

Građenje porastim betonom u potresnim područjima

Dražen Aničić

Ključne riječi

porasti beton, zgrade, građenje, potres, potresna otpornost, ispitivanja, model zgrade

Key words

porous concrete, buildings, construction, earthquake, seismic resistance, testing, building model

Mots clés

béton poreux, bâtiments, construction, tremblement de terre, résistance sismique, analyse, modèle de bâtiment

Ключевые слова

пористый бетон, здания, строительство, землетрясение, сейсмостойкость, испытания, модель здания

Schlüsselworte

Porenbeton, Gebäude, Bauen, Erdbeben, seismische Beständigkeit, Prüfung, Gebäudemodell

D. Aničić

Pregledni rad

Građenje porastim betonom u potresnim područjima

U članku se opovrgava opće uvjerenje o manjoj potresnoj otpornosti zidanih zgrada. Obraduje se primjena europskih norma za proračun zidanih konstrukcija od porastog betona i uporaba rezultata dobivenih ispitivanjima modela zgrade. Pokazano je da je građenje porastim betonom moguće u svim potresnim područjima Hrvatske. Moguća katnost zgrada smanjuje se s povećanjem seizmičnosti što je prirodno i nije prepreka primjeni sustava građenja zidanih konstrukcija od porastoga betona.

D. Aničić

Subject review

Construction with porous concrete in earthquake-prone areas

The general notion that masonry buildings are less resistant to earthquake action is challenged in the paper. The use of European standards in the design of porous-concrete masonry structures is analyzed, and the application of results obtained by building model testing is considered. It is shown that porous concrete can be used for construction purposes in all earthquake-prone areas in Croatia. Possible number of floors reduces with the increase of earthquake hazard, which is quite natural and does not hinder the use of construction systems involving porous concrete masonry structures.

D. Aničić

Ouvrage de synthèse

La construction avec béton poreux dans les zones sismiques

La notion générale que les bâtiments en maçonnerie sont moins résistants à l'action sismique est contestée dans l'ouvrage. L'emploi des normes européennes dans l'étude des structures en maçonnerie faites en béton poreux est analysé, et l'utilisation des résultats obtenus par l'analyse des modèles de construction est considérée. Il est démontré que le béton poreux peut être utilisé pour construction dans toutes les zones sismiques de Croatie. Le nombre possible des étages diminue avec l'augmentation de la sismicité, ce qui est tout-à-fait naturel et ne devrait pas empêcher l'emploi des systèmes de construction avec structures de maçonnerie en béton poreux.

Д. Аничич

Обзорная работа

Строительство из пористого бетона в сейсмических районах

В статье опровергается общепринятое мнение о меньшей сейсмостойкости кладочных зданий. Рассматривается применение европейских норм для расчета кладочных конструкций из пористого бетона и использование результатов, полученных при испытании модели здания. Показано, что строительство из пористого бетона возможно во всех сейсмических районах Хорватии. Уменьшение возможной этажности зданий с ростом сейсмичности является вполне естественным и не является препятствием к применению системы строительства конструкций из пористого бетона путем кладки.

D. Aničić

Übersichtsarbeit

Bauen mit Porenbeton in seismischen Gebieten

Im Artikel widerspricht man der allgemeinen Überzeugung über die mindere seismische Beständigkeit gemauerter Gebäude. Man bearbeitet die Anwendung europäischer Normen für die Berechnung gemauerter Konstruktionen aus Porenbeton und die Benutzung der durch Prüfung von Gebäudemodellen erhaltenen Ergebnissen. Es wird gezeigt dass Bauen mit Porenbeton in allen seismischen Gebieten Kroatiens möglich ist. Die mögliche Stockwerkanzahl mindert sich mit der Erhöhung der seismischen Stufe, was natürlich ist und kein Hindernis für die Anwendung des Bausystems gemauerter Konstruktionen aus Porenbeton.

Autor: Prof. dr. sc. **Dražen Aničić**, dipl. ing. građ., sveuč. prof. u mirovini, Vladimira Ruždjaka 9 C, Zagreb

1 Uvod

Republika Hrvatska nalazi se u potresnim područjima u kojima se, u tijeku uporabnog vijeka građevina, očekuju snažni tektonski potresi koji na građevinama mogu proizročiti znatna oštećenja pa i rušenja. Oko 95 % hrvatskog teritorija nalazi se u potresnim područjima u kojima postoji vjerojatnost oštećenja zidanih zgrada. Među mnogim građevinskim stručnjacima vladava uvjerenje da su zidane zgrade manje otporne na djelovanje potresnih sila od zgrada građenih drugim materijalima. Takvo uvjerenje nije utemeljeno za zgrade projektirane i izvedene u skladu sa suvremenim teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima i odredbama europskih norma za projektiranje zidanih konstrukcija. U radu je prikazan postupak proračuna zidanih zgrada od porastoga betona u potresnim područjima u skladu s europskim normama.

Na potresnoj platformi Zavoda za gradbeništvo Slovenije u Ljubljani ispitana su 2009. godine tri modela zidanih zgrada izvedenih od porastoga betona. U opsežnom izvještaju o tim ispitivanjima [8] pokazano je da zgrade izvedene od porastoga betona zadovoljavaju bitni zahtjev "mehanička otpornost i stabilnost" za sva potresna područja Hrvatske.

2 Projektiranje zgrada od porastoga betona na potresno djelovanje

2.1 Općenito

Zgrade građene od zidnih elemenata od porastoga betona i tankoslojnog morta projektiraju se u skladu s normama niza HRN EN 1996 [4] i normom HRN EN 1998-1 [6]. Za njih vrijede ista pravila kao i za zidane građevine projektirane od ostalih pet vrsta zidnih elemenata. Svrha je propisanih načela i pravila osigurati mehaničku otpornost i stabilnost kao i sigurnost u slučaju požara, a u slučaju potresa zaštitu ljudskih života (ispunjenje zahtjeva "ne smije doći do rušenja"), ograničenje štete (ispunjenje zahtjeva ograničenog oštećenja) i neugrožavanje funkcija onih građevina koje su bitne neposredno nakon potresa. Osim toga u normi HRN EN 1990:2002, točka 1.3 [11] navodi se i pretpostavka da tijekom faze građenja ili tijekom uporabe konstrukcije neće doći do promjene konstrukcije.

2.2 Oblikovanje

Koliko je god moguće, konstrukcije trebaju imati jednostavne i pravilne oblike u tlocrtu i po visini. Ako je nužno, to se može postići podjelom konstrukcije razdjelnicama na dinamički neovisne jedinice. Zbog osiguravanja općega duktilnog ponašanja i trošenja energije krhki se slom ili prerano stvaranje nestabilnih mehanizama mora izbjeći. O zidanim konstrukcijama iz različitih aspekata

i primjene europskih norma objavljeno je u novim radovima u [7, 10, 11].

U fazi idejnog projekta zgrada mora zadovoljiti ova načela:

- jednostavnost konstrukcije
- jednoličnost, simetriju i višestruku statičku neodređenost statičkog sustava
- otpornost i krutost u dva smjera
- otpornost i krutost na torziju
- mora imati krutu dijafragmu u razini kata
- mora imati prikladne temelje.

Jednostavnost konstrukcije karakterizira postojanje jasnih i izravnih putova prijenosa potresnih sila, jer je modeliranje, proračun, dimenzioniranje, oblikovanje pojedinosti i građenje jednostavnih konstrukcija podložno mnogo manjoj nesigurnosti ponašanja konstrukcije pri potresu. Jednoličnost u tlocrtu znači ravnomjernu raspodjelu konstrukcijskih elemenata koja omogućuje ravnomjernu raspodjelu djelovanja na te elemente. Jednoličnost po visini zgrade osigurava izbjegavanje koncentracije naprezanja i velikih zahtjeva za duktilnošću koji mogu proizročiti prerano rušenje. Svi nosivi sustavi koji preuzimaju bočna opterećenja moraju se bez prekida protezati od temelja do vrha zgrade ili bar do određenog dijela visine. Bliskost položaja središta masa i središta krutosti ideal je kojem treba težiti jer ekscentričnosti masa i krutosti uzrokuju torzijske učinke koji se proračunom mogu samo približno obuhvatiti [7, 10].

2.3 Posebna pravila za zgrade od porastoga betona

Normalizirana tlačna čvrstoća zidnih elemenata od porastoga betona određena u skladu s normom HRN EN 772-1 ne smije biti manja od $f_{b,min} = 2,0 \text{ N/mm}^2$. Tlačna čvrstoća tankslojnog morta za nearmirano i omeđeno zide ne smije biti manja od $f_{m,min} = 5,0 \text{ N/mm}^2$. Dopušteno je povezivanje vertikalnih sljebnica zidnih elemenata samo sljebnicama potpuno ispunjenim mortom. Mortom neispunjene ravne vertikalne sljebnice i neispunjene sljebnice sa mehaničkim zahvaćanjem između zidnih elemenata nisu dopuštene u potresnim područjima.

U tablici 1. navedeni su za četiri tipa gradnje rasponi dopuštenih graničnih vrijednosti faktora ponašanja q pomoću kojega se sile koje odgovaraju elastičnom odzivu umanjuju, čime se u obzir uzima prihvatljivo poslijelastično ponašanje konstrukcije i nastanak ograničenih oštećenja nosivog sustava.

Proračun modela konstrukcije mora predstavljati svojstva krutosti cijelog sustava. Krutost konstrukcijskih elemenata mora se odrediti uzimajući u obzir deformiranja zbog savijanja i posmika. U proračunu se smije uzeti

elastična krutost neraspucanog stanja ili, čemu se daje prednost i što je realnije, krutost za raspucalo stanje kako bi se bolje približio nagib prve grane bilinearnog modela sila – deformiranje konstrukcijskog elementa. Ako svojstva krutosti nisu točno određena, smije se krutost pri savijanju i posmiku za raspucalo stanje uzeti kao polovina elastične krutosti neraspucaloga bruto presjeka.

Tablica 1. Tipovi gradnje i rasponi vrijednosti faktora ponašanja q

Tip gradnje	Faktor ponašanja q prema normi HRN EN 1998-1	Faktor ponašanja q prema nacrtu Nacionalnog dodatka HRN EN 1998-1/NA ^{*)}
Nearmirano zide u skladu samo s normom HRN EN 1996-1-1 (samo za malu seizmičnost)	1,5	--
Nearmirano zide u skladu s normom HRN EN 1998-1	1,5 - 2,5	2,0
Omeđeno zide	2,0 - 3,0	2,5
Armirano zide	2,5 - 3,0	2,5

*) Mora biti zasnovan na eksperimentalnim provjerama.

Ukupna poprečna sila u podnožju zgrade dobivena linearnim proračunom smije se preraspodijeliti na zidove uz uvjet:

- da je zadovoljena opća ravnoteža (tj. da je postignuta ista ukupna poprečna sila u podnožju i isti položaj rezultante sila)
- da poprečna sila ni u kojem zidu nije smanjena za više od 25 % i da nije povećana za više od 33 %, i
- da su za stropne dijafragme posljedice te preraspodjele uzete u obzir.

Za geometrijske odnose debljine, duljine i visine nosivih zidova u tablici 9.2 norme EN 1998-1 [6] i nacrtu Nacionalnog dodatka dane su preporučene vrijednosti koje ne treba premašiti.

Zgrade koje se grade od nearmiranog ziđa moraju imati horizontalne serklaže u razini stropnih konstrukcija. Serklaži moraju biti armirani u skladu s normom s najmanje 200 mm² (4Φ8 mm), no preporučuje se odabrati najmanje 4Φ10 mm.

Zgrade koje se grade od omeđenog ziđa moraju imati međusobno povezane i usidrene horizontalne i vertikalne serklaže. Vertikalni se serklaži izvode nakon izrade ziđa. Poprečni presjek serklaža ne smije biti manji od 15 cm x 15 cm. Uzdužna armatura vertikalnih serklaža omeđenog ziđa treba imati presjek najmanje 300 mm² (4Φ10 mm), ali ne više od 0,01· A_c , gdje je A_c ploština poprečnog presjeka betona. Najmanja količina spona je Φ5/150 mm.

Za armiranje rabe se čelici B500B ili B500C. Armatura se preklapa na duljini 60Φ.

Vertikalni serklaži postavljaju se:

- na slobodnim rubovima svakog nosivog zidnog elementa
- s obje strane svakog otvora u zidu čija je ploština veća od 1,5 m²

Ovu odredbu norme HRN EN 1998-1 o vertikalnim serklažima može se tumačiti ovako:

- Ako je ploština otvora u zidu između dvaju vertikalnih serklaža manja od 1,5 m² veličina otvora se zanemaruje, a zid smatra omeđenim tim vertikalnim serklažima.
- Ako je ploština otvora u zidu veća od 1,5 m² i ako su oko otvora postavljeni vertikalni serklaži, puni zid između dvaju vertikalnih serklaža ispred i iza otvora smatra se omeđenim.
- Ako oko otvora ploštine veće od 1,5 m² nema vertikalnih serklaža, taj se zid smatra neomeđenim.

Kao će u slučaju c) u jednoj zgradi biti omeđenih i neomeđenih zidova projektant mora odlučiti kojim će faktorom ponašanja q proračunati zgradu. Nije moguće pojedinim zidovima dodijeliti različite faktore ponašanja q jer se oni odnose na zgradu kao cjelinu. Dopušteno je, međutim, za svaki glavni smjer djelovanja potresa odrediti različite faktore ponašanja.

- ako je nužno da se u zidu ne premaši razmak od 5 m između omeđujućih elemenata
- na presjecištima nosivih zidova, kad god su omeđujući elementi postavljeni prema navedenim pravilima na razmaku većem od 1,5 m.

Za zidane zgrade zahtijeva se provjera sigurnosti na rušenje, osim za zgrade koje zadovoljavaju pravila za „jednostavne zidane zgrade“.

Za granično stanje nosivosti i za potresnu proračunsku situaciju treba upotrijebiti parcijalni koeficijent za materijal $\gamma_{m,a} = (2/3) \cdot \gamma_m$ ali ne manji od 1,5 za zide i $\gamma_s = 1,0$ za čelik. Vrijednost za γ_m dana je u normi HRN EN 1996-1-1 [4] i iznosi za zidne elemente kategorije I. s projektiranim mortom i zide izvedeno u razredu izvedbe 3 (srednja kvaliteta izvedbe): $\gamma_m = 2,0$. Zidni elementi kategorije I. su elementi za koje se sukladnost s normama niza HRN EN 771 dokazuje prema sustavu potvrđivanja sukladnosti 2+.

2.4 Pravila za „jednostavne zidane zgrade“

Zgrade koje pripadaju razredima važnosti I. ili II. (manje važne zgrade i obične zgrade) i koje ispunjavaju uvjete točaka 9.2 i 9.5 norme HRN EN 1998-1 [6] smiju se raz-

vrstati u tzv. „jednostavne zidane zgrade“ ako ispunjavaju još i posebne uvjete koji se odnose na tlocrtni raspored zgrade, oblikovanje nosivih zidova, odnose masa susjednih katova i sl. Za takve zgrade nije obvezna izričita provjera sigurnosti (statički proračun). Ovisno o umnošku $a_g S$ (formula (3)), za lokaciju i tip gradnje ograničuje se dopušteni broj katova iznad temeljnog tla, n , a u oba ortogonalna smjera treba predvidjeti zidove čija je najmanja ploština presjeka u svakom smjeru A_{\min} . Najmanja ploština presjeka zidova izražena je kao najmanji postotak $p_{A,\min}$ ukupne ploštine stropa po kat.

U tablici 2. sadržani su podaci koji mogu poslužiti za brzu orijentaciju projektantu pri odabiru nosivog sustava zidova od porastoga betona bez provedbe proračuna. Podaci se zasnivaju na eksperimentalno određenom faktoru ponašanja q [8] i računalnom programu koji ispunjava zahtjeve eurokodova.

Tablica 2. Broj katova n , najmanji omjer ploštine poprečnog presjeka nosivih zidova u svakom smjeru i bruto ploštine kata i ubrzanja temeljnog tla za „jednostavne zidane zgrade“ (omeđeno zide od porastog betona, tankoslojni mort - orijentacijski podaci)

	Najmanji omjer ploštine poprečnog presjeka nosivih zidova u svakom smjeru i bruto ploštine kata - u postotku			
Proračunsko ubrzanje (m/s^2)	$a_g = 0,5$	$a_g = 1,0$	$a_g = 2,0$	$a_g = 3,0$
$S_d(T_1) = a_g S (2,5/q)$	0,6	1,2	2,4	3,6
Broj katova n				
1	2,0	2,0	2,0	3,0
2	2,0	2,0	3,5	5,0
3	2,0	2,5	4,0	6,5
4	2,0	3,0	5,0	7,0
<p>Napomena 1: Prizemlje se računa kao kat. Ne računa se prostor ispod krova a iznad punog kata (mansarda).</p> <p>Napomena 2: Za tip B temeljnog tla (brzina širenja posmičnog vala 360-800 m/s), tzv. "srednje tlo" $S=1,2$.</p> <p>Napomena 3: Za omeđeno zide $q=2,5$ pa je $S_d(T_1) = 1,2 \cdot a_g$</p> <p>Napomena 4: Faktor važnosti zgrade $\gamma_1 = 1,0$ pa je proračunsko ubrzanje $a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR} = 1,0 \cdot a_{gR}$</p> <p>Napomena 5: Karakteristična tlačna čvrstoća zida za zidne elemente objavljene tlačne čvrstoće $f_b=4$ MPa je $f_k=3,14$ MPa.</p> <p>Napomena 6: Tlačna čvrstoća tankoslojnog morta TM10 $f_m = 10$ N/mm².</p> <p>Napomena 7: Karakteristična posmična čvrstoća zida je $f_{vk}=0,16$ MPa.</p> <p>Napomena 8: Najmanja vrijednost parcijalnog koeficijenta za djelovanje potresa je $\gamma_{m,a} = 1,5$.</p> <p>Napomena 9: U proračunu potresne sile za sve je katnosti uzet popravni faktor $\lambda = 1,0$ (formula 4.5 u normi HRN EN 1998-1 i formula (2) u ovom članku.</p>				

3 Proračun zidane zgrade na djelovanje potresa

3.1 Proračun djelovanja

3.1.1 Ukupna poprečna sila

Prije proračuna zidane zgrade na djelovanje potresa nužno je provesti provjere mehaničke otpornosti i stabilnosti za djelovanje uobičajenih stalnih i prolaznih djelovanja (vlastita težina, vjetar, snijeg, uporabna opterećenja, opterećenja temeljnog tla). Provjeravaju se granična stanja nosivosti i, po potrebi, granična stanja uporabljivosti. Za te proračune primjenjuju se norme nizova HRN EN 1990 [1], HRN EN 1991 [2], HRN EN 1992 [3], HRN EN 1996 [4] i HRN EN 1997 [5].

Djelovanje potresa je izvanredno djelovanje pa se osim navedenih norma primjenjuje i norma HRN EN 1998-1 [6]. Ukupno djelovanje na konstrukciju određuje se iz izraza:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" A_{Ed} "+" \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

gdje je:

"+" oznaka znači "kombinirati sa"

E_d proračunska vrijednost učinka djelovanja

$G_{k,j}$ karakteristična vrijednost stalnog djelovanja j

A_{Ed} učinak potresnog djelovanja

$Q_{k,i}$ karakteristična vrijednosti prolaznog djelovanja i

$\psi_{2,i}$ koeficijent kombinacija koji za kuće, stambene i uredske zgrade ima vrijednost

$\psi_2 = 0,3 \cdot \varphi = 0,3 \cdot 0,5 = 0,15$ (prema izrazu (4.2) u normi HRN EN 1998-1).

Parcijalni koeficijenti za stalno i prolazno djelovanje za potresnu proračunsku situaciju imaju vrijednost $\gamma_G = \gamma_Q = 1,0$ pa su u izrazu (1) ispušteni.

Proračun stalnih (G) i prolaznih (Q) djelovanja ovdje se ne navodi, no on je istovjetan proračunu na uobičajena vertikalna djelovanja.

Potresno djelovanje proračunava se kao ukupna proračunska potresna sila u podnožju zgrade, F_b , iz izraza:

$$F_b = S_d(T_1) m \lambda \quad (2)$$

gdje je:

$S_d(T_1)$ ordinata proračunskog spektra za period oscilacije zgrade T_1 (s)

$$S_d(T_1) = a_g S \eta (2,5/q) \quad (3)$$

a_g proračunsko ubrzanje temeljnog tla za tlo tipa A (brzina širenja posmičnog vala >800 m/s); $a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$

- S faktor tla zavisao o tipu tla (A ... E, tablica 3.1 u normi HRN EN 1998-1)
- η popravni faktor za viskozno prigušenje; $\eta = 1,0$ za prigušenje 5 %
- q faktor ponašanja konstrukcije (određen u skladu s normom ili eksperimentalno)
- γ_1 faktor važnosti zgrade; $\gamma_1=1,0$ za kuće, stambene i uredske zgrade
- a_{gR} referencijsko vršno ubrzanje temeljnog tla za tlo tipa A u m/s^2 određeno iz karte potresnih područja Hrvatske (karta je u pripremi)
- m ukupna masa zgrade iznad temelja ili iznad krutoga podruma određena za izvanrednu kombinaciju djelovanja; $m = W/g$
- W težina zgrade
- g gravitacijsko ubrzanje $g = 9,81 m/s^2$
- λ popravni faktor koji iznosi $\lambda = 0,85$ ako je $T_1 \leq 2 T_C$ za zgrade koje imaju više od dva kata $\lambda = 1,0$ za zgrade s jednim i dva kata Uvjet $T_1 \leq 2 T_C$ redovito će biti ispunjen za zgrade visine do pet katova
- T_1 period prvog oblika vibracija u s
- T_C gornja granica perioda s granom konstantnog spektralnog ubrzanja.

Faktori tla, S , određeni su u tablicama 3.2 i 3.3 norme HRN EN 1998-1 [6] i imaju vrijednosti od 1,0 do 1,8.

3.1.2 Raspodjela ukupne poprečne sile po visini zgrade

Da bi se odredile poprečne sile na razinama pojedinih katova (F_i) potrebno je ukupnu proračunsku poprečnu silu u podnožju raspodijeliti po visini zgrade. To se redovito izvodi na pojednostavnjen način, uz pretpostavljenu raspodjelu sile F_b u obliku obrnutog trokuta, tj. uz pretpostavku da je prvi oblik vibracija oblikom jednak pomacima koji se po visini linearno povećavaju. Raspodjela se proračuna iz formule (4.11) u normi HRN EN 1998-1 [6] odnosno iz formule (4):

$$F_i = F_b \frac{z_i m_i}{\sum_{i=1}^n z_i m_i} \quad (4)$$

gdje je:

- F_i poprečna sila u i -tom katu
- z_i visina mase m_i iznad razine potresnog djelovanja (temelja ili gornjeg ruba krutoga podruma)
- m_i masa pojedinog kata
- n broj katova.

Sila F_b može djelovati u bilo kojem smjeru. Zbog jednostavnosti odvojeno se promatraju smjerovi x i y .

3.1.3 Raspodjela sila na pojedine nosive zidove

Horizontalne (bočne) sile F_i koje djeluju na razini svakog kata i raspodjeljuju se na nosive zidove koji preuzimaju bočno opterećenje srazmjerno svojoj bočnoj krutosti uz pretpostavku stropova krutih u vlastitoj ravnini.

Kako je bočna krutost (K) pojedinog zida jednaka recipročnoj vrijednosti horizontalnog pomaka (d) pri djelovanju jedinične sile $H=1$ pri vrhu zida ($K=H/d$), ona se proračunava transformacijom formule (5) za horizontalni pomak zida upetog na gornjem i donjem rubu u formulu (6):

$$d = \frac{Hh^3}{12EI_w} + \frac{kHh}{GA_w} \quad (5)$$

$$K_e = \frac{GA_w}{1,2h \left[1 + \alpha \cdot (G/E)(h/l)^2 \right]} \quad (6)$$

gdje je:

- h visina zida
- l duljina zida
- $\kappa = 1,2$ koeficijent nejednolične raspodjele posmičnih naprezanja
- E modul elastičnosti zida
- G modul posmika zida
- I_w moment tromosti zida
- A_w ploština poprečnog presjeka zida
- α koeficijent ovisan upetosti zida: $\alpha = 0,83$ za potpuno upeti zid; $\alpha = 3,33$ za konzolni zid

Kako kod zidanih građevina prevladava posmična krutost zidova može se doprinos krutosti na savijanje zanemariti. U tom slučaju u formuli (6) otpada izraz u uglastoj zagradi. Umjesto elastične bočne krutosti K_e za neraspucali presjek pri djelovanju potresnih sila u proračunu je dopušteno uzeti polovične vrijednosti tj. $K_p = 0,5 \cdot K_e$ čime se obuhvaća smanjenje bočne krutosti prouzročeno raspucavanjem presjeka (točke 9.4(2)P i 9.3(3) norme HRN EN 1998-1) [6].

Ako je bočna krutost j -tog zida jednaka K_j , a broj zidova toga kata je m , tada na zid j otpada sila

$$F_j = F_i \frac{K_j}{\sum_{j=1}^m K_j} \quad (7)$$

Iz tako raspodijeljenih bočnih sila mogu se odrediti i pripadajući momenti savijanja za pojedini zid. Pritom

postoji nekoliko mogućnosti određivanja momenata savijanja opisanih u literaturi [9] koje se ovdje zbog ograničenog prostora ne navode.

Time su za potresnu proračunsku situaciju u prvoj aproksimaciji definirana djelovanja N_{Ed} , V_{Ed} i M_{Ed} (tj. prije proračuna torzijskih učinaka i dopuštene preraspodjele sila).

Daljnji korak je proračun torzijskih učinaka (torzija oko vertikalne osi zgrade) koji su posljedica a) slučajnih uzroka kao neizbježnih slučajnih ekscentričnosti zbog odstupanja od projektiranih geometrijskih oblika, posebno debljine zidova i njihova položaja, odstupanja stvarnog položaja od projektiranog položaja masa (stalnih i prolaznih), odstupanja od mehaničkih svojstava materijala pojedinih nosivih elemenata zbog uobičajenog rasipanja rezultata, b) projektom određenih uzroka kao ekscentričnosti zbog nepodudaranja središta masa i središta krutosti pri definiranom rasporedu nosivih elemenata konstrukcije.

Navedenim proračunima nije obuhvaćena dopuštena preraspodjela poprečnih sila između pojedinih zidova određena linearnim proračunom koja se može provesti u skladu s točkom 9.4(6) norme HRN EN 1998-1 [6]: a) ako je zadovoljena opća ravnoteža tj. ako je postignuta ista ukupna poprečna sila u podnožju i njezin položaj kao rezultante sila, b) ako poprečna sila ni u jednom zidu nije smanjena za više od 25 % i nije povećana za više od 33 %, i c) ako su posljedice takve preraspodjele na stropne dijafragme uzete u obzir.

Torzijsko djelovanje prouzročeno slučajnim uzrocima u skladu s točkom 4.3.2 norme HRN EN 1998-1 [6] proračunom se obuhvaća ovako: smatra se da je proračunano središte masa na svakom stropu i pomaknuto iz svog proračunom određenog položaja u svakom glavnom smjeru zgrade za slučajnu ekscentričnost čija je veličina

$$e_{ax,i} = \pm 0,05 L_{x,i} \quad (8)$$

$$e_{ay,i} = \pm 0,05 L_{y,i} \quad (9)$$

gdje je:

$e_{ax,i}$, $e_{ay,i}$ slučajna ekscentričnost mase u katu i u smjeru x odnosno y od proračunom određenog položaja (vidi niže) uzeta za sve stropove u istom smjeru

$L_{x,i}$, $L_{y,i}$ dimenzija zgrade u katu i u smjeru x odnosno y okomito na smjer potresnog djelovanja

a indeks koji označava izvanrednu tj. slučajnu ekscentričnost.

Torzijsko djelovanje zbog projektom određenih uzroka tj. zbog nepodudaranja središta masa i središta krutosti određuje se proračunom odvojeno za svaki glavni smjer i za svaki kat i . Ako su glavne koordinate zgrade u tlocrtu označene s x i y , za nosive zidove postavljene pod

međusobno pravim kutom, ekscentričnosti u smjeru osi x odnosno y su:

$$e_{x,i} = x_{mx,i} - x_{sx,i} \quad (10)$$

$$e_{y,i} = y_{my,i} - y_{sy,i} \quad (11)$$

gdje je:

$x_{mx,i}$ apscisa središta katne mase

$x_{sx,i}$ apscisa središta katne krutosti

$y_{my,i}$ ordinata središta katne mase

$y_{sy,i}$ ordinata središta katne krutosti, za svaki kat i posebno, mjereno od proizvoljnog položaja ishodišta koordinatnog sustava.

Koordinate središta masa pojedinog kata i proračunaju se sumiranjem po nosivim elementima kata j od $j = 1 \dots m$ iz izraza

$$x_{mx,i} = \frac{\sum_j \sigma_{dy,j} A_{wy,j} x_j}{\sum_j \sigma_{dy,j} A_{wy,j}} \quad y_{my,i} = \frac{\sum_j \sigma_{dx,j} A_{wx,j} y_j}{\sum_j \sigma_{dx,j} A_{wx,j}} \quad (12)$$

a koordinate središta krutosti pojedinog kata i sumiranjem po nosivim elementima kata j od $j = 1 \dots m$ iz izraza

$$x_{sx,i} = \frac{\sum_j K_{x,j} x_j}{\sum_j K_{x,j}} \quad y_{sy,i} = \frac{\sum_j K_{y,j} y_j}{\sum_j K_{y,j}} \quad (13)$$

gdje je:

$\sigma_{dy,j}$, $\sigma_{dx,j}$ prosječno tlačno naprezanje j -tog zida određenog kata postavljenog u smjeru osi y odnosno x za potresnu proračunsku situaciju

$A_{wy,j}$, $A_{wx,j}$ ploština presjeka j -tog zida u smjeru osi y odnosno osi x

$K_{x,j}$, $K_{y,j}$ bočna krutost j -tog zida u smjeru osi x odnosno u smjeru osi y (jednadžba (6))

x_j , y_j koordinate (udaljenosti) j -tog zida od ishodišta.

Važno je uočiti da se u formulama (8) do (11) indeks i odnosi na $i = 1 \dots n$ katova a u formulama (12) i (13) indeks j na $j = 1 \dots m$ zidova jednog kata. Formule u (12) obuhvaćaju i masu stropa raspoređenu na zidove pa se ona posebno ne proračunava.

Torzijski moment na i -tom katu za ekscentričnosti u smjeru x odnosno y tada je jednak:

$$M_{Tx,i} = F_i \cdot (e_{ax,i} + e_{x,i}) \quad (14)$$

$$M_{Ty,i} = F_i \cdot (e_{ay,i} + e_{y,i}) \quad (15)$$

gdje je F_i ukupna poprečna sila kata.

Torzijski momenti iz jednadžbi (14) i (15), uz pretpostavku odvojenog proračuna zgrade za djelovanje potresa

u smjerovima x i y , raspoređuju se na nosive elemente kata srazmjerno njihovoj torzijskoj krutosti jer je središte krutosti ujedno središte rotacije oko vertikalne osi zgrade i jer je temeljna pretpostavka proračuna da je stropna konstrukcija beskonačno kruta u svojoj ravnini (kruti disk). Torzijski moment $M_{T_{x,i}}$ odnosno $M_{T_{y,i}}$ na katu i dobiva se zbrajanjem torzijskih momenata iz jednadžbe (14) odnosno (15) svih katova iznad i -tog.

Torzijska krutost pojedinog zida j je

$$K_{Tj} = K_{x,j} x_j^2 + K_{y,j} y_j^2 \quad (\text{kN}\cdot\text{m}) \quad (16)$$

gdje je x_j udaljenost elementa j od osi y a y_j je udaljenost elementa j od osi x , pri čemu se ishodište sustava nalazi u središtu krutosti, a ne na proizvoljnom mjestu kao ranije.

Ukupna torzijska krutost svih zidova $j = 1 \dots m$ na katu i je

$$K_{MT,i} = \sum_{j=1}^m K_{T,j} \quad (\text{kN m}), \quad (17)$$

a sila koja otpada na pojedini zid j u katu i u smjeru x prouzročena torzijskim momentom $M_{T_{x,i}}$ je

$$F_{T_{x,ij}} = M_{T_{x,i}} \frac{K_{x,j} \cdot y_j}{K_{MT,i}} \quad (\text{kN m}) \quad (18)$$

dok je sila koja otpada na pojedini zid j u katu i u smjeru y prouzročena torzijskim momentom $M_{T_{y,i}}$

$$F_{T_{y,ij}} = M_{T_{y,i}} \frac{K_{y,j} \cdot x_j}{K_{MT,i}} \quad (\text{kN}) \quad (19)$$

Sile dobivene iz jednadžbe (7) zbrajaju se sa silama iz jednadžbi (18) odnosno (19) pa na i -tom katu na j -ti nosivi element djeluju sile

$$F_{x,ij} = F_{x,j} + F_{T_{x,ij}} \quad (\text{kN}) \quad (20)$$

$$F_{y,ij} = F_{y,j} + F_{T_{y,ij}} \quad (\text{kN}) \quad (21)$$

3.2 Proračun otpornosti

3.2.1 Opće odredbe

Nakon što se ukupna potresna sila raspodijeli po visini zgrade i raspodijeli na pojedine nosive zidove potrebno je odrediti i pripadajuće vertikalno opterećenje svakog zida za potresnu proračunsku situaciju. Proračun otpornosti provodi se za svaki nosivi zid pojedinačno i za svaki kat zgrade.

Za omeđeno zide od porastoga betona primjenjuju se neke odredbe norme HRN EN 1992-1-1, *Projektiranje betonskih konstrukcija* [3] i odredbe norme HRN EN 1996-1-1, *Projektiranje zidanih konstrukcija* [4]. Ome-

đeni je zid opterećen uzdužnom silom N_{Ed} , momentom savijanja M_{Ed} i poprečnom silom V_{Ed} . Potrebno je dokazati da je za istodobno djelovanje uzdužne sile i momenta savijanja $N_{Ed} \leq N_{Rd}$ i $M_{Ed} \leq M_{Rd}$ te da je za poprečnu silu $V_{Ed} \leq V_{Rd}$.

U skladu s točkom 6.9.2(1) norme HRN EN 1996-1-1 pri određivanju proračunske vrijednosti otpornosti presjeka na djelovanje momenta savijanja u tlačnom se području smije pretpostaviti blok tlačnog naprezanja koji se zasniva samo na tlačnoj čvrstoći zida. Tlačnu armaturu vertikalnog serklaža treba zanemariti a vlačna se nosivost armature uzima u obzir.

U skladu s točkom 6.9.2(2) iste norme kod provjere omeđenih elemenata zida izloženih posmiku otpornost na posmik treba uzeti kao zbroj posmičnih otpornosti zida i betona omeđujućih elemenata. U proračunu posmične otpornosti zida treba rabiti pravila za nearmirano zide izloženo posmičnom opterećenju, uzimajući u obzir duljinu tlačno opterećenog dijela zida l_c . Armaturu omeđujućih elemenata ne treba uzeti u obzir.

3.2.2 Proračun za istodobno djelovanje M i N

U zidu duljine između serklaža l_0 i debljine t postoji normalno naprezanje od stalnog gravitacijskog opterećenja

$$\sigma_d = N_{Ed} / t l_0 \quad (22)$$

Ako je proračunska tlačna čvrstoća zida općenito za potresnu proračunsku situaciju (uz $\gamma_{M,\min}=1,5$)

$$f_d = f_k / \gamma_{M,\min} = N_{Rd} / t l_0 \quad (23)$$

tada za preuzimanje momenta savijanja parom sila (tlačno napregnut rub zida - vlačno napregnuta armatura serklaža) na tlačnom rubu zida preostaje kapacitet nosivosti za uzdužnu silu jednak

$$\Delta N = N_{Rd} - N_{Ed} = [(f_k / \gamma_{M,\min}) \cdot t \cdot x - \sigma_{d,u} \cdot t \cdot x] = [(f_k / \gamma_{M,\min}) - \sigma_{d,u}] t x \quad (24)$$

U izrazu (24) za ploštinu tlačno napregnutog zida u fazi sloma uzeta je ploština zida $t \cdot x$ (pravokutni blok naprezanja) pri čemu je duljina tlačnog područja određena približno kao $x=0,1 \cdot l_0$ što odgovara graničnom stanju nosivosti zida, opterećenog stalnom uzdužnom silom i rastućem momentu savijanja. U fazi sloma normalno naprezanje je $\sigma_{d,u}=10\sigma_d$ jer je tada tlačno područje smanjeno na duljinu x .

Otpornost takvog presjeka kombiniranog od zida i armature za moment savijanja manja je od vrijednosti:

$$\text{otpornosti zida} \quad M_{Rd,m} = \Delta N z \quad (25)$$

i

$$\text{otpornosti armature} \quad M_{Rd,s} = A_s f_{yd} z \quad (26)$$

gdje je:

- t debljina zida
- $z = l_0 \cdot x/2 + d/2$ krak unutarnjih sila
- l_0 duljina zida između vertikalnih serklaža
- d visina presjeka vertikalnog serklaža u smjeru duljine zida
- A_s ploština presjeka uzdužnih šipki vertikalnog serklaža
- $f_{yd} = f_y$ proračunska granica popuštanja armature vertikalnog serklaža za potresnu proračunsku situaciju

Primjer: Za $f_k = 3,14 \text{ N/mm}^2$, $\gamma_{M,\min} = 1,5$, $\sigma_d = 0,2 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{du} = 2,0 \text{ N/mm}^2$, $t = 300 \text{ mm}$, $l_0 = 4000 \text{ mm}$ dobiva se $\Delta N = [3,14/1,5 - 2,0] \cdot 300 \cdot 0,1 \cdot 4000 = 11,2 \text{ kN}$. Za serklaž kružnog presjeka promjera $\Phi 150 \text{ mm}$ iznosi $z = 4000 - 200 + 75 = 3875 \text{ mm}$; $A_s = 4\Phi 10 = 314 \text{ mm}^2$; $f_{yd} = 500 \text{ N/mm}^2$

$$M_{Rd,m} = 11,2 \cdot 3,875 = 43,4 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd,s} = 314 \cdot 500 \cdot 3875 = 608375 \text{ Nmm ili } 608 \text{ kNm}$$

Kako je $M_{Rd,m} < M_{Rd,s}$ mjerodavna je manja vrijednost tj. otpornost zida.

3.2.3 Proračun za djelovanje posmične sile - slom klizanjem

Proračunska je otpornost:

$$V_{Rd,mc} = V_{Rd,m} + V_{Rd,c} \quad (27)$$

gdje je:

$$V_{Rd,m} = V_{Rd} \text{ proračunska posmična otpornost zida, } V_{Rd} = f_{vd} t l_c$$

$$V_{Rd,c} \text{ proračunska posmična otpornost dvaju vertikalnih serklaža.}$$

$$V_{Rd,m} = f_{vd} t l_0 = [(f_{vk0} + 0,4 \sigma_d) / \gamma_M] t l_0 \text{ (kN)} \quad (28)$$

Primjer: Za zid od porastoga betona s $f_b = 4 \text{ N/mm}^2$, sa $f_{vk0} = 0,3 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_d = 0,2 \text{ N/mm}^2$, debljine $t = 300 \text{ mm}$ i duljine $l_0 = 4000 \text{ mm}$ te $\gamma_M = 1,5$ dobiva se

$$V_{Rd,m} = [(0,3 + 0,4 \cdot 0,2) / 1,5] \cdot 300 \cdot 4000 = 304 \text{ kN}$$

Prema točki 6.2.2 norme HRN EN 1992-1-1 [3] $V_{Rd,c}$ proračunava se iz izraza

$$V_{Rd,c} = 2 A_c (v_{\min} + k_1 \sigma_{cp}) \quad (29)$$

gdje je:

A_c ploština poprečnog presjeka jednog vertikalnog serklaža

$$v_{\min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

$$k_1 = 0,15$$

$$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$$

$$k = 1 + (200/d)^{0,5} \leq 2,0 \text{ uz } d \text{ u mm } (d = 150 \text{ mm})$$

f_{ck} karakteristična tlačna čvrstoća betona vertikalnog serklaža.

Kako se izraz $k_1 \sigma_{cp}$ u formuli (29) može zanemariti jer je vertikalni serklaž neznatno opterećen vertikalnim opterećenjem pa je $\sigma_{cp} \approx 0$, dobiva se

$$V_{Rd,c} = 2 A_c v_{\min} \quad (30)$$

Vrijednost v_{\min} za beton C20/25 iznosi $v_{\min} = 0,44 \text{ N/mm}^2$ a za beton C25/30 $v_{\min} = 0,49 \text{ N/mm}^2$. Doprinos dvaju vertikalnih serklaža posmičnoj nosivosti iznosi $V_{Rd,c} = 2 \cdot A_c \cdot v_{\min}$ (u N). Za presjek vertikalnog serklaža $\Phi 150 \text{ mm}$ i C25/30 dobiva se $V_{Rd,c} = 17,3 \text{ kN}$. Vertikalni serklaž kružnog presjeka izvodi se u zidu od porastog betona bušenjem zidnih elemenata kao tehnološka inovacija i zamjena za uobičajeni serklaž kvadratnog presjeka.

Tada je ukupna proračunska otpornost

$$V_{Rd,mc} = V_{Rd,m} + V_{Rd,c} = 304 + 17,3 = 321,3 \text{ kN.}$$

Lako je zaključiti da doprinos vertikalnih serklaža nosivosti nije značajan. Zaključak vrijedi ako je $l_c = l_0$.

3.2.4 Proračun za djelovanje posmične sile - slom po kosoj pukotini

Proračunska otpornost je

$$V_{Rd,m,x} = A_w \tau_{Rd} \quad (31)$$

$$\tau_{Rd} = \frac{f_{tk}}{1,5 \gamma_M} [1 + (\sigma_0 \cdot \gamma_M / f_{tk})]^{0,5} \quad (32)$$

gdje je:

A_w ploština poprečnog presjeka zida ($A_w = t \cdot l_0$)

$\sigma_0 = N_d / A_w$ normalno naprezanje zida za izvanrednu proračunsku situaciju

$f_{tk} = f_{tk} / \gamma_M$ proračunska vlačna čvrstoća zida

$\gamma_M = 1,5$ parcijalni koeficijent za materijal.

Primjer: Za $f_{tk} = 0,15 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_0 = 0,2 \text{ N/mm}^2$ i $\gamma_M = 1,5$ dobiva se iz formule (32) $\tau_{Rd} = 0,12 \text{ N/mm}^2$. Kako je $A_w = 300 \cdot 4000 = 1200000 \text{ mm}^2$ dobiva se $V_{Rd,m,x} = 1200000 \cdot 0,12 = 144 \text{ kN}$

S obzirom na to da je $V_{Rd,m,x} < V_{Rd,mc}$, (vidi t. 3.2.3) tj. $144 \text{ kN} < 321,3 \text{ kN}$ slom će nastupiti po kosoj pukotini.

3.3 Dokaz mehaničke otpornosti i stabilnosti

3.3.1 Pojedini nosivi element

Za svaki pojedini nosivi element (zid) dokazuje se zadovoljenje uvjeta

$$S_d \leq R_d \quad (33)$$

tj. da je djelovanje manje od otpornosti za odabranu proračunsku situaciju (u ovom slučaju za izvanrednu situaciju - djelovanje potresa).

3.3.2 Zgrada kao cjelina

Za zgradu kao cjelinu dokazuje se zadovoljenje zahtjeva za statičkom ravnotežom promatrajući zgradu kao kruto tijelo izloženo djelovanju vertikalnih i horizontalnih sila. Mora se zadovoljiti zahtjev iz točke 6.4.2 norme HRN EN 1990+A1 [1] koji obuhvaća kontrolu stabilnosti na prevrtanje i na klizanje:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab} \quad (34)$$

gdje je:

$E_{d,dst}$ proračunska vrijednost učinka destabilizirajućih djelovanja

$E_{d,stab}$ proračunska vrijednost učinka stabilizirajućih djelovanja.

LITERATURA

- [1] HRN EN 1990+A1, Eurokod – Osnove projektiranja konstrukcija
- [2] HRN EN 1991-1-1, Eurokod 1 - Djelovanja na konstrukcije - dio 1-1: Opća djelovanja – Obujamske mase, vlastita težina i uporabna opterećenja zgrada
- [3] HRN EN 1992-1-1, Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija - dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade
- [4] HRN EN 1996-1-1, Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija - dio 1-1: Opća pravila za armirane i nearmirane zidane konstrukcije
- [5] HRN EN 1997-1, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila
- [6] HRN EN 1998-1, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade
- [7] Sorić, Z.: *Nosivost nearmiranoga zida, Razlike proračuna prema ENV i EN*, Dani ovlaštenih inženjera građevinarstva, Opatija, lipanj 2010.
- [8] Tomažević, M.; Gams, M.: *Obnašanje YTONG hiš pri potresni optežbi: Modelne preiskave na potresni mizi*, Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG), Ljubljana, siječanj 2010., P 0891/08-650-1
- [9] Tomažević, M.: *Potresno odporne zidane stavbe, Tehnis*, Ljubljana, 2009., ISBN 978-961-92780-0-0
- [10] Trogrlić, B.; Mihanović, A.: *Projektiranje zidanih konstrukcija prema EN*; Dani ovlaštenih inženjera građevinarstva, Opatija, lipanj 2010.
- [11] Zamolo, M.: *Usporedba ispunjenja bitnih zahtjeva za građevinu za zidane zgrade od opeke i porastoga betona*; Dani ovlaštenih inženjera građevinarstva, Opatija, lipanj 2010.

4 Zaključak

Primjenom proračunskih postupaka prikazanih u članku može se dokazati da je zgrade izvedene od zidnih elemenata od porastoga betona moguće graditi u svim potresnim područjima Hrvatske pri čemu se valja pridržavati odredaba citiranih europskih norma a treba rabiti i rezultate ispitivanja provedenih na modelima na potresnoj platformi. Moguća katnost zgrada smanjuje se s povećanjem seizmičnosti što je prirodno i ne treba biti prepreka primjeni sustava građenja zidanih konstrukcija od porastoga betona. Posljedica ukupne manje mase zgrade od porastoga betona u odnosu na masu zgrade izvedene od drugih zidnih elemenata jest manja ukupna potresna sila. To zgradu izvedenu od porastoga betona čini jednakovrijednom u pogledu potresne otpornosti sa zgradama izvedenim od drugih zidnih elemenata.