

MŪRO GAMINIŲ IR GULSČIŲJŲ SIŪLIŲ ĮTEMPIŲ DEFORMACIJŲ BŪVIO YPATUMŲ ANALIZĖ

Robertas Zavalis¹, Bronius Jonaitis²

^{1,2}Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹robertas.zavalis@vgtu.lt; ²bronius.jonaitis@vgtu.lt

Įteikta 2011 05 27; priimta 2011 06 27

Santrauka. Straipsnyje apžvelgiami ir nagrinėjami įvairūs veiksniai, veikiantys mechanines mūro savybes. Nagrinėjamas mūro įtempių deformacijų būvis. Nagrinėjant mūro įtempių deformacijų būvį, mūro gaminių ir gulsčiųjų siūlių skiedinio deformacinės savybės nustatomos bandant kontrolinius mūro gaminių medžiagos ir skiedinio bandinius. Tyrimais nustatyta, kad gulsčiųjų siūlių deformacijas dažniausia lemia skiedinio ir mūro gaminių sąlyčio ruožų deformacijos. Analizuojant mūro įtempių deformacijų būvį tikslinga mechanines mūro gaminių ir skiedinio savybes vertinti atsižvelgiant į jų elgsenos ypatumus mūre. Straipsnyje nagrinėjamas skiedinio, esančio mūre, tamprumo modulio kitimas, lyginant su skiedinio tamprumo moduliu, nustatytu standartiniais bandymais.

Reikšminiai žodžiai: mūras, gulsčiosios siūlės storis, deformacijos, skiedinys, mūro gaminiai, silikatas.

1. Įvadas

Mūras – medžiaga, plačiai naudojama vienaukščių ir daugiaaukščių pastatų laikančiųjų arba pertvarinių konstrukcijų statyboje. Tokį mūro populiarumą lemia jo funkcionalumas, geros šilumos ir garso izoliacinės savybės, galimybė naudoti vietines žaliavas, įrengimo paprastumas, estetinis vaizdas.

Tobulėjant medžiagoms ir technologijai, vietoje įprastų plytų plačiau naudojami nauji mūro gaminiai (įvairūs tuštymėtieji blokėliai, blokai), kurių tūris atitinka kelių sudėtų plytų tūrį. Tai paspartina ir atpigina statybą. Siekiant gerinti mūro gaminių savybes, naudojamos ne tik įvairios medžiagos, bet ir skirtingos konstrukcinės formos. Įvairių autorių tyrimai rodo, kad visa tai veikia mechanines mūro savybes.

Šiame straipsnyje analizuojami pagrindiniai veiksniai, veikiantys mechanines mūro savybes. Nagrinėjamas mūro įtempių deformacijų būvis, kintant deformacinėms mūro gaminių ir skiedinio savybėms. Pastaruoju metu, tiriant mūro veikiamo apkrovos įtempių deformacijų būvį, vis plačiau naudojamas skaitinis modeliavimas. Sudarant skaitinius modelius, mūro gaminių ir skiedinio savybėms aprašyti imamos

charakteristikos, kurios nustatytos bandant kontrolinius bandinius pagal standartais reglamentuotą metodiką. Kaip rodo tyrimai (Lourenço, Pina-Henriques 2006; Lourenço 1996; Groot, Larbi 1999), mechaninės skiedinio savybės, nustatytos standartiniais metodais, gerokai skiriasi nuo skiedinio, esančio gulsčiojoje siūlėje, savybių. Taigi straipsnyje analizuojamas gulsčiųjų siūlių deformacijų poveikis bendrai mūro deformacijai ir skiedinio, esančio siūlėje, deformacinių savybių pokytis.

2. Mechanines mūro savybes veikiantys veiksniai

Mūras – kompleksinė medžiaga, sudaryta iš mūro gaminių ir juos jungiančio skiedinio. Mechanines mūro savybes veikia daug veiksnių – mūro gaminių konstrukcinis sprendinys, jų mechaninės savybės, gulsčiųjų ir stačiųjų siūlių storis, mechaninės siūlių skiedinio savybės ir kt.

Atlikta nemažai eksperimentinių tyrimų, kurių tikslas – nustatyti įvairių veiksnių poveikį mechaninėms mūro savybėms. Mūras yra sudėtinga izotropinė medžiaga, pasižyminti didele eksperimentinių rezultatų sklaida, todėl siekiant kuo tiksliau įvertinti mūro

deformacines savybes, reikia tinkamai išanalizuoti visų veiksmų poveikį. Wenzel (1997), Hendry *et al.* (1997) išskiria daug veiksmų, veikiančių mūro elgseną.

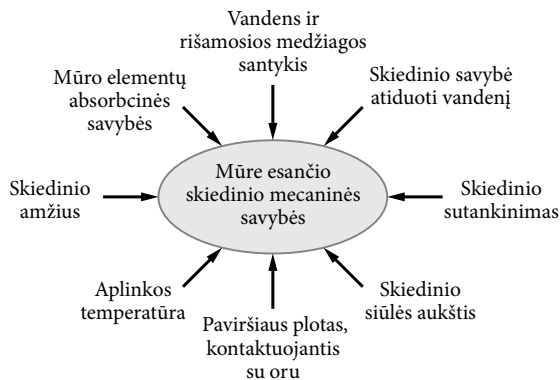
Pagrindinius veiksmus galima suskirstyti į dvi grupes: 1) mūro gaminių poveikis; 2) skiedinio poveikis. Pagrindiniai veiksniai, veikiantys mechanines mūro savybes, pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Veiksniai, turintys poveikį mechaninėms mūro savybėms

Table 1. Factors affecting mechanical properties of masonry

Mūro gaminių poveikis	Skiedinio poveikis
Gniuždomasis stipris	Gniuždomasis stipris
Tempiamasis stipris	Deformacinės savybės
Deformacinės savybės	Ryšys tarp mūro gaminių ir skiedinio
Konstruktinis sprendinys (forma, tuštymėtumas)	Siūlės storis
Absorbcinės savybės	Siūlės užpildymas ir sutankinimo tolygumas

Mūro, veikiamo apkrovos, deformacijoms didelį poveikį turi mechaninės skiedinio savybės. Mechaninės mūre esančio skiedinio savybės dėl daugelio veiksnių įtakos (Huster 2000) skiriasi nuo savybių, gautų laboratorijoje bandant standartinius skiedinio bandinius (1 pav.). Vienas pagrindinių veiksnių, veikiančių skiedinį, yra mūro gaminių medžiagos kapiliarumas (absorbcinės savybės). Gaminys, padėtas ant šviežio skiedinio, sugeria vandenį, taip paveikdamas hidratacijos procesą, dėl to keičiasi mechaninės skiedinio savybės. Jeigu mūrijant gaminiai yra pernelyg drėgni, tarp gaminių ir skiedinio gali susidaryti vandens plėvelė, kuri neigiamai veikia ryšio tarp skiedinio ir mūro gaminių susidarymą.



1 pav. Veiksniai, veikiantys mechanines skiedinio savybes (Huster 2000)

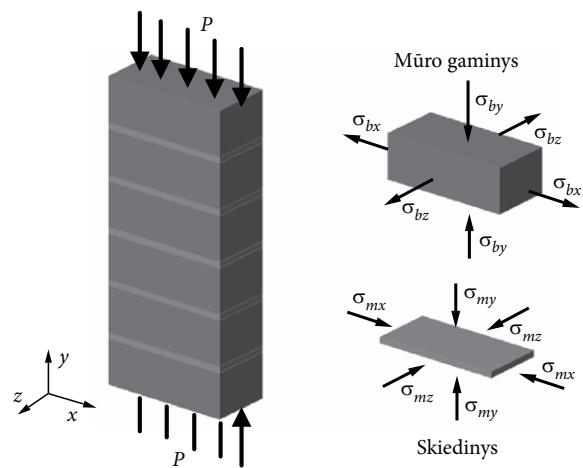
Fig. 1. Factors that have influence on properties of mortar inside masonry (Huster 2000)

3. Įtempių deformacijų būvis

Mūras sudarytas iš skirtingų medžiagų, turinčių skirtingų deformacinių savybių, todėl mūre atsiranda sudėtingas įtempių būvis.

Dažniausia mūras gaminamas naudojant standesnius mūro gaminius ir mažesnio standumo skiedinį. Gniuždomo mūro gaminiuose ir skiedinio siūlėje atsiranda skirtingas įtempių būvis. Mažesnio standumo skiedinys nuo apkrovos plečiasi labiau nei standesni gaminiai. Tokiu būdu mūro gaminiai varžo skiedinio deformacijas. Dėl šios priežasties skiedinyje sukiamas triašis gniuždomas. Gniuždomas mūro gaminys deformuojasi skersine linkme kaip ir bet koks gniuždomas kūnas, be to, papildomų skersinių deformacijų sukelia skiedinys. Kai mūro gaminių tamprumo modulis yra didesnis už gulsčiųjų siūlių skiedinio tamprumo modulį, t. y. $E_b > E_m$, gniuždomuose mūro gaminiuose skersine linkme sukiami tempiamieji įtempiai (2 pav.). Šį įtempių būvį vienas pirmųjų išplėtojo H. Hilsdorfas (Hilsdorf 1969). Taip pat plačiau šis įtempių būvis aprašytas A. T. Vermeltforto darbe (Vermeltfoort 2005).

Esant tokiam įtempių būviui, mūro gaminiuose atsiranda vertikaliųjų plyšių. Didinant apkrovą, t. y. didėjant gniuždomiesiems įtempiams, didėja skersiniai tempiamieji įtempiai mūro gaminiuose, susidarę vertikalieji plyšiai vystosi ir tai lemia mūro irtį. Atsiradusius mūro gaminiuose skersinius tempimo įtempius σ_{bx} ir σ_{bz} galima aprašyti taikant bendrąjį Huko dėsnį. Toliau pateiktos išraiškos (1 ir 2) plačiau aprašytos Durgesh *et al.* (2007), Jonaičio *et al.* (2001), Berto *et al.* (2004) darbuose.



2 pav. Mūro įtempių būvio modelis, kai mūro gaminyje standesnis už skiedinį

Fig. 2. Model of stress state in masonry components, when the unit is stiffer than the mortar

$$\sigma_{bx} = \sigma_{bz} = \sigma_y \frac{\left(-\frac{E_b}{E_m} \nu_m + \nu_b \right)}{1 - \nu_b + \frac{E_b}{E_m} \frac{h_b}{h_m} (1 - \nu_m)}, \quad (1)$$

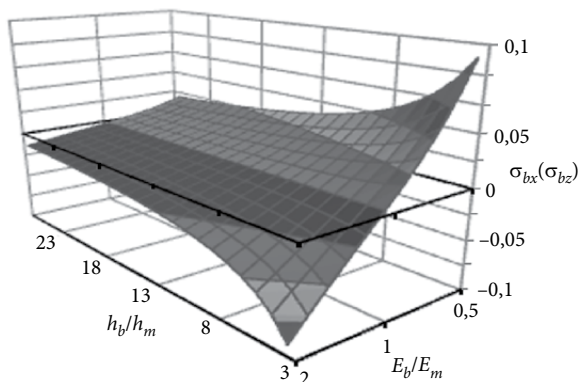
o skersinių deformacijų ε_{bx} ir ε_{bz} išraiška:

$$\varepsilon_{bx} = \varepsilon_{bz} = \frac{\sigma_y}{E_b} \frac{\left(-\frac{E_b}{E_m} \nu_m + \nu_b \right)}{1 - \nu_b + \frac{E_b}{E_m} \frac{h_b}{h_m} (1 - \nu_m)}, \quad (2)$$

čia E_b ir E_m – mūro gaminių ir skiedinio tamprumo moduliai; ν_b ir ν_m – atitinkamai mūro medžiagų Puasono koeficientai; h_b – mūro gaminių aukštis; h_m – skiedinio gulsčiosios siūlės storis.

- Išraiška (1) buvo išvesta laikantis prielaidos, kad:
- mūro gaminių ir gulsčiųjų siūlių skiedinys yra vienalytės izotropinės ir absoliučiai tamprios medžiagos;
 - ryšys tarp gulsčiųjų siūlių skiedinio ir mūro gaminių yra standus;
 - įtempiai per mūro gaminio aukštį ir gulsčiosios siūlės storį yra pasiskirstę tolygiai.

(1) formulėje nesunku pastebėti, kad skersinių įtempių dydis priklauso ne tik nuo mūro medžiagų deformacinių savybių (tamprumo modulio, Puasono koeficiento), bet ir nuo mūro sluoksnių storio (mūro gaminio aukščio ir skiedinio siūlės storio). Keičiant tamprumo modulį E_b / E_m ir Puasono koeficientų ν_b / ν_m santykius keičiasi skersinių įtempių priklausomybė nuo mūro gaminių aukščio bei skiedinio siūlės storio santykio h_b / h_m (3 pav.). Priklausomai nuo mūro gaminių ir gulsčiosios siūlės skiedinio deformacinių savybių mūro gaminiai veikiami skersinių



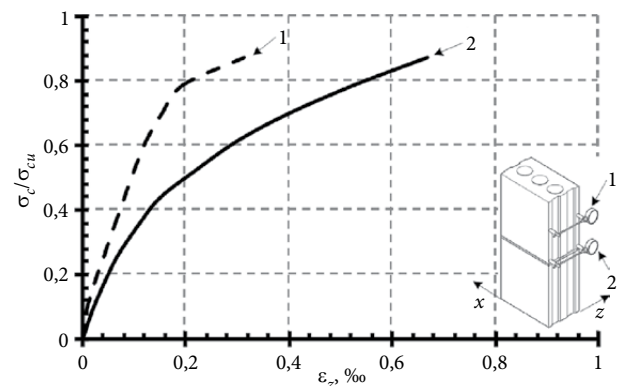
3 pav. Mūro gaminio įtempių σ_{bx} (σ_{bz}), tamprumo modulių santykio E_b / E_m ir gulsčiosios siūlės storio sąryšis

Fig. 3. The relationship of horizontal stress σ_{bx} (σ_{bz}) on the range of elastic modulus E_b / E_m and thickness of bed joint

tempiamųjų ar gniuždomųjų įtempių. Kai mūro gaminių tamprumo modulis E_b yra didesnis už skiedinio tamprumo modulį E_m , t. y. kai E_b / E_m kinta nuo 2 iki 1, mūro gaminiai skersine kryptimi yra tempiami, o skiedinys gniuždomas. Priešingu atveju, kai $E_b < E_m$, t. y. mūro skiedinys yra standesnis, santykiams E_b / E_m ir ν_b / ν_m kintant nuo 1 iki 0,5, horizontaliaja kryptimi gulsčiosios siūlės skiedinys yra tempiamas, o mūro gaminys gniuždomas. Tai patvirtina ir eksperimentiniai tyrimai (Sarangapani *et al.* 2002). Kai santykiai E_b / E_m ir ν_b / ν_m lygūs 1, pagal (1) formulę skersiniai įtempiai lygūs nuliui, tačiau šiuo atveju atsirastų tokie patys skersiniai įtempiai kaip ir vienalyčiame elemente.

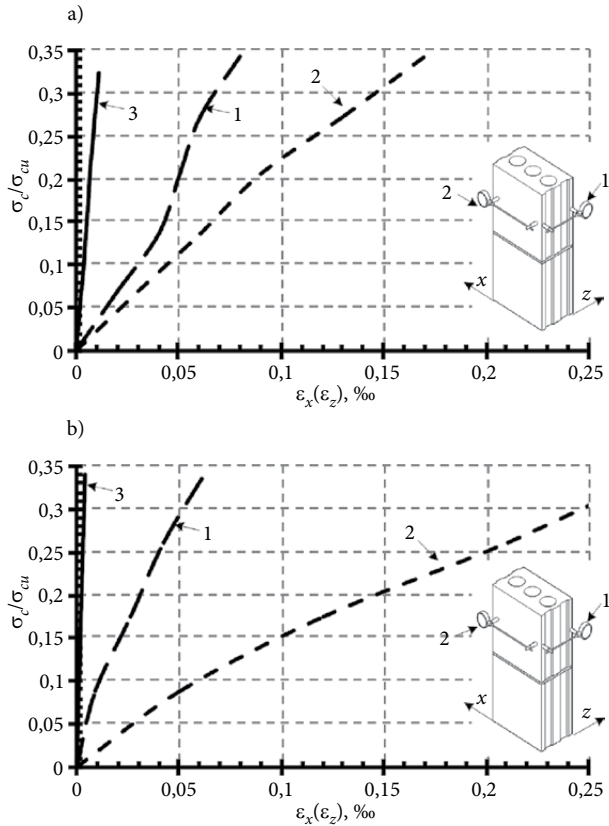
4. Įtempių deformacijų būvio tyrimas

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedroje atlikti tuštymėtų tikslių matmenų silikatinių blokų gniuždomojo mūro elgsenos tyrimai. Buvo tiriamas gniuždomojo mūro silikatinių blokų skersinių deformacijų ε_{bx} ir ε_{bz} kitimas per blokų aukštį, t. y. buvo matuojamos deformacijos greta gulsčiųjų siūlių ir bloko aukščio viduryje. Matavimų rezultatai pateikti 4 pav. Tyrimų rezultatai parodė, kad skersinės deformacijos ties gulsčiosiomis siūlėmis yra gerokai didesnės už skersines deformacijas, išmatuotas vidurinėje bloko dalyje, t. y. skersinės deformacijos, o kartu ir įtempiai skersine kryptimi per mūro gaminių aukštį pasiskirsto netolygiai. Palyginus silikatinių blokų skersines deformacijas, kai įtempiai $\sigma_c \approx 0,3\sigma_{cu}$ (kol mūras dirba tampriai), ε_{bx} (ε_{bz}) su apskaičiuotosiomis pagal (2) išraišką (5 pav.), nesunku pastebėti, kad deformacijos gerokai skiriasi. Tyrimai



4 pav. Horizontaliųjų deformacijų ε_z priklausomybė nuo gniuždomojo įtempių bloko viduryje (1) ir prie gulsčiosios siūlės (2); čia σ_{cu} – ribiniai įtempiai

Fig. 4. The dependence of horizontal strain ε_z on axial compression in the middle of the block (1) and near the bed joint (2); σ_{cu} – critical stress



5 pav. Horizontaliųjų deformacijų ε_z (1) ir ε_x (2), gautų bandymo metu, palyginimas su deformacijomis (3), gautomis pagal (2) formulę: a – kai gulsčioji siūlė stora; b – kai gulsčioji siūlė plona

Fig. 5. The comparison between curves of experimental horizontal strain ε_z (1), ε_x (2) and theoretical horizontal strain (3) form formula 2: a – thick bed joint; b – thin bed joint

rodo, kad skersinės deformacijos, o kartu ir įtempiai netolygiai pasiskirsto per mūro gaminio aukštį. Be to, skersinių deformacijų ir įtempimų dydžiai turi įtakos įtempimų santalka gulsčiojoje siūlėje, mūro gaminių tuštymėtumas, skiedinio siūlės ir mūro gaminio sąlyčio ruožas. Dėl to (1) formulė neatspindi tikrojo skersinių įtempimų pasiskirstymo mūre, bet leidžia aprašyti įtempimų būvį, kuris atsiranda mūro elementuose ir skiedinio siūlėje veikiant gniuždomajai apkrovai. Norint įvertinti skersinių įtempimų priklausomybę nuo vertikalųjų įtempimų, reiktų atlikti išsamesnius eksperimentinius tyrimus, nustatant įvairių veiksmų poveikį, iš jų tuštymėtųjų blokų konstrukcinį sprendinį, raizginio storį bei išdėstymą.

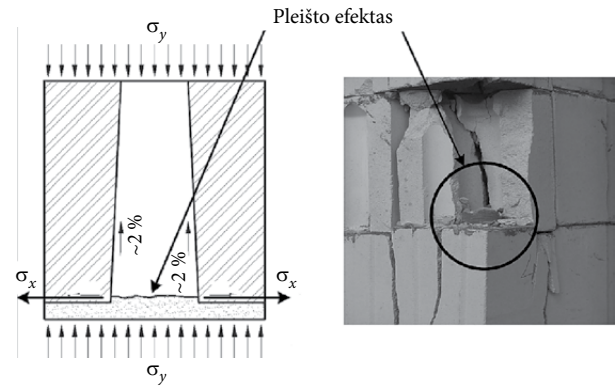
Gniuždomas mūro gaminys (blokas) skersine kryptimi deformuojasi kaip ir bet kuris kitas gniuždomas kūnas, be to, šias deformacijas didina gulsčiųjų siūlių skiedinys, sukeldamas tempiamuosius įtempimus. Tyrimai rodo, kad skersines deformacijas, taip pat ir

įtempius veikia skiedinys, patekęs į blokų tuštymes, sukeldamas pleišto poveikį (6 pav.) (Marčiukaitis *et al.* 2004; Jonaitis *et al.* 2001).

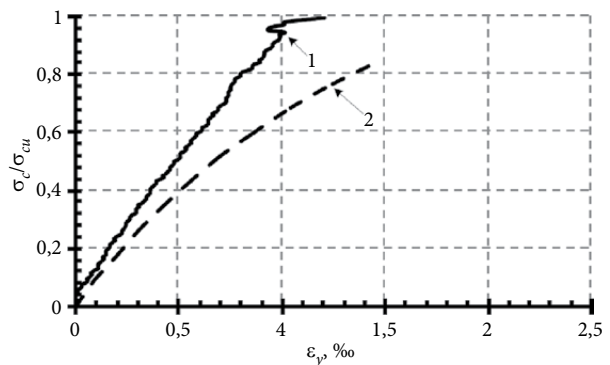
Paprastai nagrinėjant mūro įtempimų deformacijų būvį mechaninės mūro gaminių ir skiedinio savybės, taip pat ir deformacinės savybės nustatomos bandant mūro gaminių medžiagą bei skiedinio kontrolinius bandinius.

Silikatinių prizmių, išpjautų iš silikatinių blokų, ir skiedinio prizmių deformacijų tyrimo rezultatai pateikti 7 pav. Tamprumo modulio ir Puasono koeficientų kitimas priklausomai nuo gniuždomųjų įtempimų parodytas 8 pav.

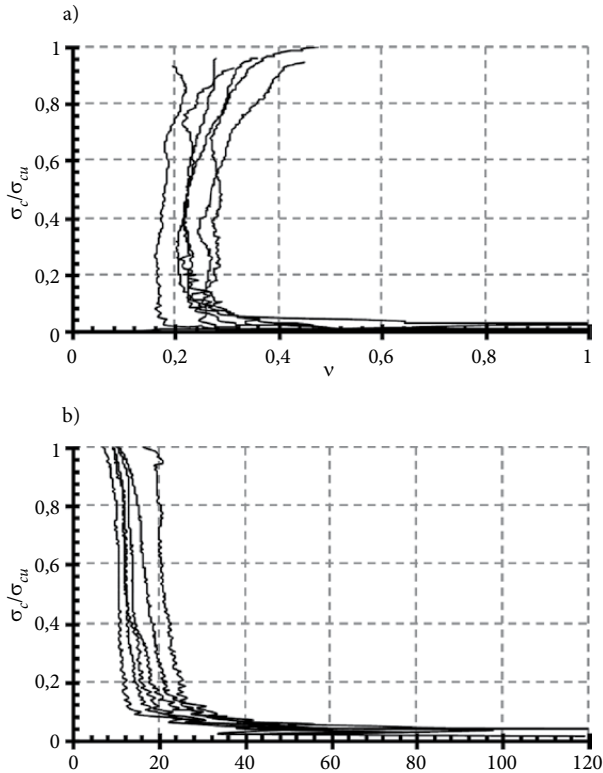
Tyrimai rodo, kad silikatinių bandinių tamprumo modulis, didinant apkrovą, yra pastovus arba kinta nedaug, todėl galima teigti, kad silikatiniai gaminiai iki irties dirba tampriai. Panašiai kinta ir Puasono koeficientas. Silikatinių blokų ir mūro deformacijos (9 pav.) liudija, kad mūro deformacijoms didelį poveikį turi gulsčiųjų siūlių deformacijos.



6 pav. Pleišto poveikis
Fig. 6. Wedge effect

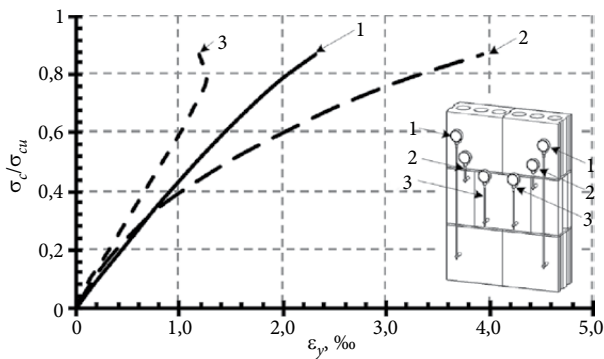


7 pav. Silikatinės (1) ir skiedinio (2) prizmių įtempimų ir deformacijų kreivės
Fig. 7. Stress-strain curves of calcium-silicate and mortar prisms



8 pav. Silikatinųjų prizmių Puasono koeficiento (a) ir tamprumo modulio (b) ir gniuždomųjų įtempių sąryšiai

Fig. 8. The relationship of Poisson's ratio and elastic modulus on axial compression of calcium-silicate prisms



9 pav. Mūro (1), skiedinio siūlės (2) ir mūro gaminių (3) įtempių ir deformacijų kreivės

Fig. 9. Stress-strain curves of masonry (1), bed joint (2) and unit (3)

Skiedinio, esančio mūre, mechanines savybes nustatyti yra sudėtinga. Tačiau skiedinio siūlės tamprumo modulis gali būti apskaičiuojamas iš bendros mūro deformacijos eliminuojant mūro gaminių deformaciją (10 pav.). Bendrą mūro deformaciją sudaro mūro gaminių ir skiedinio siūlės bei sąlyčio ruožo deformacijos:

$$\Delta l_{sum} = \Delta l_b + \Delta h_m, \quad (3)$$

čia Δl_{sum} – išilginė mūro deformacija; Δl_b – mūro ga-

minio išilginė deformacija; Δh_m – vidutinės skiedinio siūlės deformacijos (skiedinio siūlės ir sąlyčio ruožo deformacija).

Kai ką pertvarkius, iš (3) formulės skiedinio siūlės tamprumo modulį $E_{m,s}$ galima išreikšti taip:

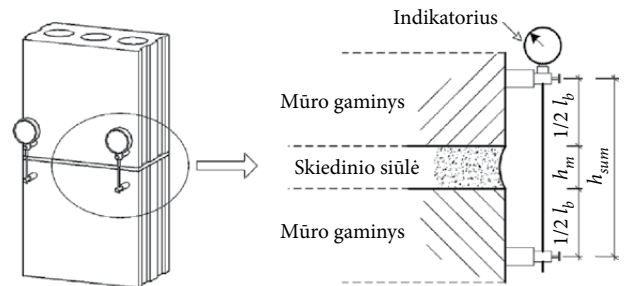
$$E_{m,s} = \frac{h_m E_{sum} E_b}{E_u (h_m + l_b) - E_{sum} l_b}, \quad (4)$$

čia $E_{m,s}$ – mūro tamprumo modulis; l_b – į matavimo ruožą patenkančio mūro gaminių dalis (10 pav.).

Gulsčiųjų siūlių išilginės deformacijos Δh_m susideda iš skiedinio Δl_m bei skiedinio ir mūro gaminių sąlyčio ruožų Δl_{con} deformacijų:

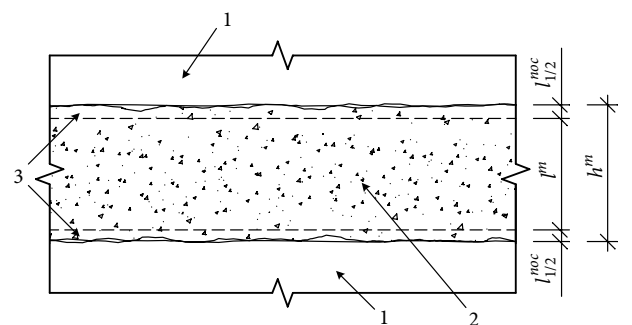
$$\Delta h_m = \Delta l_m + \Delta l_{con}. \quad (5)$$

Skiedinio ir mūro gaminių sąlyčio ruožui (11 pav.) būdinga tai, kad išilginiai įtempiai skiediniui perduodami netolygiai, dėl skiedinio siūlės nelygumų ir nevienodo atskirų zonų stiprio susidaro įtempių santalpa. Tarp skiedinio ir mūro gaminių susidaro tarpinis sluoksnis, kurio savybės skiriasi nuo vidurinių siūlės skiedinio sluoksnių savybių (Marčiukaitis *et al.* 2004; Jonaitis *et al.* 2009).



10 pav. Skiedinio siūlės tamprumo modulio nustatymo schema

Fig. 10. The scheme of defining the elastic modulus of bed joint



11 pav. Mūro gaminių ir skiedinio sąlyčio ruožų schema:

1 – mūro gaminy; 2 – skiedinio sluoksnis; 3 – sąlyčio ruožas
Fig. 11. The scheme of bed joint: 1 – unit; 2 – mortar layer; 3 – contact zone

Galima teigti, kad skiedinio siūlės deformacijas dažniausia lemia sąlyčio ruožų deformacijos. Autorių tyrimai su silikatiniais blokais rodo, kad gulsčiųjų siūlių deformacijas Δh_m apie 80–90 % sudaro sąlyčio ruožų deformacijos Δl_{con} .

Skiedinio, esančio siūlėje, tamprumo modulis nuo tamprumo modulio, nustatyto bandant standartines skiedinio prizmes, gali skirtis daugiau nei 10 kartų. VGTU Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedroje atlikti tyrimai su silikatinų blokų fragmentais parodė, kad skirtumas tarp skiedinio, esančio mūre, tamprumo modulio ir tamprumo modulio, nustatyto pagal (EN 1015-11), siekia 15–25 kartus. Lourenço, Pina-Henriques (2006) atlikti skiedinio, esančio mūre, tamprumo modulio tyrimai parodė, kad siūlės skiedinio tamprumo modulis nuo skiedinio, išbandyto laboratorijoje, skiriasi nuo 3 iki 17 kartų. Skirtumas priklauso nuo naudojamo skiedinio stiprio. Kuo stipresnis skiedinys, tuo didesnę dalį savo deformacinių savybių jis praranda. Šis veiksnys papildomai analizuojamas Lourenço (1996) ir Groot, Larbi (1999) darbuose. Kai mūro tyrimams taikomas skaitinis modeliavimas ir naudojamos skiedinio deformacinės charakteristikos, gautos bandant standartinius bandinius, gaunamas didesnis mūro standumas (Aliawdin *et al.* 2004). Todėl atliekant skaitinio modeliavimo tyrimus, tikslinga vertinti tikrąsias deformacines skiedinio savybes.

Atliekant tyrimus VGTU Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedroje, taip pat buvo stebima drėkintų ir nedrėkintų mūro gaminių įtaka skiedinio siūlės tamprumo moduliu. Mūro gaminiai buvo drėkinami norint sumažinti vandens įgėrimą iš skiedinio. Dėl technologinių priežasčių šis tyrimas buvo atlieka-

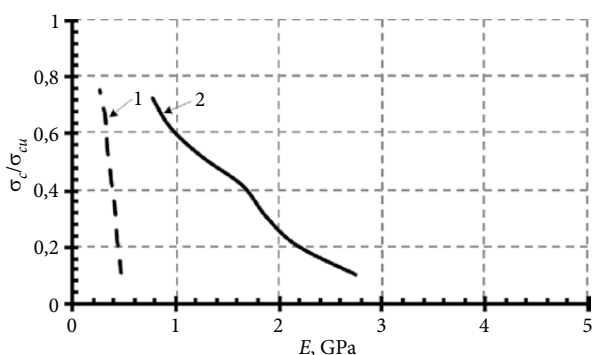
mas tik su plonomis siūlėmis ($h_m \leq 5$ mm). Nustatyta, kad papildomas mūro elementų drėkinimas turi didelę įtaką skiedinio siūlės tamprumo moduliu (12 pav.).

5. Išvados

1. Mūro gaminių gniuždomajame mūre horizontaliosios deformacijos, o kartu ir įtempiai, pasiskirsto netolygiai per mūro gaminių aukštį. Tyrimai parodė, kad horizontaliosios deformacijos ties gulsčiosiomis siūlėmis yra gerokai didesnės už horizontaliąsias deformacijas, išmatuotas mūro gaminio viduryje.
2. Tyrimais nustatyta, kad gulsčiosios siūlės deformacijas lemia skiedinio ir mūro gaminių sąlyčio ruožų deformacijos. Jos sudaro apie 80–90 % gulsčiosios siūlės deformacijų.
3. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad skiedinio tamprumo modulis, nustatytas pagal jo deformacijas gulsčiojoje siūlėje, yra apie 15–25 kartų mažesnis už tamprumo modulį, nustatytą bandant skiedinio bandinius pagal EN 1015-11, todėl nagrinėjant mūro įtempių deformacijų būvį, mūro gaminių ir skiedinio deformacines savybes reikia vertinti atsižvelgiant į jų tarpusavio sąveikos ypatumus.
4. Tyrimai parodė, kad papildomas mūro gaminių drėkinimas turi didelį poveikį deformacinėms gulsčiosios siūlės skiedinio savybėms.

Literatūra

- Aliawdin, P.; Simbirkin, V.; Toropov, V. 2004. Resistance of masonry wall panels to in-plane shear and compression, *Journal of Civil Engineering and Management* 10(1): 3–9.
- Berto, L.; Saetta, A.; Scotta, R.; Vitaliani, R. 2004. Failure mechanism of masonry prism loaded in axial compression: computational aspects, *Materials and Structures* 38: 249–256.
- Durgesh, C. R.; Hemant, B. K.; Sudhir, K. J. 2007. Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(9): 728–739. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728)
- EN 772-1. 2000. *Methods of Tests for Masonry Units – Part 1: Determination of Compressive Strength.*
- EN 1052-1. 1999. *Methods of Test for Masonry – Part 1: Determination of Compressive Strength.*
- EN 1015-11. 1999. *Methods of Tests for Mortar for Masonry – Part 11: Determination of Flexure and Compressive Strength of Hardened Mortar.*
- Groot, C.; Larbi, J. 1999. The influence of water flow (reversal) on bond strength development in young masonry, *HERON* 44(2): 63–78.
- Hendry, A. W.; Sinha, B. P.; Davies, S. R. 1997. *Design of Masonry Structures.* Department of Civil Engineering, University of Edinburgh, UK. 271 p. doi:10.4324/9780203362402



12 pav. Skiedinio siūlės tamprumo modulio kitimas nuo gniuždomųjų įtempių: 1 – nedrėkinti mūro gaminiai; 2 – drėkinti mūro gaminiai

Fig. 12. The variation of elastic modulus of bed joint: 1 – dry units; 2 – wet units

- Hilsdorf, H.; 1969. An investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in uniaxial compression, *Designing, Engineering and Construction with Masonry Products*. Houston: F. B. Jonhson.
- Huster, U. 2000. *Tragverhalten von einschaligem Natursteinmauerwerk unter zentrischer Druckbeanspruchung: Entwicklung und Anwendung eines Finite- Elemente Programmes*. Kassel University Press, Kasse. Available from Internet: <www.uni-kassel.de>.
- Jonaitis, B.; Marčiukaitis, G.; Papinigis, V.; Valivonis, J. 2001. Mūro iš tuštymėtų blokelių konstrukcinių savybių ypatumai ir jų įvertinimas, *Statyba* [Civil Engineering] 7(5): 386–390.
- Jonaitis, B.; Marčiukaitis, G.; Papinigis, V.; Valivonis, J. 2009. Analysis of the shear and flexural behaviour of masonry with hollow calcium silicate blocks, *Engineering Structures* 31(4): 827–833. Oxford: Elsevier.
- Lourenço, P. B. 1996. *Computational Strategies for Masonry Structures*: PhD thesis, Delft University of Technology. The Netherlands. Available from Internet: <www.civil.uminho.pt/masonry>. doi:10.1016/j.compstruc.2006.08.009
- Lourenço, P. B.; Pina-Henriques, J. 2006. Validation of analytical and continuum numerical methods for estimating the compressive strength of masonry, *Computers and Structures* 84: 1977–1989.
- Marčiukaitis, G.; Jonaitis, B.; Valivonis, J. 2004. Peculiarities of masonry deformation properties from hollow calcium silicate blocks, in *Theoretical Foundations of Civil Engineering: Polish - Ukrainian Transactions*. Warsaw – Dnepropetrovsk, 910–918.
- Proske, D.; van Gelder, P. 2009. *Safety of Historical Stone Arch Bridges*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-77618-5
- Sarangapani, G.; Venkatarama, R. B. V.; Jagadish, K. S. 2002. Structural characteristics of bricks, mortar and masonry, *Journal of Structural Engineering* 29(2): 101–107.
- Vermeltoort, A. T. 2005. *Brick-mortar Interaction in Masonry under Compression*: PhD thesis. Eindhoven University of Technology. The Netherlands.
- Wenzel, F. 1997. *Mauerwerk – Untersuchen und Instandsetzen Dutch Injizieren, Vernadeln und Vorspannen. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Empfehlungen für die Praxis*. Sonderforschungsbereich 315. Universität Karlsruhe.

THE ANALYSIS OF STRESS DEFORMATION STATE PECULIARITIES OF MASONRY UNITS AND BED JOINTS

R. Zavalis, B. Jonaitis

Abstract. In this paper, the analysis of various effects that have influence to the mechanical properties of masonry is made. Masonry is nonhomogeneous and anisotropic material composed of two materials with different stiffness properties. In order to analyze masonry deformations it is necessary to evaluate all effects that have influence to masonry mechanical properties (Table 1). The analysis of stress-strain state of masonry is presented in this paper. During the analysis of stress-strain state, the mechanical properties of masonry units and mortar were defined from experimental investigation of samples of unit and mortar materials. The following conclusions were reached based on the analysis of experimental data: 1) The deformations and stresses along the height of masonry unit distributes unevenly. The stresses and deformations near the bed joint are higher than in the middle of the unit (4 pav). 2) From experimental data it was determined that the deformation of bed joints mostly depend on contact zone between units and mortar. The contact zone deformation contains about 80...90% of all bed joint deformation. 3) The elastic modulus of mortar inside the composite is different from modulus of mortar specimens cast separately due to different laying and curing conditions. The elastic modulus values performed from composite were 15...25 times less than the values from standard mortar prisms (EN 1015-11). It is advisable to use real (defined from experiments) masonry units and mortar properties when detailed, numerical stress-strain analysis is performed. 4) Experimental analysis showed that bed joints have big influence to vertical deformation of masonry in axial compression. Masonry units have influence to mechanical properties of mortar joints. The experiment was carried out, during which dry and wet masonry units were used. Units were wet out to eliminate there absorption characteristics. Extra wet out units had an effect to the stiffness of bed joints (12 pav).

Keywords: masonry, bed joint thickness, deformation, mortar, masonry units, calcium-silicate.

Robertas ZAVALIS. Ph.D. student at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University. Research interests: masonry and masonry structures.

Bronius JONAITIS. Doctor, Associate Professor at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University. Research interests: theory of reinforced concrete behaviour, masonry and masonry structures, composite structures, strengthening of structures.