

V. prof. dr Ratko SALATIĆ, dipl.grad. inž.¹
V. prof. dr Rastislav MANDIĆ, dipl.grad. inž.¹
Luka POPRŽEN, dipl. grad. inž.²

SEIZMIČKA IZOLACIJA ZGRADA

0352-2733,46 (2013), p. 1-69

UDK: 699.841

PREGLEDNI (NAUČNI) ČLANAK

Rezime

Sistem seizmičke izolacije je savremeni princip zaštite građevinskih objekata od dejstva zemljotresa. Reč je o grupi pasivnih kontrolnih sistema, koji se danas pored sistema dodatnih prigušivača, najčešće primenju za kontrolu ponašanja konstrukcija pri dejstvu zemljotresnog opterećenja. Primena seizmičke izolacije za određenu grupu konstrukcija je efikasna u ispunjavanju savremenih principa seizmičkog projektovanja u zaštiti kako konstruktivnih, tako i nekonstruktivnih elemenata objekta.

U radu je izložen princip redukcije odgovora konstrukcije primenom seizmičke izolacije. Detaljno

¹ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

² MD-Perić Company, Komitska bb, Bijeljina, R. Srpska, BIH
Rad primljen septembra 2013.

je obrađen koncept sistema seizmičke izolacije koji se zasnivaju naelastomernim ležištima. Na primeru izabrane konstrukcije, koja je modelirana i kao kruto oslonjena i kao izolovana elastomernim ležištima sa olovnim jezgrom, data je kvalitativna i kvantitativna ocena redukcije odgovora konstrukcije pri seizmičkom opterećenju.

Ključne reči: seizmička izolacija, elastomerna ležišta

BASE ISOLATION IN BUILDINGS

Abstract

Seismic isolation is a modern method of protection of buildings in earthquake zones. The system belongs to the group of passive control systems, and in addition to the system of additional dampers, it is the most common method of structural control of buildings subjected to earthquake excitations. The application of seismic isolation is effective way in meeting modern seismic design principles on preventing damage of structural and non-structural elements in buildings.

The paper presents the method of reduction of structural response using seismic base isolation. The concept of seismic isolation system based on elastomeric bearings is analyzed in detail. In an illustrative example of a six story building, the implementation of seismic

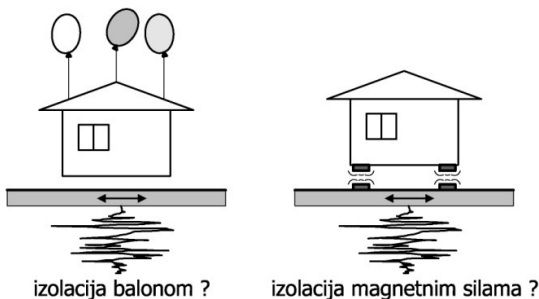
isolation with elastomeric bearings with lead core is studied. The obtained results clearly demonstrate the beneficial influence of seismic isolation on reduction of structural response due to seismic actions.

Key words: seismic isolation, elastomeric bearings

1. UVOD

Sistemi seizmičke izolacije se zasnivaju na relativno jednostavnoj ideji – što više odvojiti (izolovati) konstrukciju od kretanja tla (pobude), tokom zemljotresa.

U graničnoj teorijskoj imaginaciji, potpuno odvajanje bi značilo da konstrukcija „lebdi” za vreme pomeranja tla pri dejstvu zemljotresa, tako da on ne bi imao nikakvo dejstvo na konstrukciju (*Slika 1*).



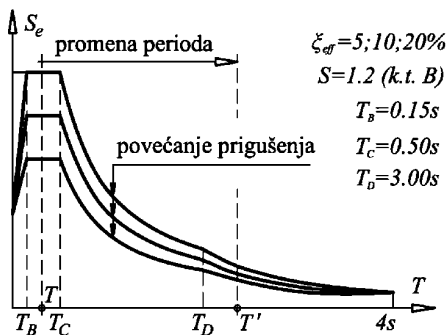
Slika 1.- Potpuna izolacija konstrukcije[8]

Ideja da se konstrukcija učini što manje osetljivom na kretanja tla realizuje se njenim oslanjanjem na skup posebno konstruisanih ležišta, odnosno izolatora, čime se konstrukcija na poseban način odvaja od tla. Ležišta se obično ugrađuju u jednoj ravni, koja se naziva ravan izolacije kojom se celokupna konstrukcija deli na: podkonstrukciju i nadkonstrukciju (*Slika 4*). U zgradarstvu najčešće se ravan izolacije nalazi u osnovi-bazi konstrukcije, pa se zbog ovoga, seizmička izolacija često naziva i baznom izolacijom.

Najznačajniji efekti kojima sistemi izolacije utiču na odgovor konstrukcije pri dejstvu zemljotresa su ograničenja maksimalne poprečne sile i povećanje fleksibilnosti konstrukcije. Prvim efektom ležišta ograničavaju iznos sile koja može da se prenese sa konstrukcije na temelj. Iznos maksimalne sile koja se ovako prenosi kontroliše se maksimalnom silom trenja u frikcionim površinama ležišta koja se suprostavlja kretanju. Drugim efektom ležišta svojom fleksibilnošću menjaju dinamičke karakteristike konstrukcije i samim tim njen odgovor na seizmičko opterećenje. Promena dinamičkih karakteristika konstrukcije podrazumeva da ležišta svojom fleksibilnošću povećaju fleksibilnost konstrukcije i tako obezbede produženje osnovnog perioda oscilovanja.

Na osnovu registracija dogođenih zemljotresa pokazalo se da veliki broj zemljotresa ima predominantne periode oscilovanja manje od jedne sekunde. Veliki broj

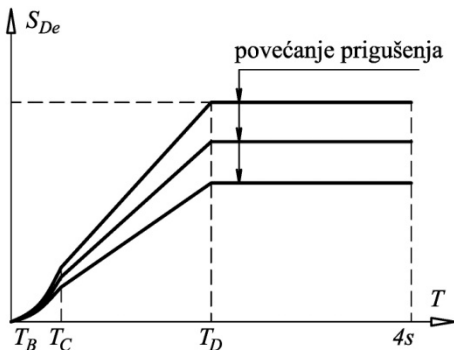
konstrukcija zgrada ima dužinu trajanja osnovnog tona upravo blisko ovom vremenskom opsegu, zbog čega se mogu javiti efekti rezonancije.



Slika 2.- Elastični spektar po Evrokodu 8

Kao što se može uočiti iz oblika spektra (Slika 2), u cilju smanjenja seizmičkih sila, tj. ubrzanja spratnih masa, poželjno bi bilo projektovati konstrukciju, tako da ona ima duži period osnovnog tona. To je moguće ostvariti samo povećanjem fleksibilnosti konstrukcije, što ima za posledicu povećanje relativnih pomeranja spratnih masa (Slika 3).

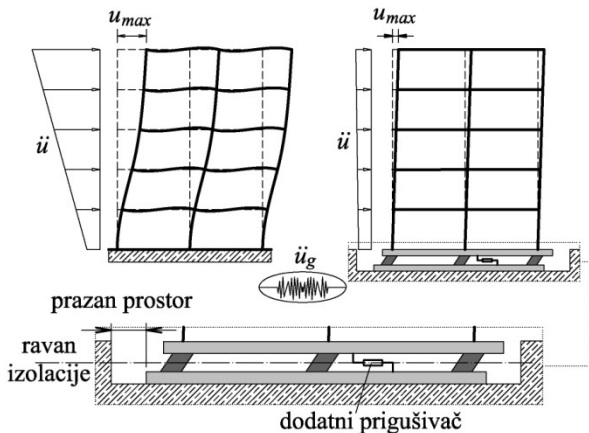
Tradicionalnim pristupom aseizmičkog projektovanja, koji se oslanja na optimalan odnos nosivosti i duktilnosti, nemoguće je obezbediti istovremeno smanjenje međuspratnih pomeranja i ubrzanja tavanica od kojih za-



Slika 3.- Elastični spektar pomeranja po Evrokodu 8

više vrednosti inercijalnih sila. Smanjenje krutosti konstrukcije, odnosno produženje perioda osnovnog tona bi bilo povoljno zbog manjih ubrzanja tavanica, ali to rezultuje i povećanim međuspratnim pomeranjima. S druge strane, povećanjem krutosti smanjuju se međuspratna pomeranja, ali su veća ubrzanja tavanica, odnosno seizmičke inercijalne sile. Oslanjanje konstrukcije na fleksibilna ležišta upravo ima za cilj simultanu redukciju i međuspratnih pomeranja i ubrzanja tavanica.

U ravni izolacije formira se zona male poprečne krutosti i na ovaj način se lokalizuje potrebna fleksibilnost, zahvaljujući kojoj se realizuje produženje perioda prvog tona oscilovanja. Produženjem osnovnog tona smanjuju se ubrzanja tavanica, odnosno veličine inercijalnih sila a



Slika 4.- Prikaz osnovnog tona oscilovanja i distribucije ubrzanja po visini konstrukcije.

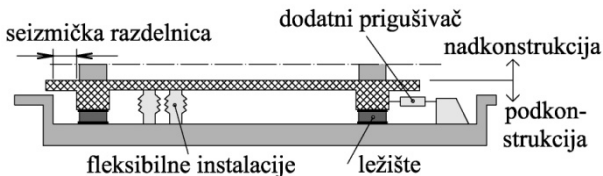
zahvaljujući dovoljno krutoj nadkonstrukciji smanjuju se i relativna spratna pomeranja.

Izgled prvog tona oscilovanja ravanskog okvira na fleksibilnim ležištima i bez njih je prikazan na *Slici 4*. Zbog malih deformacija nadkonstrukcije (konstrukcije iznad ravni izolacije), njeno kretanje u toku zemljotresa može biti opisano kao kretanje krutog tela na ležištima, što bi odgovaralo sistemu sa jednim stepenom slobode, pri čemu poprečna krutost odgovara krutosti ležišta, dok je masa jednake masi nadkonstrukcije. U ovakvom sistemu

prvi ton oscilovanja je dominantan i naziva se izolatorski ton, dok se viši tonovi nazivaju konstrukcijski tonovi. Dominantnost prvog tona u odgovoru je izraženija što je veća razlika osnovnog tona kruto i fleksibilno oslonjene konstrukcije.

S obzirom na postojanje fleksibilne zone u bazi konstrukcije, određenim oblikovanjem ležišta ili ugradnjom posebnih uređaja mora se obezbediti prenos opterećenja manjeg intenziteta (eksploatacionih opterećenja), recimo dejstva vetra, bez značajnih deformacija na ležištima. Sistem izolacije mora imati sposobnost vraćanja u ravnotežni položaj u kojem je bio pre zemljotresa, odnosno kapacitet recentriranja. Pored toga, svi instalacioni vodovi koji prolaze ravan izolacije moraju biti dovoljno fleksibilni da isprate relativna pomeranja krajeva ležišta u toku zemljotresa. Prostor u kojem su montirana ležišta mora da bude dovoljno velik za kontrolu i servisiranje ležišta (Slika 5).

Sistemi seizmičke izolacije su efikasan način ublažavanja dejstva zemljotresa pod određenim uslo-



Slika 5.- Sistem seizmičke izolacije kod zgrada

vima, ali nisu univerzalno rešenje koje je primenjivo za sve konstrukcije. U nekim slučajevima upotreba seizmičke izolacije ima veoma mali efekat, dok postoje i oni u kojim je njihova primena neprihvatljiva. Ovde se navode neki problemi kojima se mora posvetiti posebna pažnja u preliminarnoj fazi projektovanja.

- Velika relativna pomeranja koja se dešavaju u ravni izolacije mogu biti ograničavajući faktor primene, ako se oko objekta ne može da se obezbedi dovoljno slobodnog prostora što može biti prouzrokovano postojanjem susednih objekata, saobraćajnica i slično.
- Produženje osnovnog tona oscilovanja, koje se postiže seizmičkom izolacijom, ima smisla samo ako razmatrana konstrukcija ima takvu krutost da je osnovni ton dovoljno kratak i da dominira odgovorom. Što je izraženija razlika krutosti sistema sa i bez ležišta, to je i efekat izolacije naglašeniji. Kod visokih zgrada konstrukcija je, po pravilu, dovoljno fleksibilna i uticaj viših tonova je sve izraženiji, tako da bi efekat seizmičke izolacije bio izuzetno mali. Pored ovoga, za ovako visoke objekte dejstvo vetra je najčešće dominantno horizontalno opterećenje, a spomenuto je da ono treba biti preneto na temelje bez značajnijih pomeranja ležišta. Kod ovakvih konstrukcija povoljnije je rešenje ugradnja prigušivača, naročito viskoznih fluidnih prigušivača ili prigušivača sa

- podešenom masom, s obzirom da mogu poslužiti i za ublažavanje dejstva vetra.
- Fleksibilna ležišta su obično napravljena od elastomera koji kao materijal nema veliki kapacitet prihvatanja sila zatezanja. Ovo može predstavljati problem kod konstrukcija čija je visina velika u odnosu na manju dimenziju osnove, odnosno kod kojih je pri zemljotresu moguća pojava odizanja jednog kraja usled momenata preturanja.
 - Ako je na datoj lokaciji moguća pojava zemljotresa dužih predominantnih perioda upotreba seizmičke izolacije bi imala kontraefekat. Seizmička izolacija ima za cilj smanjenje frekvencije osnovnog tona koji bi u ovom slučaju uveo konstrukciju u područje rezonantnih frekvencija. Duboke naslage mekog tla amplifikuju niže frekvencije seizmičkih talasa i predstavljaju potencijalan problem za primenu seizmičke izolacije. Generalno, što je tlo kruće, to je pouzdanija primena seizmičke izolacije.

2. TIPOVI SISTEMA SEIZMIČKE IZOLACIJE

Sistem seizmičke izolacije je skup elemenata kojim se ostvaruje modifikacija ponašanja konstrukcije u toku zemljotresa. Iako prva predložena rešenja ovakvih sistema imaju dužu istoriju, intenzivan razvoj počinje sedamdesetih godina prošlog veka. Od tada, pa do danas,

predloženi su mnogi načini realizacije i mnoštvo različitih uređaja sistema izolacije. Mnogi od ovih predloga su ostali samo na nivou ideje, neki su bili predmet teorijskih i laboratorijskih istraživanja, a samo neki od njih su doživeli svoju praktičnu primenu. Sistemi izolacije koji su do sad praktično korišćeni obično se oslanjaju na jednostavna i pouzdana rešenja. Najzastupljeniji sistemi se baziraju na upotrebi elastomernih ležišta. Pored ovih, primenjivana su i rešenja sa različitim vrstama kliznih ležišta i ona koja kombinuju dve vrste ležišta. U određenim slučajevima jedan sistem seizmičke izolacije može da sadrži i dodatne prigušivače.

Ovo poglavlje sadrži pregled najzastupljenijih vrsta ležišta u sistemima seizmičke izolacije i to kroz opis upotrebljenih materijala, konstrukcije, prednosti i ograničenja pojedinih vrsta ležišta. Generalno, sistemi seizmičke izolacije treba da imaju sledeća osnovna svojstva:

- Vertikalna nosivost i odgovarajuća vertikalna krutost, moraju biti dovoljno veliki da se odgovor konstrukcije za vertikalna pomeranja tla ne menja značajno u odnosu na isti bez izolacije;
- Sistemi bazirani na elastomernim ležištima treba da imaju dovoljno malu horizontalnu krutost za produženje perioda osnovnog tona oscilovanja. Sistemi bazirani na kliznim ležištima treba da imaju dovoljno mali koeficijent trenja;
- Prigušenje izolatorskog sistema mora biti dovoljno veliko, da bi se smanjile amplitude pomeranja i

- ublažili eventualni rezonantni efekti za dejstva zemljotresnih opterećenja;
- Mora biti omogućena sposobnost recentriranja, radi vraćanja konstrukcije u položaj u kojem se nalazila pre dejstva zemljotresa;
 - Mora biti obezbeđena dovoljno velika inicijalna horizontalna krutost za dejstva manjih poprečnih opterećenja, poput vetra i slabijih zemljotresa.

2.1 Elastomerna ležišta

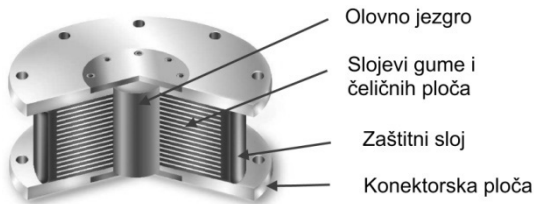
Do danas najprimenjivani i još uvek najpopularniji sistemi seizmičke izolacije su oni koji se baziraju na upotrebi lameliranih elastomernih ležišta (EL) uz određen mehanizam za disipaciju energije. Zavisno od vrste upotrebljenog elastomera i konstrukcije ležišta elastomerna ležišta se mogu podeliti u sledeće grupe:

- EL niskog prigušenja (ELNP) (*Low-damping rubber bearings*)
- EL sa olovnim jezgrom (ELPB) (*Lead rubber bearings*)
- EL visokog prigušenja (ELVP) (*High-damping rubber bearings*).

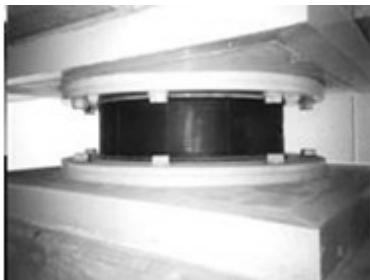
2.1.1. Emedunaslov 3 elastomerna ležišta niskog prigušenja (ELNP) i elastomerna ležišta sa olovnim jezgrom (ELPB)

Elastomerna ležišta niskog prigušenja se konstruišu od slojeva prirodne ili veštačke gume koji su odvojeni

čeličnim pločama (*Slika 6*). Na svojim krajevima imaju konektorske ploče koje služe za vezivanje sa ostalim delovima konstrukcije. Slojevi gume, čelične ploče i konektorske ploče se spajaju u procesu vulkanizacije čime se dobija kompozit ova dva materijala. Po obimu ležišta potrebno je izraditi zaštitni sloj gume radi sprečavanja korozije čeličnih ploča i zaštite same gume od štetnih efekata spoljne sredine. Obično se proizvode u varijantama sa kružnom ili pravougaonom bazom.



Slika 6.- Konstrukcija ELPB ležišta

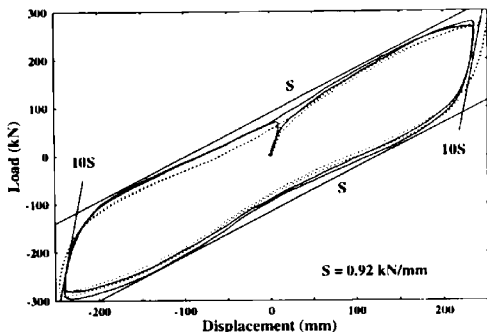


Slika 7.- Ugrađeno ležište

Čelične ploče unutar ležišta obezbeđuju njegovu vertikalnu krutost i nosivost i sprečavaju velike deformacije slojeva gume. Horizontalna fleksibilnost je obezbeđena slojevima gume između čeličnih ploča i zavisi od modula smicanja i ukupne visine elastomera. Za deformacije klizanja od 100%, veza smičuća sila-pomeranje pokazuje veoma malo odstupanja od linearnog modela. Prigušenje ležišta ove vrste u zavisnosti od vrste gume je 2-5% od kritičnog. Linearnost veze sila-pomeranje olakšava matematičko modeliranje odnosno omogućava primenu linearne analize odgovora konstrukcije za dejstva zemljotresnog opterećenja. Kao pozitivne osobine ovih ležišta može se navesti i to da se njihove mehaničke karakteristike ne menjaju značajno kroz vreme, nisu posebno osetljivi na brzinu i istoriju opterećenja i temperaturu, a tehnologija njihove proizvodnje je dobro poznata.

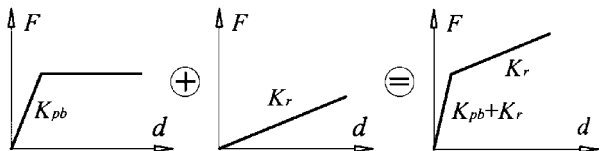
Nedostaci ELNP ležišta su malo sopstveno prigušenje i mala inicijalna horizontalna krutost. Potreban nivo prigušenja se može obezbediti ugradnjom dodatnih prigušivača. Inicijalna krutost se može postići ugrađivanjem osigurača koji vezuju krajeve ležišta ili podkonstrukciju sa nad konstrukcijom. Osigurači mogu da budu čelični elementi koji će po dostizanju sile na granici razvlačenja poslužiti kao metalni prigušivači.

Prva elastomerna ležišta sa olovnim jezgrom konstruisao je Bill Robinson 1977 na Novom Zelandu. ELPB danas su u praksi najprimenjivanija vrsta ležišta. Ona su konstruisana od EL niskog prigušenja i od jednog ili više cilindričnih olovnih jezgara.



Slika 8.- Zavisnost sila-pomeranje dobijena ispitivanjem ELPB ležišta [9]

Svrha ugradnje olovnog jezgra u ELNP je otklanjanje nedostataka vezanih za malo sopstveno prigušenje i malu inicijalnu horizontalnu krutost. U sistemima seizmičke izolacije olovo je predhodno upotrebljavano za izradu metalnih prigušivača koji su ugrađivani nezavisno od ležišta.



Slika 9.- Idealizovano ponašanje olovnog jezgra, ELNP i zbirno kod ELPB

Ugrađivanjem olovnog cilindra u ELNP dva nezavisna elementa su objedinjena u jedan, pri čemu je olovo osnovi izvor disipacije energije. Olovno jezgro se utiskuje u predhodno izbušenu rupu u ležištu. Da bi se ostvarilo dobro naleganje između čeličnih ploča i olovnog jezgra, jezgro se pravi nešto većih dimenzija od rupe i utiskuje pod pritiskom. Zahvaljujući dobrom kontaktu tokom horizontalnih deformacija ležišta obezbeđuje se ravnomerna smičuća deformacija jezgra po visini. Olovo ima relativno nisku granicu tečenja (oko 10MPa) i ponaša se približno kao elasto-plastičan materijal. Ono poseduje osobinu da posle plastičnih deformacija veoma brzo, gotovo odmah, obnavlja svoje mehaničke osobine brzim procesom rekristalizacije. Takođe, olovo ne pokazuje izrazite promene karakteristika pri temperaturnim promenama. Ova osobine mu obezbeđuju neosetljivost na zamor i čini ga pogodnim materijalom za izradu prigušivača.

Ponašanje ELPB ležišta pri dejstvu smičuće sile može se shvatiti kao paralelna veza dva elementa: linearno elastičnog elastomernog ležišta i elasto-plastičnog olovnog jezgra. Inicijalna horizontalna krutost je zbir krutosti ELNP i elastične krutosti olovnog jezgra. Po dostizanju sile na granici tečenja olovnog jezgra krutost se smanjuje i kontrolisana je krutošću elastomernog ležišta. Odnos elastične i postelastične krutosti ELPB je obično oko deset (*Slika 9*).

Ugradnjom olovnog jezgra u ELNP postižu se velika inicijalna krutost i potrebno prigušenje. Histerezisnim

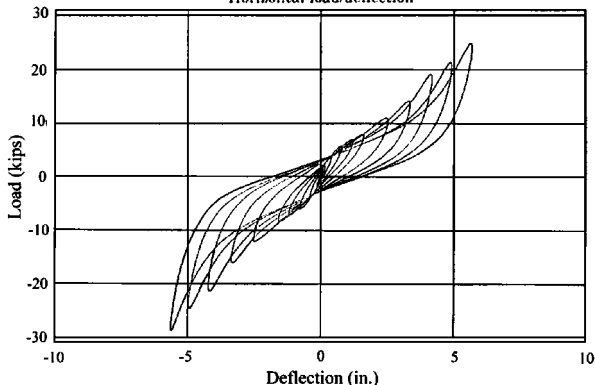
ponašanjem ELPB moguće je postići efektivno prigušenje do 35% od kritičnog. Lom mora da se desi zbog cepanja gume, a ne odvajanjem slojeva gume i čeličnih ploča. Deformacija klizanja ELPB pri kidanju elastomera je oko 500% (ako su dimenzije takve da ne dođe do gubitka stabilnosti). Laboratorijska ispitivanja ove vrste ležišta pokazuju da nisu posebno osetljiva na istoriju opterećenja (stabilan oblik histerezisa) i da uticaj temperature na krutost nije naglašena. Za manja poprečna opterećenja koja ne plastifikuju olovno jezgro, ležišta ne generišu prigušenje, pa ako je ovo bitan parametar potrebno je obezbediti dodatne izvore sile prigušenja.

2.1.3. Elastomerna ležišta visokog prigušenja (ELVP)

Elastomerna ležišta visokog prigušenja imaju istu konstrukciju kao i ona sa niskim prigušenjem, a razlikuju se jedino u elastomeru koji je korišćen za njihovu izradu.

Korišćenjem posebnih aditiva osnovnom elastomernom materijalu menja se molekularna struktura s ciljem postizanja višeg unutrašnjeg trenja u elastomeru i samim tim većeg prigušenja ležišta. Aditivi koji se koriste su najčešće čađ, smole i određena ulja. Navedenim modifikacijama elastomera postiže se povećanje vrednosti prigušenja od 10% do 20% od kritičnog, pri smičućim deformacijama od 100%. Modeliranje ovog tipa ležišta se zasniva na vezi linearno viskozno i elastoplastičnog elementa.

Bearing ID: HR030-2
Vertical pressure: 1000 PSI
Strain ranges: 5% 10% 25% 50% 75% 100% 150% 200% 250% 300% 350%
Horizontal load/deflection



Slika 10.- Zavisnost sila-pomeranje za ELVP ležišta pri različitim amplitudama pomeranja [6]

Ispitivanja ELVP pokazuju da oblik veze sila-pomeranje karakteriše nelinearnost do deformacija klizanja od 20% do kojih ležišta imaju veću krutost, potom sledi opseg deformacija (20-120%) u kojem je odgovor linearan sa umanjnjem krutosti i opseg velikih deformacija koje karakteriše povećanje krutosti. Prvi opseg deformacija se očekuje za dejstva manjih poprečnih opterećenja i veća krutost u ovom opsegu je povoljna, mada se potrebna inicijalna krutost ne može uvek postići korišćenjem samo ove vrste ležišta. Srednji

opseg deformacija se očekuje za dejstva zemljotresnih opterećenja i niska horizontalna krutost za ovoj opseg je ključ za produženje osnovnog perioda konstrukcije. Treći opseg deformacija se očekuje za dejstva veoma retkih zemljotresa i povećanje krutosti je povoljno radi kontrole preteranih pomeranja koja ugrožavaju stabilnost ležišta.

Osobine ELVP, za razliku od ELNP, pokazuju izrazitu nelinearnost odgovora i osetljivost na istoriju opterećenja (promena krutosti kroz cikluse), temperaturu (promena prigušenja), veličinu amplitude deformacija (menja se oblik histerezisa) itd. Karakteristike ležišta su zavisne od recepture elastomera koja se menja u zavisnosti od proizvođača. Obuhvatanje efekata porasta krutosti pri velikim deformacijama komplikuje matematički model ležišta. Sve ovo predstavlja značajan problem za njihovu upotrebu i čine ih manje atraktivnim rešenjem od elastomernih ležišta sa olovnim jezgrom.

2.2 Klizna ležišta

Mehanizam ograničenja maksimalne poprečne sile koja se može preneti na podkonstrukciju se realizuje sistemima seizmičke izolacije baziranih na kliznim ležištima. Kao i elastomerna i klizna ležišta su se koristila u mostogradnji za odvajanje stubova i gornjeg stroja mosta, pre njihove upotrebe u seizmičkoj izolaciji.

U kliznoj površini nadkonstrukcija se preko pogodno obikovanih klizača oslanja na podkonstrukciju. Najzastu-

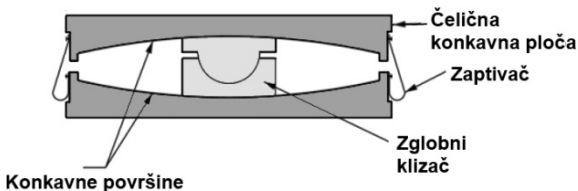
pljenija kombinacija materijala za izradu ležišta je PTFE (poli-tetra-floro-etilen) i nerđajući čelik. Najpoznatiji iz grupe PTFE materija je teflon. Klizač je obložen nekim od materijala na bazi PTFE, dok se klizna površ izarađuje od nerđajućeg čelika. Zavisno od oblika klizne površi klizna ležišta se dele na:

- Ravna klizna ležišta (RKL) (*Flat sliding bearing*)
- Sferna klizna ležišta – klizno klatno (SKL) (*Friction pendulum bearing*)

Veliki nedostatak ravnih kliznih ležišta je to što nemaju sposobnost recentriranja, što je ograničilo njihovu upotrebu u sistemima izolacije. Radi prevazilaženja ovog problema, ona se uvek kombinuju sa drugim vrstama ležišta.

2.2.1 Sferna klizna ležišta - klizno klatno (SKL)

Prikaz konstrukcije SKL dat je na *Slici 11*. Sferna klizna površina može biti konkavna na dole i na gore. Klizna površina konkavna na dole je povoljnija zbog prenošenja momenta ekscentričnosti normalne sile kad je klizač u pomećenom položaju. Nedostatak je što je podložnija prljanju klizne površine, gde je drugi slučaj povoljniji. Pri relativnom kretanju krajeva ležišta horizontalna sila se prenosi preko klizača koji je upravljani vođicom koja ima sferno udubljenje. Da bi bila moguća relativna rotacija vođice i klizača, klizač mora da bude obložen PTFE materijalom i na ovoj kontaktnoj površini.



Slika 11.- Konstrukcije sfernih kliznih ležišta

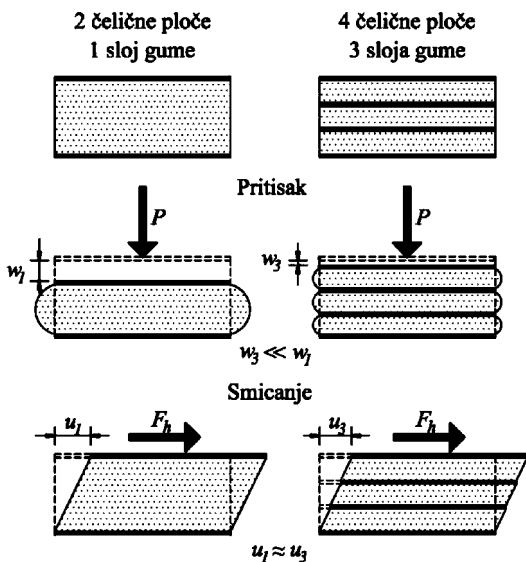
Pri dejstvu seizmičkog opterećenja klizač se kreće sfernom površinom i na taj način odiže konstrukciju. Ovako je recentriranje postignuto sopstvenom težinom konstrukcije. Konstrukcija sa ovakvim ležištima se ponaša kao klatno u toku kretanja zbog čega se ležišta nazivaju klizno klatno. Trenje između klizača i klizne površine je izvor prigušenja koje može da bude veoma veliko (do 40-50% od kritičnog). Period oscilovanja ovako dobijenog klatna je kontrolisan radijusom krivine klizne površine.

3. MEHANIČKE OSOBINE ELASTOMERNIH LEŽIŠTA

Ponašanje elastomernih ležišta pod opterećenjem je određeno ponašanjem slojeva elastomera i rasporedom čeličnih ploča od kojih je konstruisano. Osnovne osobine koje jedno ležište mora da poseduje da bi bilo primenjivo u seizmičkoj izolaciji su dovoljno velika ver-

ticalna krutost i dovoljno mala horizontalna krutost za dejstva projektnih seizmičkih opterećenja. Ostala neophodna svojstva sistema seizmičke izolacije, kao što su prigušenje i dovoljna početna horizontalna krutost, mogu biti obezbeđene posebnim dodatnim elementima.

Ugradnjom horizontalnih čeličnih ploča, na određenom međusobnom rastojanju, unutar elastomernog



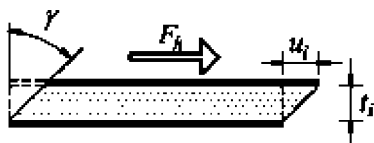
Slika 12.- Kvalitativni prikaz ponašanja EL pri dejstvu normalne i smičuće sile

ležišta postiže se povećanje vertikalne krutosti, smanjenje deformacija sloja elastomera pri dejstvu normalnih sila, izbegavanje sprezanja horizontalnih i vertikalnih oscilacija i deformacija tečenja elastomera (*Slika 12*). Ugradnja čeličnih ploča zbog njihovog horizontalnog položaja unutar ležišta ne utiče na ponašanje pri dejstvu horizontalnih sila (smičućih sila). Relativna pomeranja krajeva ležišta su kontrolisana deformacijama slojeva elastomera, dok se čelične ploče unutar ovako formiranog kompozita mogu smatrati nedeformabilnim [3].

Da bi se ponašanje ležišta kao konstruktivnog elementa modeliralo u statičkoj i dinamičkoj analizi seizmički izolovane konstrukcije, neophodno je poznavati parametre krutosti ležišta. U cilju njihovog određivanja potrebno je odrediti odgovor ležišta pri relativnom pomeranju njegovih krajeva, što je, kao što je pomenuto, pre svega određeno ponašanjem slojeva gume. Konstitutivni model gume je nelinearan i deformacije koje trpi pri opterećenju su velike. Strogo poštovanje konstitutivnog modela gume vodilo bi do nelinearnih analiza sa velikim komponentalnim deformacijama. S obzirom na kompleksnost ovakve analize, za izračunavanje početnih mehaničkih karakteristika, aproksimativno se koristi pristup zasnovan na linearnoj elastičnosti sa malim deformacijama, ali uz dodatne pretpostavke. Osnovni koraci u ovakvom pristupu će biti prikazani u narednim delovima ovog poglavlja. Inače, opravdanost primene analize linearne elastičnosti dokazana je laboratorijskim ispitivanjima i proračunima pomoću MKE [6].

3.1 Ponašanje elastomernih ležišta pri dejstvu smičuće sile

Ponašanje EL pri dejstvu sile smicanja, kao i za ostala opterećenja, prvo se analizira za jedan sloj pa potom za ležište. Za izradu ležišta se koriste tanki slojevi gume, čije su debljine u odnosu na prečnik ležišta veoma male, tj. imaju veliki faktor oblika (veći od 10). Zbog ovakve geometrije, deformacija gume je dominantno deformacija klizanja, koja je konstantna unutar sloja i po visini ležišta (Slika 12 i 13) [2].



Slika 13.- Deformacija klizanja sloja gume relativno pomeranje susednih čeličnih ploča

Shodno konstantnoj deformaciji klizanja po visini ležišta veza između pomeranja i deformacija za sloj gume γ_i i ležište u celini glasi:

$$\gamma_s = \gamma_i = \frac{u_i}{t_i} = \frac{u}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{u}{t_r} \quad (1)$$

Veza napona smicanja i klizanja je: $\tau = G\gamma$, (G je moduo smicanja elastomera).

Kombinujući veze deformacija i pomeranja, napona smicanja i deformacija i vodeći računa da je veza sile i pomeranja data sa $H=K_h \cdot u$, (odnosno da je smičuća, horizontalna, krutost jednaka sili koja pravi jedinično pomeranje) i da je horizontalna sila integral napona smicanja horizontalnog preseka, smičuća krutost se može izraziti:

$$K_h = \frac{GA}{t_r} \quad (2)$$

gde je A površina horizontalnog preseka ležišta.

Na osnovu izraza (2) se vidi da se smičuća krutost ležišta može povećati povećanjem horizontalne površine ležišta i korišćenjem elastomera većeg modula klizanja i s druge strane redukovanjem ukupne visine elastomera.

3.2. Ponašanje elastomernih ležišta pri dejstvu normalne sile pritiska

3.2.1 Faktor oblika

Faktor oblika definiše kao odnos opterećene površine i obodne neopterećene površine (omotača) jednog sloja elastomera. Za opterećenu površinu se uzima površina čeličnih ploča unutar ležišta (tzv. aktivna ili spregnutapovršina) bez zaštitnog sloja gume.

$$S = \frac{\textit{opterećena površina}}{\textit{obodna neopterećena površina}}$$

Za sloj prstenastog oblika unutrašnjeg poluprečnika, spoljašnjeg i debljine t_i , u slučaju da su i spoljašnji i unutrašnji omotači neopterećeni, dobija se:

$$S = \frac{(R_o^2 - R_i^2)\pi}{2(R_o + R_i)\pi t_i} = \frac{R_o - R_i}{2t_i} \quad (3)$$

Za sloj kružnog oblika poluprečnika R i debljine t_i , $S=R/2t_i$. Povećanju faktora oblika odgovara povećanje krutosti i samim tim smanjenje vertikalnih pomeranja. Prihvatljive vrednosti faktora oblika za ležišta koja se primenjuju u seizmičkoj izolaciji su između 10 i 20 [6].

3.2.2 Ponašanje sloja elastomera pri pritisku

Veličine kapaciteta nosivosti i aksijalne (vertikalne) krutosti zavise od geometrije ležišta i od primenjenog elastomera. Vertikalna krutost se može odrediti na osnovu ponašanja jednog sloja gume kome je sprečena deformacija na gornjoj i donjoj osnovi, zbog veze sa čeličnim pločama, koje se smatraju nedeformabilnim u svojoj ravni (*Slika 14*).

Uvodeći pretpostavke o linearno elastičnom ponašanju materijala i malim deformacijama, analiza ponašanja elastomenog ležišta pod pritiskom je i dalje komplikovana. U cilju daljeg pojednostavljenja uvedene su još dodatne pretpostavke koje se smatraju opravdanim za geometriju ležišta, čiji je faktor oblika S veći od pet [4]. Reč je o dve grupe pretpostavki. Prva se tiče kinematike

deformacije sloja, dok je druga vezana za naponsko stanje unutar sloja. Zbog pretpostavke da je stanje napona u bilo kojoj tački sloja kontrolisano unutrašnjim pritiskom, rešenje se naziva i *rešenje po pritisku*.

Prva grupa pretpostavki (kinematičke pretpostavke):

- Sve tačke koje leže na liniji upravnoj na srednju ravan sloja posle deformacije leže na paraboli;
- Horizontalne ravni ostaju horizontalne i posle deformacije.

Druga grupa pretpostavki (pretpostavke o naponskom stanju):

- U svakoj tački slojanormalni naponisu jednaki;

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -p$$

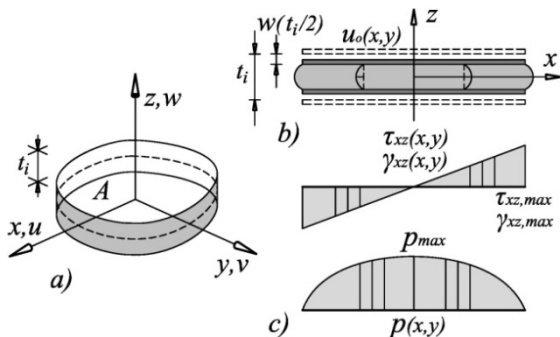
- Za smičuće naponevaži $\tau_{xy}=0$;

Na osnovu ovih pretpostavki i primenom teorije linearne elastičnosti sa malim deformacijama, dobija se jednačina unutrašnjeg pritiska u cilindričnom koordinatnom sistemu $(r;\theta)$ gde je naponsko stanje u sloju rotaciono simetrično:

$$\frac{d^2p}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp}{dr} - \frac{12G}{t^2K} p = -\frac{12G}{t_i^2} \varepsilon_c \quad (4)$$

Ova diferencijalna jednačina drugog reda predstavlja vezu između pritiska p i dilatacija ε_c , i mora biti zadovoljena za granične uslove na konturi sloja.

Dalje pojednostavljenje problema bi bila pretpostavka o nestišljivosti elastomera, koja se često upotrebljava u



Slika 14.- a) sloj elastomera prizvoljnog oblika, b) polje pomeranja sloja (c) aproksimatina raspodela smičućih napona, klizanja i unutrašnjeg pritiska na spoju sa čeličnim pločama

praksi. Sa ovim uslovom nestišljivosti, diferencijalna jednačina (4) se svodi na diferencijalnu jednačinu:

$$\frac{d^2 p}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp}{dr} = - \frac{12G}{t_i^2} \varepsilon_c \quad (5)$$

Kao rešenje jednačina(4), odnosno (5), dobija se distribucija pritiska $p(r)$ po srednjoj površini sloja A u funkciji aksijalne dilatacije. Integraleći pritisak po istoj površini dobija se rezultujuća vertikalna sila P , a zatim i moduo pritiska sloja:

$$E_{ci} = \frac{P}{A \varepsilon_{ci}} \quad (6)$$

Na kraju se može izračunati maksimalna smičuća deformacija pri pritisku (*Tabela 1*).

Rešenja koja pretpostavljaju nestišljivost elastomera, u zavisnosti od faktora oblika, daju veće vrednosti modula pritiska i samim tim precenjaju vrednosti aksijalne krutosti ležišta i maksimalnih deformacija klizanja. Prema [3] smanjenje modula pritiska usled zapreminske deformacije bi trebala da bude uzeto u obzir za faktore oblika veće od 10, što je po pravilu slučaj kod ležišta u sistemima izolacije. S druge strane, za maksimalne deformacije klizanja izrazi za nestišljiv elastomer se mogu koristiti i na strani su sigurnosti. Distribucija pritiska na srednjoj ravni i deformacija klizanja za nestišljiv elastomer prikazana je na *Slici 14c*.

Najčešći oblici ležišta su kružna, prstenasta ili kvadratna. Kvadratna se uglavnom koriste u mostogradnji, a kružna i prstenasta u zgradarstvu zbog jednakog ponašanja u svim pravcima. Bez ulaženja u detalje rešavanja jednačine pritiska prikazana su krajnja rešenja za moduo pritiska za kružne i prstenaste oblike osnove sloja odstišljivog i nestišljivog elastomera. Izrazi za maksimalne smičuće deformacije odgovaraju nestišljivom elastomeru i na strani su sigurnosti (precenjaju maksimalne vrednosti).

Tabela1.- Ponašanje sloja elastomera faktora oblika S_i pri sili pritiska P [2]

	Kružni oblik	Prstenasti oblik
Moduo pritiska sloja (nestišljiv elastomer) $E_{ci,n}$	$6GS_i^2$	$6GS_i^2 f_1$
Moduo pritiska sloja (stišljiv elastomer) E_{ci}	$(\frac{1}{6GS_i^2} + \frac{4}{3K})^{-1}$	$(\frac{1}{6GS_i^2 f_1} + \frac{4}{3K})^{-1}$
Smičuća deformacija (nestišljiv elastomer) $\gamma_{ci, max}$	$6S_i \varepsilon_{ci}$	$6S_i \varepsilon_{ci} f_2$

gde su G i K su moduli klizanja i zapreminske deformacije elastomera, dok su:

$$f_1 = \frac{\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2 + 1}{\left(\frac{R_o}{R_i} - 1\right)^2} + \frac{\frac{R_o}{R_i} + 1}{\left(1 - \frac{R_o}{R_i}\right) \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)}$$

$$f_2 = \frac{\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2 - \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2 - 1}{\left(\frac{R_o}{R_i} - 1\right) \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2}$$

3.2.3 Vertikalna krutost ležišta

Na osnovu određenih vrednosti modula pritiska pojedinih slojeva elastomera može se izračunati vertikalna

krutost pojedinog sloja, a zatim i krutost ležišta zimajući u obzir krutosti pojedinih slojeva koji su u serijskoj vezi:

$$K_{vi} = \frac{A}{t_i} \left[\frac{1}{E_{ci,n}} + \frac{4}{3K} \right]^{-1} = \frac{E_{ci}A}{t_i}, \quad \frac{1}{K_v} = \sum_1^N \frac{1}{K_{vi}} \quad (7)$$

Ležišta se najčešće proizvode tako da je debljina svih slojeva jednaka, usled čega su jednaki i moduli pritiska po slojevima. Vertikalna krutost ležišta od N jednakih slojeva je:

$$K_v = \frac{K_{vi}}{N} = \frac{E_{ci}A}{t_i N} = \frac{E_{ci}A}{t_r} = \frac{E_c A}{t_r} \quad (8)$$

Treba napomenuti da se ELPB ležišta zbog prisustva olovnog jezgra, koje sprečava izbočavanje gume na unutrašnjem prečniku, ne tretiraju kao prstenasta, već kao kružna sa neto površinom i stvarnom obimnom površinom sloja.

3.2.4 Ponašanje elastomernih ležišta pri dejstvu momenata

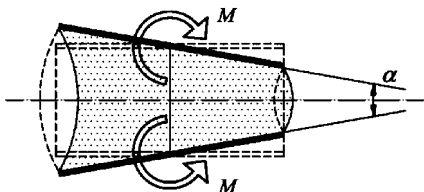
Ležišta mogu biti opterećena momentima torzije i momentima savijanja na svojim krajevima. Kod sistema seizmičke izolacije u zgradarstvu veličine naprezanja i deformacija od momenata su veoma male i često se zanemaruju [9], što posebno važi za uticaje usled momenata torzije.

Iznad ravni izolacije se uvek izvodi veoma kruta bazna ploča koja je oslonjena na krute grede preko kojih se oslanja na ležišta. Ovakva ploča treba da obezbedi jednaka translatorska pomeranja ležišta. Zbog velike fleksione krutosti greda (ili same ploče sa kapitelima) u odnosu na istu ležišta, rotacija konektorske ploče koja je vezana za njih je veoma mala i najčešće se zanemaruje u zgradarstvu. Relativne rotacije krajeva ležišta su uglavnom izraženije kod mostovskih ležišta i za razliku od onih u zgradarstvu, se ne mogu zanemartiti u proračunu. Poznavanje ponašanja EL pri dejstvu momenata savijanja je bitno zbog toga što je veličina krutosti na savijanje sloja, koji se dobija iz analize savijanja ležišta, bitan parametar u analizi stabilnosti ležišta.

Analiza ponašanja EL pri dejstvu momenata slična je onoj koja je prikazana za ponašanje EL pod pritiskom i nije detaljno obrađena. Na *Slici 15* prikazana je deformacija sloja elastomera sa čeličnim pločama pod dejstvom momenta savijanja M .

Relativna rotacija usled dejstva momenta je označena sa α . Isprekidanom zakrivljenom linijom je prikazan deformisan oblik po elementarnoj teoriji savijanja grede, dok je punom deformisan oblik spoljne ivice koji se razlikuje od prethodnog zbog deformacija klizanja elastomera. Analiza savijanja koristi iste pretpostavke kao i analiza ponašanja pod pritiskom.

Na sličan način, kao i pri analizi ponašanja pri pritisku dolazi se do diferencijalne jednačine koja opisuje



Slika 15.- *Deformacija pri savijanju*

stanje napona u funkciji unutrašnjeg pritiska unutar sloja, sa graničnim uslovom da je pritisak jednak nuli na spoljnoj konturi sloja. Dobijanje rešenja je kompleksan matematički problem i ovde će biti prikazana rešenja samo za kružni oblik osnove, za veličine bitne za analizu stabilnost ležišta koja su data u [2] i u kojoj se mogu naći potrebni detalji za ostale oblike sloja.

Tabela 2.- *Karakteristike sloja elastomera faktora oblika S_i izloženog savijanju*

Oblik osnove sloja	Kružni oblik
Moduo rotacije $E_{ri,n}$ (nestišljiv elastomer)	$2GS_i^2$
Moduo rotacije E_{ri} (stišljiv elastomer)	$2GS_i^2(1 - \frac{3GS^2}{K})$
Krutost na savijanje $E_{ri,n}I$ (nestišljiv elastomer)	$2GIS_i^2$
Krutost na savijanje $E_{ri}I$ (stišljiv elastomera)	$2GIS_i^2(1 - \frac{3GS^2}{K})$

Upoređivanjem izraza za moduo pritiska (*Tabela 1*) i moduo rotacije za kružni sloj od nestišljivog elastomera vidi se da je:

$$E_{ri} = \frac{E_{ci}}{3} \quad (9)$$

i da oba zavise od modula smicanja elastomera i veličine faktora oblika.

3.2.5 *Stabilnost ležišta*

Kapacitet vertikalne nosivosti nije određen samo vrednostima maksimalnih smičućih deformacija usled dejstva sile pritiska. Određen nivo aksijalnog pritiska, odnosno postizanje kritične sile pritiska, prouzrokuje gubitak stabilnosti ležišta kao kod običnog stuba. Za razliku od običnog stuba, kod koga je veličina kritične sile kontrolisana krutošću na savijanje preseka i dužinom izvijanja, gubitak stabilnosti EL pruzrokuje mala smičuća krutost ležišta (rotaciona krutost zavisi od modula smicanja koji ima malu vrednost), naravno, i sama visina ležišta (koja je u analizi stabilnosti ukupna debljina elastomera i čeličnih ploča). Zbog toga se ležište tretira kao smičuće slab stub.

Analiza stabilnosti se oslanja na mehaničke karakteristike odnosno rezultate dobijene analizama ponašanja jednog sloja elastomera pod opterećenjem. Ova analiza tretira ležište kao štap kod kojeg preseci upravni na ver-

ticalnu osu pre deformacije ostaju ravni, ali ne i upravni na deformisanu osu. S obzirom na tip veze ležišta sa ostalim delovima konstrukcije, odnosno sprečenih rotacija konektorskih ploča, ono ima granične uslove koje odgovaraju obostrano uklještenom štapu.

Kritična sila se dobija iz izraza:

$$P_{cr} = \frac{\sqrt{G^2 A_S^2 + 4GA_S P_E} - GA_S}{2} \quad (10)$$

gde je:

G - moduo smicanja elastomera;

A_s - uvećana smičuća površina sloja;

P_E - Euler-ova sila izvijanja obostrano uklještenog štapa sa krutošću na savijanje jednakoj efektivnoj (uvećanoj) krutosti ležišta na savijanje

Čelične ploče unutar ležišta su krute i mogu se smatrati za nedeformabilne [2] pri izvijanju, ali njihova debljina doprinosi vitkosti ležišta i mora se uračunati u dužinu izvijanja h . S druge strane, računajući kritičnu silu sa visinom h i efektivnom krutosti na savijanje, koja je data u *Tabeli 2*, vodi tome da se i na delovima visine gde se nalaze nedeformabilne čelične ploče, krutost na savijanje uzima jednaka efektivnoj krutosti. Da bi se ovo obuhvatilo pri računanju kritične sile vrednosti površine A i momenta inercije se uvećavaju prema [3]:

$$A_S = A \frac{h}{t_r} ; \quad I_S = I \frac{h}{t_r} \quad (11)$$

gde je:

h - ukupna visina cilindra ležišta odnosno zbir ukupne debljine elastomera i čeličnih ploča;

t_r - ukupna visina elastomera.

Prilikom određivanja Euler-ove sile izvijanja P_E za krutost na savijanje EI uzima se efektivna krutost na savijanje sloja elastomera, tako što se krutosti iz Tabele 2 uvećaju faktorom h/t_r . Drugim rečima, moduo elastičnosti je moduo rotacije sloja, a moment inercije je dat izrazom (11), pa se za Euler-ovu sila izvijanja dobija:

$$P_E = \pi \frac{EI}{h^2} = \pi \frac{E_{ri} I_S}{h^2} \quad (12)$$

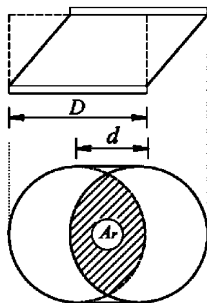
Za vrednosti faktora $S > 5$, važi $P_E \gg GA_S$, na osnovu čega se izraz (10) aproksimativno može izraziti u sledećem obliku:

$$P_{cr} = \sqrt{P_E GA_S} = \pi \frac{\sqrt{E_{ri} G I_A}}{t_r} \quad (13)$$

Uticaj vertikalne sile na horizontalnu krutost

Povećanjem aksijalne sile pritiska ima za posledicu pad smičuće (horizontalne) krutosti ležišta. Ovaj efekat se može približno obuhvatiti izrazom [3]:

$$K_H = \frac{GA_S}{h} \left[1 - \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right] \quad (14)$$



Slika 16.- Redukovana površina

Stabilnost ležišta pri velikim pomeranjima

Prethodno prikazani rezultati analize stabilnosti se odnose na slučaj kad ležište nije izloženo horizontalnim pomeranjima. Analiza ponašanja ležišta pri velikim horizontalnim pomeranjima i istovremenom dejstvu normalne sile pritiska zahteva kompleksnu analizu. Umesto toga, u praksi se za silu gubitka stabilnosti ležišta koje je pretrpelo horizontalno pomeranje najčešće koristi izraz za koji je eksperimentalno pokazano da daje rezultate na strani sigurnosti:

$$P_{cr}^* = P_{cr} \frac{A_r}{A} \quad (15)$$

gde je A_r redukovana površina koja je jednaka površini preklapanja donje i gornje baze ležišta (Slika

16) pri horizontalnom pomeranju d i računa se na osnovu izraza (16).

$$A_r = \frac{D^2}{4}(\delta - \sin \delta) \quad , \quad \delta = 2\cos^{-1}\left(\frac{d}{D}\right) \quad (16)$$

4. MODELIRANJE ELASTOMERNIH LEŽIŠTA

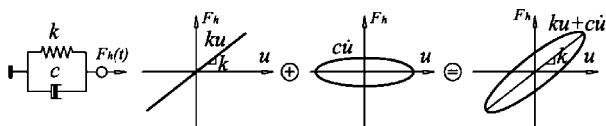
Ponašanje elastomernih ležišta pod opterećenjem u statičkoj i dinamičkoj analizi seizmički izolovanih konstrukcija simulira se proračunskim modelima ležišta, koji treba da što realnije odražavaju njegove mehaničke karakteristike. S ciljem da se dobiju približni ulazni podaci o ponašanju ležišta za očekivana opterećenja i pomeranja, u preliminarnim fazama proračuna se koriste podaci iz sličnih prethodnih projekata i(ili) preporučene vrednosti od proizvođača. Zbog specifičnosti svakog projekta potrebne karakteristike ležišta se menjaju i ne moraju se podudarati sa preporučenim od strane proizvođača, koji obično imaju laboratorijski testiran asortiman ležišta. Rezultati laboratorijskih testiranja, koji su naravno najpouzdaniji, su dati kao referentne vrednosti. Uobičajena praksa je, bez obzira na to da li proizvođač ima odgovarajuće ležište ili ne, da se uzorci proizvedenih ležišta laboratorijski testiraju. Zavisno od stepena usaglašenosti mehaničkih karakteristika korišćenih u preliminarnim fazama proračuna i onih koja su dobijena ispitivanjem,

menja se i ponašanje konstrukcije za očekivana seizmička opterećenja, što je obuhvaćeno završnom fazom projekta. Ulazni podaci o mehaničkim karakteristikama ležišta takođe mogu da se dobiju na bazi teorijskih razmatranja o ponašanju elastomernih ležišta pod opterećenjem.

Uvid u ponašanje ležišta pri dejstvu ciklične smičuće sile dobija se laboratorijskim ispitivanjima ili kombinacijom eksperimentalnih i teorijskih analiza. Rezultati se predstavljaju u obliku dijagrama zavisnosti smičuće silei horizontalnog pomeranja. Ponašanje ležišta se može okarakterisati kao linearno ili nelinearno. Ovde se pod linearnim smatra takvo ponašanje koje je moguće opisati linearno elastičnim elementom sa viskoznom prigušenjem. Kod nelinearnih zavisnost sila-pomeranje je oblika histerezisne petlje, a prigušenje je histerezisno i zavisno od pomeranja.

Tipičan primer sistema seizmičke izolacije, koje je moguće tretirati kao linearna, su oni koji se baziraju na kombinaciji elastomernih ležišta niskog prigušenja (ELNP) i viskoznih fluidnih prigušivača (VFP). Testiranja ELNP pokazala su da ova vrsta ležišta pri dejstvu dinamičke horizontane sile razvijaju veoma uzak histerezis, što omogućava primenu linearno-elastičnog elementa u opisivanju njihovog ponašanja.

Ponašanje elemenata sistema koji su bazirani na ELNP i VFP se može opisati primenom Kelvinovog tela, odnosno da u paralelnoj vezi postoje dva elementa i to, linearno elastična opruga krutosti k i viskozni prigušivač koeficijenta viskoznog prigušenja c (*Slika 17*).



Slika 17.- Kelvin-ovo telo (Linearno elastičan element (opruga) + viskozni prigušivač)

Zavisnost horizontalne sile i pomeranja pri dejstvu dinamičkog opterećenja je:

$$F_h = ku + c\dot{u} \quad (17)$$

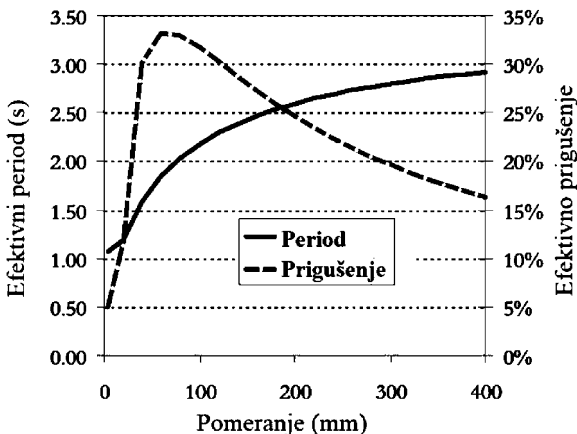
Koeficijent viskoznog prigušenja treba da obuhvati prigušenja VFP i prigušenje ELNP, koje se dobija iz površine histeresisne petlje. Prigušenje ELNP se dobija kao ekvivalentno viskozno prigušenje.

Najveći problem sistema izolacije koji se baziraju na ELNP nedovoljno velika inicijalna horizontalna krutost i malo sopstveno prigušenje ležišta, što je ograničilo njihovu primenu u praksi. Kombinovanje ELNP sa elementima koji otklanjaju ove mane je često takvo da se ukupan sistem izolacije ne može tretirati kao linearno elastičan sa viskoznim prigušenjem. U ovom slučaju moraju da se primene nelinearni modeli koji omogućavaju modeliranje disipacije energije usled plastične deformacije metala.

5. PROJEKTOVANJE SISTEMA SEIZMIČKE IZOLACIJE - DIMENZIONISANJE LEŽIŠTA

5.1 Postupak projektovanja sistema seizmičke izolacije

Pri projektovanju sistema seizmičke izolacije neophodno je izabrati odgovarajući željeni efektivni period i efektivno prigušenje sistema, odnosno period i prigušenje koje projektujemo da izolovana konstrukcija poseduje. Zahtevi koji se tiču nosivosti konstruktivnih



Slika 18.- Zavisnost efektivnog perioda i prigušenja od pomeranja za slučaj ELPB ležišta [5]

elemenata, kao i ograničenja pomeranja objekta mogu se iskoristiti za određivanje optimalnog efektivnog perioda i prigušenja. Izbor opreme koja zadovoljava sve zahtevane parametre nije jednostavan.

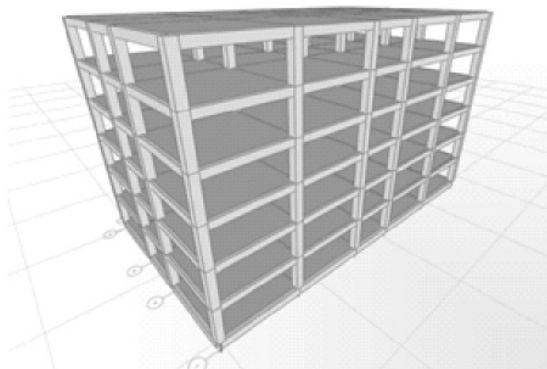
Na *slici 18* je prikazana zavisnost efektivnog perioda oscilovanja nadkonstrukcije i prigušenja u funkciji pomeranja bazne ploče u jednom konkretnom slučaju izolacije objekta primenom elastomernih ležišta sa olovnim jezgrom. Nelinearnost ovih zavisnosti ima za posledicu da je projektovanje sistema seizmičke izolacije u slučaju korišćenja elastomernih ležišta (niskog i visokog prigušenja, kao i onih sa olovnim jezgrom) iterativan postupak, koji zahteva sledeće korake:

1. Definisanje geometrije konstrukcije, gravitacionog i seizmičkog opterećenja;
2. Definisanje vrste izolacionog sistema i materijalnih karakteristika sistema;
3. Usvajanje početnih dimenzija ležišta na osnovu vertikalnog opterećenja. Određivanje karakteristika ležišta na osnovu usvojenih dimenzija i nosivosti pri gravitacionim opterećenjima. Pretpostavljanje pomeranja bazne ploče pri seizmičkom opterećenju;
4. Određivanje stvarnog pomeranja sistema za izračunati efektivni period i prigušenje;
25. Po potrebi ponavljanje koraka 3 do dostizanja konvergencije;
6. Određivanje nosivosti pri gravitacionom i seizmičkom opterećenju.

5.2 Primer procedure projektovanja sistema seizmičke izolacije

U praksi je do sada bilo više pokušaja da se procedura projektovanja sistema seizmičke izolacije u potpunosti automatizuje. S obzirom da većina objekata ima više kompleksnih ograničenja, iskustvo je pokazalo da se najbolji rezultati postižu kada se projektantu omogući uticaj u svakom koraku projektovanja. To međutim, zahteva i od projektanta konstrukcije objekta poznavanje projektovanja sistema seizmičke izolacije.

Procedura se zasniva na izboru i podešavanju određenih parametara, koji su u narednim tabelama predstavljeni sivom pozadinom.



Slika 19.- Model izabrane konstrukcije

Postupak procedure će biti prikazan za konstrukciju na *Slici 19*. U pitanju je šestospratna, prostorna dvoosno simetrična armirano-betonska ramovska konstrukcija. Kvalitet upotrebljenog betona je MB30. Gabariti u osnovi su $B/L=16/28\text{m}$, a raster stubova po dužoj strani konstrukcije je $6+6+4+6+6\text{m}$, dok je po kraćoj $6+4+6\text{m}$. Međuspratna visina je $3,3\text{m}$, a ukupna visina nadkonstrukcije je $19,8\text{m}$. Međuspratne konstrukcije se sastoje od ploča debljine $d=15\text{cm}$ i greda $b/d=35/60\text{cm}$. Svi stubovi su dimenzija $b/d=55/55\text{cm}$. Izolovana konstrukcija, pored ovoga, na svojoj bazi ima baznu ploču debljine $d=20\text{cm}$ koja se oslanja na bazne grede dimenzija $b/d=50/70\text{cm}$.

Modalnom analizom usvojene konstrukcije dobijeni su podaci o tonovima oscilovanja, iz čega se uočava da su vrednosti perioda tonova u intervalu rezonantnih perioda većine zemljotresa što konstrukciju čini pogodnom za primenu seizmičke izolacije.

Tabela 3.- *Periodi i frekvencije oscilovanja prva tri tona*

Ton	Period	Frekvencija
-	s	Hz
1	0,6287	1,5906
2	0,6173	1,62
3	0,5581	1,7919

5.2.1. Definisane geometrije konstrukcije, određivanje gravitacionog i seizmičkog opterećenja

Definisane seizmičkog opterećenja koje deluje na konstrukciju zasnovano je na proračunu prema Evrokodu 8 (EN 1998). Potrebni podaci u ovoj fazi proračuna su: podaci o geometriji konstrukcije (Tabela 4), podaci o seizmičkim masama konstrukcije (Tabela 5), podaci relevantni za seizmičko opterećenje (Tabela 6).

5.2.2 Definisane vrste izolacionog sistema i materijalnih karakteristika sistema

U ovoj fazi projektovanja je potrebno opredeliti se za sistem seizmičke izolacije koji će biti primenjen:

Tabela 4.- Podaci o geometriji konstrukcije

raspon	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
X pravac	6,0	6,0	4,0	6,0	6,0	-
Y pravac	6,0	4,0	6,0	-	-	-
Z pravac	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3

Tabela 5.- Podaci o seizmičkim masama konstrukcije

Ukupna seizmička masa	M_{us}	3594,465	t
Odgovarajuća težina	G_s	35261,7	kN

Tabela 6.- Podaci relevantni za seizmičko opterećenje

Referentno ubrzanje tla:	$a_{gR} =$	2,943	m/s ²
Kategorija značaja objekta:	$\gamma_I =$	1,4	
Projektno ubrzanje tla:	$a_g = a_{gR} \gamma_I =$	4,120	m/s ²
Faktor tla:	$S =$	1,2	
Karakteristični periodi za date lokalne uslove tla	$T_B =$	0,15	s
	$T_C =$	0,50	s
	$T_D =$	2,00	s
Elastični spektar - tip:		1	

elastomerna ležišta niskog ili visokog prigušenja, elastomerna ležišta sa olovnim jezgrom. Shodno

Tabela 7.- Materijalne karakteristike sistema izolacije

Modul smicanja elastomera:	G	0,40 MPa
Prigušenje elastomernog ležišta:	ζ	5,0%
Napon na granici tečenja olova:	$\sigma_{y,pb}$	10 MPa
Modul zapreminske deformacije:	K	2000 MPa
Deformacija pri kidanju elastomera:	ϵ_u	650%
Odnos elastične i postelastične krutosti:	$\kappa = K_e / K_r$	10

odabranom sistemu i ponudi proizvođača opreme, treba utvrditi materijalne karakteristike sistema. U slučaju razmatrane konstrukcije izabran je sistem elastomernih ležišta sa olovnim jezgrom.

5.2.3. Usvajanje početnih dimenzija ležišta i pretpostavljanje pomeranja za projektovani efektivni period i prigušenje

Dimenzije izolatora su definisane dimenzijama u osnovi, kompozicijom elastomera (broj i debljina slojeva elastomera, čeličnih i konektorskih ploča), kao i veličinom olovnog jezgra.

Minimalne dimenzije izolatora bi trebalo odrediti iz nosivosti pri gravitacionim opterećenjima. Pri tome bi faktor sigurnosti za stanje deformacija i stabilnosti trebalo da bude veći od 3,0. Početni korak je određivanje dimenzija ležišta, koje zadovoljavaju ove faktore sigurnosti.

S obzirom da je postupak iterativan, tokom projektovanja najverovatnije će biti potrebno korigovati dimenzije izolatora zavisno od veličine pomeranja pri seizmičkom opterećenju. Pri izboru dimenzija izolatora obično se koristi inkrement 50mm (npr. prečnici 570, 620mm itd.), veličine kalupa u inkrementu od 50mm, i dodatno zaštitni sloj od 10mm sa svake strane.

Debljina sloja elastomera uglavnom iznosi oko 10mm. Ako su gravitaciona opterećenja velika, moguće

je smanjiti debljinu na 8mm ili čak 6mm, ali je svakako potrebno konsultovati proizvođača. Tanji slojevi uzrokuju veću visinu izolatora, kao i veću cenu. Nosivost drastično opada podebljavanjem sloja preko 10mm, pa te debljine treba izbegavati.

Tabela 8.- *Usvojene dimenzije ležišta*

Spoljni prečnik	D_u	0,650 m
Debljina zaštitnog sloja	t_c	0,010 m
Prečnik elastomera i olovnog jezgra	D	0,630 m
Prečnik olovnog jezgra	D_{pb}	0,100 m
Debljina jednog sloja elastomera	t_i	0,008 m
Broj slojeva elastomera	N	20
Ukupna visina elastomera	t_r	0,160 m
Debljina čeličnih ploča	t_s	0,003 m
Broj čeličnih ploča	n_{sp}	19
Ukupna debljina čeličnih ploča	t_{su}	0,057 m
Visina ležišnog cilindra	h	0,217 m
Debljina konektorskih ploča	t_k	0,040 m
Ukupna visina ležišta	H	0,297 m

Tabela 9.- Geometrijske karakteristike ležišta

Bruto površina (bez zaštitnih slojeva)	A_b	0,312 m ²
Površina olovnog jezgra	A_{pb}	0,008 m ²
Aktivna površina	A	0,304 m ²
Obim aktivne površine	O	1,979 m
Faktor oblika	S	19,19
Moment inercije spregnute površine	I	0,007733 m ⁴

Tabela 10.- Mehaničke karakteristike ležišta

Postelastična krutost ležišta	K_r	759,68	kN/m
Inicijalna horizontalna krutost	K_e	7596,76	kN/m
Modul pritiska i-tog sloja	E_{ci}	556188	kN/m ²
Vertikalna krutost i-tog sloja	K_{vi}	21126152	kN/m
Vertikalna krutost ležišta	K_v	1056308	kN/m
Modul rotacije i-tog sloja	E_{ri}	294650	kN/m ²
Efektivna krutost na savijanje sloja	$(EI)_{eff}$	2278,45	kNm ²

Veličina olovnog jezgra definiše veličinu prigušenja u sistemu. U *Tabelama 8, 9 i 10* date su karakteristike usvojenog ležišta.

Za usvojeno ležište treba odrediti nosivost pri gravitacionom opterećenju (*Tabela 11*), izvršiti kontrolu deformacija (*Tabela 12*) i stabilnosti ležišta (*Tabela 13*).

Tabela 11.- *Sile pri gravitacionom opterećenju*

Maksimalno opterećenje po ležištu ($g+p$)	P_{max}	2245 kN
Minimalno opterećenje po ležištu ($g+p$)	P_{min}	1065 kN

Tabela 12.- *Kontrola deformacija*

Minimalan faktor sigurnosti za deformacije pri $g+p$	$FSD_{gr,min}$	3
Aksijalna dilatacija i -tog sloja	ε_{ci}	0,01
Deformacija klizanja usled sile pritiska	$\gamma_{c,max}$	0,9624
Dopuštena deformacija klizanja	γ_{dop}	2,17
$\gamma_{dop} > \gamma_{c,max}$	<i>Ispunjen uslov</i>	
Faktor sigurnosti za deformacije pri $g+p$	FSD_{gr}	6,75

U sledećem koraku za usvojene karakteristike ležišta i za pretpostavljeno pomeranje d_{cd} centra krutosti sistema izolacije u nivou bazne ploče određuju se vrednosti perioda osnovnog tona nadkonstrukcije, kao i efektivno prigušenje (*Tabela 14*)

Tabela 13.- *Kontrola stabilnosti*

Koeficijent uvećanja	h/t_r	1,356	
Uvećana aktivna površina	A_S	0,412	m ²
Uvećan moment inercije	I_S	0,010487	m ⁴
	GA_S	164,850	kN
Ojlerova sila izvijanja	P_E	647677,06	kN
Kritična sila ležišta	P_{crit}	10250,83	kN
$P_{max} < P_{crit}$		<i>Ispunjen uslov</i>	
Faktor sigurnosti za stabilnost pri $g+p$	FSS_{gr}	4,57	
<i>Korekcija horizontalne postelastične krutosti</i>			
Na dalje se računa sa ovom krutošću	K_r^*	723,24	kN/m

U tabeli 14 sila Q je određena površinom olovnog jezgra i napona na granici tečenja, dok su:

$$F_{max} = Q + d_{cd}K_r \quad W_D = 4Q(d_{cd} - d_y)$$

$$K_{H,eff} = F_{max}/d_{cd} \quad \zeta_{eff} = W_D/2\pi K_{H,eff}d_{cd}^2$$

$$T_{eff} = 2\pi(M_{us}/K_{Heff})^{1/2}$$

Tabela 14.- Ponašanje sistema usled seizmičkog opterećenja

Broj ležišta	n_i	24	
Ukupna postelastična krutost	K_r	17357,744	kN/m
Ukupna elastična krutost	K_e	173577,44	kN/m
Karakteristična sila sistema izolacije	Q	1884,96	kN
Pomeranje na granici elastičnosti	d_y	0,012	m
Pretpostavljeno pomeranje centra krutosti	d_{cd}	0,200	m
Maksimalna ukupna sila za pretp. pomeranje	F_{max}	5356,50	kN
Efektivna horizontalna krutost	$K_{H,eff}$	26782,52	kN/m
Potrošena energija u ciklusu za pretp. pomeranje	W_D	1416,99	kNm
Efektivno prigušenje sistema za pretp. pomeranje	ζ_{eff}	0,211	
Efektivni period	T_{eff}	2,30	s
Faktor korekcije prigušenja $\eta = \sqrt{10/(5+\zeta)}$		0,619	

5.2.4 Određivanje stvarnog pomeranja sistema za izračunati efektivni period i prigušenje

Pošto je određen efektivni period i prigušenje sistema (Tabela 14) za pretpostavljeno pomeranje centra krutosti,

Tabela 15.- *Spektralno ubrzanje i pomeranje za dobijeni efektivni period i prigušenje*

Faktor ponašanja:	q	1,0	
Vrednosti spektralnog ubrzanja:	S_e	1,446	m/s ²
Vrednosti spektralnog pomeranja:	S_{De}	0,194	m
Vrednost ukupne seizmičke sile:	F_s	5198,74	kN
Količnik ukupne seizmičke sile:	F_s/G_s	14,74	%

moguće je uporediti pretpostavljeno pomeranje sa sračunatim spektralnim pomeranjem S_{De} .

Proračun se ponavlja sve dok se ne dobije $d_{cd} \approx S_{De}$. Ako je potrebno, moguće korigovati karakteristike izolatora sve dok se ne dobije projektovani period oscilovanja.

5.2.5 Kontrola ležišta pri gravitacionom i seizmičkom opterećenju

Tabela 17.- *Vertikalne sile pri gravitacionom i seizmičkom opterećenju*

Maksimalno opterećenje po ležištu ($g+p/2+S$)	P_{max}	2130,0	kN
Minimalno opterećenje po ležištu ($g+p/2+S$)	P_{min}	450,0	kN

Tabela 18.- *Pomeranja sistema izolacije*

Pomeranje centra krutosti	d_{cd}	0,194	m
Torziona krutost sistema izolacije	K_{θ}	3267468	kNm
Duža dimenzija objekta	L	28,00	m
Ekscentricitet seizmičke sile usled slučajne torzije	e	1,40	m
Rastojanje do najudaljenijeg izolatora od centra krutosti	y_{max}	14,00	m
Dodatno pomeranje od torzije	Δd	0,031	m
Maksimalno pomeranje ležišta	d_{bd}	0,270	m

Tabela 19.- *Kontrola deformacija i kontrola stabilnosti*

Minimalan faktor sigurnosti za deformacije pri $g+p/2+S$	FSD	1,33
Redukovana vertikalna krutost u okviru i -tog sloja	K_{vi}^*	10204985kN/m
Aksijalna dilatacija i -tog sloja	ε_{ci}	0,026
Maksimalan deformacija klizanja usled pritiska	$\gamma_{c,max}$	3,004
Maks, deformacija klizanja usled hor, pomeranja	$\gamma_{s,max}$	1,690
Ukupna deformacija klizanja	γ_{tot}	4,694
Dopuštena deformacija	γ_{dop}	4,887

Tabela 19.- *Kontrola deformacija i kontrola stabilnosti (nastavak)*

$\gamma_{dop} > \gamma_{c,max}$	<i>Ispunjen uslov</i>	
Faktor sigurnosti za deformacije pri $g+p/2+S$	FSD_{gr}	1,38
<i>Provera stabilnosti</i>		
Korekcija kritične sile zbog horizontalnog pomeranja	P_{cr}^*	4952kN
$P_{max} < P_{crit}$	<i>Ispunjen uslov</i>	
Faktor sigurnosti za stabilnost pri $g+p/2+S$	FSS_{gr}	2,32

U poslednjoj fazi proračuna vrši se kontrola nosivosti izolatora pri dejstvu gravitacionog i seizmičkog opterećenja. Kontrolišu se faktori sigurnosti za stanje deformacija i stabilnosti uz minimalnu vrednost od 1,33 – *Tabele 17, 18 i 19.*

Pri proveru stabilnosti ležišta, sračunato je, prema izrazu (16), $\delta=2,255$ dok je za redukovanu površinu ležišta dobijeno $A_r=0,147 \text{ m}^2$.

6. UPOREDNA ANALIZA KRUTO OSLONJENE I SEIZMIČKI IZOLOVANE KONSTRUKCIJE

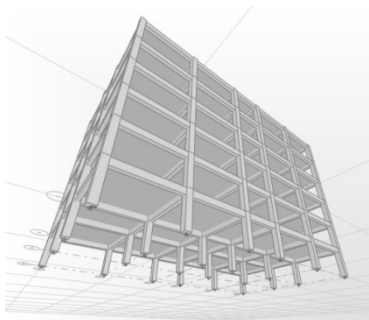
U prethodnom poglavlju je prikazano preliminarno dimenzionisanje ležišta i dobijene mehaničke karak-

teristike su upotrebljene za model izabrane izolovane konstrukcije, koja će se razmatrati i u ovom poglavlju. Potrebne karakteristike ležišta su dobijene na bazi ponašanja konstrukcijekoja je modelirana sistemom sa jednim stepenom slobode, gde je funkcija opterećenja bila elastični spektar. Ovakvim pristupom nelinearno ponašanje ležišta je uzeto u obzir na približan način, dok je uticaj fleksibilnosti nadkonstrukcije potpuno zanemaren. S ciljem da se obuhvate i ovi efekti, sledeći korak u procesu projektovanja je proračun ponašanja seizmički izolovane konstrukcije upotrebom opšteg trodimenzionalnog modela.

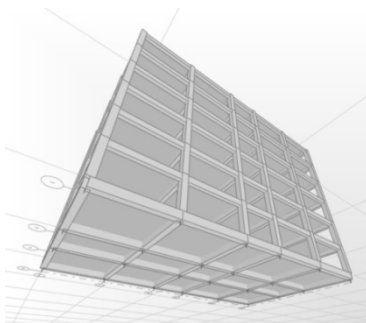
6.1 Proračunski modeli

Geometrija i opterećenja izabrane armiranobetonske ramovske konstrukcije su prikazani u petom poglavlju. Formirana su dva modela koji odgovaraju kruto oslonjenoj i seizmički izolovanoj konstrukciji, pomoću programa SAP2000v14 [1] (*Slike 20 i 21*).

Modeli se razlikuju po tome što seizmički izolovana, za razliku od kruto oslonjene, na svojoj osnovi ima baznu konstrukciju. Bazna konstrukcija se sastoji od ploče debljine $d=20\text{cm}$, koja se oslanja na bazne grede dimenzija $b/d=50/70\text{cm}$. Kruta konstrukcija ima uklještene stubove, dok je seizmički izolovana preko bazne konstrukcije oslonjena na izolatorske jedinice. Za armiranobetonsku ramovsku konstrukciju je



Slika 20.- *Kruto oslonjena konstrukcija*



Slika 21.- *Seizmički izolovana konstrukcija*

pretpostavljeno linearno elastično ponašanje. Stvarno ponašanje ležišta pod dejstvima ciklične horizontalne sile je nelinearno i opisano je zavisnošću sila-pomeranje.

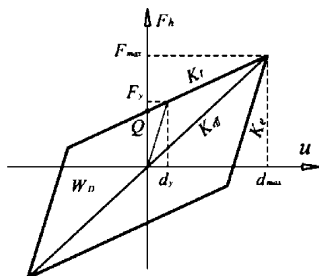
Problem je moguće linearizovati definišući vrednost efektivne smičuće krutosti i ekvivalentnog količnika viskoznog prigušenja za očekivano pomeranje.

Ako se sprovodi nelinearna analiza ponašanje ležišta se opisuje nekim od prikladnih matematičkih modela histerezisa. Čest je slučaj da se ponašanje opiše bilinearnom aproksimacijom histerezisa [3,9]. Za ležište pod vertikalnim opterećenjem najčešće se usvajapretpostavka o linearnom ponašanju. U našem modelu ležišta su modelirana veznim elementima (*link elements*) [1]. Za izabranu konstrukciju su upotrebljena jednaka ležišta ispod svih stubova.

U tabeli 20 su date usvojene karakteristike ležišta, uz napomenu da su efektivne vrednosti procenjene na

Tabela 20.- Karakteristike usvojenih ležišta potrebne za modeliranje u programu SAP2000

Inicijalna krutost ležišta	K_e	7232,39 kN/m
Odnos postelastične i inicijalne krutosti ležišta	K_r/K_e	0,1
Efektivna horizontalna krutost ležišta	$K_{H,eff}$	1116kN/m
Vertikalna krutost ležišta	K_v	1056308 kN/m
Sila na granici elastičnosti ležišta	F_y	87,27 kN
Efektivno prigušenje ležišta	ζ_{eff}	0,211



Slika 22.- *Bilinearna aproksimacija veze sila-pomeranje za ležišta*

osnovu maksimalnogočekivanogrelativnog pomeranja, kako je i prikazano u prethodnom poglavlju.

6.2 Opterećenja

Pored sopstvenog, opterećenja međuspratnih konstrukcija izabrane konstrukcije su dodatno stalno $\Delta g=2,0\text{kN/m}^2$ i povremeno od $p=3,0\text{ kN/m}^2$ koje je u seizmičkoj analizi uzeto sa 50% vrednosti. Ovde treba primetiti da je ukupna seizmička masa izolovane konstrukcije veća od kruto oslonjene za seizmičku masu bazne ploče.

Seizmičko dejstvo je definisano akcelorogramom komponente sever-jug (NS) registracije Petrovac sa maksimalnim ubrzanjem tla od $a_{g,max} = 4,293\text{m/s}^2$ trajanjem $t=19,6\text{ s}$. Seizmičko dejstvo je saopšteno samo u pravcu Y , odnosno u pravcu kraće dimenzije objekta.

6.3 Rezultati proračuna

6.3.1 Modalna analiza

Koristeći se rezultatima modalne analize upoređiće se periodi oscilovanja tonova kruto oslonjene i odgovarajuće izolovane konstrukcije. Kod konstrukcije sa izolacijom za krutost ležišta su usvojene odgovarajuće efektivne vrednosti, o čemu treba voditi računa pri tumačenju dobijenih rezultata.

Na osnovu perioda oscilovanja konstrukcije, prikazanih u *Tabeli 21*, vidi se da je period osnovnog tona produžen sa 0,629s na 2,369s, što odgovara faktoru promene perioda od 3,77. S obzirom da je modalna analiza izvršena za trodimenzionalni model, prva tri tona (u zgradi sa seizmičkom izolacijom) su izolatorski tonovi (dva translatorna i jedan torzioni) koji praktično odgovaraju pomeranju nadkonstrukcije kao krutog tela.

Tabela 21.- *Periodi oscilovanja konstrukcije*

Ton	Seizmički izolovana		Kruuto oslonjena	
	Period s	Frekvencija Hz	Period s	Frekvencija Hz
1	2,369	0,4222	0,629	1,5906
2	2,365	0,4228	0,617	1,62
3	2,085	0,4796	0,558	1,7919
4	0,369	2,7106	0,205	4,8719
5	0,357	2,8009	0,202	4,9511

Četvrti i viši tonovi su konstrukcijski tonovi sa malim faktorom participacije mase ($\leq 0,001$), što govori da pri konkretnoj efektivnoj krutosti onigenerišu veoma male seizmičke sile. Preciznije sagledavanje uticaja izolacije dobiće se primenom dinamičke analize konstrukcije izložene dejstvu akceleroograma, pri čemu će se uzeti u obzir nelinearno ponašanje izolatora.

6.3.2 Analiza vremenske istorije odgovora za akceleroogram Petrovac - komponenta NS

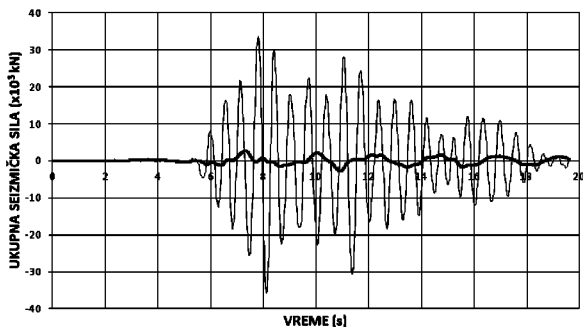
Nelinearni dinamički odgovor konstrukcije sa izolatorima upoređiće sa odgovorom kruto oslonjene konstrukcije. Uporedni odgovori posmatraće se kroz sledeće veličine:

- Ukupna seizmička sila;
- Maksimalno ubrzanje poslednje tavanice;
- Međuspratna pomeranja;
- Moment savijanja izabranog stuba prizemlja;
- Pomeranja vrha konstrukcije i relativno pomeranje nadkonstrukcije.

Ukupna seizmička sila

Redukcija nivoa seizmičkih opterećenja može da se predstavi redukcijom nivoa ukupne seizmičke sile. Na *Slici 23* prikazana je vremenska istorija ukupne seizmičke sile za razmatrani akceleroogram za kruto oslonjenu i

seizmički izolovanu konstrukciju. Maksimalna seizmička sila kod kruto oslonjene konstrukcije je 35790 kN, dok je kod izolovane 2778 kN, što znači redukciju faktorom 12,88. Naravno, kruto oslonjena konstrukcija ne može da primi ovaj iznos opterećenja bez oštećenja. Ovde je pretpostavljen njen linearno elastičan odgovor u cilju poređenja veličina odgovora.

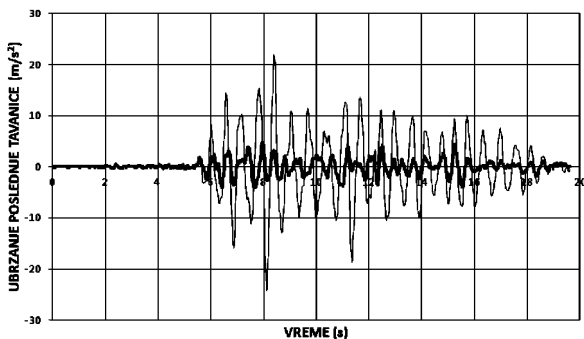


Slika 23.- Ukupna seizmička sila za kruto oslonjenu (tanja linija) i izolovanu konstrukciju (deblja linija)

Maksimalno ubrzanje poslednje tavanice

Maksimalna ubrzanja tavanica daju uvid u amplifikaciju ubrzanja po visini konstrukcije. Maksimalno ubrzanje poslednje tavanice za kruto oslonjenu konstrukciju je

24,25 m/s² a za izolovanu je 4,74 m/s² Amplifikacija ubrzanja kod kruto oslonjene konstrukcije je $\ddot{u}_{ko}/a_{g,max} = 5,65$, dok je za seizmički izolovanu konstrukciju $\ddot{u}_{si}/a_{g,max} = 1,10$ što odgovara redukciji amplifikacije faktorom 5,12. Mala amplifikacija ubrzanja kod izolovane konstrukcije govori o približno uniformnoj distribuciji seizmičkih sila po visini.

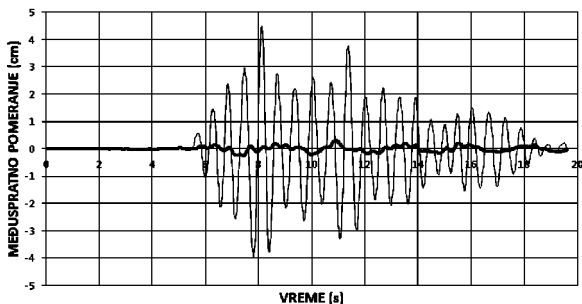


Slika 24.- Ubrzanje poslednje tavanice za kruto oslonjenu (tanja linija) i izolovanu konstrukciju (deblja linija)

Međuspratna pomeranja

Relativna spratna pomeranja pri dejstvu seizmičkog opterećenja određuju naprezanje vertikalnog nosećeg sistema između dve razmatrane tavanice. Kod ramovskog sistema veća međuspratna pomeranja rezultuju većim momentima savijanja koje prihvataju stubovi. Na *Slici 25*

prikazane jevremenska istorija relativnih međuspratnih pomeranja.

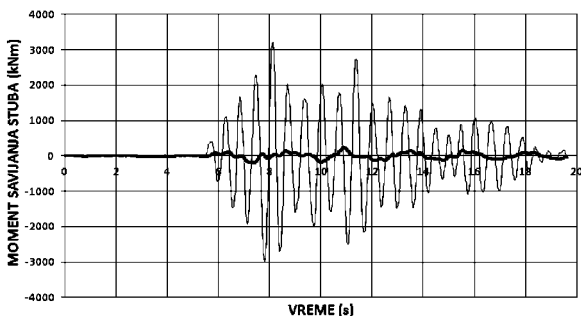


Slika 25.- Spratno pomeranje prve tavanice (kruto oslonjena konstrukcija - tanja linija) i njeno relativno pomeranje u odnosu na baznu ploču (izolovana konstrukcija - deblja linija)

Međuspratno pomeranje, odnosno relativno pomeranje krajeva stuba kod kruto oslonjene konstrukcije je 4,49 cm, a kod seizmički izolovane konstrukcije 0,306 cm, što odgovara faktoru redukcije od 14,67.

Moment savijanja stuba prizemlja

Maksimalan moment savijanja oslonačkog čvora stuba kruto oslonjene konstrukcije je bio 3211 kNm, dok je isti za seizmički izolovanu 231 kNm što je 13,9 puta manje (Slika 26). Vrednost maksimalnog momenta seizmičke izolovane konstrukcije razmatrani stub može da prihvati u elastičnom području.

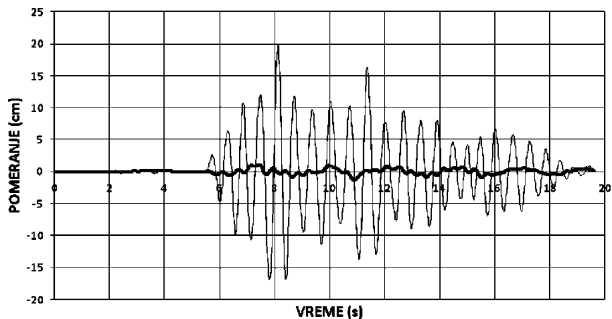


Slika 26.- Moment najopterećenijeg stuba za kruto oslonjenu (tanja linija) i izolovanu konstrukciju (deblja linija)

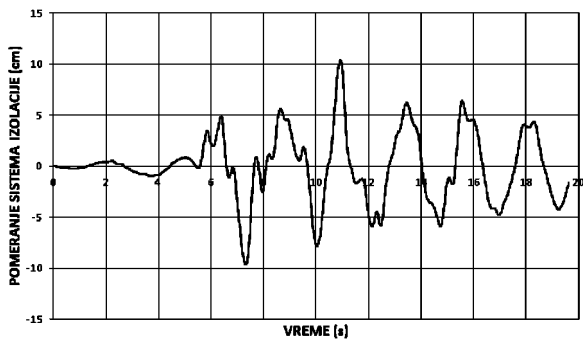
Pomeranje vrha konstrukcije i relativno pomeranje nadkonstrukcije

Da bi se stekla predstava o deformacijiskeletnog sistema, upoređiće se pomeranje vrha konstrukcije kruto oslonjene zgrade i relativno pomeranje nadkonstrukcije seizmički izolovane zgrade (Slika 27). Maksimalno pomeranje vrha kruto oslonjene konstrukcije je 19,9 cm, dok je maksimalno relativno pomeranje seizmički izolovane nadkonstrukcije 1,04 cm, što odgovara faktoru redukcije od 19,13.

U cilju kontrole pomeranja sistema izolacije koje je dobijeno u preliminarnom dimenzionisanju ležišta prikazana je i vremenska istorije relativnog pomeranja sistema izolacije (Slika 28). Maksimalno relativno pomeranje sistema izolacije je 10,37 cm i nije veće od 20 cm, na koje je ležište dimenzionisano.



Slika 27.- *Pomeranje vrha konstrukcije za kruto oslonjenu (tanja linija) i relativno pomeranje nadkonstrukcije za izolovanu konstrukciju (deblja linija)*



Slika 28.- *Relativno pomeranje sistema izolacije*

7. ZAKLJUČAK

Posledice jakih zemljotresa, i u današnje vreme u kojem se primenjuju principi aseizmičkog projektovanja, mogu da budu katastrofalne. Veliki gubici za zemljotresom pogođenu regiju se sve manje odnose na ljudske gubitke, što je naravno i primaran cilj, a sve više na ogromne materijalne štete koje trpi region pogođena jednim takvim zemljotresom. Ovakve okolnosti ukazuju na potrebu primene savremenijeg načina zaštite objekata od dejstva zemljotresa.

Jedan od aktuelnih pristupa zaštite objekata od oštećenja pri dejstvu zemljotresa zasniva se na primeni seizmičke izolacije.

Seizmička izolacija objekata je sistem pasivne seizmičke zaštite koji najveću tehničko-tehnološku i ekonomsku opravdanost nalazi kod objekata čiji period osnovnog tona oscilovanja iznosi manje od jedne sekunde, zgrade male i srednje visine. Primena seizmičke izolacije dovodi do produženja perioda osnovnog tona oscilovanja u oblast 1,5 - 3 sekunde, a samim tim i do manjih amplifikacija ubrzanja po visini konstrukcije i manjih inercijalnih sila koje deluju na objekat prilikom zemljotresa.

Redukcija seizmičkih opterećenja, koja deluju na seizmički izolovanu konstrukciju, treba da bude dovoljno velika, da konstrukcija može da pruži elastičan odgovor i pri dejstvima jakih zemljotresa. Na taj način

je obezbeđena funkcionalnost objekta i nakon dejstva zemljotresa. Sistemi seizmičke izolacije su do sada najčešće primenjivani upravo za objekte koji moraju da ostanu funkcionalni posle jakih zemljotresa (ograničenje oštećenja), odnosno za objekte od opšteg javnog značaja.

Naravno, postoje i ograničenje primene ovakvog sistema zaštite, o čemu je i diskutovano u radu, a tu je takođe vrlo važan i ekonomski aspekt.

Na primeru šestospratne zgrade ilustrovana je primena sistema izolacije sa elastomerna ležištima koja imaju olovno jezgro. Kroz rezultate modalne analize pokazan je uticaj seizmičke izolacije na promenu frekventnih karakteristika objekta. Iz vremenskih istorija odgovora, dobijenih primenom nelinearne dinamičke analize, sagledana je efikasnost sistema seizmičke izolacije u redukciji seizmičkih sila i relevantnih veličina koje određuju naprezanje konstrukcije.

8. LITERATURA

- [1] *Analysis reference manual SAP2000 v.14*, Computers and Structures Inc., Berkley CA (2009).
- [2] CONSTANTINOU M. C., WHITTAKER A. S., KALPAKIDIS Y., FENZ D. M., WARN G. P.: *Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading*, Technical Report, University of Buffalo, New York, (2007)

- [3] KELLY, J.M.:*Earthquake-resistant design with rubber*, 2nd ed., Springer-Verlag, London, (1997)
- [4] KELLY J.M., KONSTANTINIDIS D.A.:*Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*, JohnWiley & Sons, Ltd. (2011)
- [5] KELLY T.E.: *Base Isolation of Structures – Design Guidelines*, Holmes Consulting Group Ltd, (2001)
- [6] NAEIM, F., KELLY, J.M.:*Design of seismic isolated structures: From Theory To Practice*,John Wiley& Sons Inc., Chichester, U.K., (1999)
- [7] ROBINSON, W.H., COUSINS, W.J.:*Lead dampers for base isolation*, Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo and Kyoto, Japan, August 2-9, Vol 8, 427-432, (1988)
- [8] SAITO T.: Presentation - Basic Concept of Base Isolation, Japan Society of Seismic Isolation System for Buildings, www.cibw114.net/report/Japan02.pdf
- [9] SKINNER, R.I. , KELLY, T.E., ROBINSON, B.: *Seismic isolation for designers and structural engineers*,Robinson Seismic Limited, Welington,N.Z., (2007)