

UDK699.84+624.09

Primljeno 10. 9. 2002.

# Protupotresna izolacija zgrada s pomoću elastomernih ležajeva

Želimir Šimunić, Davor Grandić

## Ključne riječi

zgrada,  
protupotresna izolacija,  
elastomerni ležajevi,  
seizmičke sile,  
djelovanje potresa,  
proračun

## Key words

building,  
seismic insulation,  
elastomeric bearings,  
seismic forces,  
seismic action,  
analysis

## Mots clés

bâtiment,  
isolation antisismique,  
appareils d'appui en  
élastomère,  
forces sismiques,  
action des séismes,  
calcul

## Ключевые слова

здание,  
антисейсмическая  
изоляция,  
эластомерные опоры,  
сейсмические силы,  
действие землетрясения,  
расчёт

## Schlüsselworte:

Gebäude,  
antiseismische Isolation,  
Elastomerlager,  
seismische Kräfte,  
Einwirkung des  
Erdbebens,  
Berechnung

Ž. Šimunić, D. Grandić

Stručni rad

## Protupotresna izolacija zgrada s pomoću elastomernih ležajeva

Prikazane su teorijske podloge za seizmički proračun protupotresno izoliranih zgrada. Protupotresna izolacija s pomoću elastomernih ležajeva prikazana je na trokatnoj zgradi. Tako se mogu bitno smanjiti seizmičke sile u konstrukcijskim i nekonstrukcijskim elementima. Opisan je proračun konstrukcija otpornih na djelovanje potresa u Hrvatskoj i uporaba elastomernih ležajeva u protupotresnoj izolaciji građevina. U radu je prikazana približna metoda proračuna učinka protupotresne izolacije.

Ž. Šimunić, D. Grandić

Professional paper

## Seismic insulation of buildings with elastomeric bearings

Theoretical support data for seismic analysis of buildings insulated against earthquake action are presented. The seismic insulation with elastomeric bearings is presented on an example of a three-story building. This insulation enables significant reduction of seismic forces in structural and non-structural elements. The analysis of structures resistant to earthquake action in our country, and the use of elastomeric bearings in seismic insulation of structures, is described. An approximate method for calculating efficiency of seismic insulation is presented in the paper.

Ž. Šimunić, D. Grandić

Ouvrage professionnel

## Isolation antisismique des bâtiments par des appareils d'appui en élastomère

L'article présente les bases théoriques pour le calcul sismique des bâtiments isolés contre les séismes. L'isolation antisismique par des appareils d'appui en élastomère est présentée sur un bâtiment à trois étages. Une telle protection permet de réduire sensiblement les forces sismiques dans les éléments constructifs et non-constructifs. On décrit le calcul des constructions parasismiques en Croatie, ainsi que l'utilisation des appareils d'appui en élastomère pour l'isolation antisismique des bâtiments. L'article décrit une méthode approximative du calcul des effets de l'isolation antisismique.

Ж. Шимунич, Д. Грандич

Отраслевая работа

## Антисейсмическая изоляция зданий с помощью эластомерных опор

В работе показаны теоретические основы по сейсмическому расчёту антисейсмически изолированных зданий. Антисейсмическая изоляция с помощью эластомерных опор показана на трёхэтажном здании. Так могут быть значительно снижены сейсмические силы в здании элементах. Описан расчёт конструкций, устойчивых к действию землетрясения, у нас и применение эластомерных опор в антисейсмической изоляции сооружений. В работе показан приблизительный метод расчёта эффективности антисейсмической изоляции.

Ž. Šimunić, D. Grandić

Fachbericht

## Antiseismische Isolierung von Gebäuden mit Hilfe von Elastomerlagern

Dargestellt sind theoretische Unterlagen für die seismische Berechnung von antiseismisch isolierten Gebäuden. Die antiseismische Isolation mit Hilfe von Elastomerlagern ist am Beispiel eines dreistöckigen Gebäudes dargestellt. Auf diese Weise kann man die seismischen Kräfte in konstruktiven und nichtkonstruktiven Elementen beträchtlich vermindern. Beschrieben ist die Berechnung von gegen seismische Einflüsse widerstandsfähigen Konstruktionen in Kroatien und die Anwendung von Elastomerlagern bei der antiseismischen Isolation von Bauwerken. Im Artikel wird auch eine annähernde Methode für die Berechnung des Effekts der antiseismischen Isolation dargestellt.

Autori: Prof. dr. sc. **Želimir Šimunić**, dipl. ing. građ., Hrvatski institut za mostove i konstrukcije, Zagreb;  
mr. sc. **Davor Grandić**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb

## 1 Uvod

U konvencionalnom projektiranju konstrukcija otpornih na djelovanje potresa polazi se od načela da građevina jednom povoljnom kombinacijom nosivosti, krutosti i kapaciteta disipacije energije podnese djelovanje potresa bez rušenja ili velikih šteta, prije svega ne ugrožavajući ljude. Pri tome se, ovisno o stupnju važnosti građevine odlučuje u kojoj će se mjeri dopustiti rad konstrukcije u postelastičnom području, kako bi se na taj način histereznim prigušenjem apsorbirala unesena energija. Da bi konstrukcija u cjelini, odnosno njeni elementi mogli "raditi" u plastičnom području valja osigurati dostatnu žilavost, odnosno duktilnost. Duktilne konstrukcije imaju svojstvo transformacije i rasapa kinetičke energije unesene u konstrukciju preko njezina temelja, histereznim prigušenjem. Duktilno ponašanje konstrukcije, odnosno sposobnost konstrukcije da pretrpi znatne plastične deformacije bez gubitka nosivosti, implicira neki stupanj oštećenja i, možda, kvarenje njezine sposobnosti da izdrži i buduće jake potrese. Oštećenje se može akumulirati tijekom niza događaja (potresa) i nosivost sustava može biti ozbiljno narušena. Kriteriji razine oštećenja koji se mogu prihvatiti većinom su gospodarske prirode. Prema većini seizmičkih propisa za važnije se građevine predviđa veće potresno opterećenje kako bi plastične deformacije, a time i oštećenja građevine, bile manje. Glavna ideja protupotresne izolacije jest reducirati djelovanje potresa na građevine promjenom njezinih dinamičkih svojstava, kako bi se njezino ponašanje pod djelovanjem potresa što više zadržalo u elastičnom području i na taj način na gospodarski prihvatljiv način smanjila oštetljivost građevina, a time i troškovi sanacije. Protupotresna izolacija posebno je značajna kod građevina kod kojih je nužno osigurati njihovu uporabljivost neposredno nakon djelovanja jakog potresa odnosno kod građevina bitnih za funkcioniranje društva (na primjer bolnice, telekomunikacijske građevine, vatrogasne postaje itd.).

## 2 Općenito o protupotresnoj izolaciji

Postoje dvije osnovne ideje o izolaciji građevina od djelovanja potresa: produljenje osnovnih perioda titranja odnosno sniženje vlastitih frekvencija protupotresnim izolatorima do veličine koja osigurava dovoljno nizak odziv konstrukcije na gibanje tla; ili postavljanje zgrade na podlogu s ograničenim koeficijentom trenja čime se ograničavaju i veličine seizmičkih sila. Moguća je kombinacija objiju metoda. Uz ovo se mogu dodati i razni apsorberi energije. Produljenjem perioda titranja građevine postiže se udaljavanje od predominantnog perioda gibanja tla koji za većinu potresa iznosi 0,2 do 1,0 s, čime se isključuje pojava rezonancije. Jedan od načina za produljenje perioda titranja građevine jest uporaba armiranih elastomernih ležajeva (AEL). Osim produljenjem

perioda ležajevi smanjuju razinu seizmičkih sila svojim viskoznim i histereznim prigušenjem. Postavljanjem konstrukcija na armirane elastomerne ležajeve može se osnovni period slobodnih oscilacija krutih konstrukcija dosta lako povećati na otprilike dvije sekunde, što je dovoljno daleko od područja dominantne seizmičke uzbuđe. Specijalni apsorberi energije (amortizeri) mogu biti lonci s klipom ispunjeni nekom vrlo viskoznom tvari. Može se iskoristiti plastični rad mekog čelika, olova ili slično. Kod problema protupotresne izolacije posebnu pozornost treba posvetiti proturječnim zahtjevima. S jedne strane uporaba izolatora redovito je povezana s pojavom velikih pomaka za vrijeme djelovanja snažnog potresa, a uvjeti uporabljivosti građevine nalažu nam ograničene pomake pri djelovanju vjetra. Također, valja voditi računa i o očekivanom frekventnom sastavu potresa. Poznato je da gibanje mekog uslojenog tla ima dulje predominantne periode od perioda koji se javljaju na čvrstom tlu, pa bi pri mekom temeljnom tlu izolacija mogla biti manje izražena, ili bi njezin učinak čak mogao izostati, odnosno biti i kontraproduktivan jer bi moglo doći do rezonantnih pojava. Izolacija građevina od djelovanja potresa ima smisla kod nižih zgrada koje imaju kratkotrajne i niske vlastite periode oscilacija koje nisu temeljene na debelim slojevima mekog tla. Kod visokih zgrada ona ne bi imala racionalno opravdanje jer vjetar može biti predominantno horizontalno opterećenje.

## 3 Uporaba elastomernih ležajeva

U mnogobrojnim primjerima protupotresne izolacije građevina rabljeni su armirani elastomerni ležajevi (AEL) od kloroprenskog (umjetnog) kaučuka i prirodne gume. Veličina prigušenja kod takvih ležajeva uvelike ovisi i o veličini vertikalnog opterećenja. Često im se svojstva poboljšavaju ugradnjom olovnog cilindra u sredini ležajeva koji služi kao apsorber energije. Uporaba elastomernih ležajeva povezana je s pojavom velikih deformacija koje otežavaju priključak instalacija, te je potrebna posebna pozornost u rješavanju detalja dilatacijskih reški. Osim toga, mala krutost konstrukcije može prouzročiti pretjerane pomake od vjetra. Stoga može biti potrebno predvidjeti uporabu mehaničkih "osigurača" koji će popustiti tek pri određenoj veličini seizmičke uzbuđe. Praktična primjena elastomernih ležajeva za protupotresnu izolaciju građevina počela je početkom 70-ih godina prošlog stoljeća. Od ostvarenih primjera u literaturi često se navode primjeri četverokatne javne zgrade u Wellingtonu, N. Zeland (1982. godina) kod koje je protupotresna izolacija postignuta s 80 AEL s olovnim trnovima i francuski sustav protupotresne izolacije GAPEC po kojem je izvedena trokatna školska zgrada kod Marseillesa (1978.g), gdje je osnovni period produljen s otprilike 0,2 s na 1,7 s, čime su seizmičke sile i momenti smanjeni tri puta. Primijenjeni su AEL od prirodne gume. Ležajevi su se

ponašali približno linearno i za posmične deformacije veće od 100%. Ukupna visina elastomera bila je 40 mm, a promjer ležajeva 300 mm. Škola je projektirana za VIII. stupanj potresnog inteziteta prema MCS ljestvici. Kao vjerojatno prvi slučaj primjene elastomernih ležajeva za protupotresnu izolaciju u svijetu [11] navodi se primjer škole Heinricha Pestalozzija u Skoplju. Građevina se oslanjala na velike blokove od prirodne gume, koji za razliku od danas primjenjivanih ležajeva nisu bili armirani čeličnim pločama.

#### 4 Stanje proračuna konstrukcija otpornih na djelovanje potresa u nas

U Hrvatskoj je još uvijek u uporabi "Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima" iz 1981. godine (u daljem tekstu Pravilnik) [3]. Za proračun mostova primjenjuju se još stariji "Privremeni tehnički propisi za građenje u seizmičkim područjima" iz 1964. godine. Neki projektanti za proračun mostova i ostalih inženjerskih građevina rabe suvremeniji "Nacrt pravilnika o tehničkim normativima za projektiranje i proračun objekata u seizmičkim područjima" [7]. Pravilnikom [3] predviđena je uporaba metode ekvivalentnih statičkih sila za sve konstrukcije visokogradnje osim za one koje su prema seizmičkom riziku svrstane izvan kategorije. Konstrukcija se analizira na ravninskim modelima, odvojeno i zasebno u dva međusobno okomita horizontalana smjera, a torzijski učinci dodaju se naknadno, približnim postupkom. Kako se ta metoda temelji na prvom vlastitom obliku koji se aproksimira pravcem, utjecaji viših oblika vibracija koji su značajniji za više zgrade, približno se uzimaju u obzir dodavanjem koncentrirane sile na vrhu zgrade. Nedostatak je metode ekvivalentnih statičkih sila što se njome ne uzima u dovoljnoj mjeri u obzir utjecaj prostornog rasporeda masa i krutosti u konstrukciji. Umjesto nje bilo bi bolje rabiti neku od metoda dinamičke analize na prostornom proračunskom modelu konstrukcije. U Pravilniku se vodi računa o duktilnosti konstrukcije uvođenjem koeficijenta duktilnosti i prigušenja  $K_p$  te pravilima konstruiranja kao što su ograničenje uzdužne sile u stupovima i zidovima i pravila armiranja uzdužnom i poprečnom armaturom. Međutim, ta su pravila suviše poopćena, ne razmatraju se pojedini slučajevi, kao npr. da duktilnost svih "suvremenih konstrukcija od armiranog betona" istog tipa ne mora biti ista, niti se predviđa proračunska provjera lokalne duktilnosti u području plastičnih zglobova, iako se o tome spomenutim pravilima konstruiranja vodi računa. Također se dovoljno ne osigurava poželjan mehanizam sloma, to jest onaj u kojem se otvaranjem većeg broja plastičnih zglobova troši seizmička energija unesena u konstrukciju. Za okvirne konstrukcije to je bočni mehanizam s plastičnim zglobo-

vima u gredama i u podnožju stupova. Radi osiguranja prelaska sustava u mehanizam prema ENV 1998 predviđa se primjena proračuna po kapacitetu nosivosti. Pri određivanju parametara za izračun seizmičkog opterećenja (proračun ukupnog seizmičkog koeficijenta  $K$ ) fizikalno značenje tog postupka nije dovoljno transparentno. Namjera je, očito, bila pojednostaviti praktične proračune, što dakako može biti dobro svojstvo tehničkih propisa, ali isto tako može dovesti do njihove formalne odnosno nedovoljno kvalitetne primjene. Ovdje valja istaknuti da su učinci od seizmičkog djelovanja na konstrukciju u jednom smjeru dobiveni prema proračunskom spektru odziva danom u europskim prednormama za proračun i projektiranje konstrukcija u seizmičkim područjima ENV 1998 (Eurokod 8, EC8) [19, 20, 21, 22] veći nego dobiveni prema Pravilniku za istu konstrukciju smještenu na području istog seizmičkog intenziteta. Također, u ENV-u 1998 daje se, za razliku od Pravilnika, cijeli niz uvjeta i posebnih mjera za osiguranje zahtjevanih razina duktilnosti elemenata i konstrukcije u cjelini. Zbog očitih prednosti valjalo bi u praksi što prije prijeći na primjenu europskih prednorma za projektiranje i proračun konstrukcija u potresnim područjima ENV 1998, a kao standardnu metodu analize konstrukcije rabiti višemodalnu spektralnu analizu koja je prema ENV 1998 predložena za analizu svih vrsta zgrada. Za zgrade pravilne u tlocrtu i po visini za proračun seizmičkog opterećenja dopušta se uporaba metode ekvivalentnih statičkih sila. Protupotresna izolacija kao način redukcije djelovanja potresa na građevine kod nas se ne provodi, a niti u svijetu ostvareni primjeri izoliranih građevina nisu česti.

#### 5 Približni proračun učinka protupotresne izolacije

Prikazuje se približna metoda proračuna učinka protupotresne izolacije koja može poslužiti za idejni proračun. Opisani postupak polazi od pretpostavke da bitan utjecaj na ponašanje konstrukcije ima samo prvi (osnovni) oblik oscilacija. Konstrukciju izoliranu s pomoću AEL možemo zamisliti kao serijsku vezu dviju konstrukcija s istim rasporedom masa po visini, i to:

- stvarne konstrukcije kruto povezane s tлом
- potpuno krute konstrukcije elastično povezane s tлом (preko AEL).

Kako se radi o serijskoj vezi, imamo:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}, \quad (1)$$

gdje je  $K_1$  modalna krutost osnovnog oblika vibracija stvarne konstrukcije upete u tlo, a  $K_2$  je sumarna krutost svih ležajeva. Kako je  $T^2 = 4\pi^2 M/K$ , dobiva se:

$$T^2 = T_1^2 + T_2^2, \quad (2)$$

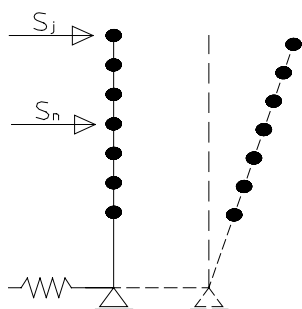
gdje je  $T_1$  prvi period stvarne konstrukcije upete u tlo,  $T_2 = 2\pi\sqrt{M/K_2}$  je period titranja apsolutno krute konstrukcije na ležajevima. Period  $T_1$  se za ovu svrhu može dobiti prema nekom od približnih izraza. Za dobiveni period  $T$  prema izrazu (2) odredi se ordinata spektra odziva, a zatim i ukupna potresna sila ("base shear") prema izrazu:

$$S = M \cdot S_{pa}, \quad (3)$$

gdje je  $S_{pa}$  ordinata spektra pseudoubziranja, a  $M$  je ukupna masa zgrade. Ako se koristimo Pravilnikom, tada je dinamički koeficijent  $K_d$  funkcija veličine perioda i uzima se u obzir ukupna težina građevine  $G$ :

$$S = K \cdot G, \quad (4)$$

gdje je  $K$  ukupni seizmički koeficijent. Raspored sila potresa po visini građevine može se približno izračunati iz pretpostavke da bitan utjecaj na odziv konstrukcije ima samo osnovni (prvi) oblik oscilacija, koji iznad ležajeva možemo aproksimirati pravcem, prema slici 1.



Slika 1. Raspored potresnih sila

Sila  $(S - \Delta S)$  jednoliko se raspoređi po katnim visinama, a sila  $\Delta S = S \cdot \frac{T_1^2}{T_1^2 + T_2^2}$  raspoređi se linearno po visini zgrade, prema izrazu:

$$\Delta S_j = \Delta S \frac{G_j h_j}{\sum_{j=1}^n G_j h_j}, \quad (5)$$

gdje je  $n$  broj katova. Ukupnu potresnu silu  $S$  raspoređujemo po visini zgrade s pomoću jednadžbe:

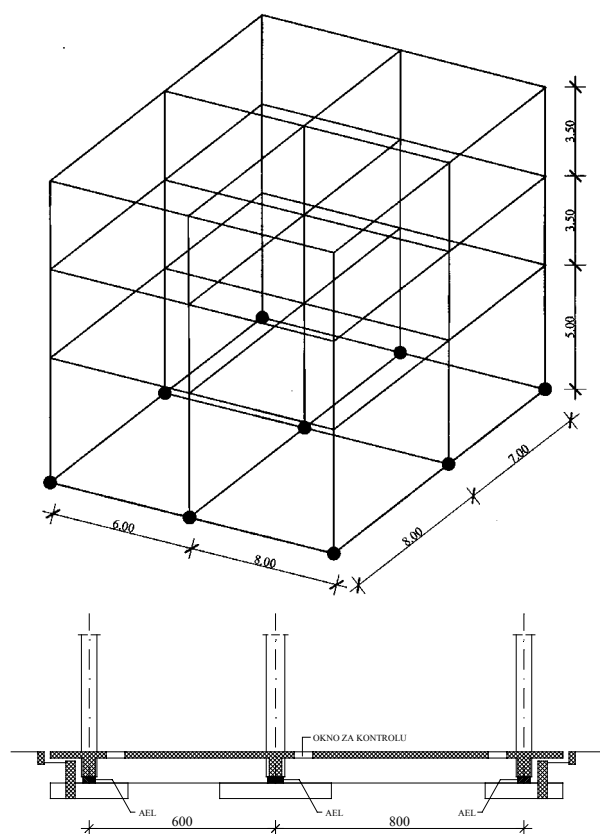
$$S_j = \frac{(S - \Delta S)}{n} + \Delta S \frac{G_j h_j}{\sum_{j=1}^n G_j h_j} \quad (6)$$

## 6 Primjer

Analizira se seizmički odziv konstrukcije s protupotresnim izolatorima i bez njih. U slučaju bez protupotresnih izolatora u obliku AEL, razmatra se odziv konstrukcije na djelovanje potresa metodom višemodalne spektralne analize na prostornom proračunskom modelu na način da se najprije rabi elastični spektar odziva uz pretpostavku potpuno elastičnog ponašanja konstrukcije, a zatim proračunski spektar prema ENV 1998-1-1 (EC8, dio 1-1) [19], uz pretpostavku duktilnog ponašanja konstrukcije. Za konstrukciju na protupotresnim izolatorima odziv se dobiva uporabom elastičnog spektra odziva, jer se za taj slučaj pretpostavlja elastično ponašanje konstrukcije. Na kraju se zaključuje o učinkovitosti protupotresne izolacije s pomoću AEL iz usporedbe učinaka seizmičkog djelovanja dobivenih za izolirani sustav prema učincima djelovanja koji su dobiveni za neizolirani sustav uporabom elastičnog spektra odziva uz pretpostavku elastičnog ponašanja konstrukcije. Ta se učinkovitost uspoređuje s postignutom redukcijom seizmičkih sila dobivenih uz pretpostavku duktilnog ponašanja konstrukcije primjenom proračunskog spektra za analizu odziva neizoliranog sustava u odnosu prema seizmičkim silama dobivene uz pretpostavku elastičnog ponašanja konstrukcije primjenom elastičnog spektra odziva za isti neizolirani sustav. Promatra se građevina smještena u VIII. potresnoj zoni prema MSK-64 ljestvici namijenjena smještaju vatrogasne postaje. Konstrukcija građevine je prostorni trokatni okvir od armiranobetonskih stupova, greda i ploča. Stupovi prizemlja su dimenzija  $b/h = 50/50$  cm, srednji stup je promjera  $d = 60$  cm, a ostali stupovi su dimenzija  $b/h = 40/40$  cm. Grede u razini temelja odnosno poda prizemlja su dimenzija  $b/h = 40/80$  cm, ostale su  $b/h = 40/70$  cm. Redukcija seizmičkog djelovanja postiže se polaganjem konstrukcije na standardne AEL od kloroprenskog (umjetnog) kaučuka. Ukupno ima 8 okruglih ležajeva promjera 450 mm i jedan ležaj promjera 550 mm (ispod srednjeg stupa). Debljina elastomera je 21 mm, ukupna visina primijenjenih ležajeva je 201 mm.

Proračun je obavljen s pomoću računala na modelu sastavljenom od 123 štapna elementa, 48 pločastih elemenata i 325 čvorova. Horizontalne su koordinatne osi X i Z, a vertikalna je os Y.

Rabi se višemodalna spektralna analiza zasnovana na spektrima odziva u dijelu 1-1 europskih prednorma za proračun i projektiranje seizmički otpornih konstrukcija (ENV 1998-1-1). U prednormama ENV 1998-1 koje su podijeljene na opći dio (ENV 1998-1-1) i na ostale dijelove u kojima se daju pravila za zgrade, opisane su samo općenite smjernice seizmičkog proračuna za slučaj kada se primjenjuju sustavi za protupotresnu izolaciju.



Slika 2. Promatrana konstrukcija na AEL: aksonometrija (gore), presjek (dolje)

Stoga se u ovoj analizi primjenjuje i prednorma ENV 1998-2 za mostove, koja detaljnije obrađuje uporabu elastomernih ležajeva kao protupotresnih izolatora. Analiza se provodi za prvih šest vlastitih oblika oscilacija za slučaj kada konstrukcija nije protupotresno izolirana i za tri oblika kada jest. Modalni odzivi kombiniraju (rezne sile, pomake) sa CQC kombinacijom (kompletna kvadratna kombinacija) kojom se uzima u obzir statistička ovisnost oscilacija u pojedinim oblicima vibracija (bliske vlastite frekvencije). Vjerojatni učinci djelovanja potresa, zbog istodobne pojave seizmičke aktivnosti u smjeru horizontalnih osi X i Z, dobivaju se sljedećim kombinacijama:

$$a) E_{Edx} \text{ "+" } 0,3 \cdot E_{Edz}, b) 0,3 E_{Edx} \text{ "+" } E_{Edz} \quad (7)$$

gdje su:

$E_{Edx}$  – učinci djelovanja zbog seizmičke aktivnosti uzduž odabrane horizontalne X-osi konstrukcije

$E_{Edz}$  – učinci djelovanja potresa poradi jednake seizmičke aktivnosti uzduž druge horizontalne osi konstrukcije, okomite na prvu (Z-os)

Spektralna analiza može se uz pretpostavku linearnog ponašanja konstrukcije rabiti za proračun protupotresno

izoliranih konstrukcija ako su zadovoljeni ovi uvjeti (prema ENV 1998-2 i literaturi [17]):

- da je proračunska krutost izolacijskog sustava pri proračunskom pomaku  $d_{Ed}$  najmanje 50% efektivne proračunske krutosti pri  $0,2 d_{Ed}$
- da proračunsko prigušenje nije preveliko (do 10%)
- da je horizontalna krutost izolacijskog sustava neovisna brzini opterećivanja i veličini vertikalnog i dvosmjernog opterećenja
- izolacijski sustav treba proizvoditi povratnu silu čije je povećanje najmanje 0,025 ukupne
- gravitacijske težine nad izolatorima pri pomaku od  $0,5d_{Ed}$  do  $d_{Ed}$  ( $d_{Ed}$  je računski pomak).

Ova se ograničenja uvode jer se primjenjuje postupak proračunske krutosti i proračunskog viskoznog prigušenja s kojim se uzima u obzir disipacija energije histereznim prigušenjem izolacijskog sustava (linearizacija problema). U usporedbi s točnim nelinearnim analizama rješenja po ovom postupku odstupaju do 10% za momente savijanja a do 50% za pomake. Ovi su podaci utvrđeni na ležajevima od prirodne gume [17], za AEL od umjetne gume ta odstupanja bila bi manja (uža histerezna petlja), ali ukazuju na to da je pomake moguće dobiti s puno manjom točnošću. Općenito, ako gore navedeni uvjeti prema ENV 1998 nisu ispunjeni valja provesti nelinearnu dinamičku analizu. Navedeni podaci upućuju na opću konstataciju da se ovim postupkom dobivaju pomaci sa znatno većim odstupanjima u odnosu prema egzakt-nijoj nelinearnoj analizi.

## 7 Spektri odziva

### 7.1 Elastični spektar odziva

Elastični spektar odziva  $S_e(T)$  na gibanje tla određen je uz pretpostavku 5%-tnog viskoznog prigušenja, s pomoću sljedećih izraza:

$$T_A \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot S \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot \beta_0 - 1) \right], \quad (8)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0, \quad (9)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \left[ \frac{T_C}{T} \right]^{k_1}, \quad (10)$$

$$T_D \leq T: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \left[ \frac{T_C}{T_D} \right]^{k_1} \cdot \left[ \frac{T_D}{T} \right]^{k_2}, \quad (11)$$

gdje je  $a_g$  proračunsko ubrzanje tla,  $S_e(T)$  ordinata elastičnog spektra odziva,  $\beta_0$  spektralni faktor povećanja pri viskoznom prigušenju 5%,  $k_1$ ,  $k_2$  su eksponenti koji utječu na oblik spektra za periode oscilacije veće od  $T_C$  odnosno  $T_D$ ,  $S$  je parametar tla,  $T_B$ ,  $T_C$  su granice horizon-

talne grane spektra,  $T$  je period oscilacije linearnog sustava s jednim stupnjem slobode i  $\eta$  je faktor korekcije prigušenja s referentnom vrijednošću  $\eta = 1$  za viskozno prigušenje 5%. Vrijednost faktora korekcije prigušenja izračunava se za prigušenja različita od 5% izrazom:

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi}} \geq 0,7, \quad (12)$$

gdje je  $\xi$  relativno prigušenje. Pretpostavljamo sljedeće ulazne podatke za konstruiranje spektra:

- za područje intenziteta potresa VIII. stupnja po MSK-64 ljestvici, računsko ubrzanje tla prema prijedlogu državnog dokumenta za primjenu jest 0,2 g
- razred tla je B ... srednje čvrsta glina, dobro konsolidirana
- faktor povećanja  $\beta_0 = 2,5$
- granični su periodi prema tome:  $T_B = 0,15$  s;  $T_C = 0,60$ s;  $T_D = 3,0$  s
- ubrzanje tla  $a_g = 0,2 \cdot 9,81 = 1,962$  m/s<sup>2</sup>

Spektar se još množi s faktorom važnosti građevine  $\gamma_I = 1,4$ .

## 6.2 Proračunski spektar odziva

U slučaju kada se predviđa plastično deformiranje konstrukcije proračun i dimenzioniranje provodi se za reducirane seizmičke sile. Da bi se moglo računati s reduciranim seizmičkim silama valja osigurati duktilnost konstrukcije, odnosno dostatan kapacitet plastičnog deformiranja elemenata konstrukcije. Do redukcije sila kod duktilnih konstrukcija dolazi uslijed trošenja energije na plastično deformiranje. Umjesto opsežne nelinearne dinamičke analize sustava, može se rabiti linearna analiza temeljena na reduciranom spektru odziva, koji se u ENV-u 1998-1-1 naziva *proračunski spektar*. Redukcija se ostvaruje s pomoću faktora ponašanja  $q$  u kombinaciji s koeficijentima modifikacije  $k_{d1}$  i  $k_{d2}$ . Normirani proračunski spektar odziva, dobiven iz elastičnog spektra odziva normiran na gravitacijsko ubrzanje zemlje  $g$ , definiran je izrazima:

$$T_A \leq T \leq T_B: S_d(T) = \alpha \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot \left( \frac{\beta_0}{q} - 1 \right) \right], \quad (13)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_d(T) = \alpha \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q}, \quad (14)$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) = \alpha \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right]^{k_{d1}} \geq 0,2 \cdot \alpha, \quad (15)$$

$T_D \leq T$ :

$$S_d(T) = \alpha \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \cdot \left[ \frac{T_C}{T_D} \right]^{k_{d1}} \cdot \left[ \frac{T_D}{T} \right]^{k_{d2}} \geq 0,2 \cdot \alpha, \quad (16)$$

gdje je  $S_d(T)$  ordinata proračunskog spektra odziva normiranog na ubrzanje  $g$ ,  $\alpha$  je omjer proračunskog ubrzanja tla  $a_g$  i gravitacijskog  $g$  ( $\alpha = a_g/g$ ),  $q$  je faktor ponašanja,  $k_{d1}$ ,  $k_{d2}$  su eksponenti koji utječu na oblik proračunskog spektra odziva za oscilacije perioda većeg od  $T_C$  odnosno  $T_D$ .

Faktor ponašanja konstrukcije dobije se iz izraza:

$$q = q_0 \cdot k_D \cdot k_R \cdot k_W \geq 1,5, \quad (17)$$

gdje je  $q_0$  osnovna vrijednost ovisna o konstrukcijskoj vrsti (okviri, zidovi...),  $k_D$  je faktor koji odražava razred duktilnosti,  $k_R$  je faktor koji odražava regularnost sustava po visini,  $k_W$  je faktor dominantnog oblika sloma.

Armiranobetonske se konstrukcije u ENV-u 1998-1-3 dijele, ovisno o sposobnosti plastičnog deformiranja na tri razreda duktilnosti: DC "L" (niska duktilnost, "low ductility"), DC "M" (srednja duktilnost, "medium ductility") i DC "H" (visoka duktilnost, "high ductility"). Proračun se provodi za srednji razred duktilnosti (DC "M"). Konstrukcija je pretežito regularna po visini, pa prema tome imamo:  $k_D = 0,75$  za DC "M",  $k_R = 1,0$  za regularan sustav,  $k_W = 1,0$  za okvirni sustav,  $q_0 = 5$ .

Faktor ponašanja tada iznosi:

$$q = 5 \cdot 0,75 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 3,75.$$

Koeficijenti modifikacije su:  $k_{d1} = 2/3$ ,  $k_{d2} = 5/3$ .

## 8 Svojstva AEL bitna za odziv konstrukcije na potresnu pobudu

### 8.1 Općenito

Odziv konstrukcije na gibanje tla za vrijeme djelovanja potresa ovisi o dinamičkim svojstvima konstrukcije. Smisao je protupotresne izolacije utjecati na dinamička svojstva sustava tako da se smanje potresne sile. Na veličinu seizmičkih sila koje djeluju na konstrukciju zbog pretpostavljene potresne uzbude utječu krutost i prigušenje sustava. *Krutost* određuje vlastite periode konstrukcije, a o odnosu vlastitih perioda i predominantnih perioda potresa ovisi dinamičko povećanje opterećenja na konstrukciju. Pri oscilacijama tla s "uobičajenim" frekvencijskim sastavom (predominantni periodi oko 0,5 sekunde) smanjenje krutosti povoljno utječe na veličinu potresnog opterećenja. Kad se za protupotresnu izolaciju zgrada upotrebljavaju armirani elastomerni ležajevi, vlastite frekvencije izoliranih sustava su obično između 0,5 i 1,0 Hz [11].

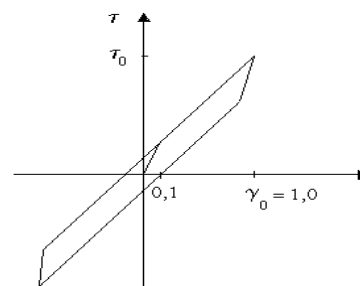
*Prigušenje* smanjuje amplitude oscilacija konstrukcija s vremenom. To znači da se mehanička energija konstrukcije postupno smanjuje i pretvara u druge oblike energije, prije svega u toplinu. Postoje nekonzervativne sile

koje se suprotstavljaju gibanju i smanjuju mehaničku energiju. To su sile prigušenja, a pojavu smanjivanja mehaničke energije zovemo disipacijom energije ili prigušenjem. Postoje razni tipovi prigušenja. U slučaju protupotresne izolacije konstrukcija s AEL od interesa je *viskozno i histerežno prigušenje*. *Viskozno se prigušenje* pojavljuje se zbog viskoznosti gradiva. Proporcionalno je relativnoj brzini oscilacija, raste s povećanjem frekvencije. Taj tip obično prevladava kod oscilacija konstrukcija u elastičnom području i lako ga je uključiti u matematički model. Iz tih razloga najčešće se rabi u praksi. Model viskoznog prigušenja često se primjenjuje i za modeliranje drugih tipova prigušenja, s tim da se uporabe ekvivalentni koeficijenti prigušenja. *Histerežno prigušenje* je značajan mehanizam ploštine petlje u dijagramu opterećenje - pomak (ploština unutar histerezne petlje). Histerežno prigušenje ovisi od veličine pomaka. Može se modelirati oprugom koja ima nelinearnu ovisnost između opterećenja i pomaka. U tom slučaju problem postaje nelinearan i za rješavanje jednadžbi gibanja potrebno je primijeniti nelinearne metode. Aproksimativno se ponekad rabi linearna analiza s viskoznim prigušenjem, s tim da se uporabi ekvivalentno viskozno prigušenje i ekvivalentna krutost (npr. u ovom primjeru).

### 8.2 Veličine krutosti i prigušenja AEL

Armirani elastomerni ležajevi odlikuju se velikom nosivošću i krutošću u vertikalnom smjeru i malom krutošću u horizontalnom smjeru (posmična krutost). Mala posmična krutost omogućuje smanjivanje potresnih sila zbog produljenja perioda horizontalnih oscilacija konstrukcije nastalog zbog smanjenja horizontalne krutosti sustava. Krutost AEL jest funkcija modula posmika elastomera  $G$ . Razlikujemo statički modul posmika  $G$  i dinamički modul posmika  $G_d$ . Za tvrdoću elastomera IRHD 60 statički je modul posmika  $G = 1,0 \text{ N/mm}^2$ . Poradi vanjskog opterećenja dolazi do deformacije ležajeva svladavanjem međusobno prostorno povezanih međumolekularnih sila, odnosno dostizanjem tzv. granične energije pri dinamičkom opterećenju elastomerni ležaj postaje krući nego kod statičkog opterećenja jer je veličina granične energije postignuta samo na nekim mjestima makromolekularnih veza. Zbog toga s povećanjem frekvencije raste i modul posmika. Utvrđeno je da dinamički moduli  $E_d$  i  $G_d$  ovise o frekvenciji, o amplitudi oscilacija i o vrsti elastomera. Ove dinamičke karakteristike rastu s povećanjem frekvencije i tvrdoće, te sa sniženjem temperature i amplitude. Za niže frekvencije (oko 0,1 Hz) veličine modula posmika približavaju se statičkom modulu posmika [16]. Za dinamički proračun može se za dinamički modul posmika uzeti  $G_d = 2G$  [16], ako se ne provodi detaljnija analiza. No, takvo znatno povećanje modula posmika primjereno je za visoke frek-

vencije, velike tvrdoće elastomera i (ili) pri niskim temperaturama i maloj amplitudi deformacija ležajeva. Kod potresa se očekuju velike deformacije ležajeva ( $\text{tg}\gamma > 1,0$ ), vlastite frekvencije sustava s elastomernim ležajevima su u području od 0,5 do 1,0 Hz, zbog čega se dinamička krutost ležajeva približava statičkoj za velike deformacije. U ovom primjeru se, bez upuštanja u detaljnu analizu, procjenjuje ekvivalentno viskozno prigušenje. Analiziraju se dva izvora prigušenja koja su karakteristična za AEL: viskozno i histerežno prigušenje. Viskozno prigušenje prevladava pri visokim frekvencijama i malim deformacijama. Kod velikih deformacija znatan je doprinos histereznog prigušenja. Prema podacima dostupnima u literaturi [16] konstruirana se idealizirani histerezni dijagram za maksimalnu relativnu deformaciju elastomera  $\text{tg}\gamma = 1,0$ . Proračunsko prigušenje određuje se kao suma koeficijenata viskoznog prigušenja sustava ( $\xi = 5\%$ ) i ekvivalentnog viskoznog prigušenja zbog neelastičnog deformiranja AEL. Za  $\gamma = 1,0$  ekvivalentni dinamički modul posmika jest  $G = 1,1 \text{ N/mm}^2$ .



Slika 3. Idealizirani histerezni dijagram

Pretpostavlja se prosječna posmična deformacija  $\gamma_0 = 1,0$  ( $\epsilon_s$ , oznaka prema Eurocodeu 8) i osnovni period izolirane konstrukcije  $T_1 = 2,0 \text{ s}$ . Ploština histerezne petlje koja odražava specifični gubitak energije u jednom ciklusu jest  $W = 0,37 \text{ N/mm}^2$ . Mehanički gubitak  $\delta$  određuje se iz ploštine dijagrama histereze prema izrazu [5]:

$$\sin \delta = \frac{W}{\pi \cdot \tau_0 \cdot \gamma_0} = \frac{0,37}{3,14 \cdot 1,1 \cdot 1,0} = 0,107 \quad (18)$$

$$\delta = 6,14^\circ, \quad \text{tg} \delta = 0,108$$

Proračunsko viskozno prigušenje ovisi i o frekvenciji uzbude i ako se gibanje tla za vrijeme djelovanja potresa aproksimira kao periodično s periodom  $\Omega = 0,5 \text{ s}$  (predominantni period potresa) može se izračunati prema razuz:

$$c_{eq} = \frac{k \cdot \text{tg} \delta}{\Omega} = \frac{13726,2 \cdot 0,108}{12,57} = 117,93 \text{ kNs/m}, \quad (19)$$

gdje je  $k$  ukupna horizontalna krutost svih AEL,  $\Omega$  je kružna frekvencija pobude ( $\Omega \approx 2\pi/0,5 = 12,57 \text{ rad/s}$ ). Ekvivalentni koeficijent viskoznog prigušenja jest:

$$\xi_{eq} = \frac{c_{eq}}{2M\omega} = \frac{117,93}{2 \cdot 994,24 \cdot 3,14} = 0,019 \approx 0,02 = 2\%, \quad (20)$$

gdje je  $\omega$  kružna frekvencija izolirane konstrukcije, ako joj je  $T = 2,0$  s ( $\omega = 2\pi/2 = 3,14$  rad/s). Na poslijetku se određuje proračunski koeficijent prigušenja:  $\xi_I = 5 + 2 = 7\%$ . Prema ENV-u 1998-2 (mostovi) dopušta se, ako se za potresnu izolaciju mostova rabe uobičajeni AEL, a ne provode se posebna ispitivanja, za projektiranje rabiti sljedeće vrijednosti:  $\xi_I = 5,0\%$ ,  $G = 1,2$  N/mm<sup>2</sup>, za  $\varepsilon_s \leq 1,2$ ,  $G = 1,6$  N/mm<sup>2</sup>, za  $\varepsilon_s \leq 2,0$ ,  $\varepsilon_{bu} = 4,0$  (deformacija koja odgovara slomu ležaja), što bitno ne odstupa od prije analiziranih vrijednosti. Vrijednosti u europskim normama su na strani veće sigurnosti. Upotrijebljene su ove krutosti ležajeva:

- Ležajevi  $\varnothing 450$  mm  
 $A = 45^2 \cdot \pi/4 = 1590,4$  cm<sup>2</sup>,  $t_l = 121$  mm (ukupna visina elastomera)  
 $k_h = \frac{G \cdot A}{t_l} = \frac{0,11 \cdot 1590,4}{0,121} = 1445,8$  kN/m – posmič-  
 na krutost  
 $k_v = \frac{E \cdot A}{t_l} = \frac{0,55 \cdot 80 \cdot 1590,4}{0,121} = 578327$  –kN/m– ver-  
 tikalna krutost
- Ležaj  $\varnothing 550$  mm  
 $A = 55^2 \cdot \pi/4 = 2375,8$  cm<sup>2</sup>,  $t_l = 121$  mm  
 $k_h = \frac{0,11 \cdot 2375,8}{0,121} = 2159,8$  kN/m  
 $k_v = \frac{0,55 \cdot 80 \cdot 2375,8}{0,121} = 863927$  kN/m  
 $k_t = \frac{G \cdot I_T}{t_l} = \frac{1100 \cdot 0,008984}{0,121} = 81,7$  kNm/rad – torzij-  
 ska krutost

### 8.3 Utjecaj prigušenja na smanjenje ordinata spektra odziva

Prigušenje smanjuje amplitude oscilacija s vremenom. To znači da se mehanička energija konstrukcije postupno smanjuje i pretvara u druge oblike energije, prije svega u toplinu. Spektar odziva predstavlja maksimalne veličine odziva oscilatora s jednim stupnjem slobode za neku uzбудu, ovisno o periodu slobodnih oscilacija. Jednadžba gibanja za sustav s više stupnjeva slobode može se napisati u matricnom obliku:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F \quad (21)$$

gdje je  $M$  matrica masa,  $C$  matrica prigušenja,  $K$  matrica krutosti,  $F$  vektor vanjskog opterećenja, a  $U, \dot{U}, \ddot{U}$  su vektori generaliziranih pomaka, brzine i ubrzanja.

Nakon transformacije na modalne koordinate pretpostavlja se da je matrica prigušenja  $C$  dijagonalna, a njezini su elementi:

$$C_i = \xi_i \cdot c_{kr} = 2 \cdot \xi_i \cdot M_i \cdot \omega_i \quad (22)$$

gdje je  $i$  oznaka za  $i$ -ti oblik oscilacija. Spektar odziva računa se kao funkcionalni odnos maksimalnog odziva (obično pomaka, brzine ili ubrzanja) sustava s jednim stupnjem slobode i perioda, frekvencije ili kružne frekvencije sustava i to kao rješenje jednadžbe gibanja koja za potresnu uzбудu u relativnom koordinatnom sustavu glasi:

$$m\ddot{u}_r + c\dot{u}_r + ku_r = -m\ddot{u}_g \quad (23)$$

Rješenje jednadžbe (23) može se za prigušenje manje od kritičnog napisati u obliku Duhamelova integrala. Za početne uvjete  $u_0 = 0$  i  $\dot{u}_0 = 0$ , dobiva se:

$$u_r(t) = -\frac{1}{\omega_D} \cdot \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (24)$$

gdje je  $\omega_D = \omega\sqrt{1-\xi^2}$  kružna frekvencija prigušenog sustava. Jednadžba (24) je polazna jednadžba za dobivanje spektara odziva. U potresnom inženjerstvu obično se rabe spektri pseudoubrzanja  $S_{pas}$ , koji su po definiciji jednostavno vezani sa spektrom relativnih pomaka:

$$S_{pa} = \omega^2 S_d \quad (25)$$

gdje je  $S_d = |u_r(t)|_{\max}$  spektar relativnih pomaka. U normama se daju gotovi proračunski spektri odziva kojima se uzima u obzir prigušenje sustava. Tako je u spektrima odziva danim u *Nacrtu pravilnika o tehničkim normativima za proračun i projektiranje inženjerskih objekata u seizmičkim područjima* [7] veličina ordinata spektara odziva dana izrazima kojima se uzima u obzir veličina koeficijenta viskoznog prigušenja sustava. Spektri dani u europskim seizmičkim propisima ENV 1998 određeni su uz pretpostavku petpostotnoga viskoznog prigušenja, što je za većinu slučajeva u zgradarstvu dovoljno točna pretpostavka. Za koeficijent prigušenja različit od 5% kod primjene elastičnog spektra rabi se korekcijski faktor prigušenja  $\eta$  prema izrazu (12). Kada se radi o protupotresno izoliranom sustavu vrijednosti spektra množe se modifikacijskim faktorom  $\eta_I$  u slučaju kada je proračunsko prigušenje izolacijskog sustava  $\xi_I \neq 5\%$ :

$$\eta_I = [7,0/(2 + \xi_I)]^{0,35} \quad (26)$$

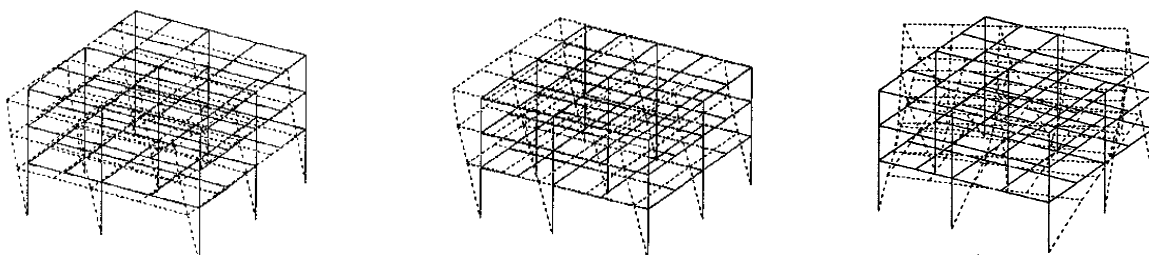
Tako u ovome primjeru imamo:

$$\eta_I = [7,0/(2 + 7)]^{0,35} = 0,916$$

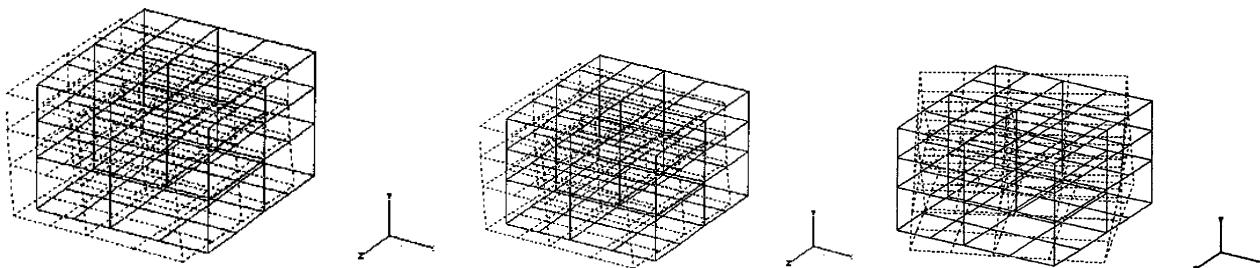
## 9 Rezultati proračuna

Na slikama 4. i 5. prikazani su vlastiti oblici oscilacija konstrukcije za slučajeve s protupotresnom izolacijom i bez nje s pomoću AEL, a u tablici 1. prikazani su periodi





Slika 4. Vlastiti oblici sustava bez protupotresne izolacije



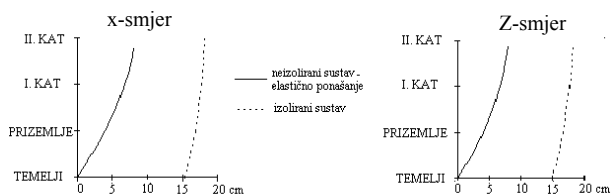
Slika 5. Vlastiti oblici sustava s protupotresnom izolacijom

oscilacija u oba slučaja. Period osnovnog oblika vibracija oscilacija  $T_1 = 1,79$  s neznatno se razlikuje od pretpostavljenog u izrazu (20) ( $T_1 = 2,0$  s).

Tablica 1. Periodi slobodnih oscilacija

Vlastiti oblik	Neizolirani sustav	Izolirani sustav
1	0,66 s	1,79 s
2	0,65 s	1,79 s
3	0,53 s	1,46 s

Na slici 6. grafički su prikazani najveći translatorni pomaci srednjih okvira sustava u dva horizontalna smjera. Pomaci konstrukcije izazvani proračunskim seizmičkim djelovanjem (primjenom proračunskog spektra) dobivaju se prema izrazu [20]:



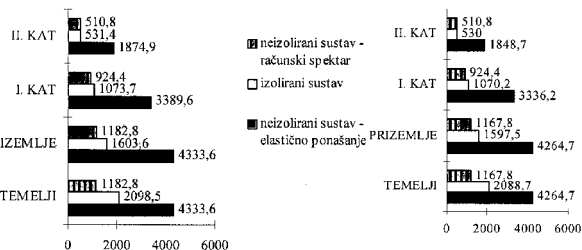
Slika 6. Grafički prikaz pomaka

$$d_s = q_d \cdot d_e \cdot \gamma_I, \tag{27}$$

gdje je  $d_s$  pomak točke nosivog sustava izazvan proračunskim seizmičkim djelovanjem,  $q_d$  je faktor ponašanja za pomak, uzima se jednak faktoru ponašanja  $q$ , osim ako to nije u ENV 1998-1-3 drugačije specificirano (za armiranobetonske okvire jednak je  $q$ ),  $d_e$  je pomak iste točke konstrukcije, određen linearnom analizom na temelju proračunskog spektra odziva,  $\gamma_I$  je faktor važnosti građevine. U ovom se primjeru pomaci neizoliranog sustava  $d_s$  dobiveni prema izrazu (27) i pomaci istog sustava

dobiveni uz pretpostavku elastičnog ponašanja uporabom elastičnog spektra odziva podudaraju.

Promjena reznih sila zbog djelovanja potresa nastala primjenom protupotresne izolacije s pomoću AEL ilustrira se grafičkim prikazom promjene ukupnih poprečnih seizmičkih sila katova (slika 7.). Na veličinu ukupne seizmičke sile u razini temelja (poda prizemlja) kod izoliranog sustava utječe, za razliku od neizoliranog, masa na podnoj konstrukciji prizemlja (grede i ploče iznad AEL) koja je s pomoću AEL odvojena, odnosno izolirana od temelja (tla). Za ocjenu veličine reznih sila u armiranobetonskoj konstrukciji mjerodavne su ukupne katne poprečne sile prizemlja, prvog i drugog kata.



Slika 7. Ukupne seizmičke poprečne sile katova u kN

Na temelju dobivenih rezultata provedena je provjera izmjera ležajeva glede dopuštenih tlačnih naprezanja, klizanja stabilnosti, posmične deformacije i ukupne posmične deformacije (uvjet sloma AEL). Utvrđeno je da ležajevi ne zadovoljavaju na klizanje, pa su odabrani usidreni ležajevi. Najveći horizontalni pomak  $u_{max}$  i u skladu s njim najveća posmična deformacija  $tg\gamma_{max}$  na mjestu jednog ležaja dobivena za kombinaciju učinaka djelovanja potresa  $0,3 E_{Edx} + E_{Edz}$  (7), jest:

$$u_{max} = \sqrt{64^2 + 165^2} = 177 \text{ mm},$$

$$tg\gamma_{\max} = \frac{177}{121} = 1,46 < tg\gamma_{dop} = 2 \cdot 0,9 = 1,8 \text{ prema [16].}$$

Posmične se deformacije zbog horizontalnih pomaka konstrukcije izazvanih djelovanjem potresa kreću od  $\gamma = 1,30$  do  $\gamma_{\max} = 1,46$ , što znači da je prosječna posmična deformacija  $\bar{\gamma} = 1,38$ , a to je veće od pretpostavljene  $\gamma_0 = 1,0$ . Točnije rješenje dobilo bi se ponavljanjem cijelog postupka s novim vrijednostima proračunskog prigušenja i krutosti dobivenim za tu deformaciju (iterativni postupak), no iz poznatih deformacijskih svojstava AEL ocijenjeno je da je za ovaj primjer doprinos te razlike malen. Provjerava se i veličina ukupne posmične deformacije ležajeva za koju je u ENV 1998-2 dan kriterij:

$$\varepsilon_{id} = \varepsilon_s + \varepsilon_h + \varepsilon_\alpha \leq 0,75\varepsilon_{bu}, \quad (28)$$

gdje je  $\varepsilon_{id}$  ukupna posmična deformacija,  $\varepsilon_s$  posmična deformacija zbog računskoga horizontalnog pomaka,  $\varepsilon_c$  posmična deformacija zbog normalnog naprezanja,  $\varepsilon_\alpha$  posmična deformacija zbog rotacije (momenta savijanja).

Prema tome imamo (prema izrazima 7.8 do 7.17 u ENV 1998-2):

- a)  $\varepsilon_\alpha \approx 0$  –zanemarivo zbog krutih greda iznad AEL  
 b) posmičnu deformaciju poradi normalnog naprezanja:

$$\varepsilon_c = \frac{1,5}{S} \cdot \frac{\sigma_e}{G} = \frac{1,5}{10,23} \cdot \frac{12,05}{1,1} = 1,606, \quad (29)$$

gdje je:

$$S = \frac{D}{4t_i} = \frac{450}{4 \cdot 11} = 10,23 \text{ – koeficijent oblika za}$$

okrugli ležaj ( $t_i$  je debljina sloja elast.) (30)

$$\sigma_e = N_{sd}/A_r \approx 1000 \cdot 10^3 / 82950 = 12,05 \text{ N/mm}^2 \text{ – proračunsko normalno naprezanje} \quad (31)$$

$$A_r = (\delta - \sin \delta) \cdot \frac{D^2}{4} = (2,35 - \sin 2,35) \cdot \frac{450^2}{4} = 82950 \text{ mm}^2 \text{ – reducirana ploština} \quad (32)$$

$D$  – promjer ležaja

$$\delta = 2 \arccos(d_{Ed}/D) \quad (33)$$

$$d_{Ed} = \sqrt{d_{Edx}^2 + d_{Edz}^2} = 173,7 \text{ mm – relativni horizontalni pomak mjerodavnog AEL} \quad (34)$$

- c) posmičnu deformaciju zbog računskoga horizontalnog pomaka:

$$\varepsilon_s = \frac{d_{Ed}}{t_i} = 1,436, \quad (35)$$

gdje je  $t_i$  ukupna visina elastomera.

Na kraju, ukupna posmična deformacija iznosi prema (28):

$$\varepsilon_{id} = 0 + 1,606 + 1,436 = 3,04 \approx 0,75 \cdot 4,0 = 3,0 \Rightarrow \text{zadovoljava}$$

Provedena je i kontrola povećanja povratne sile  $\Delta F$  koju proizvodi izolacijski sustav ("self centering"). U poglavlju 6. rečeno je da izolacioni sustav treba proizvoditi povratnu silu čije je povećanje najmanje 0,025 ukupne gravitacijske težine iznad izolatora pri pomaku od 0,5  $d_{Ed}$ , što se može približno proračunati prema izrazu:

$$\Delta F = 0,5d_{Ed} \cdot \alpha \cdot \Sigma k \geq 0,025 \cdot W, \quad (36)$$

gdje je:

$W = 9753,45 \text{ kN}$  – ukupna gravitacijska težina

$\Sigma k = 13726,2 \text{ kN/m}$  – ukupna horizontalna krutost izolacijskog sustava (ležajeva)

$d_{Ed} = u_{\max, sr} \approx 15,0 \text{ cm}$  – translatorni pomak konstrukcije u razini temelja za djelovanje potresa

$\alpha = G_0/G_{eff}$  – koeficijent promjene modula posmika (ovim koeficijentom uzima se u obzir najnepovoljniji slučaj modula posmika  $G \approx 1,0 \text{ N/mm}^2$ ).

Tako imamo:

$$\Delta F \approx 0,075 \cdot 1/1,1 \cdot 13726,2 = 935,87 \text{ kN (za } G \approx 1,0 \text{ N/mm}^2)$$

$$\Delta F > 0,025 \cdot 9753,45 = 243,8 \text{ kN} \Rightarrow \text{zadovoljava!}$$

## 10 Zaključak

U radu je pokazano da se seizmičke sile mogu višestruko smanjiti primjenom elastomernih ležajeva. U prikazanom primjeru trokatne zgrade rezne sile su smanjene oko tri puta u odnosu prema onima dobivenim za neizolirani sustav. Da bi se mogla usporediti dva konstrukcijska sustava moraju se upotrijebiti isti ulazni podaci u proračunu. Zbog toga je za oba slučaja (i za izolirani i za neizolirani sustav) primijenjena linearna dinamička analiza uporabom elastičnog spektra odziva prema europskim prednormama ENV 1998. Veličine reznih sila neizoliranog sustava proračunane su i s pomoću proračunskog spektra u kojem se redukcija seizmičkih sila ostvaruje preko faktora ponašanja  $q$  prema ENV-u 1998. Za prikazani slučaj rezne sile su smanjene 3,66 puta prema silama dobivenim elastičnim spektrom odziva. Za redukciju seizmičkih sila ostvarenu primjenom *proračunskog spektra* potrebno je osigurati dostatnu duktilnost konstrukcije i njezinih elemenata, odnosno valja osigurati dovoljni kapacitet plastičnog deformiranja konstrukcije za djelovanja potresa. To se u armiranobetonskim konstrukcijama postiže adekvatnim armiranjem poprečnom armatu-

rom (spona, spiralna armatura) u području plastičnih zglobova i zadovoljenjem određenih pravila za količinu i raspored uzdužne armature (nastavci, sidrenje, uzdužna armatura u tlačnoj zoni presjeka itd.). U tom slučaju valja očekivati oštećenje konstrukcijskih elemenata i još znatnija oštećenja, a možda i rušenje nekih nekonstrukcijskih elemenata kao posljedice djelovanja jakog potresa.

Primjenom protupotresne izolacije moguće je osigurati znatnu redukciju seizmičkih sila, a da konstrukcija ostane u elastičnom području ponašanja. To je naročito značajno kod zgrada za koje zahtijevamo da ostanu uporabljive i nakon djelovanja snažnog potresa. Kod armiranobetonskih konstrukcija za koje je upravo seizmičko djelovanje često mjerodavno, primjena protupotresne izolacije s pomoću AEL donosi *niz prednosti i ušteda* uzimajući u obzir relativno male troškove nastale zbog ugradnje AEL. U prvom redu smanjuje se potrebna količina poprečne armature (spona), jer se predviđa pretežito elastično ponašanje konstrukcije, uz podjednaki utrošak uzdužne armature. Zbog toga je jednostavnija i kvalitet

nija ugradba betona zbog manje zagušenosti čvorova okvira poprečnom i uzdužnom armaturom. Također, ostvaruju se uštede na sanaciji zgrade nakon potresa (otpada potreba za popravkom oštećenih konstrukcijskih i nekonstrukcijskih elemenata, opreme i instalacija). Uz to se znatno povećava sigurnost i poboljšava uporabljivost tako izoliranih zgrada.

U Hrvatskoj se još uvijek rabi stari Pravilnik za izgradnju građevina u seizmičkim područjima [3] naslijeden iz bivše države. S na to da su učinci djelovanja potresa (rezne sile, pomaci) koji su dobiveni primjenom *proračunskog spektra* što je dan u ENV-u 1998 i zahtjevi koji se moraju zadovoljiti pri proračunu i konstruiranju u skladu s tim europskim normama u smislu osiguranja duktilnog ponašanja veći nego prema vrijedećem Pravilniku, može se zaključiti da će u skladu s njima proračunane i projektirane konstrukcije imati veću razinu sigurnosti i uporabljivosti. Stoga su u nas potrebne hitne promjene u smislu usvajanja tehničkih norma u tom području.

## LITERATURA

- [1] Derham, C. J., Thomas A. G.: *A Rubber Bearing System for Seismic Protection of Structures*, © I Mech E 1978.
- [2] Brčić, V.: *Dinamika konstrukcija*, Građevinska knjiga, Beograd 1981.
- [3] *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima*, Sl. list br. 31, 1981.
- [4] *Guide to Selection and use of elastomeric bearings*, British Standards Institution, BS 6117 : 1982
- [5] DIN 53513, *Bestimmung der visko-elastischen Eigenschaften von Elastomeren bei erzwungenen Schwingungen ausserhalb der Resonanz*, 1983.
- [6] Derham, C. J., Kelly, J. M.; Thomas, A. G.: *Nonlinear Rubber for Seismic Isolation*, Nuclear Engineering and Design 84 (1985) 417-428, North-Holland, Amsterdam
- [7] *Nacrt pravilnika o tehničkim normativima za projektiranje i proračun inženjerskih objekata u seizmičkim područjima*, Građevinar 36 (1984)7, 295 - 314
- [8] Pilkey W. and B.: *Shock and Vibration Computer Programs – Reviews and Summaries*, The Shock and Vibration Information Center, United States Department of Defence, 1985.
- [9] Fajfar, P., Fischinger, M.: *Potres u Meksiku 1985 - karakteristike, posljedice i pouke*, Zbornik radova (329 - 336), IV. Kongres Saveza društava za seizmičko građevinarstvo Jugoslavije, 1986.
- [10] Simovski, V., Petrovski J.: *Testiranje seizmo - izolacionog i energo - disipacionog sistema*, Zbornik radova (147-154), IV. Kongres Saveza društava za seizmičko građevinarstvo Jugoslavije, 1986.
- [11] Nishikant, R. V., Enrique, B. Z.: *Characteristics For The Design Of Aseismic Bearing*, National Science Foundation, Washington, D.C., Project No. 85-159, August 1987.
- [12] Podhorsky, I.: *Protupotresna izolacija – nova koncepcija aseizmičkog projektiranja*, Građevinar 39 (1987) 2, 39-54.
- [13] Koh, C. G., Kelly J. M.: *Viscoelastic Stability Model for Elastomeric Isolation Bearings*, Journal of Structural Engineering 115 (1989) 2, 285-302
- [14] Tukungtor, D. H., Carr, A. J., Moss P. J.: *Design Method for Bridges on Lead – Rubber Bearings*, Journal of Structural Engineering, 115 (1989) 12, 3017-3030
- [15] Aničić, D., Fajfar P., Petrović, B., Szavits - Nossan, A., Tomažević, M.: *Zemljotresno inženjerstvo – visokogradnja*, Građevinska knjiga, Beograd 1990.
- [16] Šimunić, Ž.: *Dimenzioniranje elastomernih ležajeva*, Disertacija, Zagreb 1990.
- [17] Ferrito, J. M.: *Studies on Seismic Isolation of Buildings*, Journal of Structural Engineering 117 (1991) 11, 3293-3314.
- [18] Mayes, R. L., Buckle, I. G., Kelly, T. E., Jones L. R.: *AASHTO Seismic Isolation Design Requirements for Highway Bridges*, Journal of Structural Engineering, 118 (1992) 1, 284-304.
- [19] *Eurocode 8 - Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 1-1: General rules - Seismic actions and general requirements for structures*, CEN, 1994.
- [20] *Eurocode 8 - Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 1-2: General rules - General rules for buildings*, CEN, 1994.
- [21] *Eurocode 8 - Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 1-3: General rules - Specific rules for various materials and elements*, CEN, 1995.
- [22] *Eurocode 8 - Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 2: Bridges*, CEN, 1994.