

Viskoelastična svojstva u potresnoj izolaciji

Želimir Šimunić, Ana Skender

Ključne riječi

viskoelastičnost, puzanje, relaksacija, potresna izolacija, viskoelastični prigušivač, elastomerni ležaj, količina prigušenja

Key words

viscoelasticity, creep, relaxation, seismic insulation, viscoelastic damper, elastomeric bearing, damping quantity

Mots clés

viscoélasticité, fluage, relaxation, isolation sismique, amortisseur visco-élastique, appareil d'appui en élastomère, quantité d'amortissement

Ключевые слова

вискозо-эластичность, ползучесть, релаксация, изоляция против землетрясений, вискозо-эластичный демпфер, эластомерная опора, количество демпфирования

Schlüsselworte

Viskoelastizität, Kriechen, Relaksation, seismische Isolation, viskoelastischer Dämpfer, Elastomerlager, Grösse der Dämpfung

Ž. Šimunić, A. Skender

Izvorni znanstveni rad

Viskoelastična svojstva u potresnoj izolaciji

Pomoću puzanja i relaksacije polimernih materijala koji se rabe u potresnoj izolaciji opisana su viskoelastična svojstva. Posebno poglavlje posvećeno je dinamičkim viskoelastičnim svojstvima. Kao primjer primjene viskoelastičnih svojstava kod protupotresnih naprava prikazani su viskoelastični prigušivači. Dinamičkim ispitivanjem elastomernih ležajeva koji se koriste u potresnoj izolaciji određena je količina prigušenja te prikazan dijagram sile i pomaka u ovisnosti o vremenu.

Ž. Šimunić, A. Skender

Original scientific paper

Viscoelastic properties in seismic insulation

Viscoelastic properties of polymer materials used in earthquake insulation are described through creep and relaxation. A special section is consecrated to dynamic viscoelastic properties. Viscoelastic dampers are presented as an example of the use of viscoelastic properties in seismic devices. The damping quantity is determined through dynamic testing of elastomeric bearings used in seismic insulation.

Ž. Šimunić, A. Skender

Ouvrage scientifique original

Les propriétés visco-élastiques dans l'isolation sismique

Les propriétés visco-élastiques des matériaux polymères utilisés dans l'isolation sismique sont décrites à travers le fluage et la relaxation. Une section toute-entière est consacrée aux propriétés dynamiques visco-élastiques. Les amortisseurs visco-élastiques sont présentés comme un exemple d'emploi des propriétés visco-élastiques dans les dispositifs sismiques. La quantité d'amortissement est déterminée par l'analyse dynamique des appareils d'appui en élastomère utilisés dans l'isolation sismique.

Ж. Шимунић, А. Скендер

Оригинална научна работа

Вискозо-эластичные свойства в изоляции против землетрясений

С помощью ползучести и релаксации описываются вискозо-эластичные свойства полимерных материалов, используемых в изоляции против землетрясений. Отдельная глава посвящена динамическим вискозо-эластичным свойствам. В качестве примера применения вискозо-эластичных свойств в устройствах против землетрясений описаны вискозо-эластичные демпферы. Путем динамических испытаний эластомерных опор, используемых в изоляции против землетрясений, определено количество демпфирования, и приведена диаграмма силы и смещения в зависимости от времени.

Ž. Šimunić, A. Skender

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Viskoelastische Eigenschaften in seismischer Isolation

Mit Hilfe des Kriechens und Relaksationen beschreibt man viskoelastische Eigenschaften von Polymermaterialen die in seismischer Isolation genutzt werden. Ein besonderes Kapitel ist dynamischen viskoelastischen Eigenschaften gewidmet. Als Beispiel der Anwendung viskoelastischer Eigenschaften bei antiseismischen Einrichtungen sind viskoelastische Dämpfer beschrieben. Dynamischen Untersuchungen von Elastomerlagern die in seismischer Isolation genutzt werden ist die Grösse der Dämpfung festgelegt und das Diagramm Kraft- Verschiebung in Abhängigkeit von Zeit dargestellt.

Autori: Prof. dr. sc. **Želimir Šimunić**, dipl. ing. građ.; **Ana Skender**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb

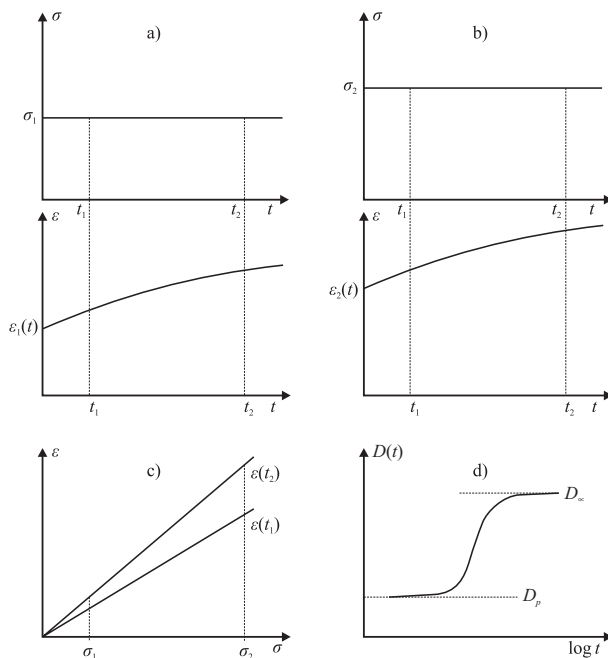
1 Uvod

Viskoelastičnost je vremenski ovisno svojstvo karakteristično za polimerne materijale koje se temelji na postupnoj promjeni oblika makromolekula pri djelovanju opterećenja i uspostavi novoga ravnotežnog stanja molekula. Teorijsku i eksperimentalnu podlogu viskoelastičnosti dali su u 19. stoljeću poznati fizičari Maxwell, Boltzmann i Kelvin, koji su proučavali ponašanje materijala pri opterećenju i rasterećenju u ovisnosti o vremenu [1]. Maxwell i Kelvin su takva ponašanja prikazali reološkim modelima i opisali fizikalnim izrazima [2]. Viskoelastična svojstva ovisna su i o temperaturi. U ovom radu opisana su viskoelastična svojstva u ovisnosti o vremenu. Na primjeru ispitivanja dinamičkih svojstava elastomernih ležajeva ocijenjeno je stanje prigušenja. Ovo je svojstvo ključno za sigurnost građevine pri djelovanju potresa.

2 Puzanje i relaksacija

Viskoelastičnost se može opisati pomoću puzanja materijala koje se definira kao ovisnost deformacije o vremenu pri djelovanju konstantnog napreznja, te relaksacijom (opuštanjem) koja se definira kao ovisnost napreznja o vremenu pri djelovanju konstantne deformacije.

Puzanje se ispituje pomoću uzoraka opterećenih na vlak, tlak ili posmik. Rezultati ispitivanja puzanja, odnosno dijagrami napreznja i deformacija ovisno o vremenu prikazani su na slici 1. a) i b).



Slika 1. Viskoelastično svojstvo polimernih materijala pri puzanju [2]

Ako za različita stanja napreznja u trenutku t vrijedi odnos

$$\frac{\varepsilon_1(t)}{\sigma_1} = \frac{\varepsilon_2(t)}{\sigma_2} = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} = D(t) \tag{1}$$

tada kažemo da materijal ima linearno-viskoelastično puzanje (slika 1. c).

Kod viskoelastičnih materijala funkcija puzanja pri vlaku poprima dvije karakteristične veličine D_p i D_∞ , tj. vrijednosti funkcije puzanja za početno vrijeme ($t = 0$) i za beskonačno vrijeme ($t = \infty$) (slika 1. d).

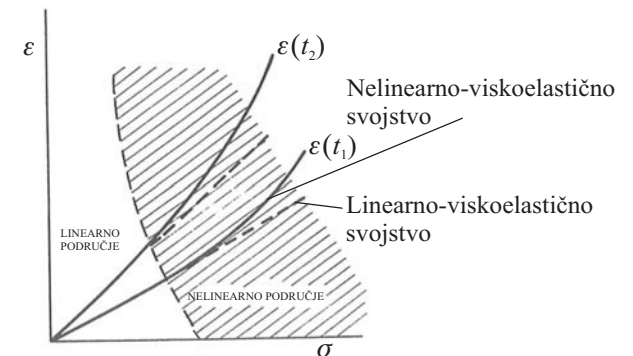
Analogno izrazu (1) funkcija puzanja pri posmiku $J(t)$ određuje se izrazom

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau}, \tag{2}$$

pri čemu je τ konstantno posmično napreznje, a $\gamma(t)$ posmična deformacija.

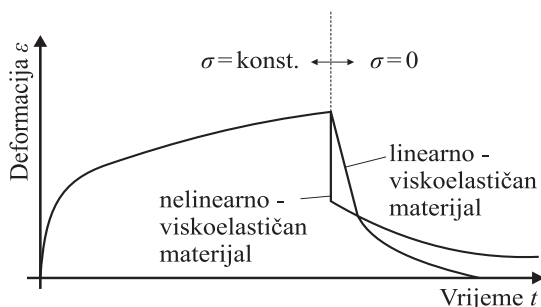
Dijagram ε - σ za viskoelastične materijale prikazan je na slici 1. c).

Nelinearno-viskoelastični materijali pužu brže i funkcija puzanja ne može se odrediti samo na temelju jednog ispitivanja kao kod linearno-viskoelastičnih materijala, već je potrebno posebno ispitivanje za svako napreznje (slika 2.). U praksi se većinom primjenjuje metoda interpolacije [1].



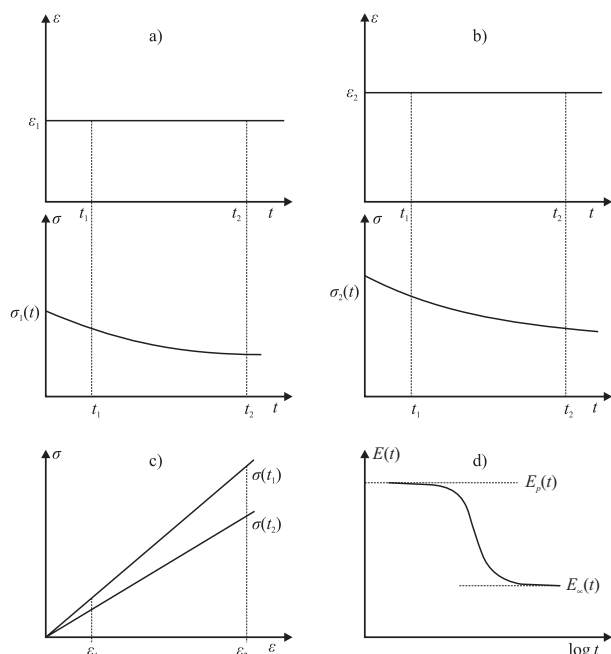
Slika 2. Usporedba linearno-viskoelastičnih i nelinearno-viskoelastičnih materijala pri puzanju

Linearna i nelinearna viskoelastična svojstva materijala mogu se analizirati i pri opterećenju i rasterećenju uzoraka. S obzirom da se viskoelastični materijali rabe u potresnoj izolaciji, deformacije moraju nestati u relativno kratkom vremenu nakon rasterećenja. Stoga su vrlo bitna viskoelastična svojstva pri rasterećenju. Ako deformacija nakon rasterećenja nestaje, pretpostavlja se da materijal ima linearno-viskoelastična svojstva, a ako deformacija nakon rasterećenja ne nestaje, pretpostavlja se da materijal ima nelinearno-viskoelastična svojstva (slika 3.).



Slika 3. Viskoelastična svojstva pri opterećenju i rasterećenju [2]

Relaksacija se također ispituje pomoću uzoraka opterećenih na vlak, tlak ili posmik. Rezultati ispitivanja relaksacije, odnosno dijagrami napreznja i deformacija u ovisnosti o vremenu prikazani su na slici 4. a) i b).



Slika 4. Viskoelastično svojstvo polimernih materijala pri relaksaciji

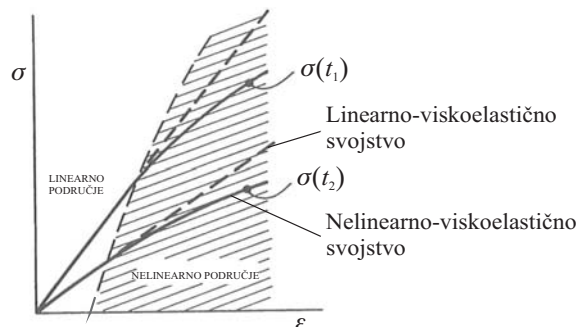
Ako za različita stanja konstantnih deformacija u trenutku t vrijedi odnos

$$\frac{\sigma_1(t)}{\varepsilon_1} = \frac{\sigma_2(t)}{\varepsilon_2} = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} = E(t) \quad (3)$$

tada kažemo da materijal ima linearno-viskoelastičnu relaksaciju (slika 4. c). Za modul relaksacije pri vlaku karakteristične su dvije veličine: početni modul $E_p(t)$ za $t = 0$ i trajni modul $E_\infty(t)$ za beskonačno dugo vrijeme (slika 4. d). Analogno modulu relaksacije pri vlaku dolazi se do izraza za modul relaksacije pri posmiku

$$G(t) = \frac{\tau(t)}{\gamma} \quad (4)$$

Odnos linearnog i nelinearnog ponašanja viskoelastičnih materijala pri relaksaciji nalazi se na slici 5.



Slika 5. Usporedba linearno-viskoelastičnih i nelinearno-viskoelastičnih materijala pri relaksaciji

Kod viskoelastičnih materijala, za razliku od elastičnih materijala, ne vrijedi recipročan odnos funkcije puzanja i modula relaksacije, odnosno vrijedi $J(t) \neq \frac{1}{G(t)}$.

3 Dinamička viskoelastična svojstva

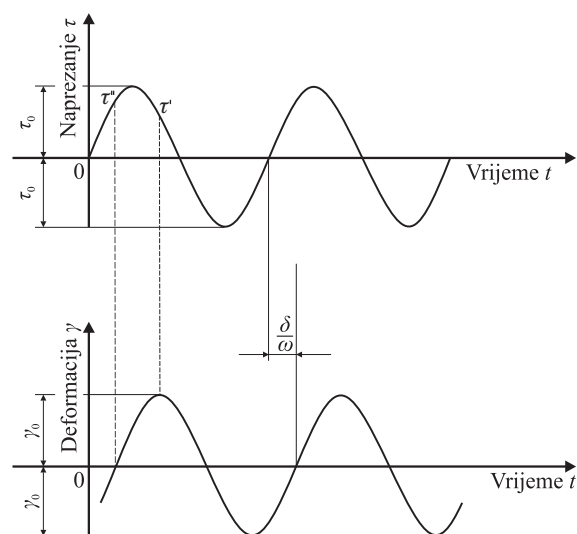
Osim statičkih ispitivanja na vlak i posmik kojima se ispituju puzanje i relaksacija, viskoelastična svojstva materijala ispituju se i dinamičkim ispitivanjima. Ako se uzorku od viskoelastičnog materijala nametne harmonijsko posmično napreznje

$$\tau(t) = \tau_0 \sin \omega t, \quad (5)$$

tada će se i posmična deformacija mijenjati harmonijski s istom kružnom frekvencijom $\omega = 2\pi f$ (f - frekvencija), ali s faznim pomakom δ zbog unutarnjeg trenja, odnosno vrijedi

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t - \delta). \quad (6)$$

Dijagrami posmičnih napreznja i deformacija u ovisnosti o vremenu t prikazani su na slici 6.



Slika 6. Dijagrami posmičnih napreznja i deformacija u ovisnosti o vremenu [3]

Iz slike 6. vidljivo je da pri vrijednosti deformacije $\gamma(t) = 0$ naprezanje nije jednako nuli. Ako postoji fazni pomak δ koji se naziva i kut gubitaka, materijal ima redovito viskoelastična svojstva. Vrijednost faznog pomaka δ kod viskoelastičnih materijala kreće se između 0° i 90° . Ako je $\delta = 0^\circ$ materijal se ponaša kao idealno-elastičan materijal, a ako je $\delta = 90^\circ$ materijal se ponaša kao idealno-viskozozan materijal, odnosno tekućina. Ova svojstva materijala mogu se opisati i brzinom deformiranja. Pri minimalnoj vrijednosti deformacije $\gamma(t) = 0$ brzina deformiranja poprima maksimalnu vrijednost i materijal se ponaša kao idealno-viskozozan materijal, dok pri maksimalnoj vrijednosti deformacije $\gamma(t) = \gamma_0$ brzina deformiranja poprima minimalnu vrijednost i materijal se ponaša kao idealno-elastičan materijal.

U trenutku kada je $\gamma(t) = 0$ naprezanje je izvan faze u odnosu na deformaciju i jednako je $\tau' = \tau_0 \sin \delta$. U trenutku kada je $\gamma(t) = \gamma_0$ naprezanje je u fazi s deformacijom i dobije se iz izraza $\tau' = \tau_0 \sin\left(\delta + \frac{\pi}{2}\right) = \tau_0 \cos \delta$.

Kod elastične komponente naprezanja τ' koja je u fazi s deformacijom ne dolazi do gubitka energije, dok izvanfazno naprezanje τ'' obuhvaća naprezanje koje nije akumulirano, već se pretvara u toplinu i naziva se izgubljenim naprezanjem. Ovo izgubljeno naprezanje zaostaje 90° u odnosu prema faznom naprezanju.

Općenito se harmonijsko posmično naprezanje i posmična deformacija mogu prikazati u obliku kompleksne funkcije

$$\tau^*(t) = \tau_0 e^{i\omega t} = \tau_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t) \quad (7)$$

$$\gamma^*(t) = \gamma_0 e^{i(\omega t - \delta)} = \gamma_0 (\cos(\omega t - \delta) + i \sin(\omega t - \delta)). \quad (8)$$

Kompleksni modul posmika definira se kao kvocijent:

$$G^* = \frac{\tau^*(t)}{\gamma^*(t)} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} e^{i\delta} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} (\cos \delta + i \sin \delta) \quad (9)$$

$$G^* = G' + iG'', \quad (10)$$

pri čemu je G' realni dio kompleksnog modula koji se često naziva i povratnim modulom

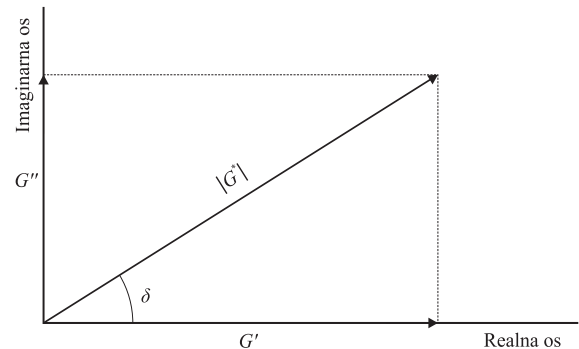
$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta = \frac{\tau'}{\gamma_0}, \quad (11)$$

a G'' imaginarni dio kompleksnog modula koji se naziva i izgubljenim modulom (modulom gubitaka)

$$G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta = \frac{\tau''}{\gamma_0}. \quad (12)$$

Kompleksni modul posmika može se prikazati u Gaussovoj ravnini (slika 7.), pri čemu je apsolutna vrijednost kompleksnog modula

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} = \frac{\tau_0}{\gamma_0}. \quad (13)$$



Slika 7. Grafički prikaz kompleksnog modula posmika

Iz slike 7. dobije se izraz za vrijednost $\text{tg} \delta$, odnosno mehanički gubitak koji predstavlja omjer imaginarnog i realnog dijela kompleksnog modula

$$\text{tg} \delta = \frac{G''}{G'} = \frac{\tau''}{\tau'}. \quad (14)$$

Analogno se određuju izrazi za kompleksni modul i mehanički gubitak pri vlaku.

$$E^* = E' + iE'' \quad (15)$$

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \quad (16)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \quad (17)$$

$$\text{tg} \delta = \frac{E''}{E'} \quad (18)$$

Na sličan način kao što se određuju kompleksni moduli mogu se definirati kompleksne funkcije puzanja pri vlaku i posmiku

$$D^* = \frac{1}{E^*} = D' - iD'' \quad (19)$$

$$J^* = \frac{1}{G^*} = J' - iJ'', \quad (20)$$

pri čemu je

$$D' = \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} \cos \delta \quad (21)$$

$$D'' = \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} \sin \delta \quad (22)$$

$$J' = \frac{\gamma_0}{\tau_0} \cos \delta \quad (23)$$

$$J'' = \frac{\gamma_0}{\tau_0} \sin \delta. \quad (24)$$

Ukupni rad obavljen u jednom ciklusu ispitivanja može se odrediti iz sljedećeg izraza

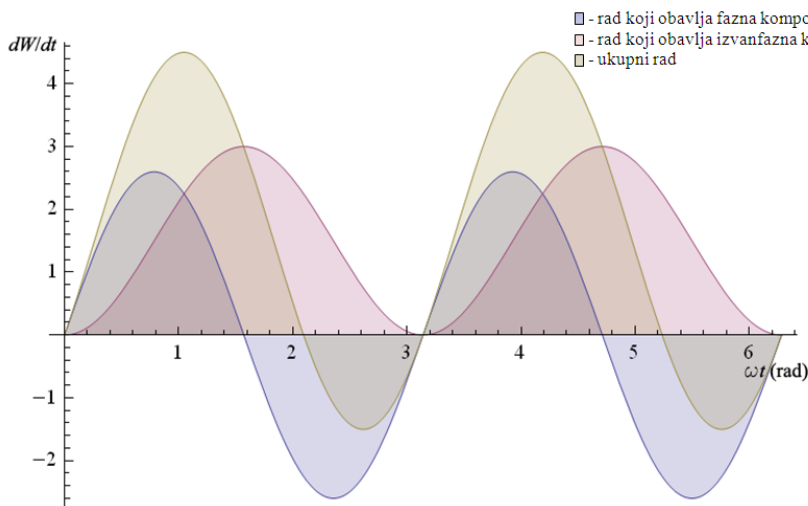
$$W = \int_0^{2\pi/\omega} \tau(t) d\gamma(t) = \int_0^{2\pi/\omega} \tau(t) \dot{\gamma} dt = \pi \tau_0 \gamma_0 \sin \delta = \pi \tau^* \gamma_0 \cdot \quad (25)$$

Iz izraza (25), kao i iz slike 8. proizlazi da samo izvanfazna komponenta napreznja obavlja rad koji predstavlja ukupnu izgubljenu energiju u ciklusu.

S obzirom da je ukupna pohranjena energija u ciklusu jednaka nuli, maksimalna pohranjena energija pojavljuje se u četvrtini ciklusa i iznosi

$$W_s = \int_0^{\pi/2\omega} \tau_0 \gamma_0 \omega \cos \delta \sin(\omega t) \cos(\omega t) dt \quad (26)$$

$$= \frac{\tau_0 \gamma_0}{2} \cos \delta = \frac{\tau^* \gamma_0}{2}$$



Slika 8. Obavljeni rad u jednom ciklusu

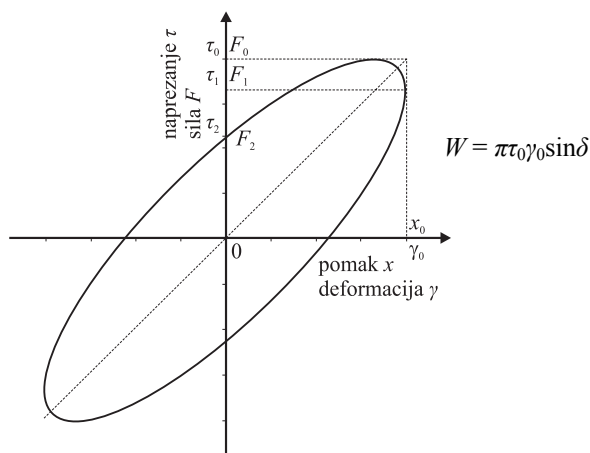
Specifična izgubljena energija određuje se iz omjera izgubljene i pohranjene energije te glasi

$$\frac{E_D}{E_s} = \frac{W}{W_s} = \frac{\pi \tau_0 \gamma_0 \sin \delta}{\frac{\tau_0 \gamma_0}{2} \cos \delta} = 2\pi \text{tg} \delta \cdot \quad (27)$$

Izraz (27) često se primjenjuje za određivanje mehaničkog gubitka te služi za određivanje količine prigušenja u konstrukciji.

Iz izraza (25) proizlazi da se količina utrošene energije može odrediti i iz dijagrama ovisnosti napreznja i deformacije pomoću ploštine histerezne petlje (slika 9.). Mehanički gubitak također je moguće odrediti pomoću histerezne petlje izrazom

$$\text{tg} \delta = \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \quad (28)$$



Slika 9. Krivulja histeze elastomernog materijala za ciklička napreznja i deformacije

4 Veza između modula relaksacije i kompleksnog modula

Izrazi iz poglavlja 2 vrijede ako su napreznje, odnosno deformacija tijekom ispitivanja konstantni. Ako u procesu pužanja napreznje nije konstantno, a u procesu relaksacije deformacija nije konstantna, kod linearno-viskoelastičnih materijala moguće je primijeniti Boltzmannov princip superpozicije. Pri kontinuiranoj promjeni napreznja uz aproksimaciju skokovite promjene napreznja deformacija će se mijenjati prema izrazu (slika 10.):

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 D(t) + \int_0^t D(t-t') d\sigma(t') \cdot \quad (29)$$

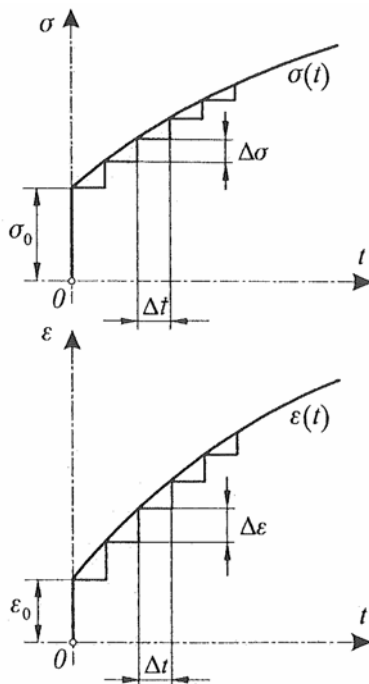
Budući da za trenutak t' ($0 < t' < t$) vrijedi

$$d\sigma(t') = d\sigma' = \frac{d\sigma'}{dt'} dt' \quad (30)$$

izraz (29) poprima sljedeći oblik

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 D(t) + \int_0^t D(t-t') \frac{d\sigma'}{dt'} dt' \cdot \quad (31)$$

Integral (31) zove se nasljedni integral.



Slika 10. Kontinuirana promjena napreznja

Očito je da deformacija $\varepsilon(t)$ ovisi o čitavom tijeku promjene napreznja za sve $t' < t$, a ne samo o vrijednosti napreznja u trenutku t . Tijek promjene napreznja zove se povijest napreznja [4] i označava se na sljedeći način:

$$\sigma' = \sigma'(t') \quad t' \leq t. \quad (32)$$

Analogno se izvodi nasljedni integral za relaksaciju napreznja

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E(t) + \int_0^t E(t-t') \frac{d\varepsilon'}{dt'} dt'. \quad (33)$$

S obzirom da svi događaji u svakom trenutku tijekom povijesti napreznja utječu na konačno stanje deformacija i napreznja, nasljedni integrali često se prikazuju u sljedećem obliku

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t D(t-t') \frac{d\sigma'}{dt'} dt' \quad (34)$$

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t E(t-t') \frac{d\varepsilon'}{dt'} dt'. \quad (35)$$

Kako bi se prikazala veza između modula relaksacije pri posmiku i kompleksnog modula posmika potrebno je modificirati izraz (35) uvođenjem zamjenske varijable $a = t - t'$ [5].

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \int_{-\infty}^t G(t-t') \frac{d\gamma'}{dt'} dt' \\ &= - \int_0^{\infty} G(a) \frac{d\gamma(t-a)}{da} da. \end{aligned} \quad (36)$$

Ako se uzorku pri ispitivanju relaksacije napreznja nametne harmonijska posmična deformacija

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin \omega t \quad (37)$$

u trenutku $t' = t - a$ deformacija je jednaka

$$\begin{aligned} \gamma(t-a) &= \gamma_0 \sin \omega [(t-a)] \\ &= \gamma_0 (\sin \omega t \cos \omega a - \cos \omega t \sin \omega a). \end{aligned} \quad (38)$$

Deriviranjem izraza (38) dobije se

$$\frac{d\gamma(t-a)}{da} = -\gamma_0 \omega (\sin \omega t \sin \omega a + \cos \omega t \cos \omega a), \quad (39)$$

a nakon uvrštavanja u izraz (36)

$$\tau(t) = \gamma_0 \omega \int_0^{\infty} G(a) (\sin \omega t \sin \omega a + \cos \omega t \cos \omega a) da. \quad (40)$$

Modul relaksacije određuje se prema izrazu (4) i glasi:

$$G(t) = \omega \sin \omega t \int_0^{\infty} G(a) \sin \omega a da + \omega \cos \omega t \int_0^{\infty} G(a) \cos \omega a da. \quad (41)$$

Deformacija poprima maksimalnu vrijednost pri $\omega t = \pi/2$ pa iz izraza (40) dobivamo faznu komponentu napreznja τ' , odnosno iz izraza (41) realnu komponentu kompleksnog modula posmika

$$G' = \frac{\tau'}{\gamma_0} = \omega \int_0^{\infty} G(a) \sin \omega a da. \quad (42)$$

Deformacija poprima minimalnu vrijednost pri $\omega t = 0$ pa iz izraza (40) dobivamo izvanfaznu komponentu napreznja τ'' , odnosno iz izraza (41) imaginarnu komponentu kompleksnog modula posmika

$$G'' = \frac{\tau''}{\gamma_0} = \omega \int_0^{\infty} G(a) \cos \omega a da. \quad (43)$$

Integrali (42) i (43) predstavljaju Fourierovu sinusnu odnosno kosinusnu transformaciju funkcije $G(t)$ uz proizvoljnu vrijednost varijable a . Inverzijom Fourierovih transformacija moguće je odrediti vezu između statičkog modula i modula dobivenog dinamičkim ispitivanjem.

5 Primjena viskoelastičnih materijala u potresnoj izolaciji

Unazad nekoliko desetljeća razvija se drugačiji pristup projektiranju konstrukcija radi ublažavanja razornosti potresa. Cilj je reducirati djelovanje potresa na konstrukciju promjenom njezinih dinamičkih svojstava, a ne povećati krutost konstrukcije prema potresnom djelovanju. Dinamička svojstva konstrukcije mijenjaju se uporabom različitih protupotresnih sustava koji troše potresnu energiju pomoću dodatnih naprava za prigušenje i/ili ograniča-

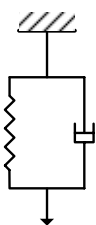
vaju unos potresne energije u konstrukciju izoliranjem glavnih konstrukcijskih elemenata (bazna izolacija) [6]. Prema normi HRN EN 1998-1 rabi se izraz izolacija u podnožju [7]. Glavni su mehanizmi prigušenja pri trošenju potresne energije viskozno i histerezo prigušenje. Histerezo je prigušenje važan mehanizam disipacije energije pri oscilacijama u plastičnom području. Viskozno prigušenje proporcionalno je relativnoj brzini oscilacija i raste s povećanjem frekvencije. Model viskoznog prigušenja često se rabi i za modeliranje drugih tipova prigušenja pod uvjetom da se primjenjuju ekvivalentni koeficijenti prigušenja.

Sustavi za dodatno prigušenje postavljaju se u konstrukciju u svrhu trošenja kinetičke ili elastične energije. Osnovna podjela sustava za trošenje energije ovisi o uzrocima njihove aktivacije, a to su pomaci, brzina i gibanje. Dodatni sustavi za trošenje energije ovisni o pomacima jesu: metalni prigušivači, prigušivači trenjem i prigušivači za centriranje konstrukcije. Dodatni sustavi za trošenje energije ovisni o brzini su viskozni prigušivači. Posebna su vrsta sustava za trošenje energije viskoelastični prigušivači koji su ovisni i o pomacima i o brzini, pa će zbog svojih viskoelastičnih svojstava biti potanko opisani.

S obzirom da su kod elastomernih materijala najizraženija viskoelastična svojstva, ti se materijali redovito i rabe tamo gdje se zahtijevaju takve karakteristike, npr. kod elastomernih ležajeva za izolaciju u podnožju. Kao praktičan primjer ispitivanja dinamičkih karakteristika građevinskih elemenata prikazan je primjer dinamičkog ispitivanja elastomernih ležajeva.

5.1 Viskoelastični prigušivači

Kod viskoelastičnih se prigušivača osim sile ovisne o brzini pojavljuje i sila ovisna o pomacima pa se kod njih pojavljuju oba mehanizma prigušenja. Na primjeru Kelvin-Voigtova reološkog modela u posmiku (slika 11.) prikazat će se viskoelastična svojstva viskoelastičnih prigušivača.



G - modul posmika
 τ - posmično naprezanje
 η - koeficijent viskoznosti

Slika 11. Kelvin-Voigtov reološki model

Ukupno posmično naprezanje sastoji se od posmičnog naprezanja u elastičnom dijelu materijala i posmičnog naprezanja u viskoznom dijelu materijala te glasi

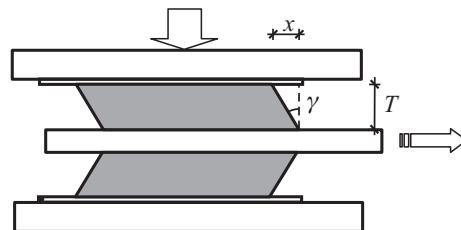
$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}, \tag{44}$$

pri čemu je $\dot{\gamma}$ brzina posmične deformacije.

Za viskoelastični uzorak debljine T i tlocrtne ploštine A (slika 12.), odnos sile $F(t)$ i pomaka $x(t)$ može se prikazati u sljedećem obliku:

$$\begin{aligned} F(t) &= GA\gamma + \eta A\dot{\gamma} \\ &= \frac{GA}{T}x(t) + \frac{\eta A}{T}\dot{x}(t) \\ &= \bar{k}x(t) + \bar{c}\dot{x}(t), \end{aligned} \tag{45}$$

pri čemu je \bar{k} elastična krutost, a \bar{c} koeficijent viskoznog prigušenja viskoelastičnog prigušivača.



Slika 12. Odnos posmične deformacije i pomaka

Ako se uzorku pri ispitivanju nametne pomak uz pretpostavku

$$x(t) = \rho \sin \bar{\omega}t \tag{46}$$

sila koja se pojavljuje u viskoelastičnom prigušivaču poprima oblik

$$F(t) = \bar{k}\rho \sin \bar{\omega}t + \bar{c}\rho \bar{\omega} \cos \bar{\omega}t, \tag{47}$$

pri čemu je $\bar{\omega}$ kružna frekvencija prisile.

Izraz (47) može se prikazati i na sljedeći način

$$\begin{aligned} F(t) &= \bar{k}\rho \sin \bar{\omega}t \pm \bar{c}\rho \bar{\omega} \sqrt{1 - \sin^2 \bar{\omega}t} \\ &= \bar{k}x(t) \pm \bar{c}\rho \bar{\omega} \sqrt{1 - \left(\frac{x(t)}{\rho}\right)^2}. \end{aligned} \tag{48}$$

Iz izraza (48) može se dobiti izraz za histerezo petlju (elipsu) viskoelastičnog prigušivača (slika 13).

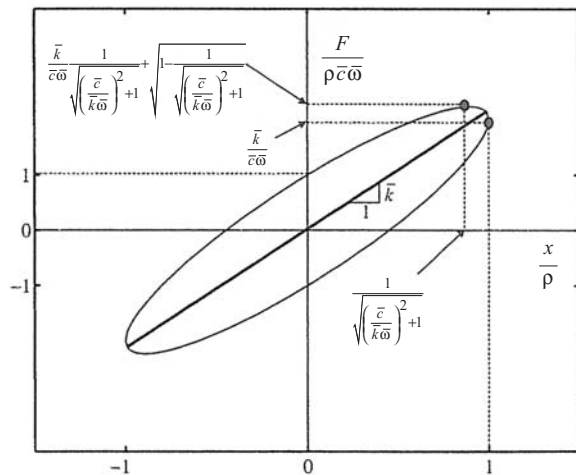
$$\frac{F(t)}{\rho \bar{c} \bar{\omega}} = \frac{\bar{k}}{\bar{c} \bar{\omega}} \frac{x(t)}{\rho} \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x(t)}{\rho}\right)^2} \tag{49}$$

Očito je prema izrazu (47) elastična sila u fazi s pomakom, dok je sila prigušenja izvan faze u odnosu na pomak. Također, maksimalna sila kod viskoelastičnih prigušivača ne pojavljuje se kod maksimalnog pomaka (slika 13.), ali je fazni pomak nešto manji nego kod idealno-viskoznih materijala (između 0° i 90°).

Kao što je već spomenuto u poglavlju 3, utrošena energija po ciklusu može se odrediti iz ploštine histerezo petlje prema izrazu:

$$\begin{aligned}
 E_D &= \int_0^{2\pi/\bar{\omega}} F(t)\dot{x}(t) dt \\
 &= \int_0^{2\pi/\bar{\omega}} (\bar{k}\rho\sin\bar{\omega}t + \bar{c}\rho\bar{\omega}\cos\bar{\omega}t)\rho\bar{\omega}\cos\bar{\omega}t dt \\
 &= \bar{k}\rho^2\bar{\omega}\left(\frac{1}{2\bar{\omega}}\sin^2(\bar{\omega}t)\right)\Big|_0^{2\pi/\bar{\omega}} + \bar{c}\rho^2\bar{\omega}^2\left(\frac{t}{2} + \frac{1}{4\bar{\omega}}\sin(2\bar{\omega}t)\right)\Big|_0^{2\pi/\bar{\omega}} \\
 &= \pi\bar{c}\rho^2\bar{\omega} = 2\pi\bar{\xi}m\rho^2\bar{\omega},
 \end{aligned}
 \tag{50}$$

pri čemu je $\bar{c} = 2\bar{\xi}m\omega$, a $\bar{\xi} = \xi_{eq} = \xi$ ekvivalentni faktor viskoznog prigušenja.



Slika 13. Histerezno ponašanje viskoelastičnih prigušivača

Iz izraza (50) proizlazi da elastična sila ne sudjeluje pri trošenju energije te je utrošena energija po ciklusu jednaka utrošenoj energiji kod viskoznih prigušivača.

Pohranjena energija prikazuje se u obliku elastične energije, odnosno

$$E_s = E_e = \frac{1}{2}k\rho^2. \tag{51}$$

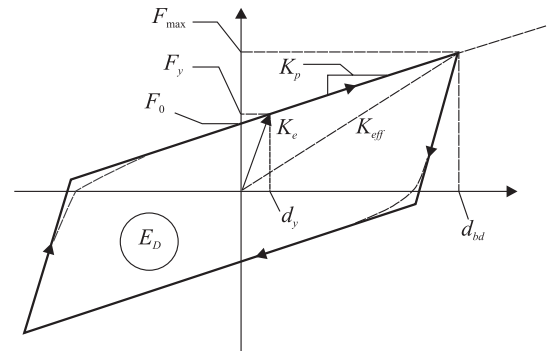
Količina utrošene energije po ciklusu služi za određivanje prigušenja u konstrukciji. Prema izrazu (27) mehanički gubitak glasi

$$\text{tg}\delta = \frac{E_D}{2\pi E_s} = \frac{2\pi\xi m\rho^2\bar{\omega}}{2\pi \cdot \frac{k\rho^2}{2}} = 2\xi\beta. \tag{52}$$

Odnos frekvencije prisile $\bar{\omega}$ i vlastite frekvencije sustava pri slobodnom osciliranju ω označuje se pomoću faktora frekvencije $\beta = \bar{\omega}/\omega$. Potresnom opterećenju odgovara rezonancija, odnosno $\beta = 1$ pa izraz (52) poprima oblik

$$\text{tg}\delta = 2\xi. \tag{53}$$

Odnos sile i pomaka sa slike 13. kod elastomernih ležajeva može se opisati bilinearnom aproksimacijom histereze (slika 14.) uz oznake iz norme EN 1998-2:2005.



- F_y - sila popuštanja
- d_y - pomak pri popuštanju
- K_e - elastična krutost
- F_0 - sila kod nultog pomaka
- F_{max} - maksimalna sila koja odgovara maksimalnom pomaku
- d_{bd} - maksimalni pomak
- K_{eff} - efektivna krutost
- K_p - postelastična (tangencijalna) krutost
- E_D - utrošena energija jednaka ploštini stvarne histerezne petlje

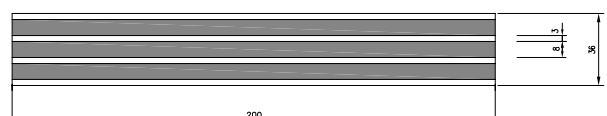
Slika 14. Bilinearna aproksimacija histerezne petlje

5.2 Ispitivanje dinamičkih karakteristika elastomernih ležajeva

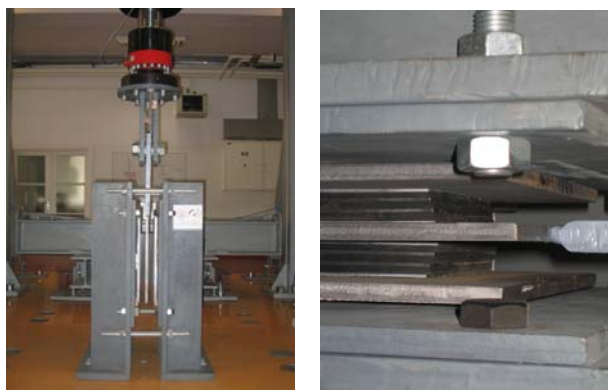
U normi EN 1998-2:2005 razlikuju se elastomerni ležajevi s malim prigušenjem (ekvivalentno viskozno prigušenje $\xi < 0,06$) i elastomerni ležajevi s velikim prigušenjem (ekvivalentno viskozno prigušenje $\xi \approx 0,1$ do $0,2$). Ekvivalentno viskozno prigušenje predstavlja energiju koja se disipira pomoću izolacijskog sustava i izražava se efektivnim prigušenjem ξ_{eff} .

Ležajevi s malim prigušenjem moraju biti usklađeni s normom EN 1337-3:2005 i mogu se primjenjivati bez posebnih ispitivanja potresnih karakteristika, dok se ležajevi s velikim prigušenjem (posebni elastomerni ležajevi) moraju ispitati u skladu s prednormom prEN 15129:2007 [8].

Pri ispitivanju su upotrijebljeni ležajevi dimenzija $200 \times 300 \times 41$ mm (2 komada) (slika 15.) te dinamička preša (slika 16.).

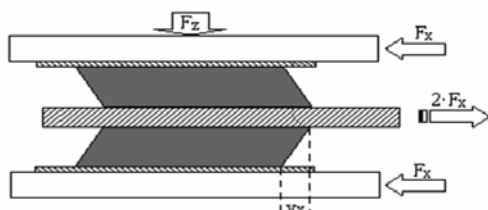


Slika 15. Ležaj 200x300x41 mm



Slika 16. Uređaj za ispitivanje dinamičkih karakteristika

Shematski prikaz ispitivanja na posmik prikazan je na slici 17. Prikazano je stlačivanje dvaju ležajeva koji su jedan od drugog odvojeni pomičnom pločom, pri čemu im je omogućena posmična deformacija u kontroliranim uvjetima. Srednji vertikalni tlak pri ispitivanju na posmik treba iznositi 6 MPa. Brzina prirasta posmičnih deformacija treba biti konstantna do maksimalnog pomaka v_{xm} ($0,7 \cdot T_q \leq v_{xm} \leq 0,9 \cdot T_q$), pri čemu je T_q ukupna debljina elastomera. Nakon doseganja maksimalne vrijednosti deformacije uklanja se opterećenje i uzorci miruju 5 minuta prije ponovnog nanošenja opterećenja.



Slika 17. Shematski prikaz ispitivanja na posmik

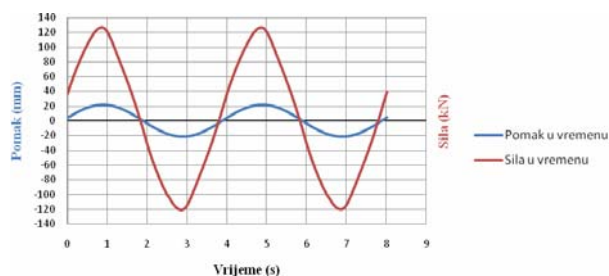
Prije ispitivanja na posmik uzorak je potrebno opteretiti tlačnom centričnom silom.

$$F_{z,sr} = \sigma \cdot A = 6 \cdot 200 \cdot 300 = 360000 \text{ N} = 360 \text{ kN} = 36 \text{ t}$$

Ukupna debljina elastomera: $T_q = T = 24 \text{ mm}$

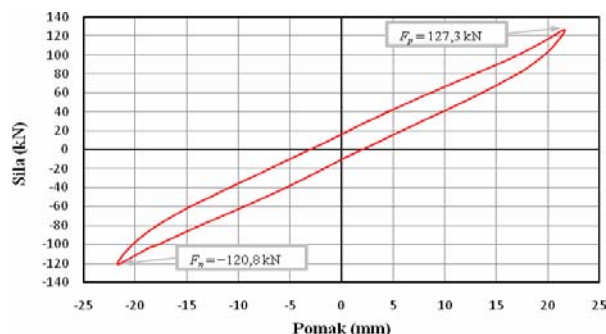
Maksimalni pomak kojim se izlaže ležaj pri frekvenciji od 0,25 Hz određuje se prema uvjetu za maksimalnu deformaciju te iznosi $v_{xm} = \gamma_{max} \cdot T_q = 0,9 \cdot 24 = 21,6 \text{ mm}$.

Rezultati ispitivanja dobiveni u laboratoriju na dinamičkoj preši dani su na slici 18.



Slika 18. Ovisnost sile i pomaka o vremenu

Na slici 19. prikazan je odnos sile i pomaka u jednom ciklusu, odnosno histerezna petlja u obliku elipse.



Slika 19. Odnos sile i pomaka pri zadanim uvjetima ispitivanja

Prema izrazu (53) prigušenje se određuje na sljedeći način:

$$\xi = \frac{\text{tg} \delta}{2} = \frac{E_D}{2\pi \cdot 2E_s} = \frac{E_D}{2\pi \cdot k \cdot \rho^2} \quad (54)$$

ili prema oznakama iz norme EN 1998-2:2005

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_{D,i}}{K_{eff} d_{cd}^2} \right], \quad (55)$$

pri čemu je:

$\sum E_{D,i}$ - suma disipirane energije svih i -tih izolatora pri proračunskom pomaku d_{cd}

d_{cd} - proračunski pomak izolacijskog sustava, odnosno u ovom slučaju maksimalni pomak.

Efektivna krutost K_{eff} određuje se sljedećim izrazom:

$$K_{eff} = \frac{F_p - F_n}{d_p - d_n}, \quad (56)$$

pri čemu su F_p i F_n maksimalna pozitivna i negativna sila u ciklusu, a d_p i d_n maksimalni pozitivni i negativni pomak u ciklusu. Vrijednosti sila F_p i F_n nalaze se među izlaznim podacima, ali se mogu očitati i na dijagramu sa slike 19.

$$F_p = F_{max} = 127,3 \text{ kN}$$

$$F_n = -120,8 \text{ kN}$$

$$F_0 = 16,0 \text{ kN}$$

$$d_p = 21,6 \text{ mm}$$

$$d_n = -21,6 \text{ mm}$$

Očitana vrijednost utrošene energije, odnosno ploštine histerezne petlje iznosi: $E_D = 1100 \text{ kNmm}$.

$$K_{eff} = \frac{F_p - F_n}{d_p - d_n} = \frac{127,3 - (-120,8)}{21,6 - (-21,6)} = 5,74 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1100}{5,74 \cdot 21,6^2} = 0,065$$

Ležaj ima prigušenje koje je na granici između ležajeva s malim i velikim prigušenjem.

6 Zaključak

S obzirom da se ne primjećuje opadanje u učestalosti i razornosti potresa, sve se više javlja potreba za djelotvornim vibracijskim i potresnim izolacijskim sustavima. Potresna izolacija ima posebno značenje kod građevina kod kojih je nužno osigurati njihovu uporabljivost neposredno nakon djelovanja jakog potresa, odnosno kod građevina od velike važnosti za javnu sigurnost, kao što su bolnice, telekomunikacijske građevine, vatrogasne postaje itd. Kako bi se izolacijski sustavi mogli sustavno analizirati, potrebno je poznavati teorijske i eksperimentalne podloge. Pri odabiru odgovarajućeg sustava potrebno je uzeti u obzir različite parametre kao što su viskoelastična svojstva, mehanizmi prigušenja te oblik i količina utrošene energije.

Viskoelastičnost je svojstvo koje se može analizirati pomoću puzanja i relaksacije materijala. U ovom radu posebno su obrađena dinamička viskoelastična svojstva budući da su ona ključna kada se rabe proizvodi od poli-

mernih materijala u potresnoj izolaciji. Kod protupotresnih naprava, kao što su npr. viskoelastični prigušivači, bitnim se parametrima smatraju histerezne petlje, količina utrošene energije i vrijednost mehaničkoga gubitka. U primjeni izolacijskih sustava potrebno je ponajprije ocijeniti koji su proizvodi najpovoljnije rješenje. Pri takvoj ocjeni nužno je poznavanje viskoelastičnih svojstava. U ovom su radu na primjeru ispitivanja dinamičkih karakteristika elastomernih ležajeva očitane vrijednosti utrošene energije te je ocijenjeno prigušenje.

Sustavi za dodatno prigušenje nezamjenjivi su u konstrukcijama u kojima se ne može primijeniti izolacija u podnožju, npr. kod visokih zgrada koje su temeljene na debelim slojevima mekog tla. Sve se češće primjenjuje kombinacija izolacije u podnožju i sustava za dodatno prigušenje. Elastomerni ležajevi kao izolacija u podnožju ograničavaju unos potresne energije u konstrukciju, dok sustavi za dodatno prigušenje povećavaju ukupnu količinu prigušenja u konstrukciji.

Budući da se u graditeljstvu često odabiru standardni elastomerni ležajevi u skladu s europskim normama, oni mogu biti i najbolja rješenja u područjima gdje dolazi do pojave potresa.

LITERATURA

- [1] McCrum, N. G.; Buckley, C.P.; Bucknall, C.B.: *Principles of Polymer Engineering*, 2nd edition, Oxford University Press, New York, 1997.
- [2] Šimunić, Ž.: *Polimeri u graditeljstvu*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [3] Šimunić, Ž.; Dolanjski, A.: *Elastomerni ležajevi*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [4] Alfirević, I.: *Uvod u tenzore i mehaniku kontinuuma*, Golden marketing, Zagreb, 2003.
- [5] Shaw, M.T.; MacKnight, W.J.: *Introduction to Polymer Viscoelasticity*, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2005.
- [6] Christopoulos, C.; Filiatrault, A.: *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, IUSS PRESS, Pavia – Italy, 2006.
- [7] HRN EN 1998-1, Eurokod 8: Projektiranje konstrukcija otpornih na potres - 1. dio: Opća pravila.
- [8] Šimunić, Ž.; Dolanjski, A.: *Dinamički proračun konstrukcija na viskoelastičnim ležajevima*, Građevinar 59 (2007) 10, 859-870.