

Analiza ponašanja armiranobetonske zgrade u potresu

Filip Cvetko¹, doc.dr.sc. **Mario Uroš²**, izv.prof.dr.sc. **Domagoj Damjanović³**

¹ Radionica statike d.o.o., filip.cvetko@statika.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za tehničku mehaniku, uros@grad.hr

³ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za tehničku mehaniku, ddomagoj@grad.hr

Sažetak

Dinamički parametri građevine – vlastite frekvencije, modalni oblici i koeficijenti prigušenja, osnovni su pokazatelji realnog stanja građevine i omogućuju predviđanje ponašanja konstrukcije uslijed mogućeg potresnog opterećenja. Provedena su eksperimentalna mjerenja dinamičkih parametara zgrade Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno – matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Izrađen je numerički model građevine i provedena je kalibracija modela na temelju rezultata ispitivanja te je analizirano ponašanje armiranobetonske konstrukcije uslijed potresnog opterećenja.

Ključne riječi: dinamički parametri, eksperimentalno mjerenje, numeričko modeliranje, kalibracija, potres

Analysis of reinforced concrete building under seismic load

Abstract

Dynamic structural parameters - natural frequencies, modal shapes, and damping coefficients - are the basic indicators of the real building condition, and they allow prediction of building behaviour under seismic load. Experimental measurements of dynamical parameters were conducted for the Geophysical Department building forming part of the Faculty of Science of the University of Zagreb. Numerical model of the building was made and the model was calibrated based on experimental results. Finally, the behaviour of the reinforced concrete structure subjected to seismic load was analysed.

Key words: dynamic parameters, experimental testing, numerical modelling, calibration, earthquake

1 Uvod

U protekla dva desetljeća postala je operacionalna modalna analiza glavni postupak utvrđivanja dinamičkih karakteristika građevinskih konstrukcija. Modalnom analizom određuju se dinamički parametri, odnosno vlastite frekvencije, modalni oblici i prigušenja konstrukcije prilikom određene pobude. Važna je zbog konačnog formuliranja matematičkog modela i upotrebljava se pri opisivanju cjelokupnog dinamičkog ponašanja konstrukcije [1].

Potresno opterećenje je dominantno horizontalno opterećenje na građevinske konstrukcije u našem području. Dinamički parametri građevine osnovni su pokazatelji realnog stanja građevine i omogućuju predviđanje ponašanja građevine uslijed mogućeg potresnog opterećenja [2]. Provedeno je eksperimentalno mjerenje dinamičkih parametara postojeće građevine i na temelju tih rezultata i dostupnih materijala izrađen je i kalibriran numerički model konstrukcije. Provedena je potresna analiza i dana ocjena konstrukcije u odnosu na današnje propise. Dostupni materijali uključivali su originalne arhitektonske podloge i armaturne nacрте građevine.

Numerička analiza provedena je metodom konačnih elemenata, najčešće primjenjivanom numeričkom metodom u inženjerskoj praksi.

2 Opis predmetne građevine

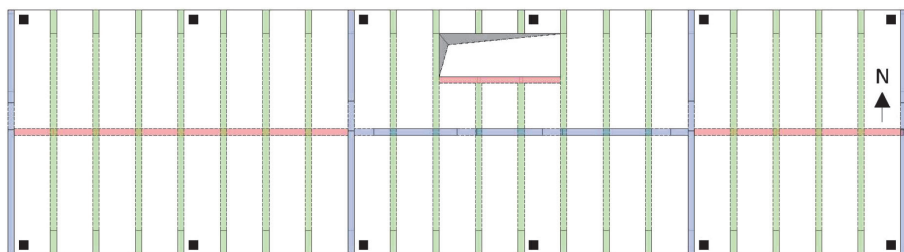
Zgrada Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno – matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu sagrađena je 1982. godine. Prvotno je imala tri etaže, a zadnja četvrta etaža nadograđena je 1996. godine. Građevina je pravokutnog tlocrtnog oblika, približnih dimenzija $45,50 \times 12,40$ m. Visina zgrade, uključujući i četvrtu etažu, iznosi 14,95 m. Četvrta etaža ne pridonosi krutosti konstrukcije već samo predstavlja dodatno stalno opterećenje na glavnu nosivu konstrukciju ispod. Nosivu konstrukciju u poprečnom smjeru čine armiranobetonski okviri na razmaku od $e = 2,16$ m i četiri armiranobetonska zida debljine 16 cm. Odnos stranica vertikalnog nosivog elementa iznosi 1:7,5 tako da se on može smatrati zidom, tj. lamelom.



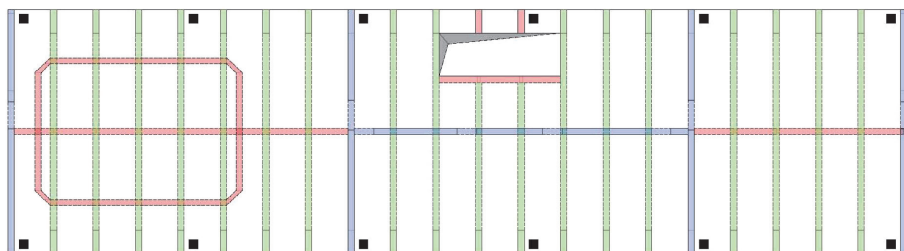
Slika 1. Sjeverno pročelje (lijevo) i južno pročelje (desno) zgrade Geofizičkog odsjeka PMF-a na Horvatuvcu 95

Lamela AB okvira dimenzija je $b/h = 16/120$ cm, a greda okvira je dimenzija $b/h = 16/60$ cm. Nosivu konstrukciju u uzdužnom smjeru čini jedan središnji armiranobetonski zid debljine 16 cm. Marka betona je prema dostupnim nacrtima armature MB 30, što odgovara današnjem razredu betona C25/30. Četvrta naknadno nadograđena etaža je zidana konstrukcija. Zidani zidovi su debljine 30 cm. Krovište je drveno dvostrešno blagog nagiba. Temeljnu konstrukciju čine temeljne stope ispod okvira i temeljne trake ispod nosivih zidova. Na slici 2. shematski su prikazani vertikalni nosivi elementi konstrukcije.

1. i 2. KAT

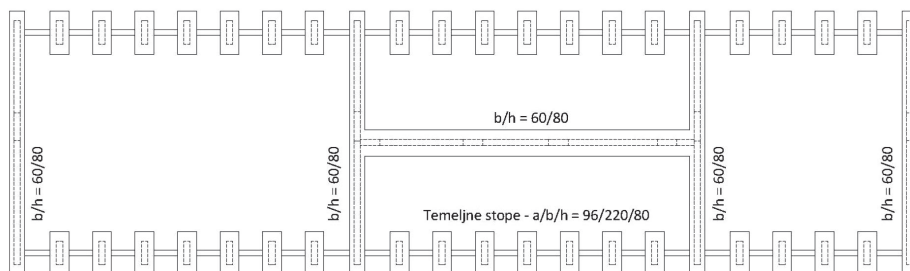


PRIZEMLJE



AB zidovi debljine $t = 16$ cm AB okviri - lamela $b/h = 16/120$ cm i grede $b/h = 16/60$ cm AB grede $b/h = 16/60$ cm
■ mjerna mjesta

TEMELJI



Slika 2. Shematski prikaz nosive konstrukcije predmetne građevine

Prilikom ispitivanja, proveden je i vizualni pregled nosive konstrukcije predmetne građevine. Prema dostupnim informacijama, na zapadnoj strani građevine tlo je lošije kvalitete [2]. Na toj strani smještena je potpuno dilatirana konstrukcija vanjskog stubišta i vidljiv je razmak između stubišta i građevine koji se povećava s visinom (oko 1 cm na prvoj etaži do 2 – 2,5 cm na zadnjoj etaži), što je posljedica diferencijalnih slijeganja građevine. Na sjevernoj i južnoj fasadi su uočene pravilno raspoređene vertikalne pukotine koje su najvjerojatnije posljedica temperaturnih naprezanja i nepostojanja dilatacijskih reški u konstrukciji.

Također, uočene su razne pukotine u pregradnim zidovima, kojih ima više na zapadnoj strani. Na glavnim nosivim elementima konstrukcije, lamelama i gredama te nosivim zidovima, nisu uočene nikakve pukotine ili oštećenja koja bi upozoravala na nedostatnu nosivost konstrukcije.

3 Eksperimentalno određivanje dinamičkih parametara

Eksperimentalno istraživanje je provedeno s ciljem određivanja osnovnih dinamičkih parametara konstrukcije – vlastitih oblika, frekvencija i koeficijenta prigušenja koji će kasnije poslužiti za kalibraciju numeričkog modela konstrukcije. Eksperimentalno određivanje dinamičkih parametara provedeno je operacionalnom modalnom analizom (OMA).

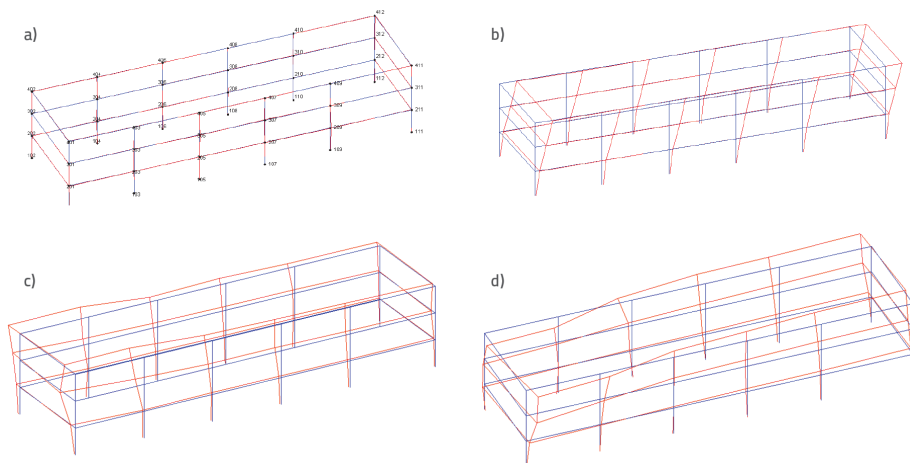
Operacionalna modalna analiza počela se koristiti 90-ih godina prošlog stoljeća. OMA omogućuje određivanje dinamičkih parametara konstrukcije mjerenjem ambijentalnih vibracija konstrukcije. Općenito, OMA je našla široku primjenu kod dinamičkih ispitivanja građevinskih konstrukcija zbog niza prednosti. Najvažnije prednosti odnose se na to što se koriste samo rezultati izmjerenih odgovora konstrukcije, a to znači da nije potrebno poznavati ulaznu pobudu, i to što pri ispitivanju nije potrebno kontrolirano pobuđivati konstrukciju, već se umjesto kontrolirane funkcije pobude koristi ambijentalna pobuda u operacionalnim uvjetima. Pri tome pretpostavljamo da je ona stohastičkog, odnosno nasumičnog karaktera. Osim toga, provođenje ispitivanja zahtijeva samo korištenje opreme za prikupljanje i obradu podataka što omogućuje jednostavnije, brže i jeftinije provođenje ispitivanja [3]. Odgovor konstrukcije (pomak, brzina, akceleracija, vibracije) maksimalne vrijednosti poprima pri određenim frekvencijama te se Fourierovom transformacijom, odnosno razlaganjem signala na komponente s određenim frekvencijama, transformira odgovor konstrukcije iz vremenske u frekvencijsku domenu. Na mjestima rezonantnih frekvencija u frekvencijskom zapisu ističu se rezonantni vrhovi, a iz pripadnih amplituda možemo odrediti modalne oblike [3].

Za zgradu Geofizičkog odsjeka odabrano je 48 karakterističnih točaka mjerenja čiji je položaj prikazan na slici 2. Korištena oprema uključivala je četiri akcelerometra, sustav za prikupljanje podataka i sustav za analizu podataka. Mjerenjem ambijen-

talnih vibracija dekompozicijom frekvencijskog područja (eng. *Frequency Domain Decomposition* - FDD) i poboljšanom dekompozicijom frekvencijskog područja (eng. *Enhanced Frequency Domain Decomposition* - EFDD) metodom OMA-e određeni su dinamički parametri konstrukcije. EFDD metoda nam omogućuje procjenu koeficijenta prigušenja, koji se ne može odrediti standardnom FDD metodom. Odgovor konstrukcije mjereno je pomicanjem dva akcelerometra kroz svih 48 točaka uz dva nepomična referentna akcelerometra, po jedan za svaki horizontalni smjer. Vibracije su mjerene na rubovima objekta u blizini lamela poprečnih AB okvira s 12 mjernih točaka po stropnoj ploči. Mjerenja su izvršena u prizemlju, 1., 2. i 3. katu. Vibracije su mjerene u dva glavna horizontalna smjera, što sveukupno daje 96 mjerenih stupnjeva slobode. Rezultati ispitivanja dinamičkih parametara prikazani su u tablici 1. Prikaz mjernih i modalnih oblika dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem dan je na slici 3.

Tablica 1. Rezultati eksperimentalnog mjerenja

Modalni oblik	Frekvencija [Hz]	Prigušenje [%]	Period [s]
1. translacija X	4,25	3,95	0,235
2. translacija Y	5,50	5,43	0,182
3. torzija	6,40	5,68	0,156

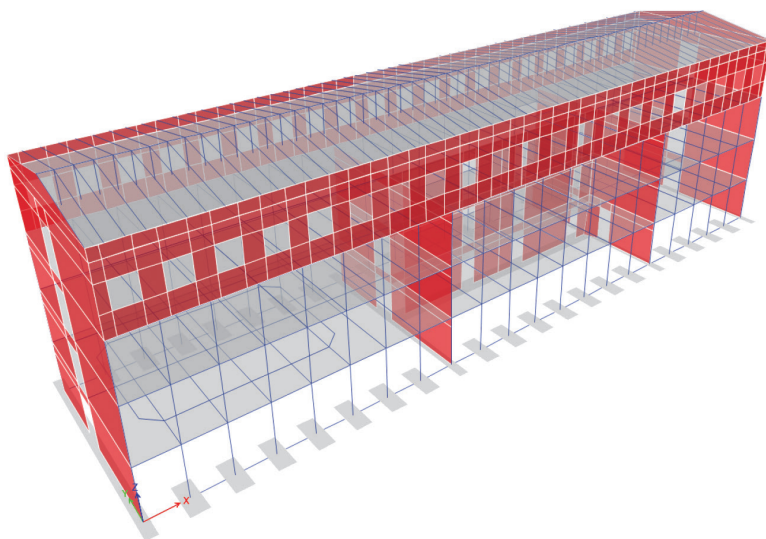


Slika 3. Prikaz mjernih i modalnih oblika dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem: a) Mjerna mjesta; b) Prvi modalni oblik – translacija u uzdužnom smjeru – $f = 4,25$ Hz; c) Drugi modalni oblik – translacija u poprečnom smjeru – $f = 5,50$ Hz; d) Treći modalni oblik – torzija – $f = 6,40$ Hz

Pregledom oblika osciliranja i dobivenih vrijednosti frekvencije, tj. perioda za prvi ton, možemo zaključiti da su rezultati ispitivanja valjani. Empirijski izraz prema normi HRN EN 1998-1, t.4.3.3.2.2 [4], daje sličnu približnu vrijednosti perioda ($T_1 = 0,270$ s) za zgradu te visine. U drugom i trećem modalnom obliku primjećuje se manja nepravilnost u obliku osciliranja, što odgovara činjenici da na toj zapadnoj strani građevine postoji dosta pukotina koje upućuju da je tu konstrukcija na neki način oštećena. Također, upravo na tom dijelu je tlo lošije kvalitete [2], što je moglo rezultirati oštećenjem nosive konstrukcije uslijed neravnomjernih slijeganja. Rezultati eksperimentalnog mjerenja iskorišteni su za kalibraciju numeričkog modela konstrukcije.

4 Numerički model konstrukcije

Numerička analiza provedena je metodom konačnih elemenata. Proveden je proračun vlastitih perioda i oblika konstrukcije te statički linearni proračun. Numerički model konstrukcije napravljen je u programskom paketu ETABS 2015. U modelu je upisana cjelokupna armiranobetonska nosiva konstrukcija u skladu s geometrijom i mehaničkim svojstvima materijala. Beton je razreda C25/30, a kasnije dimenzioniranje kritičnih elemenata je provedeno za armaturu od rebrastih šipki i mreža kvalitete B 500B(A). AB zidovi i ploče modelirani su plošnim konačnim elementima ljske sa šest stupnjeva slobode po čvoru. Prilikom očitavanja rezultata u zidovima korišten je zamjenski štapni element pridružen plošnom konačnom elementu. Sve ploče su modelirane kao krute dijafragme. Poprečne AB lamele i grede modelirane su linijskim konačnim elementima Timošenkove grede gdje se u obzir uzimaju i posmična naprezanja. Na spojevima AB lamela i grede korištena su kinematička ograničenja, tj. spoj je modeliran kao apsolutna kruta veza. Numerička analiza provedena je bez smanjenja krutosti plošnih i linijskih elemenata. Temelji su modelirani plošnim konačnim elementima odgovarajuće debljine, a tlo ispod modelirano je popustljivim plošnim osloncem (Winklerov model). Konačni elementi definirali su maksimalne veličine $0,4 \times 0,4$ m. Četvrta etaža modelirana je samo kao dodatno opterećenje te se nije posebno analizirala. Dodatno stalno opterećenje procijenjeno je na $1,00 \text{ kN/m}^2$, a uporabno opterećenje uzeto je u iznosu od $2,00 \text{ kN/m}^2$. Na slici 4. prikazan je 3D model konstrukcije s upisanim svim elementima konstrukcije.



Slika 4. Prikaz 3D modela konstrukcije

Numeričkim proračunom dobiveni su isti vlastiti oblici kao i ispitivanjem – prvi ton uzdužna translacija, drugi ton poprečna translacija i treći ton torzija. Kako bi se dobile što točnije vrijednosti frekvencija, tijekom kalibracije modela mijenjana je krutost tla. Iterativnim postupkom, počevši od apsolutno krutog tla, gdje su dobivena velika odstupanja u odnosu na mjerenja (20-50 %), konačna krutost tla uzeta je u iznosu $k = 200\,000\text{ kN/m}^3$ jer se pokazala da daje najbliže vrijednosti frekvencija u odnosu na provedeno ispitivanje.

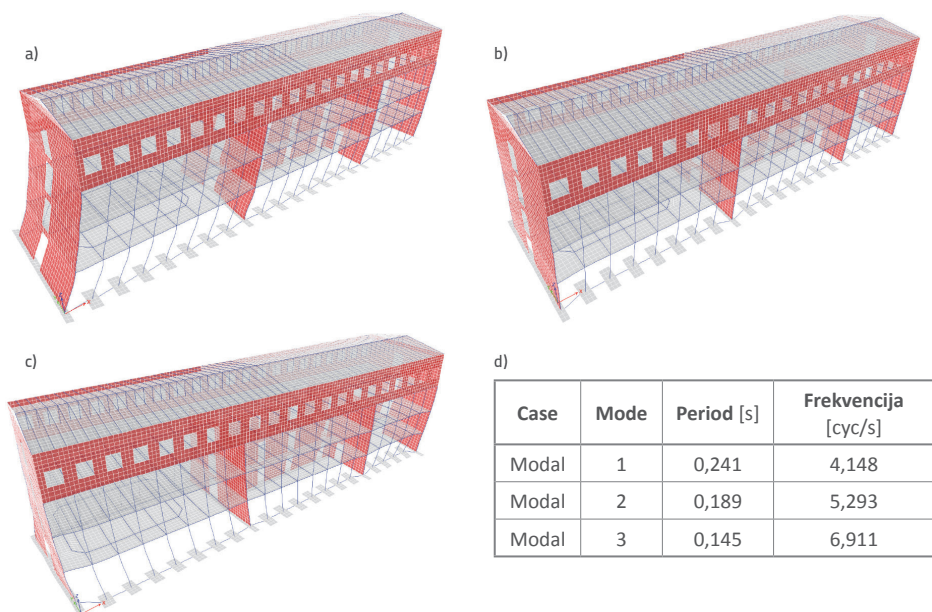
Veliki koeficijent tla tipičan je za ambijentalne vibracije jer je tlo jako kruto u odnosu na konstrukciju i ponaša se linearno elastično. Utjecaj krutosti tla na dobivene frekvencije te usporedba s eksperimentalnim mjerenjem prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Usporedba rezultata ispitivanja s rezultatima numeričkih modela s različitim krutostima tla

Modalni oblik	Eksperimentalno		Numerički model $k = 200\,000\text{ kN/m}^3$			Numerički model $k = 150\,000\text{ kN/m}^3$			Numerički model $k = 100\,000\text{ kN/m}^3$		
	f [Hz]	T [s]	f [Hz]	T [s]	R [%]	f [Hz]	T [s]	R [%]	f [Hz]	T [s]	R [%]
1. translacija X	4,25	0,235	4,15	0,241	2,55	4,05	0,252	7,23	3,37	0,271	15,31
2. translacija Y	5,50	0,182	5,29	0,189	3,84	5,06	0,204	12,08	4,35	0,230	26,92
3. torzija	6,40	0,156	6,91	0,145	7,05	6,67	0,150	3,84	6,17	0,162	3,85

Iz tablice 2. vidljivo je da manje krutosti tla daju bližu vrijednost frekvencije za treći torzijski ton, ali puno veće odstupanje za prva dva translacijska tona. Stoga je oda-

brana krutost tla $k = 200\,000 \text{ kN/m}^3$ gdje se frekvencije za prva dva translacijska tona izvrsno poklapaju s onim dobivenim ispitivanjem, a dobiva se nešto veće odstupanje za treći torzijski ton. Budući da je to odstupanje samo 7 %, možemo zaključiti da je numerički model ispravan i da dobro aproksimira realno ponašanje konstrukcije. Na slici 5. prikazani su rezultati modalne analize na numeričkom modelu.



Slika 5. Rezultati modalne analize na numeričkom modelu: a) Prvi modalni oblik – translacija u uzdužnom smjeru – $f = 4,15 \text{ Hz}$; b) Drugi modalni oblik – translacija u poprečnom smjeru – $f = 5,29 \text{ Hz}$; c) Treći modalni oblik – torzija – $f = 6,91 \text{ Hz}$; d) Tablični prikaz rezultata modalne analize iz ETABS-a

5 Proračun na potresno djelovanje

Proračun seizmičkog djelovanja provodi se prema normama HRN EN 1998-1:2011 i HRN EN 1998-1:2011/NA:2011. Predmetna građevina je trećerazredne važnosti. Horizontalno vršno ubrzanje tla na lokaciji građevine iznosi $a_{gR}/g = 0,259$ ($T_p = 475 \text{ g.}$), $a_{gR}/g = 0,129$ ($T_p = 95 \text{ g.}$). Faktor ponašanja pretpostavlja se u iznosu $q = 2,5$. Tlo se uzima kao tlo kategorije C. Proveden je seizmički proračun i dimenzioniran je najkritičniji AB okvir. Potrebna armatura uspoređena je s ugrađenom armaturom prema dostupnim armaturnim nacrtima. Sve AB lamele i AB grede armirane su jednako. Uspoređuje se armatura lamela i armatura grede u gornjoj zoni na spoju sa stupom, što je najkritičniji presjek (tablica 3.).

Tablica 3. Usporedba potrebne armature prema važećim propisima i ugrađene armature

Konstruktivski element	Ugrađena armatura [cm ²]		Potrebna armatura [cm ²]
AB lamela 16/100 cm	2×2Φ16 + 2×R-251	14,06	14,02
AB greda 16/60 cm	5Φ19+2Φ16	11,33	10,05

Iz tablice 3. možemo zaključiti da su promatrani AB elementi armirani u skladu s potrebnom armaturom prema proračunu. Također, provjereni su horizontalni pomaci konstrukcije koji iznose ukupno oko 5 mm za poprečni smjer i oko 7 mm za horizontalni smjer, što je ispod dopuštene maksimalne vrijednosti horizontalnog pomaka. Prema normi HRN EN 1998-1:2011, pri djelovanju seizmičkih sila potrebno je zadovoljiti duktilnost presjeka. Za razred duktilnosti M uzdužna tlačna sila u zidu mora biti manja od $N_{Ed} = 0,40 \times f_{cd} \times A$. U ovom slučaju, dopuštena tlačna sila u lameli iznosi $N_{Ed} = 1282$ kN. Maksimalna očitana tlačna sila iz numeričkog modela iznosi $N_{Rd} = 564$ kN, čime je uvjet zadovoljen. Razina tlačne sile je zadovoljena u svim presjecima.

6 Zaključak

Ovim radom prikazan je postupak određivanja dinamičkih parametara postojeće građevine primjenom eksperimentalnih mjerenja te izrada numeričkog modela konstrukcije koji je kalibriran na temelju eksperimentalnih rezultata. Eksperimentalno određivanje dinamičkih parametara posve je nerazorno, a primjenom metoda OMA-e kod kojih nije potrebno kontrolirano nanositi pobudu na konstrukciju, postupak se dodatno pojednostavljuje, ubrzava i pojeftinjuje. Prednost ovog pristupa je to što je pomoću rezultata eksperimentalnih mjerenja moguće kalibrirati numerički model konstrukcije kako bi se rezultati numeričkog modela približili stvarnom ponašanju postojeće konstrukcije bez provođenja opsežnih i skupih istražnih radova. Takav model je pogodan za daljnju analizu konstrukcije te ga je moguće primijeniti u analizi stvarnog ponašanja konstrukcije izložene seizmičkom opterećenju. Seizmički proračun konstrukcije izuzetno je značajan radi utvrđivanja njezine dostatne mehaničke otpornosti i stabilnosti, pogotovo kod starih zgrada koje su građene u vrijeme nekadašnjih propisa. Proračunom je pokazano da je dinamičko ponašanje predmetne konstrukcije pravilno i da ima dostatnu horizontalnu krutost.

Literatura

- [1] Chopra, A.: Dynamics of structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering, University of California at Berkeley, Third Edition, 2007.
- [2] Herak, M., Herak, D.: Continuous monitoring of dynamic parameters of DGFSM building (Zagreb, Croatia), Bull Earthquake Eng, (2010) 8, pp. 657-669.
- [3] Damjanović, D.: Ispitivanje konstrukcija. Skripta za diplomski studij, Sveučilište u Zagreb, Građevinski fakultet, Zagreb, 2018. (link za preuzimanje: http://www.grad.unizg.hr/_download/repository/SKRIPTA_IK_DD.pdf)
- [4] Eurokod 8: HRN EN 1998-1: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009) + nacionalni dodatak