SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

Ivan Banović

Seizmička izolacija osnove građevine uporabom prirodnih materijala - eksperimentalna i numerička provjera

Split, siječanj 2019.

MATICE HRVATSKE 15
21000 SPLIT - HRVATSKA /
CROATIA
www.gradst.hr

T: +385 (0)21 303 333
F: +385 (0)21 465 117
E: info@gradst.hr

IBAN:
HR3724070001100579623
OIB: 83615500218

azvo
DOKTORSKI STUDIJ
VISOKE RAZINE KVALITETE

1. Uvod

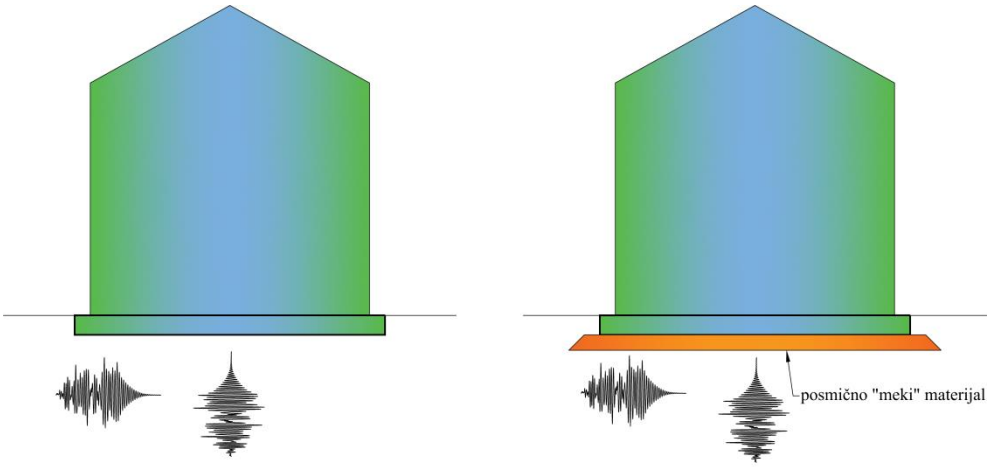
Potres je jedna od prirodnih katastrofa koju je nemoguće predvidjeti po vremenu i mjestu nastanka, a koja uzrokuje velike materijalne i ljudske žrtve. Mnoge zemlje svijeta, uključujući i Hrvatsku, nalaze se u seizmički aktivnim područjima gdje je moguća pojava potresa s razornim posljedicama. Potresi obično nastaju kada naprezanja unutar zemljine kore prekorače čvrstoću stijene, što dovodi do sloma i pomicanja stijenske mase po rasjedu. Oslobođena energija se prenosi kao seizmički valovi, koji putuju u svim smjerovima od izvorišta (hipocentra). Pri tome se valovi refraktiraju i reflektiraju, te gube izvornu energiju. Prema načinu i brzini širenja, razlikuju se visokofrekventni i niskofrekventi potresni valovi. Frekvencija potresnih valova, odnosno frekvencija gibanja tla, vrlo je bitna za utvrđivanje mogućih šteta na različitim konstrukcijama. Uslijed gibanja tla javljaju se seizmičke (inercijalne) sile na građevine, koje u njima mogu izazvati teška oštećenja ili čak njihovo rušenje. Temeljna zadaća potresnog inženjerstva i dinamike konstrukcija je izučavanje ponašanja konstrukcija pri potresu, a njihov osnovni cilj je gradnja seizmički otpornih građevina.

Pri projektiranju i proračunu građevina u potresnim područjima, koriste se dva koncepta:

(i) U tradicionalnom pristupu proračunu i projektiranju novih konstrukcija (Slika 1a), kao i kod obnove postojećih, ubrzanje tla uslijed potresa direktno se aplicira na konstrukciju. U takvom pristupu konstrukcija građevine prima veliki dio energije potresa, koja se disipira plastičnim deformacijama i oštećenjima najopterećenijih konstrukcijskih elemenata. Ovaj pristup često rezultira visokom cijenom izrade konstrukcije.

(ii) U novijem konceptu (Slika 1b), zadnjih desetljeća istražuju se razne tehnike seizmičke izolacije osnove građevine, kojima se potresno gibanje (ubrzanje) tla prigušuje prije nego se prenese na građevinu. U pristupu sa seizmičkom izolacijom osnove građevine (seismic base isolation), nosiva konstrukcija je odvojena od gibanja autohtonog tla uslijed potresa raznim posmično „mekim“ materijalom [1] ili uređajem. Općenito, osnovni koncept seizmičke izolacije

građevina je pomicanje njihovog osnovnog perioda izvan dominantnog frekventnog područja očekivanih potresa. Posljedica korištenja ovog pristupa je povećanje pomaka konstrukcije u slučaju potresa, koje treba kontrolirati i ograničiti.



(a) (b)

Slika 1: Dvije varijante temeljenja zgrade na čvrstom tlu

2. Trenutno stanje istraživačkog područja

Neke tehnike seizmičke izolacije osnove građevine su jednostavne i racionalne (primjerice, razne vrste elastomernih ležaja) i našle su primjenu u gradnji mostova i pojedinih važnijih zgrada. Nažalost, veliki broj uređaja za smanjenje potresnih sila na građevine je skup i rijetko se primjenjuje. Troškovi realizacije takvih sustava za seizmičku izolaciju mogu prijeći uštede na konstrukciji građevine od smanjenja potresnih sila, pa ekonomska opravdanost njihove primjene u nekim slučajevima može biti upitna. Također, treba napomenuti da takvi uređaji zahtjevaju održavanje i da je vijek njihova trajanja redovito kraći od vijeka trajanja građevine. Kod „gumenih“ uređaja, efeket starenja može značajno smanjiti njihovu efikasnost.

Najjednostavnija i najjeftinija tehnika seizmičke izolacije je primjena raznih slojeva prirodnih materijala ispod temelja građevine. Mogućnost primjene prirodnih materijala za seizmičku izolaciju osnove građevine je od velike važnosti. Postoje indicije da su graditelji u prošlosti koristili prirodne materijale (drvene grede, kamen, pijesak, šljunak) ne samo za povećanje nosivosti temeljnog tla, već i za smanjenje potresnih sila na građevine. U ovom konceptu

seizmičke izolacije, disipacija potresne energije ostvaruje se smanjenjem trenja ispod temelja i njegovim proklizavanjem po podlozi. Očekuje se da takav način seizmičke izolacije baze građevine bude efikasan kod krutih i srednje krutih građevina manje i srednje visine. Nužna je potreba za daljnim razvojem sustava seizmičke izolacije građevina, s ciljem da budu što jednostavniji, efikasniji i racionalniji. Krajnji je cilj da koncept seizmičke izolacije nađe široku primjenu kod svih vrsta građevina, pogotovo u seizmičkim područjima siromašnih država s brojnim stanovništvom gdje jači potresi odnose brojne ljudske živote. Nažalost, istraživanja uporabe adekvatnog aseizmičkog sloja materijala su u začetku. U nastavku su prikazani rezultati nekih takvih vrlo rijetkih istraživanja.

Povijesni razvoj seizmičke izolacije građevine može se naći u radu Markisa [2]. Banović i dr. [3] te Radnić i dr. [4] eksperimentalnom studijom s potresnom platformom utvrdili su da sloj običnog vapnenačkog pijeska odgovarajuće debljine i zbijenosti može poslužiti kao prirodni materijal za seizmičku izolaciju osnove građevine. U kratkoj studiji, ispitani su konzolni betonski stupovi s različitim rubnim uvjetima oslanjanja temelja i različitim debljinama sloja pijeska. Patil i dr. [5] proveli su eksperimentalna i analitička istraživanja na modelu s izoliranim temeljima pomoću riječnog pijeska i dobili ohrabrujuće rezultate. Teherani i dr. [6] proveli su eksperimentalnu studiju u kojoj su koristili pustinjski pijesak i ekspandiranu glinu kao klizni sloj za izolaciju osnove ruralnih zgrada u Iranu. Banović i dr. [7] su pomoću potresne platforme istražili mogućnost korištenja sloja prirodnih kamenih oblutka ispod temelja za seizmičku izolaciju osnove građevine. Testirani su modeli krute i srednje krute zgrade, oslonjeni na krutu podlogu i 4 različite podloge od oblutaka (tanka i debela podloga sa sitnom i krupnom frakcijom oblutaka). Naime, ovisno o vrsti aplicirane pobude i nekih drugih parametara, u usporedbi sa slučajem oslanjanja konstrukcije na krutu podlogu, sloj oblutaka smanjio je naprezanja/deformacije u modelu do 53%. Zhao i dr. [8] proveli su numeričku analizu šljunčanog izolacijskog sloja metodom diskretnih elemenata. Zaključili su da učinak izolacije raste s povećanjem debljine sloja i opada s povećanjem kontaktnih naprezanja ispod temelja.

Kod gradnje nekih velikih mostova, kao što su most Rion-Antirion [9] u Grčkoj, most Vasco de Gama [10] u Portugalu i most Izmit [11] u Turskoj, korišteni su ojačani slojevi od šljunka i pijeska kao izolacijski materijal ispod temelja pilona. Anastasopoulos i dr. [12] su pomoću potresne platforme istraživali ponašanje stupa mosta kojemu je temelj izoliran slojem pijeska. Serijom eksperimentalnih testova na umanjenim modelima, zaključili su da izolirani temelj ima znatno povoljnije ponašanje od klasično temeljenog stupa. Zhang [12] je prezentirao razvoj tehnologije seizmičke izolacije primjenjive za ruralne zgrade pri trenutnim ekonomskim uvjetima u Kini. Doudoumis i dr. [13] istražili su koncept umetanja umjetnog sloja tla između zgrade i temeljnog tla. Yegian i dr. [14, 15] predložili su glatke sintetičke materijale (geosintetike) za rasipanje seizmičke energije kroz klizanje ispod temelja konstrukcija ili između slojeva tla.

Obavljene su brojne numeričke i eksperimentalne studije koje analiziraju primjenu mješavine tla i gume (*rubber-soil mixtures - RMS*) za seizmičku izolaciju osnove građevina. Xiong i Li [16] analizirali su seizmičku izolaciju osnove građevine uporabom mješavina guma-tlo na temelju eksperimentalnih testova na potresnoj platformi, a Tsang i dr. [17] na parametarskoj numeričkoj studiji. Pitilakis i dr. [18] numerički su analizirali učinkovitost korištenja mješavine guma-tlo u temeljnom tlu kod seizmičke izolacije baze različitih tipova okvira. Dobiveni rezultati potvrdili su korisne učinke korištenja mješavine guma-tlo na ponašanje konstrukcije pri dinamičkom opterećenju, pri čemu je smanjenje međukatnih pomaka iznosilo 30 % do 40 %. Panjamani i dr. [19] postigli su slične rezultate u pogledu smanjenja ubrzanja i međukatnih pomaka (na različitim katovima smanjenje je bilo približno 40 % do 50 %). Bandyopadhyay i dr. [20] utvrdili su da kompozit od pijeska i do 50 % usitnjene gume ispod temelja daje dobre rezultate za seizmičku izolaciju osnove građevine. Nanda i dr. [21-24] proveli su eksperimentalna ispitivanja uporabe geotekstila i drugih materijala s malim koeficjentom trenja za izolaciju osnove zidanih zgrada. U usporedbi sa slučajem fiksne baze, dobiveno je smanjenje ubrzanja od 65 % na razini krova.

Xiao i dr. [25] su pomoću potresne platforme istražili mogućnost korištenja pet izolacijskih materijala (pijesak, šljunak, polipropilenske ploče, PVC folija i polietilenska membrana) za seizmičku izolaciju građevina. Qamaruddin i dr. [26] istražili su koncept seizmičke izolacije osnove građevine koja je slobodno oslonjena na temelje, bez čvrste veze između temelja i ostatka konstrukcije, tako da se horizontalne sile prenose trenjem.

Na temelju prethodno navedenog, vidljivo je da se vrlo mali broj istraživanja odnosio na seizmičku izolaciju osnove građevine upotrebom prirodnih materijala. Istraživanja u sklopu predviđene doktorske disertacije direktno su vezana uz istraživački projekt Hrvatske zaklade za znanost „Seizmička izolacija osnove građevine s uporabom prirodnih materijala - testiranje s potresnom platformom i numeričko modeliranje“ (broj projekta: IP-06-2016-5325), voditelja prof. dr. sc. Jure Radnića. Primarni cilj projekta i doktorske disertacije je kreiranje i eksperimentalna provjera koncepta za smanjenje potresnih sila na niže i srednje visoke građevine pomoću aseizmičkog sloja od prirodnih materijala ispod temelja. Dio istraživanja uporabom sloja od kamenih (riječnih) oblutaka već je izvršen [1, 7], dok je ostatak istraživanja u tijeku, uključujući i razvoj numeričkih modela za simulaciju 2D konstrukcija s razmatranom seizmičkom izolacijom. U nastavku je prikazana metodologija istraživanja u sklopu projekta i predviđene doktorske disertacije.

3. Predloženi koncept seizmičke izolacije osnove građevine

Temeljni cilj projekta i doktorskog rada je razvoj koncepta za seizmičku izolaciju baze koji će pokušati smanjiti potresna ubrzanja na građevinu pomoću tankog sloja od jeftinih i po mogućnosti prirodnih materijala ispod temelja građevine. Nakana je da takav koncept bude racionalan i jednostavan za realizaciju, te da nađe široku praktičnu primjenu. Predviđeni sustav seizmičke izolacije baze trebao bi biti posebno efikasan kod krutih i srednje krutih građevina temeljenih na čvrstom i srednje čvrstom tlu. Primjena koncepta je ograničena na niske i srednje

visoke zgrade, tj. na slučajeve gdje vertikalna naprezanja ispod temelja ne premašuju dopuštenu nosivost aseizmičkog sloja.

Predviđeni su tanki aseizmički slojevi debljine do svega nekoliko desetaka centimetara. Navedeni aseizmički sloj prvenstveno je namijenjen smanjenju horizontalnih potresnih ubrzanja, čiji je utjecaj dominantan kod većine građevina (u odnosu na vertikalno ubrzanje). Očekuje se da takav sloj omogući disipaciju energije potresa preko svojih horizontalnih posmičnih deformacija (pomaka) i proklizavanja, uz prihvatljive horizontalne pomake građevine.

U odnosu na građevinu s klasičnim temeljima, građevina temeljena na predviđenom aseizmičkom sloju trebala bi imati dostatno manje potresne sile, kako bi uporaba koncepta seizmičke izolacije bila ekonomski opravdana. Ovaj pristup seizmičke izolacije trebao bi biti racionalan čak i za relativno malo smanjenje potresnih ubrzanja (približno 15 %) jer bi troškovi izrade takvog aseizmičkog sloja bili manji od ušteda koje bi se postigle na konstrukciji građevine smanjenjem seizmičkih sila.

U odnosu na koncept seizmičke izolacije pomoću diskretnih složenih naprava i uređaja, predviđeni koncept seizmičke izolacije trebao bi imati slijedeće prednosti: racionalnost, jednostavnost i brzina izvedbe, primjena kod građevina sa složenom tlocrtnom dispozicijom zidova, odsustvo troškova održavanja, trajnost sustava koji odgovara životnom vijeku građevine, prihvatljivost za manje razvijene države i države u razvoju i sl.

3.1 Osnovne karakteristike aseizmičkog sloja

Predviđeno je eksperimentalno testiranje efikasnosti dvaju aseizmičkih slojeva ispod temelja građevine: ASL-1 i ASL-2. Temeljni zahtjev za oba aseizmička sloja je da imaju što manju horizontalnu krutost, uz prihvatljive horizontalne pomake temelja građevine pri potresu, te da budu stabilnih mehaničkih svojstava tijekom životnog vijeka građevine. Slojevi, također, trebaju imati što veću nosivost na vertikalna tlačna naprezanja građevine.

(i) Sloj ASL-1

Ovaj sloj predviđen je samo od prirodnih kamenih oblutaka iz riječnog korita. Oblutci trebaju imati dostatnu čvrstoću, uz osiguranje horizontalne podatljivosti pri djelovanju horizontalnih potresnih sila. Eksperimentalno će se istražiti utjecaj različitih svojstva sloja kamenih oblutaka, kako bi se utvrdio najefikasniji sloj ASL-1:

- frakcija oblutaka (4 - 8 mm, 8 - 16 mm i 16 - 32 mm),

- debljina sloja (30 cm i 60 cm),

- zbijenost oblutaka (MS = 10 MPa, MS = 30 MPa i MS = 60 MPa),

- vlažnost oblutak (v = 10 % i v = 60 %)

- kontaktna naprezanja na vrhu sloja (σ = 0.04 MPa, σ = 0.10 MPa i σ = 0.20 MPa).

(ii) Sloj ASL-2

Predviđena je kombinacija optimalnih kamenih oblutaka iz ASL-1 s tankim slojem „kliznog“ materijala, u cilju postizanja što veće efikasnosti izolacije, tj. što većeg smanjenja posmičnog otpora podloge (uz ograničenje horizontalnog pomaka konstrukcije). Eksperimentalno će se istražiti utjecaj više parametara dopunskog „kliznog“ materijala u cilju postizanja što veće efikasnosti globalnog aseizmičkog sloja.

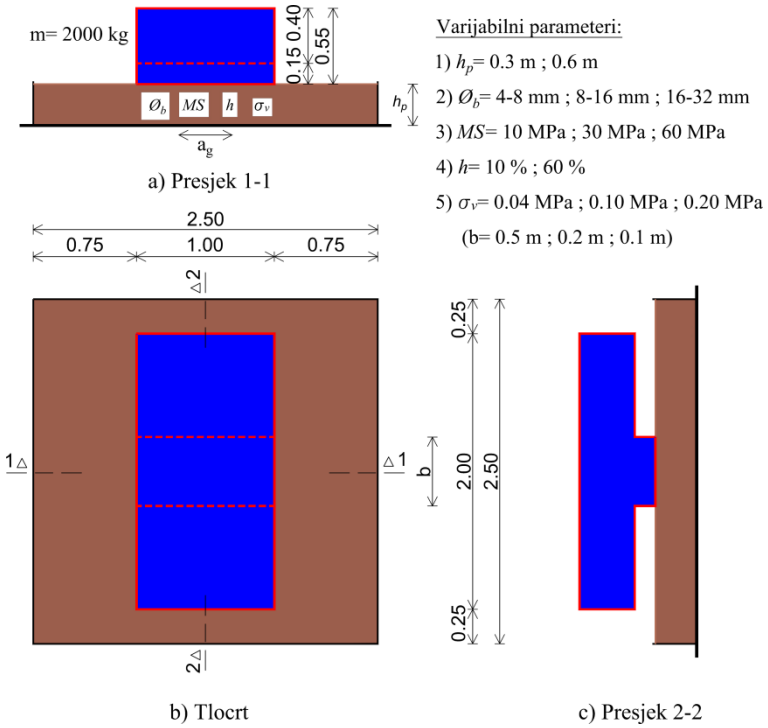
3.2 Osnovne karakteristike testiranih model zgrada

Predviđena su dva modela zgrada: model potpuno krute zgrade M_0 i modeli deformabilnih zgrada M_1, M_2, M_3 i M_4.

(i) Model potpuno krute zgrade M_0

Ovaj model će se koristiti za pronalaženje optimalnih aseizmičkih slojeva ASL-1 i ASL-2 (Slika 2). Model zgrade je kruti betonski blok mase 2000 kg. Blokovi će se oslanjati na vrh

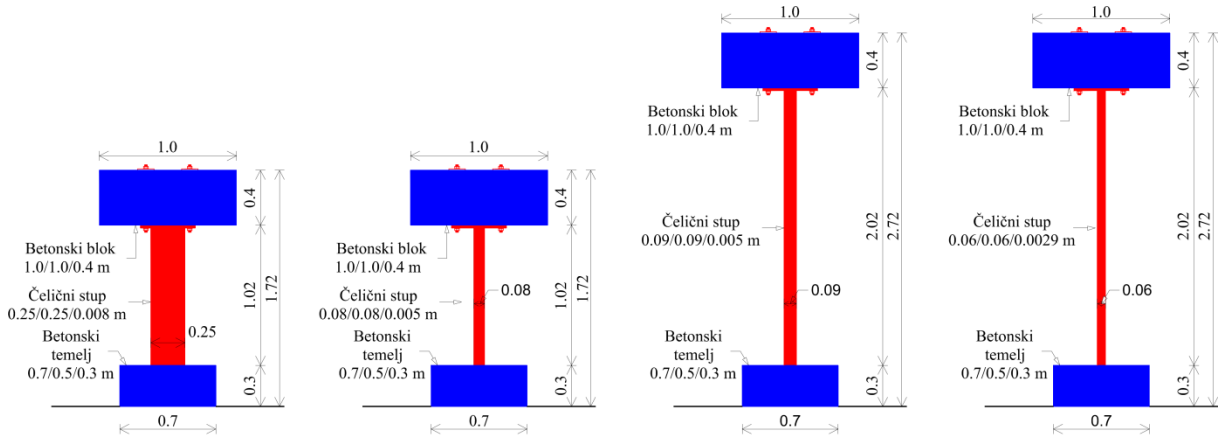
aseizmičkog sloja na različitim površinama, kako bi se mogla simulirati različita razina kontaktnih naprezanja.



Slika 2: Model krute zgrade i sloj ASL-1

(ii) Modeli deformabilnih zgrada M_1, M_2, M_3 i M_4

Ovi modeli (Slika 3) koristiti će se za utvrđivanje smanjenja potresnih sila na najefikasnijim aseizmičkim slojevima, pri čemu će se varirati krutost zgrada. Naime, model M_1 će reprezentirati vrlo krute zgrade (T_1= 0,05 s), model M_2 krute zgrade (T_1= 0,3 s), model M_3 srednje krute zgrade (T_1= 0,6 s) i model M_4 meke zgrade (T_1= 1,4 s), gdje je T_1 prvi period slobodnih oscilacija zgrade. Modeli su jednostupnjevni čelični konzolni stup s masom na vrhu, uklješten u betonski temelj.

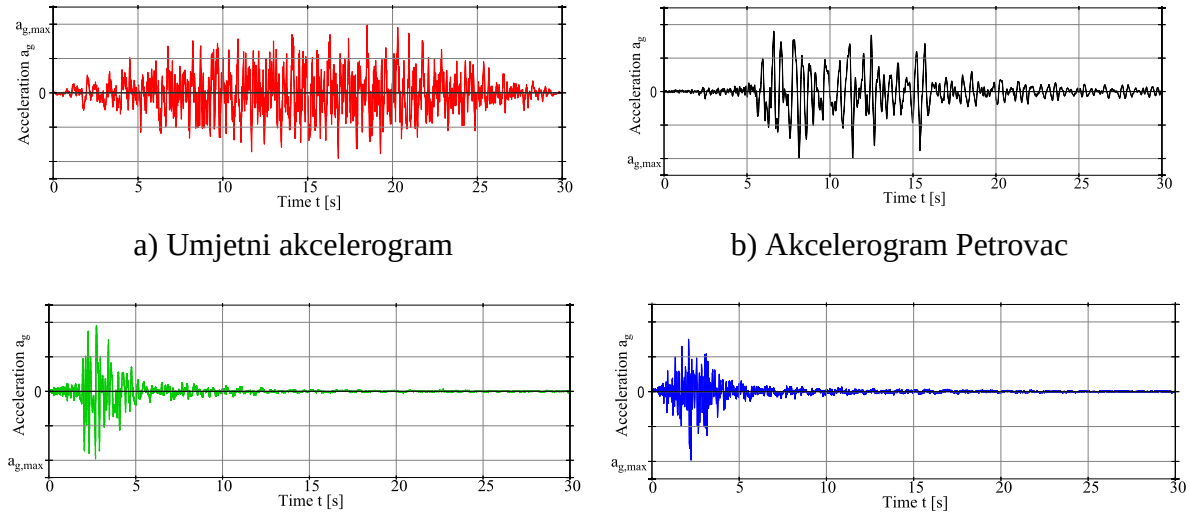


a) M_1 (T= 0.05 s) b) M_2 (T= 0.30 s) c) M_3 (T= 0.60 s) d) M_4 (T= 1.40 s)

Slika 3: Modeli deformabilnih zgrada

3.3 Dinamičke pobude

Predviđeno je da se svi testirani uzorci modela zgrada M_0, M_1, M_2, M_3 i M_4 izlože horizontalnom ubrzanju podloge 4 različita akcelerograma prema Slici 4.



a) Umjetni akcelerogram b) Akcelerogram Petrovac

c) Akcelerogram Ston d) Akcelerogram Banja Luka

Slika 4: Aplicirani akcelerogrami

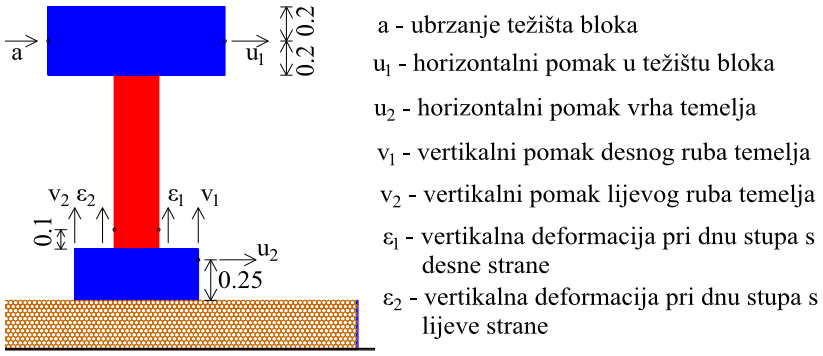
Umjetni akcelerogram je generiran prema HRN EN 1998 za tip potresa 1 i kategoriju tla A. On dobro reprezentira mjerodavnu pobudu za sve tipove (krutosti) zgrada. Ostale pobude odabrane su tako da budu što mjerodavnije za pojedini tip zgrade. Svi akcelerogrami skalirani su na jednako maksimalno ubrzanje do željene veličine (model M_0), odnosno blizu ili do gubitka stabilnosti (modeli M_1, M_2, M_3 i M_4). Bitno je naglasiti da će naprezanja u modelima

konstrukcije pri testovima ostati u elastičnom području materijala, tj. da se neće pojaviti nelinearnosti u konstrukciji. Razlog tome je nakana da se jasno razluči efekt smanjenja potresnih sila (naprezanja) u konstrukciji pri uporabi aseizmičkih slojeva ispod temelja u odnosu na klasično rješenje bez aseizmičkih slojeva. Da bi se ispitalo ponašanje modela konstrukcije neposredno prije sloma, određeni broj ispitivanja izvršiti će se do sloma konstrukcije ili do gubitka njene stabilnosti.

3.4 Laboratorij, oprema i mjerenja

Sva laboratorijska istraživanja provesti će se na potresnoj platformi u Laboratoriju za potresna ispitivanja Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu.

Predviđena su mjerenja karakterističnih ubrzanja i pomaka na svim testiranim uzorcima, te karakterističnih deformacija stupa na modelima deformabilnih zgrada (Slika 5). Također, predviđeno je praćenje modela tijekom djelovanja svih pobuda preciznom kamerom.



Slika 5: Mjerene veličine

Za dokaz efikasnosti predviđene seizmičke izolacije, usporediti će se izmjerene karakteristične izmjerene vrijednosti na svakom testiranom modelu sa seizmičkom izolacijom i istom modelu bez seizmičke izolacije. Za pokazatelj efikasnosti, usvojiti će se odnos (kvocijent) izmjerenih maksimalnih vrijednosti za oba navedena slučaja. Prethodno će se grafički prikazati i usporediti najveći dio izmjerenih veličina pomaka, ubrzanja i deformacija.

4. Numerički model za simulaciju ponašanja zgrada s razmatranom seizmičkom izolacijom pri potresu

Model bi se odnosio na ravninske konstukcije od betona, čelika i ziđa, uključujući i kombinaciju ovih materijala. Pri tome bi se koristili prethodno razvijeni numerički modeli [27-33], dopunjeni adekvatnom simulacijom razmatranih seizmičkih slojeva ispod temelja. Modeli bi se temeljili na metodi konačnih elemenata, a simulirali bi sva najvažnija nelinearna svojstva materijala, utjecaj promjene geometrije i fazno nastajanje konstrukcije.

Aseizmički sloj bi se simulirao i anizotropnim modelom materijala, s različitim svojstvima u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Naglasak će se staviti na što vjerodostojnije modeliranje posmične krutosti (deformabilnosti) i nosivosti aseizmičkog sloja, pri čemu će se parametri modela materijala definirati na temelju rezultata eksperimentalnih testova. Integralni numerički model bi se provjerio na simulaciji nekoliko provedenih testova modela deformabilnih građevina sa seizmičkom izolacijom.

Za potrebe pojednostavljenog inženjerskog proračuna, predložiti će se inženjerski izrazi za proračun posmičnog kapaciteta i horizontalne deformabilnosti aseizmičkog sloja.

Zahvala

Ovaj rad financirala je Hrvatska zaklada za znanost, s projektom „Seizmička izolacija osnove građevine upotrebom prirodnih materijala - testiranje potresnom platformom i numeričko modeliranje [IP-06-2016-5325]. Rad doktoranda na projektu financirala je Hrvatska zaklada za znanost kroz „Projekt razvoja karijera mladih istraživača - izobrazba novih doktora znanosti“. Projekt je sufinanciran od strane Europske unije, u okviru OP „Učinkoviti ljudski potencijali 2014-2020“ iz sredstava ESF-a. Istraživači su zahvalni na potpori.

Literatura

1. I. Banović, J. Radnić, N. Grgić, "Seizmička izolacija osnove građevine uporabom prirodnih materijala", *Zajednički temelji 2018-uniSTem*, Split, Hrvatska, 2018. http://doi.org/10.31534/CO/ZT.2018.01
2. N. Makris, „Seismic isolation: Early history", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, p.p. 1-16, 2018. doi: 10.1002/eqe.3124
3. I. Banović, J. Radnić, N. Grgić, D. Matešan, "The Use of Limestone Sand for the Seismic Base Isolation of Structures", *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, Article ID 9734283, 12 pages, 2018. https://doi.org/10.1155/2018/9734283
4. J. Radnić, N. Grgić, D. Matešan, G. Baloević, "Shake table testing of reinforced concrete columns with different layout size of foundation", *Materialwissenschaft und werkstofftechnik*, vol. 46, p.p. 348-367, 2015. https://doi.org/10.1002/mawe.201500410
5. S. J. Patil, G. R. Reddy, R. Shivshankar, Babu Ramesh, B. R. Jayalekshmi, Kumar Binu, "Seismic base isolation for structures using river sand", *Earthquakes and Structures*, vol. 10(4). p.p. 829-847, 2016. https://doi.org/10.12989/eas.2016.10.4.829
6. F.M. Tehrani and A. Hasani, „Behaviour of Iranian low rise buildings on sliding base to earthquake excitation", *Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Mexico City, Mexico, 1996, Paper 1433.
7. I. Banović, J. Radnić, N. Grgić, "Shake Table Study on the Efficiency of Seismic Base Isolation Using Natural Stone Pebbles," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, Article ID 1012527, 20 pages, 2018. https://doi.org/10.1155/2018/1012527.
8. X. Zhao, Q. Zhang, Q. Zhang, and J. He, „Numerical Study on Seismic Isolation Effect of Gravel Cushion", *Proceedings of the 7th International Conference on Discrete Element Methods*, Springer Proceedings in Physics 188, https://doi.org/10.1007/978-981-10-1926-5_110
9. A. Pecker, J. H. Prevost, and L. Dormieux, „Analysis of pore pressure generation and dissipation in cohesionless materials during seismic loading", *Journal of Earthquake Engineering*, vol 5(4), p.p. 441-464, 2001. https://doi.org/10.1080/13632460109350401
10. A. Pecker, „Aseismic foundation design process, lessons learned from two major projects: the Vasco de Gama and the Rion Antirion bridges", *ACI International Conference on Seismic Bridge Design and Retrofit*, La Jolla, California, 2003.

11. J. S. Steenfelt, B. Foged, and A. H. Augustesen, „IZMIT BAY BRIDGE-Geotechnical challenges and innovative solutions“, *International Journal of Bridge Engineering (IJBE)*, vol. 3(3), pp. 53-68, 2015.
12. I. Anastasopoulos, M. Loli, T. Georgarakos, and V. Drosos, „Shaking Table Testing of Rocking-Isolated Bridge Pier on Sand“, *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 17(1), p.p.1-32, 2012. https://doi.org/10.1080/13632469.2012.705225
13. I. Doudoumis, P. Papadopoulos, T. Papaliangas, "Low-cost base isolation system on artificial soil layers with low shearing resistance", *Proceedings of the 12th European conference on earthquake engineering*, London, England, 2002.
14. M. K. Yegian, U. Kadakkal, "Foundation isolation for seismic protection using a smooth synthetic liner", *Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering*, ASCE, vol. 130(11), p.p. 1121-1130, 2004.
15. M. K. Yegian, M. Catan, "Soil isolation for seismic protection using a smooth synthetic liner", *Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering*, ASCE, vol. 130(11), p.p. 1131-1139, 2004.
16. W. Xiong, Y. Li, "Seismic isolation using granulated tire–soil mixtures for less-developed regions: experimental validation", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 42, p.p. 2187–2193, 2013. https://doi.org/10.1002/eqe.2315.
17. H. H. Tsang, S. H. Lo, X. Xu, S. M. Neaz, "Seismic isolation for low-to-medium-rise buildings using granulated rubber–soil mixtures: numerical study", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 41, p.p. 2009–2024, 2012. https://doi.org/10.1002/eqe.2171.
18. K. Pitilakis, S. Karapetrou, K. Tsagdi, "Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber–sand mixtures", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, vol. 79, p.p. 237-252, 2015. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.09.018
19. A. Panjamani, M. D. Ramegowda, R. Divyesh, "Low cost damping scheme for low to medium rise buildings using rubber soil mixtures", *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2015. https://doi.org/10.3208/jgssp.v03.i05
20. Bandyopadhyay S, Sengupta A, Reddy GR. "Performance of sand and shredded rubber tire mixture as a natural base isolator for earthquake protection", *Earthquake Engineering & Engineering Vibration* 2015; 14: 683-693, https://doi.org/10.1007/s11803-015-0053-y

21. R. P. Nanda, P. Agarwal, M. Shrikhande, "Frictional base isolation by geotextiles for brick masonry buildings", *Geosynthetics International*, vol. 17(1), p.p. 48–55, 2010. https://doi.org/10.1680/gein.2010.17.1.48

22. R. P. Nanda, P. Agarwal, M. Shrikhande, "Base isolation by geosynthetic for brick masonry buildings", *Journal of Vibration and Control*, vol. 18(6), p.p. 903–910, 2012. https://doi.org/10.1177/1077546311412411

23. R. P. Nanda, M. Shrikhande, P. Agarwal, "Effect of ground motion characteristics on the pure friction isolation system", *Earthquakes and Structures*, vol. 3(2), p.p. 169–180, 2012 https://doi.org/10.12989/eas.2012.3.2.169

24. R. P. Nanda, M. Shrikhande, P. Agarwal, "Low-cost base-isolation system for seismic protection of rural buildings", *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 21(1), 2015. https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000254

25. H. Xiao, J. W. Butterworth, T. Larkin, "Low-technology techniques for seismic isolation", *NZSEE Conference*, 2004.

26. M. Qamaruddin, S. Ahmad, "Seismic response of pure-friction base isolation masonry building with restricted base sliding", *Journal of Engineering Research*, vol. 4(1), p.p. 82–94, 2007. http://dx.doi.org/10.24200/tjer.vol4iss1pp82-94

27. J. Radnić, G. Baloević, D. Matešan, M. Smilović, „On a numerical model for static and dynamic analysis of in-plane masonry infilled steel frames", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 44 (5), p.p. 423-430, 2013.

28. J. Radnić, A. Harapin, R. Markić, N. Grgić, M. Sunara, A. Buzov, „Effect of the Shear Force on the Failure of Spatial Concrete Framework Structures", *Key Engineering Materials*, vol. 553, p.p. 67-80, 2013.

29. J. Radnić, A. Harapin, D. Matešan, B. Trogrlić, M. Smilović, N. Grgić, G. Baloević, „Numerical Model for Analysis of Masonry Structures", *Gradjevinar*, Vol. 6, p.p. 529-546., 2011.

30. J. Radnić, D. Matešan, A. Harapin, M. Smilović, N. Grgić, „Numerical Model for Static and Dynamic Analysis of Masonry Structures" , *Mechanics and Properties of Composed Materials and Structures*, p.p. 1-33., 2013.

31. A. Harapin, J. Radnić, D. Ćubela, „Numerical model for composite structures with experimental confirmation“, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*,vol. 39., p.p. 143-156., 2013.

32. J. Radnić, D. Matešan, N. Grgić, G. Baloević, „Seismic analysis of composite concrete-steel-masonry structures“, *International Conference on Earthquake Engineering*, Skopje, Makedonija, 2013.

33. J. Radnić, M. Smilović, M. Sunara, D. Buklijaš-Kobojević, „Numerical study of the behaviour of masonry walls with different height-length ratio under static and seismic loads“, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 46., 46, p.p. 330-347., 2015.