

NEDAVNI MOČNI POTRESI IN NAUKI ZA SLOVENIJO

RECENT STRONG EARTHQUAKES AND LESSONS FOR SLOVENIA

akad. prof. dr. Peter Fajfar, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Matej Fischinger, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo,
Ljubljana, Jamova 2

Pregledni članek

UDK: 624.042.7(497.4)

Povzetek | V članku so prikazani osnovni podatki o potresih, ki so se zgodili leta 2009 v L'Aquila, leta 2010 v Čilu in na Haitiju, v letih 2010 in 2011 v Christchurchu in leta 2012 na Japonskem. Opisani so posledice potresov in nauki, ki so pomembni za Slovenijo. Med njimi je najpomembnejše obnašanje armiranobetonskih sten v Čilu, ki je potrdilo, da je treba omejiti velikost tlačnih napetosti v stenah.

Summary | The basic information on earthquakes, which occurred in 2009 in L'Aquila, in 2010 in Chile and Haiti, in 2010 and 2011 in Christchurch, and in 2012 in Japan is summarized. The effects of earthquakes and the lessons that are important for Slovenia are described. Among them the most important is the behaviour of reinforced concrete walls in Chile, which has confirmed that it is necessary to limit the size of the compressive stress in walls.

1 • UVOD

Proučevanje potresov in njihovih posledic omogoča napredek na področju potresnega inženirstva. V zadnjem času se po potresih večinoma opažajo posledice, ki potrjujejo spoznanja, do katerih sta znanost in stroka potresnega inženirstva prišla predvsem v zadnjih trideset letih. Še vedno pa lahko opazimo nepričakovana obnašanja posameznih tipov objektov, ki jih je treba proučiti z znanstvenimi metodami in upoštevati pri nadaljnjem razvoju stroke.

Pred kratkim sta se zgodila dva močna potresa, ki sta še posebno pomembna tudi za Slovenijo. Prvi je potres leta 2009 v L'Aquila v Italiji, ki je pomemben zaradi podobnih značilnosti samega potresa, ki jih lahko pričakujemo tudi pri nas, in zaradi podobnega fonda stavb, kot ga imamo v Sloveniji. Drugi je potres v Čilu leta 2010, ki je pomemben za Slovenijo predvsem zaradi armiranobetonskih stenastih stavb, ki so v Čilu zelo podobne tistim, ki jih gradimo pri nas.

V tem prispevku je podan kratek pregled podatkov o obeh potresih in njihovih posledicah, ki sva si jih avtorja tega prispevka ogledala kmalu po potresih na terenu. Posebno so poudarjene in analizirane tiste posledice, ki so pomembne za Slovenijo. Za primerjavo je podanih tudi nekaj podatkov o potresu na Haitiju leta 2010, ki je zahteval več kot 316.000 človeških žrtev, o seriji potresov v Christchurchu na Novi Zelandiji in o potresu na Japonskem leta 2011, ki je povzročil velik cunami in katastrofalno jedrsko nesrečo. Zaradi večje pomembnosti za Slovenijo in zaradi razpoložljivosti na terenu pridobljenih podatkov je v članku potresoma v L'Aquila in v Čilu posvečena bistveno večja pozornost kot drugim trem potresom.

2 • L'AQUILA

2.1 Osnovni podatki o potresu

Mesto L'Aquila, ki je imelo v času potresa

okrog 67.000 prebivalcev, in okolico (pokrajina Abruzzo v centralni Italiji) je 6. aprila 2009

pred jutrom prizadel močan potres z magnitudo $M_w = 6,3$. Potres, ki je zahteval okrog 300 žrtev, od tega 134 v armiranobetonskih stavbah, se je zgodil pod samim mestom. Pretrgala se je poševna ploskev, ki leži pod mestom L'Aquila v globini šest kilometrov. Ma-

terialna škoda je bila ogromna. Po nekaterih ocenah znaša od 16 do 25 milijard evrov. Med potresom je izgubilo domove okrog 65.000 ljudi, od katerih jih je približno polovica našla zatočišče v šotorih, druga polovica pa je bila nameščena v hotelih ob obali Jadranskega morja. Intenziteta v centru L'Aquile je bila ocenjena na 8,5 po MCS-lestvici. Zgodovinsko jedro L'Aquile, kjer je živel okrog 30.000 prebivalcev, je praktično uničeno, prebivalci so bili izseljeni in se še dolgo ne bodo mogli vrniti na svoje domove. Ta del mesta je bil popolnoma izprazen, dostop je mogoč samo s posebnim dovoljenjem in v spremstvu gasilcev, ki opravljajo naloge civilne zaščite. Hude posledice so bile tudi v nekaterih manjših krajih in vaseh v okolici. V vasi Onna s 700 prebivalci je bilo 40 žrtev. Tu je bil pretrg le tri kilometre pod površino in ocenjena intenziteta je znašala 9,5 po MCS-lestvici. Glavnemu potresnemu sunku je sledila vrsta popotresov. Najmočnejši med njimi (7. aprila 2009) je imel magnitudo $M_w = 5,6$.

Med potresom in popotresi so bile dobljene številne registracije gibanja tal. Osnovni podatki o registracijah, dobljenih v epicentralnem območju, ki imajo pospeške, večje od 0,1 g, so zbrani v preglednici 1. Na žalost v zgodovinskem jedru L'Aquile ni bila dobljena nobena registracija. Vse postaje so bile neposredno nad ploskvijo pretrga. Največji registrirani pospešek tal je znašal okrog 0,65 g, največja hitrost tal pa okrog 43 cm/s. Po veljavnih italijanskih predpisih znaša projektni pospešek tal za območje L'Aquile za kategorijo tal A (skala) 0,261 g. Primerjava pospeškov tal in spektralnih pospeškov kaže, da so bile potresne obremenitve v epicentralnem področju na območju kratkih in srednje dolgih nihajnih časov precej večje, kot so predvidene v novih predpisih. Pri tem je pomembno, da so bile projektne potresne sile po starejših predpisih, ki so bili

uporabljeni pri projektiranju obstoječih konstrukcij na območju L'Aquile, precej manjše od tistih po zdaj veljavnih predpisih. Na srečo je bil potres razmeroma kratek, drugače bi bile posledice še večje.

Po potresu so v L'Aquili izjemno hitro (v osmih mesecih) zgradili okrog 4500 novih stanovanj za brezdomce. Pri gradnji stavb so uporabili potresno izolirane ploščadi, na katere so namestili montažne objekte. Kljub hitri izgradnji dela potrebnih stanovanj se zdi, da popotresna obnova ni najbolj uspešna. Dopisnik ljubljanskega Dnevnika iz Rima je julija 2010 (Mrevlje, 2010) poročal o protestih prebivalcev potresnega območja in med drugim napisal: »Prebivalci v potresu porušene L'Aquile ugotavljajo, da za obnovo ni ne denarja, ne načrtov, ne volje... Skoraj 40.000 prebivalcev še vedno živi v izredno negotovih razmerah... Osemsto let staro mestno središče L'Aquile je še vedno nedostopno, za njegovo obnovo ni niti načrta niti obljubljenega denarja.«

Po potresu se je zgodil tudi edinstven primer v zgodovini, da je javni tožilec v L'Aquili vložil obtožnice proti šestim strokovnjakom in enemu uradniku zaradi suma uboja v povezavi s potresom. V regiji Abruzzo se je v začetku leta 2009 namreč zgodilo več manjših potresov, med njimi je bil najmočnejši 30. marca, ki je imel magnitudo okrog 4. Šest seizmologov in gradbenikov, ki so imeli pomembne zadolžitve v različnih institucijah, se je 31. marca sestalo na srečanju, ki ga je sklicala agencija za civilno zaščito. Namen sestanka je bil ugotavljanje nevarnosti močnega potresa. Na sestanku je bilo med drugim ugotovljeno, da ni razloga za sklepanje, da bi niz majhnih potresov lahko predstavljal uvod v večji potres, in da je verjetnost za močan potres v območju majhna, vendar pa te možnosti ni mogoče izključiti. Na novinarski

konferenci, ki je sledila sestanku, je državni uradnik nerodno tolmačil sklepe sestanka, češ da strokovnjaki pravijo, da nevarnosti močnega potresa ni, saj gre za običajno sproščanje energije. Skupina prebivalcev je kasneje sporočila, da je več stanovalcev zaradi pogostih manjših potresov razmišljalo, da bi zapustilo svoje domove, vendar so si zaradi mnenja strokovnjakov premislili. Zato so vložili uradno prošnjo, v kateri so tožilce prosili, da primer raziščejo.

Primer je izzval proteste strokovnjakov po vsem svetu, ki se ukvarjajo s potresi, saj potresov za zdaj še ni mogoče napovedati z ustrežno zanesljivostjo. Nismo pa zasledili, da bi ugotavljali odgovornost projektantov objektov, ki so se med potresom porušili.

2.2 Obnašanje gradbenih objektov

Po statističnih podatkih je bilo leta 2001 od vseh stavb v območju L'Aquile 24 % armiranobetonskih in 68 % zidanih stavb, medtem ko za 8 % stavb material ni bil določen. 55 % stavb je bilo zgrajenih po letu 1945. Samo 5 % stavb je imelo več kot tri etaže (Ricci et al., 2011). Od 72.000 objektov, ki so jih pregledali do konca avgusta 2009, jih je imelo več kot 50.000 poškodovano konstrukcijo ali polnila. Med njimi jih je imelo okrog 28.000 poškodbe stopnje 2 ali več na petstopenjski lestvici (od 0 za nepoškodovane do 5 za porušene objekte). Okrog 17.000 jih je imelo poškodbe stopnje 3 ali več. Malo več kot polovica vseh pregledanih objektov je bila uporabnih. Med zidanimi objekti je bil delež hudo poškodovanih objektov približno 2,5-krat večji kot med armiranobetonskimi objekti (Dolce et al., 2009).

Jakost potresa, merjena s pospeški, je bila tako visoka, da se je velik del konstrukcij poškodoval. Po drugi strani je bilo število popolnih porušitev inženirsko grajenih konstrukcij razmeroma majhno, čeprav je bila duktilnost velikega dela konstrukcij (nearmirane zidane in stare armiranobetonske konstrukcije) majhna. To lahko pripišemo kratkemu trajanju potresa. Analiza akcelorogramov je pokazala, da je trajanje močnega dela potresa (to je časa, v katerem je prešlo v konstrukcije 90 % celotne energije) znašalo tri sekunde do deset sekund.

Zidane stavbe, ki predstavljajo večino stavb v L'Aquili, so bile zidane v različnih časovnih obdobjih. Kvaliteta materialov in gradnje je zelo različna. Številne stavbe so bile adaptirane na različne načine. Detaljne analize njihovega obnašanja je mogoče najti v publikacijah, navedenih v spisku literature.

Postaja	Oznaka	Vrsta tal (EC8)	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)
V. Aterno-Centro Valle	AQV	B	646	42,8
V. Aterno-Colle Grilli	AQG	A	507	35,5
V. Aterno-Fiume Aterno	AQA	B	436	32,0
L'Aquila Parcheggio	AQK	B	347	36,2
L'Aquila Castello	AQU	B	310	35,0
Gran Sasso	GSA	A	149	9,8

Preglednica 1 • Maksimalni pospeški (PGA) in hitrosti tal (PGV) v epicentralnem območju (Çelebi et al., 2010)

Najpomembnejša ugotovitev, ki jo je bilo mogoče dobiti pri ogledu posledic potresa, je potrditev znanega dejstva, da pri starih zidanih objektih k potresni odpornosti pomembno prispeva povezava zidov z železnimi ali jeklenimi vezmi. Na fasadah se je videlo, da imajo železne ali jeklene vezi številne stavbe v starem mestnem jedru L'Aquile. Stavbe so bile sicer poškodovane, ni pa bilo izpadanja zidov zunaj njihove ravnine in posledično rušenja objekta (slika 1).

Obstoječe armiranobetonske stavbe so bile projektirane po predpisih, ki so bili veljavni v različnih obdobjih in so predvidevali bistveno nižje potresne obremenitve, kot so predpisane v veljavnih italijanskih predpisih in v Evrokodu 8. Tudi zahteve za zagotavljanje duktilnosti so bile bistveno blažje ali pa jih sploh ni bilo. Kljub temu in kljub visokim pospeškom je bilo popolnih porušitev neduktilnih armiranobetonskih stavb razmeroma malo. K temu so gotovo v splošnem prispevala tudi polnila, ki v začetni fazi precej prispevajo k togosti in nosilnosti konstrukcije ter k njeni sposobnosti za sipanje energije. To običajno, predvsem pri kratkem trajanju potresa, prispeva k večji potresni odpornosti konstrukcije, če se zaradi vpliva polnil ne pojavita mehka etaža ali velika torzija, ki lahko povečata ranljivost konstrukcije. Pri daljšem trajanju močnega gibanja tal je vpliv polnil pri neduktilnih konstrukcijah manj ugoden ali celo neugoden. Po drugi strani so poškodbe polnil, ki se lahko pojavijo že pri manjših potresih, zelo moteče ali celo nesprejemljive z ekonomskega in socialnega vidika. Zlasti pogoste so bile poškodbe dvoslojnih fasadnih zidov z vmesno plastjo zraka zaradi izolacije (slika 2). Lahko se zgodi, da objekt s praktično nepoškodovano konstrukcijo po potresu postane neuporaben. Za zmanjšanje poškodb polnil je zato pomemben kriterij mejnega stanja uporabnosti, ki v sodobnih predpisih omejuje velikost etažnih pomikov.

Spet se je potrdilo, da so najranljivejši objekti z nepravilno zasnovo, predvsem s tako imenovanim mehkim pritličjem. Med redke primere popolnih porušitev armiranobetonskih stavb sodi stavba hotela Duca Degli Abruzzi v L'Aquili (slika 3), ki predstavlja izrazit primer mehkega pritličja. Porušitev stanovanjske stavbe (slika 4) v Pettinu v bližini centra L'Aquile se je zgodila predvsem zaradi kombinacije oslabiljenega pritličja zaradi garaž, nepravilnega tlora in posledičnih torzijskih vplivov ter pomanjkanja stremenske armature in neduktilnih detajlov (Verderame, 2011). Objekt je imel armiranobetonsko konstrukcijo s



Slika 1a • Železne in jeklene vezi so zagotovile soliden odziv zidane stavbe v starem jedru L'Aquile



Slika 1b • Detajl pred kratkim vgrajenih jeklenih vezi (dodatno k že obstoječim – železnim)



Slika 2 • Porušitev dvoslojne fasadne stene



Slika 3 • Hotel Duca Degli Abruzzi v L'Aquili pred potresom (levo, iz Google Maps Street View) in po njem (desno)

polnili. H krhkim porušitvam stebrov so prispevale tudi povečane strižne sile v stebrih zaradi vpliva polnil. Poškodbe zaradi vpliva togega parapeta, ki je skrajšal svetlo višino stebrov, smo videli tudi v novejšem stanovanjskem objektu (slika 5).

V L'Aquilli smo opazili tudi več težko poškodovanih neduktilnih sten (slika 6). K poškodbam je prispevalo več dejavnikov. V prvi vrsti je bila, podobno kot je bilo to značilno za slovensko prakso pred črnogorskim potresom, vodoravna armatura bistveno šibkejša od navpične. Tanke vzdolžne palice niso mogle preprečiti uklona razmeroma debelih in na široko razporejenih navpičnih palic. Na vogalih sten ni bilo koncentrirane armature v obliki skritih stebrov. Tako tudi vodoravna armatura ni bila ustrezno sidrana – samo s kljuko pod kotom 90 stopinj v krovni plasti betona. Videti je bilo, da je bil delež prereza sten v primerjavi s površino floris precej majhen.

Večina industrije v mestu je delovala v montažnih industrijskih halah, ki so podobne našim. Globalno obnašanje teh konstrukcij je bilo dobro (slika 7). Verjetno so k temu pripomogli tudi dolgi nihajni časi teh stavb, ki so bili zunaj resonančnega območja potresa. Vendar je potres opozoril na velik problem pravilnega konstruiranja in dimenzioniranja pritrditev fasadnih panelov na konstrukcijo. Opazili smo veliko močnih poškodb pritrditvenih elementov, ki so povsem enaki, kot se uporabljajo pri nas, in več zelo nevarnih porušitev fasadnih panelov (slika 8).

2.3 Nauki

Potres v L'Aquilli s stališča obnašanja konstrukcij ni pokazal veliko novega, z izjemo nevarnih porušitev pritrditvenih elementov za fasadne panele v armiranobetonskih montažnih halah. Potrdil je znana dejstva, da je gibanje tal lahko precej močnejše od predvidenega gibanja (večji pospeški, večje potresne obremenitve), da je pri zidanih stavbah zelo pomembna povezava zidov, da je obnašanje starih neduktilnih objektov večinoma slabo, da je škoda pri njih zelo velika, tudi če ni popolne porušitve, da nepravilnosti po višini (predvsem mehko pritličje) in po florisu objekta zelo poslabšajo potresni odziv. Zelo izrazito pa je pokazal na katastrofalne socialne in ekonomske posledice zaradi velike ranljivosti mest z velikim številom starih objektov. Ob upoštevanju dejstva, da se potres podobne ali večje jakosti lahko zgodi tudi pri nas, bi morali v Sloveniji pri načrtovanju zaščite proti posledicam potresa upoštevati tudi ta nauk potresa v L'Aquilli.



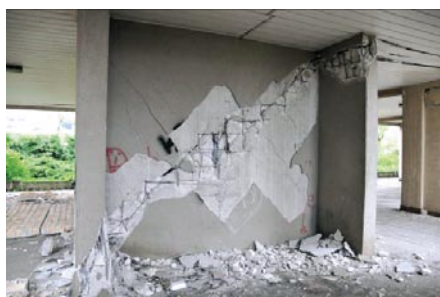
Slika 4a • Porušitev pritličja stanovanjskega bloka v Pettinu



Slika 4b • Neduktilni detajli brez zadostnih stremen v stebrih ob garažni odprtini



Slika 5 • Strižna porušitev stebra ob togem parapetu/ogradi



Slika 6a • Strižna porušitev stene v pritličju stanovanjske stavbe



Slika 6b • Neduktilni konstrukcijski detajli armature v steni



Slika 7 • Nepoškodovana montažna hala v gradnji. Tudi že zgrajena hala v ozadju ni bila poškodovana



Slika 8 • Porušitev montažnih panelov v montažni hali (Vir: ASSOBBETON)

3 • ČILE

3.1 Osnovni podatki

V Čilu se je 27. februarja 2010 zgodil eden najmočnejših potresov v novejši zgodovini z magnitudo $M_w = 8,8$. Dolžina pretrga je znašala okrog 500 kilometrov. Zaradi velike magnitude in s tem povezane velike dolžine pretrga je bilo trajanje močnega dela potresa zelo dolgo (več kot eno minuto, v območju mesta Concepcion okrog dve minuti). To je bila bistvena razlika v primerjavi s potresom v L'Aquili, kjer je bilo trajanje gibanja tal bistveno krajše. Intenziteta potresa je bila ocenjena na 9 ali manj, maksimalni vodoravni pospeški tal v Concepcionu so bili primerljivi s tistimi v L'Aquili (65 % g), medtem ko so v Santiagu segali do 0,3 g, z izjemo ene registracije z 0,56 g. Navpični pospeški so bili večinoma nekoliko manjši od vodoravnih. V nasprotju s potresom v L'Aquili, kjer so bile posledice omejene na razmeroma majhno območje, je potres v Čilu zaradi velike dolžine pretrga prizadel izredno veliko ozemlje. Porušeni ali močno poškodovanih je bilo okrog 370.000 objektov, smrtnih žrtev pa je bilo več kot petsto, kar je razmeroma malo za potres takšnih razsežnosti. K temu je prispevalo dejstvo, da so v Čilu močni potresi zelo pogosti, zato je temu prilagojena gradnja, pri čemer se strogo upoštevajo predpisi. Na prizadetem območju je bilo med stavbami, grajenimi med letoma 1989 in 2009, blizu 10.000 stavb z več kot tremi etažami, od tega blizu 2000 stavb z več kot devetimi etažami. Od vseh teh stavb se je samo ena popolnoma porušila, uničenih (delno porušeni ali nepopravljivo poškodovanih) pa je bilo okoli 50 stavb. Pomembno je, da je med njimi tudi nekaj povsem novih. Te poškodbe lahko pripišemo pomanjkljivostim v predpisih, ki so dovoljevali projektiranje in gradnjo armiranobetonskih stenastih stavb z neustrezno zasnovo in neustreznimi konstrukcijskimi detajli. Ta nauk potresa v Čilu je zelo pomemben tudi za Slovenijo, kjer se uporablja zelo podobni konstrukcijski sistemi.

3.2 Obnašanje armiranobetonskih sten

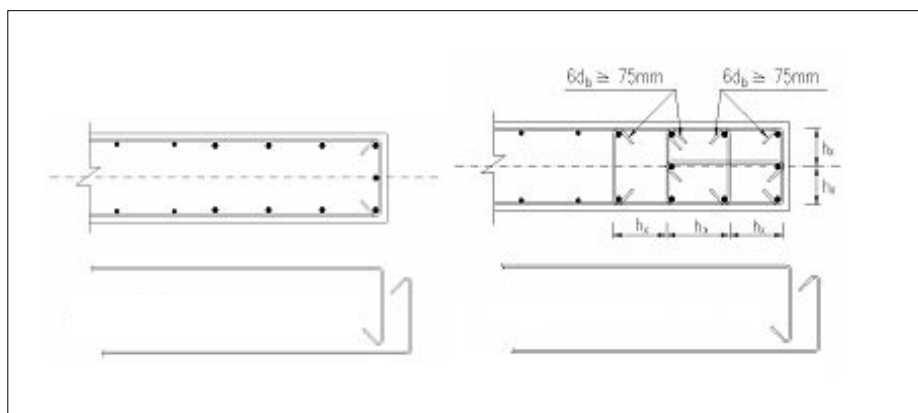
Ko je leta 1985 Čile prizadel močan potres, so raziskovalci ((Wood, 1991), (Wallace, 1993)) poročali o zelo dobrem obnašanju stavb s precej tankimi srednjeduktilnimi stenami. Ta poročila so dvignila samozavest tudi v Sloveniji, kjer gradimo zelo podobne stene. Zato so bila poročila o nekaterih težko poškodovanih stenastih konstruk-

cijah po potresu leta 2010 zelo neprijetno presenečenje. Res je bila magnituda potresa izjemna, vendar je bila intenziteta primerljiva s tisto leta 1985. Ta strah vznepujoča poročila so bila tudi temeljni razlog, da sta se avtorja odpravila v Čile.

Izkazalo se je, da je bil vzrok za precej številne porušitve sten razmeroma jasen in preprost. Konstrukcijski sistem in detajle, ki so bili zelo dobri za zmerno visoke stavbe s približno desetimi etažami, ki so se gradile v prejšnjih desetletjih, so zaradi velikega povpraševanja v

času ekonomskega razcveta začeli uporabljati tudi pri stavbah višine 20 etaž in več. Ob tem so zaradi pridobivanja čiste tlorisne površine včasih celo zmanjševali delež prereza sten v primerjavi s površino tlorisa. Obdržali so tudi majhne debeline sten okoli 20 cm. Za preteklo prakso je bilo značilno duktilno obnašanje, saj se je armatura plastificirala, ko tlačna cona še zdaleč ni bila izkoriščena. Zato srednjeduktilni detajli objekta tlačne cone niso bili problematični. Z velikim povečanjem tlačnih obremenitev pa so detajli postali kritični, in porušili so se tlačni vogali v kombinaciji s tlačnim strižnim lomom.

Čeprav se morda zdi, da ta ugotovitev za Slovenijo, kjer še vedno prevladujejo precej nizke



Slika 9 • Detajli izvedbe vogalne armature sten v čilenski praksi



Slika 10a • Razprtje neučinkovito sidrane vodoravne armature na vogalih močno tlačno obremenjenih sten



Slika 10b • Značilen pretrg vogalne navpične armature zaradi posledja plastifikacije in uklona



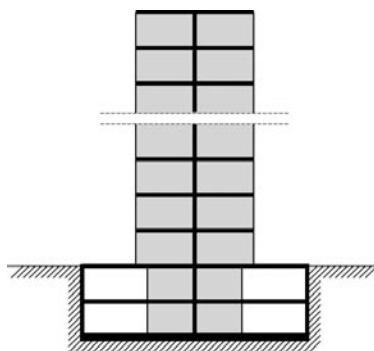
Slika 10c • Porušitev in uklon palic na mestu preklopa armature



Slika 10d • Uklon pravokotno na ravnine relativno tanke stene



Slika 11 • Značilna porušitev sten v prvi kletni etaži



Slika 12 • Značilna zasnova po višini stavb



Slika 13a • Stavba Alto Rio v času zgraditve leta 2008



Slika 13b • Stavba se je med potresom prelomila v pritličju in prevrnila

stavbe do deset etaž, ta problem ni kritičen in relevanten, je treba upoštevati, da je pri nas načrtovanih več precej visokih stavb. Poleg tega v arhitekturi obstajajo želje (celo pritiski) po radikalnih zmanjšanih deleža sten v tlorisu. V nasprotju s starim predpisom Evrokod namreč ne določa minimalnega deleža sten v tlorisu. Na srečo Evrokod v nasprotju z dosedanjimi predpisi v Čilu omejuje maksimalni tlak zaradi osne obtežbe v stenah (določilo je podobno omejitvi, ki smo jo imeli že v starih predpisih).

Značilni detajli armature na robovih sten v Čilu so prikazani na sliki 9. Poleg teh uporabljajo tudi rešitve z U-stremeni, ki so enake kot v naši praksi.

S slike 9 je razviden značilen detajl sidranja vodoravne armature v vogalih s kljukami pod kotom 90 stopinj (večkrat znaša kot zakrivitve ene od palic tudi 180 stopinj). Povsem enak detajl je narisani tudi na sliki 5.8 v Evrokodu 8-1. Vendar se je ta rešitev pri večjih tlačnih obremenitvah vogalov sistematično pokazala kot neustrezna. Krovna plast betona je odpadla, sidranje armature je postalo neučinkovito in vodoravna armatura se je razprla (slika 10a). Sledil je uklon vzdolžnih palic. Sosledje plastifikacije in uklona vzdolžnih palic na vogalih sten je pogosto pripeljalo do pretrga teh palic (slika 10b). Takšne porušitve so bile še zlasti pogoste na mestih prekopov armature (slika 10c). Iz prikazanega lahko zaključimo, da je treba vzdolžno armaturo v močno tlačno obremenjenih stenah sidrati v objeto betonsko jedro. Čilenski potres je potrdil tudi nevarnost uklona močno tlačno obremenjenih tankih sten zunaj ravnine stene (slika 10d). Priporočamo nadzor minimalne potrebne debeline sten po postopkih iz literature (na primer: poglavje 5.4.3.c v knjigi Paulay in Priestley, 1992).

Najbolj značilne so bile strižno-tlačne porušitve sten v prvi kletni etaži višjih stavb (slika 11). Analiza teh poškodb je zelo poučna tudi za našo prakso.

Značilna zasnova takšne stavbe je prikazana na sliki 12. Projektanti so očitno pričakovali, da bodo močne obodne stene v kleti prevzele večino obtežbe in razbremenile stene jedra stavbe. Zato so tudi dopuščali določeno redukcijo števila in dimenzij sten v kleti, ki je omogočala večjo funkcionalnost garaž. Te redukcije so bile običajno relativno majhne (na primer: zmanjšanje dolžine stene s šest metrov na pet), vendar kljub temu pogosto usodne. Stene v prvi kleti so namreč izjemno obremenjene in prenos na obodne stene se izvrši šele globlje v kleti. V prvi vrsti je na mestu velikega skoka v togosti stena obre-



Slika 14a • Pogled na mesto preloma v pritličju stavbe Alto Rio

menjena z veliko prečno silo, ki jo zahteva prenos obremenitve na obodne stene. Upogibni moment na vrhu kletne stene je enak kot v pritličju spodaj, tlaki pa se povečajo zaradi dodatne teže ene etaže in morebitnih redukcij v številu in dimenzijah sten.

Opišimo še edino popolno porušitev visoke stenaste stavbe Alto Rio, ki je bila deležna velike medijske pozornosti. Alto Rio je bila povsem nova 15-nadstropna armiranobetonska stanovanjska stavba (slika 13a), ki je bila zgrajena leta 2008 v mestu Conception v bližini reke na značilnih mehkih tleh. Imela je dve podzemni etaži. Pretežno stenasta stavba v kombinaciji z okviri se je med potresom v pritličju dobesečno prelomila in prevrnila (slika 13b). Po prevrnitvi konstrukcija v višjih etažah (z izjemo še enega preloma proti vrhu



Slika 14b • Vsa armatura v pritličju je bila preklopljena na isti višini na mestu preloma

stavbe zaradi udarca ob tla) niti ni bila zelo poškodovana. Od 87 ljudi, ki so bili v času potresa v stavbi, jih je 79 preživel. 52 se jih je celo samih rešilo iz stavbe.

Vzroki porušitve še niso povsem razjasnjeni. Vendar lahko sklepamo na kombinacijo več dejavnikov. To so že opisani mehanizmi poškodb v visokih tankih stenah, delno mehko in neregularno pritličje ter slaba tla na lokaciji. Opazili pa smo še eno pomembno podrobnost. Vsa armatura v stebrih pritličja je bila preklopljena na istem mestu (slika 14). To mesto je sovpadalo z mestom preloma. Za konec ovrednotimo opažanja v Čilu še s stališča zahtev Evrokoda 8 in naše dosedanje gradbene prakse. Ugotovimo lahko, da bi dosledno upoštevanje določil Evrokoda 8 (zlasti tistih za stene visoke duktilnosti)

preprečilo velik del problemov, ki smo jih opazili po čilenskem potresu. Predvsem je pomembno, da Evrokod določa maksimalno dovoljeno normirano tlačno silo v steni ($0,35$ za stene visoke duktilnosti in $0,40$ za stene srednje stopnje duktilnosti). Pri stenah visoke stopnje duktilnosti, delno pa tudi pri srednje duktilnih stenah, je treba preveriti duktilnost zaradi kombinacije osne sile in momenta z neposredno ali posredno kontrolo tlačnih deformacij in učinkovitosti objetja vogala stene. Predpisane so minimalne debeline robnih elementov. Predpisani so pogoji za gostoto prečne armature, ki naj bi učinkovito preprečili uklon tlačne armature na mestu plastičnih členkov. V členu 5.8.1 (5) je tudi zahtevano, da se pri stenah, ki so vpete v kleti škafastega tipa, kritično območje razteza še v dolžini h_{cr} pod nivojem stropa kleti. Stržna sila se določi z načrtovanjem nosilnosti. Pogrešamo pa eksplicitno omejitev minimalnega deleža sten. Poleg tega je detajl sidranja vodoravne armature v shemi na sliki 5.8 v Evrokodu 8 neustrezen.

Za našo dosedanje prakso lahko rečemo, da je upoštevala vrsto dobrih določil, ki gotovo zmanjšujejo nevarnost porušitev, ki smo jih opazili v Čilu. Omejen je bil nivo tlačnih naporov in določen minimalni dovoljeni delež sten v florisu. Določena je bila tudi precej gosta prečna armatura ob vpetju sten. Vsekakor pa predpisi niso vsebovali dovolj strogih določil za varovanje močno tlačno obremenjenih vogalov sten. Zato lahko podobno kot v Čilu zaključimo, da je bila praksa v Sloveniji dobra za malo ali zmerno obremenjene stene (z gotovostjo so to na primer stene v stavbah do pet etaž, če je delež sten v vsaki smeri vsaj $1,5$ do 2%). Če pa bi obstoječi konstrukcijski sistem brez bistvenih sprememb prakse hoteli uporabiti pri visokih stavbah (na primer 15 etaž) in/ali bi močno zniževali delež prereza sten, bi lahko pričakovali podobne probleme, kot smo jih zaznali v Čilu.

4 • HAITI

Potres z magnitudo 7, ki je 12. januarja 2010 prizadel Haiti, predstavlja eno največjih naravnih in humanitarnih katastrof v novejši zgodovini. Zahteval je več kot 316.000 žrtev. Okrog 1,5 milijona ljudi (približno 15% celotne populacije Haitija) je bilo neposredno prizadetih. Ocenjeno je, da je bilo porušenih več kot 105.000 hiš, več kot 208.000 pa jih je bilo

poškodovanih. Med drugim je bilo porušenih ali močno poškodovanih okrog 1300 šol, več kot 50 zdravstvenih domov in bolnic ter 13 od 15 pomembnih vladnih objektov, vključno s predsedniško palačo. Škoda je ocenjena na osem milijard ameriških dolarjev, kar predstavlja več kot 120% bruto nacionalnega produkta. Predvsem je bilo prizadeto glavno

mesto Port-au-Prince, kjer živi med 2,5 in tri milijone prebivalci. Žarišče potresa z ocenjeno globino okrog 13 kilometrov je bilo okrog 20 kilometrov oddaljeno od mesta. Ker na Haitiju ni bilo seizmoloških instrumentov, je težko oceniti vrednosti fizikalnih parametrov gibanja tal. Večina objektov je grajenih brez formalnih načrtov, kvaliteta gradnje je na splošno slaba. Potresi podobne jakosti so se na Haitiju že dogajali v preteklosti v letih 1701, 1751, 1770 in 1860. Ker je od zadnjega močnejšega potresa preteklo že 150 let, so odgovorni

očitno – v obilju drugih problemov, ki tarejo eno od najrevnejših držav na svetu – pozabili na predpise o potresnoodporni gradnji.

Čeprav bi se jakost najmočnejšega potresa pri nas lahko približala jakosti potresa na Haitiju, naše razmere seveda niso primerljive

z razmerami na Haitiju. Vseeno pa je vedno treba imeti v mislih, da dejstvo, da dolgo ni bilo močnega potresa, ne pomeni, da se tak potres ne bo več zgodil.

5 • CHRISTCHURCH

V Christchurchu se je zgodila serija potresov, med katerimi je bil najmočnejši tako imenovani potres Darfield 4. septembra 2010 z magnitudo 7,1, največje posledice pa je imel (po)potres 22. februarja 2011, ki je imel magnitudo 6,3. Pomembna popotresa sta se zgodila še 13. junija 2011 in povečala poškodbe na objektih, poškodovanih v predhodnih potresih. Potresi so se zgodili na prelomu, ki ga niso poznali.

Potres Darfield se je zgodil na globini okrog deset kilometrov približno 40 kilometrov zahodno od Christchurcha, ki ima okrog 375.000 prebivalcev. V bližini pretrga so bili izmerjeni veliki pospeški. Največji izmerjeni pospešek tal je znašal 1,24 g v navpični smeri, povprečje dveh vodoravnih pospeškov na isti postaji pa je znašalo 0,74 g. Pospeški v bližini pretrga so bili večji od projektnih pospeškov. V Christchurchu so spektralni pospeški v območju nihajnih časov pod 1,5 s dosegali okrog 70 % projektnih vrednosti, pri nihajnih časih nad 1,5 s pa so dosegali projektne vrednosti. Potres, ki se je zgodil ponoči, ko je bilo središče mesta, kjer so najranljivejše stare

zidane stavbe, prazeno, ni povzročil žrtev. Materialna škoda je nastala predvsem zaradi zelo razširjene likvifikacije. Velika škoda je nastala tudi zaradi poškodb nekonstrukcijskih elementov in opreme v stavbah. Škoda je bila ocenjena na štiri milijarde NZ dolarjev.

Večina inženirsko grajenih objektov (angl. »engineered structures«), tudi starejših, je armiranobetonskih in lociranih v Christchurchu, kjer je bila intenziteta potresa ocenjena na VII–VIII po MMI-lestvici. Obnašanje konstrukcij teh objektov je bilo v splošnem dobro, tudi zaradi razmeroma nizkih pospeškov, pogosto pa so se pojavljale poškodbe nekonstrukcijskih elementov in opreme. Na primer: porušili so se regali v dveh regionalnih središčih, zaradi česar so bile uničene enomesečne zaloge hrane za Christchurch.

Obnašanje starih nearmiranih zidanih konstrukcij, ki večinoma niso imele povezanih zidov, je bilo slabo, saj je bila približno polovica takšnih objektov močno poškodovanih. V trgovskem delu središča so bili zaradi izpadanja zidov ogroženi tudi novejši objekti v sosesčini poškodovanih objektov. Ekipa EERI

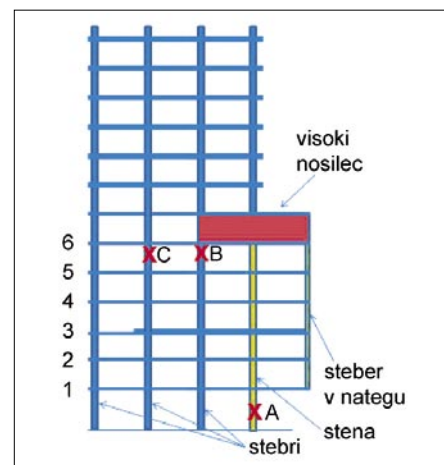
je v svojem poročilu napisala: »Zidovi, ki so padali na pločnike, na restavracije na prostem in na sosednje manjše stavbe, bi povzročili veliko žrtev, če bi se potres zgodil podnevi ali zgodaj zvečer.« To se je dejansko zgodilo februarja 2011.

Po potresu je mestni svet v Christchurchu (Christchurch City Council, 2010) sprejel odlok, po katerem morajo lastniki okrog 7600 potresno neodpornih stavb v 15 do 20 letih ugraditi stavbe tako, da bo njihova potresna odpornost ustrezala vsaj 67 % potresne odpornosti, ki jo zahtevajo predpisi za nove stavbe. Kot potresno neodporne so definirane stavbe, katerih potresna odpornost znaša manj kot 33 % odpornosti, ki jo zahtevajo predpisi za nove stavbe. Zahteva ne velja za stanovanjske hiše, ki imajo manj kot dve nadstropji in manj kot tri stanovanja.

Potres, ki se je zgodil 22. februarja 2011, je bil dejansko močan popotres, ki je sledil potresu 4. septembra 2010. Čeprav je imel manjšo magnitudo (6,3, kar pomeni približno 16-krat manjšo sproščeno energijo kot pri magnitudi 7,1), so bile njegove posledice zaradi bližine središča Christchurcha (oddaljenost približno šest kilometrov) bistveno večje. Poleg več sto nearmiranih zidanih stavb so se porušili dva večetažna armiranobetonska poslovna objekta in garažna hiša. Umrlo je 184 ljudi, materialna škoda je ocenjena na 20 milijard



Slika 15 • Popolna porušitev stavbe televizije Canterbury. Med glavnimi vzroki za porušitev je bil slab stik etažnih plošč z jedrom. (Vir: Ken Elwood)



Slika 16 • Prerez konstrukcije hotela Grand Cancellor. Porušili so se stena na mestu A v prečni smeri in stebri na mestih B in C. (Vir: Ken Elwood)



Slika 17 • Porušitev zaradi preboja prednapetih etažnih plošč v garažni hiši (Vir: Ken Elwood)

NZ dolarjev. Maksimalni registrirani pospešek tal je znašal 2,2 g. Trajanje močnega gibanja tal je bilo razmeroma kratko in je v središču mesta znašalo okrog osem sekund. Spektralni pospeški v središču mesta so večinoma presegali vrednosti v elastičnem spektru za povratno dobo petsto let, deloma pa tudi za povratno dobo 2500 let po veljavnih predpisih. Spektralni pospeški tega potresa so bili v središču mesta precej večji od spektralnih pospeškov potresa Darfield v območju nihajnih časov do 2,0 s, pri višjih nihajnih časih pa so bile vrednosti spektralnih pospeškov obeh potresov podobne.

Potres je spet povzročil obsežno likvifikacijo, padanje skal in plazove, kar je poškodovalo na tisoče hiš in infrastrukturo. Katastrofalne posledice je imela porušitev stavbe televizije Canterbury (CTV), ki je povzročila približno polovico vseh žrtev potresa. Nosilno konstruk-

cijo šestetažne armiranobetonske stavbe, ki je bila grajena sredi osemdesetih let prejšnjega stoletja, sta predstavljala stena z odprtinami in jedro. Podrta se je celotna stavba razen jedra (slika 15). Pomemben razlog za popolno porušitev je bil slab prenos horizontalnih obremenitev z etažnih plošč na jedro.

Močno je bil poškodovan tudi hotel Grand Chancellor. Prerez konstrukcije na sliki 16 kaže, da je bil del fasade obešen na visokem nosilcu. Takšne zasnove konstrukcij so v arhitekturi zelo priljubljene tudi pri nas. Zelo slab odziv te konstrukcije (porušili so se stena na mestu A v prečni smeri in stebri na mestih B in C) pa opozarja na potrebno znanje in veliko previdnost pri uporabi takšnih zasnov na potresnih območjih.

Porušila se je tudi armiranobetonska garažna hiša, kjer se je zgodila porušitev zaradi preboja prednapetih etažnih plošč (slika 17).

Porušeni ali močno poškodovanih je bilo na stotine nearmiranih zidanih stavb, dva- do trikrat več kot med potresom Darfield. Med njimi so bile tudi takšne, ki so bile utrjene pred potresi. Mnoge stavbe, ki so nepoškodovane ali rahlo poškodovane prenesle potres Darfield, so se porušile med tem potresom. V središču mesta je bilo med nearmiranimi zidanimi stavbami kar 62 % označenih rdeče (porušeno ali hude poškodbe) in samo 12 % zeleno (uporabno). Pri armiranobetonskih stavbah jih je bila polovica uporabnih, 19 % pa jih je bila označenih rdeče. Velik del središča mesta, ki obsega okrog dvesto betonskih in petsto do šeststo zidanih stavb, je bil popolnoma zaprt za pristop.

13. junija 2011 sta se zgodila dva močna popotresa z magnitudama 5,6 in 6,3, ki sta povzročila dodatne poškodbe. Bilo je 46 ranjenih, dodatna škoda je znašala približno šest milijard NZ dolarjev. Maksimalni pospeški tal so spet dosegli zelo visoke vrednosti (2,13 g v epicentralnem področju, 0,78 g v središču).

Nova Zelandija ima sodobne predpise za gradnjo novih objektov, kot večinoma povsod po svetu pa so problematični obstoječi objekti. Ker je bil Christchurch ocenjen kot mesto z zmerno potresno nevarnostjo, ni imel posebnega programa za utrjevanja starih zidanih objektov, ampak so lokalne oblasti le spodbujale k prostovoljnemu utrjevanju ogroženih objektov. Potresi, ki so povzročili bistveno večje pospeške od pričakovanih, so ohromili mesto Christchurch, ki bo potrebovalo dolga leta, da si bo opomoglo. Tako kot v Sloveniji je tudi v Christchurchu povratna doba močnih potresov razmeroma dolga, kar neugodno vpliva na pripravljenost za utrjevanje potresno neodpornih obstoječih objektov.

6 • JAPONSKA

Območje Tohoku na Japonskem je 11. marca 2011 prizadel potres z magnitudo 9. To je bil najmočnejši potres, zabeležen na Japonskem, in peti najmočnejši potres v zabeleženi zgodovini človeštva. Žarišče potresa je bilo v morju okrog 72 kilometrov od obale v globini okrog 32 kilometrov. Najbližje večje mesto je Sendai, ki je oddaljen okrog 130 kilometrov od žarišča. Pred potresom je bilo več popotresov, glavnemu potresu pa je sledilo več sto popotresov. Sistem za zgodnje obveščanje je zaznal potres in milijonom poslal sporočilo, ki je v Tokio

(oddaljenost okrog 370 kilometrov) prispelo približno eno minuto pred potresnimi valovi. Potres je povzročil cunami. Največja višina valov, ki so dosegli obalo, je znašala 39 metrov. Največji izmerjeni pospešek tal je znašal 2,7 g (v vodoravni smeri). Zaradi potresa in cunamija je umrlo več kot 15.000 ljudi (od tega več kot 90 % zaradi utopitve), več kot 4000 jih je bilo maja 2011 še pogrešanih. Popolnoma uničenih je več kot 45.000 objektov, močno poškodovanih je več kot 140.000. Celotna materialna škoda je ocenjena na okrog 300 milijard ameriških

dolarjev, kar predstavlja največjo škodo zaradi naravne nesreče v zgodovini.

Največji del katastrofalnih posledic potresa je povzročil cunami. Med drugim je cunami povzročil jedrsko nesrečo. Več jedrskih elektrarn se je zaradi potresa samodejno ustavilo. Pri elektrarni Fukušima I so valovi cunamija, ki so dosegli višino do 14 metrov, zaradi prenizkih obrambnih zidov zalili rezervne dizelske generatorje, odpovedali so sistemi hlajenja, posledično pa se je talila srediha v treh enotah elektrarne. Večkrat je eksplodiralo, eksplozije so poškodovale ovoje reaktorjev in radioaktivne snovi so prehajale v okolico. Evakuiranih je bilo več kot 200.000 prebivalcev v širši okolici reaktorja.

Samo gibanje tal med potresom kljub visokim pospeškom tal, ki so bili izmerjeni na nekaterih mestih (do 2,7 g), večinoma ni povzročilo rušenj objektov.

Potresa takšne jakosti, kot je bil potres v

Tohoku, in cunamijev v Sloveniji na srečo ne pričakujemo. Pomembna je potrditev znanega dejstva, da potresnoodporna gradnja zmanjšuje posledice potresa. Pokazalo pa se je tudi, da je potres lahko vedno večji, kot ga

pričakujemo in upoštevamo pri projektiranju, zato je treba vedno zagotoviti določeno dodatno varnost. Predvsem pri industrijskih objektih za varnost ni pomembna samo konstrukcija, ampak tudi oprema.

7 • ZAKLJUČKI

Potresi, ki jih obravnavamo v tem članku, so imeli zelo različne jakosti. Potresi z magnitudo 9 ali blizu nje v Sloveniji glede na njene geotektonske značilnosti niso mogoči. Potresi na Haitiju in potres Darfield z magnitudo 7 predstavljajo po predvidevanjih seizmologov zgornjo mejo jakosti potresov v Sloveniji. Nedvomno pa lahko pri nas pričakujemo potrese takšne jakosti, kot so bili potresi v L'Aquila in popotresi v Christchurchu. Glede na precejšno podobnost stavbnega fonda v Sloveniji in Italiji lahko pričakujemo tudi podobne posledice močnega potresa v Sloveniji (če se bo ta na primer zgodil v bližini Ljubljane), kot so bile v L'Aquila.

Bistvene razlike med posledicami potresov na Haitiju in v Čilu jasno kažejo na izjemno pomembnost potresnoodporne gradnje. Katastrofa, ki se je zgodila na Haitiju, pri nas zaradi neprimerno boljše gradnje ni mogoča. Dejstvo pa je, da je v Sloveniji veliko število objektov, predvsem starejših, ki so potresno premalo odporni in so ogroženi pri močnejšem potresu. Vsaj najpomembnejše med temi objekti bi bilo treba potresno utrditi.

Kljub vsem raziskovalnim dosežkom, ki smo jim bili priča v zadnjem času, je potresno gibanje tal še vedno zelo težko napovedati. Potresi v Christchurchu so se zgodili na prelomu, ki ni bil znan. Tako potres v L'Aquila

kot tudi potresi v Christchurchu so pokazali, da so pospeški tal lahko bistveno večji od pričakovanih pospeškov. Čeprav maksimalni pospešek tal nima dobre korelacije z jakostjo potresnega gibanja tal, so tako visoki pospeški, kot so bili registrirani, in z njimi povezani spektralni pospeški jasno opozorilo, da so potresne obremenitve konstrukcij lahko bistveno večje od tistih, na katere projektiramo naše konstrukcije. V takšnih primerih je zelo pomembna dodatna varnost, ki jo sodobni predpisi zagotavljajo z zahtevo po projektiranju nadzorovanega obnašanja (angl. capacity design). Pri nepravilnih konstrukcijah, predvsem tistih z mehкими pritrilji, je dodatno varnost zelo težko ali celo nemogoče zagotoviti.

Vsi potresi so pokazali, da se pri objektih, projektiranih in grajenih v skladu s sodobnimi načeli potresnoodporne gradnje, zelo redko zgodi porušitev. Problem je še vedno zelo velika materialna škoda zaradi poškodb nekonstrukcijskih elementov in opreme. Razvoj potresnoodpornega projektiranja gre v smeri zmanjševanja škode ob upoštevanju principov projektiranja nadzorovanega obnašanja objektov (angl. performance-based design).

Poseben primer je oprema industrijskih objektov, ki je lahko vzrok velike nesreče, kot se je to zgodilo na Japonskem. Oprema naše jedrske

elektrarne v Krškem je bila projektirana za potresne obremenitve, nismo pa prepričani, da velja to tudi za vso drugo potencialno nevarno opremo v Sloveniji.

Zelo konkreten nauk potresa v Čilu je lokalna porušitev tankih armiranobetonskih sten zaradi prevelike tlačne obremenitve in neustreznega projektiranja sten v prvi kletni etaži.

To se je zgodilo, ker so konstrukcijski sistem, ki je sicer dober za srednje visoke stavbe, nekritično in nasilno uporabili za precej višje stavbe, ki jih je zahteval trg v času razcveta ekonomije. Pri nas bi dosledno upoštevanje določil Evrokoda 8 za projektiranje duktilnih sten lahko preprečilo večino opaženih porušitev. Dosedanje prakso lahko ocenimo kot dobro za malo do zmerno tlačno obremenjene stene (z gotovostjo so to stene v regularnih stavbah do pet etaž, če je delež prereza sten v vsaki smeri v primerjavi s površino tlora vsaj 1,5-odstoten, kot je to zahteval dosednji predpis). Če pa bi to prakso brez bistvenih sprememb hoteli uporabiti pri visokih stavbah z močno tlačno obremenjenimi stenami in/ali bi močno zniževali delež prereza sten, bi lahko pričakovali podobne probleme, kot smo jih opazili v Čilu. Smiselna bi bila tudi dodatna kontrola tankih sten v nekaterih visokih stavbah, ki so bile zgrajene v preteklosti. Pomembno se je tudi zavedati, da močne obodne stene v kleti ne razbremenijo notranjih sten v prvi kletni etaži. Nasprotno, strižne obremenitve v notranjih stenah v prvi kletni etaži se lahko močno povečajo.

8 • ZAHVALA

Obisk na potresno prizadetih območjih običajno ni mogoč brez sodelovanja in pomoči kolegov iz prizadete države. Avtorjema so pomagali predvsem dr. I. Iervolino in prof. G. Manfredi (Italija) ter prof. J. C. De La Llera (Čile).

9 • LITERATURA

L'Aquila

Çelebi, M., Bazzurro, P., Chiaraluce, L., Clemente, P., Decanini, L., DeSortis, A., Ellsworth, W., Gorini A., Kalkan, E., Marcucci, S., Milana, G., Mollaioli, F., Olivieri, M., Paolucci, R., Rinaldis, D., Rovelli, A., Sabetta, F., Stephens, C., Recorded Motions of the 6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Italy, Earthquake and Implications for Building Structural Damage: Overview, Earthquake Spectra 26, 3, 651–684, 2010.

- Dolce, M., in 37 soavtorjev, Quick surveys: post-earthquake usability inspections, poglavje 2.2 v *Progettazione Sismica* 1, 3: 95–103, 2009.
- L'Aquila, April 6th 2009, 3:32 am, *Progettazione Sismica*, 1, 3. Special Issue, IUSS Press, Pavia, 2009.
- L'Aquila earthquake: seismic sequence of 6th April 2009, Abruzzo, Italy, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering* 9(1), 2011.
- Mrevlje, A., Prebivalci v potresu porušene L'Aquile namesto pomoči dobili gumijevke, *Dnevnik*, 9. 7. 2010.
- The L'Aquila earthquake, A view of site effects and structural behaviour from temporary networks, Special Issue, *Bulletin of Earthquake Engineering* 9(3), 2011.
- The Mw 6.3 Abruzzo, Italy, Earthquake of April 6, 2009, *Learning from Earthquakes*, EERI Special Earthquake Report, June 2009.
- Ricci, P., De Luca, F., Verderame, G. M., 6th April 2009 L'Aquila earthquake, Italy: reinforced concrete building performance, *Bulletin of Earthquake Engineering* 9,1: 285–305, 2011.
- Verderame, G. M., De Luca, F., Ricci, P., Manfredi, G., Preliminary analysis of a soft-storey mechanism after the 2009 L'Aquila earthquake, *Earthquake Engineering Structural Dynamics* 40: 925–944, 2011.

Čile

- Paulay, T., Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, Wiley, New York, 1992.
- The Mw 8.8 Chile Earthquake of February 27, 2010, EERI Special Earthquake Report, June 2010.
- Wood, S. L., Performance of Reinforced Concrete Buildings during the 1985 Chile Earthquake, Implications for the Design of Structural Walls, *Earthquake Spectra* 7(4), 607–637, 1991.
- Wallace, J. W., Moehle, J. P., Ductility and Detailing Requirements of Bearing Wall Buildings, *Journal of Structural Engineering*, ASCE 118(6), 1625–1644, 1992.

Haiti

- 2010 Haiti earthquake, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/2010_Haiti_earthquake (14. 9. 2011).
- The Mw 7.0 Haiti Earthquake of January 12, 2010, Report 1, EERI Special Earthquake Report, April 2010.
- The Mw 7.0 Haiti Earthquake of January 12, 2010: Report 2, EERI Special Earthquake Report, May 2010.

Christchurch

- Christchurch City Council, Earthquake-Prone Dangerous and Insanitary Buildings Policy 2010, 9. 10. 2010. <http://www.ccc.govt.nz/thecouncil/policiesreportsstrategies/policies/groups/buildingplanning/earthquakepronebuildingspolicy.aspx> (15. 9. 2011).
- June 2011 Christchurch earthquake, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/June_2011_Christchurch_earthquake (14. 9. 2011).
- Peak ground acceleration, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Peak_ground_acceleration (14. 9. 2011).
- The Mw 7.1 Darfield (Canterbury), New Zealand Earthquake of September 4, 2010, EERI Special Earthquake Report, November 2010.
- The M 6.3 Christchurch, New Zealand, Earthquake of February 22, 2011, EERI Special Earthquake Report, May 2011.

Japonska

- 2011 Tohoku earthquake and tsunami, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/2011_T%C5%8Dhoku_earthquake_and_tsunami (14. 9. 2011).