

Primljen / Received: 10.3.2014.

Ispravljen / Corrected: 4.8.2014.

Prihvaćen / Accepted: 4.9.2014.

Dostupno online / Available online: 10.10.2014.

Utjecaj poprečnih zidova na popustljivost stropne ploče

Autori:



Mohammad Ahmadi, dipl.ing.građ.
Malezijsko tehničko sveučilište (UTM)
Građevinski fakultet
Johor, Malezija
mfp_ahmadi@yahoo.com



Izv.prof.dr.sc. **Suhaimi Abu Bakar**, dipl.ing.građ.
Malezijsko tehničko sveučilište (UTM)
Građevinski fakultet
Zavod za konstrukcije i materijale
Johor, Malezija
suhaimibakar@utm.my



Hajer Satih Abbas, dipl.ing.građ.
Malezijsko tehničko sveučilište (UTM)
Građevinski fakultet
Johor, Malezija
hajir87m@yahoo.com

Stručni rad

Mohammad Ahmadi, Suhaimi Abu Bakar, Hajer Satih Abbas

Utjecaj poprečnih zidova na popustljivost stropne ploče

Krutost stropne ploče ima značajan utjecaj na odgovor konstrukcije. Uobičajena je pretpostavka da se radi o krutom elementu. Ovakva pretpostavka smanjuje stupanj slobode i osigurava lakšu analizu. No, tijekom posljednjih potresa, popustljivost stropne ploče privukla je znatiželju znanstvenika. Kako bi se istražilo njeno ponašanje, u ovom radu analizirana je jednokatna armiranobetonska konstrukcija. Analiza je provedena na četiri okvirne konstrukcije, a primjenom računalnih programa ETABS2000 i LUSAS je izračunat optimalni omjer između popustljivosti stropne ploče i pomaka konstrukcije. Analiza je pokazala da se kod omjera manjeg od 0,5 stropne ploče mogu razmatrati kao kruti element.

Ključne riječi:

stropna ploča, popustljivost, optimalni odnos, pomak kata, progib ploče

Professional paper

Mohammad Ahmadi, Suhaimi Abu Bakar, Hajer Satih Abbas

Investigation into diaphragm flexibility using shear wall

The diaphragm stiffness has a significant influence on the structural responses. Typically engineers assume those diaphragm are rigid. This assumption decreases the degree of freedom and provides easier analysis. But diaphragm damages in past earthquakes, due to its flexibility, have attracted researchers toward the diaphragm behaviour. In order to investigate this behaviour, in this study single storey RC structure was considered (four frame models using ETABS2000 and LUSAS) to calculate optimum ratio between diaphragm deflection and storey displacement. The diaphragm ratio with lower 0.5 should be considered as rigid.

Key words:

Diaphragm, flexibility, optimum ratio, storey displacement, diaphragm deflection

Fachbericht

Mohammad Ahmadi, Suhaimi Abu Bakar, Hajer Satih Abbas

Einfluss von Querwänden auf die Flexibilität von Deckenplatten

Die Steifigkeit von Deckenplatten hat einen bedeutenden Einfluss auf das Verhalten des Tragwerks. Normalerweise wird ein steifes Element vorausgesetzt; diese Annahme vermindert die Anzahl der Freiheitsgrade und ermöglicht einfachere Analysen. Aufgrund von Beschädigungen im Laufe der letzten Erdbeben, hat die Flexibilität von Deckenplatten jedoch die Aufmerksamkeit der Forschung auf sich gezogen. Um das entsprechende Verhalten zu untersuchen, wird in dieser Arbeit eine einstöckige Stahlbetonkonstruktion analysiert. Dazu sind mittels der Programme ETABS und LUSAS vier verschiedene Rahmenkonstruktionen betrachtet und optimale Verhältnisse zwischen der Flexibilität der Deckenplatte und der Stockwerksverschiebung berechnet worden. Die Analysen haben gezeigt, dass bei einem Verhältnis unter 0,5 die Deckenplatten als steife Elemente betrachtet werden können.

Schlüsselwörter:

Deckenplatte, Flexibilität, optimales Verhältnis, Stockwerksverschiebung, Deckendurchbiegung

1. Uvod

U ovom radu se istražuje odnos popustljivosti stropne ploče i pomaka konstrukcije što je vrlo važno u građevinarstvu, posebice kod modeliranja konstrukcija. Krutost stropne ploče sastoji se od krutosti u ravnini i izvan ravnine. Ako se krutost stropne ploče pretpostavi kao kriterij, onda se stropna ploča može promatrati kao kruto ili kao popustljivo tijelo. Inženjeri uglavnom pretpostavljaju da je stropna ploča kruta, jer takva pretpostavka smanjuje broj stupnjeva slobode i omogućuje lakšu analizu.

Analiza konstrukcijskih modela s pretpostavkom da je stropna ploča kruta pokazuju važnost ovog kriterija [1]. No, oštećenja stropne ploče tijekom posljednjih potresa privukla su pažnju znanstvenika za istraživanje ponašanja u njoj ravnini. Saffarini i Qudaimat [2] su zaključili kako je kruta stropna ploča prihvatljiva kod zgrada bez poprečnog zida, međutim kod zgrada s poprečnim zidovima može uzrokovati probleme i pogreške. Ju i Lin [3] su također potvrdili njihovo stajalište. Moeini i suradnici [4] pokazali su kako je kruta stropna ploča dovoljna pretpostavka u zgradama bez poprečnih zidova.

Bhuiyan i Leon [5] ocijenili su utjecaj popustljivosti stropne ploče na visokim zgradama i pokazali da visoke zgrade s popustljivim stropnim pločama bolje podnose veća ubrzanja (odnosno pomake), a time su i njihovi vlastiti periodi veći. Fleischman i suradnici [6] su otkrili da se plastičnost stropne ploče ostvaruje na nižim katovima zbog njenih deformacijskih svojstava.

Hadianfard i Sedaghat [7] proučavali su nelinearni odgovor razuporne konstrukcije s popustljivom stropnom pločom (stropni sustav s betonskim gredama) i demonstrirali su da je odnos raspona važan parametar kod popustljivosti stropne ploče (ako odnos prelazi tri, pretpostavka popustljivosti ne smije se zanemariti). Sadashiva i suradnici [8] su pokazali da popustljivost stropne ploče značajno utječe na pomake konstrukcije. Korištenjem predložene formule projektanti mogu procijeniti progib stropne ploče.

Sve metode istraživanja ponašanja stropne ploče mogu se klasificirati u dvije grupe: kvalitativni kriterij prema EN 1998-1 [9]

i kvantitativni kriterij prema FEMA 273 [10]. Prema EN 1998-1, stropna ploča bi se trebala modelirati po stvarnoj popustljivosti u njoj ravnini. To znači da se, ako je horizontalni pomak krute stropne ploče, veći od 10 % dopuštenog horizontalnog pomaka, takva stropna ploča smatra krutom. FEMA 273 stropne ploče dijeli u tri grupe: popustljiva, polukruta i kruta, koje su prikazane u tablici 1. i na slici 1.

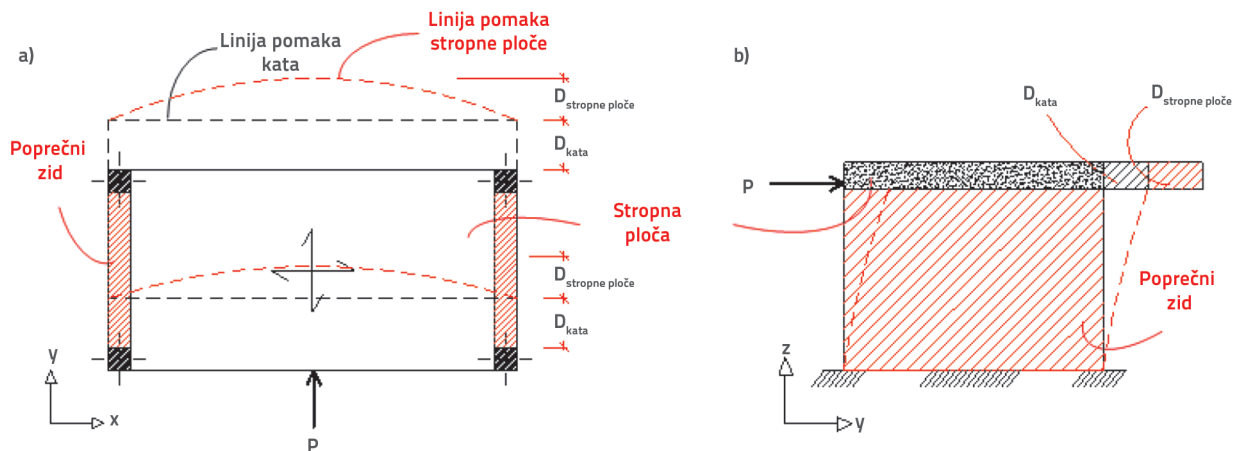
Tablica 1. Klasifikacija popustljivosti stropne ploče prema FEMA 273

Popustljivost stropne ploče	Ograničenja
kruta	$\frac{D_{stropne\ ploče}}{D_{kata}} < 0,5$
polukruta	$0,5 \leq \frac{D_{stropne\ ploče}}{D_{kata}} \leq 2$
popustljiva	$2,0 < \frac{D_{stropne\ ploče}}{D_{kata}}$

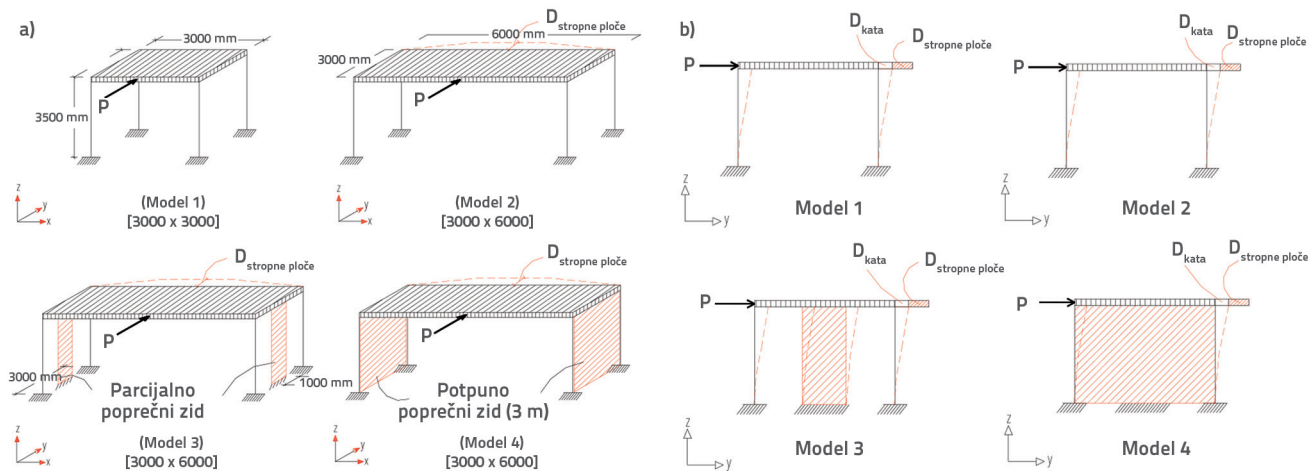
Ovo nam pokazuje da je popustljivost stropne ploče jedan od najvažnijih kriterija koje projektanti nikako ne smiju zanemariti. Iako se koriste u nekim normama za projektiranje, granice iznad 0,5 i 2 još nisu utvrđene, stoga je potrebno daljnje proučavanje.

1.1. Karakteristike modeliranja

U ovom radu proučavan je model četiri okvira na armiranobetonskoj konstrukciji da bi se utvrdila popustljivost stropne ploče i relativni optimalni omjer (eng. *optimum ratio* - OR) između progiba stropne ploče ($D_{stropne\ ploče}$) i maksimalnog pomaka kata (D_{kata}). Istraživanje uključuje modeliranje i analizu četiri modela (prostorni okvir sa stropnom pločom): dimenzije 3 x 3 m i 3 x 6 m, 3 x 6 m povezan parcijalnim poprečnim zidom i 3 x 6 m povezan s poprečnim zidom. Debljine ploče i poprečnog zida iznosile su 150 mm, a dimenzije grede i stupova 250 x 300



Slika 1. Uvećan prikaz progiba stropne ploče u ravnini: a) tlocrt konstrukcije; b) pogled s visine



Slika 2. Modeli bez poprečnih zidova, s parcijalnim poprečnim zidovima i poprečnim zidovima: a) prostorni prikaz modela; b) uzdužni presjek

Tablica 2. Koeficijent seizmičke otpornosti

Norma	Faktori	Parametri	Broj faktora	
			Sustav bez poprečnih zidova	Sustav s poprečnim zidovima
Potresno opterećenje EN 1998-1:2004	Ubrzanje tla	$a_{gr} = 3,45 \text{ m/s}^2$	$a_g = 3,45$	$a_g = 3,45$
	Faktor utjecaja	$\gamma_t = 1,0$ (tablica 4.3)		
	Faktor tla (Tip 1)	Tip tla = B	X	
		$S = 1,2$		
		$T_B = 0,15$		
		$T_C = 0,5$		
	Osnovni period vibracija	$H = 3,50 \text{ m}$	$T_1 = 0,192 \text{ s}$	$T_1 = 0,127 \text{ s}$
		$C_t = 0,075$ (betonski okvir)		
		$C_t = 0,05$ (s poprečnim zidovima)		
	Faktor ponašanja	$T_1 = C_t H/4$	$q = 3,3$	$q = 3,3$
		$a_u/a_1 = 1,1$ (5.2.2.2)		
	Spektar za projektiranje	$q = 3 a_u/a_1$ (tablica 5.1)	$S_d(T_1) = 3,13$	$S_d(T_1) = 3,08$
$T_B < T_1 < T_C$				
$S_d(T) = a_g S(2,5/q)$ (bez poprečnih zidova)				
Faktor korekcije	$S_d(T) = a_g S [2/3 + T_1/T_B(2,5/q - 2/3)]$ (s poprečnim zidovima)	$\lambda = 0,85$	$\lambda = 0,85$	
	$\beta = 0,2$			
Faktor seizmičke otpornosti	$T_1 < 2T_C$	$c = 0,0521$	$c = 0,0339$	
	$C = S_d(T_1)\lambda$			
	$C = 0,51$			
	$c = C/9,81$ (ETABS)			

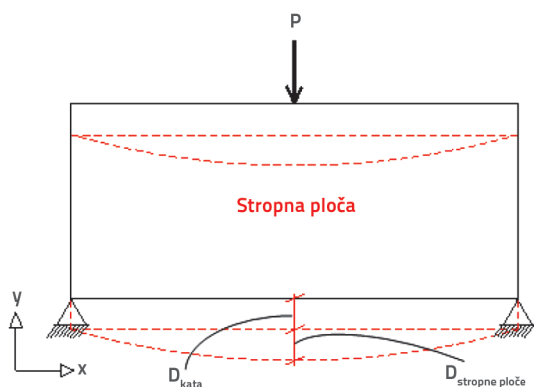
mm i 350 x 350 mm. Armatura grede i stupova je 6φ16 (6 šipki promjera 16 mm) i 8φ16.

Cilj primijenjene numeričke analize bio je odrediti optimalan odnos maksimalnog progiba stropne ploče i maksimalnog pomaka kata. Za proračun maksimalnog pomaka kata korišten je program ETABS2000 dok je program LUSAS korišten za određivanje maksimalnog progiba stropne ploče. Modeli su podvrgnuti horizontalnom seizmičkom opterećenju prema EN 1998-1. Pretpostavljeno je da se svi modeli nalaze u seizmički aktivnoj zoni (slika 2.). Tablica 2. pokazuje potrebne postupke za izračun seizmičke otpornosti armiranobetonskih okvira i sustava s poprečnim zidovima (za sve modele) prema EN 1998-1. Karakteristike materijala su sljedeće:

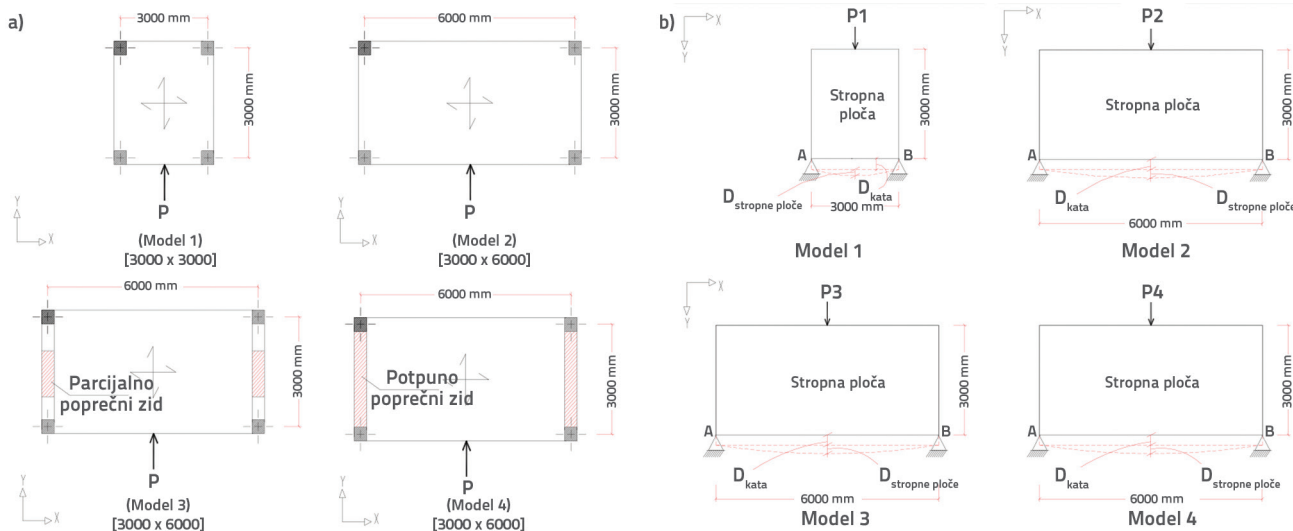
$$f_c = 30 \text{ N/mm}^2 \text{ (B-300)}, f_y = 400 \text{ N/mm}^2 \text{ (A-III)}, f_{vs} = 400 \text{ N/mm}^2 \text{ (A-II)}$$

1.2. Strategija modeliranja

Stropna ploča prenosi inercijske sile s temelja na vertikalne elemente [11] i povezuje sve vertikalne elemente zajedno [12] i na taj način stvara čvrstoću i krutost na ravninu (djelovanje stropne ploče), [13].



Slika 3. Modeliranje visokostijeni nosačem (gredom)



Slika 4. Obrazloženje modela: a) tlocrt modela; b) pretvaranje stropne ploče u visokostijeni nosač (gredu)

U istraživanju su korištene različite metode za stropnu ploču, a kategorizirane su u dvije skupine: prostorno modeliranje (korištenjem ljuski i elemenata stropne ploče) [14] i štapno modeliranje [12]. Druga metoda je puno jednostavnija za razumijevanje i upotrebu. Stropne ploče mogu biti modelirane kao grede u horizontalnom smjeru [12, 15]. U ovom radu primijenjeno je modeliranje visokostijeni nosačem (gredom) (slika 3.), što je pojednostavljeno slike 1.a.

2. Metodologija

Kao što je navedeno u uvodu, istraživanje uključuje modeliranje i analizu četiri modela za određivanje odnosa između $D_{\text{stropne ploče}}$ i D_{kata} . Prema slici 4., da bi se ostvario cilj istraživanja, korištena su dva važna konstrukcijska faktora (geometrija i sustav), različite veličine stropne ploče (Model 1 i Model 2) i efekt poprečnih zidova (Model 3 i Model 4).

Kad je jedan kat konstrukcije kao kod modela 1 (slika 4.) izložen bočnom opterećenju, tada se može pomaknuti u y smjeru. U ovom radu krutost stupova i poprečnih zidova služi kao ojačanje protiv horizontalnih pomaka konstrukcije. Predložena numerička metoda pretpostavlja da progib stropne ploče počinje nakon što se pojavi maksimalni pomak kata. Kao posljedica toga, može se pojednostavniti i podijeliti na dva različita progiba koji se računaju zasebno. Jedan predstavlja maksimalnu vrijednost pomaka kata (prije progiba ploče), a drugi je progib stropne ploče.

To znači da se u prvoj fazi računa pomak kata, a u drugoj fazi uzeta su dva zglobna pridržanja stropne ploče. Stoga se ponašanje stropne ploče gleda kao ponašanje visokostijeni nosača (grede) (slika 4.b) pa se na taj način dobije progib grede. Program ETABS2000 je korišten pri izračunu potresnog opterećenja (oznaka P na slikama) i bočnog pomaka (D_{kata}). Program LUSAS je korišten za analizu stropne ploče i njenog progiba ($D_{\text{stropne ploče}}$).

ETABS koristi seizmičku otpornost koja je prikazana u tablici 2. Prema strategiji modeliranja, greda se koristi za prikaz svih

modela (slika 4.). Stoga, glavna opterećenja (P1, P2, P3 i P4) unesena su u ETABS2000 i dobivena opterećenja su korištena na svaki model grede da bi se dobio $D_{\text{stropne ploče}}$. Svaka greda ima izračunan progib, a D_{kata} i $D_{\text{stropne ploče}}$ su tablično prikazani da bi se odredio njihov odnos OR ($D_{\text{stropne ploče}} / D_{\text{kata}}$). Nakog toga, rezultati su prikazani u linijskom grafikonu, pomoću kojeg je izračunan OR (eng. *optimum ration*) tj. optimalni omjer između progiba stropne ploče i maksimalnog pomaka kata.

3. Rezultati i diskusija

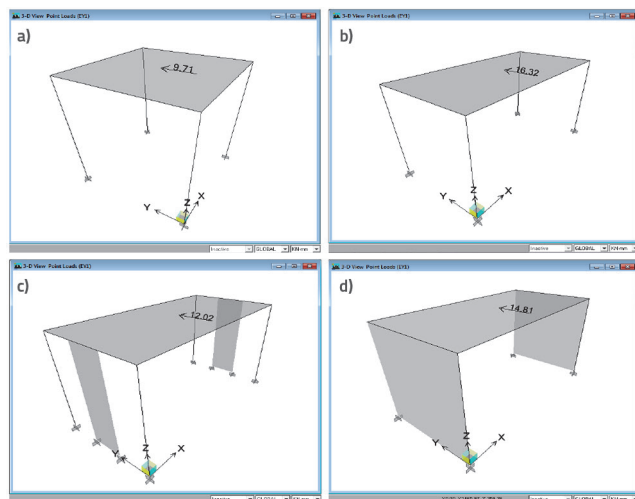
Svako potresno opterećenje (P_i) dobiveno je u ETABS2000 kao što je prikazano na slici 5.

model 1: $P_1 = 9,71$ kN, model 3: $P_3 = 12,02$ kN,
model 2: $P_2 = 16,32$ kN, model 4: $P_4 = 14,81$ kN.

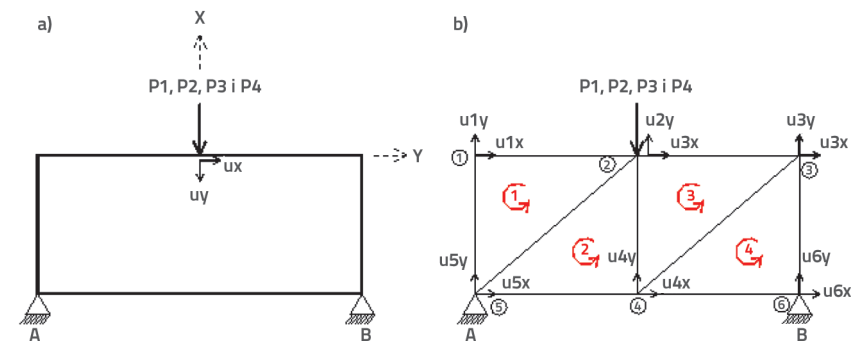
Pomak kata D_{kata} je prikazan u tablici 3.

Tablica 3. Maksimalni pomak kata izračunan pomoću programa ETABS

Modeli	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
D_{kata} [mm]	0,47600	0,74200	0,03800	0,00600



Slika 5. Smjer potresnog opterećenja (EY) na katu (ETABS2000): a) model 1; b) model 2; c) model 3; d) model 4



Slika 6. Specifikacija konačnog elementa: a) položaj opterećenja i konvencija pomaka; b) diskretizacija linearnim trokutnim elementima

Prema slici 6., kada je stropna ploča odnosno greda pod opterećenjima P1, P2, P3 i P4 (prema rezultatima iz programa ETABS), maksimalna vrijednost pomaka izračunana je preko računalnog programa koji se bazira na metodi konačnih elemenata (LUSAS) i prikazana u tablici 4. s obzirom na mrežu konačnih elemenata (stvarno ponašanje stropne ploče dobije se pomoću gušće mreže). Na slici 6.b. prikazan je primjer diskretizacije linearnim trokutnim elementima (diskretizacija s 4 linearna trokutna elementa).

Tablica 4. Maksimalni pomak stropne ploče ($D_{\text{stropne ploče}}$) i položaj opterećenja (LUSAS)

Modeli		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
$D_{\text{stropne ploče}}$ [mm]	Linearna matrica sa 112 elemenata	0,01236			
	Linearna matrica sa 128 elemenata		0,04891	0,03601	0,04438

Svi izračunani omjeri dani su u tablici 5. i ti su podaci prikazani na slici 7. (odnos između progiba stropne ploče i pomaka kata), a time je ostvaren cilj ovog rada.

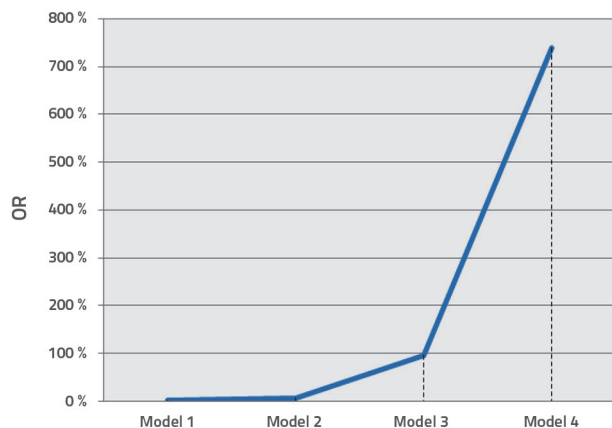
Tablica 5. Odnos između $D_{\text{stropne ploče}}$ i D_{kata}

Modeli	$D_{\text{stropne ploče}}$	D_{kata}	$D_{\text{stropne ploče}} / D_{\text{kata}}$
Model 1	0,01236	0,47600	0,03
Model 2	0,04891	0,74200	0,07
Model 3	0,03601	0,03800	0,95
Model 4	0,04438	0,00600	7,40

Slika 7. prikazuje omjer ($D_{\text{stropne ploče}} / D_{\text{kata}}$) za svaki model, koji se neznatno povećava (sa 2,6 % do 6,59%) za modele 1 i 2 (model bez poprečnog zida). Nakon modela 2, krivulja se drastično povećava s modela 2 na model 3 s parcijalnim poprečnim zidom (sa 6,59 % do 94,76 %). Pretpostavlja se da je uzrok ove značajne promjene faktor popustljivosti i korištenje poprečnog zida (kao potpora stropnoj ploči), zbog čega stropna ploča ima veću popustljivost nego goli okvir. Stoga zaključujemo da je granica između ovih dvaju modela (modela 2 i modela 3) kriterij OR tj. optimalni omjer između progiba stropne ploče i maksimalnog pomaka kata. Taj kriterij je predstavljen kao srednja vrijednost omjera između modela 2 i modela 3, kako slijedi:

$$OR = \frac{6,59\% + 94,76\%}{2} = 50,67\% \cong 50\%$$

Udio od 50 % ili 0,5 uzima se kao optimalni omjer između progiba stropne ploče i pomaka kata s poprečnim zidom. Stropne ploče s nižim omjerom se smatraju krutima, dok se stropne ploče s omjerom koji prelazi 50 % smatraju popustljivima. Iako je ovo istraživanje prošireno u odnosu na FEMA 273, koje je sažeto u tablici 1. (prvi red), za pronalazak drugih klasifikacija u tablici (krutost i popustljivost) trebalo bi se provesti dodatno istraživanje.



Slika 7. Odnos između $D_{\text{Stropne ploče}}$ i D_{kata} (OR)

LITERATURA

- [1] Fleischman, R.B., Farrow, K.T.: Dynamic behavior of perimeter lateral-system structures with flexible diaphragms, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30 (2001), pp. 745–763.
- [2] Saffarini, H., Qudaimat, M.: In-plane floor deformations in RC structures, *Journal of Structural Engineering* 118 (1992) 11, pp. 3089–3102.
- [3] Ju, S.H., Lin, M.C.: Comparison of building analyses assuming rigid or flexible floors, *J. Struct. Eng. ASCE*, 125 (1999), pp. 25–39.
- [4] Moieni, M., Rafezy, B., Howson, W.P.: Investigation Into The Floor Diaphragm Flexibility And Error Formula, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* October, Beijing, China, pp. 192–201, 2008.
- [5] Bhuiyan, M., Leon, R.: Effect of Diaphragm Flexibility on Tall Building Responses, *Structures Congress Sponsored by the Structural Engineering Institute of ASCE*, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 2286–2297, 2013.
- [6] Fleischman, R.B., Farrow, K.T., Eastman, K.: Seismic performance of perimeter lateral system structures with highly flexible diaphragms, *Earthquake Spectra*, 18 (2002), pp. 251–286.
- [7] Hadianfard, M.A., Sedaghat, S.: Investigation of joist floor diaphragm flexibility on inelastic behavior of steel braced structures, *Scientia Iranica A*, 20 (2013) 3, pp. 445–453.
- [8] Sadashiva, V.K., MacRae, G.A., Deam, B.L., Spooner, M.S.: Quantifying the seismic response of structures with flexible diaphragms, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41 (2012), pp.1365–1389.
- [9] EN 1998-1, *Earthquake resistant design of structures. Part I: General rules and rules for buildings*, Europ. Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 1994.
- [10] Federal Emergency Management Agency, *National Earthquake Hazard Reduction Program Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA-273, Washington, D.C., 1998.
- [11] Federal Emergency Management Agency, *Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings*, FEMA 310, Washington, D.C., 1998.
- [12] Moehle, P.J., Hooper, D.J., Kelly, J.D., Meyer, R.T.: *Seismic design of cast-in-place concrete diaphragms, chords, and collectors: A guide for practicing engineers*, NEHRP Seismic Design Technical Brief Number 3, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST GCR 10-917-4, 2010.
- [13] Fleischman, R.B., Naito, C., Restrepo, J., Sause, R., Ghosh, S.K.: *Seismic Design Methodology for Precast Concrete Diaphragms, Part 1: Design Framework*, *PCI Journal*, 50 (2005) 5, pp. 68–83.
- [14] Barron J.M., Hueste M.B.D.: *Diaphragm effects in rectangular reinforced concrete*, *ACI Structural Journal*, 101 (2004) 5, pp. 615–624.
- [15] Charleson, A.: *Seismic Design for Architects*. Architectural Press, Elsevier, 2008.

4. Zaključak

U ovom radu proučavana je učinkovitost popustljivosti stropne ploče i, kao što je navedeno u uvodu, postoje neke značajne specifikacije u normama za potres. Međutim, ovo istraživanje je samo smjernica, odnosno nije usredotočena na mjerenje tih specifikacija. U ovom istraživanju je korišten jednostavan postupak i pomoću četiri različita modela (različite dimenzije, npr. 3 x 3 m i 3 x 6 m) i sustava (s poprečnim zidom i bez njega) ovaj problem je riješen.

U ovom istraživanju pretpostavljeno je da je okvir pod bočnim opterećenjem, dok virtualno, stupovi i poprečni zidovi su uzeti kao oslonci stropne ploče. Nakon maksimalnog pomaka kata (D_{kata}), nastupa i progib stropne ploče ($D_{\text{stropne ploče}}$). Kao posljedica toga, pomak kata i progib stropne ploče mogu se računati odvojeno, a stropna ploča se uzima kao visokostijeni nosač (greda) s dva ležaja. Program ETABS2000 je korišten pri izračunu potresnog opterećenja i pomaka kata, kao i pri analizi stropne ploče da bi se mogao dobiti njen progib ($D_{\text{stropne ploče}}$). Nakon prikaza svih progiba u tablici, omjer ($OR = D_{\text{stropne ploče}} / D_{\text{kata}}$) za svaki okvir je lako izračunati.

Glavni je zaključak ovog rada taj što se je numeričkom analizom pokazalo da optimalni omjer između progiba stropne ploče i pomaka kata s poprečnim zidom iznosi 0,5. Iako se hipoteza odnosi na četiri različita okvira, možda bi uz promjenu stanja rezultati statičkog proračuna bili drugačiji. Uбудuće bi se trebalo provesti istraživanje uključujući različita stanja (raspone i katove) i ograničenja (krutost i popustljivost).