

Potresna sigurnost armiranobetonskih montažnih hala – analitička studija

Matej Fischinger, Miha Kramar, Tatjana Isaković

Ključne riječi

montažna hala, armiranobetonska konstrukcija, potresni rizik, histerezni model, smanjivanje nosivosti, analiza vjerojatnosti, Eurokod 8

Key words

prefabricated hall, reinforced-concrete structure, seismic risk, hysteresis model, reduction in bearing capacity, analysis of probability, Eurocode 8

Mots clés

halle préfabriquée, structure en béton armé, risque sismique, modèle d'hystérésis, réduction de la capacité portante, analyse de probabilité, Eurocode 8

Ключевые слова

монтажный зал, железобетонная конструкция, риск при землетрясении, гистерезисная модель, уменьшение несущей способности, анализ вероятности, Eurokod 8

Schlüsselworte

Montagehalle, Stahlbetonkonstruktion, seismisches Risiko, Hysterese-Modell, Tragfähigkeitsminderung, Glaublichkeitsanalyse, Eurokode 8

M. Fischinger, M. Kramar, T. Isaković

Izvorni znanstveni rad

Potresna sigurnost armiranobetonskih montažnih hala – analitička studija

U članku se opisuje analitička studija potresnog rizika za armiranobetonske montažne hale. Uporabljjen je histerezni model koji u obzir uzima smanjivanje nosivosti unutar pojedinoga ciklusa te pri ponovljenim ciklusima s jednakim pomacima. Model je uporabljjen i za ocjenu rizika s analizom vjerojatnosti. Rezultati su omogućili kritičnu ocjenu odgovarajućih odredbi u normama Eurokod 8 iz 2004., posebno veličinu faktora ponašanja i time povezane veličine proračunskih sila potresa.

M. Fischinger, M. Kramar, T. Isaković

Original scientific paper

Seismic safety of prefabricated reinforced-concrete halls - analytical study

The analytical study of prefabricated reinforced concrete halls is described in the paper. The use is made of hysteresis model which takes into account reduction in bearing capacity within a specific cycle and at repeated cycles with equal displacements. The model is also used in risk assessment with probability analysis. The results have enabled critical assessment of corresponding provisions contained in Eurocode 8, 2004, namely the performance factor and the related design earthquake force.

M. Fischinger, M. Kramar, T. Isaković

Ouvrage scientifique original

Sécurité sismique des halles préfabriquées en béton armé - étude analytique

L'étude analytique des halles préfabriquées en béton armé est décrite dans l'ouvrage. L'usage est fait du modèle d'hystérésis qui prend en compte la réduction de la capacité portante à l'intérieur d'un cycle spécifique et dans le cas de répétition des cycles, à déplacements égaux. Le modèle est également utilisé dans l'évaluation de risque avec l'analyse de probabilité. Les résultats ont permis l'évaluation critique des dispositions correspondantes contenues dans l'Eurocode 8 de l'année 2004, ce qui concerne notamment le facteur de comportement et les forces sismiques correspondantes.

M. Фишингер, М. Крамар, Т. Исакович

Оригинальная научная работа

Сейсмическая надежность железобетонных монтажных залов – аналитическая разработка

В статье описывается аналитическая разработка для железобетонных монтажных залов по риску при сейсмических воздействиях. Применена гистерезисная модель, учитывающая уменьшение несущей способности в рамках отдельного цикла и при повторяющихся циклах с одинаковыми смещениями. Модель использовалась и для оценки риска с анализом вероятности. Результаты обеспечили возможность критической оценки соответствующих положений норм Eurokod 8 2004 года, в особенности, большинства факторов поведения и связанной с ними величины расчетных сил землетрясения.

M. Fischinger, M. Kramar, T. Isaković

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Seismische Sicherheit von Montagehallen aus Stahlbeton - analytische Studie

Im Artikel beschreibt man eine analytische Studie des seismischen Risikos für Montagehallen aus Stahlbeton. Man benützte das Hysterese-Modell, welches die Minderung der Tragfähigkeit innerhalb des einzelnen Zykluses, sowie auch bei wiederholten Zyklen mit gleichen Verformungen, berücksichtigt. Das Modell benützte man auch für die Bewertung des Risikos mit der Analyse der Glaublichkeit. Die Ergebnisse ermöglichten eine kritische Bewertung der entsprechenden Verordnungen in den Normen Eurokode 8 aus dem Jahr 2004., besonders die Grösse des Verhaltens-Faktors und der damit verbundenen Grösse der seismischen Berechnungskräfte.

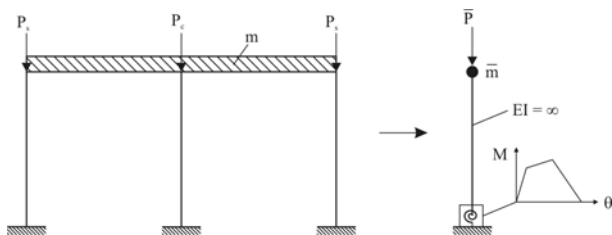
Autori: Prof. dr. sc. **Matej Fischinger**, dipl. ing. građ.; dr. sc. **Miha Kramar**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Tatjana Isaković**, dipl. ing. građ., Univerza v Ljubljani, FGG, IKPIR, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija

1 Uvod

U dva povezana članka prikazani su rezultati europsko-ga projekta *Ponašanje montažnih betonskih konstrukcija pri utjecaju potresa – ispitivanja u potporu Eurokoda 8*. U prvom su članku prikazani rezultati pseudodinamičkih i cikličkih pokusa jednokatne armiranobetonske montažne hale u prirodnoj veličini. Odziv je vitkih stupova bio specifičan, s opaženim smanjivanjem nosivosti. Ako se vjerodostojno želi ocijeniti rizik rušenja, potreban je eksperimentalno provjeren i dovoljno jednostavan numerički model koji se može modelirati smanjivanjem nosivosti. U članku je prikazan razvoj takvog modela koji je zatim upotrijebljen u sustavnoj studiji potresnoga rizika. Dobi-venim eksperimentalnim i analitičkim rezultatima moglo se kritički ocijeniti neke relevantne odredbe (posebno veličina faktora ponašanja, tj. faktora redukcije potresnih sila q) u Eurokodu 8.

2 Proračunski model

Krovna konstrukcija ispitivane hale bila je kruta u svojoj ravnini. Razina osnovnih sila u stupovima bila je mala (bezdimenzijska je osna sila bila $v_d = 1,2-2,1$ posto), a razlika u kapacitetima savijanja stupova bila je minimalna. Stoga se konstrukcija lako mogla modelirati ekvivalentnim stupom, s prosječnom razinom osne sile i prosječnom okomitom silom. Za model ekvivalentnoga stupa upotrijebljen je element s koncentriranim plastično spojenim zglobovima na mjestu upetosti (slika 1.). U plastičnom su zglobovima uzete u obzir i elastične deformacije stupa. Pomak u plastičnom zglobovima jednak je Δ/L , gdje je Δ pomak na vrhu konstrukcije i L visina stupa (u nastavku $\theta = \Delta/L$). Modeliranje montažne industrijske hale sa jakim spojevima tako se svelo na problem određivanja histereznoga odziva moment (M) – pomak (θ) u plastičnom zglobovima prosječnoga stupa.

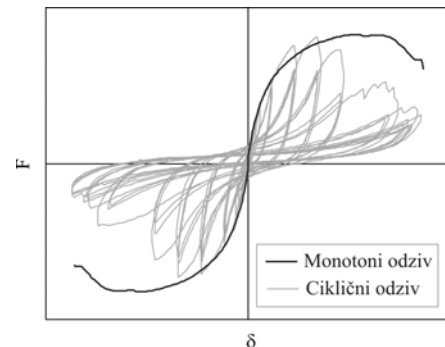


Slika 1. Pojednostavnjeni numerički model jednokatne hale

Eksperimenti su pokazali da stupovi, nakon postignute maksimalne nosivosti, imaju još deformacijski kapacitet. Taj dodatni kapacitet može značajno utjecati na potresnu sigurnost konstrukcije. Stoga, ako se vjerodostojno želi ocijeniti rizik rušenja konstrukcije pri potresu, potreban je numerički model za stupove kojim se može opisati njihovo ponašanje sve do rušenja. U okviru tog istraživanja ispitano je više modela i na kraju se odlučilo za

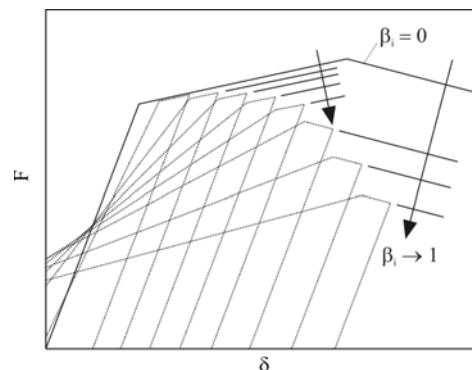
empirijski model koji predlaže Haselton [3], a s analizom vrlo vitkih stupova morao se primjereno modificirati. Tim se modelom dobilo dobro podudaranje eksperimentalnih i numeričkih rezultata, pored toga se mogla modelirati i pojava »omekšavanja« zbog ponavljajućih ciklusa, koja je opažena u eksperimentima.

Haseltonov je empirijski model zasnovan na histereznom modelu koji je razvio Ibarra sa suradnicima [2]. Glavna karakteristika Ibarrinoga histereznoga modela je mogućnost modeliranja monotonoga i cikličkoga odziva s jednakim ulaznim podacima. Na slici **Pogreška! Izvor reference nije pronađen.** vidi se primjer odziva konstrukcije pri monotonom opterećenju i odziv identične konstrukcije pri statičkom cikličkom opterećenju (F predstavlja općenitu silu i δ općeniti pomak). Pri monotonom odzivu nosivost raste do maksimalne nosivosti, a zatim slijedi smanjenje nosivosti, tj. »omekšanje«. Kako se vidi, ciklički odziv pri većim deformiranjima ne slijedi monotonu ovojnici. Nosivost se smanjuje i pri ponavljanjima pomaka iste veličine, unatoč tome što maksimalna nosivost još nije postignuta. Ta je pojava *deterioracija* nosivosti zbog ponavljajućih ciklusa, tj. ciklička *deterioracija* nosivosti.



Slika 2. Monotoni i ciklički odziv konstrukcije

Uobičajeno se ciklička *deterioracija* nosivosti u obzir uzima tako da se monotoni i ciklički odziv modelira s različitim ovojnica. Ibarra je predlagao rješenje u kojem se element definira pomoću osnovne (monotone) ovojnice odziva, koja se pri opterećenju mijenja (smanjuje) s obzirom na disipiranu histereznju energiju (slika 3.).



Slika 3. Ciklička deterioracija nosivosti

Opseg degradacije podešava energijsko pravilo, koje su razvili Ranhama i Krawinkler [9]. Pravilo predviđa da svaki element pri opterećenju ima određenu zalihu histerezne energije. Ta zaloha se za vrijeme opterećenja smanjuje, što utječe na smanjivanje nosivosti. Ciklička *deterioracija* u polovici ciklusa i opisuje se faktorom β_i , koji se izračunava jednadžbom:

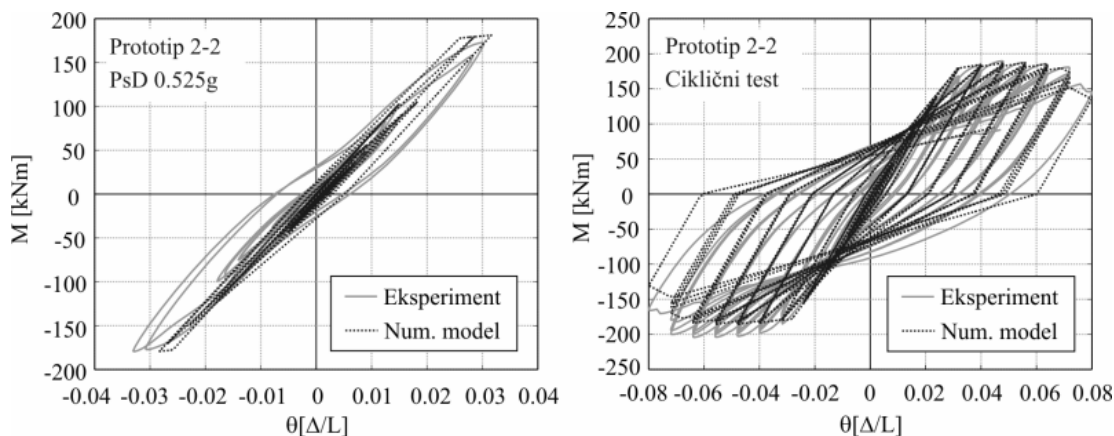
$$\beta_i = \frac{E_i}{E_i - \sum_{j=1}^i E_j} \quad (1)$$

gdje je

E_i - histerezna energija disipirana u polovičnom ciklusu

$\sum E_j$ - histerezna energija disipirana u svim dosadašnjim polovičnim ciklusima (u pozitivnome i negativnom smjeru)

E_t - ukupna energijska zaloha elementa.



Slika 4. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za Prototip 2-2

Parametar β_i tako se brojem ciklusa povećava, a ovojnica odgovarajuće skuplja. Na opisani se način smanjuje nosivost na područjima očvršćenja i omekšanja (slika 3.).

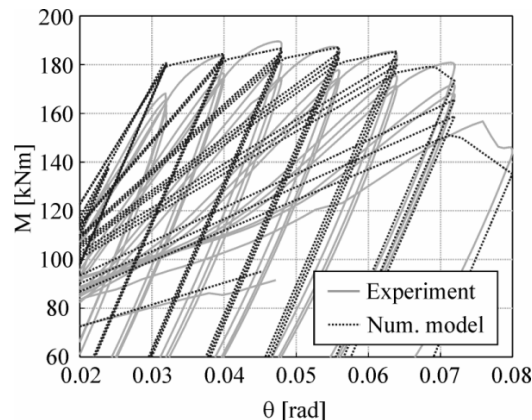
Ibarrin je histerezni model za osnovu uporabio Haselton [3] i njime izmjerio rezultate 255 pokusa armiranobetonskih stupova iz baze podataka PEER (*Pacific Earthquake Engineering Centre*; PEER, [8]). Konačni su rezultat bile jednadžbe s kojima se proračunavaju ulazni podaci za Ibarrin histerezni model (osnovna ovojnica odziva, zaloha histerezne energije), u ovisnosti o karakteristikama stupa (indeks posmičnoga raspona, razina osne sile, udio uzdužne i poprečne armature, čvrstoća čelika i betona...).

Predlagane su jednadžbe dobro opisale odziv svih triju uzoraka (tu se obrađuju samo rezultati uzorka 2-2). Iznimka je bio pomak na granici popuštanja. Izmjereni je pomak na granici popuštanja naime u svim stupovima dosta veći od empirijske ocjene koju predlaže Haselton. Prognoza je kriva zato jer se empirijske ocjene temelje

na ispitivanjima stupova s manjim indeksima posmičnoga raspona. Kod tih je stupova pomak na granici popuštanja praktično neovisan o visini stupa. Deformiranje na savijanje se s visinom povećava, iako je pri višim stupovima odgovarajuće manji utjecaj posmičnih deformiranja i deformiranja zbog klizanja armature na mjestima upetosti. Kod vitkih stupova izrazito prevladavaju deformiranja na savijanje i stoga se pomak na granici popuštanja znatno povećava s visinom stupa. Stoga su, na osnovi eksperimentalnih rezultata svih triju uzoraka Haseltonove empirijske jednadžbe (koje se odnose na pomak na granici popuštanja) priređene za vitke stupove. Prilagođeni je postupak modeliranja opširno opisan u doktorskoj disertaciji Mihe Kramara [7].

Na slici 4. prikazani su numerički i eksperimentalni rezultati Prototipa 2-2 pri pseudodinamičkom ispitivanju s ubrzanjem 0,525 g i statičkom cikličkom ispitivanju.

Prikazan je histerezni odziv $M-\theta$ u plastičnom zglobu. Rezultati se detaljnije mogu usporediti na detalju odziva na slici 5. Vidi se da numerički model dobro opisuje odziv konstrukcije te smanjivanje nosivosti u ponavljajućim ciklusima.

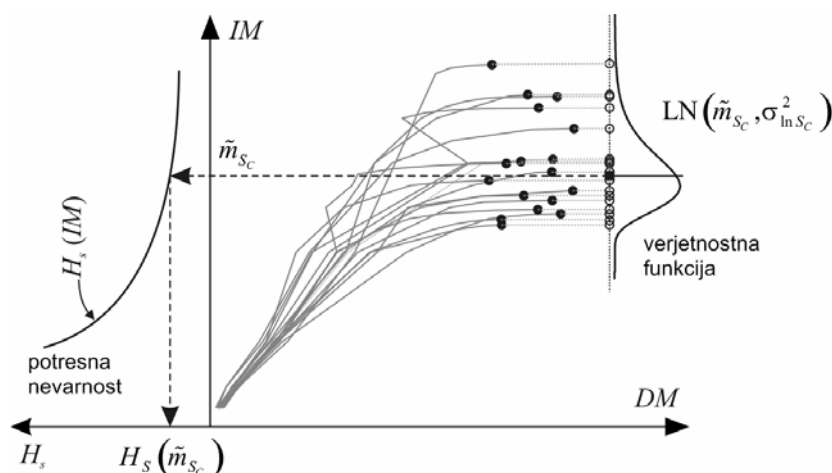


Slika 5. Detaljna usporedba eksperimentalnoga i proračunatog odziva

3 Metoda za ocjenu potresnoga rizika

Dobrim numeričkim modelom može se točno ocijeniti kapacitet konstrukcije pri unaprijed propisanom opterećenju. Zna se da je potresno opterećenje slučajno i nepredvidljivo, osim toga su slučajne i ostale varijable koje se odnose na kvalitetu materijala i karakteristike proračunskoga modela. Ako se vjerodostojno želi ocijeniti potresni rizik za konstrukcije, moraju se upotrijebiti metode vjerojatnosti. Stoga je u ispitivanju rabljena trenutno vrlo raširena metodologija »PEER« koja se temelji na izrazu o potpunoj vjerojatnosti događaja [1]. Konačni rezultat metodologije je vjerojatnost premašaja graničnoga stanja konstrukcije u određenom razdoblju. S obzirom na cilj ispitivanja, granično se stanje konstrukcije proizvoljno definira. Kako se odziv konstrukcije računao modelom koji uključuje smanjivanje nosivosti, kapacitet se konstrukcije izrazio mjerom za intenzitet potresnoga opterećenja *IM* (*Intensity Measure*). U ovoj se studiji za *IM* izbralo maksimalno ubrzanje tla.

Metoda na osnovi intenziteta shematski je prikazana na slici 6. Temelji se na inkrementalnoj dinamičkoj analizi (IDA). IDA je serija dinamičkih analiza kojima se proračunava odziv konstrukcije pri različitim razinama intenziteta potresnoga opterećenja. Rezultat je krivulja IDA koja prikazuje odnos između intenziteta *IM* i odziva *DM* (*Damage Measure*) konstrukcije. Ako se za proračun IDA rabi numerički model koji prepoznaje smanjivanje nosivosti i/ili u obzir uzima geometrijske nelinearnosti (P-delta efekti) krivulja je IDA odozgora ograničena. Pri tom se graničnom intenzitetu odziv konstrukcije počinje izrazito brzo povećavati. Ta pojava predstavlja rušenje konstrukcije i označena je s crnom točkom na slici 6.



Slika 6. Shematski prikaz metode za proračun potresnoga rizika

Pojedinačna krivulja IDA predstavlja odziv konstrukcije pri izabranom akcelerogramu s različitim intenzitetima. Bit analize vjerojatnosti je u tom što se u obzir uzimaju različite mogućnosti potresnoga opterećenja i varijacije

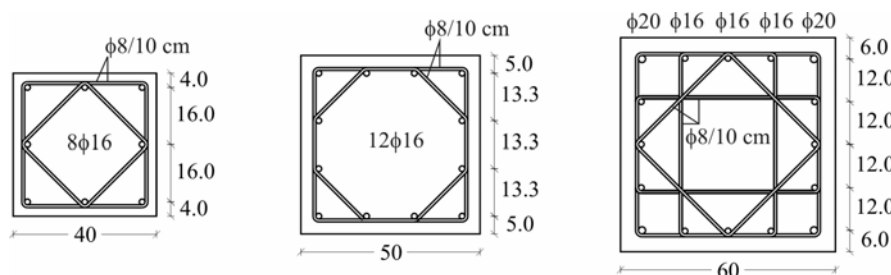
numeričkoga modela u okviru točnosti modeliranja konstrukcije. Ako se napravi IDA za različite akcelerogramme i za različite izvedenice numeričkoga modela, za rezultat se dobije veći broj krivulja IDA i isto toliko intenziteta, pri kojima se konstrukcija ruši (S_c). Slučajnost graničnih intenziteta S_c zbog oba izvora nepouzdanosti je zorno prikazana funkcijom vjerojatnosti na slici 6.

Neovisno o analizi konstrukcije potrebno je napraviti analizu potresne opasnosti područja u kojem se konstrukcija nalazi. Opasnost se ocjenjuje pri uzimanju u obzir tektonskih prelomnih linijama i povijesti potresa na promatranom području. Rezultat analize potresne opasnosti funkcija je potresne opasnosti H_s koja kazuje kolika je vjerojatnost pojave potresa, s ubrzanjem koje je veće ili jednako izabranoj vrijednosti u nekom razdoblju.

Vjerojatnost premašaja graničnoga stanja konstrukcije proračunava se tako što se funkcija potresne opasnosti pomnoži s funkcijom vjerojatnosti te se umnožak integrira po svim vrijednostima intenziteta. Ako se pretpostavi da je razdioba S_c logaritamski normalna, H_s se zapisuje u eksponentnom obliku, izraz za vjerojatnost premašaja graničnoga stanja konstrukcije može se dobiti analitički [5].

4 Parametarska studija potresnoga rizika za industrijske montažne hale sa jakim spojevima

Opisana se metoda uporabila za određivanje potresnoga rizika za sve realno moguće regularne jednokatne montažne industrijske hale sa jakim spojevima. Konstrukcija se modelirala ekvivalentnim stupom (poglavlje 2). Obradeni su stupovi s pripadajućom masom 10 – 150 t, čime se obuhvatio ukupan raspon masa u industrijskim montažnim halama. Najmanja masa (10 t) dobiva se iz vertikalnog opterećenja 2,5 kN/m² koje djeluje na ekvivalentnoj ploštini od 40 m², najveća masa (150 t) dobiva se iz opterećenja 6,5 kN/m² koje djeluje na ploštini od 230 m². Obradivana su tri simetrično armirana kvadratna presjeka sa stranicama 40, 50 i 60 cm (slika 7.). Visina je stupova bila jednaka kao pri ispitnim uzorcima, 5 m. Stupovi su dimenzionirani za potresno opterećenje kombinaciju po EC8. Izbrano je proračunsko ubrzanje tla $a_{gdn}=0,25$ g i tlo kategorije B. Potresne su sile reducirane faktorom ponašanja $q = 4,5$ koji je propisan za monolitne okvire s velikim stupnjem duktilnosti (DCH). Po najnovijoj verziji norme EC8 [2] pod određenim se uvjetima (stupovi povezani u oba smjera, proračunska normirana osna sila u stupovima $v_{dn}<0,3$) može uporabiti i za jednokatne montažne konstrukcije (točka 5.1.2 u EC8/1).

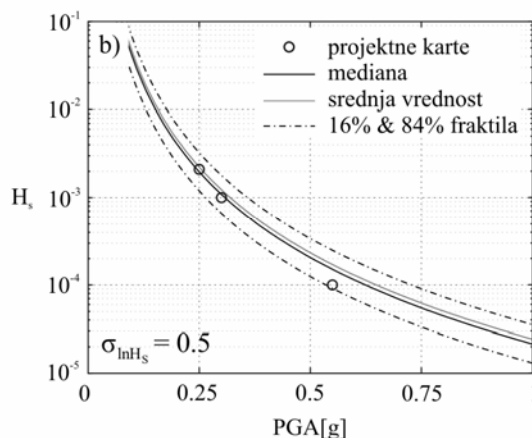
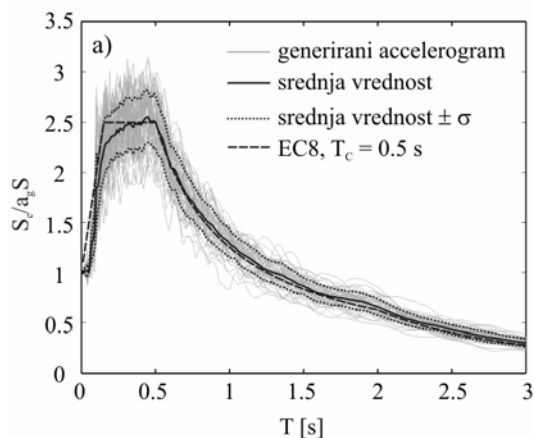


Slika 7. Poprečni presjeci stupova s armaturom po EC8

Upravo je provjera te odredbe u normi bila glavni cilj opisana ispitivanja.

Stupovi s određenim dimenzijama su smisleni samo unutar određenoga intervala masa. Tako se stup sa stranicom 40 cm opterećuje s maksimalnom masom 30 t, stup dimenzije 50 cm s masom 70 t i stup dimenzije 60 cm s masom 150 t. Zanimljivo je da je za preuzimanje proračunskog momenta na savijanje u svim slučajevima dostatan već minimalni udio skupne uzdužne armature koju za stupove propisuje EC8 ($\rho_{l,min}=0,01$). Zahtijevani udio armature osiguran je šipkama prikazanim na slici 7.

Potrebnu poprečnu armaturu u kritičnom području na mjestu upetosti određuju konstrukcijska pravila za veliki stupanj duktilnosti (DCH). Ta su pravila dosta rigorozna. Ponajprije je kritičan zahtjev koji određuje maksimalni razmak među poduprtim uzdužnim šipkama (za stupove DCH taj je razmak 15 cm). Zbog toga je zahtjeva potrebno u kritičnom području stupova izabrati relativno velik broj spona. Prema svim konstrukcijskim pravilima dostatne su spona $\Phi 8/10$ cm, raspoređene u skladu sa slikom 7.



Slika 8. Normirani elastični spektar umjetno generiranih akceleroograma (a) i funkcija potresne opasnosti (b)

Za mjeru intenziteta odabrano je maksimalno ubrzanje temeljnog tla (PGA). Varijacija u potresnim opterećenjima simulirana je s 50 umjetno generiranih akceleroograma koji su generirani tako da se prosječni elastični spektar odziva svih akceleroograma približno podudara s elastičnim spektrom koji za tla kategorije B propisuje EC8

(slika 8a., jednak spektar uzet je u obzir pri dimenzioniranju konstrukcija). Zbog pomanjkanja točnijih studija potresne opasnosti na području Ljubljane, funkcija potresne opasnosti izrađena je na osnovu karata potresne opasnosti Slovenije. Funkcija eksponentnog oblika provedena je kroz tri točke proračunskog ubrzanja s povratnim periodima od 475 godina (0,25 g), 1000 godina (0,3 g) i 10000 godina (0,55 g) za područje Ljubljane (slika 8b.).

Nakon postupka, koji je opisan u poglavlju 3 proračunan je potresni rizik za sve konstrukcije (stupove), projektirane po EC8. Rezultati – 5 postotna fraktila graničnih intenziteta ($PGA_{c,0.05}$) i vjerojatnost rušenja u 50 godina na području Ljubljane ($H_{LS,50}$) – prikazani su na slikama 9. i 10. Zbog izabrane minimalne uzdužne i poprečne armature, koja je dosta veća od proračunski potrebne armature, obrađivane konstrukcije (stupovi) imaju veliku rezervnu nosivost. Zato su vjerojatnosti rušenja relativno male. Vjerojatnost rušenja se povećava s povećanjem mase zato jer su u svim konstrukcijama stupovi bili jednakoga presjeka armirani s jednakom (minimalnom) armaturom. Zato je rezervna nosivost u konstrukcijama s većom masom bila manja.

JCSS (*Joint Committee on Structural Safety*) preporuča za srednje važne zgrade pri potresnom opterećenju ciljni indeks pouzdanosti 3,3/god [6], što je ekvivalentno vjerojatnosti 2,5 posto u 50 godina. S obzirom na to da su

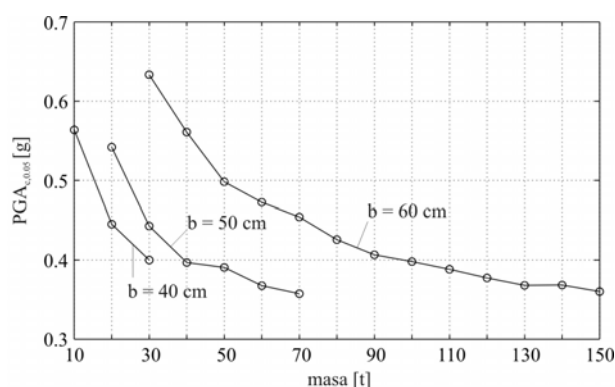
vjerojatnosti rušenja pri svim obrađivanim slučajevima puno manje od granične vrijednosti može se zaključiti da su konstrukcije (stupovi), koje su projektirane po EC8 i pri tom u obzir uzeta sva minimalna i konstrukcijska pravila za stupanj duktilnosti DCH, dovoljno sigurne. Ako većina konstrukcijskih zahtjeva nije uzeta u obzir,

vjerojatnost rušenja znatno je premašila prihvatljivu vrijednost. Usporedba za stupove 60/60 cm dana je na slikama 11. i 12. (detalje pogledati u [7]).

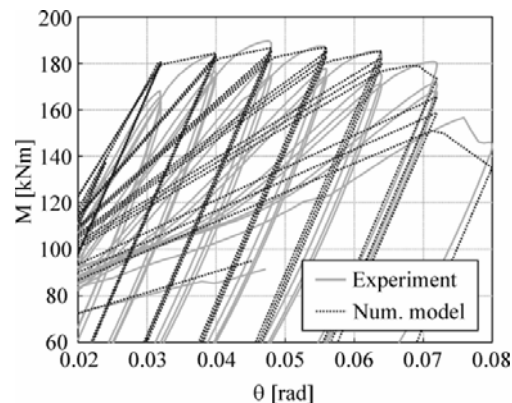
5 Ocjena faktora ponašanja u normi Eurokod 8

Pisci konačne verzije norme EC8 [2] polazili su od pretpostavke da je montažnim halama pri određenim uvjetima moguće osigurati sličnu sposobnost trošenja potresne energije, kao što je imaju monolitni okviri. Zato se u usporedbi s prednormom pojavilo nekoliko važnih promjena, koje je bez detaljnoga pregleda teksta norme teško opaziti. Ponajprije je definiciji »sustava obrnutoga njihala« bila dodana napomena u sitnom tisku: »U tu kategoriju ne spadaju jednokatni okviri koji imaju vrhove stupova povezane uzduž oba glavna smjera zgrade i pri kojima ni u jednom stupu normirana osna sila v_a ne prelazi 0,3.«. Na taj se način montažne hale implicitno uvrštavaju u kategoriju »okvira« (sukladno tumačenju jednog od vodećih pisaca obaveznoga poglavlja 5.11 u EC8 i vode projekta PRECAST prof. Toniola iz Politehnike u Milanu [10]). Zbog brojnih dvojbi o toj promjeni predlagani su i izvedeni eksperimenti, opisani u prvom članku.

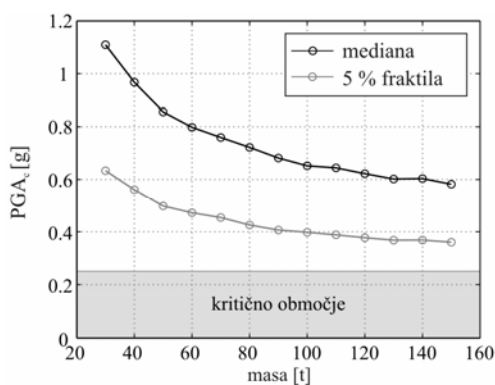
Na osnovi rezultata iz poglavlja 4 može se zaključiti da uporaba povećanih redukcijskih faktora (manjih veličina potresnih sila), koje predviđa zadnja verzija EC8 [CEN, 2004.], pri određenim uvjetima daje zadovoljavajuće rezultate. Bitni uvjeti za to su: (a) izvedba spojeva u oba



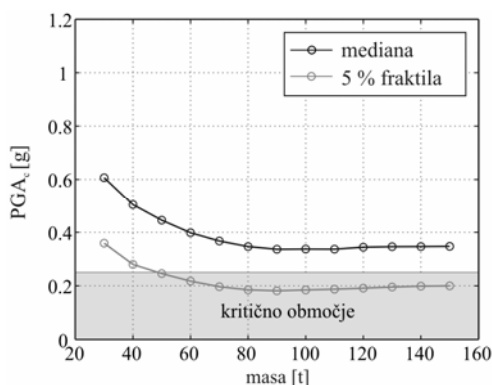
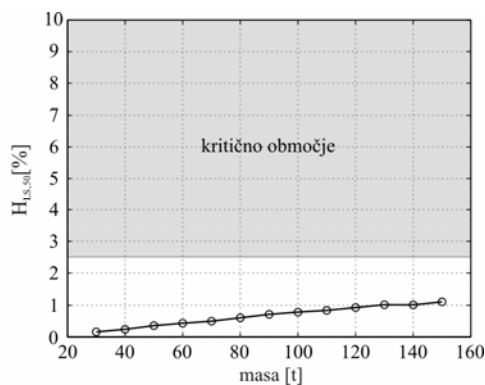
Slika 9. Granični intenziteti (5 %-tna fraktila) za sve obrađivane hale



Slika 10. Vjerojatnost rušenja u 50 godina za sve obrađivane hale



Slika 11. Ocjena potresne ugroženosti za hale sa stupovima 60/60 cm (zahtjevi za minimalnom armaturom iz EC8 su uzeti u obzir)



Slika 12. Ocjena potresne ugroženosti za hale sa stupovima 60/60 cm (zahtjevi za minimalnom armaturom iz EC8 nisu uzeti u obzir)

glavna smjera zgrade, (b) dokaz jakih spojeva s planiranjem nosivosti i eksperimentalno određena otpornost spojeva te (c) dosljedno uzimanje u obzir konstrukcijskih zahtjeva u normi. Unatoč smanjenju s obzirom na prednormu, potresne su sile još uvijek puno veće nego što se rabe u dosadašnjoj praksi.

Slika 12. pokazuje da konstrukcija koja ne bi imala rezervnu nosivost i bila projektirana s faktorom ponašanja 4,5 za visok stupanj duktilnosti, ne bi dosegla dostatnu potresnu sigurnost, iako su primjeri jednokatnih hala bez rezervne nosivosti zbog minimalnih konstrukcijskih zahtjeva rijetki.

6 Zaključak

Obrađivan je potresni odziv i potresni rizik za jednokatne montažne armiranobetonske hale sa jakim spojevima koji se sastoje iz skupine konzolnih stupova, koje povezuje krovna konstrukcija, kruta u svojoj ravnini. Takvih ispitivanja i odgovarajućeg znanja do sada nije bilo. Zato su rezultati značajno utjecali na razvoj evropskih normi EC8 [2] te na buduću projektantsku praksu. Na osnovi opsežnih ispitivanja, koja su opisana u ovom i prvom članku, mogu se postaviti neke tvrdnje i zaključci:

1. Uporabom postupka planiranja nosivosti spojevi u obrađivanom sustavu uspješno su napravljeni dovoljno snažnim, pa je ponašanje slično monolitnom sustavu s krovnom konstrukcijom koja je bila dovoljno kruta u svojoj ravnini. Iznimka je bilo slabije područje kraja grede s U-sponama oko moždanika iz stupa, projektirano po talijanskoj praksi. Ponajprije se u obzir mora uzeti da su spojevi eksperimentalno provjereni samo za konstrukciju s malom masom. Osim toga,

spojevi su svakoga sustava posebni i nikakvo uopćavanje nije moguće. Tako rezultati vrijede samo uz pretpostavku sustava sa jakim spojevima i ispunjavanje projektnih zahtjeva zadnje verzije EC8 [2]. Nedavno je odobren veliki europski projekt SAFECAST, koji je namijenjen samo ispitivanjima (inovativnih) spojeva u montažnim halama pri potresnom utjecaju.

2. Dosljedno uzeti u obzir projektni i konstrukcijski zahtjevi EC8 osiguravaju uobičajenim konstrukcijama obrađivanoga tipa primjeren stupanj potresne sigurnosti. Stupanj ugroženosti konstrukcija koje bi bile armirane samo s proračunskom potrebnom armaturom određenom s faktorom ponašanja 4,5 (tj. koje ne bi imale rezervu nosivost zbog konstrukcijskih zahtjeva) bio bi velik.
3. Uzimajući u obzir uvjete koji su nabrojani u poglavlju 5, faktor je ponašanja, koji za montažne hale određuje norma [2], približno odgovarajući. Ne zadovoljava za konstrukcije bez rezervne nosivosti. U svakom je slučaju uvjete iz poglavlja 5 potrebno za svaki specifičan montažni sustav brižno provjeriti posebnim ispitivanjima.
4. Zahtjevi EC8 s obzirom na gustoću spona u plastičnim zglobovima na mjestima upetosti stupova čine se dosta strogi, iako ispitivanje to nije potvrdilo. Pri projektiranju se količina zahtijevanih spona jako zakružila nagore (razmak između spona bio je 7,5 cm). Unatoč tome pri prvom je eksperimentu na prototipu 2 došlo do preranoga rušenja zbog izvijanja uzdužne armature na mjestu upetosti stupa. U ponovljenom ispitivanju se smanjila udaljenost na 5 cm i postiglo bitno bolje ponašanje.

LITERATURA

- [1] Cornell, C. A.; Krawinkler, H.: *Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment*. PEER Center News, 4, 1: 1-3, 2000.
- [2] CEN, Eurocode 8: *Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. EN 1998-1. European Committee for Standardization, 2004.
- [3] Haselton, C. B.: *Assessing seismic collapse safety of modern reinforced concrete moment frame buildings*. Ph.D. Thesis, Stanford University, 2006.
- [4] Ibarra, L. F.; Medina, R. A.; Krawinkler, H.: *Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 34, 12: 1489–1511, 2005.
- [5] Jalayer, F.: *Direct Probabilistic Seismic Analysis: Implementing Non-linear Dynamic Assessments*. Ph.D. Thesis, Stanford University, 2003.
- [6] JCSS, Probabilistic model code, Part 1: Basis of design, 12th draft. Joint Committee on Structural Safety. <http://www.jcss.ethz.ch/JCSSPublications/PMC/PMC.html>, 2001.
- [7] Kramar, M.: *Potresna ranljivost montažnih armiranobetonskih hal*. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, FGG, 176 str., 2008.
- [8] PEER. 2007. *PEER Structural Performance Database University of California, Berkeley*. <http://nisee.berkeley.edu/spd> (30.8.2007).
- [9] Rahnama, M.; Krawinkler, H.: *Effects of soft soil and hysteresis model on seismic demands*. John A. Blume Earthquake Engineering Center Report. 108, Department of CEE, Stanford University, Stanford, 1993.
- [10] Toniolo, G. (coordinator): *Final report of the EU Research Project: Seismic Behaviour of Precast Concrete Structures with respect to EC8* (Contract No. G6RD-CT-2002-00857), 2007.