

POTRESNA IZOLACIJA IN NEREGULARNA ZASNOVA V ARHITEKTURI

EARTHQUAKE RESISTANT INSULATION AND IRREGULAR LAYOUTS IN ARCHITECTURE

izvleček

Članek analizira uporabnost sistema potresne izolacije za zmanjšanje neugodnih torzijskih vplivov pri asimetričnih konstrukcijah, ki smo jim pogosto priča v sodobni arhitekturi. Pri tem podrobneje raziskuje, če in do kakšne mere oziroma kdaj in v katerih primerih lahko sistem potresne izolacije »absorbira« neregularnosti in nepravilnosti v konstrukciji. Pri tem se lahko vprašamo, ali lahko dovolj sodoben in napreden sistem potresne izolacije npr. omogoča izgradnjo temeljne ploščadi, na kateri bi bila mogoča izgradnja kakršne koli konstrukcije, za katero nevarnost potresa sploh ne bi obstajala. V prvem delu članka sta kratko razložena razvoj in princip delovanja potresne izolacije. V nadaljevanju so analizirani vplivi potresne izolacije na arhitekturo, kot so temeljni nosilci in tehnične etaže, problemi dilatacije objekta od okolice, problemi vodenja inštalacij ter druga posebna pravila in omejitve. V analitičnem delu je prikazana detajlna analiza neizolirane in potresno izolirane, za Slovenijo tipične armirano-betonske okvirne konstrukcije. Učinek izolacije je prikazan s pomočjo nelinearne analize in primerjave horizontalnih pomikov, torzijskih rotacij in poškodb izolirane in neizolirane konstrukcije pri 10 različnih potresih, posnetih v naši bližnji okolici. Zaključki raziskav kažejo, da je s pomočjo potresne izolacije mogoče znatno ublažiti neugodne vplive na konstrukcijo, saj se ti prenesejo na sistem izolacije v temeljih, ki pa mora biti projektiran tako, da je sposoben prenesti povečane pomike in rotacije stavbe.

ključne besede:

Arhitektura potresnih območij, potresna izolacija, neregularne konstrukcije, tlorisna asimetrija.

abstract

The article analyses the use of earthquake resistant insulation in diminishing undesired torsion effects on asymmetrical structures, often seen in contemporary architecture. It includes a detailed account, if, to what extent and when, in which cases can systems of earthquake insulation "absorb" structural irregularities or mistakes. Hereby we can question whether a modern enough or progressive system of earthquake insulation can, for example, enable the building of a foundation plate that could facilitate any type of construction on it, which wouldn't be endangered by earthquake hazards. The first part of the article gives a brief account of the development and principles of operation of earthquake insulation. It is followed by an analysis of influences of earthquake insulation on architecture, such as foundation beams and technical floors, problems of dilatation of buildings from their environs, problems of leading utilities, as well as other special rules and limitations. The analytical part brings a detailed analysis of un-insulated and earthquake insulated reinforced concrete frame structure, typical for Slovenia. The effect of insulation is shown by a non-linear analysis and comparison of horizontal shifts, torsion rotation and damage to insulated and un-insulated structures evidenced from ten different earthquakes in our immediate vicinity. The research findings show that by using earthquake insulation we can significantly diminish negative influences on structures, since these are transferred to the foundation's insulation system, whereby the latter has to be designed to be capable of bearing increased shifts and rotation of the building.

key words:

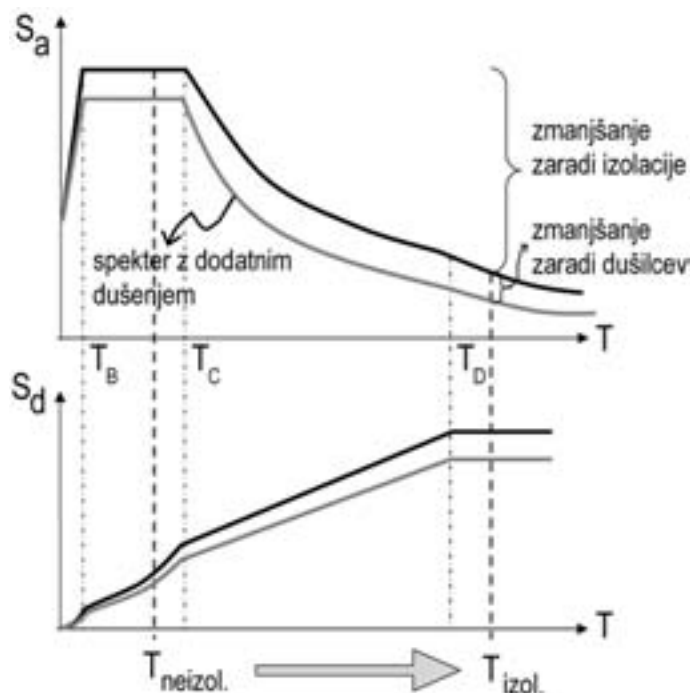
Architecture of earthquake-prone areas, earthquake insulation, irregular structure, layout asymmetry.

Sistem potresne izolacije lahko predstavlja pomembno alternativo za gradnjo stavb na potresnih območjih. Osnovna ideja potresne izolacije je poznana že od začetka devetnajstega stoletja, funkcionalno in cenovno dostopni sistemi pa se pojavljajo šele zadnjih deset let. Potresna izolacija se za zdaj v svetu največ uporablja pri konstrukcijah posebnega pomena ali stavbah, ki vsebujejo zelo drago opremo. S tehničnega in ekonomskega vidika pa z razvojem različnih ležišč in dušilcev ni več posebnih ovir za uporabo sistemov potresne izolacije, tudi na primer pri "arhitekturno posebnih" stanovanjskih in poslovnih stavbah, kot so stavbe z neregularnimi tlorisi ali nepravilnostmi po višini. Pri tem se lahko vprašamo tudi, kakšen vpliv ima uporaba potresne izolacije na projektiranje konstrukcij v arhitekturi. Projektiranje konstrukcij v arhitekturi, za razliko od golega upoštevanja tehničnih smernic in priporočil za pravilnost konstrukcije, ki ga favorizira gradbena stroka, pogosto sloni na popolnoma drugačnih izhodiščih, kot pa je gola osnovna varnost konstrukcije. Arhitekt projektant si vedno želi poseči po prepoznavnih rešitvah, ki bodo dobile prve nagrade na natečajih. Takšne konstrukcije so s stališča gradbene stroke pogosto popolnoma neregularne (npr. nesimetrične) in kot take potresno bolj ogrožene. S stališča arhitekturnega oblikovanja konstrukcij je torej predvsem zanimiva svobodnejša arhitekturna izraznost, ki jo lahko pričakujemo ob uporabi potresne izolacije in/ali koncentriranju tehnološko zahtevnih naprav za zmanjšanje potresnih vplivov. Tako se lahko vprašamo, ali lahko dovolj sodoben in napreden sistem potresne izolacije npr. omogoča izgradnjo temeljne ploščadi, na kateri bi bila mogoča izgradnja

kakršne koli konstrukcije, za katero nevarnost potresa sploh ne bi obstajala. Na ta način bi bil med drugim omogočen tudi prenos nekaterih zanimivih arhitekturnih konceptov z nepotresnih na potresno nevarna tla. Tako se pri zasnovi konstrukcije ne bi bilo treba ozirati na njeno zadostno horizontalno togost, duktilnost in ostale potresno varne zahteve, kar bi arhitektom omogočalo širši manevrski prostor in svobodnejše oblikovanje.

Jasno je, da s sistemom potresne izolacije ne moremo rešiti prav vsake konstrukcijske nelogičnosti in da pri vsaki realizaciji obstajajo določene tehnološke meje, ki jih ne moremo preseči s še tako sofisticiranim sistemom zaščite. Zavedati se je treba tudi, da je potresna izolacija tehnologija, ki ni uporabna prav za vsako vrsto konstrukcije, temveč prvenstveno za tiste z večjo togostjo in krajšim nihajnim časom. Odgovor na vprašanja tehnoloških mej in določitev racionalnih omejitev svobodnega projektiranja v arhitekturi zahteva obširne raziskave, saj vpliv potresne izolacije na obnašanje neregularnih stavb še ni podrobneje raziskan. Izhajamo iz hipoteze, da lahko pravilna uporaba potresne izolacije in drugih tehnološko naprednih sistemov za povečanje potresne varnosti, ob upoštevanju določenih konstrukcijskih pravil in omejitev ter racionalnih tehnoloških mej, bistveno pripomore k svobodnejšemu oblikovanju arhitekture določenih tipov konstrukcij, kar je v interesu tako projektantov konstrukcij kot projektantov arhitekture.

S stališča arhitekture je torej predvsem pomembno odgovoriti na vprašanje, če in do kakšne mere oziroma kdaj in v katerih primerih lahko sistem potresne izolacije "absorbira" neregularnosti in nepravilnosti v konstrukciji, ki smo jim v sodobni arhitekturi



Slika 1: Potresna izolacija zmanjšanje obremenitve in povečanje relativnih pomikov zaradi podaljšanja nihajnega časa in dodatnega dušenja vgrajenih dušilcev.

Figure 1: Earthquake insulation diminishes loads and increase of relative shifts because of the extended oscillation time and additional damping by inbuilt mufflers.

pogosto priča. Vpliv potresne izolacije na obnašanje ekscentričnih konstrukcij stavb za zdaj ostaja neraziskana tema, tako pri nas kot v svetu. Članek na zastavljeno vprašanje poskuša odgovoriti z detajlno analizo potresno izoliranih asimetričnih konstrukcij in primerjavami rezultatov z odzivom neizoliranih kot tudi potresno izoliranih simetričnih konstrukcij.

Princip in razvoj potresne izolacije

Ideja potresne izolacije je znana že z začetka našega štetja, saj že v spisih rimskega zgodovinarja Gaiusa Plinius Secundusa iz 1. stoletja našega štetja zasledimo opis zasnove potresne izolacije grškega templja boginje Diane v Efezu, pri katerem so pod temelje položili sloj iz drobcev premoga in sloj nastrožene volne [Martelli & Forni, 1998]. Dejanski začetki potresne izolacije pa segajo na začetek 20. stoletja, v leto 1909, ko je angleški zdravnik J. A. Calantarients patentiral poseben način gradnje, pri katerem med objekt in njegove temelje oziroma podzemeljske dele vstavimo posebne sloje (pesek, sljuda, lojevec) in s tem ločimo gibanje konstrukcije od gibanja tal v primeru močnih potresov [Naeim & Kelly, 1999].

Z izolacijskimi napravami namreč zmanjšamo energijo, ki jo potres dovaja v konstrukcijo, s tem pa reduciramo potresne sile, ki delujejo na konstrukcijo. To lahko dosežemo z vstavljanjem posebnih mehkih elementov v konstrukcijo (ležišč), kar podaljša nihajno dobo konstrukcije, in/ali z vstavljanjem dušilcev za sipanje potresne energije, ki niso del osnovnega konstrukcijskega sistema. Vpliv potresa lahko prikažemo z elastičnim spektrom

odziva, ki prikazuje maksimalno vrednost pospeška na vrhu konstrukcije (S_a) v odvisnosti nihajnega časa T in dušenja (slika 1). Iz spektra je razvidno, da tako podaljšanje nihajne dobe ($T_{neizol.} \rightarrow T_{izol.}$) kot povečanje dušenja zmanjšuje pospeške na vrhu konstrukcije, zaradi česar so sile na konstrukcijo med potresom manjše. Podobno kot spekter pospeškov lahko prikažemo tudi spekter pomikov kot prikaz relativnih pomikov mase glede na tla. Pri zelo togi konstrukciji ($T \sim 0$) je relativni pomik seveda nič, pri zelo podajnih konstrukcijah ($T \sim \infty$) pa je enak pomiku temeljnih tal. V trenutku, ko se v konstrukciji aktivira izolacijski sistem, postane konstrukcija zelo podajna. Za takšne konstrukcije lahko torej pričakujemo velike relativne pomike glede na pomike tal (slika 1). Naloga konstruktorja je torej, da vgradi takšen izolacijski sistem, da se bo konstrukcija obnašala elastično, pri čemer pa morajo pomiki tal ostati čim manjši.

Študija izolacije cestnih viaduktov na gradbeni fakulteti [Fischinger, Isaković, 2001] zaključuje, da je potresna izolacija učinkovita, obetavna in ekonomsko konkurenčna tehnologija, vendar pa za širšo uporabo manjka predvsem izkušenj, podatkov in primerov pozitivne prakse. Pregled novejših razpoložljivih literature pa kaže na to, da se uporaba izolacije v zadnjih letih naglo širi in da je izkušenj in razpoložljivih podatkov, pa tudi primerov pozitivne prakse, čedalje več.

Razlog so predvsem izkušnje zadnjih potresov, ki kažejo izredno dobro obnašanje izoliranih zgradb. Tako lahko v zadnjih letih sledimo močnemu porastu projektov potresno izoliranih zgradb [Fujita, 1998; Naeim & Kelly, 1999; Marioni & Dusi, 2003; Pan et al., 2005]. Iz literature je razvidno [baza z opisi projektov potresno izoliranih zgradb v Italiji (GLIS), <http://www.assisi-antiseismicsystems.org/> <april, 2007>], da se potresna izolacija vse bolj uporablja tudi v stanovanjski gradnji in pri raznih sanacijah [Marioni & Dusi, 2003; Pan et al., 2005; Melkumyan & Hovhannisyanyan, 2006], saj so v tem primeru poškodbe konstrukcije minimalne ali celo izključene. Pozitivne izkušnje nedavnih potresov se kažejo še v izvajanju številnih mednarodno podprtih projektov, ki spodbujajo uvajanje in uporabo nizkocenovne potresne izolacije v državah v razvoju (nekdanje države Sovjetske zveze, Čile, Kitajska, Indonezija). Tako se je v primeru stanovanjske novogradnje izkazalo, da so bili stroški zaradi uporabe doma proizvedenih in projektiranih potresnih izolacijskih sistemov za približno eno tretjino nižji [Melkumyan & Hovhannisyanyan, 2006].

Arhitekturne posebnosti potresno izoliranih stavb

Tehnologija potresne izolacije v arhitekturo prinaša številne prednosti, pa tudi z njo povezane specifičnosti, tako pri zasnovi arhitekture konstrukcije kot pri izvedbi temeljev, dostopov in vodenju inštalacij. Najpomembnejše so:

- temeljni nosilci in tehnične etaže,
- ločitev (dilatacija) objekta od okolice,
- posebno (dilativno) vodenje inštalacij,
- posebna pravila, vezana na togost in gabarite (vitkost) stavbe.

Temeljni nosilci in tehnične etaže

Predpis Eurocode 8 zahteva, da je med zgornjo in spodnjo konstrukcijo treba zagotoviti dovolj prostora in narediti druge



Slika 2: Temeljna brana iz veznih gred in tlorisna razporeditev izolacijskih naprav. [Clemente, P.: Isolamento sismico della nuova scuola F. Iovine di San Giuliano di Puglia (str. 4), <http://www.assisi-antiseismicsystems.org/Territorial/GLIS/Applicazioni06.htm>, <april, 2007>.]

Figure 2: Foundation grid built from connecting beams and layout of the insulation apparatus.

potrebne ukrepe, tako da so med življenjsko dobo konstrukcije omogočeni pregledovanje, vzdrževanje in zamenjava naprav. V ta namen je treba nad in pod izolacijskim sistemom običajno izvesti močno ploščo ali brano iz močnih veznih gred, na katero so direktno ali prek dodatnih navpičnih elementov pritrjene naprave izolacijskega sistema (sliki 2 in 3).

Ločitev objekta od okolice in vodenje inštalacij

Potresno izolirana konstrukcija mora biti ločena od okoliške zemljine in konstrukcij, da se lahko med potresom prosto giblje v vseh smereh. Posebno pozornost je treba nameniti stopniščem, dostopom, pa tudi ločitvi kletnih delov objekta od okoliške zemljine. Eden od problemov je tudi vodenje vseh inštalacij, kot so vodovod, odtoki, električne in plinske napeljave itd. Ker so lahko pomiki potresno izolirane konstrukcije v primerjavi z okolico precejšnji, je treba veliko pozornosti posvetiti tudi pravilnemu načrtovanju in izvedbi inštalacij, posebno njihovih spojev. Problem je znan že od prvih korakov uporabe potresne izolacije [Naeim & Kelly, 1999], saj so že prvi predlagatelji predvideli posebne spoje in rešitve za vodenje inštalacij. Predpisi zahtevajo, da morajo vse napeljave skozi dilatacije okrog izolirane konstrukcije v stanju omejenih poškodb ostati elastične. Plinske in ostale nevarne napeljave, ki potekajo skozi dilatacije med izolirano konstrukcijo in okolico, je treba projektirati tako, da v mejnem stanju varno prevzamejo relativne pomike med izolirano konstrukcijo in okoliško zemljino. Na tržišču danes dobimo več vrst spojnih elementov, za različne sisteme inštalacij – razlikujejo se glede na medij oziroma energijo, ki jo napeljava prenaša (para, topla in hladna voda, plin, kemikalije, naftni derivati ...). Obstajajo posebni ojačani sistemi za inštalacije pod visokim pritiskom in visoko temperaturo ipd. Vsi sistemi morajo biti izdelani po predpisanih standardih in certificirani. Primer prereza izolirane konstrukcije z dilatacijsko rego med objektom in okolico in primer vodenja inštalacij sta prikazana na sliki 4. Posebna pravila, vezana na togost in gabarite (vitkost) stavbe

Pri vsaki dejanski realizaciji obstajajo določene tehnološke meje,



Slika 3: Tehnična etaža potrebuje vsaj 1,5 m višine. [Clemente, P.: Isolamento sismico della nuova scuola F. Iovine di San Giuliano di Puglia (str. 4), <http://www.assisi-antiseismicsystems.org/Territorial/GLIS/Applicazioni06.htm>, <april, 2007>.]

Figure 3: The height of the technical floor has to be at least 1.5 m.

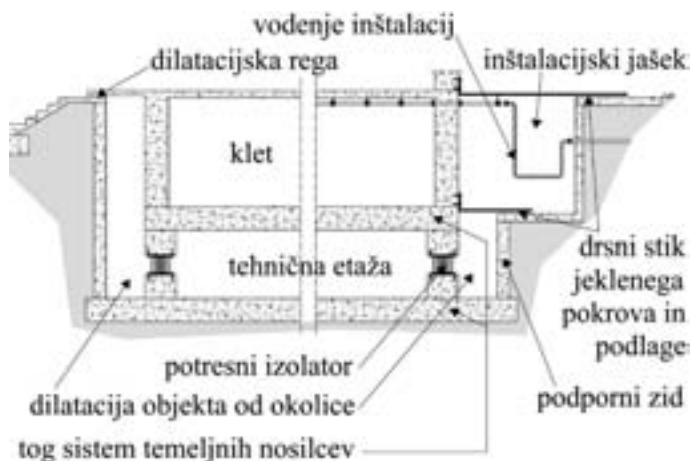
ki jih ne moremo preseči s še tako sofisticiranim sistemom zaščite. Zavedati se je treba tudi, da je potresna izolacija tehnologija, ki ni uporabna prav za vsako vrsto konstrukcije, temveč prvenstveno za tiste z večjo togostjo in krajšim nihajnim časom. Sem torej ne sodijo okvirne in/ali vitke ter visoke konstrukcije, temveč nižje konstrukcije z veliko horizontalno togostjo in majhnim nihajnim časom. Zelo pomembno vlogo igra tudi za zgradbe značilna vitkost oziroma razmerje višina – širina (H/B). V primeru visokih zgradb namreč obstaja nevarnost pojava nateznih obremenitev v ležiščih in s tem prekoračitev dopustnih nateznih sil v ležiščih. Za določitev posebnih pravil in tehnoloških mej uporabnosti potresne izolacije je potrebna podrobnejša raziskava obnašanja nesimetričnih potresno izoliranih konstrukcij z različnimi konstrukcijskimi sistemi, različnih višin, tlorisnih oblik, iz različnih materialov in z različnimi vrstami in stopnjami nesimetrije ali drugih neregularnosti pri različno močni potresni obtežbi.

Potresna izolacija neregularnih konstrukcij

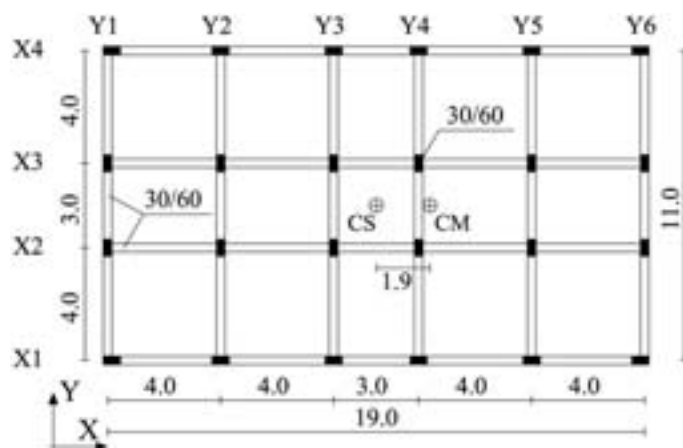
Regularno zasnovano so kot predpogoj potresno odporne gradnje sprejeli pisci vseh svetovnih zakonodaj s tega področja. Bolj simetrični objekti z enakomerno razporeditvijo nosilnih elementov (okvirov, sten, jeder) imajo praviloma precej manjše pomike (pa tudi precej bolj ugodne translatorne, za razliko od neugodnih torzijskih zasukov) kot v tlorisu ali po višini nesimetrični objekti. Izrazito nesimetrični objekti so na primer stavbe z ekscentričnimi stenami ali jedri oz. nepravilnostmi po višini (na primer z mehкими etažami). Izraz neregularnost konstrukcije se v pričujočem članku nanaša predvsem na naslednje tipe nepravilnosti konstrukcij [Slak & Kilar, 2005]:

- tlorisna asimetrija,
- različne togosti v dveh pravokotnih smereh,
- nepravilnosti po višini.

Potresna izolacija neregularnih konstrukcij je v večji meri malo ali neraziskano področje. Prve raziskave potrjujejo hipotezo, da ob uporabi potresne izolacije in/ali koncentriranju tehnološko



Slika 4: Dilatiranje objekta in inštalacij.
Figure 4: Dilatation of the building and utilities.



Slika 5: Tloris obravnavane konstrukcije in položaj centra mas za simetrično in nesimetrično konstrukcijsko varianto.

Figure 5: Layout of the described structure and position of mass centres for symmetrical and asymmetrical structural variables.

zahtevnih naprav lahko v določeni meri zmanjšamo neugodne torzijske in ostale učinke, ki so posledica neregularnosti konstrukcij. Obnašanje izoliranih tlorisno asimetričnih konstrukcij smo podrobneje raziskali z detajlno analizo potresno izoliranih asimetričnih konstrukcij in primerjavami rezultatov, z odzivom neizoliranih kot tudi potresno izoliranih simetričnih konstrukcij. Rezultati so prikazani v nadaljevanju.

Analiza možnosti uporabe potresne izolacije za zmanjšanje torzijskih vplivov

Opis analizirane konstrukcije

Kot testni primer smo izbrali štirietažno armiranobetonsko okvirno konstrukcijo. Osnovna konstrukcijska varianta je pravilna dvojno simetrična konstrukcija, pri kateri center togosti in center mas sovpadata. Etažna višina znaša 3.0 m, osna razdalja med stebroma pa 4.0 m oziroma 3.0 m. Stebri in grede so dimenzij 30/60 cm (slika 5).

Simetrična konstrukcija (oznaka Symm) je bila dimenzionirana v skladu z Eurocode standardoma 2 in 8, upoštevana je bila kategorija tal B, pospešek tal $a_g=0.35g$ in redukcijski faktor $q=3.75$. Upoštevana je bila naključna ekscentričnost enaka $\pm 5\%$ ustrezne dimenzije stavbe. Dimenzije gred in stebrov so bile enake v vseh etažah. Masa prvih treh etaž je znašala 295 ton, masa vrhnje etaže pa 237 ton. Za dimenzioniranje sta bila uporabljena prostorski računski model in metoda s spektri odziva. Celotna prečna sila je znašala 23 % skupne teže konstrukcije. Različne potrebe po nosilnosti stebrov in gred so bile dosežene s spreminjanjem armature v posameznih okvirih in posameznih etažah. Vzdolžna armatura v gredah je bila izračunana s programom SAP2000. Pri določanju armature stebrov je bila upoštevana metoda varovalke, na način, kot je to zahtevano v Eurocode 8. Upoštevano je bilo, da je armatura v spodnjih dveh etažah enaka. Prav tako je enaka armatura v tretji in četrti etaži. Nadalje je bilo upoštevano, da imajo vsi stebri enega okvira v isti etaži enako armaturo. Vsi okvirji v Y smeri so identični. Enaka

sta tudi okvirja X1 in X4, pa tudi okvirja X2 in X3. Nekatere podrobnosti o dimenzioniranju simetrične variante so opisane v [Faella & Kilar, 1998; Kilar, 2000].

Vpeljava tlorisne asimetrije

Neregularnost v tlorisu (asimetrijo) dosežemo s spreminjanjem položaja centra mas. Na ta način ostaja konstrukcija za primer simetrije in asimetrije enaka, razlika med obnašanjem obeh je izključno posledica neregularnosti v tlorisu, saj je vpliv ostalih dejavnikov izključen. Nesimetrično varianto smo dobili tako, da smo center mas premaknili v +X smeri za $e_m=0.1 \cdot L$ ($1.9 \text{ m}=10\% L$ – varianta Asym). Pri tem je armatura ostala enaka kot pri simetrični konstrukciji.

Matematični model

Nelinearna statična in dinamična analiza sta bili izvedeni na 3D računskem modelu z računalniškim programom SAP2000. Za medetažne plošče je predpostavljeno, da so popolnoma toge v svoji ravnini in popolnoma podajne pravokotno nanjo. Grede so bile modelirane z upoštevanjem enosnega upogiba in striga. Pri stebrih sta bila upoštevana upogib in strig v dveh smereh, pa tudi osne in torzijske deformacije. Vse strižne, osne in torzijske vzmeti so bile upoštewane kot elastične. Dušenje je bilo upoštevano kot kombinacija masne in togostne matrike. Koeficienta dušenja sta bila določena za 5 % dušenje, glede na 1. in 2. nihajno obliko.

Material in nelinearne karakteristike stebrov in gred

Zaradi možnosti preveritve in ponovitve analiz podajamo vse upoštewane karakteristike materiala in nelinearnega obnašanja prezevov:

- beton: C20/25 (MB25), elastični modul $E=2.850 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, prostorninska teža $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$, Poissonov količnik $\nu=0.20$, strižni modul $G=1.1875 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$.
- jeklo: elastični modul $E=2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$, vzdolžna armatura in stremena so kakovosti RA400/500.

Tri značilne točke prereza, ki opisujejo obnašanje armiranega betona v nelinearnem območju, so:

- cr ... crack (razpokanje betona v področju nategov – material počni),
- y ... yield (tečenje armature v področju nategov – meja elastičnosti prereza),
- u ... ultimate (porušitev prereza).

Steber je armiran simetrično, zato so te točke simetrične tako za pozitivno kot negativno smer momenta, medtem ko je v primeru prečke, ki ima različno armaturo zgoraj in spodaj, odnos nesimetričen.

V programu SAP2000 smo upoštevali poenostavljeno bilinearno obnašanje nelinearnih členkov, pri katerem ne spremljamo nastopa prvih razpok prereza. Glede na namen raziskave je to smiselno, saj nas zanima predvsem, ali potresno izolirana konstrukcija ostaja v elastičnem območju ali ne. Pri tem je bila upoštevana začetna reducirana elastična togost na »yield«, po njej pa dejansko izračunana utrditev, določena s programom DIAS [Fischinger et al., 1993]. Začetna reducirana elastična togost je b

Členek	L_p	N	M_y^- Φ_y^-	M_y^+ Φ_y^+	M_x^- Φ_x^-	M_x^+ Φ_x^+
Greda	0.324	0	295.8 0.51	253.6 0.49	309.4 5.61	263.2 6.52
Steber center	0.284	-437.8	446.6 0.61	446.6 0.61	520.1 1.98	520.1 1.98
Steber rob	0.284	-245.8	166.0 1.31	166.0 1.31	207.9 3.81	207.9 3.81

Tabela 1: Karakteristike plastičnih členkov za etažah 1 in 2, enote so [m, kN, 10-2/m].

Table 1: Characteristics of plastic joints in floors 1 and 2, the units are [m, kN, 10-2/m].

Legenda:

L_p _ dolžina plastičnega članka [Paulay & Priestley, 1992]

$M_{\pm y(u)}$ in $\Phi_{\pm y(u)}$ _ moment in ukrivljenost na meji tečenja (y) oz. pri porušitvi (u)

Potresna obtežba

Možnost variacije potresne obtežbe je vključena z analizo stavb pri 10 različnih potresnih zapisih. Izbrali smo razpoložljive akcelerograme iz naše bližnje (evropske) okolice. Močnejše komponente posameznih potresov smo normirali na pospešek 0.35 g (na katerega je bila konstrukcija dimenzionirana), 0.525 g (50 % večji) in 0.7 g (100 % večji – pospešek enak dvakratnemu pospešku, na katerega je bila konstrukcija dimenzionirana) in jih usmerili v Y smeri. Delovanje druge komponente v X smeri v predstavljeni fazi raziskave ni bilo upoštevano.

Izbira ležišč za potresno izolacijo

Ležišča smo namestili centrično, pod vse stebre v pritličju. Za izbiro ustreznih ležišč smo uporabili dva postopka. Prvi temelji na spremljanju poškodb v gredah in stebrih, drugi pa na izbiri

Država	Datum	Lokacija	Trajanje s	a_{max}^{N-S} cm/s ²	a_{max}^{E-W} cm/s ²
Črna gora	15.4.1979	Ulcinj	25	279.4	235.0
Črna gora	15.4.1979	Ulcinj2	25	167.8	217.9
Bosna in Hercegovina	13.8.1981	Banja Luka	10	506.4	386.8
Črna gora	15.4.1979	Bar	25	356.8	353.1
Črna gora	15.4.1979	Herceg Novi	25	209.4	226.0
Romunija	30/31.8.1986	Vrancea	25	273.3	297.1
Italija	11.5.1976	Tolmezzo	15	341.9	309.6
Italija	15.9.1976	Forgaria	15	298.8	323.4
Italija	15.9.1976	San Rocco	15	136.4	227.5
Črna gora	15.4.1979	Petrovac	19.6/25	429.3	298.8

Tabela 2: Upoštevani akcelerogrami potresov.

Table 2: The used earthquake acceleration graph.

želenega nihajnega časa konstrukcije. Oba načina dajeta podobne rezultate.

Izbira s spremljanjem poškodb v gredah in stebrih

Metoda temelji na analizi s spektrom odziva. Togost ležišč izbiramo kot odstotek elastične strižne togosti stebra, ki znaša:

$$K_{strižno}^{steber} = \frac{GA_s}{h_{stebra}} = 593599 \text{ kN/m}$$

... elastično

Pri tem opazujemo diagrame upogibnih momentov in spremljamo, kdaj je dosežen YIELD moment glede na definicijo členkov v posameznih gredah in stebrih. Metoda je nekoliko nerodna in zamudna, ugotovimo pa lahko, da se pri togosti vzmeti, enaki 0.15 % togosti stebra, poškodbe ne pojavljajo več. Takšna konstrukcija ima nihajni čas 1.7 sekunde. Slika 6 prikazuje pomike na vrhu, pomike tal in razliko med njima, ki predstavlja relativni pomik, ki upogiba konstrukcijo in dejansko povzroča poškodbe. Z manjšanjem strižne togosti izolacije se relativni pomiki manjšajo, pomiki vrha (in tal nad ležišči) pa so čedalje večji.

Izbira z določitvijo nihajnega časa

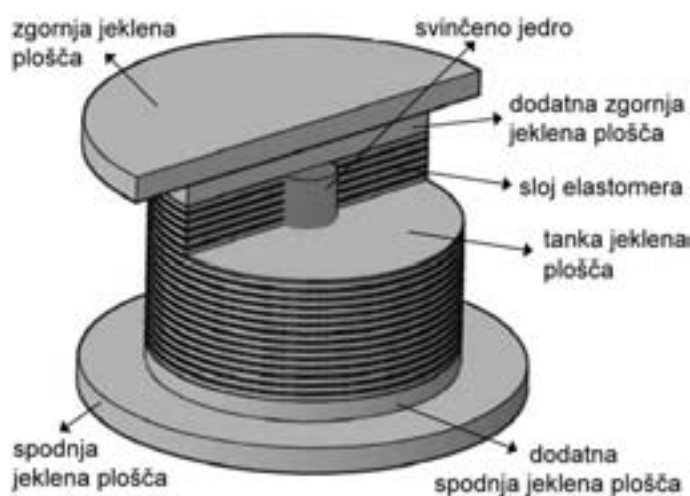
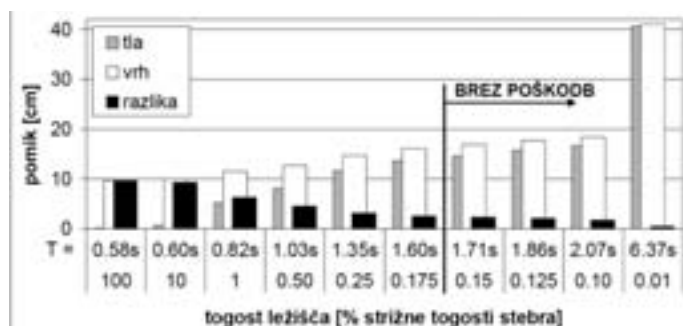
Metoda temelji na postopkih, ki so se uveljavili pri projektiranju mostov z elastomernimi ležišči. Opisana je tudi v predpisu Eurocode 8 za mostove [EN-1998-2, 2005]. Pri tej metodi je postopek naslednji:

Izberemo želen nihajni čas → izračunamo efektivno strižno togost ležišč (gre za sistem z eno prostostno stopnjo – SDOF):

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2 m}{T_{eff}^2}$$

kjer je m celotna masa v potresnem projektnejem stanju glede na EC8 (v našem primeru 1340 t).

Bistveno vprašanje je, kakšen nihajni čas izbrati. Iz upoštevanega elastičnega spektra sledi, da je relativni pospešek na vrhu enak projektnejemu pospešku tal pri nihajnem času približno 1.5 sekunde. Dobljeno togost nato razdelimo na 24 ležišč. Tako



Slika 6: Izbira ustreznih ležišč s spreminjanjem togosti ležišč (izražene kot odstotek elastične strižne togosti stebra).

Slika 7: Shema izbranega ležišča.

Figure 6: Choice of suitable beds by changing the bed's rigidity (expressed as the share of the columns elastic shear rigidity).

Figure 7: Scheme of the selected bed.

lahko dobimo naslednje togosti ležišč: 980 kN/m ($T_{eff}=1.5$ s), 720 kN/m ($T_{eff}=1.75$ s) or 551 kN/m ($T_{eff}=2.0$ s). Ta metoda je iteracijska, saj moramo za izbrano ležišče nato še preveriti, če res preprečuje poškodbe in če so izpolnjene ostale zahteve in kontrole, vezane na dejansko elastomerno ležišče.

Za naš primer smo izbrali gumijasto ležišče s svinčnim jedrom (LRB), z efektivno strižno togostjo 800 kN/m. Podobno ležišče lahko najdemo tudi v literaturi [Doudoumis et. al., 2006]. Oblikovni faktor S [Naeim & Kelly, 1999] izbranega ležišča znaša 11.7, strižni modul elastomera G pa 1000 kN/m². Vertikalno togost ležišča izračunamo iz [Fischinger & Isaković, 2001]:

$$K_v = \frac{A}{h} (6GS^2 + \kappa)$$

kjer je A prečni prerez elastomera, h višina elastomera (150 mm) in κ kompresijski modul (2000 MPa). Obnašanje ležišča v

vertikalni smeri je predpostavljeno elastično.

Karakteristike izbranih ležišč

Ležišče je sestavljeno iz:

- 2 jeklenih plošč (vrh in dno), premera 500 mm in debeline 30.0 mm,
- 2 jeklenih plošč (vrh in dno), premera 350 mm in debeline 25.0 mm,
- 20 slojev elastomera, premera 350 mm in debeline 7.5 mm,
- 19 tankih jeklenih plošč, premera 350 mm in debeline 3.0 mm, centralnega svinčenega jedra, premera 77.0 mm in višine 257 mm,
- celotna višina: 317 mm.

Osnovne tehnične karakteristike:

dopustna tlačna napetost = 1.25 kN/cm²

projektni pomik $D_d = 0.150$ m

togost po plastifikaciji $K_d = 650$ kN/m

začetna togost $K_u = 4225$ kN/m

sila pri projektnem pomiku (D_d) = 120 kN.

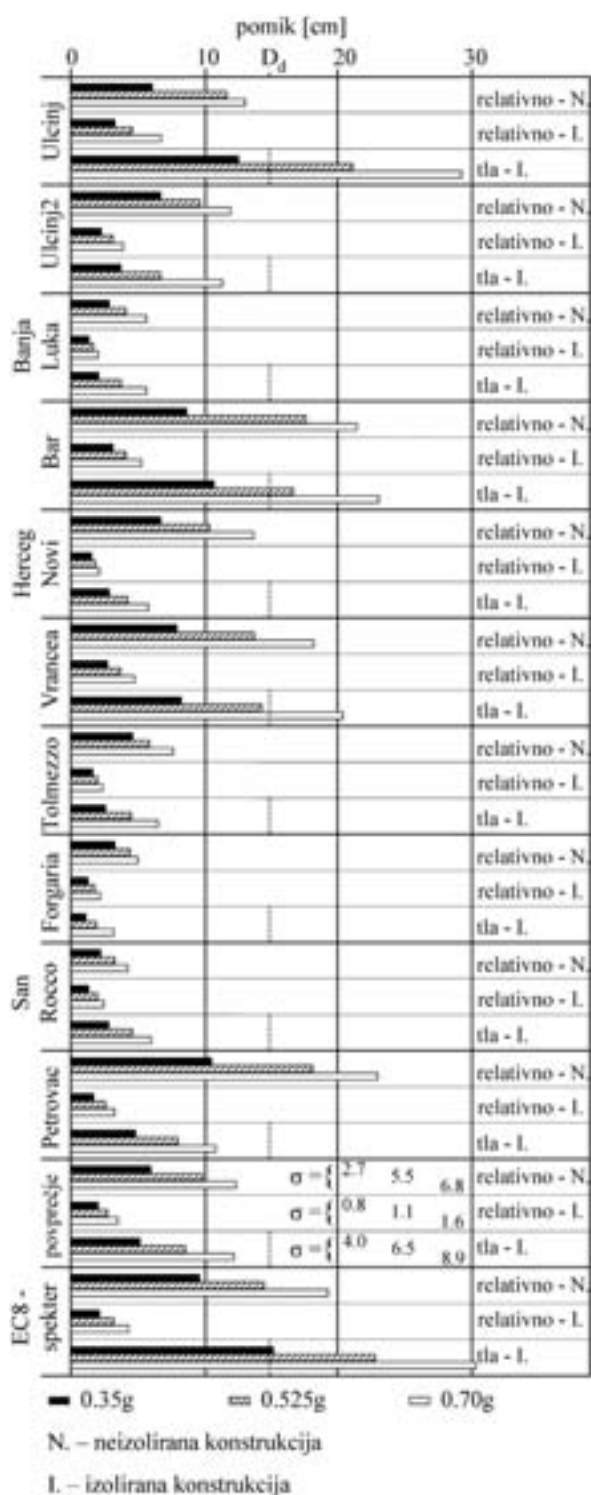
	T_1 [s]	T_2 [s]	T_3 [s]
Symm – Neizolirana	0.580 (X)	0.564 (Y)	0.373 (Z)
Symm – Izolirana	1.804 (Y)	1.760 (X)	1.393 (Z)
Asym – Neizolirana	0.593 (Y)	0.580 (X)	0.387 (Z)
Asym – Izolirana	1.884 (Y)	1.733 (X)	1.364 (Z)

Tabela 3: Nihajni časi.

Table 3: Oscillation times.

Rezultati – simetrična konstrukcija

Izbrani rezultati nelinearnih dinamičnih analiz za neizolirano in izolirano simetrično konstrukcijo so prikazani na slikah 8, 9 in 10. Slika 8 prikazuje pomika na vrhu v smeri Y (za neizolirano konstrukcijo) in pomike tal ter relativne pomike (za izolirano konstrukcijo), kot tudi povprečne vrednosti in standardno deviacijo za vseh 10 izbranih potresov, skaliranih na 0.35g, 0.525g in 0.70g (dvakratni pospešek, na katerega je bila konstrukcija dimenzionirana). Pri tem relativni pomiki predstavljajo razliko med absolutnim pomikom vrha konstrukcije in pomikom tal. Pri neizolirani konstrukciji so relativni pomiki enaki pomikom na vrhu, saj so tla nepomično vpeta. S slike 8 je razvidno, da nekatera potresna vzburjanja, kot na primer Banjaluka, Herceg Novi, Tolmezzo, Forgaria in San Rocco ne povzročajo večjih pomikov, niti pri neizolirani niti pri izolirani konstrukciji, saj njihova frekvenčna sestava ne povzroča resonančnih odzivov pri obravnavani konstrukciji. Ostali potresni zapisi povzročijo več škode, za neizolirano konstrukcijo sta najbolj kritična Bar in Petrovac, za izolirano konstrukcijo pa Ulcinj in Bar (poškodbe za ta dva potresa so prikazane na slikah 9 in 10). Potres Petrovac, ki je najbolj kritičen pri neizolirani konstrukciji, pri tej ne povzroči večjih pomikov ali poškodb. Pomiki so, kot je bilo pričakovati, večji pri večjih pospeških tal. Vidimo lahko tudi, da račun s spektrom po Eurocode 8 da zelo dobre rezultate, ki so na varni strani. Velika odvisnost odziva konstrukcije od potresnega zapisa kaže na nepredvidljivost potresne obremenitve, ki se odraža tudi v velikih vrednostih standardnega odklona, še posebej pri zapisih,



Slika 8: Relativni pomiki in pomiki tal za neizolirano (N.) in izolirano (I.) konstrukcijo za 10 izbranih potresnih zapisov, s pospeškom tal skaliranim na 0.35g (projektni pospešek tal) in na 50 ter 100 % večji pospešek.

Figure 8: Relative shifts and ground shifts for un-insulated (N.) and insulated (I.) structures for ten selected earthquake records with ground acceleration scaled to 0.35g (project ground acceleration) and a 50 or 100% larger acceleration.

skaliranih na 0.70g.

Če primerjamo relativne pomike neizolirane in izolirane konstrukcije (prvo in drugo skupino stolpcev pri vsakem potresu), lahko ugotovimo, da so pomiki izolirane konstrukcije za vse potrese in vsa skaliranja vedno manjši od pomikov neizolirane konstrukcije. Če primerjamo pomike tal pri izolirani konstrukciji (tretja skupina stolpcev pri vsakem potresu), vidimo, da so ti podobni ali večji kot pomiki vrha pri neizolirani konstrukciji, vendar pa pri skaliranju na pospešek tal 0.35g nikdar ne presežejo projektnega dopustnega pomika $D_d = 15$ cm. V primeru 50 % močnejšega potresa je projektni pomik ležišča 15 cm presežen le pri zapisih Ulcinj in Bar. Največji pomik ležišča ~29 cm dobimo pri potresu Ulcinj in skaliranju pospeška tal na 0.70g. V tem primeru je pomik ležišča enak približno dvakratni višini ležišča, kar je po podatkih iz literature za izjemne obtežbe še vedno dopustno (nekateri viri navajajo, da porušitev ležišča nastopi šele pri pomiku, večjem od trikratne višine ležišča). Rezultati kažejo na izredno učinkovitost izbranega sistema potresne izolacije, saj konstrukcija ostaja elastična pri projektnih potresnih obremenitvah, pa tudi pri 50 in 100 odstotkov večjih pospeških tal. V teh primerih sicer pride do nekaj manjših poškodb posameznih gred v višjih etažah, vendar so te občutno manjše kot pri neizolirani konstrukciji (sliki 9 in 10).

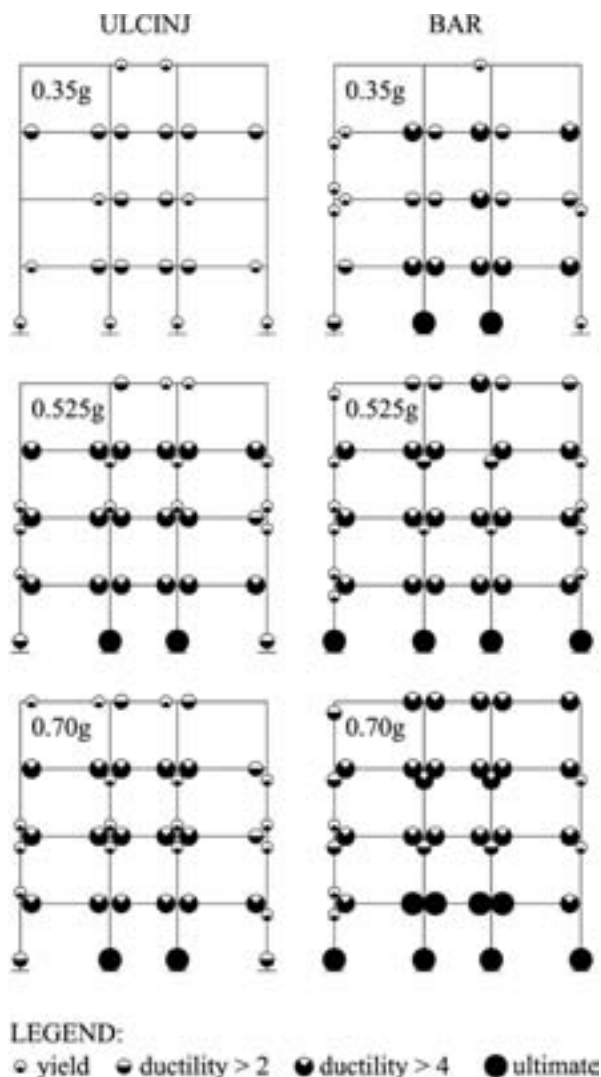
Učinkovitost potresne izolacije lahko najbolj nazorno prikažemo s prikazom poškodb. Na slikah 9 in 10 je prikazana shema poškodb za neizolirano in izolirano konstrukcijo za potresna zapisa Ulcinj in Bar. Poškodbe so opisane s faktorji duktilnosti prereza za stebre in grede za prečni preizkus konstrukcije v Y smeri. Pri tem je faktor duktilnosti prereza μ definiran kot razmerje dosežene rotacije in rotacije na meji tečenja za upoštevanje nelinearne vzmeti. Dokler je $\mu \leq 1.0$, je obnašanje prereza elastično. Pri faktorju duktilnosti 1 (yield) se začne tečenje natezne armature, beton v nategu ima že kot las tanke razpoke, zaščitna plast betona odpade, vendar preizkus še vedno polno nosi.

Pri večjih duktilnostih prereza (2 – 4) se razpoke čedalje bolj povečujejo, tvori se plastični členek, pri čemer se plastične rotacije povečujejo hitreje kot moment v členku (tečenje prereza). Pri mejni nosilnosti prereza (ultimate) je dosežena mejna tlačna nosilnost betona, kar pomeni, da se beton začne drobiti in preizkus se kmalu nato poruši.

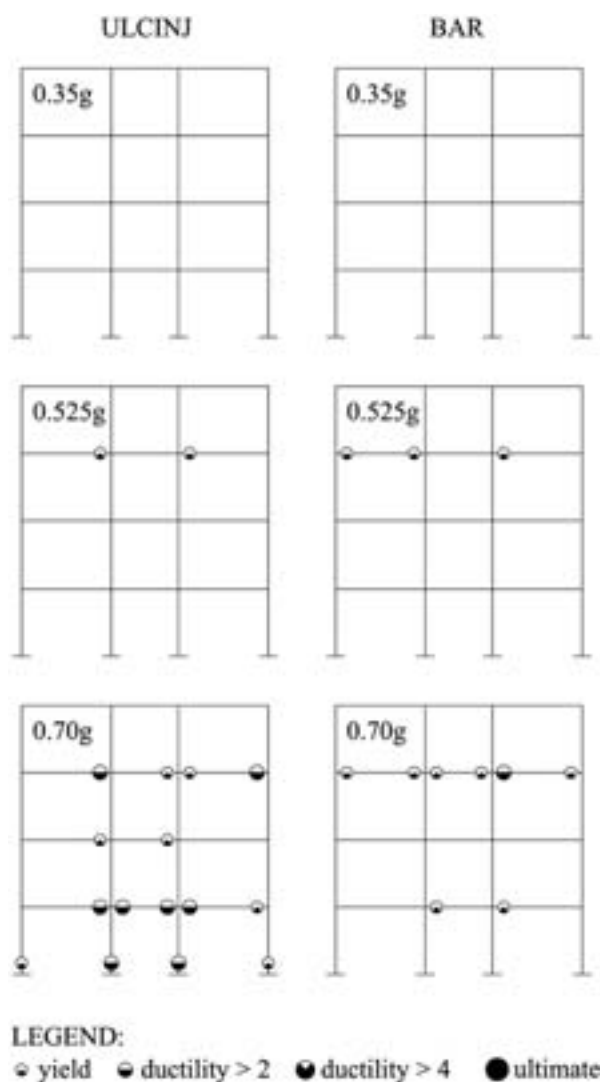
Pri potresnih zapisih, skaliranih na 0.525g in 0.70g, pride do manjših poškodb gred v višjih etažah, stebri so poškodovani ob vpetju le v primeru akcelerograma Ulcinj in Petrovac in skaliranju na 0.70g.

Rezultati – asimetrična konstrukcija

Izbrani rezultati nelinearnih dinamičnih analiz za neizolirano in izolirano asimetrično konstrukcijo so prikazani na slikah 11, 12, 13 in 14. Vsi rezultati so prikazani za akcelerogram z maksimalnim pospeškom, skaliranim na 0.35g. Pri asimetrični konstrukciji lahko pričakujemo povečanje torzijskih rotacij stavbe in posledično povečanje horizontalnih pomikov na podajni strani (okvir Y6) in zmanjšanje pomikov na togi strani (okvir Y1). Slika 11 prikazuje relativne pomike in pomike tal za okvira na podajni in togi strani za neizolirano in izolirano konstrukcijo. Za primerjavo so prikazani tudi pomiki neizolirane



Slika 9: Poškodbe za neizolirano konstrukcijo.
 Figure 9: Damage to non-insulated structure.



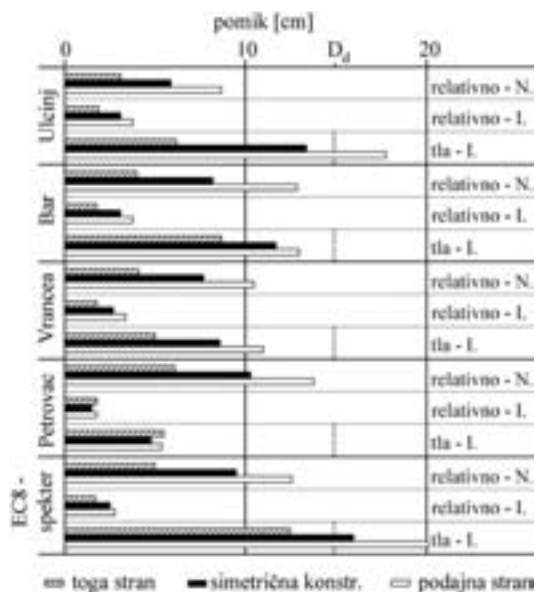
Slika 10: Poškodbe za izolirane konstrukcijo.
 Figure 10: Damage to insulated structure.

in izolirane simetrične konstrukcije. Prikazani so rezultati za štiri potresne zapise, ki so se izkazali za najbolj merodajne pri analizi simetrične izolirane konstrukcije (Ulcinj, Bar, Vrancea in Petrovac). Če opazujemo pomike neizolirane konstrukcije (slika 11, prva skupina stolpcev pri vsakem potresu), lahko ugotovimo, da je pomik na podajni strani vedno bistveno večji kot pomik na togi strani, pri čemer je pomik simetrične neizolirane konstrukcije zelo blizu njuni aritmetični sredini.

Podobne zaključke dobimo tudi pri opazovanju relativnih pomikov izolirane konstrukcije (slika 11, druga skupina stolpcev pri vsakem potresu), le da so ti približno dva- do trikrat manjši kot pri neizolirani konstrukciji. Sklenemo lahko, da izolacija zadovoljivo ščiti konstrukcijo pred neugodnimi vplivi asimetrije. Na to kažejo tudi poškodbe konstrukcije, ki so za potres Ulcinj prikazane na sliki 12, ki kaže, da zaradi asimetrije sicer pride do meje tečenja v nekaj gredah v etažah 1 in 3, vendar so te poškodbe v primerjavi s poškodbami neizolirane konstrukcije zanemarljive.

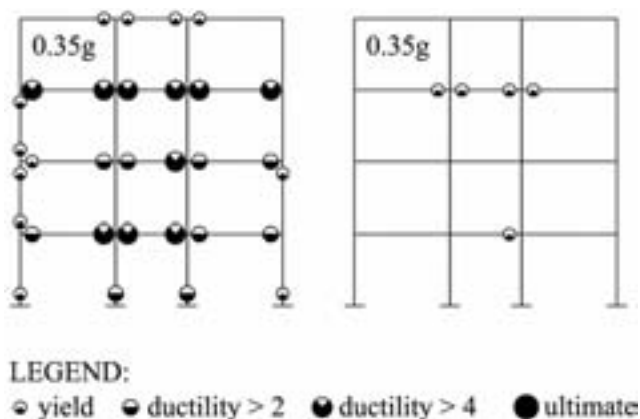
Ob opazovanju pomikov tal (slika 11, tretja skupina stolpcev pri vsakem potresu) lahko ugotovimo, da so pomiki pri vseh potresih večji kot pri neizolirani konstrukciji. Torzijske rotacije pridejo do polnega izraza, pomiki tal na podajni strani so približno za do 25 % večji kot pri simetrični izolirani konstrukciji in v primeru akceleroograma Ulcinj dosežajo približno 18 cm. Pri skaliranjih na 50 in 100 % večjih pospeških bi torej obstajala nevarnost poškodb ali celo porušitev ležišč na podajni strani (pod okvirom Y6). Zdi se, da sistem potresne izolacije prenaša vpliv asimetrije s konstrukcije na sistem potresne izolacije. Predpostavljamo, da bi torzijske rotacije potresno izolirane stavbe lahko zmanjšali, tako da bi povečali togost ležišč na podajni strani in zmanjšali togost ležišč na togi strani.

Slika 13 prikazuje časovni potek torzijskih rotacij na vrhu konstrukcije za neizolirano in izolirano konstrukcijo. Najbolj merodajna je primerjava relativnih rotacij, ki indicira velikost dodatnih poškodb zaradi torzije (slika 13a). Vidimo lahko, da so



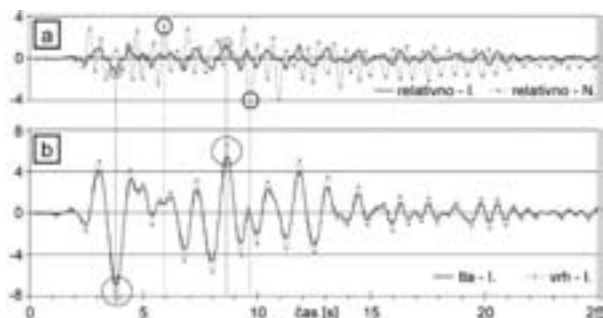
Slika 11: Relativni pomiki in pomiki tal za togo (Y1) in podajno (Y6) stran za neizolirano (N.) in izolirano (I.) asimetrično konstrukcijo (skaliranje 0.35g). Prikazani so tudi pomiki simetrične konstrukcije.

Figure 11: Relative shifts and ground shifts for the rigid (Y1) and soft (Y6) sides of un-insulated (N.) and insulated (I.) asymmetrical structures (scaling 0.35g). Shifts in symmetrical structures are also shown.



Slika 12: Poškodbe za asimetrično neizolirano (levo) in izolirano (desno) konstrukcijo.

Figure 12: Damage on an asymmetrical un-insulated (left) and insulated (right) structure.



Slika 13: Torzijske rotacije [10–3 rad] za izolirano (I.) in neizolirano (N.) konstrukcijo (Ulcinj, 0.35g).

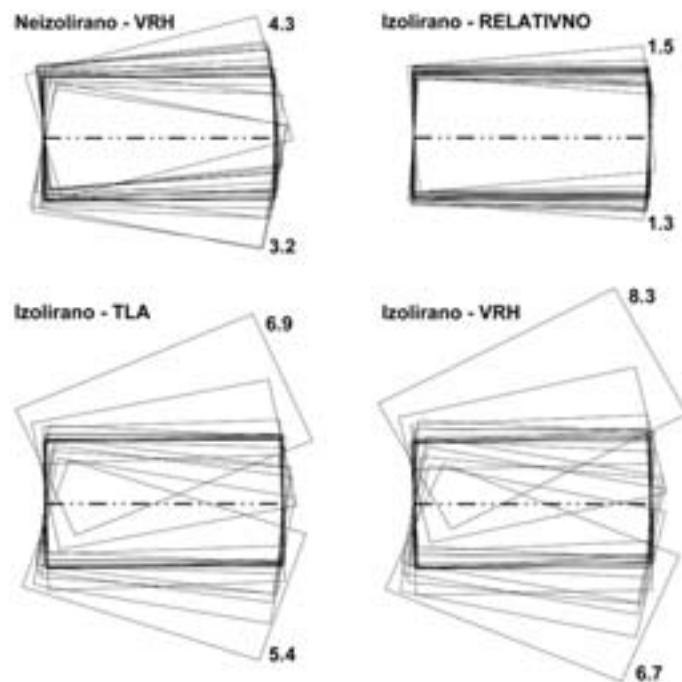
Figure 13: Torsion rotation [10-3 rad] for insulated (I.) and un-insulated (N.) structures (Ulcinj, 0.35g).

relativne rotacije za izolirano konstrukcijo bistveno manjše kot pa za neizolirano konstrukcijo. Zanimivo je tudi, da je dinamični odziv neizolirane in izolirane konstrukcije popolnoma drugačen, kar lahko vidimo tudi iz nastopa maksimalnih vrednostih odziva, do katerih pride v popolnoma drugih časih (pri izolirani konstrukciji maksimumi nastopijo prej). Slika 13b prikazuje rotacije tal in absolutne rotacije na vrhu konstrukcije. Zdi se, da vrh konstrukcije popolnoma sledi torzijskim rotacijam tal, saj so maksimalni zasuki tal in vrha doseženi v istem času. V istem trenutku je dosežena tudi maksimalna relativna rotacija, ki predstavlja razliko med njima.

Sama oblika torzijskega nihanja simetrične konstrukcije v kombinaciji s translatorskim nihanjem v Y smeri je najboljše razvidna s slike 14, ki prikazuje nevezano zaporedje premikov obrisa temeljne plošče in zgornje etažne plošče. Pri tem so za izolirano konstrukcijo ločeno prikazane relativna rotacija (vrh – tla), rotacija tal (talne plošče) in absolutna rotacija vrha konstrukcije. Na sliki so označene tudi maksimalne vrednosti rotacij.

Sklepi

Raziskava obravnava študije nelinearnega dinamičnega obnašanja simetrične in asimetrične armirano betonske okvirne konstrukcije pri različnih potresnih obremenitvah. Upoštevanih je bilo 10 potresnih zapisov z nam bližnjega evropskega prostora in skaliranje pospeškov na 100 %, 150 % in 200 % projektne pospeška tal (0.35g). Izbrali smo standardni izolacijski sistem s 24 elastomernimi ležišči s svinčnim jedrom in togimi temeljnimi gredami.



Slika 14: Podroben prikaz premikov in rotacij neizolirane in izolirane konstrukcije [10–3 rad] (Ulcinj, 0.35g).

Figure 14: Detailed depiction of shifts and rotation of un-insulated and insulated structures [10-3 rad] (Ulcinj, 0.35g).

Analize simetrične konstrukcije potrjujejo ustreznost izbranega izolacijskega sistema. Pri vseh upoštevanih potresih konstrukcija ostaja v elastičnem območju. Pri potresih, ki so močnejši od projektiranega potresa, le v nekaterih primerih pride do manjših poškodb posameznih gred v 2. in 3. etaži. Na podlagi teh rezultatov lahko sklepamo, da je predlagani sistem izolacije zelo učinkovit in da bistveno povečuje varnost konstrukcije, ne samo pri projektirani potresni obtežbi (kot to zagotavljajo predpisi), temveč tudi pri dvakrat močnejših potresnih obtežbah.

Analiza nesimetrične konstrukcije je pokazala, da uporabljeni sistem izolacije bistveno zmanjša poškodbe, ki sicer nastanejo na podajni strani neizolirane asimetrične konstrukcije. V posameznih primerih so sicer nastopile manjše poškodbe v posameznih gredah, ki pa so zanemarljive. Rezultati potrjujejo hipotezo, da lahko z izolacijskim sistemom zmanjšamo oziroma v določenih primerih celo popolnoma izničimo neugodne vplive torzije in s tem omogočimo svobodnejše projektiranje arhitekture.

Ena od pomembnih ugotovitev raziskave je tudi, da se pri potresni izolaciji asimetričnih konstrukcij torzijski vplivi prenesejo iz zgornje nosilne konstrukcije v sam izolacijski sistem. Ugotovili smo, da so v tem primeru pomiki izolatorjev na podajni strani zaradi torzije bistveno večji kot pri izolirani simetrični konstrukciji. V primeru močnejših potresov torej obstaja nevarnost poškodb izolatorjev. Ugotavljamo sicer, da je obnašanje izoliranih asimetričnih konstrukcij boljše kot obnašanje neizoliranih, obstaja pa dejstvo, da je pri asimetrični konstrukcijski zasnovi potresna varnost objekta manjša kot pri simetričnih konstrukcijah. Ugotavljamo tudi, da so potrebne nadaljnje raziskave, ki jih bomo usmerili predvsem v analizo različnih tipov konstrukcij z in brez izolacije, različnih sistemov potresne izolacije in vplivov dušilcev na torzijski odziv asimetričnih konstrukcij. Predvidevamo še izdelavo cenovne analize, ki bo prikazala dejanske izvedbene možnosti v vsakdanji projektantski praksi.

Literatura in viri

- Baza z opisi projektov potresno izoliranih zgradb v Italiji, ASSISI – mednarodna organizacija protipotresnih sistemov, oddelek GLIS (Gruppo di Lavoro Isolamento Sismico), <http://www.assisi-antiseismicsystems.org/Territorial/GLIS/Applicazioni06.htm>, <april, 2007>.
- CEN, European Committee for Standardization., (2005): EN-1998-2 – Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges.
- Doudoumis, N.I., Kotanidis, C. & Doudoumis, I.N., (2006): A comparative study on static push-over and time-history analysis methods in base isolated buildings. Proc. 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva. Paper number: 420.
- Faella, G., Kilar, V., (1998): Asymmetric multistorey R/C frame structures: push-over versus nonlinear dynamic analysis. Proc. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris. Rotterdam: Balkema.