Povezivanje u spoju mortom u ziđu od opečnih blokova

Penava, Davorin; Sigmund, Vladimir; Kožar, Ivica; Anić, Filip; Trajber, Domagoj; Vig, Mirko

Source / Izvornik: **Građevinar, 2016, 68, 609 - 616**

Journal article, Published version
Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

https://doi.org/10.14256/JCE.1576.2016

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:016694

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Primljen / Received: 23.1.2016.
Ispravljen / Corrected: 14.7.2016.
Prihvaćen / Accepted: 23.8.2016.
Dostupno online / Available online: 10.9.2016.

Povezivanje u spoju mortom u zidu od opečnih blokova

Autori:



[1] Doc.dr.sc. Davorin Penava
davorin.penava@gfos.hr



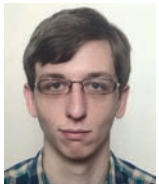
[1] Prof.dr.sc. Vladimir Sigmund



[2] Prof.dr.sc. Ivica Kožar
ivica.kozar@uniri.hr



[1] Filip Anić, mag.ing.aedif.
filip.anic@gfos.hr



[1] Domagoj Trajber, mag.ing.aedif.
domagoj.trajber@gfos.hr



[1] Mirko Vig, mag.ing.aedif.
mirko.vig@gfos.hr

[1] Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek

[2] Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet

Izvorni znanstveni rad

Davorin Penava, Vladimir Sigmund, Ivica Kožar, Filip Anić, Domagoj Trajber, Mirko Vig

Povezivanje u spoju mortom u zidu od opečnih blokova

Ako se pri izvedbi konstrukcijskog zida upotrebljevaju opečni zidni elementi s vertikalnim šupljinama i mort opće namjene, tijekom ispunjavanja sljubnica nastupa prodiranje morta u šupljine zidnog elementa. Otpornost pri posmiku određuje se na jednak način za zide od punih ili šupljih opečnih zidnih elemenata te stoga utjecaj međusobnog spoja zidnih elemenata i sljubnica morta nije uzet u obzir. Pomoću prostornih nelinearnih proračunskih modela i usporedbom s odzivom fizikalnih modela provjeren je utjecaj međusobnog spoja šupljih zidnih elemenata i sljubnica morta na posmičnu nosivost.

Ključne riječi:
šuplji opečni zidni elementi, posmična čvrstoća zida, nelinearni proračunski model, funkcija otpornosti pri posmiku

Original scientific paper

Davorin Penava, Vladimir Sigmund, Ivica Kožar, Filip Anić, Domagoj Trajber, Mirko Vig

Clay block masonry and mortar joint interlocking

If clay blocks with vertical voids and general-purpose mortar are used in masonry construction, interlocking will occur during placement of units and mortar. Shear strength of the clay block and solid brick masonry is usually determined in the same way, without taking interlocking into consideration. With interlocking, the tensile strength of clay blocks is reached before mortar bed joint sliding occurs. In order to consider the effect of interlocking in nonlinear analyses, three-dimensional design models were built and verified using physical model response. The shear resistance function was adopted to enable proper description of masonry response.

Ključne riječi:
clay block masonry, masonry shear strength, nonlinear design model, shear resistance function

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Davorin Penava, Vladimir Sigmund, Ivica Kožar, Filip Anić, Domagoj Trajber, Mirko Vig

Blockziegelmauerwerk und Verbund an der Mörtelfuge

Wenn für tragendes Mauerwerk Blockziegel und Allzweckmörtel verwendet werden, kommt es bei der Ausführung zur Verknüpfung von Ziegelsteinen und Mörtel. Der Schubwiderstand wird normalerweise gleicherweise für Mauerwerk aus Hohlziegel und für Vollsteinmauerwerk ermittelt, so dass Einflüsse der gegenseitigen Verbindung nicht berücksichtigt werden. Aufgrund der Verknüpfung wird der Zugwiderstand der Blockziegel erreicht, bevor der Schubwiderstand der Mörtelfuge ausgeschöpft ist. Um den Effekt der Wechselwirkung in nichtlinearen Analysen zu berücksichtigen, wurden dreidimensionale Berechnungsmodelle aufgestellt und aufgrund physischen Modellverhaltens verifiziert. Die Schubwiderstandsfunktion wurde eingeführt, um das Verhalten des Mauerwerks auf geeignete Weise darzustellen.

Ključne riječi:
Wandelement aus Hohlziegel, Schubwiderstand von Mauerwerk, nichtlineares Berechnungsmodell, Widerstandsfunktion bei Schubeinwirkungen

1. Uvod

Ako se pri izvedbi konstrukcijskog zida upotrebljavaju opečni zidni elementi s vertikalnim šupljinama (slika 1.) i mort opće namjene, tijekom ispunjavanja sljubnica nastupa prodiranje morta u šupljine zidnog elementa. Pri projektiranju konstrukcijskog zida u skladu s odredbama EN1996-1-1 i EN1998-1 normi [1-3], proračunska posmična čvrstoća određuje se pod pretpostavkom jednakog zidnog veza po horizontalnim sljubnicama morta, za šuplje i pune opečne zidne elemente, tj. prema izrazu $f_v = f_{v0} + \mu \cdot f_p$, gdje je f_{v0} početna posmična čvrstoća pri nultom tlačnom naprezanju, μ koeficijent unutarnjeg trenja i f_p tlačno naprezanje. Pri tome utjecaj međusobnog spoja zidnih elemenata i sljubnica morta s prodiranjem morta u šupljine zidnog elementa nije uzet u obzir. Dodatno, postavljeni uvjet granične vrijednosti posmične čvrstoće jednak je vlačnoj čvrstoći zidnog elementa u smjeru okomito na naliježuću površinu tj. $f_{vlt} = f_{mu,t,h} = 0{,}065 \cdot f_{mu,c,h,}$ gdje je $f_{mu,c,h}$ pripadna srednja tlačna čvrstoća zidnih elemenata. Fizikalna svojstva šupljih opečnih zidnih elemenata usporedno s naliježućom površinom ne razmatraju se, osim ako je uvjet $f_{mu,c,b,min} = 2$ N/mm^2 u skladu s odredbom norme EN 1998-1 [2]. U radu je prikazano istraživanje utjecaja međusobnog spoja šupljih opečnih zidnih elemenata i reški morta na posmičnu čvrstoću zida. Provedeno je eksperimentalno određivanje posmične čvrstoće zida u smjeru horizontalnih sljubnica, gdje je prisutno prodiranje morta, i vertikalnih sljubnica, gdje prodiranje morta nije bilo prisutno. Fizikalna svojstva šupljeg opečnog zidnog elementa, okomito i usporedno s naliježućom površinom, određena su u skladu s normama [5, 6]. Uzorci zida za određivanje posmične čvrstoće izvedeni su u skladu s normom [7]. Eksperimentalno određena svojstva zidnih elemenata i međusobnog spoja zidnih elemenata i sljubnica morta upotrijebljeni su pri izvedbi prostornih nelinearnih proračunskih modela u računalnom programu [8], kako bi se na prikladan način opisao odziv zida u nelinearnom području.

Utvrđeno je kako je otpornost pri posmiku zida od šupljih opečnih zidnih elemenata s vertikalnim šupljinama i morta opće namjene jednaka vlačnoj čvrstoći zidnih elemenata usporedno s naliježućom površinom odnosno horizontalnim sljubnicama morta, tj. $f_{vlt} = f_{mu,t,b} = 0{,}065 \cdot f_{mu,c,b}$, gdje je $f_{mu,c,b}$ pripadna srednja tlačna čvrstoća zidnih elemenata usporedno s horizontalnim sljubnicama morta. Utjecaj međusobnog spoja zidnih elemenata i morta s prodiranjem morta u šupljine zidnog elementa, u nelinearnim proračunima uspješno je opisan primjenom funkcije otpornosti pri posmiku.



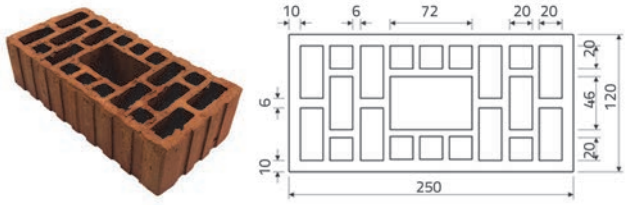
Slika 1. Izvedba šupljeg opečnog ispunskog zida [4]

Tablica 1. Srednje vrijednosti fizikalnih svojstava zidnog elementa okomito i usporedno sa smjerom šupljina

Opis	Simbol	Vrijednost	Jedinica
Tlačna čvrstoća usporedno sa smjerom šupljina	$f_{mu,c,h}$	14,79	N/mm^2
Tlačna čvrstoća okomito na smjer šupljina	$f_{mu,c,b}$	3,49	N/mm^2
Vlačna čvrstoća usporedno sa smjerom šupljina	$f_{mu,t,h}$	$0{,}065 \cdot f_{mu,c,h}$	N/mm^2
Vlačna čvrstoća okomito na smjer šupljina	$f_{mu,t,b}$	$0{,}065 \cdot f_{mu,c,b}$	N/mm^2
Modul elastičnosti usporedno sa smjerom šupljina	$E_{mu,t,h}$	4002	N/mm^2
Modul elastičnosti okomito na smjer šupljina	$E_{mu,t,b}$	949	N/mm^2
Krajnja deformacija usporedno sa smjerom šupljina	$\varepsilon_{mu,t,h}$	3,70	‰
Krajnja deformacija okomito na smjer šupljina	$\varepsilon_{mu,t,b}$	3,64	‰
Poissonov omjer usporedno sa smjerom šupljina	$\upsilon_{mu,c,h}$	0,10	-
Poissonov omjer okomito na smjer šupljina	$\upsilon_{mu,c,b}$	$\upsilon_{mu,c,h} \cdot E_{mu,t,b} / E_{mu,t,h}$	-
Neto gustoća	ρ_{nu}	0.760	g/mm^3

2. Šuplji opečni zidni elementi

Upotrebljeni opečni zidni elementi s vertikalnim šupljinama imali su duljinu l_{mu} = 250 mm, širinu w_{mu} = 120 mm i visinu h_{mu} = 65 mm (slika 2.), a te su dimenzije utvrđene prema normama [5, 9].



Slika 2. Upotrebljeni zidni elementi (dimenzije u mm)

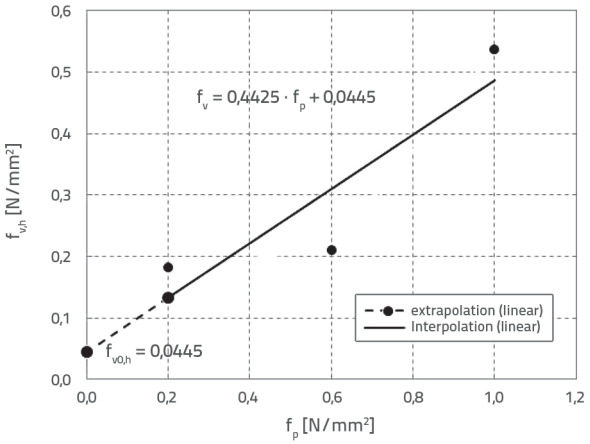
Utvrđeni volumen svih šupljina u odnosu na ukupni volumen zidnog elementa iznosio je $V_{vu}/V_{gu} \cdot 100 = 68$ %, kako je propisano u normi [10].
Fizikalna svojstva zidnog elementa, okomito i usporedno s naliježućom površinom, određena su prema normama [5, 6], a prikazana su u tablici 1. U skladu s odredbom norme EN 1998-1 [2] razmatrane su isključivo srednje vrijednosti.

3. Eksperimentalno određivanje posmične čvrstoće

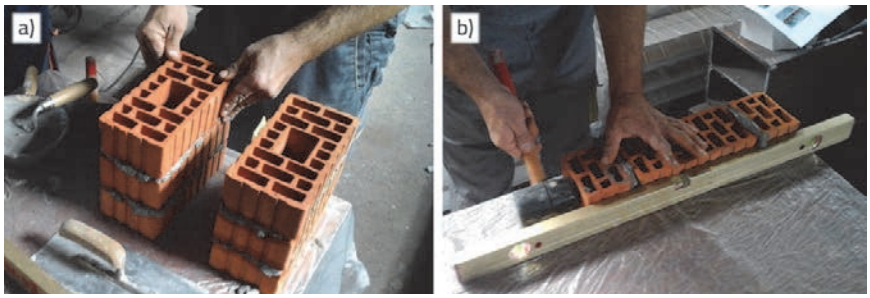
Eksperimentalno određivanje posmične čvrstoće ziđa provedeno je za smjerove horizontalnih i vertikalnih sljubnica u skladu s normamam [1, 7]. Pri izvedbi uzoraka ziđa upotrebljeni su šuplji opečni zidni elementi i mort opće namjene s udjelom cementa, građevnog vapna i pijeska 1:1:5. Razred čvrstoće morta utvrđen prema normi [11] iznosio je M5, što je najmanja preporučena vrijednost čvrstoće u skladu s odredbom norme EN 1998-1 [2]. Tijekom ispunjavanja horizontalnih sljubnica mortom nastalo je prodiranje morta u šupljine zidnog elementa (slika 3.a), dok pri ispunjavanju vertikalnih sljubnica to nije bilo moguće (slika 3.b).

3.1. Zidni vez bez prodiranja morta

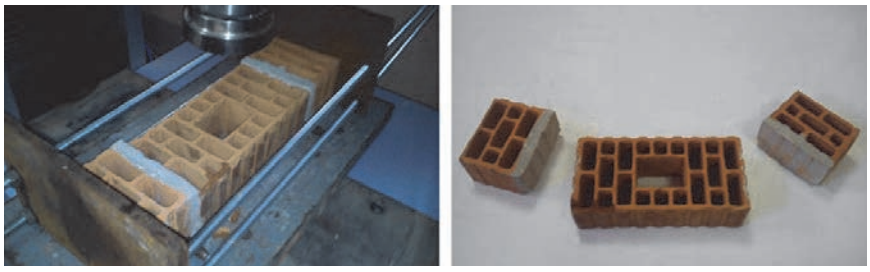
Eksperimentalna ispitivanja u smjeru vertikalnih sljubnica provedena su pri tlačnim naprezanjima f_p = 0,2, 0,6 i 1,0 N/mm². Tijekom ispitivanja nastupio je posmični slom klizanjem po vertikalnim sljubnicama (slika 4.). Iz dijagrama odnosa tlačnog naprezanja i posmične čvrstoće (slika 5.), utvrđena je srednja početna posmična čvrstoća ziđa $f_{v0,h}$ = 0.05 N/mm² i koeficijent unutarnjeg trenja μ_h = 0.45.



Slika 5. Dijagram odnosa tlačnog naprezanja i posmične čvrstoće ziđa za smjer vertiklanih sljubnica



Slika 3. Izvedba uzoraka ziđa u svrhu određivanje posmične čvrstoće u smjeru: a) horizontalnih i b) vertikalnih sljubnica



Slika 4. Posmični slom klizanjem po vertiklanim sljubnicama morta

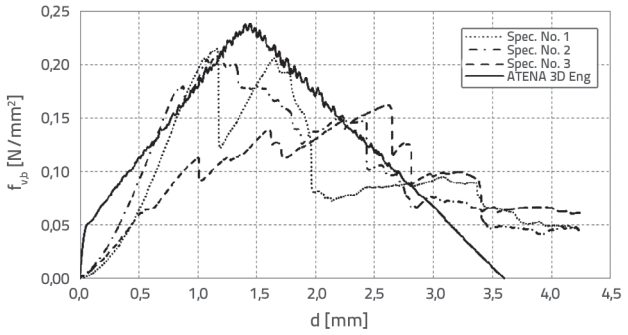
3.2. Zidni vez s prodiranjem morta

Eksperimentalno određivanje posmične čvrstoće ziđa u smjeru horizontalnih sljubnica provedeno je bez tlačnog naprezanja, tj. sa f_p = 0, radi usporedbe sa srednjom vrijednosti početne posmične čvrstoće određene za smjer vertikalnih sljubnica. Tijekom ispitivanja je vlačna čvrstoća zidnog elementa $f_{mu,t,b}$ dostignuta prije nego posmična čvrstoća na klizanje po horizontalnoj sljubnici morta $f_{v0,b}$ (slika 6.).
Vrijednost pripadnog posmičnog naprezanja iznosila je $f_{v,b}$ = 0.22 N/mm² (slika 7.) i odgovarala je vrijednosti dobivenoj izrazom $f_{vlt} = f_{mu,t,b} = 0{,}065 \cdot f_{mu,c,b}$, gdje je $f_{mu,c,b}$ srednja vrijednost tlačne čvrstoće zidnog elementa okomito na smjer

šupljina, odnosno usporedno s horizontalnim sljubnicama morta (tablica 1.).



Slika 6. Vlačni slom zidnog elementa pri posmiku kao posljedica prodiranja morta u šupljine



Slika 7. Dijagram odnosa pomaka i posmične čvrstoće zida za smjer horizontalnih sljubnica

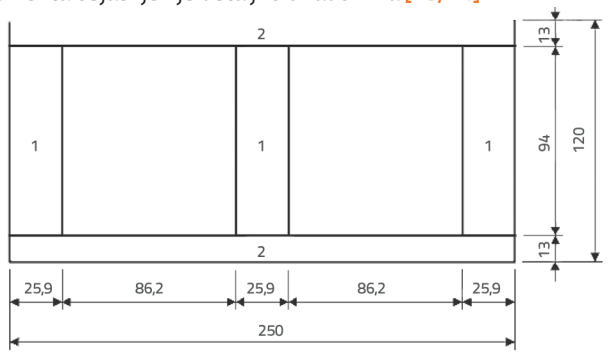
4. Prostorni nelinearni proračunski model

Kako bi se utjecaj međusobnog spoja šupljih zidnih elemenata i horizontalnih sljubnica morta prikazao matematičkim putem, upotrebljeni su nelinearni proračunski modeli u računalnom programu ATENA 3D Eng [8]. Modeli su izvedeni na način kako bi u što većoj mjeri odgovarali fizikalnim modelima.

4.1. Model šupljeg opečnog zidnog elementa

Šuplji opečni zidni elementi, zbog različitih fizikalnih svojstava okomito i usporedno sa smjerom šupljina (tablica 1.), modelirani su kao spregnuti element od dva materijala kao što je prikazano na slici 8.

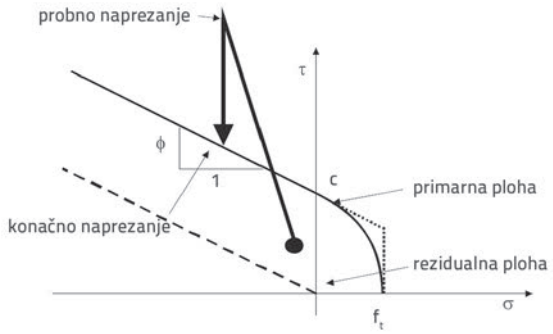
Prema autorima [12], usvojen je CC3DNonLinCementitious2 model ponašanja materijala čija su svojstva navedena u tablici 2. i CCIsoBrick konačni elementi. Modelom je moguće opisati nelinearno ponašanje materijala pri vlačnim (raspucavanje) i tlačnim naprezanjima (plastičnost). Način modeliranja zidnog elementa objašnjen je detaljno u radovima [13, 14].



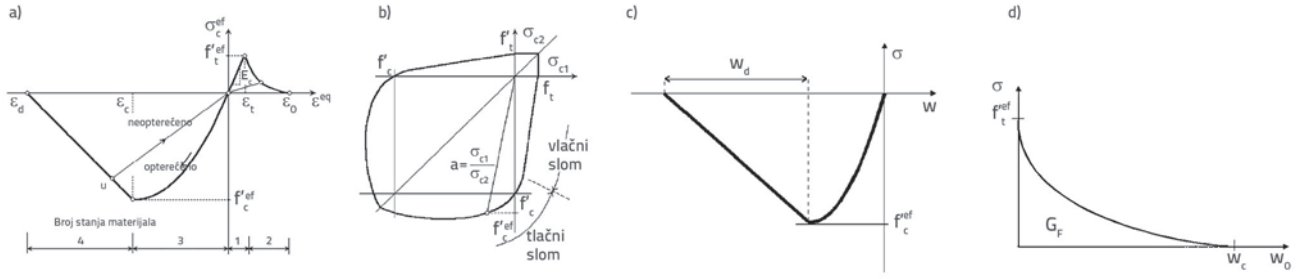
Slika 8. Proračunski model šupljeg opečnog zidnog elementa

4.2. Model zidnog veza

Za vertikalne i horizontalne sljubnice morta odabran je model ponašanja materijala Interface Material Model i CCIsoGap konačni elementi nulte debljine [12]. Osnova odabranog modela ponašanja materijala je Mohr-Coulombova teorija čvrstoće s naglim prekidom pri vlaku (slika 10.).



Slika 10. Model ponašanja materijala međusobnog spoja zidnih elemenata i sljubnica morta



Slika 9. Slika 9. CC3DNonLinCementitious2 model ponašanja materijala: a) odnos naprezanja i deformacija pri jednoosnim tlaku i vlaku; b) dvoosna funkcija sloma; c) omekšavanje betona pri tlaku u ovisnosti o pomaku; d) eksponencijalna funckija otvaranja pukotine

Tablica 2. Fizikalna svojstva zidnog elementa u okviru modela ponašanja materijala CC3DNonLinCementitious2

Opis	Simbol	Materijal 1	Materijal 2	Jedinica
Modul elastičnosti	E	12469,25	4428,08	N/mm^2
Poissonov omjer	μ	0,100	0,035	-
Vlačna čvrstoća	f_t	3,00	1,05	N/mm^2
Tlačna čvrstoća	f_c	-46,21	-16,10	N/mm^2
Energija loma	G_F	$7{,}509 \cdot 10^{-2}$	$2{,}616 \cdot 10^{-2}$	N/mm
Kritični pomak pri tlaku	w_d	-0,01	-0,5	mm
Plastična deformacija pri dostizanju tlačne čvrstoće	ε_{cp}	$-1{,}00 \cdot 10^{-8}$	$-1{,}00 \cdot 10^{-8}$	-
Umanjenje tlačne čvrstoće zbog postojanja pukotina	$r_{c,lim}$	0,80	0,80	-
Crack shear stiff. factor	s_F	20	20	-
Ekscentricitet slomne plohe	-	0,520	0,520	-
Množilac za usmjeravanje plastičnog toka	β	0,00	0,00	-
Jedinična težina materijala	ρ	$0{,}0239 \cdot 10^{-3}$	$0{,}0239 \cdot 10^{-3}$	N/mm^3
Koeficijent toplinskog produljenja	α	$1{,}20 \cdot 10^{-5}$	$1{,}20 \cdot 10^{-5}$	1/C
Koeficijent modela s nepomičnim pukotinama	-	0	0	-

Tablica 3. Fizikalna svojstva sljubnica morta u okviru Interface Material Model

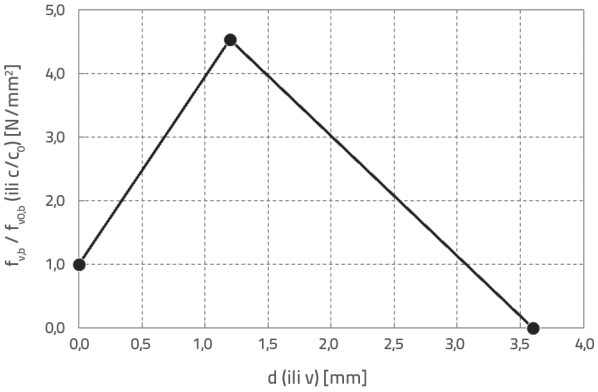
Opis	Simbol	Materijal 1	Materijal 2	Jedinica
Normalna krutost	K_{nn}	1249,16	442,52	N/mm^3
Tangencijalna krutost	K_{tt}	567,80	213,69	N/mm^3
Vlačna čvrstoća	f_t	0,17	0,17	N/mm^2
Kohezija	c	0,10	0,10	N/mm^2
Koeficijent trenja	-	0,44	0,44	-
Najmanja vrijednost normalne krutosti u numeričke svrhe	$K_{nn,min}$	1,25	0,44	N/mm^3
Najmanja vrijednost tangencijalne krutosti u numeričke svrhe	$K_{tt,min}$	0,57	0,21	N/mm^3

Za fizikalna svojstva modela vertikalnih i horizontalnih sljubnica morta odabrana su svojstva vertikalnih sljubnica, tj. $f_{v0,b} = f_{v0,h}$ i $\mu_b = \mu_h$. Vlačna čvrstoća $f_{t,b} = f_{t,h} = 0{,}08$ N/mm^2 usvojena je iz [15]. Vrijednost je trebalo prilagoditi neto površini modelskog zidnog elementa, jer su vrijednosti dobivene eksperimentima izražene kao bruto vrijednosti, kao što je prikazano u tablici 3. i opisano u [13, 14]. Kako bi se u obzir uzelo prodiranja morta u šupljine zidnog elementa, modelskoj vertikalnoj sljubnici pridodana je funkcija otpornosti pri posmiku (slika 11.).

Funkcija je osmišljena na osnovi opažanja pri eksperimentalnom određivanju posmične čvrstoće u smjeru horizontalnih sljubnica (slika 7.).

Funkcija, s pomakom d / mm na apscisi i posmičnom čvrstoćom f_v / N/mm^2 na ordinati (v i c/c_0 u računalnom programu ATENA 3D Eng), sastoji se od tri glavne točke, a to su:

- prva točka $f_v = f_{v0,b} / f_{v0,b} = 1$ i $d_1 = 0$,
- druga točka $f_v = f_{mu,t,b} / f_{v0,b} = 4{,}54$ i $d_2 = 1{,}2$ mm,
- treća točka $f_v = 0 / f_{v0,b} = 0$ i $d = 3 \cdot d_2 = 3{,}6$ mm.



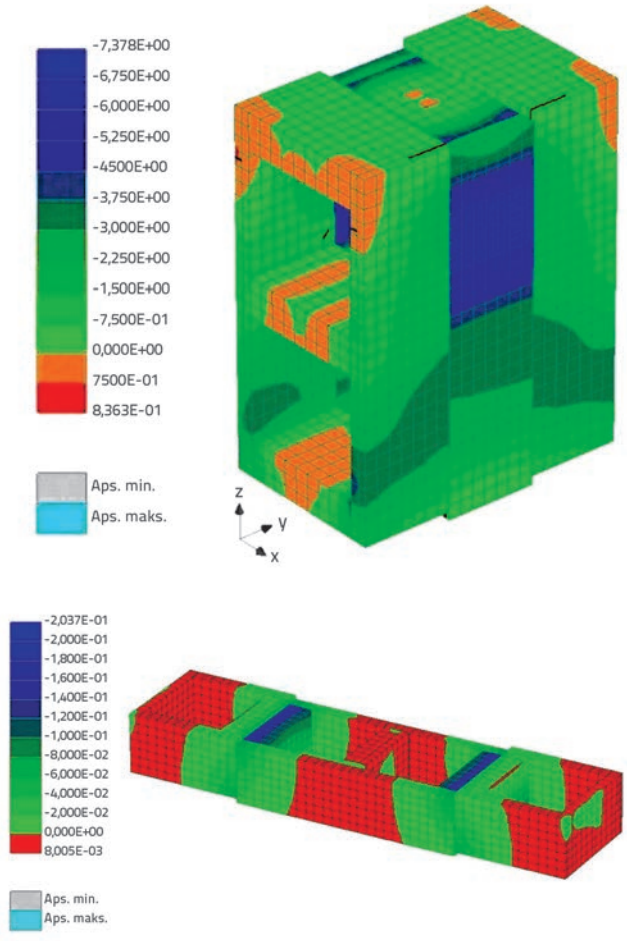
Slika 11. Funkcija otpornosti pri posmiku

Normalna K_{nn} i tangencijalna krutost K_{tt} modelskih sljubnica morta (tablica 3.) određene su prema radovima [12-14], gdje je t = 10 mm.

4.3. Provjera točnosti proračunskog modela

Osjetljivost proračunskog modela na gustoću mreže konačnih elemenata provjerena je odabirom veličine konačnog elementa od 10, 20 i 30 mm te usporedbom proračunskog i eksperimentalnog odziva (tablice 4. i 5.).

Na slici 7. prikazan je odziv proračunskog modela u smjeru horizontalnih sljubnica morta usporedno s prikazom eksperimentalnog odziva. Na slici 12. prikazana su normalna naprezanja proračunskog modela u smjeru usporedno sa smjerom opterećivanja u predslomnom stanju za odabranu veličinu konačnog elementa 10 mm i korak opterećivanja 0,01 mm. Za slučaj opterećivanja u smjeru horizontalnih sljubnica morta (slika 12.), vlačna naprezanja usporedno sa smjerom opterećivanja u zidnom elementu iznosila su 0,75 N/mm^2. Za slučaj opterećivanja u smjeru vertikalnih sljubnica, vlačna naprezanja iznosila su 0,008 N/mm^2.



Slika 12. Normalna naprezanja u šupljem opečnom zidnom elementu za smjer opterećivanja usporedno s horizontalnim (gore) i vertikalnim sljubnicama morta (dolje), dimenzije u N/mm^2

Tablica 4. Razlika u odzivu proračunskog i eksperimentalnog odziva za smjer vertikalnih sljubnica morta

Korak opterećivanja [mm]	Veličina konačnog elementa [mm]	f_{v0} [N/mm^2]	Razlika [%]
0,01	10	0,056	10,7
	20	0,054	7,4
	30	0,057	12,3
0,02	10	0,069	27,5
	20	0,064	21,9
	30	0,063	20,6

Tablica 5. Razlika u odzivu proračunskog i eksperimentalnog odziva za smjer horizontalnih sljubnica morta

Korak opterećivanja [mm]	Veličina konačnog elementa [mm]	f_{v0} [N/mm^2]	Razlika [%]
0,01	10	0,239	7,9
	20	0,242	9,1
	30	0,241	8,7
0,02	10	0,243	9,5
	20	0,244	9,8
	30	0,242	9,1

5. Obrazloženje rezultata

U svrhu određivanja ovisnosti posmične čvrstoće f_v šupljeg opečnog zida o međusobnom spoju sa sljubnicama morta, pripremljeni su ispitni uzorci u skladu s normom [7]. Eksperimentalna ispitivanja provedena su posebno za smjer vertikalnih i horizontalnih sljubnica morta, pri čemu je uočen utjecaj međusobnog spoja zidnih elemenata i potpuno ispunjenih sljubnica morta za smjer horizontalnih sljubnica. Nakon što su određena najvažnija svojstva fizičkog modela, primijenjeni su proračunski modeli kako bi se pri nelinearnom proračunu na prikladan način u obzir uzeo utjecaj međusobnog spoja šupljih opečnih zidnih elemenata i sljubnica morta.

Pri eksperimentalnim ispitivanjima u smjeru vertikalnih sljubnica morta, tj. kad su tri različite vrijednosti tlačnih naprezanja f_p = 0,2, 0,6 i 1,0 N/mm^2, određeni su početna posmična čvrstoća $f_{v0,h}$ = 0.05 N/ mm^2 i kut unutarnjeg trenja μ_h = 0,45. To je bilo moguće zato jer je slom ispitnih uzoraka nastupio klizanjem po vertikalnim sljubnicama morta, tj. nije bilo utjecaja prodiranja morta u šupljine zidnog elementa, što odgovara slučaju kada su zidni elementi pune opeke. U tom slučaju izraz za posmičnu čvrstoću ostaje $f_v = f_{v0} + \mu \cdot f_p$ prema [1]. U drugom slučaju, kada su eksperimentalna ispitivanja provedena za smjer horizontalnih

sljubnica morta, nastupio je vlačni slom zidnog elementa umjesto sloma klizanjem po sljubnicama morta, što ne bi bilo moguće da su zidni elementi pune opeke. Opisani način sloma smatra se neprihvatljivim prema odredbama u [7] i treba se zanemariti. U skladu s normom [1], nastali način sloma smatra se graničnom vrijednošću posmične čvrstoće $f_v = f_{vlt}$ koja se određuje izrazom $f_{vlt} = 0{,}065 \cdot f_{mu,c,h}$, gdje je $f_{mu,c,h}$ tlačna čvrstoća zidnog elementa u smjeru okomito na naliježuću površinu. Ipak, u primjeni navedenih izraza postoje oprečnosti:

- Izraz za graničnu vrijednost posmične čvrstoće primjenjuje se samo ako vrijednost dobivena izrazom $f_v = f_{v0} + \mu \cdot f_p$ prelazi graničnu vrijednost, a ne kao jedina mogućnost zbog utjecaja međusobnog spoja šupljih opečnih zidnih elemenata i sljubnica morta (slike 6. i 7.).
- Vlačna, a također i tlačna čvrstoća šupljeg opečnog zidnog elementa, okomito su i usporedno s naliježućom površinom različite (tablica 1.) zbog prisutnosti šupljina (68 % od ukupnog volumena za prikazani slučaj).
- Otkriveno je kako vrijednost dobivena izrazom $f_{mu,t,b} = 0{,}065 \cdot f_{mu,c,b}$, gdje je $f_{mu,c,b}$ tlačna čvrstoća zidnog elementa u smjeru usporedno s naliježućom površinom, odgovara graničnoj vrijednosti posmične čvrstoće (vlačnoj čvrstoći šupljih opečnih zidnih elemenata u smjeru usporedno s naliježućom površinom).

U primjeni proračunskih modela za simulaciju eksperimentalnih ispitivanja, šuplji opečni zidni elementi modelirani su na način kako bi bila uključena njihova fizikalna svojstva usporedno i okomito na naliježuću površinu (tablica 1.). Postupak modeliranja šupljih opečnih zidnih elemenata detaljno je objašnjen u [13, 14] te je stoga izuzet iz ovog rada. Dodatno, trebalo je razviti i u model ponašanja materijala uključiti funkciju otpornosti pri posmiku (slika 11.) kako bi se u obzir uzeo utjecaj međusobnog spoja zidnih elemenata i horizontalnih sljubnica morta. To je zato jer se model ponašanja materijala koji predstavlja sljubnice morta zasniva na Mohr - Coulombovoj teoriji čvrstoće te je pretpostavljano da je $f_{v0,b} = f_{v0,h}$, $\mu_b = \mu_h$ i $f_{t,b} = f_{t,h}$. Uključivanje funkcije otpornosti pri posmiku kao dodatak početnoj posmičnoj čvrstoći omogućilo je točnost rezultata proračunskog modela s razlikom od 7,9 % u odnosu na eksperimentalno dobivenu vrijednost. To je postignuto pri odabiru veličine konačnog elementa od 10 mm i koraka opterećivanja od 0,01 mm, što se može vidjeti iz tablica 4. i 5. Normalna naprezanja modelskih šupljih opečnih zidnih elemenata u predslomnom stanju, prikazana na slici 12., upućuju na pojavu vlačnih naprezanja u iznosu do 0,75 N/mm^2, što je više od vlačne čvrstoće zidnih elemenata za promatrani smjer, a koja iznosi $f_{mu,t,b} = 0{,}23$ N/mm^2. To je uzrokovalo pojavu pukotina, drukčiju nego na fizikalnom modelu. Razlike su nastale uslijed pojednostavljenja modelskog spram fizikalnog zidnog elementa te zbog odabranog modela ponašanja materijala (pukotine su vidljive, ali se materijal neće razdvojiti i gubi početna svojstva). Vlačna čvrstoća u šupljim opečnim zidnim elementima za slučaj proračuna modela u smjeru vertikalnih reški morta bila je zanemariva. Proračunom je uspješno simuliran način sloma te odziv modela s razlikom u odzivu spram fizikalnog modela od 10,7 % (pri odabiru veličine konačnog elementa od 10 mm i koraka opterećivanja od 0,01 mm). U skladu s odredbom norme EN1998-1 [2] u obzir su uzete samo srednje vrijednosti fizikalnih svojstava.

6. Zaključak

Ako se pri izvedbi konstrukcijskog ziđa upotrebljavaju opečni zidni elementi s vertikalnim šupljinama i mort opće namjene, tijekom ispunjavanja horizontalnih sljubnica nastupa prodiranje morta u šupljine zidnog elementa. Pri projektiranju knstrukcijskog ziđa u skladu s odredbama normi EN1996-1-1 i EN1998-1, proračunska posmična čvrstoća određuje se pod pretpostavkom jednakog zidnog veza po horizontalnim sljubnicama morta, za šuplje i pune opečne zidne elemente. Prema dobivenim rezultatima istraživanja, slijede ovi zaključci i preporuke:

- Međusobni spoj opečnih zidnih elemenata s vertikalnim šupljinama i horizontalnih sljubnica morta tijekom eksperimentalnog određivanja posmične čvrstoće prouzročio je vlačni slom zidnog elementa, zbog čega se takav način sloma, koji je neizbježan, ne bi trebao smatrati neprihvatljivim kako se navodi u normi [7].
- Šuplji opečni zidni elementi posjeduju fizikalna svojstva znatno različita u smjeru usporedno i okomito na naliježuću površinu te se stoga, a i zbog utjecaja prodiranja morta u šupljine zidnog elementa, ziđe od zidnih elemenata vertikalnim šupljinama ne može razmatrati jednako kao i ziđe od pune opeke pri provjeri potresne otpornosti (također u slučaju ispunskog ziđa može nastati tzv. efekt jastuka zbog slabe horizontalne tlačne čvrstoće zidnih elemenata s vertikalnim šupljinama [16]).
- Posmičnu čvrstoću šupljeg opečnog konstrukcijskog ziđa s posve ispunjenim horizontalnim sljubnicama morta potrebno je uzeti jednako vlačnoj čvrstoći zidnog elementa usporedno s naliježućom površinom $f_v = f_{mu,t,b}$, a koja se može odrediti prema izrazu $f_{mu,t,b} = 0{,}065 \cdot f_{mu,c,b}$, gdje je $f_{mu,c,b}$ tlačna čvrstoća zidnog elementa u smjeru usporedno s naliježućom površinom.

U nelinearnim proračunima primjenom proračunskih mikromodela potrebno je modelu ponašanja materijala za sljubnice morta pridodati funkciju otpornosti pri posmiku. Ipak, kako bi proračunski model bio ispravan, potrebno je predstaviti zidne elemente modelom koji u obzir uzima različita svojstva elementa usporedno i okomito na naliježuću površinu. Funkciju otpornosti pri posmiku, tj. karakteristične točke funckije, potrebno je potvrditi eksperimentalnim ispitivanjima, kako bi se uz vrijednosti čvrstoće utvrdile i vrijednosti pripadnih pomaka.

Zahvala

Prikazani rad dio je istraživanja Hrvatske zaklade za znanost u okviru istraživačkog projekta Uokvireno ziđe - kompozitni nosivi sustav kod armiranobetonskih zgrada te ovim putem iskazujemo zahvalnost na potpori.

LITERATURA

[1] CEN: Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures (EN 1996-1-1:2005), European Committee for Standardization, Brussels, 2005.

[2] CEN: Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings (EN 1998-1:2004), European Committee for Standardization, Brussels, 2004.

[3] Sorić, Z.: Mechanical properties of nonreinforced masonry walls, Građevinar, 52 (2000) 2, pp. 67-78.

[4] Sigmund, V.: FRAmed-MAsonry Composites for Modelling and Standardization [Internet]. 2015 [cited 2015 Jan 13]. Available from: http://framed-masonry.com/

[5] CEN: Specification for masonry units - Part 1: Clay masonry units (EN 771-1:2011), European Committee for Standardization, Brussels, 2011.

[6] CEN: Methods of test for masonry units - Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone) (EN 772-13:2000), European Committee for Standardization, Brussels, 2000.

[7] CEN: Methods of Test for Masonry - Part 3: Determination of Initial Shear Strength (EN 1052-3:2002/A1), European Committee for Standardization, Brussels, 2007.

[8] Cervenka Consulting s.r.o. ATENA for Non-Linear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures. Prague: Červenka Consulting s.r.o.; 2015.

[9] CEN: Methods of test for masonry units - Part 16: Determination of dimensions (EN 772-16:2011), European Committee for Standardization, Brussels, 2011.

[10] CEN: Methods of test for masonry units - Part 3: Determination of net volume and percentage of voids of clay masonry units by hydrostatic weighing (EN 772-3:1998), European Committee for Standardization, Brussels, 1998.

[11] CEN: Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar (EN 1015-11:1999/A1:2006), European Committee for Standardization, Brussels, 2006.

[12] Cervenka, V., Jendele, L., Cervenka, J.: ATENA Program Documentation Part 1 Theory, Cervenka Consulting Ltd., Prague, Czech Republic, 2012.

[13] Penava, D., Sigmund, V., Kožar, I., Anić, F., Trajber, D., Vig, M.: Influence of 2D and 3D Micro Modelling Approach in Seismic Design of Framed-Masonry Structures with Respect to Hollow Clay Masonry Units, 3rd Aachen Conference on Computational Engineering Science (ACCES), Aachen, Germany, 2015.

[14] Penava, D., Sigmund, V., Kožar, I., Anić, F., Trajber, D., Vig, M.: Spatial micro model of the masonry wall, 8th International Congress of Croatian Society of Mechanics, Opatija, Croatia, 2015.

[15] Necevska-Cvetanovska, G., Sendova, V., Apostolska, R.: Frame - Masonry Composites for Modelling and Standardization (Framed-Masonry) Report IZIIS 2015 - 31, Skopje, Macedonia, 2015.

[16] Sigmund, V., Penava, D.: Influence of openings, with and without confinement, on cyclic response of infilled r-c frames - an experimental study, Journal of Earthquake Engineering, 18 (2014) 1, pp. 113-46, http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2013.817362