

DINAMIČKI ODGOVOR OKVIRNIH KONSTRUKCIJA VELIKIH RASPONA NA RAZLIČITU SEIZMIČKU POBUDU OSLONACA

DYNAMIC RESPONSE OF LARGE-SPAN FRAME STRUCTURES TO MULTIPLE SUPPORT SEISMIC EXCITATION

Paolo Fabijan*, Han Qin**, Luyu Li**, Nina Čeh***

Sažetak

Dinamički odgovor dugačkih konstrukcija rezultat je različite pobude međusobno udaljenih oslonaca, što može povećati doprinos nesimetričnih tonova osciliranja. Provedeno je eksperimentalno-numeričko istraživanje - pobuda je u eksperimentima nanošena potresnim stolovima okomito na uzdužnu os modela, a ponašanje je praćeno beskontaktno, dok se numerički model temelji na linearnoj MKE i numeričkoj vremenskoj integraciji.

Ključne riječi: *dinamička analiza, višestruka pobuda oslonaca, metoda konačnih elemenata, eksperimentalni model, nesimetrični oblici osciliranja.*

Abstract

The dynamic response of long structures is the result of varying excitation of distant supports, which can increase the contribution of asymmetrical oscillation modes. Experimental-numerical research was carried out - in the experiments, the excitation was applied by shaking tables perpendicular to the longitudinal axis of the model, and the behavior was monitored optically, while the numerical model is based on linear FEM and numerical time integration.

Key words: *dynamic analysis, multiple support excitation, finite element method, experimental model, asymmetric forms of oscillation.*

* PRO STUDIO d.o.o., Bože Starca Jurićeva 10, 51000 Rijeka, E-mail: paolo.fabijan@pro-studio.hr

** Dalian University of Technology, School of Infrastructure Engineering, 2 Lianggong Rd., Dalian, Liaoning, Kina, E-mail: hiker_qh@qq.com, liluyu@yeah.net

*** Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka, E-mail: nina.ceh@uniri.hr

1. Uvod

Konstrukcije velikog raspona, poput mostova, moraju izdržati snažne vibracije tijekom potresa zbog složene pobude njihovih oslonaca. Velika udaljenost između susjednih oslonaca (stupova/upornjaka) i širenje seizmičkih valova kroz tlo ili stijenu (brzina širenja i njezine karakteristike značajno variraju ovisno o lokalnim geomorfološkim uvjetima) rezultiraju time da nekoliko različitih pobuda istovremeno djeluju na takav sustav. Duž njihove uzdužne osi variraju vrijeme dolaska, amplituda i frekvencijski sadržaj pobude [1], što dovodi do značajnog asimetričnog dinamičkog odgovora rasponskog sklopa, koji se često ne uzima u obzir kod geometrijski simetričnih ili gotovo simetričnih konstrukcija. Mostovi, cjevovodi, brane i druge konstrukcije s udaljenim susjednim osloncima ili temeljene u tlu sa složenim lokalnim karakteristikama posebno su osjetljivi na efekt višestruke pobude oslonaca.

Brojni znanstvenici diljem svijeta numerički i analitički proučavaju efekte višestruke pobude oslonaca na konstrukcije velikih raspona već nekoliko desetljeća [2], [3]. Eurokod 8, dio 2 navodi da se učinak višestruke pobude oslonaca može uzeti u obzir ovisno o udaljenosti između susjednih oslonaca te vrsti temeljnog tla na kojem se nalaze. Što je temeljno tlo veće krutosti i homogenije, poput stijenske mase, to je veća udaljenost na kojoj se utjecaj višestruke pobude pojavljuje [4]. Nekoliko eksperimentalnih studija pokazalo je da su pomaci uzrokovani višestrukom pobudom oslonaca bili čak 36 % veći od onih bez tog efekta [4]. Općenito, zanemarivanje prostorno promjenjivog gibanja tla za kratke i dugačke konstrukcije nije na strani sigurnosti, posebno bez da razmatramo specifične parametre (statički sustav, duljina raspona, uvjeti tla, parametri stupova, omjer krutosti stupova, itd.). Usporedba slučajeva s nanesenom jednolikom i različitom pobudom oslonaca pokazuje vjerojatni raspon pogrešaka koje se mogu javiti u proračunima tijekom projektiranja [5] kao rezultat zanemarivanja prostorno-vremenske prirode kretanja tla. Numerička analiza mosta s parametarskom konfiguracijom u kojoj je prvi oblik osciliranja antimetričan pokazuje da je pogreška između jednolike i nejednolike pobude oslonaca često veća i da treba provesti obje analize kako bismo primijenili konzervativan pristup [6].

Unatoč brojnim ambicioznim pokušajima da se predloži jednostavniji pristup, istraživači su zaključili da za dobivanje sigurnog odgovora konstrukcije treba uzeti u obzir relativne pomake, izračunate korištenjem nelinearne analize u vremenu s višestrukom pobudom oslonaca [7]. Posljednjih godina mnogi predlažu korištenje pojednostavljenog analitičkog pristupa koji mora biti u potpunosti validiran mjerenjima na terenu ili (barem) malim, ali dobro dokumentiranim laboratorijskim eksperimentima. Međutim, vrlo je malen broj eksperimentalnih studija,

vjerojatno zbog činjenice da postoji tek nekoliko ustanova koje mogu izvoditi takve eksperimente koji su ekonomski opravdani i uspješno mjere odgovor konstrukcije. Jednoosni eksperimenti provedeni prije više od deset godina još uvijek se koriste za validaciju modela temeljenih na metodi konačnih elemenata [5]. Podaci s terenskih mjerenja su nedostatni i uglavnom pokrivaju vibracije u svakodnevnoj uporabi, ali ne i snažne ili ekstremne seizmičke događaje. Višestruka pobuda oslonaca i danas predstavlja složen problem [8]–[10] za koji očito nedostaju eksperimentalni podaci kojima treba težiti [11]. Potrebna su daljnja znanstvena istraživanja kako bismo razumjeli odnos između asinkronog gibanja i oblika pobude [12], a proces kalibracije i validacije izmjerenim podacima bitan je za razvoj točnih i pouzdanih modela za simulaciju [13].

U ovome je radu predstavljeno eksperimentalno i numeričko istraživanje provedeno s ciljem boljeg razumijevanja dinamičkog odgovora dugačke okvirne konstrukcije. Najprije su prikazana eksperimentalna ispitivanja na jednostavnom modelu dugačkog okvira pobuđenog stvarno izmjerenim zapisima. Zatim je predstavljen numerički model, koji je validiran usporedbom s eksperimentalno dobivenim rezultatima. Tako validirani numerički model je omogućio analizu utjecaja isključivo efekta kašnjenja potresnih valova među udaljenim osloncima na ukupni odgovor konstrukcije.

2. Eksperimentalna ispitivanja

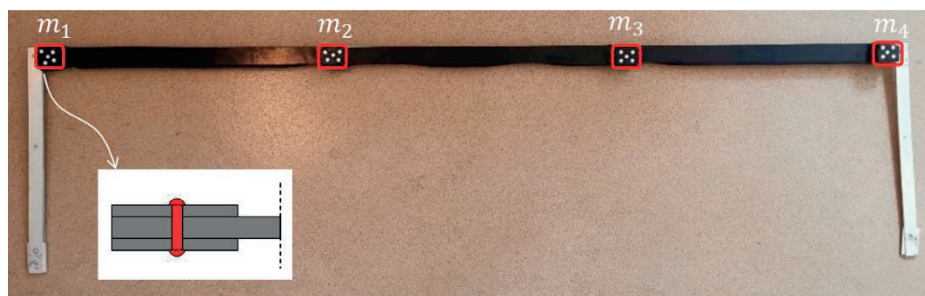
Sva eksperimentalna ispitivanja su provedena u Laboratoriju za Konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Za potrebe ispitivanja korištene su dvije potresne platforme Quanser ST-III (Slika 1 lijevo) s mogućnošću simuliranja ubrzanja frekvencijom do 20 Hz. Zasebni elektromagnetni motori omogućuju nanošenje različite pobude dva potresna stola te je ta mogućnost korištena u gotovo svakom provedenom ispitivanju.



Slika 1. Potresni stol Quanser ST-III (lijevo) i optički mjerni sustav GOM Aramis 4M (desno)

Ponašanje potresnih stolova i ispitanih modela praćeno je opti¢kim mjernim sustavom za mjerenje pomaka i deformacija GOM Aramis 4M (Slika 1 desno). Sustav se sastoji od dvije kamere s mogućnošću slikanja visokim frekvencijama koje su prije korištenja kalibrirane pomoću kalibracijskog križa na radnoj udaljenosti od 3380 mm s mjernim volumenom od 2305 x 1735 x 1735 mm. Korištenjem mjernog sustava koji nije povezan s potresnim platformama umanjena je mogućnost pojave pogrešaka prilikom mjerenja koje bi se mogle pojaviti zbog vibracija stolova.

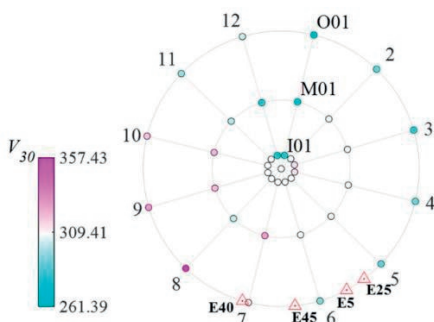
Ekspirimentalna ispitivanja provedena su na aluminijskom modelu grede duljine 201 cm sa stupovima visine 50 cm koji predstavljaju pojednostavljenu okvirnu konstrukciju velikih raspona, poput dugaćkih mostova ili njihovih dijelova oslonjenih na visoke stupove. Greda modela kvadratnog poprećnog presjeka 40x4 mm je oslonjena na vrlo fleksibilne stupove poprećnih presjeka sastavljenih od dva pravokutnika 30x2 mm na razmaku od 4 mm te su na nju na jednakim razmacima od 67 cm pričvršćena 4 utega, svaki težine 4N (Slika 2). Toćke na kojima su praćeni pomaci su: mjesta na kojima su pričvršćeni utezi, spojevi stupa i grede te oslonci stupova. Kamere su pozicionirane pod odrećenim kutom u odnosu na ravninu osciliranja okvira kako bismo mogli pratiti svih šest stupnjeva slobode modela u prostoru.



Slika 2. Model okvira: greda s četiri dodana utega pričvršćena na fleksibilne stupove, te detalj spoja greda-stup prikazan u tlocrtu

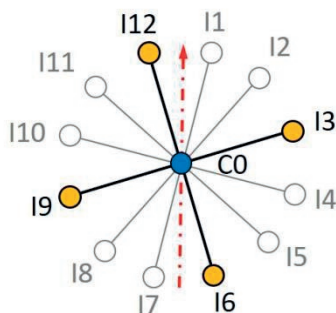
2.1 Dinamićka pobuda

SMART 1 je sustav seizmografskih stanica na otoku Tajvan, namijenjen promatranju i bilježenju snažnih seizmoloških kretanja, koje su posebno izrađene za inženjerske potrebe te seizmološka istraživanja i studije vezane uz nastanak i karakteristike blisko-poljnih potresa [14]. Na Slici 3 vidimo shematski prikaz rasporeda 37 seizmografskih postaja SMART 1 sustava, gdje je jedna središnja, a preostalih 36 postaja su raspoređene unutar tri prstena polumjera 200 m, 1 km i 2 km.



Slika 3. Raspored seizmografskih stanica SMART 1 sustava [14]

Podaci korišteni u eksperimentalnim ispitivanjima preuzeti su iz postaja koje se nalaze u unutarnjem prstenu te su kombinirani na način da je jedan oslonac modela uvijek opterećen zapisom iz središnje postaje, a drugi oslonac jednim od zapisa koji je proizašao iz jedne od postaja koje se nalaze na međusobno okomitim pravcima (Slika 4). Na taj način se simulira kašnjenje i promjena potresnog vala između susjednih oslonaca.



Slika 4. Unutarnji prsten SMART 1 sustava s označenim smjerom širenja potresnih valova [15]

3. Numerički model

Numerički model se temelji na jednadžbi dinamičke ravnoteže sustava [2]:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}_t = \mathbf{p}_{eff}, \quad (1)$$

gdje su \mathbf{M} , \mathbf{C} i \mathbf{K} matrice masa, prigušenja i krutosti sustava, $\ddot{\mathbf{u}}_t$, $\dot{\mathbf{u}}_t$ i \mathbf{u}_t vektori nepoznatih ubrzanja, brzina te pomaka/rotacija u trenutku t , dok je $\mathbf{p}_{eff} = -\mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\iota} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_{g,t}$ vektor efektivnih sila/momenata koji djeluju na sustav uslijed potresne pobude. U prethodnom izrazu $\boldsymbol{\iota}$ predstavlja matricu utjecaja pomaka oslonaca na stupnjeve slobode sustava, a $\ddot{\mathbf{u}}_{g,t}$ ubrzanje

oslonaca u trenutku t . Za rješavanje jednadžbe (1) je korištena Newmarkova skupina jednostupanjskih, implicitnih i uvjetno stabilnih integracijskih metoda, koja se pokazala zadovoljavajućom u dinamičkoj analizi konstrukcija koje su izložene potresnim ili udarnim pobudama. Metoda se temelji na zadovoljavanju jednadžba dinamičke ravnoteže u trenutku t nakon što je rješenje u trenutku $t-\Delta t$ poznato. Korištenjem Taylorovog reda. Uz pretpostavku da je ubrzanje svake točke linearno, unutar vremenskog koraka Δt dobivamo Newmarkove jednadžbe za ubrzanje i brzinu svake točke sustava kao:

$$\ddot{u}_t = b_1(u_t - u_{t-\Delta t}) + b_2\dot{u}_{t-\Delta t} + b_3\ddot{u}_{t-\Delta t}, \quad (2)$$

$$\dot{u}_t = b_4(u_t - u_{t-\Delta t}) + b_5\dot{u}_{t-\Delta t} + b_6\ddot{u}_{t-\Delta t}, \quad (3)$$

gdje su b_1 do b_6 konstante [2]. Supstitucijom jednadžbi (2) i (3) u jednadžbu (1) dobivamo izraz za dinamičku ravnotežu sustava u trenutku t koji ovisi samo o nepoznatim stupnjevima slobode sustava \mathbf{u}_t :

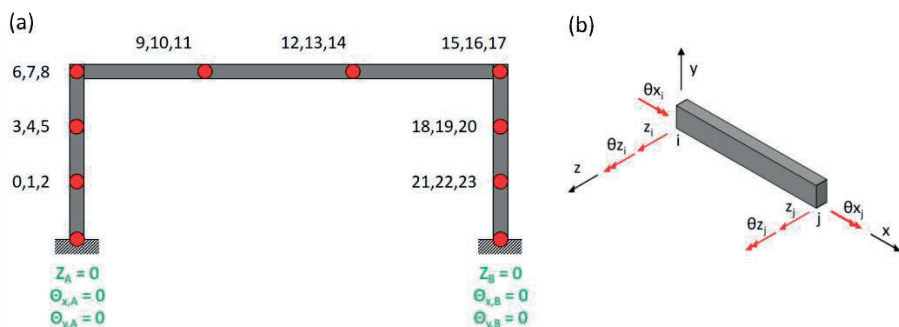
$$(b_1\mathbf{M} + b_4\mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{u}_t = \mathbf{p}_t + \mathbf{M}(b_1\mathbf{u}_{t-\Delta t} - b_2\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} - b_3\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}) + \mathbf{C}(b_4\mathbf{u}_{t-\Delta t} - b_5\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} - b_6\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}). \quad (4)$$

Iz jednadžbe (4) određujemo nepoznate pomake i kutove zaokreta čvornih točaka sustava na kraju svakog vremenskog koraka (koristeći se poznatim vrijednostima pomaka, brzine i ubrzanja s početka istog vremenskog koraka). Brzine i ubrzanja za isti trenutak se određuju na temelju izraza (2) i (3). U ovome su radu korišteni Newmarkovi parametri $\beta = 1/4$, $\gamma = 1/2$.

3.1 Diskretizacija modela

Rješenje jednadžbe dinamičke ravnoteže promatranog sustava je dobiveno tako što je sustav podijeljen, tj. diskretiziran na više manjih dijelova ili konačnih elemenata te su postavljene jednadžbe ravnoteže za svaki element. Iz takvog je sustava jednadžbi formirana globalna jednadžba dinamičke ravnoteže sustava.

Ponašanje sustava opisano je pomoću roštiljnih konačnih elemenata, gdje svaki konačni element sustava može imati najviše 6 stupnjeva slobode (jedan pomak i dvije rotacije, Slika 5.b). U ovom slučaju su to pomaci okomito na os elementa, te dvije rotacije koje predstavljaju savijanje i torziju elementa. Takav okvir ima 24 stupnja slobode (Slika 5.a).



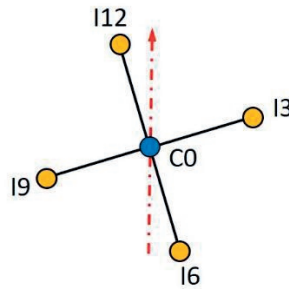
Slika 5. Numerički model: (a) stupnjevi slobode okvira nakon uvedenih rubnih uvjeta i (b) prikaz konačnog elementa za diskretizaciju grede modela [15]

4. Analiza rezultata

U ovom poglavlju prikazani su rezultati na temelju kojih je numerički model validiran. Nakon toga su, pomoću validiranog numeričkog modela, provedene dodatne simulacije kako bismo analizirali utjecaj višestruke pobuda oslonaca dugačke okvirne konstrukcije, posebice kada je kašnjenje potresne pobude vladajući mehanizam koji izaziva promjenu funkcije pobude.

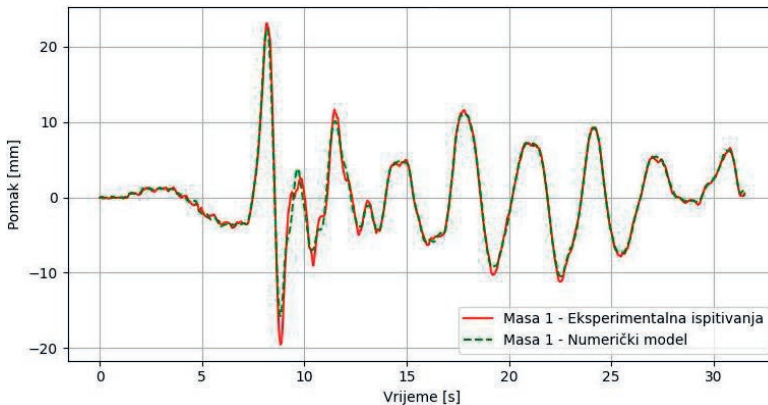
Za potrebe validacije modela u nastavku su prikazana dva od ukupno pet provedenih ispitivanja. Prvo ispitivanje, pod nazivom SE_C0C0, je ispitivanje kod kojeg se radi o jednakoj pobudi oslonaca tj. oba oslonca modela su izložena pobudi na temelju podataka iz središnje postaje SMART 1 sustava.

Kod drugog ispitivanja (SE_C0I3), model je izložen višestrukoj pobudi oslonaca kod koje je jedan oslonac izložen podacima izmjenjenim iz središnje postaje C0, a drugi oslonac je izložen pobudi na temelju podataka iz postaje I3. Oslonci opterećeni na takav način imitiraju stvarni nailazak potresnog vala na konstrukciju koja je orijentirana na liniji C0-I3, prikazanoj na Slici 6.



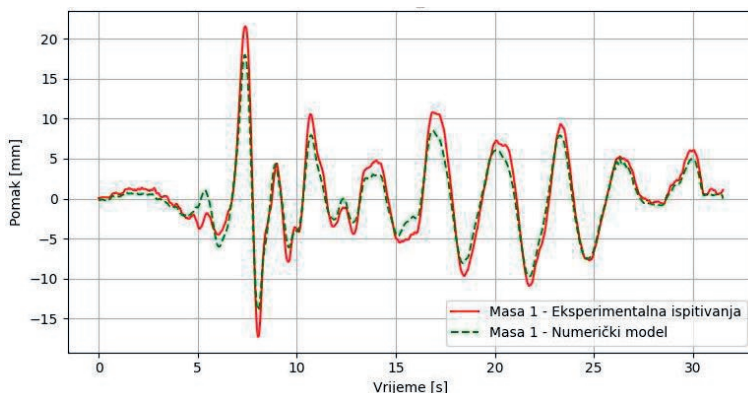
Slika 6. Unutarnji prsten SMART 1 sustava - izdvojene stanice

Na slikama 7 i 8 je vidljivo da se rezultati dobiveni numeričkim modelom većim dijelom vrlo dobro poklapaju s eksperimentalno dobivenim rezultatima. Kod jednolike pobude se pojavljuju manja odstupanja između eksperimentalnih i numeričkih rezultata nego kod različite višestruke pobude oslonaca.



Slika 7. Usporedba pomaka mase 1 (ispitivanje SE_COC0)[15]

Iz Slika 7 i 8 je vidljivo da su frekvencije modela vrlo dobro zahvaćene simulacijom. Razlog pojave odstupanja u amplitudama je možemo pronaći u nedovoljno precizno određenom koeficijentu prigušenja (koji je u ovom slučaju eksperimentalno određen i iznosi $\xi = 0.02901$) i karakteristikama materijala od kojega je okvir izrađen te spoju stupova i grede modela.

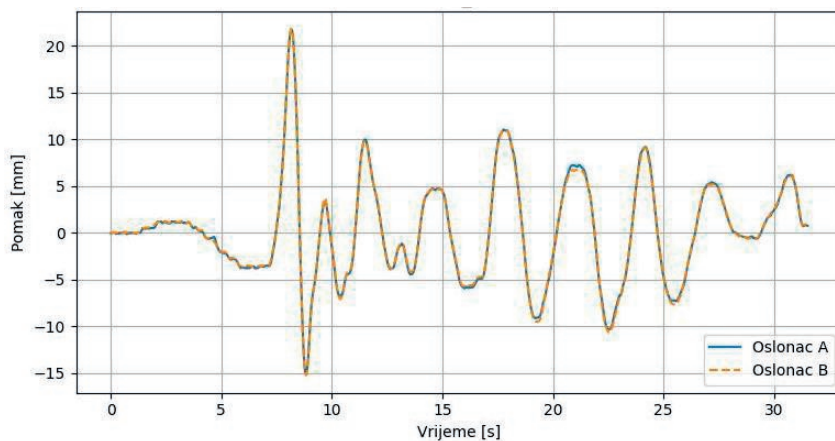


Slika 8. Usporedba pomaka mase 1 (ispitivanje SE_CO13) [15]

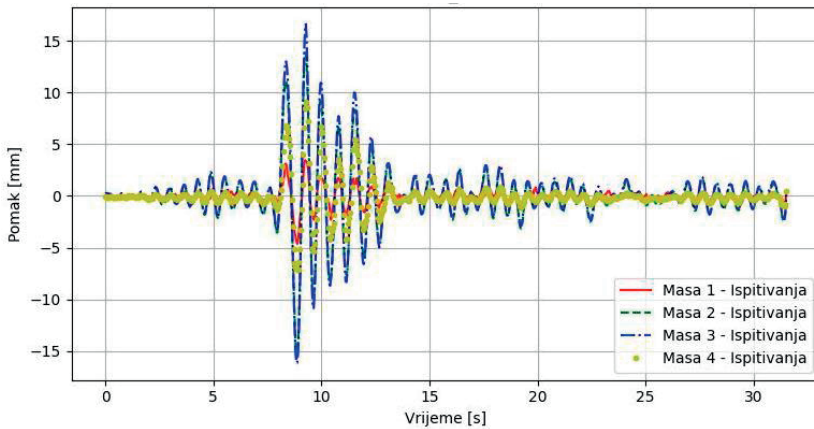
Na temelju prikazanih rezultata u ovom poglavlju validiran je izrađeni numerički model.

4.1 Utjecaj višestruke pobude oslonaca na pomake

U nastavku su prikazani rezultati i analiza eksperimentalnih ispitivanja kako bismo bolje razumjeli na koji način višestruka pobuda oslonaca utječe na ukupne pomake konstrukcije. U sklopu ispitivanja je korištena približno jednolika pobuda oslonaca (ispitivanje SE_COC0) te različita pobuda oslonaca (ispitivanje SE_CO13).



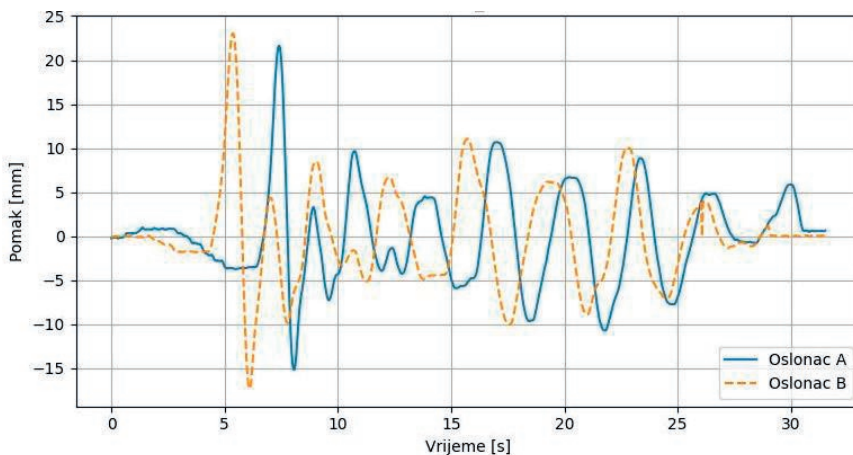
Slika 9. Dijagram pomaka oba oslonca (ispitivanje SE_COC0) [15]



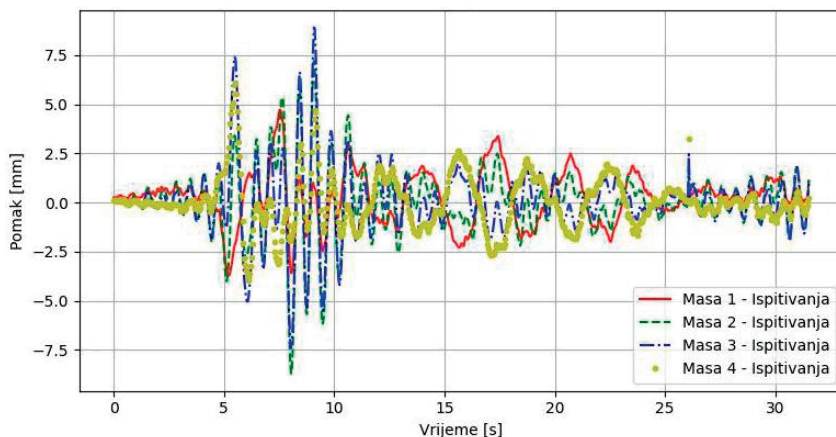
Slika 10. Dijagram relativnih pomaka svih masa (ispitivanje SE_COC0)

Kod ispitivanja s jednolikom pobudom oslonaca (Slika 9), vidljivo je da 1. (simetrični) oblik osciliranja čini najveći dio ukupnog dinamičkog odgovora okvira. Utjecaj prvog oblika osciliranja pri kojem su pomaci svih masa istog predznaka, dok su pomaci masa 2 i 3 približno jednakih veličina i znatno veći od pomaka masa 1 i 4, se na Slici 9 najjasnije vidi oko 9. sekunde, gdje su i relativni pomaci masa okvira najveći. Relativni pomaci masa su dobiveni pomoću ranije opisane utjecajne matrice, koja omogućava jednostavnu eliminaciju statičkih pomaka (koje bi stupnjevi slobode doživjeli u slučaju sporo nanesenih pomaka oslonaca $u_{g,t}$) iz ukupno izmjerenih pomaka stupnjeva slobode.

Osim što je pobuda različita, u ispitivanju SE_C013 javlja se i kašnjenje pobude između oslonaca, te ono u ovom slučaju iznosi cca 2 s (Slika 11).



Slika 11. Dijagram pomaka oba oslonca (ispitivanje SE_C013) [15]



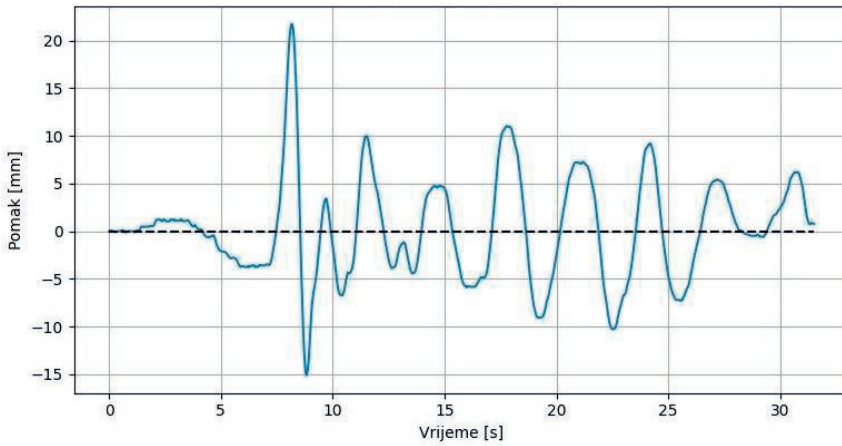
Slika 12. Dijagram relativnih pomaka svih masa (ispitivanje SE_C013)

Usporedimo li dijagrame pomaka masa kod jednolike pobude oslonaca (Slika 10) s dijagramom pomaka kod različite pobude s vremenskim zakašnjenjem između oslonaca (Slika 12), jasno se vidi kako zakašnjenje pobude rezultira većom prisutnošću asimetričnih oblika osciliranja unutar ukupnog dinamičkog odgovora. Utjecaj 1. oblika osciliranja se i ovdje najbolje vidi oko 9. sekunde, dok oko 17. sekunde možemo jasno uočiti utjecaj asimetričnih oblika osciliranja pri kojima su pomaci masa 1 i 4 (ili pomaci masa 2 i 3) suprotnih predznaka. U ovom slučaju se radi o 2. i 4. obliku osciliranja okvirnog modela.

4.2 Utjecaj kašnjenja pobude na pomake

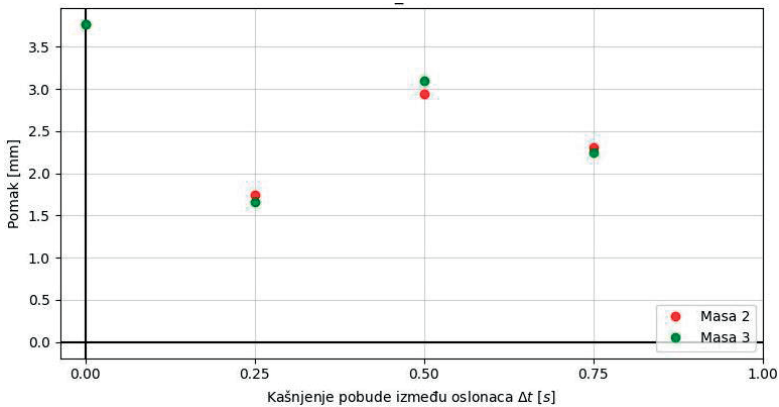
U prošlom poglavlju je prikazano na koji način višestruka pobuda oslonaca, koja uključuje zakašnjenje potresnog vala, ali nije ograničena samo na taj efekt, utječe na dinamički odgovor konstrukcije. U nastavku je prikazano kako isključivo kašnjenje pobude između oslonaca (bez ikakve promjene same funkcije pobude) utječe na ponašanje promatranog okvira.

U sklopu provođenja ove analize prikazani su rezultati za dvije nanese pobude: SE_C0C0 iz sustava SMART 1 (Slika 13) te potresni zapis Northridge 360 (Slika 15). Poslužili smo se prethodno validiranim numeričkim modelom, a kao pobuda oslonaca nanošeni su spomenuti potresni zapisi sa zakašnjenjem pobude između oslonaca u iznosima od: 0, 0,25, 0,5 te 0,75 s.

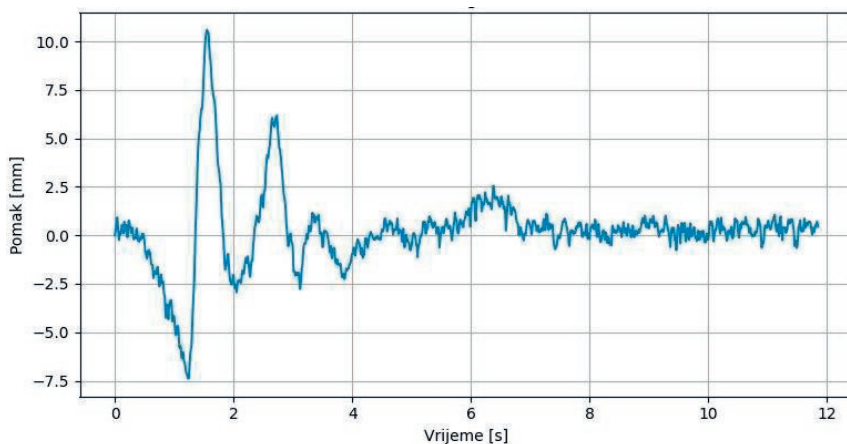


Slika 13. Potresni zapis SE_COCO [15]

Na Slici 14 su prikazani najveći pomaci srednjih dviju masa na modelu (masa 2 i 3) prilikom simulacije okvira opterećenog potresnim zapisom SE_COCO (prikazanog na Slici 13) bez i s različitim zakašnjenjima između oslonaca. Vidimo da se najveći relativni pomaci masa javljaju prilikom jednolike pobude oba oslonaca, dok su najveći relativni pomaci mase 3 u odnosu na masu 2 prisutni prilikom kašnjenja pobude od 0,5 sekundi. Budući da značajni relativni pomaci između susjednih masa ukazuju na značajne unutarnje elastične sile, ovaj je efekt važno uočiti.

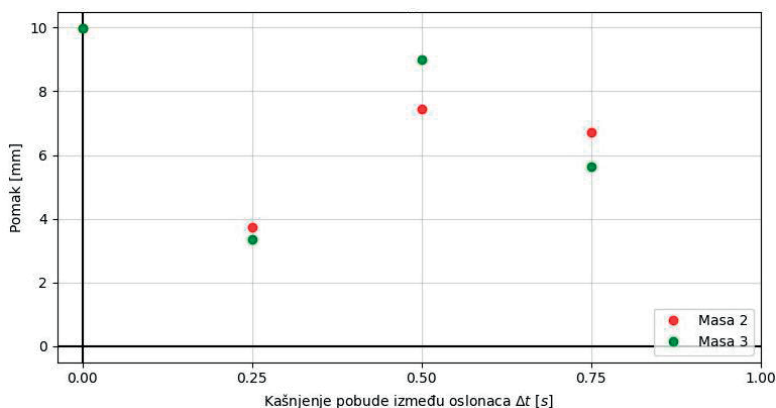


Slika 14. Usporedba maksimalnih relativnih pomaka mase 2 i 3 (SE_COCO)



Slika 15. Potresni zapis Northridge 360 [15]

Na Slici 16 su ponovno prikazani najveći pomaci srednjih dviju masa na okvirnom modelu, sada opterećenom potresnim zapisom Northridge 360 bez i s različitim zakašnjenjima između oslonaca. Ovdje možemo uočiti znatno veće relativne pomake masa modela pri svim iznosima kašnjenja pobude. Vidljivi su i znatno veći relativni pomaci mase 3 u odnosu na masu 2, pogotovo istaknuti prilikom kašnjenja od 0,5 i 0,75 sekundi.



Slika 16. Usporedba maksimalnih relativnih pomaka mase 2 i 3 (Northridge 360)

Promotrimo li rezultate numeričke analize za zapis SE_C0C0 (Slika 14) te Northridge 360 (Slika 16), vidimo da se pojavljuje vrlo slično ponašanje konstrukcije. Za kašnjenje pobude između oslonaca u iznosu od 0,25 sekundi pojavljuje se značajan pad u maksimalnim relativnim pomacima mase 2 i 3, u iznosu od preko 50 % pomaka prilikom opterećenja oslonaca jednolikom pobudom. Jasno je i da se maksimalni pomaci općenito uvijek

pojavljaju za slučaj jednolike pobude oslonaca, što znači da je 1. oblik osciliranja najdominantniji. Provedena analiza ukazuje na činjenicu da kašnjenje pobude oslonaca može imati i pozitivan utjecaj na ponašanje konstrukcije u smislu smanjenja ukupnih pomaka. Međutim, kašnjenje pobude od 0,5 sekundi rezultira značajnijim relativnim pomacima mase 3 u odnosu na masu 2 u slučaju oba potresna zapisa, što dovodi do unutarnjih sila te naprezanja i deformacija u sustavu koje je potrebno dodatni analizirati. Spomenute unutarnje sile se ne pojavljuju prilikom jednolike pobude oslonaca dugačke okvirne konstrukcije i nije ih moguće uočiti bez provođenja analize dinamičkog odgovora dugačkih konstrukcija na višestruku pobudu oslonaca.

5. Zaključak

Prikazano je eksperimentalno i numeričko istraživanje dinamičkog odgovora jednostavnog modela dugačke okvirne konstrukcije na različitu potresnu pobudu međusobno udaljenih oslonaca konstrukcije. Takva višestruka pobuda oslonaca kod dugačkih konstrukcija može povećati doprinos asimetričnih tonova osciliranja cjelokupnom dinamičkom odgovoru te rezultirati dodatnim unutarnjim silama i naprezanjima.

Provedena je serija eksperimentalnih ispitivanja modela dugačke okvirne konstrukcije u kojima je pobuda u obliku stvarno izmjerenih potresnih zapisa nanošena okomito na uzdužnu os konstrukcije. Pobuda i dinamički odgovor konstrukcije mjereni su beskontaktnim metodama. Paralelno s time je razvijen numerički model za simulaciju istog ponašanja koji se temelji na metodi konačnih elemenata i direktnoj vremenskoj integraciji jednadžbi kretanja. Numerički model je validiran na temelju usporedbe s eksperimentalnim rezultatima te dalje korišten za analizu utjecaja višestruke pobude oslonaca na ukupni dinamički odgovor konstrukcije.

Tako validirani numerički model je omogućio analizu utjecaja isključivo efekta kašnjenja potresnih valova među udaljenim osloncima na ukupni odgovor konstrukcije. Na analiziranom primjeru se pokazalo da kašnjenje pobude može smanjiti pomake točaka konstrukcije u usporedbi s pobudom koja istovremeno nailazi na susjedne oslonce. Međutim, pokazalo se da su prilikom kašnjenja pobude često veći relativni pomaci između pojedinim dijelova konstrukcije, što dovodi do većih unutarnjih sila i naprezanja u samoj konstrukciji.

Zahvala.

Prikazano istraživanje je dio diplomskog rada „Utjecaj višestruke potresne pobude oslonaca na ponašanje okvirnih konstrukcija velikih raspona“ Paola Fabijana izrađenom pod mentorstvom izv. prof. Nine Čeh. Eksperimentalna ispitivanja su provedena u sklopu bilateralnog hrvatsko-kineskog projekta „Experimental Study of Bridge Structures Considering the Asymmetric Effect under Multiple Support Excitation“, a eksperimentalni model je sufinanciran sredstvima fonda Sizif (šifra projekta N-SZF 2/2021) od strane Studentskog zbora Sveučilišta u Rijeci i Zaklade Sveučilišta u Rijeci.

Literatura

- [1] A. G. Sextos, K. D. Pitilakis, and A. J. Kappos, Inelastic Dynamic Analysis of RC Bridges Accounting for Spatial Variability of Ground Motion, Site Effects and Soil-Structure Interaction Phenomena. Part 1: Methodology and Analytical Tools, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 32, no. 4, pp. 607–627, Apr. 2003, doi: 10.1002/eqe.241.
- [2] Chopra K. Anil, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Fifth Edit. Pearson Education Limited, 2020.
- [3] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*. 2007.
- [4] A. J. Crewe and J. A. P. Norman, Experimental Modelling of Multiple Support Excitations of Long Span Bridges, in *4th International Conference on Earthquake Engineering*, 2016, pp. 127–136.
- [5] A. A. Meibodi, N. A. Alexander, J. A. Norman, and A. J. Crewe, A Theoretical and Experimental Exploration of the Seismic Dynamics of Multi-Span Bridges, *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 18, no. 9, pp. 4275–4298, Jul. 2020, doi: 10.1007/s10518-020-00864-6.
- [6] A. A. Meibodi and N. A. Alexander, Spatiotemporal Seismic Excitation of Bridges with an Anti-Symmetrical First Mode, *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 1957–1977, Mar. 2021, doi: 10.1007/s10518-020-01025-5.
- [7] G. Zanardo, H. Hao, and C. Modena, Seismic Response of Multi-Span Simply Supported Bridges to a Spatially Varying Earthquake Ground Motion,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 31, no. 6, pp. 1325–1345, Jun. 2002, doi: 10.1002/eqe.166.
- [8] H. Qin and L. Li, Error Caused by Damping Formulating in Multiple Support Excitation Problems, doi: 10.3390/app10228180.

- [9] H. Qin, L. Li, and B. F. Spencer, Efficient Estimation of Seismic Response of Large-Span Structures Considering the Effect of Multiple-Support Excitation, *J. Eng. Mech.*, vol. 145, no. 12, p. 04019096, Dec. 2019, doi: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001667.
- [10] H. Qin, N. Čeh, and L. Li, Efficient Response Estimation Approach for As-Built Bridges Based on Multisupport Response Spectrum Method, *J. Eng. Mech.*, vol. 149, no. 10, p. 04023080, Oct. 2023, doi: 10.1061/jenmdt.emeng-7175.
- [11] R. Wang, W. Xie, and M. D. Pandey, Generation of Floor and Tertiary Response Spectra of Structures under Seismic Excitations at Multiple Supports, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 51, no. 4, pp. 853–874, Apr. 2022, doi: 10.1002/eqe.3594.
- [12] S. P. Papadopoulos and A. G. Sextos, Anti-Symmetric Mode Excitation and Seismic Response of Base-Isolated Bridges under Asynchronous Input Motion, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 113, pp. 148–161, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.soildyn.2018.06.004.
- [13] J. S. Theyssen *et al.*, Calibration and Validation of the Dynamic Response of Two Slab Track Models Using Data from a Full-Scale Test Rig, *Eng. Struct.*, vol. 234, May 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.111980.
- [14] H. Qin and L. Li, A Modified Gaussian Model for Spectral Amplitude Variability of the SMART 1 Array Records, *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 23, p. 12067, Nov. 2022, doi: 10.3390/app122312067.
- [15] P. Fabijan, Utjecaj višestruke potresne pobude oslonaca na ponašanje okvirnih konstrukcija velikih raspona, Sveučilište u Rijeci. Građevinski fakultet. Zavod za nosive konstrukcije i tehničku mehaniku. Katedra za tehničku mehaniku, Rijeka, 2023.