

Seizmička izolacija osnove građevine uporabom kamenih oblutaka

Ivan Banović¹, Jure Radnić¹, Nikola Grgić¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Republika Hrvatska, {ivan.banovic; jure.radnic; nikola.grgic}@gradst.hr

Sažetak

Prikazani su rezultati eksperimentalne studije efikasnosti seizmičke izolacije pomoću sloja od prirodnih kamenih oblutaka. Ispitivani su modeli krute i srednje krute zgrade. Razmatrani su slučajevi oslanjanja modela na krutu podlogu te na četiri različite podloge od oblutaka (tanki i debeli podloga sa sitnom i krupnom frakcijom oblutaka). Aplikirana su četiri različita horizontalna akcelerograma i mjereni karakteristični pomaci, ubrzanja i deformacije na testiranim modelima. Sve deformacije/naprezanja modela ostala su u elastičnom području. Zaključeno je da efikasnost sloja od kamenih oblutaka ispod temelja, u odnosu na klasično rješenje s krutom podlogom, značajno ovisi o tipu aplikiranog akcelerograma i relativno malo o razmatranim debljinama sloja i frakcijama oblutaka. Rješenje se pokazalo vrlo efikasnim, uz smanjenje potresnih sila čak do oko 70 %.

Ključne riječi: potresna platforma, seizmička izolacija, prirodni kameni oblutci

Seismic base isolation using a layer of natural stone pebbles

Abstract

The results of a shake table study of the effectiveness of seismic base isolation using a layer of natural stone pebbles are presented. Models of stiff and medium-stiff buildings were tested. Case studies were conducted with the model foundation on the rigid base and four different layers of pebbles (thin and thick layer with small and large pebbles). Four different horizontal accelerograms were applied. The characteristic displacements, accelerations and strains were measured. Strains/stresses of the tested models were in the elastic area. It was concluded that the efficiency of the stone pebbles layer under the foundation, compared to the classical solution of a foundation, strongly depends on the type of the applied excitation and depends relatively little on the layer thickness and pebbles fraction. The solution proved to be very efficient, with a reduction of earthquake forces up to about 70%.

Keywords: shake table, seismic base isolation, natural stone pebbles

1. Uvod

U tradicionalnom pristupu projektiranju i proračunu konstrukcija, ubrzanje tla uslijed potresa direktno se aplicira na konstrukciju. Da bi se postigla potrebna razina sigurnosti, koristeći norme za projektiranje i proračun konstrukcija, ovaj pristup često rezultira visokom cijenom izrade konstrukcije.

Seizmička izolacija građevine je tehnika kojom se štiti nosiva konstrukcija i nenosivi dijelovi građevine od razornih utjecaja potresa. Suvremena znanost zadnjih desetljeća istražuje razne tehnike seizmičke izolacije osnove građevine kojima se potresno gibanje tla (ubrzanje) prigušuje prije nego se prenese na građevinu. U pristupu sa seizmičkom izolacijom osnove građevine, nosiva struktura je odvojena od gibanja autohtonog tla uslijed potresa raznim posmično „mekim“ uređajima. Općenito, osnovni koncept seizmičke izolacije građevina je pomicanje osnovnog perioda konstrukcije izvan dominantnog frekventnog područja očekivanih potresa. Posljedica korištenja ovog pristupa je povećanje pomaka konstrukcije u slučaju potresa koje treba kontrolirati i ograničiti.

Rješenja sa slojem od adekvatnih materijala ispod temelja za smanjenje seizmičkih sila na građevine, za koja se očekuje da mogu biti efikasna i racionalna, u začetku su istraživanja. Postoje indicije da su još u dalekoj prošlosti graditelji koristili slojeve od različitih materijala s ciljem povećanja seizmičke otpornosti građevina. Takva jeftina rješenja bi mogla naći široku primjenu u seizmičkoj izolaciji srednje visokih zgrada širom svijeta. Suvremena znanost pokušava istražiti tu ideju i pronaći rješenja kojima bi se kod brojnih građevina moglo nadomjestiti seizmičku izolaciju pomoću sofisticiranih uređaja. Rezultati istraživanja jednog takvog tipa seizmičke izolacije su prezentirani u ovom radu.

Prema dostupnim informacijama, do sada je objavljeno vrlo malo radova u kojima se istraživala „jeftina“ seizmička izolacija osnove građevine pomoću prirodnih materijala. Rezultati nekih dosadašnjih istraživanja mogu se naći u [1-4].

U ovom su radu prikazani rezultati eksperimentalne studije o efikasnosti primjene sloja od prirodnih kamenih oblutaka ispod temelja na smanjenje potresnih sila na konstrukcije. Konačan cilj je praktična primjena takvog rješenja u budućnosti pri gradnji srednje visokih zgrada i manjih mostova u seizmičkim područjima. Istraživanja su provedena na jednostavnim modelima krute i srednje krute zgrade koristeći potresnu platformu, pomoću koje su aplicirana četiri različita akcelerograma koja su prouzrokovala naprezanja modela u elastičnom području. Najprije je istražen odgovor modela s njegovim temeljima oslonjenim izravno na krutu podlogu (potresnu platformu), a potom s temeljima oslonjenim na sloj od kamenih oblutaka. Varirane su dvije debljine sloja i dvije frakcije kamenih oblutaka. Mjereni su karakteristični pomaci, deformacije i ubrzanja modela. Prikazani su i neki diskutirani rezultati studije, s glavnim zaključcima istraživanja. Rezultati provedene studije su ohrabrujući u pogledu efikasnosti razmatrane seizmičke izolacije. Ipak, potrebna su daljnja istraživanja utjecaja još nekih važnih efekata, koji u provedenoj studiji nisu razmatrani, kako bi se mogli dobiti još vjerodostojniji zaključci u pogledu efikasnosti i racionalnosti razmatranog koncepta seizmičke izolacije osnove građevine.

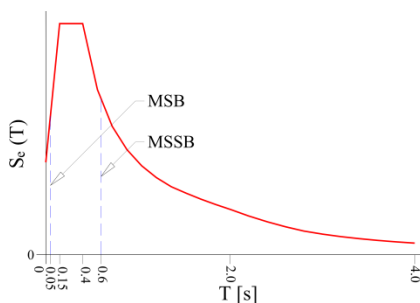
2. Kameni oblutci i podloga od oblutaka ispod temelja

U ovoj su eksperimentalnoj studiji korišteni kameni oblutci iz riječnog korita. Oblutci su pretežito iz vapnenca i manjim dijelom iz granita. Korištene su dvije frakcije oblutaka: 4-8 mm (tzv. sitni oblutci) i 16-32 mm (tzv. krupni oblutci) te dvije debljine podloge: $d=0.3$ m (tzv. tanka podloga) i $d=0.6$ m (tzv. debela podloga). Podloge su formirane unutar sanduka tlocrtnih dimenzija 2.5×2.5 m, koji je fiksiran za platformu. Nastojalo se da deformacijski uvjeti podloge unutar sanduka budu slični onima koje bi podloga imala ispod temelja realne građevine. Podloge su formirane u slojevima debljine 0.10 m, uz lagano statičko i dinamičko zbijanje pomoću potresne platforme. Prosječna zbijenost podloge na vrhu iznosila je oko 30 MPa.

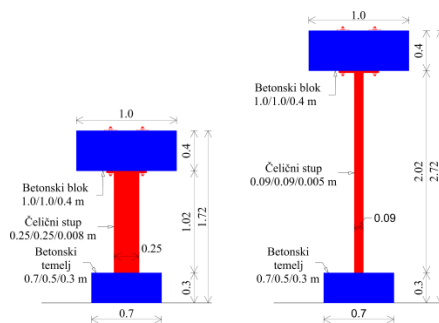
3. Usvojeni modeli zgrada

Potresne sile na građevinu značajno ovise o njenim dinamičkim karakteristikama koje ovise o njenoj krutosti i masi. Dinamičke karakteristike građevine dobro su opisane njenim periodima i oblicima slobodnih oscilacija. Prema [5], za tip 1 i tip tla A, projektne seizmičke sile za jednostupnjevi konzolni stup s masom na vrhu su definirane ovisno o njegovom periodu slobodnih oscilacija T (Slika 1).

Umjesto modela realne zgrade u umanjenom mjerilu, što bi rezultiralo nizom problema i dvojbi, u ovoj je studiji korišten zamjenjujući model zgrade s konzolnim jednostupnjevnim stupom s masom na vrhu koji ima prvi period slobodnih oscilacija T_1 kao i realna zgrada. Dakle takav model dobro reprezentira dinamičke karakteristike realne zgrade. Testirana su dva modela zgrada prema Slici 2, model MSB kod kojeg je eksperimentalno utvrđen $T_1=0.05$ s i reprezentira krute zgrade te model MSSB kod kojeg je eksperimentalno utvrđen $T_1=0.6$ s i reprezentira srednje krute zgrade. U usvojenim modelima uključen je i temelj jer ponašanje realnih zgrada pri potresu značajno ovisi o njihovim temeljima. Pri proračunu seizmičkih sila temeljenom na jednostupnjevnom sustavu, polazi se od pretpostavke potpunog uklještenja dna stupa u temelj, tj. da nema vertikalnih pomaka i rotacije temelja. U ovom su istraživanju ovi efekti uključeni u razmatranje.



Slika 1. Spektar odgovora prema [5], za tip 1 i kategoriju tla A



a) MSB ($T=0.05$ s)

b) MSSB ($T=0.6$ s)

Slika 2. Testirani uzorci

4. Testirani uzorci i aplicirane pobude

Eksperimentalno je ispitano deset različitih uzoraka na četiri ubrzanja podloge. Prvo su ispitivani modeli MSB i MSSB oslonjeni na krutu podlogu. Iznad platforme izveden je sloj betona debljine $d = 0.10$ m koji simulira uobičajeni podbeton ispod temelja realnih zgrada. Ovo stanje približno odgovara realnim zgradama koje su izravno temeljene na čvrstom temeljnom tlu bez potresne izolacije. Kod toga je spriječen horizontalni pomak temelja u odnosu na podlogu, dok je omogućeno odizanje temelja od podloge.

Potom su ispitivani modeli MSB i MSSB oslonjeni na podlogu od kamenih oblutaka. Kod toga je varirana debljina podloge (0.3 m i 0.6 m) i frakcija oblutaka (4-8 mm i 16-32 mm).

Razmatrani modeli zgrada s usvojenim podlogama izloženi su horizontalnim ubrzanjima potresne platforme u smjeru veće tlocrtno dimenzije temelja. Apliciran je umjetni akcelerogram (formiran za elastični spektar prema [5], tlo kategorije A), akcelerogram potresa Petrovac, akcelerogram potresa Banja Luka i akcelerogram potresa Ston. Maksimalno ubrzanje akcelerograma $a_{g,max}$ skalirano je na $a_{max} = 0.3$ g za model MSB, a za model MSSB na 0.2 g. Sloj oblutaka poslije svake aplicirane pobude doveden je u početno stanje.

4.1. Mjerene veličine i oprema za ispitivanje i mjerenje

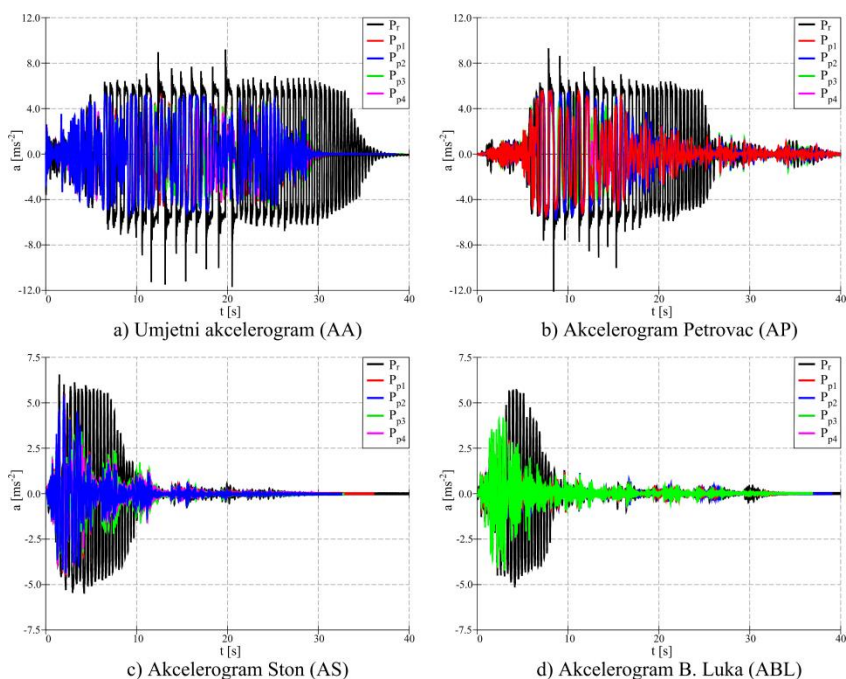
Na svakom su testiranom uzorku mjerene sljedeće veličine: horizontalni pomak u težištu mase na vrhu stupa (u_1), horizontalni pomak pri vrhu temelja (u_2), vertikalni pomak vrha temelja na desnom rubu (v_1) i lijevom rubu (v_2), vertikalna deformacija pri dnu stupa s desne strane (ε_1) i lijeve strane (ε_2) te horizontalno ubrzanje u težištu mase na vrhu stupa (a).

Usvojena ubrzanja podloge aplicirana su pomoću potresne platforme u Laboratoriju za potresna ispitivanja na Sveučilištu u Splitu. Prikupljanje podataka sa svih senzora izvršeno je pomoću sustava Quantum-x mx 840A (HBM). Pomaci su mjereni pomoću analognih mjerača pomaka, tip PB-25-S10-N0S-10C (*Uni Measure*), deformacije su mjerene pomoću elektrotopornih mjernih traka dužine 6 mm, tip 6/120 LY11 (HBM), dok su ubrzanja mjerena piezo - električnim niskofrekventnim akcelerometrom tip 4610 (MS).

5. Eksperimentalni rezultati

Prikazano je nekoliko rezultata zbog ograničene veličine rada, odvojeno za svaki aplicirani akcelerogram, za svih pet razmatranih tipova podloga: P_r - kruta podloga; P_{p1} - podloga od oblutaka frakcije 16-32 mm, debljine sloja 0.3 m; P_{p2} - podloga od oblutaka frakcije 16-32 mm, debljine sloja 0.6 m; P_{p3} - podloga od oblutaka frakcije 4-8 mm, debljine sloja 0.3 m; P_{p4} - podloga od oblutaka frakcije 4-8 mm, debljine sloja 0.6 m.

Horizontalno ubrzanje (a) u težištu mase na vrhu stupa prikazano je na Slici 3. Primjetno je da je najveće ubrzanje za sve razmatrane akcelerograme imala kruta podloga, te da se maksimalna ubrzanja za usvojene podloge od oblutaka malo razlikuju. U odnosu na krutu podlogu, najmanje smanjenje ubrzanja imala je tanka podloga od krupnih oblutaka.


Slika 3. Ubrzanje (a) u težištu mase na vrhu stupa za model MSB

U Tablici 1 prikazane su najveće izmjerene vrijednosti eksperimentalnih rezultata i njihov odnos.

Tablica 1. Maksimalne vrijednosti nekih izmjerenih veličina i njihov odnos

Aplicirana pobuda	Testirani model	Horizontalni pomak težišta bloka			Vertikalno odizanje vrha temelja			Ubrzanje težišta bloka			Deformacija na dn stupa		
		u_1 [mm]	u_1^* [mm]	$\frac{u_1^*}{u_1}$	v_1, v_2 [mm]	v_1^*, v_2^* [mm]	$\frac{v_1^*, v_2^*}{v_1, v_2}$	a [ms ⁻²]	a^* [ms ⁻²]	$\frac{a^*}{a}$	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ [⁰ / ₁₀₀]	$\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*$ [⁰ / ₁₀₀]	$\frac{\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*}{\varepsilon_1, \varepsilon_2}$
Umjetni akcelerogram	MSB	150	45	0.30	64	15	0.23	11.6	5.5	0.47	0.055	0.029	0.53
	MSSB	173	107	0.62	39	17	0.44	7.6	4.4	0.58	0.850	0.460	0.53
Akcelerogram Petrovac	MSB	120	85	0.71	51	35	0.69	12.1	5.7	0.47	0.058	0.027	0.47
	MSSB	142	80	0.56	28	13.5	0.48	7.6	4.5	0.59	0.870	0.460	0.53
Akcelerogram Ston	MSB	16.2	16.5	1.02	6.8	5.5	0.81	6.5	5.2	0.80	0.031	0.023	0.74
	MSSB	33.6	32	0.95	3.2	3.7	1.16	3.7	3.7	1.00	0.415	0.380	0.92
Akcelerogram B. Luka	MSB	12	6.5	0.54	4.4	1.7	0.39	5.8	4.1	0.71	0.025	0.018	0.72
	MSSB	21	14.5	0.69	1.4	2.3	1.64	2.8	2.4	0.86	0.320	0.220	0.69

$u_1, v_1, v_2, a, \varepsilon_1, \varepsilon_2$...maksimalne vrijednosti za krutu podlogu

$u_1^*, v_1^*, v_2^*, a^*, \varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*$...maksimalne vrijednosti za sloj oblutaka

6. Zaključak

Na temelju rezultata eksperimentalnih istraživanja ponašanja dvaju modela zgrada oslonjenih na krutu podlogu i podloge od kamenih oblutaka, izloženih ubrzanju četiri različita horizontalna akcelerograma s napreznjima konstrukcije u elastičnom području, može se zaključiti sljedeće:

- U odnosu na oslanjanje temelja na krutu podlogu, uporaba sloja oblutaka ispod temelja rezultirala je povoljnijim odgovorom modela zgrada na seizmička ubrzanja. Efikasnost sloja oblutaka ponajprije je ovisila o tipu apliciranog akcelerograma i krutosti modela te, manjim dijelom, o usvojenoj debljini sloja i frakciji oblutaka.
- Najmanje smanjenje deformacija/napreznja u stupu modela zgrade neposredno iznad temelja za akcelerograme AA, AP, AS i ABL iznosilo je 47%, 53%, 26%, 28% kod modela zgrade MSB i 47%, 47%, 8%, 31% kod modela zgrade MSSB.
- Smanjenje horizontalnog pomaka vrha modela zgrade za akcelerograme AA, AP, AS, ABL iznosilo je 70%, 29%, 0%, 46% kod modela zgrade MSB i 38%, 44%, 5%, 31% kod modela zgrade MSSB.
- Potrebna su daljna istraživanja predloženog koncepta seizmičke izolacije kako bi se dobili još vjerodostojniji zaključci u pogledu njegove efikasnosti i praktične primjene.

Zahvala

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost pod projektom Seizmička izolacija osnove građevine upotrebom prirodnih materijala - testiranje potresnom platformom i numeričko modeliranje [IP-06-2016-5325]. Rad doktoranda financirala je Hrvatska zaklada za znanost putem Projekta razvoja karijera mladih istraživača - izobrazba novih doktora znanosti“. Projekt je sufinancirala Europska unija, u okviru OP-a „Učinkoviti ljudski potencijali 2014-2020 iz sredstava ESF-a. Autori su zahvalni na potpori.

Literatura

- [1] Tsang, H.H.: Seismic isolation by rubber–soil mixtures for developing countries, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*; 37(2), pp. 283-303, 2008, doi.org/10.1002/eqe.756
- [2] Radnić, J., Grgić, N., Matešan, D., Baloević, G.: Shake table testing of reinforced concrete columns with different layout size of foundation, *Materialwissenschaft und werkstofftechnik*; 46, pp. 348-367, 2015, doi.org/10.1002/mawe.201500410
- [3] Xiong, W., Li, Y.: Seismic isolation using granulated tire–soil mixtures for less-developed regions: experimental validation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*; 42, pp. 2187–2193, 2013, https://doi.org/10.1002/eqe.2315
- [4] Patil, S.J., Reddy, G.R., Shivshankar, R., Babu Ramesh, Jayalekshmi, B.R., Kumar Binu.: Seismic base isolation for structures using river sand, *Earthquakes and Structures*,10(4): pp. 829-847, 2016, doi.org/10.12989/eas.2016.10.4.829
- [5] EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance- Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2004. Brussels: European Committee for Standardization