Primljen / Received: 27.10.2011.
Ispravljen / Corrected: 18.6.2012.
Prihvaćen / Accepted: 26.6.2012.
Dostupno online / Available online: 16.7.2012.

Učinak redukcije krutosti na seizmičku otpornost građevine

Autori:

Prof.dr.sc. Mehmed Čaušević, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
mehmed.causevic@gradri.hr

Tomislav Franković, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
tomislav.frankovic@gradri.hr

Nino Mahmutović, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
nino.mahmutovic@gradri.hr

Pregledni rad

Mehmed Čaušević, Tomislav Franković, Nino Mahmutović

Učinak redukcije krutosti na seizmičku otpornost građevine

U radu su izloženi rezultati istraživanja provedenih na dvije tipične konstrukcije, pri čemu se varirala vrijednost posmične krutosti ili krutosti na savijanje elemenata konstrukcije (greda ili zidova). Odgovoreno je na pitanja: zašto je europska norma EN 1998-1:2004 propisala redukciju krutosti elemenata na 50 % početne vrijednosti, što se događa ako se pređe ta granica, kako redukcija krutosti utječe na vrstu mjerodavne kombinacije opterećenja te kolika je razlika u količini armature dobivene prema linearnim metodama s uzimanjem u obzir redukcije krutosti i bez njih.

Ključne riječi:
reducirana krutost, kombinacija opterećenja, spektri odziva, granična stanja uporabivosti, nelinearnost

Subject review

Mehmed Čaušević, Tomislav Franković, Nino Mahmutović

Effects of stiffness reduction on seismic capacity of buildings

Results obtained by analysis of two typical structures are presented. The value of shear stiffness, or stiffness to bending of structural elements (beams or walls), was varied during this analysis. The following question was answered: why did European Standard EN 1998-1:2004 set the element stiffness reduction to fifty percent of the initial value, what happens if such limit is exceeded, how is the relevant load combination type influenced by stiffness reduction, and what is the difference in the quantity of reinforcement obtained according to linear methods, if the reduction of stiffness is, or is not, taken into account.

Key words:
reduced stiffness, load combination, response spectra, limit state of serviceability, nonlinearity

Übersichtsarbeit

Mehmed Čaušević, Tomislav Franković, Nino Mahmutović

Effekt der Reduktion der Steifigkeit auf den seismischen Widerstand des Gebäudes

In der Arbeit sind die Forschungsresultate angeführt, die auf zwei typischen Konstruktionen durchgeführt wurden, wobei die Wertigkeit der Schubsteifigkeit oder die Biegesteifigkeit der Elementkonstruktion (von Balken oder Wänden) variiert hat. Es wurden auf folgende Fragen Antwort gegeben: 1. Weshalb hat die europäische Norm EN 1998-1:2004 eine Reduktion der Steifigkeit der Elemente auf 50 % des Anfangswertes vorgeschrieben? 2. Was geschieht, wenn diese Grenze überschritten wird? 3. Wie ist die Beeinflussung der Steifigkeitsreduktion auf die Art der maßgebenden Belastungskombination? 4. Wie groß ist die Differenz in der Armaturenquantität, die man mit und ohne Einbeziehung der Reduktion der Steifigkeit durch lineare Methoden erhält?

Schlüsselwörter:
Reduzierte Steifigkeit, Belastungskombination, Antwortspektrum, Grenzzustand der Verwendbarkeit, Nichtlinearität

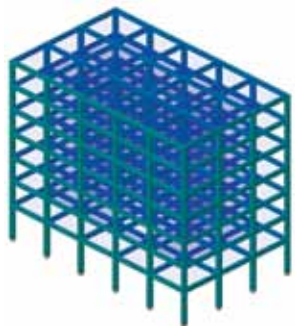
1. Uvod

Europskom normom za projektiranje zgrada u seizmičkim područjima [1] propisuju se četiri metode proračuna otpornosti konstrukcija zgrada od kojih su dvije linearne i dvije nelinearne. Poznato je da se i u linearnim proračunima uzima u obzir nelinearno ponašanje konstrukcije (koncept faktora ponašanja). Intencija je navedene europske norme da se uzme u obzir nelinearno ponašanje konstrukcije i raspucavanje njezinih elemenata u potresu te da se primjenjuju i nelinearne metode proračuna konstrukcija. Ako navedeno iz nekih razloga nije moguće ostvariti (na primjer zbog neposjedovanja odgovarajućeg softvera), projektant se upućuje na modeliranje konstrukcije na način da se u linearnom proračunu uzme u obzir samo 50% posmične krutosti ili krutosti na savijanje nosivih elemenata [1].

Uzimanjem u obzir raspucavanje elemenata konstrukcije dolazi do povećanja njezina prvog vlastitoga perioda, a samim time dolazi do smanjenja vrijednosti seizmičkih sila, shodno obliku projektnog spektra [1, 2]. Pritom navedeno smanjenje može biti toliko izraženo da za masivne betonske i zidane konstrukcije prestaje biti mjerodavna seizmička proračunska kombinacija, a to nije bila dosadašnja praksa. Stoga je trebalo istražiti utjecaj redukcije krutosti nosivih elemenata, pri čemu se istodobno zadržavaju vrijednosti faktora ponašanja koje su određene u europskoj normi EN 1998-1:2004.

U radu su analizirane dvije različite vrste konstrukcijskih sustava koji se često primjenjuju u praksi (slike 1. i 2.).

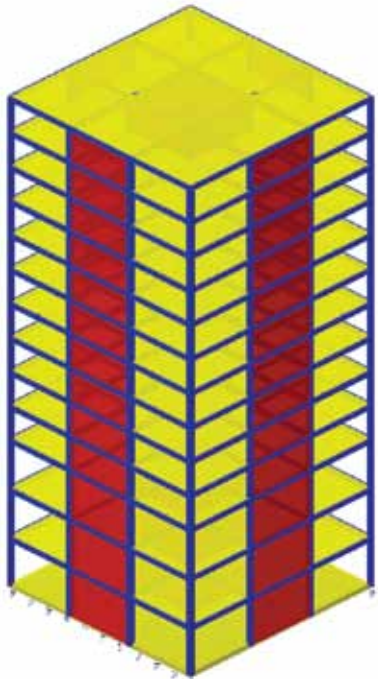
Prva konstrukcija (u daljnjem tekstu "konstrukcija 1") predstavlja klasični okvirni sustav bez dodatnih armiranobetonskih zidova koji bi služili za prijam horizontalnih sila od potresa. Sastoji se od podruma, prizemlja i šest katova pravokutnih tlocrtnih dimenzija 30 x 18 m. Visina je konstrukcije 30,75 m, visina prizemlja 5,0 m, visina katova 3,4 m (ove se vrijednosti navode jer će biti potrebne pri proračunu dopuštenih relativnih katnih pomaka). Opterećenje konstrukcije sastoji se od stalnoga, promjenljivoga, uporabnoga i potresnoga djelovanja. Stalno se opterećenje može podijeliti na vlastitu težinu konstrukcijskih elemenata (uzeto u obzir u primijenjenom softveru) i opterećenja dodatnih slojeva međukatne konstrukcije (1,90 kN/m^2) i krova (2,11 kN/m^2). Uporabno opterećenje [3] određeno je na temelju namjene površine (uredi i poslovni prostori - kategorija B) i iznosi 2,4 kN/m^2.



Slika 1. 3D prikaz klasične okvirne konstrukcije (konstrukcija 1)

Druga je konstrukcija (slika 2.) okvirna s vertikalnim zidnim platnima (u daljnjem tekstu "konstrukcija 2"). Sastoji se od podruma, prizemlja i jedanaest katova. Tlocrtne su dimenzije građevine 22,5 x 22,5 m, a visina je 50 m. Opterećenje dodatnih slojeva međukatnih konstrukcija je 1,5 kN/m^2 i krovne konstrukcije 2,0 kN/m^2. Uporabno se opterećenje [3, 4] sastoji od dva tipa: uporabno opterećenje za poslovni dio i uporabno opterećenje za stambeni dio. Podrum, prizemlje i prvi kat čine poslovni dio i uporabno opterećenje ima vrijednost 2,4 kN/m^2, a ostali katovi čine stambeni dio građevine kojega je uporabno opterećenje 1,6 kNm^2.

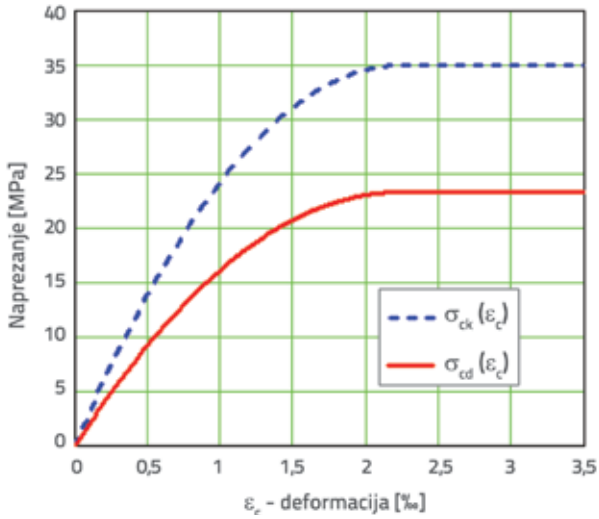
Obje konstrukcije proračunane su za zahtjev neurušavanja konstrukcije NCR (engl. *Non Collapse Requirement*) [1, 2]. Usvojen je srednji razred duktilnosti konstrukcije DCM (engl. *Ductility Class Medium*).



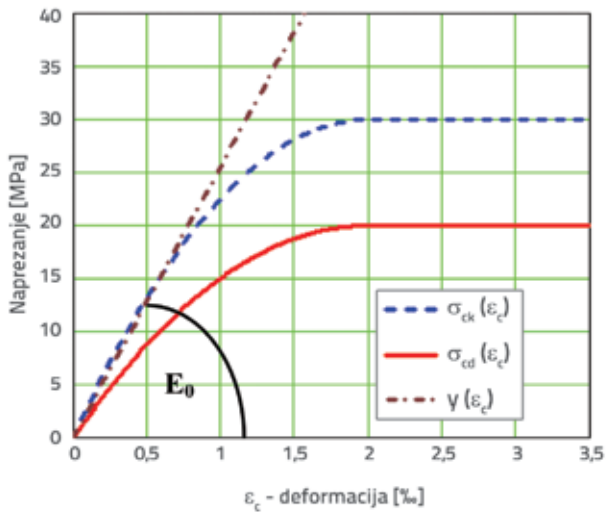
Slika 2. 3D prikaz okvirne konstrukcije s vertikalnim zidnim platnima (konstrukcija 2)

2. Osnovne postavke proračuna

Prije samog postupka proračuna konstrukcije potrebno je odrediti karakteristike osnovnih materijala (beton i čelik za armiranje). Za obje konstrukcije usvojen je isti čelik za armiranje B500B, a razred tlačne čvrstoće betona za prvu konstrukciju jest C35/45, a za drugu konstrukciju C30/37. Koristeći se izrazom iz EN 1992-1-1 [5] i odgovarajućim softverom, nacrtani su radni dijagrami betona u obliku parabole i pravca i prikazani na slikama 3. i 4. Na slici 3. i 4. crvenom je crtom označen proračunski radni dijagram beton, koji je dobiven tako da je karakteristična tlačna čvrstoća (plava točkasta crta) reducirana s parcijalnim faktorom sigurnosti za materijal γ_c. Nagib smeđeg pravca na slici 4. prikazuje početni (tangentni) modul elastičnosti E_0.



Slika 3. Proračunski dijagram betona C 35/45



Slika 4. Karakteristični i proračunski dijagram betona C 30/37 s početnim modulom elastičnosti E_0

Dimenzije elemenata konstrukcije određene su radi zadovoljavanja proračunskih i ekonomskih čimbenika. U tablicama 1. i 2. dane su usvojene dimenzije.

Tablica 1. Dimenzije elemenata konstrukcije 1

Element	Dimenzije		
	b [cm]	h [cm]	L [cm]
ploča	-	20	600
greda	30	70	600
stup	60	60	500

Prva konstrukcija planirana je na lokaciji koju karakteriziraju depoziti srednje zbijenog šljunka i pijeska (razred temeljnog tla C), a druga konstrukcija je na prostoru koji čine depoziti vrlo zbijenog pijeska (razred temeljnog tla B).

Tablica 2. Dimenzije elemenata konstrukcije 2

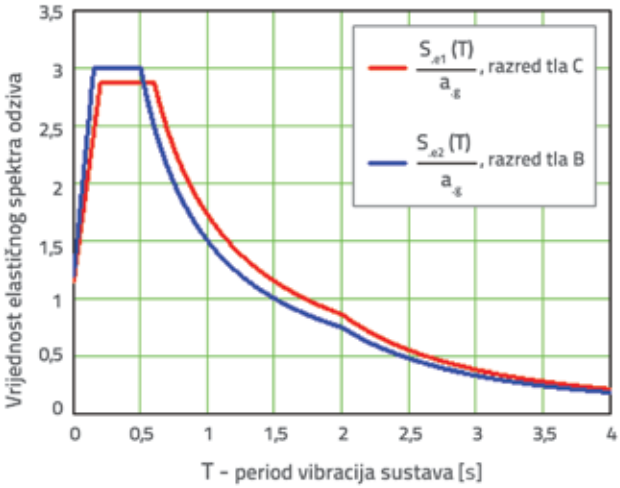
Element	Dimenzije		
	b [cm]	h [cm]	L [cm]
ploča	-	25	750
greda	40	50	750
stup	50	50	500
zid	25	500*	750
Odnosi se na visinu jedne etaže konstrukcije			

Poredbeno maksimalno ubrzanje a_{gR} u tlu razreda A određuje se primjenom Nacionalnog dodatka za primjenu Eurokoda 8 u Hrvatskoj [8] na osnovi odgovarajućega poredbenog povratnog perioda seizmičkog djelovanja na konstrukciju za uvjet neurušavanja konstrukcije T_{NCR} = 475 godina [1].
Faktor važnosti građevine ovisi o ponašanju konstrukcije neposredno nakon potresa, a u oba je slučaja usvojena jednaka vrijednost γ_I= 1,0. Projektno ubrzanje u tlu razreda A ima vrijednost:

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR} \quad (1)$$

$$a_g = 1{,}0 \cdot 0{,}2g = 0{,}2g \quad (2)$$

Horizontalna seizmička djelovanja na određenom prostoru prikazuju se pomoću elastičnog spektra odziva ubrzanja podloge, a definirana su s dvije okomite neovisne komponente koje su dane istim spektrom odziva (slika 5.). Vertikalna komponenta potresnog djelovanja nije uzeta u obzir jer je zadovoljen uvjet: $a_{vg} = 0{,}18g < 0{,}25g$.



Slika 5. Prikaz elastičnog spektra odziva

Kako bi se osiguralo nelinearno ponašanje konstrukcija potrebno ih je projektirati na djelovanje sila koje su manje od onih kada je

odziv konstrukcije potpuno elastičan. To se ostvaruje uvođenjem reduciranoga elastičnoga spektra odziva (projektni spektar, slika 6.). Redukcija se provodi preko faktora ponašanja q koji predstavlja omjer između seizmičkih sila kada je odziv konstrukcije potpuno elastičan i projektnih seizmičkih sila [1, 2]. Faktor ponašanja ovisi o vrsti konstrukcijskog sustava i o usvojenom razredu duktilnosti, a određuje se na sljedeći način:

$$q = q_0 \cdot k_w \geq 1{,}5 \tag{3}$$

Osnovna vrijednost faktora ponašanja q_0 dobije se iz tablice 3.

Tablica 3. Osnovne vrijednosti faktora ponašanja

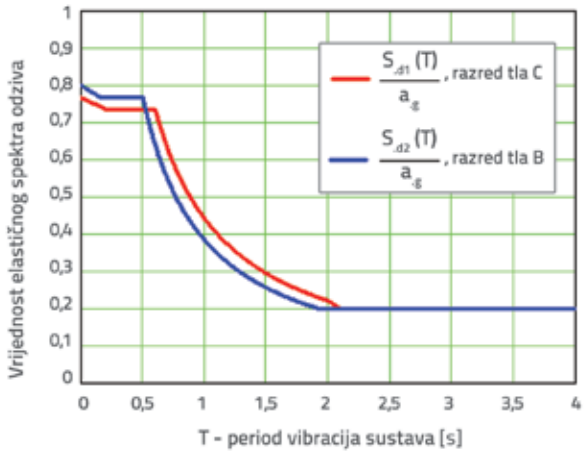
Konstrukcijski sustav	DCM	DCH
okvirni sustav	$3{,}0 \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	$4{,}5 \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
dvojni sustav		
zidni sustav s povezanim zidovima		
zidni sustav s nepovezanim zidovima	3,0	$4{,}0 \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
torzijski fleksibilan sustav	2,0	3,0
sustav obrnutog njihala	1,5	2,0

Za višekatne i višebrodne konstrukcije vrijednost α_u/α_1 iznosi 1,3. Faktor prevladavajućeg oblika sloma k_w definiran je u tablici 4.

Tablica 4. Vrijednosti faktora prevladavajućeg oblika sloma k_w.

Konstrukcijski sustav	k_w
okvirni sustav	1,0
zidni sustavi istovjetni okvirnim sustavima	
zidni sustavi	$0{,}5 \leq \frac{1+\alpha_0}{3} \leq 1$
sustavi istovjetni zidnim sustavima	
torzijski fleksibilni sustavi	

Za obje konstrukcije usvojen je srednji razred duktilnosti, jednaka osnovna vrijednost faktora ponašanja (q_0=3,9) i faktora prevladavajućeg oblika sloma (k_w=1,0).



Slika 6. Prikaz projektnog spektra odziva

3. Kombinacije djelovanja

Konstrukcije su modelirane i proračunane prema osnovnoj i seizmičkoj proračunskoj kombinaciji [4]. Učinci djelovanja prema osnovnoj proračunskoj kombinaciji određuju se primjenom sljedećeg izraza:

$$\sum_{j\geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{''+''} \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{''+''} \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \tag{4}$$

Ukupna težina građevine koja se "angažira" u trenutku djelovanja potresa određuje se prema:

$$m = \sum G_{k,j} \text{''+''} \sum \psi_{E,i} Q_{k,i} \tag{5}$$

Faktor kombinacije $\psi_{E,i}$ proračunava se prema izrazu :

$$\psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2,i} \tag{6}$$

gdje ϕ označava koeficijent koji ovisi o razredu građevine i stupnju opterećenosti pojedinog kata, a $\psi_{2,i}$ je koeficijent pomoću kojega se uvodi "nazovistalna" vrijednost promjenljivog djelovanja Q_i.

$$\Psi_{E,i} = 0{,}5 \cdot 0{,}3 = 0{,}15$$

Seizmička proračunska kombinacija temelji se na karakterističnim vrijednostima stalnih djelovanja, umanjenoj vrijednosti promjenljivih djelovanja te proračunskoj vrijednosti potresnog djelovanja:

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} \text{''+''} P \text{''+''} A_{Ed} \text{''+''} \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \tag{7}$$

$$A_{Edx} = E_{Edx} + 0{,}30 E_{Edy} \tag{8}$$

$$A_{Edy} = 0{,}30 E_{Edx} + E_{Edy} \tag{9}$$

Simbolom E_{Ed} označava se projektni učinak potresnog djelovanja u pravcu x ili y. U seizmičkoj proračunskoj kombinaciji nema parcijalnih faktora sigurnosti γ jer se princip proračuna prema europskoj normi EN 1998-1 temelji na faktorima ponašanja q. Uzimajući u obzir mogućnost dvosmjernog djelovanja potresa određenog pravca može se usvojiti ukupno osam kombinacija djelovanja, a prikazane su u tablici 5.

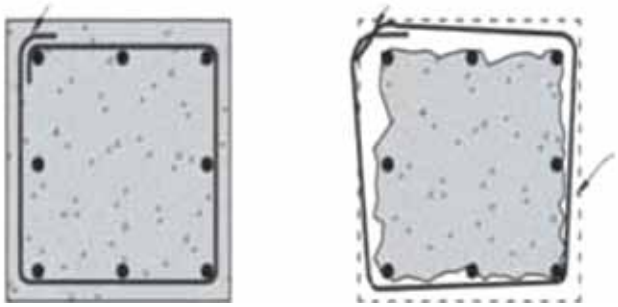
Tablica 5. Kombinacije djelovanja za seizmičku proračunsku kombinaciju

Oznaka	G_k	Q_k	E_{Edx}	E_{Edy}
Kombinacija 1	1,00	0,30	1,00	0,30
Kombinacija 2	1,00	0,30	1,00	- 0,30
Kombinacija 3	1,00	0,30	- 1,00	0,30
Kombinacija 4	1,00	0,30	- 1,00	- 0,30
Kombinacija 5	1,00	0,30	0,30	1,00
Kombinacija 6	1,00	0,30	0,30	- 1,00
Kombinacija 7	1,00	0,30	- 0,30	1,00
Kombinacija 8	1,00	0,30	- 0,30	- 1,00

4. Redukcija krutosti nosivih elemenata

Ako iz nekih razloga (na primjer zbog neposjedovanja odgovarajućeg softvera) nije moguće uzeti u obzir nelinearno ponašanje konstrukcije i raspucavanje njezinih elemenata u potresu, taj se efekt prema članku 4.3.1.(7) norme EN 1998-1 [1] može simulirati uzimanjem u proračunu reducirane vrijednosti posmične krutosti i krutosti na savijanje nosivih betonskih i zidanih elemenata, i to u vrijednosti 50% početne vrijednosti krutosti koja se primjenjuje u osnovnoj proračunskoj kombinaciji. Na taj se način uvodi nelinearnost, ali se ipak zadržava isti faktor ponašanja koji je određen za punu krutost nosivih elemenata.

Ovo je istraživanje utjecaja reducirane krutosti konstrukcijskih elemenata (grede i zidovi) provedeno u intervalu između 100% i 10% početne vrijednosti krutosti elemenata na savijanje, primjenom softverskog paketa Tower koji omogućuje redukciju krutosti na savijanje ploča, greda i vertikalnih zidnih platna. To je i razumljivo, jer se prema ustaljenim pravilima za projektiranje konstrukcija u seizmičkim područjima ne preporučuje redukcija krutosti stupova [2, 9, 10]. Pritom je za prvu konstrukciju reducirana krutost svih greda na savijanje, a krutost na savijanje stupova zadržana je konstantnom. Kod druge je konstrukcije reducirana krutost svih vertikalnih zidnih platana, a krutosti greda i stupova nisu se mijenjale.
U potresu, kada se konstrukcija ošteti i kada se smanji krutost pojedinih konstrukcijskih elemenata građevine, modul elastičnosti može imati istu vrijednost kao prije potresa, ali se krutost na savijanje smanjuje tako da se uzima u obzir oštećenje elementa. Djelovanjem potresa dolazi do smanjenja dimenzija geometrije poprečnog presjeka i u vezi s time mijenja se početni moment tromosti I_0 koji je, uz početni modul elastičnosti E_0, parametar za definiranje promjene krutosti na savijanje (slika 7.).



Slika 7. Neoštećen poprečni presjek i isti presjek nakon oštećenja u potresu (bez zaštitnog sloja, otvaranje vilica)

4.1. Usporedba vrijednosti reznih sila za osnovnu i seizmičku proračunsku kombinaciju

Konstrukcija 1 - reducirane krutosti greda

Smanjivanjem krutosti na savijanje greda povećavaju se vrijednosti osnovnog perioda vibracija sustava, tj. smanjuju se vlastite kružne frekvencije konstrukcije (slika 1., tablica 6.).

Tablica 6. Osnovni periodi i frekvencije osciliranja za konstrukciju 1

Krutost greda [%]	Osnovni period [s]	Frekvencija [Hz]
100	0,805	1,243
90	0,820	1,220
80	0,838	1,193
70	0,859	1,164
60	0,886	1,129
50	0,922	1,085
40	0,968	1,033
30	1,036	0,965
20	1,141	0,876
10	1,340	0,746

Vrijednosti unutarnjih sila u karakterističnim elementima konstrukcije prema osnovnoj proračunskoj kombinaciji prikazane su u tablicama 7., 8. i 9.

Tablica 7. Rezne sile u najopterećenijoj ploči za osnovnu proračunsku situaciju

Presjek	Smjer *x* [kNm/m']	Smjer *y* [kNm/m']
polje	13,83	14,40
ležaj	-25,26	-29,37

Tablica 8. Rezne sile u najopterećenijoj gredi za osnovnu proračunsku situaciju

Unutarnja sila		Vrijednost
moment savijanja	polje	148,04 kNm
	vanjski ležaj	- 296,90 kNm
uzdužna sila		43,70 kN
poprečna sila		180,55 kN

Tablica 9. Rezne sile u podnožju najopterećenijeg stupa za osnovnu proračunsku situaciju

Unutarnja sila	Vrijednost
moment savijanja	192,91 kNm
uzdužna sila	-3876,00 kN
poprečna sila	70,40 kN

Kod ploča su analizirana dva karakteristična presjeka (polje i ležaj), kako bi se ustanovilo koja je proračunska situacija mjerodavna.

Tablica 10. Promjena reznih sila u polju najopterećenije ploče za seizmičku proračunsku kombinaciju

Krutost greda [%]	Moment savijanja u polju ploče [kNm/m']	
	Smjer *x*	Smjer *y*
100	12,30	12,42
90	12,48	12,65
80	12,72	12,88
70	12,98	13,14
60	13,22	13,43
50	13,50	13,71
40	13,83	14,03
30	14,17	14,37
20	14,55	14,76
10	14,75	14,91

Na osnovi rezultata proračuna prikazanih u tablici 10. može se uočiti da je osnovna proračunska kombinacija mjerodavna do redukcije krutosti greda od 40 % za smjer *x* odnosno 30 % za smjer *y*. Budući da se u ovom slučaju dobije količina armature manja od minimalne, ploču u polju treba armirati minimalnom armaturom određenom normama EN 1992-1 i EN 1998-1, koja u ovom slučaju ima vrijednost 2,91 cm^2/m.

Tablica 11. Promjena reznih sila nad ležajem najopterećenije ploče za seizmičku proračunsku kombinaciju

Krutost greda [%]	Moment savijanja na ležaju ploče [kNm/m']	
	Smjer *x*	Smjer *y*
100	- 39,42	- 40,11
90	- 40,34	- 41,05
80	- 41,43	- 42,17
70	- 42,76	- 43,54
60	- 44,42	- 45,24
50	- 46,58	- 47,44
40	- 49,50	- 50,42
30	- 53,74	- 54,91
20	- 61,14	- 62,65
10	- 79,45	- 81,42

Pri analizi presjeka ploče nad ležajem (tablica 11.) može se uočiti da je mjerodavna seizmička proračunska kombinacija bez obzira na redukciju krutosti greda. Nad ležajem se mogu pojaviti pozitivni i negativni momenti savijanja pa je taj presjek potrebno armirati u gornjoj i donjoj zoni. Armatura koja se ugrađuje u svakom je slučaju veća od propisane minimalne armature. Dimenzioniranje je izvršeno u skladu s odredbama norme EN 1992-1, uzimajući u obzir dodatne zahtjeve vezane za duktilnost koji su propisani u EN 1998-1.

Tablica 12. Promjena reznih sila u polju najopterećenije grede za seizmičku proračunsku kombinaciju

Krutost greda [%]	Moment savijanja u polju grede [kNm]
100	121,90
90	117,98
80	113,90
70	109,65
60	105,24
50	100,67
40	95,96
30	91,15
20	86,34
10	81,67

Iz tablice 12. može se uočiti da se redukcijom krutosti na savijanje grede u polju smanjuju vrijednosti momenta savijanja, a analogno tome i potrebna količina armature. Prema tome, mjerodavna bi bila osnovna proračunska kombinacija. Zbog uvjeta lokalne duktilnosti u vlačnom je području gredu potrebno armirati najmanje minimalnom potrebnom armaturom prema EN 1998-1 (6,24 cm^2).

Tablica 13. Promjena reznih sila nad ležajem najopterećenije grede za seizmičku proračunsku kombinaciju

Krutost greda [%]	Moment savijanja na ležaju grede [kNm]
100	- 577,07
90	- 560,93
80	- 543,06
70	- 523,09
60	- 500,52
50	- 474,59
40	- 444,14
30	- 407,17
20	- 359,65
10	- 290,00

Kod presjeka grede nad ležajem mogu se pojaviti pozitivni i negativni momenti savijanja pa je i u ovom slučaju gredu potrebno armirati u njezinoj gornjoj i donjoj zoni. Redukcijom krutosti greda na savijanje navedeni se momenti smanjuju, pri čemu je seizmička proračunska kombinacija mjerodavna do redukcije krutosti greda od 11 % u odnosu na početnu krutost. Najznačajniji su elementi što se tiče trošenja seizmičke energije kod klasičnih okvirnih konstrukcija stupovi. Stupovi su ovdje dimenzionirani na koso savijanje s uzdužnom tlačnom silom, uzimajući u obzir dodatno deformiranje elementa prema teoriji 2. reda [6, 7]. Pri dimenzioniranju su primijenjeni dijagrami interakcije [7].

$$N_{Ed}^{II} = N_{Ed}^{I} \tag{10}$$

$$M_{Edy}^{II} = N_{Ed}^{II} \cdot e_{tot,z} \tag{11}$$

$$M_{Edz}^{II} = N_{Ed}^{II} \cdot e_{tot,y} \tag{12}$$

Tablica 14. Rezne sile u podnožju najopterećenijeg stupa za seizmičku proračunsku kombinaciju

Krutost greda [%]	Moment savijanja [kNm]		Uzdužna sila [kN]
	M_{Edy}	M_{Edz}	
100	- 572,90	- 172,84	- 2554,10
90	- 570,30	- 172,00	- 2552,10
80	- 567,31	- 171,03	- 2551,10
70	- 563,86	- 169,91	- 2549,10
60	- 559,86	- 168,62	- 2546,70
50	- 555,19	- 167,13	- 2543,90
40	- 549,76	- 165,41	- 2540,50
30	- 543,52	- 163,46	- 2536,20
20	- 536,79	- 161,41	- 2530,50
10	- 531,70	- 160,00	- 2521,20

Pokazalo se da je za stupove mjerodavna seizmička proračunska kombinacija za bilo koju vrijednost redukcije krutosti greda (tablica 14.).

4.1.1. Rezultati proračuna količine armature za seizmičku proračunsku kombinaciju

Redukcija krutosti greda od 50 % - konstrukcija 1

Razlika u količini armature za početnu krutost greda te pri redukciji krutosti na 50 % početne vrijednosti ovisi o vrsti konstrukcijskog elementa i njegovu položaju u konstrukciji. U nastavku ćemo tablično prikazati dobivene vrijednosti za seizmičku proračunsku kombinaciju za sljedeće elemente:

- polje i ležaj najopterećenije ploče (tablice A i B)
- polje i ležaj najopterećenije grede (tablice C, D, E)
- podnožje najopterećenijeg stupa (tablica F)

Tablica A. Promjena momenta savijanja i potrebne armature u polju najopterećenije ploče

Krutost greda [%]	Moment savijanja [kNm/m′]		Potrebna armatura [cm²/m′]	
	Smjer *x*	Smjer *y*	Smjer *x*	Smjer *y*
100	12,30	12,42	1,63	1,76
50	13,50	13,71	1,79	1,94

Tablica B. Promjena momenta savijanja i potrebne armature nad ležajem najopterećenije ploče

Krutost greda [%]	Moment savijanja [kNm/m′]		Potrebna armatura [cm²]	
	Smjer *x*	Smjer *y*	Smjer *x*	Smjer *y*
100	- 39,42	- 40,11	5,34	5,78
50	- 46,58	- 47,44	6,35	6,89

Prema navedenim podatcima dolazi se do zaključka da se prilikom provedene redukcije krutosti greda od 50% povećala količina armature u ploči, i to:

- za presjek u polju ploče potrebna količina armature povećala se za 9,8 % za smjer *x* odnosno 10,2 % za smjer *y*
- kod presjeka nad ležajem ploče potrebna armatura povećala se za 18,9 % za smjer *x* i 19,2 % za smjer *y*.

Tablica C. Promjena momenta savijanja i potrebne armature u polju najopterećenije grede

Krutost greda [%]	Moment savijanja [kNm]	Potrebna armatura [cm²]
100	121,90	4,33
50	100,67	3,58

Tablica D. Promjena pozitivnog momenta savijanja i potrebne armature u donjoj zoni nad ležajem najopterećenije grede

Krutost greda [%]	Moment savijanja [kNm]	Potrebna armatura [cm²]
100	404,63	14,64
50	302,14	10,92

Tablica E. Promjena negativnog momenta savijanja i potrebne armature u gornjoj zoni nad ležajem najopterećenije grede

Krutost greda [%]	Moment savijanja [kNm]	Potrebna armatura [cm²]
100	-577,07	23,10
50	-474,59	18,53

Za gredu se može konstatirati:
- potrebna armatura pri analizi presjeka u polju grede prilikom provedene redukcije krutosti greda od 50% očekivano se smanjila za 17,3 %. Međutim ovdje se ne može usvojiti smanjenje armature na vrijednost 3,58 cm² iz gornje tablice zbog zahtjeva za lokalnom duktilnošću po kojemu je prema EN 1998–1 potrebna armatura 6,24 cm²
- kod presjeka nad ležajem potrebna armatura u donjoj zoni smanjila se za 25,3 %, a u gornjoj zoni za 19,8 % (u ovom slučaju dolazi do uštede armature redukcijom krutosti greda na savijanje).

Tablica F. Promjena momenata savijanja i uzdužne sile u podnožju najopterećenijeg stupa

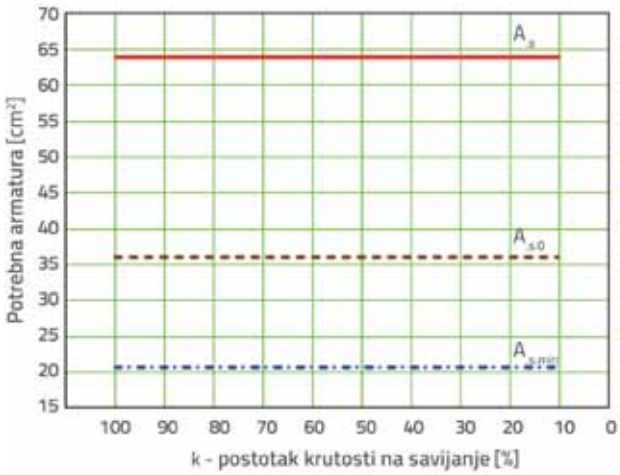
Krutost greda [%]	Moment savijanja [kNm]		Uudužna sila [kN]
	M_{Edy}	M_{Edz}	
100	- 572,90	- 172,84	- 2554,10
50	- 555,19	- 167,13	- 2543,90

Prema podatcima iz posljednje tablice može se zaključiti:
- moment savijanja oko *y* osi smanjio se za 3,1 %
- moment savijanja oko *z* osi smanjio se za 3,3 %
- uzdužna sila smanjila se za 0,4 %.

Usvojena je konstantna količina armature u presjeku najopterećenijeg stupa u cijelom intervalu redukcije krutosti greda i iznosi 63,90 cm².

Na slici 8. crvenom je bojom označena armatura u najopterećenijem stupu prema seizmičkoj proračunskoj kombinaciji A_s=63,90 cm² (1,78 %), smeđom bojom minimalna armatura propisana prema EC8, $A_{s.0}$ = 36 cm² (1,0 %), a plavom armatura dobivena prema osnovnoj proračunskoj kombinaciji $A_{s.min}$ = 20,61 cm² (0,57 %).

Dolazi se do zaključka da se za 50 % početne krutosti greda može usvojiti jednaka armatura kao i kod neraspucanih presjeka te kod ovog konstrukcijskog elementa nema uštede armature.



Slika 8. Prikaz armature stupa (crveno-usvojena, smeđe-minimalna, plavo-armatura iz osnovne kombinacije)

4.1.2. Rezultati proračuna graničnog stanja uporabivosti

Konstrukcija 1 - klasična okvirna konstrukcija

Osim prikazanih i navedenih provjera za granično stanje nosivosti, potrebno je analizirati kakvo je granično stanje uporabivosti konstrukcije (GSU). Kod GSU-a provjeravaju se relativni pomaci katova i pomak vrha konstrukcije.

U nastavku ćemo najprije prikazati provjeru relativnih pomaka u prizemlju i prvome katu. Relativni su pomaci najvažniji segment kontrole GSU-a. Dopušteni relativni pomak dobije se primjenom sljedećeg izraza iz EN 1998-1:

$$d_r \cdot v \leq 0{,}005h \qquad (13)$$

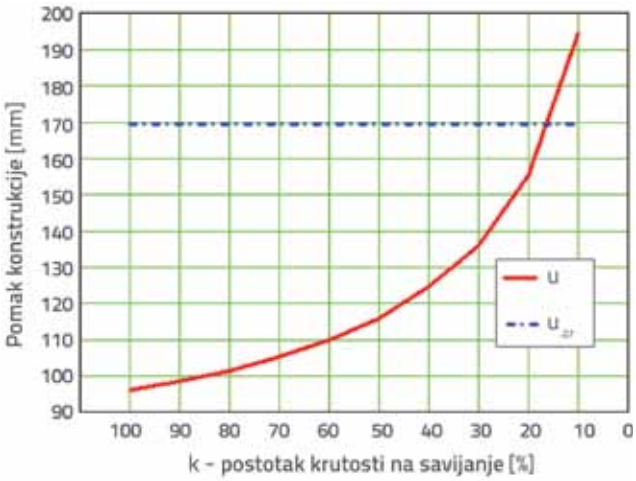
gdje je d_r proračunski međukatni pomak dobiven kao razlika prosječnih horizontalnih pomaka pri vrhu i pri podnožju kata koji se promatra, *h* je katna visina, a *v* je faktor smanjenja koji ovisi o važnosti građevine. Dopušteni relativni pomak (pet tisućina visine) prizemlja ima vrijednost 25 mm, a prvog kata 17 mm.

Tablica 15. Prikaz relativnih pomaka

Krutost greda [%]	Relativni pomaci [mm]	
	prizemlje	1. kat
100	12,79	7,06
90	12,88	7,29
80	12,97	7,58
70	13,10	7,93
60	13,26	8,36
50	13,45	8,91
40	13,74	9,65
30	14,16	10,68
20	14,83	12,28
10	16,11	16,22

Na temelju rezultata prikazanih u tablici 15., može se uočiti da vrijednosti relativnih pomaka ne prelaze dopuštene vrijednosti.

Osim provjere relativnih pomaka provedena je i analiza pomaka vrha konstrukcije ovisno o smanjenju krutosti elemenata na savijanje (slika 9.). Dopuštena vrijednost horizontalnog pomaka vrha konstrukcije određuje se sukladno vrijednosti navedenoj u odgovarajućem nacionalnom dodatku i ima vrijednost *H/150* (*H* je visina građevine). Ova je dopuštena vrijednost pomaka dana dosta grubo te je zato važno zadovoljiti uvjet relativnih pomaka (13). Dopuštena je vrijednost horizontalnog pomaka vrha konstrukcije u ovom slučaju 169,33 mm i veća je od pomaka vrha građevine sve do smanjenja krutosti greda na vrijednost od 16 % početne vrijednosti (slika 9.).



Slika 9. Prikaz ovisnosti pomaka vrha konstrukcije o promjeni njezine krutosti i usporedba s dopuštenom vrijednosti

4.2. Usporedba vrijednosti reznih sila za osnovnu i seizmičku proračunsku kombinaciju

Reducirana krutost vertikalnih zidova - konstrukcija 2

Promjenom krutosti na savijanje armiranobetonskih zidova prikazanih na slici 2. povećavaju se vrijednosti osnovnog perioda vibracija ovoga sustava, tj. smanjuju se vlastite kružne frekvencije (tablica 16.).

Proračunske rezne sile u karakterističnim presjecima konstrukcijskih elemenata za osnovnu proračunsku kombinaciju imaju sljedeće vrijednosti:

a) ploča (polje): M_{Edx} = 150 kNm/m

b) zidno platno (podnožje): N_{Ed} = -5015 kN

c) greda (polje): M_{Ed} = -135 kNm

d) stup (podnožje): N_{Ed} = -3250 kN

Tablica 16. Osnovni periodi i frekvencije osciliranja za konstrukciju 2

Krutost zidova [%]	Period [s]	Frekvencija [Hz]
100	0,890	1,124
90	0,930	1,075
80	0,971	1,030
70	1,030	0,971
60	1,100	0,909
50	1,180	0,847
40	1,250	0,800
30	1,450	0,690
20	1,671	0,598
10	2,100	0,476

U području ležaja ploča neovisno o smanjenju krutosti zidova mjerodavna je osnovna proračunska kombinacija te se promatra utjecaj redukcije krutosti vertikalnih zidova na promjenu momenata savijanja samo u polju ploče. Za dimenzioniranje ploča u polju mjerodavna je osnovna proračunska kombinacija do vrijednosti reducirane krutosti od 40 % (tablica 17.).

Tablica 17. Promjena reznih sila u polju najopterećenije ploče

Krutost zidova [%]	Moment savijanja u polju ploče [kNm/m]
100	62,00
90	81,00
80	92,00
70	103,00
60	115,00
50	138,00
40	147,00
30	151,00
20	160,00
10	172,00

U osnovnoj proračunskoj kombinaciji u zidnim platnima prevladava uzdužna tlačna sila u vrijednosti od N_{Ed} = -5015 kN. U seizmičkoj se proračunskoj kombinaciji, koja je u ovom

slučaju mjerodavna, zbog djelovanja potresa uz uzdužnu tlačnu silu javlja i moment savijanja u podnožju građevine (tablica 18.).

Tablica 18. Promjena reznih sila u podnožju najopterećenijeg zida

Krutost zidova [%]	Uzdužna sila [kN]	Moment savijanja [kNm]
100	-5685	214
90	-5613	201
80	-5597	198
70	-5524	185
60	-5480	170
50	-5387	157
40	-5360	145
30	-5285	132
20	-5123	112
10	-5049	95

Za presjek najopterećenije grede nad ležajem mjerodavna je osnovna proračunska kombinacija za svaku vrijednost reducirane krutosti zidova u seizmičkoj proračunskoj kombinaciji (tablica 19.) te ćemo u ovom slučaju promatrati utjecaj redukcije krutosti zidova samo na promjenu momenata savijanja u polju grede. Za dimenzioniranje grede u polju mjerodavna je osnovna proračunska kombinacija do vrijednosti reducirane krutosti zidova koje su manje od 33 % (tablica 19.).

Tablica 19. Promjena reznih sila u gredi u polju

Krutost zidova [%]	Moment savijanja [kNm]
100	65,00
90	70,00
80	75,00
70	88,00
60	90,00
50	100,00
40	115,00
30	135,00
20	150,00
10	162,00

Stupovi su opterećeni pretežno uzdužnim silama i minimalnim momentima savijanja. Momente savijanja od potresnih djelovanja preuzeli su vertikalni zidovi. Stupovi su dimenzionirani na uzdužnu tlačnu silu gdje su uzete u obzir i njihove deformacije (teorija 2. reda [6]). Armatura je u stupovima za svaku vrijednost reducirane krutosti zidova manja od minimalne te se usvaja minimalna armatura (25 cm^2).

4.2.1. Rezultati proračuna količine armature za seizmičku proračunsku kombinaciju

Konstrukcija 2 - okvirna s vertiklanim zidnim platnima

Grede i ploče dimenzionirane su u skladu s odredbama norme EN 1992-1, uzimajući u obzir dodatne zahtjeve vezane za lokalnu duktilnost koji su navedeni u europskoj normi EN 1998-1. Količina potrebne armature pri proračunu s 100 % i 50 % krutosti zidova na savijanje prikazana je u tablici 21.

Tablica 21. Prikaz potrebne armature u elementima konstrukcija ovisno o redukciji krutosti zidova

Element konstrukcije	100 % krutost zidova	50 % krutost zidova
ploča	polje: 6,72 cm^2/m	polje: 12,80 cm^2/m
	ležaj: 3,07 cm^2/m	ležaj: 5,41 cm^2/m
zid	podnožje: 5,26 cm^2/m	podnožje: 7,64 cm^2/m
	sredina: 7,58 cm^2/m	sredina: 8,95 cm^2/m
greda	polje: 22,02 cm^2	polje: 15,38 cm^2
	ležaj: 7,46 cm^2	ležaj: 10,56 cm^2
stup	podnožje: 11,50 cm^2	podnožje: 13,80 cm^2
	sredina: 11,50 cm^2	sredina: 13,80 cm^2

Ako se promatraju količine potrebne armature za navedene konstruktivne elemente, može se uočiti da je armatura dobivena proračunom u slučaju 50 % krutosti zidova redovito veća (osim u slučaju polja grede) od armature u slučaju 100% krutosti zidova. Znači, razlika u količini armature postoji i ona se daljnjim smanjenjem krutosti zidova sve više povećava, a dobivena je armatura u zidovima za svaku vrijednost reducirane krutosti zidova veća od minimalne i manja od maksimalne armature.

Treba imati na umu da je kod reducirane krutosti zidova građevine od 50 % potrebno poprečnu armaturu gušće rasporediti u zidu, stupu i gredama. Količina armature vertikalnih zidova je u seizmičkoj proračunskoj situaciji za svaki slučaj reducirane krutosti veća od propisane minimalne vrijednosti.

4.2.2. Rezultati proračuna graničnog stanja uporabivosti

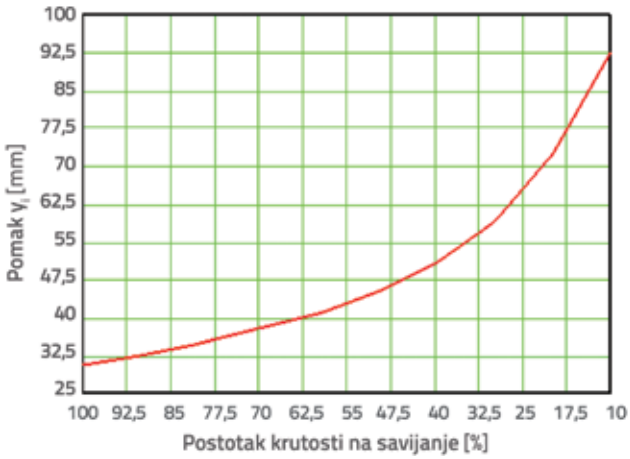
Konstrukcija 2 - okvirna s vertiklanim zidnim platnima

Relativni su katni pomaci najvažniji u analizi GSU konstrukcijskog sustava, a njihove vrijednosti za prizemlje i prvi kat prikazane su u tablici 22. Njihove su vrijednosti manje od dopuštenih. Dopušteni relativni pomaci dobiveni su izrazom (13).

Tablica 22. Prikaz relativnih pomaka konstrukcije

Krutost zidova [%]	Relativni pomaci [mm]	
	prizemlje	1. kat
100	21,50	4,08
90	21,89	5,98
80	22,03	7,15
70	22,15	8,6
60	22,59	9,8
50	22,93	11,18
40	23,58	12,86
30	24,12	14,6
20	25,15	15,8
10	26,22	18,59

Apsolutni pomak vrha konstrukcije prikazan je na slici 10. ovisno o reduciranoj krutosti zidova. Oni su za svaku vrijednost reducirane krutosti zidova izrazito manji od dopuštenog pomaka koji iznosi 333 mm, a to je izravni rezultat utjecaja vertikalnih betonskih zidova.

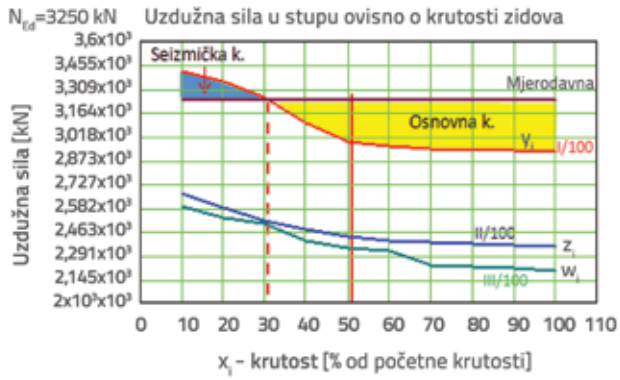


Slika 10. Promjena pomaka vrha konstrukcije s redukcijom krutosti vertikalnih zidova

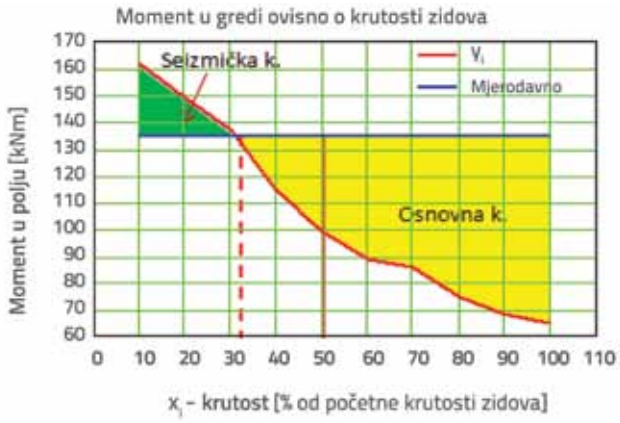
4.2.3. Utjecaj smanjenja krutosti zidova na promjenu mjerodavne kombinacije

Smanjivanjem krutosti nekog elementa konstrukcije događa se preraspodjela reznih sila u druge elemente konstrukcije. Preraspodjela reznih sila odvija se proporcionalno krutostima pojedinih elemenata. Rezultat je toga da kruči elementi preuzimaju veći dio seizmičkih sila. Ako se na primjer smanjuju krutosti vertikalnih zidova, tada okvirni sustav, stupovi i grede, kao elementi konstrukcije čije se krutosti ne mijenjaju, preuzimaju veći dio seizmičkih sila. Na slici 11. to je prikazano za stupove u kojima se povećava uzdužna tlačna sila pri redukciji krutosti zidova. Za stupove seizmička proračunska kombinacija poprima manje područje pri redukciji krutosti zidova (slika 11.).

Dakle, smanjivanjem krutosti određenog elementa zbog promjene sila u njemu pomiče se granica područja u kojem je mjerodavna seizmička proračunska kombinacija za taj konstruktivni element. Na slici 12. prikazani su rezultati analize utjecaja redukcije krutosti zidova na promjenu granice pri kojoj vrijedi osnovna odnosno seizmička proračunska kombinacija za grede (polje).



Slika 11. Promjena uzdužne sile u stupovima ovisno o promjeni krutosti zidova i prikaz granične krutosti zidova za seizmičku i osnovnu proračunsku kombinaciju



Slika 12. Promjena momenta savijanja u polju u gredi ovisno o promjeni krutosti zidova i prikaz granične krutosti za seizmičku i osnovnu proračunsku kombinaciju

4. Zaključak

Za prvu se konstrukciju redukcijom krutosti greda povećavaju rezne sile u pločama, a smanjuju u stupovima i gredama. Prema dobivenim se rezultatima za ležajeve greda i stupove uzimaju neraspucani presjeci pri dimenzioniranju tih elemenata konstrukcije. Na taj se način ostvaruje veća sigurnost konstrukcije u cjelini. Kada je riječ o polju ploče i presjeka grede u polju redukcija krutosti greda nema utjecaja jer je kod njih mjerodavna minimalna armatura određena normama EN 1992-1 i EN 1998-1. Pokazano je da je za propisanu redukciju krutosti greda od 50 % za ploče u polju mjerodavna osnovna proračunska kombinacija za oba smjera, dok je za presjeke nad ležajevima ploča mjerodavna seizmička proračunska kombinacija. Kod greda u polju mjerodavna je osnovna proračunska kombinacija, a u stupovima seizmička proračunska kombinacija.

Za drugu se konstrukciju redukcijom krutosti AB zidova povećavaju vrijednosti reznih sila u pločama, gredama i stupovima, a u vezi s tim i količina armature u njima raste. Za presjeke na ležajevima ploča i greda uvijek je mjerodavna osnovna proračunska kombinacija, dok je u polju mjerodavna seizmička proračunska kombinacija do 40 % početne vrijednosti krutosti zidova za ploče odnosno 33 % početne vrijednosti krutosti zidova za grede. Za stupove ta granična vrijednost odgovara krutosti zidova do 30 %. U Europskoj se normi EN 1998-1 predlaže smanjenje početne krutosti zidova konstrukcije na vrijednost od 50 %, pri kojoj, kao što pokazuju dobiveni rezultati za drugu konstrukciju, prestaje vrijediti seizmička proračunska kombinacija.

U izloženim analizama provedena je redukcija krutosti elemenata konstrukcije (greda ili zidova) od 100 % do 10 % početne vrijednosti njihovih krutosti. Granice kada osnovna proračunska kombinacija prestaje biti mjerodavna, a počinje biti mjerodavna seizmička proračunska kombinacija, nije jednaka za svaki konstrukcijski element. Analiziranjem dobivenih rezultata dolazi se do zaključka da promjena unutarnjih sila u karakterističnim elementima konstrukcije zbog redukcije krutosti pojedinih elemenata ovisi o odabranom konstrukcijskom sustavu, usvojenom faktoru ponašanja i dimenzijama pojedinih elemenata.

Očito se neki generalni zaključak o utrošku armature glede redukcije krutosti elemenata konstrukcije ne može donijeti jer, kao što je pokazano u analizama ovih dvaju primjera, količina i razmještaj armature ovise o vrsti konstrukcijskog sustava. S redukcijom krutosti kod nekih se elemenata konstrukcije smanjuje količina armature, a kod nekih se povećava. Uzimanje 50% početne krutosti (greda ili zidova) rezultira realnijim ponašanjem konstrukcije u potresu, a armatura je u konstrukciji pravilnije raspoređena.

Istraživanja prikazana u ovome radu provedena su u sklopu znanstvenog projekta "Razvoj konstrukcija povećane pouzdanosti s obzirom na potres" (114-0821466-1470) kojeg financira Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske.

LITERATURA

[1] Eurocode 8 – *Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, EN 1998-1: 2004.

[2] Čaušević, M.: *Dinamika konstrukcija – Potresno inženjerstvo, Aerodinamika, Konstrukcijske euronorme*, Golden marketing - Tehnička knjiga, Zagreb, 2010.

[3] Eurocode 1–Actions on structures – Part 1–1: General actions – densities, selfweight, imposed load for buildings: CEN - European Committee for Standardization (ENV 1991 – 2 – 1 : 1995), Brussels, 1995.

[4] Eurocode 0, *Basis of structural design*, CEN European Committee for Standardization, Brussels, EN 1990: 2002.

[5] Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1 –1: General rules and rules for buildings: CEN - European Committee for Standardization, Brussels, 2004.

[6] Čaušević, M.: Statika i stabilnost konstrukcija – geometrijska nelinearnost, Školska knjiga, Zagreb, 2003.

[7] Tomičić, I.: Priručnik za proračun AB konstrukcija, DHGK, Zagreb, 1993.

[8] Eurokod 8 – Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade – **Nacionalni dodatak**, HRN EN 1998-1/NA, prijedlog za javnu raspravu, travanj 2011.

[9] Dowrick, D. J.: *Earthquake resistant design: For Engineers and Architects,* 2nd Edition, John Wiley, New York, 1987.

[10] Paulay, T. and Priestley, M. J. N.: *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings,* John Wiley, New York, 1992.