

Utjecaj 3D printanih dijagonalnih elemenata na dinamički odgovor jednostavnog modela na pobudu podloge

Cukon, Carla

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:157:344478>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

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

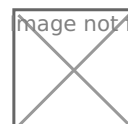


image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Carla Cukon

**Utjecaj 3D printanih dijagonalnih elemenata na dinamički odgovor
jednostavnog modela na pobudu podloge**

Završni rad

Rijeka, 2022

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski sveučilišni studij
Građevinarstvo
Mehanika II**

**Carla Cukon
0114032692**

**Utjecaj 3D printanih dijagonalnih elemenata na dinamički odgovor
jednostavnog modela na pobudu podloge**

Završni rad

Rijeka, rujan 2022.

IZJAVA

Završni/Diplomski rad izradio/izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom/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.

Carla Cukon

U Rijeci, 5.9.2022.

ZAHVALA:

Zahvaljujem se mentorici doc. Dr. sc. Nini Čeh na svojoj ukazanoj pomoći i trpljenju prilikom izrade ovog završnog rada.

SAŽETAK:

U ovom radu promatra se reakcija okvira na potresnu pobudu. Promatrana su tri jednaka jednokatna modela okvira od kojih je jedan bez dijagonalnih štapova, dok druga dva dodane imaju dijagonalne štapove različitih promjera. Eksperiment se odvijao u Laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci. Potresna pobuda izvodila se na potresnom stolu Quanser ST-III, a eksperiment je snimljen optičkim mjernim sustavom GOM mbH PONTOS 3D 4M. Usporedbom dobivenih rezultata zaključeno je da dijagonalni štapovi povećavaju prigušenje okvira, a smanjuju pomake okvira, te time doprinose dinamičkom odgovoru takve konstrukcije na potresnu pobudu.

Ključne riječi: potresna pobuda, jednokatni modeli okvira, dijagonalni štapovi, povećanje oscilacija, smanjenje pomaka

ABSTRACT:

This undergraduate thesis deals with the dynamic response of single-storey frame to seismic excitation. Three single-storey frame models are used, where one of them is without diagonal rods, while the other two have diagonal rods with different diameters attached to them. All experiments were conducted in the Structural laboratory at the Faculty of Civil Engineering in Rijeka. Furthermore, seismic excitation is simulated via the Quanser ST-III seismic platform and monitored using the GOM mbH PONTOS 3D 4M system. Based on the comparison between the results obtained for the three different models, it is concluded that the diagonal rods increase the damping, while they decrease the frame displacements. This contributes to the dynamic response of the frame during seismic excitation.

Key words: key words: seismic excitation, single-story frame models, diagonal rods, increasing oscillations, reducing displacements

Sadržaj

1.UVOD.....	10
2. POTRESI I NJIHOV UTJECAJ NA KONSTRUKCIJE	11
2.1. Predviđanje i mjerenje potresa.....	12
2.2. Reakcija konstrukcije prilikom potresa	14
3.JEDNADŽBA KRETANJA ZA POJEDNOSTAVLJENI JEDNOKATNI MODEL	15
4.OPIS OPREME I MODELA	18
4.1 Korištena oprema	18
4.1.1. Dvoosna potresna platforma Quanser STI-III.....	18
4.1.2. Sustav brzih kamera i popratnog softvera za optičko mjerenje GOM Aramis 4M	20
4.1.3. 3D printer Prusa i3 MK3S.....	21
4.2 Opis modela	24
5.PROVEDENI EKSPERIMENT	27
5.1. Dinamičke karakteristike iz slobodnih oscilacija	27
5.2. Izračun dinamičkih karakteristika okvira kada potresni stol miruje	29
5.3. Dinamičko opterećenje potresnog stola	41
6. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK	43
7.LITERATURA.....	44

Popis slika

Slika 1. Karta epicentara potresa u Hrvatskoj [1].....	12
Slika 2. Richterova ljestvica [4]	13
Slika 3. Marcallieva ljestvica [4].....	13
Slika 4. Dijagram slobodnog tijela i mase ubrzanja	15
Slika 5. Prikaz okvira u nedeformiranom i deformiranom stanju	16
Slika 6. Amplitude prigušenog titranja [7]	17
Slika 7. Dvoodsna potresna platforma Quanser STI-III, izvor GRađevinski fakultet u Rijeci [8].....	19
Slika 8. Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M, slikano na Građevinskom fakultetu.....	20
Slika 9. 3D printer Prusa i3 MK3S, slikano na Građevinskom fakultetu.....	21
Slika 10. Prikaz displaya 3D printera , slikano na Građevinskom fakultetu	22
Slika 11. Prikaz dijiagonalnog štapa, slikano u programu Fusion 360.....	23
Slika 12. Skica okvira jednokatne konstrukcije.....	24
Slika 13. Prikazano s lijeva na desno; okvir 2, okvir 1, okvir 3	25
Slika 14. Dijagonala 1, promjer šupljine 0,04cm, prikazan u Autodesk Fusion-u 360.....	26
Slika 15. Dijagonala 2- promjer šupljine 0,06cm, prikazan u Autodesk Fusion-u 360.....	26
Slika 16. Sinusoidna krivulja [10]	27
Slika 17. Snimak zaslona računala, postavke Northridge pobude potresnog stola, smjer širenja potresnih valova 90^0	28
Slika 18. Snimak zaslona računala, postavke potresa Northridge pobude potresnog stola, smjer širenja valova 360^0	28
Slika 19. Grafički prikaz pomaka okvira nakon smirivanja baze potresnog stola	29
Slika 20. Vlastoručna pobuda okvira, slikano u programu Aramis.....	32
Slika 21. Najveće amplitude okvira 1	32
Slika 22. Najveće amplitude okvira 2.....	33
Slika 23. Najveće amplitude okvira 3.....	33
Slika 24. Potresni zapis Northridge 90^0 , baza potresnog stola miruje.....	35
Slika 25. Potresni zapis Northridge 360^0 , baza potresnog stola miruje.....	38
Slika 26. Oscilacije okvira uzrokovan potresnom pobudom sine sweep	41
Slika 27. Oscilacije okvira uzrokovane potresnom pobudom Northridge 90^0	42
Slika 28. Oscilacije okvira uzrokovane potresnom pobudom Northridge 360^0	42

Popis tablica

Tablica 1. Mase okvira jednokatne konstrukcije	24
Tablica 2. Prikaz vremena i amplitude okvira	29
Tablica 3. Prigušenje okvira	31
Tablica 4. Vremena i amplitude okvira	33
Tablica 5. Vrijednosti prigušenja okvira i srednje vrijednosti.....	35
Tablica 6. Vremena i amplitude okvira	36
Tablica 7. Prigušenja okvira i srednje vrijednosti	37
Tablica 8. Vremena i amplitude okvira	38
Tablica 9. Prigušenja okvira i srednje vrijednosti	39

1. UVOD

Potresi predstavljaju veliki problem prilikom građenja. Ne mogu se predvidjeti niti spriječiti. Uloga građevinara je građevinu učiniti što otpornijim na potrese tj. osigurati da konstrukcija može pretrpjeti potrese bez većih oštećenja, a pogotovo bez urušavanja. U povijesnom aspektu, nije se obraćala pažnja na potrese. Zbog toga danas gradovi pogođeni potresom znaju pretrpjeti velika oštećenja cijelog područja obuhvaćenog potresom. Zbog čega se događaju velike štete i moguće ljudske žrtve.

Hrvatska je u zadnje dvije godine pretrpjela nekolicinu manjih i dva jača potresa kojim je oštećeno veliko područje. Stara jezgra grada Zagreba je u potresu početkom 2020. godine oštećena upravo zbog starosti zgrada i nepravilne sanacije i odražavanja. Kako bi se to u budućnosti spriječilo, radi se na napretku projektiranja i tehnologije građenja.

U ovom radu proveden je pokus dinamičkog odgovora jednokatnog okvira na potresnom stolu kako bi se ispitala u učinkovitosti dodavanja dijagonala koje su prije samog ispitivanja dizajnirane i printane 3D printerom. Dijagonale su se izvodile u dva različita promjera te su se ispitivale privezane na spomenutu okvirnu konstrukciju. Pokus je snimljen optičkim kamerama, a zatim su se rezultati obrađivali u GOM sustavu. Svi rezultati su potkrijepljeni grafičkim prikazom i proračunom dobivenih deformacija. Provedenim pokusom dobit ćemo odgovor preuzimaju li dijagonalni štapovi opterećenja građevine tj. deformacije koje su nastale pomacima potresnog stola. Samim time hoće li se smanjiti oscilacije građevine odnosno kojim dijagonalnim štapovima će se prije izbaviti energija potresa i dobiti prigušenje same građevine.

2. POTRESI I NJIHOV UTJECAJ NA KONSTRUKCIJE

Prirodno podrhtavanje tla nazivamo potres. Potresi nastaju prilikom naglog oslobađanja energija uslijed gibanja zemljine kore, točnije tektonskih ploča, po već postojećim pukotinama poznatim kao rasjedi. Jačina potresa ovisit će o dubini žarišta gdje nastaje potres. Razlikujemo plitke, srednje duboke i duboke potrese, od kojih su plitki potresi najopasniji jer uzrokuju veliku materijalnu štetu. Energija koja je nastala u žarištu oslobađa se u obliku elastičnih valova tj. seizmičkih valova. Prepoznamo dvije skupine seizmičkih valova. Prostorni seizmički valovi (S i P valovi) šire se prostorno u svim smjerovima Zemljine unutrašnjosti dok se energija površinskih seizmičkih valova (Rayleighovi i Loveovi) širi u blizini Zemljine površine. [1]

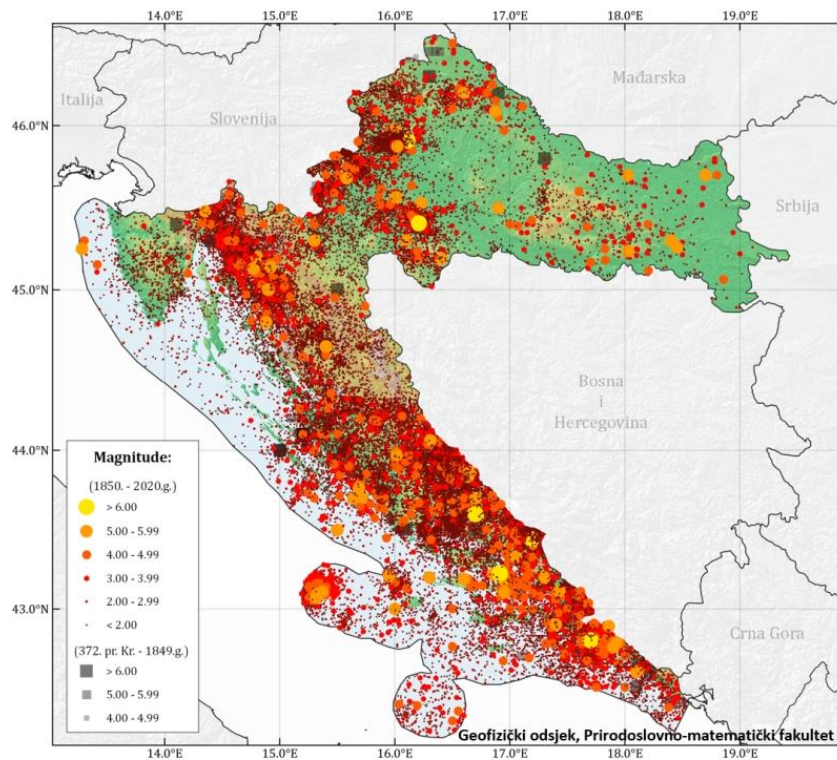
Prostorni valovi dijele se na primarne i sekundarne seizmičke valove. Primarni valovi gibaju se najvećom brzinom (4-7 km/s) te prvi budu zabilježeni u seizmičkim postajama. Primarni valovi nazivaju se još i longitudinalnim valovima zbog načina gibanja čestica. Čestice se gibaju naprijed-natrag paralelno sa smjerom gibanja vala i time izazivaju kompresiju (stiskanje) i dilataciju (razvlačenje) stijenske mase. Sekundarni valovi šire se manjom brzinom (2-5 km/s) od primarnih valova. Nazivaju se još i transverzalni valovi, čestice titraju tj. gibaju se gore-dolje.

Površinski valovi spadaju u najsporije seizmičke valove. Zbog male brzine imaju najveću amplitudu što ih čini najdestruktivnijim valovima za stabilnost građevine. Loveovi valovi gibaju se samo u horizontalnoj ravnini s lijeve na desnu stranu. Prolaskom kroz građevinu uzrokuju cijepanje i oštećivanje temelja. Rayleighovi valovi gibaju se eliptično u smjeru obrnutom kazaljke na satu. Eliptičnim gibanje uzrokuju velike pomake materijalnih čestice. Iznimno su destruktivni za građevine zbog toga što su najsporiji i što imaju najduže vrijeme prolaska kroz Zemljinu površinu. [2]

Nastajanje potresa opisuje se Teorijom elastičnih odraza koja opisuje oslobađanje velike količine energije tijekom potresa.

2.1. Predviđanje i mjerenje potresa

Moderna tehnologija se brzo razvila u kratkom vremenu, no i dalje ne postoji način kojim bismo sa točnošću mogli predvidjeti pojavu potresa. Naravno, postoje mnogi pokazatelji koji najavljuju potres poput promjene magnetskog polja, vibracije, čudno ponašanja životinja i sl. Procjene pojave potresa određuju se pomoću karte seizmičkog zoniranja, kojom se prikazuju često pogođena potresna područja i područja gdje su potresi rijetki ili ih uopće nema. Prikaz potresnih područja u Hrvatskoj prikazan na slici 1.



Slika 1. Karta epicentara potresa u Hrvatskoj [1]

Prilikom mjerenja potresa određuje se magnituda i intenzitet potresa.

Mjerenjem magnitude potresa određujemo stvarnu količinu energije koja je oslobođena potresom, koja se određuje Richterovom ljestvicom. Charles F. Richter je godine 1930. osmislio brojčanu ljestvicu kako bi pratio veličine potresa u Kaliforniji. Ljestvica je logaritamska i osmišljena je na način da računa amplitude S i P valova registriranih seizmografom. Budući da je ljestvica logaritamska, omjer veličine potresa nisu usporedni sa

brojčanim iznosom na ljestvici. Primjerice, potres jakosti 4,0 prema Richterovoj ljestvici ima 100 puta veću amplitudu i 1000 puta veću energiju od potresa koji iznosi 2,0. (Slika 2.) [3]

Richterove magnitude	Opis potresa	Učestalost pojave
Ispod 2,0	Mikro	Oko 8.000 po danu
2,0 – 2,9	Manji	Oko 1.000 po danu
3,0 – 3,9		49.000 godišnje (procjena)
4,0 – 4,9	Lagani	6.200 godišnje (procjena)
5,0 – 5,9	Umjereni	800 godišnje
6,0 – 6,9	Jaki	120 godišnje
7,0 – 7,9	Veliki	18 godišnje
8,0 – 8,9	Razarajući	1 godišnje
9,0 – 9,9		1 u 20 godina
10,0+	Epski	Ekstremno rijetki (nepoznati)

Slika 2. Richterova ljestvica [4]

Intenzitetom potresa mjerimo potresno djelovanje na površinu, tj. ponašanje objekta podrhtavanjem, moguće promjene u krajoliku i ljudski doživljaji potresa. Najčešće se koristi Marcallijeva ljestvica kojom numeriramo štetu nastalo potresom. Ljestvica se sastoji od 12 brojeva tj. dvanaest stupnjeva koji su opisani popratnim objašnjenjima ponašanja ljudi i građevina. (Slika 3.)

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 3. Marcallieva ljestvica [4]

2.2. Reakcija konstrukcije prilikom potresa

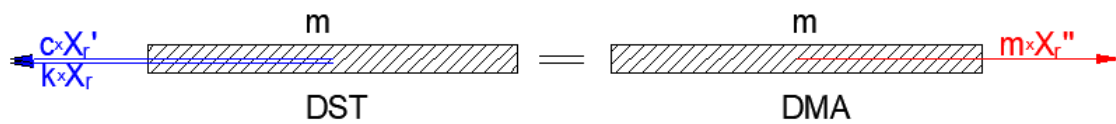
Potres uzrokuje gibanje Zemljine površine tako i svega što se nalazi na njoj. Budući da je potres uzrokovan naglim oslobodjenjem energija, ona se prenosi ne temelje, a zatim na cijelu građevinu. Dolazi do potresanja, osciliranja i velikog gibanja građevine. Ukoliko građevina nije konstruirana na takvu opterećenja dolazi do sloma, pucanja ili totalnog popuštanja materijala.

Frekvencija građevine određena je njenom krutošću i masom. Dakle građevina se giba vlastitom frekvencijom i vlastitim periodom, no potresni valovi se također gibaju svojom frekvencijom (odnosno, u njihovom gibanju je sadržano mnogo frekvencija s odgovarajućim amplitudama gibanja). Do problema dolazi ukoliko se dvije frekvencije poklope, pri čemu dolazi do rezonancije. Poklapanjem oscilacije građevine i oscilacije potresnih valova dolazi do najveće amplitude titranja. Veća oscilacija građevina uzrokuje veće deformacije, pukotine i mogućnost urušavanja. [5]

Uz problem pojave rezonancije, postoji problem pojave amplifikacije. Amplifikacija je pojava povećanja amplitude seizmičkog vala zbog prelaska iz jedne vrste geološkog materijala u drugi, npr. prilikom prolaska seizmičkog vala iz stijene u tlo. Brzina širenja tada vala se smanjuje no amplituda se povećava. Što je veća amplituda gibanja potresnih valova, to možemo očekivati veću konačnu štetu. [6]

3. JEDNADŽBA KRETANJA ZA POJEDNOSTAVLJENI JEDNOKATNI MODEL

Pojednostavljeni model je onaj model u kojem se konstrukcija može idealizirati kao koncentrirana masa poduprta elementima bez mase sa krutošću k u bočnom smjeru. Jednokatni model je model sa jednim stupnjem slobode, što znači da mu je omogućeno gibanje samo u horizontalnom smjeru tj. duž x-osi. Dinamički odgovor modela dobiti ćemo izvedbom jednadžbe kretanja služeći se drugim Newtonovim zakonom, prikazano na Slici 4. [7]



Slika 4. Dijagram slobodnog tijela i mase ubrzanja

Jednadžbu izvodimo prema drugom Newtonovom zakonu:

$$-c \cdot \dot{X}_r - k \cdot X_r = m \cdot \ddot{X}_r, \quad (1)$$

Odnosno:

$$c \cdot \dot{X}_r + k \cdot X_r + m \cdot \ddot{X}_r = 0, \quad (2)$$

Gdje je:

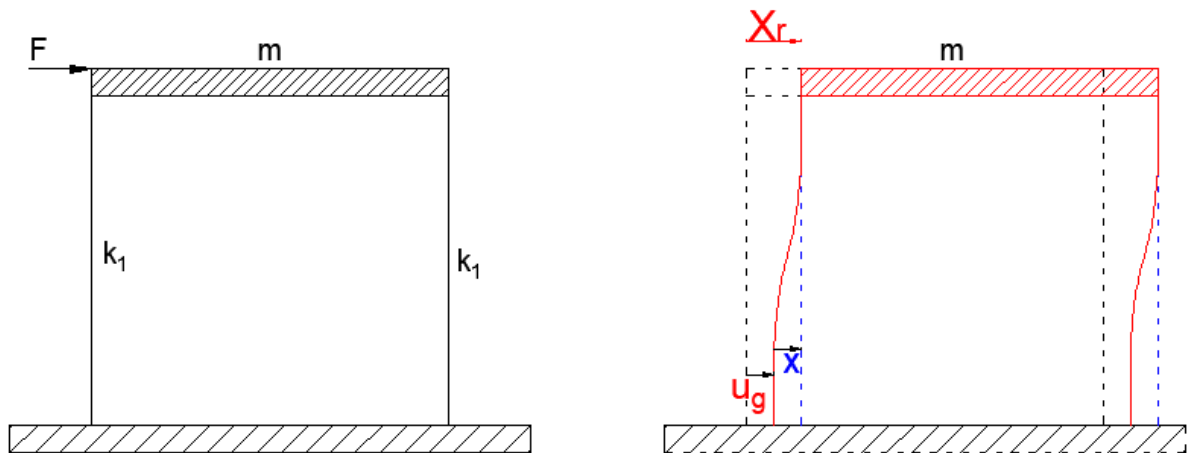
m - masa podloge,

k - krutost sustava,

c - koeficijent prigušenja,

$X_r, \dot{X}_r, \ddot{X}_r$ - relativan pomak mase obzirom na oslonac/bazu, te njegove derivacije po vremenu (brzina i akceleracija).

Usljed djelovanja vanjske sile ili potresne pobude tla dolazi do pomaka jednokatne konstrukcije što prikazuje Slika 5.



Slika 5. Prikaz okvira u nedeformiranom i deformiranom stanju

Iz prikaza deformiranog okvira Slika 5. možemo izračunati apsolutni pomak X_r :

$$X = u_g + x \quad (3)$$

Derivacije jednadžbe (3) u vremenu t glase:

$$\dot{X}_r = \dot{u}_g + \dot{x} , \quad (4)$$

$$\ddot{X}_r = \ddot{u}_g + \ddot{x} \quad (5)$$

Nakon što jednadžbu dobiven derivacijom pomaka (5) uvrstimo u jednadžbu kretanja (2) dobijemo slijedeći prikaz:

$$c \cdot \dot{X}_r + k \cdot X_r + m \cdot (\ddot{u}_g + \ddot{x}) = 0 , \quad (6)$$

odnosno :

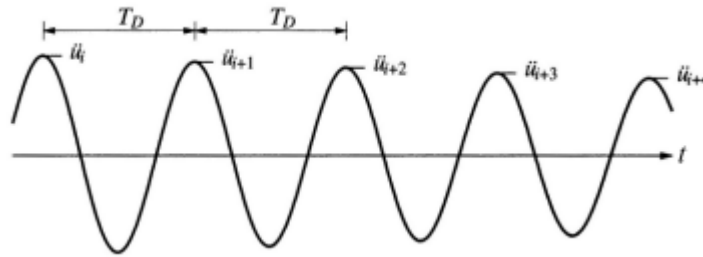
$$m\ddot{x} + c \cdot \dot{X}_r + k \cdot X_r = -m\ddot{u}_g , \quad (7)$$

gdje je:

\ddot{u}_g - akceleracija tla ili baze (akceleracija potresa ili potresanje potresnog stola).

Na taj način samo dobili jednadžbu kretanja okvira podvrgnutog funkciji ubrzanja podloge.

Za izračunavanje koeficijenta prigušenosti, uzeli smo uzastopne vršne vrijednosti amplituda valova svakog pojedinog okvira udaljene za period T (Slika 6.). Srednju vrijednost perioda dobit ćemo razlikom vremena odabranih promatranih točaka.



Slika 6. Amplitude prigušenog titranja [7]

Vlastita frekvencija : $f = \frac{1}{T}$ [Hz]

Kružna frekvencija : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ [$\frac{rad}{s}$]

Poznavajući masu okvira, njegovu krutost dobit ćemo iz :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \rightarrow k = \omega^2 \cdot m,$$

a prigušenje kao :

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i+j}},$$

gdje su:

u_i , u_{i+j} - vrijednosti amplituda valova

Koeficijent prigušenja je : $c = \zeta \cdot \omega \cdot 2m$

Prigušenje znatno utječe na brzinu smirivanja titranja, što je veće prigušenje manje je ciklusa do smirivanja titranja. Veće prigušenje građevina koje su podložene potresnom opterećenju smanjuje deformacije građevina i omogućuje brži izlaz energije dovedene potresnim opterećenjem. U slijedećim stranicama ovog rada to ćemo pokazati i na promjeru.

4.OPIS OPREME I MODELA

Svi provedeni eksperimenti te izrada modela provedena je u sveučilišnom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci. Oprema je opisana u nastavku, a ispitani model u točki 4.1.

4.1 Korištena oprema

4.1.1. Dvoosna potresna platforma Quanser STI-III

Sustav se sastoji od dvoosne potresne platforme Quanser STI-III koje se pokreću elektromagnetskim motorom. Uz navedeno sadržava kontrolnu *hardwere* ploču uz potreban *software* za korištenje i podložnu ploču za dvoosne platforme.

Navedene dvoosne platforme mogu se koristiti odvojeno tj. neovisno jedna o drugoj za provođenje dva ispitivanja istovremeno. Zajedno korištenje platformi provodi se na način da ispitani model oslonimo na jednu i na drugu ploču. Pri istovremenom korištenju platformi dopuštena je veća maksimalna masa modela, a pobuda koju one simuliraju mogu biti jednaka (sinkroni rad ploča) ili različita (asinkroni rad ploča). [8]

Tehničke karakteristike potresne platforme:

- Tlocrtne dimenzije svake platforme $625 \times 625 \text{ mm}^2$,
- Hod svake platforme u svakom od dva smjera je 15 cm, a raspon radnih frekvencija je 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 i kakvog tereta može proizvesti ubrzanje od 2,8 g u X smjeru i 4,5 g u Y smjeru,
- Očna udaljenost platformi može biti od 1 m do 2,5 m.

Navedeni uređaj koristit ćemo za simulaciju dinamičke pobude tj. potresnih zapisa za ispitivanje dimenzioniranog modela prilikom eksperimentalnog dijela završnog rada.

Prilikom vršenja eksperimenta za ovaj završni rad korištena je jedna platforma. Pomaci platforme bili su u jednom smjeru, u smjeru osi x. (Slika 7.)



Slika 7. Dvoodsna potresna platforma Quanser STI-III, izvor GRađevinski fakultet u Rijeci [8]

4.1.2. Sustav brzih kamera i popratnog softvera za optičko mjerenje GOM Aramis 4M

Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M sastoji se od mjerne glave sa dvije kamere, kablova, nosača, kalibracijskog objekta, para leća, laserskog pokazivača, kofera za LED osvjetljenje i foto ćelija.

Sustav kamera koristi se kako bi se ostvarilo 3D beskontaktno mjerenje pomaka i deformacija. Prije početka snimanja potrebno je izvesti kalibraciju, odnosno ovisno o veličini objekta definiramo udaljenost kamera i njihov kut snimanja. Kamere snimaju cijeli tijek izvođenja eksperimenta na temeljnu praćenja površina ispitivanog modela. Po površinu su zalijepljene crno-bijele referentne točke kako bi uređaj mogao pratiti položaj točaka na svim fotografijama. Prva izvedena fotografija naziva se referentna slika, a nakon nje određujemo parametre mjerenja tj. koliko dugo će se vršiti mjerenje i koliko slika će se izvoditi u sekundi. (Slika 8.)

Tehničke karakteristike sustava:

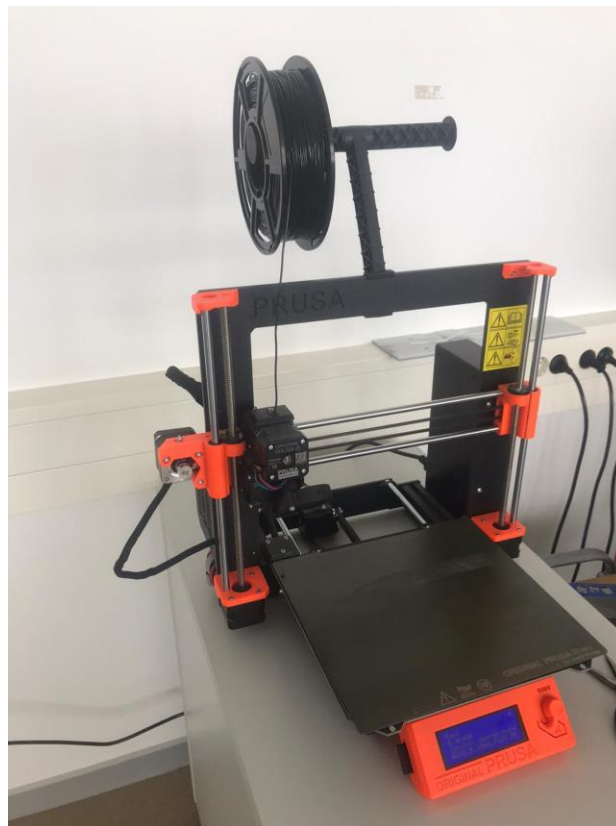
- Snimanja do 168 fps rezolucijom od 2400x1728 piksela, te do 1300 fps rezolucijom od 2400x168 piksela,
- Jedan par leća žarišne dužine 20 mm pogodan za mjerenje volumene od 125x90 mm² do 2150x1600 mm²,
- Kalibracijski objekt za snimanje mjerodavnog volumena od 350x260 mm² do 500x370 mm².



Slika 8. Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M, slikano na Građevinskom fakultetu

4.1.3. 3D printer Prusa i3 MK3S

Printer koji smo koristili za printanje, prikazan na Slici 8, dizajniranog modela je marke Prusa i3 MK3S, prikazan na Slici 9., koji za osnovnu funkciju rada koristi FFF 3D tehnologiju [eng. fused filament fabrication]. Tehnologija radi na način da se podloga na koju se printa miče naprijed-nazad, a mlaznice za ekstrudiranje filameta kreće lijevo-desno. Karakteristika nove tehnologije printanja je ta da se filamet zagrijava do temperature taljenja, istiskuje te lijepi. Na podlogu koja se također zagrijava na određenu temperaturu. Filament se istiskuje u slojevima, a debljinu slojeva definirano u programu. Vrijeme printanja ovisiti će o postavkama brzine printanja, dimenzijama modela i vrsti filameta koji se koristi prilikom printanja.[9]



Slika 9. 3D printer Prusa i3 MK3S, slikano na Građevinskom fakultetu

Filament koji je korišten prilikom izrade dijagonala za učvršćivanje jednostavne jednokatne konstrukcije je TPU flexible filament. Materijal je promjera 1,75 mm i može se zagrijavati na 230-250 stupnjeva Celzijevih. Model koji je dizajniran i printan u svrhu ispitivanja za završni rad, filament je zagrijavan za 235 C dok je podloga na 50 C. Ekran i karakteristike printera prilikom printanja dijagonalnih štapova je prikazan na Slici 10 .[8]



Slika 10. Prikaz displaya 3D printera , slikano na Građevinskom fakultetu

Za modeliranje štapova korišten je program Autodesk Fusion 360. Dijagonalni štapovi su šuplji iznutra a po dužini plašta imaju otvore oblika šesterokuta. Oba modela su visine 30 cm i promjera 0,08 cm. Razlikuju se promjeri šupljina. Promjer šupljina prvog modela iznosi 0,04 cm, dok drugog 0,06 cm (Slika 11).



Slika 11. Prikaz dijiagonalnog štapa, slikano u programu Fusion 360

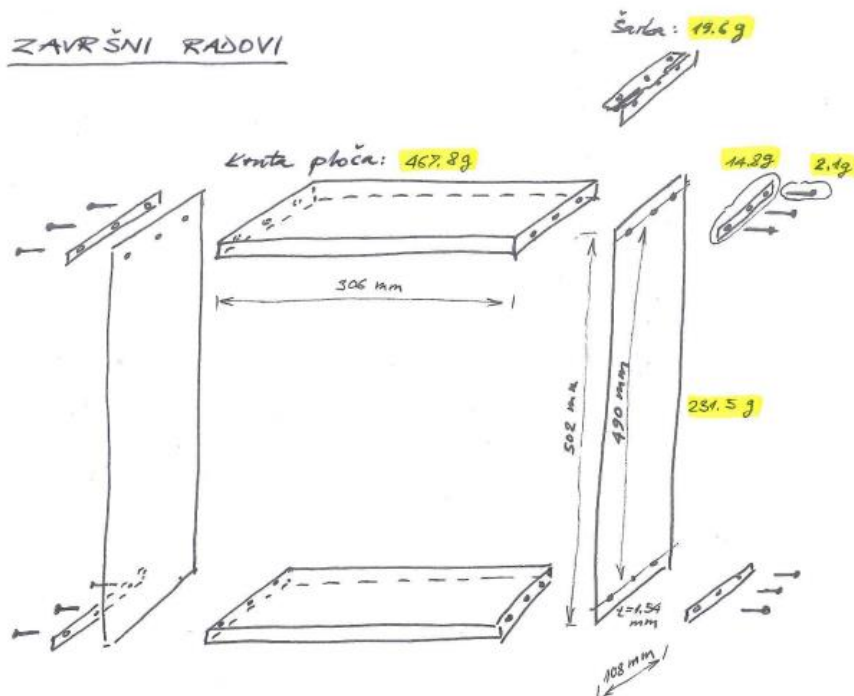
U softveru proizvođača imena PrusaSlicer podešavaju se postavke printanja. Nacrta izvedeni u programu Autodesk Fusion 360 izvezeni su kao Lytography (.stl) dokument. Izborom filameta u PrusaSlicer programu automatski se definiraju podaci o potrebnoj temperaturi zagrijavanja mlaznice i podloge.

Tehničke karakteristike 3D printera:

- Volumen dostupan za printanje je 25x21x21 cm,
- Debljina linije : 0,05-0,35 mm,
- Maksimalna brzina printanja: 200+ mm/s,
- Promjer filameta : 1,75 mm,
- Površina printera sastoji se od odvojenih magnetskih čeličnih limova s različitim površinskim oblogama.

4.2 Opis modela

Za izvedbu navedenog eksperimenta korišten je okvir jednokatne konstrukcije. Visina okvira iznosi 502 mm, a širina 306 mm. Jednokatni okvir sastoji se od: krute ploče, vijaka, stijenki i pločica (Slika 12). Ukupna masa okvira jednokatne konstrukcije iznosi 741,5 g. Pojedinačne mase dijelova jednokatne konstrukcije opisane su u Tablici 1.



Slika 12. Skica okvira jednokatne konstrukcije

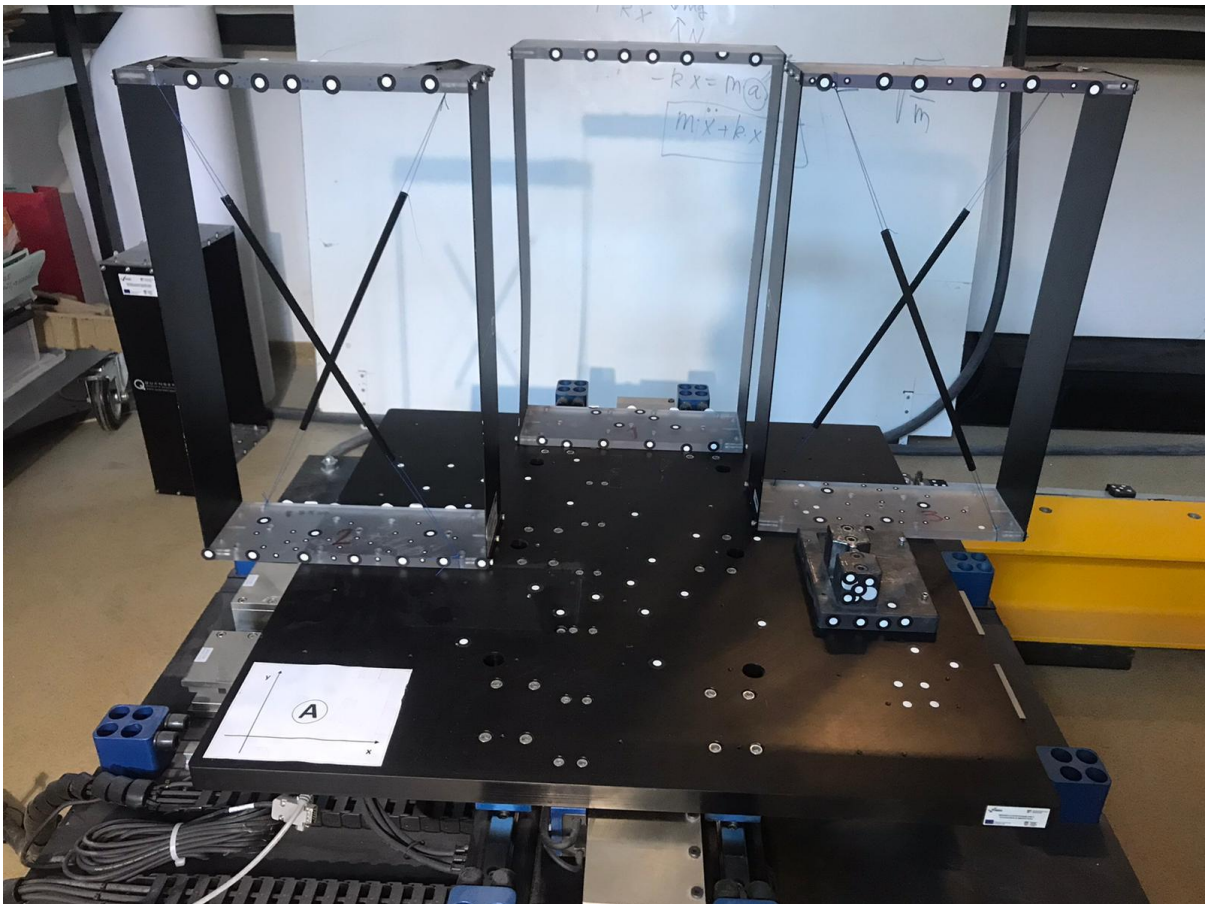
	Komad	Masa [g]
Kruta ploča	1	467,8
Polovica stijenke	2	231,5
Vijak	6	12,6
Pločica	2	29,6
Ukupna masa okvira		741,5

Tablica 1. Mase okvira jednokatne konstrukcije

Okvir jednokatne konstrukcije je statički neodređen, oslonjen je na dva upeta oslonca. Onemogućeni su mu pomaci u smjerovima x i y, te kut zaokreta u osloncima. U praksi bi to bio mekani zid ili zid sa otvorima sa dodanim dijagonalama.

Kako bismo povećali krutost jednokatne konstrukcije koristili smo dijagonalne štapove. Dijagonalni štapovi dimenzionirani su u programu imena Fusion 360 i isprintani 3D printerom. Štapovi su opisani u poglavlju 4.1.3.

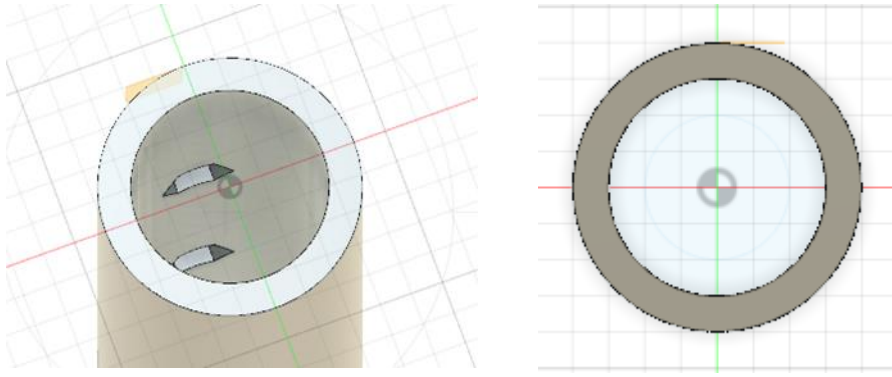
Prilikom izvođenja ispitivanja koristili smo tri jednake konstrukcije koje smo istovremeno ispitivali, prikazani na Slici 13. ispitivanje se vrši istovremeno kako bismo vidjeli odgovore modela na iste pobude koje izaziva potresni stol. Ukoliko bi se ispitivanje radilo posebno za svaku konstrukciju ne bismo ih mogli sa sigurnošću uspoređivati jer pobude stola ne bi nužno bile identične tj. potresni stol može napraviti pogreške.



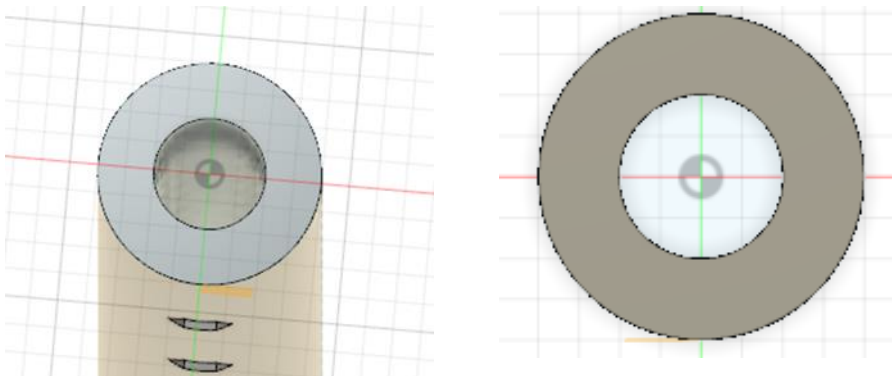
Slika 13. Prikazano s lijeva na desno; okvir 2, okvir 1, okvir 3

Okvir 1, (prikazan na slici 13) je bez povezanih dijagonala, na temelju usporedbe ostala dva okvira s njime, vidjeli funkciju dijagonala tj. smanjuju li deformacije same konstrukcije.

Okvir 2, (lijevi okvir na slici 13) ima dodane mekše štapove koji su povezani dijagonalno. Visina mu iznosi 30 cm, a promjer je 0,06cm. Dijagonala je prikazana na Slici 14.



Slika 14. Dijagonala 1, promjer šupljine 0,04cm, prikazan u Autodesk Fusion-u 360
Okvir 3, (desni okvir na slici 13) ima dodane krute štapove koju su povezani dijagonalno.
Visina štapa iznosi 30 cm, a promjer je 0,04cm. Prikazana na Slici 15.



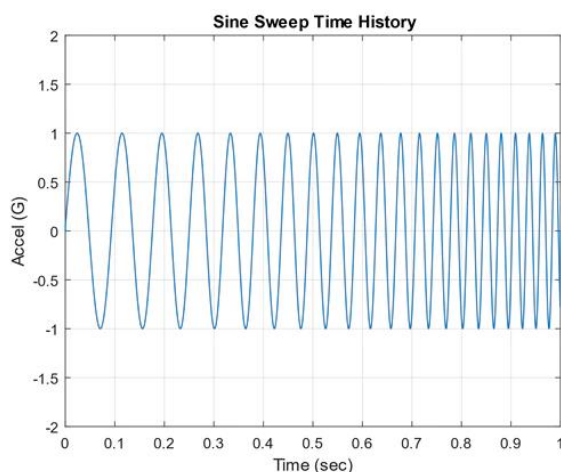
Slika 15. Dijagonala 2- promjer šupljine 0,06cm, prikazan u Autodesk Fusion-u 360

5. PROVEDENI EKSPERIMENT

Provedeni eksperimenti su se izvodili u laboratoriju za konstrukcije građevinskog fakulteta na potresnom stolu (opisan u poglavlju 4.1.1.), snimljeni su optičkim kamerama (opisana u poglavlju 4.1.2), a dobiveni podatci su obrađeni u GOM Correlate programu iz kojeg su dobiveni slijedeći rezultati.

5.1. Opis eksperimenta

Kako bismo ispitali isprintane dijagonalne štapove provodili smo četiri različita testa. Prvi test započeo je sinusoidnim zapisom. Sinusoida je matematička krivulja definirana sinusnom trigonometrijskom krivuljom, čiji je to graf (jednadžba glasi : $y = \sin x$, prikazana na Slici 14.). To je vrsta kontinuiranog vala i glatke periodične funkcije čija se frekvencija može povećavati ili smanjivati. Sinusoida je prikazana na Slici 16. [11]



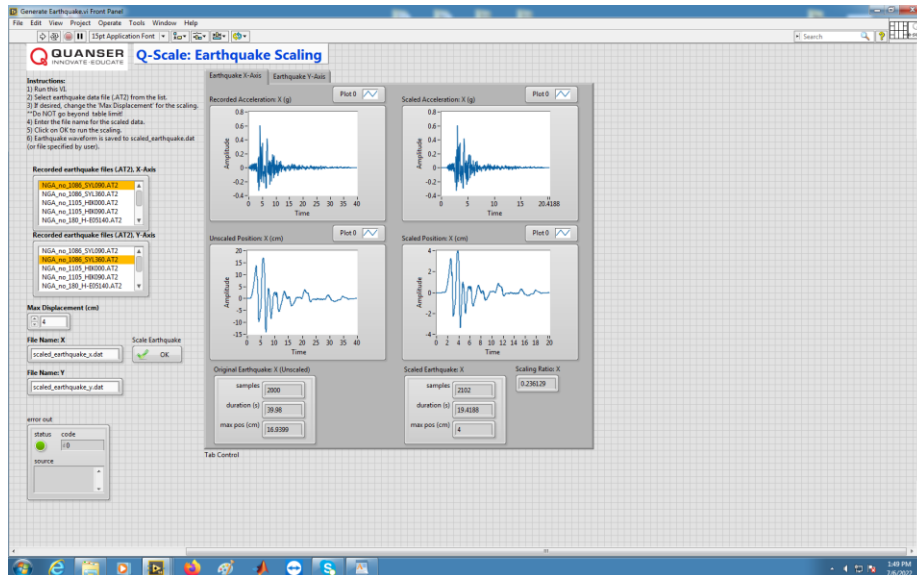
Slika 16. Sinusoidna krivulja [10]

U sljedećem testu izvršili smo ručnu pobudu okvira. Potresni stol je bio u stanju mirovanja. Okvire sam osobno uhvatila, izmaknula iz položaja ravnoteže i pustila. Na taj način sam postigla osciliranje okvira.

U trećem i četvrtom testu koristili smo potresni zapis Northridge, razlika u testovima jer bila kut širenja potresnih valova. Northridge potres je drugi najjači potres koji je zatekao Sjedinjene Američke Države. Njegov obim iznosio je 137 kilometara i obuhvatio je šire područje Kalifornije. Prvi i najjači slom bio je 6,7 magnitude i trajao je između 10 i 20 sekundi. Poslije prvog uslijedila su još dva kraća potresa, neznatno manje od 6 magnitude. Ubrzanje tla uzrokovano potresom je jedno od najvećih instrumentom zabilježenih u tom dijelu Amerike i iznosilo je 1,82g. Brzina tla zabilježena na prihvatnoj stanici Rinaldi iznosila je 183 cm/s, također najveća do tada zabilježena. Potres se odvio u dolini San

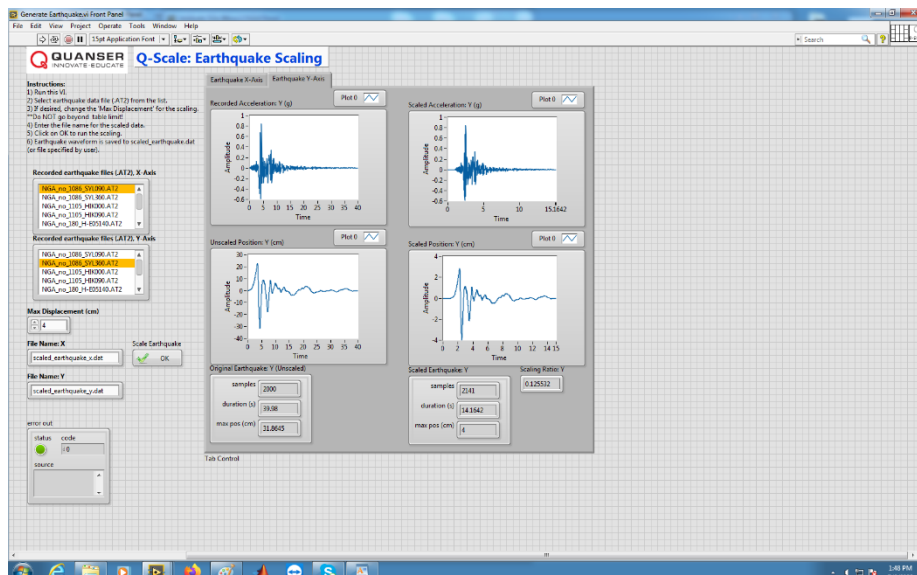
Fernando na prethodno neotkrivenom rasjedu. Procjena štete uzrokovane potresom iznose 24-93 milijardi dolara, što ga čini, uz najjači potres i najskupljom prirodnom katastrofom u SAD-u. [10]

U trećem ispitivanju korišten je potresni zapis Northridge koji je usmjeren 90^0 u odnosu na seizmograf (Slika 17.). Slikom je prikazan graf potresnog zapisa u stvarnoj veličini, a sa desne strane je za potrebe simuliranja potresa u laboratoriju skaliran na maksimalni pomak od 4 cm. Potresni zapis općenito mora biti skaliran zbog mogućnosti potresnog stola.



Slika 17. Snimak zaslona računala, postavke Northridge pobude potresnog stola, smjer širenja potresnih valova 90^0

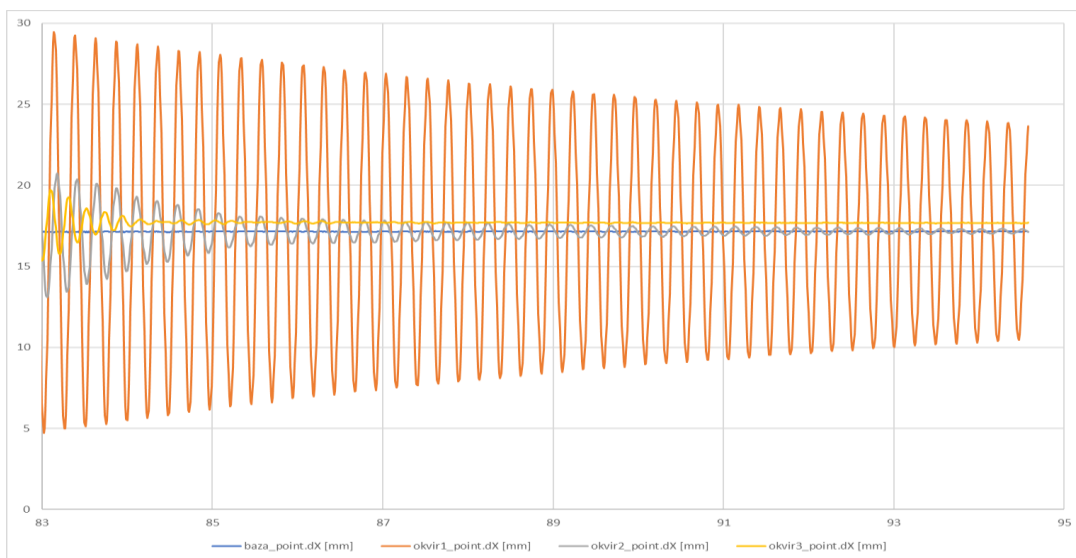
U četvrtom testu korišten je isti potresni zapis no u smjeru od 360^0 u odnosu na seizmogram. Na slici je prikazana stvarna veličina i skalirana veličina potresa. (Slika 18.)



Slika 18. Snimak zaslona računala, postavke potresa Northridge pobude potresnog stola, smjer širenja valova 360^0

5.2. Izračun dinamičkih karakteristika okvira iz slobodnih oscilacija

Kako bismo izračunali veličine prigušenja i vlastite frekvencije svakog pojedinog okvira obratili smo pažnju na dio ispitivanja kada se potresni stol umiri. U prvom provedenom testu gdje je potresni stol bio pokrenut sinusnom pobudom, potresni stol se umirio u 83. sekundi. (Slika 19)



Slika 19. Grafički prikaz pomaka okvira nakon smirivanja baze potresnog stola

Iz prethodne tablice očitali smo četiri točke maksimalnih vrijednosti amplitude i zapisali tablično (Tablica 2.)

Okvir 1			Okvir-2		Okvir 3	
broj	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)
1	83,138918	12,363456	83,188918	3,36997	83,128918	1,965619
2	83,388918	12,14081	83,398918	3,087586	83,338918	1,63673
3	83,628918	11,945036	83,628918	2,733393	83,498918	1,202719
4	83,868918	11,762991	83,858918	2,463543	83,708918	1,024329

Tablica 2. Prikaz vremena i amplitude okvira

Iz navedenog vremena, izračunali smo period osciliranja za svaki okvir, a on iznosi $T_1=0,243$ s, $T_2=0,223$ s i $T_3=0,193$ s. Vlastite frekvencije okvira jesu:

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,243} = 4,1096 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,223} = 4,4776 \text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{0,193} = 5,1724 \text{ Hz}$$

Poznavajući vrijednosti vlastitih frekvencija možemo izračunati kružne frekvencije okvira:

$$\omega_1 = f_1 \cdot 2\pi = 4,1096 \cdot 2\pi = 25,821 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_2 = f_2 \cdot 2\pi = 4,4776 \cdot 2\pi = 28,134 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_3 = f_3 \cdot 2\pi = 5,1724 \cdot 2\pi = 32,499 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Nakon što smo izračunali vrijednosti kružnih frekvencija, poznavajući mase okvira možemo dobiti vrijednosti krutosti pojedinog okvira iz jednadžbe:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m}} \rightarrow k_1 = \omega_1^2 \cdot m = 25,821^2 \cdot 0,7415 = 494,388 \frac{\text{radkg}}{\text{s}}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \rightarrow k_2 = \omega_2^2 \cdot m_2 = 28,134^2 \cdot 0,7708 = 610,091 \frac{\text{radkg}}{\text{s}}$$

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{k_3}{m_3}} \rightarrow k_3 = \omega_3^2 \cdot m_3 = 32,499^2 \cdot 0,7917 = 836,194 \frac{\text{radkg}}{\text{s}}$$

Masa okvira 2 i 3 se razlikuje jer smo ih pribrojili mase pričvršćenih dijagonala:

$$m_2 = m + 2 \cdot m_{d1} = 741,5 + 2 \cdot 14,667 = 770,83 \text{ g} = 0,7708 \text{ kg}$$

$$m_3 = m + 2 \cdot m_{d2} = 741,5 + 2 \cdot 25,075 = 791,65 \text{ g} = 0,7917 \text{ kg} .$$

Za izračunavanje veličine prigušenog titranja koristimo se jednadžbom za slabo prigušene sustave:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i+j}}$$

Dobivene vrijednosti za svaki okvir prikazan u Tablici 3.

	Okvir 1	Okvir 2	Okvir 3
ζ_1	0,02855	0,13747	0,28762
ζ_2	0,02554	0,19395	0,48399
ζ_3	0,02412	0,16327	0,25219
Srednja vrijednost	0,02609	0,16405	0,34127

Tablica 3. Prigušenje okvira

Iz dobivenih vrijednosti prigušenja i kružne frekvencije možemo dobiti koeficijent prigušenja koji je:

$$c_1 = \zeta_1 \cdot 2m \cdot \omega_1 = 0,02609 \cdot 2 \cdot 0,7415 \cdot 25,821 = 0,9982$$

$$c_2 = \zeta_2 \cdot 2m_2 \cdot \omega_2 = 0,16405 \cdot 2 \cdot 0,7708 \cdot 28,134 = 7,1148$$

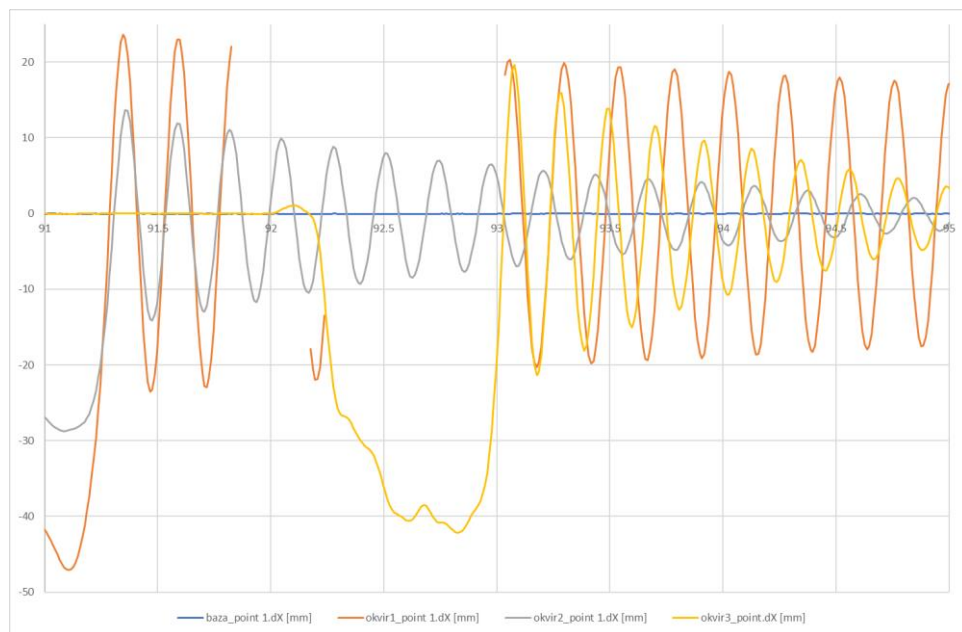
$$c_3 = \zeta_3 \cdot 2m_3 \cdot \omega_3 = 0,34127 \cdot 2 \cdot 0,7917 \cdot 32,499 = 17,5613$$

Iz dobivenih rezultata jasno je vidljivo da Okvir 3 koji ima privezane „krute“ dijagonalne štapove, ima znatno veći koeficijent prigušenja nego Okvir 1 bez ikakvih dijagonalnih štapova.

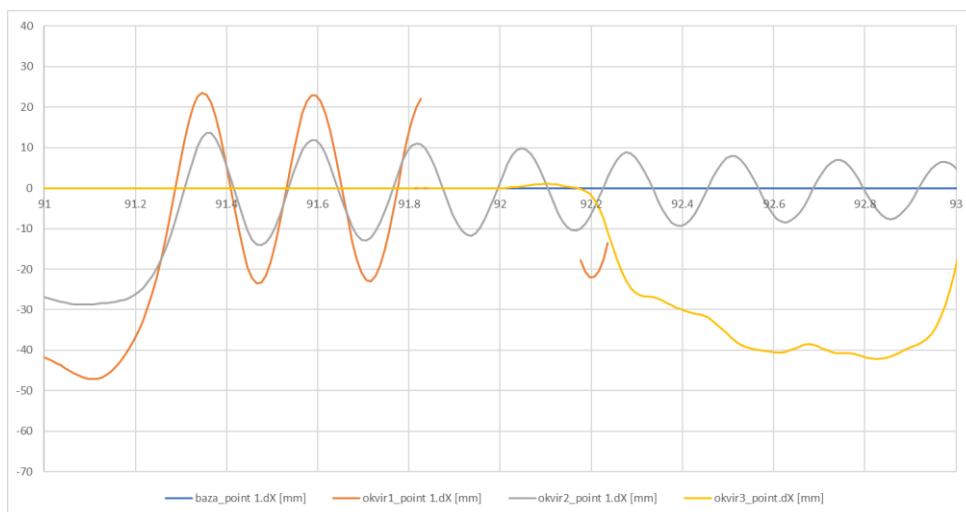
U drugom testu, su okviri micani rukom, tj. ja sam svakog osobno izmaknula i pustila (Slika 20). Svaki je imao najveće amplitude u različitom vremenu. Okvir 1 ima najveće amplitude u rasponu do 91. do 95. sekunde (Slika 21), okvir 2 ima najveće amplitude u rasponu od 91. do 93. sekunde (Slika 22.), a okvir 3 ima najveće amplitude u rasponu od 99. do 101. sekunde (Slika 23). Dobiveni grafovi su nepravilni iz razloga što vlastoručnom pobudom postignuti veliki pomaci i velike brzine kretanja, a optički sustav pri velikim brzinama dobiva mutne fotografije i iz njih ne uspijeva izračunati pomake.



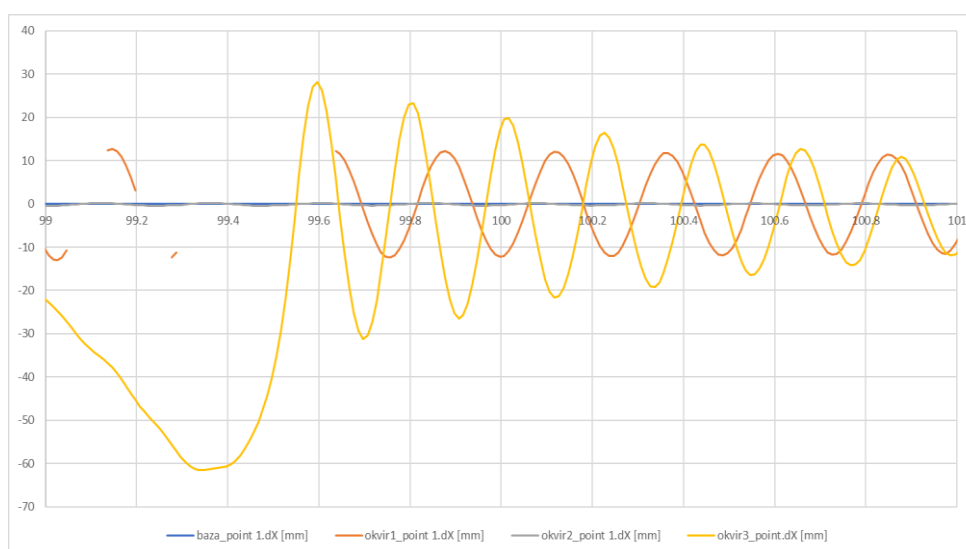
Slika 20. Vlastoručna pobuda okvira, slikano u programu Aramis



Slika 21. Najveće amplitude okvira 1



Slika 22. Najveće amplitude okvira 2



Slika 23. Najveće amplitude okvira 3

Okvir 1			Okvir-2		Okvir 3	
broj	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)
1	91,346554	23,60098	91,366554	13,54496	99,596554	28,11425
2	91,596554	22,94147	91,596554	11,797202	99,806554	23,26877
3	91,826554	22,03466	91,826554	10,791646	100,006554	19,53378
4	-	-	92,056554	9,54545	100,236554	15,37377

Tablica 4. Vremena i amplitude okvira

Iz Tablice 4. proračunali smo periode Okvira i one iznose $T_1 = 0,24$ s, $T_2 = 0,23$ i $T_3 = 0,213$.

Dobivši vrijednost perioda možemo izračunati frekvenciji po sljedećoj formuli:

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,24} = 4,1667 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,23} = 4,3478 \text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{0,213} = 4,6875 \text{ Hz}$$

A zatim izračunavamo vrijednost kružne frekvencije :

$$\omega_1 = f_1 \cdot 2\pi = 4,1667 \cdot 2\pi = 26,17994 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_2 = f_2 \cdot 2\pi = 4,3478 \cdot 2\pi = 27,3182 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_3 = f_3 \cdot 2\pi = 4,6875 \cdot 2\pi = 29,4524 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Znajući masu okvira i kružnu frekvenciju, možemo dobiti njihovu krutost:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m}} \rightarrow k_1 = \omega_1^2 \cdot m = 26,17994^2 \cdot 0,7415 = 508,2161 \frac{\text{radkg}}{\text{s}}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \rightarrow k_2 = \omega_2^2 \cdot m = 27,3182^2 \cdot 0,7708 = 575,2356 \frac{\text{radkg}}{\text{s}}$$

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{k_3}{m_3}} \rightarrow k_3 = \omega_3^2 \cdot m = 29,4524^2 \cdot 0,7917 = 686,7568 \frac{\text{radkg}}{\text{s}}$$

Okviru 2 i 3 pribrojili smo mase dijagonala. Za izračunavanje veličine prigušenog titranja koristimo se jednažbom za slabo prigušene sustave:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i+j}}$$

Dobivene vrijednosti za svaki okvir prikazane su u Tablici 5.

	Okvir 1	Okvir 2	Okvir 3
ζ_1	0,044519	0,217009	1,897898
ζ_2	0,063349	0,139942	1,871143
ζ_3	-	0,192075	1,995841
Srednja vrijednost	0,053934	0,183009	1,921627

Tablica 5. Vrijednosti prigušenja okvira i srednje vrijednosti

Sa izračunatim vrijednostima izračunavamo koeficijent prigušenja:

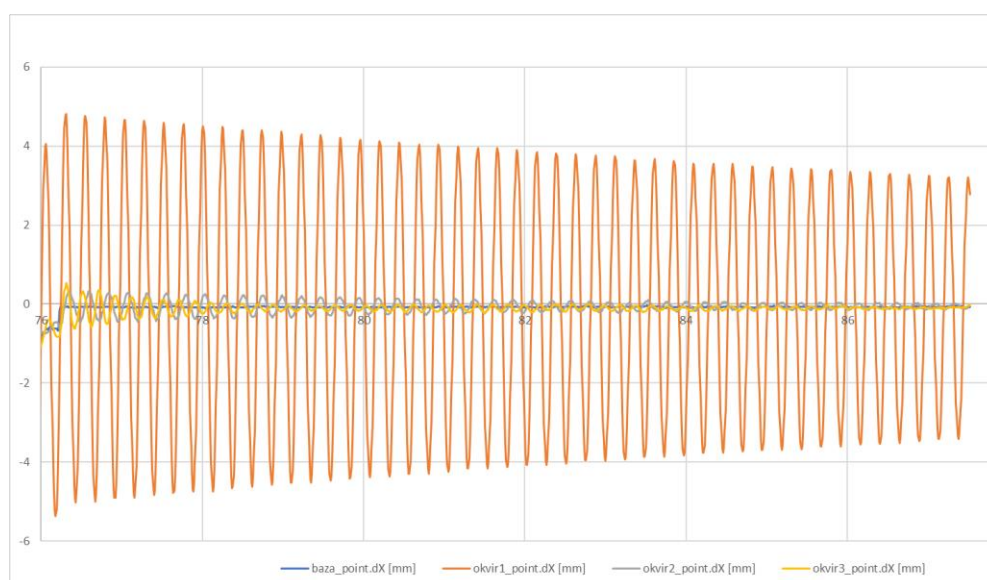
$$c_1 = \zeta_1 \cdot 2m \cdot \omega_1 = 0,053934 \cdot 2 \cdot 0,7415 \cdot 26,17994 = 2,0940$$

$$c_2 = \zeta_2 \cdot 2m_2 \cdot \omega_2 = 0,183009 \cdot 2 \cdot 0,7708 \cdot 27,3182 = 7,7072$$

$$c_3 = \zeta_3 \cdot 2m_3 \cdot \omega_3 = 1,921627 \cdot 2 \cdot 0,7917 \cdot 29,45245 = 89,6151$$

Iz dobivenih vrijednosti možemo vidjeti da je amplituda okvira 3 najveća u odnosu na druga dva okvira. Vlastita frekvencija i kružna frekvencija se minimalno razlikuju u rezultatima svakog okvira. Okvir 3 ima dosta veću krutost u odnosu na druga dva okvira. Te je jasno vidljivo i pretpostavka je bila da će okvir 3 imati najveći koeficijent prigušenja.

U trećem testu gdje je potresni stol pobuđen potresnim zapisom Northridge, obratili smo pažnju na 76. sekundi provedenog ispitivanja. (Slika 24.)



Slika 24. Potresni zapis Northridge 90⁰, baza potresnog stola miruje

Ponovo su očitane četiri točke najveće amplitude svakog okvira i prikazane tablično (Tablica 6.)

Okvir 1			Okvir-2		Okvir-3	
broj	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)
1	76,549167	4,836527	76,579167	0,348104	76,509167	0,353313
2	76,789167	4,811292	76,859167	0,295612	76,709167	0,397755
3	77,029167	4,741067	77,049167	0,277648	76,899167	0,24365
4	77,279167	4,732838	77,299167	0,326584	77,109167	0,230027

Tablica 6. Vremena i amplitude okvira

Iz prethodne Tablice 6. dobili smo srednju vrijednost perioda $T_1=0,243$ s, $T_2=0,24$ i $T_3=0,20$ s. Pomoću dobivenih perioda izračunati ćemo frekvencije svakog okvira:

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,243} = 4,1096 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,240} = 4,1667 \text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{0,200} = 5 \text{ Hz}$$

Izračunati ćemo kružne frekvencije:

$$\omega_1 = f_1 \cdot 2\pi = 4,1096 \cdot 2\pi = 25,821 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = f_2 \cdot 2\pi = 4,1667 \cdot 2\pi = 26,180 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_3 = f_3 \cdot 2\pi = 5 \cdot 2\pi = 31,416 \text{ rad/s}$$

Poznavajući masu okvira i prethodno dobivenu kružnu frekvenciju, izračunati ćemo krutosti okvira:

$$k_1 = \omega_1^2 \cdot m = 25,821^2 \cdot 0,7415 = 494,821 \frac{\text{radkg}}{\text{s}}$$

$$k_2 = \omega_2^2 \cdot m_2 = 26,180^2 \cdot 0,7708 = 528,298 \frac{\text{radkg}}{\text{s}}$$

$$k_3 = \omega_3^2 \cdot m_3 = 31,416^2 \cdot 0,7917 = \frac{781,377 \text{radkg}}{\text{s}}$$

Vrijednosti prigušenja dobijemo iz jednadžbe:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{u_i}{u_{i+j}}$$

	Okvir 1	Okvir 2	Okvir 3
ζ_1	0,008217	0,256752	-0,18611
ζ_2	0,023096	0,098479	0,769853
ζ_3	0,002729	-0,25499	0,090377
Srednja vrijednost	0,011347	0,033413	0,224706

Tablica 7. Prigušenja okvira i srednje vrijednosti

Vrijednost prigušenja prikazana su u Tablici 7. , a njenu srednju vrijednost koristimo za izračunavanje vrijednosti koeficijenta prigušenja:

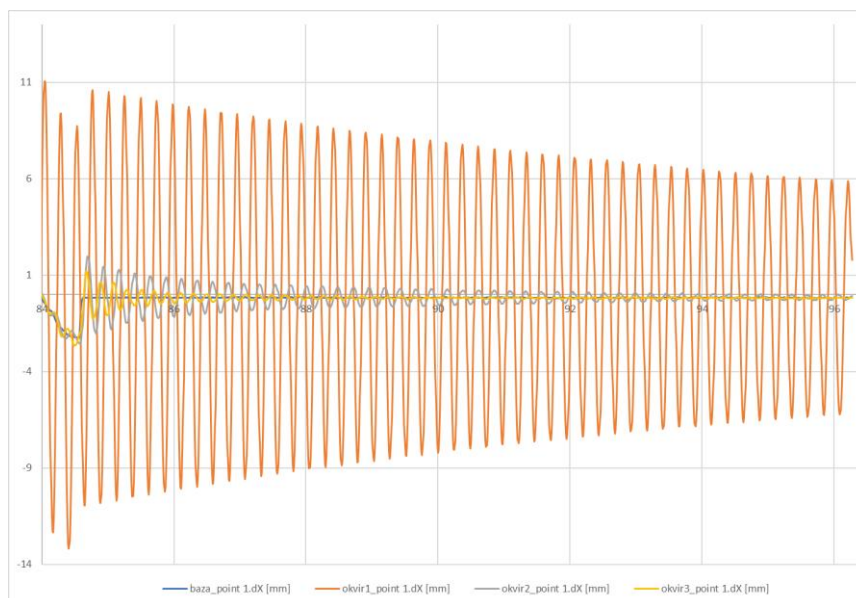
$$c_1 = \zeta_1 \cdot 2m \cdot \omega_1 = 0,011347 \cdot 2 \cdot 0,7415 \cdot 25,821 = 0,434525$$

$$c_2 = \zeta_2 \cdot 2m_2 \cdot \omega_2 = 0,033413 \cdot 2 \cdot 0,7708 \cdot 26,180 = 1,3485$$

$$c_3 = \zeta_3 \cdot 2m_3 \cdot \omega_3 = 0,224706 \cdot 2 \cdot 0,7917 \cdot 31,416 = 11,1778$$

Iz dobivenih rezultata možemo vidjeti da su amplitude okvira 1 daleko veće nego kod ostala dva okvira. Vlastita i kružna frekvencija okvira 3, nešto je veća nego li kod druga dva okvira. Može se primijetiti da su dijagonale okvira 3 doprinijele njegovoj krutosti i velikom koeficijentu prigušenja.

U testu zadnjem testu korišten je potresni zapis Northridge 360⁰, a u 85. sekundi smo očitali amplitude i napravili proračune. (Slika 25.)



Slika 25. Potresni zapis Northridge 360⁰, baza potresnog stola miruje

Očitane točke za daljnji proračun prikazane su tablično. (Tablica 8.)

Okvir 1			Okvir 2		Okvir 3	
Broj	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)	Vrijeme (s)	Amplituda (mm)
1	84,759415	10,642674	84,689415	2,142806	84,689415	1,288012
2	85,009415	10,688975	84,949415	1,50949	84,909415	0,609059
3	85,259415	10,353765	85,149415	1,309345	85,099415	0,697567
4	85,489415	10,210536	85,389415	1,12697	85,319415	0,225289

Tablica 8. Vremena i amplitude okvira

Iz prethodne tablice izračunati ćemo periode kako bi mogli izračunati vlastite frekvencije.

Dobiveni periodu su: $T_1=0,243$ s, $T_2=0,233$ s i $T_3=0,210$ s. Vlastite frekvencije okvira su:

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,243} = 4,1096 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,240} = 4,2857 \text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{0,200} = 4,7619 \text{ Hz}$$

A zatim kružne frekvencije :

$$\omega_1 = f_1 \cdot 2\pi = 4,1096 \cdot 2\pi = 25,821 \frac{rad}{s}$$

$$\omega_2 = f_2 \cdot 2\pi = 4,2857 \cdot 2\pi = 26,928 \frac{rad}{s}$$

$$\omega_3 = f_3 \cdot 2\pi = 4,7619 \cdot 2\pi = 29,920 \frac{rad}{s}$$

Pomoću prethodno dobivenih rezultata, proračunavamo krutost svakog okvira:

$$k_1 = \omega_1^2 \cdot m = 25,821^2 \cdot 0,7415 = 494,388 \frac{radkg}{s}$$

$$k_2 = \omega_2^2 \cdot m_2 = 26,928^2 \cdot 0,7708 = 558,918 \frac{radkg}{s}$$

$$k_3 = \omega_3^2 \cdot m_3 = 29,920^2 \cdot 0,7917 = 708,731 \frac{radkg}{s}$$

Dobijemo vrijednosti prigušenja (Tablica 9.)

	Okvir 1	Okvir 2	Okvir 3
ζ_1	-0,00686	0,55032	1,176432
ζ_2	0,05005	0,223438	-0,21313
ζ_3	0,021881	0,235611	1,775337
Srednja vrijednost	0,021689	0,336456	0,912879

Tablica 9. Prigušenja okvira i srednje vrijednosti

Srednju vrijednost prigušenja (Tablica 9.) koristimo prilikom izračuna koeficijenta prigušenja:

$$c_1 = \zeta_1 \cdot 2m \cdot \omega_1 = 0,021689 \cdot 2 \cdot 0,7415 \cdot 25,821 = 0,8305$$

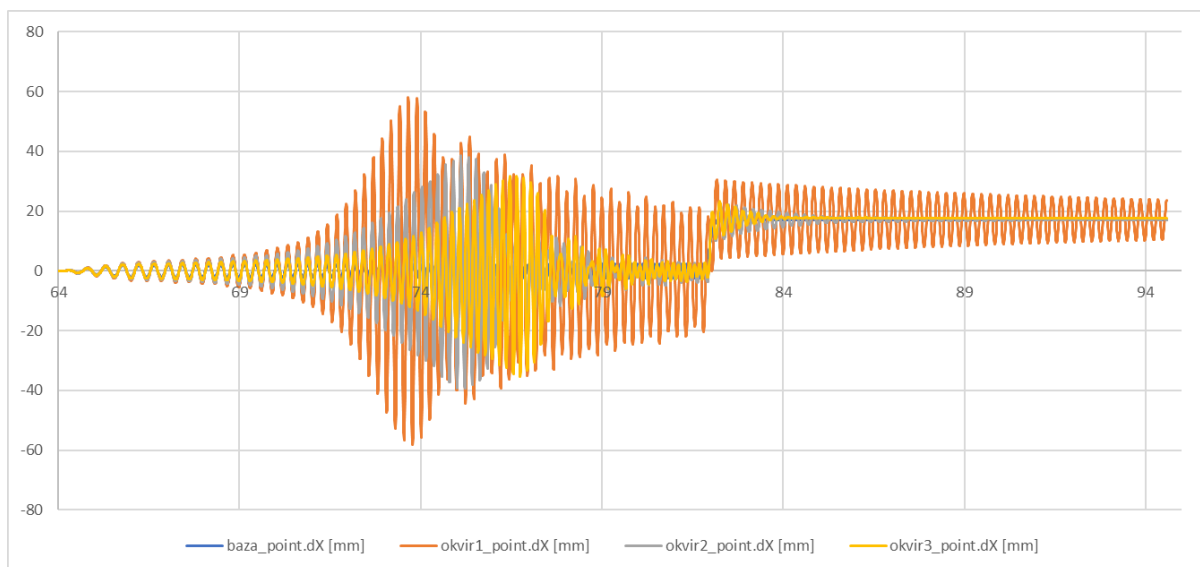
$$c_2 = \zeta_2 \cdot 2m_2 \cdot \omega_2 = 0,336456 \cdot 2 \cdot 0,7708 \cdot 26,928 = 13,967$$

$$c_3 = \zeta_3 \cdot 2m_3 \cdot \omega_3 = 0,912879 \cdot 2 \cdot 0,7917 \cdot 29,920 = 43,2479$$

Dobivenim rezultatima možemo opet potvrditi da veća krutost okvira (dobivena dodavanjem 3D printanih dijagonala) manjim periodom valova te smanjenja titranja i povećanja prigušenju. Prigušenje okvira 3 je za 40 puta veće od okvira 1. iz četiri provedena ispitivanja su dobivene neznatno različite frekvencije za okvir 1, dok su razlike kod okvira 2 i 3 veće. Razlog tome može biti nedovoljna preciznost mjerenja kod većih frekvencija, izlazak iz linearnog područja ponašanja okvira ili način pričvršćenja dijagonala za okvir.

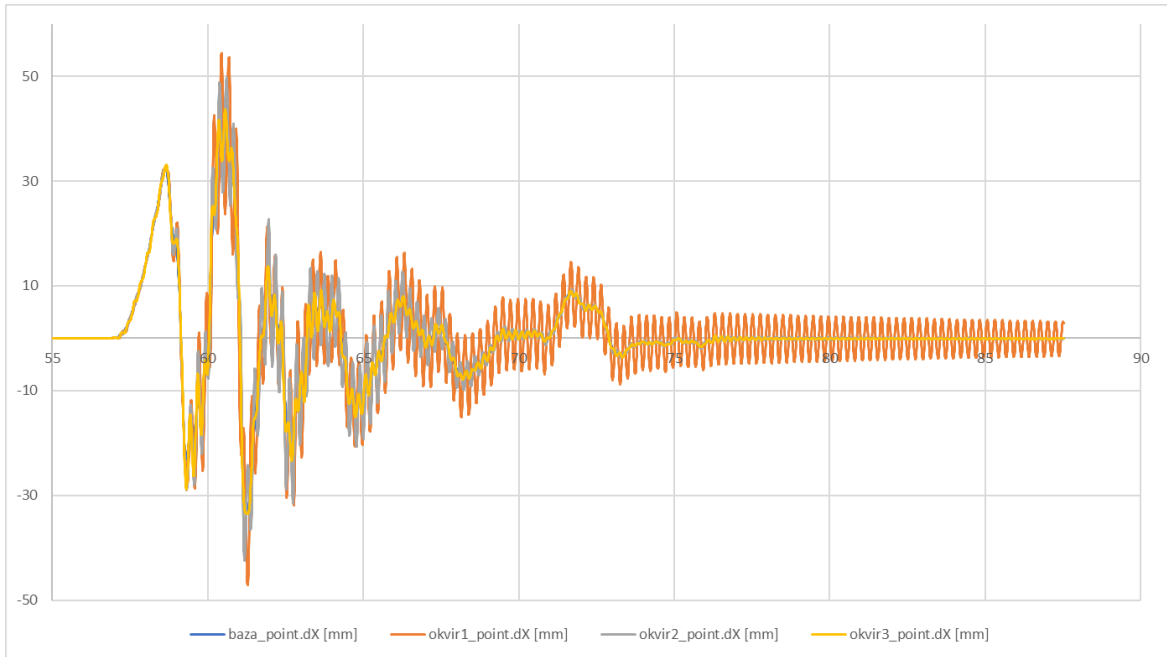
5.3. Dinamičko opterećenje potresnog stola

U prvom ispitivanju korištena je sine sweep potresna pobuda, a graf je prikazan na Slici 26. U dobivenom grafu vidljivo je da okvir 1 ima najveće amplitude, a zatim okvir 2 i okvir 3. Vidljivo je da se povećanjem frekvencije pobude u različito vrijeme javljaju maksimalne amplitude. Jasno je vidljivo da dijagonalni štapovi doprinose smanjenju amplitude te smanjuju potrebno vrijeme za prigušavanje tj. umirivanje okvira.

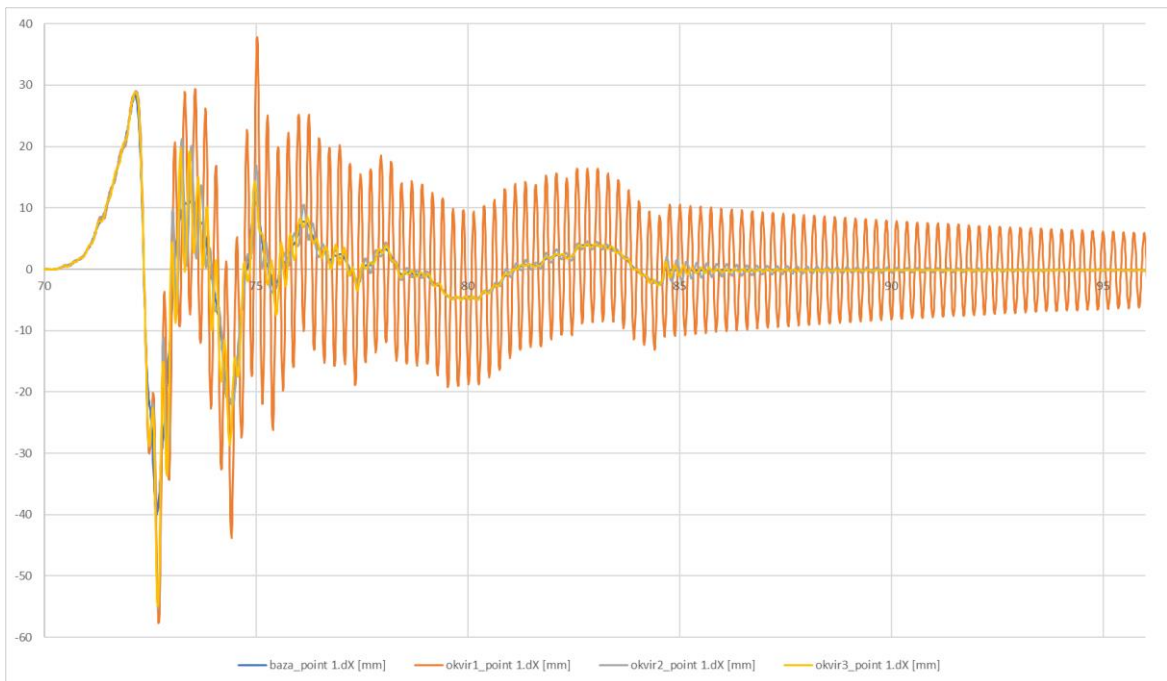


Slika 26. Oscilacije okvira uzrokovan potresnom pobudom sine sweep

U trećem testu, gdje je korišten potresni zapis Northridge 90^0 , prikazanom na slici 27., vidimo da na samom početku djelovanja potresnog opterećenja, nema velike razlike u oscilacijama okvira. Što više vrijeme odmiče razlike u oscilacijama su veće. Također, u četvrtom testu gdje je korišten isti potresni zapis, no smijer valova je 360^0 (Slika 28.) vide se iste karakteristike ponašanja okvira. Analitički je dokazano da krući okvir s dodanim 3D printanim dijagonalama, u našem slučaju je to okvir 3, imat veću vlastitu frekvenciju a manji period, te znatno veći koeficijent prigušenja sustava.



Slika 27. Oscilacije okvira uzrokovane potresnom pobudom Northridge 90⁰



Slika 28. Oscilacije okvira uzrokovane potresnom pobudom Northridge 360⁰

6. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

U radu su opisani potresi, njihovi uzroci i način kretanja pojedinih potresnih valova. Opisana je reakcija građevine prilikom djelovanja potresa i problemi koji nastaju ukoliko se potres ne uzme u obzir prilikom proračuna i građenja iste.

U svrhu provođenja ovog ispitivanja dinamičkog odgovora jednokatnog okvira s dodanim ojačanjima dizajnirani su dijagonalni štapovi sa otvorima šesterokutnog oblika po jednoj osi stranice. Štapovi su printani u dvije veličine odnosno sa dvije različite veličine promjera. Od svake vrste štapova isprintani su dva uzorka, kako bi se mogli dijagonalno pričvrstiti na okvir. Ispitivanje dijagonalnih štapova izvodilo se na potresnoj platformi Quanser ST-III, a pomaci su snimljeni i praćeni optičkom kamerom i mjernim sustavom GOM mbH PONTOS 3D 4M.

Iz priloženih dijagrama i iz provedenog proračuna možemo zaključiti da 3D dijagonalni štapovi poboljšavaju dinamički odgovor građevine. Okviri koji su učvršćeni dijagonalama imaju bolje dinamičke performanse za manje frekvencije potresa. Jasno je vidljivo iz svih priloženih grafova da su oscilacije manje kod onih okvira koji imaju dijagonalne štapove, a pogotovo okvira 3 koji ima štapove debljeg promjera. U svim potresnim zapisima utvrđeno je značajno smanjenje amplituda i znatno brže smanjivanje oscilacije, te time bolje prigušenje građevina.

U nastavku istraživanja bilo bi dobro provesti ispitivanje na jednostavnim jednokatnim konstrukcijama koje su učvršćene dijagonalama, ali s dinamičkom provedbom dva smjera.

7.LITERATURA

- [1] Tkalčić Hrvoje :POTRESI KOD ZAGREBA: NEKA PITANJA I OGDOVORI, https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/o_potresima?@=1lrt7#news_97576, pristup 27.4.2022.
- [2] Jagodnik Perta : Primjenjena geologija- Potresi , https://moodle.srce.hr/2019-2020/pluginfile.php/3351755/mod_resource/content/1/PG_SVS_2019_P13_Potresi.pdf, pristup 2.5.2022.
- [3] „Richterova ljestvica - Wikipedija“, https://hr.wikipedia.org/wiki/Richterova_ljestvica, pristup 8.6.2022.
- [4] „Što je Richterova, a što Marcellijeva ljestvica?“, <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> , pristup 8.6.2022.
- [5] „rezonancija – Wikipedija“ , <https://hr.wikipedia.org/wiki/Rezonancija>, pristup 7.5.2022.
- [6] Jagodnik Perta : Primjenjena geologija- Potresi , https://moodle.srce.hr/2019-2020/pluginfile.php/3351755/mod_resource/content/1/PG_SVS_2019_P13_Potresi.pdf,
- [7] „ DINAMIKA KONSTRUKCIJA s uvodom u potresno inženjerstvo“, https://www.grad.unizg.hr/download/repository/DK_skripta%5B2%5D.pdf pristup 17.8.2022.
- [8] „ Katalog laboratorijske i terenske opreme Građevinskog fakulteta u Rijeci“
- [9] „ FDM 3D printing“ , [FDM 3D ispis - Modeliranje fused taloženja poznato i kao FFF \(tractus3d.com\)](https://www.tractus3d.com), pristup 5.7.2022.
- [10]„Northinge1994“,https://en-m-wikipedia-org.translate.goog/wiki/1994_Northridge_earthquake?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=hr&_x_tr_hl=hr&_x_tr_pto=sc, pristup 18.8.2022.
- [11] „ Sine sweep testing“, <https://endaq.com/pages/sine-sweep-testing> , pristup 24.8.2022.