

# Dinamički odgovor jednokatnog modela s krutom i zglobnom vezom između zida i ploče na pobudu podloge

---

**Rudan, Leonardo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:079274>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#) / [Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-04**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Leonardo Rudan**

**Dinamički odgovor jednokatnog modela s krutom i zglobnom vezom  
između zida i ploče na pobudu podloge**

**Završni rad**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski sveučilišni studij**

**Mehanika 2**

**Leonardo Rudan  
JMBAG: 0114035946**

**Dinamicki odgovor jednokatnog modela s krutom i zglobnom vezom  
između zida i ploče na pobudu podloge**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2023.**

## **IZJAVA**

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Leonardo Rudan

U Rijeci, 15.09.2023.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorici dr. sc. Nini Čeh na iskazanoj dobroj volji, uloženom trudu, i nesebičnoj pomoći kroz izradu seminarskog rada.

## SAŽETAK

Ovaj završni rad obrađuje razliku dinamičkih odgovora dvaju okvira, jednog sa 4 kruta spoja, a drugog sa 3 kruta i jednim zglobnim spojem. U uvodu je objašnjeno kako promatramo potres u mehaničkom smislu riječi, te su definirana fizikalna svojstva dvaju okvira koje analiziramo. Izvedena je jednadžba kretanja pomoću koje je izračunat koeficijent prigušenja svakog okvira. Radi potvrde proračuna, proveden je eksperiment slobodnih oscilacija na svakom okviru, gdje su pomaci mjereni optičkim mjernim sustavom. Zaključno su okviri podvrgnuti djelovanju četiri različita potresna zapisa pomoću potresnog stola, te su analizirani njihovi relativni pomaci.

**Ključne riječi:** Dinamička analiza, jednokatni okvir, zglojni spoj, kruti spoj, oscilacije, prigušenje

## **ABSTRACT**

In this undergraduate the difference in dynamic response between two frames is examined - one with four rigid joints and the other with three rigid joints and one hinged joint. The mechanical explanation of seismic activity and a definition of the physical characteristics of the two frames under examination are given in the introduction. The equation of motion was derived and damping coefficient calculated for each frame. A free vibration experiment is conducted on each frame to verify the calculations, where the displacements were measured by an optical measurement system. Finally, the frames' relative displacements when subjected to the influence of four different seismic records using a seismic table are examined.

**Key words:** dynamic analysis, single-story frame, hinged joint, rigid joint, oscillations, damping

## *Sadržaj:*

1. Uvod.....	3
2. Dinamika seizmičkih događaja.....	4
3. Fizikalna svojstva okvira .....	7
3.1. Model sa dva kruta spoja .....	7
3.2. Model sa jednim krutim spojem i jednim zglobnim spojem.....	7
4. Definiranje jednadžbe kretanja.....	9
5. Laboratorijska ispitivanja.....	19
5.2. Okvir sa krutim spojevima krovne konstrukcije sa zidovima .....	24
5.3. Okvir sa zglobnim spojevima krovne konstrukcije sa zidovima .....	24
6. Rezultati laboratorijskih ispitivanja .....	25
6.1. Okvir sa krutim spojevima krovne konstrukcije sa zidovima .....	25
6.1.1. Slobodne oscilacije - Izračun frekvencije $f$ , i kružne frekvencije $\omega$ .....	25
6.1.2. Izračun koeficijenta prigušenja .....	26
6.2. Okvir sa zglobnim spojevima krovne konstrukcije sa zidovima .....	28
6.2.1. Slobodne oscilacije - Izračun frekvencije $f$ , i kružne frekvencije $\omega$ .....	28
6.2.2. Izračun koeficijenta prigušenja .....	29
6.3. Dobivene vrijednosti proračuna.....	30
7. Komparacija rezultata laboratorijskih ispitivanja .....	31
7.1. Potres Northridge.....	31
7.2. Potres Kobe .....	34
7.3. Potres El Centro.....	37
7.4. Potres Cape Mendocino .....	43
8. Zaključak.....	46
9. Literatura .....	47



*Popis slika:*

Slika 1: zgrada uništena djelovanjem potresa [3] .....	4
Slika 2, Prikaz svih vrsta seizmičkih valova na grafu Brzina-vrijeme [5].....	5
Slika 3: Vertikalni seizmograf [5].....	6
Slika 4: Okvir sa dva kruta spoja korišten za ispitivanja .....	7
Slika 5: Teorijski 2D model okvira sa dva kruta spoja.....	7
Slika 6: Teorijski 2D model okvira sa jednim zglobnim i jednim krutim spojem.....	8
Slika 7: Okvir sa jednim zglobnim i jednim krutim spojem korišten za ispitivanja .....	8
Slika 8: Idealizacija modela .....	9
Slika 9: Prikaz pomaka na okviru .....	10
Slika 10 Na slici su prikazane sile koje djeluju na okvir .....	14
Slika 11: Quanser STI-III.....	21
Slika 12: GOM mbH PONTOS 3D 4M.....	23
Slika 13: Graf slobodnih oscilacija krutog okvira .....	25
Slika 14: Slobodne oscilacije krutog okvira sa naznačenim amplitudama u nekom vremenu .....	27
Slika 15: Slobodne oscilacije zglobnog okvira.....	28
Slika 16: Slobodne oscilacije zglobnog okvira sa naznačenim amplitudama u vremenu.....	30
Slika 17: Potresni zapis Northridge .....	31
Slika 18: Isječak potresnog zapisa Northridge od 1.-6. sekunde .....	32
Slika 19 Relativni pomak okvira za potresni zapis Northridge .....	33
Slika 20: Potresni zapis Kobe .....	34
Slika 21: Potresni zapis Kobe u rasponu od 9.-16. sekunde .....	35
Slika 22: Relativni pomak okvira za potresni zapis Kobe .....	36
Slika 23: Potresni zapis El Centro .....	37
Slika 24: Potresni zapis El Centro sagledan u vremenskom periodu između 4. i 8. sekunde.....	38
Slika 25: Relativni pomaci kod potresnog zapisa El Centro između sekunda 4 i 8.....	39
Slika 26: Isječak potresnog zapisa El Centro od 8.-13. sekunde .....	40
Slika 27: Relativni pomak okvira kod potresnog zapisa El Centro između seunda 8 i 13 .....	41
Slika 28: Relativni pomak kod potresa El Centro.....	42
Slika 29: Potresni zapis Cape Mendocino .....	43
Slika 30: Isječak potresnog zapisa Cape mendocino između 3. i 9. sekunde .....	44
Slika 31: Relativni pomak okvira kod potresnog zapisa Cape Mendocino .....	45

## 1. *Uvod*

Prirodne katastrofe kao što su potresi predstavljaju značajnu opasnost za infrastrukturu, posebice zgrade koje su u izgradnji. Utjecaj potresa na sigurnost i stabilnost zgrada privukao je značajnu pozornost u istraživanju, budući da je ključno zaštititi i pojedince i imovinu od mogućih štetnih ishoda. Cilj ovog rada je usredotočiti se na specifičnu vrstu spojeva između krova i zidova, kako bi se odredilo koja varijanta nudi bolji odgovor na seizmička opterećenja kod jednostavnih jednoetažnih sustava [3].

Integracija različitih komponenti zgrade uvelike se oslanja na spojeve koji povezuju krov i zidove. Ovi spojevi su bitni za uspostavljanje čvrste i izdržljive strukture. U slučaju potresa, sile nastale ovom prirodnim pojavom stvaraju dinamičke pomake i naprezanja na zgradama. Stoga se ne smije podcijeniti značaj dobro odabranih spojeva koji su sposobni apsorbirati i prigušiti te sile [3].

Fokus ove studije bit će ispitati i usporediti dvije različite kategorije veza koje postoje između krovova i zidova: konvencionalne krute spojeve i zglobne spojeve. Klasični kruti spojevi obično se koriste u tradicionalnim građevinskim praksama, prvenstveno zbog svoje jednostavne prirode i dosljedne izvedbe. S druge strane, zglobni spojevi omogućuju povećanu rotaciju i ponašaju se drukčije prilikom utjecaja seizmičkih sila [3].

Naš cilj je doći do zaključka o prednostima i nedostacima različitih vrsta spojeva u odnosu na dinamički odgovor modela opterećenih seizmičkom pobudom kroz analize i eksperimente. Kako bismo to postigli, ispitat ćemo različite scenarije potresa i pomno promatrati performanse pojednostavljenih modela jednokatnih objekata opremljenih različitim vrstama spojeva, omogućavajući sveobuhvatnu usporedbu [3].

Naše istraživanje ima cilj bolje razumjeti dinamičku analizu, kako bismo kasnije mogli donositi informirane odluke o projektiranju zgrade i izmjenama postojećih struktura [3].

## *2. Dinamika seizmičkih događaja*

Potres je prirodna pojava koja nastaje kao rezultat tektonskih aktivnosti unutar Zemljine kore. Kada se stijene u tlu, koje čine površinski sloj Zemlje, naglo pomaknu ili puknu, stvara se val vibracija koji se širi kroz tlo i uzrokuje podrhtavanje na površini [2].

Ova podrhtavanja mogu varirati u intenzitetu, od blagih vibracija koje nisu primjetne do snažnih potresa koji mogu izazvati velike razaranja. Intenzitet potresa mjeri se na različitim skalama, poput Richterove ili Moment-magnitude ljestvice, kako bi se opisalo koliko je snažan potres bio [3].

Potresi mogu imati kratkotrajne ili trajne učinke, ovisno o njihovoj jačini i udaljenosti od epicentra (mjesto u tlu gdje je potres nastao). Najveću štetu obično uzrokuju snažni potresi s epicentrom u blizini gusto naseljenih područja [3].

Ove prirodne katastrofe mogu uzrokovati rušenje zgrada, mostova i drugih građevina, te izazvati klizišta i urušavanje tla. Ponekad potresi izazivaju i tsunamije - snažne morske valove koji se šire iz epicentra i mogu prouzročiti ogromnu štetu na obali [3].

Ljudi kroz povijest nastoje razumjeti prirodu potresa i pronaći načine kako se bolje pripremiti i zaštititi od njihovih posljedica. Inženjeri i znanstvenici razvijaju građevinske standarde i mjere zaštite kako bi se osigurala veća otpornost građevina na potrese.

Potres je, u građevinskom smislu, vibriranje podloge ispod građevina. U prijevodu tlo titra i trese građevinu koja u sebi mora imati dovoljno jake veze i zglobove da izdrži naprezanja potresa. U nastavku ćemo analizirati ponašanje pojednostavljene građevine u ovisnosti o vrsti zglobova između ploča i zidova [2].



*Slika 1: zgrada uništena djelovanjem potresa [3]*

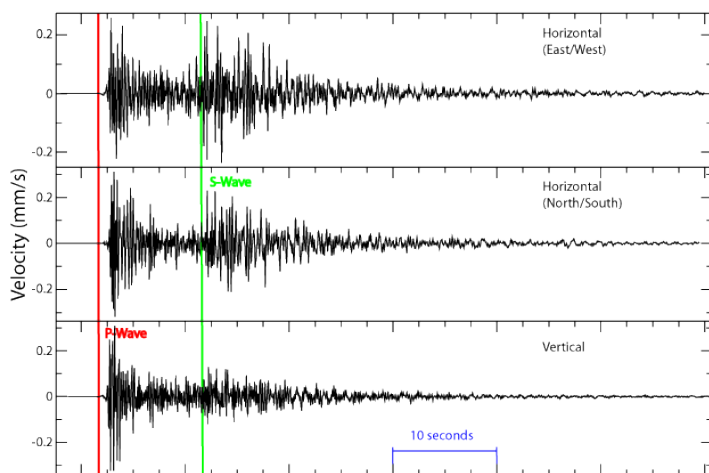
Osnovni čimbenik kod analize djelovanja potresa je seizmički val. To je mehanički val koji se istovremeno iz svojeg žarišta širi na sve strane. Seizmički val ima svoju brzinu koja ovisi o konstanti elastičnosti i gustoći materijala kroz koji se šire. Isti se dijeli na longitudinalne i transverzalne. Kod longitudinalnih je širenje moguće kroz tijela svih agregatnih stanja za razliku od transverzalnih gdje je širenje moguće samo kroz kruta tijela [5].

Uređaj koji se koristi za mjerenje magnitude potresa se naziva seizmograf. On registrira pomak, brzinu i akceleraciju tla. To nam je bitno jer građevine imaju svoju kritičnu frekvenciju titranja pri kojoj dolazi do kritičnih pomaka i naprezanja u građevini [5].

Seizmogram je izravni produkt seizmografa. To je graf koji na apcisi prikazuje vrijeme u sekundama te na ordinati brzinu u milimetrima po sekundi. Na njemu se prikazuje sinusoidalna linija koja predstavlja neki pomak tla u vremenu. Pomak koji se registrira može biti u horizontalnom smjeru istok-zapad te sjever-jug, odnosno u vertikalnom smjeru što je vidljivo iz primjera seizmograma ispod [5].

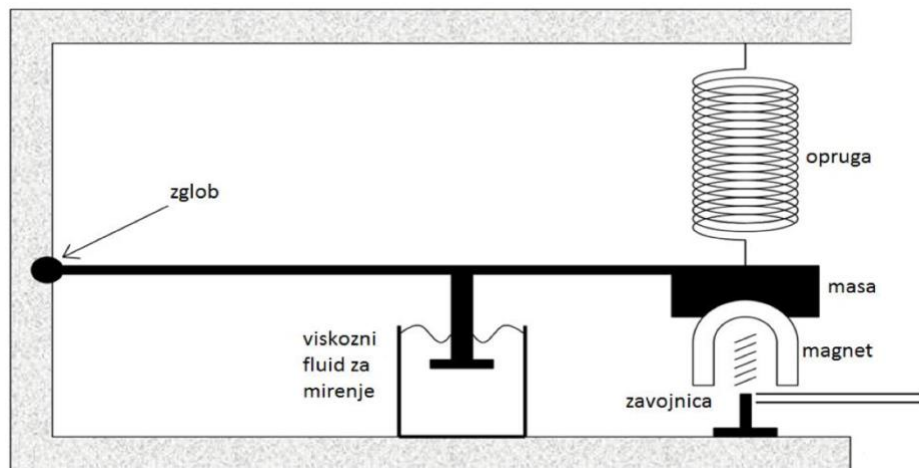
Postoje 3 vrste valova koje seizmograf registrira [5]:

1. P-valovi; ujedno i najbrži valovi (crvena linija)
2. S-valovi; 1,7 puta sporiji valovi (zelena linija)
3. L-valovi; najsporiji valovi bez značajnijeg utjecaja



Slika 2, Prikaz svih vrsta seizmičkih valova na grafu Brzina-vrijeme [5]

Kada govorimo o komponentama mehaničkog seizmografa onda govorimo o njihovom uređaju za registraciju, sustavu za dodatno mirenje i sata. U trenutku nailaska potresnog vala na seizmograf njihalo se počinje gibati. Uređaj za registraciju ima funkciju bilježenja pomaka njihala, dok uređaj za mirenje omogućuje detaljniji zapis gibanja tla bez slobodnih oscilacija njihala [5].



Slika 3: Vertikalni seizmograf [5]

Prikaz vertikalnog seizmografa s oprugom za lakšu vizualizaciju koncepta rada uređaja. Dopusćen je samo vertikalni pomak jer mu je spriječeno gibanje u horizontalnom smjeru. Zavojnica smještena unutar magneta prenosi impulse na spravu za registriranje [5].

Ono što nas u nastavku zanima jest ponašanje jednokatnih okvira tijekom izloženosti seizmičkoj pobudi na potresnom stolu. Kada govorimo o seizmičkoj pobudi onda, u ovom slučaju, govorimo o potresnim zapisima *Northridge*, *Kobe*, *El Centro* i *Cape Mendocino* koji nam služe kao ogledni primjer stvarnih potresnih zapisa koji se često koriste u praksi za analizu utjecaja potresa na građevinu. Na potresnom stolu se ispitivaju 2 okvira opisana u idućem odlomku [5].

### 3. Fizikalna svojstva okvira

Promatrani okvir na kojem se vrše ispitivanja je idealizirani jednokatni model sa jednim stupnjem slobode koji se sastoji od dvije metalne ploče duljine 502 mm debljine 1,68 mm modula elastičnosti 21 000 kN/cm<sup>2</sup> i dvije krute ploče duljine 306 mm.

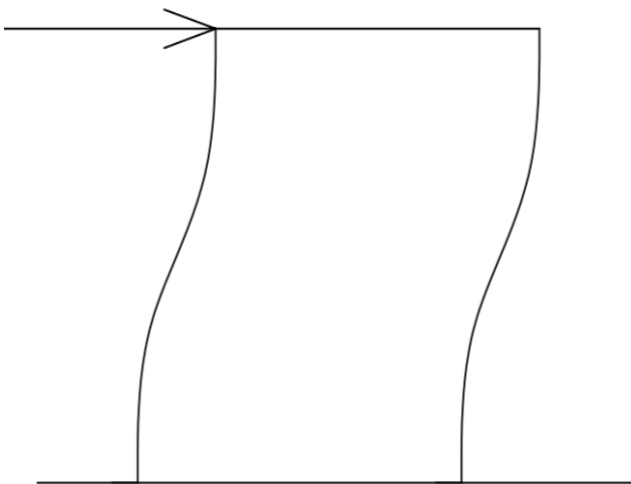
Kada idealiziramo model na njega primjenjujemo pojednostavljena temeljena na velikoj razlici fizikalnih veličina u modelu. Pa se nastavno tome masa vertikalnih stupova gleda kao da djeluje u jednoj točki bez zanemarivanja njihove krutosti. Masa “krovne konstrukcije“, odnosno ploče jest znatno veća od mase stupova i ona se smatra apsolutno krutom [1].

Kroz ispitivanja koristimo dva modela navedenog okvira koji se razlikuju s obzirom na spoj krovne ploče sa zidnom stranicom:

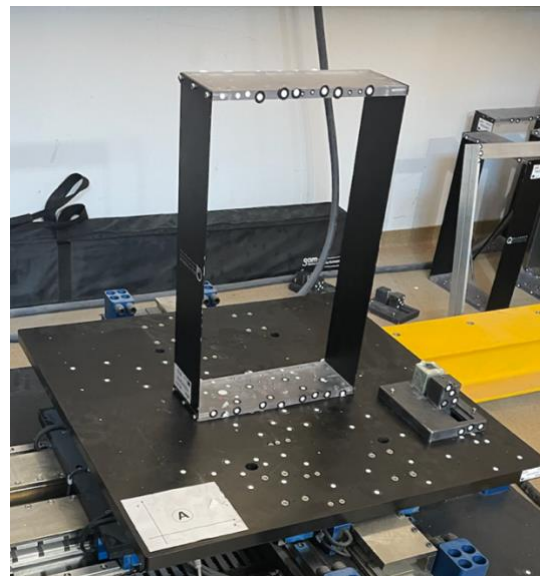
1. Model sa dva kruta spoja
2. Model sa jednim krutim spojom i jednim zglobnim spojom

#### 3.1. Model sa dva kruta spoja

Dvije vertikalne metalne ploče su spojene na krute ploče te pričvršćene su za krute ploče preko tri vijaka na svakom spoju kojih ima sveukupno 4 na modelu. Cijeli model sa svim svojim elementima ima masu 973 grama. Međutim kako je donja kruta ploča zavidana za potresni stol ona nema utjecaja na oscilacije. Pa se oduzevši mase 6 vijaka i donje ploče masa modela spusti na 741,5 grama.



Slika 5: Teorijski 2D model okvira sa dva kruta spoja

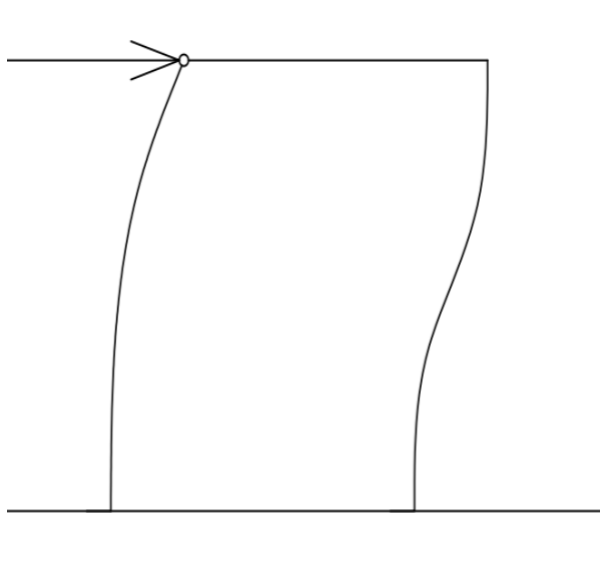


Slika 4: Okvir sa dva kruta spoja korišten za ispitivanja

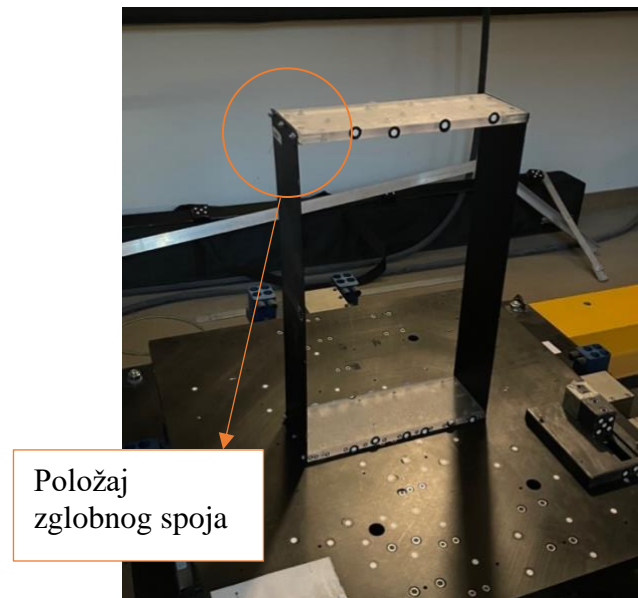
### 3.2. Model sa jednim krutim spojem i jednim zglobnim spojem

Slično kao i kod prvog modela dvije vertikalne ploče su spojene na dvije krute ploče preko vijaka. Donja ploča je na vertikalne pričvršćena preko tri vijka sa svake strane. Isti spoj je izveden na jednom kraju gornje ploče, dok je između ploče i vijka na drugoj strani postavljen zglob koji omogućava rotaciju. Zglob je spojen pomoću 4 vijka te ima masu 19,6 g.

Cijeli model sa svim svojim elementima ima masu 994,7 grama. Međutim kako je donja kruta ploča zavidana za potresni stol ona nema utjecaja na oscilacije. Pa se oduzevši mase 6 vijaka i donje ploče masa modela spusti na 763,2 grama.



Slika 6: Teorijski 2D model okvira sa jednim zglobnim i jednim krutim spojem

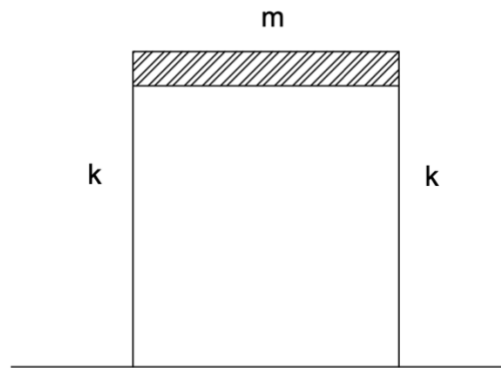


Slika 7: Okvir sa jednim zglobnim i jednim krutim spojem korišten za ispitivanja

#### 4. Definiranje jednadžbe kretanja

Za razumijevanje ponašanja jednokatnog okvirnog modela uslijed djelovanja eksternih sila na model ili u slučaju seizmičke pobude podloge prvo moramo shvatiti koje sile se javljaju u okviru pri djelovanju seizmičke pobude na donju ploču okvira [1].

Kod ove idealizacije masa okvira  $m$  je jednaka masi krovne konstrukcije, a krutost okvira  $k$  pri djelovanju horizontalnih sila je jednaka sumi krutosti dvaju vertikalnih stupova okvira [1].



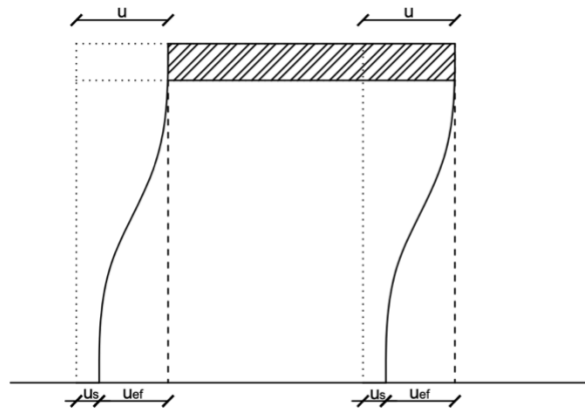
Slika 8: Idealizacija modela

Na okvir djeluje sila  $p(t)$  koja se mijenja u vremenu. Njoj se suprotavlja sila  $f_s$  koja je sila otpora zidova okvira na deformaciju te joj je iznos proporcionalan sa krutosti okvira. Nakon određenog vremena sila  $p(t)$  prestaje djelovati i dovodi okvir u stanje titranja[1].



Prilikom djelovanja sile  $p(t)$  na okvir dolazi do određenih pomaka. Javljaju se 3 tipa pomaka[1]:

1. Pomak tla,  $u_s$
2. Pomak ploče,  $u_{ef}$
3. Ukupni pomak ploče,  $u$



Slika 9: Prikaz pomaka na okviru

Pomak tla predstavlja pomak podnožja stupa s obzirom na njihov prvotni položaj. Pomak ploče predstavlja relativni horizontalni pomak apsolutno krute ploče u odnosu na podnožje stupa, a ukupni pomak predstavlja zbroj prethodno navedenih. Kod proračuna najbitniji nam je ukupni pomak  $u$  [1].

Rezultantna sila koja djeluje na okvir je razlika navedenih sila te iznosi [1]:

$$p(t) - f_s \quad (1)$$

Sila  $f_s$  ovisi o krutosti stupova te pomaku ploče u odnosu na podnožje stupova što je vidljivo iz iduće jednadžbe [1]:

$$f_s = k \cdot u \quad (2)$$

u kojoj izraz za krutost  $k$  glasi:

$$k = \sum_{\text{stupovi}} \frac{12EI_c}{h^3}, \quad (3)$$

odnosno za 2 stupa u ovom slučaju:

$$k = \frac{24EI_c}{h^3}. \quad (4)$$

Prema drugom Newtonovom zakonu gibanja dolazimo do slijedeće jednadžbe gdje dvostruko derivirani pomak  $\ddot{u}$  predstavlja akceleraciju ploče tijekom kretanja [1]:

$$m\ddot{u} + f_s = p(t) \quad (5)$$

Kada se na okvir primjeni sila  $p(t)$  ona u okviru izazove pomak  $u$ . Kada sila prestane djelovati na okvir  $p(t) = 0$  okvir počinje slobodno titati. U jednadžbu drugog Newtonovog zakona (5) supstituira se izraz (2) za silu  $f_s$  te 0 umjesto  $p(t)$  [1].

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (6)$$

Pomak  $u$  je jednak početnom pomaku  $u(0)$  zajedno sa brzinom koja je jednaka početnoj brzini [1].

$$u = u(0) \quad (7)$$

$$\dot{u} = \dot{u}(0) \quad (8)$$

Rješavanjem homogene diferencijalne jednadžbe (5) dolazimo do slijedeće jednadžbe [1]:

$$u(t) = u(0) \cos \omega_n t + \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t, \quad (9)$$

u kojoj je prirodna frekvencija neprigušenog sustava:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (10)$$

Okvir periodički titra oko svojeg ravnotežnog stanja ( $u = 0$ ) amplitudom koja je jednaka početnom pomaku  $u(0)$  te se period titranja  $T_n$  mjeri prema formuli [1]:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (11)$$

Drugim riječima, pomak ima istu vrijednost u vremenima  $t_1$  i  $t_1 + \frac{2\pi}{\omega_n}$ , također, za navedena vremena, brzina osciliranja okvira ima iste vrijednosti [1].

Nepriгуšeni sustav oscilira naizmjenično između maksimalnog pomaka  $u_{ef}$  i minimalnog pomaka  $-u_{ef}$ . Veličina navedenih dvaju pomaka je jednaka i ujedno predstavlja i amplitudu gibanja. Amplituda ovisi o početnim uvjetima, točnije, početnom pomaku i brzini te se računa preko formule [1]:

$$u_o = \sqrt{[u(0)]^2 + \left[\frac{\dot{u}(0)}{\omega_n}\right]^2} \quad (12)$$

Rješenje jednadžbe (6) leži u homogenoj diferencijalnoj jednadžbi drugog reda koja se sastoji od stalnih koeficijenata od kojih je koeficijent  $s$  nepoznanica [1]:

$$u = e^{st} \quad (13)$$

Nakon supstitucije u jednadžbu (6) dobiva se:

$$(ms^2 + k)e^{st} = 0 \quad (14)$$

Eksponent nije nikad jednak nuli pa se karakteristične jednačbe dijele na [1]:

$$(ms^2 + k) = 0 \quad (15)$$

$$s_{1,2} = \pm i\omega_n \quad (16)$$

$$i = \sqrt{-1} \quad (17)$$

Generalno rješenje jednačbe (6) glasi [1]:

$$u(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad (18)$$

Što nakon supstituiranja jednačbe (6) u prethodnu postaje [1]:

$$u(t) = A_1 e^{i\omega_n t} + A_2 e^{-i\omega_n t} \quad (19)$$

Konstante  $A_1$  i  $A_2$  su nepoznate. Koristeći de Moivreov teorem, u kojemu su [1]:

$$\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} \quad (20)$$

$$\sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i} \quad (21)$$

Jednačba (19) može se zapisati kao [1]:

$$u(t) = A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t \quad (22)$$

Gdje konstante  $A$  i  $B$  ostaju neodređene. Kod deriviranja možemo dobiti vrijednosti konstanta u početnom položaju [1].

$$\dot{u}(t) = -\omega_n A \sin \omega_n t + \omega_n B \cos \omega_n t \quad (23)$$

Uvrstivši početno vrijeme koje je jednako 0 dobijamo slijedeće jednačbe za  $u(0)$  i  $\dot{u}(0)$  [1]:

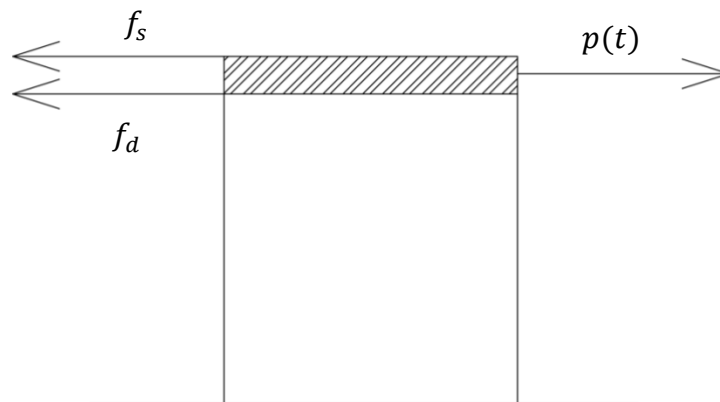
$$u(0) = A \quad (24)$$

$$\dot{u}(0) = \omega_n B \quad (25)$$

Supstitucijom konstanti A i B iz prethodne dvije jednačbe u jednačbu (22) dođemo do rješenja homogene jednačbe definiranog u jednačbi (9) [1]:

$$u(t) = u(0) \cos \omega_n t + \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t, \quad (9)$$

U idealiziranim uvjetima, okvir bi počeo titrati bez prestanka u beskonačnost. Iz tog razloga proračun na okviru se provodi zajedno sa silom prigušenja  $f_d$  koja kroz neko vrijeme priguši titranje okvira sve dok ne dođe do prestanka istog [1].



Slika 10 Na slici su prikazane sile koje djeluju na okvir

Sila prigušenja ( $f_d$ ) je sila bez čijeg utjecaja bi okvir titrao u beskonačnost. Ona prigušuje titranje okvira dok dođe u stanje u kojem ne titra. Ovisi o koeficijentu prigušenja  $i$  i o prvoj derivaciji pomaka okvira, odnosno brzini titranja okvira [1]:

$$f_D = c \cdot \dot{u} \quad (26)$$

Rezultantna sila koja djeluje na okvir je zbroj navedenih sila te iznosi [1]:

$$p(t) - f_s - f_d \quad (27)$$

Prema drugom Newtonovom zakonu gibanja dolazimo do slijedeće jednadžbe gdje dvostruko derivirani pomak  $\ddot{u}$  predstavlja akceleraciju ploče kod pobude [1]:

$$m\ddot{u} + f_d + f_s = p(t) \quad (28)$$

Supstitucijom jednadžbi prethodnih dviju sila u jednadžbu (28) te izjednačavanjem  $p(t)$  sa nulom dolazimo do konačne jednadžbe za slobodne prigušene oscilacije [1]:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (29)$$

Dijeljenjem jednadžbe (29) sa masom  $m$  dobijemo [1]:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad (30)$$

Pa se uvrštavanjem  $\omega_n$  u jednadžbu (10) dobije izraz za omjer prigušenja  $\zeta$  [1]:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (31)$$

$c_{cr}$  je kritični koeficijent prigušenja te ima izraz [1]:

$$c_{cr} = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega_n} \quad (32)$$

Konstanta prigušenja  $c$  je mjera disipirane energije u ciklusu slobodne vibracije. Dok je omjer prigušenja  $\zeta$  bezdimenzionalna vrijednost prigušenja. Za naš okvir vrijedi  $c < c_{cr}$  i  $\zeta < 1$  te shodno tome vrijedi rješena jednadžba za  $u(t)$  [1.]:

$$u(t) = e^{-k\omega_n t} \left[ u(0) \cos \omega_D t + \left( \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \right) \sin \omega_D t \right] \quad (33)$$

U kojoj rješenje za prirodnu prigušenu frekvenciju  $\omega_D$  glasi [1]:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (34)$$

Prirodni period prigušene frekvencije  $T_D$  u odnosu je sa prirodnim periodom  $T_n$  preko slijedeće jednačbe [1]:

$$T_D = \frac{T_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (35)$$

Kod prigušenog sustava amplituda je uvijek jednaka te nema promjene u pomaku susjednih amplituda. Međutim, kod prigušenih sustava amplituda oscilira kod svakog perioda. Jednačba (33) dokazuje da se amplituda smanjuje u eksponencijalnom odnosu s vremenom. Linija koja spaja navedene amplitude ima nagib  $\pm \rho e^{-\zeta \omega_n t}$  u kojem je  $\rho$  dobiven preko formule [1]:

$$\rho = \sqrt{[u(0)]^2 + \left[ \frac{\dot{u}(0) + \zeta \omega_n u(0)}{\omega_D} \right]^2} \quad (36)$$

Jednačba (30) se rješava uvrštavajući slijedeću jednačbu (38) umjesto pomaka  $u$  [1]:

$$u = e^{st} \quad (37)$$

$$(s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2) e^{st} = 0 \quad (38)$$

Rješenja jednačbe (38) za  $s$  [1]:

$$s_{1,2} = \omega_n \left( -\zeta \pm i\sqrt{1 - \zeta^2} \right) \quad (39)$$

Iz čega proizlazi generalno rješenje [1]:

$$u(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad (40)$$

Što nakon uvrštavanja izgleda [1]:

$$u(t) = e^{-\zeta \omega_n t} (A_1 e^{i\omega_D t} + A_2 e^{-i\omega_D t}) \quad (41)$$

U izrazu (41)  $A_1$  i  $A_2$  su nepoznate konstante te daljnjim raspisivanjem dobivamo izraz koji sadrži trigonometrijske funkcije na slijedeći način [1]:

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t) \quad (42)$$

Izrazi se iz početnog stanja dobijaju kao [1]:

$$A = u(0) \quad (43)$$

$$B = \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \quad (44)$$

Nakon uvrštavanja konstanta  $A$  (43) i  $B$  (44) u jednadžbu (42) dobivamo konačno rješenje za pomak dano u jednadžbi (33) [1].

Omjer pomaka u vremenu  $t$  i vrijednosti pomaka nakon punog perioda  $T_D$  je neovisan o vremenu. Taj isti omjer je zadan preko slijedećih jednakosti [1]:

$$\frac{u(t)}{u(t + T_D)} = \exp(\zeta\omega_n T_D) = \exp\left(\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}\right) \quad (45)$$

Te druge jednakosti dobivene preko jed. (35) [1]:

$$\frac{u_i}{u_{i+1}} = \exp\left(\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}\right) \quad (46)$$

Budući da se omjer prigušenja ne može odrediti analitički u slučaju praktičnih struktura, isti se određuje eksperimentalno. Kod blago prigušenih sustava omjer prigušenja se određuje preko [1]:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad (47)$$



Prirodni period  $T_D$  sustava se također može odrediti preko sustava slobodnog osciliranja mjerenjem vremena jednog ciklusa. Uspoređujući to sa prirodnim periodom usvojenim preko izračunatih krutosti i mase idealiziranog sustava možemo zaključiti koliko precizno su ulazni podaci uzeti u obzir kod idealiziranog sustava, odnosno koliko je isti mjerodavna reprezentacija stvarne promatrane građevine [1].

## *5.Laboratorijska ispitivanja*

Razumijevanje dinamičkih procesa, kao i ponašanja sustava u različitim okolnostima, uvelike se oslanja na laboratorijske eksperimente. Naša pozornost bit će usmjerena na rezultate dobivene laboratorijskim ispitivanjima, posebice u odnosu na referentne oscilatorne podatke. To uključuje ispitivanje vremenski ovisnih funkcija pomaka u slobodnim oscilacijama, kao i identifikaciju kritične frekvencije u prisilno pobuđenim oscilacijama [2].

Na okviru se provode dvije vrste ispitivanja:

1. Ispitivanje slobodne oscilacije
2. Ispitivanje prisilne pobude podloge

Ispitivanje slobodne oscilacije okvira se zasniva na deformaciji okvira u neki početni pomak krovne ploče. Ista se zatim otpušta u stanje slobodne oscilacije u kojoj se okvir kroz prigušeno osciliranje vraća u početni položaj [2].

Dok je prisilna pobuda podloge ispitivanje u kojem se podloga ispod promatranoga okvira počinje pomicati prema krivulji nekog stvarnog potresnog zapisa. Tim ispitivanjem je cilj promatrati oscilacije oba okvira, odnosno promatrati kritične deformacije okvira, a samim time i kritične sile u konstrukciji [2].

Ispitivanjem harmonijskog pomaka koji varira s vremenom u slobodnim oscilacijama, možemo proniknuti u prirodne frekvencije koje pokazuje sustav. Ova nam analiza pruža dublje razumijevanje načina na koji sustav reagira na dinamičku pobudu. Kritična frekvencija je povezana s pojavom rezonancije i može dovesti do povećane amplitude titranja, što može imati značajne posljedice u inženjerskim i znanstvenim primjenama [2].

U ovom radu ćemo analizirati rezultate laboratorijskih istraživanja koja su provedena kako bismo dobili uvid u ponašanje sustava u navedenim situacijama. Kroz eksperimente, simulacije i analize, istražujemo kako se sustav ponaša u različitim uvjetima i kako se mijenja s promjenom parametara frekvencije pobude. Dobiveni rezultati doprinose dubljem razumijevanju dinamičkih svojstava sustava i pružaju temelje za daljnje primjene u inženjerskom projektiranju, znanstvenim istraživanjima i razvoju novih tehnologija [2].

Cilj nam je bio kroz ta ispitivanja mjeriti pomak ploče okvira, očitati frekvenciju titranja okvira pri kojoj su pomaci maksimalni. Drugim riječima pronaći kritičnu frekvenciju titranja okvira.

To smo postigli postupnim povećavanjem frekvencije titranja potresne platforme ispod okvira. Okvir će kod kritične frekvencije najviše rezonirati sa platformom i pomaci će biti najveći. Kada su pomaci najveći i naprezanja u okviru će biti najveća [2].

Pomake na okviru mjerili smo optičkim mjernim sustavom visoke frekvencije fotografiranja sustava kako bi se dobila čim točnija mjerenja [4].

## 5.1. Opis korištene opreme

### *Quanser STI-III*

Kao zamjena za tlo u stvarnim uvjetima korištena je dvoosna potresna platforma Quanser STI-III. To je ispitni uređaj koji se sastoji od dvije dvoosne potresne platforme pokretanih elektromagnetskim motorom i sustava za upravljanje [4].



*Slika 11: Quanser STI-III*

Koristi se za modelska ispitivanja na utjecaj dinamičke pobude (poput potresa, harmonijskih opterećenja i slično). Dostupan nam je sustav od dvije platforme, koje se mogu koristiti odvojeno i neovisno jedna o drugoj za provođenje dva ispitivanja istovremeno, ali i zajedno na način da ispitani model bude oslonjen i na jednoj i na drugoj platformi. Pri korištenju platformi istovremeno dopuštena je veća maksimalna masa, a pobuda koju one proizvode može kod sinkronog rada biti jednaka ili kod asinkronog rada različita [4].

Tehničke karakteristike [4]:

→Tlocrtne dimenzije svake platforme 625 x 625 mm<sup>2</sup>

- Hod svake platforme u svakom od dva smjera je 15 cm, a raspon radnih frekvencija između 0 i 20 Hz
- Svaka platforma uz maksimalni teret od 130 kg može proizvesti ubrzanje od 1g u svakom od dva smjera
- Svaka platforma bez ikakvog tereta može proizvesti ubrzanje od 2,8 g u x smjeru i 4,5 g u y smjeru
- Oсна udaljenost platformi može biti od 1 m do 2,5 m

### *GOM mbH PONTOS 3D 4M*

Koristi se za trodimenzionalno beskontaktno mjerenje pomaka i deformacija, a u našem slučaju tla i registriranje amplitude pomaka okvira kod titranja na navedenoj potresnoj platformi. To je sustav optičkih kamera koji snima velik broj fotografija u sekundi koje se naknadno računalno obrađuju te služe za definiranje pomaka i deformacija okvira. Kamere se kalibriraju prije početka snimanja te prate minimalno 3 točke na površini okvira [4].



*Slika 12: GOM mbH PONTOS 3D 4M*

Osnovni dijelovi optičkog mjernog sustava su: dvije kamere, kablovi, nosači, kalibracijski objekt, par leća, laserski pokazivač, kofer, LED osvjetljenje, foto ćelija [4].

Tehničke karakteristike [4]:

- Mogućnost snimanja do 168 fps rezolucijom od 2400x1728 piksela, te do 1300 fps rezolucijom od 2400x168 piksela
- Jedan par leća žarišne dužine 20 mm pogodan za mjerne volumene od 125 x 90 mm<sup>2</sup> do 2150 x 1600 mm<sup>2</sup>
- Kalibracijski objekt za snimanje mjernog volumena od 350 x 260 mm<sup>2</sup> do 500 x 370 mm<sup>2</sup>

### *5.2. Okvir sa krutim spojevima krovne konstrukcije sa zidovima*

Ova vrsta spoja krovne ploče sa zidovima je specifična iz nekoliko razloga. Jedan od glavnih razloga jest mogućnost očuvanja kuta između ploče i zidova. To svojstvo nam je zanimljivo iz razloga što bitno utječe na deformaciju stupova o čijoj krutosti ovisi dinamički odgovor okvira koji promatramo [1].

### *5.3. Okvir sa zglobnim spojevima krovne konstrukcije sa zidovima*

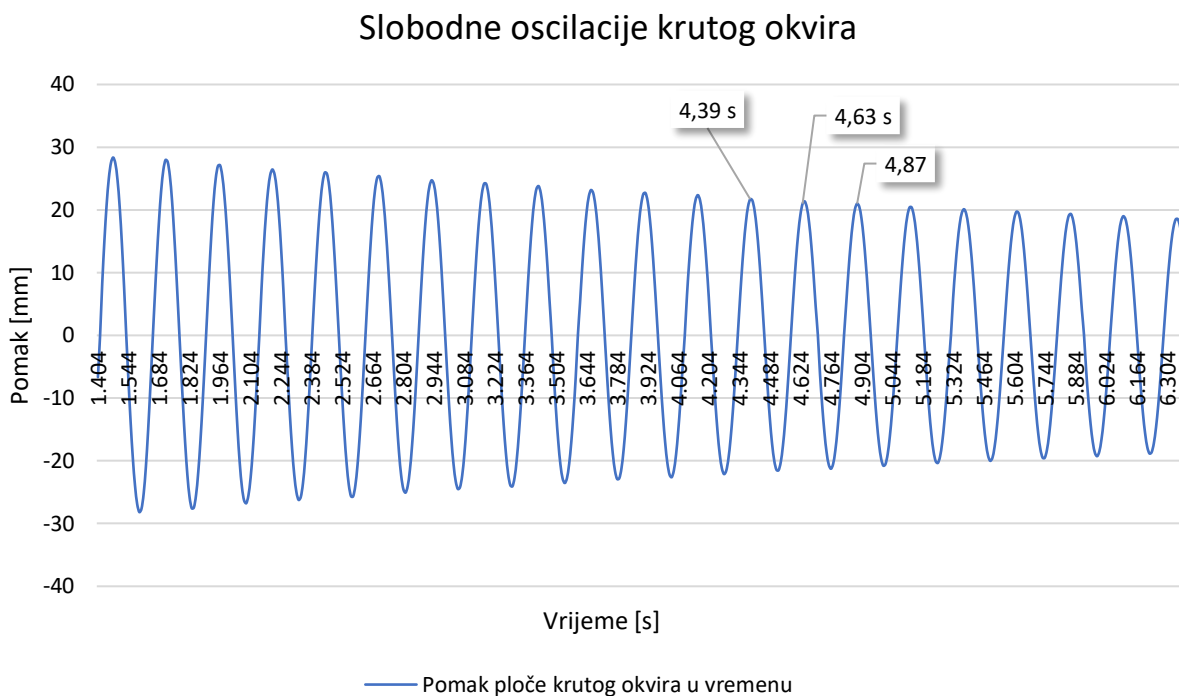
Kada promatramo okvir sa zglobnim spojevima krovne konstrukcije i zidova uočavamo bitnu razliku u odnosu na isti okvir sa krutim spojevima. Naime, kod ovakvog tipa okvira nemamo očuvanje pravog kuta na mjestu spoja već je rotacija dopuštena. Samim time dolazi do potpuno drugačijeg savijanja zidova ili u ovom slučaju limova što bitno utječe na ponašanje same konstrukcije kod djelovanja potresa [1].

## 6. Rezultati laboratorijskih ispitivanja

### 6.1. Okvir sa krutim spojevima krovne konstrukcije sa zidovima

#### 6.1.1. Slobodne oscilacije - Izračun frekvencije $f$ , i kružne frekvencije $\omega$

Prvo i osnovno što nam treba za analizu utjecaja potresa na konstrukciju jest prirodna frekvencija okvira. Za dobivanje iste koristimo formulu ovisnu o periodu kojeg dobijemo očitanjem iz grafa te koji u našem slučaju iznosi 0,24 s što se vidi iz *slike 11* [1].



Slika 13: Graf slobodnih oscilacija krutog okvira

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,24} = 4,167s^{-1} \quad (48)$$

Nakon izračuna frekvencije istu uvrštavamo u formulu za kružnu frekvenciju [1]:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 4,167 = 26,182 s^{-1} \quad (49)$$



Koja nam služi za izračun krutosti zajedno uz masu okvira [1].

$$k = \omega^2 \cdot m = 26,182^2 * 0,7415 = 508,3 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (50)$$

### 6.1.2. Izračun koeficijenta prigušenja

Kako se radi o realnom sustavu, u modelu se javlja prigušenje koje je definirano koeficijentom  $c$ . To prigušenje uzrokuje postepeno usporavanje titranja sustava ili drugim riječima postupno smanjenje amplitude titranja. Za matematičko definiranje titranja prvo određujemo logaritamski dekrement pomoću dviju susjednih amplituda kombinirajući slijedeće formule [1]:

$$\delta = 2 * \pi * \zeta \quad (51)$$

$$\delta = \frac{1}{j} * \ln \frac{u_i}{u_{(i+j)}}, \quad (52)$$

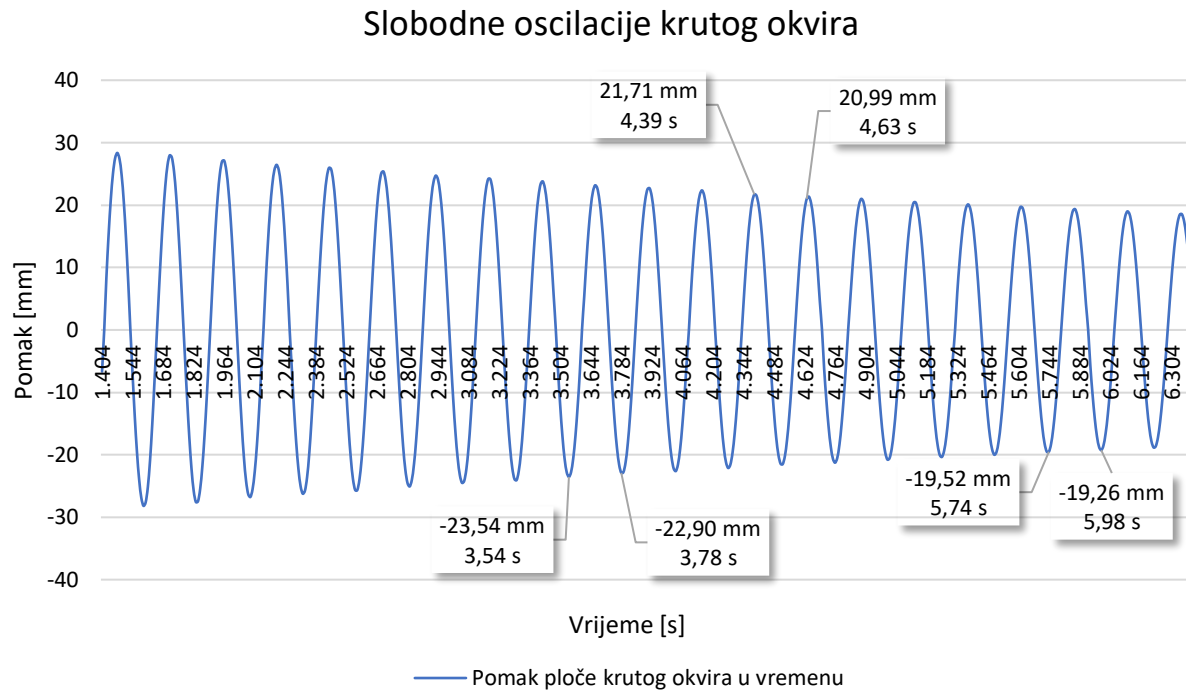
pa iz njih proizađe:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} * \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad (53)$$

Zatim dolazimo do formule za koeficijent prigušenja pomoću poznavanja odnosa prigušenja [1]:

$$c = \zeta * 2 * m * \omega \quad (54)$$

Na slijedećem grafu su prikazani podaci pomoću kojih ćemo doći do koefcijenta prigušenja:



Slika 14: Slobodne oscilacije krutog okvira sa naznačenim amplitudama u nekom vremenu

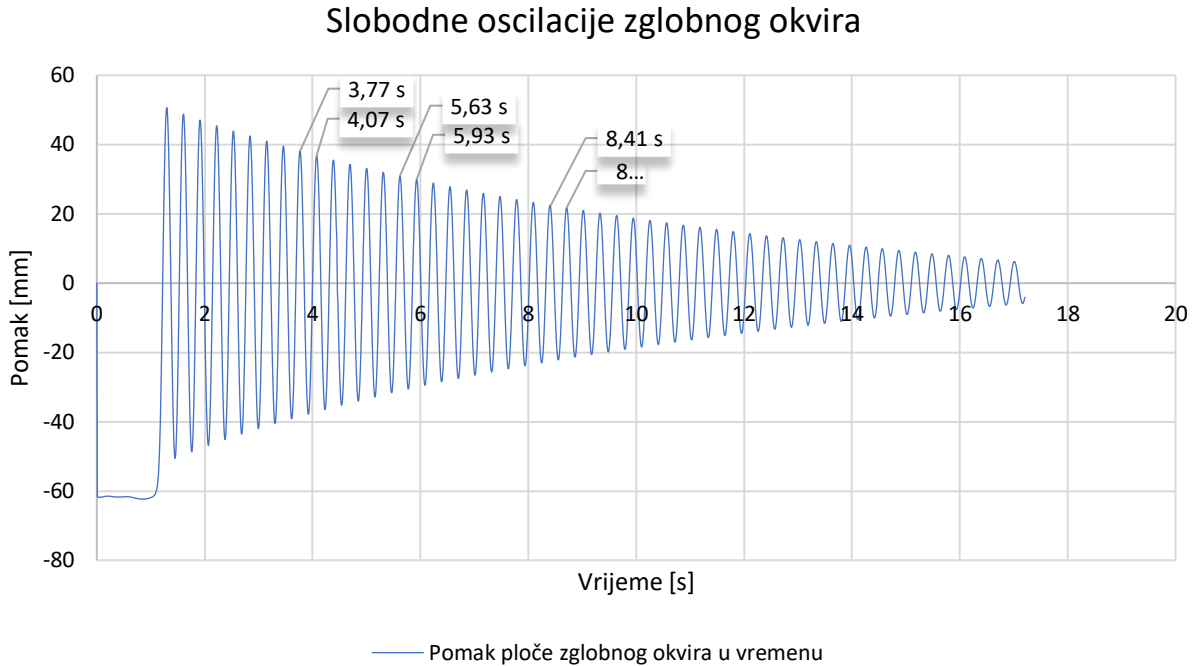
$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} * \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{21,71}{20,99} = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{23,54}{22,90} = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{19,52}{19,26} = 0,005409 \quad (47)$$

$$c = 0,005409 * 2 * 0,7415 * 26,182 = 0,21 \quad (55)$$

## 6.2. Okvir sa zglobnim spojevima krovne konstrukcije sa zidovima

### 6.2.1. Slobodne oscilacije - Izračun frekvencije $f$ , i kružne frekvencije $\omega$

Kao i kod prethodnog okvira započinjemo s određivanjem prirodne frekvencije. Za dobivanje iste koristimo formulu ovisnu o periodu kojeg dobijemo očitanjem iz grafa koji u ovom slučaju okvira sa zglobnim spojevima iznosi 0,30 s što se jasno vidi iz priloženog grafa [1].



Slika 15: Slobodne oscilacije zglobnog okvira

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,30} = 3,334 \text{ s}^{-1} \quad (48)$$

Nakon izračuna frekvencije istu uvrštavamo u formulu za kružnu frekvenciju [1]:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 3,334 = 20,944 \text{ s}^{-1} \quad (49)$$

Koja nam služi za izračun krutosti zajedno uz masu okvira [1].

$$k = \omega^2 \cdot m = 20,944^2 \cdot 0,7632 = 334,78 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (50)$$

### 6.2.2. Izračun koeficijenta prigušenja

Kako se radi o realnom sustavu, u modelu se javlja prigušenje koje je definirano koeficijentom  $c$ . To prigušenje uzrokuje postepeno usporavanje titranja sustava ili drugim riječima postupno smanjenje amplitude titranja. Za matematičko definiranje titranja prvo određujemo logaritamski dekrement pomoću dviju susjednih amplituda kombinirajući slijedeće formule [1]:

$$\delta = 2 * \pi * \zeta \quad (51)$$

$$\delta = \frac{1}{j} * \ln \frac{u_i}{u_{(i+j)}}, \quad (52)$$

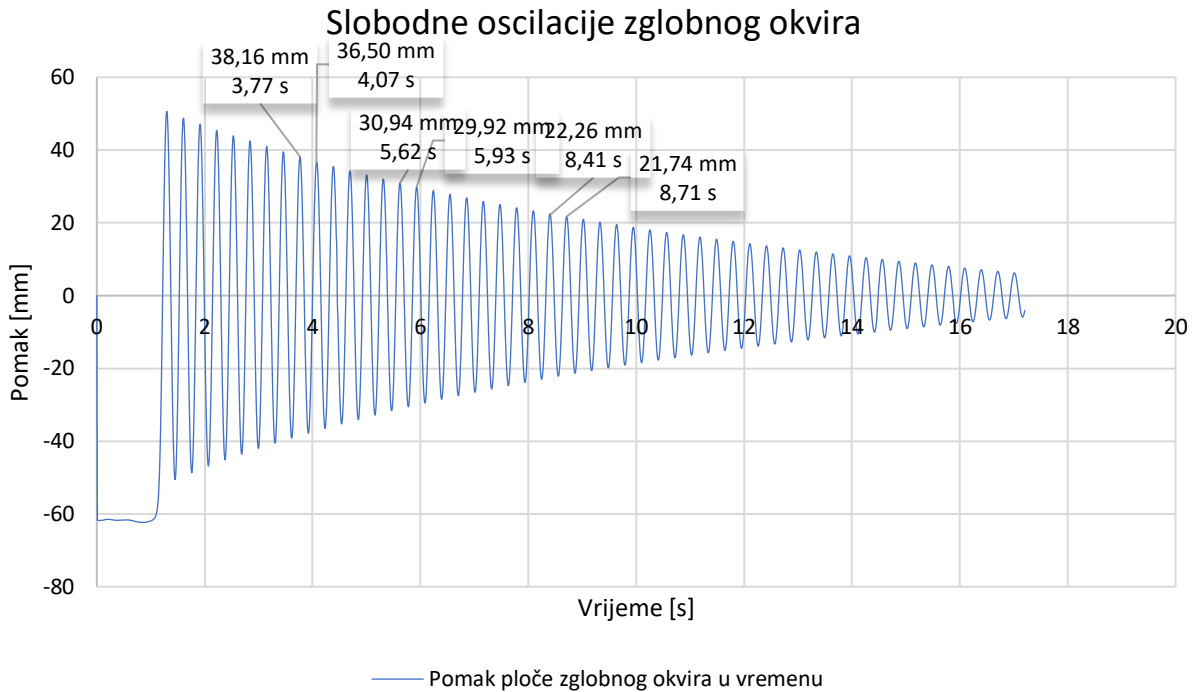
pa iz njih proizađe:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} * \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad (53)$$

Zatim dolazimo do formule za koeficijent prigušenja pomoću poznavanja odnosa prigušenja [1]:

$$c = \zeta * 2 * m * \omega \quad (54)$$

Na slijedećem grafu su prikazani podaci pomoću kojih ćemo doći do koeficijenta prigušenja:



Slika 16: Slobodne oscilacije zglobnog okvira sa naznačenim amplitudama u vremenu

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} * \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{38,16}{36,50} = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{30,94}{29,92} = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{22,26}{21,74} = 0,007079 \quad (47)$$

$$c = 0,007079 * 2 * 0,7632 * 20,944 = 0,226 \quad (55)$$

### 6.3. Dobivene vrijednosti proračuna

Iz proračuna je jasno vidljiva razlika u rezultatima. Okvir sa dva kruta spoja se pokazao kao okvir sa većom frekvencijom i manjim periodom. Takve razlike u vrijednostima u daljnjem proračunu doprinose ka manjoj krutosti okvira sa zglobnim spojem. Daljnjim proračunom utvrđujemo da takav okvir ima veći koeficijent prigušenja.

Imajući sve to na umu, u slijedećem poglavlju ćemo analizirati ponašanje tih dvaju okvira na djelovanje stvarnih potresa.

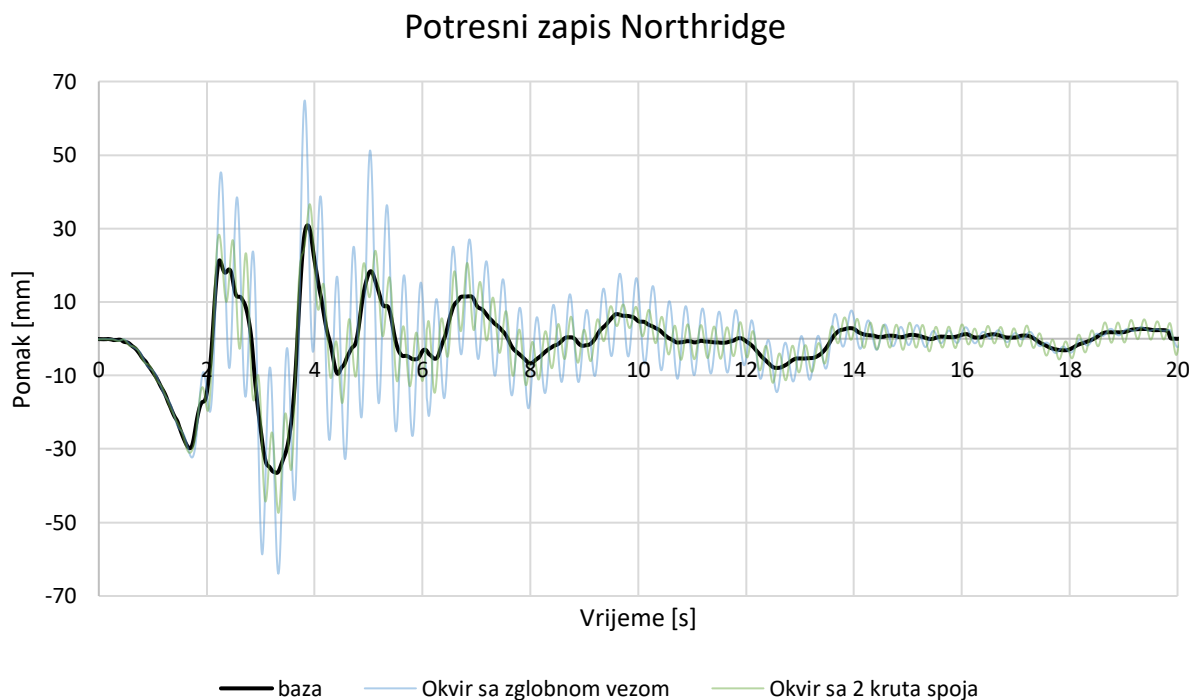
## 7. Komparacija rezultata laboratorijskih ispitivanja

Nakon što smo smo odredili osnovne značajke oba okvira te utvrdili njihovo ponašanje u idealnim uvjetima, u ovom poglavlje ćemo ih podvrgnuti utjecajima u praksi. Točnije, podvrgnut ćemo ih djelovanju stvarnih potresnih zapisa koji mogu služiti kao referentni potresi u svijetu građevinarstva [3].

Za usporedbu ponašanja okvira promatrati ćemo najveće pomake gornje etaže okvira. Potresi čiji ćemo potresni zapis koristiti su [2]:

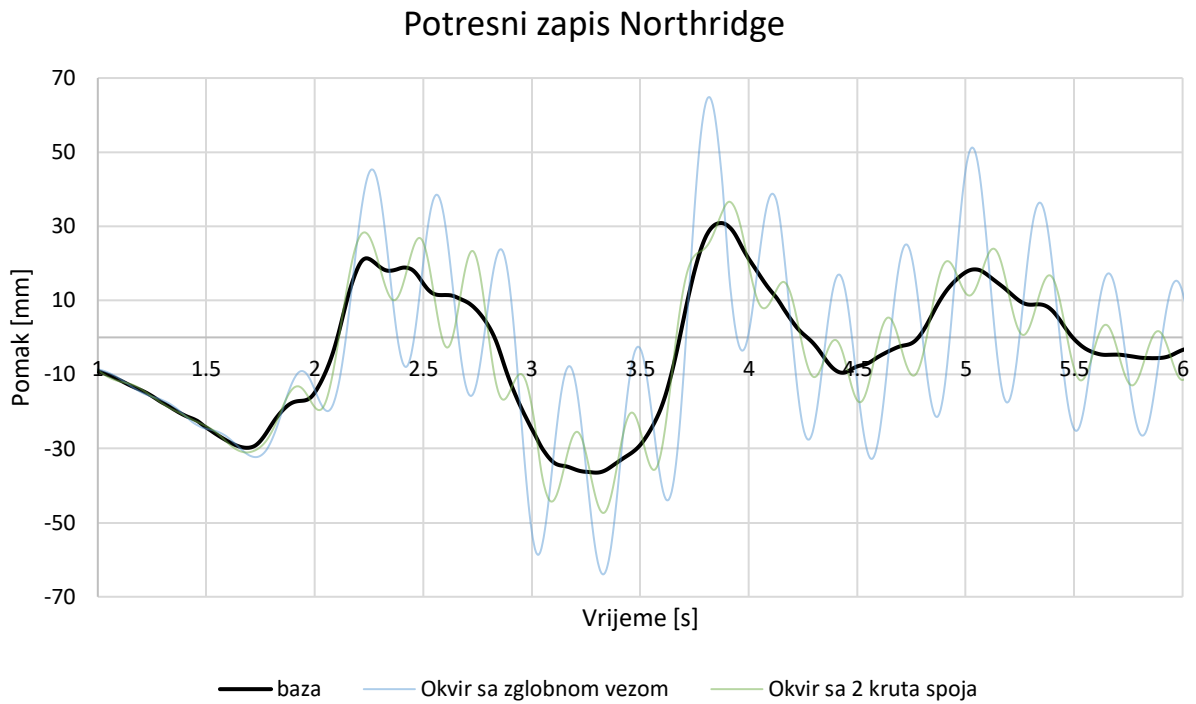
1. Potres Northridge
2. Potres Kobe
3. Potres El Centro
4. Potres Cape Mendocino

### 7.1. Potres Northridge



Slika 17: Potresni zapis Northridge

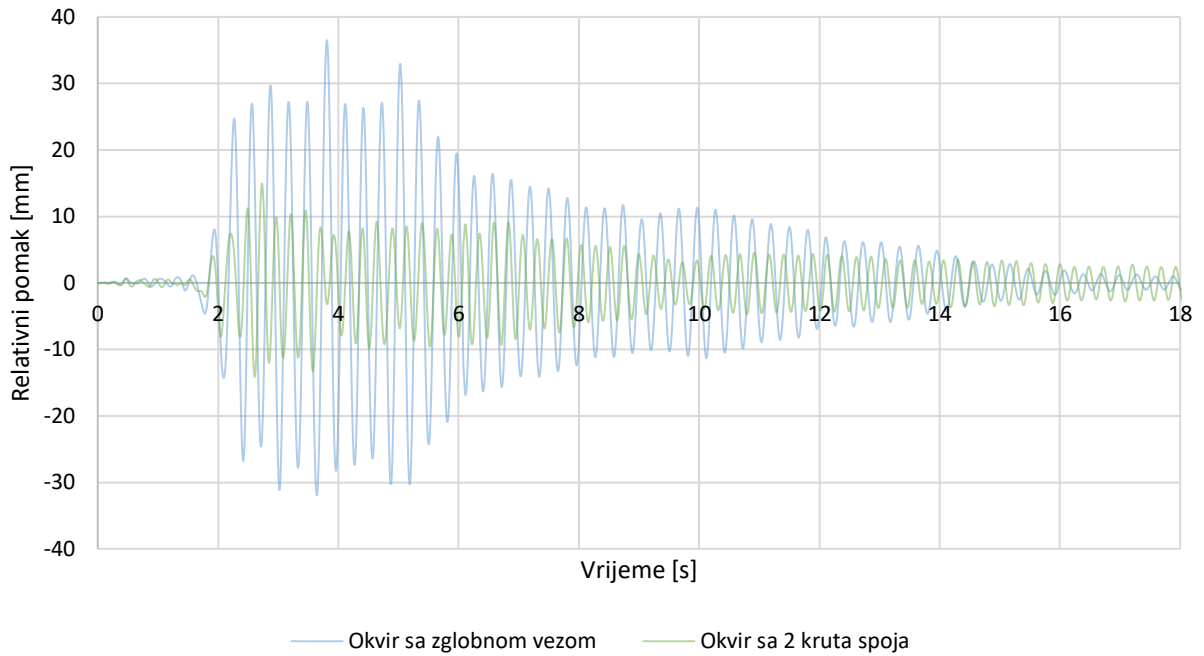
Analizirajući krivulje pomaka okvira izloženima potresu Northridge odmah je uočljivo kako je okvir sa zglobnom vezom nepovoljniji okvir s obzirom na pomake.



*Slika 18: Isječak potresnog zapisa Northridge od 1.-6. sekunde*

Kada sagledavamo manji isječak zapisa pomaka u vremenskom razdoblju od prve do šeste sekunde uočavamo kako je na nekim mjestima pomak zglobnog okvira dvostruko veći od pomaka okvira sa krutim vezama.

## Relativni pomak okvira

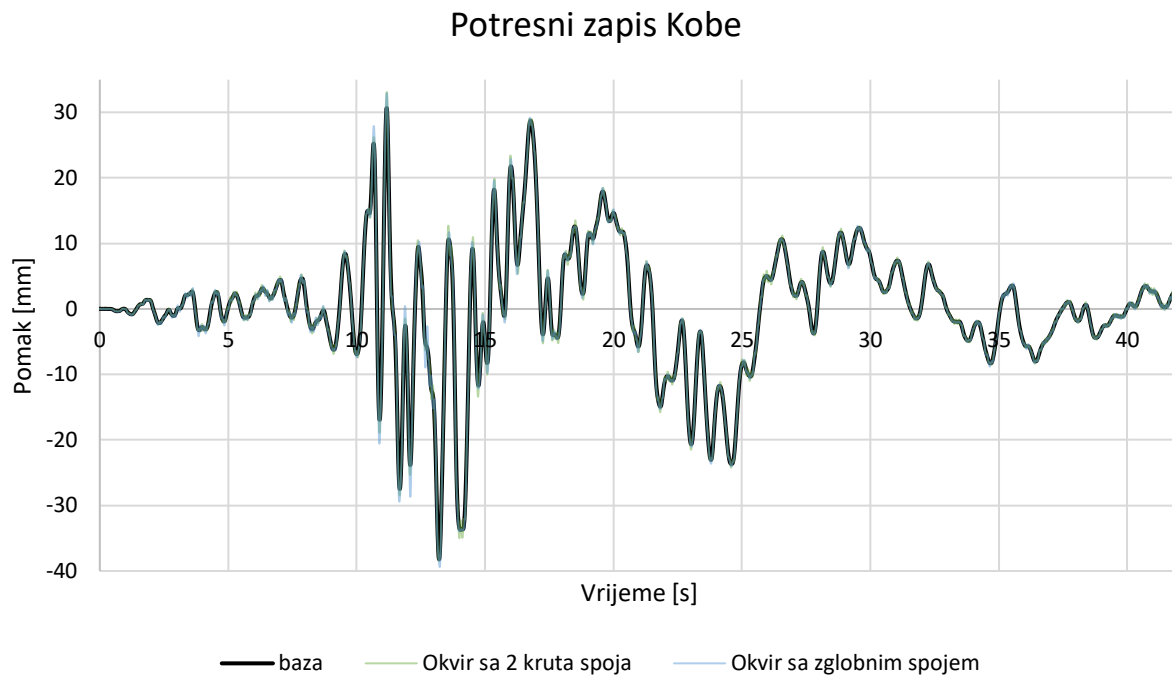


Slika 19 Relativni pomak okvira za potresni zapis Northridge

Ta teza nam postaje još jasnija kada sagledamo relativni pomak tih dvaju okvira. Relativni pomak predstavlja razliku ukupnog pomaka okvira zajedno sa potresnim stolom i pomaka samog potresnog stola. Iz grafa relativnog pomaka je jasno vidljivo kako okvir sa zglobnom vezom ima mnogo veću amplitudu od od okvira sa krutom vezom, no vrijedi napomenuti kako se okvir sa zglobnim spojem brže prigušava.

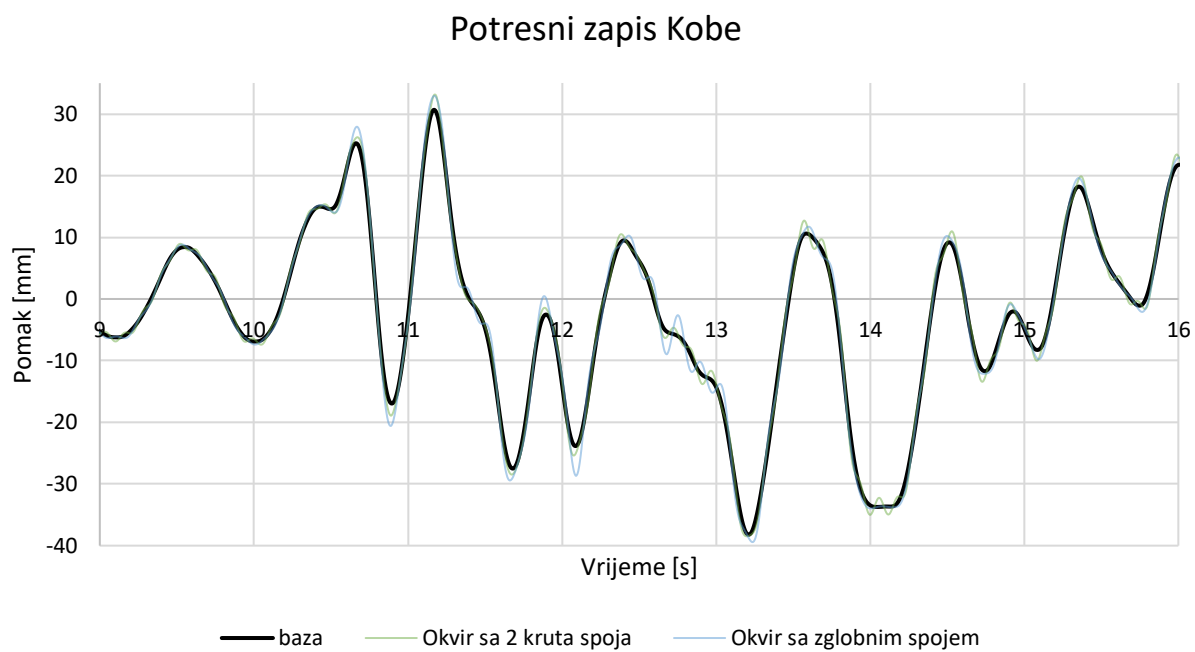


## 7.2. Potres Kobe



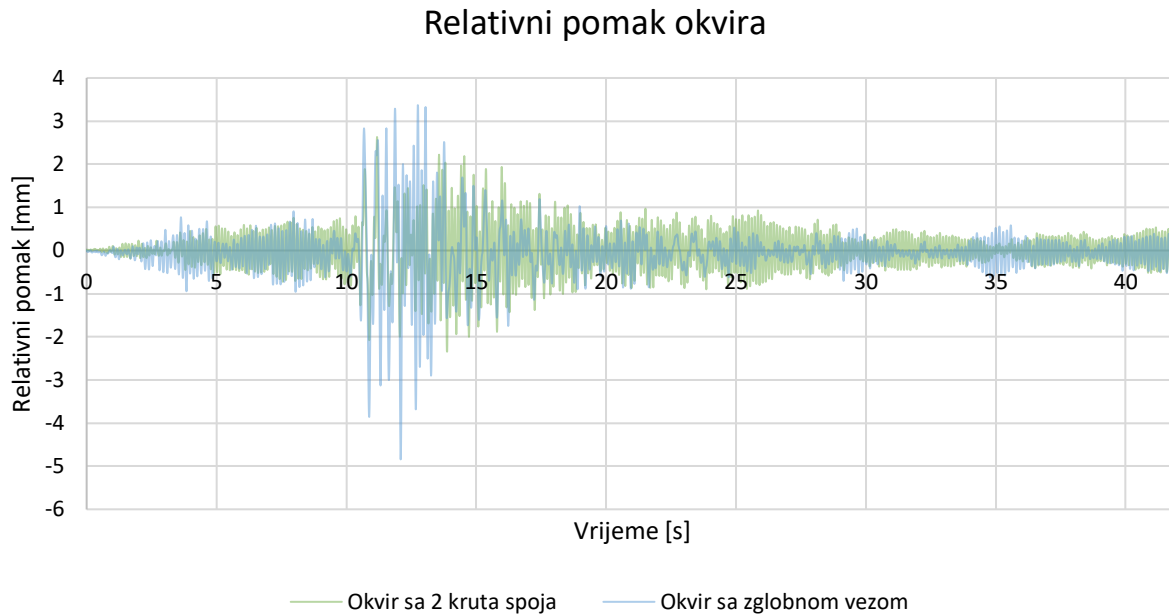
Slika 20: Potresni zapis Kobe

Kod potresa Kobe imamo malo drukčiju situaciju. Naime, titranja oba okvira su kroz trajanje potresa vrlo slična sa skoro istim maksimalnim pomacima. To je pojava pri kojoj, potres koji je sačinjen od mnogo kombiniranih pravilnih frekvencija, ne sadrži u sebi niti jednu kritičnu frekvenciju od oba okvira. Kao rezultat tome, dva okvira samo vibriraju.



*Slika 21: Potresni zapis Kobe u rasponu od 9.-16. sekunde*

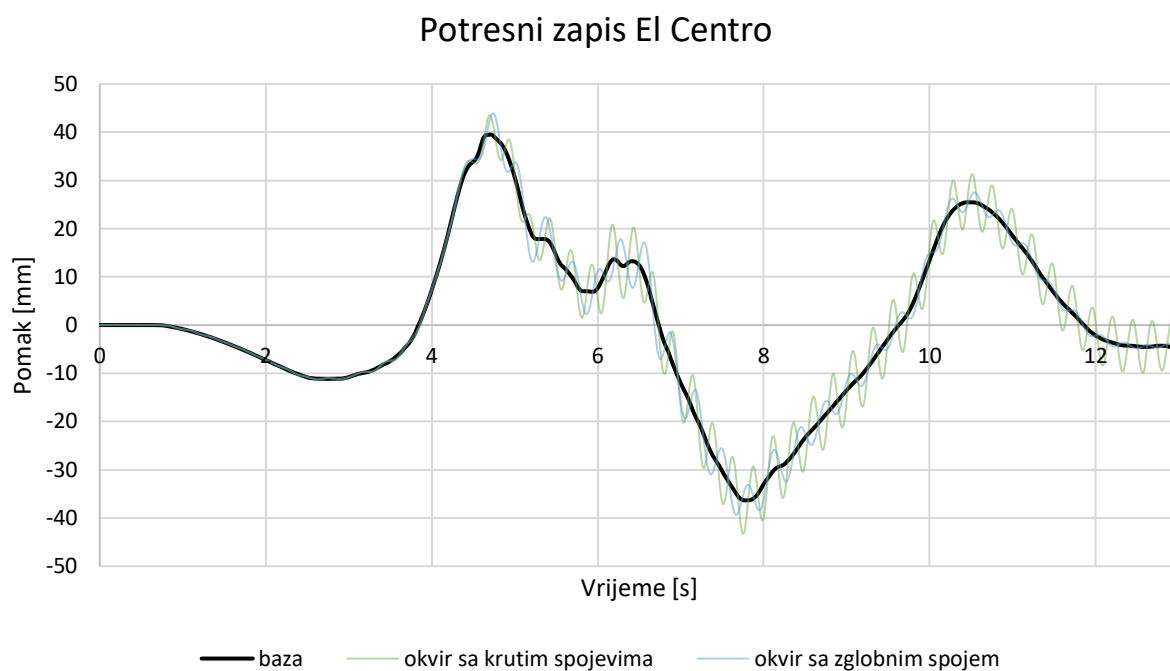
Sagledavajući taj isti potresni zapis u manjem mjerilu, počevši od devete sve do šesnaeste sekunde, vidljivo je kako okvir sa zglobnim spojem ipak malo prednjači kada su u pitanju maksimalni pomaci.



Slika 22: Relativni pomak okvira za potresni zapis Kobe

Analizirajući relativni pomak okvira izloženih potresnom zapisu Kobe dolazimo do zaključka da su, u trenutku najvećih pomaka tla, maksimalne amplitude znatno veće kod okvira sa zglobnom vezom. Međutim, ako sagledavamo potres od početka do kraja zaključujemo da su oscilacije na nekim mjestima veće kod okvira sa zglobnim spojem, a na nekima obrnuto te da se u globalu slično ponašaju.

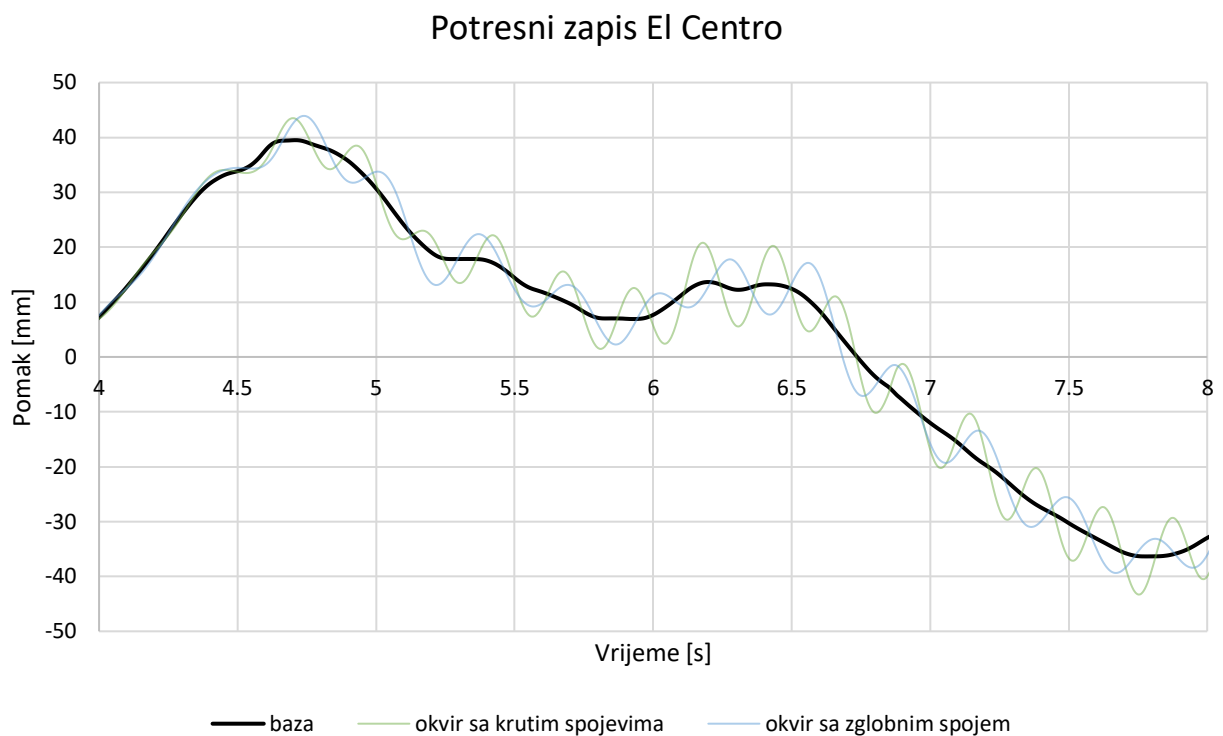
### 7.3. Potres El Centro



Slika 23: Potresni zapis El Centro

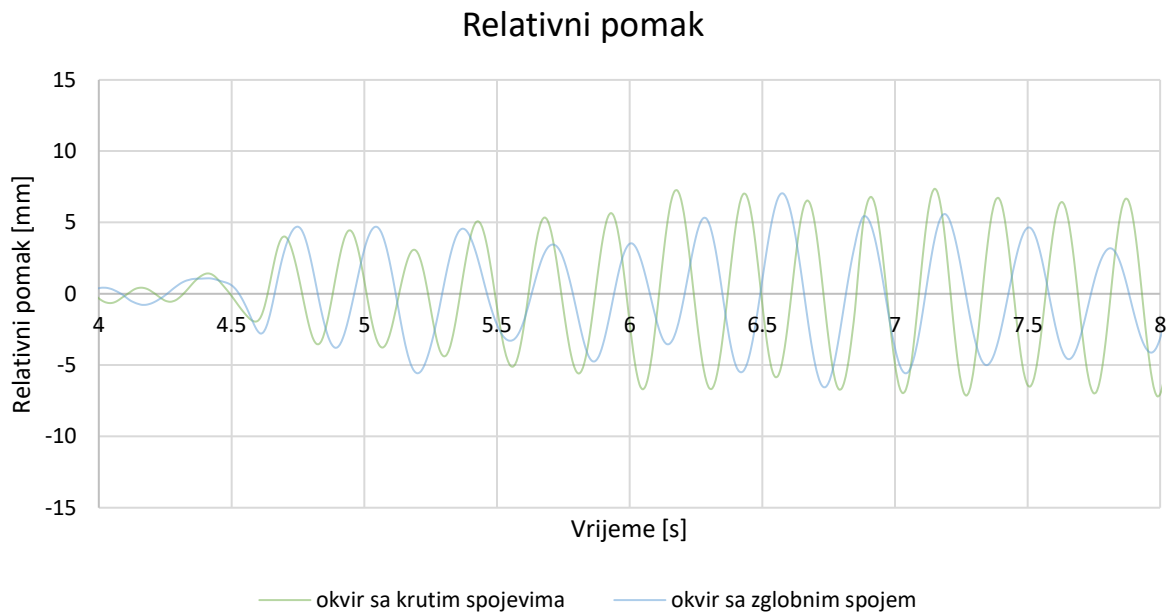
Kod potresnog zapisa El Centro imamo nešto drugačiju priču od svih dosadašnjih ispitivanja. Iz grafa je na prvu primjetno puno veće titranje okvira sa dva kruta spoja od onoga s jednim zglobnim spojem. To je sve više vidljivo prema kraju djelovanja potresa.

Sagledati ćemo vremenski period između četvrte i osme sekunde u kojem imamo velike amplitude titranja baze.



Slika 24: Potresni zapis El Centro sagledan u vremenskom periodu između 4. i 8. sekunde

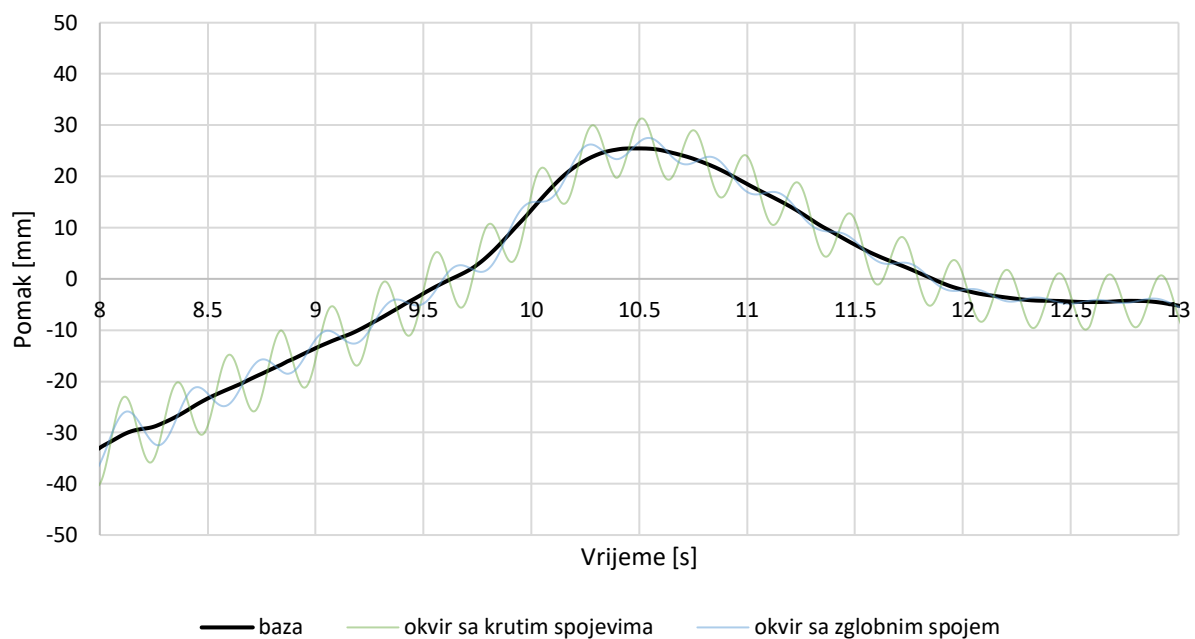
Kod velikih amplituda u potresu El Centro promjećujemo jako slične amplitude bez velikih oscilacija.



Slika 25: Relativni pomaci kod potresnog zapisa El Centro između sekunda 4 i 8

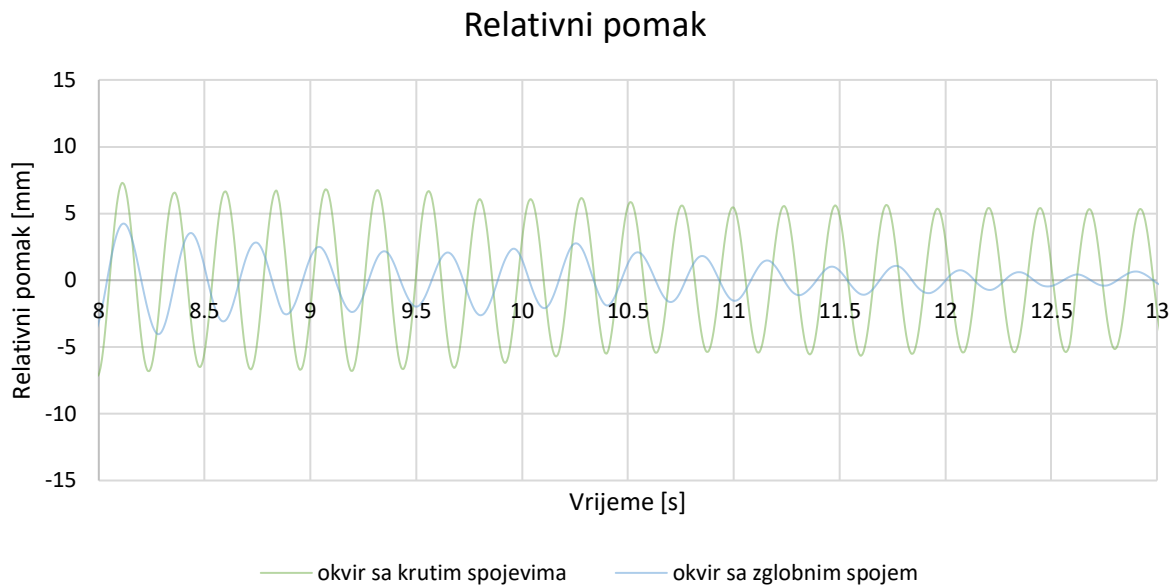
Ponovnom analizom maksimalnih amplituda na grafu relativnih pomaka oba okvira vidimo da nas je oko prevarilo na prvom grafu budući da je iz ovog grafa vidljivo kako se okvir sa zglobnim spojem povoljnije ponaša kroz djelovanje potresnog zapisa. Kroz sveukupni zapis ima manje amplitude te manju maksimalnu amplitudu kroz izdvojeni isječak.

## Potresni zapis El Centro



Slika 26: Isječak potresnog zapisa El Centro od 8.-13. sekunde

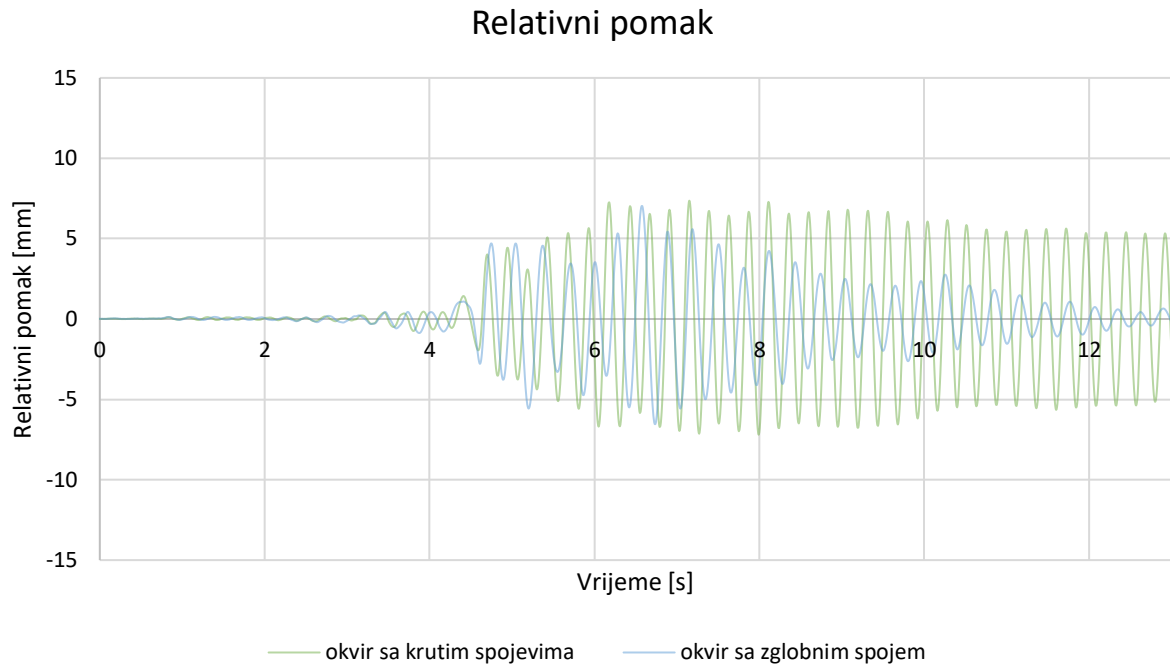
Kada na isti način sagledamo dio između osme i trinaeste sekunde jasan je obrazac većih amplituda okvira sa krutim spojevima te je u ovom isječku još više izražen.



Slika 27: Relativni pomak okvira kod potresnog zapisa El Centro između seunda 8 i 13

Promatrajući relativni pomak okvira između osme i trinaeste sekunde primjećujemo znatno smanjenje titranja zglobnog okvira (koji ima veće prigušenje) i veliko titranje okvira sa dvije krute veze koje vrlo sporo opada.

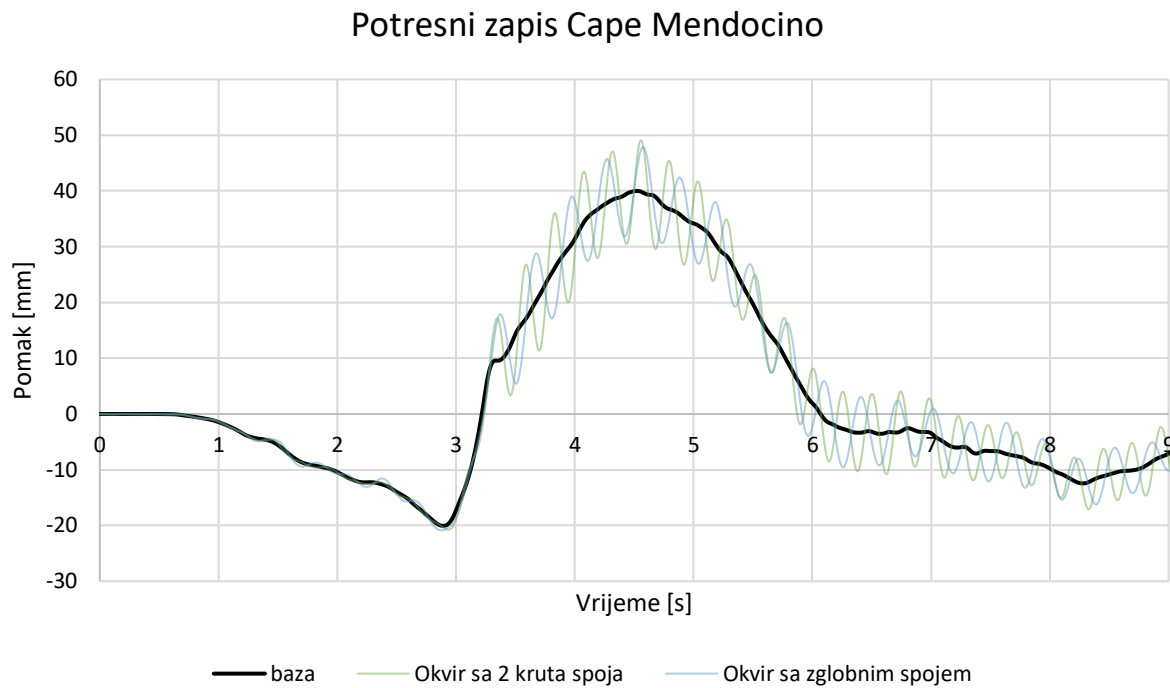




*Slika 28: Relativni pomak kod potresa El Centro*

Promatranjem zapisa od početka do kraja uočavamo da skoro pa nema oscilacija u prvih 4 sekunde zapisa. Između 4. i 6. sekunde uočavamo podjednaku pobudu u oba okvira koja nakon 6. sekunde opada u slučaju okvira sa zglobnom vezom, a u slučaju okvira sa dvije krute veze amplituda ostaje vrlo slična kao što je u 6. sekundi zapisa.

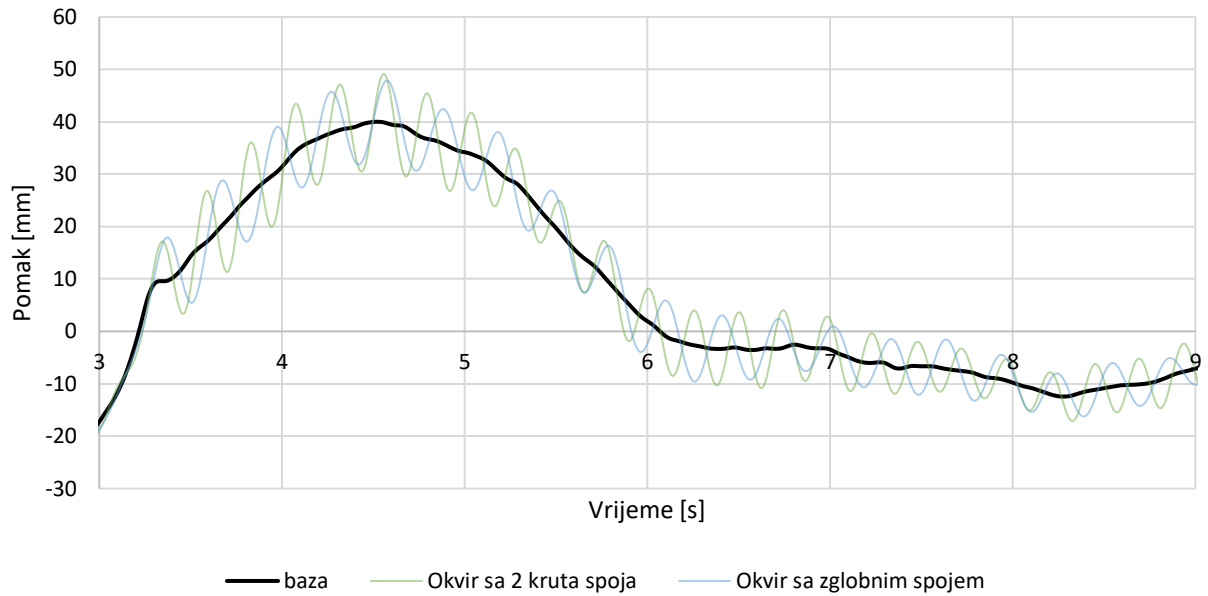
#### 7.4. Potres Cape Mendocino



Slika 29: Potresni zapis Cape Mendocino

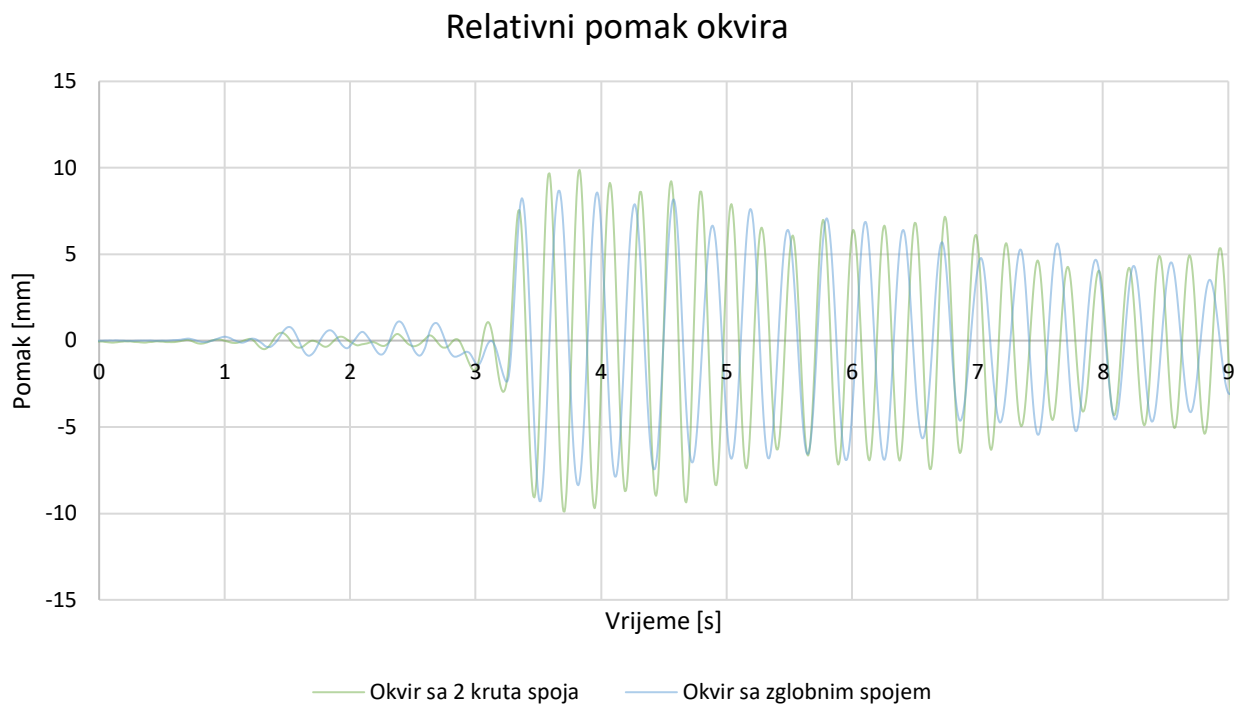
Potresni zapis Cape Mendocino je po amplitudama vrlo sličan potrsu Kobe gledajući po maksimalnim amplitudama titranja. One su vrlo slične kroz cijelo trajanje potresa do trenutka prestanka djelovanja potresnog zapisa.

### Potresni zapis Cape Mendocino



Slika 30: Isječak potresnog zapisa Cape mendocino između 3. i 9. sekunde

Za potvrdu smo izvukli isječak potresnog zapisa između treće i devete sekunde u kojemu se jasnije vidi velika sličnost u amplitudama.



Slika 31: Relativni pomak okvira kod potresnog zapisa Cape Mendocino

Kod pobližeg promatranja relativnih pomaka dvaju okvira koje promatramo dolazimo do zaključka da su oscilacije veoma slične. Vrijedi naglasiti kako je maksimalna amplituda nešto veća kod okvira sa dva kruta spoja što nam ipak govori da je, u ovom slučaju, okvir sa zglobnom vezom nešto povoljniji od okvira sa dvije krute veze.

## 8. Zaključak

Istraživanje koje smo provodili u ovom radu odnosi se na utvrđivanje razlike u ponašanju dva tipa okvira kada su podvrgnuti potresnoj pobudi.

Potres uzimamo u obzir kao pomak koji ima neki svoj zapis na grafu s apscisom vremena i ordinatom pomaka. Ideja ovog rada jest podvrgnuti svaki tip okvira na potresne zapise te snimati njihove oscilacije kako bismo im mogli usporediti ponašanje.

Okviri na kojima smo provodili ispitivanja su bili sačinjeni od dvije horizontalne ploče koje su međusobno spojene preko dvije vertikalne ploče sa sveukupno četiri spoja po okviru, odnosno dva spoja na gornjoj ploči i dva spoja na donjoj ploči. Bitna razlika između ta dva okvira jest da je jedan okvir ima četiri kruta spoja, a drugi tri kruta i jedan zglojni koji je nalazi na gornjoj ploči.

Ta dva okvira smo pričvrstili na potresni stol na kojemu smo dalje simulirali potrese tako što bismo izazvali pobudu stola prema stvarno zabilježenim potresnim zapisima. Cijele eksperimente smo snimali pomoću vrlo preciznog optičkog sustava za određivanje pomaka.

Nakon izlaganja oba okvira pobudama četiri poznata potresna zapisa dobili smo rezultate koji sugeriraju kako je okvir sa jednom zglojnom vezom skloniji većim maksimalnim amplitudama koje izazivaju veće deformacije u okviru što u konačnici rezultira većim silama u zidu.

Međutim, također smo zaključili da se kod okvira sa jednom zglojnom vezom brže prigušavaju oscilacije te okvir prije staje s osciliranjem od okvira sa krutim vezama. Ta pojava ima veze sa trenjem u zglojnom spoju budući da se kod trenja javlja toplina te se dobar dio kinetičke energije gubi u sustavu kroz toplinu, što rezultira većim prigušenjem, odnosno kraćim osciliranjem.

## 9. Literatura

- [1.] K. Chopra, DYNAMICS OF STRUCTURES: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Englewood Cliffs, New Jersey: PRENTICE GALL, 1981..
- [2.] Ponašanje jednokatnih modela konstrukcija s različitim vezama između zidova i ploče pod utjecajem seizmičke pobude podloge, Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2021. urn:nbn:hr:157:566477
- [3.] [https://www.pmf.unizg.hr/geof/popularizacija\\_geofizike/seizmoloski\\_pojmovnik](https://www.pmf.unizg.hr/geof/popularizacija_geofizike/seizmoloski_pojmovnik)
- [4.] [https://www.gradri.uniri.hr/files/Katalog\\_laboratorijske\\_i\\_terenske\\_opreme\\_GF\\_Rijeka.pdf](https://www.gradri.uniri.hr/files/Katalog_laboratorijske_i_terenske_opreme_GF_Rijeka.pdf)
- [5.] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=63782>