

Primljen / Received: 16.11.2022.

Ispravljen / Corrected: 20.3.2023.

Prihvaćen / Accepted: 28.4.2023.

Dostupno online / Available online: 10.11.2023.

Analiza mehanizma disipacije energije međukatno izolirane konstrukcije utemeljena na zaostajanju u fazi

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Shangrong Zhang**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Ningxia, Kina
Fakultet za građevinarstvo i hidrotehniku
sr_zhang@nxu.edu.cn



Mr.sc. **Chi Zhang**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Ningxia, Kina
Fakultet za građevinarstvo i hidrotehniku
zhangchi0016@163.com
Autor za korespondenciju



Mr.sc. **Xue Ju**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Ningxia, Kina
Fakultet za građevinarstvo i hidrotehniku
Juxue1210@163.com



Mr.sc. **Yang Xiong**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Ningxia, Kina
Fakultet za građevinarstvo i hidrotehniku
Xy18096000795@163.com

Prethodno priopćenje

Shangrong Zhang, Chi Zhang, Xue Ju, Yang Xiong

Analiza mehanizma disipacije energije međukatno izolirane konstrukcije utemeljena na zaostajanju u fazi

Kod konstrukcija koje su seizmički međukatno izolirane dolazi do fenomena vremenske odgode koji se javlja između potkonstrukcije i natkonstrukcije. Fenomen uzrokuje faznu razliku, a generirana fazna razlika ima značajan utjecaj na učinak prigušenja. Kako bi se ispitao ovaj učinak, uspostavljen je dvomaseni model konstrukcije s međukatnom izoliracijom, izvedena je formula fazne razlike, analiziran je utjecaj fazne razlike na učinak prigušenja modelirane izolirane konstrukcije te je dobivena optimalna fazna razlika za postizanje najboljega učinka prigušenja. Također smo kombinirali načelo minimalne potresne sile i optimalne fazne razlike kako bi se optimiralo prigušivanje izolacijskoga sloja konstrukcije s različitim omjerima mase. Na temelju optimalnoga prigušenja postavljena je jednadžba ravnoteže s aspekta energije. Prijenos i potrošnja energije uslijed različitih faznih razlika analizirani su kako bi se ispitao odnos između faznih razlika i učinka prigušenja izolirane međukatne konstrukcije.

Ključne riječi:

izolirana međukatna konstrukcija, vremenska odgoda, fazna razlika, mehanizam energetske izolacije

Research Paper

Shangrong Zhang, Chi Zhang, Xue Ju, Yang Xiong

Study on seismic dissipation mechanism of inter-story isolation structure based on phase

Owing to the existence of the isolation layer, a phase lag phenomenon occurs between the superstructure and substructure of a story isolation structure. This phenomenon causes a phase difference between the superstructure and substructure; furthermore, the generated phase difference has a significant impact on the structural damping effect. To study this effect, we established a two-mass model of an inter-story isolated structure, derived the phase difference formula, analysed the impact of the phase difference on the damping effect of the modelled inter-story isolated structure and obtained the optimal phase difference to achieve the best damping effect; in addition, we combined the principle of minimum base shear and optimal phase difference to optimise the damping of the structural isolation layer with different mass ratios. Based on the optimal damping, an energy balance equation was established from the viewpoint of energy. The energy transfer and consumption under different phase differences were analysed to further discuss the relationship between phase differences and the damping effect of the inter-story isolated structure.

Key words:

inter-story isolated structure, phase lag, phase difference, energy isolation mechanism

1. Uvod

Učinci potresa na konstrukcije iznimno su značajni i opsežno se istražuju, što osigurava brojne korisne podatke [1-3]. S povećanjem seizmičkih zahtjeva građevinskih konstrukcija, tehnologija izolacije postupno se poboljšava i sve se više primjenjuje prilikom gradnje. Zgrada Western Post u Japanu izolirana je pomoću gumenih izolacijskih ležajeva te je pokazala dobru seizmičku otpornost tijekom Velikog Hanshin potresa (poznatiji kao Kobe potres 1995.). Ne samo da je građevinska konstrukcija ostala neoštećena, već su i unutarnje uređenje, oprema i instrumenti ostali sačuvani. Bolnica Malatya, izolirana konstrukcija smještena u istočnom dijelu Turske, također je pokazala dobro seizmičko ponašanje tijekom potresa magnitude 7,8 u Turskoj 6. veljače 2023. Međunarodna zračna luka Beijing Daxing u Pekingu u Kini najveća je pojedinačna izolirana konstrukcija na svijetu i poznata je kao jedno od "sedam novih svjetskih čuda". Izolacijski se sloj sastoji od izolacijskog ležaja na bazi olova i gume, običnog gumenog izolacijskog ležaja, elastičnog kliznog ležaja i prigušivača. Nova izolacijska tehnologija predložena je na temelju teorije i inženjerske prakse izoliranja temelja konstrukcija. [4]. Izolacijski sloj međukatne izolacije je fleksibilan i obično se postavlja između poda i stupa, što učinkovito proširuje opseg izolacijske tehnologije [5]. Međutim, zbog izolacijskoga sloja, konstrukcija s međukatnom izolacijom postaje vertikalno nepravilna, a njezina mehanička svojstva znatno se razlikuju od svojstava tradicionalnih konstrukcija [6, 7]. To rezultira različitim stanjima gibanja potkonstrukcije i natkonstrukcije.

Kako bismo bolje razumjeli mehanizam disipacije energije međukatne izolacije, znanstvenici su proveli opsežna istraživanja temeljena na masi, frekvenciji i prigušenju izolacijskoga sloja. Simulacijom osnovnih karakteristika izolacijskoga sloja i konstrukcije, Ying i sur. [8] simulirali su ponašanje konstrukcije s međukatnom izolacijom. Smatralo se da se međukatna izolacija uglavnom primjenjivala za promjenu obilježja prirodnih vibracija konstrukcije zbog kontrole prigušivanja udara. Osim toga, disipacija energije izolacijskoga sloja primijenjena je za postizanje učinaka disipacije energije i prigušivanja udara, a promjena omjera masa također je imala značajan utjecaj na mehanizam prigušivanja udara. Zheng i sur. [9] navode da vibracijska obilježja zgrada ne ovise samo o krutosti izolacijskog sloja, zgradi i broju prigušivača, već i o krutosti i omjeru masa potkonstrukcije i natkonstrukcije. Kim i sur. [10] ispitivali su utjecaj granice popuštanja i horizontalne krutosti izolacijskog sloja na pomak. Rezultati su pokazali da povećanje granice popuštanja i horizontalne krutosti može učinkovito smanjiti uklanjanje izolacijskoga sloja, ali to bi također smanjilo stabilnost cijele konstrukcije. Stoga je važno odabrati primjerene vrijednosti za granicu popuštanja i horizontalnu krutost izolacijskoga sloja. Faiella i sur. [11] su iz analize dviju stvarnih zgrada zaključili da su omjer mase potkonstrukcije i natkonstrukcije prigušenje seizmičkoga izolacijskog sloja ključni parametri u projektiranju međukatne izolacije. Kada je krutost izolacijskoga sloja mala, međukatna izolacija može učinkovito kontrolirati seizmički odziv natkonstrukcije, ali također može

pojačati seizmički odziv potkonstrukcije [12]. U ovoj su fazi istraživanja o mehanizmu međukatnih izolacija gotovo cjelovita. Međutim, još uvijek nedostaju utjecaj natkonstrukcije na potkonstrukciju i metode za izbjegavanje povećanja seizmičkog odziva potkonstrukcije. Nadalje, najnovije norme za projektiranje seizmičke izolacije zgrada objavljene u Kini pružaju detaljne upute za projektiranje konstrukcija s međukatnim izolacijama, ali i navode da je pri projektiranju potkonstrukcije potrebno uzeti u obzir utjecaj uzdužne sile, momenta savijanja, posmične sile i dodatnog momenta savijanja kojim natkonstrukcija djeluje na potkonstrukciju. To pokazuje da se ne može zanemariti utjecaj natkonstrukcije na potkonstrukciju [13]. Wang S.J. i sur. [14] izveli su eksperimente na potresnom stolu i otkrili da između natkonstrukcije i potkonstrukcije postoji vremenska odgoda. Nadalje, vremenska odgoda uzrokuje faznu razliku (zaostajanje u fazi) između gornjeg i donjeg dijela, a postoje očigledne razlike u djelovanju natkonstrukcije na potkonstrukciju pod različitim faznim razlikama. Učinak prigušenja kod međukatne izolacije pod različitim faznim razlikama također je različit. Stoga je fazna razlika moćan alat za ispitivanje djelovanja natkonstrukcije na potkonstrukciju i mehanizma disipacije energije kod međukatne izolacije.

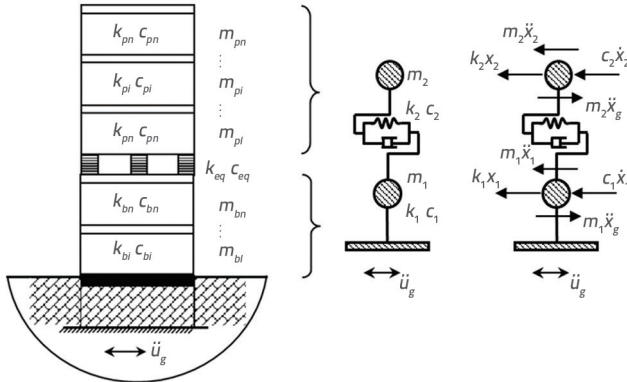
Faza se često primjenjuje za objašnjavanje optimalnoga učinka prigušenja prilagodljivih pasivnih prigušivača (engl. *Tuned mass damper* - TMD). Li [15] navodi da se utjecaj faze ne može zanemariti u analizi prigušenja sustava TMD-a. Soong i Dargush [16] raspravljali su o faznom konceptu sustava TMD-a pod jednostavnom harmonijskom pobudom. Primijetili su kada je fazna razlika između relativnog pomaka TMD-a i pomaka glavne konstrukcije bila 90° , da je tada energija prenesena iz konstrukcije u sustav TMD-a bila najveća, a učinak prigušenja TMD-a najbolji. Zhang i sur. [28] predložili su da se kada je fazna razlika između sile TMD-a na konstrukciju i vanjske pobude 180° , sila TMD-a na konstrukciju smanjuje. Međutim, njihovo je istraživanje bilo ograničeno na sinusno opterećenje. Zhang [17] sugerira da je prigušenje TMD-a najučinkovitije kada je fazna razlika između brzine središnje konstrukcije i TMD-a u odnosu na pomak središnje konstrukcije 180° . Primjena faze u analizi TMD-a opširno je ispitivana, ali faza u konstrukcijama s međukatnom izolacijom nije detaljnije istražena. Polazeći od faze, u ovom se radu analizira interakcija natkonstrukcije i potkonstrukcije, kao i utjecaj faze na učinak prigušenja međukatne izolacije. Štoviše, analizom dobivamo optimalnu faznu razliku za postizanje najboljega učinka prigušenja konstrukcije te analiziramo mehanizam prigušenja međukatno izolirane konstrukcije kombiniranjem faze i energije.

2. Pojednostavljeni model međukatne izolacije i izračuna fazne razlike

2.1. Pojednostavljeni model i dinamička jednadžba

Model konstrukcije s dva dinamička stupnja slobode s međukatnom izolacijom relativno je jednostavan i može

prikazati utjecaj glavnih parametara na konstrukciju [19]. Štoviše, može vizualno prikazati faznu razliku između natkonstrukcije i potkonstrukcije, što pogoduje faznoj analizi konstrukcije s međukatnom izolacijom. S obzirom na to daje horizontalna krutost izolacijskoga sloja sustava mnogo niža od horizontalne krutosti natkonstrukcije, smatra se da je natkonstrukcija kao cjelina blizu stanja translacijskog gibanja pod seizmičkim djelovanjem, djelujući kao kruto tijelo. Pri analizi dinamičkih karakteristika, izolacijski sloj i natkonstrukcija mogu se pojednostaviti na jednu masu, a potkonstrukcija se također pojednostavljuje na jednu samostalnu masu. Pojednostavljeni model prikazan je na slici 1. [20].



Slika 1. Model konstrukcije s dva stupnja slobode s međukatnom izolacijom

Jednadžbe gibanja izražene su na sljedeći način [20]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{x}_g\} \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

pri čemu su m_1 i m_2 ekvivalentna masa potkonstrukcije, odnosno ukupna masa natkonstrukcije. c_1 i c_2 su ekvivalentno prigušenje potkonstrukcije i prigušenje izolacijskoga sloja. k_1 i k_2 su ekvivalentna krutost potkonstrukcije i horizontalna krutost izolacijskoga sloja. x_1 i x_2 su pomaci. x_g je potresno ubrzanje tla.

2.2. Izračun fazne razlike

Pretpostavlja se da je jednadžba pobude ubrzanja supstrata $P_{\sin\omega t}$. Točan izraz za jednadžbu (1) je $\ddot{x}_g = P_{\sin\omega t}$. Za pojednostavljeni model, pretpostavljeno je da je rješenje ravnotežnog stanja konstrukcije

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t \\ x_2 = A_3 \cos \omega t + A_4 \sin \omega t \end{cases} \quad (2)$$

To je izraženo u izrazu (1) i pojednostavljeno na

$$\begin{cases} A_1(-m_1\omega^2 + k_1 + k_2) + A_2(c_1 + c_2)\omega - A_3k_2 - A_4c_2\omega = 0 \\ A_1(-c_1 - c_2)\omega + A_2(-m_1\omega^2 + k_1 + k_2) + A_3c_2\omega - A_4k_2 = -m_1P \\ -A_1k_2 - A_2c_2\omega + A_3(-m_2\omega^2 + k_2) + A_4c_2\omega = 0 \\ A_1c_2\omega - k_2A_2 - A_3c_2\omega + A_4(-m_2\omega^2 + k_2) = -m_2P \end{cases} \quad (3)$$

Izraz (3) podijelimo sa m_1 i dobivamo

$$a = -\omega^2 + \omega_1^2 + \omega_1^2 u, \quad b = 2\omega\omega_1\xi_1 + 2\omega_2\xi_2 u \omega$$

$$c = \omega_2^2 u, \quad d = 2\omega\omega_2\xi_2 u, \quad g = u\omega_2^2 - u\omega^2$$

ω_1 je frekvencija potkonstrukcije, ξ_1 je omjer prigušenja potkonstrukcije, ω_2 je frekvencija natkonstrukcije, ξ_2 je omjer prigušenja natkonstrukcije, a omjer mase je $u = m_2/m_1$; rješavamo kvadratni sustav jednadžbi kako bismo dobili sljedeće:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{(bd^2 - d^3u - d^3 + c^2d + bg^2 + bd^2u - c^2du - 2cdg + acdu - adgu + bcgu)p}{a^2d^2 + a^2g^2 - 2ac^2g - 4acd^2 + 2ad^2g + b^2d^2 + b^2g^2 + 2bc^2d - 4bcdg - 2bd^3 + c^4 + 2c^2d^2 + d^4} \\ A_2 &= \frac{-(ad^2 - c^2u - 2cd^2 + ag^2 - c^2g + d^2g + ad^2u - cd^2u - bcd u + acgu + bdgu)p}{a^2d^2 + a^2g^2 - 2ac^2g - 4acd^2 + 2ad^2g + b^2d^2 + b^2g^2 + 2bc^2d - 4bcdg - 2bd^3 + c^4 + 2c^2d^2 + d^4} \\ A_3 &= \frac{(bd^2 - c^2d - d^3 + acd - adg + bcg + bc^2u + a^2du - bd^2u + b^2du - 2acdu)p}{a^2d^2 + a^2g^2 - 2ac^2g - 4acd^2 + 2ad^2g + b^2d^2 + b^2g^2 + 2bc^2d - 4bcdg - 2bd^3 + c^4 + 2c^2d^2 + d^4} \\ A_4 &= \frac{-(ad^2 - cd^2 - c^3 - bcd + acg + bdg - ac^2u + ad^2u + a^2gu + b^2gu - 2bcd u)p}{a^2d^2 + a^2g^2 - 2ac^2g - 4acd^2 + 2ad^2g + b^2d^2 + b^2g^2 + 2bc^2d - 4bcdg - 2bd^3 + c^4 + 2c^2d^2 + d^4} \end{aligned}$$

Relativni pomak natkonstrukcije je

$$x_2 = A_r \sin(\omega t + \varphi_r) \quad (4)$$

U izrazu (4):

$$\tan \varphi_r = \frac{A_3 - A_1}{A_4 - A_2}, \quad A_r = \sqrt{(A_3 - A_1)^2 + (A_4 - A_2)^2}$$

Brzina potkonstrukcije je

$$\dot{x}_1 = A_s \sin(\omega t + \varphi_s) \quad (5)$$

U izrazu (5):

$$\tan \varphi_s = -\frac{A_2}{A_1}, \quad A_s = \sqrt{(A_1\omega)^2 + (A_2\omega)^2}$$

Tada je fazna razlika između relativnog pomaka natkonstrukcije i brzine potkonstrukcije

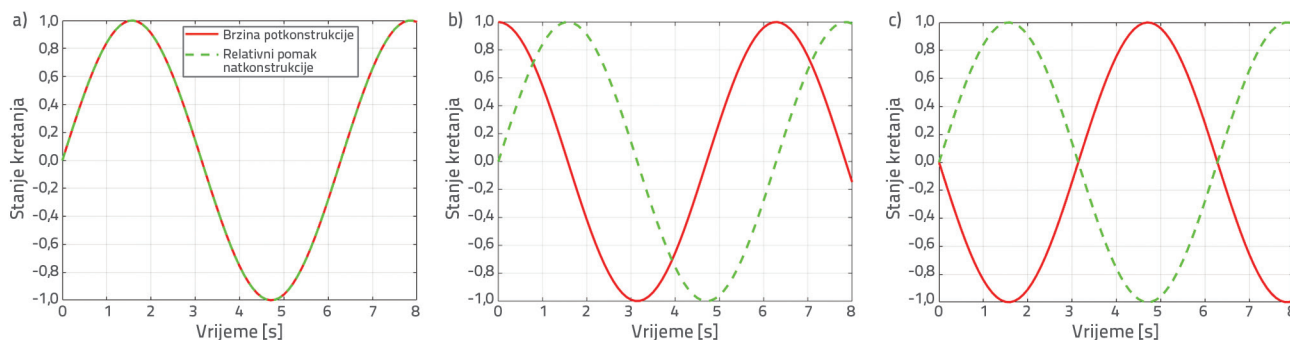
$$\theta = \varphi_r - \varphi_s \quad (6)$$

3. Fazna razlika i učinak prigušenja

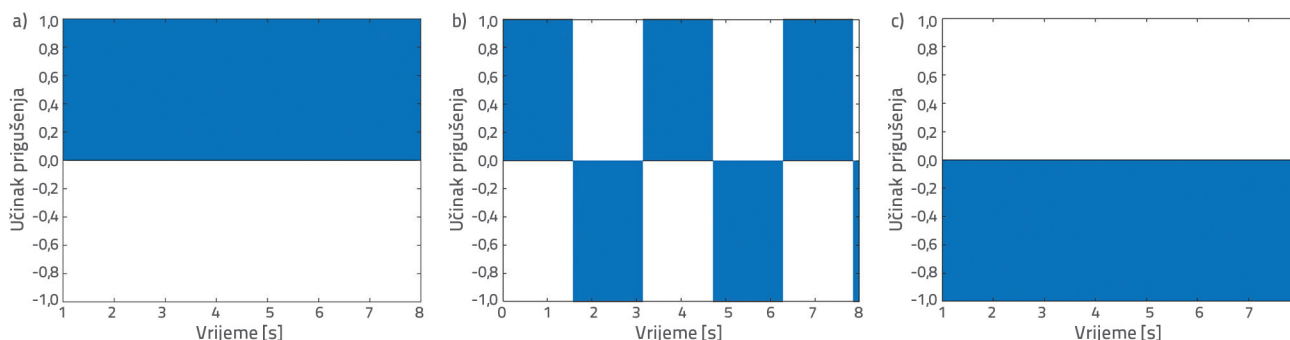
3.1. Odnos između fazne razlike i učinka prigušenja

Kako bismo ispitali odnos između fazne razlike i učinka prigušenja u jednom ciklusu, pretvorit ćemo koordinate izraza (4) i (5) duž smjera vremenske osi φ_α/ω , što neće utjecati na izračun fazne razlike iz koje se može dobiti sljedeća jednadžba:

$$\dot{x}_1 = A_s \sin(\omega t + \varphi_s - \varphi_r) = A_s \sin(\omega t) \quad (7)$$



Slika 2. Relativni pomak natkonstrukcije i brzina potkonstrukcije: a) $\theta = 0^\circ$; b) $\theta = 90^\circ$; c) $\theta = 180^\circ$



Slika 3. Fazna razlika i učinak prigušenja: a) $\theta = 0^\circ$; b) $\theta = 90^\circ$; c) $\theta = 180^\circ$

$$x_2 = A_r \sin(\omega t + \varphi_r - \varphi_s) = A_r \sin(\omega t + \theta) \tag{8}$$

Radi lakše analize, pretpostavlja se da je $A_a = A_r = 1$. Vrijednosti fazne razlike θ su 0° , 90° i 180° . Prikazi na slikama 2. i 3. su ucrtani prema izrazima (6) i (7). Ove brojke prikazuju učinak faze na smanjenje potresne sile konstrukcije. Krivulje s različitim predznakom na slici 2. pokazuju da je seizmički odziv potkonstrukcije smanjen, a krivulje s istim predznakom pokazuju da je seizmički odziv potkonstrukcije pojačan.

Na temelju scenarija prigušenja prikazanog na slici 2. ucrtali smo analizu prigušenja fazne razlike prikazanu na slici 3., koja intuitivnije odražava učinak fazne razlike na učinak prigušenja konstrukcije. Na slici 3., kada je fazna razlika 0° , odziv potkonstrukcije je uvijek pojačan, a kada je fazna razlika 90° , situacija je suprotna, a odziv potkonstrukcije uvijek opada. Kada je fazna razlika 180° , vrijeme pojačanja i smanjenja seizmičkog odziva potkonstrukcije u jednom ciklusu je polovično. Stoga je 180° optimalna fazna razlika za smanjenje seizmičkoga odziva konstrukcije.

3.2. Načelo fazne energije

Kako bi se dodatno potvrdila točnost teorijske analize u podpoglavlju 2.1 i kako bi se analizirala promjena u djelovanju natkonstrukcije na potkonstrukciju pod različitim faznim razlikama u jednom ciklusu, ovaj je rad usvojio načelo fazne energije [21] za kombiniranje faze te analizira učinak fazne razlike na učinak prigušenja izolirane međukatne konstrukcije.

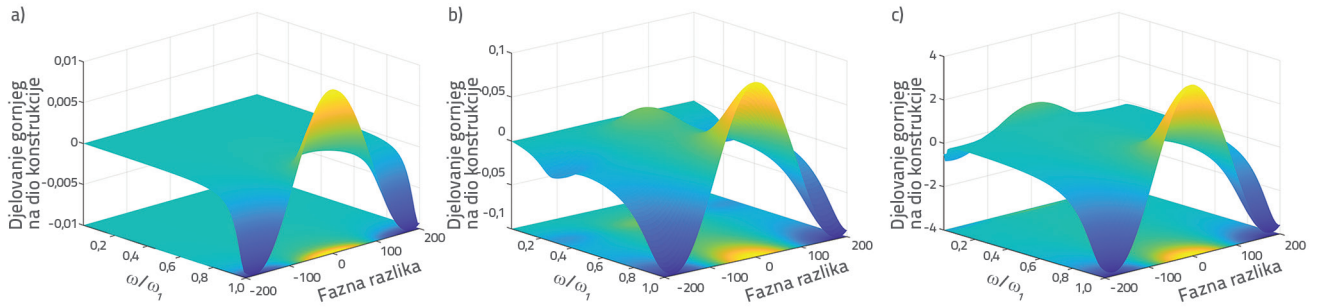
Jednadžba za djelovanje natkonstrukcije na potkonstrukciju je sljedeća:

$$E_\theta = \int_0^{2\pi/\omega} F_\theta \cdot \dot{x}_1 dt = \int_0^{2\pi/\omega} F_\theta \cdot A_s \sin(\omega t) dt \tag{9}$$

$$F_\theta = k_2 \cdot x_2 = k_2 \cdot A_r \sin(\omega t + \theta) a \tag{10}$$

U jednadžbi se harmonijska sila F_θ natkonstrukcije uzima kao sila natkonstrukcije ekvivalentna sili potkonstrukcije; \dot{x}_1 je brzina potkonstrukcije, x_2 je pomak natkonstrukcije i k_2 je krutost izolacijskoga sloja. Da bi se dobilo opće pravilo, masa potkonstrukcije definirana je kao 1, a masa natkonstrukcije mijenja se s promjenama u omjeru masa. Primjenom izraza (8), omjeri mase od 0, 1, 1 i 20 odabrani su za prikaze na slici 4.

Prema slici 4., kada je fazna razlika 0° , natkonstrukcija postiže maksimalno pozitivno djelovanje na potkonstrukciju i pojačava seizmički odziv konstrukcije. Kada je fazna razlika $\pm 180^\circ$, natkonstrukcija ima maksimalno negativno djelovanje na potkonstrukciju i smanjuje seizmički odziv konstrukcije; kada je fazna razlika $\pm 90^\circ$, natkonstrukcija djeluje na potkonstrukciju i ne pojačava niti smanjuje seizmički odziv konstrukcije. Istodobno, uspoređujući djelovanje pri različitim omjerima masa, možemo zaključiti da što je omjer masa veći, to je djelovanje gornje konstrukcije na donju značajnije. Kad je omjer frekvencija mali, djelovanje natkonstrukcije je beznačajno. Kada je omjer mase umjeren i velik, omjer frekvencije je približno 0,3 odnosno 0,01, a djelovanje



Slika 4. Djelovanje natkonstrukcije na potkonstrukciju: a) Omjer mase 0,1; b) Omjer mase 1; c) Omjer mase je 20

gornjeg na donji dio također se značajno poboljšalo jer je frekvencija vanjske pobude blizu frekvencije samoosciliranja natkonstrukcije i dolazi do rezonancije.

4. Analiza fazne razlike

Fazna razlika između gornjeg i donjeg dijela konstrukcije varira s promjenama u omjeru konstrukcijske mase, omjeru frekvencije i omjeru prigušenja. Stoga je odabir parametara za izoliranu međukatnu konstrukciju ključno pitanje u proučavanju varijacije fazne razlike [22]. Važno je odabrati odgovarajući raspon parametara kako bi fazna razlika bila približna 180° za faznu analizu. U ovom smo radu najprije analizirali zakon varijacije fazne razlike unutar raspona parametara načela minimalnog osnovnog smicanja, a zatim smo optimizirali faznu razliku kao cilj optimizacije za omjer prigušenja seizmičkog izolacijskog sloja. Na temelju ovih rezultata proučavali smo učinak načina vibracije na faznu razliku.

4.1. Analiza parametara i optimizacija

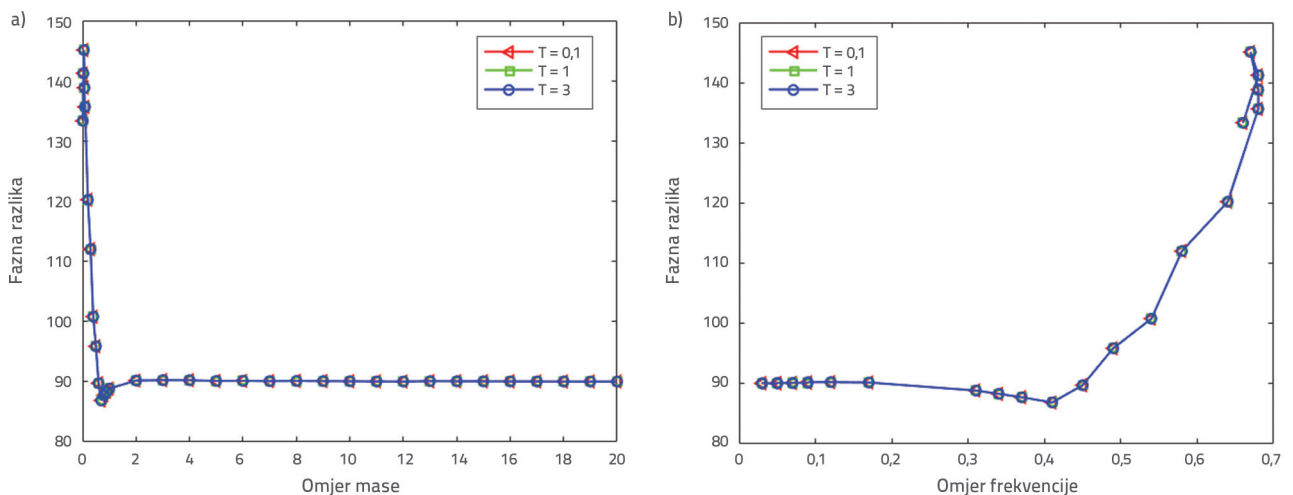
Provedena je analiza u području parametara načela minimalnog osnovnog smicanja [9]. Omjer prigušenja donjeg ustroja je 0,05,

raspon omjera masa je 0,01 do 20, raspon omjera prigušenja izolacijskoga sloja je 0,01 do 0,5, a raspon omjera frekvencija između gornjeg i donjeg ustroja je 0,01 do 1,0. Analizirana je promjena fazne razlike u gornjem rasponu parametara, te je optimiziran omjer prigušenja seizmičkog izolacijskog sloja.

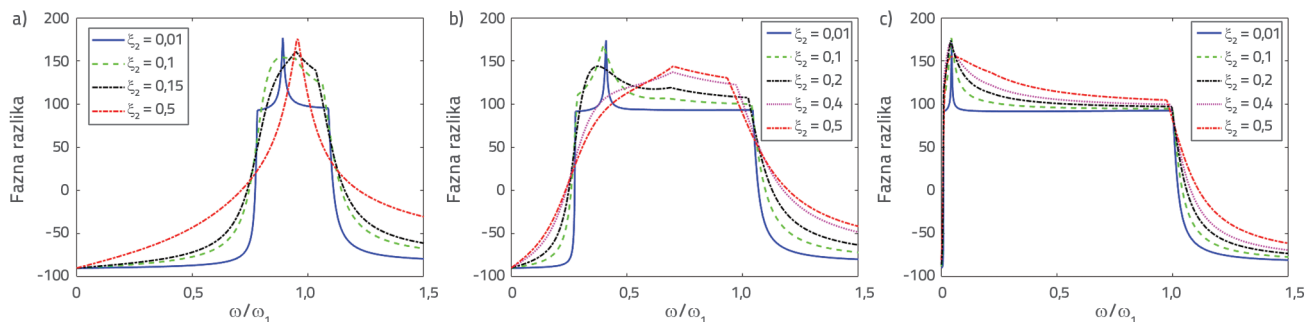
Kao što je prikazano na slici 5., na faznu razliku ne utječe promjena perioda u donjem ustroju. Fazna razlika se smanjuje s povećanjem omjera masa. Brzina promjene je brža kada je omjer mase manji, a sporija je kada je omjer mase veći i postupno teži prema 90°. Fazna razlika lagano se smanjuje s povećanjem omjera frekvencija, a zatim raste s povećanjem omjera frekvencija.

Slika 6. prikazuje odnos između fazne razlike, omjera prigušenja izolacijskog sloja i omjera frekvencija, pri čemu omjer frekvencija predstavlja omjer frekvencije vanjske pobude i frekvencije donjeg ustroja. Fazna razlika pod različitim omjerima prigušenja najprije raste, a zatim opada s povećanjem omjera frekvencija. Kada je prigušenje relativno malo, brzina promjene fazne razlike je brža. Kada je omjer prigušenja velik, brzina promjene je spora, kao što je prikazano na slici 5.

Budući da je omjer prigušenja izolacijskog sloja ključno pitanje u projektiranju konstrukcija s međukatnom izolacijom, ovaj je rad primijenio rezultate prikazane na slici 6. i utjecaj fazne razlike



Slika 5. Odnos između fazne razlike i omjera mase i omjera frekvencija u različitim periodima: a) Pomak fazne razlike s omjerom mase; b) Pomak fazne razlike s omjerom frekvencija



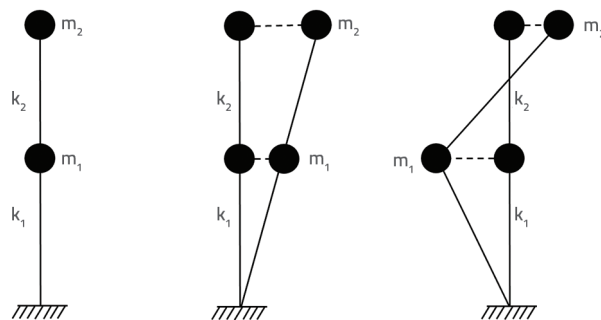
Slika 6. Odnos između omjera prigušenja seizmičkog izolacijskog sloja i fazne razlike: a) $u = 0$; b) $u = 1$; c) $u = 20$

na učinak prigušenja kako bi se optimizirao raspon omjera prigušenja izolacijskog sloja. Za faznu analizu, fazna razlika pri optimalnom omjeru prigušenja trebala bi biti približna 180° , a fazna razlika između 90° i 180° trebala bi imati relativno širok frekvencijski pojas. U skladu s gornjim načelima, optimalan raspon omjera prigušenja iznosi 0,1–0,15, 0,2–0,4 i 0,1–0,5 kada je omjer mase malen, umjeren i velik.

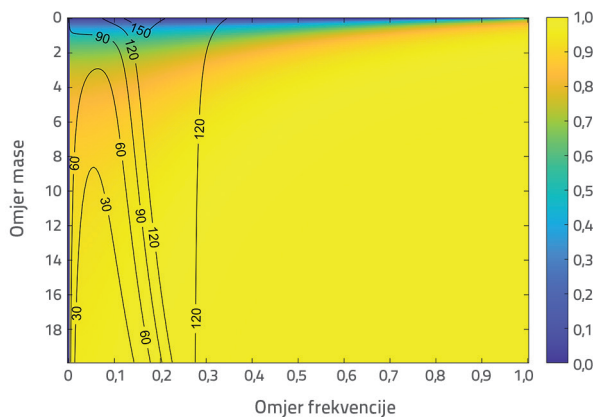
4.2. Analiza vibracijskog moda

Optimalni parametri opisani u podpoglavlju 3.1 odabrani su za iscrtavanje koordinata vibracija prvog i drugog reda pojednostavljenog modela izolacijske međukatne konstrukcije, kao što je prikazano na slici 7. Gornja ravnina prikaza predstavlja koordinate vibracija natkonstrukcije, a donja ravnina predstavlja koordinate vibracija potkonstrukcije. Koordinate vibracija prvog reda objiju konstrukcija su u istom smjeru, a fazna razlika između njih je manja. Koordinate vibracija drugog reda su obrnute, a fazna razlika između objiju konstrukcija je veća. Stoga je fenomen vremenske odgode očitiji.

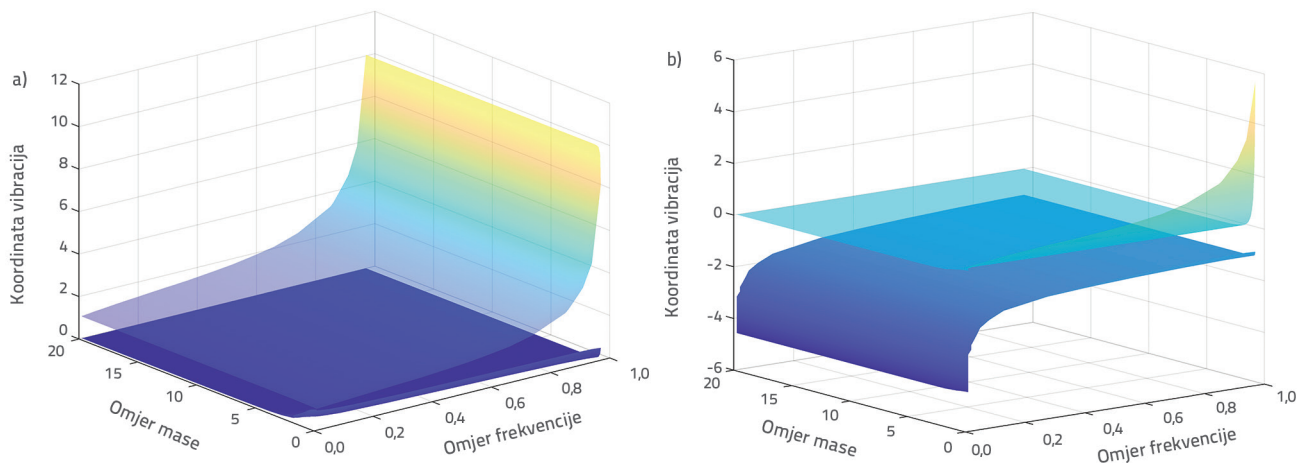
Slika 8. prikazuje odnos između gibanja natkonstrukcije i potkonstrukcije s međukatnom izolacijom pod različitim vibracijskim modovima. Dvije mase oscilacija prvog reda uvijek su u istoj fazi, a dvije mase oscilacija drugog reda uvijek su u suprotnim fazama.



Slika 8. Dijagram vibracijskog moda izolirane međukatne konstrukcije



Slika 9. Koeficijent sudjelovanja mase vibracijskog moda



Slika 7. Promjene koordinata međukatnog izolacijskog moda: a) Koordinate vibracija prvog reda; b) Koordinate vibracija drugog reda

Faktor sudjelovanja modalne mase izravno odražava stupanj utjecaja vibracijskog moda na seizmički odziv. Dvomaseni ekvivalentni model ima samo dva vibracijska moda, a zbroj faktora sudjelovanja modalne mase je 1 [23]. Slika 9. prikazuje odnos između koeficijenta sudjelovanja mase moda prvog reda i omjera mase i frekvencije, koji odražava promjenu koeficijenta sudjelovanja mase moda drugog reda. Linija na slici prikazuje promjenu fazne razlike. Dijagram pokazuje da je utjecaj omjera mase na koeficijent sudjelovanja mase kod vibracijskog moda evidentan, dok je utjecaj omjera frekvencija na koeficijent sudjelovanja mase kod moda vibracije malen. Vibracijski mod prvog reda uvijek ima značajan učinak na konstrukciju. Sa smanjenjem omjera mase i frekvencije, utjecaj drugog reda vibracijskog moda na konstrukciju postaje sve očitiji. Varijacija u faznoj razlici s omjerima mase i frekvencije u dijagramu je u skladu s pravilom promjene prikazanim na slici 5. Nadalje, fazna razlika raste s porastom koeficijenta sudjelovanja mase moda drugog reda. Kada je fazna razlika najbliža 180° , koeficijent sudjelovanja mase moda drugog reda je relativno velik. Stoga mod drugog reda ima značajan utjecaj na to može li fazna razlika između gornjeg i donjeg ustroja biti približna 180° .

5. Analiza energije međukatno izoliranih konstrukcija po fazama

Učinci potresa na konstrukciju uključuju prijenos, transformaciju i disipaciju energije. Primjenom energije za analizu utjecaja fazne razlike na učinak prigušenja može se bolje prikazati cijeli proces odziva konstrukcije pod djelovanjem potresa i elastoplastična svojstva same konstrukcije [24]. U rasponu optimalnih parametara opisanih u podpoglavlju 3.1 analizirani su procesi prijenosa, transformacije i potrošnje energije pod različitim faznim razlikama u ciklusu, a utjecaj fazne razlike na učinak prigušenja međukatne izolacijske konstrukcije je dodatno ispitan.

5.1. Jednadžba energetske bilance međukatne izolacije

Kada je konstrukcija izložena potresu, dio ukupne ulazne energije pohranjuje se kao kinetička energija i nadoknadiva elastična energija naprezanja, a ostali se dijelovi troše prigušenjem same konstrukcije i nenadoknadivim neelastičnim naprežanjem [25]. Na temelju pretpostavki modela, primijenjen je dvomaseni model za utvrđivanje jednadžbe ravnoteže energije za konstrukciju s međukatnom izolacijom kako slijedi:

$$E_e + E_p + E_n = E \quad (11)$$

U izrazu (11), E_e je energija elastične vibracije, E_p je histerezna disipacija energije u izolacijskom sloju, E_n je disipacija energije prigušenja potkonstrukcije, a E je ukupna ulazna energija od potresa.

5.2. Elastična energija vibracije

Na temelju pretpostavke modela da je natkonstrukcija kruta i da ne stvara elastičnu energiju vibracija, na elastičnu energiju vibracija međukatno izolirane konstrukcije utječe samo elastična deformacija izolacijskog sloja i potkonstrukcije [26], a izraz se može prikazati maksimalnim deformacijskim odzivom seizmičkog izolacijskog sloja i potkonstrukcije:

$$E_e = \frac{fQ_m \cdot \delta_2}{2} \left[1 + \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2 \right] \quad (12)$$

$$\delta_1 = \max \left[-\frac{A_a}{\omega} \cos(\omega t) \right], \quad \delta_2 = \max \left[A_a \sin(\omega t) + \frac{A}{\omega} \cos(\omega t + \theta) \right] \quad (13)$$

U izrazu (12) fQ_m je najveća posmična sila koju nosi izolacijski sloj; T_1 je period potkonstrukcije; T_2 je period natkonstrukcije; δ_1 je najveće naprežanje potkonstrukcije, koje se definira kao najveći pomak potkonstrukcije u periodu pod različitim faznim razlikama, a δ_2 je maksimalno naprežanje izolacijskog sloja, koje se definira kao najveći pomak natkonstrukcije u odnosu na potkonstrukciju u periodu pod različitim faznim razlikama.

5.3. Histerezna disipacija energije izolacijskog sloja

Histerezna disipacija energije izolacijskog sloja jednaka je djelovanju koje obavlja sila smicanja prigušivača yQ_m na kumulativno plastično naprežanje δ_{pm} [27]. Jednadžba je sljedeća:

$$E_p = yQ_m \cdot \delta_{pm} \quad (14)$$

U ovom se slučaju kumulativni omjer plastičnog naprežanja η_m definira kao omjer kumulativnog plastičnog naprežanja δ_{pm} na deformaciju tečenja δ_{pm} prigušivača, a prosječni omjer plastičnog naprežanja μ_m definira se kao omjer maksimalnog naprežanja δ_2 na deformaciju tečenja δ_{vm} [28]. Istovremeno se uvodi koeficijent n , a njegovo fizikalno značenje je omjer histerezne disipacije energije prigušivača i djelovanja vibracija najvećeg naprežanja δ_2 izolacijskog sloja u tjedan dana. Kada se dogodi najveće naprežanje izolacijskog sloja, n iznosi 2 [29]. Dakle, odnos između kumulativnog omjera plastičnog naprežanja η_m i prosječnog omjera plastičnog naprežanja μ_m može se izraziti kao

$$\eta_m = 4n\bar{\mu}_m \quad (15)$$

Odnos između histerezne disipacije energije izolacijskog sloja, sile smicanja tečenja prigušivača i maksimalnog naprežanja izolacijskog sloja uspostavljaju se kombiniranjem izraza (12) i (13):

$$E_p = 4n \cdot yQ \cdot \delta_2 \quad (16)$$

5.4. Disipacija energije prigušenja donjeg ustroja

Disipacija energije prigušenja okvirne konstrukcije može se dobiti pomoću sljedeće empirijske formule [30]:

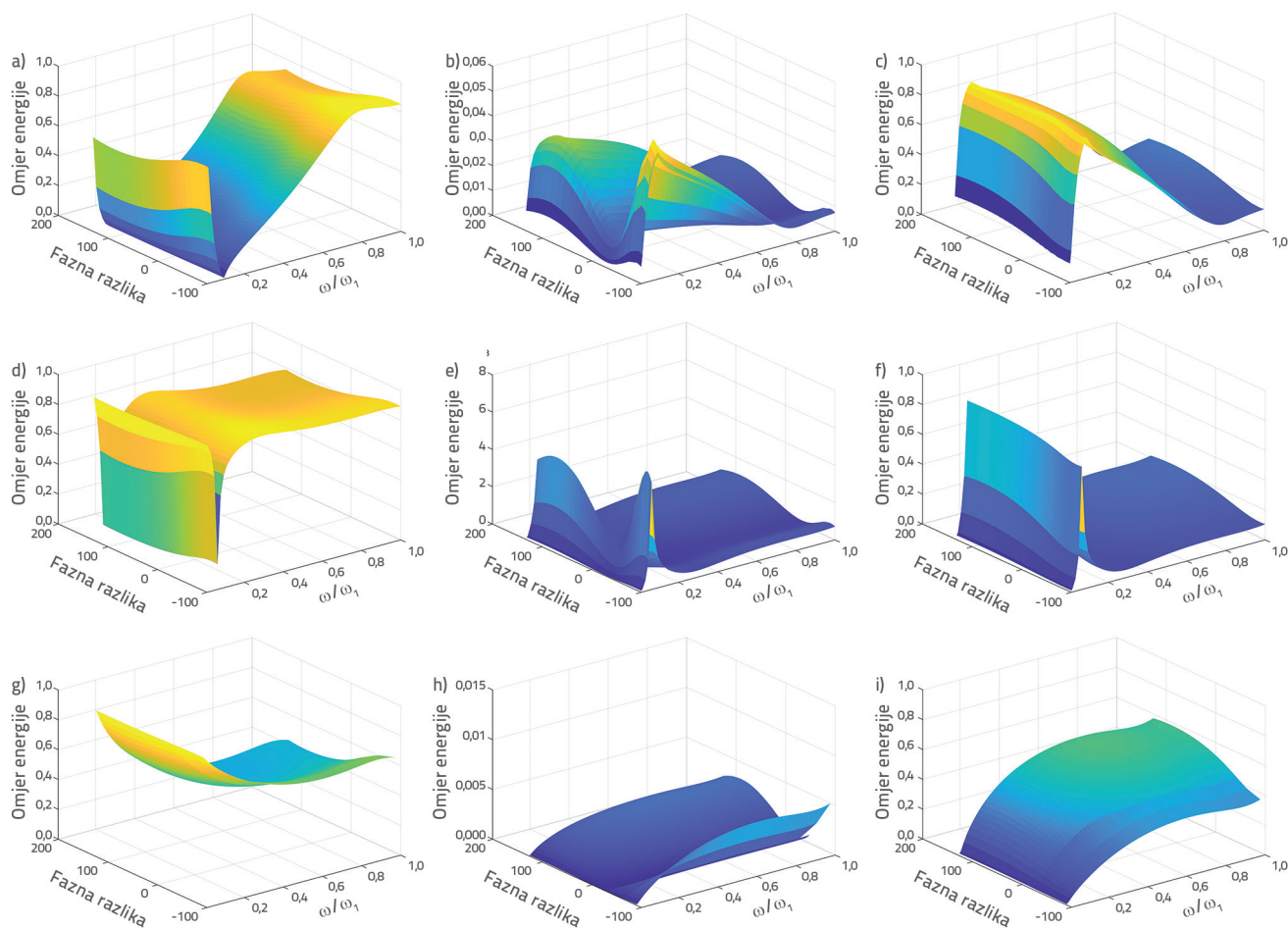
$$E_h = \left[1 - \left(\frac{1}{1 + 3\xi + 1.2\sqrt{\xi}} \right)^2 \right] E \tag{17}$$

pri čemu je E ukupna ulazna energija od potresa, a ξ je omjer prigušenja konstrukcije. Na temelju pretpostavke modela da natkonstrukcija ne stvara energiju disipacije prigušenja, svu energiju disipacije prigušenja konstrukcije osigurava potkonstrukcija, tako da se energija disipacije prigušenja može prenositi primjenom energije disipacije prigušenja cijele konstrukcije bez seizmičkog izolacijskog sloja pri istom omjeru mase. Jednadžbe su sljedeće:

$$E'_h = \frac{m_1}{m_1 + m_2} E_h = \left[1 - \left(\frac{1}{1 + 3\xi + 1.2\sqrt{\xi}} \right)^2 \right] \frac{E}{1 + u} \tag{18}$$

5.5. Učinak faze na međukatnu energiju izolacije

Slika 10. prikazuje odnose između postotka različitih energija u jednom ciklusu i omjera frekvencija i faze razlike. Omjer frekvencija je omjer vanjske frekvencije pobude i frekvencije potkonstrukcije. Slika 10. pokazuje da je elastična energija vibracija koju stvara konstrukcija puno manja od energije prigušenja potkonstrukcije i histerezne energije izolacijskog sloja. Elastična energija vibracije čini najmanji udio ukupne energije kada je fazna razlika blizu 0 i 180°, a najveći kada je blizu ±90°. Histerezna energija izolacijskog sloja raste s porastom faze razlike. Promjena energije prigušenja potkonstrukcije s faznom razlikom suprotna je histereznoj



Slika 10. Odnos koeficijenta sudjelovanja modalne mase prema omjeru mase i omjeru frekvencije: a) $u = 0,1$, disipacija energije prigušenja donjeg ustroja; b) $u = 0,1$, elastična energija vibracije; c) $u = 0,1$, histerezno rasipanje energije izolacijskog sloja; d) $u = 1$, rasipanje energije prigušenja donjeg ustroja; e) $u = 1$, elastična energija vibracije; f) $u = 1$, histerezno rasipanje energije izolacijskog sloja; g) $u = 20$, disipacija energije prigušenja donjeg ustroja; h) $u = 1$, elastična energija vibracije; i) $u = 20$, histerezna disipacija energije izolacijskog sloja

energiji izolacijskog sloja, koja opada s povećanjem fazne razlike. Promjena energije prigušenja donjeg ustroja s faznom razlikom suprotna je energiji fazne razlike, opadajući s povećanjem fazne razlike. Za međukatno izolirane konstrukcije, seizmički odziv konstrukcije može se učinkovito smanjiti primjenom seizmičke ulazne energije seizmičkog izolacijskog sloja, a odziv pomaka konstrukcije također se može učinkovito ograničiti razumnom kontrolom energije elastične vibracije konstrukcije. Kada je fazna razlika blizu 180° , prijenos, pretvaranje i potrošnja energije laminirane seizmičke konstrukcije najkorisniji su za smanjenje seizmičkog odziva konstrukcije.

6. Zaključak

U ovom radu izveden je izraz za faznu razliku između potkonstrukcije i natkonstrukcije međukatnog izolacijskog sustava i optimiziran je omjer prigušenja izolacijskog sloja prema utjecaju fazne razlike na smanjenje seizmičnosti. Nadalje, energija je primijenjena za objašnjenje mehanizma disipacije seizmičke energije međukatno izolirane konstrukcije. Analizom su dobiveni sljedeći zaključci:

- Kada fazna razlika između natkonstrukcije i potkonstrukcije iznosi 180° , učinak natkonstrukcije na potkonstrukciju može učinkovito smanjiti seizmički odziv potkonstrukcije; kada fazna razlika iznosi 0° , seizmički odziv potkonstrukcije je pojačan; a kada je fazna razlika 90° , seizmički odziv potkonstrukcije nije niti pojačan niti smanjen. Kada je vlastita frekvencija natkonstrukcije ili potkonstrukcije jednaka frekvenciji vanjske pobude, povećava se utjecaj natkonstrukcije na potkonstrukciju.

- Kako bi se fazna razlika između obiju konstrukcija približila 180° , omjer težine konstrukcije može se odgovarajuće smanjiti, a omjer frekvencije konstrukcije može se odgovarajuće povećati. Štoviše, omjer prigušenja izolacijskog sloja treba odabrati unutar optimalnog raspona omjera prigušenja koji odgovara odgovarajućem omjeru mase, što je korisno za smanjenje seizmičkog odziva izolacijske konstrukcije.
- Koordinate vibracijskog moda prvog reda su u istom smjeru, a koeficijent sudjelovanja mase vibracija prvog reda smanjuje se sa smanjenjem težine konstrukcije i omjera prigušenja. Koordinate vibracijskog moda drugog reda su obrnute. Stoga vibracijski mod drugog reda značajno pridonosi faznoj razlici, što pomaže da fazna razlika između natkonstrukcije i potkonstrukcije dosegne 180° , čime se smanjuje seizmički odziv konstrukcije.
- Analiza prijenosa, pretvaranja i disipacije energije može učinkovito odražavati cjelokupni proces konstrukcije pod djelovanjem potresa, smanjiti elastičnu energiju vibracije konstrukcije za međukatno izolacijsku konstrukciju i kontrolirati naprezanje konstrukcije pomoću energije disipativne konstrukcije izolacijskog sloja. Stoga, fazna razlika koja je približna 180° može ne samo smanjiti seizmički odziv potkonstrukcije, već i dobro kontrolirati strukturni pomak u analizi energije.

Zahvala

Ovo su istraživanje poduprli Nacionalna zaklada za prirodne znanosti u Kini (br. 52268033) i Program za mlade Zaklade za prirodne znanosti Ningxia (br. 2021AAC05003) te Zaklada za prirodne znanosti iz Ningxije [potpora br. 2022AAC03073].

LITERATURA

- [1] Izol, R., Gürel, M.A., Buyuktasgin, H.A.A.: Investigation of the effectiveness of nature-inspired buttress forms in supporting masonry structures, *Građevinar*, 74 (2022) 7, pp. 573-586, <https://doi.org/10.14256/JCE.3415.2021>
- [2] Bağbanci, M.B.: Dynamic identification of three 19th century churches in Turkey, *Građevinar*, 74 (2022) 2, pp. 125-134, <https://doi.org/10.14256/JCE.2823.2019>
- [3] Zhao, H., Wang, X., Fang, Z., et al.: Assessment of fragility curve for steel frame construction under different categories of earthquakes, *Assessment*, 2021.
- [4] Nakamura, Y., Okada, K.: Review on seismic isolation and response control methods of buildings in Japan, *Geoenvironmental Disasters*, 6 (2019) 1, pp. 1-10.
- [5] Ai, Q.: State-of-the-art of story isolation system, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2004.
- [6] Ryan, K.L., Earl, C.L.: Analysis and design of inter-story isolation systems with nonlinear devices, *Journal of Earthquake Engineering*, 14 (2010) 7, pp. 1044-1062.
- [7] Li, Z., Huang, G., Chen, X., et al.: Seismic Response and Parametric Analysis of Inter-Story Isolated Tall Buildings Based on Enhanced Simplified Dynamic Model, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 22 (2022) 03n04, pp. 2240008.
- [8] Fulin, Z., Ying, Z., Ping, T.: Theoretical study on story isolation system, *China Civil Engineering Journal*, 42 (2009) 8, pp. 1-8.
- [9] Zheng, G.C., Xu, H.L.: Damping Effect of Story Isolation Structure Considering Different Positions of Isolation Layer, *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications Ltd, (2013) 353, pp. 2105-2109.
- [10] Kim, H.S., Kim, S.G., Kang, J.W.: Seismic Response Evaluation of Mid-Story Isolation System According to the Change of Characteristics of the Seismic Isolation Device, *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, 18 (2018) 1, pp. 109-116.
- [11] Faiella, D., Mele, E.: Insights into inter-story isolation design through the analysis of two case studies, *Engineering Structures*, 2020, 215: 110660.
- [12] Li, X.Z., Ou, H.L., Li, S.: Simplified analysis of the computational model for layer spaced earthquake structures, *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 22 (2002) 1, pp. 122-125.

- [13] GT/T 51408-2021, Code for seismic design of buildings [S].
- [14] Wang, S.J., Chang, K.C., et al.: Simplified analysis of mid-story seismically isolated buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40 (2011) 2, pp. 119-133.
- [15] Chuangdi, L., Tianli, H., Tun, L.: The complex modal methods for analysis of random earthquake response of structures with TMD, *Journal of Vibration and Shock*, 22 (2003) 1, pp. 36-39.
- [16] Soong, T.T., Dargush, G.F.: *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, John Wiley & Sons, New York: Chichester, 1997
- [17] Zhang, J.P.: Two theoretical problems of structural vibration control, *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 20 (2000) 1, pp. 125-129
- [18] Li, Z., Zheliang, F., Qianjin, Y.: TMD as an approach to mitigate ice-induced vibrations, 19th IAHR International Symposium on Ice. July 6-11 2008. Vancouver, Canada, pp. 1301-1308.
- [19] He, DD, Miao, Q.S., Li, W.F.; Parameter optimization design of high position story isolated structure subjected to earthquake, *Journal of Vibration Engineering*, 26 (2013) 6, pp. 895-900.
- [20] Li, X., Tan, P., Li, X., et al.: Parameters Optimization and Energy Analysis of Inter-Story Isolation System[M]. *International Collaboration in Lifeline Earthquake Engineering 2016*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, (2017), pp. 257-264.
- [21] Liangkun, L., Ping, T., Xiangxiu L.: Phase and performance analysis for TMD control systems, *Journal of Vibration and Shock*, 34 (2015) 11, pp. 160-165.
- [22] Ai, Q., Yunteng, L., Guochen, Z.: Research on working mechanism of story isolation structure, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration - Chinese Edition*, 26 (2006) 4.
- [23] Zhou, Q., Singh, M.P., Huang, X.Y.: Model reduction and optimal parameters of mid-story isolation systems, *Engineering Structures*, (2016) 124, pp. 36-48.
- [24] Zhou, Y., Xu, T., Zhou, F.L.: Research and development of structural seismic design based on energy method, *Earthquake Engineering and Engineering*, (1999) 4, pp. 133-139.
- [25] Akiyama, H.: Earthquake resistant design based on the energy concept, *Proceedings of 9th WCEE*, 1988, pp. 905-910.
- [26] Ying, Z., Ping, T., Fulin, Z.: Seismic response prediction for a story-isolation structure based on energy balance method, *Journal of Vibration and Shock*, 28 (2009) 4, pp. 137-142.
- [27] Donaire-Ávila, J., Benavent-Climent, A., Lucchini, A., et al.: Energy-based seismic design methodology: A preliminary approach, *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, January. 2017, 9.
- [28] Zhang, Y.H., Li, B., Yan, G.Q., Zheng, G.Y., Bao, Y.P.: Seismic response prediction and optimization design method for base isolated structure based on energy balance, *Journal of Vibration and Shock*, 40 (2021) 17, pp. 32-40.
- [29] Akiyama, H.: *Earthquake-resistant design method for buildings based on energy balance*, Tokyo: Jibotang Press, 1999. (in Japanese)
- [30] Xingzhu, P., Wei, W., Xingxing, W.: Earthquake response prediction of isolated structures based on energy principle, *Engineering Mechanics*, 28 (2011) 7, pp. 65-072.
- [31] Clough, R.W., Penzien, J.: *Of structures*, McGraw-Hill, 1975.