

UDK 721+666.973:699.84

Primljeno 18. 10. 2010.

Ponašanje zgrada iz porastoga betona u potresnim uvjetima

Miha Tomažević, Matija Gams

Ključne riječi

zgrada, porasti beton, potresni uvjeti, potresna platforma, proračunski parametar, kapacitet pomaka, faktor ponašanja konstrukcije

Key words

building, porous concrete, seismic conditions, seismic platform, design parameter, drift capacity, structural behaviour factor

Mots clés

bâtiment, béton poreux, conditions sismiques, plate-forme sismique, paramètre d'étude, capacité du déplacement inter-étages, facteur de comportement de structure

Ключевые слова

здание, пористый бетон, условия землетрясения, сейсмическая платформа, расчетный параметр, сила смещения, фактор поведения конструкции

Schlüsselworte

Gebäude, Porenbeton, seismische Bedingungen, seismische Plattform, Berechnungsparameter, Verschiebungskapazität, Faktor des Verhaltens der Konstruktion

M. Tomažević, M. Gams

Izvorni znanstveni rad

Ponašanje zgrada iz porastoga betona u potresnim uvjetima

U radu je opisano ispitivanje provedeno na potresnoj platformi dvaju troetažnih i jednog četveroetažnog modela zgrada izrađenih od porastoga beton. Zabilježeno je tipično ponašanje posmičnog zida s dijagonalnim pukotinama u smjeru uzbuđivanja i katnim mehanizmom ponašanja pri rušenju. Analizirani su odnosu između oštećenja, otpornosti i katnih pomaka za pojedina granična stanja, dana je ocjena za proračunske parametre, kao što su kapacitet pomaka i faktor ponašanja konstrukcije.

M. Tomažević, M. Gams

Original scientific paper

Seismic behaviour of porous concrete buildings

The testing conducted on seismic platform to determine behaviour of porous concrete buildings, using two three-storey building models, and one four-storey building model, is described in the paper. Typical behaviour of shear wall with diagonal cracks in the direction of excitation, and with storey-based mechanism of behaviour during collapse, has been noted. Relationships between the damage, resistance and storey drift are analyzed for individual limit states, and an estimation of design parameters, such as the drift capacity and structural behaviour factor, is given.

M. Tomažević, M. Gams

Ouvrage scientifique original

Comportement sismique des bâtiments en béton poreux

Les essais conduits sur la plate-forme sismique afin de déterminer le comportement des bâtiments en béton poreux, en utilisant les modèles de deux structures à trois étages et une structure à quatre étages, sont décrits dans l'ouvrage. Le comportement typique de mur de cisaillement, avec fissures diagonales dans le sens de l'excitation et avec le mécanisme d'effondrement par étages, a été noté. Les rapports entre l'endommagement, la résistance et le déplacement inter-étages sont analysés pour les états limites individuels, et l'estimation des paramètres d'étude, tels que la capacité du déplacement inter-étages et le facteur de comportement de structure, est présentée.

M. Томажевич, М. Гамс

Оригинальная научная работа

Поведение зданий из пористого бетона в условиях землетрясения

В работе описывается испытания двух трехэтажных и одной четырехэтажной модели зданий, выполненных из пористого бетона, проведенные на сейсмической платформе. Отмечено типичное поведение разрезной стены с диагональными трещинами в направлении возбуждения и этажным механизмом поведения при разрушении. Проанализированы соотношения между повреждением, стойкостью и этажными смещениями для отдельных граничных состояний, дана оценка расчетных параметров, таких, как сила смещения и фактор поведения конструкции.

M. Tomažević, M. Gams

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Benehmen der Gebäude aus Porenbeton in seismischen Bedingungen

Im Artikel beschreibt man eine an der seismischen Plattform durchgeführte Untersuchung zweier dreistöckigen und eines vierstöckigen Gebäudemodells, ausgeführt aus Porenbeton. Angemerkt ist das typische Verhalten der Schermauer mit diagonalen Rissen in der Richtung der Erregung und der Etagenmechanismus beim Einsturz. Analysiert sind die Verhältnisse zwischen Beschädigung, Widerstandsfähigkeit und Etagenverschiebungen für einzelne Grenzzustände, gegeben ist eine Abschätzung für Berechnungsparameter, so was die Verschiebungskapazität und der Faktor des Verhaltens der Konstruktion sind.

Autori: Prof. dr. sc. **Miha Tomažević**, dipl. ing. građ.; dr. sc. **Matija Gams**, dipl. ing. građ., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana

1 Uvod

Porasti beton, autoklavirani ćelijasti (aerirani) beton, lagani je građevni materijal koji ima vrlo povoljna toplinska i zvučna izolacijska svojstva i veliku požarnu otpornost. Iako je tlačna čvrstoća ziđa od porastog betona mnogo manja od čvrstoće klasičnog ziđa od opeke i blokova, ipak je dovoljna da se porastim betonom mogu graditi i višekatne zgrade. Dok je ponašanje materijala pri djelovanju vertikalnog opterećenja već dosta dobro istraženo, postoji samo ograničen broj podataka o ponašanju zidova od porastoga betona u potresnim uvjetima [1, 2, 3]. Informacije o dinamičkom odzivu zgrada od porastoga betona na potresno djelovanje i o mehanizmima rušenja veoma su oskudne. Također su rijetki slučajevi kad su zgrade od porastoga betona bile izložene jakim potresima. Međutim, kao što pokazuje kuća u Bovcu u Sloveniji koja je 2004. potres VIII. stupnja po ljestvici EMS-98 preživjela bez oštećenja (slika 1.), iskustva su ohrabrujuća.



Slika 1. Zgrada u Bovcu, izgrađena od porastoga betona, preživjela je 2004. potres bez oštećenja (snimka Uroša Klemena)

Da bi se istražilo ponašanje zgrada od porastoga betona u potresnim uvjetima i pojačalo povjerenje u mogućnost gradnje tim materijalom na potresnim područjima, zajedno s poduzećima Xella porobeton iz Slovenije i Hrvatske u Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG) proveden je program istraživanja čije su izvođenje u potpunosti same financirale obadvije tvrtke. Cilj istraživanja bila je i ocjena vrijednosti nekih parametara za projektiranje, kao što su kapacitet deformiranja i faktor ponašanja konstrukcije [4].

2 Prototipne zgrade, modelski materijali i izgradnja modela

Zbog ograničenog kapaciteta potresne platforme odlučeno je da se ispituju tri modela tipičnih zgrada u mjerilu 1:4 koje je dovoljno veliko da omogući pouzdano modeliranje mehanizama ponašanja koji se za vrijeme potresa mogu očekivati na prototipovima. Da bi modeli mogli stati na seizmičku platformu dimenzija 2,5/2,0 m, oni su po dimenzijama predstavljali isječak prototipne zgrade s manjim odstupanjima u detaljima izrade koja nisu bitnije utjecala na ponašanja modela pri potresanju platforme.

Modeli su predstavljali idealiziranu zgradu čije su dimenzije u tlocrtu 6,85 x 8,75 m, a katna visina 2,50 m. Ploština presjeka zidova u simetričnom, kraćem smjeru tlocrta iznosi 5,8 %, a u duljem smjeru 8,3 % katne ploštine. Prototip modela M1 i M2 jest zgrada od 4 etaže (P+2+mansarda). Kod prototipa modela M1 stropne konstrukcije su montažne (tzv. bijeli strop), a kod prototipa modela M2 monolitne su armiranobetonske ploče armirane u oba smjera. Bijeli je strop montažni strop sastavljen od armiranobetonskih nosača i ispuna od porastoga betona bez tlačne ploče. Prototip modela M3 je zgrada jednaka prototipu modela M2, samo je za jedan kat viša (P+3+mansarda). Kod svih prototipnih zgrada krovna konstrukcija iznad mansarde je drvena, pokrivena crijepom.

Prototipovi su izvedeni sustavom omeđenog ziđa s vertikalnim i horizontalnim serklažima. Vertikalni su serklaži locirani prema Eurokodu 8 [5]. U prototipovima modela M1 i M2 serklaži su kružnog presjeka promjera 16 cm, armirani uzdužnom armaturom 4 Ø 14 mm. Kod prototipa modela M3 armatura vertikalnih serklaža je nešto jača (4 Ø 16 mm), ali je presjek betona manji (promjer 10 cm). Horizontalni su serklaži kod prototipa armirani su 4 Ø 12 mm. U zgradi s bijelim stropom, horizontalni serklaži su zabetonirani u posebnim U-elementima. Granica popuštanja upotrijebljenoga armaturnog čelika je 400 MPa (čelik S400), a tlačna čvrstoća betona odgovara razredu C25/30.

Da bi se rezultati ispitivanja modela mogli pretvoriti u vrijednosti koje vrijede za prototip pri izradi modela i samog ispitivanja potrebno je ispuniti više uvjeta sličnosti. Pri dinamičkim ispitivanjima kojima se ispituju mehanizmi rušenja, dva su uvjeta odlučujuća:

- raspodjela masa i krutosti po visini modela treba biti slična raspodjeli u prototipskoj konstrukciji (sličnost dinamičkog ponašanja)
- odnos između stvarnih, radnih tlačnih naprezanja u zidovima modela, σ_0 i tlačne čvrstoće ziđa, f_c , mora biti što je više moguće sličan odnosu u prototipskoj zgradi (sličnost mehanizma rušenja u uvjetima potresnog opterećenja).

Ako su oba uvjeta ispunjena, dinamički odziv mehanizam ponašanja (mehanizam rušenja) modela i prototipa bit će toliko slični da se vrijednosti izmjerene na modelu mogu pretvoriti u vrijednosti koje će za slične uvjete opterećenja vrijediti za prototip. Jednadžbe pretvorbe imaju oblik $q_P = q_M S_q$, gdje je q_P vrijednost fizikalne veličine na prototipu, q_M vrijednost iste veličine izmjerene na modelu, a S_q je faktor mjerila koji se za svaku veličinu određuje tzv. dimenzijskom analizom. U tablici 1. dani su faktori mjerila za najvažnije fizikalne veličine za opći slučaj.

Tablica 1. Faktori mjerila pri općoj modelskoj sličnosti

Fizikalna veličina	Odnos
Duljina (l)	$S_L = l_P / l_M$
Čvrstoća (f)	$S_f = f_P / f_M$
Deformacija (ε)	$S_\varepsilon = \varepsilon_P / \varepsilon_M$
Obujamska masa (γ)	$S_\gamma = \gamma_P / \gamma_M$
Pomak (d)	$S_d = S_L$
Sila (F)	$S_F = S_L^2 S_f$
Vrijeme (t)	$S_t = S_L (S_\varepsilon S_f / S_f)^{0,5}$
Frekvencija (ω)	$S_\omega = 1 / S_t$
Brzina (v)	$S_v = (S_\varepsilon S_f / S_f)^{0,5}$
Ubrzanje (a)	$S_a = S_f / (S_L S_f)$

Ako se za izradu modela upotrijebe materijali s čvrstoćom koja je za faktor mjerila (u konkretnom slučaju četiri puta) manja od čvrstoće materijala prototipa, a da se pritom ne mijenjaju deformacije, masa i prigušenje materijala (tzv. potpuna modelska sličnost), odnosi se pojednostavljaju. U ovom je slučaju zbog tehnoloških teškoća pri proizvodnji potpuno sličnog materijala upotrijebljen materijal koji se samo približio traženim vrijednostima.

Zidni elementi od porastoga betona (62,5/25,0/30,0 cm - duljina/visina/debljina) izrađuju se u tri razreda čvrstoće: 2, 4 i 6 MPa. Ako se analiziraju postojeći podaci [1], može se vidjeti da se vlačna čvrstoća zida, koja predstavlja parametar koji određuje otpornost zida na posmik, samo malo mjenja s promjenom tlačne čvrstoće. Ako je tlačna čvrstoća zida od zidnih elemenata razreda 6 za faktor $5,35/2,14 = 2,50$ veća od tlačne čvrstoće zida od zidnih elemenata razreda 2, vlačna je čvrstoća, određena dijagonalnim tlačnim pokusom, veća za samo 18 %.

Dimenzije modelskih zidnih elemenata, izrađenih u tvornici u Kisovcu (Slovenija), bile su 15,6/6,3/7,5 cm (duljina/visina/debljina), a za zidanje je upotrijebljeno *Ytong*

ljepilo koje nije posebno modelirano. Tlačna čvrstoća samog materijala određena je na kockama 6,3/6,3/6,3 cm izvađenim iz zidnih elemenata, dok su tlačna čvrstoća i modul elastičnosti zida određeni ispitivanjem modelskih zidova dimenzija 46,9/68,8/7,5 cm (duljina/visina/debljina). Vlačna čvrstoća zida, $f_{td,M}$, ispitana je dijagonalnim tlačnim pokusom uzoraka dimenzija 37,5/37,5/7,5 cm. Vrijednosti mehaničkih svojstava modelskog zida uspoređene su s prototipskim vrijednostima (tablica 2.). Usporedba vrijednosti pokazuje da je tlačna čvrstoća zida modelirana relativno dobro, dok vlačna čvrstoća zida nije smanjena u jednakoj mjeri.

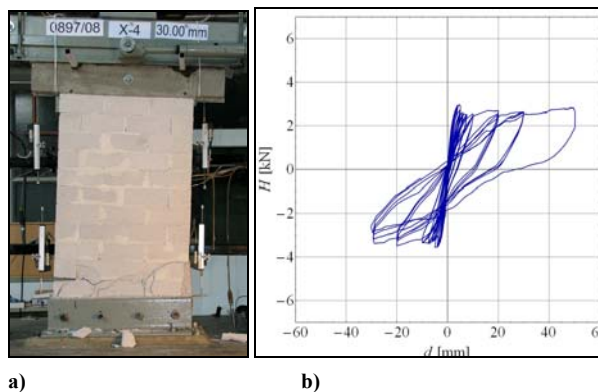
Tablica 2. Mehanička svojstva modelskog zida i usporedba s prototipnim vrijednostima za zide od zidnih elemenata razreda čvrstoće 4.

Obujamska masa γ_M (kg/m ³)	γ_P/γ_M	$f_{b,M}$ (MPa)	$f_{b,P}/f_{b,M}$	$f_{c,M}$ (MPa)	$f_{c,P}/f_{c,M}$	$f_{td,M}$ (MPa)	$f_{td,P}/f_{td,M}$
496	1,0	1,59	3,14	1,49	2,63	0,25	0,96

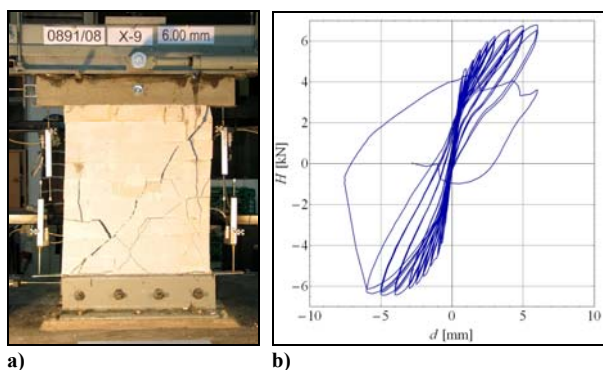
Oznake u tablici 2. znače (indeks P vrijedi za prototipne, a M za modelske vrijednosti):

- f_b - prosječna tlačna čvrstoća zidnog elementa
- f_c - prosječna tlačna čvrstoća zida
- f_{td} - prosječna vlačna čvrstoća zida dobivena dijagonalnim tlačnim ispitivanjem
- γ - obujamska masa.

Istraženo je i ponašanje modelskih zidova u potresnim uvjetima. Ispitivanja koja su provedena za konstantno vertikalno opterećenje (omjer $\sigma_o/f_c = 0,20$) pokazala su da se zidovi bez vertikalnih serklaža ruše na savijanje (slika 2.), dok se zidovi sa serklažima koji povećavaju otpornost na savijanje ruše na posmik (slika 3.). Kao što se vidi iz dijagrama na slikama 2. i 3., otpornost na posmik gotovo je dva puta veća od otpornosti na savijanje.



Slika 2. a) Mehanizam rušenja na savijanje nearmiranog zida; b) Histerezne petlje za modelski zid bez vertikalnih serklaža

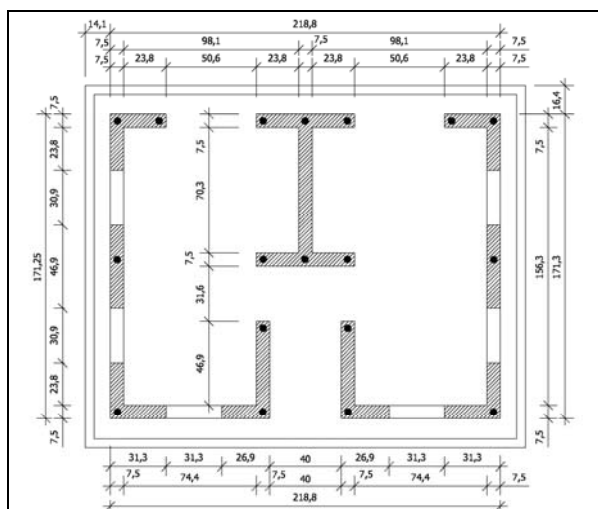


Slika 3. a) Mehanizam rušenja na posmik omeđenog zida; b) Histerezne petlje za modelski zid s vertikalnim serklažima

Receptura betona bila je prilagođena pojedinim elementima. Postignuta tlačna čvrstoća betona, ispitana na prizmama, kod vertikalnih je serklaža iznosila 7,8–10,4 MPa, kod bijelog stropa 15,6 MPa i kod armiranobetonskih ploča 16,4 MPa (model M2) te 27,4 MPa (model M3).

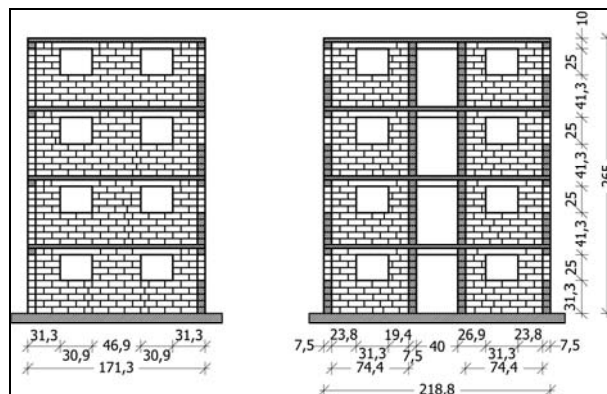
Čelik za armiranje nije bio modeliran. Upotrijebljen je običan čelik kome je presjek smanjen u skladu s mjerilom sila, $S_F = 16$. Presjek armature vertikalnih serklaža modela M1 i M2 smanjen je na $\varnothing 4,2$ mm (kod granice popuštanja 220 MPa), a presjek armature vertikalnih serklaža modela M3 na $\varnothing 3,8$ mm (kod granice popuštanja 480 MPa). Za armiranje horizontalnih serklaža upotrijebljena je šipka $\varnothing 3,5$ mm s granicom popuštanja 210 MPa.

Dimenzije svih modela u tlocrtu bile su 1,71 x 2,19 m, katna visina 0,675 m, a debljina zidova 7,5 cm. Cijela visina modela M1 s bijelim stropom bila je 2,03 m, modela M2 s punim pločama 1,99 m, a visina modela M3 2,65 m. Tlocrt zidova s označenim položajem vertikalnih serklaža prikazan je na slici 4., a oba vertikalna presjeka s načinom polaganja zidnih elemenata prikazana su na



Slika 4. Tlocrt tipičnog kata ispitanih modela s označenim položajem vertikalnih serklaža (mjerne u cm)

slici 5.; zidanje modela prikazano je na slici 6., a izrada stropnih konstrukcija na slici 7.



Slika 5. Uzdužni i poprečni vertikalni presjek modela M3 (mjerne u cm)



Slika 6. Zidanje zidova modela



Slika 7. Izrada stropnih konstrukcija modela: a) bijeli strop modela M1 (gore) i b) jedna od ploča modela M2 (dolje)

3 Potresno opterećenje i ispitivanja

Potresna se platforma sastoji od čeličnog postolja sandučaste konstrukcije koje se vijcima pričvrsti na laboratorijski temelj i od čelične platforme dimenzija 2,5/2,0 m, isto tako sandučaste konstrukcije, koja klizi po postolju i na koju se pričvrsti temeljna ploča modela te hidrauličkog sustava za uzbudu. Teflonski klizni ležajevi omogućuju kontrolirano kretanje platforme u samo jednom horizontalnom smjeru i sprječavaju bočnu ili vertikalnu rotaciju. Za uzbudu potresne platforme upotrijebljena je hidraulička preša Schenck PL 160N, koja djeluje u oba smjera, kapaciteta sile ± 160 kN i pomaka ± 125 mm. Ona je s jedne strane pričvršćena na platformu, a s druge na fiksnu čeličnu potporu (slika 8.).



Slika 8. Potresna platforma s modelom M1

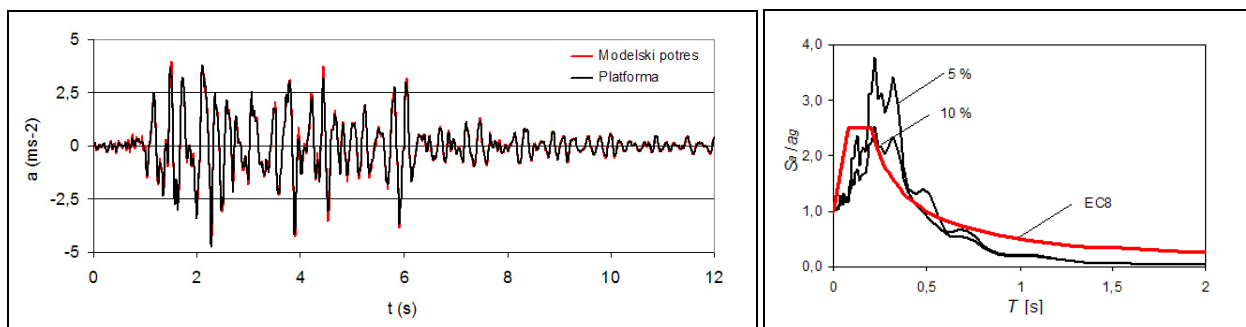
Kao osnova za ispitivanje ponašanja modela upotrijebljen je 24 sekunda dug isječak registracije N-S komponente ubrzanja potresa od 15. 4. 1979 u Crnoj Gori (hotel Oliva u Petrovcu), koji predstavlja jak dio potresa. Intenzitet i dinamičke karakteristike modelskog potresa određeni su uz pretpostavku da će se ispitivati potpuni modeli, pa je tako vrijeme trajanja registracije smanjeno s faktorom $S_t = S_L^{0,5} = 2$ na 12 sekundi, dok su ubrzanja ostala nepromijenjena. Vremenski slijed ubrzanja modelskog potresa koji je poslužio za generiranje kretanja potresne platforme prikazan je na slici 9.a. Može se uo-

čiti da stvarno kretanje platforme pri modelskom potresu gotovo u potpunosti odgovara proračunskom. Spektar ubrzanja ovako modeliranog potresa za 10 % prigušenja dosta je sličan u istom mjerilu modeliranom spektru u Eurokodu 8 (slika 9.b).

Svi su modeli ispitani s uzbudom u više faza postupnim povećavanjem intenziteta uzbude sve dok nije postignuto granično stanje rušenja. Oznake faza znače omjer programiranoga maksimalnog ubrzanja platforme u pojedinoj fazi ispitivanja i maksimalnog ubrzanja modelskog potresa. Oznaka R100 znači da je model uzbuđen potresom koji bi u idealnim uvjetima modeliranja (potpuni model) odgovarao prototipnom potresu. U toj je fazi maksimalno ubrzanje platforme jednako maksimalnom ubrzanju modelskog potresa (100 %).

Model M1 ispitivan je uzbudom u smjeru osi simetrije, dok su modeli M2 i M3 ispitani uzbudom u okomitom smjeru. Masom u obliku čeličnih utega, pričvršćenih na stropne ploče, kompenzirana je razlika između mase (težine) modela i mase (težine) kvazistalnog i uporabnog opterećenja prema Eurokodovima. Masa je predstavljala estrih i podove ($1,50$ kN/m²) te odgovarajući dio uporabnog opterećenja ($p = 2,00$ kN/m²) koje se prema Eurokodu uzima u obzir u potresnoj situaciji ($\psi_{E,i} p = \varphi \psi_2 p = 0,5 \times 0,3 \times 2,00 = 0,30$ kN/m²).

Budući da se za vrijeme ispitivanja ustanovilo kako model M1 ni pri najjačoj uzbudi na granici kapaciteta platforme nije bio ozbiljnije oštećen, na ploče je pričvršćena dodatna masa. Umjesto 210 kg na svaku od stropnih ploča pričvršćeno je 560 kg (na gornju ploču umjesto 330 kg stavljeno je 680 kg), a ispitivanja su ponovljena. S povećanom su masom od početka ispitani modeli M2 i M3 (slika 10.). Analize stanja naprezanja u zidovima pokazale su da su se omjeri tlačnih naprezanja u zidovima i tlačne čvrstoće ziđa zbog povećanja masa čak približili omjerima koji postoje u prototipu. Na drugoj strani povećanje masa nije suštinski utjecalo na promjenu dinamičkih karakteristika modela.



Slika 9. a) Usporedba vremenskog tijeka ubrzanja modelskog potresa i stvarnih ubrzanja platforme (lijevo); b) Usporedba spektra ubrzanja modelskog potresa i modeliranog spektra prema Eurokodu 8 (desno)



Slika 10. Dodatna masa pričvršćena na gornju ploču modela M3

Modeli su opremljeni sa po tri mjeraca ubrzanja i pomaka u svakom katu (slika 11.), a za ocjenu intenziteta uzbude mjerena su ubrzanja potresne platforme. Na osnovi registracije vlastitih oscilacija modela poslije udara čekićem po jednoj od stropnih ploča, analizirane su promjene osnovnih frekvencija oscilacija poslije svake faze ispitivanja.



Slika 11. a) Okvir za pričvršćivanje mjeraca pomaka i detalj pričvršćivanja mjeraca pomaka i b) akcelerometra na model

4 Rezultati ispitivanja

U ponašanju modela prevladavao je mehanizam posmika. Kod svih modela u zidovima prizemlja u smjeru uzbude nastale su dijagonalne pukotine. S povećanim intenzitetom uzbude pukotine su se širile, da bi u graničnom stanju rušenja dovele do tipičnoga katnog mehanizma. U zidovima u ortogonalnom smjeru kao posljedica savijanja izvan ravnine nastale su većinom horizontalne pukotine.

Iako stropna konstrukcija modela M1 (bijeli strop) bez tlačne ploče ne ispunjava zahtjeve norme, ona je u svojoj ravnini bila dovoljno kruta pa je ostala monolitna i djelovala kao kruta horizontalna dijafragma sve do kraja ispitivanja modela. Na bijelom stropu nisu primijećena oštećenja koja bi mogla biti posljedica nedostatka tlačne

ploče. Značajnije torzijske komponente oscilacija nisu izmjerene.

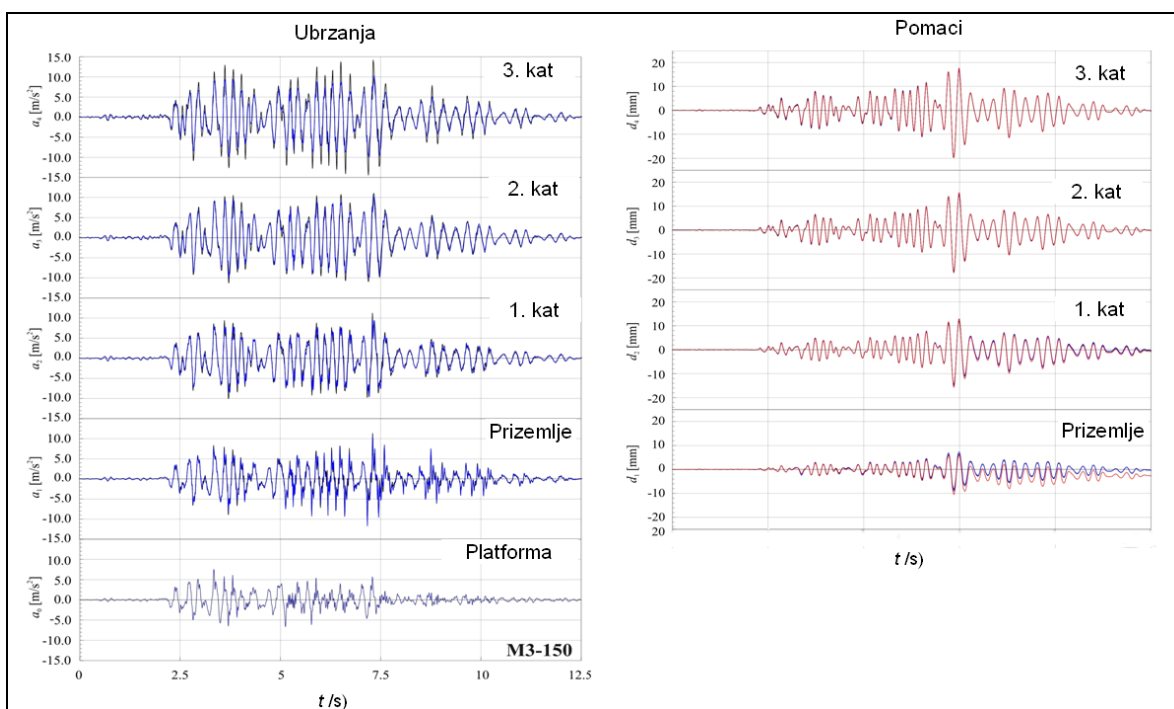
U nelinearnim fazama ispitivanja mogla se vidjeti odlučujuća uloga vertikalnih serklaža koji su povezali zidove i spriječili njihovo raspadanje. To dokazuju šipke armature serklaža u prizemlju modela koje su se u fazi rušenja plastificirale odnosno prekinule. Tipična oštećenja u zidovima i vertikalnim serklažima u graničnom stanju rušenja prikazana su na slici 12.



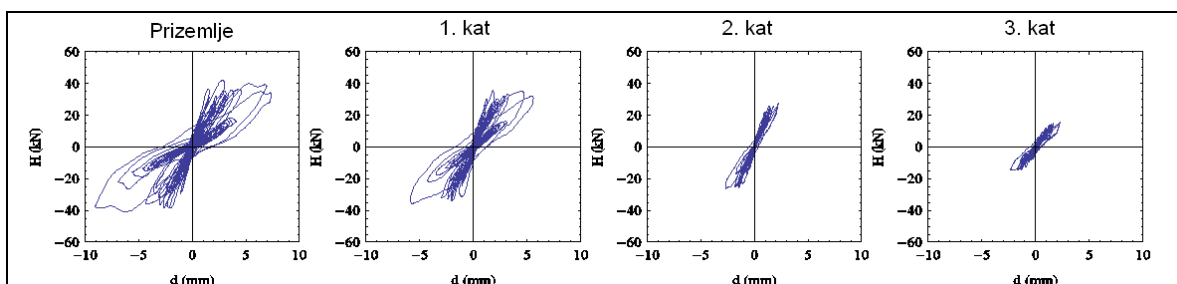
Slika 12. Oštećenja zidova modela M1 (gore) i modela M2 (dolje) u graničnom stanju rušenja

Svi su se modeli ponašali kao sustavi koji rade na posmik s predominantnim prvim oblikom oscilacija. Doprinos viših oblika, uključujući utjecaj torzije, bio je minimalan. Kao tipična, na slici 13. prikazana je registracija ubrzanja i pomaka modela M3 u fazi kada je postignuta maksimalna otpornost. Histerezni odnosi katnih sila posmika, proračunanih na osnovi poznatih masa modela i izmjerenih ubrzanja, te relativnih katnih pomaka, prikazani su na slici 14.

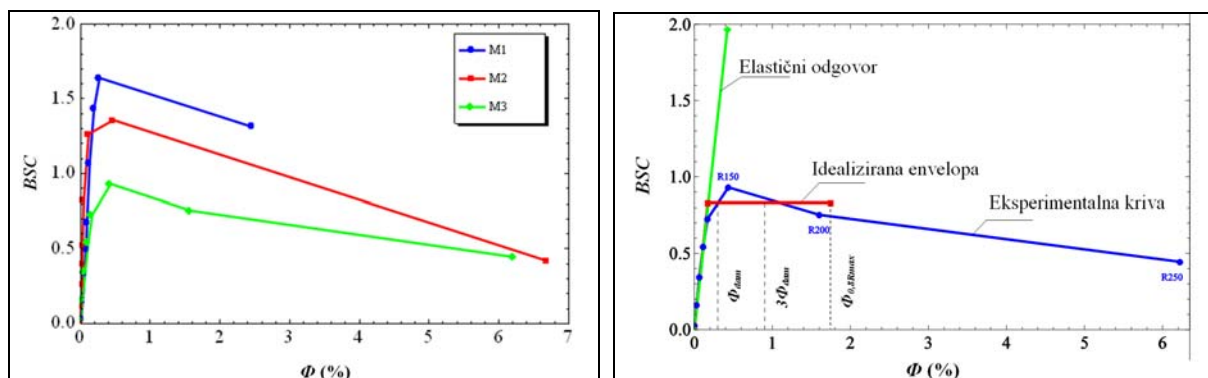
Maksimalne izmjerene sile posmika u prizemlju, BS_{max} , i težine pojedinih modela, W , dane su u tablici 3., gdje su kao mjerilo intenziteta uzbuda navedene i maksimalne vrijednosti ubrzanja potresne platforme, a_{omax} . Kao što se vidi, u svim su modelima bez obzira na smjer uzbude i katnost izmjerene približno jednake vrijednosti maksimalnih sila posmika što pokazuje da je stvarna otpornost zidova u nešto manjoj mjeri ovisila o tlačnim naprezanjima u zidu nego što se to teorijski moglo očekivati. Ako se otpornost izrazi u bezdimenzijskom obliku s koeficijentom sile posmika u prizemlju (*base shear*



Slika 13. Vremenski slijed odziva ubrzanja i pomaka modela M3 pri postignutoj maksimalnoj otpornosti



Slika 14. Histerezne petlje ovisnosti katnih sila posmika i relativnih katnih pomaka izmjerene na modelu M3 u fazi postignute maksimalne otpornosti



Slika 15. a) Krivulje potresne otpornosti dobivene ispitivanjem modela (lijevo); b) Ocjena faktora ponašanja q za slučaj modela M3 (desno)

coefficient), to jest omjerom stvarne sile posmika i težine zgrade, $BSC_{max} = BS_{max}/W$, razlike su, očekivano, puno veće.

Omjer sile posmika i katnog pomaka u prizemlju osnovni je parametar potresne otpornosti zgrade čije se ponašanje može opisati katnim mehanizmom na posmik. Kri-

vuća otpornosti (capacity curve) obično se prikazuje u bezdimenzijskom obliku kao ovisnost koeficijenta sile posmika u prizemlju, $BSC = BS/W$, i kuta katnog pomaka, Φ , tj. omjera relativnoga katnog pomaka, d , i katne visine, h , ($\Phi = (d/h)100$), u postocima. Eksperimentalno dobivene krivulje prikazane su na slici 15.a.

Tablica 3. Maksimalna sila posmika u prizemlju, BS_{max} , i koeficijent sile posmika u prizemlju, BSC_{max}

Model	a_{omax} (g)	BS_{max} (kN)	W (kN)	BSC_{max}
M1	1,37	45,02	27,46	1,64
M2	1,28	45,94	33,82	1,36
M3	0,77	41,89	45,01	0,93

Pomoću krivulja otpornosti definiraju se tri karakteristična granična stanja: granično stanje nastanka oštećenja, granično stanje maksimalne otpornosti i granično stanje rušenja. Vrijednosti koeficijenta sile posmika u prizemlju (potresne otpornosti) te kutovi katnog pomaka prizemlja za pojedina granična stanja dani su u tablici 4.

Tablica 4. Vrijednosti koeficijenta sile posmika u prizemlju, BSC , i kuta katne rotacije prizemlja, Φ , u graničnim stanjima

Granično stanje	M1		M2		M3	
	BSC	Φ (%)	BSC	Φ (%)	BSC	Φ (%)
Nastanak oštećenja	1,54	0,23	1,29	0,36	0,83	0,30
Maksimalna otpornost	1,64	0,28	1,36	0,49	0,93	0,43
Rušenje	1,31	2,55	0,42	6,69	0,45	6,22

Svi su modeli postigli granično stanje maksimalne otpornosti odmah poslije nastanka pukotina, a oštećenja nastala pri maksimalnoj otpornosti već se mogu klasificirati u kategoriju ozbiljnijih oštećenja. Pri povećanom intenzitetu uzbude opseg oštećenja se povećao, a otpornost se postupno smanjila.

Krivulje otpornosti rabljene su za ocjenu faktora ponašanja q koji prema Eurokodu 8 izražava sposobnost konstrukcije da prenosi potresno opterećenje unatoč oštećenjima u nelinearnom području. Da bi se faktor q mogao ocijeniti, krivulje se obično idealiziraju s bilinearnim, idealno elastičnim - idealno plastičnim odnosom, dobivenim iz uvjeta jednakosti energija, predstavljenog jednakim plošinama ispod stvarne i idealizirane krivulje (slika 15.b). Prema definiciji koja pretpostavlja da su maksimalni pomaci elastične i neelastične konstrukcije kod iste dinamičke uzbude jednaki, faktor ponašanja konstrukcije, q , odredi se kao omjer sile koja bi nastala pri odzivu na projektirani potres ako bi se konstrukcija ponašala elastično, H_e , i proračunske sile, H_{du} , na koju se konstrukcija projektira, $q = H_e/H_{du}$. Međutim, realnija se ocjena dobije pomoću energijskog kriterija prema kome je ploština trokuta ispod elastične ovisnosti maksimalne elastične sile i pomaka jednaka ploštini ispod stvarne (ili idealizirane) krivulje otpornosti. U tom slučaju faktor q postaje funkcija duktilnosti konstrukcije $q = (2\mu_u - 1)^{1/2}$, gdje je faktor duktilnosti, μ_u , definiran omjerom katnog pomaka (rotacije) na proračunskoj gra-

nici rušenja i pomaka (rotacije) na granici elastičnosti ($\mu_u = d_u/d_e = \Phi_u/\Phi_e$). Tipična ocjena prikazana je na slici 15.b, dok su na oba načina dobivene vrijednosti faktora q navedene u tablici 5.

Tablica 5. Vrijednosti faktora ponašanja konstrukcije q ocijenjene na osnovi ispitivanja modela

Model	$q = BSC_e/BSC_{max}$ (eksp. krivulja)	$q = BSC_e/BSC_u$ (ideal. krivulja)	$q = (2\mu_u - 1)^{1/2}$
M1	1,87	2,05	2,23
M2	1,17	1,30	4,69
M3	2,12	2,37	3,08

Pri ocjeni faktora ponašanja na osnovi duktilnosti nije uzeta u obzir cjelokupna raspoloživa duktilnost modela. Kapacitet pomaka i duktilnosti iskoristi se samo do pomaka pri kojem otpornost padne na 80 posto maksimalne [5] ili do pomaka pri kojem oštećenja prelaze prihvatljivu granicu, što je manje. Analize su pokazale da ozbiljnija oštećenja (oštećenja 3. stupnja prema EMS klasifikaciji [6]) nastanu pri katnom pomaku koji je približno tri puta veći od katnog pomaka pri nastanku prvih pukotina [7]. Kao što se može vidjeti, vrijednosti faktora ponašanja koje su ocijenjene na osnovi raspoložive duktilnosti veće su od preporučenih u Eurokodu 8.

5 Ponašanje prototipa

Da bi rezultati ispitivanja bili praktično primjenjivi moraju se transformirati na prototipne vrijednosti. Imajući na umu djelovanje da su mehanizmi ponašanja i rušenja zidova adekvatno modelirani, ograničit ćemo raspravu na korelaciju potresne otpornosti modela i prototipa. Seizmička je otpornost predstavljena krivuljom otpornosti, to jest ovisnošću katne sile posmika i katnih pomaka. Takva se krivulja može dobiti na različite načine, od kojih je najjednostavniji monotoni statički pokus. Krivulja koja je dobivena ispitivanjem na potresnoj platformi realnija je jer je dobivena u uvjetima stvarnog potresnog opterećenja koje svojim cikličkim dinamičkim svojstvima utječe na nastanak oštećenja te degradaciju nosivosti i krutosti pri ponavljanju potresnog opterećenja. Zbog toga nije toliko značajan oblik vremenskog slijeda potresa, pomoću kojega se ispituje konstrukcija, nego je važniji dinamički i ciklički karakter odziva modela na potres. U tom je pogledu za pouzdanost transformacije rezultata na prototip dovoljno, da kretanje platforme ispunjava osnovna dinamička svojstva realnog potresa.

Dok su karakteristike porastoga betona na tlačno opterećenje dosta dobro modelirane, nesuglasnosti pri modeliranju drugih parametara ne dopuštaju primjene jednostavnih odnosa model-prototip koji vrijede pri potpunoj modelskoj sličnosti. Dodatna je korekcija potrebna još više zbog toga što je potpuna modelska sličnost dodatno narušena zbog naknadno dodane mase. Dok korekcija

zbog narušenih odnosa između mehaničkih svojstava modelskih i prototipnih materijala nalaže smanjenje vrijednosti potresnih sila izmjerenih na modelima, korekcija zbog dodane mase dopušta povećanje tih vrijednosti.

Način korekcije zbog odnosa između mehaničkih količina modelskog i prototipnog zida nije jednoličan. Iako je tlačna čvrstoća smanjena, slično kao kod prototipnog materijala, vlačna čvrstoća zida nije se smanjila. Na taj bi se način moglo tumačiti da je porasti beton modeliran sukladno zakonima modelske sličnosti pa je potrebna samo manja korekcija zbog razlike u nedostizanju potrebnog faktora modeliranja (2,6 umjesto 4). Međutim, budući da otpornost zidova pri mehanizmu na posmik određuje vlačna čvrstoća, odlučeno je da se, što se tiče otpornosti, prihvati konzervativniji način transformacije rezultata. Naime, da se rezultati ispitivanja modela primijene na prototip uz pretpostavku da su modeli izrađeni od prototipnog materijala. To znači da se ubrzanja,

najvećega očekivanog intenziteta potresa, do proračunskog ubrzanja tla $Sa_g = 0,35$, mogu graditi i zgrade visine četiri etaže. Takve zgrade moraju ispunjavati zahtjeve norma, a njihovu potresnu otpornost treba provjeriti proračunom.

Na osnovi eksperimentalno utvrđenog kapaciteta duktilnosti i disipacije energije može se preporučiti da se pri određivanju proračunskog potresnog opterećenja za zgrade od porastoga betona, izgrađene u sustavu omeđenog zida, čija se potresna otpornost provjerava metodom ekvivalentnog statičkog proračuna, uzme u obzir faktor ponašanja konstrukcije $q = 2,5$. Ispitivanja pokazuju mogućnost da se upotrijebi čak i vrijednost na gornjoj granici područja dopuštenog u Eurokodu 8, $q = 3,0$, ali su potrebna dodatna ispitivanja prije preporučivanja ove vrijednosti. Ispitivanja su pokazala važnu ulogu vertikalnih serklaža u ponašanju zgrada od porastoga betona u potresnim uvjetima. Serklaži, kojima se poveća otpornost zidova na

Tablica 6. Vrijednosti koeficijenta potresne otpornosti i katne rotacije u prizemlju transformirane na prototip

Granično stanje	M1			M2			M3		
	BSC^1	BSC^2	Φ (%)	BSC^1	BSC^2	Φ (%)	BSC^1	BSC^2	Φ (%)
Nastanak oštećenja	0,39	0,67	0,23	0,32	0,48	0,36	0,21	0,32	0,30
Maksimalna otpornost	0,41	0,70	0,28	0,34	0,51	0,49	0,23	0,35	0,43
Rušenje	0,33	0,56	2,55	0,11	0,17	6,69	0,11	0,17	6,22

BSC^1 : samo korekcija zbog materijala; BSC^2 : konačna korekcija zbog materijala i masa

izmjerena na modelu, smanje faktorom koji je jednak mjerilu duljina. Tim se faktorom koji je četiri, smanjuju i sile proračunane na osnovi izmjerenih ubrzanja. Budući da su vrijednosti bezdimenzijske, vrijednosti kuta katnog pomaka ostaju jednake.

Iako je dodatna masa promijenila omjere između radnih naprezanja u zidovima i tlačne čvrstoće zida, analiza stanja pokazala je da se omjer u modelima čak približio omjerima u prototipnoj konstrukciji. To znači da dodatna masa nije utjecala na mehanizam rušenja. Faktor korekcije ocijenjen je na osnovi omjera projektiranoga uporabnog opterećenja u potresnoj situaciji te stvarne mase pričvršćene na stropne konstrukcije pojedinih modela. Rezultati proračunani za pojedina granična stanja dani su u tablici 6.

6 Zaključak

Analiza rezultata ispitivanja pokazuje da je seizmička otpornost zgrada od porastoga betona, izgrađenih u sustavu omeđenog zida, dovoljno velika da se u područjima

savijanje, povezuju zidove, poslije nastanka težih oštećenja sprječavaju raspadanje zidova i osiguravaju monolitno ponašanje zgrade. Pokazalo se da se dimenzije vertikalnih serklaža mogu smanjiti. Međutim zbog ugradljivosti betona i zaštite armature od korozije preporučuje se da minimalni promjer kružnog presjeka serklaža bude 150 mm, a minimalna armatura jednaka preporučenoj u Eurokodu 8.

Ispitivanja su isto tako pokazala da montažna stropna konstrukcija nazvana "bijeli strop" bez tlačne ploče, koja se upotrebljava pri gradnji zgrada od porastoga betona, osigurava monolitno djelovanje u svojoj ravnini i djeluje kao kruta horizontala dijafragma čak i pri najjačem potresu.

Da bi se mogle iskoristiti sve mogućnosti koje pruža gradnje porastim betonom u potresnim uvjetima, potrebno je detaljnije istražiti osnovne ovisnosti između mehaničkih svojstava porastoga betona u statičkim i seizmičkim uvjetima.

ZAHVALA

Istraživanja je financirala tvrtka Xella porobeton SI iz Kisovca kod Zagorja u Sloveniji. Autori se zahvaljuju svima koji su pridonijeli uspjehu projekta, na prvome mjestu g. Urošu Klemenu iz tvrtke Xella porobeton SI, koji je najzaslužniji da su istraživanja uopće započela i financirana, te g. Alenu Omerzi iz tvrtke Xella porobeton HR i prof. dr. sc. Draženu Aničiću iz Zagreba za korisne sugestije u vezi s ispitivanjem i analizom rezultata.

LITERATURA

- [1] *Earthquake Resistant Design of Ytong Load-bearing Masonry Structures. Manual.* Xella Holding AG, München, 2001.
- [2] Tanner, J. E.; Varela, J. L.; Klingner, R. E.; Brightman, M. T.; Cancino, U.: *Seismic Testing of Autoclaved Aerated Concrete Shearwalls: A Comprehensive Review.* ACI Structural Journal (2005) May-June, 374–382.
- [3] Schöps, P.; Jäger, W.: *Confined Masonry - a Chance to Improve the Load Bearing Capacity.* 11th Canadian Masonry Symposium (2009), Toronto, Ontario.
- [4] Tomažević, M.; Gams, M.: *Seismic behaviour of Ytong houses: model shaking table tests.* Report ZAG-P 0891/08-650-2, Ljubljana, 2010.
- [5] *Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings,* EN 1998-1:2004. CEN, Brussels, 2004.
- [6] *European Macroseismic Scale 1998,* Grünthal G., Ed. European Seismological Commission, Luxemburg, 1998.
- [7] Tomažević, M.: *Damage as a measure for earthquake-resistant design of masonry structures: Slovenian experience.* Canadian Journal of Civil Engineering 34 (2007) 11, 1403–1412.