

Krivulje vjerojatnosti oštećenja za armiranobetonski okvir neproračunan na djelovanje potresa

Marijana Hadzima-Nyarko, Gordana Pavić, Dijana Nikić

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Sažetak

Iako su novije zgrade projektirane u skladu s propisanim zahtjevima norme HRN EN 1998-1:2011 za proračun potresno otpornih zgrada, još uvijek postoji značajan broj starijih zgrada koje su izgrađene ne slijedeći ikakve norme. Studija provedena u radu zasniva se na procjeni potresne oštećljivosti zgrade osnovne škole u Osijeku projektirane 70-tih godina prošlog stoljeća, čiji je nosivi sustav armiranobetonski okvir. Za procjenu potresne oštećljivosti primijenjen je dinamički proračun korak po korak na numeričkom modelu zgrade – ravninskom armiranobetonskom okviru niske duktilnosti.

Ključne riječi: procjena potresne oštećljivosti, ravninski model armiranobetonske okvirne konstrukcije, krivulje vjerojatnosti oštećenja, dinamički proračun korak po korak

Fragility curves of reinforced concrete frame without earthquake resistance design

Abstract

Although newer buildings are designed in accordance with the requirements of HRN EN 1998-1:2011 for the design of earthquake resistant buildings, there are still a significant number of older buildings built without following any standards. The study carried out in this paper is based on the assessment of earthquake vulnerability of an elementary school building in Osijek designed in the 1970's, with a bearing system which is reinforced concrete frame. For the assessment of the earthquake vulnerability, "step by step" dynamic analysis was performed on the numerical model of the building - a reinforced concrete frame with low ductility.

Key words: earthquake vulnerability assessment, model of reinforce concrete frame, fragility curves, Step by step time history analysis

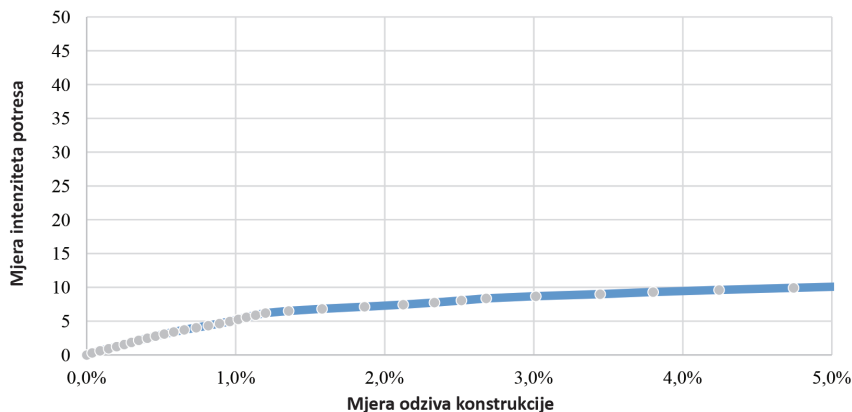
1. Uvod

Primarni je cilj potresnoga inženjerstva istraživanje karaktera potresa i ponašanja konstrukcija izloženih potresnim djelovanjima. Upravo je ponašanje armiranobetonskih konstrukcija pod potresnim djelovanjem često predmet razmatranja i istraživanja, posebice u potresno aktivnim zonama (Abdelnaby i Elnashai, 2015; Rabczuk i dr., 2005; Petrone i dr., 2016; Rodrigues i dr., 2018). Opravdanost interesa zasniva se na složenosti njihovoga ponašanja te činjenici da su armiranobetonske konstrukcije vrlo rasprostranjene (Koutromanos i dr. 2011). Na ponašanje armiranobetonskih konstrukcija pod potresnim djelovanjem utječe veliki broj parametara, a među njima je i slučajnost pojave potresa. Zbog toga se zahtijeva probabilistički pristup u rješavanju problema potresne oštetljivosti. Razvijene su brojne metode koje svojim pristupom pokušavaju što točnije procijeniti potresni rizik, no unatoč velikom broju istraživanja provedenih na tu temu još uvijek postoje brojne nepoznanice i nesigurnosti koje treba istražiti. U primjeru ovoga rada odabran je ravninski model armiranobetonske okvirne konstrukcije osnovne škole u Osijeku projektirane 70-tih godina prošloga stoljeća. Studija provedena u radu zasniva se na procjeni potresne oštetljivosti ravninskih armiranobetonskih okvirnih konstrukcija niske duktilnosti (Nikić, 2016.). Oštetljivost određene konstrukcije ili cijele kategorije konstrukcija definirana je u obliku potresnoga intenziteta i odnosa oštećenja. Tim se odnosom dobiva vjerojatnost distribucije nastanka oštećenja za određeni potresni intenzitet i najčešće je prikazan u obliku matrica vjerojatnosti oštećenja ili krivulja vjerojatnosti oštećenja. Glavni je cilj kroz probabilističku analizu definirati potresnu oštetljivost modela armiranobetonske okvirne konstrukcije, pri čemu će se kao rezultat konstruirati krivulje vjerojatnosti oštećenja koje pokazuju vjerojatnost otkazivanja konstrukcije ili dosezanja razine oštećenja za svako definirano granično stanje oštetljivosti.

2. Dinamički proračun korak po korak

Dinamički proračun korak po korak ili inkrementalna dinamička analiza (engl. *Incremental Dynamic Analysis, IDA*) prvi je put spomenut u Berter i dr. (1977.), a prve računalne algoritme za provedbu proračuna IDA predstavili su Vamvatsikos i Cornell (Spears i dr., 2004.). IDA predstavlja skup nelinearnih proračuna konstrukcijskoga modela koji daju iscrpne podatke o ponašanju modela pri zadanim potresnim opterećenjima. Osnova je metode IDA na skaliranju, odnosno inkrementalnom uvećanju zapisa potresa kako bi se omogućila tvorba seta potresa različitih intenziteta i individualno analiziranje numeričkoga konstrukcijskog modela za svaku razinu potresne pobude. U konačnici, IDA krivulja predstavlja maksimalni odziv konstrukcije u odnosu na mjeru intenziteta pobude. Primjer jednostruke IDA krivulje prikazan je na slici 1., na kojoj je, uz pretpostavku da je zapis potresnoga opterećenja realno skaliran,

vidljivo da krivulja za niže faktore skaliranja ima oblik ravne linije. To upućuje na činjenicu da se konstrukcija u tom području ponaša elastično. Za više faktore skaliranja krivulja poprima krivudav oblik, što znači da je potresno opterećenje dovoljno jako da može izazvati nelinearno otkazivanje konstrukcije.

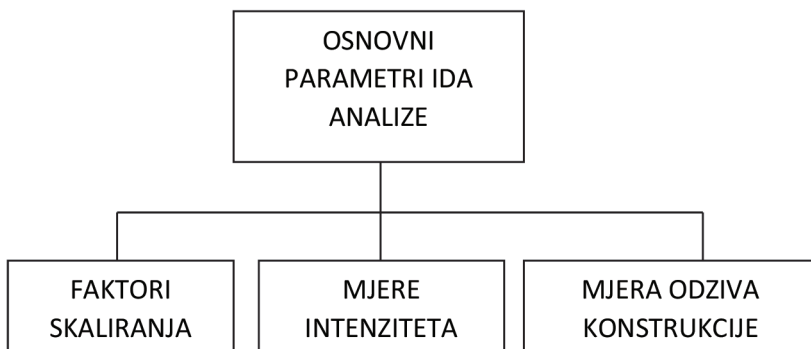


Slika 1. Primjer jednostruke IDA krivulje

Jednostrukom IDA krivuljom prikazano je kako će konstrukcija reagirati na različite intenzitete istoga potresa. Međutim, prednost metode je mogućnost višestruke analize IDA, čime se na jednom grafu prikazuje više krivulja, a svaka predstavlja odziv konstrukcije za različite razine potresnih pobuda. IDA je probabilistička i parametarska metoda analize konstrukcija koja podrazumijeva izlaganje konstrukcijskih modela nizu potresnih zapisa tako da svaki od njih bude uvećan do određene razine intenziteta, proizvodeći tako više krivulja koje mogu zbog preglednosti i boljega razumijevanja problematike biti prikazane na istomu grafu. Shematski prikaz osnovnih parametara analize IDA prikazan je na slici 2.

Faktor skaliranja predstavlja pozitivnu skalarnu vrijednost na osnovi koje se uvećava izvorni potresni zapis u vremenu radi dobivanja skalarnoga prikaza. Mjera intenziteta potresa označava relativnu jačinu potresnoga opterećenja. Intenzitet se najčešće prikazuje empirijskim subjektivnim mjerama potresnoga gibanja temeljnoga tla (npr. Richterovali Mercallijeva ljestvica). Međutim, taj tip mjere nije u mogućnosti precizirati vrijednost koja se može skalirati. Pri odabiru mjere potresa treba odabrati onu koja varira linearno s faktorom skaliranja. Zbog toga se magnituda uzima kao jedna od najprihvatljivijih mjera intenziteta potresa za proračun IDA. Međutim, u praksi je uobičajeno da se kao mjera intenziteta potresa upotrebljava spektralno ubrzanje za prvi vlastiti period s 5% prigušenja, $S_a(T_1, 5\%)$,

a često je u primjeni i vršno ubrzanje temeljnoga tla (engl. *Peak Ground Acceleration, PGA*). Dosadašnja istraživanja pokazala su da primjena spektralnih vrijednosti ipak daje konzistentnije rezultate. Pri odabiru referentne mjere intenziteta potresa mjerodavna je ona mjera koja rezultira najmanjom disperzijom rezultata (Dhakai, 2006.). Mjera odziva konstrukcije neposredno je povezana s područjem ponašanja konstrukcije i predstavlja odziv konstrukcije na djelovanje potresne pobude. Ako se promatra konstrukcija na globalnoj razini, područje ponašanja najčešće je povezano s maksimalnom vrijednosti međukatnoga pomaka konstrukcije, koja će se primijeniti i u ovom radu.

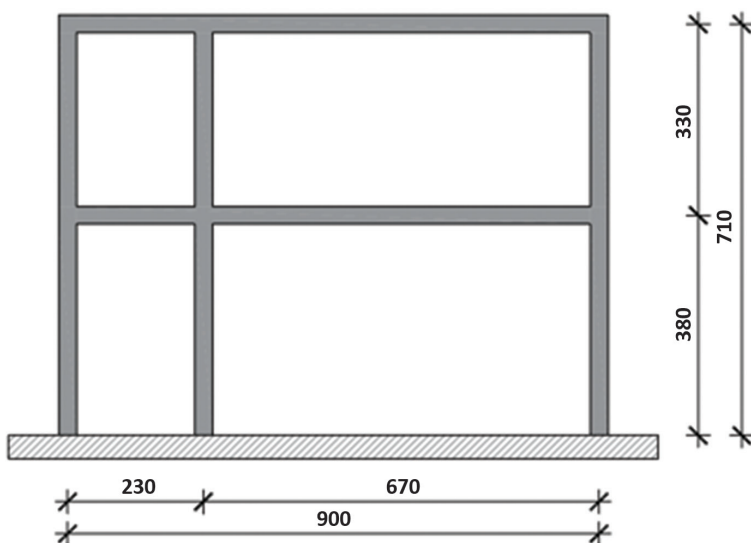


Slika 2. Shematski prikaz osnovnih parametara analize IDA

3. Model konstrukcije

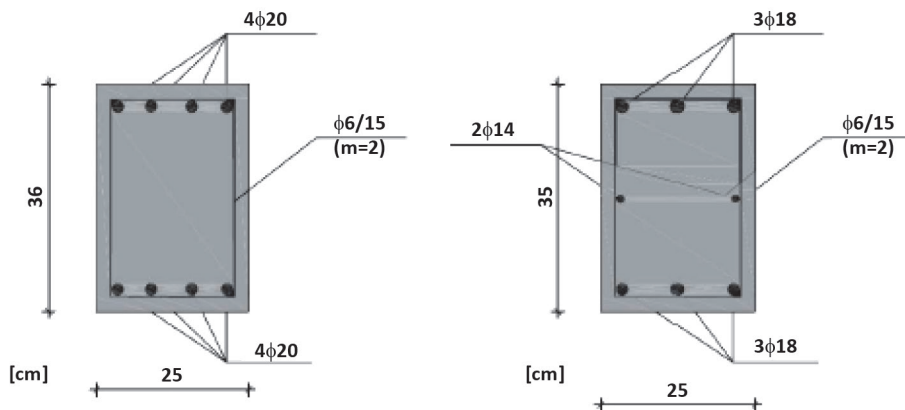
Na osnovi projektne dokumentacije osnovne škole u gradu Osijeku proveden je proračun osnovnoga konstrukcijskog sustava. Osnovni su konstrukcijski sustavi dilatacije I (prostor škole) i dilatacije III (športska dvorana) armiranobetonski okviri, koji su međusobno ukruženi serklažima (Državni Arhiv u Osijeku, HR-DAOS-72, fasc. 583, 1967.).

Prikladan numerički model za proračun potresne oštetljivosti armiranobetonskih okvirnih konstrukcija mora zadovoljiti odgovarajuće zahtjeve: točnost unutar inženjerskih tolerancija, jednostavnost i pouzdanost. Modeli elemenata također moraju biti dovoljno točni, fizikalno podobni, učinkoviti i jednostavni. Numerički modeli simuliraju odziv konstrukcije u pogledu kapaciteta pomaka, raspršivanja energije i perioda vibriranja za potrebnu procjenu potresne oštetljivosti građevine. Potresni odziv armiranobetonskih okvirnih konstrukcija može se procijeniti promatrajući globalni prostorni mehanizam odziva sustava ili promatrajući odziv ravninskoga modela. Pravilnost konstrukcija u smislu masa i krutosti, također po visini i u tlocrtu, omogućuje ravninsko modeliranje i ravninsku analizu za procjenu potresnoga odziva (Rossetto i Elnashai, 2003.). Na slici 3. prikazan je ravninski armiranobetonski okvir modela.



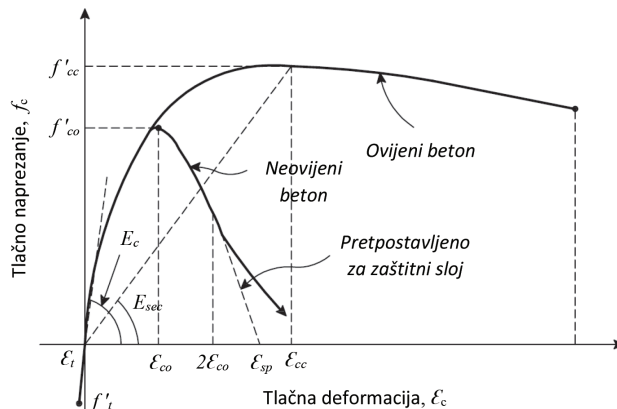
Slika 3. Prikaz ravninskog modela armiranobetonskog okvira

Za nelinearni dinamički proračun ukupne su mase koncentrirane po etažama okvira. Ukupna težina masa dobivena je na osnovi podataka iz projektne dokumentacije škole, kao i proračunana armatura u svim karakterističnim presjecima (Državni Arhiv u Osijeku, HR-DAOS-72, fasc. 583, 1967.). Na slici 4. prikazani su poprečni presjeci nosivih elemenata okvira s pripadajućom armaturom: na lijevom dijelu slike prikazan je poprečni presjek greda, a na desnom dijelu poprečni presjek stupova.

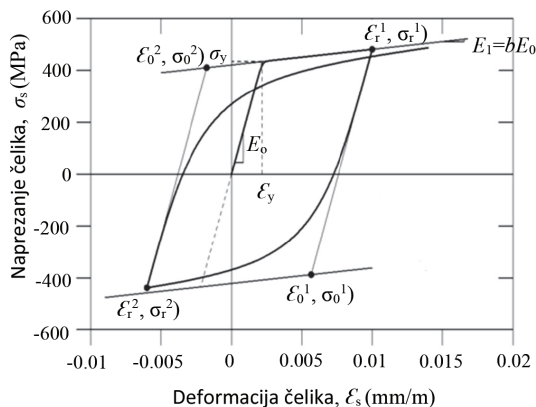


Slika 4. Prikaz poprečnih presjeka nosivih elemenata AB okvira

Proračun IDA nelinearnoga numeričkog modela proveden je primjenom programskog paketa SeismoStruct, ver. 7.0.6 (Seismosoft, 2002.). Elementi okvira definirani su konačnim elementima unutar poprečnoga presjeka elementa i uzduž elementa, te se njima pripisuju značajke geometrijske i materijalne nelinearnosti. Za simuliranje nelinearnoga ponašanja betona primijenjen je Manderov model (1988.) s konstantnom ovijenošću. Koeficijent ovijenosti (K) definiran je kao omjer između ovijenoga i neovijenog naprezanja u betonu i upotrebljava se za skaliranje odnosa naprezanje–deformacija po cijeloj duljini raspona deformacija. Model materijala primijenjen je i za ovijeni dio (jezgra) i za neovijeni (zaštitni sloj) elementa, pri čemu je koeficijent ovijenosti za prvi uzet kao 1,2, a za drugi kao jedinična vrijednost. Vrijednost deformacije pri vršnom naprezanju neovijenoga betona uzeta je kao 0,002. Na slici 5. prikazan je σ – ϵ dijagram za model betona prema ovijenosti (Mander i dr., 1988). Na slici 6. prikazan je model Menegotto–Pinto (1973.), koji je upotrebljen za armaturni čelik.



Slika 5. σ – ϵ dijagram za Manderov model betona (Mander i dr., 1988)

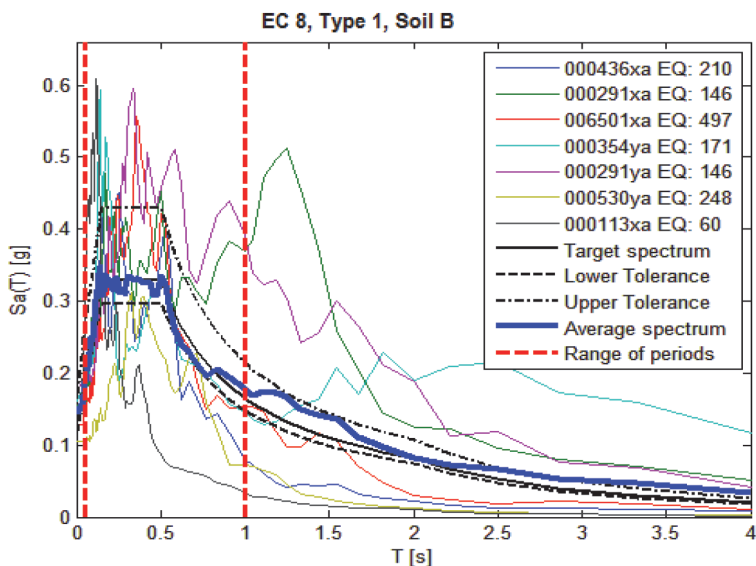


Slika 6. Prikaz nelinearnog cikličkog ponašanja armaturnog čelika, model Menegotto–Pinto armaturnog čelika (Menegotto i Pinto, 1973)

4. Odabir seta potresnih zapisa

Kod dinamičkoga proračuna ulazni podatak potresnoga opterećenja treba predstavljati akcelerogram očekivanih oscilacija tla na promatranoj lokaciji. Primijenjeni su stvarni akcelerogrami, odnosno zapisi potresnoga gibanja temeljnoga tla, koji su odabrani iz europske baze podataka (engl. *European Strong-motion Database*) u programskom paketu Rexel v 3.5 (Iervolino i dr., 2009). Svi su zapisi normalizirani tako da srednja vrijednost svih zapisa oscilira oko projektnog spektra EC8, te su zasebno primjenjivani na ravninski model armiranobetonske okvirne konstrukcije u programskom paketu SeismoStruct ver 7.0.6 (Seismosoft, 2002.).

Odabran je projektni spektar EC8, Tip 1, te je definirano vršno ubrzanje temeljnoga tla i kategorija tla (B). Na osnovi karte potresnih područja Republike Hrvatske (za povratno razdoblje 475 godina) očitano je vršno ubrzanje temeljnog tla za područje grada Osijeka s vrijednošću od 0,11g. Rexel v 3.5 nudi mogućnost pronalaska jednoga, sedam ili trideset akcelerograma odjednom; odabran je set od sedam potresnih zapisa, prema preporuci Čaušević (2010.). Na slici 7. prikazan je nelinearni 5% prigušeni spektar odziva baze od sedam potresnih zapisa, primijenjenih u radu, koji su usklađeni s projektnim spektrom EC8, Tip 1, vršno ubrzanje temeljnog tla od 0,11g te kategorije tla B.

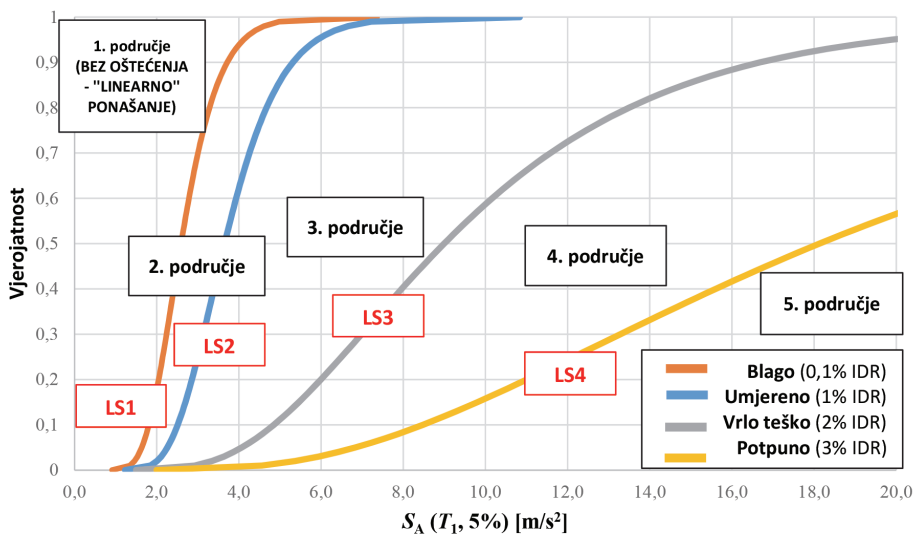


Slika 7. Prikaz sedam potresnih zapisa iz programa Rexel v 3.5, potrebnih za provedbu proračuna IDA (Iervolino i dr., 2009)

5. Rezultati

Nakon proračuna maksimalnih međukatnih pomaka za svih sedam potresnih zapisa sljedeći je korak konstruiranje IDA krivulja na osnovi podataka koji su definirani u prethodnom koraku (IDR_{max} i $S_a(T_1, 5\%)$). Na slici 8. prikazana je konstruirana krivulja vjerojatnosti oštećenja na kojoj su na osi apscisa vrijednosti najvećega međukatnog pomaka IDR_{max} , koje označavaju mjeru odziva konstrukcije, dok su na osi ordinata vrijednosti spektralnoga ubrzanja za prvi vlastiti period s 5% prigušenja $S_a(T_1, 5\%)$, koje označavaju mjeru intenziteta potresa.

Sljedeći se korak odnosi na obradu statističkih podataka. Prije svega, potrebno je definirati granična stanja (engl. *Limit States*) oštećenja konstrukcije. U primjeru ovoga rada primijenjena su granična stanja oštećenja prema HAZUS–MH (FEMA, 2003.), gdje su krivulje vjerojatnosti oštećenja opisane srednjom vrijednošću međukatnoga pomaka IDR_{max} kroz četiri stanja oštećenja: blago (engl. *Slight*), umjereno (engl. *Moderate*), vrlo teško (opsežno) (engl. *Extensive*) i potpuno (engl. *Complete*). Kad se provede proračun za sva četiri granična stanja oštećenja dobiva se kao rezultat graf sa četiri IDA krivulje vjerojatnosti oštećenja prikazane kao lognormalne funkcije, koje označavaju četiri razine oštećenja za svih sedam potresnih zapisa, kako je prikazano na slici 8.



Slika 8. Krivulje vjerojatnosti oštećenja za četiri razine oštećenja

6. Zaključak

Radi procjene potresne oštetljivosti ravninski model armiranobetonskoga okvira zgrade osnovne škole u Osijeku modeliran je u programskom paketu SeismoStruct, ver. 7.0.6 te je podvrgnut setu od sedam potresnih zapisa. Primijenjen je analitički pristup procjeni potresne oštetljivosti, to jest nelinearni dinamički proračun inkrementalnoga tipa (IDA). Kao rezultat proračuna konstruirane su IDA krivulje vjerojatnosti oštećenja, koje predviđaju vjerojatnost dosezanja ili prekoračenja određenoga graničnog stanja kao funkciju intenziteta gibanja temeljnoga tla izraženu spektralnim ubrzanjem. Za potrebe proračuna krivulja vjerojatnosti oštećenja definirana su granična stanja oštećenja za armiranobetonski okvir. Rezultati proračuna IDA pokazali su veliku disperziju rezultata u dinamičkom odzivu konstrukcije. Da bi se dobila što realnija i vjerodostojnija srednja vrijednost svih dinamičkih odziva konstrukcije treba uzeti u obzir veći broj potresnih zapisa (primjerice 30 potresnih zapisa). Ponašanje armiranobetonske konstrukcije bilo je razmjerno povoljno, gotovo linearno, za pojedine potresne zapise (Kyllini, Racha, Friuli), dok je u slučaju ostalih bilo izrazito nepovoljno, to jest zahtjev bočnih deformacija (međukatni pomaci, IDR_{max}) već se pri manjim razinama graničnih stanja oštećenja konstrukcije ($0,40\% IDR_{max}$ i $0,60\% IDR_{max}$) povećavao u većemu koraku u odnosu na intenzitet pobude, to jest nije bio proporcionalan. Globalno, rezultati proračuna pokazuju da IDA krivulje vjerojatnosti oštećenja postaju ravnije, odnosno manjeg nagiba, kako se granična stanja kreću od blagoga do potpunog oštećenja, zbog prirode statističke raspodjele podataka potresnog odziva. U konačnici, može se zaključiti kako je varijabilnost međukatnih pomaka mnogo više izražena pri velikim intenzitetima potresnoga gibanja temeljnoga tla nego pri malim intenzitetima.

Literatura

1. Abdelnaby, A.E.; Elnashai, A.S. 2015. Numerical modeling and analysis of RC frames subjected to multiple earthquakes. *Earthquakes and Structures* 9/5, 957–981.
2. Bertero, V.V.; Clough, R.W.; Oliva, M. 1977. Use of Earthquake Simulators and Large- Scale Loading Facilities in ERCBC, *Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction (ERCBC)*, University of California, Berkeley, pp. 1652-1681.
3. Čaušević, M. 2010. *Dinamika konstrukcija*. Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb.
4. Dhakal, R.P.; Mander, J.B.; Mashiko, N. 2006. Identification of critical ground motions for seismic performance assessment of structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 35/8, 989–1008.
5. Državni arhiv u Osijeku, (DAOS). "HR – DAOS – 72 Skupština općine Osijek", fasc. 583. Osnovna škola «Industrijska četvrt» Osijek. Glavni projekt: statički proračun (1968.)

6. FEMA. 2003. *HAZUS-MH Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, U.S.A.
7. Iervolino, I.; Galasso, C.; Cosenza, E. 2009. REXEL: Computer Aided Record Selection for Code-Based Seismic Structural Analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering* 8, 339–362.
8. Koutromanos, I.; Stavridis, A.; Shing, P.B.; Willam, K. 2011. Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads. *Computers & Structures* 89/11–12, 1026–1037.
9. Mander, J.; Priestley, M.; Park, R. 1988. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering* 114, 1804–1826.
10. Menegotto, M.; Pinto, P. 1973. Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending. Technical report, Proceedings of the Symp. Resistance and Ultimate Deformability of Struct. Acted on by Well-Defined Repeated Loads, IABSE Reports, Vol. 13.
11. Nikić, D. 2016. Konstruiranje krivulja vjerojatnosti oštećenja za odabrani ravninski model ab okvira. Diplomski rad. Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek. Osijek.
12. Petrone, F.; Shan, L.; Kunnath, S.K. 2016. Modeling of RC Frame Buildings for Progressive Collapse Analysis. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 10/1, 1–13.
13. Rabczuk, T.; Akkermann, J.; Eibl, J. 2005. A numerical model for reinforced concrete structures. *International Journal of Solids and Structures* 42/5–6, 1327–1354.
14. Rodrigues, H.; Furtado, A.; Vila-Pouca, N.; Varum, H.; Barbosa, A.R. 2018. Seismic Assessment of a School Building in Nepal and Analysis of Retrofitting Solutions. *International Journal of Civil Engineering* 16/11, 1573–589.
15. Rossetto, T.; Elnashai, A. 2003. Derivation Of Vulnerability Functions For European-type RC Structures Based On Observational Data. *Engineering Structures* 25, 1241–1263.
16. SeismoSoft (2002). *SeismoStruct: A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures*. Technical report, Seismosoft Ltd, Pavia, Italy, (<http://www.seismosoft.com>).
17. Spears, D.B.; Owens, B.E.; Bailey, C.M. 2004. The Goochland – *Chopawamsic terrane boundary, central Virginia Piedmont*, in: Southworth C.S., and Burton W., *Geology of the National Capital Region – Field Trip Guidebook: U.S. Geological Survey Circular 1264*, 223–245.
18. Vamvatsikos, D.; Cornell, C. A. 2002. Incremental Dynamic Analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 31, 491–514.