

# Utjecaj promjene mase i širine ploče jednokatnog modela na dinamički odgovor na pobudu podloge

---

Korpar, Lovro

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:157:921726>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Prijediplomski Sveučilišni studij  
Građevinarstvo  
Mehanika II**

**Lovro Korpar  
0114035332**

**Utjecaj promjene mase i širine ploče jednokatnog modela na dinamički odgovor na pobudu podloge**

**Završni rad**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Prijediplomski Sveučilišni studij  
Građevinarstvo  
Mehanika II**

**Lovro Korpar  
0114035332**

**Utjecaj promjene mase i širine ploče jednokatnog modela na dinamički odgovor na pobudu podloge**

**Završni rad**

**Rijeka, 19. rujna 2023.**

Zavod: **Zavod za nosive konstrukcije i tehničku mehaniku**  
Predmet: **Mehanika II**  
Grana: **2.15.06 tehnička mehanika (mehanika krutih i deformabilnih tijela)**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 26

Pristupnik: **Lovro Korpar (0114035332)**  
Studij: **Građevinarstvo**

Zadatak: **Utjecaj promjene mase i širine ploče jednokatnog modela na dinamički odgovor na pobudu podloge**

### Opis zadatka:

Opisati dinamičko ponašanje jednokatnog okvira s deformabilnim zidovima i krutom pločom na vrhu tijekom seizmičke pobude. Izvesti jednadžbu kretanja, objasniti dinamičke parametre i način unošenja pobude uslijed pomaka podloge. Komentirati utjecaj širine ploče na dinamičke karakteristike okvira. Isplanirati i provesti eksperimentalna ispitivanja ponašanja umanjenog okvirnog modela pri pobudi izvedenoj potresnim stolom. Mjerenja provesti optičkim mjernim sustavom, te obraditi rezultate. Usporediti eksperimentalno i analitički dobivene rezultate, analizirati rezultate i donijeti zaključke.

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.  
Rok za predaju rada: 19. rujna 2023.

Mentor: Doc. dr. sc. Nina Čeh

## **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.

---

Lovro Korpar

U Rijeci, 19. rujna 2023.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorici dr.sc. Nini Čeh na mentorstvu, uloženom trudu, dobroj volji, te pomoći oko izrade završnog rada. Također zahvaljujem se na dodatnom znanju kojeg sam stekao tokom izrade ovog završnog rada, te mogućnosti rada u laboratoriju.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, posebno mom pokojnom ocu bez čijih priča nebi upisao ovaj fakultet, te majci na najvećoj podršci koju čovjek može dobiti.

## SAŽETAK

Ovim završnim radom cilj je bio usporediti utjecaj promjene mase i širine ploče jednokatnog modela na dinamički odgovor na pobudu podloge. Izvedena je jednadžba kretanja i provedeno eksperimentalno ispitivanje problema.

Ukupno je provedeno pet laboratorijskih ispitivanja za dva različita umanjena jednokatna okvira koji su se nalazili na platformi potresnog stola. Najprije su laboratorijski ispitane slobodne oscilacije oba okvira zato što su iz njega određene njihove dinamičke karakteristike. Sljedeća četiri ispitivanja provodila su se za okvire pobuđene potresnim zapisima koji su se događali u prošlosti. Rezultati ispitivanja dobiveni optičkim mjernim metodama su analizirani te uspoređeni s analitičkim predikcijama.

Ključne riječi: potresna pobuda, laboratorijsko ispitivanje, promjena mase, pobuda podloge, jednokatni okvir, optički mjerni sustav.

## **ABSTRACT**

The objective of this final paper was to compare the influence of the change in mass and width of the single-story top panel on the dynamic response to base excitation. The equation of motion was derived and an experimental testing of the problem was carried out.

In total, five laboratory tests were conducted for two different small-scale single-story frames located on the platform of the shaking table. First laboratory examination of free oscillations of both frames were carried out and their dynamic characteristics were determined from it. The next four experiments were conducted for frames subjected to earthquake records from earthquakes that occurred in the past. The test results obtained by optical measurement methods were analyzed and compared with analytical predictions.

Key words: earthquake excitation, laboratory testing, mass change, foundation excitation, one-story frame, optical measuring system.



# Sadržaj

<b>Popis slika</b>	<b>ii</b>
<b>Popis tablica</b>	<b>iv</b>
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 POTRESI I NJIHOVI UTJECAJI NA GRAĐEVINE</b>	<b>2</b>
2.1 Zemlja i tektonika . . . . .	2
2.2 Potresi - uzrok i odziv . . . . .	4
2.3 Vrste seizmičkih valova . . . . .	4
2.4 Magnituda i intenzitet potresa . . . . .	5
2.5 Utjecaj potresa na građevine . . . . .	6
<b>3 JEDNADŽBA KRETANJA</b>	<b>11</b>
<b>4 OPIS OPREME I JEDNOKATNOG OKVIRA</b>	<b>15</b>
4.1 Laboratorijska oprema . . . . .	15
4.1.1 Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M . . . . .	15
4.1.2 Sustav od dvije dvoosne potresne platforme Quanser STI-III . . . . .	17
4.2 Jednokatni okvir . . . . .	18
<b>5 LABORATORIJSKA ISPITIVANJA I REZULTATI</b>	<b>21</b>
5.1 Rezultati ispitivanja . . . . .	21
5.2 Ispitivanje slobodnih oscilacija . . . . .	21
5.2.1 Okvir bez dodane mase . . . . .	22
5.2.2 Okvir sa dodanom masom . . . . .	24
5.3 Ispitivanja potresnih zapisa i usporedba rezultata . . . . .	26
5.3.1 Potresni zapis Northridge . . . . .	26
5.3.2 Potresni zapis Kobe . . . . .	28
5.3.3 Potresni zapis El Centro . . . . .	30
5.3.4 Cape Mandocino . . . . .	31

<b>6 ZAKLJUČAK</b>	<b>33</b>
<b>Literatura</b>	<b>34</b>

# Popis slika

2.1	Presjek Zemlje i konvekcijska strujanja u plaštu [1] . . . . .	3
2.2	Granice tektonskih ploča [2] . . . . .	3
2.3	Richterova ljestvica [3] . . . . .	5
2.4	Skraćeni opis opažanja prema stupnjevima Mercalli-Cancani-Sievergovoj ljestvici [4] . . . . .	6
2.5	Oštećena garaža, potres Northridge, USA 1994. god. [5] . . . . .	7
2.6	Teško oštećena zgrada, potres Kobe, Japan 1995. god., Katsumi Kasahara / Novinar [6] . . . . .	8
2.7	Zgrada Imperial County Service, El Centro, Kalifornija 1979. god. [7] . . . . .	9
2.8	Popušteni stupovi na zgradi Imperial County Service, El Centro, Kalifornija 1979. god. [8] . . . . .	10
2.9	Oštećena viktorijanska kuća, Fernadel, Kalifornija, 1992. god. [9] . . . . .	10
3.1	Deformiranje jednokatnog okvira pri pobudi potresom . . . . .	11
3.2	DST i DMA dijagrami . . . . .	12
4.1	Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M . . . . .	16
4.2	Potresna platforma . . . . .	17
4.3	Skica jednokatnih okvira različitih dimenzija . . . . .	18
4.4	Skica jednokatnog okvira i njegovih dijelova . . . . .	19
4.5	Jednokatni okviri na potresnom stolu, gledano s desna na lijevo; okviri 1, okvir 2 . . . . .	20
5.1	Grafički prikaz slobodnih oscilacija okvira 1 . . . . .	22
5.2	Grafički prikaz slobodnih oscilacija okvira 2 . . . . .	24
5.3	Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Northridge . . . . .	26
5.4	Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Northridge u vremenu od 2 do 7 sekundi . . . . .	26
5.5	Grafički prikaz relativnih pomaka okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Northridge . . . . .	27
5.6	Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Kobe . . . . .	28

5.7	Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Kobe u vremenu od 17 do 19 sekundi . . . . .	28
5.8	Grafički prikaz relativnih pomaka okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Kobe . . . . .	29
5.9	Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis El Centro	30
5.10	Grafički prikaz relativnih pomaka okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis El Centro . . . . .	30
5.11	Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Cape Mandocino . . . . .	31
5.12	Grafički prikaz relativnih pomaka okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Cape Mandocino . . . . .	31

# Popis tablica

4.1	Masa okvira 1 (bez dodane mase) . . . . .	19
4.2	Masa okvira 2 (sa dodanom masom) . . . . .	19
5.1	Vrijeme i pomak okvira 1 . . . . .	23
5.2	Vrijeme i pomak okvira 2 . . . . .	25

# 1. UVOD

Potres je iznenadna prirodna pojava kratkotrajnih vibracija površine Zemlje. Izazvana je spontanom i naglim oslobađanjem energije uslijed pokreta pojedinih dijelova Zemljine kore duž rasjeda. Istraživanjem potresa, odnosno seizmičkih valova bavi se geofizička disciplina seizmologija. Danas poznajemo razne vrste potresa, ali kao glavnim i najučestalijim potresima smatramo one koji su nastali kao posljedica tektonskih poremećaja koji izazivaju pucanje i vibracije na površini Zemlje, kao i na objektima. Nažalost, u zadnjih par godina desilo se puno jako razornih potresa u Republici Hrvatskoj, isto kao i u drugim državama. Uzimajući to u obzir, inženjeri građevine i ostalih srodnih disciplina sve više proučavaju potrese i njihov utjecaj na građevine. Jedna od stvari koja im jako pomaže u tome su laboratorijska ispitivanja, na umanjenim modelima.

U laboratorijskim ispitivanjima koriste se posebni modeli koji imitiraju konstrukciju pri pobudi potresa nanesejoj u kontroliranim uvjetima. Ti modeli mogu se modificirati na različite načine kako bi što bolje pomogli u istraživanjima. Na primjer, na modelima se mogu koristiti ploče različitih krutosti te se na njih mogu dodavati različiti damperi kojima se konstrukcija dodatno osigurava od potresa.

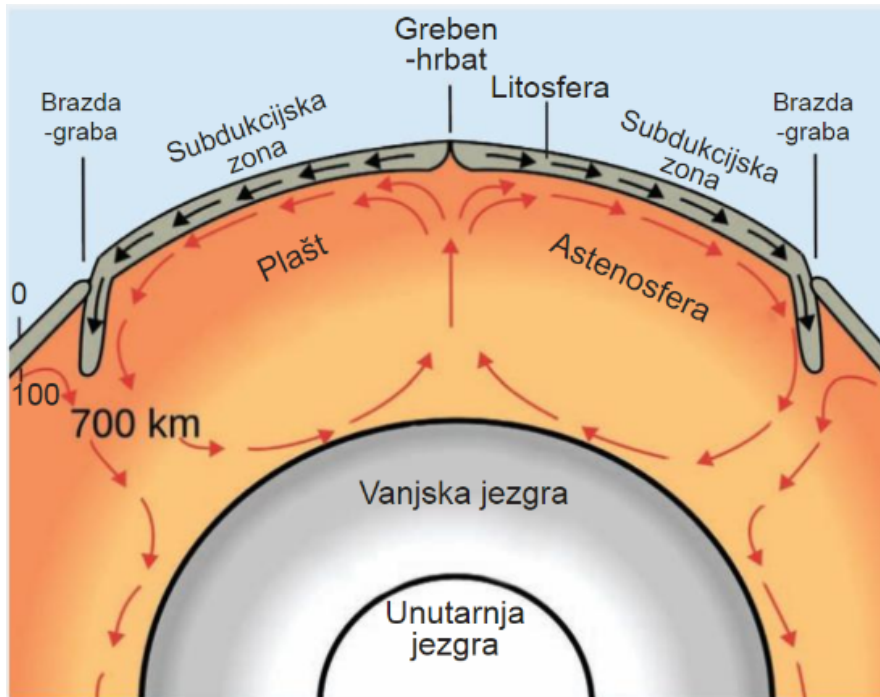
U ovom završnom radu prvenstveni će se proučavati promjena mase jednokatnog okvirnog sustava na dinamički odgovor na pobudu podloge. U obzir će se uzeti i promjena širine krute ploče, čije dimenzije zapravo ne utječu na dinamički odziv, stoga je u obzir uzeta samo promjena mase koja se javlja promjenom širine. Uz laboratorijska ispitivanja, dinamičke karakteristike će biti popraćene proračunom te objašnjenjima.

## **2. POTRESI I NJIHOVI UTJECAJI NA GRAĐEVINE**

Zemlja se povremeno potresa u obliku brzo izmjenjenih vibracija litosfere koje uzrokuju valovi koji prenose energiju u svim smjerovima iz nekog podzemnog žarišta (epicentra). Potrese, njihova žarišta, smjerove, vrijeme trajanja i jačinu ne možemo predvidjeti. Ali, kao pomoć razumijevanju potresa, služe nam seizmološke stanice na kojima se svake godine zabilježi preko milijun potresa diljem svijeta. Svi zabilježeni potresi su nam bitni, ali najbitniji su nam oni u naseljenim područjima. Kod potresa u naseljenim područjima možemo vidjeti odzive konstrukcija te u većini slučajeva nažalost i razaranja. Te stvari nam pomažu u budućem projektiranju konstrukcija i njihovom poboljšavanju. [10]

### **2.1 Zemlja i tektonika**

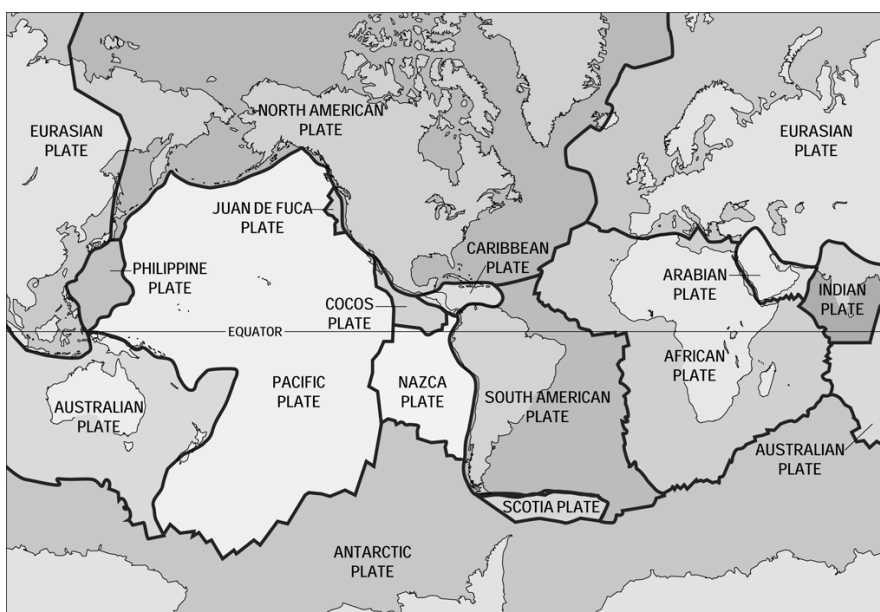
Da bismo razumjeli gdje i kako potresi nastaju prvo trebamo znati par stvari o Zemlji i njenoj unutrašnjosti. Zemlju po dubini možemo podijeliti na tri glavna dijela, a to su Zemljina kora, Zemljin plašt i Zemljina jezgra. Zemljina kora i gornji dio plašta tvore litosferu. Litosfera je kompleksan sustav jer se sastoji od više različitih materijala. Brzina širenja seizmičkih valova jako ovisi o materijalu kroz koji oni prolaze u litosferi. Ispod litosfere nalazi se astenosfera, koja je sastavljena od težih i gušćih stijena od onih koje izgrađuju Zemljinu koru. Samim time, brzina širenja seizmičkih valova u astenosferi brža je nego u litosferi. Prijelaz između litosfere i astenosfere naziva se Mohorovičićev diskontinuitet. Ime je dobio po hrvatskom geofizičaru Andriji Mohorovičiću koji ga je prvi otkrio. Mohorovičićev diskontinuitet je zapravo linija na kojoj dolazi do nagle promjene, tj. smanjenja brzine svih seizmičkih valova. Na još većoj dubini u površini Zemlje nalaze se gornji plašt (dubina oko 670 km) te donji plašt (dubina oko 2900 km), no oni nisu toliko bitni za istraživanje seizmičkih valova, zato što potresi nastaju na maksimalnoj dubini od oko 700 km. [1, 10]



Slika 2.1: Presjek Zemlje i konvekcijska strujanja u plaštu [1]

Tektonika je znanost o prostornom oblikovanju ili građi zemljine kore. Seizmolozi smatraju tektoniku jako bitnom za istraživanje potresa jer se najveći broj potresa dešava upravo pomicanjem tektonskih ploča.

Tektonika ploča znanstvena je teorija koja opisuje kretanje tektonskih ploča. Teorija tumači da Zemljina kora zajedno s gornjim plaštom pluta po polutekućoj astenosferi. No, obzirom da Zemljina kora nije homogena, ona se tim pomicanjem razdvaja u više manjih ili većih tektonskih ploča razdijeljenih rasjedima ili granicama. [1]



Slika 2.2: Granice tektonskih ploča [2]



Rasjede možemo podijeliti u tri kategorije:

- granice razmicanja ploča
- granice podvlačenja ploča
- transformni ili horizontalni rasjedi

Samim pomicanjem tektonskih ploča po različitim vrstama rasjeda nastaju potresi. [1]

## **2.2 Potresi - uzrok i odziv**

Kao što je već navedeno u uvodu ovog poglavlja, potresi su posljedica podrhtavanja Zemlje. Uzrok tim potresima su poremećaji u litosferi, koji su izazvani magmatskom aktivnošću, urušavanjem ili tektonskim poremećajima. Potresi nastali magmatskom aktivnošću i urušavanjem nam nisu u fokusu, zato što su njihova djelovanja jako mala i zanemariva za građevine. U fokusu su nam najviše tektonski potresi. Oni nastaju u žarištu, odakle se oslobađa seizmička energija te se u obliku valova širi u svim smjerovima. Tektonski potresi su zapravo vezani uz određene tektonske linije u litosferi i nastaju kao posljedica mehaničkih slomova stijena te njihovih pomaka duž rasjeda. Ovisno o dubini žarišta oni mogu biti plitki (dubina do 70 km), srednji (dubina od 70 km do 350 km), te duboki (dubina od 350 do 700 km). Mjesto na površini neposredno iznad žarišta naziva se epicentar. Tu su posljedice potresa najintenzivnije te najčešće najrazornije za građevine.

Seizmologija je znanost koja se bavi istraživanjem seizmičkih valova te samim time i cijelom potresnom aktivnošću. Instrument kojim se mjeri potresanje površina naziva se seizmograf. Rezultati mjerenja zapisuju se na seizmogramu. U Hrvatskoj postoji više seizmoloških postaja na kojima se izdaju zapisi o potresima i na kojima se prati potresna aktivnost. Preko tih postaja građane se obavještava o jačini i vremenu trajanja potresa, isto tako seizmološke postaje su jako bitne za građevinare zato što preko njih dobivamo sve željene i detaljne informacije o potresima. [1, 10, 11]

## **2.3 Vrste seizmičkih valova**

Potresi se prenašaju seizmičkim valovima koje dijelimo na:

- prostorne seizmičke valove
- površinske seizmičke valove

Prostorne seizmičke valove dijelimo na Primarne (P) valove i Sekundarne (S) valove. Oni se iz žarišta potresa šire u svim smjerovima kroz Zemljinu unutrašnjost.

Primarni valovi su valovi koji se najbrže šire kroz unutrašnjost Zemlje te prvi dolaze do seizmoloških postaja. Razlog tome je što se oni gibaju longitudinalno, ali bez obzira na veliku brzinu, ne uzrokuju velike štete.

Sekundarni valovi su valovi koji se sporije šire kroz unutrašnjost Zemlje te samim time i kasnije dolaze do seizmičkih postaja. Gibaju se sporije jer se šire transversalno te kasnije dolaze do seizmoloških postaja.

Površinski seizmički valovi šire se jako blizu Zemljine površine. Njihova brzina širenja je puno sporija od prostornih seizmičkih valova te su samim time puno razorniji za građevine. Dijelimo ih na Loveove (L) valove i na Rayleighove valove.

Loveovi valovi šire se jedino u horizontalnoj ravnini, s lijeva na desno. Oni su jako opasni za temelje građevina zato što ih presijecaju i naglo oštećuju.

Rayleighovi valovi šire se u obliku elipse, obrnuto od kazaljke na satu. Rayleighovi valovi kreću se najsporije te zbog toga imaju najrazorniji učinak na građevine. [1, 10, 11]

## 2.4 Magnituda i intenzitet potresa

Postoje dva načina određivanja jačine potresa: prvi način je određivanje magnitude potresa, a drugi način je određivanje intenziteta.

Magnituda potresa je broj koji opisuje veličinu ili količinu oslobođene energije potresa. Ona se određuje preko seizmografa, tj. mjerenjem najveće amplitude na seizmogramu. Magnituda se opisuje na Richeterovoj ljestvici. Richeterova ljestvica opisana je brojevima od 0 do 10. To je logaritamska ljestvica na kojoj su prikazane magnitude potresa te opis njihove jačine i njihovih učestalosti. [4]

Richterove magnitude	Opis potresa	Učinci djelovanja potresa	Učestalost pojave
Ispod 2,0	Mikro	Mikropotresi, ne osjećaju se.	Oko 8.000 po danu
2,0 – 2,9	Manji	Općenito se ne osjete, ali bilježe ih seizmografi.	Oko 1.000 po danu
3,0 – 3,9		Često se osjete, no rijetko uzrokuju štetu.	49.000 godišnje (procjena)
4,0 – 4,9	Lagani	Osjetna drmanja pokućanstva, zvukovi trešnje. Značajnija oštećenja rijetka.	6.200 godišnje (procjena)
5,0 – 5,9	Umjereni	Uzrokuje štetu na slabijim građevinama u ruralnim regijama, moguća manja šteta kod modernih zgrada.	800 godišnje
6,0 – 6,9	Jaki	Može izazvati štete u naseljenim područjima 160 km od epicentra.	120 godišnje
7,0 – 7,9	Veliki	Uzrokuje ozbiljnu štetu na velikom području.	18 godišnje
8,0 – 8,9	Razarajući	Može prouzrokovati golemu štetu i po tisuću kilometara od epicetra.	1 godišnje
9,0 – 9,9		Katastrofalni potres koji uništava većinu objekata u krugu od nekoliko tisuća kilometara.	1 u 20 godina
10,0+	Epski	Nikada nisu zabilježeni.	Ekstremno rijetki (nepoznati)

Slika 2.3: Richeterova ljestvica [3]

Intenzitet potresa je subjektivniji način određivanja jakosti potresa. On se određuje na temelju prikupljanja podataka od ljudi koji su svjedočili potresu. Intenzitet potresa izražava se različitim ljestvicama, no najpopularnija je Mercalli-Cancani-Siebergova (MCS) ljestvica. MSC ljestvica ima 12 stupnjeva, a svaki stupanj opisuje određenu jačinu potresa. U Hrvatskoj se MSC ljestvica koristi za brzu procjenu jačine potresa, dok

se za detaljnije određivanje koristi Medvedev-Sponheuer-Karinkova (MSK) ljestvica. Najveći problem ovakve ljestvice kod određivanja intenziteta potresa koji se dogodio u nenaseljenom području gdje nema svjedoka je činjenica da se takav potres mora proglasiti potresom 1. stupnja (nezamjetljiv potres). [4]

Stupanj	Naziv	Kratki opis karakteristika ljestvice MCS
I °	Nezamjetljiv potres	Bilježe ga jedino seizmografi.
II °	Jedva osjetan potres	Osjeti se samo u gornjim katovima visokih zgrada.
III °	Lagan potres	Tlo podrhtava kao kad ulicom prođe automobil.
IV °	Umjeren potres	Prozorska okna i staklenina zveče kao da je prošao težak teretni automobil.
V °	Prilično jak potres	Njišu se slike na zidu. Samo pojedinci bježe na ulicu.
VI °	Jak potres	Slike padaju sa zida, ormari se pomiču i prevrću. Ljudi bježe na ulicu.
VII °	Vrlo jak potres	Ruše se dimnjaci, crjepovi padaju sa krova, kućni zidovi pucaju.
VIII °	Razoran potres	Slabije građene kuće se ruše, a jače građene oštećuju. Tlo puca.
IX °	Pustošni potres	Kuće se teško oštećuju i ruše. Nastaju velike pukotine, klizišta i odroni zemlje.
X °	Uništavajući potres	Većina se kuća ruši do temelja, ruše se mostovi i brane. Izbija podzemna voda.
XI °	Katastrofalan potres	Srušena je velika većina zgrada i drugih građevina. Kidaju se i ruše stijene.
XII °	Veliki katastrofalan potres	Do temelja se ruši sve što je čovjek izgradio. Mijenja izgled krajolika, rijeke mijenjaju korito, jezera nestaju ili nastaju.

Slika 2.4: Skraćeni opis opažanja prema stupnjevima Mercalli-Cancani-Siebergovoj ljestvici [4]

## 2.5 Utjecaj potresa na građevine

Utjecaj potresa na građevine je široka znanstvena djelatnost koja dugi niz godina okuplja inženjere građevine diljem svijeta, a pogotovo u područjima velike seizmičke aktivnosti. Sve veća gustoća naseljenosti i urbanizacija dovode do veće vjerojatnosti ugrožavanja ljudskih života te šteta na građevinama, koje mogu biti prouzročene nekim budućim potresom. Potres je prirodna pojava nepredvidivog karaktera, a njegove posljedice, nažalost, mogu biti jako razorne i napraviti velike katastrofe. Također, potres je prirodna pojava čije djelovanje čovjek ne može spriječiti, ali ga može ublažiti. Isto tako, potrebno je napomenuti da jedan dio šteta na građevinama nastaje kao direktna posljedica dinamičkog odgovora konstrukcije na kretanje tla. Puno štete na građevinama nastaje nakon katastrofe, a to su požari, slijeganje i klizanje tla, lavine, poplave,

i sl. Očito je da potresi imaju veliko djelovanje na čovjeka i njegovu okolinu te se radi toga diljem svijeta ulaže mnogo sredstava u njihovo istraživanje. [12]

Postoji mnogo primjera oštećenih i urušenih građevina od posljedica potresa u prošlosti. Neke od tih potresa i građevina ćemo obraditi u ovom poglavlju te nakon toga napraviti laboratorijska ispitivanja sa njihovim rezultatima mjerenja zapisanim na seizmogramu. [12]

Potres Northridge desio se 17. siječnja 1994. godine u dolini San Fernando u južnoj Kaliforniji, SAD. Ovaj potres bio je najdestruktivniji u Kaliforniji od potresa u San Franciscu, 1906. godine. Epicentar potresa bio je u predgrađu Reseda, trajao je 10-20 sekundi, a magnituda je bila 6,7. Štete na građevinama bile su jako velike, ali ih nije bilo puno koje su se srušile u potpunosti. No, preko deset tisuća građevina bilo je označeno crvenom bojom, što znači da su nesigurne i potrebno ih je srušiti. Sveukupan broj oštećenih i srušenih građevina prešao je 87 400. [13]



Slika 2.5: Oštećena garaža, potres Northridge, USA 1994. god. [5]

Veliki Hanshin potres, ili potres u Kobeu, desio se 17. siječnja 1995. godine u južnom dijelu Hyogo Prefektura u Japanu. Ovaj potres, koji je uključivao i regiju Hanshin, trajao je oko 20 sekundi, a najveća magnituda bila je 6,9 (7,3 na Richterovoj skali). Epicentar je bio u sjevernom dijelu otoka Awaji, 20 kilometra od grada Kobe, a žarište potresa nalazilo se samo 17 kilometara ispod epicentra. Velik broj građevina bio je srušen, no građevine koje su bile izgrađene po novim normama ostale su čitave i podnjele su dinamička opterećenja. [14] Jedna građevina koja je stradala u potresu nalazi se na slici 2.6. Osnovni razlog rušenja zgrade sa slike (2.6) je nesimetrično postavljanje krute jezgre, što je dovelo do velikih torzijskih deformacija cijele zgrade i popuštanja relativno mekih stupova na rubu. [12]



Slika 2.6: Teško oštećena zgrada, potres Kobe, Japan 1995. god., Katsumi Kasahara / Novinar [6]

Potres Imperial Valley koji se desio 15. listopada 1979. godine bio je najveći potres u Kaliforniji tog desetljeća. Potres je bio magnitude 6,5 te mu je epicentar bio u sjevernom Meksiku, a najviše štete na građevinama bilo je u gradu El Centro. Potres se osjetio od grada Las Vegas pa sve do Tihog oceana. Zgrada Imperial County Service, koja se nalazi na slici 2.7, jedna je od mnogih koje su nastradale u potresu. Najveći problem armirano-betonske zgrade bili su stupovi koji su se nalazili na istočnoj strani zgrade. Svi stupovi u redu popustili su te je prvi kat zgrade pao za čak 30 cm (slika 2.8). [7]



Slika 2.7: Zgrada Imperial County Service, El Centro, Kalifornija 1979. god. [7]



Slika 2.8: Popušteni stupovi na zgradi Imperial County Service, El Centro, Kalifornija 1979. god. [8]

Serijski potresi u Cape Mendocinu desili se 25. travnja 1992. godine. Cape Mendocino zadesila su čak tri uzastopna potresa. Prvi i najjači bio je magnitude 7,2 - dok su sljedeća dva potresa bila magnitude 6,5. Sreća je bila da Cape Mendocino nije naseljeno područje. Najveća šteta bila je u gradu Fernadel koji je udaljen oko 30 kilometara od epicentra. Nažalost, u gradu su bile oštećene 32 građevine, od kojih je jedna viktorijanska kuća (slika 2.9), koja se pomaknula i dimnjak se razdvojio od kuće. Prije potresa dimnjak se nalazio na mjestu gdje je sada siva traka. [15]

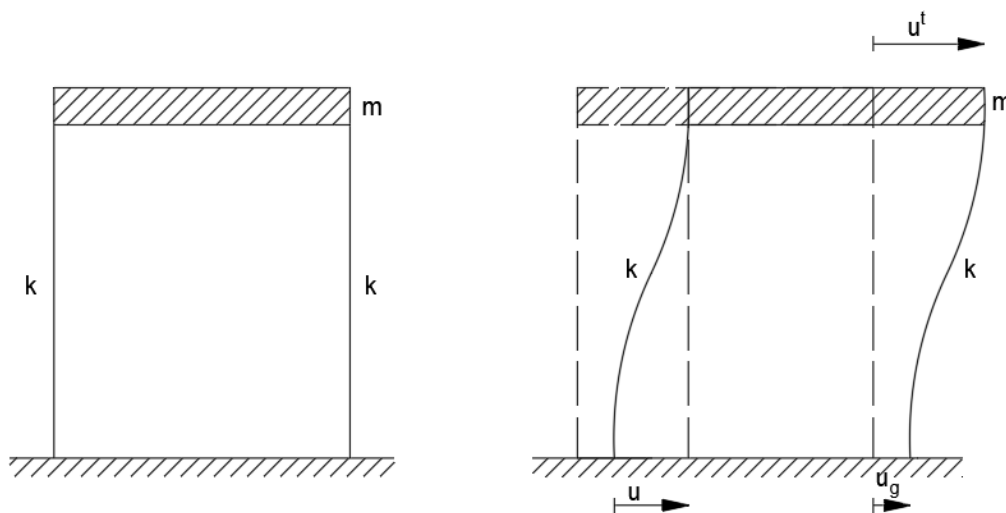


Slika 2.9: Oštećena viktorijanska kuća, Fernadel, Kalifornija, 1992. god. [9]

### 3. JEDNADŽBA KRETANJA

U laboratorijskim ispitivanjima za bolje shvaćanje djelovanja potresa na konstrukcije, koristi se jednokatni okvir na kojeg utječe pomicanje podloge (potres). Jednokatni okvir s krutom pločom koji mi promatramo ima samo jedan stupanj slobode, a to je horizontalni pomak ploče. Budući da nas zanima utjecaj promjene mase i širine ploče jednokatnog okvira na njegov dinamički odgovor, jednokatne okvire ćemo ispitivati samo na dinamičku pobudu podloge, bez nanošenja ostalih vanjskih sila. Sukladno tome, jednadžbu kretanja dobit ćemo iz drugog Newtonovog zakona, kojim ćemo izjednačiti dijagram slobodnog tijela (DST) s dijagramom masa puta akceleracija (DMA) (slika 3.2). [16, 17]

Na slici 3.1 prikazana je skica jednokatnog okvira kojeg upotrebljavamo u laboratorijskom ispitivanju. S lijeve strane okvir je u nedeformiranom stanju, a s desne strane on je u deformiranom stanju.



Slika 3.1: Deformiranje jednokatnog okvira pri pobudi potresom



Članovi na slici 3.1 jesu:

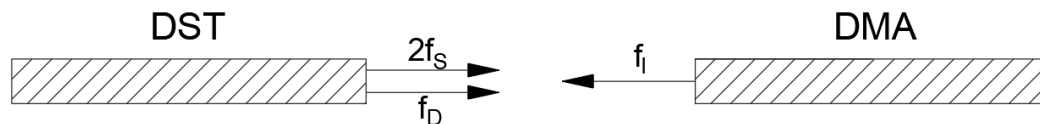
$m$  - masa [kg],

$k$  - krutost [N/m],

$u$  - relativni pomak okvira [m],

$u^t$  - ukupni pomak [m],

$u_g$  - pomak tla (podloge) [m].



Slika 3.2: DST i DMA dijagrami

Kada izjednačimo DST i DMA dijagram dobivamo:

$$2f_s + f_D = -f_I, \quad (3.1)$$

gdje su:

$2f_s$  - elastična sila od zidova jedokatnog okvira [N] (NAPOMENA: U nastavku proračuna  $2f_s$  biti će  $f_s$  zbog toga što je krutost oba zida dana kao jedna vijednost prije početka pokusa.),

$f_D$  - sila prigušenja [N],

$f_I$  - sila inercije [N].

Elastična sila jednaka je:

$$f_s = k * u. \quad (3.2)$$

Sila prigušenja proporcionalna je brzini:

$$f_D = c * \dot{u}, \quad (3.3)$$

a sila inercije jednaka je:

$$f_I = m * \ddot{u}^t, \quad (3.4)$$

gdje su:

$c$  - koeficijent viskoznog prigušenja,

$\dot{u}$  - brzina [m/s],

$\ddot{u}$  - ubrzanje [ $m/s^2$ ].

Uvrštavanjem jednakosti sila, slijedi:

$$k * u + c * \dot{u} = -m * \ddot{u}^t, \quad (3.5)$$

odnosno:

$$k * u + c * \dot{u} + m * \ddot{u}^t = 0. \quad (3.6)$$

Iz slike (3.1) vidimo da je ukupni pomak  $u^t$  jednak zbroju pomaka tla i relativnog pomaka okvira:

$$u^t = u_g + u. \quad (3.7)$$

Deriviranjem jednažbe (3.7) dobivamo:

$$\dot{u}^t = \dot{u}_g + \dot{u}, \quad (3.8)$$

gdje su:

$\dot{u}^t$  - ukupna brzina [m/s],

$\dot{u}_g$  - brzina tla (podloge) [m/s],

$\dot{u}$  - relativna brzina okvira [m/s],

te iz druge derivacije slijedi:

$$\ddot{u}^t = \ddot{u}_g + \ddot{u}, \quad (3.9)$$

gdje su:

$\ddot{u}^t$  - ukupno ubrzanje [ $m/s^2$ ],

$\ddot{u}_g$  - ubrzanje tla (podloge) [ $m/s^2$ ],

$\ddot{u}$  - relativno ubrzanje okvira [ $m/s^2$ ].

Uvrštavanjem jednažbe (3.9) u jednažbu (3.6) dobivamo:

$$k * u + c * \dot{u} + m * (\ddot{u}_g + \ddot{u}) = 0, \quad (3.10)$$

odnosno:

$$k * u + c * \dot{u} + m * \ddot{u} = -m * \ddot{u}_g. \quad (3.11)$$

Putem ovih izraza dobili smo jednažbu kretanja koja nam je potrebna za daljnji proračun.

Sve vrijednosti u jednažbi smo ili odredili iz dimenzija konstrukcije (masa i krutost zidova), ili ćemo ih dobiti rezultatima mjerenja. Jedina nepoznanica nam je koeficijent viskoznog prigušenja za kojeg slijedi objašnjenje i izvod formule.

Koeficijent viskoznog prigušenja jest:

$$c = \zeta * \omega * 2m, \quad (3.12)$$

gdje su:

$\zeta$  - prigušenje,

$\omega$  - kružna frekvencija [ $\frac{rad}{s}$ ].

Prigušenje ne možemo odrediti analitički, već ga određujemo iz rezultata koje dobivamo iz laboratorijskog ispitivanja slobodnih oscilacija okvira. Ono zapravo opisuje razliku između dvaju uzastopnih brijegova amplitude.

Stoga, izraz za prigušenje glasi:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{u_i}{u_{i+j}}, \quad (3.13)$$

gdje su:

$u_i, u_{i+j}$  - uzastopne amplitude valova.

Kružna frekvencija:

$$\omega = 2 * \pi * f, \quad (3.14)$$

ili

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (3.15)$$

gdje je:

$f$  - vlastita frekvencija [ $s^{-1}$ ].

Vlastitu frekvenciju dobivamo kao:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (3.16)$$

gdje je:

$T$  - period [s].

Period  $T$  možemo dobiti iz vremenske razlike dvaju susjednih brijegova amplitude, iz rezultata ispitivanja slobodnih oscilacija ili uvrštavanjem jednažbe (3.16) u jednažbu (3.14), te dobivamo:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (3.17)$$

[16, 17]

# 4. OPIS OPREME I JEDNOKATNOG OKVIRA

## 4.1 Laboratorijska oprema

Slijedi objašnjenje rada i tehničke karakteristike opreme koja će se koristiti za laboratorijska ispitivanja.

### 4.1.1 Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M

Optički mjerni sustav sastoji se od mjerne glave s dvije kamere, kablova, nosača, kalibracijskog objekta, para leća, laserskog pokazivača, kofera, LED osvjetljenja i foto ćelija.

Sustav kamera koristi se za 3D beskontaktno optičko mjerenje pomaka i deformacija. Prije početka snimanja pokusa potrebno je napraviti kalibraciju kamera, odnosno ovisno o veličini objekta koji se snima, potrebno ih je namjestiti na određenu udaljenost i kut snimanja. Kamere snimaju cijeli tijek pokusa. Na temelju praćenja objekta koje snimaju, u našem slučaju jednokatnog okvira, kao rezultat daju podatke o položaju točaka na površini jednokatnog okvira. Točke koje se prate su zapravo crno-bijele referentne točke koje se lijepe na površinu jednokatnog okvira i podloge, kako bi ih kamere mogle pratiti u svim fotografijama koje one snime. Obzirom na to da na model stavljamo referentne točke, prva fotografija u nizu naziva se referentna fotografija, a nakon nje slijedi niz fotografija kojima određujemo rezultate mjerenja.

Tehničke karakteristike:

- mogućnost snimanja do 168 fps rezolucijom od 2400 x 1728 piksela, te do 1300 fps rezolucijom od 2400 x 168 piksela,
- jedan par leća žarišne dužine 20 mm pogodan za mjerne volumene od 125 x 90  $mm^2$  do 2150 x 1600  $mm^2$ ,
- kalibracijski objekt za snimanje mjernog volumena od 350 x 260  $mm^2$  do 500 x 370  $mm^2$ . [18]



Slika 4.1: Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M

## 4.1.2 Sustav od dvije dvoosne potresne platforme Quanser STI-III

Sustav od dvije dvoosne potresne platforme Quanser STI-III je pokretan elektromagnetskim motorom. Sustav se sastoji od kontrolne *hardware* ploče sa potrebnim *software-om* te od podložne ploče za dvoosne platforme.

Sustav služi za modelska ispitivanja na utjecaj dinamičke pobude. Dvije platforme se mogu koristiti odvojeno i neovisne su jedna o drugoj. Moguće je izvoditi dva ispitivanja istovremeno, ali i zajedno, na način da model bude oslonjen na obje platforme. Pri korištenju platformi istovremeno dopuštena je veća maksimalna masa, a pobuda koju one proizvode može biti jednaka (sinkroni rad) ili različita (asinkroni rad). [18]

Tehničke karakteristike:

- tlocrtna dimenzija svake platforme  $625 \times 625 \text{ mm}^2$ ,
- 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 2,8g u x smjeru i 4,5g u y smjeru,
- osna udaljenost platformi može biti od 1 m do 2,5 m. [18]

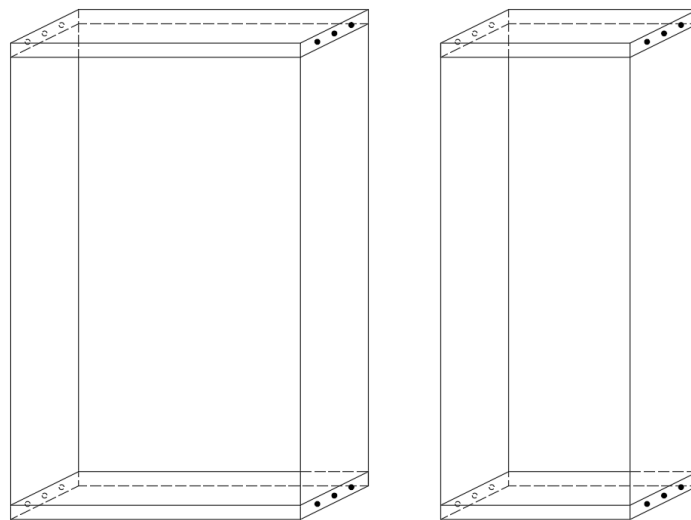


Slika 4.2: Potresna platforma

## 4.2 Jednokatni okvir

Za izvedbu laboratorijskih ispitivanja korišten je jednokatni okvir. On se sastoji od dvije krute ploče, dvije metalne ploče (zidovi), vijaka te podložnih pločica koje se nalaze između krutih i metalnih ploča (slika 4.4).

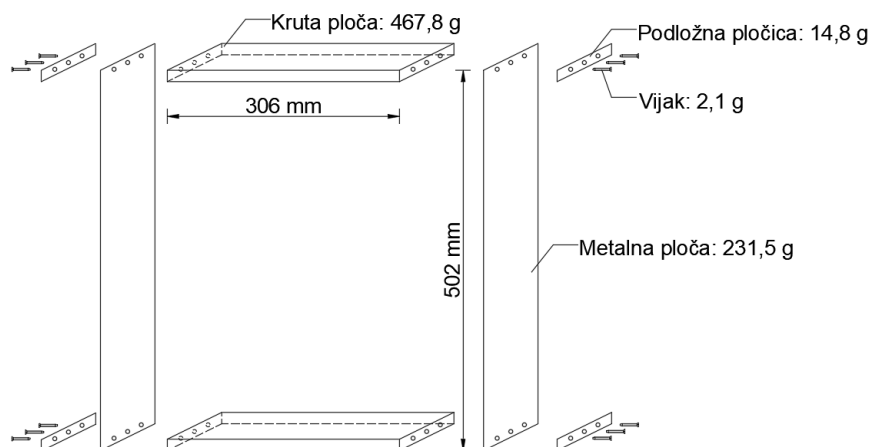
Tema završnog rada je promjena mase i širine jednokatnog okvira, no s obzirom da promjena širine jednokatnog okvira nema nikakvog utjecaja na dinamičku pobudu, te samo promjena mase kod šire ploče utječe na dinamički odgovor, okvir smo ostavili istih dimenzija. To možemo zaključiti iz jednadžbe (3.11) gdje vidimo da u njoj nema nikakvih članova sa dimenzijama same ploče. To znači da umjesto da smo masu okvira promijenili promjenom dimenzija krute ploče (slika 4.3), nju ćemo promijeniti dodavanjem dodatne mase na okvir istih dimenzija.



Slika 4.3: Skica jednokatnih okvira različitih dimenzija

Ukupna masa okvira iznosi 1483 grama, no obzirom da je donja kruta ploča povezana sa potresnom platformom, nju možemo zanemariti, isto kao i ostatak donje polovice okvira koji smatramo da ne oscilira. Kada to uzmemo u obzir, ukupna masa okvira koja nam je potrebna za daljnji proračun iznosi 741,5 grama.

Obzirom da laboratorijskim ispitivanjima želimo saznati kako promjena mase okvira utječe na dinamičku pobudu, drugom okviru dodali smo dva utega od kojih svaki ima težinu 1 N, tj. 101,97 grama. Dakle, ukupna masa drugog okvira iznosi 945,44 grama.



Slika 4.4: Skica jednokatnog okvira i njegovih dijelova

Element	Komad	Masa [g]	Ukupna masa [g]
Kruta ploča	2	467,8	935,6
Metalna ploča	2	231,5	463
Podložna pločica	4	14,8	59,2
Vijak	12	2,1	25,2
Ukupna masa okvira			1483
Ukupna masa gornjeg dijela okvira			741,5

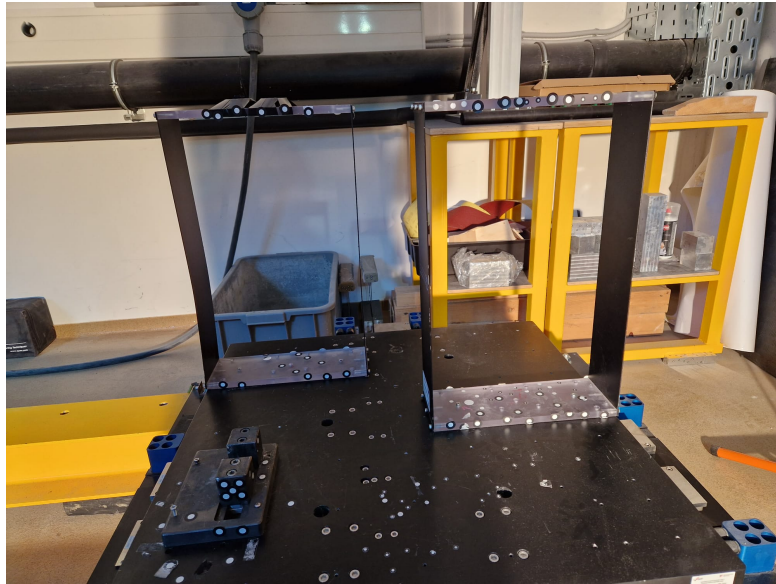
Tablica 4.1: Masa okvira 1 (bez dodane mase)

Element	Komad	Masa [g]	Ukupna masa [g]
Kruta ploča	2	467,8	935,6
Metalna ploča	2	231,5	463
Podložna pločica	4	14,8	59,2
Vijak	12	2,1	25,2
Uteg	2	101,97	203,94
Ukupna masa okvira			1686,94
Ukupna masa gornjeg dijela okvira			945,44

Tablica 4.2: Masa okvira 2 (sa dodanom masom)



Prilikom izvođenja laboratorijskih ispitivanja korištena su dva jednokatna okvira (slika 4.5). Okvire smo istovremeno ispitivali na istoj potresnoj platformi kako bismo vidjeli odgovore jednokatnih okvira na istu potresnu pobudu. Okvire smo ispitivali istovremeno kako bi smo dobili točnije rezultate ispitivanja (ako bi smo ih ispitivali odvojeno, ne bismo nužno dobili istu pobudu podloge).



Slika 4.5: Jednokatni okviri na potresnom stolu, gledano s desna na lijevo; okvir 1, okvir 2

Okvir 1 (slika 4.5, desno) je bez dodane mase, njega ćemo usporediti sa okvirom 2 na kojem je dodana masa od 2 N (slika 4.5, lijevo) te ćemo njega vidjeti kako promjena mase utječe na dinamički odgovor konstrukcije na pobudu podloge.

# 5. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA I REZULTATI

Laboratorijska ispitivanja provodili smo na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci u Laboratoriju za konstrukcije. Za ispitivanja smo koristili potresnu platformu (opisano u poglavlju 4.1.2), optički mjerni sustav GOM (opisano u poglavlju 4.1.1), te dva jednokatna okvira (opisano u poglavlju 4.2), a za obradu optičkih podataka koristio se program ARAMIS professional.

Ukupno je provedeno pet laboratorijskih ispitivanja. Koristila su se dva jednokatna okvira koji su se ispitivali istovremeno (Slika 4.5). Za oba okvira nanosile su se iste funkcije pomaka.

U prvom ispitivanju promatrali smo slobodne oscilacije okvira. Potresni stol bio je u stanju mirovanja, a okvire smo pomaknuli rukom te simulirali slobodne oscilacije. U drugom ispitivanju koristili smo se potresnim zapisom Northbridge. Za treće ispitivanje koristi smo potresni zapis Kobe, a u četvrtom ispitivanju potresni zapis El Centro. Za peto ispitivanje koristili smo potresni zapis Cape Mandocio. Informacije o ovim potresima opisane su u poglavlju 2.5.

## 5.1 Rezultati ispitivanja

U nastavku su prikazani rezultati svih provedenih ispitivanja. Prvo će biti prikazani proračuni dinamičkih karakteristika oba okvira iz ispitivanja slobodnih oscilacija te nakon toga usporedba rezultata ispitivanja potresnih zapisa.

## 5.2 Ispitivanje slobodnih oscilacija

Ispitivanje slobodnih oscilacija bilo nam je bito zato što iz njega možemo dobiti sve dinamičke karakteristike koje nas zanimaju za oba okvira. U nastavku slijedi postupak i objašnjenje proračuna.

## 5.2.1 Okvir bez dodane mase

Uz dobivenu krutost zidova koja iznosi 541,3 N/m i mase (tablica 4.1) možemo izračunati kružnu frekvenciju  $\omega$ , period  $T$ , te vlastitu frekvenciju  $f$ .

Uvrštavanjem krutosti i mase u jednadžbu (3.15) kružna frekvencija iznosi:

$$\omega = \sqrt{\frac{541,3}{0,7415}} = 27,02 \text{ rad/s.} \quad (5.1)$$

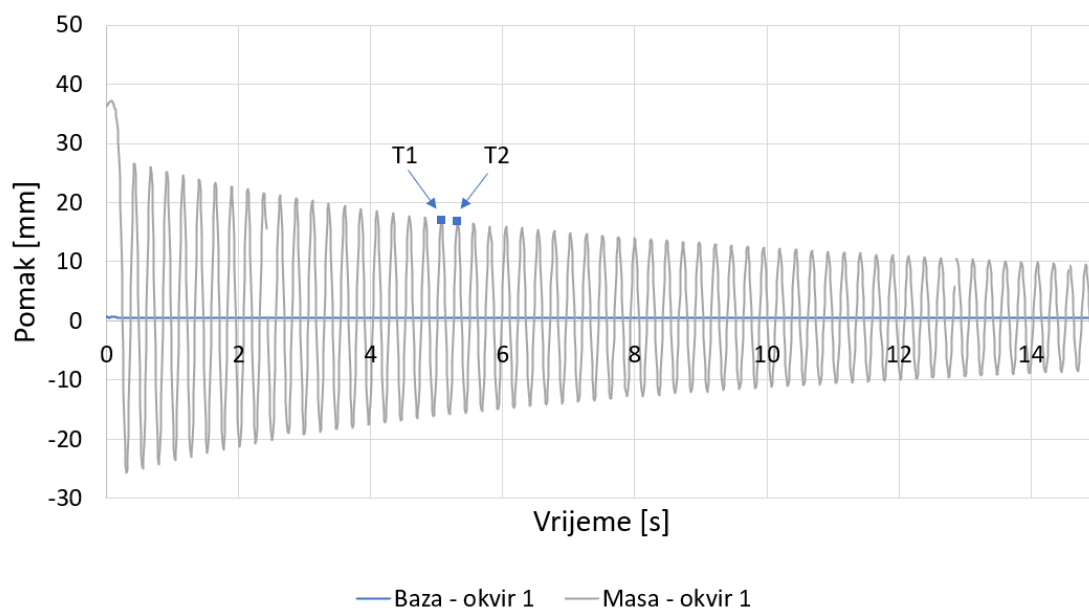
Zatim uvrštavanjem kružne frekvencije u jednadžbu (3.17) dobivamo period  $T$ :

$$T = \frac{2\pi}{27,02} = 0,23 \text{ s.} \quad (5.2)$$

A vlastitu frekvenciju dobivamo uvrštavanjem perioda  $T$  u jednadžbu (3.16):

$$f = \frac{1}{0,23} = 4,35 \text{ s}^{-1}. \quad (5.3)$$

Kako bismo izračunali prigušenje okvira potrebni su nam rezultati mjerenja prikazani na slici 5.1. Iz vremenske razlike između dva susjedna brijega ponovo možemo dobiti period  $T$ , te slijedi daljnji analitički proračun.



Slika 5.1: Grafički prikaz slobodnih oscilacija okvira 1

Vrijednosti vremena i pomaka izvući ćemo iz zapisa koji smo dobili obradom podataka (slika 5.1).

Točka	Vrijeme [s]	Pomak [mm]
1	5,076976	17,02437
2	5,316976	16,86042

Tablica 5.1: Vrijeme i pomak okvira 1

Iz razlike u vremenima točke 1 i točke 2 (tablica 5.1) dobivamo period T:

$$T = 0,24 \text{ s.} \quad (5.4)$$

Zatim uvrštavanjem perioda T u jednadžbu (3.16) dobivamo vlastitu frekvenciju  $f$  koja iznosi:

$$f = \frac{1}{0,24} = 4,166\dot{6} \text{ s}^{-1} \quad (5.5)$$

Sa dobivenom vlastitom frekvencijom  $f$  preko jednadžbe (3.14) dobivamo kružnu frekvenciju  $\omega$ :

$$\omega = 2 * \pi * 4,166\dot{6} = 26,18 \text{ rad/s} \quad (5.6)$$

Iz jednadžbe (3.15) možemo dobiti krutost  $k$ :

$$k = \omega^2 * m, \quad (5.7)$$

odnosno:

$$k = 26,18^2 * 0,7415 = 508,22 \text{ N/m.} \quad (5.8)$$

Krutost koju smo dobili iz prvog ispitivanja manja je za 6,1% od prethodno zadane krutosti (koja je određena ranije u drukčijem laboratorijskom ispitivanju).

Nakon što smo okvir pomaknuli rukom, on postepeno počinje usporavati i smirivati se. To je rezultat prigušenja kojeg svaka konstrukcija ima te se njegova vrijednost mijenja ovisno o karakteristikama konstrukcije. Slijedeće što ćemo napraviti je izračunati prigušenje preko dijagrama na slici (5.1), te uz pomoć dvije uzastopne maksimalne vrijednosti amplituda koje su zapisane u tablice (5.1).

Pomoću jednažbe (3.13) dobivamo prigušenje  $\zeta$ :

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{17,02437}{16,86042} = 0,00154. \quad (5.9)$$

Na kraju pomoću jednadžbe (3.12) možemo dobiti koeficijent viskoznog prigušenja  $c$  za okvir 1:

$$c = 0,00154 * 26,18 * 2 * 0,7415 = 0,06. \quad (5.10)$$

## 5.2.2 Okvir sa dodanom masom

Isto kao i za okvir 1 uz krutost i masu iz tablice 4.2 možemo izračunati kružnu frekvenciju  $\zeta$ , period  $T$  i vlastitu frekvenciju  $f$ .

Uvrštavanjem krutosti  $k$  i mase  $m$  u jednadžbu (3.15) dobivamo kružnu frekvenciju:

$$\omega = \sqrt{\frac{541,3}{0,94544}} = 23,93 \text{ rad/s}. \quad (5.11)$$

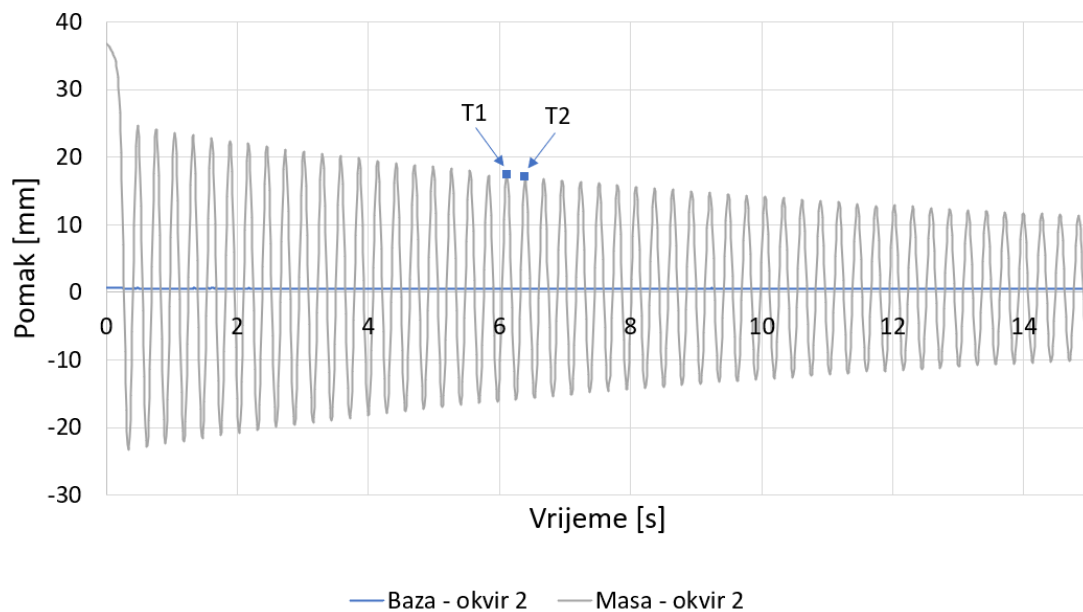
Uvrštavanjem kružne frekvencije  $\zeta$  u jednadžbu (3.17) dobivamo period  $T$ :

$$T = \frac{2\pi}{23,93} = 0,26 \text{ s}. \quad (5.12)$$

Te na kraju vlastitu frekvenciju  $f$  dobivamo uvrštavanjem perioda  $T$  u jednadžbu (3.16):

$$f = \frac{1}{0,26} = 3,85 \text{ s}^{-1} \quad (5.13)$$

Za izračun perioda  $T$ , vlastite frekvencije  $f$ , kružne frekvencije  $\omega$ , krutosti  $k$ , prigušenja  $\zeta$ , te koeficijenta viskoznog prigušenja potrebni su nam rezultati mjerenja. Rezultati mjerenja prikazani su na slici (5.2), a maksimalne vrijednosti dviju amplituda te njihov razmak u vremenu prikazani su u tablici (5.2).



Slika 5.2: Grafički prikaz slobodnih oscilacija okvira 2

Točka	Vrijeme [s]	Pomak [mm]
1	6.109976	17.38614
2	6.389976	17.09093

Tablica 5.2: Vrijeme i pomak okvira 2

Iz razlike u vremenu točke 1 i točke 2 (tablica 5.2) period T iznosi:

$$T = 0,28 \text{ s.} \quad (5.14)$$

Zatim uvrštavanjem perioda T u jednadžbu (3.16) dobivamo vlastitu frekvenciju  $f$ :

$$f = \frac{1}{0,28} = 3,57 \text{ s}^{-1} \quad (5.15)$$

Sa dobivenom vlastitom frekvencijom  $f$  iz jednadžbe (3.14) dobivamo kružnu frekvenciju  $\omega$ :

$$\omega = 2 * \pi * 3,57 = 22,43 \text{ rad/s} \quad (5.16)$$

Prigušenje  $\zeta$  dobivamo uvrštavanjem vrijednosti pomaka iz tablice (5.2) u jednadžbu (3.13):

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{17,38614}{17,09093} = 0,0027. \quad (5.17)$$

Te na kraju iz jednadžbe (3.12) možemo dobiti koeficijent viskoznog prigušenja  $c$  za okvir 2:

$$c = 0,0027 * 22,43 * 2 * 0,94544 = 0,11. \quad (5.18)$$

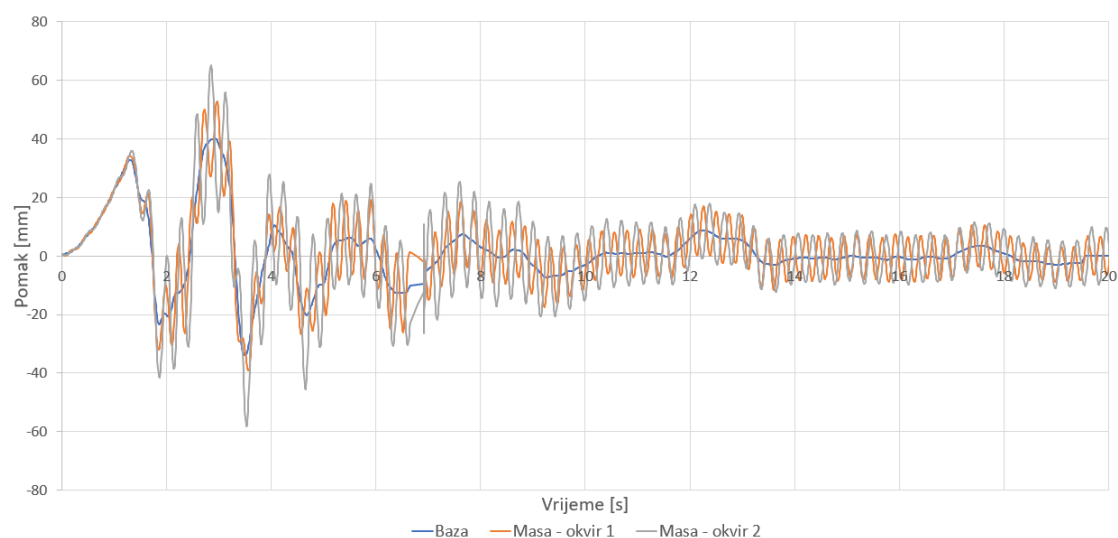
Iz rezultata možemo primjetiti da je period okvira 2 veći za 14,3% od perioda okvira 1. S druge, strane vlastita frekvencija okvira 2 manja je za 14,3% od vlastite frekvencije okvira 1. Isto tako, kružna frekvencija okvira 2 manja je za 14,3% od kružne frekvencije okvira 1. Kod usporedbe prigušenja možemo primjetiti da je prigušenje okvira 2 za 57,04% veće od prigušenja okvira 1. Naposljetku, koeficijent viskoznog prigušenja okvira 2 veći je za 54,5% od koeficijenta viskoznog prigušenja okvira 1.

## 5.3 Ispitivanja potresnih zapisa i usporedba rezultata

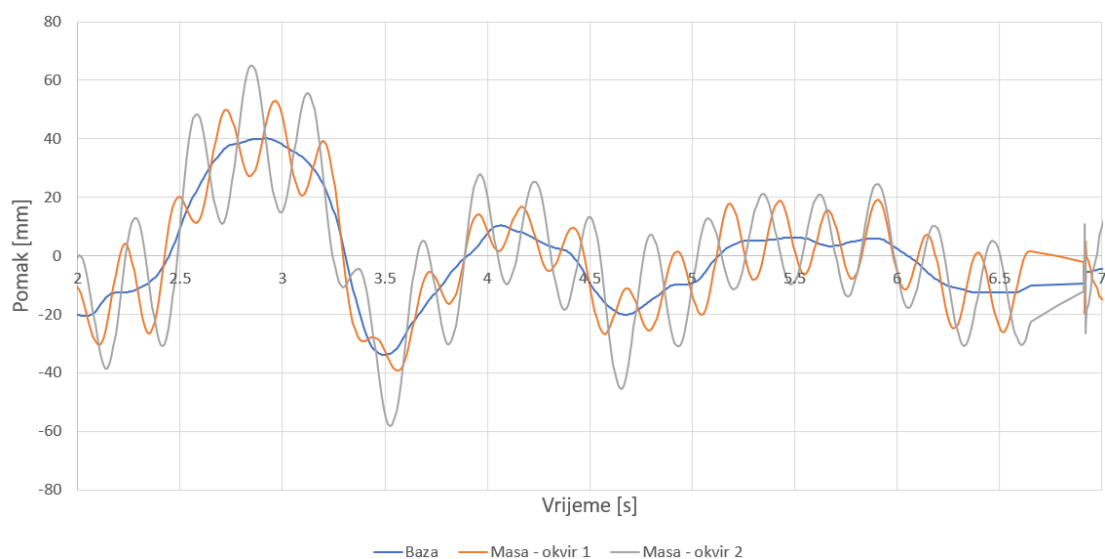
Slijedi usporedba rezultat okvira 1 i okvira 2 dobivenih u sljedeća četiri ispitivanja potresnih zapisa. Za ove vrste ispitivanja proračuni dinamičkih karakteristika nisu provedeni zbog pre naglih promjena pomaka.

### 5.3.1 Potresni zapis Northridge

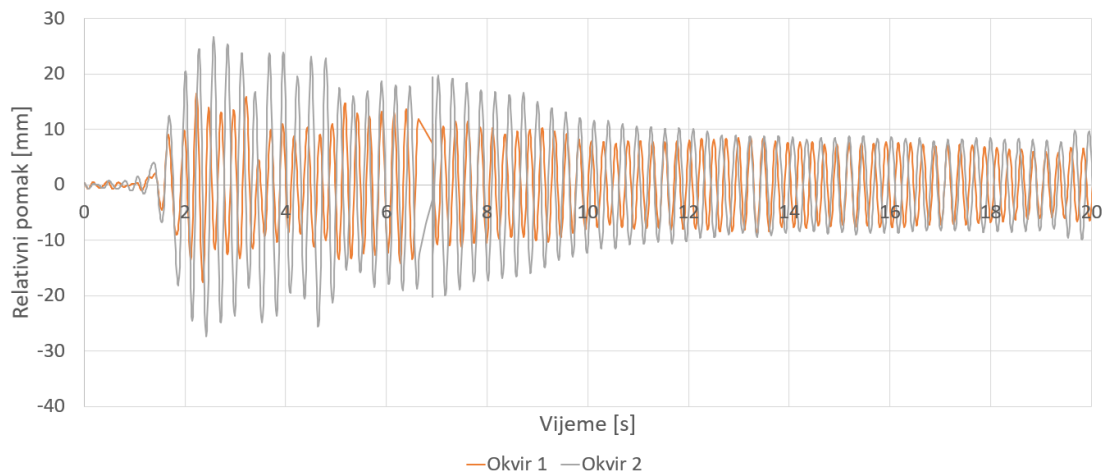
Karakteristike potresa Northridge opisane su u poglavlju 2.5, a slijede rezultati dobiveni mjerenjem pomaka okvira 1 i okvira 2 koji su provedeni u drugom laboratorijskom ispitivanju.



Slika 5.3: Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Northridge



Slika 5.4: Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Northridge u vremenu od 2 do 7 sekundi



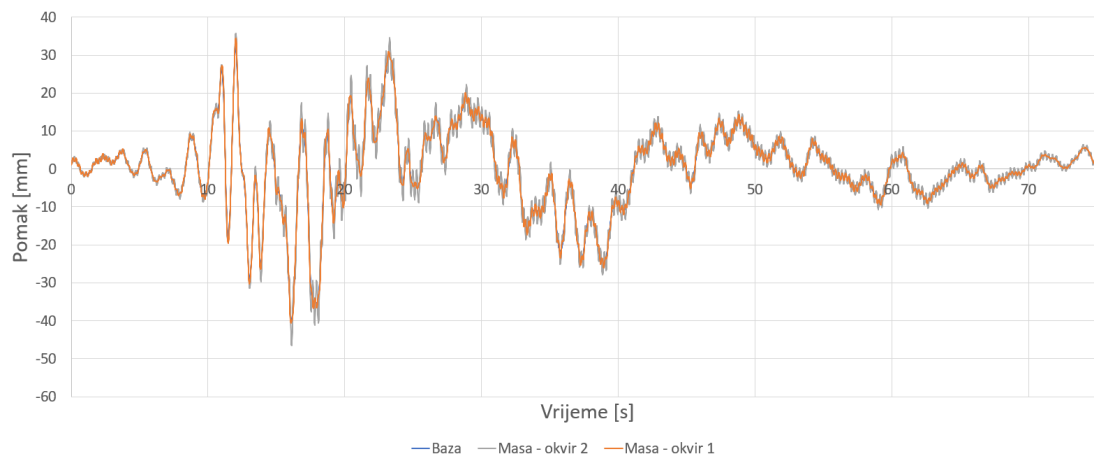
Slika 5.5: Grafički prikaz relativnih pomaka okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Northridge

Iz slika (5.3, 5.4 i 5.5) možemo vidjeti da okvir 2 (sa dodanom masom) ima veću amplitudu od okvira 1 (bez dodane mase), što je i očekivano iz rezultata koje smo dobili analitički u poglavlju 5.2. Na početku vide se velike razlike u oscilacijama, dok su u sredini i na kraju oscilacije prilično jednake. U intervalu od 2 do 7 sekundi (slika 5.4) možemo uočiti najveće apsolutne pomake okvira 1 koji iznose 39,2306 mm, dok su maksimalni apsolutni pomaci okvira 2 jednaki 58,312 mm, što je razlika za čak 19,081 mm. Najveći relativni pomaci (slika 5.5) okvira 1 iznose 17,6235 mm, a za okvir 2 najveći relativni pomaci iznose 27,3358 mm, razlika je i dalje poprilično velika, a ona iznosi 9,7123 mm.

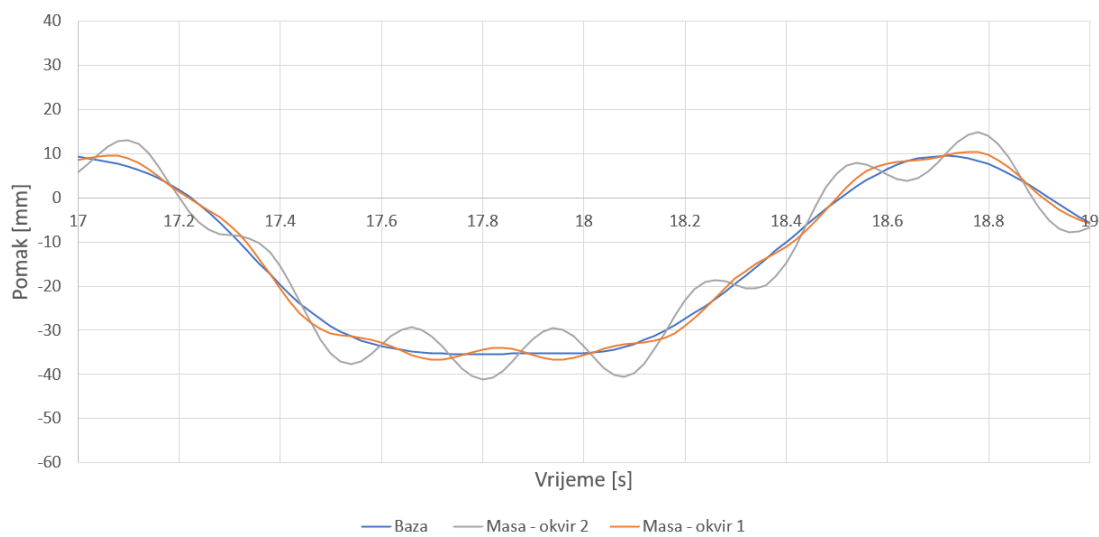


### 5.3.2 Potresni zapis Kobe

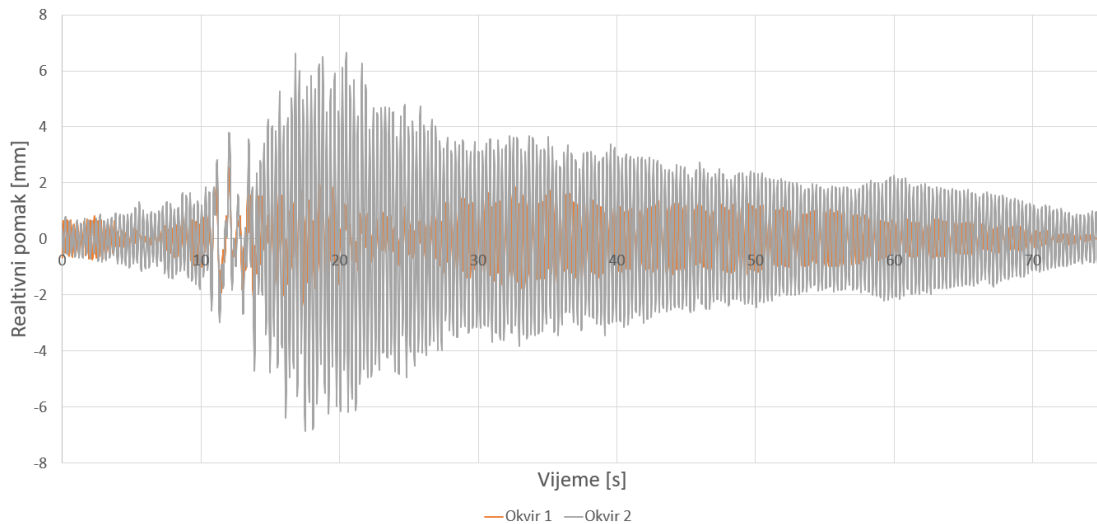
Više o potresu Kobe nalazi se u poglavlju 2.5, a sada slijedi analiza njegovog potresnog zapisa sa rezultatima dobivenim iz trećeg laboratorijskog ispitivanja.



Slika 5.6: Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Kobe



Slika 5.7: Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Kobe u vremenu od 17 do 19 sekundi

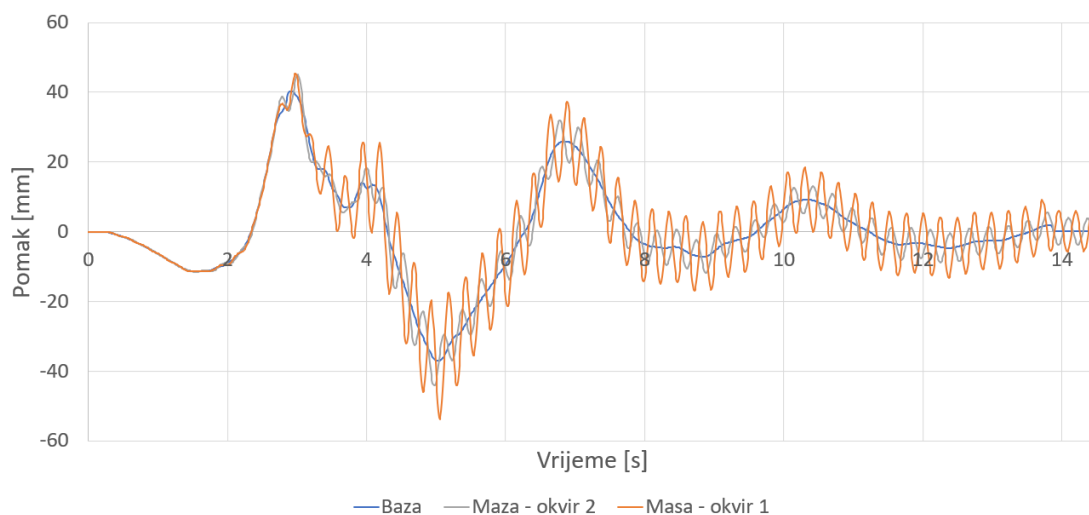


Slika 5.8: Grafički prikaz relativnih pomaka okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Kobe

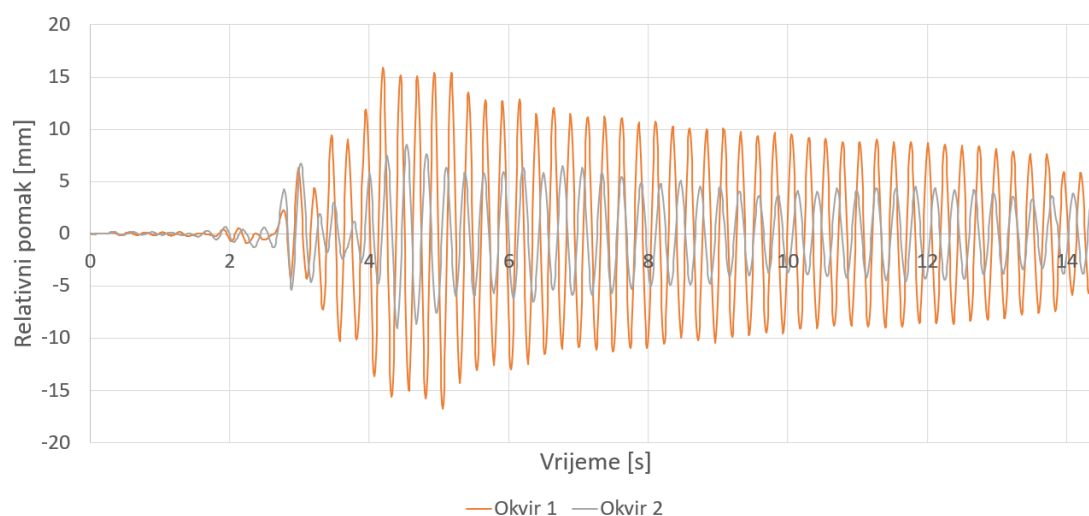
Iz slike (5.6, 5.7 i 5.8) možemo vidjeti kako su oscilacije okvira 2 veće od oscilacija okvira 1, isto kao i kod potresnog zapisa Northridge. U intervalima od 17. do 19. sekunde (slika 5.7) najveći apsolutni pomaci okvira 1 iznose 35,675 mm, a najveći apsolutni pomaci okvira 2 iznose 41,171 mm, što je razlika od 5,5 mm. Isto tako možemo primjetiti da su oscilacije okvira 1 jako malene u odnosu na bazu. A to možemo zaključiti i iz relativnih pomaka (slika 5.8) gdje je relativni pomak okvira 1 jednak 2,426 mm, a relativni pomak okvira 2 iznosi 6,867 mm, što je razlika od 4,441 mm. Obzirom na to reklo bi se da potres Kobe nije bio toliko razoran za neke građevine, ali iz slike (5.6) možemo vidjeti da je potres trajao jako dugo vremena te zaključujemo da je potres bio razoran zbog dugog trajanja.

### 5.3.3 Potresni zapis El Centro

Četvrto laboratorijsko ispitivanje proveli smo za potresni zapis El Centro. O potresu El Centro više je opisano u poglavlju 2.5, a sada slijedi objašnjenje i usporedba rezultata dobivenih u laboratorijskom ispitivanju.



Slika 5.9: Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis El Centro

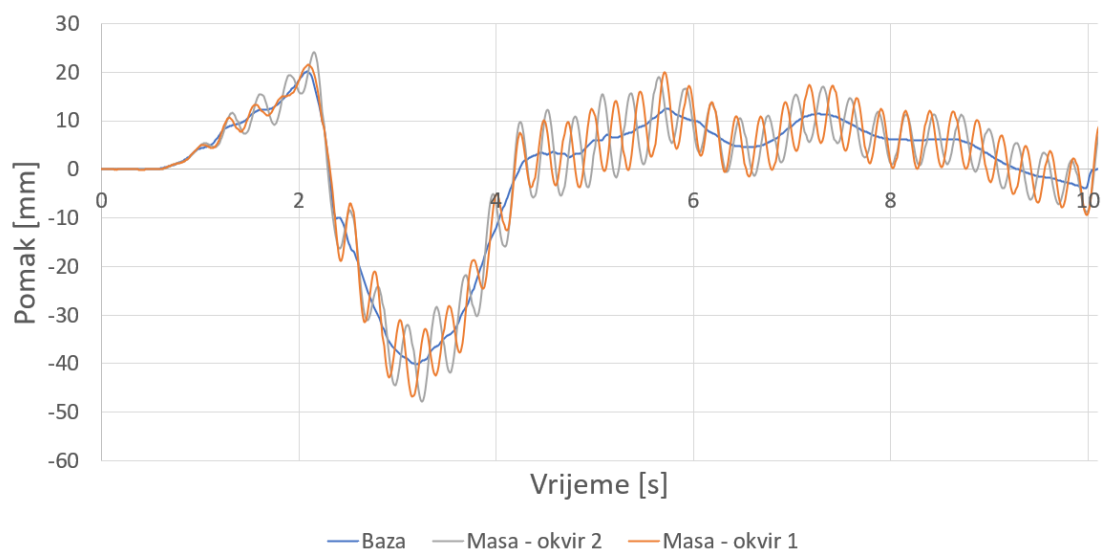


Slika 5.10: Grafički prikaz relativnih pomaka okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis El Centro

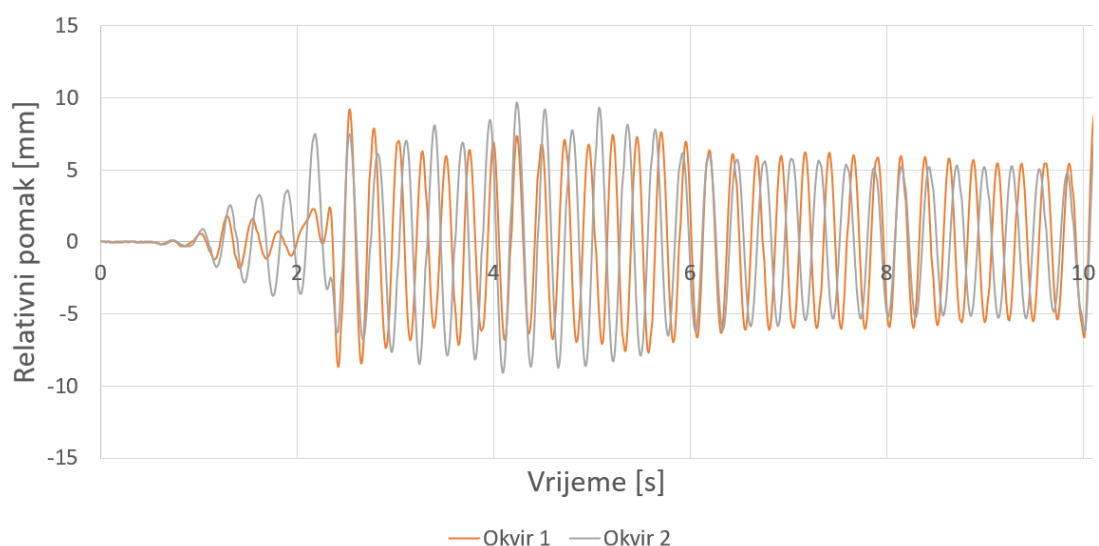
Za razliku od prijašnjih ispitivanja, u ovom ispitivanju možemo primjetiti kako su oscilacije okvira 1 veće od oscilacija okvira 2 (slika 5.9 i 5.10). To pogotovo možemo primjetiti u intervalu od 5 do 10 sekundi, gdje je najveći apsolutni pomak okvira 1 jednak 43,15 mm, a najveći apsolutni pomak okvira 2 jednak je 36,86 mm, što je razlika od 6,29 mm (slika 5.9). Najveći relativni pomaci okvira 1 iznose 16,79 mm, a najveći relativni pomaci okvira 2 iznose 7,58 mm, razlika je za 9,21 mm (slika 5.10).

### 5.3.4 Cape Mandocino

Posljednje laboratorijsko ispitivanje provedeno je na potresnom zapisu Cape Mandocino. Opis potresa i njegove karakteristike nalaze se u poglavlju 2.5, a kao i za sve ostale potresne zapise slijedi objašnjenje i usporedba rezultata dobivenih za okvir 1 i okvir 2.



Slika 5.11: Grafički prikaz oscilacija okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Cape Mandocino



Slika 5.12: Grafički prikaz relativnih pomaka okvira 1 i okvira 2 za potresni zapis Cape Mandocino

Kod potresnog zapisa Cape Mandocino možemo primjetiti da su oscilacije okvira 1 i okvira 2 poprilično jednake (slika 5.11 i 5.12). Na primjer, u intervalu od 5 do 10 sekundi možemo primjetiti da su u nekim trenucima pomaci okvira 1 veći od pomaka

okvira 2 i obrnuto, a u intervalu od 2 do 4 sekunde najveći apsolutni pomaci okvira 1 iznose 46,7074 mm, dok su najveći apsolutni pomaci okvira 2 jednaki 47,8374 mm što je razlika od samo 1,13 mm (slika 5.11). Isto tako iz slike (5.12) možemo primjetiti da su najveći relativni pomaci okvira 1 jednaki 9 mm, a najveći relativni pomaci okvira 2 jednaki su 9,65 mm, razlika je samo 0,65 mm.

## 6. ZAKLJUČAK

Ovim završnim radom su modeli jednokatnog okvira analitički i eksperimentalno analizirani. Analizirana je bila promjena mase jednokatnog modela na dinamički odgovor na pobudu podloge, dok promjena širine krute ploče ne predstavlja dodatne efekte, što je objašnjeno u poglavlju 4.2. Sva laboratorijska ispitivanja provedena su na Građevinskom fakultetu u Rijeci u Laboratoriju za konstrukcije. Ispitivanja su provedena na potresnom stolu, snimana uz pomoć optičkih kamera, a podatci su obrađeni uz pomoć programskog paketa Aramis.

Ukupno je bilo provedeno pet ispitivanja iz kojih smo dobili podatke o pomacima okvira. Prvo su ispitane slobodne oscilacije iz kojih smo dobili rezultate o svojstvima pojedinog okvira. Kako bi smo došli do podataka analitički, bile su nam potrebne masa i krutost oba okvira, a te su vrijednosti su bile zasebno određene prije početka ispitivanja. Podatci koji su dobiveni analitički i eksperimentalno razlikovali su se, no jasno je da su podatci dobiveni eksperimentalno točniji.

Nakon usporedbe i analize rezultata koje smo dobili, možemo primjetiti da su u većini slučajeva pomaci okvira s većom masom bili veći od okvira s manjom masom. No to ne mora značiti da će tako biti i u stvarnosti. Proračunom možemo uočiti razlike između okvira. Na primjer, period okvira bez dodane mase bio je 0,23 sekunde, dok je period okvira sa dodanom masom bio 0,28 sekunde. To znači da okvir sa manjom masom brže oscilira od okvira sa većom, što je vidljivo iz rezultata koje smo dobili za koeficijent viskoznog prigušenja. Čim je on veći, konstrukcija prije dolazi u mirovanje i sigurnija je na potresnu pobudu.

Možemo vidjeti da čak i male promjene mase bitno utječu na konstrukciju i njezin odziv na dinamičku pobudu. Smatram da je za ovakve vrste ispitivanja bolje napraviti programski kod preko kojeg bismo mogli izmjenjivati sve podatke o konstrukciji i simulirati različite kombinacije geometrijskih i materijalnih parametara sustava, te mislim da bi to bio dobar nastavak na ovu temu.

# LITERATURA

- [1] Marinko, Oluić. *Potresi : uzroci nastanka i posljedice : s posebnim osvrtom na Hrvatsku i susjedna područja*. Prosvjeta, 2015.
- [2] Bjarmason, Evar Arnfjord. Wikimedia commons. URL [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World\\_tectonic\\_plate\\_map\\_large.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_tectonic_plate_map_large.png).
- [3] A.B.K. Do 7 stupnjeva: Najjači potresi u hrvatskoj. URL <https://sibenski.slobodnadalmacija.hr/sibenik/vijesti/hrvatska-i-svijet/do-7-stupnjeva-najjaci-potresi-u-hrvatskoj-najvjerojatnije-se-mogu-dogoditi-u-dalmaciji-najrizicnija-su-ova-tri-grada-1186875>.
- [4] vjesnik, Dubrovački. Što je richterova, a što mercallijeva ljestvica?, 4 2022. URL <https://dubrovacki.slobodnadalmacija.hr/dubrovnik/zupanja/dubrovnik/sto-je-richterova-a-sto-mercallijeva-ljestvica-koliko-su-cesti-razorni-potresi-jaci-od-sedam-stupnjeva-a-koji-su-moguci-cak-i-u-dalmaciji-1186892>.
- [5] Area, Natural Hazards Mission. Northridge, ca earthquake damage. URL <https://www.usgs.gov/media/images/northridge-ca-earthquake-damage-62>.
- [6] II, Rong-Gong Lin. Garcetti wants better earthquake safety for l.a.'s day care centers, private schools and steel towers, 2018.
- [7] Johnson, I., Carl, Edward, and i Ostali. The imperial valley, california, earthquake of october 15, 1979, 1979. URL <https://pubs.usgs.gov/pp/1254/report.pdf>.
- [8] SAC, EM Ingenieros. View of the 1979 imperial valley earthquake damage, 1979.
- [9] Jason, Patton. 1992 cape mendocino earthquake and tsunami. URL <https://storymaps.arcgis.com/stories/695f0487e6764718bb36ca05d1bb7404>.
- [10] Milan, Herak. *Geologija*. 1984. URL <https://shop.skolskaknjiga.hr/geologija.html>.
- [11] Petra, Jagodnik. Potresi, 2021. URL [https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/5667663/mod\\_resource/content/0/PG\\_Potresi.pdf](https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/5667663/mod_resource/content/0/PG_Potresi.pdf).

- [12] Mustafa, Hrasnica. *Seizmička analiza zgrada*. 2005.
- [13] Britannica, Urednici Enciklopedije. Northridge earthquake of 1994, 2022. URL <https://www.britannica.com/event/Northridge-earthquake-of-1994>.
- [14] Britannica, Urednici Enciklopedije. Kobe earthquake of 1995, 2023.
- [15] Group, Redwood Coast Tsunami Work. Cape mendocino earthquakes 1992, 2022. URL <https://rctwg.humboldt.edu/capemendo92>.
- [16] Chopra, Anil K. *Dynamics of structures : theory and applications to earthquake engineering*. [Pearson Education India], 2007. URL [https://books.google.com/books/about/Dynamics\\_of\\_Structures.html?id=0dU1bDaRyP4C](https://books.google.com/books/about/Dynamics_of_Structures.html?id=0dU1bDaRyP4C).
- [17] Damir, Lazarević, Šavor Novak Marta, and Mario, Uroš. *Dinamika konstrukcija*, 2018. URL [https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/DK\\_skripta%5B2%5D.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/DK_skripta%5B2%5D.pdf).
- [18] Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet. *Katalog laboratorijske i terenske opreme građevinskog fakulteta u rijeci*.