

# RAZISKAVA ZAG:

## POTRESNA ODPORNOST OBJEKTOV IZ POROBETONA

Besedilo:  
**prof.dr. Miha Tomažević**  
 in **doc.dr. Matija Gams**

Porobeton, avtoklavirani celični (aerirani) beton, je lahek gradbeni material, ki ima zelo dobre toplotno in zvočno izolativne lastnosti ter veliko požarno odpornost. Beli gradbeni material pod blagovno znamko Ytong (prej siporeks) že več kot 40 let proizvajajo v slovenskem Zasavju, v kraju Kisovec.

Ytong spada med trajnostne gradbene materiale, ki v različnih oblikah (kot so plošče ali bloki različnih debelin), omogočajo izgradnjo tako nosilnih kot nenosilnih sten in medetažnih konstrukcij, z njim pa lahko gradimo tudi večnadstropne stavbe.

Čeprav je v Sloveniji najbolj razširjena gradnja masivnih hiš s tradicionalno opeko, je vse več domov zgrajenih tudi z Ytong gradbenim sistemom. Ker naša država leži na potresnem območju, smo že leta 2009 izvedli obsežno raziskavo potresne odpornosti stavb iz porobetona. Danes je znano, da zaradi majhne mase med potresom v hišah iz porobetona nastanejo manjše potresne sile kot v podobno velikih stavbah iz opeke, kar nakazuje, da potresna odpornost ustreza današnjim zahtevam.

### Preiskava modelov prototipov stavb na potresni mizi

Da bi se prepričali o obnašanju hiš iz porobetona med potresom in utrdili zaupanje za uporabo tega materiala na potresnih območjih, smo na Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG) v sodelovanju s podjetjem Xella porobeton SI, kot naročnikom, izvedli obsežen program raziskav modelov prototipnih stavb na potresni mizi. Ker potresna miza ni omogočala preiskave stavb v naravni velikosti, smo se odločili preiskati modele idealizirane stavbe z vsemi značilnostmi sistema Ytong, izdelane v merilu 1:4. Izbrano modelno merilo je dovolj veliko, da omogoča do podrobnosti modelirati konstrukcijske detajle in s tem ponazoriti mehanizme obnašanja, ki jih lahko pričakujemo pri prototipnih stavbah. Razmera majhna teža materiala je omogočila, da so bili modeli po dimenzijah največji, kar smo jih doslej preiskali.

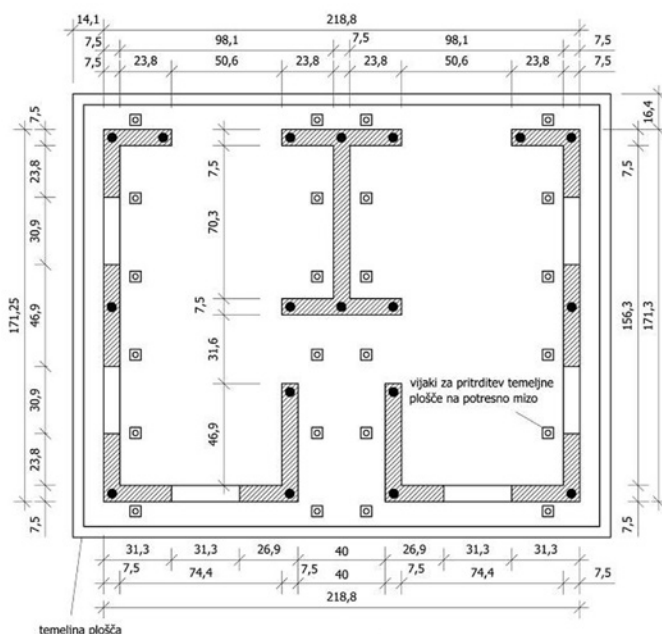
Prototipne stavbe, katerih modele smo preiskali, imajo enake tlorisne dimenzije in enako porazdelitev zidov v tlorisu. Tlorisna površina zidovja v krajši smeri je 5,8 %, v daljši pa 8,3 % bruto tlorisne površine prototipne stavbe. Sezidali smo tri modele, pri čemer sta prototipa modelov M1 in M2 predstavljala stavbo s 4 etažami (P+2+mansarda). Razlikovala sta se le po tipu stropnih plošč, ki so pri modelu M1 montažne (t.i. beli strop), pri modelu M2 pa monolitne križem armirane armiranobetonske plošče. Beli strop je montažni strop, ki je sestavljen iz armiranobetonskih nosilcev in montažnih porobetonjskih polnil brez tlačne plošče. Prototip modela M3 je stavba, ki ima eno etažo več (P+3+mansarda), stropne konstrukcije pa so, podobno kot pri modelu M2, monolitne armiranobetonske plošče. Nad mansardo imajo vse prototipne stavbe enako leseno ostrešje in kritino iz opečnih strešnikov.

Prototipne stavbe so grajene v sistemu povezanega zidovja z navpičnimi in vodoravnimi zidnimi vezmi. Navpične vezi so v skladu s standardom postavljene na vseh vogalih, na vseh prostih robovih zidov, na obeh straneh odprtin s površino več kot 1,5 m<sup>2</sup> in povsod, kjer bi bila sicer razdalja

med vezmi več od 5 m. Vezi prototipov modelov M1 in M2 so vzdolžno armirane s 4 Ø 14 mm, prečni prerez vezi pa je okrogel s premerom 16 cm. Navpične vezi prototipa modela M3 imajo vezi manjši prečni prerez (okrogel s premerom 10 cm), a nekoliko močnejšo armaturo (4 Ø 16 mm).

Čeprav se »modelna preiskava« morda sliši enostavno, je potrebno pri dinamičnih preiskavah modelov konstrukcij, s katerimi raziskujemo porušne mehanizme, izpolniti več pogojev, da bi lahko rezultate preiskav preslikali na prototip. Dva pogoja sta odločilna:

- porazdelitev mas in togosti po višini modela mora biti podobna porazdelitvi v prototipni konstrukciji (podobnost dinamičnega obnašanja);
- razmerje med delovno napetostjo in trdnostjo materiala v zidovih modela mora



Slika 1. Tloris modelov in porazdelitev navpičnih zidnih vezi

biti čim bolj podobno razmerju v zidovih prototipne stavbe (podobnost porušnih mehanizmov pri potresni obtežbi).

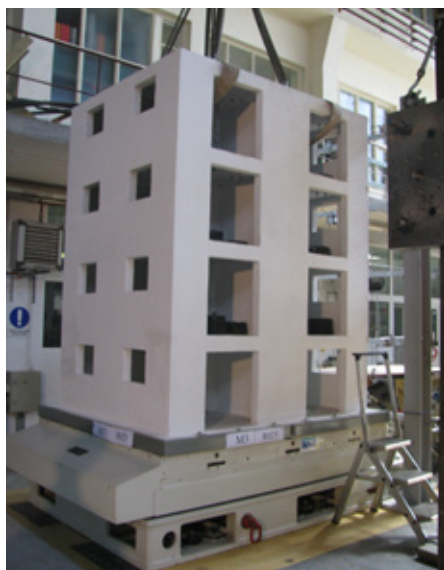
Če sta izpolnjena oba pogoja, bosta dinamični odziv in mehanizem obnašanja (porušni mehanizem) modela in prototipa enaka oziroma podobna v tolikšni meri, da lahko vrednosti parametrov, ki smo jih opazovali na modelu, v skladu z zakoni modelne podobnosti, pretvorimo na vrednosti, ki jih lahko pričakujemo v podobnih obtežbenih pogojih na prototipni konstrukciji. Enačbe za preslikavo imajo obliko  $qP = qMSq$ , kjer je  $q_p$  vrednost fizikalne veličine na prototipu,  $q_M$  vrednost iste veličine, izmerjena na modelu,  $S_q$  pa faktor merila, ki ga za vsako posamezno veličino dobimo s ti. dimenzionalno analizo. Preslikava se poenostavi, če uspemo za izdelavo modela pripraviti material, ki ima za merilo dolžin, tj. štirikrat manjšo trdnost od prototipa, pri tem pa med drugim ohrani enako specifično maso, specifične deformacije in dušenje.

## Priprava modelov na preiskave

Zidni bloki in drugi sestavni elementi so bili v laboratoriju ZAG s posebnim orodjem po potrebi prilagojeni dejanskim razmeram na modelu. Preiskave so pokazale, da smo tlačno trdnost zidakov modelirali razmeroma dobro, medtem ko trdnostne lastnosti zidovja niso bile zmanjšane v enaki meri. Če kot merodajen parameter privzamemo natezno trdnost, določeno z diagonalno tlačno preiskavo, bi lahko celo sklepali, da je ostala enaka kot pri prototipnem zidovju. Ker razpoložljivih materialov, ki bi ustrezali modeliranim lastnostim armaturnega jekla, ni na trgu, smo za armaturo zidnih vezi in stropov uporabili kar običajno armaturno jeklo, s tem da smo prerez palic zmanjšali v merilu sil.

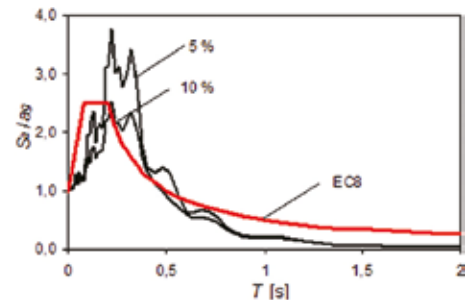
Tlorisne dimenzije vseh modelov so bile 1,71 x 2,19 m, etažna višina 0,675 m, ravno tako je bila enaka tudi debelina zidov (7,5 cm). Z upoštevanjem stropnih konstrukcij je bila višina modela M1 2,03 m, višina modela M2 1,99 m, višina modela M3 pa 2,65 m. Tloris modelov in porazdelitev navpičnih zidnih vezi v tlorisu prikazuje slika 2. Pred preiskavo na potresni mizi smo na stropne konstrukcije modelov pritrdili dodatno maso, s katero smo nadomestili razliko med lastno maso (težo) modelov in maso (težo) kvazi stalne in koristne obtežbe.

Potresna miza na ZAG je enostavna naprava, ki jo sestavljajo fiksni podstavek, gibljiva platforma in hidravlični bat za pogon. Podstavek oziroma temeljni del mize je jeklena škatlasta konstrukcija, ki se z vijaki pritrdi na laboratorijsko armiranobetonsko preizkuševalno ploščad. Na zgornji strani ima pritrdjena vodila, po katerih drsi gibljivi del naprave, potresna miza, ravno tako jeklena škatlasta konstrukcija dimenzij 2,5/2,0 m. Vodila, po katerih drsi potresna miza, 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. Potresno mizo premika programski, dvosmerno delujoči hidravlični bat Schenk PL 160N z zmogljivostjo  $\pm 160$  kN pri hodu  $\pm 125$  mm, ki je na fiksni strani pritrdjen na jekleno oporno steno, na gibljivi strani pa na mizo (slika 2).



Slika 2. Štirinadstropni model M3 med preiskavo na potresni mizi

Za krmiljenje gibanja potresne mize smo uporabili potresno gibanje tal, ki po obliki in amplitudah ustreza N-S komponenti časovnega poteka pospeškov tal med potresom v Črni gori 15. aprila 1979, zabeleženi v hotelu Oliva v Petrovcu. Največji izmerjeni pospešek tal pri tem zapisu, katerega spekter odziva primerjamo s spektrom odziva po Evrokodu 8 na sliki 3, je bil 0,43 g. Ker smo na podlagi preiskave tlačne trdnosti zidakov sklepali, da bomo preiskali modele, sezidane z materialom, kateremu smo zmanjšali trdnosti v merilu dolžin (1:4), smo v skladu s pravili modeliranja čas trajanja prototipnega



Slika 3. Normalizirani spekter odziva pospeškov modelnega potresa v primerjavi z modeliranim elastičnim spektrom odziva po Evrokodu 8

potresa zmanjšali s kvadratnim korenom merila dolžin, medtem ko so pospeški ostali nespremenjeni.

Pred preiskavo smo modele opremili z merilniki pospeškov in pomikov, ki smo jih v vsakem nadstropju namestili ob vogalih in na sredini stropnih konstrukcij. Vsak model smo preiskali z vzbujanjem v več zaporednih fazah, pri čemer smo intenziteto vzbujanja stopnjema povečevali dokler nismo dosegli mejnega stanja porušitve. Med preiskavo je bil model M1 pritrdjen na potresno mizo tako, da je vzbujanje delovalo v smeri krajše osi, v kateri je razporeditev zidov simetrična, modela M2 in M3 pa tako, da je bila smer vzbujanja pravokotna na os simetrije. Model M1 smo preiskali dvakrat: prvič z dodatno maso, katere količino smo določili v skladu z zakoni modeliranja, drugič pa s približno trikrat večjo dodatno maso, saj je bilo prvotne mase premalo, da bi se model resneje poškodoval celo pri najmočnejšem vzbujanju, ki ga zmora potresna miza. Z enako povečano maso smo preiskali tudi modela M2 in M3.

## Ugotovitve preiskave

Kot je bilo pričakovati že na podlagi opažanj med ciklično strižno preiskavo modelnih zidov, so se modeli porušili strižno. V zidovih, ki so stali v smeri vzbujanja, so nastale značilne diagonalno usmerjene strižne razpoke, kar je v zadnjih fazah preiskave privedlo do nastanka etažnega porušnega mehanizma. Stropne konstrukcije modela M1 so bile montažne. Kljub temu, da njihovi detajli ne izpolnjujejo v celoti priporočil oziroma zahtev tehnične regulative za montažne stropne konstrukcije na potresnih območjih, so stropi zagotovili monolitnost in so delovali kot toge vodoravne diafragme tudi med najmočnejšim potresom. Na stropnih konstrukcijah nismo opazili nobenih poškodb.

Na modelih M2 in M3, ki sta bila pre-

iskana z vzbujanjem v smeri, pravokotni na os simetrije, ni bilo opaziti znakov torzijskega nihanja. Mehanizem porušitve je bil podoben kot pri modelu M1: nastale so strižne razpoke v zidovih v smeri vzbujanja, iz česar se je v končni fazi razvil etažni porušni mehanizem, pri katerem so poškodbe skoncentrirane v pritličju.

V vseh fazah preiskave je bila dobro razvidna tudi vloga navpičnih zidnih vezi. Čeprav niso bile v celoti izvedene v skladu z zahtevami standardov evrokod (okrogli prerez namesto pravokotnega, manjši prerez betona od zahtevanega), se je plastificiralo oziroma pretrgalo le manjše število armaturnih palic, vezi pa so zagotovile celovitost obnašanja konstrukcije modelov. Da so navpične vezi učinkovito sodelovale pri prevzemu potresne obtežbe in zagotovile povečano sposobnost sipanja energije v nelinearnem področju nihanja, kažejo tudi poškodbe zidov, ki so nastale v višjih nadstropjih. Tipične poškodbe v zidovih pri mejnem stanju porušitve so prikazane na slikah 4 in 5.

Na podlagi izmerjenih pospeškov in poznanih mas modelov, skoncentriranih v višini stropov, smo lahko izračunali strižne sile, ki so v posameznih fazah preiskave nastale v posameznih etažah. Odvisnost med največjimi vrednostmi strižne sile in pripadajočimi etažnimi pomiki določa ti. ovojnico odpornosti. Navadno jo prikažemo v brezdimenzijski obliki, kjer strižno silo v pritličju izrazimo z razmerjem med strižno silo v pritličju, BS, in teži stavbe, W, ti. koeficientom strižne (prečne) sile v pritličju,  $BSC = BS/W$ , relativni etažni pomik pa z razmerjem med relativnim etažnim pomikom, d, in etažno višino, h, ti. imenovanim kotom etažnega zasuka, ki ga izrazimo v odstotkih etažne višine,  $\Phi = d/h$  (%). Odvisnosti za vse preiskane modele prikazuje slika 7, na njih pa lahko definiramo mejna stanja, kot so mejno stanje nastanka poškodb, mejno stanje maksimalne odpornosti, ter končno projektno mejno stanje. Na podlagi izmerjenih podatkov pri teh mejnih stanjih izvednotimo parametre za projektiranje.

Če analiziramo odvisnosti, prikazane na sliki 6, lahko ugotovimo, da so sicer neznatne poškodbe, ki so na modelu M1 nastale med zadnjo fazo preiskave, zmanjšale njegovo togost: ko smo nadaljevali preiskavo istega modela, sicer z oznako M1a, je bil naklon ovojnice že na začetku preiskave manjši. Poškodbe so nakazovale kombinacijo mehanizmov nosilnosti

(strižno, prestrižno in upogibno), vendar se stanje poškodb in njihov vpliv na togost praktično nista spremenila vse do faze preiskave, v kateri je model dosegel največjo odpornost. Pri stanju največje odpornosti so v zidovih modela tudi zelo resne poškodbe. Samo navpične vezi so pripomogle, da se model **ni porušil in je vzdržal še dodatno vzbujanje** s povečano intenziteto gibanja tal.

Preiskave na potresni mizi so pokazale, da je obnašanje stavb, sezidanih iz gradbenega sistema Ytong, enakovredno obnašanju stavb iz opečnega zidovja.

Ovojnici modelov M2 in M3 kažeta na razmeroma veliko kapaciteto pomikov in duktilnosti. Večja duktilnost je lahko vsaj pri modelu M3 posledica močnejše armature navpičnih zidnih vezi, ki se med preiskavo niso pretrgale. Po doseženem mejnem stanju poškodovanosti sta modela že takoj v nadaljevanju preiskave dosegla največjo odpornost, zatem pa se je odpornost zmanjševala z jakostjo vzbujanja, medtem ko se je obseg poškodb povečeval.

### Preslikava rezultatov preiskav na prototip

Da bi imeli rezultati preiskav praktično vrednost, smo jih morali preslikati na prototip. Pri preslikavi rezultatov nismo ugotavljali, kako bi se prototipne stavbe dinamično odzvale na konkretni potres, pač pa smo se omejili na potresno odpornost, ki jo predstavljajo krivulje odpornosti. Takšno krivuljo, ki, kot rečeno, predstavlja odvisnost med odpornostjo kritične etaže in etažnim zasukom, lahko dobimo na različne načine. Najbolj enostavno se jo dobi z monotono statično preiskavo, pri kateri se konstrukciji, ki je obremenjena s konstantno navpično obtežbo, vsiljujejo vodoravni pomiki. Krivulja odpornosti, dobljena s preiskavo na potresni mizi,

je bolj realna, saj je pri njeni konstrukciji upoštevan dinamični in ciklični značaj potresne obtežbe, ki vpliva za nastanek poškodb in upadanje togosti in nosilnosti pri ponavljanju obtežbe. Pri tem ni toliko pomemben časovni potek potresa, s katerim preiščemo model. Bolj pomembne so dinamične, ciklične lastnosti odziva modela na gibanje tal. Zato je dovolj, da ima časovni potek pospeškov in pomikov, s katerim vzbujamo model, osnovne značilnosti potresnega gibanja tal.

Čeprav smo razmeroma dobro modelirali tlačno trdnost porobetonskih zidakov, nam primerjava vrednosti drugih mehanskih lastnosti ni dopuščala, da bi pri preslikavi rezultatov modelnih preiskav na prototip upoštevali odvisnosti, ki veljajo pri popolni modelni podobnosti. Korekcija je bila potrebna tudi zaradi tega, ker smo popolno modelno podobnost pokvarili s tem, da smo na modele po začetnih fazah preiskave dodali maso. V našem primeru moramo rezultate modelnih preiskav korigirati tako zaradi neskladij pri modeliranju trdnosti materialov kot tudi zaradi dodanih mas. V prvem koraku preslikave smo morali na modelih izmerjene vrednosti potresnih sil zmanjšati, medtem ko smo jih v drugem koraku povečali.

Način korekcije zaradi razmerja med mehanskimi lastnostmi modelnega in prototipnega zidovja ni enolično določljiv, saj smo zahtevano razmerje pri tlačni trdnosti razmeroma dobro ujeli, vendar je enaka kot pri prototipnem zidovju ostala natezna trdnost, določena z diagonalno tlačno preiskavo. Ker pri strižnem porušnem mehanizmu natezna trdnost zidovja določa odpornost zidov, moramo rezultate modelnih preiskav na prototip preslikati tako, kot da smo preiskali modele, sezidane iz prototipnega materiala. To pomeni, da je treba pospeške, izmerjene na modelih, zmanjšati v merilu dolžin, kar pomeni, da moramo z merilom dolžin, tj. štirikrat zmanjšati tudi izmerjene potresne, prečne sile. Ker so brezdimenzijske veličine, velikosti zasukov ostanejo enake.

**Preglednica 1. Vrednosti koeficienta prečne sile v pritličju, BSC, in zasuka spodnje etaže,  $\Phi$ , pri mejnih stanjih, preslikane na prototipne stavbe**

Mejno stanje	M1	M1a	M2	M3				
	BSC	$\Phi$ (%)	BSC	$\Phi$ (%)	BSC	$\Phi$ (%)	BSC	$\Phi$ (%)
nastanek poškodb	0,68	0,10	0,67	0,23	0,48	0,36	0,32	0,30
maksimalna odpornost	-	-	0,70	0,28	0,51	0,49	0,35	0,43
porušitev	-	-	0,56	2,55	0,17	6,69	0,17	6,22



Čeprav je dodatna masa spremenila tudi razmerja med delovno napetostjo in tlačno trdnostjo zidovja, analiza stanja pokaže, da je bilo z njo vzpostavljeno enako razmerje kot v prototipni konstrukciji. To pomeni, da masa, dodana na modele, ni vplivala na porušni mehanizem, ki ga je pričakovati pri prototipu. Korekcijski faktor smo določili kot razmerje med projektno in dejansko maso celotnega modela. Projektno maso modela smo izračunali z upoštevanjem projektne koristne obtežbe v potresni situaciji, dejansko maso pa z upoštevanjem dejanske mase vseh uteži, pritrjenih na stropne konstrukcije. V preglednici 1 navajamo rezultate, ki jih dobimo s preslikavo rezultatov modelnih preiskav na prototipne stavbe. Pri preverjanju potresne odpornosti nas zanimajo vrednosti pri doseženi maksimalni odpornosti.

### Sklep

Preiskave na potresni mizi so pokazale, da je obnašanje stavb, sezidanih iz avtoklaviranega celičnega betona gradbenega sistema Ytong, enakovredno obnašanju stavb iz opečnega zidovja. Na eni strani zaradi majhne mase materiala v stavbi iz porobetona med projektnim potresom nastanejo manjše potresne sile, kot pri težjih opečnih stavbah, na drugi strani pa ni strižna odpornost zidov, sezidanih iz porobetona, nič manjša od strižne odpornosti zidov iz opečnih votlakov. Kot kažejo preiskave, ki smo jih opravili v okviru te študije, ugotovitev velja pri pogoju, da je zidovje povezano z navpičnimi zidnimi vezmi, ki pri majhnih tlačni trdnosti zidovja iz porobetona in majhni upogibni odpornosti zidov zagotovijo, da se izkoristi razpoložljiva, večja strižna odpornost.

Analiza rezultatov modelnih preiskav in njihova preslikava na prototip pokaže, da imajo stavbe, sezidane v sistemu Ytong z navpičnimi vezmi, dovolj veliko potresno odpornost, da se lahko grade na obmo-

čjih z največjo pričakovano potresno nevarnostjo v Sloveniji tudi štiri etaže visoko. Med preiskavo dosežene vrednosti koeficienta prečne sile v pritličju presegajo oziroma vsaj dosežajo vrednosti, ki se zahtevajo pri projektiranju zidanih konstrukcij s povezanim zidovjem na potresno najbolj ogroženih območjih v Sloveniji, celo če so stavbe grajene na slabih tleh. Če upoštevamo vrednost projektne pospeška tal  $a_g = 0,25 \text{ g}$  in koeficienta tal na slabih tleh, kjer le izjemoma gradimo navadne stavbe,  $S = 1,4$ , je projektna vrednost koeficienta prečne sile v pritličju enaka  $BSCd = 0,35$ .

Samo po sebi se razume, da je treba potresno odpornost konstrukcije vsakokrat dokazati z računom. Kapaciteta duktilnosti in sipanja energije omogočata, da se pri preverjanju potresne odpornosti lahko uporablja vrednost faktorja obnašanja konstrukcije  $q = 2,5$ . Preiskave modelov na potresni mizi sicer nakazujejo, da bi se lahko uporabljale tudi vrednosti na zgornji meji območja, ki ga priporoča Evrokod 8,  $q = 3,0$ , vendar bi bilo pred tem treba opraviti še nekatere dodatne raziskave.

Preiskave so tudi pokazale, da montažna stropna konstrukcija sistema Ytong (beli strop) zagotavlja monolitno delovanje in deluje kot toga vodoravna diafragma med najmočnejšim potresom, ne glede na to, da ne izpolnjuje v celoti priporočil oziroma zahtev tehnične regulative za montažne stropne konstrukcije na potresnih območjih. Ravno tako lahko sklepamo, da dimenzije in količina armature navpičnih vezi po sistemu Ytong za-

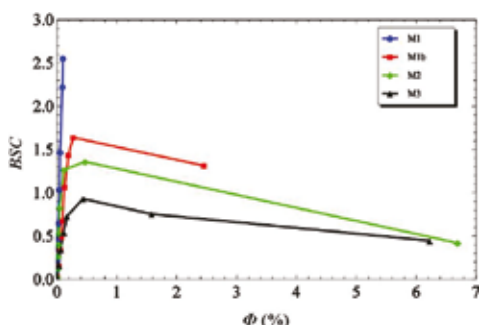


Slika 4. Tipične poškodbe zidovi v pritličju modela pri mejnem stanju porušitve



Slika 5. Navpična zidna vez ob robu zidu v pritličju modela pri končnem mejnem stanju

gotavljajo pričakovano delovanje, čeprav nekoliko odstopajo od zahtev standardov evrokod. Preiskave na potresni mizi so pokazale, da so navpične zidne vezi po nastanku hujših poškodb v nosilnih zidovih uspešno povezale zidovje, preprečile razpadanje z razpokami ločenih delov zidov in zagotovile celovitost obnašanja stavbe vse do porušitve.



Slika 6. Ovojnice odpornosti, dobljene s preiskavo modelov



**YTONG**

**Xella porobeton SI, d.o.o.**  
 Loke pri Zagorju 64  
 1412 Kisovec, SLOVENIJA  
[www.ytong.si](http://www.ytong.si)