

Proračunski mikromodel za procjenu potresne otpornosti armiranobetonskih okvira s ispunskim zidom u kojem se nalaze omeđeni otvori

Davorin Penava, Filip Anić, Sarah Šćurla

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

Sažetak

Pri projektiranju potresne otpornosti armiranobetonskih okvirnih konstrukcija s ispunskim zidom u kojem se nalaze otvori, omeđujući elementi ključni su pri razradi detalja konstrukcijskog sustava. Omeđujući elementi nisu podložni proračunu kao okvirne konstrukcije i njihova razrada detalja temeljena je na jednostavnim preporukama. Primjenom proračunskih mikromodela utvrđena je razdioba posmične otpornosti između elemenata okvira s ispunskim zidom, pri čemu je iskazan i udio doprinosa omeđujućih elemenata.

Ključne riječi: armiranobetonski okvir, ispunsko zide, prozorski i vratni otvor, omeđujući elementi, udio po-tresne otpornosti

Computational micromodel for earthquake resistance evaluation of reinforced concrete frames with masonry infill walls containing confined openings

Abstract

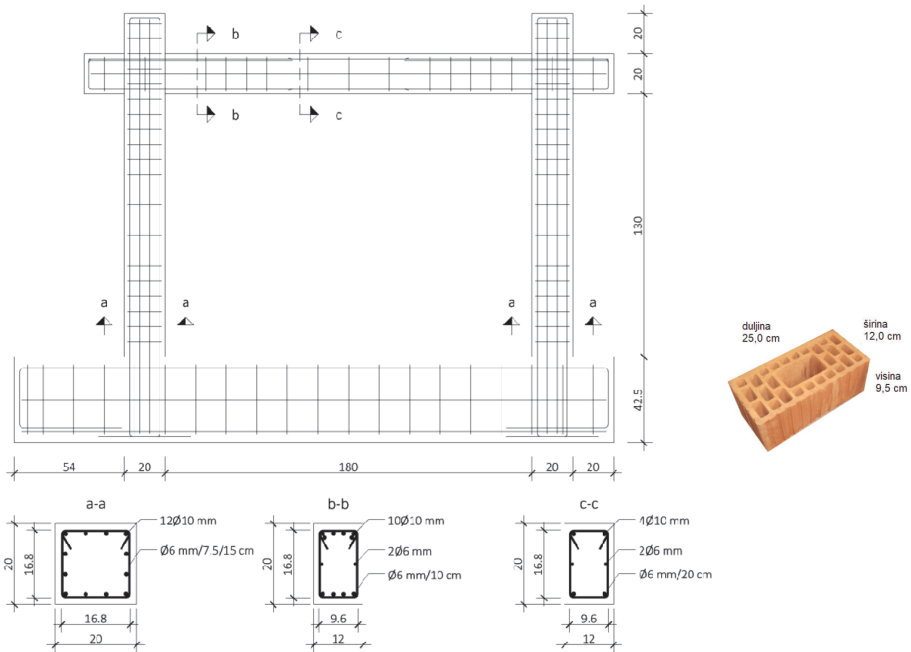
In earthquake resistant design of reinforced concrete frames with masonry infill walls containing openings, confining elements are crucial in detailing of structural system. Confining elements are not subdued to design as frame structures and their detailing is based on simple recommendations. By use of computational micromodels a partial shear resistance of members of infilled frames was determined, and in particular the resistance contribution of confining elements.

Key words: Reinforced concrete frame, masonry infill wall, window and door opening, confining elements, partial earthquake resistance

Uvod

Pri projektiranju potresne otpornosti armiranobetonskih okvirnih konstrukcija s ispunskim zidom (konstrukcijski sustav okvir-zid), u kojemu se nalaze izmješteni i neizmješteni prozorski i vratni otvori, omeđujući elementi (vertikalni serklaži) ključni su pri razradi detalja konstrukcijskoga sustava (CEN, 2004a, 2004b, 2005). Izvedba vertikalnih armiranobetonskih omeđujućih elemenata uz rub otvora omogućava znatna poboljšanja u ponašanju konstrukcijskoga sustava okvir-zid (Penava, 2012; Sigmund and Penava, 2014). Međutim, ako omeđujući elementi oko otvora nisu izvedeni pri gradnji, ponašanje ispunskoga zida postaje nepouzdanije, a time i potresni odziv ovih konstrukcijskih sustava podložniji nesigurnosti, iz razloga poput: mnogovrstan slom zida, nepričvršćenost okomito na ravninu zida, neodgovarajuće raspucavanje koje vodi k preuranjenom rušenju (Al-Chaar, Lamb and Issa, 2003; Decanini, Liberatore and Mollaioli, 2006; Kakaletsis and Karayannis, 2007, 2008, 2009; Tasnimi and Mohebkah, 2011; Sigmund and Penava, 2014; Penava *et al.*, 2018). Omeđujući elementi nisu podložni proračunu kao okvirne konstrukcije i njihova razrada detalja temeljena je na jednostavnim preporukama.

Osnova su ovoga rada ispitane u mjerilu 1:2,5 izvedene modelske konstrukcije armiranobetonskih okvira s ispunskim zidom (Penava, 2012; Sigmund and Penava, 2014) u kojemu se nalaze izmješteni ili neizmješteni prozorski i vratni otvori (omjer ploština otvora i zida $A_o / A_s \leq 15\%$ (Sigmund and Penava, 2013)), i zid bez otvora (slike 1. i 3. i tablica 1.), projektirane i s razradom detalja kao okvirne konstrukcije prema razredu umjerene duktilnosti u skladu s odredbama norma EN 1992-1-1, EN 1996-1-1 i EN 1998-1 (CEN, 2004a, 2004b, 2005). Ispunsko zid izvedeno je opečnim blokovima svrstanima u Skupinu 2 zidnih elemenata i mortom opće namjene razred čvrstoće M5, u skladu sa zahtjevima konstrukcijskoga zida pri projektiranju potresne otpornosti. Modelske konstrukcije bile su razvrstane u tri grupe prema tablici 1. Modeli Skupine II bili su jednaki onima Skupine I, ali s dodavanjem omeđujućih elemenata pored otvora, dok su modeli Skupine III bili poredbeni modeli. Ispitivanja, pri ponavljajućemu posmičnom djelovanju u ravnini zida, dovela su do spoznaje o dostizanju znatnoga oštećenja zida (4. razred oštećenja u skladu s ljestvicom EMS-98 (Grünthal *et al.*, 1998; Schwarz *et al.*, 2015)) pri katnom pomaku od 1,25%, u usporedbi s 0,5% bez prisutnosti omeđujućih elemenata pored otvora. Međutim, posmična otpornost omeđujućih elemenata otkazivala je u blizini vrhova otvora već pri 3. razredu oštećenja pri katnim pomacima između 0,75% i 1% (slike 2. i 3.).



Slika 1. Nacrt s razradom detalja armiranobetonske okvirne konstrukcije u mjerilu 1:2,5 ispitane u laboratoriju (lijevo) i šuplji opečni zidni elementi (desno) (Penava, 2012; Sigmund and Penava, 2014)

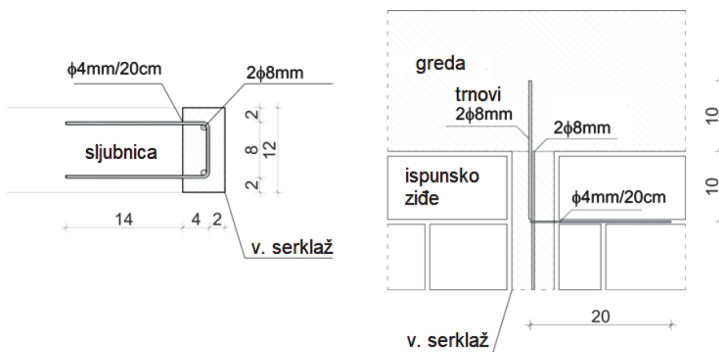


Slika 2. Ispitane u mjerilu 1:2,5 izvedene modelske armiranobetonske okvirne konstrukcije s ispunskim zidom u kojemu se nalaze omeđeni otvori, i zidne bez otvora (Penava, 2012; Sigmund and Penava, 2014)

Tablica 1. Razredba i opis modelskih konstrukcija ispitanih u laboratoriju (Penava, 2012; Sigmund and Penava, 2014)

Modelska konstrukcija		Prikaz modelske konstrukcije	Otvor		Opis
Skupina	Oznaka		Vrsta, mjere i omjer ploština	Razmještaj	
II	1		Vratni otvor	Neizmješten	Modelske konstrukcije s omeđenim otvorima u zidu
			$l_o/h_o=0,35/0,90$ m	$e_o = l_o/2 = 0,90$ m	
			$A_o/A_i=0,14; A_o=0,32$ m ²		
	2		Prozorski otvor	Neizmješten	
			$l_o/h_o=0,50/0,60$ m	$e_o = l_o/2 = 0,90$ m	
			$A_o/A_i=0,13; A_o=0,30$ m ²	$P=0,40$ m	
	3		Vratni otvor	Izmješten	
			$l_o/h_o=0,35/0,90$ m	$e_o = h_i/5 + l_o/2 = 0,44$ m	
$A_o/A_i=0,14; A_o=0,32$ m ²					
4		Prozorski otvor	Izmješten		
		$l_o/h_o=0,50/0,60$ m	$e_o = h_i/5 + l_o/2 = 0,44$ m		
		$A_o/A_i=0,13; A_o=0,30$ m ²	$P=0,40$ m		
III	1		-	-	Poredbene modelske konstrukcije
	2		-	-	

Tumač oznaka: A_o je ploština otvora koja je jednaka umnošku visine (h_o) i duljine otvora (l_o); A_i je ploština ispunskog zida koja je jednaka umnošku visine (h_i) i duljine zida (l_i); $h_i = 1.3$ m; $l_i = 1.8$ m; e_o je odmaknutost otvora; $t_i = 0.12$ m je debljina zida; P je visina parapetnog zida.


Slika 3. Nacrt i razrada detalja vertikalnoga armiranobetonskog omeđujućeg elementa (serklaža) u poprečnom presjeku (lijevo) i po visini (desno) (Penava, 2012; Sigmund and Penava, 2014)

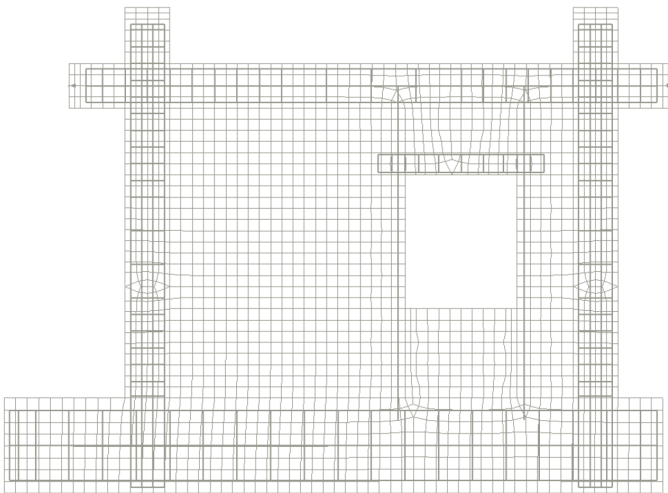
U ovom je radu primjenom proračunskih mikromodela utvrđena razdioba poprečne (potresne) otpornosti između elemenata konstrukcijskoga sustava okvir-ziđe pri razredima oštećenja u skladu s europskom makroseizmičkom ljestvicom EMS-98 (Grünthal *et al.*, 1998; Schwarz *et al.*, 2015) te je iskazan udio doprinosa svakoga elementa zasebno, a osobito omeđujućih elemenata.

Proračunski mikromodel

Proračunski je pojednostavljeni mikromodel (slika 4.) razvijen u računalnom programu ATENA 2D Eng (Cervenka, Jendele and Cervenka, 2012; Pryl and Cervenka, 2013; Cervenka Consulting s.r.o., 2015) i vrednovan prema rezultatima dobivenima ispitivanjima u mjerilu 1:2,5 izvedenih modelskih konstrukcija (Penava, 2012; Sigmund and Penava, 2014), a što je pobliže opisano u publikaciji (Penava, Sigmund and Kožar, 2016).

Prihvaćeni pristup razvoja proračunskoga modela, u usporedbi s drugim dostupnim rješenjima poput onih danih u (Crisafulli, Carr and Park, 2000; Cavaleri and Di Trapani, 2015; Furtado, Rodrigues and Arêde, 2015; Laughery and Pujol, 2015; Asteris *et al.*, 2016, 2017; Di Trapani *et al.*, 2018), posjedovao je mogućnost izravnoga uzimanja različitih vrsta, veličina i razmještaja otvora i omeđujućih elemenata u obzir, predočavanja mnogovrsnoga sloma i oštećenja ziđa i razmatranja razdiobe posmične (potresne) otpornosti prema elementima konstrukcijskoga sustava (Al-Chaar, 2008; Mohebkah, Tasnimi and Moghadam, 2008; Koutromanos, 2011; Campbell, 2012; Asteris *et al.*, 2013; Sarhosis, Tsavdaridis and Giannopoulos, 2014; Penava, Sigmund and Kožar, 2016).

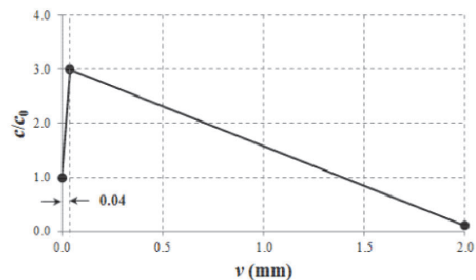
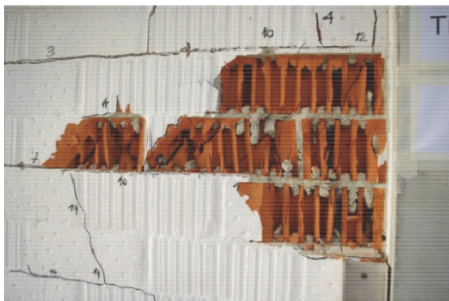
Proračunski je model bio ograničen na ravninu, kako je bilo i tijekom ispitivanja.



Slika 4. Proračunski model armiranobetonske okvirne konstrukcije s ispunskim zidom razvijen u računalnom programu ATENA 2D Eng (Cervenka Consulting s.r.o., 2015)

Geometrijska svojstva proračunskoga modela uzeta su jednaka onima u mjerilu 1:2,5 izvedenih i ispitanih modelskih konstrukcija (slike 1. do 4.). Područje u modelu koje obuhvaćaju beton i zidni elementi izvedeno je ravninskim izoparametarskim devetčvornim četverostranim i šestčvornim konačnim elementima trokutnoga oblika, dok su šipke armature izvedene tročvornim štapnim elementima, a sljubnice spojnim elementima s mogućnošću isključenja vlačne čvrstoće. Veličina konačnih elemenata, na osnovi međusobne usporedbe približavanja slijednih rezultata proračuna, utvrđena je kao jedna četvrtina veličine zidnoga elementa (slika 4.). Zidni elementi i spoj zidnih elemenata i sljubnica morta (spojni elementi nulte debljine) izvođeni su zasebno, jednako kao i na stvarnoj konstrukciji. Normalna i tangencijalna krutost spojnih elemenata procijenjena je na osnovi izraza $K_{nn}=E/t$ odnosno $K_{tt}=G/t$, gdje je E modul elastičnosti, a G modul posmika zidnoga elementa, dok je t debljina sljubnice morta (Cervenka, Jendele and Cervenka, 2012; Pryl and Cervenka, 2013).

Prihvaćeni konstitucijski zakoni ponašanja gradiva s pripadnim svojstvima, utvrđeni normiranim ispitivanjima ili putem teorijskih izraza dani su u (Penava, Sigmund and Kožar, 2016). Dodatno, poseban učinak povezivanja šupljega opečnog zidnog elementa i sljubnice morta (Penava *et al.*, 2016) uzet je u obzir kod spojnoga elementa horizontalnih sljubnica dodavanjem funkcije očvršćivanja početne posmične čvrstoće (slika 5.). Beton i zidni elementi predstavljeni su modelom dostupnim u programu NonLinCementitious2 odnosno SBETA (Cervenka, Jendele and Cervenka, 2012; Pryl and Cervenka, 2013).

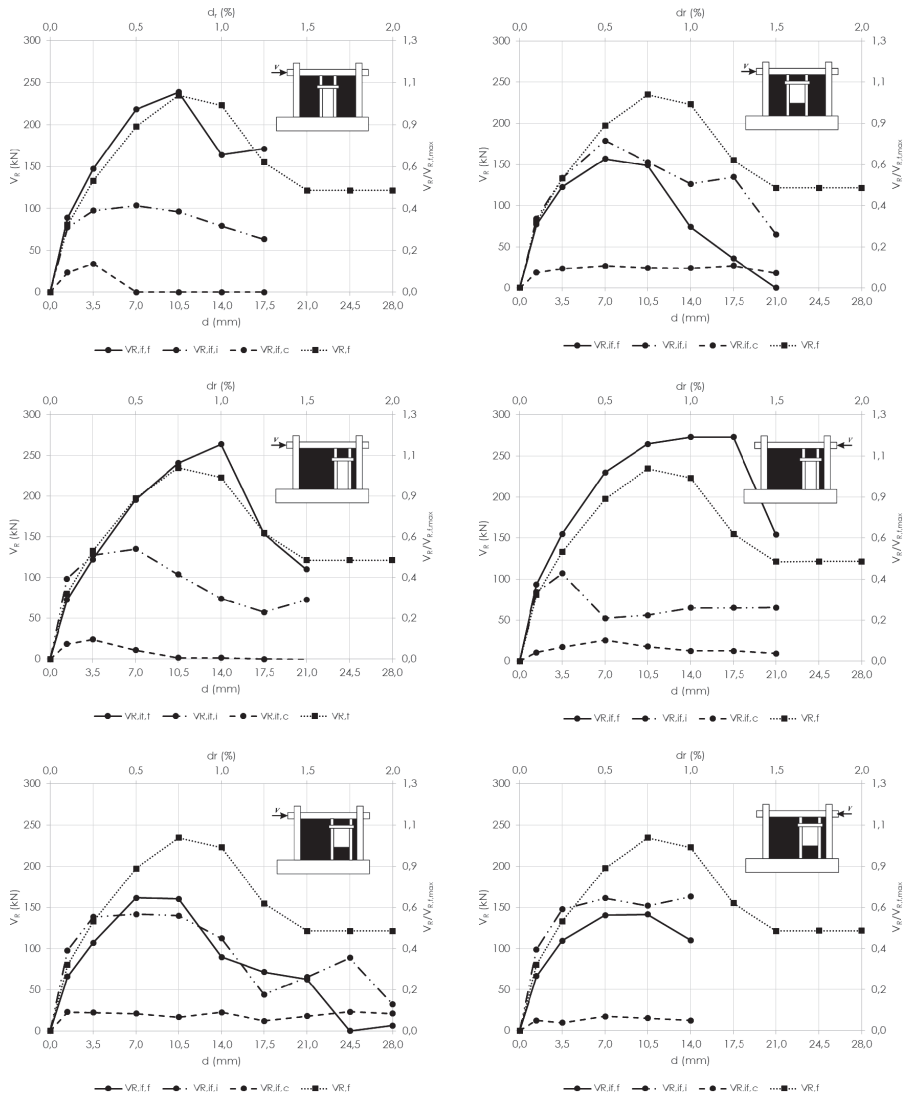


Slika 5. Povezivanje u spoju šupljega opečnog zidnog elementa i horizontalne sljubnice morta (lijevo) i funkcija očvršćivanja početne posmične čvrstoće (desno)

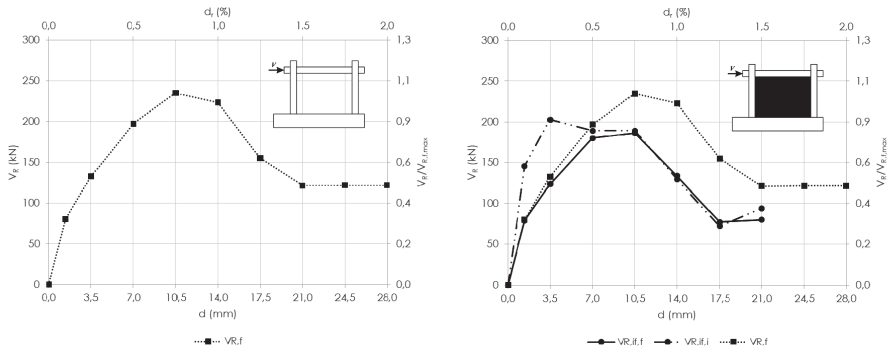
Proračuni i rezultati

Vrijednosti posmične (potresne) otpornosti elemenata konstrukcijskoga sustava, to jest armiranobetonskoga okvira $V_{R,if,f}$ (kN), ispunskoga ziđa $V_{R,if,i}$ (kN) i armiranobetonskoga omeđujućeg elementa $V_{R,if,c}$ (kN), određene su nelinearnim statičkim proračunom postupnim guranjem grede okvira s prirastom pomaka $d=0,1$ mm do

ciljanoga pomaka $d=28$ mm to jest $d_r=2\%$. (rušenje okvira). Vrijednosti su opažane u ravni stopa stupova okvira (slike 6. i 7.). Udio poprečne otpornosti iskazan je putem $V_R / V_{R,f,max} \times 100$ (%), gdje je $V_{R,f,max}$ vršna posmična otpornost okvira bez ispunjskoga žida.



Slika 6. Razdioba posmične otpornosti na elemente konstrukcijskoga sustava okvir-žid (Skupina II)



Slika 7. Razdioba posmične otpornosti na elemente konstrukcijskoga sustava okvir-ziđe (Skupina III)

Razlika

Vrednovani proračunski mikromodel u mjerilu 1:2,5 izvedenih i ispitanih modelskih konstrukcija armiranobetonskih okvira s ispunskim zidom, u kojemu se nalaze omeđeni otvori, i zid bez otvora, upotrijebljen je radi određivanja razdiobe posmične otpornosti na pojedinačne (ne)konstrukcijske elemente sustava, što nije moguće postići mjernim uređajima tijekom ispitivanja. Odabrani modelski pristup omogućio je ispunjavanje svih geometrijskih zahtjeva na modele, neovisno o vrsti, veličini i razmještaju otvora, s izravnim modeliranjem gradiva kakva su u stvarnosti. Općenito je razdioba posmične otpornosti između elemenata sustava bila različita od slučaja do slučaja, te je bila pod utjecajem vrste, veličine i razmještaja otvora te prisutnosti omeđujućih elemenata. U slučaju vratnoga otvora projektni su zahtjevi veći od očekivanih. Izvedba omeđujućih elemenata preporučljiva je zbog umanjivanja nepouzdanosti procjene odziva ovih konstrukcijskih sustava.

Literatura

- Al-Chaar, G. K. (2008) *Constitutive models for nonlinear finite element analysis of masonry prisms and infill walls*. Washington, DC.
- Al-Chaar, G. K., Lamb, G. E. and Issa, M. A. (2003) "Effect of openings on structural performance of unreinforced masonry infilled frames", *ACI Special Publication*, 211, pp. 247–262.
- Asteris, P. G. et al. (2013) "Mathematical micromodeling of infilled frames: state of the art", *Engineering Structures*. Elsevier Ltd, 56, pp. 1905–1921. doi: 10.1016/j.engstruc.2013.08.010.
- Asteris, P. G. et al. (2016) "A macro-modelling approach for the analysis of infilled frame structures considering the effects of openings and vertical loads", *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(5), pp. 551–566. doi: 10.1080/15732479.2015.1030761.

- Asteris, P. G. *et al.* (2017) "Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels", *Engineering Structures*. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.10.012.
- Campbell, J. (2012) *Numerical Model for Nonlinear Analysis of Masonry Walls*. PhD Thesis. Rheinisch – Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Cavaleri, L. and Di Trapani, F. (2015) "Prediction of the additional shear action on frame members due to infills", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(5), pp. 1425–1454. doi: 10.1007/s10518-014-9668-z.
- CEN (2004a) *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004)*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN (2004b) *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings (EN 1998-1-1:2004)*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN (2005) *Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures (EN 1996-1-1:2005)*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Cervenka Consulting s.r.o. (2015) "ATENA for Non-Linear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures". Prague: Červenka Consulting s.r.o.
- Cervenka, V., Jendele, L. and Cervenka, J. (2012) *ATENA Program Documentation Part 1 Theory*. Prague: Cervenka Consulting Ltd.
- Crisafulli, F. J., Carr, A. J. and Park, R. (2000) "Analytical modelling of infilled frame structures - a general review", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(1), pp. 30–47.
- Decanini, L. D., Liberatore, L. and Mollaioli, F. (2006) "The Influence of Openings on the Seismic Behaviour of Infilled Framed Structures", in *15th World Conference on Earthquake*. Lisbon, Portugal.
- Furtado, A., Rodrigues, H. and Arêde, A. (2015) "Modelling of masonry infill walls participation in the seismic behaviour of RC buildings using OpenSees", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 7(2). doi: 10.1007/s40091-015-0086-5.
- Grünthal, G. *et al.* (1998) *European macroseismic scale 1998*. Luxembourg.
- Kakaletsis, D. J. and Karayannis, C. G. (2007) "Experimental investigation of infilled R/C frames with eccentric openings", *Structural Engineering and Mechanics Journal*, 26(231–250).
- Kakaletsis, D. J. and Karayannis, C. G. (2008) "Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading", *Journal of Earthquake Engineering*, 12(2), pp. 197–221. doi: 10.1080/13632460701299138.

Kakaletsis, D. J. and Karayannis, C. G. (2009) "Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with openings", *ACI Structural Journal*, 106(2), pp. 132–141.

Koutromanos, I. (2011) *Numerical Analysis of Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames Subjected to Seismic Loads and Experimental Evaluation of Retrofit Techniques*. University of California, San Diego.

Laughery, L. and Pujol, S. (2015) "Compressive strength of unreinforced struts", *ACI Structural Journal*, 112(5). doi: 10.14359/51687711.

Mohebkhah, A., Tasnimi, A. A. and Moghadam, H. A. (2008) "Nonlinear analysis of masonry-infilled steel frames with openings using discrete element method", *Journal of Constructive Steel Research*, 64(12), pp. 1463–1472. doi: 10.1016/j.jcsr.2008.01.016.

Penava, D. (2012) *Influence of openings on seismic response of masonry infilled reinforced concrete frames*. PhD thesis. Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Osijek, Croatia.

Penava, D. et al. (2016) "Clay block masonry and mortar joint interlocking", *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 68(08), pp. 609–616. doi: 10.14256/JCE.1576.2016.

Penava, D. et al. (2018) "Contribution of RC columns and masonry wall to the shear resistance of masonry infilled RC frames containing different in size window and door openings", *Engineering Structures*, 172, pp. 105–130. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.007.

Penava, D., Sigmund, V. and Kožar, I. (2016) "Validation of a simplified micromodel for analysis of infilled RC frames exposed to cyclic lateral loads", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(10), pp. 1–26. doi: 10.1007/s10518-016-9929-0.

Pryl, D. and Cervenka, J. (2013) *ATENA program documentation, part 1 of 1, troubleshooting manual*. Prague: Cervenka Consulting Ltd.

Sarhosis, V., Tsavdaridis, K. D. and Giannopoulos, I. (2014) "Discrete Element Modelling of Masonry Infilled Steel Frames with Multiple Window Openings Subjected to Lateral Load Variations", *The Open Construction and Building Technology Journal*, 8(1), pp. 93–103.

Schwarz, J. et al. (2015) "Vulnerability assessment and damage description for R.C. frame structures following the EMS-98 principles", *Bulletin of Earthquake Engineering*. Springer Netherlands, 13(4), pp. 1141–1159. doi: 10.1007/s10518-014-9694-x.

Sigmund, V. and Penava, D. (2013) "Assessment of masonry infilled reinforced concrete frames with openings", *Technical Gazette*. Strojsarski fakultet u Slavonskom Brodu, Elektrotehnički fakultet u Osijeku, Građevinski fakultet u Osijeku, 20(3), pp. 459–466.

Sigmund, V. and Penava, D. (2014) "Influence of openings, with and without confinement, on cyclic response of infilled R-C frames - An experimental study", *Journal of Earthquake Engineering*, 18(1), pp. 113–146. doi: 10.1080/13632469.2013.817362.

Tasnimi, A. A. and Mohebkhah, A. (2011) "Investigation on the behaviour of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches", *Engineering Structures*, 33.

Di Trapani, F. *et al.* (2018) "Empirical Equations for the Direct Definition of Stress–Strain Laws for Fiber-Section-Based Macromodeling of Infilled Frames", *Journal of Engineering Mechanics*, 144(11), p. 04018101. doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001532.