

PREISKAVE MODELOV ZIDANIH STAVB NA POTRESNI MIZI

SHAKING-TABLE TESTS OF MASONRY BUILDING MODELS

prof. dr. Miha Tomažević, univ. dipl. inž. grad.

Zavod za gradbeništvo Slovenije,
Dimičeva 12, 1000 Ljubljana
miha.tomazevic@zag.si

Znanstveni članek

UDK: 624.012:624.042.7.001.5

Povzetek | V prispevku so obravnavane prednosti in pomanjkljivosti preiskav modelov zidanih stavb v majhnem merilu na enostavni potresni mizi na ZAG-u. V primerjavi s stroški preiskav velikih modelov ali prototipnih konstrukcij so stroški modelnih preiskav razmeroma majhni. Modeli so cenejši od prototipov, čeprav so za izdelavo ustreznih modelnih materialov včasih potrebne obsežne predhodne študije. Razen same ploščadi, ki se uporablja le kot potresna miza, so vse ostale naprave, programski hidravlični bati, jekleno podporje, elektronski sistemi za zajemanje podatkov in podobno, uporabne tudi za druge vrste preiskav. Ker modelno merilo predstavlja omejitve pri simulaciji obnašanja prototipov, z modelnimi preiskavami na splošno ne moremo raziskovati obnašanja konstrukcijskih detajlov, pač pa z njimi dobimo podatke o obnašanju celotne konstrukcije. Tako lahko razmeroma dobro ponazorimo porušne mehanizme zidanih konstrukcij in rezultate preiskav uporabimo za preverjanje računskih modelov in določitev vrednosti parametrov, s katerimi opišemo lastnosti konstrukcije v nelinearnem področju nihanja. Na tipičnih primerih so predstavljene različne tehnike modelnih preiskav in možnosti interpretacije rezultatov. Predstavljeni so tudi delovanje potresne mize, postopki za simulacijo potresnega gibanja tal in krmiljenje naprave ter meritve in obdelava podatkov za učinkovito analizo obnašanja preiskanih modelov.

Summary | The advantages and disadvantages of testing of small-scale masonry building models on a simple shaking table at ZAG are discussed. The costs of testing are relatively low, compared to the costs of testing large scale models or prototype structures. Physical models are cheaper than prototypes, although preliminary studies to develop adequate model materials are most often needed. Except the platform, other testing equipment, such as programmable actuators, steel supporting system, and electronic data acquisition system can be also used for any other types of testing. Since scale effects represent limitations, only the overall seismic behaviour of structural systems can most often be studied, and not the behaviour of structural details. Failure mechanisms of masonry structures subjected to seismic ground motion can be simulated fairly well. The results of tests are used for the verification of numerical models as well as for the determination of values of parameters, which determine the behaviour of masonry structures in the non-linear range of seismic response. Various approaches of testing are discussed and typical examples presented. The basic procedures to model the earthquake ground motion and control the shaking table motion are explained. Instrumentation of models, data acquisition and processing to analyze the dynamic behaviour of tested models are also presented.

1 • UVOD

Čeprav je bil tudi v razvoju numeričnih metod za analizo potresne odpornosti zidanih konstrukcij v zadnjih desetletjih dosežen velik napredek, je eksperimentalno preizkušanje obnašanja elementov in sklopov, tudi celotne konstrukcije, še vedno neizogibno. Zidovje je neelastičen, nehomogen in neizotropen konstrukcijski material, ki ga samo z izračunom težko obvladamo. Še več, z novimi materiali in tehnologijami zidanja se marsikdaj bistveno spremenijo tudi nekatere že raziskane zakonitosti. Pri eksperimentalnem preizkušanju zato ne gre samo za ugotavljanje ključnih

med preiskavo deformiramo podobno, kot bi nihale med potresom, pri čemer si pomagamo z izračunom (t. i. psevdodinamična preiskava).

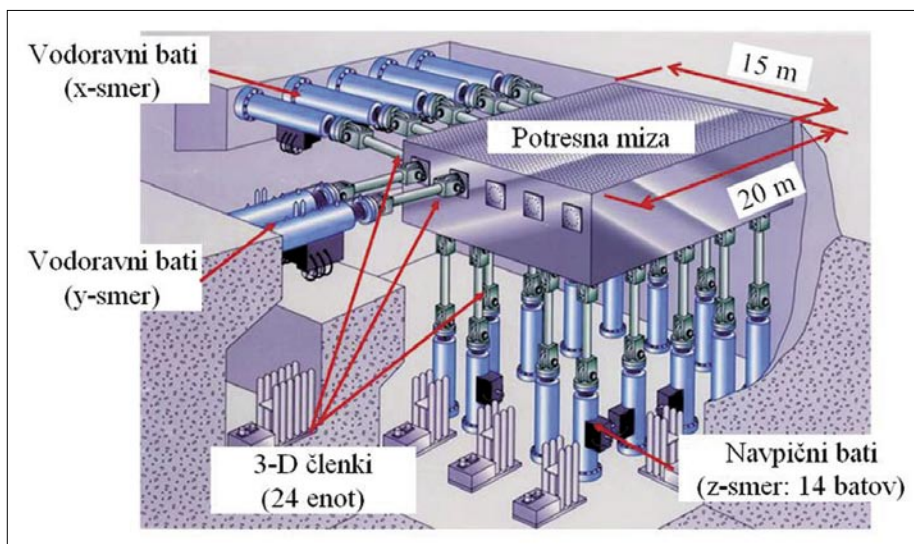
Razvoj tehnologije nam danes omogoča, da na potresnih mizah, ki ponazarjajo prostorsko gibanje tal med potresom, preiskujemo tudi do desetnadstropne stavbe v naravnem merilu (slika 1). Seveda je takšnih naprav, ki so izjemno drage, na svetu le nekaj. Ker so temu primerno drage tudi preiskave, se v marsikaterem laboratoriju uporabljajo manjše in cenejše naprave, na katerih seve-

številine raziskave, o katerih smo poročali tudi v Gradbenem vestniku. Ker je zmogljivost mize v primerjavi z velikimi napravami skromna, na zavodu preiskujemo razmeroma majhne modele. Zato se večkrat porajajo dvomi o zanesljivosti rezultatov naših raziskav. Še posebej danes, ko se veliki eksperimentalni centri z zmogljivimi napravami združujejo v konzorcije, ki opravijo večino eksperimentalnih raziskav. Koliko so v primerjavi z raziskavami obnašanja velikih preizkušancev sploh vredni rezultati, dobljeni s preiskavo pomanjšanih konstrukcij?

V prispevku bomo opisali, kako izvesti modelne preiskave, da bodo rezultati zanesljivi, in pri tem opozorili na omejitve, ki jih moramo pri eksperimentih upoštevati, da bomo na podlagi preiskave modela lahko zanesljivo predvideli, kako se bo obnašala konstrukcija v naravnem merilu. Še posebej, ker gre za modeliranje obnašanja zidanih konstrukcij, ki so sezidane iz materiala, katerega lastnosti so v primerjavi z lastnostmi drugih gradbenih materialov nekaj posebnega.

Na splošno lahko rečemo, da s preiskavo majhnih modelov lahko raziščemo le splošno obnašanje in porušni mehanizem celotnega konstrukcijskega sistema, in ne obnašanja posameznih elementov ali detajlov. Ko zmanjšamo dimenzije konstrukcije, se spremenijo tudi vplivi marsikaterega, za obnašanje konstrukcije odločilnega parametra. Vpliva merila na gradiente napetosti in deformacij, sprejemnost med malto in zidaki oziroma malto in armaturo in podobno pri fizikalnem modeliranju ne smemo zane-mariti. Teoretično ni problemov. Pri pripravi materialov in izdelavi samega modela pa včasih naletimo na nepremostljive težave. Zato je v večini primerov velikost modela odvisna prav od možnosti, da s še sprejemljivo napako modeliramo vpliv teh parametrov, za vsak primer sproti pa ustreznost tudi dokažemo s spremljajočimi študijami in preiskavami.

Čeprav izgledajo preprosto, modelne preiskave zahtevajo veliko predhodnih raziskav in izkušenj, če želimo, da bodo njihovi rezultati verodostojni oziroma jih bomo lahko uporabili tudi za napoved, kako se bodo obnašale med potresom konstrukcije v naravnem merilu.



Slika 1 • Shematični prikaz največje potresne mize na svetu (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Miki, Japonska)

mehanskih lastnosti zidovja, pač pa tudi za preverjanje predpostavk računskih modelov. S preiskavami obnašanja zidov kot osnovnih elementov zidanih konstrukcij s ciklično vodoravno obtežbo sicer dobimo nekatere osnovne podatke, vendar ti zaradi kompleksnosti in različnosti sistemov zidanja največkrat niso dovolj. Da bi dobili podatke, ki so odvisni od zasnove konstrukcije, moramo v pogojih potresne obtežbe raziskati obnašanje celotnih konstrukcijskih sistemov. Za to je na razpolago več možnosti. Konstrukcije lahko preiščemo bodisi tako, da jih postavimo na naprave, s katerimi ponazorimo gibanje tal med potresom – potresne mize, in raziskujemo njihov odziv, bodisi jih preiščemo tako, da jih prihrdimo na tla in jih

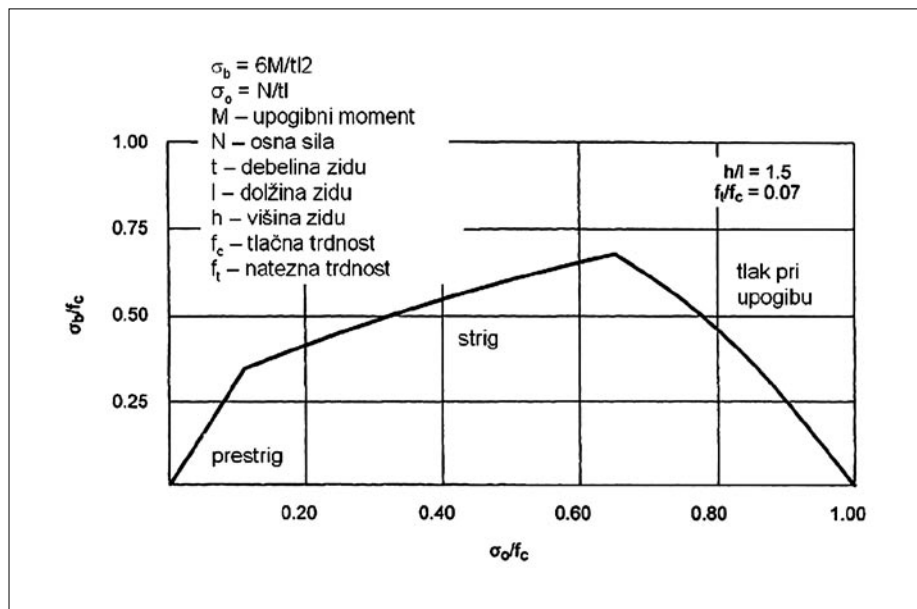
da ne preizkušajo konstrukcij v naravnem merilu oziroma prototipov, pač pa njihove pomanjšane modele. Tudi te potresne mize so bolj ali manj tehnološko zahtevne naprave, saj nekatere ravno tako zmorejo simulacijo prostorskega gibanja tal, medtem ko se druge zadovoljijo z dvema komponentama ali pa celo z eno samo. V odvisnosti od velikosti lahko pomanjšane konstrukcije (modeli) bolj ali manj natančno ponazorijo prototip.

Enostavno mizo, katere predhodnica je bila celo med prvimi v Evropi (Turnšek in Reisner, 1970) in s katero lahko ponazorimo eno samo komponento gibanja tal, imamo tudi na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Na njej smo v zadnjih desetletjih izvedli

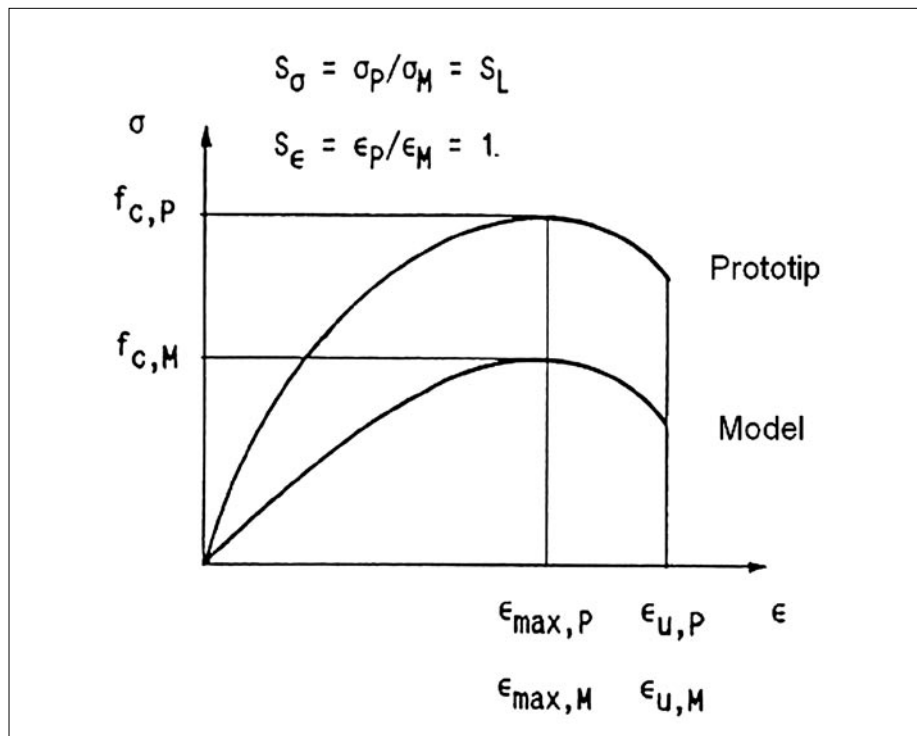
2 • FIZIKALNO MODELIRANJE ZIDANIH KONSTRUKCIJ

Če raziskujemo obnašanje zidanih stavb s preiskavo njihovih modelov na potresnih mizah, je podobnost med mehanizmi obnašanja, ki smo jih ugotovili na stavbah, ki so jih prizadeli

potresi, in mehanizmi, ki smo jih ugotovili med preiskavo njihovih modelov na potresni mizi, prav gotovo najmerodajnejše merilo za oceno zanesljivosti takšnih preiskav. Potek poškodb



Slika 3 • Odvisnost porušnega mehanizma od razmerja med tlačnimi napetostmi v zidu in tlačno trdnostjo zidovja ((Tomažević in Turnšek, 1980), (Mann in Müller, 1982), (Mann in sod., 1988))



Slika 3 • Odvisnost med napetostmi in deformacijami materialov prototipa in popolnega modela

in porušni mehanizmi, ki jih dobimo z modelno preiskavo, morajo biti podobni tistim, ki smo jih po potresu ugotovili na stavbah.

Če nam bo to uspelo in če hkrati poznamo robne pogoje in smo izmerili vse potrebne fizikalne veličine, lahko rečemo, da smo z modelno preiskavo dobili vse potrebne podatke za vrednotenje parametrov, ki jih rabimo za oceno odziva prototipne stavbe na potres. Podatki, ki jih dobimo z modelno preiskavo, bodo uporabni, čeprav morda nismo v celoti izpolnili vseh pogojev, na podlagi katerih smo načrtovali izdelavo modela in njegovo preiskavo.

Osnovno težavo pri modelnih preiskavah konstrukcij na potresni mizi predstavlja dejstvo, da raziskujemo, kako se obnaša konstrukcija v nelinearnem področju pri dinamični obtežbi. Če bi raziskovali obnašanje konstrukcije v elastičnem področju pri statični obtežbi, bi bile modelne preiskave precej enostavnejše, saj bi modele lahko izdelali iz kakršnega koli elastičnega materiala. Poznati bi morali le osnovna razmerja med mehanskimi lastnostmi materialov prototipa in modela.

Da bi zadostili osnovnemu pogoju za verodostojnost modelne preiskave na potresni mizi, podobnosti med porušnim mehanizmom prototipa in modela pri potresu, je treba izpolniti pri izdelavi modela dvoje:

- da bi dosegli podoben dinamični odziv na potres, morajo biti mase in togosti po višini modela porazdeljene podobno kot v prototipni stavbi;
- da bi dosegli podoben porušni mehanizem, morajo v elementih konstrukcije modela vladati podobna razmerja med napetostnim stanjem zaradi vplivov gravitacijske in potresne obtežbe in trdnostnimi lastnostmi kot v elementih konstrukcije prototipa. Znano je, da so od teh razmerij odvisni lokalni porušni mehanizmi (slika 2).

O tem, kako modelirati potresno gibanje tal, bomo govorili v posebnem poglavju.

Če na modelu izmerimo splošno fizikalno veličino q_M , med njo in pripadajočo veličino na prototipu q_P obstoji korelacija ((Langhaar, 1951), (Harris in Sabnis, 1999)):

$$q_P = q_M S_q, \quad (1)$$

kjer je S_q faktor merila za dano fizikalno veličino. Od tega, kako se bomo lotili izdelave modela, bodo odvisne tudi korelacije med fizikalnimi veličinami, izmerjenimi na modelu, in pripadajočimi veličinami na prototipu.



Slika 4 • Izdelava modelnih zidakov z jeklenim opažem

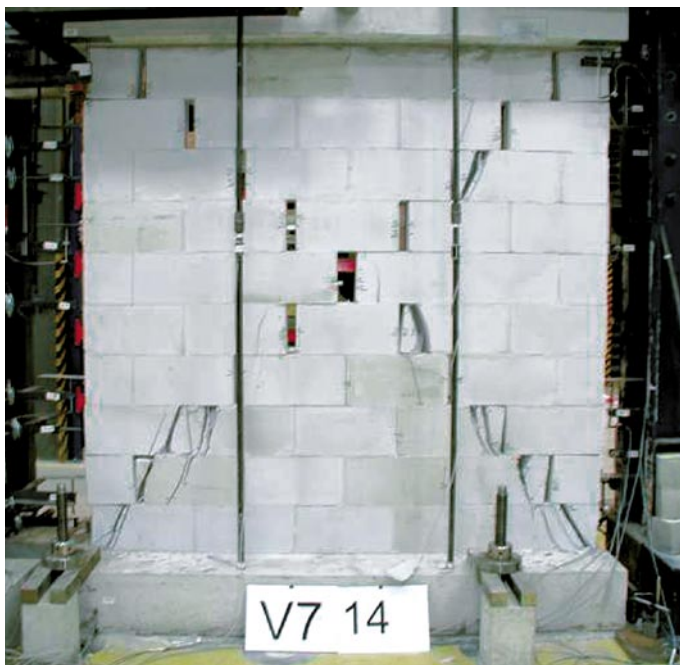
Lahko izdelamo t.i. popolni model (angleško »complete« ali »true model«), za katerega uporabimo materiale, katerih diagram σ - ε je v smeri napetosti zmanjšan v merilu modeliranja ($S_\sigma = S_\varepsilon$), v smeri deformacij pa je enak kot prototipni material ($S_\varepsilon = 1$). Z drugimi besedami: popolni model izdelamo iz materialov, katerih trdnost zmanjšamo v geometrijskem merilu, medtem ko njihove deformacijske last-

nosti ostanejo nespremenjene (slika 3). To pa še ni vse: takšni materiali morajo imeti enako kot prototip tudi specifično maso ($S_\gamma = 1$), Poissonov količnik ($S_\mu = 1$) oziroma pri zidanih konstrukcijah razmerje med strižnim in modulom elastičnosti G/E in dušenje ($S_\zeta = 1$). Tehnološke omejitve omejujejo najmanjše še možno merilo, saj se z manjšanjem trdnosti materialov praviloma zmanjša tudi njihova

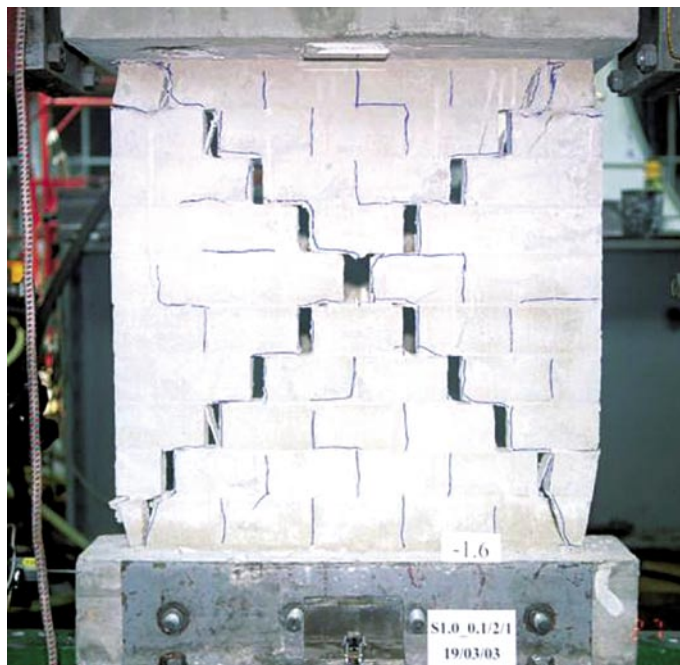


Slika 5 • Preiskava modelnega zidu v posebej zasnovani napravi

specifična masa. Da bi jo obdržali enako kot v prototipu, materialom dodajamo težke, tudi kovinske agregate, kar pa spet vpliva na trd-

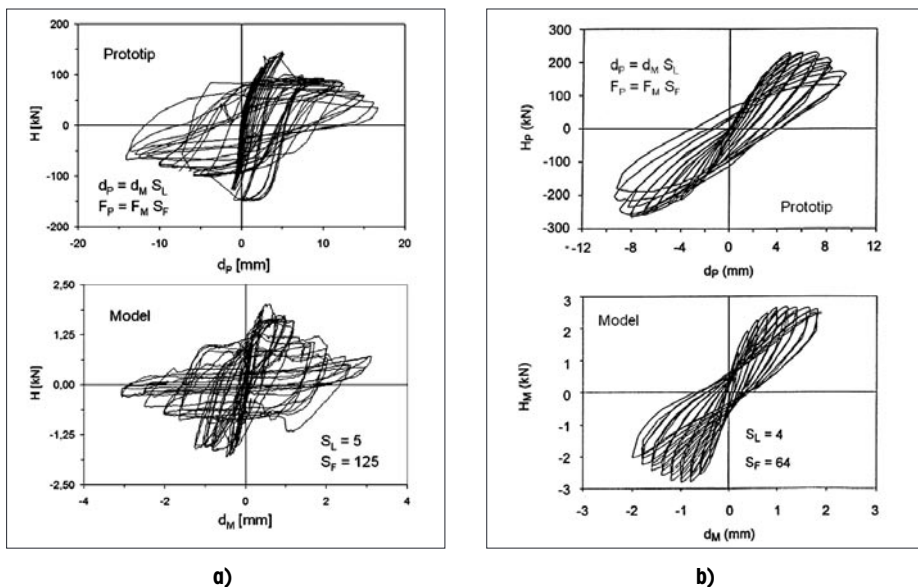


a)



b)

Slika 6 • Podobnost mehanizma porušitve: a) strižne razpoke v prototipnem zidu in b) strižne razpoke v modelu ((Tomažević in sod., 2004), (Oetes in Loering, 2006))



Slika 7 • Podobnost histerezne odvisnosti med vodoravno silo in pomiki: a) zid iz sodobnih zidakov, prikazan na sliki 6, merilo 1 : 5, in b) kamniti zid hiše v Posočju, merilo 1 : 4 ((Tomažević in sod., 2004), (Oetes in Loering, 2006), (Tomažević in Velechovsky, 1992))

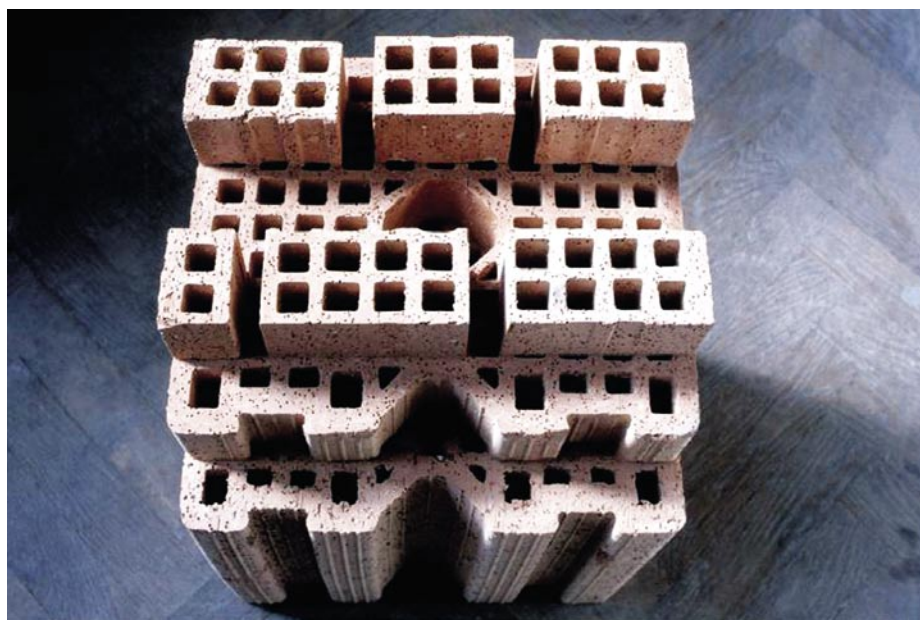
nost. Pred leti smo za izdelavo zidakov za zidanje popolnega modela v merilu 1 : 7 uporabili mešanico elektrofiltrskega pepela, perlit, žgane gline, korundnega prahu in kalvena, ki smo jo pod tlakom primerno oblikovali in žgali v peči za keramiko ((Boštjančič, 1977), (Tomažević, 1987)). Ker je izdelava takšnih zidakov zelo zamudna in draga, potresna miza pa omogoča tudi preiskave precej večjih modelov (merila 1 : 5 do 1 : 3), v zadnjih letih modelne zidake izdelamo iz posebej projektirane malte, sestavljene iz zmesi zdrobljene opeke ali drugega agregata, apna, cementa, drugih dodatkov in vode (slika 4). Trdnost malte lahko projektiramo, o dejanskih lastnostih pa se pred serijsko izdelavo zidakov prepričamo s predhodnimi preiskavami. Z uporabo zdrobljene opeke zagotovimo ustrezno specifično maso, z drugimi komponentami pa reguliramo zahtevano trdnost ((Tomažević in sod., 1996), (Tomažević in Klemenc, 1997), (Tomažević in sod., 2004, 2008)). Zahtevane dimenzije oziroma obliko zidakov zagotovimo z od primera do primera izdelanim jeklenim opazem na vibracijski mizi, v katerega vlijemo malto, in ki omogoča, da vsak dan izdelamo tudi po nekaj sto zidakov. V odvisnosti od velikosti lahko porabimo za izdelavo posameznega modela celo več kot 10.000 zidakov, zato je pomemben tudi čas, v katerem jih lahko izdelamo.

Ker je zidovje neelastičen, nehomogen in neizotropen material, še ni rečeno, da smo s tem, če smo v zahtevanem razmerju zmanj-

šali trdnost zidakov in malte, že kar uspešno modelirali tudi lastnosti zidovja prototipne stavbe. In narobe: če nismo uspeli z modeliranjem trdnosti osnovnega materiala, še ni rečeno, da nismo uspeli z modeliranjem zidovja. Ker so bolj kot lastnosti sestavnih materialov, zidakov in malte pomembne lastnosti zidovja, pred dokončno odločitvijo o izbiri materiala za zidanje modelov v posebej zasnovanih napravah preiščemo še v modelnem merilu sezidane zidove

(slika 5), njihovo obnašanje pa primerjamo z obnašanjem prototipnih zidov. Ker nas zanima obnašanje zidov pri potresni obtežbi, pozornost posvetimo bolj natezni kot tlačni trdnosti zidovja, še posebej pa s prototipom primerjamo ugotovljeni porušni mehanizem, tj. potek in porazdelitev poškodb, sposobnost disipacije energije in duktilnost ter druge parametre, ki vplivajo na obnašanje zidanih konstrukcij med potresom. Na sliki 6 prikazujemo porušno stanje prototipnega in modelnega zidu, ki smo ju preiskali v okviru raziskav vrednosti faktorja obnašanja q , s katerim po Evrokodu 8 določamo projektne potresne sile za zidane konstrukcije in pri katerih je bila podobnost med obnašanjem prototipnega in modelna zidovja ključnega pomena. Na sliki 7 primerjamo histerezne odvisnosti med vodoravno silo in pomiki, ki smo jih ugotovili tako s preiskavo zidov, ki ju prikazuje slika 6, kot tudi s preiskavo kamnitega zidovja v okviru raziskav mehanizma delovanja jeklenih zidnih vezi, kjer podobnost obnašanja prototipnega in modelnega zidovja sicer ni bila tako pomembna, vendar smo kljub temu uspeli zelo dobro modelirati celo lastnosti kamnitega zidovja.

Če uspemo izdelati materiale, s katerimi lahko sezidamo popolni model, med preiskavo avtomatično izpolnimo pogoje za podobnost dinamičnega obnašanja in porušnega mehanizma. Razmerje med lastno težo oziroma maso konstrukcije bo ostalo takšno, kot zahtevajo osnovne zahteve za modeliranje. Če bomo na modele dodali še uteži, s katerimi



Slika 8 • Za izdelavo enostavnega modela lahko uporabimo kar razžagane prototipne votlake

bomo ponazorili koristno obtežbo, bomo v zidovih modela ustvarili tudi podobne nape-
tostne razmere kot pri prototipu.

Druga možnost je, da za izdelavo modela uporabimo kar prototipne materiale (slika 8) (Tomažević in sod., 1989). Tak model ime-
nujemo enostavni model (angleško »simple model«). Tudi s preiskavo enostavnega mo-
dela dobimo rezultate, ki jih lahko preslikamo na prototipno konstrukcijo. Ker uporaba pro-
totipnih materialov ne zahteva predhodnih raziskav, je izdelava modela v resnici razmero-
ma enostavna. Da bi pa ustregli pogojem za podobnost dinamičnega odziva in porušnega
mehanizma ter rezultate preiskave verodostoj-
no preslikali na prototip, moramo tak model na preiskavo navadno posebej pripraviti.
Paziti moramo predvsem na to, da s tem, ko v zidovih ustvarimo razmere, s katerimi
zagotovimo podobnost porušnega mehaniz-
ma, ne pokvarimo podobnosti dinamičnega
obnašanja.

Faktorje meril za posamezne fizikalne veličine
teoretično določimo s pomočjo t.i. dimenzi-
onalne analize (Langhaar, 1951). Faktorji
modelnega merila so za posamezne ključne
fizikalne veličine, ki določajo dinamično
obnašanje konstrukcij, navedeni v preglednici
1. V preglednici so navedeni splošni izrazi pa
tudi enačbe, ki veljajo v primeru popolnih in
enostavnih modelov.

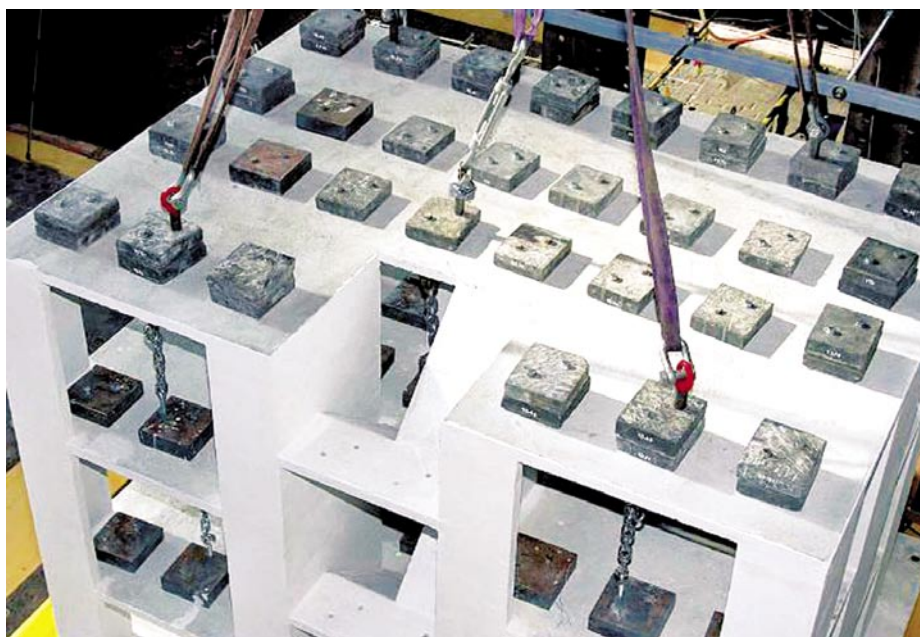
V praksi se nam večinoma zgodi, da ne uspe-
mo izdelati materiala, ki bi v vseh pogledih
ustrezal zahtevam, ki jih postavljajo pravila

Veličina	Splošna enačba	Popolni model	Enostavni model
Dolžina (L)	$S_L = L_P / L_M$	S_L	S_L
Deformacija (ε)	$S_\varepsilon = \varepsilon_P / \varepsilon_M$	1	1
Trdnost (f)	$S_f = f_P / f_M$	S_L	1
Napetost (σ)	$S_\sigma = \sigma_P / \sigma_M$	S_L	1
Modul elastičnosti (E)	$S_E = S_\sigma / S_\varepsilon$	S_L	1
Specifična masa (γ)	$S_\gamma = \gamma_P / \gamma_M$	1	1
Sila (F)	$S_F = S_\sigma^2 S_f$	S_L^3	S_L^2
Čas (t)	$S_t = S_L \sqrt{S_\gamma S_\varepsilon} / S_f$	$\sqrt{S_L}$	S_L
Frekvenca (ν)	$S_\nu = 1 / S_L$	$1/\sqrt{S_L}$	$1/S_L$
Pomik (d)	$S_d = S_\varepsilon S_\sigma$	S_L	S_L
Hitrost (v)	$S_v = S_\varepsilon \sqrt{S_f / S_\gamma}$	$\sqrt{S_L}$	1
Pospešek (a)	$S_a = S_f / S_L S_\gamma$	1	$1/S_L$

Preglednica 1 • Faktorji merila za popolno in enostavno modelno podobnost

za popolno modeliranje. Če se na primer z
modelnim materialom uspemo približati za-
htevani vrednosti natezne trdnosti zidovja, bo
morda tlačna trdnost ustrezala zahtevanemu
merilu nekoliko manj. Ravno tako je manj
verjetno, da bi hkrati uspeli v zahtevanem
razmerju zmanjšati modul elastičnosti in
strižni modul. Pri zidanih konstrukcijah, kjer
prevladuje strižni mehanizem obnašanja,
bomo poskušali čim doslednejše izpolniti za-
hteve pri veličinah, s katerimi opišemo strižni
mehanizem, pri drugih veličinah pa z mode-
liranjem ne bomo tako uspešni. Tak model
včasih imenujemo popačen model (angleško

»distorted model«). Da bomo vrednosti, iz-
merjene na modelu, preslikali na prototip,
bomo morebitna odstopanja upoštevali tako,
da bomo namesto modelnih meril, ki veljajo
za popolne ali enostavne modele, upoštevali
vrednosti, izračunane s splošnimi enačbami.
V te enačbe – tipične so navedene v pre-
glednici 1 – bomo vstavili dejanska razmerja
med lastnostmi modelnih in prototipnih mate-
rialov.



Slika 9 • Koristno obtežbo predstavljajo jekleni bloki, ki so z vijaki pritrjeni na stropne plošče modela



Slika 10 • Pri enostavnem modelu
zahtevana napetostna razmerja
ustvarimo s prednapetjem zidov.
Silo vnašamo z mehki vzmetmi

Povedali smo že, da pri popolnem modelu oba ključna pogoja za verodostojnost rezultatov modelnih preiskav na potresni mizi izpolnimo tako, da na model dodamo le mase, s katerimi ponazorimo koristno obtežbo stropov. Dodatno maso v obliki betonskih blokov, svinčenih opek ali jeklenih ingotov z vijaki togo pritrđimo na stropne konstrukcije modelov. Če podajnost stropnih konstrukcij pomembno vpliva na dinamični odziv, moramo poskrbeti, da je dodatna masa pritrđena tako, da ne spremeni togosti stropov. Zato raje kot v enem samem kosu maso na strope pritrđimo v več manjših kosih (slika 9). Dodatna masa v drugačni obliki, na primer v obliki svinčenih kroglic ali težkega agregata (peska) v vrečah, ni primerna, saj se zaradi dinamičnih vplivov pri razmeroma visokih frekvencah nihanja zgoščeni agregat v vrečah med preiskavo razrahlja, kar pokvari rezultate meritev.

Pri enostavnih modelih z dodajanjem mase do mere, potrebne, da se izpolni pogoj podobnosti porazdelitve mas in s tem dinamičnega obnašanja, velikost tlačnih napetosti v zidovju navadno še ne doseže vrednosti, ki jo zahteva podobnost porušnega mehanizma.

Če bi potrebni nivo napetosti v zidovih ustvarili z dodajanjem mas, bi porušili podobnost dinamičnega obnašanja. Lastna frekvenca nihanj modela bi se nesorazmerno zmanjšala, s tem pa bi se spremenil tudi njegov odziv na modelirani potres. Če bi nas zanimal odziv konkretne konstrukcije na konkretni potres, bi s takšno modelno preiskavo seveda prišli do napačnih sklepov. Žal so takšne napake precej pogoste.

Koliko se lahko spremenijo lastne nihajne frekvence, če potrebne napetosti v zidovih ustvarimo z dodajanjem mase, tj. koristne obtežbe, bomo prikazali na primeru enostavnega modela, ki smo ga preiskali pred leti (Tomažević in Velechovsky, 1992). Izmerjena lastna frekvenca modela z masami, ki zagotavljajo podobnost dinamičnega obnašanja, je bila $v_M = 13,81$ Hz, z računom ocenjena vrednost pa $v_M = 13,43$ Hz. Če z istim računskim modelom izračunamo lastno frekvenco prototipa, dobimo $v_p = 2,64$ Hz, kar ustreza zahtevi $v_M = v_p S_L$ (model je bil izdelan v merilu 1 : 5). Če pa na strope modela pritrđimo toliko mase, da bodo tudi tlačne napetosti ustrezale zahtevanemu razmerju, se z

istim računskim modelom izračunana lastna frekvenca modela zmanjša na $v_M = 7,47$ Hz. Lastna frekvenca prototipne stavbe bi bila v tem primeru $v_p = 1,48$ Hz, torej skoraj dvakrat manjša, kot bi morala biti, kar seveda ne bi bilo zanemarljivo in bi vplivalo na interpretacijo dinamičnega odziva modela glede na prototip.

Zato moramo pri enostavnih modelih napetosti v zidovih povečati tako, da s tem ne vplivamo na dinamične lastnosti modela. Kot najučinkovitejša metoda se je izkazalo zunanje prednapetje zidov z jeklenimi pletenimi vrvmi, ki so sidrane v temelj, na vrhu modela pa do zahtevane sile prednapete. Da se zaradi spremembe položaja med nihanjem modela med preiskavo in vrhov ne bi ustvarile dodatne sile, silo v vrhov vzdržujejo mehke vzmeti (slika 10). Preiskave in izračuni so pokazali, da prednapetje praktično ne vpliva na dinamični odziv modelov. Ravno tako so zaradi nagiba vrvi nastale vodoravne komponente sile prednapetja zanemarljivo majhne v primerjavi s prečnimi silami, nastalimi v modelu med odzivom na potres (Tomažević in Velechovsky, 1992).

3 • POTRESNA MIZA

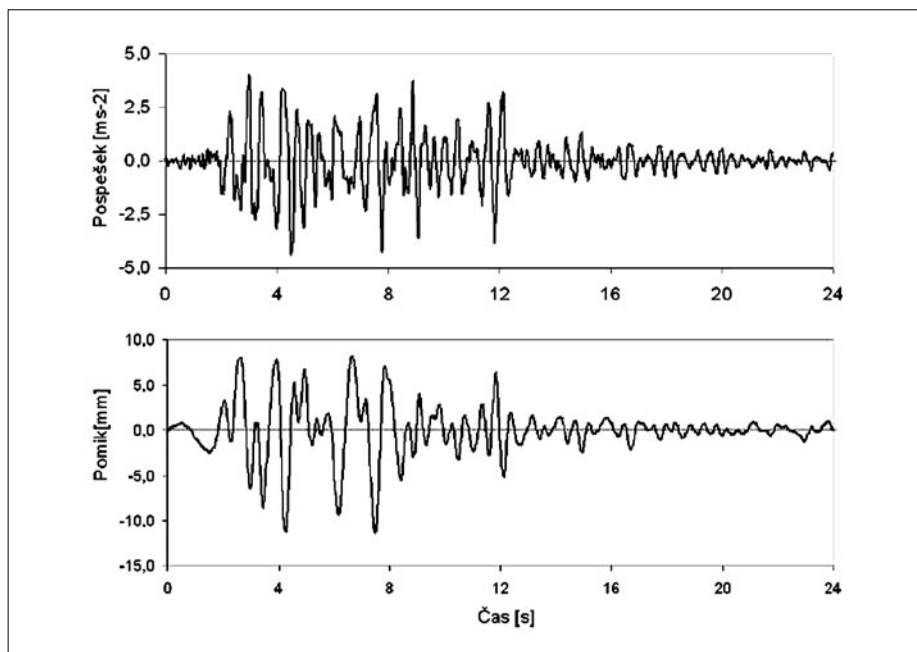
Ideja, da se za simulacijo potresnega gibanja tal lahko koristno uporabijo tudi enosmerno delujoče enostavne potresne mize, ki jih poganja večnamenska preizkuševalna oprema, je osnovana na razmišljanjih, predstavljenih v nadaljevanju.

Čeprav je dejansko gibanje tal med potresom prostorsko, njegove navpične komponente nimajo pomembnejšega vpliva na obnašanje običajnih konstrukcij pravilne zasnove, kot so zidane konstrukcije. Tudi načela potresno-odpornega projektiranja dopuščajo, da se pravilne konstrukcije preverijo na delovanje vodoravne projektne potresne obtežbe v vsaki glavni smeri posebej. Zato lahko večino podatkov, pomembnih za obnašanje konstrukcije pri potresu, dobimo že tako, da preiščemo obnašanje konstrukcije pri simulirani obtežbi, ki deluje le v eni od obeh glavnih smeri ali pa poševno nanju.

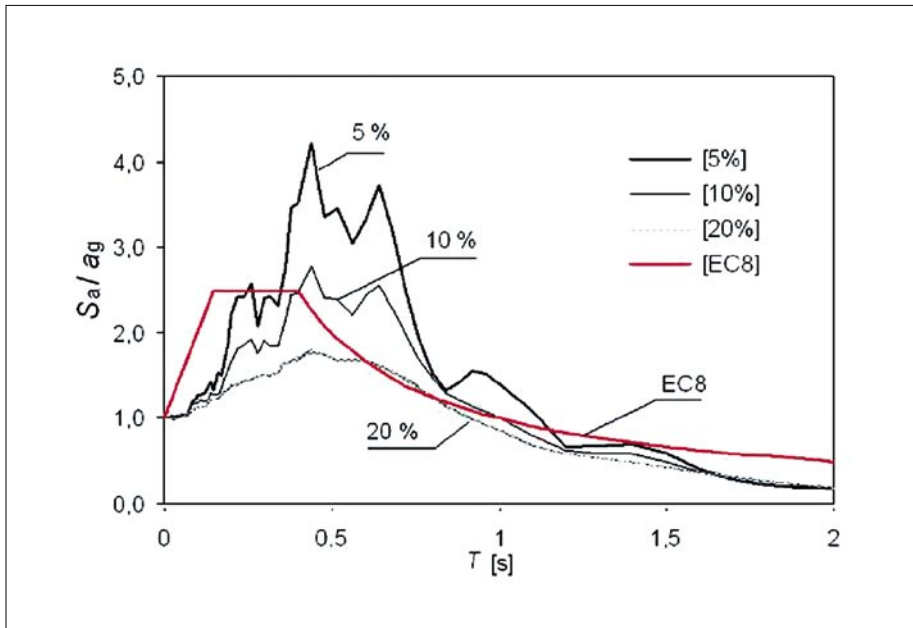
Potresno gibanje tal je stohastični pojav, katerega lastnosti so odvisne od žariščnega mehanizma, lastnosti zemeljske skorje, skozi katero se širi seizmično valovanje in ne nazadnje od lastnosti temeljnih tal, na katerih stoji opazovana konstrukcija. Kot deterministični

pojav, kakršnega upoštevamo v naših dinamičnih analizah, se privzeti potres ne bo nikoli

več dogodil. Zato niti ne bi bilo treba, da bi znali že zabeleženo potresno gibanje tal z našimi preizkuševalnimi napravami popolnoma natančno ponazoriti. To je bolj izziv za načrtovalce teh naprav, za uporabnike rezultatov preiskav pa ni ključnega pomena. Za upo-



Slika 11 • Močni del zapisa pospeškov tal N-S komponente potresa 15. 4. 1979 v Petrovcu, Črna gora, in izračunani časovni potek pomikov tal

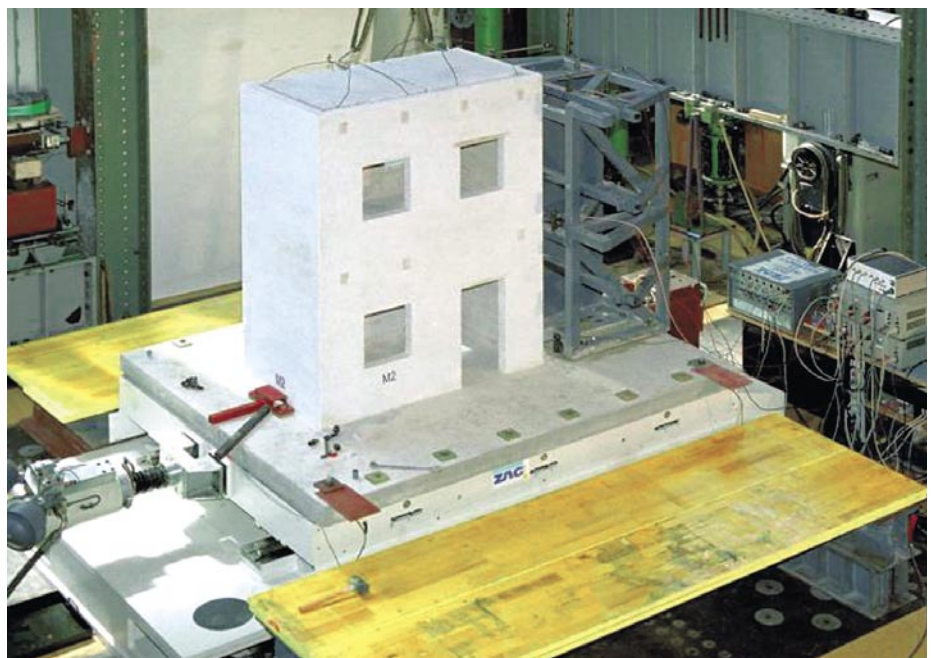


Slika 12 • Primerjava elastičnega spektra odziva po Evrokodu 8 za koeficient tal $S = 1,0$ s spektrom odziva pospeškov črnogorskega potresa za 5 %, 10 % in 20 % kritičnega dušenja

rabnike je pomembno, da vemo, s kakšnim gibanjem smo vzbudili nihanje konstrukcije, ki jo preizkušamo. Seveda mora imeti gibanje potresne mize ključne značilnosti potresnega gibanja tal. Kar se tiče odziva na potres in ne na kakršno koli dinamično vzbujanje (npr. na vzbujanje s sinusnim nihanjem), dobimo verodostojne rezultate, če so simulatorji potresa sposobni v statističnem smislu ponazoriti značilnost dejanskega gibanja tal med potresom v časovni in frekvenčni domeni. Toliko boljše seveda, če jih lahko natančno krmilimo. Kako izbrati potres, ki ga uporabimo za krmiljenje potresne mize? Navadno izberemo kar eno od registracij rušilnih potresov, ki so prizadeli podobne prototipne stavbe, katerih obnašanje raziskujemo. Kot kriterij za izbiro lahko privzamemo tudi podobnost spektra odziva potresa s projektnim spektrom, ki ga najdemo v predpisih za projektiranje potresno-odpornih konstrukcij, na primer v Evrokodu 8. Potres, s katerim bomo krmilili potresno mizo, lahko tudi umetno generiramo. Pri tem navadno osnovne značilnosti umetnega potresa izberemo tako, da se bo njegov spekter odziva ujemal s projektnim spektrom, ki ga dobimo v predpisih.

Na Zavodu za gradbeništvo Slovenije že dalj časa kot eno od primernih registracij za preiskavo modelov zidanih konstrukcij na potresni mizi uporabljamo 24 sekund trajajoči zapis močne faze N-S komponente črnogorskega potresa iz leta 1979 (registracija potresa:

15. 4. 1979 v Petrovcu), z maksimalnim izmerjenim pospeškom v velikosti 0,43 g (slika 11). Zapis potresa sicer traja 48 s, vendar smo za krmiljenje potresne mize odrezali tisti del zapisa, kjer nihanje tal po naši oceni ne bi več pomembno vplivalo na odziv zidanih konstrukcij. Uporabljamo le del registracije v času od 3,5 s do 27,5 s.



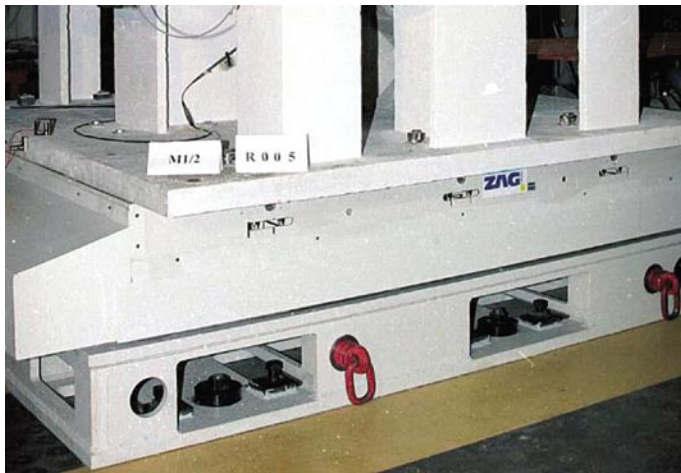
Slika 13 • Pogled na potresno mizo ZAG med preiskavo modela zidane stavbe; armiranobetonska temeljna plošča, na kateri je sezidan model, je z vijaki pritrjena na potresno mizo; ob mizi je postavljen lesen oder za lažje opazovanje modela

Kot prikazuje slika 12, se spekter odziva za pisa pospeškov gibanja tal med črnogorskim potresom, ki ga uporabljamo za krmiljenje potresne mize med preiskavo modelov, pri 5 % kritičnega dušenja ne ujema najbolje z elastičnim spektrom odziva po Evrokodu 8 za trdna tla. Območje največjega ojačenja, ki je pri 5 % kritičnega dušenja večje kot predpostavlja Evrokodov elastični spekter odziva, leži poleg tega v območju daljših lastnih nihajnih časov (nižjih lastnih frekvenc nihanja). Da bi se med preiskavo na potresni mizi njihovi časi, ki so značilni za zidane konstrukcije, ujeli z območjem največjega ojačenja, čas trajanja prototipnega potresa včasih namenoma skrajšamo. Zato se izogibamo primerjavam s črnogorskim potresom, saj je modelirani potres, preslikan v naravno velikost, največkrat podoben črnogorskemu samo po obliki zapisa pospeškov in maksimalnih pospeških, ne pa tudi glede na ostale parametre.

3.1 Opis naprave

Potresna miza, ki jo uporabljamo na Zavodu za gradbeništvo Slovenije (slika 13), je enostavna naprava, ki omogoča simulacijo potresnega gibanja tal v eni sami smeri. Sestavlja jo trije glavni sklopi:

- mehanski sklop, sestavljen iz v eni smeri gibljive mize, na katero pritrđimo model oziroma temeljno ploščo, na kateri sezidamo model, in podstavka, ki ga pritrđimo na



Slika 14 • Potresna miza na ZAG: pritrditev spodnje plošče na preizkuševalno ploščad; temeljna plošča modela sega čez potresno mizo



Slika 15 • Potresna miza na ZAG s programskim hidravličnim batom za pogon mize; vidi se tudi eno od drsnih vodil

laboratorijsko preizkuševalno ploščad in po katerem drsi miza,

- hidravlični pogonski sklop, ki premika mizo po poljubnem programu in ga sestavljata dvosmerno delujoči programski hidravlični bat s servoventilom in hidravlična črpalka,
- elektronski krmilni sklop, s katerim programiramo in kontroliramo časovni potek premikov mize.

Za uspešno preiskavo seveda potrebujemo tudi sklop merilnikov različnih dinamičnih in drugih fizikalnih veličin in merilnega sistema, s katerim izmerjene podatke neprekinjeno zajemamo, beležimo in spremenimo v obliko, primerno za analizo (angleško »data acquisition«, »data processing«).

Glede na to, da delovne razmere v laboratoriju ne dopuščajo, da bi bila miza fiksna, je bila zasnovana kot sestavljiva naprava. Podstavek, temeljni del mize, je toga jeklena škatlasta konstrukcija, ki se z vijaki pritrdi na laboratorijsko armiranobetonsko preizkuševalno ploščad (slika 14). Na zgornji strani ima pritrdjena vodila, po katerih drsi gibljivi del naprave, potresna miza. Vodila so izdelana tako, da omogočajo natančno mehansko vodenje mize v vzdolžni smeri in ne dopuščajo nagibov in pomikov v ostalih smereh. Da bi bilo trenje v vodilih čim manjše, so drsni ležaji teflonski. Potresna miza je ravno tako toga, jeklena, z rebri ojačena škatlasta konstrukcija velikosti 2,5 m x 2,0 m, ki ima v zgornji jekleni plošči vrezane luknje z navoji za pritrditev temeljne plošče modela. Ta je navadno izdelana iz armiranega betona. Luknje so razporejene enakomerno po celotni zgornji površini mize, tako da se način pritrditve temeljne plošče modela lahko

prilagodi njegovi velikosti in florisni zasnovi. Zaradi potrebne togosti, ki jo mora imeti za obvladovanje vpetosti modelov, premični del potresne mize ni lahek in predstavlja pomemben delež koristne mase, ki jo mora premikati hidravlični bat med simulacijo potresa z zahtevanimi dinamičnimi karakteristikami. Mizo je po naših idejnih rešitvah projektiralo in izdelalo podjetje Unior, d. d., Program strojna oprema, iz Zreč.

Drugi sklop naprave je programski, dvosmerno delujoči hidravlični bat s servoventilom in hidravličnim agregatom (črpalko), ki premika potresno mizo. Bat je na eni strani vpet v jekleno oporno steno, na drugi pa se s posebnim vmesnim delom pritrdi na gibljivo ploščad (slika 15). Krmili ga računalniško vodeni krmilni sistem.

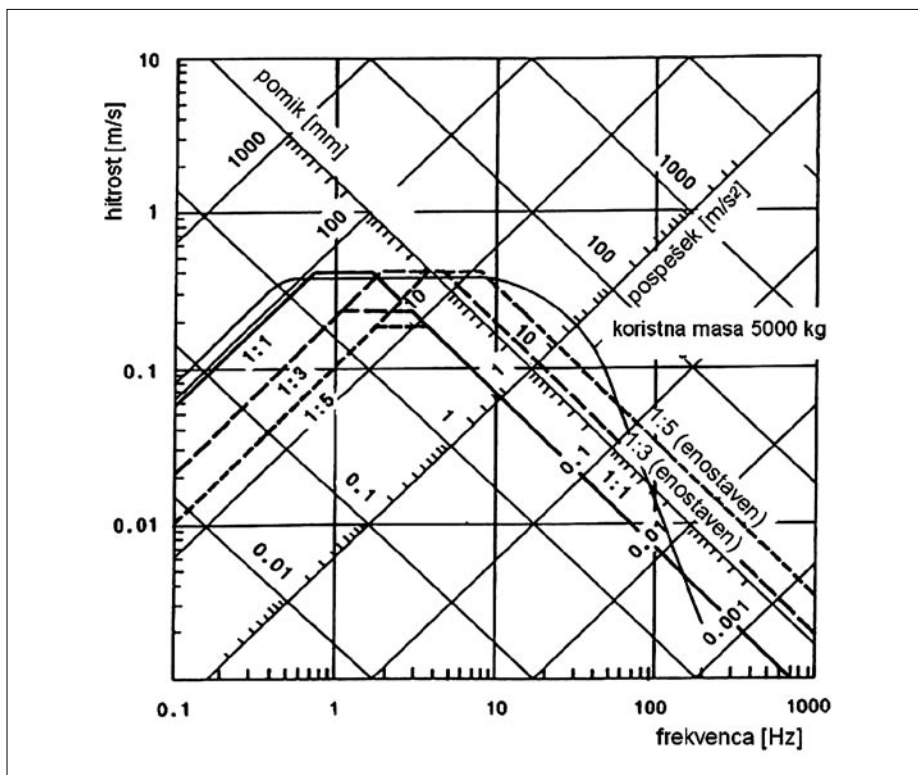
3.2 Zahteve in zmogljivosti

Zahteve, ki jih mora izpolnjevati naprava za simulacijo potresnega gibanja tal, so odvisne od fizikalnih modelov stavb, ki jih preizkušamo

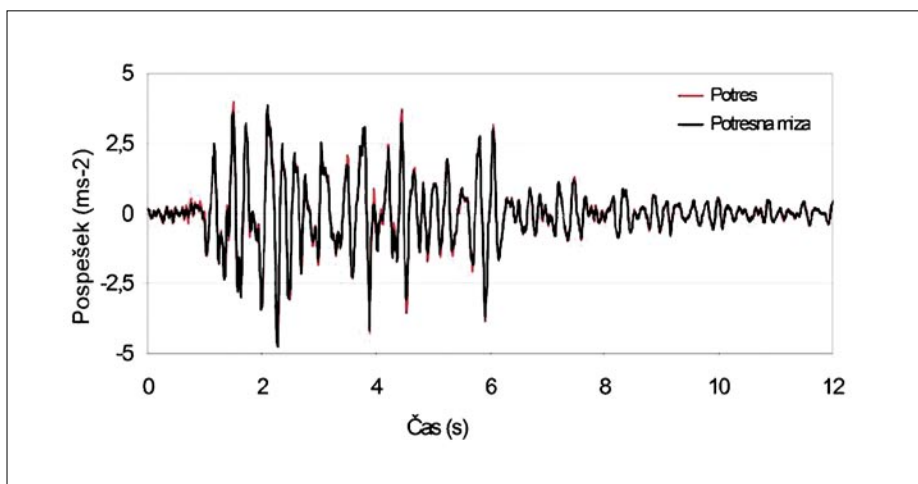
na mizi. Odvisne so od merila, v katerem je izdelan model, od vrste modela oziroma od načina, kako smo prototip modelirali (popolni model na eni in enostavni model na drugi strani), in seveda tudi od velikosti modela oziroma koristne mase, ki jo mora spraviti v gibanje naprava, tj. seštevka mas potresne mize, temeljne plošče modela in modela samega. Osnovne zahteve dobimo kar s primerjavo dinamičnih lastnosti tipičnih potresov oziroma spektrov odziva potresov in faktorji modeliranja, ki jih najdemo v preglednici 1. Če predpostavimo, da je čas trajanja potresa v povprečju 30 s, da leži frekvenčno območje tipičnega spektra odziva potresa, v katerem je vpliv potresa na konstrukcijo še pomemben, med 25 Hz in 0,25 Hz (nihajni časi med 0,04 s in 4 s, glej spekter odziva po Evrokodu 8 na sliki 12), in da se največji pospeški potresov gibljejo okrog 0,5 g, potem zahtev ni težko preslikati na model. Za posamezno vrsto modelne podobnosti in tipična merila so zahteve navedene v preglednici 2.

Merilo	Vrsta modela	Čas	Frekvenca	Pospešek	Pomik
Prototip		30 s	25 Hz–0,25 Hz	0,5 g	50 mm
1 : 3	popoln enostaven	17,3 s	43,3 Hz–0,43 Hz	0,5 g	16,7 mm
		10,0 s	75 Hz–0,75 Hz	1,5 g	16,7 mm
1 : 4	popoln enostaven	15,0 s	50 Hz–0,50 Hz	0,5 g	12,5 mm
		7,5 s	100 Hz–1,00 Hz	2,0 g	12,5 mm
1 : 5	popoln enostaven	13,4 s	55,9 Hz–0,56 Hz	0,5 g	10 mm
		6,0 s	125 Hz–1,25 Hz	2,5 g	10 mm

Preglednica 2 • Zahtevane dinamične lastnosti potresne mize pri preiskavah popolnih in enostavnih modelov



Slika 16 • Primerjava dinamičnih zmogljivosti hidravličnega sistema za pogon potresne mize z batom 160 kN in koristno maso 5000 kg z zahtevami pri različnih merilih modeliranja



Slika 17 • Primerjava med akcelerogramom črnogorskega potresa, uporabljenim za izračun pomikov za krmiljenje potresne mize (rdeče), in izmerjenimi vrednostmi pospeškov na potresi mizi (črno); popoln model, merilo 1 : 4, masa 3000 kg

Na zavodu uporabljamo za pogon potresne mize programska hidravlična bata znamke Schenck statične zmogljivosti 160 kN oziroma 250 kN in s hodom ± 125 mm oziroma ± 200 mm. Šibkejši bat potrebuje za simulacijo enakega gibanja tal manjši pretok olja kot močnejši bat, zato ga lahko krmilimo natančneje. Ker se masa modelov, ki jih po dimenzijah še lahko postavimo na potresno

mizo, giblje v območju zmogljivosti bata, zadošča pa tudi razpoložljivi hod ± 125 mm, navadno za pogon mize uporabljamo bat s statično zmogljivostjo 160 kN. Razpoložljiva moč dveh hidravličnih agregatov – črpalk, ki se lahko med seboj tudi povežeta in pri delovnem tlaku 280 barov zagotavljata pretok olja do 245 l/min., je 140 kW. To je dovolj, da hidravlični sistem poganja s pospeški

do velikosti 5 g koristno maso do velikosti 5000 kg.

Zmogljivost sistema z batom 160 kN je prikazana na sliki 16 pri pogoju, da mora bat premikati koristno maso v velikosti 5000 kg. Kot je videti, naprava izpolnjuje pogoje za preiskave popolnih modelov tudi pri merilu 1 : 5, medtem ko med preiskavo enostavnih modelov pri višjih frekvencah in visokih pospeških že lahko pride do popačenja želenega gibanja tal. Tipično ujemanje med akcelerogramom potresa, uporabljenim za izračun pomikov za krmiljenje potresne mize, in izmerjenimi vrednostmi pospeškov na potresi mizi med preiskavo popolnega modela, izdelanega v merilu 1 : 4, prikazuje slika 17. Vhodni akcelerogram (želena vrednosti) in dejanski časovni odziv mize pri popolnem modeliranju se zelo dobro ujemata med seboj. Do popačenja pride šele potem, ko se intenziteta modeliranega potresa močno poveča in preseže intenziteto prototipnega potresa za več kot dva- do trikrat.

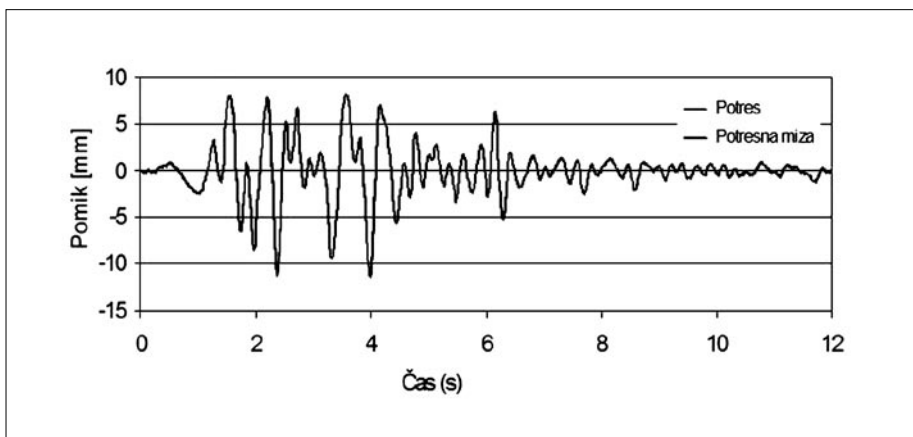
Tudi medsebojna primerjava drugih parametrov, s katerimi se opiše potresno gibanje tal, kot so Ariasova intenziteta (Arias, 1970), spektri odziva, vhodna energija in podobno, kaže, da s potresno mizo dosežemo zadovoljivo ujemanje značilnosti gibanja potresne mize z značilnostmi prototipnega, vhodnega potresa. Primerjava med maksimalnimi pospeški in pomiki potresne mize, Ariasovo intenziteto in vhodno energijo je prikazana v preglednici 3 za primer, ko smo črnogorski potres modelirali za preiskavo popolnega modela v merilu 1 : 4, celotna gibajoča se masa pa je bila približno 3000 kg. Vrednosti so primerjane za vsako posamezno fazo preiskave posebej (glej naslednje poglavje), korelacija med modeliranim vhodnim potresom in dejanskim gibanjem potresne mize pa je zadovoljiva celo takrat, ko intenziteta vzbujanja preseže intenziteto modeliranega prototipnega potresa za dva- do trikrat. Čeprav pri ekstremnih povečanih intenzitete pride po popačenja vršnih vrednosti pospeškov in zato tudi do sprememb razmerij med Ariasovo intenziteto in vhodno energijo, gibanje potresne mize zadrži osnovne značilnosti vhodnega, prototipnega potresa.

3.3 Krmiljenje potresne mize in potek preiskave

Čeprav je kontrolni sistem za pogon programskih hidravličnih batov prirejen bodisi za krmiljenje sil bodisi pomiki, se je izkazalo, da je krmiljenje batov s pomiki v dinamičnih pogojih precej enostavnejše kot krmiljenje s silami oziroma pospeški (sila = masa \cdot pospešek).

Faza	a_{\max} (g)	$\frac{a_{\max,Ri}}{a_{\max,R100}}$	d_{\max} (mm)	$\frac{d_{\max,Ri}}{d_{\max,R100}}$	I_A (m/s)	$\frac{I_{A,Ri}}{I_{A,R100}}$	E_{inp} (Nm)	$\frac{E_{\text{inp,Ri}}}{E_{\text{inp,R100}}}$
R005	0,027	0,06	0,600	0,05	0,0051	0,00	0,8	0,00
R025	0,109	0,23	2,854	0,25	0,1380	0,06	20,4	0,06
R050	0,239	0,49	5,660	0,50	0,5437	0,25	81,6	0,26
R075	0,380	0,79	8,509	0,75	1,2221	0,56	180,1	0,57
R100	0,483	1,00	11,322	1,00	2,1638	1,00	318,0	1,00
R150	0,727	1,51	17,034	1,50	4,8413	2,24	711,6	2,23
R200	1,015	2,10	22,721	2,00	8,5955	3,97	1259,2	3,96
R300	2,682	5,55	34,002	3,00	21,6463	10,00	2658,8	8,36
R350	3,555	7,36	39,492	3,49	30,7944	14,23	3411,1	10,72

Preglednica 3 • Primerjava med maksimalnimi pospeški, a_{\max} in pomiki potresne mize, d_{\max} Ariasovo intenziteto, I_A , in vhodno energijo, E_{inp} , potresne mize v posameznih fazah preiskave popolnega modela v merilu 1 : 4



Slika 18 • Primerjava med izračunanimi pomiki črnogorskega potresa, s katerimi krmilimo potresno mizo (rdeče), in izmerjenimi pomiki potresne mize (črno); popoln model, merilo 1 : 4, masa 3000 kg

Krmiljenje s silami oziroma pospeški bi v dinamičnih pogojih zahtevalo vsakokrat posebej upoštevanje interakcije med potresno mizo in preiskovanega modela.

Med potresom se beleži časovni potek pospeškov tal. Ker neposredno zapisanih informacij o poteku hitrosti in pomikov gibanja tal ni, časovni potek pospeškov tal za hitrosti enkrat, za izračun pomikov pa dvakrat integriramo. Postopek numerično ni zapleten, vendar je treba pri računu upoštevati celo vrsto parametrov, od lastnosti instrumentov – akcelero metrov, t.i. prenosno funkcijo, načina, kako interpoliramo vrednosti digitaliziranih podatkov, če niso zapisane v enakih časovnih intervalih oziroma če so ti predolgi, do napak, ki nastanejo zaradi izbrane metode integracije in nepoznatih začetnih pogojev. V našem primeru, ko so vrednosti pospeškov

zapisane v enakih časovnih intervalih, dolgih 0,02 s, smo za integracijo uporabili trapezno metodo, napake zaradi začetnih pogojev pa korigirali z enostavno linearno korekcijo osnovne linije. Slika 18 prikazuje časovni potek pomikov gibanja potresne mize, ki odgovarja časovnemu poteku črnogorskega potresa, modeliranega za preiskavo popolnega modela v merilu 1 : 4. Seveda je ujemanje med želenimi in dejanskimi pomiki še boljše kot ujemanje pospeškov, skoraj popolno.

Da bi med preiskavo dobili čim večje število pomembnih podatkov, se tudi na zavodu držimo nenapisanega pravila, da model preiščemo z nizom zaporednih vzburjanj, ki jim postopoma povečujemo intenziteto, med posameznimi fazami preiskave pa ugotavljamo, kako se spreminjajo stanje modela in njegove dinamične lastnosti. Faze navadno

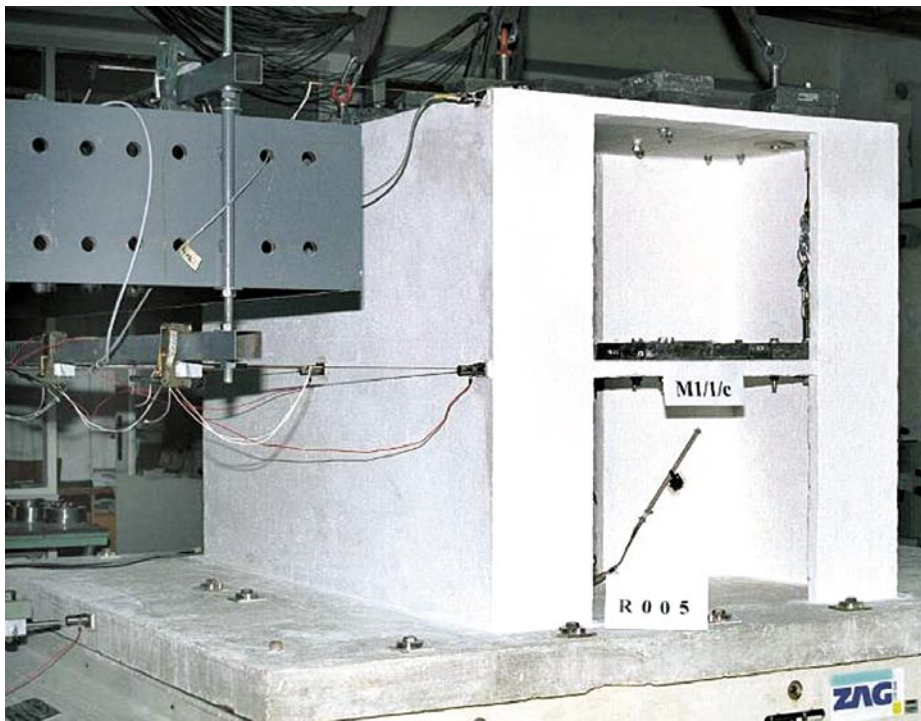
označujemo s številkami, ki pomenijo odstotke polne intenzitete prototipnega potresa. Faza z oznako R100 tako pri nas pomeni, da je bil model preiskan s potresom, ki je na modelu pustil enake posledice, kot bi jih na njegovem prototipu pustil npr. črnogorski potres. Oznaka R200 pomeni, da je bilo vzbujanje dvakrat močnejše, oznaka R50 pa, da je bilo vzbujanje za polovico šibkejše.

Ker je proces krmiljenja zelo natančen, pospeški v območju zmogljivosti hidravličnega bata naraščajo premo sorazmerno s povečanjem krmilnih pomikov. Ravno tako naraščajo vsi ostali parametri, vključno z amplitudami spektrov odziva. Podatki v preglednici 3 kažejo, da je v analiziranem primeru do popačenja prišlo šele takrat, ko so pospeški potresne mize več kot trikrat presegli vrednosti prototipnega potresa.

Med posameznimi fazami vzbujanja s potresno mizo izmerimo tudi spremembo dinamičnih lastnosti preiskovanega modela. Preiskava je enostavna: z udarcem s posebnim kladivom vzbudimo nihanje modela, z analizo zapisanega iznihanja pa ugotovimo lastne frekvence nihanja in dušenja. S Fourierovo analizo časovnega poteka odziva modela med samim vzbujanjem lahko ugotovimo (analiziramo posamezne, med seboj prekrivajoče se dele odziva – okna), da se lastna frekvenca nihanja modela spreminja tudi med samim odzivom.

3.4 Meritve, zajemanje in obdelava podatkov

Dinamične veličine, s katerimi opišemo nihanje konstrukcije med potresom in ki jih merimo med preiskavo na potresni mizi, so predvsem pospeški in pomiki. Včasih nas zanima, kako se med nihanjem spreminjajo deformacije materialov v prerezi, kritičnih za obnašanje konstrukcije in za nastanek porušnih mehanizmov (zidovje, armatura in zalivni beton), včasih nas zanimajo tudi druge fizikalne veličine oziroma nas zanima, kako se obnašajo elementi za utrditev, ki jih vgradimo za izboljšanje obnašanja konstrukcije med potresom (vezi, izolatorji ipd.). Ne glede na to, da nam sodobna merilna tehnika omogoča, da ni treba več skopariti z merilniki, moramo skrbno premisliti, kam jih pritruditi, da bodo čim dlje delovali. Čeprav so razmeroma poceni, pa večino merilnikov pred pričakovano porušitvijo odstranimo z modela, da se pri padcu modela ne bi preveč poškodovali ali celo uničili. Medtem ko večino merilnikov pritrudimo na model, pri čemer pazimo, da so mesta, kjer jih pritrudimo, čim manj izpostavljeni

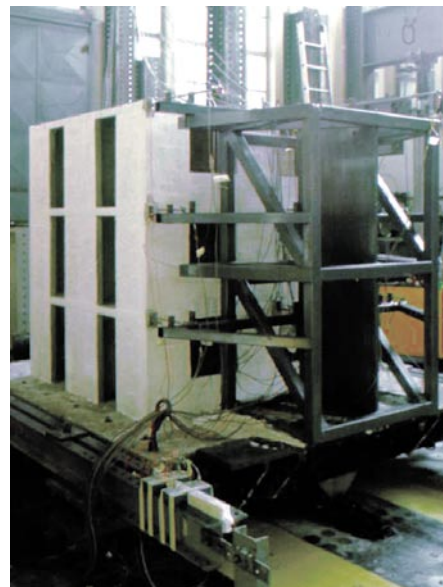


Slika 19 • Model med preiskavo na potresni mizi. Ogrodje za namestitve merilnikov je pritrjeno zunaj mize; merijo se absolutni pomiki modela

možnosti nastanka poškodb, merilnike pomikov pritrđimo na posebno konstrukcijo. Ta je lahko postavljena izven območja vpliva potresne mize, tako da merimo absolutne pomike modela, od katerih v vsakem trenutku odštejemo pomik potresne mize (slika 19). Konstrukcijo za namestitve merilnikov pomika lahko pritrđimo tudi na potresno mizo in merimo pomike modela glede na potresno mizo (slika 20). Konstrukcija za namestitve merilnikov mora biti v tem primeru

izredno toga, saj njen odziv ne sme pokvariti meritev. Izkazalo se je, da mora biti njena lastna frekvenca vsaj 100- do 200-krat višja od lastne frekvence modela, sicer so z vrednotenjem rezultatov meritev težave. Medtem ko z laserskimi merilniki ni treba vzpostaviti neposredne povezave z modelom, imajo vsi ostali merilniki pomikov tipala pritrđena na model.

Posebni sistemi za zajemanje podatkov skrbijo, da se električni signali, ki jih oddajajo



Slika 20 • Model med preiskavo na potresni mizi; ogrodje za namestitve merilnikov je pritrđeno na mizo; merijo se relativni pomiki modela glede na temelj

merilniki, ustrezno ojačijo in z veliko hitrostjo v pravilnem vrstnem redu zapišejo v spomin. Sodobni merilni sistemi in krmilni računalniki so sposobni obdelati izredno veliko število podatkov. Če je bilo včasih treba zelo premisliti, kam namestiti morda le deset razpoložljivih merilnikov, da bodo meritve kolikor toliko dobro opisale obnašanje modela, je danes vprašanje, kako obdelati množico izmerjenih podatkov oziroma kako izločiti nepotrebne meritve.

4 • TIPIČNI PRIMERI

Na Zavodu za gradbeništvo Slovenije smo na potresni mizi preiskali že lepo število modelov zidanih stavb in raziskali že marsikatero lastnost, ki vpliva na obnašanje zidanih konstrukcij pri potresni obtežbi. Kaj raziskujemo na modelih in kako analiziramo podatke meritev, bomo poskusili opisati na nekaterih značilnih primerih, ki jih bomo predstavili v nadaljevanju. Da bi prikazali njihovo uporabno vrednost, bomo tudi pokazali, da so rezultati modelnih preiskav lahko podlaga za ustrezne sklepe celo takrat, ko ne izpolnimo v celoti vseh pravil modeliranja. Le interpretirati jih moramo na pravilen način.

4.1 Vpliv zidnih vezi

Analiza poškodb starih zidanih stavb po potresih pokaže, da je treba za ustrezno obnašanje stavb med potresi zagotoviti celovitost konstrukcije in skupno delovanje vseh nosilnih elementov. Da bi raziskali, kako delujejo naknadno vgrajene zidne vezi, smo na potresni mizi preiskali dve seriji modelov kamnitih in opečnih zidanih hiš z lesenimi stropi. Modeli, ki smo jih sezidali kot popolne modele v merilu 1 : 4, so predstavljali enostavne enoprostorske, dvoetažne hiše, ki so imeli v zidovih, ki so stali pravokotno na smer delovanja potresa, okenske in vratne odprtine.

Da bi raziskali mehanizem delovanja vezi, smo v vsaki seriji najprej preiskali referenčni model z lesenimi stropi brez vezi, nato pa še po dva modela, od katerih je imel eden zidove, povezane z vezmi, drugi pa namesto vezi in lesenih stropov armiranobetonske plošče (Tomažević in sod., 1992).

Za izdelavo modelov kamnitih hiš smo uporabili kar naravni kamen, odvzet iz dejanske hiše, ki smo ga zdrobili na primerno majhne kose, primerne mehanske lastnosti zidovja pa smo dosegli s prilagojeno sestavo malte (glej sliko 6b). Modele opečnih hiš smo sezidali iz opek, ki smo jih ulili iz malte ustrezne sestave. Za jeklene vezi, ki smo jih vgradili enako kot v prototipnih hišah in jih sidrali s podložnimi ploščami v vogalih, pa smo uporabili žgano žico, ki smo ji ustrezno zmanjšali premer.



Slika 21 • Črna gora, 1979: porušitev kamnite hiše z nepovezanim zidovjem

Zidne vezi smo opremili z merilnimi lističi, saj je bil cilj raziskave ugotoviti, kaj se med potresom dogaja v vezeh.

Ugotovili smo, da leseni stropi, ki niso sidrani v zidovje, ne morejo preprečiti ločevanja zidov, zaradi česar lahko pride do porušitve zgornjih nadstropij (sliki 21 in 22). Če pa zidove povežemo z jeklenimi vezmi, se stavba odzove na potres kot celovita konstrukcija, čeprav lesenih stropov ne zamenjamo s togimi armiranobetonskimi diafragmami (slika



Slika 22 • Mehanizem porušitve modela kamnite hiše z nepovezanim zidovjem

23). Rezultati raziskav so dali tudi podatke za dimenzioniranje jeklenih zidnih vezi. Med preiskavo smo merili deformacije zidnih vezi (slika 24). Ugotovili smo, da pri nihanju zidu pravokotno na ravnino lahko uporabimo analogijo z armiranobetonsko zidno vezjo (upogib) in profil zidne vezi izračunamo na podlagi predpostavke, da se med nihanjem ustvari armiran upogibni nosilec, katerega statična višina je enaka debelini zidu, obremenitev pa predstavljajo enakomerno po-

razdeljene vztrajnostne sile, ki nastanejo v višini stropa, kjer leži vez. Za oceno obtežbe upoštevamo pospešek v višini stropa in pripadajočo maso zidu (polovico višine etaže pod vezjo in polovico nad njo).

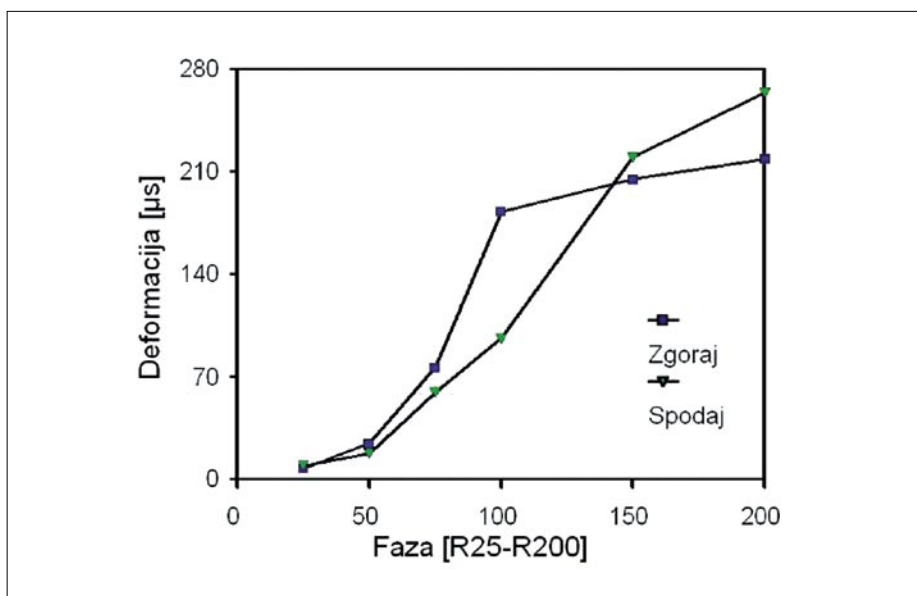
Če vez povezuje zidove v ravnini delovanja potresa, jo dimenzioniramo na podlagi predpostavke, da se v končnem mejnem stanju ustvari mehanizem paličja, kjer končno prečno silo, ki nastane pri doseženi strižni nosilnosti dela povezanega dela stavbe, prevzame vez. Meritve deformacij v zidnih vezeh med preiskavo modelov na potresni mizi (slika 24) so namreč pokazale, da v vezeh nastane sila, enaka prečni sili v nadstropju nad vezmi v trenutku, ko doseže zidovje svojo strižno odpornost.

4.2 Potresna izolacija in povezovanje z laminatnimi trakovi CFRP

Pred nedavnim smo poročali o raziskavah možnosti zamenjave običajnih jeklenih vezi s trakovi iz s karbonskimi vlakni ojačenih polimernih laminatov (CFRP) in o možnosti, če se da s potresno izolacijo nadomestiti običajne posege v konstrukcijo (Tomažević in sod., 2008). Preiskali smo pet po zasnovi enakih modelov dvonadstropne opečne hiše z lesenimi stropi brez zidnih vezi, izdelanih v merilu 1 : 4, ki so bili na preiskavo pripravljeni na različne načine: Medtem ko je bil referenčni model sezidan neposredno na temeljno ploščo, sta bila dva modela od nje ločena, prvi z vlagozapornim slojem v obliki polietilenske folije, vložene med drugo in tretjo



Slika 23 • Mehanizem porušitve modela kamnite hiše s povezanim zidovjem



Slika 24 • Deformacije v vzdolžnih jeklenih zidnih vezeh povezanega modela, izmerjene v posameznih fazah preiskave

vrsto zidakov, drugi pa s potresnimi izolatorji, vloženi med temeljno ploščo in nosilnim zidovjem. V nadaljevanju raziskave smo četrti in peti model utrdili s trakovi CFRP, s katerimi smo ponazorili navpične in vodoravne zidne vezi in utrdili zidovje. Četrti model je bil sezidan neposredno na temeljni plošči, medtem ko je bil peti s potresnimi izolatorji ločen od nje. Ker bi pri izdelavi popolnih modelov z modeliranjem lastnosti polimernih laminatov in vlagozapornega sloja naleteli na težko premostljive težave, smo izdelali modelne materiale, katerih mehanske lastnosti so se gibale v okviru razpona vrednosti, ki smo jih s preiskavami ugotovili na zidovju starih opečnih stavb. Tako smo v modelih ustvarili podobna razmerja med lastnostmi laminatov, lepil, zidovja in drugih uporabljenih materialov, kot v pravi konstrukciji. Prototipno konstrukcijo smo ponazorili z enostavnim modelom. Mehanske lastnosti prototipnega in modelnega zidovja so primerjane v preglednici 4.

Kot smo že povedali, sta za zagotavljanje podobnosti dinamičnega obnašanja in porušnega mehanizma med modelom in prototipom ključni dve zahtevi: podobna porazdelitev mas in togosti po višini prototipa in modela in podobno razmerje med napetostmi v zidovih in tlačno oziroma natezno trdnostjo zidovja. Ker v danem primeru nismo preiskovali popolnih, pač pa enostavne modele, smo se morali prepričati, če so potrebni dodatni ukrepi za zagotavljanje teh zahtev. Pri tipičnih opečnih stavbah s podobnim razstojem med zidovi kot pri preiskanih modelih, se vrednosti razmerja med maso stropov in pripadajočo maso zidov gibljejo v območju 1 : 2,5–1 : 3. Pri preiskanih modelih je bilo to razmerje 1 : 4,1 v prvem in 1 : 2,1 v drugem nadstropju.

Po oceni se gibljejo tipične vrednosti tlačnih napetosti v zidovju pri dvonadstropnih opečnih stavbah v območju 0,12 MPa–0,15 MPa, kar pomeni širok razpon 1,2 %–10 % pričakovanih vrednosti tlačne trdnosti zidovja. Vrednosti so odvisne od teže stropov, etažne višine in razstoja med zidovi. V obravnavanem primeru so bile tlačne napetosti na spodnji meji pričakovanega območja, tj. 0,12 MPa, kar pomeni 2 % tlačne trdnosti modelnega zidovja. Čeprav je vrednost na spodnji meji, je razmerje med dejansko tlačno napetostjo in trdnostjo zidovja še vedno v pričakovanem območju. Zato lahko sklepamo, da bodo ne glede na to, da smo brez posebnih dodatnih ukrepov preiskali enostavne modele, izpolnjeni vsi pogoji za doseganje podobnosti obnašanja modelov in prototipne konstrukcije.

Fizikalna veličina	Prototip	Model
Tlačna trdnost (f_c)	1,5–10,0 MPa	6,1 MPa
Natezna trdnosti (f_t)	0,10–0,70 MPa	0,23 MPa
Modul elastičnosti (E)	1500–3800 MPa	1864 MPa
Strižni modul (G)	60–165 MPa	68 MPa
Specifična masa (γ)	1600 kg/m ³	1685 kg/m ³

Preglednica 4 • Razmerja med trdnostnimi lastnostmi zidovja prototipne in modelne stavbe

Kot kaže na sliki 25 in 26, smo med preiskavo referenčnega modela z lesenimi stropi in nepovezanim zidovjem (slika 26) ugotovili enak mehanizem porušitve, kot smo ga opazili na starih stavbah podobne zasnove po potresu (slika 25).

Tudi pri tej študiji smo za krmiljenje potresne mize uporabili 24 s dolgo registracijo poteka pospeškov močne faze potresa v Črni gori leta 1979. Vendar smo pri preiskavi prvega modela zaradi procesne napake mizo krmilili s potresom, modeliranim v skladu s pravili, ki veljajo za popolne modele: čas trajanja smo zmanjšali za polovico (s kvadratnim korenem merila dolžin), pospeški pa so ostali enaki kot pri prototipnem potresu. Glede na to, da smo preiskovali enostavne modele, bi morali čas skrajšati z merilom dolžin, tj. štirikrat, pospeške pa enakokrat povečati.

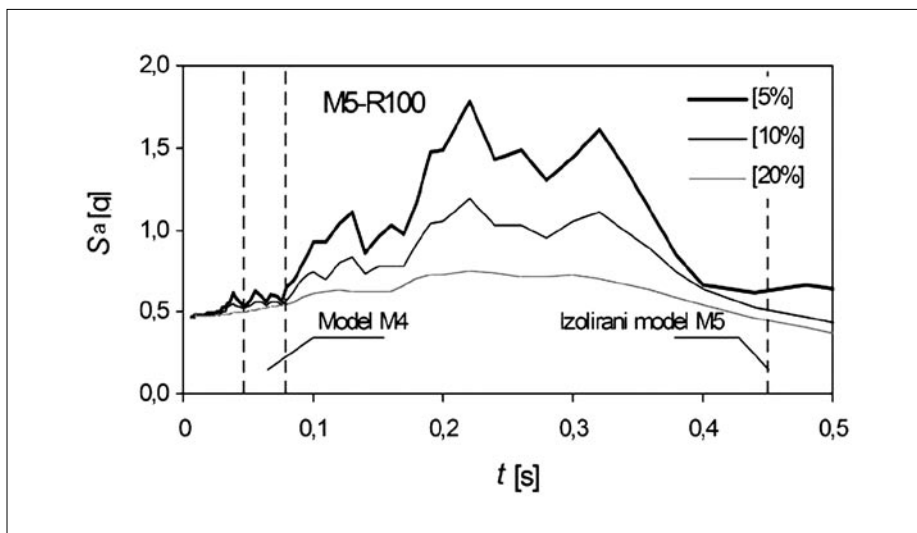
Kako je napaka vplivala na rezultat preiskav? Predvsem na podlagi meritev ne moremo sklepati, kako bi se prototipne stavbe odzvale na 24 s dolgo močno fazo črnogorskega potresa. V danem primeru bi bil prototipni potres po obliki sicer podoben črnogorskemu, vendar bi namesto 24 s trajal 48 s, največji pospešek tal pa bi bil enak le 0,11 g. Zato interpretacija rezultatov, v kateri bi se sklicevali na črnogorski potres, nima smisla. Ker velja, da je rezultat vsakega eksperimenta uporaben, le interpretirati ga moramo na pravilen način, to storimo tudi v danem primeru. Če želimo sklepati, kaj se bo med potresom zgodilo s prototipno konstrukcijo, moramo posebej analizirati dinamične lastnosti vzbujanja s potresno mizo in njihov vpliv na preiskane modele. Pri analizi gibanja potresne mize velikost pospeškov niti ni toliko pomembna, saj intenzifeto vzbujanja v posameznih fazah postopno povečujemo. Pozornost pa mora posvetiti dejstvu, da časa trajanja nismo



Slika 25 • Umbrija, 1997: tipične poškodbe kamnite hiše z nepovezanim zidovjem



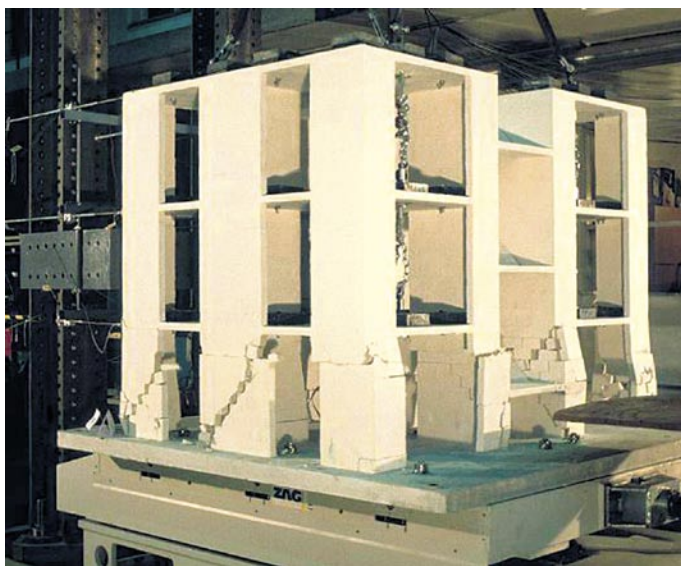
Slika 26 • Mehanizem porušitve modela kamnite hiše z nepovezanim zidovjem



Slika 27 • Spekter odziva pospeškov potresne mize z vrisanim območjem lastnih nihajnih časov preiskanih modelov (čas trajanja vzbujanja 12 s)

Oznaka	Tip	Material	Opomba
M1-1	vrstna hiša	kalcijev silikat	brez vezi
M1-2	vrstna hiša	opečni votlak	brez vezi
M1-1c	vrstna hiša	kalcijev silikat	vezi ob stopnišču
M1-1d	vrstna hiša	kalcijev silikat	v celoti povezana
M2-1	stan. hiša	kalcijev silikat	brez vezi
M2-2	stan. hiša	opečni votlak	brez vezi

Preglednica 5 • Opis modelov, preiskanih na potresni mizi



Slika 28 • Etažni strižni mehanizem porušitve modela trietažne stanovanjske hiše iz navadnega zidovja



Slika 29 • Črna gora, 1979: etažni strižni mehanizem porušitve navadne opečne stavbe

skrajšali, s čimer območje maksimalnega ojačanja v spektru odziva potresa ni več sovpadalo z lastnim nihajnim časom modelov, kot je bilo načrtovano (slika 27).

Z dodatno analizo gibanja potresne mize, ki ne bi bila potrebna, če bi izbrani prototipni potres modelirali v skladu z zakonitostmi modeliranja, smo ugotovili, da so bili učinki vzbujanja na preiskane modele podobni, kot bi bili v primeru pravilno modeliranega potresa. Kot merilo za intenziteto vzbujanja lahko uporabimo pospeške tal, kot merilo za primerjavo obnašanja pa prečno silo v pritličju, ki jo izračunamo iz izmerjenega časovnega odziva pospeškov in poznane mase modelov. Seveda moramo pri takšni primerjavi paziti, da pri vrednotenju ne upoštevamo meritev v fazi, ko so nepovezani modeli začeli razpadati, in predpostavke, na podlagi katerih izračunamo prečno silo, ne veljajo več. Čeprav so v tej fazi preiskave še delovali merilniki pospeškov in pomikov, izmerjene vrednosti niso več uporabne za analizo.

4.3 Faktor obnašanja konstrukcije

Da bi preverili v EC 8 priporočene vrednosti faktorja obnašanja konstrukcije q za zidane konstrukcije, smo na potresni mizi preiskali 6 modelov, ki so predstavljali stavbe dveh različnih zasnov, sezidanih iz dveh vrst zidakov (Tomažević in sod., 2004): izsek dvanadstropne vrstne hiše z glavnimi nosilnimi zidovi, pravokotnimi na smer delovanja potresa (model prikazuje slika 19), in trinadstropno stanovanjsko hišo z enakomerno razporejenimi nosilnimi zidovi v obeh pravokotnih smereh (slika 28). V primeru vrstne hiše so bili zidovi dveh modelov delno ali v celoti povezani z navpičnimi vezmi (preglednica 5).

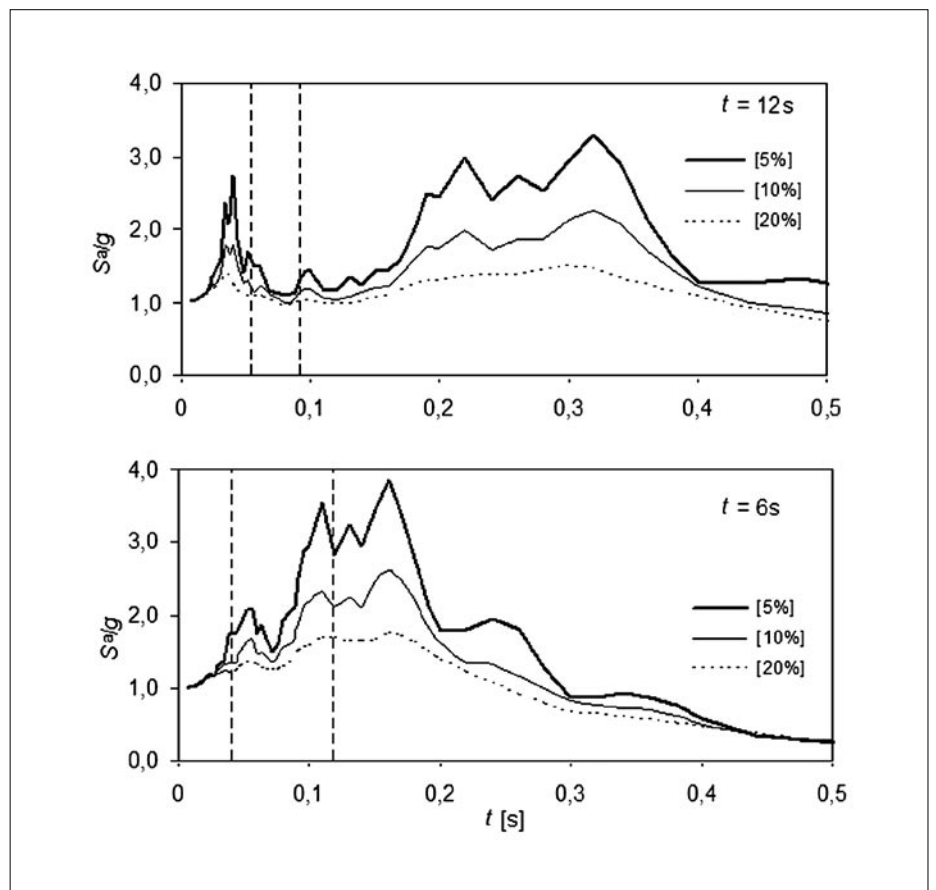
Modeli so bili izdelani v merilu 1 : 5. Načrtovali smo jih kot popolne modele, zato smo izde-

lali modelne zidake, s katerimi smo dosegli, da je bilo obnašanje zidov modela podobno obnašanju zidov iz prototipnih materialov (sliki 6 in 7a). Da bi izpolnili pogoje popolne modelne podobnosti, smo na stropne plošče z vijaki pritrtili dodatno maso v obliki jeklenih kvadrov (slika 9). V preglednici 6 navajamo, kako se je pri preiskanih modelih z razmerami na prototipni konstrukciji ujemalo razmerje med maso stropov in koristne obtežbe ter maso zidov, skoncentrirano v višini stropov. Ravno tako prikazujemo podobnost razmerij med tlačnimi napetostmi v zidovih in tlačno trdnostjo zidovja v prototipni konstrukciji in modelu. Lahko ugotovimo, da smo v danem primeru točno modelirali podobnost porazdelitve mas, nekoliko manj, vendar še vedno dovolj natančno, da lahko obravnavamo fizikalne modele konstrukcij kot popolne modele, pa razmerja med dejanskimi napetostmi in tlačno trdnostjo zidovja. Zato lahko sklepamo, da smo s preiskavo verodostojno ponazorili strižni etažni porušni mehanizem, tipičen za navadne zidane konstrukcije s podobno zasnovo konstrukcije (slika 29).

Tako kot v prej opisanem primeru tudi pri tej seriji preiskav modeliranje izbranega potresnega gibanja tal ni potekalo v celoti v skladu z izbrano tehniko modeliranja. Medtem ko je bil prototipni potres pri prvih treh modelih skrajšan z merilom $S_i = 2$, in ne z merilom $S_i = \sqrt{5} = 2,24$, kot bi zahtevalo popolno modeliranje, je bil pri drugih treh modeli še dvakrat krajši. Vzbujanje pri modelih M2-1, M2-2 in M1-1 je namesto 10,7 s ($24/\sqrt{5}$) trajalo 12 s. Ker je analiza spektrov odziva pokazala, da lastni nihajni časi modelov ležijo izven območja največjega spektralnega ojačanja, je bil pri modelih M1-2, M1-1c in M1-1d čas vzbujanja skrajšan na 6 s. S tem so se nihajni časi preostalih treh modelov približali resonančnemu območju modelnega potresa. Če razlike zaradi napake pri faktorju merila časa pri prvih treh modelih niti niso pomembne (lahko bi celo rekli, da smo modelirali 27 s dolgo močno fazo črnogorskega potresa: $27/\sqrt{5} = 12$ s), pa dodatno dvakratno skrajšanje pomeni tolikšne spremembe spektra odziva, da tudi tokrat ne moremo govoriti, kako bi se prototipi, ki jih predstavljajo sicer skoraj popolno fizikalno modelirani modeli, odzvali na črnogorski potres. Še več, v tem primeru ne moremo neposredno – samo na podlagi nominalne intenzitete vzbujanja s potresno mizo – primerjati niti obnašanja modelov. Trije modeli so bili namreč preiskani s potresom, ki je trajal 12 s, trije pa s potresom, ki je trajal le 6 s. Tipična spektra odziva

Model	m_{wP} (kg)	m_{IP} (kg)	m_{wP}/m_{IP}	m_{wM} (kg)	m_{IM} (kg)	m_{wM}/m_{IM}	σ_{oP} (MPa)	σ_{oM} (MPa)	σ_{oP}/σ_{oM}
M1-1	22200	35300	0,63	178	288	0,62	0,26	0,06	4,3
M1-2	10000	35300	0,28	61	288	0,21	0,20	0,05	4,0
M2-1	25700	67900	0,38	206	518	0,40	0,55	0,11	5,0
M2-2	11600	67900	0,17	70	518	0,14	0,46	0,11	4,2

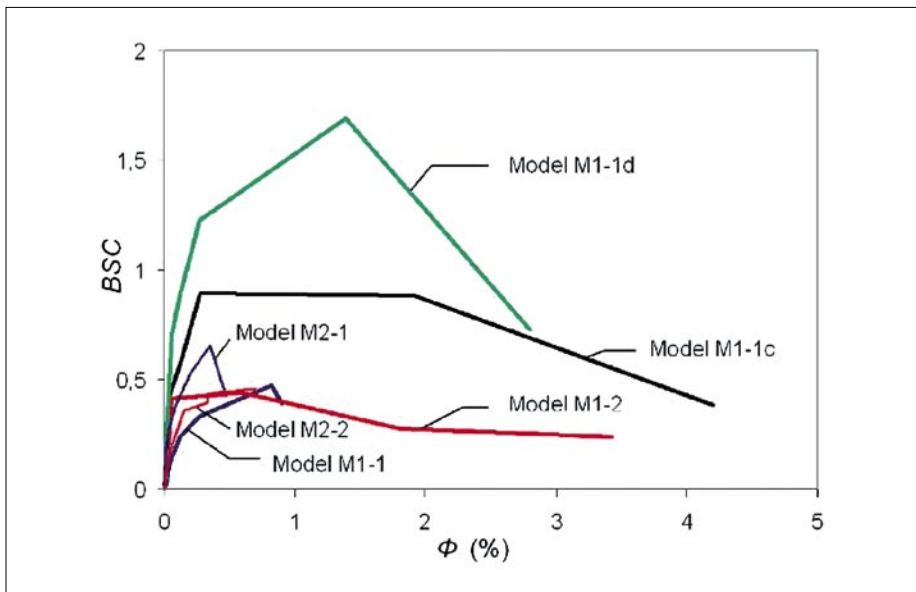
Preglednica 6 • Mase zidovja (m_w) in stropov (m_s), skoncentrirane v višini stropov, in povprečne tlačne napetosti v zidovih (σ_o) prototipnih konstrukcij (indeks P) in modelov (indeks M)



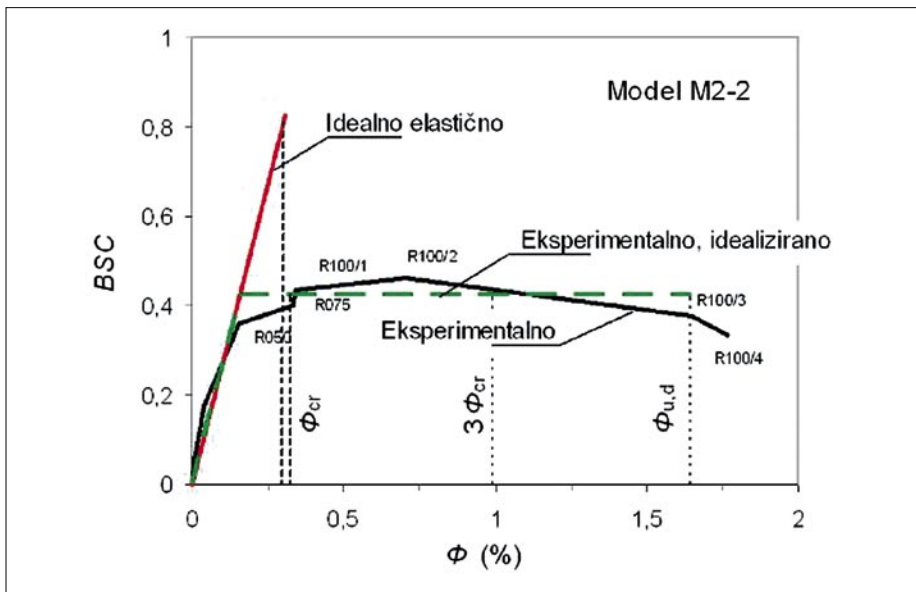
Slika 30 • Spektra odziva pospeškov 12 s in 6 s dolgega vzbujanja s potresno mizo z vrisanim območjem lastnih nihajnih časov preiskanih modelov

za čas trajanja potresa 12 s oziroma 6 s, v katerih so vrisana tudi območja lastnih nihajnih časov preiskanih modelov, sta v obliki spektralnega ojačanja prikazana na sliki 30. Razlike v učinkih na odziv modelov so očitne. Za medsebojno primerjavo obnašanja modelov moramo v danem primeru uporabiti druga merila. Bolj ali manj univerzalno merilo, ki ni toliko odvisno od načina vzbujanja, so krivulje odpornosti konstrukcije oziroma krivulje odvisnosti med nastalo prečno silo

v pritličju in njej odgovarjajočo deformacijo (etažnim pomikom oziroma zasukom), ki jih izvednotimo na podlagi izmerjenega odziva pomikov in pospeškov ter mase modelov (slika 31). Seveda se moramo tudi pri takšni primerjavi prepričati, kakšna so bila razmerja med vhodno energijo vzbujanja v posameznih fazah preiskave, pa tudi nekateri drugimi parametri, pomembnimi za odziv preiskane konstrukcije na potresno vzbujanje. Analiza teh parametrov je pokazala, da so po-



Slika 31 • Primerjava krivulj odpornosti za preiskane modele



Slika 32 • Vrednotenje faktorja obnašanja konstrukcije q na podlagi izmerjene krivulje odpornosti modela

5 • SKLEPI

V prispevku smo predstavili prednosti in pomanjkljivosti preiskav modelov zidanih stavb v pomanjšanem merilu na enostavni potresni mizi, ki jo imamo v laboratoriju za konstrukcije na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Kot kaže primerjava eksperimentalnih rezultatov z učinki potresa na zidane stavbe, ki smo jih ugotovili po potresih, lahko dobimo s preiskavami modelov zanesljive podatke

o pričakovanem splošnem obnašanju in porušnih mehanizmih, čeprav niti fizikalnega modela stavbe ne izdelamo popolnoma v skladu z zahtevami modelne podobnosti niti ne modeliramo izbranega potresnega gibanja tal povsem natančno.

Modele lahko izdelamo bodisi kot popolne, pri katerih trdnostne lastnosti materialov zmanjšamo v modelnem merilu, bodisi kot

datki o obnašanju modelov, čeprav dobljeni z različnim vzbujanjem, med seboj primerljivi. Z upoštevanjem dejanskih razmerij med vsakokratno modelirano potresno obtežbo in dejanskim potresom jih lahko tudi preslikamo na ustrezne prototipe.

Tu smo prikazali samo nekatere probleme, ki smo jih morali rešiti pred interpretacijo rezultatov preiskav zaradi nedoslednosti pri modeliranju potresnega vzbujanja. Na sliki 31 za ilustracijo prikazujemo povzetek primerjave obnašanja vseh preiskanih modelov s krivuljami odpornosti, na sliki 32 pa način, kako smo na podlagi krivulje odpornosti posameznega modela z uporabo definicije faktorja obnašanja konstrukcije q izvednotili razpoložljivo vrednost. Prispevek, v katerem bomo podrobno poročali o rezultatih raziskav, še pripravljamo.

enostavne, pri čemer uporabimo kar prototipne materiale. Največkrat je stanje nekje vmes: če nam uspe modelirati posamezni parameter, imamo lahko pri modeliranju drugega manj uspeha. Govorimo o popačenih modelih, pri katerih so mehanske in druge lastnosti materialov med zahtevanimi za popolno modeliranje in lastnostmi prototipa. Glede na to, koliko smo se približali popolnosti, se nam lahko zapletejo tudi priprave na preiskavo. Če želimo rezultate preiskave preslikati na konkretni prototip, moramo pri preslikavi vsekakor upoštevati dejanska razmerja med modelnimi

in prototipnimi materiali in vse druge faktorje, ki nam lahko popačijo sicer enostavne korelacije.

Glede na tehnološke in ekonomske možnosti za izdelavo materialov, ki jih lahko uporabimo za zidanje popolnih modelov zidanih konstrukcij, so študije in raziskave pokazale, da merilo 1 : 7 predstavlja spodnjo mejo za modele opečnih, merilo 1 : 4 pa kamnitih zidanih stavb. Za simulacijo enosmernega potresnega gibanja tal lahko uporabimo enostavno potresno mizo, ki jo poganja univerzalni dvosmerno delujoči programski bat, ki je priključen na zmogljivo hidravlično črpalko. Primerjava dinamičnih lastnosti gibanja potresne mize in potresa, ki se uporablja za krmiljenje, pokaže, da je odstopanje med želenimi in dejanskimi vrednostmi parametrov gibanja potresne mize

pri merilih modeliranja, ki jih običajno uporabljamo pri modelnih preiskavah, tj. 1 : 3 do 1 : 5, minimalno.

Medtem ko preiskava nelinearnega dinamičnega obnašanja popolnega modela ne zahteva nobenih prilagoditev, moramo pri enostavnem modelu poskrbeti za ustrezna napetostno-trdnostna razmerja v nosilnih elementih in ustrezno porazdelitev mas in togosti po višini. To včasih zahteva razmeroma zahtevne tehnične rešitve.

Zaradi praktičnih omejitev, ki jih pred nas postavljajo različne tehnike fizikalnega modeliranja konstrukcij in simulacije potresnega gibanja tal, moramo pred preiskavo modela na potresni mizi izvesti celo vrsto predhodnih raziskav, s katerimi določimo mehanske in druge lastnosti sestavnih materialov in zi-

dovja. Izvesti moramo tudi kalibracijske preiskave potresne mize, s katerimi ugotovimo lastnosti modeliranega potresnega gibanja tal in njegovo skladnost s prototipnim potresom. Ker je odločitev o velikosti modela odvisna od tehničnih omejitev potresne mize, velikosti ploščadi in zmogljivosti hidravlične opreme, batov in črpalke, moramo poznati tudi velikost največje mase, ki jo hidravlika premika brez večjih motenj in odstopanj med krmilnim in dejanskim časovnim potekom gibanja tal. Ravno tako moramo poznati resonančno frekvenco sistema, včasih pa tudi, kako samo nihanje modela (odziv) vpliva na krmiljenje gibanja potresne mize (interakcija model – potresna miza). Vse to – pa še marsikaj drugega – moramo raziskati pred vsako serijo preiskav modelov na potresni mizi.

6 • ZAHVALA

Avtor je pri pisanju prispevka uporabil podatke, pridobljene med pripravo in izvedbo številnih raziskav, ki so bile pod njegovim vodstvom izvedene na Zavodu za gradbeništvo Slovenije

in ki jih je večinoma financiral o zdajšnje Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo RS oziroma Agencija RS za raziskovalno dejavnost. Del opisanih raziskav je bil izveden

v okviru programa P2-0274 Gradbeni objekti, del pa v okviru sodelovanja s podjetjem Sika Slovenija, d. o. o., in z nemškim združenjem opekarjev Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau, e. V. Podrobnosti o raziskavah, omenjenih v prispevku, bo bralec, ki ga problematika zanima, našel v objavljenih člankih in razpravah, ki jih avtor navaja v literaturi.

7 • LITERATURA

- Arias, A., A measure of earthquake intensity, V: Hanson, R. (ur.), *Seismic Design of Nuclear Power Plants*, MIT Press, Cambridge, 1970.
- Boštjančič, J., Model materials suitable for dynamic testing of models in the plastic range, V: *Proceedings, 6th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, New Delhi, 2745–2752, 1977.
- Evrokod 8, Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, SIST EN 1998-1: 2005, 2005.
- Harris, G. H., Sabnis, G. M., *Structural modeling and experimental techniques*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1999.
- Langhaar, H. L., *Dimensional analysis and theory of models*, John Wiley & Sons, New York, 1951.
- Mann, W., Müller, H., Failure of shear-stressed masonry – an enlarged theory, tests and application to shear walls, *Proceedings of the British Ceramic Society*, No. 30, Shelton House, Stoke-on-Trent, 223–235, 1982.
- Mann, W., Koenig, G., Oefes, A., Tests of masonry walls subjected to seismic forces, V: *Proceedings, 8th International Brick/Block Masonry Conference*, Dublin, Vol. 2, Elsevier Applied Science, London, 764–773, 1988.
- Oefes, A., Loering, S., On the behavior of masonry buildings subjected to seismic loads, *Bautechnik*, 83 (2), 125–138, 2006.
- Terčelj, S., Turnšek, V., Tomažević, M., Sheppard, P., Laboratorijske preiskave pri reševanju problemov grajenja na potresnem področju, *Materiali i konstrukcije*, 21 (4), 3–11, 1978.
- Tomažević, M., Turnšek, V., Lateral load distribution as a basis for the seismic resistance analysis of masonry buildings, V: *Proceedings, Research Conference on Earthquake Engineering*, Skopje, 455–488, 1980.
- Tomažević, M., Dynamic modelling of masonry buildings: storey mechanism model as a simple alternative, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 15 (6), 731–749, 1987.
- Tomažević, T., Velechovsky, T., Weiss, P., Raziskave potresne odpornosti zidanih zgradb z mešanim konstrukcijskim sistemom, *Gradbeni vestnik*, 38 (11–12), 311–318, 1989.

- Tomažević, M., Velechovsky, T., Some aspects of testing small scale masonry building models on simple earthquake simulators, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21 (11), 945–963, 1992.
- Tomažević, M., Weiss, P., Velechovsky, T., Vpliv togosti stropov na potresno odpornost starih zidanih zgradb, *Gradbeni vestnik*, 41 (3–4), 73–84, 1992.
- Tomažević, M., Lutman, M., Weiss, P., Seismic upgrading of old brick-masonry urban houses: tying of walls with steel ties, *Earthquake Spectra*, 12 (3), Earthquake Engineering Research Center, Oakland, 599–622, 1996.
- Tomažević, M., Klemenc, I., Potresna odpornost zidanih stavb z navpičnimi vezmi: raziskave in računska analiza. *Gradbeni vestnik*, 46 (11–12), Informacije ZAG (320), 1997.
- Tomažević, M., Bosiljkov, V., Weiss, P., Klemenc, I., Experimental research for identification of structural behaviour factor for masonry buildings, Part I, Poročilo ZAG, P 115/00-650-1, 2004.
- Tomažević, M., Klemenc, I., Weiss, P., Protipotresna utrditev starih zidanih stavb s sodobnimi metodami: raziskave obnašanja modelov na potresni miz, *Gradbeni vestnik*, 57 (2), 30–42, 2008.
- Turnšek, V., Reisner, J., Aparatura za seizmičke opite, *Materiali i konstrukcije*, Beograd, 15 (2), 15–19, 1970.