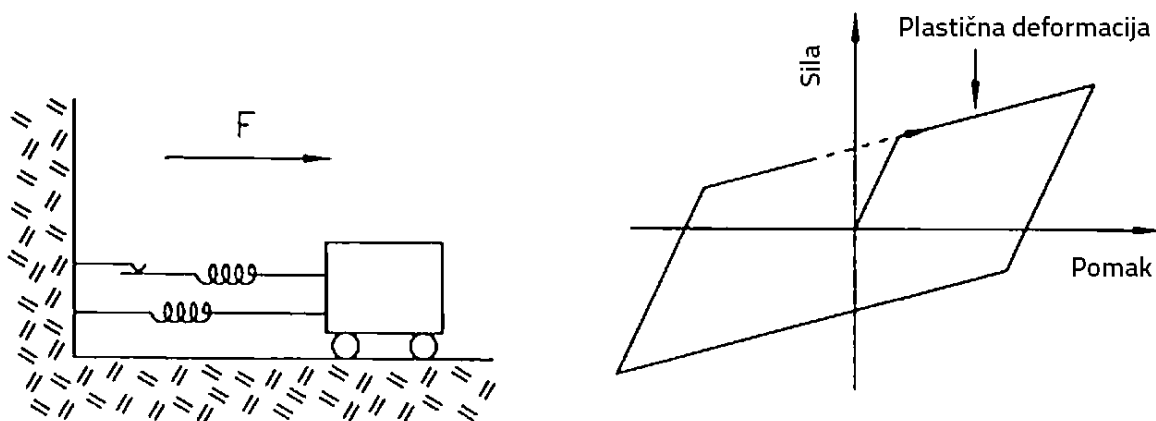
je maksimalni mogući potres (*Maximum Capable Earthquake* – MCE), odnosno maksimalna razina potresnih podrhtavanja koja se ikada može očekivati na određenoj lokaciji, ima 10% vjerojatnosti da će biti premašena u 100 godina (povratni period 1000 godina) i opisuje se kao vrlo rijedak događaj (Naeim, Kelly, 1999).

Prigušenje i histerezna svojstva izolatora mogu se odabrati tako da elementi nadgradnje budu u elastičnom području ili barem u području ograničene duktilnosti. Veći dio ukupnog pomaka konstrukcije može se koncentrirati u izolatorima s relativno malom deformacijom same konstrukcije. Konstrukcija se na ležajevima kreće kao kruto tijelo, čija se krutost može još povećati dodatnim elementima za ukrućenje. Slika 5.1 prikazuje linearno prigušeni izolator koji se sastoji od linearne opruge i viskoznog prigušivača. Petlja histereze sila-pomak ima efektivni nagib, prikazan isprekidanom linijom, koji označava krutost ili obrnutu fleksibilnost izolatora, a slika 5.2 bilinearni izolator sastavljen od dvije linearne opruge od kojih je uz jednu serijski vezan i Coulombov prigušivač. Petlja histereze je bilinearna, a karakteristična je po svoja dva nagiba od kojih je jedan početna, a drugi popustljiva krutost, što odgovara elastičnoj i plastičnoj deformaciji izolatora (Skinner, Robinson, McVerry, 1993).

Primjena seizmičke izolacije
u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



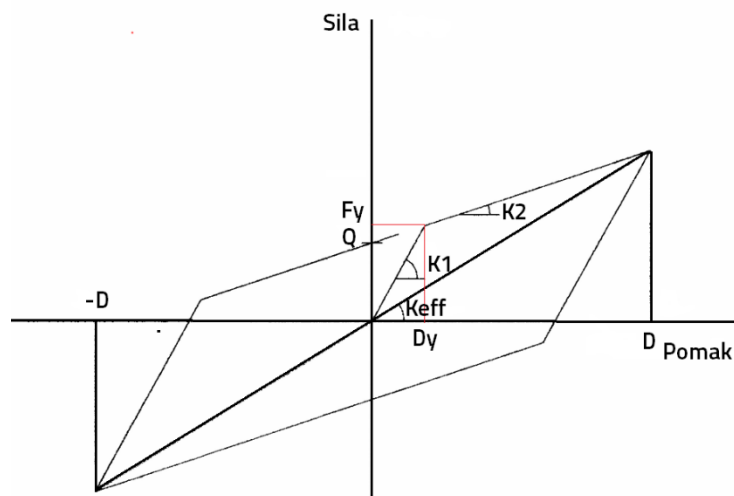
Slika 5.1 Histerezna petlja sila-pomak linearnog prigušenog izolatora (Skinner, Robinson, McVerry, 1993).



Slika 5.2 Histerezna petlja sila-pomak bilinearnog izolatora s Coulombovim prigušivačem (Skinner, Robinson, McVerry, 1993).

Svi izolacijski ležajevi, u praksi se modeliraju bilinearnim modelom temeljenim na tri parametra; K_1 , K_2 i Q (slika 5.3).

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 5.3 Parametri histerezne petlje (Naeim, Kelly, 1999.)

Navedeni parametri označavaju sljedeće:

K_1 – **elastična krutost** – ovaj parametar predstavlja krutost izolacijskog ležaja pri monotonim opterećenjima prije nego dođe do popuštanja materijala, a procjenjuje se iz dostupnih histereznih petlji iz testova elastomernih ležajeva ili se određuje kao višekratnik postelastične krutosti K_2

K_2 – **postelastična krutost** – parametar predstavlja krutost izolacijskog ležaja nakon popuštanja materijala, koristi se za modeliranje ponašanja ležajeva s olovnom čepom i ležajeva s trenjem njihala nakon što prođu elastičnu fazu

Q – **karakteristična čvrstoća** – predstavlja čvrstoću ležaja u stanju popuštanja

Za elastomerne ležajeve karakteristična čvrstoća Q procjenjuje se iz histereznih petlji, za ležajeve s olovnom trnom određuje se na temelju naprezanja popuštanja u olovu i područja oko olova, za ležajeve s trenjem njihala određuje se koeficijentom trenja klizne površine i opterećenjem koje nosi ležaj (Naeim, Kelly, 1999).

Bezdimenzionalna karakteristična čvrstoća dana je izrazom:

$$a = \frac{K_1 - K_2}{K_2} \quad (5.1.)$$

i određuje se iteracijom.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Efektivno prigušenje temeljne seizmičke izolacije je definirano kao:

$$\beta_{eff} = \frac{4 \cdot Q \cdot (D - D_y)}{2 \cdot \pi \cdot K_{eff} \cdot D^2} \quad (5.2.)$$

gdje y označava bezdimenzionalni pomak:

$$y = \frac{D}{D_y} \quad (5.3.)$$

pri čemu je D projektirani pomak, a D_y označava pomak pri popuštanju i opisuje se odnosom:

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (5.4.)$$

Maksimalna vrijednost efektivnog prigušenja ovisi o omjeru K_1 i K_2 . Nagib K_2 lako je odrediti za bilo koju vrstu izolacijskog sustava, dok se K_1 određuje očitavanjem iz histereze i može jako varirati (Naeim, Kelly, 1999).

Efektivni period određuje se na sljedeći način:

$$T_{eff} > 3 \cdot T \begin{cases} T_D = 3 \cdot T_1 > 0,6 \text{ za DBE} \\ T_M = 3 \text{ za MCE} \end{cases} \quad (5.5.)$$

Gdje je T_D period izolacije koji pripada projektom potresu (DBE), T_M je period izolacije koji pripada maksimalnom mogućem potresu (MCE), a T_1 je vlastiti period neizolirane konstrukcije.

Efektivna krutost elastomernih ležajeva s olovnim trnom (LRB) definirana je kao nagib sekante od vrha do vrha histerezne petlje i dana je s:

$$K_{eff} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot m}{T_{eff}^2} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad D \geq D_y \quad (5.6.)$$

Projektirani pomak LRB ležaja dobije se pomoću izraza:

$$D = \frac{R_d}{4 \cdot \pi^2} \cdot T_{eff}^2 \begin{cases} D_D = \frac{R_{d(10\%/50)}}{4 \cdot \pi^2} \cdot T_D^2 \text{ za DBE} \\ D_M = \frac{R_{d(2\%/50)}}{4 \cdot \pi^2} \cdot T_M^2 \text{ za MCE} \end{cases} \quad (5.7.)$$

Kako bi se razjasnio utjecaj odabira K_1 na prigušenje, razmotrimo sustav s istim vrijednostima Q i K_2 , odnosno istim efektivnim periodom pri svim vrijednostima D i istom histereznom petljom, ali modeliran različitim K_1 , tada:

$K_1^1 = 51K_2$ odgovara sustavu trenja njihala

$K_1^2 = 21K_2$ odgovara elastomernim ležajevima s olovnom čepom

$K_1^3 = 6K_2$ ili $K_1^4 = 3K_2$ odgovara elastomernim ležajevima visokog prigušenja (Chatzidaki, 2011.)

5.2 Koraci pri projektiranju izoliranih konstrukcija

Kako bi se prikazala sama ideja i princip projektiranja izoliranih konstrukcija ovdje se opisuje projektiranje prema američkim standardima i propisima iz UBC 1997 (*Uniform Building Code*) i dijelovima iz OSHPD-96 (*Office of Statewide Health Planning and Development*) i FEMA-273 (*Federal Emergency Management*).

Prije svega potrebno je utvrditi faktor seizmičke zone Z i odrediti kategoriju tla na lokaciji građevine. Zatim treba proračunati maksimalno mogući potres (MCE). Daljnji korak je određivanje seizmičkih koeficijenata uzimajući u obzir kategoriju tla i faktor seizmičke zone. Nakon toga treba odrediti redukcijski faktor (tablica 5.1) za odgovarajući statički sustav iznad izolacije.

Tablica 5.1 Redukcijski faktor ovisno o statičkom sustavu (Chatzidaki, 2011.)

Konstrukcija	R_1
Specijalni okvir otporan na momente	2,0
Posmični zid	2,0
Standardni poduprti okvir	1,6
Ekscentrični poduprti okvir	2,0

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Nadalje, treba odabrati vrstu izolacijskih ležajeva, koeficijente prigušenja β_D i β_M te željeni period vibracija izolacije. Potrebno je odabrati početnu procjenu fundamentalnog perioda vibracija izolacijskog sustava na razini pomaka temelja, koji će biti između 2 i 3 sekunde. Prema odabranom periodu treba procijeniti efektivnu krutost izolacijskog sustava i minimalni proračunski pomak D_D prema izrazu:

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VD} \cdot T_D}{B_D} \quad (5.8.)$$

i proračunati početnu procjenu minimalnog proračunskog pomaka, ako je vrijednost veća od prihvatljive, potrebno je odabrati manji period vibracija.

Daljnji korak je utvrditi minimalne proračunske lateralne sile V_b i V_s pomoću navedenih izraza:

$$V_b = K_{D,max} \cdot D_D \quad (5.9.)$$

$$V_s = \frac{K_{D,max} \cdot D_D}{R_I} \quad (5.10.)$$

Gdje je V_b minimalna proračunska lateralna sila za izolacijski sustav i konstrukciju na ili ispod izolacijskog sustava, a V_s za konstrukciju iznad izolacije. Ako su njihove vrijednosti veće od prihvatljivih, treba uzeti veći period vibracija.

Nakon svega navedenoga, slijedi preliminarno dimenzioniranje konstruktivnih elemenata gornje konstrukcije. Statičke lateralne sile na svakoj etaži, dobivene proračunom V_s , koriste se za preliminarno dimenzioniranje naprezanja gornje konstrukcije na temelju graničnih pomaka (0,010/ R_I – postupak statičke sile, 0,015/ R_I – analiza spektra odziva, 0,020/ R_I – *time-history* analiza).

Na temelju dobivenih pomaka, krutosti, sila i prigušenja treba preliminarno dimenzionirati izolatore i njihov raspored kako bi se oduprli gravitacijskom i horizontalnom opterećenju te zadovoljili zahtjeve pomaka (Chatzidaki, 2011).

Slijedi izrada matematičkog modela izolirane konstrukcije na temelju potrebnih karakteristika ležajeva i predviđenih pomaka te odabir odgovarajućeg postupka bočnog odgovora. Potrebno je iterativno definirati vrijednosti projektnog pomaka D'_D i maksimalnog pomaka D'_M . Vrijednost projektnog pomaka trebala bi biti između prethodno

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

definiranog minimalnog proračunskog pomaka D_D i maksimalnog D'_M . Također treba utvrditi period izolacije.

Treba odrediti ciljane vrijednosti efektivne krutosti pomoću sljedećih jednadžbi:

$$K_{D,max} = K_{D,min} = \frac{DBE \text{ base shear}}{D_D} \quad (5.11.)$$

$$K_{M,max} = K_{M,min} = \frac{MCE \text{ base shear}}{D_M} \quad (5.12.)$$

Potrebno je usporediti efektivne periode T_D i T_M koje daje matematički model sa minimalnim vrijednostima dobivenima proračunom.

Razina prigušenja provjerava se pomoću jednadžbi:

$$\beta_D = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\text{ukupna površina unutar histerezne petlje}}{K_{D,max} \cdot D_D^2} \right) \quad (5.13.)$$

$$\beta_M = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\text{ukupna površina unutar histerezne petlje}}{K_{M,max} \cdot D_M^2} \right) \quad (5.14.)$$

Daljnji korak je provjera svojstava prema rezultatima dobivenim ispitivanjem prototipa ležaja. Te jesu li svojstava u konstruiranom matematičkom modelu u granicama koje sugeriraju rezultati ispitivanja prototipa. Isto je potrebno učiniti i sa proizvedenim ležajevima (Chatzidaki, 2011).

5.2.1 Provedba projektiranja izoliranih konstrukcija

Prvi korak je zadavanje dimenzija stupova i greda konstrukcije iznad izolacije. Određuje se vrijednost koja se odnosi na izolacijski sustav, a to je efektivno prigušenje β_{eff} i bezdimenzionalna karakteristična čvrstoća a koja je povezana s mehaničkim karakteristikama prigušivača.

Zatim se određuju željeni periodi vibracija T_D i T_M . Gdje je

$$T_D = 3 \cdot T_1 \quad (5.15.)$$

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

a T_M veći je od 3 sekunde.

Zatim se računaju ciljane vrijednosti efektivne krutosti pomoću formula:

$$K_{D,min} = \frac{(2\pi)^2 \cdot W}{T_D^2}, \quad K_{D,max} = 1,10 \frac{K_{D,min}}{0,90} \quad (5.16.)$$

$$K_{M,min} = \frac{(2\pi)^2 \cdot W}{T_M^2}, \quad K_{M,max} = 1,10 \frac{K_{M,min}}{0,90} \quad (5.17.)$$

Te početne procjene minimalnog i maksimalnog bočnog pomaka:

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \cdot Sa_D(T_D)}{\beta_D}, \quad D_M = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \cdot Sa_M(T_M)}{\beta_M} \quad (5.18.)$$

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^2}}, \quad D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad (5.19.)$$

U izrazima (5.18.) $Sa_D(T_D)$ i $Sa_M(T_M)$ označavaju vrijednosti spektra odziva od 10% u 50 godina i 2% u 50 godina s prigušenjima β_D i β_M .

Ako ispada da je proračunati D_D veći od odabranoga u projektu D_{sel} , tada se bira manji T_D i ponavlja se postupak.

Dalje se prema navedenim izrazima proračunavaju minimalne bočne sile gornje konstrukcije V_S i izolacijskog sustava V_b .

$$V_S = \frac{N_{iso} \cdot K_{D,max} \cdot D_D}{R_1}, \quad R_1 = 2,0, \quad N_{iso}: broj izolatora \quad (5.20.)$$

$$V_b = N_{iso} \cdot K_{D,max} \cdot D_D \quad (5.21.)$$

Sljedeći korak je provedba linearne elastične analize, kod koje je raspodjela minimalne bočne sile konstrukcije iznad izolacije V_S trokutasta. Treba uzeti u obzir i granice naprezanja i maksimalni pomak manji od $0,010/RI$.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Pomoću formule:

$$V_S \approx V_{smicanje \text{ prema kodu}} = m_{tot} \cdot Sa(T_1) \quad (5.22.)$$

Provjerava se je li vrijednost V_S blizu proračunatoj u izrazu (5.20). Ovdje je $Sa(T_1)$ dobiven iz spektra odziva fiksne natkonstrukcije. Ako je vrijednost V_S približna gore navedenom izrazu, nastavlja se proračun, a ako nije potrebna je prilagodba dizajna kako bi se izbjegli nedostaci.

Nakon toga slijedi definiranje mehaničkih karakteristika izolatora i modela konačnih elemenata nadgradnje i izolacijskog sustava. Odabire se postupak analize (u ovom slučaju nelinearna statička analiza). Ciljani pomaci za nelinearnu statičku analizu prethodno su izračunati D'_D i D'_M .

Konačni dizajn definira se iteracijom, a treba zadovoljavati sljedeća svojstva:

Projektiranje temeljeno na performansama s izolacijom

50%/50 godina $\theta_{max} < 0,4\%$ u pomaku D'_D

10%/50 godina $\theta_{max} < 1,8\%$ u pomaku D'_M

2%/50 godina $\theta_{max} < 3,0\%$

Projektiranje temeljeno na performansama bez izolacije

10%/50 godina $\theta_{max} < 0,4\%$ u pomaku D'_D

2%/50 godina $\theta_{max} < 1,8\%$ u pomaku D'_M

Gdje θ_{max} predstavlja maksimalni kut zaokreta. Ako navedeni uvjeti nisu zadovoljeni, treba prilagoditi dizajn.

Potrebna je provjera izvijanja svakog izolatora tako da faktor sigurnosti bude veći ili jednak ciljanom faktoru.

$$SF = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot S \cdot \omega_H^2 \cdot r}{g} \quad (5.23.)$$

$$\omega_H^2 = \frac{K_H}{W} \cdot g \quad (5.24.)$$

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

$$K_H = \frac{G \cdot A_s}{h} \quad (5.25.)$$

$$A_s = A \cdot \frac{h}{t_r} \quad (5.26.)$$

Ovdje SF označava faktor sigurnosti, ω_H označava horizontalnu frekvenciju, a S je faktor oblika ležaja.

Oznaka r predstavlja polumjer zakretanja, a iznosi :

$$\frac{\alpha}{2\sqrt{3}} \text{ za kvadratni ležaj sa stranicom } \alpha$$

$$\frac{\phi}{4} \text{ za kružni ležaj promjera } \phi$$

W označava opterećenje koje preuzima ležaj, a K_H je horizontalna krutost samog ležaja.

A_s je oznaka za efektivnu posmičnu površinu ležaja, h je ukupna visina ležaja, dakle visina gume i čelika, a t_r visina samo gume.

Na kraju je potrebna provjera bočnog pomaka svakog izolatora, a vrši se pomoću sljedećih jednakosti:

$$\text{Kvadratni ležaj } P_{crit} = B \left[1 - \left(\frac{P}{P_{crit}} \right)^2 \right], \quad P_{crit} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot S \cdot S_2 \cdot G \quad (5.27.)$$

$$\text{Kružni ležaj } P_{crit} = 2R \cdot \frac{\pi}{4} \left[1 - \left(\frac{P}{P_{crit}} \right)^2 \right], \quad P_{crit} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot S \cdot S_2 \cdot G \quad (5.28.)$$

gdje je B duljina stranice kvadratnog ležaja, R je radijus kružnoj ležaja, P je specificirano opterećenje, a P_{crit} je kritično naprezanje. S označava faktor oblika dok je S_2 omjer stranica ili drugi faktor oblika definiran sa $S_2 = \phi/t_r$ ili α/t_r . G je posmična krutost.

P mora biti manji od P_{crit} .

Ako svi ovi uvjeti nisu zadovoljeni, potrebno je prilagoditi dizajn (Chatzidaki, 2011).

5.2.2 Izvijanje i stabilnost elastomernog ležaja

Višeslojni elastomerni ležaj može doživjeti izvijanje slično stupu, ali s niskom posmičnom krutošću kao glavnim faktorom. Ležaj se analizira kao kontinuirani kompozitni sustav, a modelira se kao greda. Da bi se gumeni izolator pravilno modelirao, potrebno je modificirati određene veličine. Ležaj se smatra stupom duljine h , s poprečnim presjekom površine A i posmičnom krutošću po jedinici duljine $P_S = G \cdot A_S$, gdje je A_S efektivna posmična površina koja je opisana izrazom (5.26). Krutost savijanja modificira se na sličan način, tako da $(EI)_{eff}$ za jedan sloj debljine t postaje EI_S , gdje je:

$$EI_S = E_{c\left(\frac{1}{3}\right)} I \frac{h}{t_r} \quad (5.29.)$$

Ležaj je ograničen na rotaciju na oba kraja i može se slobodno bočno pomicati na vrhu, iz sljedeće jednadžbe dobije se rezultat kritičnog opterećenja izvijanja:

$$P_{crit} = \frac{-P_S + \sqrt{P_S^2 + 4P_S P_E}}{2} \quad (5.30.)$$

gdje su

$$P_S = GA \cdot \frac{h}{t_r} \quad (5.31.)$$

$$P_E = \frac{\pi^2}{h^2} \frac{1}{3} E_c I \frac{h}{t_r} \quad (5.32.)$$

Kritično opterećenje može se aproksimirati kao:

$$P_{crit} = (P_S P_E)^{\frac{1}{2}} \quad (5.33.)$$

Za većinu tipova ležajeva gdje je faktor oblika veći ili jednak 5, a sila P_E puno veća od P_S .

Stoga imamo da je kritična sila jednaka:

Primjena seizmičke izolacije
 u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

$$P_{crit} = \begin{cases} \left(GA \cdot \frac{h}{t_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\pi^2}{h^2} \frac{1}{3} 6GS^2 Ar^2 \frac{h}{t_r} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{\sqrt{2}\pi GASr}{t_r} \end{cases} \quad (4.34.)$$

Iz izraza (5.27.) i (5.28.) dobije se da je kritični tlak jednak:

$$\frac{p_{crit}}{G} = \begin{cases} \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot S \cdot S_2 & \text{za kružni ležaj} \\ \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot S \cdot S_2 & \text{za kvadratni ležaj} \end{cases} \quad (5.35.)$$

Opterećenje W koje prenosi ležaj u stvarnom dizajnu bit će manje od kritičnog te se zanemaruje utjecaj vertikalnog opterećenja na horizontalnu krutost koja je povezana s frekvencijom na način koji je opisan izrazom (5.24).

Iz jednakosti

$$SF = \frac{P_{crit}}{W} \quad (5.36.)$$

proizlazi da je faktor sigurnosti jednak izrazu (5.23).

Može se zaključiti da što je veći faktor oblika S , frekvencija ω_H ili veličina ležaja, to je veći faktor sigurnosti.

Ako se uzme u obzir već spomenuto da je r radijus zakretanja i jednak je $\alpha/2\sqrt{3}$ za kvadratni ležaj sa stranicom α i $\phi/4$ za kružni ležaj promjera ϕ te da je tlak jednak $p = W/A$ dobiju se izrazi:

$$r = \begin{cases} 2\sqrt{\pi} \left(\frac{W}{p} \right)^{\frac{1}{2}} & \text{za kružni ležaj} \\ \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(\frac{W}{p} \right)^{\frac{1}{2}} & \text{za kvadratni ležaj} \end{cases} \quad (5.37.)$$

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Ako je tlak stalan, faktor sigurnosti će se smanjivati s kvadratnim korijenom opterećenja W što može dovesti do neočekivanog problema izvijanja slabo opterećenih ležajeva (Naeim, Kelly, 1999).

5.2.3 Vertikalno opterećenje i horizontalna krutost

Ako je opterećenje na ležaju slično opterećenju izvijanja, smanjuje se horizontalna krutost, koja se određuje linearnom elastičnom analizom na sljedeći način:

$$K_H = \frac{GA_S}{h} \left[1 - \left(\frac{P}{P_{crit}} \right)^2 \right] \quad (5.38.)$$

Pomak gornjeg dijela ležaja prema dolje dan je s:

$$\delta_V = \frac{P_S + P D^2}{P_E h} \quad (5.39.)$$

Gdje je P vertikalna sila koju nosi ležaj, a D bočni pomak na vrhu ležaja.

U većini slučajeva je $P \gg P_S$ pa slijedi da je:

$$\delta_V = \frac{P}{P_{crit}} \frac{h}{\sqrt{2\pi r S}} \frac{D^2}{h^2} = \left(\frac{P}{P_{crit}} \right) \sqrt{\frac{P_S D^2}{P_E h^2}} \quad (5.40.)$$

Dobijemo pomak prema dolje koji se dodaje onome koji nastaje čistom kompresijom izolatora. Taj pomak prema dolje uzrokuje rotacija čeličnih slojeva u ležaju, a ta rotacija proizvodi posmično naprezanje. To naprezanje uzorkuje vertikalno opterećenje, a ukupno posmično naprezanje uzrokuje pomak gornjeg dijela ležaja u donjem smjeru (Chatzidaki, 2011).

5.2.4 Veliki bočni pomaci

Analiza izvijanja elastomernog izolatora temelji se na linearnoj teoriji, sličnoj analizi izvijanja stupa. Ta analiza određuje opterećenje izvijanja u neizobličenom stanju, ali ne daje informacije o stabilnosti ležaja u izobličenom stanju. Nestabilnost se očituje gubitkom pozitivne inkrementalne horizontalne krutosti, što je ključno pri projektiranju ležaja jer će maksimalno vertikalno opterećenje i maksimalni horizontalni pomak nastupiti istovremeno i predstavljati granično stanje za dimenzioniranje ležaja.

Za predviđanje ponašanja ležaja u kombinaciji spomenutih vršnih vrijednosti, maksimalnog vertikalnog opterećenja i maksimalnog horizontalnog pomaka, potrebna je složena nelinearna analiza. Kako bi se olakšao postupak, dane su dvije jednostavne hipoteze za aproksimaciju graničnog stanja:

1. Kritični pomak je bočni pomak pri kojem ležaj pokazuje nultu inkrementalnu horizontalnu krutost, što se događa kada smanjena površina na koju djeluje tlak dosegne kritično naprezanje p_{crit} .
2. Površina A u izrazu za kritično opterećenje u nedeformiranom stanju zamjenjuje se smanjenom površinom A_r . Ova pretpostavka je vjerojatnija jer vertikalna naprezanja uzrokovana pomakom ne bi trebala značajno utjecati na savojnu otpornost, ali postoji mogućnost da smanje posmičnu otpornost.

Smanjena površina za kvadratni ležaj sa stranicom B dana je s:

$$A_r = B(B - D) \quad (5.41.)$$

Ako je prva hipoteza točna vrijedi:

$$P = p_{crit} A_r = \frac{\pi}{\sqrt{6}} G S S_2 B (B - D_{crit}) \quad (5.42.)$$

Gdje je D_{crit} kritični pomak pod opterećenjem P .

I vrijedi:

$$\frac{D_{crit}}{B} = 1 - \frac{P}{P_{crit}} \quad (5.43.)$$

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Ako je točna druga hipoteza, tada vrijedi:

$$P = \sqrt{GA_r \frac{\pi^2(EI)_{eff}}{t_r^2}} = \left(\frac{A_r}{A}\right)^{\frac{1}{2}} P_{crit} \quad (5.44.)$$

$$\frac{A_r}{A} = \left(\frac{P}{P_{crit}}\right)^2 = \frac{B(B - D_{crit})}{B^2} \quad (5.45.)$$

$$\frac{D_{crit}}{B} = 1 - \left(\frac{P}{P_{crit}}\right)^2 \quad (5.46.)$$

Ako je P približno jednako P_{crit} , rezultati su isti, a ako je $P < P_{crit}$, razlikuju se u praktičnoj primjeni (Chatzidaki, 2011).

5.3 Projektiranje izolacije u podnožju prema HRN EN 1998-1

U poglavlju 10 norme HRN EN 1998-1 obuhvaćen je proračun izoliranih konstrukcija u kojima se sustav izolacije smješta ispod glavne mase konstrukcije i smanjuje odziv sustava pri potresu. Za izolacijske uređaje zahtijevana je veća pouzdanost što se ostvaruje primjenom faktora povećanja γ_x na pomake za svaki element pri potresnom djelovanju. Preporuka vrijednosti navedenog faktora povećanja za zgrade je 1,2. Kod graničnog stanja nosivosti, gornji i donji ustroj ostaju u elastičnom području dok izolacijski uređaji smiju dostići svoju graničnu sposobnost.

Dinamički odziv konstrukcije proračunava se s obzirom na inercijske sile, pomake i ubrzanje. Za zgrade moraju se uzeti u obzir torzijski učinci i učinci slučajnih ekscentriciteta.

Izolacijski sustav smije se modelirati kao ekvivalentni linearni viskoelastični model ako je sastavljen od uređaja kao što su slojeviti elastomerni ležajevi, ili kao bilinearni histerezni model ako je sastavljen od elastoplastičnih uređaja. Ako se koristi linearni model, u obzir se uzima proračunska krutost svakog izolacijskog elementa i trošenje energije svakog izolacijskog sustava izražava se ekvivalentnim viskoznom prigušenjem kao „proračunskim prigušenjem“ ξ_{eff} (Hrvatski zavod za norme, 2011).

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Kod pojednostavnjenog linearnog proračuna uzimaju se u obzir dva horizontalna dinamička pomaka i tome dodaju statički učinci torzije. Prilikom modeliranja pretpostavlja se da je gornji ustroj kruto tijelo koje se horizontalno pomiče iznad sustava izolacije. U tom slučaju proračunski period za translaciju je:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} \quad (5.47.)$$

gdje M predstavlja masu gornjeg ustroja, a K_{eff} proračunsku horizontalnu krutost izolacijskog sustava.

Pri određivanju proračunske horizontalne krutosti, pomaci nastali torzijom oko vertikalne osi, mogu se zanemariti ako ukupna ekscentričnost za dva glavna horizontalna smjera, od središta krutosti izolacije do vertikalne projekcije središta masa gornjeg ustroja, ne prelazi 7,5% duljine gornje konstrukcije poprečno na horizontalni smjer koji se promatra.

Ova metoda smije se primijeniti na sustave izolacije s ekvivalentnim linearnim prigušenjem ako zadovoljavaju sljedeće uvjete:

- udaljenost do najbližeg potencijalno aktivnog rasjeda veća je od 15 kilometara, misleći pritom na rasjede magnitude veće ili jednake 6,5 po Richteru
- maksimalna dimenzija gornje konstrukcije tlocrtno nije veća od 50 metara
- donji ustroj je toliko krut da su učinci diferencijalnih slijeganja temeljnog tla svedeni na minimum
- svi uređaji smješteni su iznad donjeg ustroja koji preuzima vertikalna opterećenja
- proračunski period zadovoljava uvjet:

$$3T_f \leq T_{eff} \leq 3s \quad (5.48.)$$

pri čemu je T_f osnovni period gornje konstrukcije ako se pretpostavi da je upeta u podnožju.

Dodatni uvjeti za zgrade koje je potrebno zadovoljiti za primjenu pojednostavnjene metode proračuna:

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

- sustav koji preuzima bočno opterećenje gornjeg ustroja treba biti tlocrtno simetričan uzduž dvije glavne osi i pravilno raspoređen
- rotacija u podnožju do koje dolazi zbog ljuljanja trebala bi biti zanemariva
- omjer krutosti sustava izolacije treba zadovoljiti sljedeću jednakost:

$$\frac{K_v}{K_{eff}} \geq 150 \quad (5.49.)$$

gdje je K_v vertikalna krutost, a K_{eff} efektivna horizontalna krutost izolacijskog sustava,

- osnovni period u vertikalnom smjeru treba biti:

$$T_v = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_v}} \leq 0,1 \text{ s} \quad (5.50.)$$

- pomak središta krutosti pri potresu treba računati za svaki horizontalni smjer prema formuli:

$$d_{de} = \frac{MS_e(T_{eff}, \xi_{eff})}{K_{eff, min}} \quad (5.51.)$$

pri čemu je $S_e(T_{eff}, \xi_{eff})$ spektralno ubrzanje,

- sile u horizontalnom smjeru na svakoj etaži treba računati za svaki smjer prema:

$$f_i = m_j S_e(T_{eff}, \xi_{eff}) \quad (5.52.)$$

ovdje m_j predstavlja masu na razini j , taj sustav sila zbog kombinacije slučajne i stvarne ekscentričnosti daje torzijske učinke,

- ako se torzijski pomak oko vertikalne osi smije zanemariti pod uvjetom kako je već navedeno, učinci torzije na pojedini izolatorski element mogu se odrediti za svaki smjer povećavanjem unutarnjih sila faktorom δ_i koji za x smjer iznosi:

$$\delta_x = 1 + \frac{e_{tot, y}}{r_y^2} y_i \quad (5.53.)$$

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

- pri čemu su x_i i y_i koordinate izolatorskog elementa i s obzirom na proračunski centar krutosti, $e_{tot,y}$ je ukupna ekscentričnost u y smjeru, r_y je radijus torzije izolacijskog sustava u y smjeru, a dan je izrazom:

$$r_y^2 = \Sigma(x_i^2 K_{yi} + y_i^2 K_{xi}) / \Sigma K_{xi} \quad (5.54.)$$

gdje su K_{xi} i K_{yi} proračunske krutosti elementa i u smjerovima x i y (Hrvatski zavod za norme, 2011).

6 Primjeri seizmičke izolacije kod projektiranja i obnove (*case studies*)

U svijetu je sve veća upotreba seizmičke izolacije, prvenstveno u seizmički najaktivnijim područjima. Uz navedene primjere u poglavlju 2.1. gdje je seizmička izolacija primijenjena, u nastavku će se detaljnije opisati po jedan primjer gradnje sa seizmičkom izolacijom i naknadnom ugradnjom u postojeću konstrukciju.

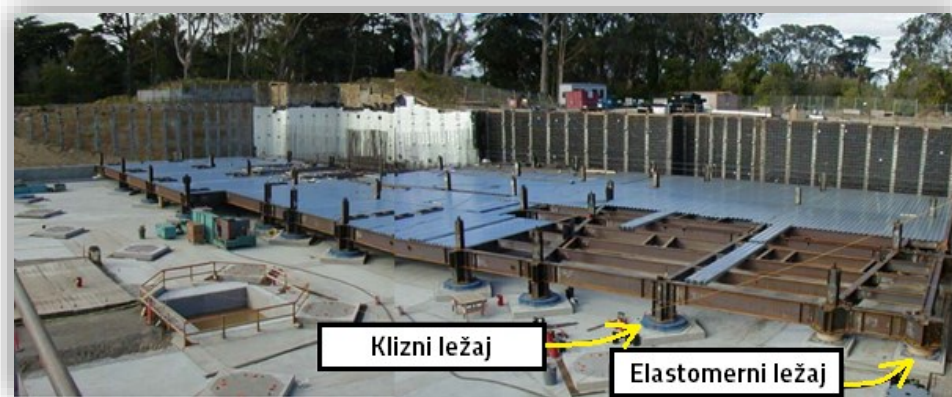
6.1 Gradnja *New de Young* muzeja sa seizmičkom izolacijom u San Franciscu

Seizmička izolacija kod novogradnje primjenjuje se prvenstveno kod bitnih objekata, zgrade faktora važnosti IV koje uključuju bolnice, vatrogasne stanice, elektrane i slično. Također, primjenjuje se kod objekata čiji se rad odmah nakon potresa smatra posebno važnim (*hi-tech* proizvodnja) i u kojima se nalaze vrijedni sadržaji podložni oštećenjima od potresa (umjetnički muzeji). Primjer primjene izolacije za zaštitu sadržaja je muzej *New de Young* u San Franciscu. Muzej je zamijenio postojeću neadekvatnu i u potresu oštećenu građevinu (Kircher, 2013).

Muzej je seizmički izoliran sa 76 elastomernih ležajeva, 76 ravnih kliznih ležajeva i 24 hidraulička prigušivača. Ležajevi i prigušivači smješteni su u prostoru ispod prizemlja i ne utječu na arhitekturu i funkcionalnost muzeja. Odabrani sustav izolacije jedan je od 20 razmatranih za muzej, a za njega je inženjerskom evaluacijom utvrđeno da je to rješenje s najmanjim smicanjem baze (odnosno najbolji sustav za dizajn nadgradnje), najnižim ubrzanjem poda (najbolji sustav za zaštitu sadržaja) te najnižim troškovima (Kircher, 2013).

Slika 6.1 daje prikaz gradilišta muzeja nakon izvedbe izolacijskih ležajeva, muzej se izvodi kao čelična okvirna konstrukcija.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 6.1 Izgradnja New de Young muzeja sa seizmičkim izolacijskim ležajevima, klizni ležaj (lijevo), elastomerni ležaj (desno) (Kircher, 2013.)

Slika 6.2 prikazuje konstrukciju na razini izolacije nakon apliciranja zaštite od požara. Prikazan je klizni ležaj i hidraulički prigušivač koji povezuje nosač prizemlja te betonsko postolje i temelj ispod. Ravni klizači pružaju potporu i daju prigušenje (zbog trenja) bez povećanja krutosti izolacijskog sustava. Hidraulički prigušivači dodani su za osiguranje kontrole pomaka zbog relativne blizine rasjeda i potencijala za velikim pomacima tla (Kircher, 2013).

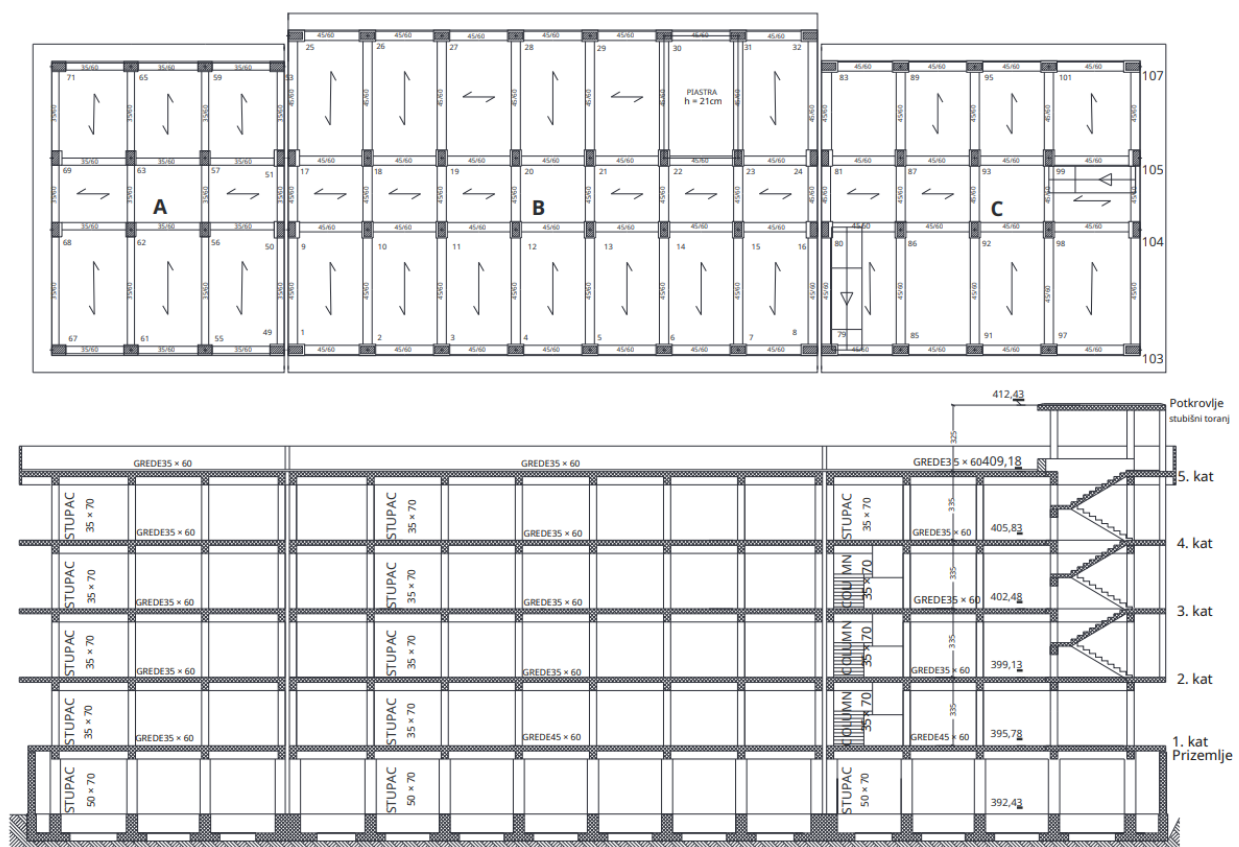


Slika 6.2 Klizni ležaj i hidraulički prigušivač (Kircher, 2013.)

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

6.2 Seizmičko naknadno opremanje bolničkog centra u Avellinu (Italija)

Primjer naknadnog opremanja seizmičkom izolacijom je rekonstrukcija peterokatne građevinske konstrukcije bolničkog centra u Avellinu u Italiji. Radi se o armirano-betonskoj okvirnoj konstrukciji. Projektirana je prema talijanskim seizmičkim propisima iz 1986. godine. Metoda spektra odziva primijenjena je za predviđanje sila u elementima konstrukcije. Zgrada se sastoji od tri armiranobetonske okvirne konstrukcije (slika 6.3) te je bilo potrebno njihovo dilatiranje da bi se izbjeglo međusobno sudaranje tijekom potresnog djelovanja.



Slika 6.3 Tlocrt i presjek izvorne zgrade bolničkog centra u Avellinu (Ferraioli, Mandara, 2017).

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Najprije je bilo potrebno sakupiti informacije o postojećoj konstrukciji, izvesti in situ mjerenja i laboratorijske testove. Seizmička svojstva procijenjena su prema smjernicama iz Dodatka B EN 1998-3 i u skladu s talijanskim propisima. Provjera seizmičke sigurnosti provedena je korištenjem pročišćenih modela triju konstrukcija u računalnom programu konačnih elemenata, u seizmičkoj procjeni korištena su proračunska gravitacijska opterećenja. Vertikalna su opterećenja uzeta sa seizmičkim u kombinaciji $1,0 G + 0,15 Q$ za sve etaže osim gornje gdje je kombinacija $1,0 G + 0,30 Q$. Krivulja nosivosti, odnos osnovne posmične sile i pomaka kontrolnog čvora, dobivena je nelinearnom statičkom (*pushover*) analizom u skladu s talijanskim propisima i Eurokodom 8. Ispitivanjem je utvrđeno nezadovoljavajuće seizmičko ponašanje za neka granična stanja posebno za konstrukcije A i C zbog nedovoljne bočne nosivosti i ograničene duktilnosti (Ferraioli, Mandara, 2017).

Naknadno opremanje postojećih konstrukcija može se izvesti s dvije alternativne strategije uzimajući pritom u obzir dva aspekta seizmičkog projektiranja, zahtjev i kapacitet. Prva strategija temelji se na konvencionalnim metodama naknadne ugradnje, uključuje dodavanje novih elemenata, te metode povećavaju kapacitet strukture, odnosno njenu krutost i/ili čvrstoću kako bi se zadovoljili zahtjevi. No, ove metode povećanjem krutosti povećavaju ubrzanje zgrade te uključuju opsežne izmjene zgrade te gubitak njezine funkcionalnosti. Temelj druge strategije je disipacija energije i tehnike seizmičke izolacije kojima se smanjuje zahtjev za konstrukciju kako bi trenutni kapacitet konstrukcije bio dovoljan za podnošenje projektiranog potresa. Funkcionalnost zgrade time je zadržana, a većina građevinskih radova ograničena je na razinu izolacije (Ferraioli, Mandara, 2017).

Seizmičko ojačanje ove konstrukcije izvedeno je eliminiranjem dilatacija na razini tla, čime je stvorena zajednička izolacijska ravnina. Napravljeni su dilatacijski spojevi između greda, stupova i ploča. Podna ploča ojačana je povećanjem debljine odozgo i dodavanjem armaturne mreže 12×12 m usidrene u ploči. Izolacija konstrukcije izvedena je na način da je 25 okruglih gumenih ležajeva s visokim prigušenjem (HDRB) postavljeno ispod stupova prizemlja. Promjer je odabran proporcionalno vertikalnom opterećenju. Povećanjem promjera dobiveni su krući ležajevi zbog čega je bilo potrebno koristiti ravne klizne ležajeve u kombinaciji s elastomernim ležajevima. Pri odabiru rasporeda ležajeva nastojalo se minimizirati učinke torzije zbog ekscentriciteta između centra mase gornje konstrukcije i centra krutosti izolacijskog sustava. Unutarnja stepeništa i dizala u ovom slučaju ne prelaze preko izolacijske ravnine dok su vanjska stepeništa i pristupne točke projektirane tako da budu pričvršćene za gornju konstrukciju i jednostavno oslonjene na konstrukciju ispod

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

izolatora. Instalacije i cijevi koje prelaze izolacijsku ravninu projektirane su tako da se mogu horizontalno pomicati (Ferraioli, Mandara, 2017).

U projektu seizmičke rekonstrukcije ispunjena su ograničenja propisana talijanskim seizmičkim propisima i Eurokodom, a odnose se na efektivnu krutost izolacijskog sustava, efektivni omjer prigušenja, odnos sile i pomaka. Za predviđanje sila u elementima korištena je metoda spektra odziva. Podne dijafragme smatraju se krutima u svojoj ravnini, no provode se dvije analize, jedna zanemarujući, a druga uzimajući u obzir fleksibilnost dijafragme u ravnini. Velika krutost i čvrstoća temelja omogućila je zanemarivanje međudjelovanja temelja i gornje konstrukcije. Prema dobivenim rezultatima u prva tri moda dominira izolacijski sustav, dok u ostalih 5 modova dominira nadgradnja (Ferraioli, Mandara, 2017).

Ugradnja izolacijskih ležajeva (slika 6.4) započinje prijenosom opterećenja sa stupa na dvije hidrauličke preše, zatim rezanje stupa te postavljanje ležaja i naposljetku prenošenje opterećenja s dizalica na izolacijski ležaj (Ferraioli, Mandara, 2017).

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 6.4 Postupak ugradnje izolacijskih ležajeva pri rekonstrukciji bolničkog centra u Avellinu (Ferraioli, Mandara, 2017).

Rezultati nelinearne vremenske analize (*time-history*) pokazali su da je vrijednost maksimalnog bočnog pomaka na fleksibilnoj strani izolacijske ravnine bila veća od 35% od onoga u središtu mase. Zaključeno je da seizmička izolacija ima brojne prednosti u odnosu na druge načine naknadnog opremanja zgrade. Glavna prednost je da seizmička izolacija smanjuje djelovanje seizmičke sile na gornju konstrukciju i daje zaštitu nadgrađu bez opsežnih zahtjeva ojačanja te sa zadržavanjem funkcionalnosti zgrade jer se radovi ograničavaju ispod izolacijske ravnine, te se smanjuje međukatno pomicanje (Ferraioli, Mandara, 2017).

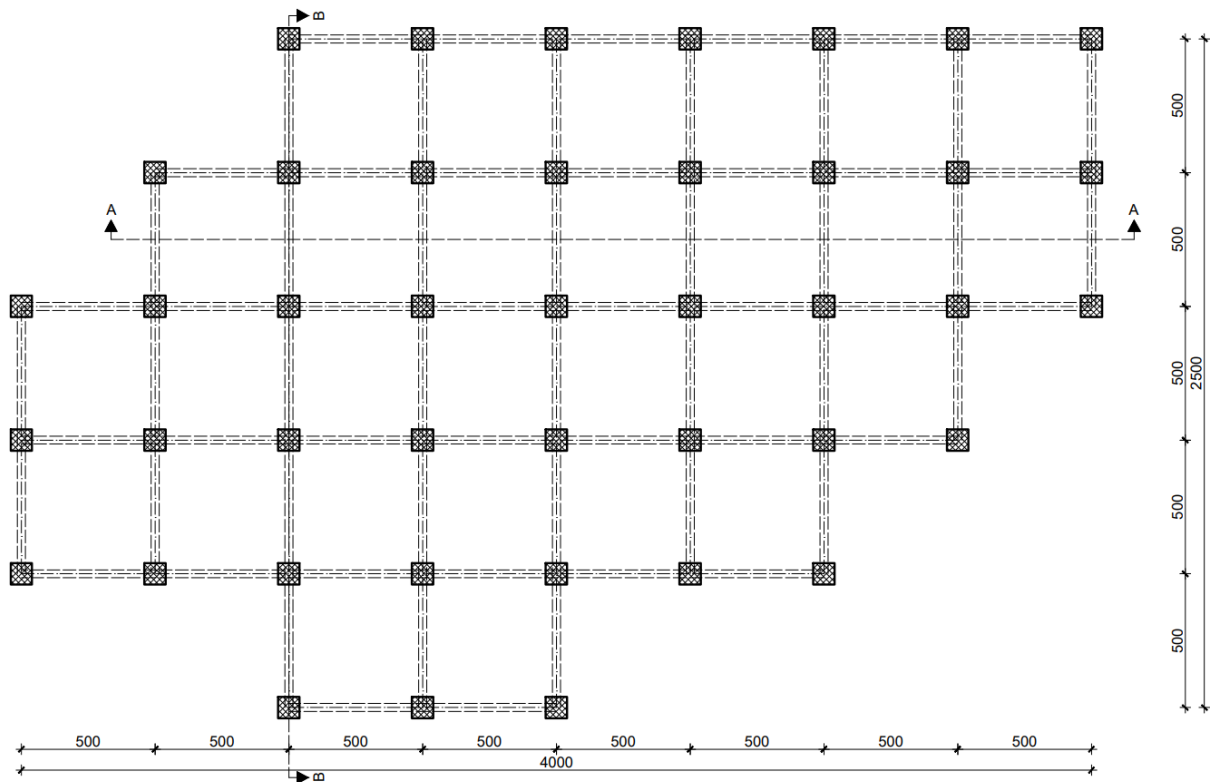
7 Primjer i usporedba ponašanja konstrukcije sa i bez seizmičke izolacije

U okviru ovog rada provedena je usporedba ponašanja armiranobetonske okvirne konstrukcije sa i bez seizmičke izolacije. Usporedba se provodi pomoću modalne spektralne analize, koja omogućava detaljan uvid u dinamičko ponašanje konstrukcija pod utjecajem seizmičkih sila.

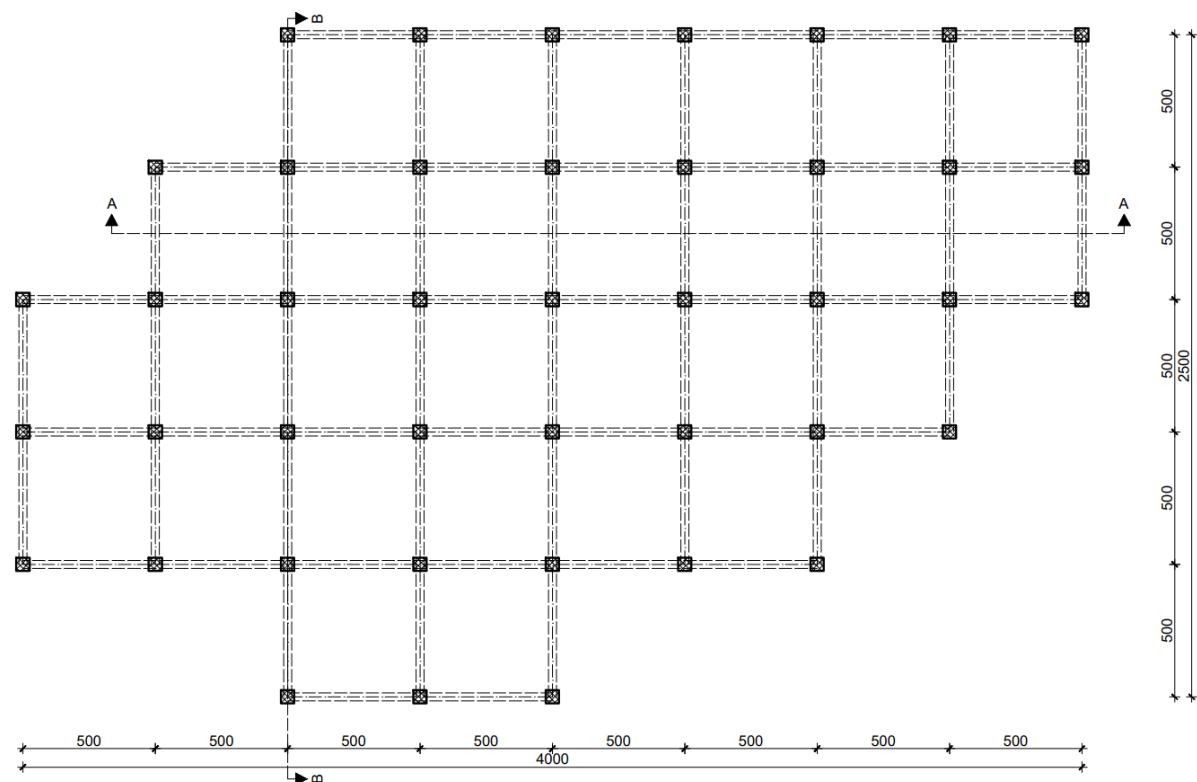
Glavni cilj istraživanja bio je analizirati kako primjena seizmičkih izolatora utječe na produljenje prirodnog perioda i smanjenje deformacija u usporedbi s konstrukcijom na fiksnim temeljima, te ispitati učinkovitost izolacije u pogledu poboljšanja seizmičke otpornosti. Analizira se armiranobetonska okvirna konstrukcija s jednom podzemnom i četiri nadzemne etaže. Razred čvrstoće betona je 30/37, a čelik za armaturu razreda je B500B. Dimenzije stupova u podrumskom dijelu iznose 80x80 cm, dok su iznad podruma smanjeni na 50x50 cm. Grede imaju dimenzije 40x30 cm, a debljina međukatnih ploča iznosi 14 cm. Horizontalni osni razmaci stupova iznose 5 metara. Slika 7.1 i slika 7.2 prikazuju tlocrte ispitane zgrade, presjek A-A prikazuje slika 7.3, a presjek B-B prikazuje slika 7.4. Za sustav izolacije odabrani su elastomerni ležajevi.

Pomoću spektralne analize u računalnom programu *SCIA Engineer*, prikupit će se podaci o frekvencijama, periodima, sila u podnožju i pomacima za oba modela. Cilj je usporediti ova dva pristupa te evaluirati prednosti i nedostatke korištenja seizmičke izolacija u svrhu poboljšanja sigurnosti i stabilnosti konstrukcija u seizmički aktivnim područjima.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

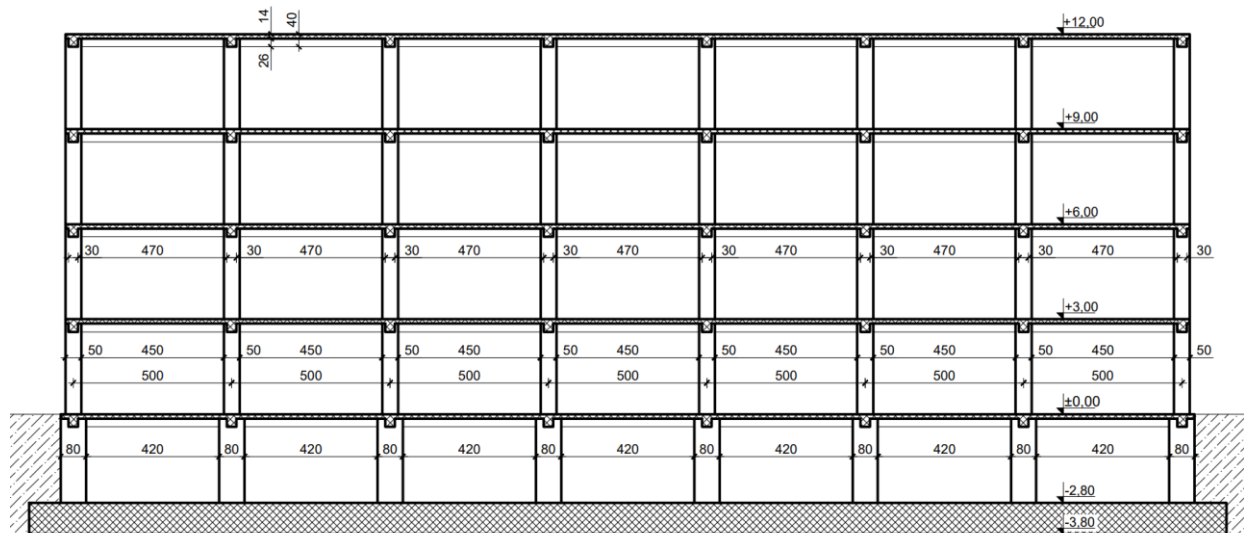


Slika 7.1 Tlocrt podruma

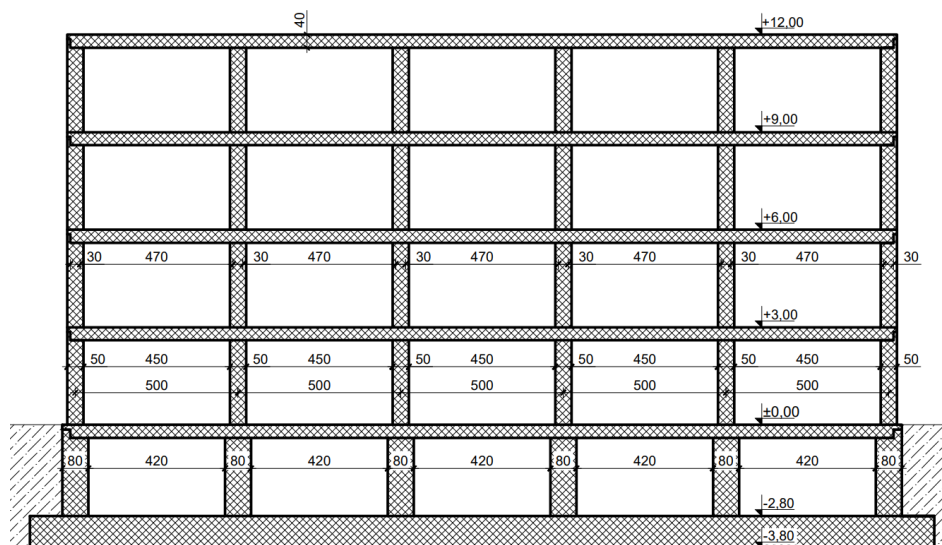


Slika 7.2 Tlocrt prizemlja, prvog, drugog i trećeg kata

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 7.3 Presjek A-A

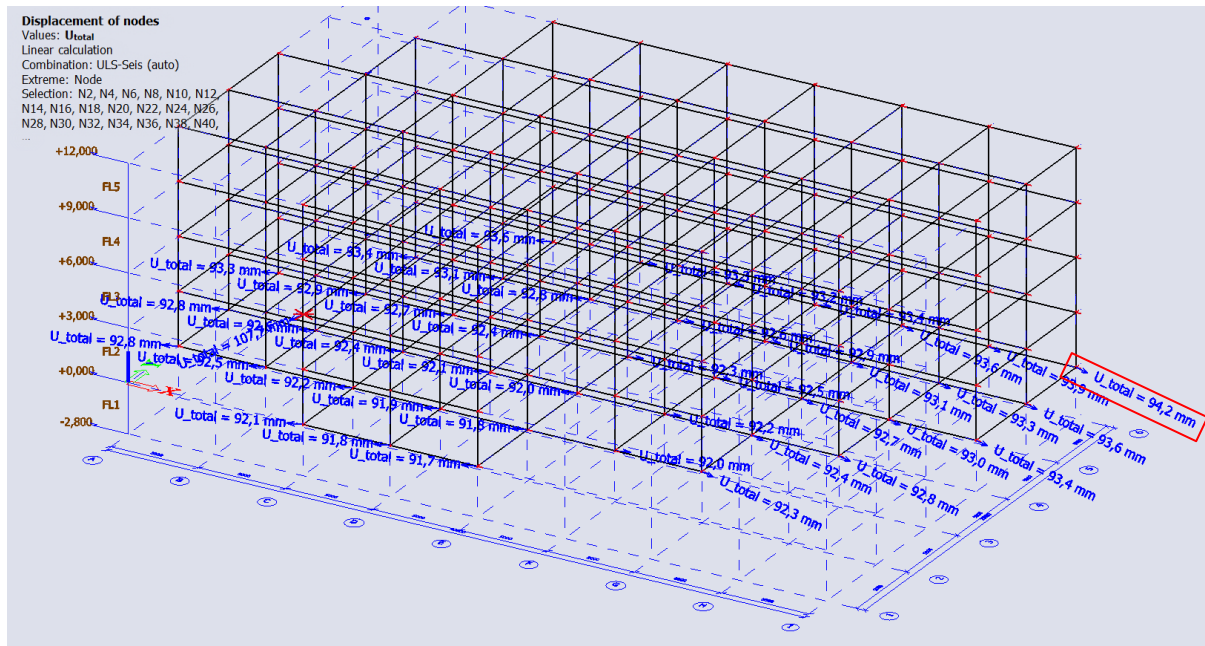


Slika 7.4 Presjek B-B

Modeliranje konstrukcije izvedeno je s određenim pojednostavljenjima koja su bila nužna zbog ograničenja softverskih alata, stoga se analizirana konstrukcija sastoji od nadzemnog dijela iznad podruma, dok je podrumski prostor zanemaren. Elastomerni ležajevi postavljeni su na vrhovima stupova podruma.

Za model zgrade s fiksnim temeljima zadani su upeti ležajevi na dnu stupova prizemlja, dok su za izoliranu zgradu zadani ležajevi s određenim krutostima u x, y i z smjeru. Takvi ležajevi oponašaju elastomerne ležajeve, a odabrani su iz FIP MEC kataloga proizvoda na temelju vertikalnih reakcija u podnožju te potrebnog horizontalnog pomaka.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 7.6 Maksimalni horizontalni pomak za kombinaciju graničnog stanja nosivosti u seizmičkim uvjetima (ULS-Seis)

Na temelju ovih rezultata, iz kataloga je odabran ležaj koji omogućava pomake od ± 150 mm, radi dodatne sigurnosti. Krutost odabranog ležaja u horizontalnim smjerovima iznosi $0,74 \text{ kN/mm}$, a u vertikalnom smjeru 602 kN/mm (slika 7.7).

SI-N	V kN	F _{zd} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D _g mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-N 300/76	550	1780	0.74	602	300	76	152	202	350	92
SI-N 350/75	990	2800	1.03	796	350	75	143	193	400	118
SI-N 400/75	1760	4680	1.34	1216	400	75	143	193	450	153
SI-N 450/78	2410	6530	1.63	1415	450	78	154	204	500	202
SI-N 500/78	3610	9380	2.01	1954	500	78	154	204	550	247
SI-N 550/77	4380	9820	2.47	2296	550	77	147	197	600	287
SI-N 600/80	5380	10310	2.83	2539	600	80	147	197	650	335
SI-N 650/81	6400	10830	3.28	2857	650	81	145	195	700	384
SI-N 700/80	7420	11370	3.85	3272	700	80	151	211	750	508
SI-N 800/80	11470	14990	5.03	4918	800	80	151	211	850	659
SI-N 900/84	14980	21220	6.06	5628	900	84	158	218	950	848
SI-N 1000/84	18230	22590	7.48	6667	1000	84	164	244	1050	1252
SI-N 1100/84	22800	27460	9.05	8890	1100	84	164	244	1150	1509
SI-N 1200/96	24240	28700	9.43	8903	1200	96	176	256	1250	1807

Slika 7.7 Tablica iz FIP MEC kataloga ležajeva; za pomake ± 150 mm (FIP MEC katalog proizvoda)

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

7.2 Utjecaj izolatora na frekvencijske karakteristike

Smanjenje krutosti ležajeva seizmički izolirane konstrukcije u horizontalnim smjerovima dovele su do povećanja perioda vibracija što je i cilj same seizmičke izolacije (tablica 7.1). Ova promjena rezultira smanjenjem dinamičkih opterećenja prenesenih na nadzemnu konstrukciju. U modelu s fiksnim temeljima, periodi vibracija kraći su zbog visoke krutosti temelja što daje malu fleksibilnost strukture u horizontalnim smjerovima (tablica 7.2). Slika 7.8 prikazuje grafikon koji daje podatke o usporedbi vlastitih perioda seizmički izolirane i neizolirane konstrukcije u prvih 10 modova, u njemu su vizualno prikazani podaci dobiveni modalnom analizom.

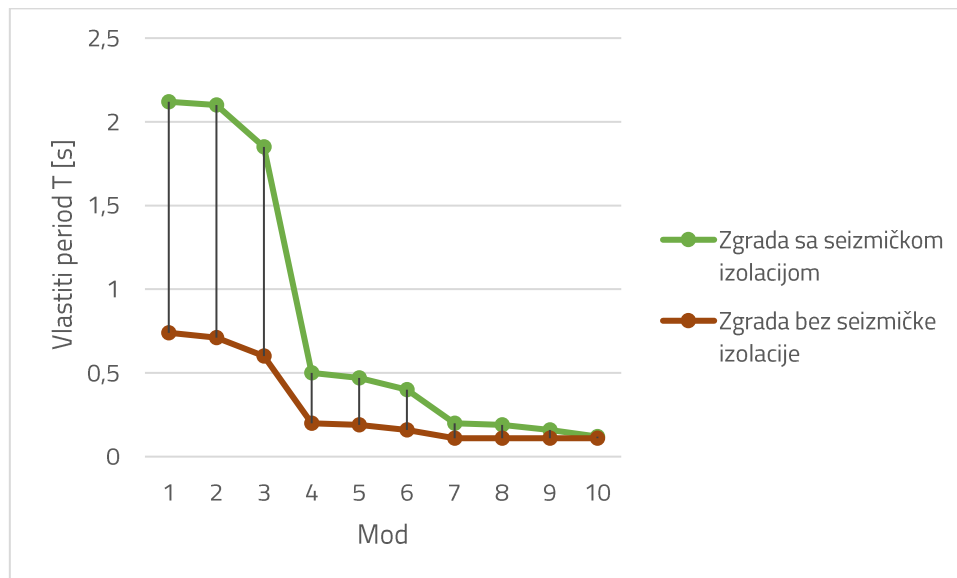
Tablica 7.1 Tablica rezultata modalne analize konstrukcije sa seizmičkom izolacijom

Mode	mega [rad/s]	Period [s]	Freq. [Hz]	W_{xi}/W_{stot}	W_{yi}/W_{ytot}	W_{zi}/W_{zstot}	$W_{xi,R}/W_{xstot,R}$	$W_{yi,R}/W_{ytot,R}$	$W_{zi,R}/W_{zstot,R}$
1	2.95909	2,12	0,47	0,0006	0,9904	0,0000	0,0024	0,0000	0,0001
2	2.98881	2,10	0,48	0,9911	0,0006	0,0000	0,0000	0,0009	0,0015
3	3.4005	1,85	0,54	0,0015	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,9928
4	12.5271	0,50	1,99	0,0000	0,0088	0,0000	0,2659	0,0001	0,0000
5	13.3501	0,47	2,12	0,0067	0,0000	0,0000	0,0003	0,1312	0,0000
6	15.8347	0,40	2,52	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0001	0,0056
7	31.6868	0,20	5,04	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
8	33.1328	0,19	5,27	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9	38.527	0,16	6,13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
10	50.9444	0,12	8,11	0,0000	0,0000	0,4539	0,0003	0,0033	0,0000
				1,0000	1,0000	0,4539	0,2691	0,1356	1,0000

Tablica 7.2 Tablica rezultata modalne analize konstrukcije bez seizmičke izolacije

Mode	mega [rad/s]	Period [s]	Freq. [Hz]	W_{xi}/W_{stot}	W_{yi}/W_{ytot}	W_{zi}/W_{zstot}	$W_{xi,R}/W_{xstot,R}$	$W_{yi,R}/W_{ytot,R}$	$W_{zi,R}/W_{zstot,R}$
1	8.44592	0,74	1,34	0,0002	0,6257	0,0000	0,0985	0,0000	0,0004
2	8.90094	0,71	1,42	0,6306	0,0002	0,0000	0,0000	0,0480	0,0003
3	10.5286	0,60	1,68	0,0003	0,0004	0,0000	0,0001	0,0000	0,6376
4	31.9143	0,20	5,08	0,0000	0,1202	0,0000	0,0414	0,0000	0,0001
5	33.0507	0,19	5,26	0,1170	0,0000	0,0000	0,0000	0,0212	0,0001
6	38.2751	0,16	6,09	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,1151
7	58.8265	0,11	9,36	0,0000	0,0000	0,0007	0,0006	0,0003	0,0000
8	59.0231	0,11	9,39	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000
9	59.1119	0,11	9,41	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0001	0,0000
10	59.2013	0,11	9,42	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000
				0,7482	0,7467	0,0008	0,1407	0,0699	0,7536

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

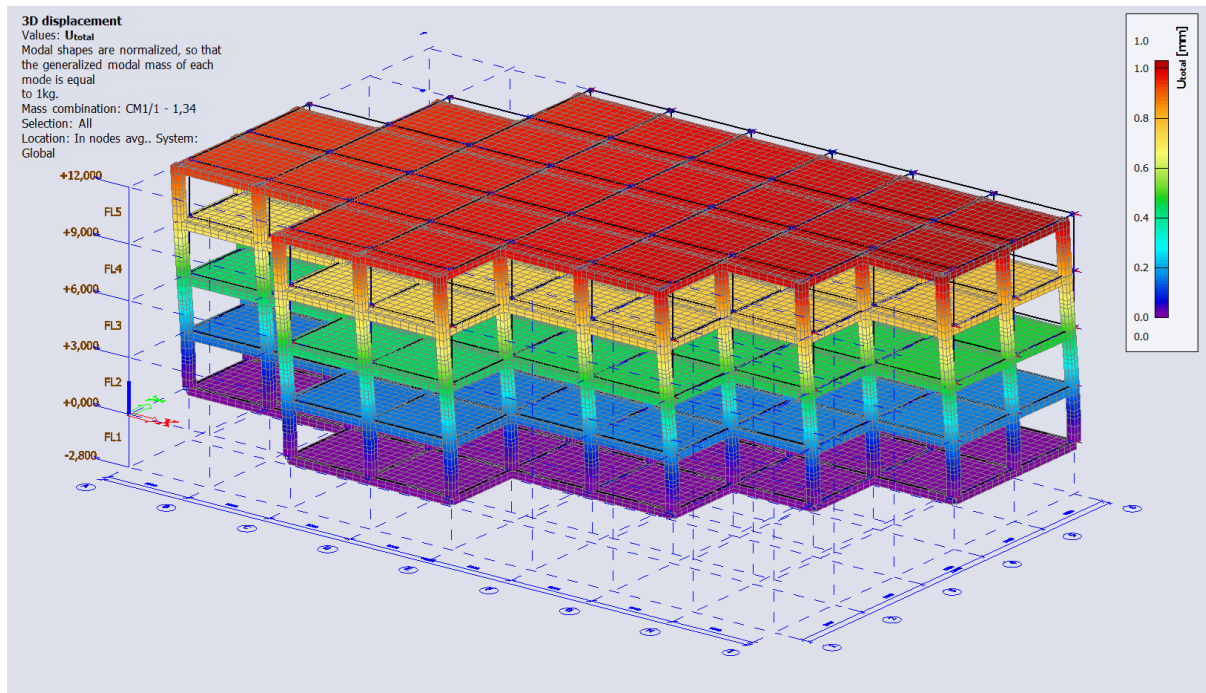


Slika 7.8 Usporedba vlastitih perioda u prvih 10 moda vibracija

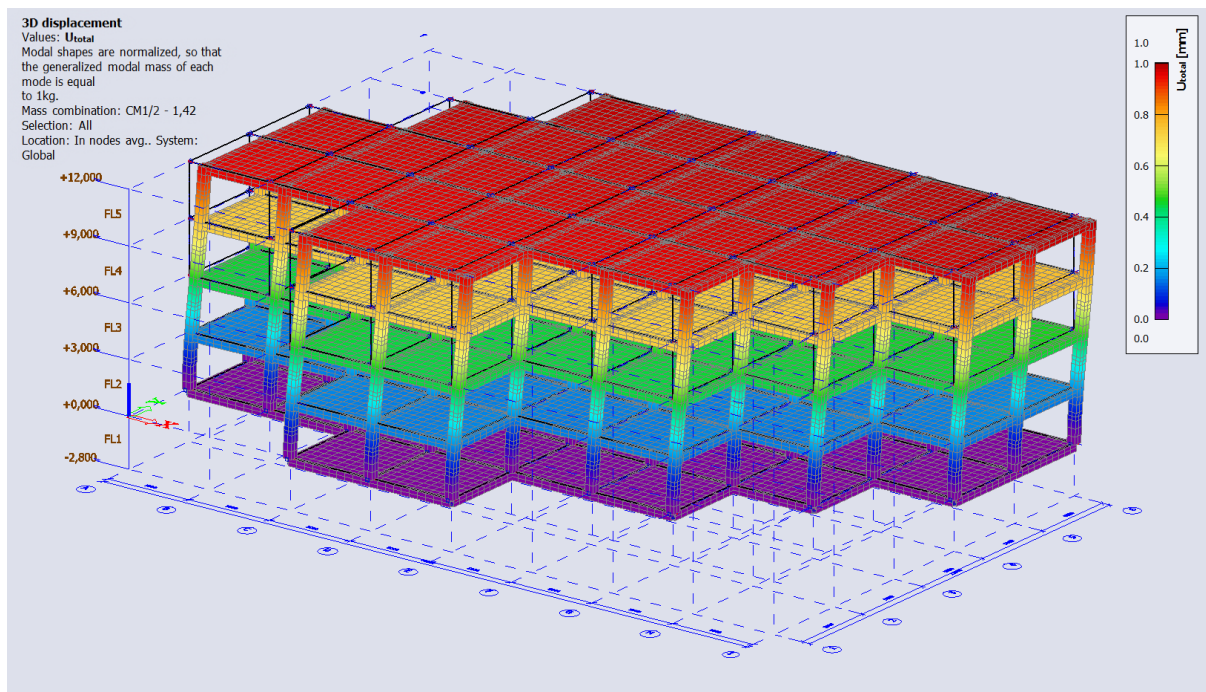
Kod seizmički izolirane zgrade, ukupna efektivna masa koja sudjeluje u gibanju iznosi 1,0 (100%). Što je u kontekstu seizmički izoliranih konstrukcija očekivan rezultat budući da izolatori omogućuju horizontalno kretanje cijele zgrade iznad ležaja.

Kod oba modela u 1. modu javlja se pomak u y smjeru, 2. mod vibracija daje pomak u x smjeru, a treći je torzija. Slika 7.9, slika 7.10 i slika 7.11 prikazuju pomake prva 3 moda konvencionalne zgrade, a slika 7.12, slika 7.13 i slika 7.14 daju prikaz pomaka zgrade sa seizmičkim izolacijskim ležajevima.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

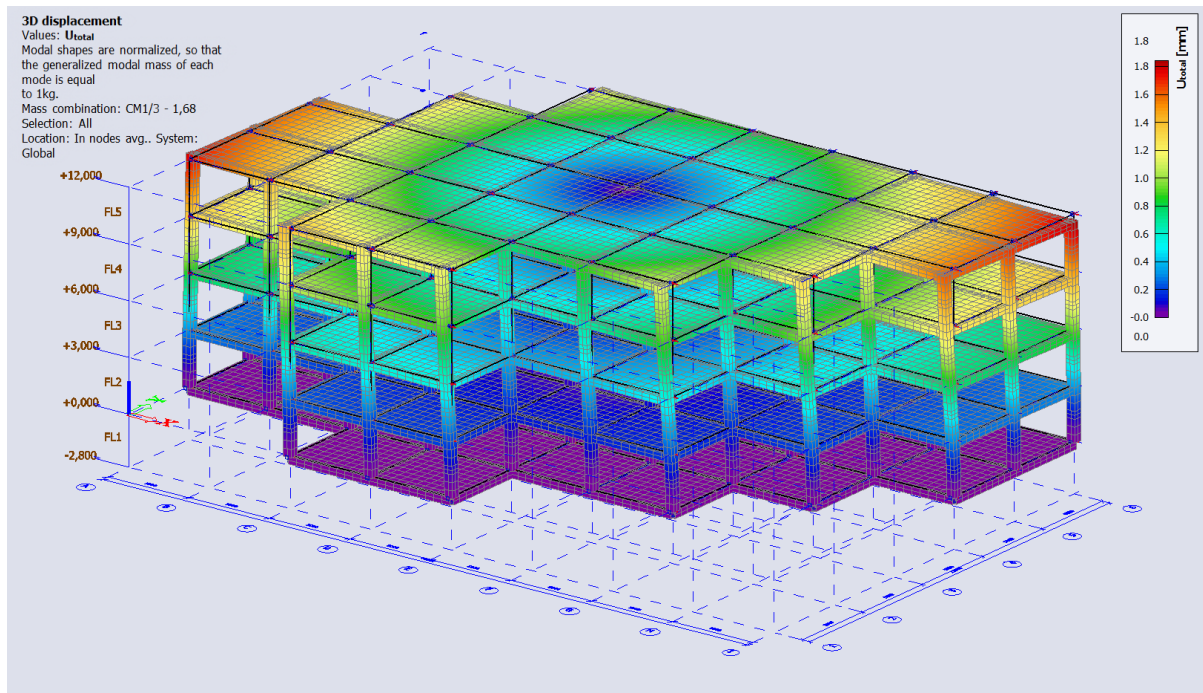


Slika 7.9 Trodimenzionalni prikaz pomaka za prvi mod vibracija zgrade sa fiksnim temeljima

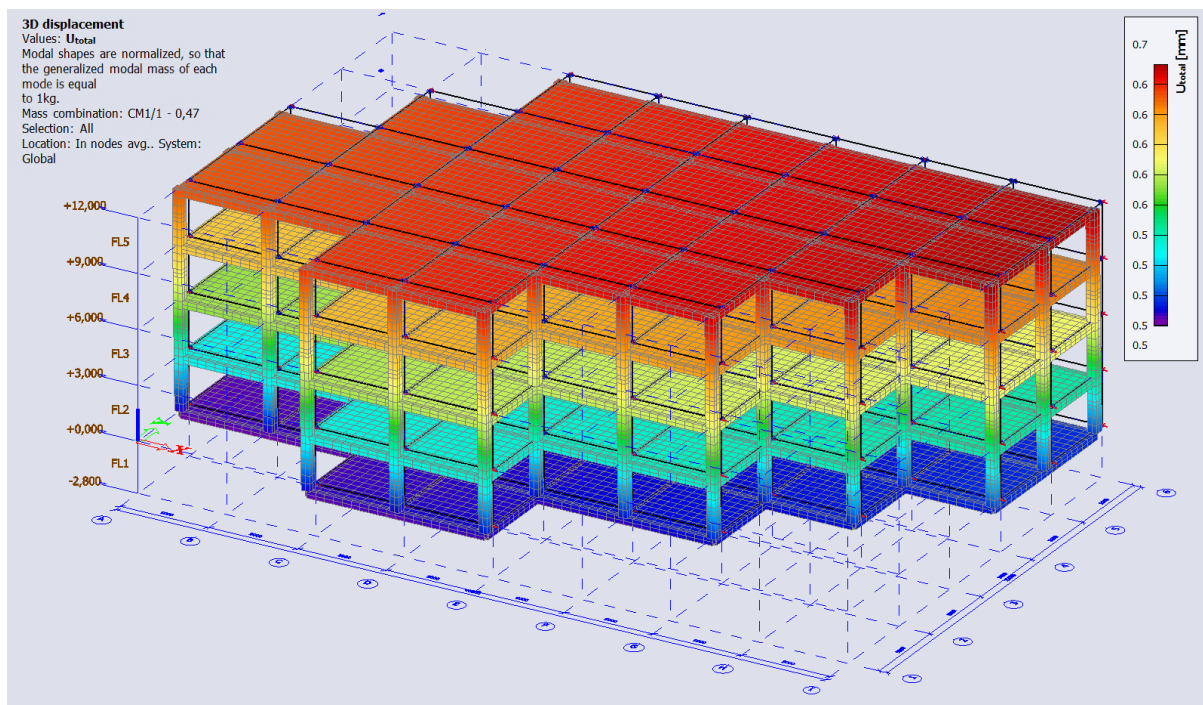


Slika 7.10 Trodimenzionalni prikaz pomaka za drugi mod vibracija zgrade sa fiksnim temeljima

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

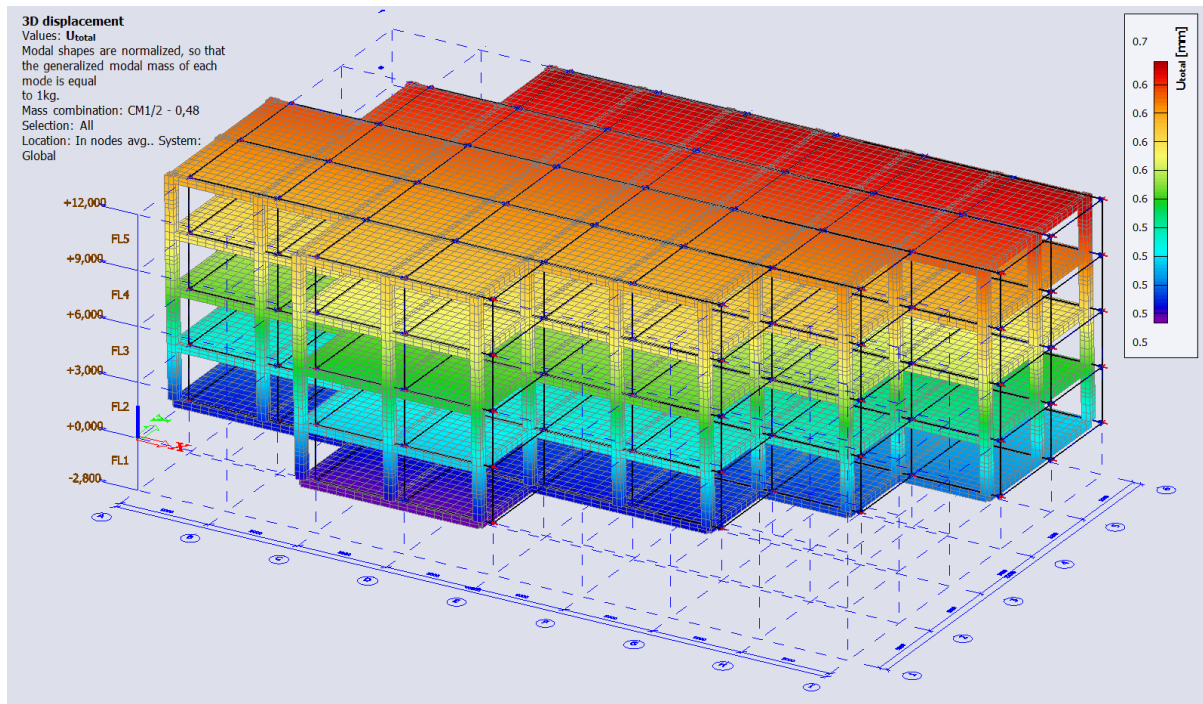


Slika 7.11 Trodimenzionalni prikaz pomaka za treći mod vibracija zgrade sa fiksnim temeljima

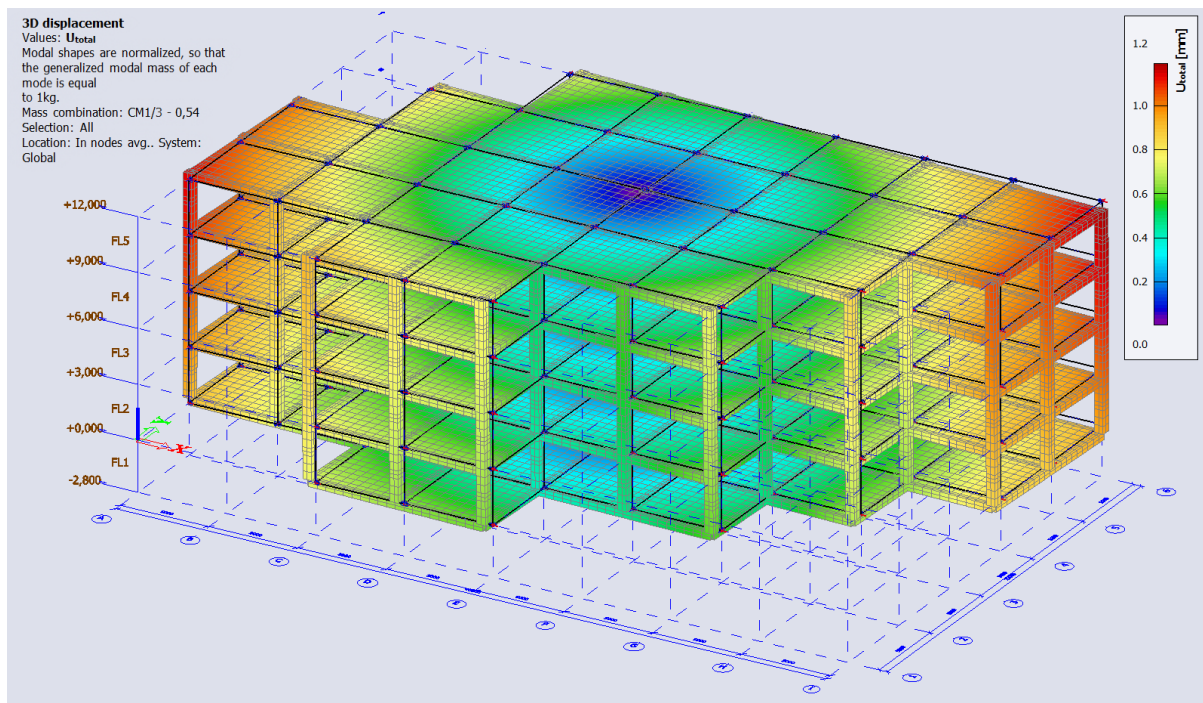


Slika 7.12 Trodimenzionalni prikaz pomaka za prvi mod vibracija zgrade sa seizmičkim izolacijskim ležajevima

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 7.13 Trodimenzionalni prikaz pomaka za drugi mod vibracija zgrade sa seizmičkim izolacijskim ležajevima



Slika 7.14 Trodimenzionalni prikaz pomaka za treći mod vibracija zgrade sa seizmičkim izolacijskim ležajevima

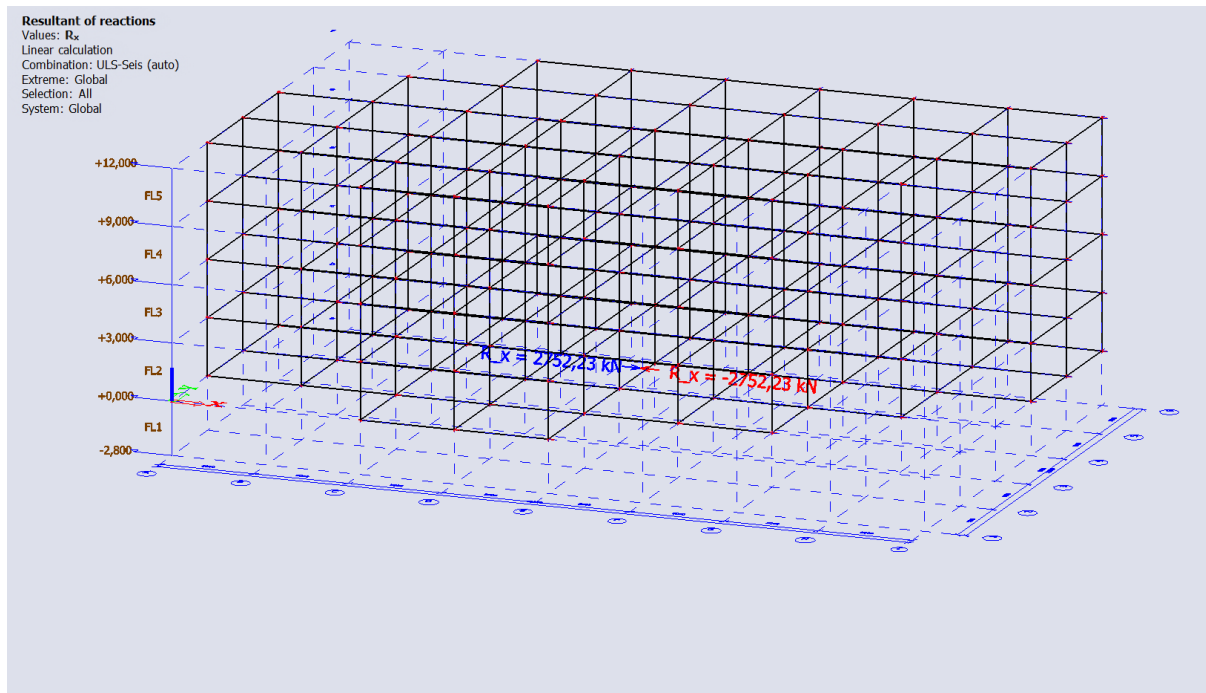
Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Iz prikazanih 3D pomaka lako je uočiti kako su kod konvencionalne zgrade mnogo veći međukatni pomaci i velik je pomak na vrhu zgrade u odnosu na dno koje je fiksno. Izolirana zgrada kreće se kao kruto tijelo na elastomernim ležajevima.

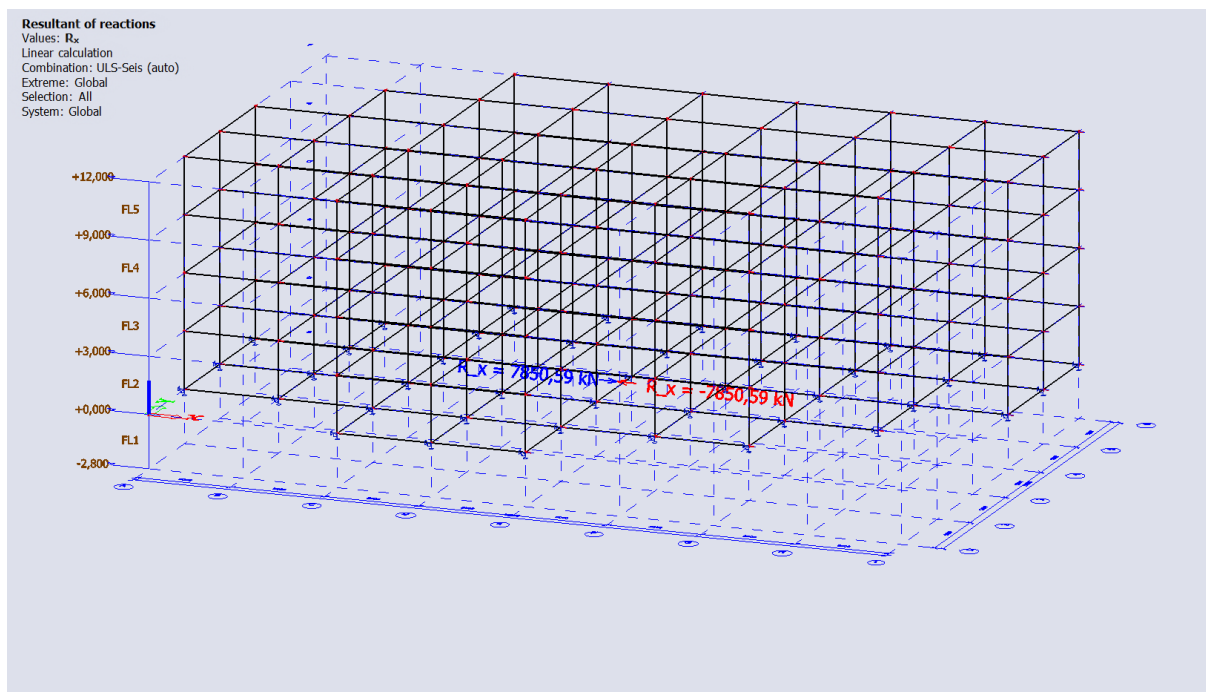
Kod fiksne zgrade javljaju se veća unutarnja naprezanja i veća opterećenja na konstrukciju iznad ležaja, što povećava rizik od oštećenja tijekom jakih seizmičkih djelovanja. Elastomerni ležajevi omogućuju veće horizontalne pomake, što doprinosi smanjenju dinamičkih opterećenja prenesenih na zgradu iznad ležaja zbog čega su takve zgrade sigurnije u potresu.

Ako se usporedi sila u podnožju (*base shear*) izolirane (slika 7.15) i neizolirane konstrukcije (slika 7.16), vidljivo je kako je kod izolirane konstrukcije smanjena, i to za otprilike 65%. Sila u podnožju izolirane zgrade iznosi 2752,23 kN, dok je ta vrijednost kod fiksne zgrade 7850,69 kN. Budući da je neizolirana zgrada, bez izolacijskih ležajeva, direktno povezana sa temeljem krutom vezom, seizmička sila će se prenijeti direktno na strukturu i njezine elemente. Izolacijski ležajevi smanjuju sile prenesene s tla na konstrukciju, oni omogućuju „odvajanje“ od tla tijekom potresa, čime se smanjuje razina opterećenja prenesena na samu konstrukciju.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada



Slika 7.15 Sila u podnožju (*base shear*) kod seizmički izolirane konstrukcije



Slika 7.16 Sila u podnožju (*base shear*) kod konstrukcije bez seizmičke izolacije

8 Zaključak

Unatoč tome što se sustavi seizmičke izolacije i dalje razvijaju, na temelju dosadašnjih istraživanja i primjena postojećih sustava može se zaključiti da sama ideja ima veliki potencijal te da će u budućnosti vjerojatno imati sve veću primjenu. Seizmička izolacija ima brojne prednosti, ali i nedostatke, koji će se u budućnosti zasigurno reducirati. Prednosti se očituju već u fazi projektiranja, omogućujući poboljšane arhitektonske značajke i smanjenje konstrukcijskih elemenata zbog manje potrebe za duktilnošću. Najbitnija prednost je smanjenje strukturalnih oštećenja prilikom potresnog djelovanja budući da izolacijski ležajevi omogućuju odvajanje zgrade od tla, a energiju gibanja apsorbiraju ležajevi. Seizmička izolacija pogodna je i za naknadnu ugradnju s obzirom da se prilikom radova na ugradnji ne ometa funkcionalnost zgrade.

Mana seizmičke izolacije je što se ona može koristiti isključivo kod konstrukcija na stabilnom tlu i moraju se izbjegavati područja blizu rasjeda kako ne bi došlo do vertikalnih ubrzanja u konstrukciji, a time i nepredviđenim oštećenjima. Seizmičke izolatore potrebno je redovito kontrolirati i održavati kako bi se zadržala njihova funkcionalnost. Blizina susjednih zgrada još je jedan aspekt na koji treba obratiti pozornost pri donošenju odluke o ugradnji seizmičkih izolatora. Izolirane konstrukcije u potresu imaju velike horizontalne pomake pa iz tog razloga može doći do oštećenja konstrukcije, susjedne građevine ili samih izolatora.

Rezultati provedene usporedbe ponašanja zgrade sa i bez seizmičke izolacije pokazali su kako je uvođenjem seizmičkih izolatora došlo do povećanja vlastitih perioda vibracija zgrade, što je povoljno, budući da veći period povećava stabilnost konstrukcije. Razlike u periodima između konstrukcije na fiksnim temeljima i seizmički izolirane konstrukcije najveće su u prva tri moda vibracija. Dodavanjem izolatora došlo je i do značajnog smanjenja sile u podnožju (*base shear-a*), odnosno sile koja se s tla prenosi u konstrukciju, a time se smanjilo i naprezanje u elementima konstrukcije i potreba za dodatnim ojačanjima. Kod konvencionalnih zgrada dolazi do međukatnih pomaka i najveća ubrzanja javljaju se na vrhu zgrade, dok seizmički izolirana zgrada deformacije doživljava prvenstveno u ležajevima, i ubrzanja po visini relativno su jednaka, s obzirom da se konstrukcija na seizmičkim izolacijskim ležajevima kreće kao kruto tijelo.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Kod konvencionalnih konstrukcija, u potresu dolazi do oštećenja nosivih i nenosivih konstrukcijskih elemenata, oštećenja instalacija i namještaja, u ekstremnim slučajevima i do ljudskih žrtava. U seizmički izoliranim konstrukcijama manje su vibracije pa su reducirana i oštećenja. Seizmički izolatori ponašaju se kao jastuci koji snažnu trešnju pretvaraju u blago podrhtavanje zbog čega su takve konstrukcije sigurnije, a građevinski inženjeri pri projektiranju takvih konstrukcija ispunjavaju jedan od osnovnih zadataka projektiranja – a to je zaštita ljudskih života.

9 POPIS LITERATURE

Barone, S., Vetturini, R. (2023) Seismic retrofit of strategic masonry structures with base isolation technique: The case study of „Giacomo Matteotti“ school building in Gubbio, Italy, U: Atalić, J., Kišiček, T., Uroš, M., Gidak, P., Šavor Novak, M., Haladin, I., Dasović, I., Demšić, M., Frančić Smrkić, M., Baniček, M. (ur.) *Proceedings of the 2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering*. Zagreb, Hrvatska. 22. - 24. ožujka 2023. Dostupno na: <https://crocee.grad.hr/event/2/contributions/306/> (Pristupljeno: 26. svibnja 2024.)

Charleson, A., Guisasola, A. (2017) *Seismic Isolation for Architects*. Abingdon, Oxon; New York: Routledge

Chatzidaki, F. (2011) *Optimum design of base isolated RC structures*. Magistarski rad. Atena: National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Interdisciplinary Postgraduate Program of Specialized Studies „Analysis and Design of Structures“, Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research

Christovasilis, I. P. (2006) *Seismic Analysis of Liquefied Natural Gas Tanks*. Dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/13-View-of-LNG-tank-at-Revithoussa-Island-in-Greece-during-construction_fig6_315744218 (Pristupljeno: 8. lipnja 2024.)

Cover story: Pillars of Strength (2011) *Highlighting Japan*. Dostupno na: https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/201112/201112_01.html (Pristupljeno: 6. lipnja 2024.)

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Di Trocchio, G., Zaccari, M., D'Amato, M., Gigliotti (2023) Seismic retrofit of strategic masonry structures with base isolation technique: The case study of „Giacomo Matteotti“ school building in Gubbio, Italy, U: Atalić, J., Kišiček, T., Uroš, M., Gidak, P., Šavor Novak, M., Haladin, I., Dasović, I., Demšić, M., Frančić Smrkić, M., Baniček, M. (ur.) *Proceedings of the 2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering*, Zagreb, Hrvatska. 22. - 24. ožujka 2023. Dostupno na: <https://crocee.grad.hr/event/2/contributions/377/> (Pristupljeno: 26. svibnja 2024.)

Ferraioli, M., Mandara, A. (2017) Base Isolation for Seismic Retrofitting of a Multiple Building Structure: Design, Construction, and Assessment. *Mathematical Problem sin Engineering [online]*, vol. 2017. Dostupno na: [Base Isolation for Seismic Retrofitting of a Multiple Building Structure: Design, Construction, and Assessment - Ferraioli - 2017 - Mathematical Problems in Engineering - Wiley Online Library](#) (Pristupljeno: 25. svibnja 2024.)

FIPMEC katalog proizvoda. Dostupno na: <https://www.fipmec.it/en/download-area/catalogues/#category-53> (Pristupljeno: 29. kolovoza 2024.)

Ghasemi, M., Talaeitaba, S. B. (2020) On the effect of seismic base isolation on seismic design requirements of RC structures. *Structures*. 28 (2020) 2244-2259

Hrvatski zavod za norme, HRN EN 1998-1_2011_hr

Hussain, S. A., Hafeez, M. A. (2016) Implementation of seismic isolation system in r.c. buildings. *Global Journal of Engineering Science and Researches*. 3(10)

Ismail, M. (2017) Seismic isolation of structures. Part I: Concept, review and a recent development. *Hormigón y Acero*. 69(285), 147-161

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Kircher, C. A. (2008) Seismic protection of museum buildings using base isolation and damping system. U: *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China. 12. – 17. listopada 2008.

Kostikas, C., Dalakiouridou, M., Giarlelis, C., Lamprinou, E. (2018) The Onassis House of Letters and Arts, Greece: A design Overview. *Structural Engineering International*. 20(1), 58-61

Makris, N. (2018) Seismic isolation: Early history. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 48(2), 1-15

Mayes, R. L., Naeim, F. (2001) Design of Structures with Seismic Isolation. U: Naeim, F. (ur.). *The Seismic Handbook*. Drugo izdanje. Springer, Boston, MA, 723-755

Mitsui Fudosan Co., Ltd., Kajima Corporation (2013), *Halving the Shaking Due to Long-Period Earthquake Ground Motion at Shinjuku Mitsui Building Japan's First Rooftop-Installed Ultra-Large Vibration Control Device*. Dostupno na: <https://www.mitsuifudosan.co.jp/english/corporate/news/2013/0729/> (Pristupljeno: 7. lipnja 2024.)

Mostaghel, N. and Khodaverdian, M. (1987) Dynamics of resilient-friction base isolator (RFBI), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15, 379–390.

Naeim, F., Kelly, J. M. (1999) *Design of seismic isolated structures: From Theory to Practice*, Sedinjene Američke Države, New York, John Wiley & Sons, Inc.

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Oiles Corporation, *Friction Pendulum System, FPS*, Dostupno na: https://www.oiles.co.jp/en/products/damping_isolation/building/fps/ (Pristupljeno: 5. lipnja 2024.)

Oiles Corporation, *Methods of seismic Isolation*, Dostupno na: https://www.oiles.co.jp/en/products/damping_isolation/building/residence/seismic-isolation/structure/ (Pristupljeno: 5. lipnja 2024.)

Roy, S. S., Dash, S. R. (2018) Dynamic behavior of multispan continuous girder bridge with isolation bearings. *International Journal of Bridge Engineering*. 6(2), 01-23

Sarkisian, M., Lee, P., Long, D., Shook, D., Díaz, A. (2013) Experiences with Friction Pendulum seismic isolation in California, U: Brebbia, C. A., Hernández, S. (ur.) *Earthquake resistant engineer structures*. Deveto izdanje, Southampton, Ujedinjeno Kraljevstvo, WIT Press. 357-368

Skinner, R. I., Robinson, W. H., McVerry, G.H. (1993) *An introduction to Seismic Isolation*. Chichester, Ujedinjeno Kraljevstvo, John Wiley & Sons

Subramanian, N. (2023) *Resilient Earthquake Resistant Buildings of Japan*, Dostupno na: <https://www.linkedin.com/pulse/resilient-earthquake-resistant-buildings-japan-narayanan-rmjxe> (Pristupljeno: 9. lipnja 2024.)

10 POPIS SLIKA

Slika 1.1 Odgovor izolirane i konvencionalne konstrukcije na potresnu silu (Charleson, Guisasola, 2017.).....	8
Slika 1.2 Ponašanje konstrukcije na fiksnim temeljima pri djelovanju seizmičke sile, s visinom raste utjecaj bočne sile, veliki su međukatni pomaci (Mayes, Naeim, 2001.).....	9
Slika 1.3 Ponašanje konstrukcije s izolacijskim sustavom pri djelovanju seizmičke sile, nema povećanja utjecaja bočne sile s visinom, međukatni pomaci su minimalni (Mayes, Naeim, 2001.).....	9
Slika 2.2 Usporedba pomicanja izolirane zgrade i zgrade na fiksnim temeljima u odnosu na početni položaj (Charleson, Guisasola, 2017.).....	13
Slika 2.3 Seizmički izolirana konstrukcija Julesa Touaillona iz 1870. godine (Makris, 2018.)	15
Slika 2.5 Prikaz konstrukcije <i>Tokyo's Sky Tree</i> (<i>Hightlight Japan</i> , 2011.).....	19
Slika 2.6 <i>Skinjuku Mitsui</i> neboder, dijelovi uređaja postavljenog na vrh zgrade za kontrolu vibracija, sastoji se od njihala (kablova i masa) i prigušivača (<i>Mitsui Fudosan Co., Ltd., Kajima Corporation</i> , 2013.).....	20
Slika 2.7 Prikaz ležajeva spremnika za ukapljeni plin (LNG - liquefied natural gas) na otoku Revinthosa u Grčkoj tijekom gradnje (Christovasilis, 2006.).....	22
Slika 2.8 Pojava momenta drugog reda zbog ekscentričnosti aksijalnog opterećenja kod kliznog ležaja (Trocchio, Zaccari i dr., 2023.).....	23
Slika 2.9 Eksperimentalna histerezna petlja ravnog kliznog ležaja sa čeličnim histereznim prigušivačima (FIPMEC katalog proizvoda).....	24
Slika 2.10 Ležaj seizmičke izolacije s trenjem njihala (Sarkisian, et al. 2013.).....	25
Slika 2.11 Dijelovi FPS ležaja (<i>Oiles Corporation</i> , katalog proizvoda).....	25
Slika 2.12 Klizni izolacijski ležaj njihala (Chatzidaki, 2011).....	26

Primjena seizmičke izolacije
 u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Slika 2.14 Ležaj s trenjem elastične baze (Mostaghel, Khodaverdian, 1987.).....	27
Slika 2.15 Histerezna petlja elastomernog ležaja (FIPMEC katalog proizvoda).....	28
Slika 2.16 Dijelovi gumenog ležaja (Roy, Dash, 2018.).....	29
Slika 2.17 Dijelovi ležaja od olova i gume (Satya Sapath, Dash, 2018.).....	30
Slika 2.18 Histerezna petlja gumenog ležaja s olovnom trnom (FIPMEC katalog proizvoda)	31
Slika 2.19 Glavna zgrada <i>Shimizu Corporation Institute of Technology</i> u Tokyo-u izolirana sa 6 olovno-gumenih ležajeva (Charleson, Guisasola, 2017).	34
Slika 4.1 Spektar odziva koji prikazuje odnos akceleracije odgovora konstrukcije i prirodnog perioda konstrukcije (Charleson, Guisasola, 2017.).....	38
Slika 4.2 Usporedba spektra odziva konvencionalne i izolirane konstrukcije (Charleson, Guisasola, 2017.).....	38
Slika 4.3 Jednoetažna linearna konstrukcija bez prigušenja na fleksibilnim ležajevima (Ismail, 2017.)	39
Slika 4.4 Statički sustav jednoetažne linearne konstrukcije bez prigušenja na fleksibilnim ležajevima (Ismail, 2017.).....	40
Slika 5.1 Histerezna petlja sila-pomak linearnog prigušenog izolatora (Skinner, Robinson, McVerry, 1993).....	45
Slika 5.2 Histerezna petlja sila-pomak bilinearnog izolatora s Coulombovim prigušivačem (Skinner, Robinson, McVerry, 1993).....	45
Slika 5.3 Parametri histerezne petlje (Naeim, Kelly, 1999.).....	46
Tablica 5.1 Redukcijski faktor ovisno o statičkom sustavu (Chatzidaki, 2011.).....	48
Slika 6.1 Izgradnja New de Young muzeja sa seizmičkim izolacijskim ležajevima, klizni ležaj (lijevo), elastomerni ležaj (desno) (Kircher, 2013.).....	63
Slika 6.2 Klizni ležaj i hidraulički prigušivač (Kircher, 2013.).....	63

Primjena seizmičke izolacije
 u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Slika 6.3 Tlocrt i presjek izvorne zgrade bolničkog centra u Avellinu (Ferraioli, Mandara, 2017).....	64
Slika 6.4 Postupak ugradnje izolacijskih ležajeva pri rekonstrukciji bolničkog centra u Avellinu (Ferraioli, Mandara, 2017).	67
Slika 7.1 Tlocrt podruma.....	69
Slika 7.2 Tlocrt prizemlja, prvog, drugog i trećeg kata.....	69
Slika 7.3 Presjek A-A.....	70
Slika 7.4 Presjek B-B	70
Slika 7.6 Maksimalni horizontalni pomak za kombinaciju graničnog stanja nosivosti u seizmičkim uvjetima (ULS-Seis)	72
Slika 7.7 Tablica iz FIP MEC kataloga ležajeva; za pomake ± 150 mm (FIP MEC katalog proizvoda).....	72
Tablica 7.1 Tablica rezultata modalne analize konstrukcije sa seizmičkom izolacijom	73
Tablica 7.2 Tablica rezultata modalne analize konstrukcije bez seizmičke izolacije.....	73
Slika 7.8 Usporedba vlastitih perioda u prvih 10 moda vibracija.....	74
Slika 7.9 Trodimenzionalni prikaz pomaka za prvi mod vibracija zgrade sa fiksnim temeljima	75
Slika 7.10 Trodimenzionalni prikaz pomaka za drugi mod vibracija zgrade sa fiksnim temeljima	75
Slika 7.11 Trodimenzionalni prikaz pomaka za treći mod vibracija zgrade sa fiksnim temeljima	76
Slika 7.12 Trodimenzionalni prikaz pomaka za prvi mod vibracija zgrade sa seizmičkim izolacijskim ležajevima.....	76
Slika 7.13 Trodimenzionalni prikaz pomaka za drugi mod vibracija zgrade sa seizmičkim izolacijskim ležajevima.....	77

Primjena seizmičke izolacije u protupotresnoj izgradnji i obnovi zgrada

Slika 7.14 Trodimenzionalni prikaz pomaka za treći mod vibracija zgrade sa seizmičkim izolacijskim ležajevima.....	77
Slika 7.15 Sila u podnožju (<i>base shear</i>) kod seizmički izolirane konstrukcije.....	79
Slika 7.16 Sila u podnožju (<i>base shear</i>) kod konstrukcije bez seizmičke izolacije.....	79

11 POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Redukcijski faktor ovisno o statičkom sustavu (Chatzidaki, 2011.).....	48
Tablica 7.1 Tablica rezultata modalne analize konstrukcije sa seizmičkom izolacijom	73
Tablica 7.2 Tablica rezultata modalne analize konstrukcije bez seizmičke izolacije.....	73