



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Povilas Petruškevičius

**SUSTIPRINTO GNIUŽDOMOJO MŪRO ĮTEMPIŲ BŪVIO ANALIZĖ
STRESS STATE ANALYSIS OF STRENGTHENED COMPRESSIVE
MASONRY**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2015

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedra

ISBN
Egz. sk.
Data-.....-..... ISSN

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Sustiprinto gniuždomojo mūro įtempių būvio analizė**

Autorius **Povilas Petruškevičius**

Vadovas **doc. dr. Bronius Jonaitis**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Apvalkalais suvaržius mūro skersines deformacijas gaunamas mūro gniuždomojo stiprio padidėjimas, pasikeičia įtempių ir deformacijų būvis. Sustiprinto mūro lakomajai galiai apskaičiuoti, priklausomai nuo stiprinimo būdo, pateikiamos skirtingos metodikos. Gniuždomos mūrinės konstrukcijos stiprinamos betoniniais, plieniniais, armuoto tinko ar armuoto polimero apvalkalais. Dėl įrengimo paprastumo dažniausiai naudojami plieniniai apvalkalai, kurie ne tik suvaržo gniuždomojo mūro skersines deformacijas, bet ir atlaiko dalį gniuždančiosios apkrovos, dėl to padidinama mūro laikomoji galia. Darbo tikslas yra nustatyti skersinių deformacijų suvaržymo įtaką mūro laikomajai galiai ir plieninio apvalkalo statramsčių gniuždomojo stiprio išnaudojimo koeficientą priklausantį nuo trinties tarp stiprinamojo mūro ir statramsčių bei pateikti skaičiavimo rekomendacijas. Tikslui pasiekti atliktas eksperimentinis ir taikant skaitinį modeliavimą, sustiprinto plieniniu apvalkalu ir apkrauto trumpalaikė statinė apkrova gniuždomo mūro įtempių deformacijų tyrimas. Eksperimentai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedros laboratorijoje, kurių rezultatai palyginti su teoriniais skaičiavimais. Eksperimentais nustatyta mūro skersinių deformacijų suvaržymo įtaka mūro gniuždomajam stipriui, mūrinio elemento laikomosios galios pokytis jį sustiprinus, apvalkalo statramsčių stiprio išnaudojimo koeficientas. Darbą sudaro 5 skyriai, kuriuose nagrinėjama nesustiprinto mūro elgsena, galimi mūro pažeidimai, mūro stiprinimo būdai ir skaičiavimo metodikos, atliekamas sustiprinto mūro elgsenos tyrimas ir pateikiamos išvados.

Prasminiai žodžiai: Mūro įtempių ir deformacijų būvis, sutiprintas gniuždomas mūras, plieninis apvalkalas, gelžbetoninis apvalkalas, sustiprinto polimero apvalkalas, eksperimentinis tyrimas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures

ISBN _____ ISSN _____
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Stress state analysis of strengthened compressive masonry**

Author **Povilas Petruškevičius**

Academic supervisor **Assoc Prof Dr Bronius Jonaitis**

Thesis
language: Lithuanian

Annotation

Jacketing increases the load-carrying capacity and the deformability of masonry. There are some different jacketing techniques to strengthen masonry such as steel jacketing, reinforced concrete jacketing, fiber reinforced polymers wrapping and using steel cords. Steel jacketing is extensively used to retrofit masonry columns and has proven to be very efficient in increasing strength and ductility of the columns. Aim of the work is to investigate influence of transverse strains restriction for the load-carrying capacity of masonry and to determine coefficient of steel angles exploitation which depends from friction between steel angles and masonry. It was made an experimental work with 9 specimens of masonry columns, static linear numerical analysis and theoretical calculations. In experimental work it was found the effectiveness of steel jacketing, behavior of strengthened masonry and stress-strain characteristics of strengthened compressive masonry. An experimental results were compared with theoretical calculations and recommendations was made.

Keywords: Strengthened compressive masonry, steel jacketing, confinement, reinforced concrete jacketing, FRP wrapping.

Turinys

IVADAS	13
1. GNIUŽDOMOJO MŪRO ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ BŪVIS	15
2. GNIUŽDOMOJO MŪRO PAŽAIDOS	19
2.1. Technologiniai mūro defektai	20
2.2. Pažaidos, atsiradusios naudojimo metu	21
2.3. Eksploatuojamo mūro būklės įvertinimas	24
2.4. Skyriaus išvados	25
3. MŪRO STIPRINIMO BŪDAI	26
3.1. Stiprinimas plieninėmis vielomis	26
3.2. Stiprinimas anglies arba stiklo pluošto apvalkalais	28
3.3. Stiprinimas plieniniu apvalkalu	32
3.4. Stiprinimas gelžbetoniniais apvalkalais	33
3.5. Skyriaus išvados	34
4. SUSTIPRINTO MŪRO LAIKOMOSIOS GALIOS SKAIČIAVIMO METODAI	35
4.1. Metaliniais apvalkalais sustiprinto mūro stiprio skaičiavimas	35
4.1.1. Sustiprinto mūro stiprio ir laikomosios galios vertinimas	35
4.1.2. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo armavimo skersiniais antdėklais intensyvumo	37
4.1.3. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo antdėklų plieno stiprio	38
4.2. Gelžbetoniniu apvalkalu sustiprinto mūro stiprio skaičiavimas	39
4.2.1. Gelžbetoniniu apvalkalu sustiprinto mūro stiprio ir laikomosios galios vertinimas	39
4.2.2. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros skerspjūvio ploto	41
4.2.3. Sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros žingsnio	43
4.3. Polimeriniu apvalkalu sustiprinto mūro laikomosios galios ir įtempių skaičiavimas ...	44
4.3.1. Polimeriniu apvalkalu sustiprinto gniuždomo mūro laikomosios galios vertinimas	44
4.3.2. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo storio	46
4.3.3. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo tempiamojo stiprio	48
4.3.4. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kampų apvalinimo spindulio	49
4.3.5. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kolonos skerspjūvio matmenų santykio	50
4.4. Skyriaus išvados	51
5. GNIUŽDOMOJO MŪRO SUSTIPRINTO PLIENINIŲ APVALKALŲ ELGSENOS TYRIMAS	52
5.1. Medžiagos ir bandiniai, bandymo metodika	52
5.1.1. Bandiniai	52
5.1.2. Bandymo metodika	55
5.1.3. Bandymo rezultatų analizė	56
5.1.4. Rezultatų palyginimas	70
5.2. Kompiuterinė analizė	71
5.2.1. Konstrukcijos modeliavimas	71
5.2.2. Rezultatai	72
5.3. Skyriaus išvados	73
BENDROSIOS IŠVADOS	75
NAUDOTA LITERATŪRA	77
PRIEDAI	79

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Triašis įtempių būvis plytų ir mūro sąlyčio vietoje gniuždomame mūre (Kaushik, 2007).....	16
1.2 pav. Plytų, skirtingo stiprumo skiedinio ir mūro įtempių deformacijų kreivių palyginimas: a - silpnas skiedinys; b - stiprus skiedinys; c - vidutinio stiprumo skiedinys (Kaushik 2007).	16
1.3 pav. Centriškai gniuždomojo mūro suirimo charakteris (Castori 2014; Aiello 2009)	17
2.1 pav. Plytų mūro mikrostruktūra: A – užpildas, B – rišamoji medžiaga, M – matrica; V – tuštuma. (Larbi 2004)	19
2.2 pav. Šalčio paveiktas mūras.....	22
2.3 pav. Mūras, pasidengęs išplautų medžiagų sluoksniu	23
2.4 pav. Druskų kristalizacijos pažeistos mūrio siūlės ir ištrupėjusios plytos.....	24
3.1 pav. Apgaubimas nerūdijančio plieno vielomis (Borri 2013)	26
3.2 pav. Sustiprinimo įrengimo schema; a - paruošiamos siūlės ir suapvalinami kampai; b - padengiamos armuotu skiediniu ir uždedami metaliniai kampai; c - išgręžiama skylė kiaurai skerspjūvį (G.Castori, 2014).....	27
3.3 pav. Mūro suvaržymo schema naudojant dalinį apvalką.....	31
3.4 pav. Kolonos sustiprintos naudojant plieninių kampuočių apvalką	32
3.5 pav. Plieninio apvalkalo apkrovimo ir atrėmimo tipai. a – apvalkalas atremtas ir tiesiogiai apkrautas apkrova; b – apvalkalas atremtas, bet tiesiogiai neapkrautas apkrova; c – apvalkalas neatremtas ir tiesiogiai neapkrautas apkrova.	33
3.6 pav. Mūro elemento stiprinimo gelžbetoniniu apvalkalu schema	34
4.1 pav. Mūro, sustiprinto plieninių kampuočių apvalkalu, skaičiuotinė schema.....	35
4.2 pav. Sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo armavimo intensyvumo .	38
4.3 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo armavimo intensyvumo	38
4.4 pav. Sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo antdėklų plieno stiprio ...	39
4.5 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo antdėklų plieno stiprio	39
4.6 pav. Kolonos sustiprintos gelžbetoniniu apvalkalu, skaičiuotinė schema.....	40
4.7 pav. Suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybės, nuo apvalkalo skersinės armatūros diametro	42
4.8 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros diametro.....	42
4.9 pav. Suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybės, nuo apvalkalo skersinės armatūros žingsnio.....	43
4.10 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros žingsnio	44
4.11 pav. Efektyviai suvaržyto skerspjūvio plotų pasiskirstymas (Corradi 2006).	45
4.12 pav. Apvalkalu sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė, nuo apvalkalo storio	47
4.13 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo apvalkalo storio	47
4.14 pav. Apvalkalu sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė, nuo apvalkalo tempiamojo stiprio.....	48
4.15 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo apvalkalo tempiamojo stiprio	49
4.16 pav. Santykio k_{eff} ir laikomosios galios pokyčio priklausomybės nuo kampų apvalinimo spindulio	50
4.17 pav. Apvalkalu sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo skerspjūvio kraštinių santykio.....	51
4.18 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo skerspjūvio kraštinių santykio	51
5.1 pav. Bandiniai; a ir b - gniuždomo mūro fragmentai (bandiniai); c - silikatinis tuštymėtasis blokelis (250x180x238mm).....	52
5.2 pav. Skiedinio prizmių bandymas; a - skiedinio prizmės bandymams; b - skiedinio tempiamojo stiprio lenkiant bandymas; c - skiedinio gniuždomojo stiprio nustatymo bandymas; d - skiedinio tamprumo modulio nustatymo bandymas	53

5.3 pav. Plieninis apvalkalas.....	54
5.4 pav. Plieninės templės	54
5.5 pav. Tarpinių sluoksnių įrengimo schemas; a – kampuotis glaudžiamas per skiedinio sluoksnį; b – kampuotis glaudžiamas per du kartono sluoksnius; c – kampuotis glaudžiamas per du kampuočių sluoksnius tarp jų įdedant du sluoksnius polietileno plievelės	55
5.6 pav. Deformacijų matavimo prietaisų ant kontrolinių bandinių išdėstymo schema ir bendras vaizdas.....	56
5.7 pav. Sustiprinto bandinio deformacijų matavimo prietaisų išdėstymo schema ir bendras bandymo vaizdas	56
5.8 pav. Bandinių, kuriuose buvo panaudotas S1 skiedinys įtempių ir deformacijų diagramos	60
5.9 pav. Bandinių, kuriuose buvo panaudotas S2 skiedinys įtempių ir deformacijų diagramos	61
5.10 pav. Kampuočių vertikalų deformacijų priklausomybė nuo mūro santykinių įtempių ...	62
gniuždančiai apkrovai.....	64
5.11 pav. Bandinių su S1 skiediniu horizontalių tempimo deformacijų ir normalinių mūro įtempių priklausomybės.....	64
5.12 pav. Bandinių su S2 skiediniu horizontalių tempimo deformacijų ir normalinių mūro įtempių priklausomybės.....	65
5.13 pav. KS-S1-1 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_c/f_{cu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.....	66
5.14 pav. KS-S1-2 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_c/f_{cu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.....	66
5.15 pav. KS-S2-1 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_c/f_{cu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.....	67
5.16 pav. KK-S1-1 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_c/f_{cu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.....	67
5.17 pav. KK-S1-2 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_c/f_{cu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.....	67
5.18 pav. KKp-S1-1 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_c/f_{cu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.....	68
5.19 pav. Vidutiniai įtempiai templėse ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje	68
5.20 pav. Vidutiniai įtempiai templėse trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje	69
5.21 pav. Kolonų bandinių plyšių pasiskirstymas po suirimo	69
5.22 pav. Kolonų blokelių suirimo formos, teorinė ir gautos eksperimentiškai.....	70
5.23 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas konstrukcijoje. a – normaliniai įtempiai išilgine kryptimi; b – normaliniai įtempiai trumpesniosios skerspjūvio kraštinės kryptimi; c – normaliniai įtempiai ilgesniosios skerspjūvio kraštinės kryptimi	73

Lentelių sąrašas

4.1 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo armavimo skersiniais antdėklais intensyvumo	37
4.2 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo antdėklų plieno stiprio.....	38
4.3 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros skerspjūvio ploto	42
4.4 lentelė. Sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros žingsnio.....	43
4.5 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo storio	47
4.6 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo tempiamojo stiprio.....	48
4.7 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kampų apvalinimo spindulio.....	49
5.1 lentelė. Blokų bandymo rezultatai	52
5.2 lentelė. Skiedinio stiprumo ir deformacinių savybių nustatymo rezultatai	53
5.3 lentelė. Plieno savybių tyrimų rezultatai.	54
5.4 lentelė. Bandinių charakteristikos.....	55
5.5 lentelė. Mūro fragmentų gniuždomosios galios tyrimų rezultatai	59
5.6 lentelė. Gniuždomojo mūro išilginių santykinų deformacijų ribinės reikšmės.....	59
5.7 lentelė. Mūro stipris.....	61
5.8 lentelė. Eksperimentiniai kampuočių išnaudojimo koeficientai.....	63
5.9 lentelė. Horizontaliosios mūro gaminių deformacijos šalia siūlių, esant maksimaliai gniuždančiai apkrovai.....	64
5.10 lentelė. Įtempiai templėse sustiprintam mūrui pasiekus maksimalius gniuždomuosius įtempius σ_{cu}	68
5.11 lentelė. Sustiprintų mūro elementų terinio ir eksperimentinio stiprio prieaugių palyginimas.....	70
5.12 lentelė. Sustiprintų mūro elementų teorinės ir eksperimentinės laikomųjų galių palyginimas.....	71
5.13 lentelė. Tempimo įtempių plieninėse templėse palyginimas	72

Naudojami žymenys

A – stiprinamojo mūrinio elemento skerspjūvio plotas;

A_s – plieninio apvalkalo statramsčių skerspjūvio plotas;

A_{sw} – antdėklų skerspjūvio plotas;

E – tamprumo modulis;

$F_{crc,obs}$ – eksperimentų metu nustatyta plyšių atsivėrimo apkrova;

$F_{u,obs}$ – eksperimentų metu nustatyta bandinį ardančioji apkrova;

$N_{R,act}$ – pažeistos konstrukcijos laikomoji galia;

N_{Rd} – pagal projektavimo normas apskaičiuota konstrukcijos laikomoji galia;

V_m – mūro tūris;

V_s – armatūros tūris;

b – skerspjūvio plotis;

f_b – mūro gaminių stipris;

f_{bc} – blokelių gniuždomasis stipris;

$f_{cum,obs}$ – sustiprinto mūro gniuždomasis stipris;

f_d – nestiprinto mūro gniuždomasis stipris;

f_{FRP} – polimerinio apvalkalo tempiamasis stipris;

f_m – skiedinio stipris;

f_{mb} – skiedinio lenkiamasis stipris;

f_{mc} – skiedinio gniuždomasis stipris;

$f_{m,obs}$ – eksperimentinis mūro bandinių gniuždomasis stipris;

f_r – tempimo įtempiai poliembriniame apvalkale;

f_{sc} – kampuočių plieno skaičiuotinis stipris;

f_u – plieno tempiamasis stipris;

f_y – plieno takumo stipris;

$f_{y,w}$ – antdėklų plieno skaičiuotinis stipris;

f_1 – efektyvieji suvaržymo įtempiai;

h – skerspjūvio aukštis;

h_b – plytos storis;

h_m – skiedinio siūlės storis;

k_e – skerspjūvio suvaržymo efektyvumo koeficientas;

k_{eff} – santykis tarp sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio ir nesustiprinto mūro gniuždomojo stiprio;

k_1 – suvaržymo apvalkalu koeficientas;

r_f – skerspjūvio formos koeficientas;

r_0 – skerspjūvio kampų suapvalinimo spindulys;

s_w – žingsnis tarp antdėklų;

t_f – apvalkalo storis;

Δf_d – mūro stiprio prieaugis;

$\Delta \Theta$ - koeficientas įvertinantis skerspjūvio kampų užapvalinimo spindulį;

b - koeficientas, kuriuo, priklausomai nuo defektų ar pažaidų rūšies, mažinama konstrukcijos laikomoji galia;

γ_b – apvalkalo statramščių stiprio išnaudojimo koeficientas;

$\varepsilon_{h,obs}$ – eksperimentų metu nustatytos horizontaliosios mūro deformacijos;

ε_{mu} – ribinė mūro deformacija;

h_k - koeficientas, kuriuo įvertinama elemento būklė;

ρ - armavimo skersine armatūra (antdėklais) koeficientas;

S_{hb} - horizontalieji įtempiai plytoje;

S_{hm} - horizontalieji įtempiai skiedinio siūlėje;

σ_s – įtempiai plieninėse templėse;

$f_{i,m}$ - koeficientas įvertinantis ekscentricitetų įtaką viršutiniame, apatiniame ir viduriniame pjūviuose;

u_b - plytų skersinių deformacijų (Puasono) koeficientas;

u_m - skiedinio skersinių deformacijų (Puasono) koeficientas.

IVADAS

Mūras yra plačiai naudojama statybinė konstrukcija. Eksploatavimo metu mūre atsiranda įvairių pažeidimų, kurių kilmė ir padariniai yra skirtingi. Atsiradus pažeidimams mūre ir konstrukcijoms nebetenkinant saugos ar tinkamumo ribinių būvių reikalavimų, mūrines konstrukcijas tenka stiprinti. Yra įvairių gniuždomojo mūro stiprinimo būdų, kurie turi savų privalumų ir trūkumų.

Problematika

Apvalkalais suvaržius mūro skersines deformacijas gaunamas mūro gniuždomojo stiprio padidėjimas, pasikeičia įtempių ir deformacijų būvis. Sustiprinto mūro lakomajai galiai apskaičiuoti, priklausomai nuo stiprinimo būdo, pateikiamos skirtingos metodikos. Sudėtinga tiksliai įvertinti plieniniu apvalkalu sustiprinto mūro lakomosios galios padidėjimą, kuris priklauso nuo skersinių deformacijų suvaržymo ir gniuždančios apkrovos dalies, kurią perima apvalkalo statramsčiai. Statramsčių gniuždomojo stiprio išnaudojimo laipsnis kinta priklausomai nuo keleto priežasčių, o sudėtingiausia šį laipsnį įvertinti, kai apvalkalas gniuždančią apkrovą perima tik per trintį tarp statramsčių ir stiprinamojo mūro.

Darbo aktualumas

Gniuždomos mūrinės konstrukcijos stiprinamos betoniniais, plieniniais, armuoto tinko ar armuoto polimero apvalkalais. Dėl įrengimo paprastumo dažniausiai naudojami plieniniai apvalkalai, kurie ne tik suvaržo gniuždomojo mūro skersines deformacijas, bet ir atlaiko dalį gniuždančiosios apkrovos, dėl to padidinama mūro laikomoji galia. Dažnai įrengiant plieninius apvalkalus jų statramsčių nepavyksta tiesiogiai apkrauti gniuždančia apkrova ir patikimai atremti, todėl jie gniuždančios apkrovos dalį perima tik per trintį su mūru, nuo kurios priklauso ir jų gniuždomojo stiprio išnaudojimo laipsnis.

Tyrimų objektas

Darbe nagrinėjama gniuždomojo mūro, sustiprinto plieniniu apvalkalu, elgsena (įtempių ir deformacijų būvis).

Darbo tikslas

Nustatyti skersinių deformacijų suvaržymo įtaką mūro laikomajai galiai ir plieninio apvalkalo statramsčių gniuždomojo stiprio išnaudojimo koeficientą priklausančią nuo trinties tarp stiprinamojo mūro ir statramsčių. Pateikti skaičiavimo rekomendacijas.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia išspręsti tokius uždavinius:

1. Atlikti literatūros apžvalgą gniuždomojo mūro stiprinimo apvalkalais tematika.

2. Iširti mūro, sustiprinto plieniniu apvalkalu, įtempių deformacijų būvį
3. Nustatyti trinties tarp plieninio apvalkalo statramsčių ir stiprinamojo mūro įtaką statramsčių gniuždomojo stiprio išnaudojimo laipsniui.
4. Nustatyti mūro skersinių deformacijų suvaržymo įtaką mūro gniuždomajam stipriui.
5. Taikant skaitinį modeliavimą išanalizuoti plieniniu apvalkalu sustiprinto gniuždomojo mūro įtempių deformacijų būvį.
6. Palyginti eksperimentais ir analitiniu metodu nustatytą gniuždomojo mūro stiprį bei sustiprinto mūro gniuždomąją galią.

Tyrimų metodika

Eksperimentinis ir taikant skaitinį modeliavimą, sustiprinto plieniniu apvalkalu ir apkrauto trumpalaikė statinė apkrova gniuždomo mūro įtempių deformacijų tyrimas. Eksperimentai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedros laboratorijoje, kurių metu buvo išbandyti 9 mūro elementai, iš kurių 6 buvo sustiprinti plieniniu apvalkalu. Sukurtas konstrukcijos skaitinis modelis.

Darbo mokslinis naujumas

Nustatytas plieninio apvalkalo statramsčių gniuždomojo stiprio išnaudojimo koeficientas, kuris priklauso nuo trinties tarp apvalkalo statramsčių ir stiprinamojo mūro. Nustatyta skersinių deformacijų suvaržymo įtaka mūro gniuždomajam stipriui.

Ginamieji teiginiai

1. Plieninio mūro apvalkalo tiesiogiai neapkrautų statramsčių gniuždomojo stiprio išnaudojimo laipsnis priklauso nuo trinties tarp statramsčių ir stiprinamojo mūro.
2. Sustiprintų gniuždomų elementų mūro gniuždomasis stipris priklauso nuo skersinių deformacijų suvaržymo.

Darbo rezultatų aprobavimas

1. Pranešimas 18 – oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ sekcijoje „Statyba“, 2015 metų kovo 19 dieną Vilniuje. Pranešėjas Povilas Petruškevičius, tema „Plieninio apvalkalo įtaka mūro įtempių būviui“.
2. Parengtas straipsnis „Plieniniu apvalkalu sustiprinto mūro laikomosios galios tyrimas“, Povilas Petruškevičius.

Darbo struktūra

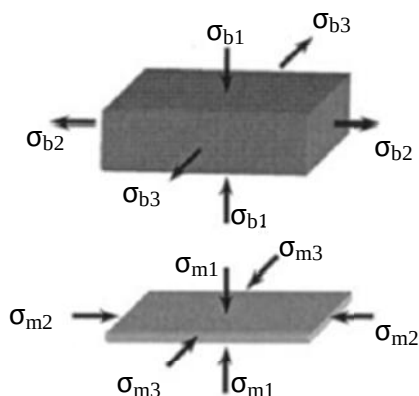
Darbą sudaro 5 skyriai, kuriuose nagrinėjama nesustiprinto mūro elgsena, galimi mūro pažeidimai, mūro stiprinimo būdai ir skaičiavimo metodikos, atliekamas sustiprinto mūro elgsenos tyrimas. Darbe pateikti 54 paveiklai ir 20 lentelių.

1. GNIUŽDOMOJO MŪRO ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ BŪVIS

Skirtingų nestiprinto mūro tipų mechaninė elgsena paprastai apibūdinama viena bendra savybe: labai mažu tempiamuoju stiprumu. Ši savybė yra tokia svarbi, kad ji nulemdavo senųjų mūro konstrukcijų formą iki XIX a. Mūro elementų galime surasti beveik visų tipų statiniuose, visame pasaulyje, tokį populiarumą lėmė maža šios medžiagos kaina, geros garso ir šilumos izoliavimo savybės, prieinamumas. Nuo pat pradžių, mūras naudojamas atlaikyti vien gniuždymui, kaip tai yra įprasta ir dabar, nebent naudojame armuotą arba įtemptąjį mūrą (Zucchini 2006). Tik per pastaruosius 50 metų mokslinės žinios apie mūro mechaniką leido mokslininkams prognozuoti mūrinių kolonų, arkų, sienų elgseną. Mūro elgsenos modeliavimas baigtiniais elementais ir kitais matematinio diskretizavimo metodais, kartu atliekant laboratorinius bandymus, leido plačiai ištirti mūro suirimo pobūdį, priežastis ir elgseną (Aprile, 2001; Kaushik 2007).

Mūras paprastai yra neelastinga, nehomogeniška ir anizotropiška medžiaga, sudaryta iš dviejų medžiagų kurios turi gana skirtingas savybes. Mūras yra labai silpnas tempiant, nes jį sudaro mūro gaminiai (plytos, blokėliai), kurie yra sudėti tam tikra tvarka ir tarpusavyje bendram darbui sujungti skiediniu. Daugeliu atvejų mūro mechaninės savybės nulemia mūro gaminių ir gulsčiųjų siūlių skiedinio kontakto (sąlyčio) savybės. Mūras pasižymi pakankamu gniuždomuoju stipriu ir nedideliu tempiamuoju stipriu. Kaip minėta, mūras dažniausiai naudojamas gniuždomiems konstrukciniams elementams. Daugelyje skaitinių ir teorinių analizių gerai išnagrinėta sąveika tarp skiedinio ir plytų ir ryšys tarp įtempių pasiskirstymo, kuris turi būti žinomas su pakankamai tiksliai, kad būtų galima nustatyti suirimo pobūdį. Gniuždomojo mūro mechaninės savybės ir elgsena priklauso nuo sąveikos tarp plytų ir skiedinio, nes šios medžiagos turi skirtingas deformacines savybes. Nuo skirtingų mūro gaminių ir skiedinio deformacinių savybių labai priklauso gniuždomojo mūro suirimo pobūdis: mūras gali suirti atsiradus plyšiams, kurių kryptis lygiagreti jėgos veikimo kryptčiai ar šlyties išilgai silpnųjų siūlių (Aprile, 2001; Berto, 2005; Kaushik 2007). Dažniausiai mūrai naudojami mūro gaminiai yra stipresni ir geresnių mechaninių savybių nei naudojamas skiedinys, todėl dažniausiai gniuždomasis mūras pradeda irti dėl mūro gaminiuose sukeliama tempimo įtempių. Šiuo atveju dėl horizontalių skiedinio deformacijų suvaržymo skiedinyje sukeliamas triašis gniuždymo įtempių būvis, mūro gaminiuose – gniuždymo ir dviašio tempimo įtempių būvis (žr. 1.1 pav.). Dėl tokio įtempių būvio gniuždomajame mūre gaunama, kad skiedinio stipris mūre yra didesnis nei jo kubinis

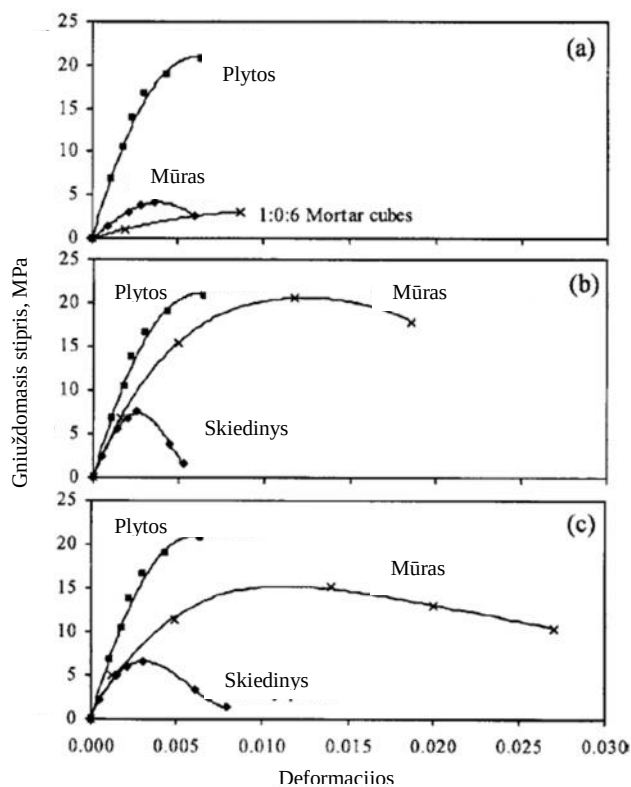
gniuždomasis stipris, bet viso mūro stipris gaunamas mažesnis nei mūro gaminių gniuždomasis stipris (Berto, 2005).



1.1 pav. Triašis įtempių būvis plytų ir mūro sąlyčio vietoje gniuždomame mūre (Kaushik, 2007)

Paprastai yra manoma, kad mūro gniuždomojo stiprio vertė yra tarp plytų ir skiedinio stiprių verčių, dažniausiai taip ir yra, tačiau kai skiedinio stipris yra artimas plytų stipriui ar net didesnis už plytų stiprį, gaunami kitokie rezultatai. Remiantis Sarangapanio ir kt. (Sarangapani *et al* 2002) pateikto tyrimo medžiaga, galima teigti, kad mūrai naudojant nedidelio stiprio ir mažo tamprumo modulio ($E=500 \text{ MPa}$) plytas, jose yra gaunamas triašis gniuždymas, o gulsčiosiose skiedinio siūlėse sukeliama ašinis gniuždymas ir tempimo įtempiai horizontaliaja kryptimi. Tokia mūro elgsena yra visiškai priešinga, kai yra

naudojamos stipresnės už skiedinį plytos. Sarangapanio 2005 metais atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad kai buvo naudojamos silpnos ir mažo tamprumo modulio plytos ($E=500 \text{ MPa}$) ir keičiama siūlių skiedinio klasė, mūro gniuždomasis stipris didėja, kai yra gaunama geresnė plytų ir skiedinio sukibtis. Gerėjant plytų ir skiedinio sukibčiai, buvo gautas ne tik mūro gniuždomojo stiprio, bet ir kitų rodiklių didėjimas. H. B. Kaushiko (Kaushik 2007) atlikti tyrimai parodė, kad stiprių plytų ir silpno skiedinio mūro gniuždomasis stipris yra mažesnis už mūro gniuždomąjį stiprį. Tačiau atvejais kai panaudoti vidutinio



1.2 pav. Plytų, skirtingo stiprumo skiedinio ir mūro įtempių deformacijų kreivių palyginiams: a - silpnas⁶ skiedinys; b - stiprus skiedinys; c - vidutinio stiprumo skiedinys (Kaushik 2007)

stiprumo ir labai stiprūs skiediniai, gauta, jog bendras mūro stipris yra mažesnis ir už plytų ir už skiedinio stiprius (žr. 1.2 a pav.), gautos mūro įtempių ir deformacijų diagramos yra žemiau už panaudotų medžiagų įtempių ir deformacijų diagramas. Šiais eksperimentais nustatyta, kad naudojant sudėtinius skiedinius su kalkių priedais, gauta geresnė skiedinio siūlės elgsena: deformacijos prieš suirimą buvo maždaug 45 % didesnės, nei stipriuosiuose skiediniuose, nors gniuždomasis skiedinio stipris buvo apie 35 % mažesnis. Dėl šių priežasčių pasikeitė ir gniuždomojo mūro elgsena. Mūro deformacijos yrant buvo 50 % didesnės, o bandinio stipris tik 13 % mažesnis, nei mūro bandiniuose su stipriaisiais skiediniais. Nors visuose autorių bandymuose yra naudojami labai skirtingo stiprio mūro gaminiai ir skiediniai, mūro bandinių suirimo charakteris beveik visada išlieka toks pat, t. y. mūro bandiniai suyra atsiradus plyšiams, lygiagretiems su gniuždančios su jėgos veikimo kryptimi (žr. 1.3. pav).



1.3 pav. Centriškai gniuždomojo mūro suirimo charakteris (Castori 2014; Aiello 2009)

Mūro gniuždomasis stipris gali būti išreiškiamas darant prielaidą, kad horizontalių įtempių pusiausvyra priklauso nuo gulsčiosios skiedinio siūlės storio, mūro gaminio aukščio, siūlės skiedinio sąveikos su mūro gaminiu. Tempiamieji mūro gaminių (plytų) įtempiai, gali būti randami iš pusiausvyros sąlygos:

$$k \cdot s_{hm} \cdot h_m = -s_{hb} \cdot h_b, \quad (1)$$

čia h_m ir h_b yra skiedinių siūlių ir plytų storiai, s_{hm} ir s_{hb} atitinkami horizontalieji įtempiai, k – koeficientas, kuris įvertina skiedinio ir mūro gaminio sąveiką.

Priėmus prielaidą, kad vertikalieji įtempiai yra vienodi, (1) sąlyga gali būti užrašyta taip:

$$\frac{1}{E_m} \left((1-u_m) s_{hm} - u_m \overline{s_v} \right) = \frac{1}{E_b} \left((1-u_b) s_{hb} - u_b \overline{s_v} \right), \quad (2)$$

čia u_m ir u_b yra skiedinio ir plytų Puasono koeficientai, $\overline{s_v}$ vertikalieji įtempiai.

Iš (1) ir (2) lygčių gali būti išreiškiami tempiamieji įtempiai s_{hm} ir s_{hb} :

$$s_{hm} = \frac{u_m - \frac{u_b}{r}}{1 - u_m + (1 - u_b) \frac{k}{r} \frac{h_m}{h_b}} \overline{s_v}; \quad (3)$$

$$S_{hb} = -S_{hm} k \frac{h_m}{h_b}; \quad (4)$$

čia r yra santykis E_b/E_m , o k anksčiau aptartas koeficientas, kurio vertė yra priimama nuo 1 iki 2. 1 yra priimamas pažeistoms kolonomis, 2 – vientisoms.

Funkcija, priklausanti nuo koeficiento k :

$$\Phi(k) = \frac{u_m - \frac{u_b}{r}}{1 - u_m + (1 - u_b) \frac{k}{r} \frac{h_m}{h_b}}. \quad (5)$$

Tuomet (3) ir (4) formules galima užrašyti:

$$S_{hm} = \Phi(k) \cdot \overline{S_v}; \quad (6)$$

$$S_{hb} = -k \cdot \Phi(k) \cdot \frac{h_m}{h_b} \overline{S_v}. \quad (7)$$

Galima pastebėti, kad funkcija $\Phi(k)$ nedaug priklauso nuo koeficiento k kitimo, nes gaunama didelė santykio vertinančio mūro medžiagos r vertė. Taigi kitas priartėjimas gali būti užrašomas taip:

$$S_{hm} = \Phi(1) \cdot \overline{S_v}; \quad (8)$$

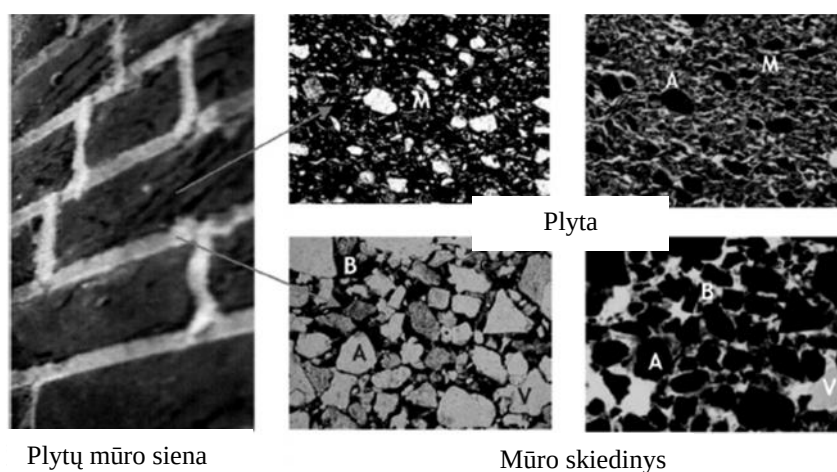
$$S_{hb} = -\Phi(1) \cdot \frac{h_m}{h_b} k \cdot \overline{S_v} = -Z \cdot k \cdot \overline{S_v}; \quad (9)$$

(9) formulėje yra išreikšti horizontalieji įtempiai mūro gaminiuose kaip vertikaliųjų įtempių tiesinė funkcija, su pasirinktu įvestu suirimo kriterijumi (Aprile, 2001).

Taigi, mūro pagaminto iš skirtingų mechaninių savybių plytų ir skiedinio elgsena, stipris ir suirimas gali stipriai skirtis. Mūro stiprį lemia naudojamo skiedinio stipris, plytų stipris ir jų sukibimo sąlygos. Paprastai mūras suyra nuo horizontaliųjų tempimo įtempių plytose, kuriuos sukelia skiedinio siūlės. Tuo tarpu, skiedinio stipris mūre dažniausiai yra didesnis už jo kubelinį stiprį, nes dėl skirtingų skiedinio ir plytų deformacinių savybių, skiedinys mūre yra apgniuždomas horizontaliomis kryptimis.

2. GNIUŽDOMOJO MŪRO PAŽAIIDOS

Plytų mūro medžiagų (skiedinio ir mūro gaminių) patvarumas priklauso nuo įvairių juos sudarančių medžiagų cheminių, fizinių ir mechaninių savybių stabilumo eksploatacijos metu. Savybių blogėjimas dažniausiai prasideda nuo nepastebimų mikrostruktūros pokyčių. Šie pokyčiai gali lėtai veikti mūro medžiagas, kol procesas išsiplečia tiek, kad jo požymiai pasireiškia išorinėje struktūroje. Blogėjantis mūro skiedinio ar mūro skiedinio ir mūro gaminių bendras darbas daugiausiai priklauso nuo jų mineralinės sudėties ir vidinės struktūros. Plika akimi plytos ir skiedinys atrodo kaip tanki, homogeniška ir vandeniui nepralaidi struktūra, bet mikrostruktūroje ji turi ertmių ir netolygumų (žr. 2.1. pav.), kurie gali turėti įtakos mūro ilgalaikiškumui (Larbi 2004).



2.1 pav. Plytų mūro mikrostruktūra: A – užpildas, B – rišamoji medžiaga, M – matrica; V –tuštuma. (Larbi 2004)

Išskiriama, kad mūro defektus galima skirstyti į technologinės kilmės ir atsiradusius naudojimo metu (Jokūbaitis *et al* 2012). Mūro irimo būdus galima išskirti kaip mūro eroziją ir koroziją. Periodiškas, mechaninis ardymas – erozija, o ardymas dėl cheminių procesų – korozija. Mūre erozija pagreitina korozijos procesus, t.y. palaipsniui pereina į koroziją. R.P.J. van Heesas (Hees 2004) išskiria mūro irimą (eroziją ir koroziją) lemiančias priežastis ir faktorius:

Pagrindiniai faktoriai, susiję su aplinka, yra šie:

- Drėgmės patekimas: lietus, vandens įgertis iš grunto ar žemės paviršiaus, tirpstantis sniegas, potvyniai.
- Druskų patekimas iš grunto, gruntinių ar paviršinių vandenų, pastate saugomų medžiagų (nuolatinės druskų saugyklos), per orą, potvynius, apledėjimą.
- Oro užterštumas.

- Temperatūrų svyravimai ir ekstremumai.
- Ugnies poveikiai.
- Dinaminės apkrovos (žemės drebėjimai, vėjas, transportas...).

Pagrindiniai faktoriai dėl panaudotų medžiagų:

- Skiedinio sudėtis.
- Plytų savybės.
- Druskų buvimas medžiagose.

Nuo projektavimo priklausantys faktoriai:

- Pagrindinis statinio projektas ir vėlesni jo pakeitimai.
- Medžiagų parinkimas.
- Pastato išdėstymas.
- Remonto metodų ir medžiagų parinkimas.

Nuo statybos darbų priklausantys faktoriai:

- Projekto įvykdymo kokybė.
- Skiedinio paruošimas statybvietyje.
- Medžiagų kietėjimas.
- Nesukietėjusio skiedinio apsauga.
- Darbų atlikimo kokybė.

Taigi, matome, kad mūro ilgaamžiškumą ir savybes eksploatavimo metu lemia daug veiksnių, todėl projektuojant mūrą ir eksploatuojant mūrines konstrukcijas reikia atsižvelgti į galimas pažaidų priežastis, dėl kurių vėliau gali atsirasti papildomos didelės išlaidos reikalingos mūro gaminiams stiprinti.

2.1. Technologiniai mūro defektai

Technologiniai mūro defektai atsiranda dar iki pastatų pradedant eksploatuoti, t.y. statybos stadijoje. Prie šių defektų priskiriama sienų, stulpų, kolonų matmenų nuokrypos, nepakankama perriša mūro trumpainiais, prasta mūro siūlių kokybė, nepakankamas mūro gaminių ar skiedinio stipris, skersinio armavimo nuokrypos ir įvairūs konstrukcijų susilpninimo atvejai. Mūro konstrukcijų matmenų nuokrypos gali atsirasti mūrijant esant neigiamai temperatūrai, dėl panaudotų skirtingų savybių mūro gaminių, kai mūrijamos sluoksniuotosios sienos, dėl drėgmės ir šalčio poveikio. Tokiu atveju mūro sienose atsiranda papildomi ekscentricitetai, kurie gali sukelti sienų pleišėjimą ir dar didesnes deformacijas. Bloga gulsčiųjų siūlių kokybė yra tuomet, kai mūrijant bendrosios paskirties skiediniu, siūlės padaromos didesnio nei 15 mm arba mažesnio nei 10 mm storio. Iš ankstesnių skyrių jau

žinoma, kad įtempiai mūro gaminiuose ir mūro stipris priklauso nuo siūlių storio. Kuo storesnė siūlė, tuo santykinai yra didesnės ir jos skersinės deformacijos, kurios padidina mūro supleišėjimo ir irties tikimybę. Pavyzdžiui, kai gulsčiosios siūlės storis yra didesnis nei 20 mm ir skiedinys yra žemesnės nei M2,5 klasės, mūro laikomoji galia gali sumažėti 20 %. Neužpildytos skiediniu stačiosios siūlės, mūro stiprį gali sumažinti iki 10 %. Mūro gaminių defektai: stipris mažesnis už projektinį, matmenų nuokrypos, paviršiaus nelygumai - gali labai sumažinti mūro stiprį, atsparumą šalčiui bei eroziniais ir koroziniais poveikiams. Sumažinus mūro gaminių stiprį viena pakopa, mūro laikomoji galia gali susilpnėti iki 17 %. Įrengiant inžinerinius tinklus dažnai sumažinamas mūro konstrukcinių elementų skerspjuvis. Dviejų plytų storio sienos šviežiame mūre padarytas gulsčias pusės plytos gylio griovelis gali sumažinti sienos laikomąją galią 50 %, o 60 mm gylio – 21 % (Jokūbaitis *et al* 2012).

Visos technologinės nuokrypos nuo projektinių vėliau turi didelę įtaką mūro stipriui ir todėl mūras dar eksploatacijos pradžioje nebėra projektinio stiprio, dėl ko vėliau gali atsirasti plyšiai ar neleistini poslinkiai.

2.2 . Pažaidos, atsiradusios naudojimo metu

Dažniausiai naudojimo metu atsirandanti mūro pažaida yra mūrinių konstrukcijų pleišėjimas. Plyšių orientacija ir jų atsivėrimo priažastys gali būti įvairios: gniuždomųjų mūrinių konstrukcijų statieji plyšiai dėl perkrovos, sienų įstrižieji ir statieji plyšiai dėl pamatų nuosėdžių, statieji plyšiai dėl temperatūros ir drėgmės poveikio, plyšiai lenkiamųjų elementų galuose ir išplitę nuo elemento galo link atramos krašto, plyšiai dėl sienų vertimo arba skėtimo jėgų, normaliniai plyšiai, atsiradę mūrinių skliautų, arkų ir arkinių sąramų apačioje dėl perkrovos, atramų skečiamojo poslinkio.

Priklausomai nuo perkrauto mūro gniuždomųjų įtempių didumo, atsiveria pavieniai statieji plyšiai per vieną dvi plytų mūro eiles. Didėjant apkrovai šie plyšiai ilgėja ir paskutinėje irimo stadijoje kerta daugiau nei aštuonias plytų mūro eiles, apkrovos veikimo linkme suskaldydami mūrą į atskirus 120 - 200mm pločio stulpelius (Jokūbaitis *et al* 2012).

Paviršinius mūro sluoksnius dažnai pažeidžia erozija ir korozija. Erozijos procesai, tokie kaip vėjo ir vandens išplovimas, veikia ir mūro gaminius, ir mūrą, bet ardymo procesai greičiausiai pasireiškia minkštesniajame iš jų. Šalčio poveikis ir druskų kristalizacija yra sudėtiniai cikliniai erozijos procesai, kurių greitis priklauso nuo porų dydžio ir pasiskirstymo, taip pat nuo ciklų skaičiaus. Druskų kristalizaciją jau galima priskirti prie mūro korozijos, nes kristalizuojantis druskoms mūre jau vyksta cheminiai procesai (Domone 2010). Galima išskirti tris mūro korozijos pasireiškimo tipus. Pirmasis labiausiai pasireiškia

skiedinio siūlėse ir tai yra mechaninė betono struktūros pažeida, kai sudedamosios cementinio skiedinio dalys yra vandens išplaunamos ar ištirpinamos vandens. Antrojo tipo korozija pasireiškia mūro sudedamosioms dalims chemiškai reaguojant su agresyviomis dujomis arba skysčiais. Šio tipo korozijos greičiui poveikį turi aplinkos temperatūra ir drėgnis. Trečiojo tipo korozija, dar vadinama sulfatine korozija, yra tuomet, kai chemiškai reaguojant agresyvioms sulfatinėms druskoms ar rūgštims su mūro sudedamosiomis dalimis, porose susidariusių reakcijos produktų tūris padidėja kelis kartus.

Šalčio sukelta erozija yra reiškinys, kuris vyksta dėl įvairių veiksnių kombinacijos. Šalčio sukelta žala yra viena pagrindinių porėtų medžiagų irimo priežasčių, pasireiškiančių mūro gaminiuose ir skiedinyje, eksploatuojamose normaliomis lauko sąlygomis (žr. 2.2 pav.). Žinoma, tai paveiks bet koki išorės mūrą, bet labiausiai tokį, kuris nuolat yra drėgnoje aplinkoje ar net prisotintas drėgmės. Šaltis skatina mūro eroziją, kai yra užšaldomas jame susikaupęs vanduo. Vanduo, esantis mūro porose, virsta ledu ir plečiasi, susidaro papildomi įtempiai, kurie veikia mūrą ir jį gadina. Mūro absorbuojamo vandens kiekis priklauso nuo naudotų medžiagų kapiliarinių savybių. Nors mūro kapiliarinės vandens įgerties savybės yra ypač svarbios jo elgsenai šaltyje, tačiau eksploatuojamam išorėje mūrai pavojingas ir lietus, kuris krenta įstrižai, t.y. su dideliu vėju. (Domone 2010; Smits 2009).



2.2 pav. Šalčio paveiktas mūras

Išplovimas vyksta tuomet, kai lietaus arba susikondensavęs vanduo, kuriame yra rūgščiųjų atmosferos dujų, tokių kaip SO_2 , NO_x , CO_2 , sąveikauja su mūru ir lemia rūgštyse tirpių mūro skiedinio arba plytų sudedamųjų dalių irimą (daugiausia kalcio hidroksido ir karbonatų), tirpinamos medžiagos kristalizuojasi arba sudaro kitus junginius ir yra pernešamos į kitas mūro vietas. Kai nuosėdos nuslūgsta tiesiai ant plytų paviršiaus, tai vadinama žydėjimu (Scrivner 1997). Kai yra sausa, žydėjimas dažniausiai pasireiškia kaip balta danga ant išorinio mūro paviršiaus (žr. 2.3. pav.). Skiedinio rišamųjų medžiagų tirpdymas didina jo poringumą ir dėl to mūro siūlės tampa dar labiau pažeidžiamos šalčio, drėgmės ir tolesnio išplovimo. Tirpinimas ir išplovimas gali nulemti skiedinio sukibties ir

stiprumo mažėjimą arba didėjančias deformacijas dėl mažėjančio skerspjūvio, o tai gali neigiamai atsiliepti plytų ir skiedinio siūlių sąveikai. Kai ant plytų mūro pasireiškia žydėjimas, tai dažniausiai reiškia ir estetinės mūro išvaizdos pablogėjimą, reiškia prarandamą medžiagą dėl išplovimo (Larbi 2004).



2.3 pav. Mūras, pasidengęs išplautų medžiagų sluoksniu

Kai druskos, tirpios ir netirpios, kristalizuojasi mūro gaminiuose ir skiedinyje, ypač ant ar tiesiai po jų paviršiumi, gali būti sukeliama tokio didumo įtempiai, kad dėl jų atsirastų plyšiai mūre ar vietiniai nedideli įtrūkiai mūro gaminių paviršiuje. Šis procesas laikomas žalojančiu mūrą (Binda 1987). Šios druskos į mūrą gali patekti skirtingais būdais, bet visais atvejais jos yra pernešamos drėgmės. Druskų kristalizacija dažniausiai lydimą dviejų pagrindinių irimo tipų. Mūro gaminiuose, daugiausia mūro plytose, kurios dažnai sušampa nuo lietaus, pasikartojanti netirpių druskų kristalizacija atskiria plytų ar skiedinio daleles, kurios vėliau yra išplaunamos kartu su druskomis per lietų. Taip erozija vyksta palaipsniui nuo mūro paviršiaus. Labiau apsaugotose mūro zonose lieka mažiau druskų ir dažniausiai junginiuose su dulkėmis ir suodžiais iš atmosferos suformuoja stiprų apvalkalą ar plutą. Druskų kristalizacijai progresuojant, pluta palaipsniui didėja ir storėja ir gali galiausiai atskelti pagrindinį nuolaužų sluoksnį (žr. 2.4 pav.) (Larbi, 2004).

Sulfatų poveikis plytoms ir mūro siūlėms pasireiškia, kai sulfatiniai tirpalai reaguoja su trikalčio aliuminatu C_3A , portlandcemenčio sudedamąja dalimi, ir formuojasi junginys, vadinamas etringitu $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$. Ši reakcija yra lydimą junginio plėtimosi, kai ji vyksta mūre, o jos efektas yra bendras mūro plėtimasis, kuris vėliau gali peraugti į progresyvų mūro siūlių suirimą (Gaze 2000).



2.4 pav. Druskų kristalizacijos pažeistos mūro siūlės ir ištrupėjusios plytos

Buvo apžvelgta visa eilė mūro pažeidimų galinčių atsirasti eksploatacijos metu. Pažeidimų kilmė yra nuo mechaninio ardymo iki cheminio, tačiau visi šie pažeidimai atsiranda dėl neteisingos pastato eksploatacijos ar projektavimo klaidų.

2.3. Eksploatuojamo mūro būklės įvertinimas

Kai ankstesniuose skyriuose aptartų mūro pažaidų įvertinti negalima, taikant įprastines projektavimo normų formules, siūloma faktinę pažeistos konstrukcijos laikomąją galią $N_{R,act}$ apskaičiuoti pagal (10) išraišką (Jokūbaitis *et al* 2012):

$$N_{R,act} = N_{Rd} b, \quad (10)$$

čia N_{Rd} – pagal projektavimo normas apskaičiuota konstrukcijos laikomoji galia, imant būklės tyrimais nustatytas realias mūro medžiagų stiprio, konstrukcijos skerspjūvio ploto ir kitų matmenų reikšmes;

b - koeficientas, kuriuo, priklausomai nuo defektų ar pažaidų rūšies, mažinama konstrukcijos laikomoji galia.

Kai mūre yra nuo perkrovos atsiradę statieji plyšiai, priklausomai nuo jų ilgio ir išsidėstymo, koeficiento β reikšmė kinta nuo 0,5 iki 1. Vertinant mūrą, kuriame yra technologiniai mūrijimo defektai (nėra perrišos, neužpildytos stačiosios siūlės, gulsčiųjų siūlių storis kintantis), koeficientas β kinta nuo 0,75 iki 1. Paveiktam gaisro mūrui, priklausomai nuo sienų ar stulpų matmenų, koeficientas β kinta nuo 0,7 iki 1.

Silpnoms mūro pažaidoms priskiriamos pažaidos, kurios mūro laikomąją galią sumažina iki 15 %. Tokiems defektams priskiriamos šalčio ir erozijos sukeltos pažaidos, sienos apdailinio sluoksnio pažaida (iki 15 % sluoksnio storio); iki 5 mm gaisro pažeistas mūro sluoksnis; statieji ir įstrižieji mūro plyšiai, kertantys ne daugiau kaip dvi mūro eiles. Kai pažaidos priskiriamos prie silpnų, rekomenduojama atlikti patikrinamuosius laikomosios galios skaičiavimus ir, jei laikomoji galia pakankama, mūro stiprinti nereikia.

Vidutinėms mūro pažaidoms priskiriamos pažaidos, kurios mūro laikomąją galią sumažina iki 25 %. Tokiems defektams priskiriamos šalčio ir erozijos padarytos pažaidos,

sienos apdailinio sluoksnio pažaida (iki 25 % sluoksnio storio); iki 20 mm gaisro pažeistas mūro sluoksnis; statieji ir įstrižieji plyšiai, kertantys ne daugiau kaip keturias mūro eiles; vietinė mūrinių atramų pažaida iki 20 mm gylio; sienų posvyris ar išlinkis aukšte iki 1/6 jų storio. Šiuo atveju, esant vidutinėms mūro pažaidoms, atliekami patikrinamieji laikomosios galios skaičiavimai ir įrengiami laikinieji ir nuolatiniai konstrukcijų sustiprinimai.

Stiprioms mūro pažaidoms priskiriamos pažaidos, kai mūro laikomoji galia yra sumažėjusi iki 50 %. Tokiems defektams yra priskiriamos pažaidos, kai iki 40 % sienos storio yra pažeista šalčio, erozijos ar korozijos; statieji ir įstrižieji plyšiai, kertantys ne daugiau kaip aštuonias mūro eiles; sienų posvyriai ir išlinkiai, labai padidinantys apkrovos pridėties ekscentricitetą; vietinė mūro pažaida viršija 20 mm gylį; gaisro pažeistas 50–60 mm storio mūro sluoksnis. Tuomet atliekami patikrinamieji skaičiavimai, pažeistos konstrukcijos turi būti stiprinamos.

Avarinės būklės pažaidos yra visos pažaidos viršijančios ankščiau paminėtas stiprias mūro pažaidas. Šiuo atveju konstrukcijos turi būti išmontuotos arba išramstytos ir sustiprintos.

2.4. Skyriaus išvados

Atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad:

Technologinės kilmės mūro pažaidos lemia tai, kad mūras jau eksploatacijos pradžioje gali būti mažesnio stiprio nei projektinis, dėl ko vėliau konstrukcijose gali atsirasti neleistini plyšiai ir poslinkiai.

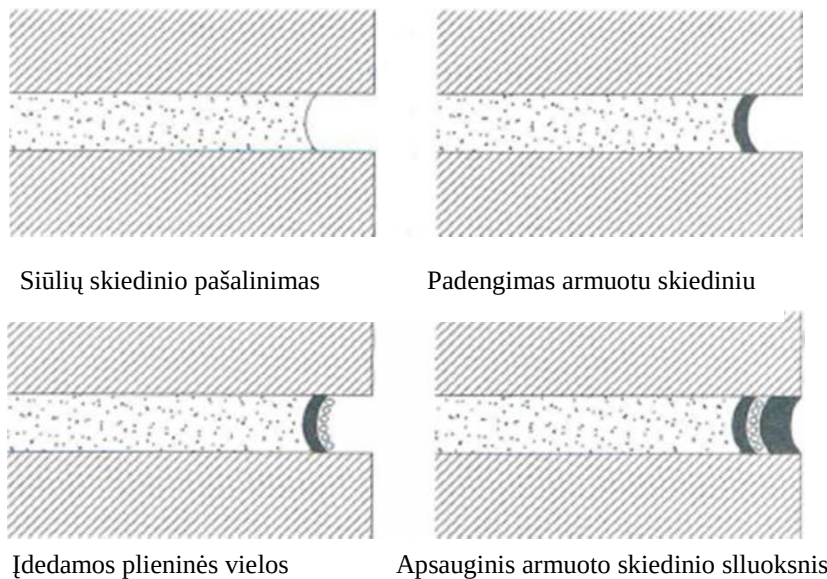
Dėl neteisingos pastato eksploatacijos ar projektavimo klaidų susidaro mechaninės ar cheminės kilmės mūro pažaidos dėl kurių, mažėja mūro stipris, prastėja išvaizda.

3. MŪRO STIPRINIMO BŪDAI

3.1. Stiprinimas plieninėmis vielomis

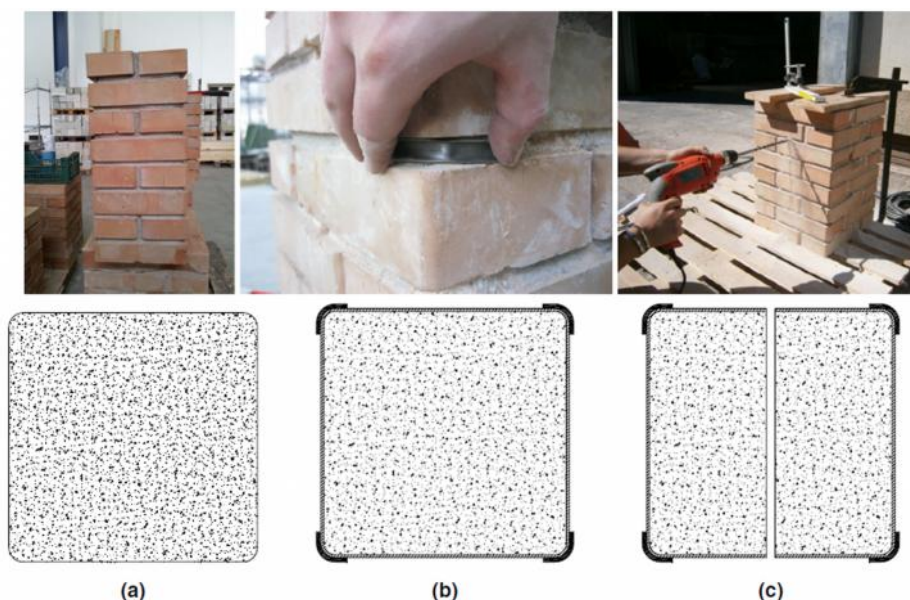
Dažniausiai įvairiais būdais stiprinant mūrines konstrukcijas yra pakeičiamas bendras jų vaizdas, nebebūna matyti mūro plytų ir siūlių, nes jos būna paslepiamos po apvaskalais ar užtinkuojamos kai įrengiami plieniniai apvaskalai. Jurina (2010) pasiūlė mūriniams kolonomis stiprinti naudoti plienines vielas arba lynus. Kai naudojami mažo skersmens (1–3 mm) nerūdijančio plieno lynai, jie tarpusavyje sudaro iš dalies persidengiančias kilpas, kurios sutampa su mūro siūlėmis. Taikant šį metodą praktiškai nepakeičiama mūrinės konstrukcijos išorė, todėl šis metodas yra labai tinkamas pastatams, kurie yra priskirti paveldo grupei ir jų konstrukcijų išvaizda negali būti keičiama ar aptaisoma apvaskalais.

Šio metodo efektyvumą savo tyrimuose nagrinėjo A. Borri (2013) ir G. Castori (2014). Nagrinėdami šį metodą autoriai teigia, kad norint padidinti jo efektyvumą galima plienines vielas papildomai iš anksto įtempti. Tuomet mūro stiprinimo priemonės jau dirbtų aktyviai ir iškart įsitruktų į bendrą darbą su mūru. Lynus siūloma įtempti apie 10 % jų tempiamojo stiprio. Toks įtempimo procentas yra parinktas dėl dviejų priežasčių. Pirmiausia tiek įtempti vielas yra nesudėtinga statybvietėje ir nereikalinga didelė įranga. Antra, kadangi yra tiesioginis kontaktas tarp mūro siūlių ir plieninių vielų, didesnė vielų įtempimo jėga sukuria ir didesnę sąveikos tarp skiedinio ir vielų slėgį, dėl kurio įtempiant gali atsirasti vietinių pažaidų mūro siūlėse.



3.1 pav. Apgaubimas nerūdijančio plieno vielomis (Borri 2013)

Stiprinimas atliekamas etapais (3.1 pav.). Pirmiausia yra pašalinama apie 10 – 20 mm skiedinio iš siūlių. Tuomet nedideliu polimerinėmis arba itin mažo skersmens plieninėmis fibromis armuoto skiedinio sluoksniu yra padengiamas išpjautų siūlių paviršius ir nerūdijančio plieno vielos yra įdedamos į kiekvieną siūlę. Galiausiai siūlės yra galutinai užpildomos armuotu skiediniu, kuris galutinai paslepia vielas.



3.2 pav. Sustiprinimo įrengimo schema; a - paruošiamos siūlės ir užapvalinami kampai; b - padengiamos armuotu skiediniu ir uždedami metaliniai kampai; c - išgręžiama skylė kiaurai skerspjūvį (G.Castori, 2014)

Kai norima įtempti vielas, yra naudojamos didesnio skersmens vielos, iki 3 mm. Šiuo atveju viela yra dedama į kiekvieną siūlę ir kai viela yra apvyniojama aplink koloną, jos galai yra perkišami per kolonos mūro siūlėje išgręžtą skylę (3.2 pav.) ir tuomet įtvirtinama įtempimo įrenginyje. Įtempinama naudojant rankinį prietaisą. Vielos užinkaruojamos kolonoje užinjektuojant išgręžtą skylę skiediniu, o po maždaug 24 valandų vielos atleidžiamos.

G.Castori (2014) straipsnyje rekomenduojama mūro siūlių kampus suapvalinti (spinduliu apie 20 mm) prieš dedant vielas, kad būtų galima išvengti įtempių koncentracijos. Suapvalinimo kampuose rekomenduojama uždėti plieninius kampus, kad įtempiamos vielos nestrigtų kampuose ar jų nesugadintų.

A. Borri (2013) ir G. Castori (2014) atliktų bandymų rezultatai naudojant šį stiprinimo metodą parodė, kad taip sustiprinus kolonas pasikeičia jų suirimo pobūdis ir mechaninė elgsena gniuždant. Tačiau kolonų suirimas visais atvejais įvykdavo dar prieš nutrūkstam plieninėms vieloms. Straipsniuose toks suirimas aiškiamas skirtingomis deformavimosi sąlygomis tarp plytų ir skiedinio siūlių. Paprastai, gniuždant mūrą, skiedinio siūlės plečiasi, tačiau šiuo atveju plieninių vielų kilpos ir sukibimo jėgos su plytomis sulaiko šias deformacijas, tačiau tempimo įtempiai vis tiek sukeliami plytose. O tempimo įtempiams

pasiekus ribinius, bandiniuose susiformuoja vertikalūs plyšiai. Iki pat bandinių suirimo pastebėtas plyšių skaičiaus ir plitimo augimas, bet, lyginant su nestiprintais bandiniais, gaunami labiau išsisklaidę ir plonesni plyšiai per visą koloną.

G.Castori (2014) pateikti bandymų rezultatai rodo aiškų bandinių stiprio padidėjimą. Kai buvo naudojama po vieną iš anksto neįtemptą vielos kilpą kiekvienai siūlei, aštuonkampio skerspjūvio kolonų bandiniuose stipris padidėjo 24 %, o tokio pat tipo bandiniuose, tik su iš anksto įtempta viela, buvo gauta, kad stipris padidėjo 29 %, lyginant su nestiprinto mūro bandiniais. Kai buvo naudojama persidengiančios kilpos, gauta, kad aštuonkampio skerspjūvio bandinių stipris padidėjo 38 %. Tačiau A. Bori 2013 metais atlikto bandymo metu, buvo gauti geresni stiprio padidėjimo rezultatai, tokiam pat skerspjūviui buvo gauta stiprio padidėjimas nuo 123 % iki 143 %, o kai buvo naudotos persidengiančios kilpos – 196 %. A. Borri (2013) atliktuose tyrimuose stiprinimo viela visais atvejais buvo iš anksto įtempta. Kvadratinio skerspjūvio kolonose gaunamas mažesnis stiprio padidėjimas. A. Borri bandymuose gautas vidutinis stiprio padidėjimas siekė apie 70 %, kai buvo stiprinama persidengiančiomis vielomis, nors buvo gauta ir geresnių rezultatų kai stiprio prieaugis siekė iki 97 %. G.Castori bandymuose kvadratinio skerspjūvio kolonose gautas stiprio padidėjimas buvo 30 – 50 %. Prasčiausi bandymų rezultatai visose mokslininkų studijose gaunami su stačiakampio skerspjūvio kolonomis. A. Borri (2014) stiprio padidėjimą tokio skerspjūvio kolonose, naudojant vienos arba persidengiančių vielų sistemą, atitinkamai gavo 84 % ir 61 %, o G. Castori (2014) maksimalus bandymo rezultatas su stačiakampio skerspjūvio kolonomis buvo 12 %.

Taigi, bandymų rezultatai rodo, kad šis stiprinimo būdas gali būti naudojamas gniuždomiems mūriniams elementams stiprinti. Sustiprinimo procedūra yra paprasta, o mokslininkų atlikti tyrimai rodo, kad gaunamas didelis stiprio padidėjimas. O sustiprintų mūro stulpų išvaizda praktiškai nepakeičiama.

3.2. Stiprinimas anglies arba stiklo pluošto apvalkalais

Dar vienas plačiai taikomas mūrinių kolonų stiprinimo metodas yra kolonų apvyniojimas armuotais polimeriniais apvalkalais. Šiam stiprinimui dažniausiai naudojami didelio stiprio stiklo arba anglies pluoštu armuoti polimeriniai apvalkalai. Konstrukcijas sustiprinti nepakeičiant jų architektūrinės vertės, formos ar elemento svorio tradicinėmis priemonėmis yra sudėtinga. M. A. Aiello ir kt. (Aiello *et al.* 2009) išskiria tokius kolonų apgaubimo pluoštais armuotais polimeriniais apvalkalais (angl. FRP – fiber reinforced polymers) privalumus, lyginant su tradiciniais stiprinimo būdais: kolonos skerspjūvio plotas

nepadidėja; kolonų masė praktiškai nepakinta; mažas apvalkalų svoris reiškia, kad įrengimas yra greitesnis, lengvesnis ir ne toks pavojingas jas įrengiančiam personalui, negu stiprinant tradiciniais būdais. Apvalkalo įrengimo žingsniai:

- nuo kolonos paviršiaus nuvalomos ir pašalinamos pašalinės medžiagos, aštrūs išsikišimai, kad būtų užtikrintas geras dervos ir mūro sukibimas;
- rekomenduojama nusklembti skerspjūvio kampus spinduliu 20–25 mm, kampų nusklembimas rekomenduojamas M. J. Masia (2003), M. A. Aiello (2009), M. Corradi (2006), F. Micelli (2007) straipsniuose, o vadovaujantis Italijos normų CNR DT 200/2004 dalimi 4.5.2.1.4, kampų nusklembimas, stiprinant mūrinės kolonas FRP apvalkalais, yra privalomas (kampų nusklembimas padidina efektyvųjį skerspjūvio suvaržymo plotą ir sumažina įtempių koncentracijas apvalkale ties kampais);
- tolygiai vientisu epoksidinės dervos sluoksniu padengiamas kolonos paviršius, šiam sluoksniui susigėrus į koloną – operacija kartojama;
- vyniojamas FRP, kurio pluošto orientacija turi būti parenkama statmena jėgos pridėjimo krypčiai, rekomenduojama, kad pluošto vyniojimo sluoksniai vertikaliai persidengtų 50 mm, o horizontalios užlaidos būtų bent 200 mm, taip yra užtikrinamas apvalkalo efektyvumas. Tokiu būdu įrengtas apvalkalas dirbs pasyviai, t.y. esant mažoms apkrovoms mūro plėtimasis bus proporcingas Puasono koeficientui ir skersinių deformacijų suvaržymas pradinėje stadijoje bus nedidelis, tačiau didėjant apkrovai apvalkalas įsitraukia į darbą. Siekiant, kad apvalkalas nuo pat naudojimo pradžios įsitrauktų į darbą, naudojamos mašinos, kurios vyniodamas FRP apvalkalą jį iškart įtempia.

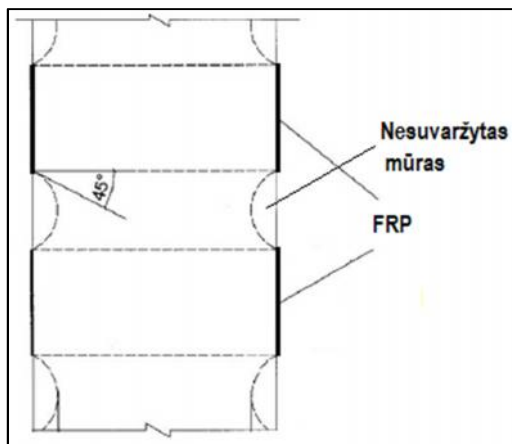
Kaip ir 3.1 poskyryje aprašytas metodas, stiprinimas polimeriniais apvalkalais yra paremtas mūro skersinių deformacijų suvaržymu. Polimerinis apvalkalas neperima gniuždymo jėgos, o tik suvaržo mūro skersines deformacijas. Kolonų stiprinimui gali būti naudojami labai įvairūs armuoti polimeriniai apvalkalai. M. Corradi 2006 metais atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad efektyviausia yra naudoti didelio stiprio anglies pluoštu armuotus polimerinius apvalkalus (CFRP). Naudojant tokius apvalkalus gaunamas didesnis kolonų stiprio padidėjimas, nei panaudojus aukšto tamprumo modulio, bet mažesnio tempiamojo stiprio apvalkalus.

Kolonų stiprinimo CFRP pluoštais efektyvumą apskaičiuoti sudėtinga, kadangi tai yra palyginti naujas metodas, tad ir skaičiavimo metodikos nėra tikslios ir turi daug apribojimų. M. J. Masia (2003) atliko sustiprintų CFRP apvalkalu skerspjūvio matmenų įtakos kolonų gniuždomajai galiai eksperimentinius tyrimus. Didžiausias dėmesys buvo

skiriamas jau pažeistų kolonų stiprinimui, t.y. pirmiausia dar nesustiprintos kolonos buvo gniuždomos tiek, kad jose susidarytų vertikalūs plyšiai (viena kolona iš 18 buvo sulaužyta visiškai, kad būtų nustatyta gniuždomoji galia). Kolonos buvo pažeidžiamos tiek, kad eksploatavimo sąlygose jas jau būtų būtina pakeisti arba stiprinti. Pažeistos kolonos buvo apvyniojamos CFRP apvalkalu per visą aukštį. Tam, kad būtų nustatyta skerspjuvio matmenų įtaka kolonos laikomajai galiai, buvo naudojamos trijų skirtingų skerspjuvio matmenų kolonos, kai kurioms dar buvo papildomai nusklembiami kampai prieš apvyniojant CFRP, o 4 kolonų kvadratinis skerspjuvis buvo pakeistas į apvalų skerspjuvį šį apibetonuojant. CFRP esmė ta, kad jis perima tempimo įtempius, todėl buvo daryta prielaida, kad geriausias efektas bus pasiektas apvalaus skerspjuvio kolonoje. Kaip ir buvo tikėtasi prieš bandymą, jį atlikus buvo nustatyta, kad stiprinimo įtaka mažėja, didėjant kolonos skerspjuviui (tai rodė ir prieš bandymus atlikti mokslininkų skaičiavimai). Skaičiavimams naudotas modelis, kuriame remiamasi tuo, kad CFRP apvalkalo sukeltas apvalaus skerspjuvio koloną varžantis didžiausias slėgis yra tiesiogiai proporcingas apvalkalo tempiamajam stipriui ir apvalkalo storiui, tačiau atvirkščiai proporcingas kolonos skersmeniui. Tai reiškia, kad kai yra naudojamas tokio pat storio ir stiprio apvalkalas, didėjant kolonos skersmeniui, mažėja skerspjuvį varžantis slėgis, o kartu ir mūro stiprio priaugis dėl skersinių deformacijų suvaržymo apvalkalu.

Naudojant FRP pluoštus efektyviausia stiprinti apvalaus skerspjuvio kolonas (Masia 2003; Micelli 2007). J. M. Masia (2003) tyrimais nustatyta, kad sustiprinus CFRP apvalkalu apvalaus skerspjuvio kolonas, jų gniuždomoji galia vidutiniškai padidėja iki 175 %. Šiuo atveju kolonų gniuždomoji galia galėjo padidėti iki 50 % dėl papildomo betono sluoksnio. Įrengus CFRP apvalkalą ne per visą kolonos aukštį, kolonų gniuždomoji galia padidėja iki 93 % (Micelli 2007). Pastarieji tyrimai patvirtina, kad norint pasiekti didžiausią efektyvumą, CFRP apvalkalą reikia įrengti per visą kolonos aukštį. Įrengiant dalinį apvalkalą yra sutaupoma brangaus pluošto, tačiau gaunamas mažesnis mūro stiprio padidėjimas, nes nėra efektyviai suvaržomas visas mūras per skerspjuvio aukštį (3.3 pav.), gaunamos nesuvaržyto mūro zonos, kurių pasiskirstymas per kolonos aukštį pavaizduotas 3.3 pav. Šias zonas galima pavadinti dalinio apvalkalo „silpnąja grandimi“. Kintant atstumui tarp pluošto juostų, atitinkamai kinta ir nesuvaržytos zonos dydis, dėl šios priežasties gali keistis ir mūro elemento suirimo pobūdis. M.A.Aiello ir kitų (2007) atliktų eksperimentų metu buvo užfiksuoti skirtingi tokių bandinių suirimo tipai. Atvejais, kai dalinio apvalkalo ruožai vieni nuo kitų buvo atstumais, lygiais apvalkalo juostų pločiui, bandiniai suirdavo nesuvaržyto mūro zonose, o apvalkalas likdavo nepažeistas. Tačiau kai atstumas tarp apvalkalo juostų

buvo buvo pusė apvalkalo juostos pločio, tuomet suirimas įvykdavo nutrūkus FRP apvalkalo juostai. Toks suirimo tipas būdingas ir bandiniams, kurie yra suvaržyti ištisiniu apvalkalo sluoksniu per visą skerspjūvio aukštį.



3.3 pav. Mūro suvaržymo schema naudojant dalinį apvalkalą

M. Corradi (2006), tirdamas CFRP efektyvumą, nagrinėjo stačiakampio ir aštuonkampio skerspjūvio mūrines kolonas. Lyginant stačiakampio, stačiakampio su nusklembtais kampais ir aštuonkampio skerspjūvio plotų kolonas, didžiausias CFRP efektyvumas buvo gautas aštuonkampio skerspjūvio kolonose, mažiausias – stačiakampio. Šiame tyrime taip pat buvo naudotas skirtingų savybių pluoštas didelio tempiamojo stiprio arba labai aukšto tamprumo modulio, geresni rezultatai buvo gauti naudojant didelio stiprumo pluoštą. Atlikus tyrimus, gauta, kad vidutinis stačiakampio skerspjūvio kolonų stiprio padidėjimas naudojant skirtingus pluoštus buvo 60 %. Taip pat buvo išbandyta prieš vyniojant CFRP pluoštą dar ant kolonos kampų uždėti L formos kampuočius (50 mm pločio ir 2 mm storio) ir tuomet apvynioti CFRP pluoštu. Šiuo būdu buvo gautas vidutinis 20 % papildomas laikomosios galios padidėjimas lyginant su sustiprintomis kolonomis be kampuočių. Aštuonkampio skerspjūvio kolonų vidutinis stiprio padidėjimas naudojant skirtingus pluoštus buvo 125 %, čia stiprio padidėjimą lėmė tai, kad aštuonkampyje skerspjūvyje suvaržyto skerspjūvio naudingas plotas yra gerokai didesnis, nei stačiakampio.

Stiprinant mūrines kolonas polimeriniais apvalkalais yra suvaržomos mūro skersinės deformacijos ir dėl to gaunamas mūro gniuždomojo stiprio padidėjimas. Nors šie apvalkalai turi didelių privalumų, tokių kaip mažas savasis svoris ir paprastas įrengimas, tačiau dažniausiai jų naudojimą apriboja didelė kaina, o sustiprinus polimeriniu apvalkalu mūrinį elementą pakeičiama jo išvaizda ir nebematyti mūro, kas dažnai yra nepageidaujama stiprinant architektūrinę vertę turinčių pastatų konstrukcijas.

3.3 Stiprinimas plieniniu apvalkalu

Plieniniai apvalkalai dažniausiai įrengiami naudojant plieninius kamuočius ir plienines juostas. Šis mūrinių kolonų stiprinimo būdas nuo ankščiau paminėtų skiriasi tuo, kad įrengus plieninių kampuočių apvalkalą yra ne tik suvaržomos mūro skersinės deformacijos, bet ir pats apvalkalas perima vertikalias gniuždančias apkrovas. Tačiau įrengus plieninių kampuočių apvalkalą padidėja konstrukcijos skerspjūvio matmenys ir ženkliai padidėja konstrukcijos savasis svoris, kuris dažniausiai yra nepageidaujamas. Apvalkalo įrengimas taip pat reikalauja nemažų darbo sąnaudų. Apvalkalo įrengimas atliekamas taip:

- paruošiamas stiprinamo elemento paviršius (nuvalomas);
- kampuočių sąlyčio su konstrukcija dalis padengiama cementinio skiedinio arba epoksidinės dervos sluoksniu ir kampuočiai glaudžiai pripsaudžiami prie stiprinamojo elemento;
- kampuočiai tarpusavyje sujungiami metalinėmis juostomis (antdeklais) arba plieninėmis templėmis (prieš virinant antdeklus prie kampuočių jie yra pašildomi iki maždaug 60-80 °C, taip apvalkalas prisipaudžia prie konstrukcijos ir ją apspaudžia).

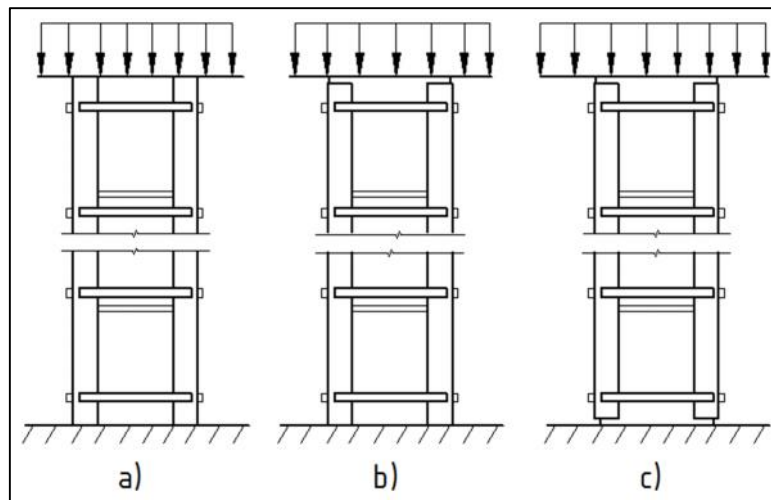
Atstumas tarp plieninių juostų (antdeklų) arba templių parenkamas atsižvelgiant į kampuočių klupumą, mūrinio elemento skersinių deformacijų suvaržymą ir parenkamas mažesnis už mažiausią mūrinio elemento skerspjūvio matmenį (žr. 3.4 pav.) (Malganov A.I. 1990; P.B.Waghmare 2011).



3.4 pav. Kolonos sustiprintos naudojant plieninių kampuočių apvalkalą

Efektyviasias tokio apvalkalo panaudojimo būdas yra kai apvalkalas viršutniame ir apatiniame pjūviuose apkraunamas vertikalia apkrova (3.5 (a) pav.), t.y. kuomet jis gniuždymo apkrovą perima tiesiogiai, o ne per susidarančią trintį tarp apvalkalo ir stiprinamojo mūrinio elemento. Mažiau efektyvus tokio apvalkalo įrengimo būdas, kai

apvalkalui vertikalioji apkrova perduodama viršutiniame arba apatiniame pjūvyje (3.5 (b) pav.), o kitas jo galas yra laisvas. Mažiausią gniuždymo jėgos dalį apvalkalas perima, kai jis nėra tiesiogiai apkrautas gniuždančia jėga, o jos dalį perima tik per trintį su sustiprintu elementu (3.5 (c) pav.).



3.5 pav. Plieninio apvalkalo apkrovimo ir atrėmimo tipai. a – apvalkalas atremtas ir tiesiogiai apkrautas apkrova; b – apvalkalas atremtas, bet tiesiogiai neapkrautas apkrova; c – apvalkalas neatremtas ir tiesiogiai neapkrautas apkrova.

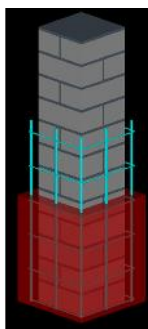
Nors plieniniui apvalkalui įrengti ir reikalingos didelės darbo sąnaudos ir ženkliai padidinamas konstrukcijos savasis svoris, tačiau įrengus tokio tipo apvalkalą galima labai padidinti konstrukcijos laikomąją galią, nes tokio tipo apvalkalas ir varžo skersines mūro deformacijas, ir kampuočiais perima išilginę apkrovą.

3.4. Stiprinimas gelžbetoniniais apvalkalais

Stiprininant gelžbetoniniu apvalkalu (3.6 pav.) kolonos laikomoji galia padidėja dėl kelių priežasčių. Skerine apvalkalo armatūra yra suvaržomos skersinės mūro deformacijos, išilginiai apvalkalo armatūros strypai perima gniuždančios jėgos dalį ir apvalkalo betonas perima gniuždomos jėgos dalį.

Tokio tipo apvalkalo storis yra imamas mažiausiai 60 mm ir gali būti didinamas priklausomai nuo stiprinamojo elemento skerspjūvio matmenų. Šis skerspjūvio matmenų padidėjimas yra bene didžiausias stiprinimo gelžbetoniniu apvalkalu trūkumas. Gaunama, kad pavyzdžiui mūrinės 250x250 mm kolonos skerspjūvio matmenys padidėja iki 370x370 mm, tuo pačiu proporcingai didėja ir konstrukcijų savasis svoris, kas yra nepageidaujama. Išilginės armatūros skersmuo parenkamas Ø6-12 mm, o sankaboms naudojama Ø4-10 mm plieninė armatūra, kurios žingsnis turi būti mažesnis nei 150 mm. Siekiant kuo daugiau suvaržyti mūro skersines deformacijas, geriau naudoti mažesnio skersmens armatūrą skersiniams antdėklams ir ją išdėlioti kuo mažesniu žingsniu, tuomet gaunama, kad mūro elemento skerspjūvis yra

labiau suvaržomas ir sumažinamos nesuvaržytos zonos (Malganov A.I. 1990; P.B.Waghmare 2011).



3.6 pav. Mūro elemento stiprinimo gelžbetoniniu apvalkalu schema

Stiprinant mūrines kolonas gelžbetoniniu apvalkalu reikalingos didelės darbų sąnaudos, o kartu ir stipriai pakeičiama konstrukcijų išvaizda, matmenys ir svoris, dėl šių priežasčių tokio tipo apvalkalas nėra dažnai naudojamas.

3.5. Skyriaus išvados

Skyriuje buvo pateikti keturi mūrinių konstrukcijų stiprinimo būdai, jų įrengimo technologijos, privalumai ir trūkumai. Nustatyta, kad:

Stiprinant konstrukcijas plieninėmis vielomis reikalingos didelės darbų sąnaudos, o mūro stiprio padidėjimas labai priklauso nuo įrengimo būdo ir kolonos skerspjūvio, mokslininkų bandymuose mūrinių elementų gniuždomojo stiprio padidėjimas, esant skirtingoms sąlygoms, kito nuo 12 % iki 196 %. Šio metodo didžiausias privalumas yra tas, kad sustiprinto mūro išvaizda nepakinta.

Mūro elementų stiprinimas sustiprintu polimeriniu apvalkalu yra efektyvus būdas padidinti mūro gniuždomąjį stiprį, didžiausias stiprinimo efektyvumas yra gaunamas apvalaus skerspjūvio elementams, o mažiausias – stačiakampio skerspjūvio, stiprio padidėjimas labai priklauso nuo įrengimo būdo ir naudojamų medžiagų. Stiprinant FRP apvalkalu reikalingos mažos mūro paviršiaus paruošimo darbų sąnaudos, tačiau platų jo panaudojimą riboja didelė kaina.

Stiprinant plieniniu apvalkalu reikalingos didesnės darbo sąnaudos ir ženkliai padidinamas konstrukcijos savasis svoris, tačiau įrengus tokio tipo apvalkalą galima labai padidinti konstrukcijos laikomąją galią, nes apvalkalas varžo skersines mūro deformacijas ir kampuočiais perima išilginę apkrovą, todėl yra naudojamas dažniausiai.

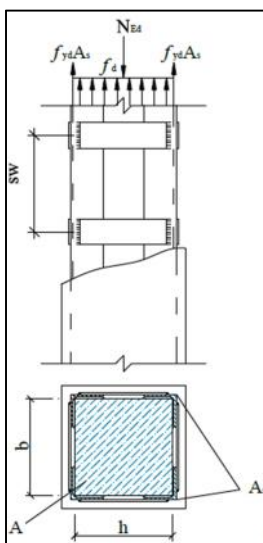
Gelžbetoninis apvalkalas labai padidina stiprinamosios konstrukcijos savąjį svorį ir matmenis, jam įrengti reikalingos didelės darbų sąnaudos, todėl jis yra naudojamas rečiau.

4. SUSTIPRINTO MŪRO LAIKOMOSIOS GALIOS SKAIČIAVIMO METODAI

4.1 Metaliniais apvalkalais sustiprinto mūro stiprio skaičiavimas

4.1.1 Sustiprinto mūro stiprio ir laikomosios galios vertinimas

Literatūroje sunku surasti metaliniais apvalkalais sustiprinto mūro, laikomosios galios skaičiavimo rekomendacijas. Kai apvalkalas yra įrengiamas pagal 3.3 skyriuje aprašytas taisykles, galima sudaryti tokią skaičiavimo schemą, kuri pateikiama 4.1 pav. ir pagal ją užrašyti laikomosios galios nustatymo formulę (11 formulė).



4.1 pav. Mūro sustiprinto plieninių kampuočių apvalkalu, skaičiuotinė schema

Skaičiuotinėje schemeje matytoma, jog veikiančią ašinę gniuždomąją jėgą atlaiko mūras, kurio skersinės deformacijos yra suvaržytos apvalkalu, ir plieniniai kampuočiai. Sustiprinto metaline apkaba mūro kolonos skaičiuotinė gniuždomoji galia:

$$N_{Rd} = f_{i,m} \left[\left(h_k \cdot f_d + h \cdot \frac{2,5r}{1+2,5r} \cdot \frac{f_{y,w}}{100} \right) \cdot A + g_b \cdot f_{sc} \cdot A_s \right], \quad (11)$$

čia

A – stiprinamojo mūrinio elemento skerspjūvio plotas;

f_d – nestiprinto mūro gniuždomasis stipris;

$f_{i,m}$ - koeficientas įvertinantis ekscentricitetų įtaką viršutiniame, apatiniame ir viduriniame pjūviuose;

A_s – plieninio apvalkalo skerspjūvio plotas (bendras kampuočių skerspjūvio plotas):

$$A_s = \sum_1^i A_{si}, \text{ kur } A_{si} - \text{vieno kampuočio skerspjūvio plotas;}$$

$f_{y,w}$ – antdėklų plieno skaičiuotinis stipris;

f_{sc} – kampuočių plieno skaičiuotinis stipris;

h_k - koeficientas, kuriuo įvertinama elemento būklė:

$h_k = 1,0$ - kai stiprinamajame elemente nėra plyšių; $h_k = 0,7$ - kai stiprinamasis elementas yra supleišėjęs;

$h = 1 - \frac{4e_0}{t}$ - koeficientas priklausantis nuo pradinio ekscentriciteto e_0 ;

$r = \frac{V_s}{V_m} \cdot 100 = \frac{2A_{sw} \cdot (h+b)}{h \cdot b \cdot s_w} \cdot 100$ - armavimo skersine armatūra (antdeklais) koeficientas,

apskaičiuojamas taip pat kaip ir skersai armuotam mūriui:

čia V_s – armatūros tūris, V_m – mūro tūris, A_{sw} – antdeklų skerspjūvio plotas, h – skerspjūvio aukštis, b – skerspjūvio plotis, s_w – žingsnis tarp antdeklų;

γ_b – koeficientas, kuris įvertina plieninio apvalkalo atrėmimo ir apkrovimo pobūdį:

$\gamma_b = 1,0$ – kai apvalkalas yra apkrautas ir atremtas apatiniam pjūvyje; $\gamma_b = 0,7$ – kai apvalkalas apkrautas, bet apatinėje dalyje neatremtas; $\gamma_b = 0,35$ – kai apvalkalas neapkrautas ir neatremtas apatiniam pjūvyje (kai apvalkalas į darbą įsijungia tik per trintį su mūru);

(11) formulėje matyti, kad gniuždomo mūro laikomoji galia, nevertinant kampuočių įtakos, gali būti apskaičiuota pagal tokią išraišką:

$$N_m = f_{i,m} \left(h_k \cdot f_d + h \frac{2,5r}{1+2,5r} \cdot \frac{f_{y,w}}{100} \right) \cdot A, \quad (12)$$

o jei priimame, kad pradinis ekscentricitetas $e_0 = 0$, ir veikianti įrąža yra tik centriškai pridėta ašinė jėga, tuomet:

$$N_m = \left(h_k \cdot f_d + \frac{2,5r}{1+2,5r} \cdot \frac{f_{y,w}}{100} \right) \cdot A. \quad (13)$$

Mūro, kurio skersinės deformacijos yra suvaržytos apvalkalu, gniuždomojo stiprio nustatymo išraišką galima užrašyti taip:

$$f_{md} = h_k \cdot f_d + \frac{2,5r}{1+2,5r} \cdot \frac{f_{y,w}}{100} \quad (14)$$

Išreiškiamas santykis k_{eff} tarp sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio ir nesustiprinto mūro gniuždomojo stiprio, šis santykis toliau bus naudojamas palyginant skaičiavimus.

$$k_{eff} = \frac{f_{md}}{f_d} = \frac{h_k \cdot f_d + \frac{2,5r}{1+2,5r} \cdot \frac{f_{y,w}}{100}}{h_k f_d}. \quad (15)$$

4.1.2 Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo armavimo skersiniais antdėklais intensyvumo

Atliekamas skaičiavimas, siekiant nustatyti priklausomybę nuo skersinio armavimo antdėklais intensyvumo ir mūro gniuždomojo stiprio, kai sustiprinto mūro gniuždomasis stipris nustatomas, pagal (14) išraišką, o santykis tarp sustiprinto mūro ir nestiprinto mūro gniuždomųjų stiprių – pagal (15) išraišką.

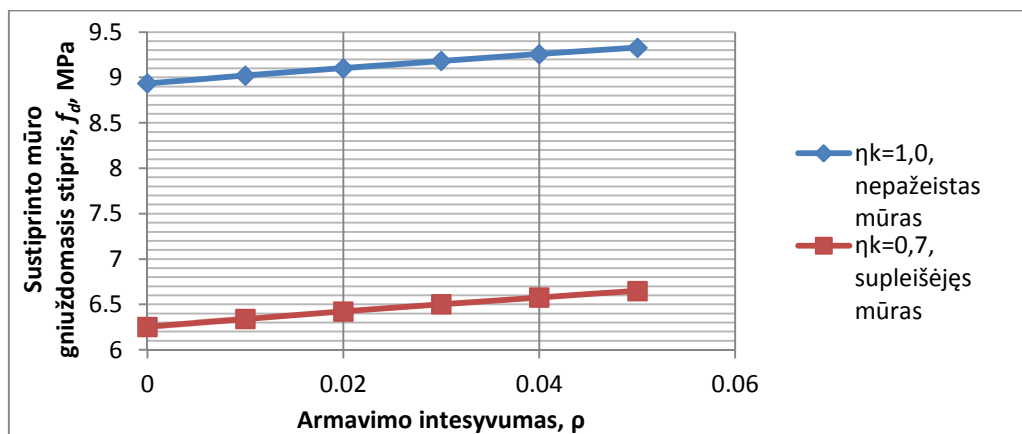
Skaičiavimuose nagrinėjama kolona, kurios matmenys yra 0,25x0,25m. Kolonai panaudoti silikatiniai mūro gaminiai, kurių stipris 20 MPa. Mūro skiedinio siūlės įrengiamos iš S10 klasės skiedinio, kurio gniuždomasis stipris 10 MPa. Mūro gniuždomasis stipris apskaičiuojamas pagal EN1996-1-1 3.2 formulę: $f_d = K \cdot f_b^{0.7} \cdot f_m^{0.3}$, kur f_b – mūro gaminių stipris, f_m – skiedinio stipris, K – konstanta nustatoma pagal EN 1996-1-1 3.3 lentelę. Naudojami kampuočiai L60x60x4.0 (plieno klasė S355).

Skersinio armavimo antdėklais intensyvumas ρ priklauso nuo antdėklų storio, pločio ir žingsnio, todėl nustatant priklausomybes, bus keičiami šie apvalkalo parametrai.

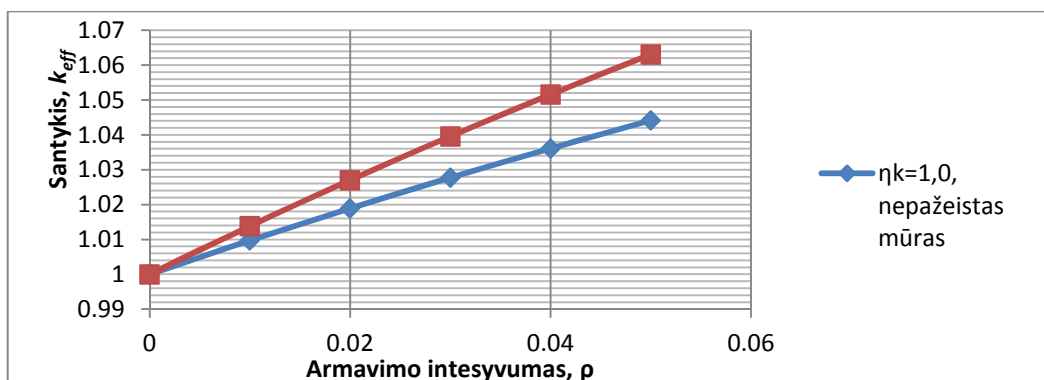
Skaičiavimai bus atliekami dviem atvejais: analizuojant nepažeistą mūrą, kai $\eta_k = 1,0$ ir analizuojant supleišėjusį mūrą - $\eta_k = 0,7$. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 4.1 lentelėje ir 4.2–4.3 pav.

4.1 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo armavimo skersiniais antdėklais intensyvumo

Skersinio armavimo intensyvumas, ρ	$\eta_k=1,0$, nepažeistas mūras		$\eta_k=0,7$, supleišėjęs mūras	
	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}
0	8.93	1.000	6.25	1.000
0.01	9.02	1.010	6.34	1.014
0.02	9.10	1.019	6.42	1.027
0.03	9.18	1.028	6.50	1.040
0.04	9.26	1.036	6.58	1.052
0.05	9.33	1.044	6.65	1.063



4.2 pav. Sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė, nuo armavimo intensyvumo



4.3 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo armavimo intensyvumo

Iš rezultatų matyti, kaip stipris priklauso nuo skersinio armavimo intensyvumo. Didėjant ρ , gaunamas ir didesnis sustiprinto mūro gniuždomasis stipris f_{md} . Taip pat 4.3 pav. matyti, jog gaunamas didesnis santykis k_{eff} kai yra stiprinamas pažeistas mūras.

4.1.3 Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo antdėklų plieno stiprio

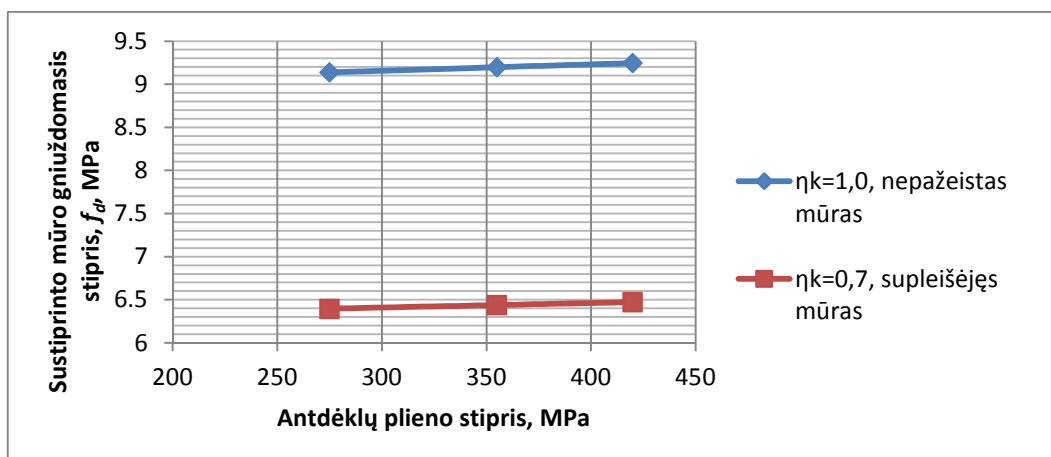
Atliekamas skaičiavimas, siekiant nustatyti priklausomybę tarp antdėklų plieno stiprio ir sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio, kuomet sustiprinto mūro gniuždomasis stipris nustatomas, pagal (14) išraišką, o santykis tarp sustiprinto mūro ir nestiprinto mūro gniuždomųjų stiprių – pagal (15) išraišką.

4.2 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo antdėklų plieno stiprio

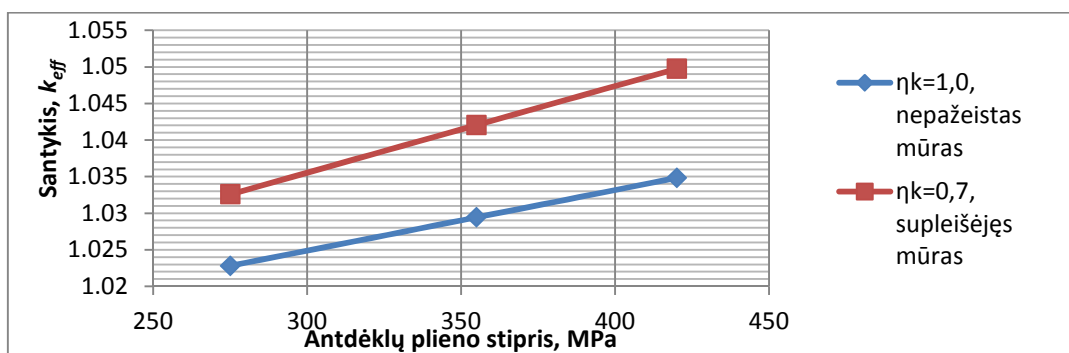
Antdėklų plieno stipris, f_k , MPa	$\eta_k=1,0$, nepažeistas mūras		$\eta_k=0,7$, supleišėjęs mūras	
	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}
275	9.14	1.02	6.46	1.03
355	9.20	1.03	6.52	1.04
420	9.25	1.03	6.57	1.05

Kolonos ir mūro parametrai yra parenkami analogiškai 4.1.2 skyriuje aprašytiems. Taip pat nagrinėjami ir du atvejai: supleišėjusio ir nesupleišėjusio mūro. Šiuo

atveju, mūro skersinio armavimo antdėklais intensyvumas yra pastovus $\rho=0,032$. Skaičiavimo rezultatai pateikiami 4.2 lentelėje ir 4.4–4.5 pav.



4.4 pav. Sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo antdėklų plieno stiprio



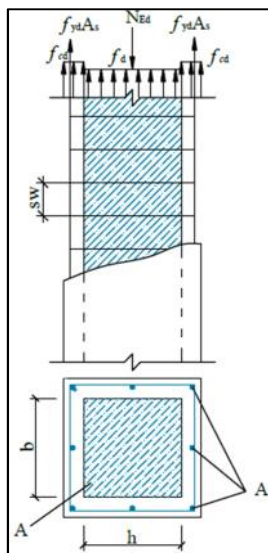
4.5 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo antdėklų plieno stiprio

Analizė parodė, kad padidinus antdėklų plieno stiprį, mūro kolonų gniuždomoji laikomoji galia padidėja neženkliai. Didesnę įtaką gniuždomajai galiai turi skersinio armavimo intensyvumo koeficientas, t.y. antdėklų skerspjūvio plotas ir išdėstymo žingsnis. Todėl antdėklams naudoti didesnio stiprio plieną netikslinga.

4.2 Gelžbetoniniu apvaskalu sustiprinto mūro stiprio skaičiavimas

4.2.1 Gelžbetoniniu apvaskalu sustiprinto mūro stiprio ir laikomosios galios vertinimas

Kai apvaskalas yra įrengiamas pagal 3.4 poskyryje pateiktą metodiką, tuomet galima sudaryti tokio elemento skaičiuojamąją schemą (4.6 pav.), o jo laikomąją galią nustatyti, pagal (16) formulę.



4.6 pav. Kolonos, sustiprintos gelžbetoniniu apvalkalu, skaičiuotinė schema

Skaičiuojamojoje schemoje matyti, jog koloną veikiančią ašinę jėgą atlaiko mūras, kurio skersines deformacijas varžo apvalkalas, apvalkalo betonas ir išilginė apvalkalo armatūra. Sustiprinto gelžbetoniniu apvalkalu mūro, gniuždomoji galia bus:

$$N_R = f_{i,m} \left(\left(h_k \cdot f_d + h \frac{3,0 \cdot r}{1 + r} \cdot \frac{f_{y,w}}{100} \right) \cdot A + g_b \cdot f_c \cdot A_c + f_{sc} \cdot A_s \right), \quad (16)$$

čia

A – stiprinamojo mūrinio elemento skerspjūvio plotas;

f_d – nestiprinto mūro gniuždomasis stipris;

$f_{i,m}$ - koeficientas įvertinantis ekscentricitetų įtaką viršutiniame, apatiniame ir viduriniame pjūviuose;

A_s – apvalkalo išilginės armatūros skerspjūvio plotas (bendras visų išilginių armatūros strypų skerspjūvio plotas):

$$A_s = \sum_1^i A_{si}, \text{ kur } A_{si} - \text{vieno strypo skerspjūvio plotas;}$$

$f_{y,w}$ – apvalkalo skersinės armatūros (sankabų) stipris;

f_{sc} – gniuždomosios apvalkalo armatūros stipris;

h_k - koeficientas, kuriuo įvertinama elemento būklė:

$h_k = 1,0$ - kai mūro elemente nėra plyšių; $h_k = 0,7$ - kai mūro elemente yra plyšiai;

$h = 1 - \frac{4e_0}{t}$ - koeficientas priklausantis nuo pradinio ekscentriciteto e_0 ;

$$r = \frac{V_s}{V_m} \cdot 100 = \frac{2A_{sw} \cdot (h+b)}{h \cdot b \cdot s_w} \cdot 100 - \text{armavimo skersine armatūra koeficientas, apskaičiuojamas}$$

taip pat kaip ir skersai armuotam mūriui:

čia V_s – armatūros tūris, V_m – mūro tūris, A_{sw} – skersinės armatūros skerspjūvio plotas, h – skerspjūvio aukštis, b – skerspjūvio plotis, s_w – skersinės armatūros žingsnis;

γ_b – koeficientas, kuris įvertina plieninio apvalkalo atrėmimo ir apkrovimo pobūdį:

$\gamma_b=1,0$ – kai apvalkalas yra apkrautas ir atremtas apatiniaame pjūvyje; $\gamma_b=0,7$ – kai apvalkalas apkrautas, bet apatinėje dalyje neatremtas; $\gamma_b=0,35$ – kai apvalkalas neapkrautas ir neatremtas apatiniaame pjūvyje (kai apvalkalas dirba kartu su mūru tik per trintį);

f_c – betono gniuždomasis stipris;

A_c – apvalkalo betoninio skerspjūvio plotas;

(16) formulėje matyti, kad gniuždomo mūro laikomoji galia, nevertinant apvalkalo betono ir armatūros perimamos gniuždančios jėgos:

$$N_m = f_{i,m} \left(h_k \cdot f_d + h \frac{3,0 \cdot r}{1+r} \cdot \frac{f_{y,w}}{100} \right) \cdot A, \quad (17)$$

o jei priimame, kad pradinis ekscentricitetas $e_0=0$, o veikianti įrąža yra tik centriškai gniuždanti ašinė jėga, tuomet:

$$N_m = \left(h_k \cdot f_d + \frac{3,0 \cdot r}{1+r} \cdot \frac{f_{y,w}}{100} \right) \cdot A. \quad (18)$$

Mūro, kurio skersinės deformacijos yra suvaržytos apvalkalu, gniuždomojo stiprio nustatymo išraišką galima užrašyti taip:

$$f_{md} = h_k \cdot f_d + \frac{3,0 \cdot r}{1+r} \cdot \frac{f_{y,w}}{100}. \quad (19)$$

Išreiškiamas santykis k_{eff} tarp sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio ir nesustiprinto mūro gniuždomojo stiprio, šis santykis toliau bus naudojamas palyginant skaičiavimus.

$$k_{eff} = \frac{f_{md}}{f_d} = \frac{h_k \cdot f_d + \frac{3,0 \cdot r}{1+r} \cdot \frac{f_{y,w}}{100}}{h_k \cdot f_d}. \quad (20)$$

4.2.2 Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros skerspjūvio ploto

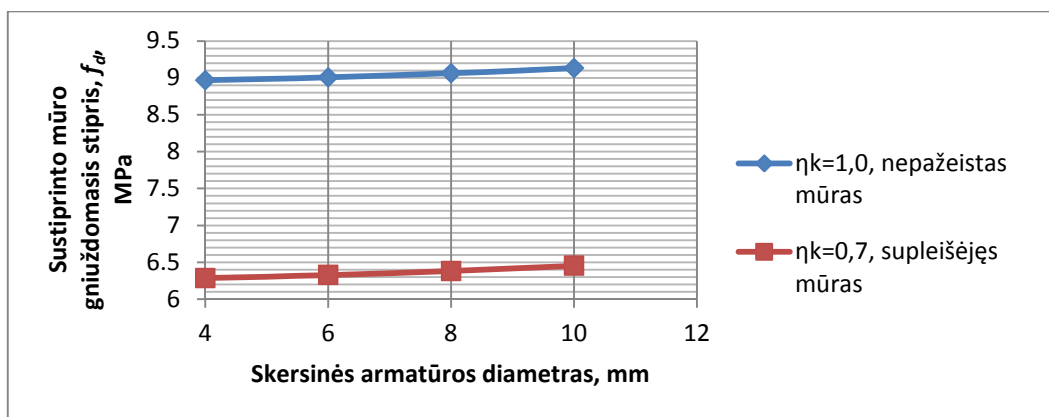
Atliekamas skaičiavimas, siekiant nustatyti priklausomybę tarp skersinės armatūros diametro ir suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio, kuomet mūro gniuždomasis

stipris yra nustatomas pagal (19) išraišką, o santykis tarp sustiprinto mūro ir nestiprinto mūro gniuždomųjų stiprių – pagal (20) išraišką.

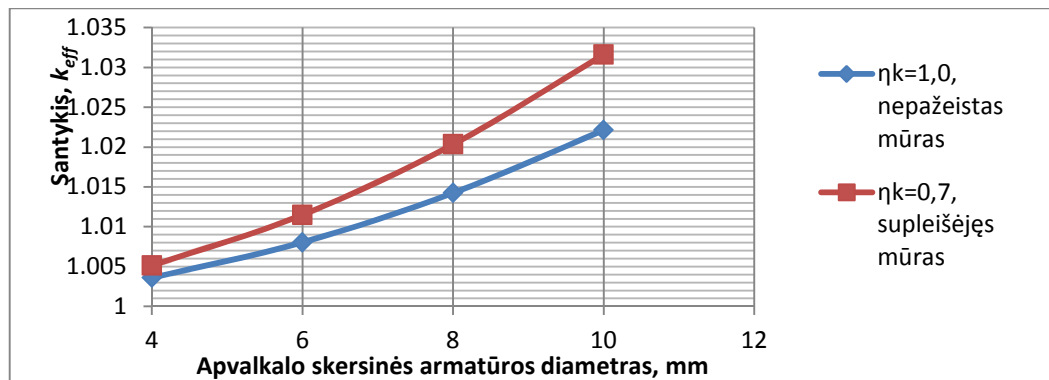
Analizėje nagrinėtos kolonos pagrindiniai duomenys pateikti 4.1.2 skyrelyje. Gelžbetoninio apvalkalo betono klasė C20/25. Apvalkalo išilginę armatūrą sudaro 8Ø8mm strypai, jo storis 60 mm. Šiuose skaičiavimuose skersinės armatūros skersmuo kinta nuo 4 iki 10 mm. Kaip ir ankstesniuose skyriuose nagrinėjami du atvejai: analizuojant nepažeistą mūrą, kai $h_k = 1,0$ ir analizuojant supleišėjusį mūrą - $h_k = 0,7$. Rezultatai pateikiami 4.3 lentelėje ir 4.7 – 4.8 pav.

4.3 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros skerspjūvio ploto

Skersinės armatūros diametras, mm	$\eta_k=1,0$, nepažeistas mūras		$\eta_k=0,7$, supleišėjęs mūras	
	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}
4	8.97	1.004	6.29	1.005
6	9.01	1.008	6.33	1.011
8	9.06	1.014	6.38	1.020
10	9.13	1.022	6.45	1.032



4.7 pav. Suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybės, nuo apvalkalo skersinės armatūros diametro



4.8 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros diametro

Iš gautų rezultatų matyti, kad didėjant apvalkalo skersinės armatūros skersmeniui didėja ir suvaržyto mūro gniuždomasis stipris. Stipris labiau didėja, kai yra stiprinamas jau pažeistas mūras.

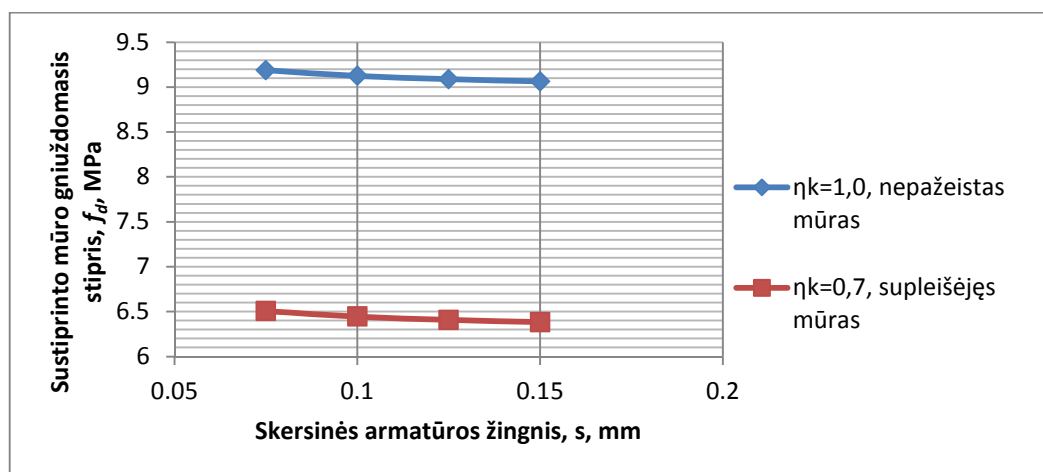
4.2.3 Sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros žingsnio

Atliekamas skaičiavimas, siekiant nustatyti priklausomybę tarp skersinės armatūros žingsnio ir suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio, kai mūro gniuždomasis stipris yra nustatomas pagal (19) išraišką, o santykis tarp sustiprinto mūro ir nestiprinto mūro gniuždomųjų stiprių – pagal (20) išraišką.

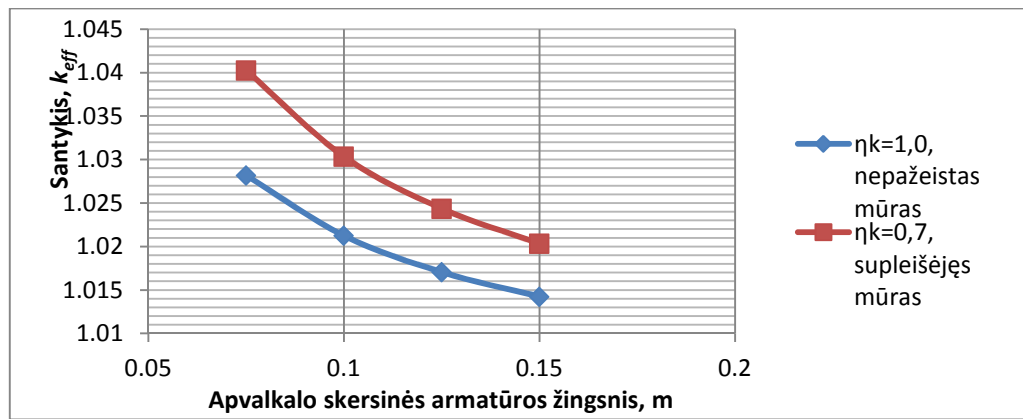
Analizėje nagrinėtos kolonos pagrindiniai duomenys aprašyti 4.1.2 skyrelyje. Gelžbetoninio apvalkalo betono klasė C20/25. Apvalkalo išilginę armatūrą sudaro 8Ø8mm strypai, jo storis 60 mm. Šiuose skaičiavimuose skersinės armatūros skersmuo priimamas lygus 6mm, o jos žingsnis kinta nuo 75 mm iki 150 mm. Kaip ir ankstesniuose skyriuose nagrinėjami du atvejai: analizuojant nepažeistą mūrą, kai $h_k = 1,0$ ir analizuojant supleišėjusį mūrą - $h_k = 0,7$. Rezultatai pateikiami 4.4 lentelėje ir 4.9–4.10 pav.

4.4 lentelė. Sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros žingsnio

Skersinės armatūros žingsnis, m	$\eta_k=1,0$, nepažeistas mūras		$\eta_k=0,7$, supleišėjęs mūras	
	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}
0.075	9.19	1.028	6.51	1.040
0.1	9.12	1.021	6.44	1.030
0.125	9.09	1.017	6.41	1.024
0.15	9.06	1.014	6.38	1.020



4.9 pav. Suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybės, nuo apvalkalo skersinės armatūros žingsnio



4.10 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo apvalkalo skersinės armatūros žingsnio

Iš skaičiavimų rezultatų matyti, kad didėjant skersinės armatūros žingsniui, mažėja skersinio armavimo intensyvumas, o kartu ir sustiprinto mūro gniuždomasis stipris. Pažeisto mūro elementų stipris, didėjant skersinės armatūros žingsniui, mažėja greičiau, nei sveiko sustiprinto mūro.

4.3. Polimeriniu apvalkalu sustiprinto mūro laikomosios galios ir įtempių skaičiavimas

4.3.1. Polimeriniu apvalkalu sustiprinto gniuždomo mūro laikomosios galios vertinimas

Kaip jau aprašyta 3.2 poskyryje, sustiprinus koloną polimeriniu apvalkalu jos laikomoji galia padidėja tik dėl skersinių mūro deformacijų suvaržymo, o tuo tarpu pats apvalkalas gniuždančios ašinės jėgos neperima. Todėl centriškai gniuždomo sustiprinto polimeriniu apvalkalu elemento laikomąją galią galima apskaičiuoti pagal (21) išraišką.

$$N_{Rd} = A_m \cdot f_{md}, \quad (21)$$

čia

A_m – mūro skerspjūvio plotas;

f_{md} – suvaržyto mūro gniuždomasis stipris, kuris apskaičiuojamas pagal (22) išraišką (pagal Corradi *et al.* 2006; Aiello *et al.* 2009):

$$f_{md} = f_d + k_1 \cdot f_1 \quad (22)$$

čia f_d – nesustiprinto mūro gniuždomasis stipris;

$k_1 \cdot f_1$ – mūro gniuždomojo stiprio padidėjimas dėl apvalkalu suvaržytų skersinių deformacijų;

k_1 – suvaržymo apvalkalu koeficientas, kurio reikšmė skirtingų mokslininkų siūloma skirtinga. Dažniausiai siūloma reikšmę imti tarp 2,8 ir 4,0. Tačiau G. Campione (2003) savo straipsnyje atlikęs papildomus tyrimus su betonu, šią reikšmę priima 2,0. Tikslesnę analizę nustatant šį koeficientą atliko H. Toutanji (2002) ir pasiūlė formulę, kurią naudojant galima apskaičiuoti koeficientą k_1 :

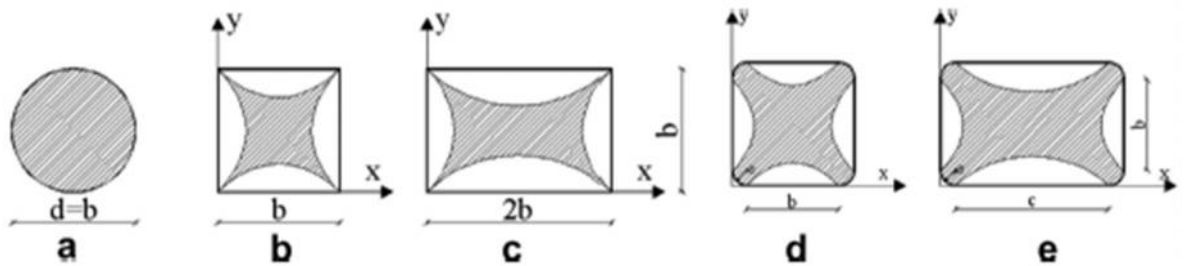
$$k_1 = 3,5 \cdot \left(\frac{f_1}{f_d} \right)^{0.15}, \quad (23)$$

f_1 – efektyvieji suvaržymo įtempiai.

Efektyvieji skerspjuvio suvaržymo įtempiai apskaičiuojami pagal Corradi ir kt. (2007) ir Aiello ir kt. (2009) siūlomą išraišką (24):

$$f_1 = k_e \cdot f_{1,0}, \quad (24)$$

čia k_e – skerspjuvio suvaržymo efektyvumo koeficientas, kuris nurodo santykį tarp suvaržyto apvaskalu mūro ir nesuvaržyto mūro skerspjuvio plotų (4.11 pav.), ir kuris priklauso nuo skerspjuvio formos ir skerspjuvio kampų užapvalinimo spindulio.



4.11 pav. Efektyviai suvaržyto skerspjuvio plotų pasiskirstymas (Corradi 2006).

Koeficiento k_e nustatymui M. Corradi 2006 siūloma formulė, kuria yra įvertinama skerspjuvio kampų suapvalinimo įtaka ir skerspjuvio kraštinių santykio įtaka efektyviam deformacijų suvaržymui (25) formulė.

$$k_e = \frac{1 + \Delta\Theta - \frac{p}{12 \cdot r_f} \cdot (r_f^2 + 1)}{1 + \Delta\Theta}, \quad (25)$$

čia

$\Delta\Theta$ - koeficientas, įvertinantis skerspjuvio kampų suapvalinimo spindulį r_0 :

$$\Delta\Theta = \frac{(2 \cdot r_0 \cdot (b + c) - p \cdot r_0^2)}{b \cdot c}, \quad (26)$$

čia r_0 – skerspjuvio kampų užapvalinimo spindulys,

b ir c skerspjuvio matmenys (c – didesnysis matmuo);

r_f - skerspjuvio formos koeficientas, santykis tarp skerspjuvio kraštinių matmenų:

$$r_f = \frac{c}{b};$$

$f_{1,0}$ – skerspjuvį varžantys įtempiai, kurie apskaičiuojami skirtingai esant kvadratiniam, kvadratiniam su apvalintais kampais ir apvaliam skerspjuviui. Tačiau G. Campione (2003)

pateikia bendras formules, kurias naudojant galima tiksliai apskaičiuoti šį slėgį. Pagrindinė formulė:

$$f_{1,0} = \frac{2 \cdot t_f \cdot f_r}{c}, \quad (27)$$

čia

t_f – apvalkalo storis,

c – skerspjūvio didesnysis matmuo,

f_r – tempimo įtempiai apvalkale. Kai turime apvalią koloną slėgį $f_{1,0}$ – galime apskaičiuoti naudojant šią formulę tik pakeitus tempimo įtempius apvalkale f_r į apvalkalo stiprį f_{FRP} , o jei kolona stačiakampio skerspjūvio ir be užapvalintų kampų vietoje 2 rašome $\sqrt{2}$, ir taip pat pakeičiame apvalkalo įtempius f_r į apvalkalo stiprį f_{FRP} (Corradi *et al* 2007; Aiello *et al* 2009; Campione *et al* 2003). Naudojant universalią formulę, tempimo įtempiai apvalkale apskaičiuojami pagal 28 išraišką.

$$f_r = f_{FRP} \left[\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} k_i \right) \frac{2r_0}{c} + k_i \frac{\sqrt{2}}{2} \right], \quad (28)$$

čia k_i – koeficientas įvertinantis įtempių koncentraciją ties kampais ($k_i=0,2121$ (Campione *et al* 2003)),

f_{FRP} – apvalkalo tempiamasis stipris.

Išreiškiamas santykis k_{eff} tarp sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio ir nesustiprinto mūro gniuždomojo stiprio, šis santykis toliau bus naudojamas palyginant skaičiavimus.

$$k_{eff} = \frac{f_{md}}{f_d + k_1 \cdot f_1}. \quad (29)$$

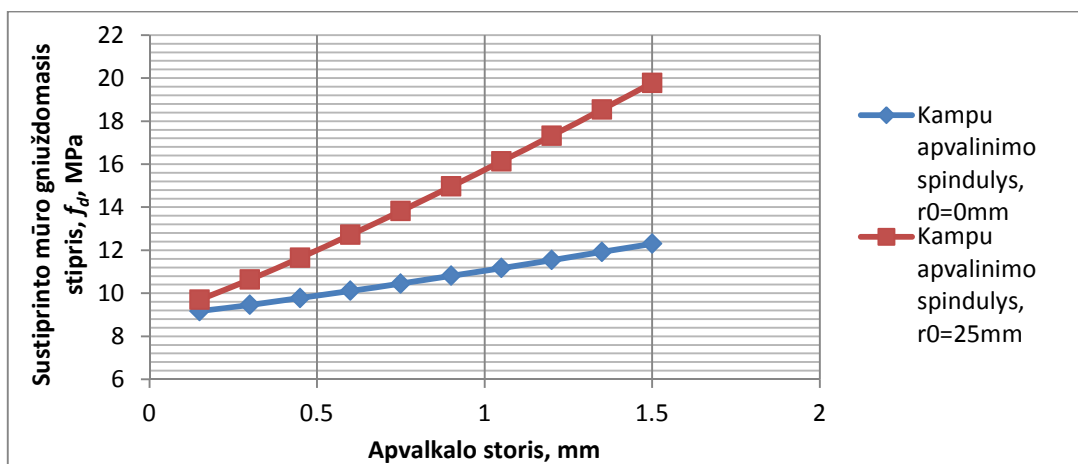
4.3.2. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo storio

Atliekamas skaičiavimas, siekiant nustatyti priklausomybę tarp polimerinio apvalkalo storio ir suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio, kai mūro gniuždomasis stipris yra nustatomas pagal (22) išraišką, o santykis tarp sustiprinto mūro ir nestiprinto mūro gniuždomųjų stiprių – pagal (29) išraišką.

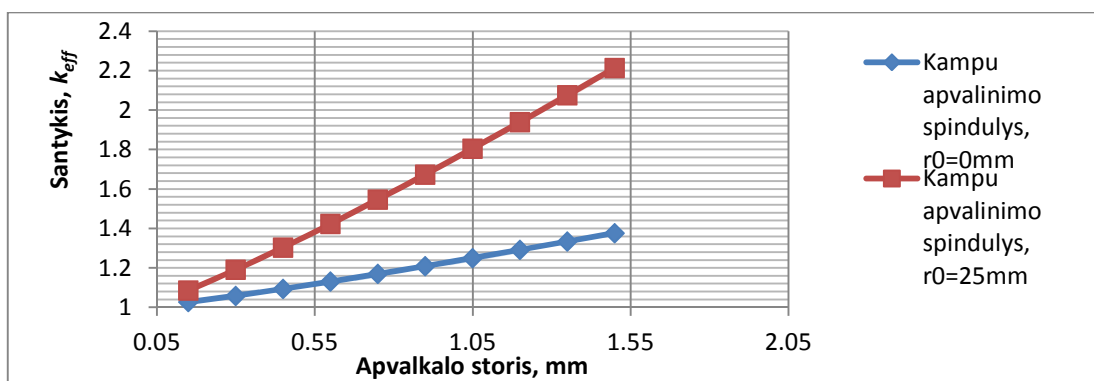
Analizėje nagrinėtos kolonos pagrindiniai duomenys aprašyti 4.1.2 skyrelyje. Apvalkalui naudojamo anglies pluošto tempiamasis stipris priimamas $f_{FRP}=1500MPa$, o apvalkalo storis kinta nuo $0,15mm$ iki $1,5 mm$. Skaičiavimas atliekamas dviem atvejais: kai skerspjūvio kampai priimami statūs ir kai kampų užapvalinimo spindulys lygus $r_0=0,025m$. Rezultatai pateikiami 4.5 lentelėje ir 4.12 – 4.13 pav.

4.5 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo storio

Apvalkalo storis, t_p , mm	Kampu apvalinimo spindulys, $r_0=0\text{mm}$		Kampu apvalinimo spindulys, $r_0=25\text{mm}$	
	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}
0,15	9.17	1.027	9.70	1.086
0,30	9.46	1.059	10.64	1.191
0,45	9.78	1.094	11.65	1.304
0,60	10.11	1.131	12.72	1.423
0,75	10.45	1.170	13.82	1.547
0,90	10.81	1.209	14.96	1.674
1,05	11.17	1.250	16.13	1.805
1,20	11.54	1.292	17.32	1.939
1,35	11.92	1.334	18.54	2.075
1,50	12.30	1.377	19.78	2.214



4.12 pav. Apvalkalu sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė, nuo apvalkalo storio



4.13 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo apvalkalo storio

Skaičiavimo rezultatai rodo, kad apvalkalo storis turi didelę įtaką sustiprinto mūro stiprumui, taip pat iš rezultatų matyti, kad gniuždomo mūro stipris ženkliai padidėja, kai stiprinamo elemento skerspjūvio kampai yra suapvalinami.

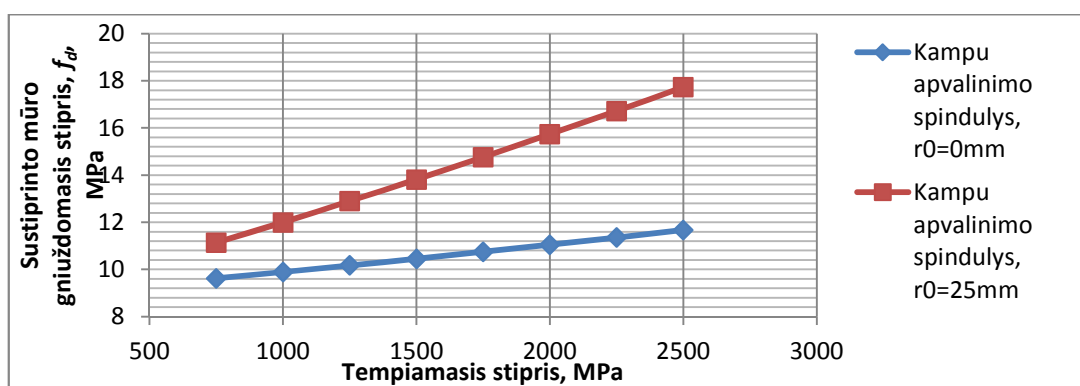
4.3.3. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo tempiamojo stiprio

Atliekamas skaičiavimas, siekiant nustatyti priklausomybę tarp polimerinio apvalkalo tempiamojo stiprio ir suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio, kai mūro gniuždomasis stipris yra nustatomas pagal (22) išraišką, o santykis tarp sustiprinto mūro ir nestiprinto mūro gniuždomųjų stiprių – pagal (29) išraišką.

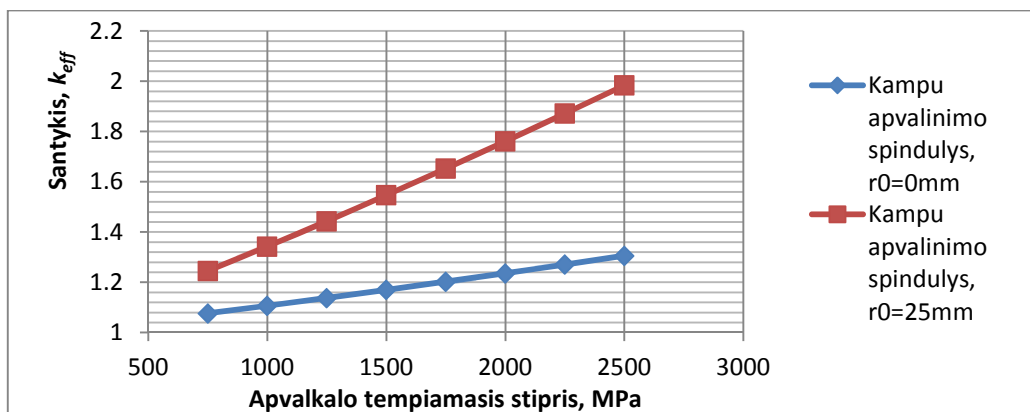
Analizėje nagrinėtos kolonos pagrindiniai duomenys aprašyti 4.1.2 skyrelyje. Priimama, kad apvalkalui naudojamo anglies pluošto tempiamasis stipris kinta nuo $f_{FRP}=750\text{MPa}$ iki $f_{FRP}=2500\text{MPa}$, o apvalkalo storis priimamas $0,75\text{ mm}$. Skaičiavimas atliekamas dviem atvejais: kuomet skerspjūvio kampai priimami statūs ir kuomet kampų suapvalinimo spindulys lygus $r_0=0,025\text{m}$. Rezultatai pateikiami 4.6 lentelėje ir 4.14–4.15 pav.

4.6 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apvalkalo tempiamojo stiprio

Apvalkalo tempiamasis stipris, MPa	Kampu apvalinimo spindulys, $r_0=0\text{mm}$		Kampu apvalinimo spindulys, $r_0=25\text{mm}$	
	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}
750	9.62	1.077	11.14	1.246
1000	9.89	1.107	12.00	1.343
1250	10.17	1.138	12.90	1.443
1500	10.45	1.170	13.82	1.547
1750	10.75	1.203	14.77	1.653
2000	11.05	1.236	15.74	1.761
2250	11.35	1.271	16.72	1.872
2500	11.67	1.306	17.73	1.984



4.14 pav. Apvalkalu sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė, nuo apvalkalo tempiamojo stiprio



4.15 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo apvalkalo tempiamojo stiprio

Iš skaičiavimų matyti, kad didėjant apvalkalo tempiamajam stipriui, didėja ir mūro skersinių deformacijų suvaržymas, o kartu ir mūro gniuždomasis stipris. Taip pat, daug geresnis sustiprinimo efektas gaunamas, kai mūro kampai yra suapvalinami.

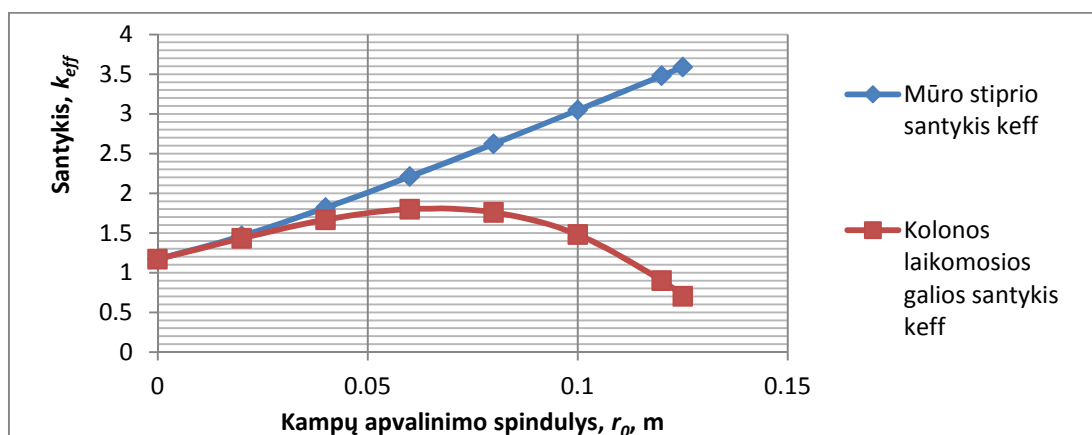
4.3.4. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kampų apvalinimo spindulio

Atliekamas skaičiavimas, siekiant nustatyti priklausomybę tarp polimerinio apvalkalo tempiamojo stiprio ir suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio, kai mūro gniuždomasis stipris yra nustatomas pagal (22) išraišką, o santykis tarp sustiprinto mūro ir nestiprinto mūro gniuždomųjų stiprių – pagal (29) išraišką.

Analizėje nagrinėtos kolonos pagrindiniai duomenys aprašyti 4.1.2 skyrelyje. Apvalkalui naudojamo anglies pluošto tempiamasis stipris priimamas $f_{FRP}=1500MPa$, o apvalkalo storis priimamas $0,75\text{ mm}$. Kampų apvalinimo spindulys keičiamas nuo 0 iki 0,125 m, t.y. kol kolonos skerspjūvis tampa apvalus. Prie šių skaičiavimų rezultatų reikalinga pateikti ir kolonos laikomosios galios grafiką, nes didinant kampų apvalinimo spindulį, mažėja mūrinio skerspjūvio plotas. Rezultatai pateikiami 4.7 lentelėje ir 4.16 pav.

4.7 lentelė. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kampų apvalinimo spindulio

Kampu apvalinimo spindulys, r_0 , m	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}	Laikomosios galios pokytis
0	10.45	1.170	1.170
0.02	13.07	1.463	1.432
0.04	16.24	1.818	1.668
0.06	19.73	2.209	1.800
0.08	23.42	2.622	1.759
0.1	27.23	3.048	1.480
0.12	31.10	3.480	0.902
0.125	32.06	3.589	0.704



4.16 pav. Santykio k_{eff} ir laikomosios galios pokyčio priklausomybės nuo kampų apvalinimo spindulio

Iš grafikų pateiktų 4.16 pav. matyti, kad didėjant kampų apvalinimo spinduliui mūro gniuždomasis stipris didėja labai greitai, tačiau kai kampų apvalinimo spindulys pasiekia apie $\frac{1}{4}$ skerspjūvio kraštinės matmens, nors gniuždomasis stipris ir didėja, bet visos kolonos laikomoji galia pradeda staiga mažėti, dėl didelės mūrinio skerspjūvio dalies netekimo.

4.3.5. Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kolonos skerspjūvio matmenų santykio

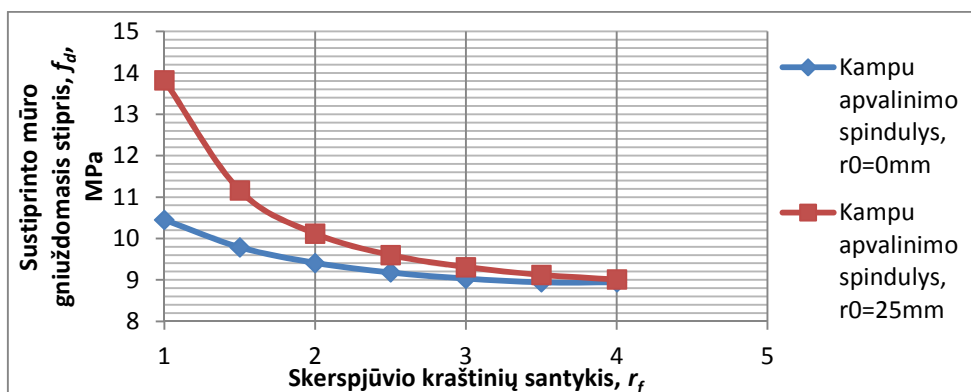
Atliekamas skaičiavimas, siekiant nustatyti priklausomybę tarp kolonos matmenų santykio ir suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio, kuomet mūro gniuždomasis stipris yra nustatomas pagal (22) išraišką, o santykis tarp sustiprinto mūro ir nestiprinto mūro gniuždomųjų stiprių – pagal (29) išraišką.

4.8 Mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo kolonos skerspjūvio matmenų santykio

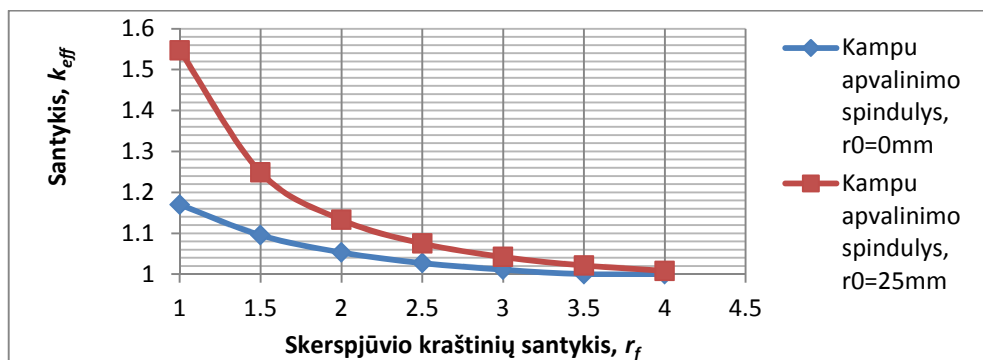
Matmenų santykis, r_f	Kampu apvalinimo spindulys, $r_0=0mm$		Kampu apvalinimo spindulys, $r_0=25mm$	
	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}	Sustiprinto mūro gniuždomasis stipris, f_d , MPa	Santykis k_{eff}
1	10.45	1.170	13.82	1.547
1,5	9.79	1.095	11.16	1.249
2	9.41	1.053	10.12	1.133
2,5	9.18	1.027	9.60	1.075
3	9.03	1.011	9.31	1.042
3,5	8.94	1.000	9.12	1.021
4	8.94	1.000	9.01	1.008

Analizėje nagrinėtos kolonos pagrindiniai duomenys aprašyti 4.1.2 skyriuje. Apvalkalui naudojamo anglies pluošto tempiamasis stipris priimamas $f_{FRP}=1500MPa$, o apvalkalo storis priimamas $0,75\text{ mm}$. Skaičiavimas atliekamas dviem atvejais: kuomet

skerspjūvio kampai priimami statūs ir kuomet kampų užapvalinimo spindulys lygus $r_0=0,025m$. Rezultatai pateikiami 4.8 lentelėje ir 4.17 – 4.18 pav.



4.17 pav. Apvalkalu sustiprinto mūro gniuždomojo stiprio priklausomybė, nuo skerspjūvio kraštinių santykio



4.8 pav. Santykio k_{eff} priklausomybė nuo skerspjūvio kraštinių santykio

Iš skaičiavimo rezultatų matyti, kad keičiant kolonos skerspjūvio matmenų santykį r_f , mūro skersinių deformacijų suvaržymas mažėja, o kartu mažėja ir mūro stiprio prieaugis. Kai kraštinių santykis r_f pasiekia 3, suvaržymas nebėra naudingas, mūro gniuždomasis stipris ir mūrinės kolonos laikomoji galia nepadidėja.

4.4. Skyriaus išvados

Išanalizavus atskirų parametrų įtaką sustiprinto gniuždomojo mūro stipriui, nustatyta, kad:

Mūro gniuždomasis stipris stiprinant plieniniu ir gelžbetoniniu apvalkalais labiausiai priklauso nuo skersinio armavimo intensyvumo, skaičiuojant gaunama, kad didesnis apvalkalai efektyvesni yra stiprinant jau supleišėjusį mūrą.

Naudojant FRP apvalkalus mūro gniuždomojo stiprio padidėjimui didžiausią įtaką turi apvalkalo storis ir kolonos skerspjūvio kampų apvalinimo spindulys, nuo šių parametrų stiprio padidėjimas priklauso labiausiai.

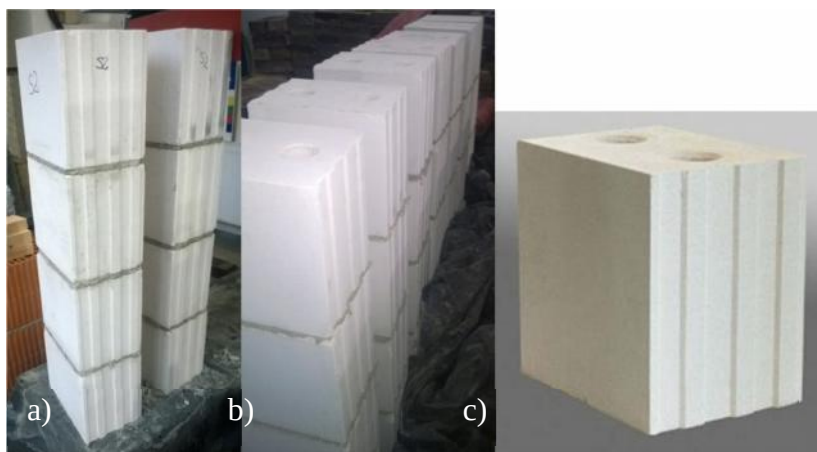
Stiprinant FRP apvalkalu stačiakampio skerspjūvio elementą, jo kraštinių santykis turi būti mažesnis už 3, nes kitu atveju stiprinimas yra neefektyvus.

5. GNIUŽDOMOJO MŪRO SUSTIPRINTO PLIENINIU APVALKALU ELGSENOS TYRIMAS

5.1. Medžiagos ir bandiniai, bandymo metodika

5.1.1. Bandiniai

Sustiprinto plienine apkaba gniuždomo mūro įtempių ir deformacijų būvio eksperimentiniams tyrimams pagaminti 9 vnt. gniuždomų elementų fragmentai (bandiniai) (5.1 pav.). Bandinių pagrindo matmenys 250x180 mm, aukštis 988 mm (5.1 pav. a ir b). Bandiniai sumūryti iš tuštymėtųjų silikatinių blokų (5.1 pav. c), mūrijimui naudotas bendrosios paskirties cementinis skiedinys, gulsčiųjų siūlių storis 10-12 mm. Bandinių gamybai (mūrijimui) panaudotas skirtingo gniuždomojo stiprio skiedinys.



5.1 pav. Bandiniai; a ir b - gniuždomo mūro fragmentai (bandiniai); c - silikatinis tuštymėtasis blokelis (250x180x238mm)

Silikatinių blokų gniuždomasis stipris nustatytas pagal LST EN 772-1:2011 reikalavimus, apkraunant statine trumpalaike apkrova, statmenai guldomajam paviršiui. Blokų gniuždymo stiprio rezultatai pateikti 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. Blokų bandymo rezultatai

Bandinys	Gniuždymo stipris, f_{bc} , N/mm ²	Vidutinis gniuždymo stipris, f_{bcm} , N/mm ²
B-1	24,21	23,94
B-2	23,47	
B-3	24,20	
B-4	24,54	
B-5	23,26	

Bendrosios paskirties cementinio skiedinio gniuždomasis ir tempiamasis stipris lenkiant nustatytas pagal LST EN 1015-17:2001 reikalavimus. Tempiamasis stipris lenkiant nustatytas lenkiant skiedinio kontrolinius bandinius – 40x40x160 mm prizmes (5.2 pav. a ir b)

Gniuždomasis stipris nustatytas gniuždant puseles, gautas po prizmių lenkimo bandymo (5.2 pav. c). Skiedinio deformacinės savybės, tamprumo modulis nustatyti bandant prizmes 40x40x160 mm (5.2 pav. d). Siedinio tempiamojo stiprio lenkiant bei gniuždomojo stiprio bei deformacinių savybių tyrimų rezultatai pateikti 5.2 lentelėje. Iš skiedinio bandymų rezultatų matyti, kad S1 tipo skiedinio gniuždomasis stipris yra 37 % didesnis, nei naudotų mūro blokelių, o skiedinio S2 yra 17 % mažesnis už blokelių gniuždomąjį stiprį.



5.2 pav. Skiedinio prizmių bandymas; a - skiedinio prizmės bandymams; b - skiedinio tempiamojo stiprio lenkiant bandymas; c - skiedinio gniuždomojo stiprio nustatymo bandymas; d - skiedinio tamprumo modulio nustatymo bandymas

5.2 lentelė. Skiedinio stiprumo ir deformacinių savybių nustatymo rezultatai

Serija	Bandinys	Lenkiamasis stipris, f_{mb} , N/mm^2	Vidutinis lenkiamasis, f_{mbm} , stipris, N/mm^2	Gniuždomasis stipris, f_{mc} , N/mm^2	Vidutinis gniuždomasis stipris, f_{mcm} , N/mm^2	Tamprumo modulis, E , $N/mm^2 \times 10^3$	Vidutinis tamprumo modulis, E , $N/mm^2 \times 10^3$
S1	S1-1.1	4,408	4,21	31,82	33,00	-	21,63
	S1-1.2			32,66		-	
	S1-2.1	4,285		31,86		-	
	S1-2.2			33,48		-	
	S1-4.1	4,107		35,04		-	
	S1-4.2			33,29		-	
	S1-5.1	4,081		29,16		-	
	S1-5.2			31,95		-	
	S1-6.1	4,294		33,99		-	
	S1-6.2			34,32		-	
	S1-8.1	4,382		31,29		-	
	S1-8.2			35,11		-	
	S1-9.1	3,941		35,34		-	
	S1-9.2			32,70		-	
	S1-3*	-		-		20,05	
	S1-7*	-		-		23,21	
S2	S2-2.1	3,123	3,08	19,45	19,89		18,04
	S2-2.2			20,75			
	S2-3.1	3,036		20,85			
	S2-3.2			18,53			
	S2-1*	-		-		18,04	

PASTABA. * pažymėti bandiniai buvo naudojami skiedinio tamprumo moduliui nustatyti.

Gniuždomojo mūro stiprinimui sukonstruotas ir pagamintas apvalkalas iš plieninio 50x50x3 mm lygiašonio kampuočio (5.3 pav.). Apvalkalo vertikaliųjų juostų sujungimui (mūro skersinių deformacijų suvaržymui) panaudotos 20Ø10 plieninės templės

(5.4 pav.) Tam, kad būtų galima apvalkalo vertikaliąsias juostas (kampuočius) glaudžiai prispausti prie bandinio (mūrinio fragmento), templių galai buvo išriegti. Templių plieno savybės (takumo įtempiai, stiprumas ir tamprumo modulis) nustatytos tempiant Ø10 skersmens strypus ir matuojant deformacijas. Templių plieno savybių tyrimų rezultatai pateikti 5.3 lentelėje.



5.3 pav. Plieninis apvalkalas



5.4 pav. Plieninės templės

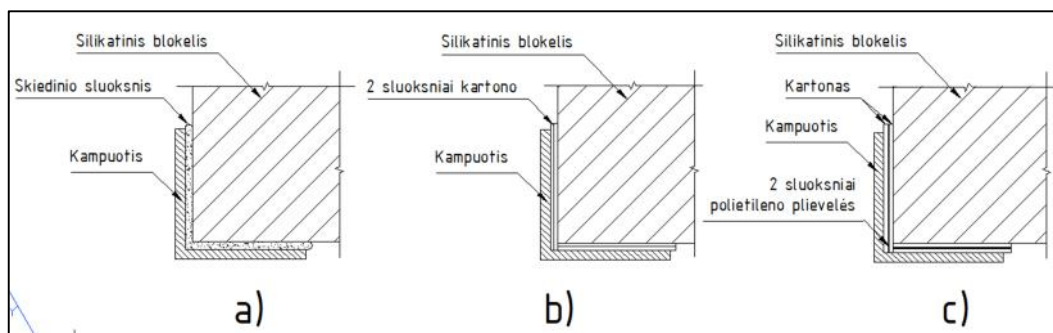
Gniuždomojo mūro bandiniai sustiprinti glaudžiant apkabų vertikaliuosius elementus prie mūro. Norint užtikrinti patikimą ir tolygų

prispaudimą, kampuočiai buvo glaudžiami per greitai kietėjančio cementinio skiedinio sluoksnį. Naudojant skiedinį kaip tarpinį sluoksnį, kapuočių apvalkalas ne tik varžo skersines kolonų deformacijas, bet ir dėl gero kampuočių, skiedinio ir blokelių sukibimo perima ir dalį gniuždančios jėgos, o tai iškreipia gaunamus rezultatus ir tikroji skersinių deformacijų suvaržymo įtaka tampa mažiau aiški. Kad

būtų galima panaikinti trintį tarp apkabos vertikaliųjų elementų (kampuočių) ir mūro, dalis bandinių buvo sustiprinti glaudžiant kampuočius per kietas medžio plaušo plokštės juostas, kiti – dedant tarp dviejų juostų polietileno intarpus (juostas). Apkabos plieninių vertikaliųjų elementų – kampuočių glaudimo prie mūro fragmentų salygos parodytos 5.5 pav. Kad apvalkalas nebūtų tiesiogiai apkraunamas, tarp jo ir preso plokščių paliekamas tarpas, tokiu būdu buvo apkraunamas tik stiprinamasis elementas (mūro fragmentas). Dalis apkrovos į kampuočius perduodama tik per trintį tarp kampuočio ir stiprinamojo elemento.

5.3 lentelė. Plienų savybių tyrimų rezultatai.

Bandinio numeris	Tempiamasis stipris, f_{ui} , N/mm ²	Vidutinis tempiamasis stipris, f_u , N/mm ²	Takumo riba, f_{yi} , N/mm ²	Takumo riba, f_y , N/mm ²	Tamprumo modulis, N/mm ² ×10 ³	Vidutinis tamprumo modulis, N/mm ² ×10 ³
1	353	355	239	238	201,1	203
2	350		235		200,76	
3	362		240		206,4	



5.5 pav. Tarpinių sluoksnių įrengimo schemas; a – kampuotis glaudžiamas per skiedinio sluoksnį; b – kampuotis glaudžiamas per du kartono sluoksnius; c – kampuotis glaudžiamas per du kampuočių sluoksnius tarp jų įdedant du sluoksnius polietileno plėvelės

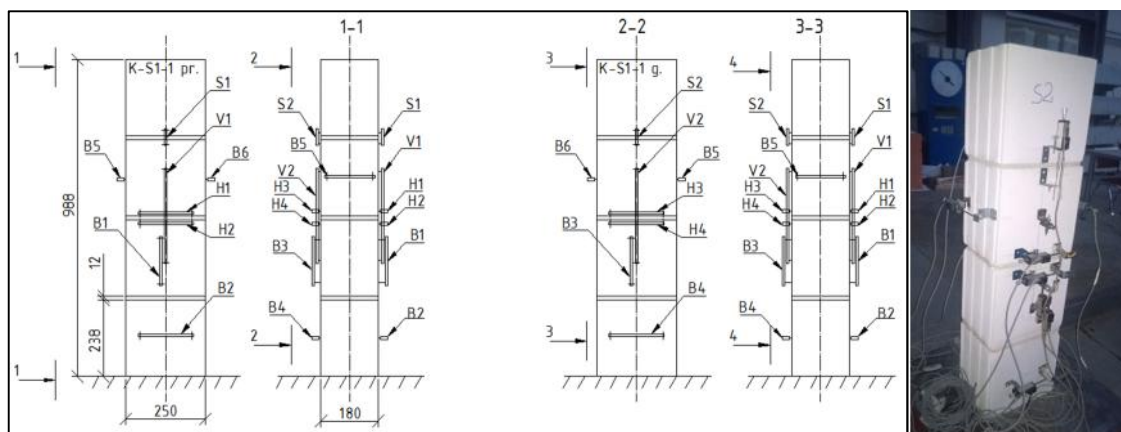
Kampuočiai prie mūro buvo prispaudžiami templėms užveržiant veržles. Visais atvejais templių pradinis įveržimas buvo vienodas, nesuteikiant pradinių įtempių. Dalis bandinių buvo skirti mūro gniuždomajam stipriui nustatyti. Kontrolinių ir sustiprintų mūro bandinių charakteristikos pateiktos 5.4 lentelėje.

5.4 lentelė. Bandinių charakteristikos

Serija	Bandinio šifras	Skiedinio tipas	Gulsčiosios skiedinio siūlės storis, mm	Bandinio tipas				Serijos bandinių skaičius
				Nesustiprintas	Sustiprintas kampuočių apvalkalu			
					Su skiediniu	Sumažinta trintis		
						Kartonas	Kartonas su polietileno plievele	
K-S1	K-S1-1	S1	10-12	+				2
	K-S1-2	S1		+				
K-S2	K-S2-1	S2		+				1
KS-S1	KS-S1-1	S1			+			2
	KS-S1-2	S1			+			
KS-S2	KS-S2-1	S2			+			1
KK-S1	KK-S1-1	S1				+		2
	KK-S1-2	S1				+		
KKp-S1	KKp-S1-1	S1					+	1

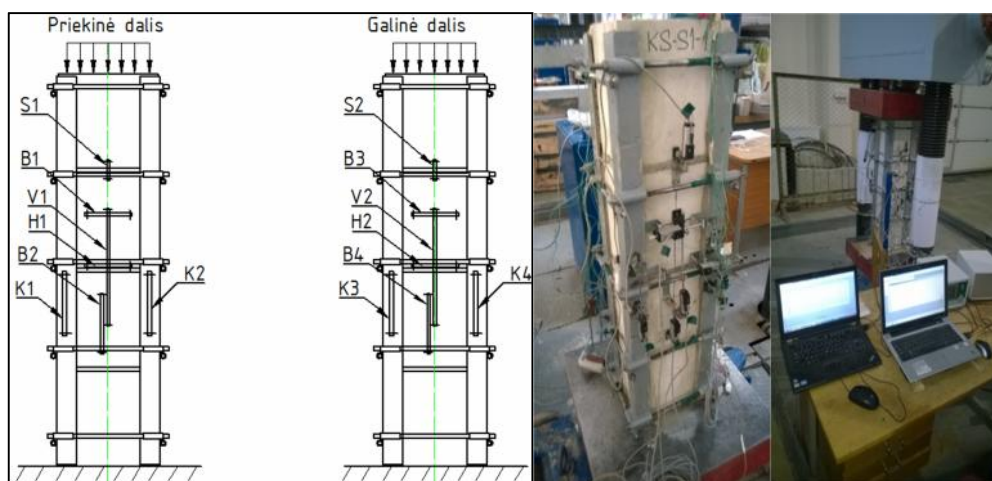
5.1.2. Bandymo metodika

Kontroliniai ir sustiprinto mūro fragmentai (bandiniai) buvo bandomi centriškai gniuždant trumpalaikę statinę apkrovą, bandymo metu bandiniai buvo apkraunami pastoviu 2 – 3 kN/s greičiu iki pat suirimo. Bandymo metu buvo matuojamas nesustiprinto mūro, mūro gaminių – blokų išilginės bei skersinės deformacijos, bei gulsčiųjų siūlių deformacijos. Deformacijų matavimui naudoti elektroniniai deformacijų jutikliai „Almemo“, kurių matavimo tikslumas 0,001 mm. Deformacijų matavimo prietaisų išdėstymo schema bei bandymo bendras vaizdas parodyti 5.6 pav.



5.6 pav. Deformacijų matavimo prietaisų ant kontrolinių bandinių išdėstymo schema ir bendras vaizdas

Bandant sustiprinto mūro fragmentus buvo matuojamos mūro, mūro gaminių išilginės ir skersinės deformacijos, gulsčiųjų siūlių deformacijos bei apvaskalo vertikalųjų elementų – kampuočių ir templių išilginės deformacijos. Deformacijų matavimo prietaisų išdėstymo schema bei bandymo bendras vaizdas pateikti 5.7 pav. Ant sustiprinto mūro bandinio montuojama 14 deformacijų matavimo prietaisų (5.7 pav.) ir 20 tenzometriniai jutikliai. Tenzometriniai jutikliai parodo, kokios tempimo deformacijos susidaro templėse gniuždam mūro fragmentą.



5.7 pav. Sustiprinto bandinio deformacijų matavimo prietaisų išdėstymo schema ir bendras bandymo vaizdas

Pastaba: gniuždomąja apkrova apkrautas tik stiprinamasis elementas.

5.1.3 Bandymo rezultatų analizė

Sustiprintų ir kontrolinių (nesustiprintų) mūro fragmentų gniuždomosios galios tyrimų rezultatai pateikti 5.5 lentelėje. Bandant trumpalaikė statinė apkrova nustatyta mūro fragmentų ardomoji apkrova bei įtempiai įtempiai kuriems esant iro gniuždomas mūras ir ribinės mūro deformacijos.

Bandant nustatyta, kad nesustiprinto mūro fragmentų (kontrolinių bandinių) suirimas buvo staigus ir trapus. Bandinių, kuriems buvo naudotas stirpesnysis skiedinys S1,

vidutinė suirimo jėga sudarė 572 kN, vidutiniai bandinių ribiniai gniuždomieji įtempiai - 12,71 MPa, o užfiksuota vidutinė maksimali vertikali mūro santykinė deformacija šiuose bandiniuose – $\varepsilon_{mu}=0,004135$. Bandinio su skiediniu S2 ardančioji apkrova sudarė 523 kN, o įtempiai - 11,622 MPa. Didžiausia šio bandinio mūro vertikali santykinė deformacija – 0,00464. Pastebėta, kad plyšiai atsivėrė apkrovai esant arti suirimo. Bandiniuose su S1 skiediniu pirmasis plyšys atsivėrė prie apkrovos lygios 425 kN (tai sudarė 74,3 % ardančios apkrovos). Bandinyje su skiediniu S2 pirmasis plyšys atsivėrė kai apkrova buvo 420 kN (tai sudarė 80,3 % ardančios apkrovos) (žr. 5.5 ir 5.6 lenteles). Tokia aukšta plyšių atsivėrimo apkrova yra todėl, kad bandiniams sumūryti yra panaudotas didelio stiprumo skiedinys, S1 atveju skiedinys yra stipresnis už blokelių, o S2 – vos silpnesnis už blokelių. Kadangi blokeliai turi kiaurymes, todėl jos lemia plyšių pasiskirstymą ir plyšiai susidaro tose vietose, kur skerspjūvio plotas yra mažiausias.

Mūro fragmentų KS-S1 ir KS-S2, sustiprintų plieniniu apvalkalu priglaustu prie mūro per cementinio skiedinio sluoksnį (5.5 pav. a), ardančioji apkrova siekė 796 kN, o ribiniai įtempiai – 17,68 MPa. Šių fragmentų mūro vertikaliosios (išilginės) santykinės deformacijos irimo metu sudarė 0,0046. Plyšiai susidarė veikiant apkrovai lygiai 738 kN, kuri sudarė 92,7 % ardančiosios apkrovos.

Sustiprintų plieniniu apvalkalu, priglaustu per cementinio skiedinio sluoksnį, mūro fragmentų gniuždomoji galia padidėjo 39%, plyšių susidarymo apkrova padidėjo iki 74%, ribinės gniuždomojo mūro deformacijos padidėjo iki 11%.

Bandinių su silpnesniu gulsčiųjų siūlių skiediniu, ardančioji apkrova sudarė 772 kN, ribiniai įtempiai - 17,2 MPa. Plyšiai susidarė veikiant apkrovai lygiai 680 kN, tai sudarė 88% ardančiosios apkrovos. Lyginant su nesustiprintu mūru, šiuo atveju sustiprinto apvalkalu mūro gniuždomoji galia padidėjo 47,6%, plyšių susidarymo apkrova 61,9 %, o ribinės vertikalios mūro deformacijos padidėjo 39,7 %. Matyti, kad bandinių kuriuose buvo naudotas S2 skiedinys (silpnesnis), gautas stiprio padidėjimas yra didesnis lyginant su bandiniais, kurių gamybai panaudotas skiedinys S1, analogiškai pastebimas ir ribinių vertikaliųjų mūro santykinų deformacijų padidėjimą. Abiejų bandinių serijų atveju gauta, kad pleišėjimo apkrova padidėja daugiau nei padidėja gniuždomasis bandinių stipris, o pleišėjimo apkrovos tampa artimos suirimo apkrovoms (žr. 5.5 ir 5.6 lentelę).

KK-S1 seriją sudarė du bandiniai, šiuose bandiniuose, siekiant sumažinti trintį tarp kampuočių ir mūro, vietoje skiedinio dedamos dvi statybinio kartono juostos (žr. 5.5 pav. b), kurios tarpusavyje suglaustos lygiaisiais paviršiais. Šiuo atveju, gaunama mažesnė trintis tarp apvalkalo ir mūro, tačiau, kampuočiai ne visu plotu priglunda prie mūro dėl blokelių

kraštinėse esančių nelygumų, kurie naudojant skiedinį būna užpildyti. Šios serijos bandinių pasiekta vidutinė ardančioji apkrova – 702 kN, įtempiai – 15,6 MPa. O vidutinės ribinės santykinės mūro išilginės defracijos - 0,00568. Kampuočių perimama vertikalios apkrovos dalis, šiuo atveju turėtų būti mažesnė nei KS-S1 ir KS-S2 serijų bandiniuose, todėl matome, kad ardančiosios apkrovos padidėjimas šiuo atveju yra mažesnis. Vidutinis gautas KK-S1 serijos bandinių ardančiosios apkrovos padidėjimas lyginant su nestiprintais bandiniais sudarė 22,7 %, o ribinių išilginių santykinų deformacijų – 37,3 %. Gauta vidutinė pleišėjimo apkrova – 530 kN, kuri sudaro 75,5 % maksimalios apkrovos, o pleišėjimo apkrovos padidėjimas sustiprinus bandinį yra 24,6 % (žr. 5.5 ir 5.6 lenteles).

KKp-S1 serijos bandinyje, kuriame kaip ir KK-S1 serijos bandiniuose tarpiniame sluoksnyje buvo dedamos statybinio kartono juostos, papildomai tarp kartono buvo įdėti dar du polietileno plievelės sluoksniai (5 pav. c.). Tokiu būdu dar labiau sumažinta trintis tarp apvalkalo ir mūro. KKp-S1 bandinio maksimali gniuždymo apkrova sudarė 701 kN, jos sukelti maksimalūs įtempiai – 15,58 MPa, ribinės išilginės santykinės mūro defracijos – 0,00626. Šie dydžiai rodo, kad gautas stiprio padidėjimas yra 22,6 %, o ribinės defracijos padidėjo 51,4 %. Užfiksuota bandinio pleišėjimo apkrova – 600 kN, kuri sudaro 85,6 % ardančiosios apkrovos. Pleišėjimo apkrovos padidėjimas, lyginant su nestiprintais bandiniais, sudaro 41,2 % (žr. 5.5 ir 5.6 lenteles).

Gniuždomosios galios tyrimų rezultatai parodė, kad gniuždomoji galia labiausiai padidėjo KS-S2 serijos bandinyje (apkaba prie mūro priglausta per cementinio skiedinio sluoksnį, mūrai panaudotas skiedinys S2), šiuo atveju daugiausia padidėjo ir plyšio susidarymo apkrova. Mažiausiai ardančioji apkrova padidėjo KKp-S1 bandinyje, (sumažinta trintis tarp apkabos ir mūro) o mažiausias pirmo plyšio susidarymo prieaugis buvo KK-S1 serijos bandiniuose (žr. 5.5 lentelę). Varžant skersines bandinių defracijas kampuočiais, taip pat gauta, kad ribinės išilginės bandinių mūro santykinės defracijos turėjo ženklų padidėjimą, kuris buvo nuo 11,2 iki 51,4 proc.

5.5 lentelė. Mūro fragmentų gniuždomosios galios tyrimų rezultatai

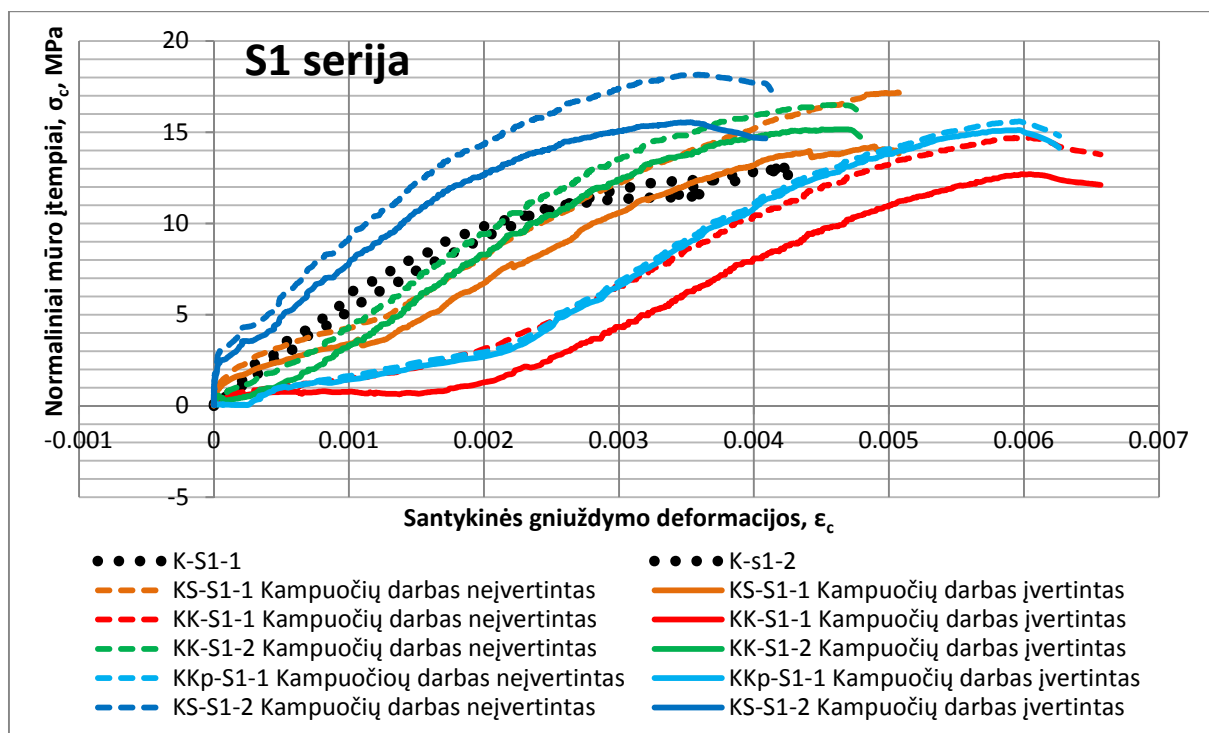
Serija	Bandinys	Ardančioji apkrova, $F_{u,obs}$, kN	Plyšio atsiradimo apkrova, $F_{crc,obs}^*$, kN	$\frac{F_{crc,obs}}{F_{u,obs}}$	Gniuždomasis stipris, N/mm^2		$\frac{F_{crc,obs,s}}{F_{crc,obs,m}}$	$\frac{F_{u,obs,s}}{F_{u,obs,m}}$
					Bandinio, $f_{m,i,obs}$	Vidutinis bandinių serijos, $f_{m,obs}$		
K-S1	K-S1-1	587	430	0,733	13,044	12,711	-	-
	K-S1-2	557	420	0,754	12,378		-	-
K-S2	K-S2-1	523	420	0,803	11,622	11,622	-	-
KS-S1	KS-S1-1	774	735	0,950	17,2	17,68	1,729	1,353
	KS-S1-2	817	740	0,918	18,16		1,741	1,428
KS-S2	KS-S2-1	772	680	0,881	17,16	17,16	1,619	1,476
KK-S1	KK-S1-1	662	470	0,710	14,71	15,6	1,105	1,157
	KK-S1-2	742	589	0,794	16,49		1,386	1,297
KKp-S1	KKp-S1-1	701	600	0,856	15,58	15,58	1,412	1,226

5.6 lentelė. Gniuždomojo mūro išilginių santykinų deformacijų ribinės reikšmės

Serija	Bandinys	Maksimalios išilginės (gniuždymo) mūro deformacijos		$\frac{e_{mi,obs,s}}{e_{mm,obs,m}}$
		Bandinio, $\epsilon_{mi,obs}$	Vidutinis bandinių serijos, $\epsilon_{mm,obs}$	
K-S1	K-S1-1	0,00433	0,004135	-
	K-S1-2	0,00394		-
K-S2	K-S2-1	0,00464	0,00464	-
KS-S1	KS-S1-1	0,00507	0,0046	1,23
	KS-S1-2	0,00413		1,0
KS-S2	KS-S2-1	0,00648	0,00648	1,397
KK-S1	KK-S1-1	0,00657	0,00568	1,589
	KK-S1-2	0,00479		1,158
KKp-S1	KKp-S1-1	0,00626	0,00626	1,514

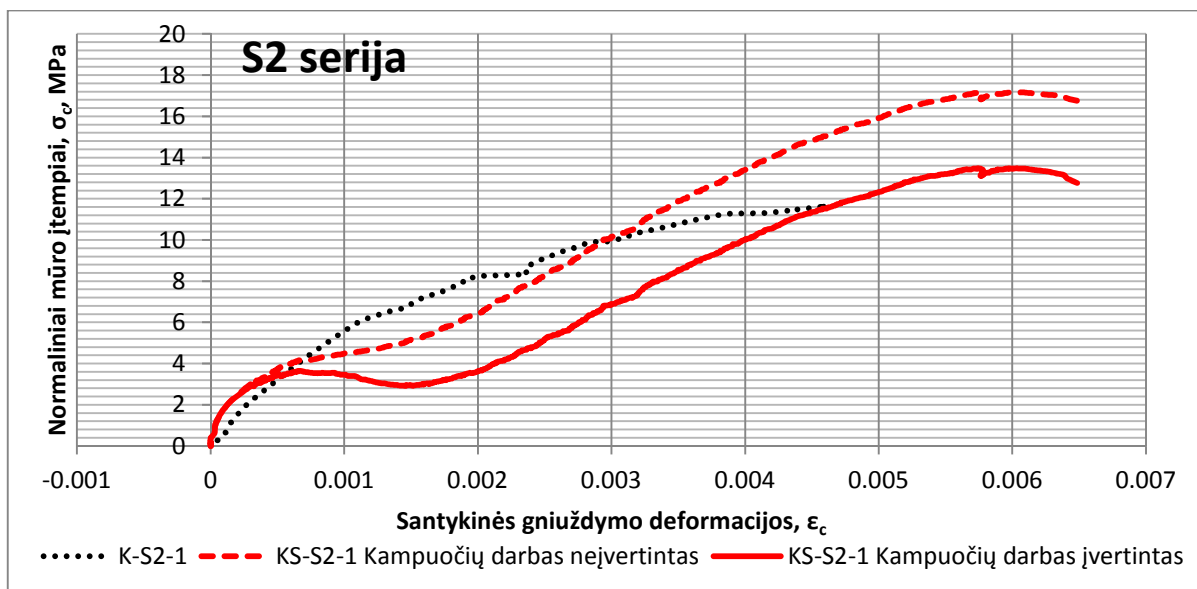
Toliau analizuojant bandymų duomenis reikalinga įvertinti, kokie buvo tikrieji normaliniai gniuždymo įtempiai mūre, nes dalį jėgos per trintį perėmė kampuočiai. 5.8 ir 5.9 pav. pateikiamos mūro įtempių ir deformacijų diagramos kai kampuočių perimama vertikali jėga nėra išskirta ir kuomet yra įvertinta, jog dalį gniuždančios jėgos kampuočiai perima per trintį. 5.8 pav. pateikiama bandinių kuriems buvo panaudotas S1 skiedinys mūro įtempių – deformacijų diagramos. Iš diagramų matyti, kad tik KS-S1-2 bandinio atveju mūro vertikaliosios deformacijos buvo mažesnės už kontrolinių nesustiprintų bandinių, o likusių sustiprintų bandinių, didėjant normaliniams gniuždymo įtempiams, deformacijos didėjo greičiau nei nesustiprintų bandinių. Žymiausias gniuždomojo mūro stiprio padidėjimas gautas bandiniuose, kuriuose tarpiniu sluoksniu buvo skiedinys, taip pat juose prieš suirimą dar papildomai didžiausią jėgos dalį periimdavo ir kampuočiai (bandiniai KS-S1-1 ir KS-S1-2). Taip pat, šiuose bandiniuose gniuždanti jėga, kurią perima kampuočiai palaipsniui didėja viso

bandymo metu ir didžiausią jėgos dalį periima tik prieš suirimą, o tuo tarpu bandiniuose kuriuose buvo mažinama trintis ir naudojamas kartonas, kampuočių periima jėgos dalis išlieka pastovi ir priklauso nuo trinties jėgos, kuri prasidėjus praslydimui nekinta. Tik bandinyje KKp-S1-1, kuriame trinties jėga papildomai buvo mažinama polietileno plievele, kampuočiams tenkanti jėga yra visai nedidelė, praslydimas prasideda nuo pat bandymo pradžios ir tik prieš patį bandinio suirimą, kai yra didžiausios mūro skersinės deformacijos, gniuždanti jėga kampuočiuose kiek padidėja. Tačiau šiame bandinyje, mūro stipris dėl skersinių deformacijų suvaržymo padidėjo beveik tiek pat, kiek ir bandiniuose, kuriuose tarpinis sluoksnis buvo skiedinys.



5.8 pav. Bandinių, kuriuose buvo panaudotas S1 skiedinys įtempių ir deformacijų diagramos

5.9 pav. pateikiami bandinių su S2 skiediniu grafikai. Sustiprinto bandinio KS-S2-1 mūro įtempių – deformacijų diagramos forma yra panaši į kitų sustiprintų bandinių, kur kaip tarpinis sluoksnis buvo panaudotas skiedinys. Matome, kad sustiprinto mūro deformacijos, esant tam pačiam apkrovos lygiui, yra ženkliai didesnės nei nesustiprinto mūro, tačiau tuo pačiu ir mūro gniuždomasis stipris gaunamas didesnis. 5.9 pav. pateiktos sustiprinto mūro įtempių – deformacijų diagramos rodo, kad viso bandymo metu, kampuočių priimama apkrovos dalis nuolat didėjo: pradžioje labai staigiai išaugusi, vėliau didėjo lėtai. Įvertinus kampuočių įtaką bandymuose, sudaroma sustiprintojo gniuždomojo mūro stiprio lentelė, kurioje pateikiamos yra suvaržyto mūro gniuždomojo stiprio vertės ir jų palyginimas su nestiprintų bandinių gniuždomojo stipriu (5.7 lentelė).



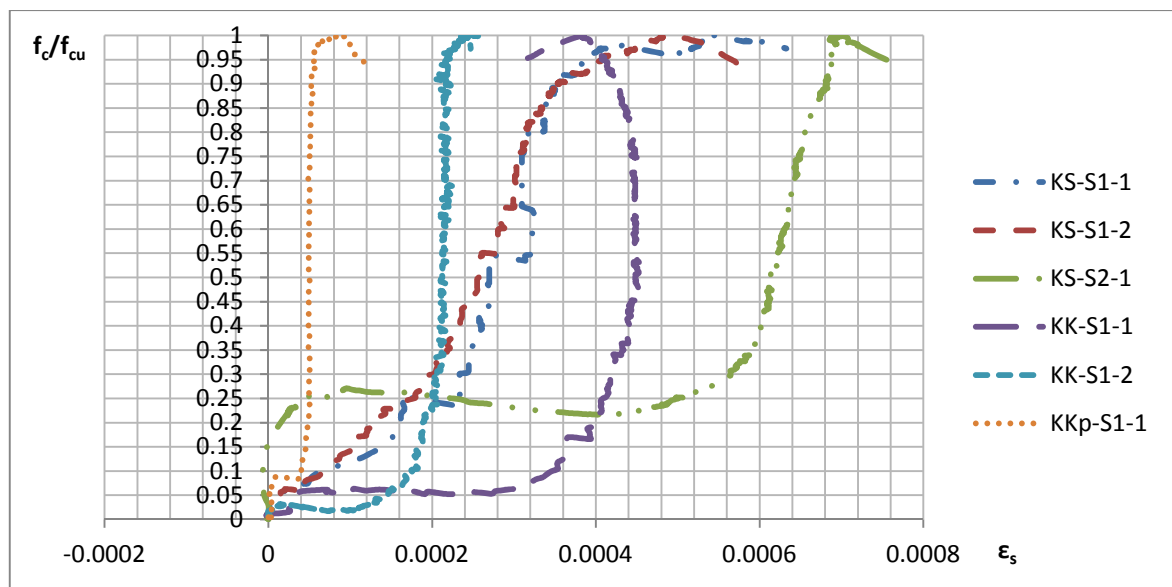
5.9 pav. Bandinių, kuriuose buvo panaudotas S2 skiedinys įtempių ir deformacijų diagramos

5.7 lentelė. Mūro stipris

Serija	Bandinys	Mūro gniuždomasis stipris, MPa		Vidutinis stipris, MPa	$\frac{f_{cui,obs,s}}{f_{cum,obs,m}}$	$\frac{f_{cum,obs,s}}{f_{cum,obs,m}}$
		Bandinio, $f_{cui,obs}$	Vidutinis bandinių serijos, $f_{cum,obs}$			
K-S1	K-S1-1	13,044	12,711	12,71	-	-
	K-S1-2	12,378			-	
KS-S1	KS-S1-1	14,21	14,88	14,55	1,118	1,145
	KS-S1-2	15,55			1,223	
KK-S1	KK-S1-1	12,71	13,94		1,000	
	KK-S1-2	15,16			1,193	
KKp-S1	KKp-S1-1	15,11	15,11		1,189	
K-S2	K-S2-1	11,622	11,622	11,62	-	-
KS-S2	KS-S2-1	13,48	13,48	13,48	1,16	1,16

Apie stiprinamojo mūro ir apvalkalo plieninių kampuočių bendrą darbą galima spręsti pagal jų deformacijas bei jų vystymąsi. Apvalkalo kampuočių išilginės santykinės deformacijos pateiktos 5.10 pav. Iš 5.10 pav. pateiktų diagramų nesunku pastebėti tai, kad atskiruose bandiniuose kampuočiai mūro atžvilgiu slydo, o kituose buvo sukibę su mūru. Bandinių KS-S1-1 ir KS-S1-2 kampuočių deformacijų priklausomybių grafikai sutampa ir iš jų matyti, kad praslydimo tarp kampuočių ir mūro praktiškai nėra, nes didėjant mūro apkrovimo lygiui, palaipsniui didėja ir kampuočių vertikaliosios deformacijos, diagramose nėra zonų, kuriose didėjant mūro apkrovimo laipsniui, kampuočių deformacijos nekistų. Bandinio KS-S2-1, kuriame tarpinis sluoksnis tarp kampuočių ir mūro taip pat buvo skiedinys, kampuočių deformacijų diagrama turi dvi skirtingas dalis (5.10 pav.). Pirmojoje, kurioje mūro įtempiai siekia iki 25% mūro gniuždomojo stiprio, kampuočių deformacijos didėja labai greitai, nors mūre įtempiai praktiškai nedidėja t.y. visą tenkančią apkrovą perima kampuočiai. Galima daryti išvadą, kad šioje dalyje kampuočiai su mūru yra visiškai sukibę ir

praslydimo tarp jų nėra. Antrojoje diagramos dalyje matoma, kad mūro įtempiai jau didėja bet tuo pačiu nuolat didėja ir kampuočių gniuždymo deformacijos, tačiau jau daug lėčiau nei pirmojoje dalyje, šiuo metu deformacijų kitimo greitis yra toks kaip ir KS-S1 serijos bandinių. Bandinių serijų KK-S1 ir KKp-S1 kampuočių deformacijų diagramų formos yra tokios pat. Jos taip pat kaip ir KS-S2 atveju susideda iš dviejų dalių: horizontaliosios ir vertikaliosios. Visų trijų diagramų pirmosios (horizontaliosios) dalys yra skirtingo ilgio, t.y. tam, kad prasidėtų praslydimas tarp mūro ir kampuočių reikalinga skirtinga jėga. Tuo pačiu galima pastebėti, kad apkrovos lygis kai kampuočiai pradeda perimti vertikalią apkrovą skiriasi. KK-S1-1 bandinio kampuočiai didelę apkrovos dalį pradeda perimti kai mūro įtempiai yra 5% nuo gniuždomojo stiprio, KK-S1-2 kai – 2,5% ir KKp-S1-1 – 8%. KKp-S1-1 bandinio kampuočių išilginių deformacijų diagrama rodo, kad slydimas tarp kampuočių ir mūro prasidėjo labai greitai ir kampuočiai vertikaliosios apkrovos beveik neperėmė, todėl visas sustiprinimo efektas buvo gautas dėl skersinių deformacijų suvaržymo.



5.10 pav. Kampuočių vertikalių deformacijų priklausomybė nuo mūro santykinio įtempio

Vertinant kampuočių santykinę gniuždymo deformaciją akivaizdu, kad mūro elementui suyrant kampuočiai nepasiekia savo takumo stiprio. Tai yra įvertinama skaičiavimuose priimant atitinkamą kampuočių išnaudojimo laipsnio koeficientą. Teoriškai apskaičiuojant tokių sustiprintų mūro elementų laikomąją galią, kai kampuočiai nėra tiesiogiai apkrauti vertikalia apkrova ir neatremti atramoje, o visą vertikalią apkrovą perima trintimi, siūloma priimti kampuočių išnaudojimo koeficiento vertę lygią 0,35. Kadangi eksperimentuose buvo sukuriamos skirtingos trinties salygos tarp mūro elemento ir plieno, apskaičiuojami eksperimentiniai plieno stiprio išnaudojimo koeficientai ir pateikiami 5.8 lentelėje. Kur matoma, kad kai kampuočiai prie mūro buvo glaudžiami per skiedinio sluoksnį, jų stiprio išnaudojimas vidutiniškai siekė 50 % ir buvo didesnis nei teoriškai siūloma, o

bandiniuose, kuriuose buvo mažinama trintis gauta, kad kampuočiai nepasiekė teorinio išnaudojimo laipsnio.

5.8 lentelė. Eksperimentiniai kampuočių išnaudojimo koeficientai.

Serija	Bandinys	Įtempiai kampuočiuose prieš pat suirimą, MPa	Kampuočių takumo įtempiai, MPa	Kampuočių išnaudojimo koeficientas, γ_b	γ_b , vid
KS-S1	KS-S1-1	108,54	230,0	0,47	0,5
	KS-S1-2	98,35		0,43	
KS-S2	KS-S2-1	139,9		0,61	
KK-S1	KK-S1-1	76,2		0,33	0,28
	KK-S1-2	50,5		0,22	
KKp-S1	KKp-S1-1	17,89		0,08	0,08

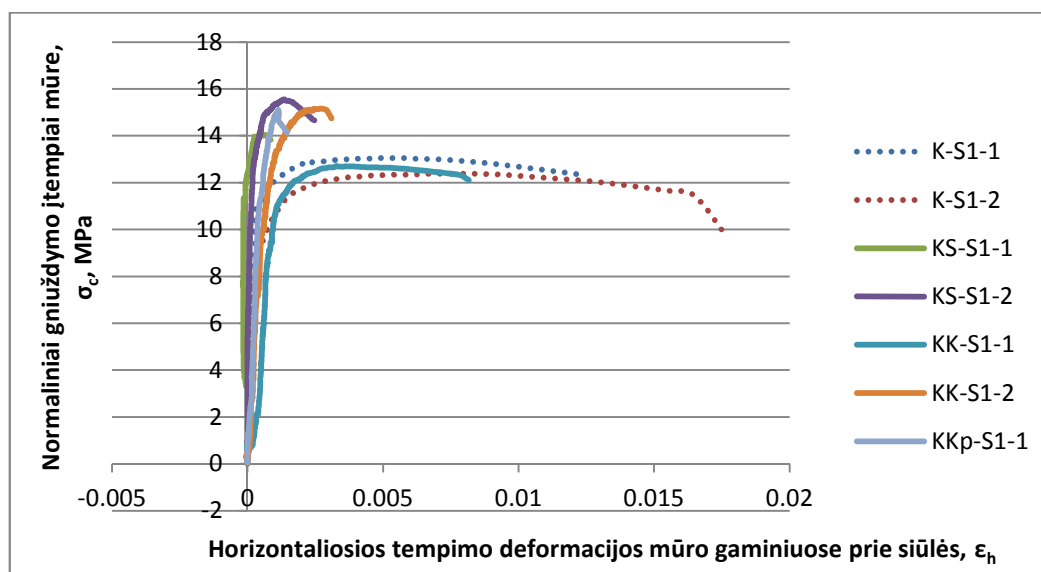
Kaip žinoma mūras suyra dėl tempimo įtempių susidarančių mūro gaminiuose dėl skirtingų horizontaliųjų skiedinio siūlių ir mūro gaminių deformacinių savybių. Todėl atliekant bandymus buvo matuojamos mūro gaminių deformacijos statmenai jėgos pridėjimo kryptčiai šalia skiedinio siūlių (žr. 11 pav. H1 ir H2 davikliai). Stiprinant mūrą visų tipų apvalkalai suvaržo šias deformacijas, todėl gaunamas mūro gniuždomojo stiprio padidėjimas. Nagrinėjant bandymų rezultatus matoma, kad sustiprinus kolonas plieninių kampuočių apvalkalu, yra žymiai suvaržomos skersinės mūro deformacijos (5.9 lentelė). Nestiprintuose K-S1 serijos bandiniuose vidutiniškai horizontaliosios blokelių santykinės deformacijos šalia siūlės, veikiant didžiausiai apkrovai, buvo 0,00579, K-S2 bandinyje – 0,004. Atlikus bandymus su sustiprintais bandiniais matyti, kad KS-S1 serijos bandiniuose gautas didžiausias šių deformacijų suvažymas, nes santykis tarp vidutinių šios serijos deformacijų su vidutinėmis nestiprintų kolonų deformacijomis yra vos 0,19, t.y. sustiprinus apvalkalu mūro gaminio skersinės deformacijos prie siūlės yra 5,2 karto mažesnės. KS-S2 serijos bandinyje gautas deformacijų suvažymas yra mažesnis nei KS-S1, tačiau taip pat yra žymus, nes santykis tarp apvalkalu sustiprinto bandinio skersinių deformacijų su nestiprinto bandinio yra 0,689. Panašūs rezultatai gauti ir bandant kitas bandinių serijas, KK-S1 serijos bandinių – 0,504, o KKp-S1 – 0,196 (žr. 5.9 lentelę). Matant kaip buvo suvaržytos skersinės deformacijos, darosi aišku ir kodėl gauti tokie dideli plyšių susidarymo jėgų verčių padidėjimai ir kodėl šios jėgos taip priartėjo prie ardančiųjų apkrovų.

5.11 ir 5.12 pav. pateikiamos priklausomybės tarp normalinių įtempių mūre ir horizontaliųjų tempimo deformacijų mūro gaminiuose šalia siūlės. Grafikuose normaliniai mūro įtempiai yra gauti jau atmetus gniuždančios jėgos dalį, kurią kiekviename bandyme tenka kampuočiams. 5.11 pav. pateiktame grafike matomas ryškus skersinių deformacijų suvaržymas (bandiniai KS-S1-1, KS-S1-2, KK-S1-2, KKp-S1-1), tačiau bandinyje KK-S1-1 horizontaliųjų deformacijų priklausomybės nuo normalinių įtempių diagrama yra artima

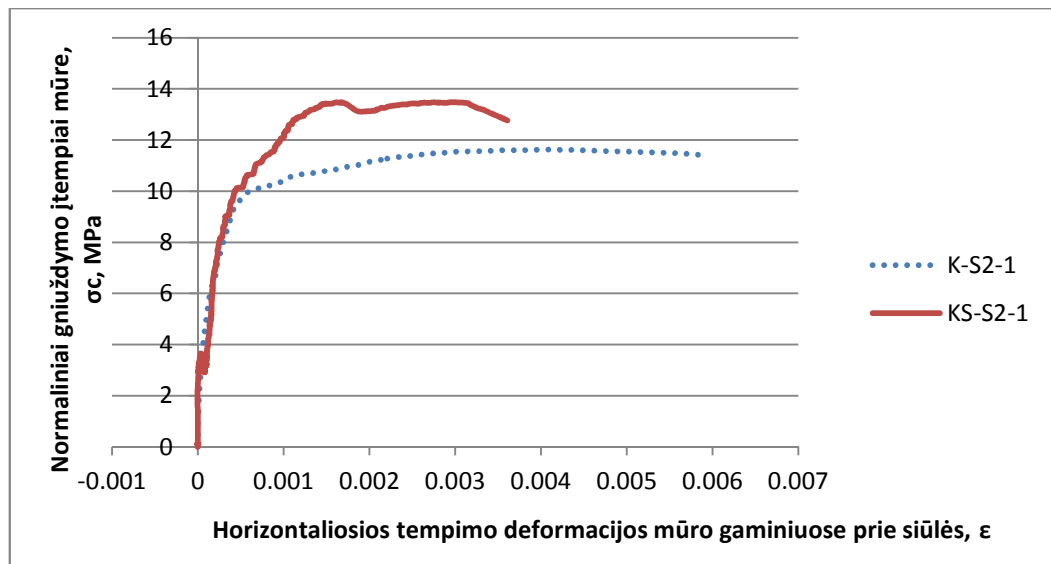
nestiprinto mūro diagramai. Šiuo atveju tik suirimo deformacijos yra mažesnės, lyginant su nestiprintų bandinių. Bandiniuose, kuriuose tarp kampučių ir mūro buvo panaudotas skiedinys, gauta, kad susidarė mažiausios horizontaliosios deformacijos t.y. jos buvo geriausiai suvaržytos. Toliau analizuojant šių deformacijų pasiskirstymą bandiniuose, matyti, kad bandiniuose su kartonu KK-S1-2 ir KKp-S1-1 jos pasiskirsto labai panašiai ir pradeda skirtis tik priartėjus prie suirimo apkrovos (išskyrus bandinį KK-S1-1). Sustiprinto mūro bandinyje KS-S2-1 gautas horizontaliųjų deformacijų pasiskirstymas viso apkrovimo metu buvo labai artimas nestiprinto mūro horizontaliųjų deformacijų pasiskirtymui, tačiau didėjant gniuždomajai apkrovai keitėsi ir skersinių deformacijų pobūdis, didėja suvaržymo efektas (5.12 pav.).

5.9 lentelė. Horizontaliosios mūro gaminių deformacijos šalia siūlių, esant maksimaliai gniuždančiai apkrovai

Serija	Bandinys	Horizontaliosios (tempimo) blokelių deformacijos prie siūlių esant didžiausiai apkrovai		$\frac{e_{hi,obs,s}}{e_{hm,obs,m}}$	$\frac{e_{hm,obs,s}}{e_{hm,obs,m}}$
		Bandinio, $\epsilon_{hi,obs}$	Vidutinis bandinių serijos, $\epsilon_{hm,obs}$		
K-S1	K-S1-1	0,00477	0,00579	-	-
	K-S1-2	0,00680		-	
K-S2	K-S2-1	0,00400	0,004	-	-
KS-S1	KS-S1-1	0,000667	0,0011	0,115	0,19
	KS-S1-2	0,001532		0,264	
KS-S2	KS-S2-1	0,002755	0,002755	0,689	0,689
KK-S1	KK-S1-1	0,003286	0,00292	0,568	0,504
	KK-S1-2	0,002546		0,440	
KKp-S1	KKp-S1-1	0,001133	0,00113	0,196	0,196



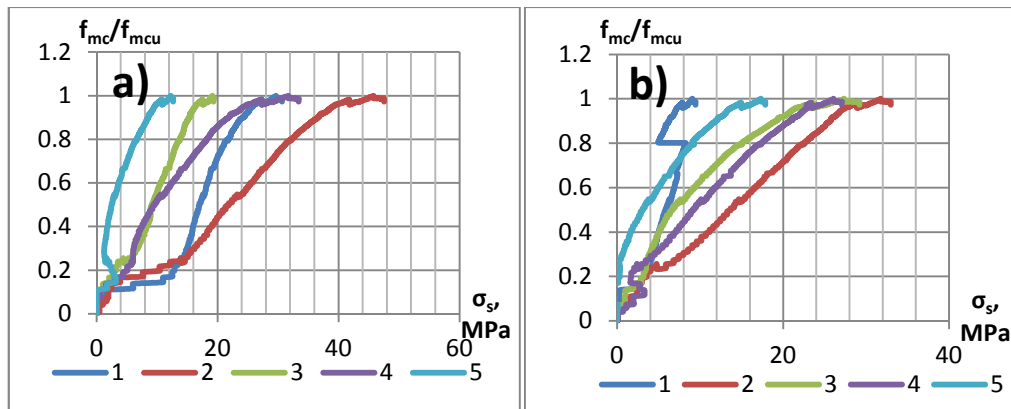
5.11 pav. Bandinių su S1 skiediniu horizontaliųjų tempimo deformacijų ir normalinių mūro įtempių priklausomybės



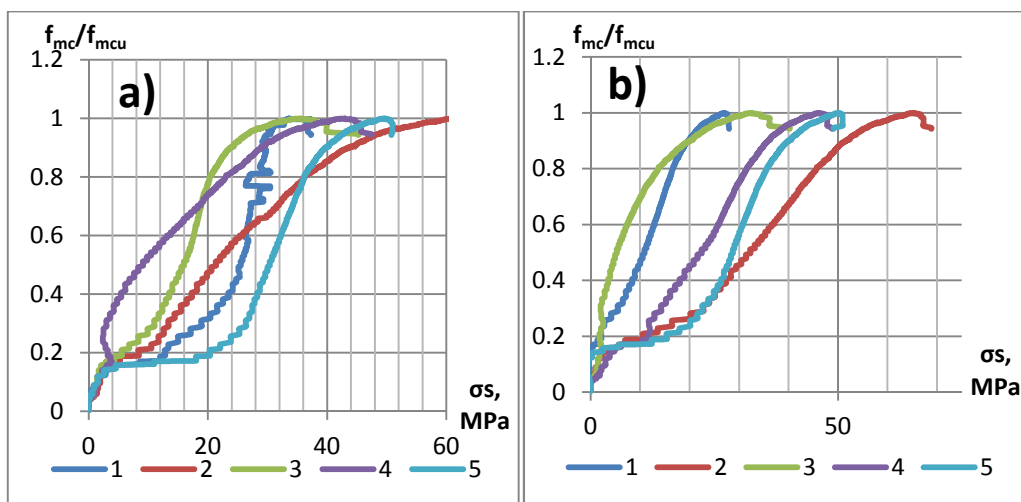
5.12 pav. Bandinių su S2 skiediniu horizontaliųjų tempimo deformacijų ir normalinių mūro įtempių priklausomybės

Apie mūro skersinių deformacijų suvaržymą galima spręsti ir pagal templių įtempius bandymo metu. Ant visų plieninių apvalkalo templių buvo suklijuoti tenzodavikliai, kurie fiksavo templių išilgines deformacijas. Pagal templių deformacijas nesunku nustatyti tempimo įtempius ir jose sukliamas jėgas. Lyginant 5.13-5.18 pav. pateiktus grafikus, matyti, kad visuose bandiniuose įtempiai templėse pasiskirstė gan skirtingai. Pastebima, kad dažniausiai didžiausia tempimo jėga susidarydavo 2 ir 4 templėse, o mažiausia 1 ir 5 (5.19-5.20 pav.). Mažiausia jėga gauta 1 ir 5 templėse gauta, nes tose vietose mūrą varžė netik apvalkalas, bet ir preso plokštės, nors tarp preso plokščių ir bandinių buvo dedamas dvigubas kartono sluoksnis, tačiau suvaržymas nebuvo panaikintas ir tai matyti, pagal tempimo įtempius viršutinėje ir apatinėje templėse (1 ir 5). Visuose bandiniuose įtempių templėse priklausomybių nuo mūro įtempių grafikai yra panašios formos, didėjant mūro apkrovai proporcingai didėja ir įtempiai templėse. Lyginant visų bandymų vidutines tempimo įtempių templėse reikšmes matyti, kad vos didesni įtempiai gauti ilgesniojoje kraštinėje esančiose templėse (5.10 lentelė). Kas reiškia, kad šia kryptimi mūras daugiau deformavosi skersine kryptimi. Nors vertinant vidutines deformacijų reikšmes matyti, kad trumpesniosios kraštinės templėse esančiose 3 pozicijoje susidarė didesnė tempimo jėga, nei 3 pozicijoje esančių templių ilgesniojoje kraštinėje. Tas akivaizdžiai matyti ir lyginant 19-20 pav. pateiktus vidutinių įtempių templėse grafikus. Ilgesniojoje skerspjuvio kraštinėje didžiausi vidutiniai įtempiai užfiksuoti ketvirtoje templėje, kurie buvo 46,5 MPa, o tai atitinka 3,65 kN tempimo jėgą, o mažiausi vidutiniai įtempiai užfiksuoti pirmoje templėje 22,7 MPa, tai atitinka 1,78 kN jėgą. Taigi, šiuo atveju tempimo jėgos skiriasi 2,05 karto. Panaši situacija yra ir su trumpesniąja skerspjuvio kraštine, kur didžiausi vidutiniai įtempiai sudarė 40,1 MPa, kurie

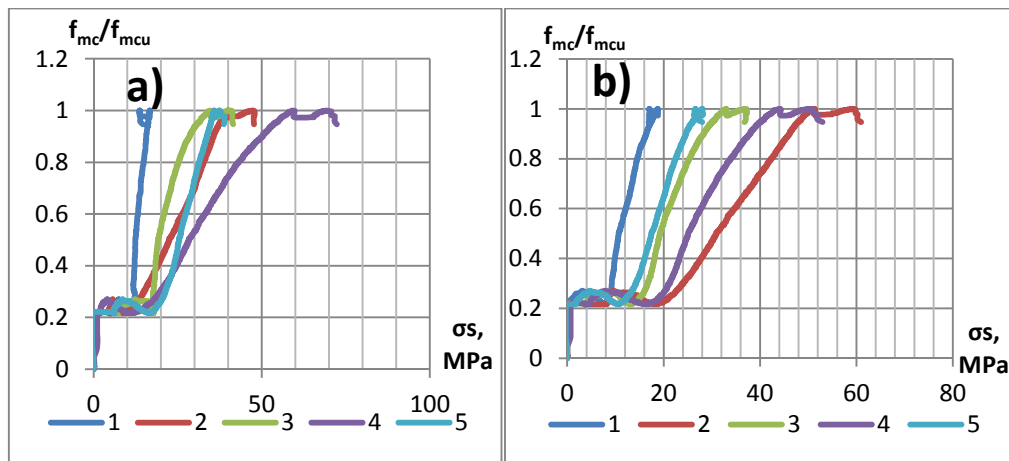
taip pat susidarė 4 tempļe, o tai atitiko 3,15 kN jėgą, o mažiausi taip pat pirmojoje – 18,7 MPa, kur jėga buvo 1,47 kN. Trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje mažiausia ir didžiausia jėgos skiriasi 2,14 karto, šis skirtumas yra artimas ilgesniosios kraštinės jėgų skirtimui. Absoliutus tempimo jėgos maksimumas gautas per bandymus buvo 5,13 kN. Lyginant skirtingų bandinių serijų tempimo įtempių pasiskirstymo bandiniuose grafikus, matoma, kad didžiausios tempimo jėgos susidarė bandiniuose, kuriuose tarpiniu sluoksniu tarp kampuočių ir mūro buvo skiedinys, o iš to galima daryti išvadą, kad šiuose bandiniuose buvo geriausiai suvaržytos skersinės mūro deformacijos. Naudojant skiedinį kaip tarpinį sluoksnį buvo geresnis kontaktas tarp mūro paviršiaus ir kampuočių, tuo pačiu užtikrinta, kad kampuočiai visu savo plotu buvo atsirėmę į mūrą ir patikimai varžė jo skersines deformacijas, o naudojant kartoną nebuvo užtikrinta, kad kampuočiai visu savo paviršiumi patikimai priglustų prie mūro paviršiaus, dėl mūro nelygumų. Todėl šiuo atveju ir mūro skersinės deformacijos nebuvo taip patikimai suvaržytos.



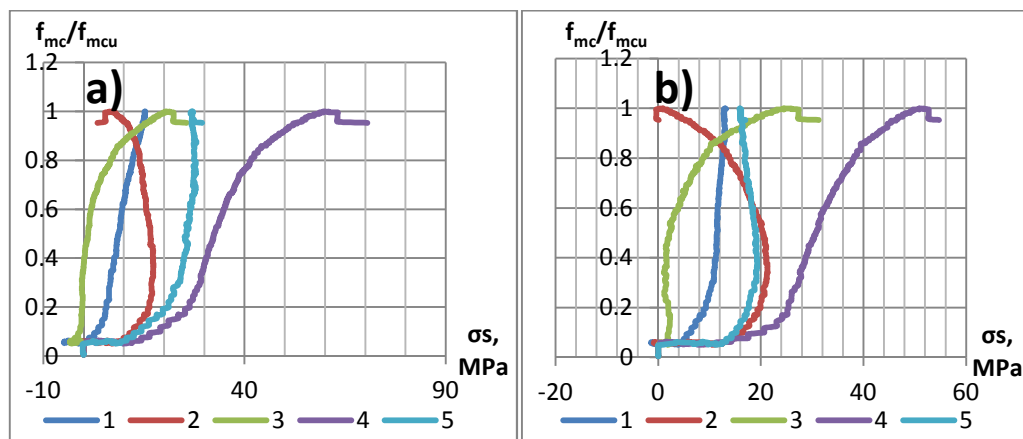
5.13 pav. KS-S1-1 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_{mc}/f_{mcu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.



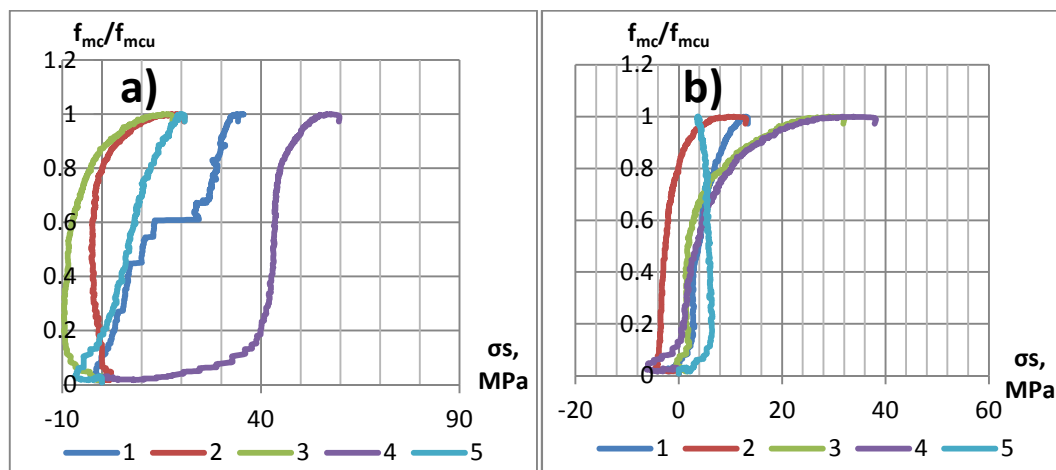
5.14 pav. KS-S1-2 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_{mc}/f_{mcu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.



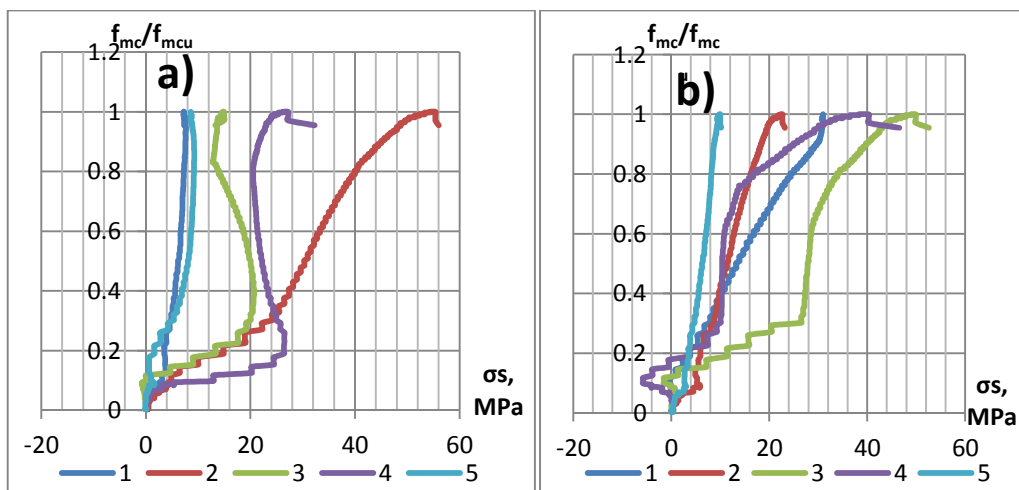
5.15 pav. KS-S2-1 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_{mc}/f_{mcu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.



5.16 pav. KK-S1-1 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_{mc}/f_{mcu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.



5.17 pav. KK-S1-2 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_{mc}/f_{mcu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.

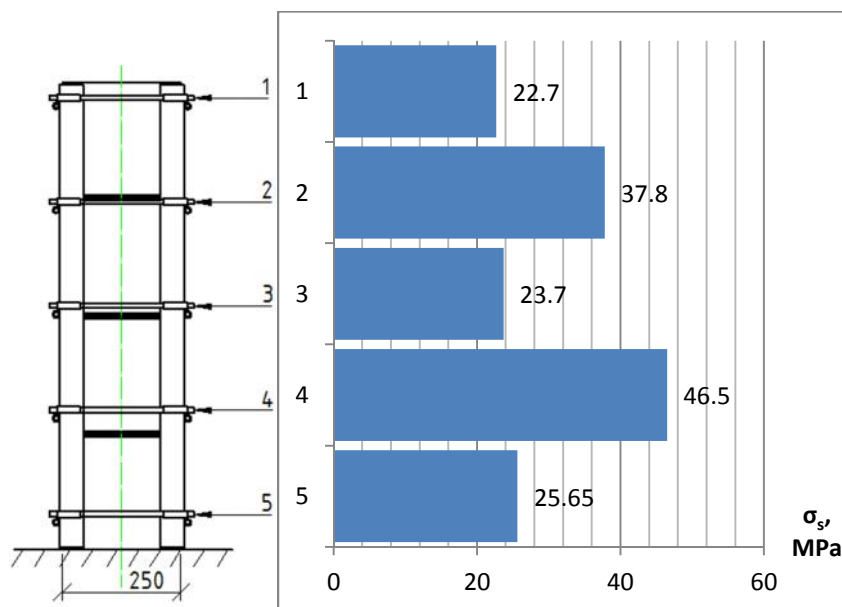


5.18 pav. KKp-S1-1 kolonos apvalkalo templių įtempių σ_s priklausomybė nuo mūro įtempių santykio su mūro stipriu f_{mc}/f_{mcu} ; a – templių esančių ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje; b – templių esančių trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Skaičiais 1,2,3,4,5 sužymėtas templių eiliškumas nuo bandinio viršaus.

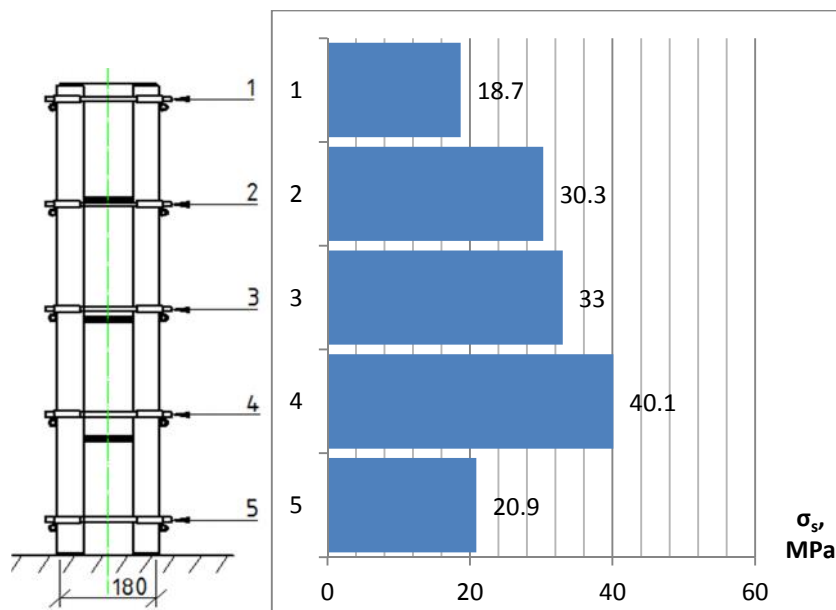
5.10 lentelė. Įtempiai templėse sustiprintam mūrui pasiekus maksimalius gniuždomuosius įtempius σ_{cu}

Bandinys	Įtempiai templėse ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje, MPa					Įtempiai templėse trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje, MPa				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
KS-S1-1	29.6	45.8	19.2	31.7	12.3	9.06	31.8	27.3	26.1	17.3
KS-S1-2	33.7	61.6	35.6	43.0	49.7	27.1	65.4	32.6	46.3	50.2
KS-S2-1	16.7	40.1	34.9	59.7	35.9	18.8	51.4	33.0	44.3	28.1
KK-S1-1	15.2	6.4	21.4	60.9	27.2	13.1	0.2	26.0	51.8	16.0
KK-S1-2	33.8	18.8	16.5	57.6	20.2	13.0	10.6	29.9	33.8	3.8
KKp-S1-1	7.2	54.3	14.7	26.2	8.6	31.0	22.3	49.0	38.3	9.8
Vidurkiai:	22,7	37,8	23,7	46,5	25,65	18,7	30,3	33,0	40,1	20,9

Žinant jėgas veikiančias templėse galima nustatyti gniuždomuosius mūro įtempius veikiančius horizontaliają kryptimi.



5.19 pav. Vidutiniai įtempiai templėse ilgesniojoje skerspjūvio kraštinėje



5.20 pav. Vidutiniai įtempiai templėse trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje

Sustiprintų bandinių suirimo pobūdis skyrėsi nuo nesustiprintų bandinių. Sustiprintuose bandiniuose plyšių atsivėrimo apkrovos buvo labai artimos suirimo apkrovoms, o ir plyšių pasiskirstymas buvo kitoks nei nestiprintuose bandiniuose. Suvaržytame mūre pirmieji plyšiai vėrėsi ne per centrus, o arčiau kraštų ir plito pagal suvaržymo linijas. Pirmasis plyšys sustiprintame bandinyje dažniau atsiverdavo trumpesniojoje kraštinėje tai buvo užfiksuota 4 bandiniuose iš 6, likusių dviejų bandinių pirmieji plyšiai atsivėrė trumpesniojoje skerspjūvio kraštinėje. Beveik visuose bandymuose pleišėjimas ir suirimas prasidėdavo antrajame nuo viršaus blokelyje (žr. 5.21 pav.). O nagrinėjant suirusių bandinių blokelių daugumoje buvo aiškūs suvaržytos ir nesuvaržytos dalies skerspjūvio dalies kontūrai, matyti, kad nesuvaržyta bandinio dalis parabolės formos plyšiu atskyra nuo suvaržytosios ir tuomet įvyksta suirimas, taip pat matoma, kad plyšių kryptį nulemia ir kiaurymių padėtis blokeliuose (5.22 pav.).



5.21 pav. Kolonų bandinių plyšių pasiskirstymas po suirimo



5.22 pav. Kolonų blokelių suirimo formos, teorinė ir gautos eksperimentiškai

5.1.4. Rezultatų palyginimas

Pagal 4.1.2. skyrelyje aprašytą metodiką apskaičiuojamas bandymuose naudoto mūro stiprio padidėjimas dėl skersinių deformacijų suvaržymo plieniniu apvalkalu (naudojama 4.1.2. skyrelio (14) formulė). Matoma, kad skaičiuojant pagal šią formulę stiprio padidėjimas priklauso nuo mūro skerspjūvio matmenų, plieninių templių žingsnio, templių skerspjūvio ir plieno stiprio. Taigi, apskaičiavus pagal šią formulę tiek mūrui, kuriam buvo panaudotas S1 skiedinys, tiek kuriam panaudotas S2 skiedinys, stiprio pokyčio absoliutinė vertė bus ta pati. Pagal anksčiau pateiktus apvalkalo ir mūro duomenis, apskaičiuojamas teorinis stiprio padidėjimas: $\Delta f_d = 1,84 \text{ MPa}$. Sudaroma 5.11 lentelė, kurioje palyginami teoriniai ir bandymų duomenys apie stiprio padidėjimą. Rezultatai rodo, kad vidutinis stiprio prieaugis bandinių serijoje su S1 skiediniu visiškai sutampa su teoriniu ir yra 14,5 %, o bandiniuose su silpnėsiu skiediniu S1, eksperimentiškai nustatytas stiprio prieaugis yra 1,1 % didesnis už teoriškai apskaičiuotą. Teoriniai mūro stiprio padidėjimo skaičiavimo rezultatai yra patikimi.

5.11 lentelė. Sustiprintų mūro elementų teorinio ir eksperimentinio stiprio prieaugių palyginimas

Serija	Bandinys	Nestiprinto mūro stipris, f_d , MPa	Stiprio prieaugis, Δf_d		Vidutinis stiprio prieaugis, $\Delta f_{d,vid}$		Teorinis stiprio prieaugis, $\Delta f_{d,t}$	
			MPa	%	MPa	%	MPa	%
KS-S1	KS-S1-1	12,71	1,5	11,8	1,84	14,5	1,84	14,5
	KS-S1-2		2,84	22,3				
KK-S1	KK-S1-1		0,0	0				
	KK-S1-2		2,45	19,3				
KKp-S1	KKp-S1-1		2,4	18,9				
KS-S2	KS-S2-1	11,62	1,86	16,0	1,86	16,0		15,8

Naudojant 4.1.2 skyriuje pateiktą 11 formulę apskaičiuojama sustiprintų gniuždomų mūro elementų laikomoji galia, kuriai nustatyti naudojamos eksperimentuose

nustatytos mūro ir plieninio apvalkalo medžiagų stiprio charakteristikų reikšmės. Mūro su S1 tipo skiediniu gniuždomasis stipris 12,711 MPa, S2 – 11,622 MPa, plieninių tempių takumo stipris 238,0 MPa, plieninių kampuočių takumo stipris 230 MPa. Gauta teorinė sustiprintų kolonų laikomoji galia palyginama su bandymuose nustatyta (5.12 lentelė).

5.12 lentelė. Sustiprintų mūro elementų teorinės ir eksperimentinės laikomųjų galių palyginimas

Serija	Bandinys	Eksperimentinė laikomoji galia, $F_{u,obs}$, kN	Vidutinė serijos laikomoji galia, $F_{u,vid,obs}$, kN	Teoriškai apskaičiuota laikomoji galia, kN	$F_{u,vid,obs}/ N_{Rd}$
KS-S1	KS-S1-1	774	795,5	750,1	1,06
	KS-S1-2	817			
KK-S1	KK-S1-1	662	702,0		0,94
	KK-S1-2	742			
KKp-S1	KKp-S1-1	701	701		
KS-S2	KS-S2-1	772	772	701,0	1,10

Kaip matoma 5.12 lentelėje, bandinių serijos, kuriose tarpinis sluoksnis buvo skiedinys (KS-S1 ir KS-S2 serijos), gauta, kad teoriškai apskaičiuota sustiprinto mūro elemento laikomoji galia yra mažesnė už gautą eksperimentiškai, kaip ir turėtų būti gaunama. KS-S1 serijos atveju, eksperimentinė laikomoji galia vidutiniškai buvo 6,0 % didesnė už teorinę, o KS-S2 atveju – 10 % didesnė už teoriškai apskaičiuotą. Tačiau atvejais, kai buvo sumažinta trintis tarp kampuočių ir mūro, gauta, kad eksperimentinė laikomoji galia yra mažesnė už teorinę (vidutiniškai 6,5 % mažesnė). Taip buvo gauta, nes sumažinus trintį kampuočių išnaudojimo koeficientas ženkliai sumažėjo ir nebesiekė teorinio (kampuočių išnaudojimo koeficiento vertes žr. 5.8 lentelėje). Reikėtų atkreipti dėmesį, kad kai skaičiuojama teorinė plienine apkaba sustiprinto mūro elemento laikomoji galia, apkaba turi būti įrengta pagal rekomendacijas, kurios siūlo tarp kampuočių ir mūro naudoti skiedinį. Taigi, eksperimentai rodo, kad kai įrengiame plieninį apvalkalą, kaip rekomenduojama, galima projektuoti sustiprintus mūro elementus pagal pateiktą skaičiavimo metodiką.

5.2. Kompiuterinė analizė

5.2.1. Konstrukcijos modeliavimas

Atliekamas konstrukcijos kompiuterinis modeliavimas baigtinių elementų programa „SolidWorks Simulation“ ir statinė konstrukcijos analizė. Kuriamas skaičiuojamasis modelis pagal KS-S1 mūro fragmentų bandinių seriją, t.y. Kai kampuočiai prie mūro glaudžiami per skiedinio sluoksnį ir mūro fragmentams sumūryti panaudotas

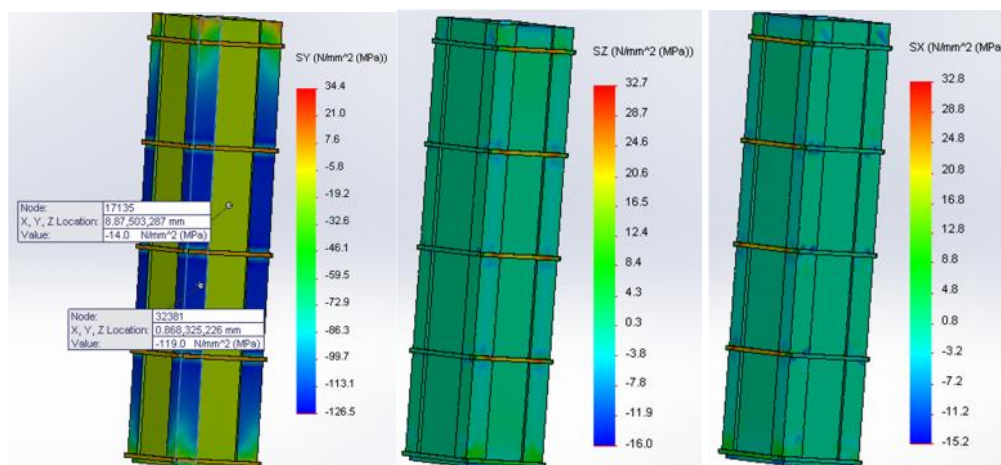
stipresnysis S1 skiedinys. Modelyje įvedamos bandymais nustatytos medžiagų mechaninės savybės, kurių nustatymas ir vertės yra aprašytos 5.1.1 poskyryje. Modeliuojant parenkama, kad veikianti apkrova yra 795 kN (vidutinė KS-S1 serijos bandinių laikomoji galia nustatyta eksperimentiškai), kuri yra pridėjama kaip iškirstyta 17,7 MPa apkrova ant blokelių, kampuočiai apkrova yra neapkraunami. Atrama yra parenkama kuri leidžia poslinkius horizontaliomis kryptimis, tačiau varžo vertikalų konstrukcijos poslinkį. Konstrukcijos atrėmimo ir apkrovos pridėjimo sąlygos parenkamos analogiškos atliktų eksperimentų sąlygoms.

5.2.2. Rezultatai

Atlikus statinę konstrukcijos analizę, gauti rezultatai lyginami su eksperimentų metu gautais KS-S1 bandinių serijos rezultatais. Gauta, kad normaliniai įtempiai mūre išilgine kryptimi yra 14,0 MPa, o eksperimento metu nustatyta, kad vidutiniškai KS-S1 serijos bandiniuose normaliniai įtempiai prieš suirimą buvo 14,88 MPa. Eksperimento metu gauta 6,2 % didesnė normalinių įtempių vertė, nei kompiuterine analize. Tačiau normaliniai įtempiai kampuočiuose išilgine kryptimi gauti atliekant kompiuterinę analizę buvo 119 MPa, o eksperimentiškai nustatyta 103,4 MPa, o tai yra 13,1 % mažiau (išilginių normalinių įtempių pasiskirstymą konstrukcijoje žr. 5.23 pav. a). Nagrinėjami tempimo įtempiai templėse, eksperimentinės ir kompiuterinės analizės vertės pateikiamos 5.19 lentelėje, o tempimo įtempių pasiskirstymas templėse gautas atliekant kompiuterinę analizę pateiktas 5.23 pav. b ir c. Kaip matoma, tempimo įtempių reikšmės templėse labai skiriasi, mažiausias skirtumas gaunamas viduriniuose templėse pažymėtose 3 numeriu (templių numerius žiūrėti 5.19 ir 5.20 pav.), nors ir čia skirtumas yra didesnis nei 27 %.

5.13 lentelė. Tempimo įtempių plieninėse templėse palyginimas

Atvejis	Įtempiai templėse ilgesniojoje skerspjuvio kraštinėje, MPa					Įtempiai templėse trumpesniojoje skerspjuvio kraštinėje, MPa				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Eksperimentiškai gauta, KS-S1 serijoje	31,7	53,7	27,4	37,4	31	18,1	48,6	30,0	36,2	33,8
Kompiuterinė analizė	22,8	22,6	21,5	22,9	9,2	23,1	20,9	21,2	22,1	7,9
Skirtumas lyginant su kompiuterine analize, %	39	138	27	63	237	22	133	29	64	328



5.23 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas konstrukcijoje. a – normaliniai įtempiai išilgine kryptimi; b – normaliniai įtempiai trumpesniosios skerspjūvio kraštinės kryptimi; c – normaliniai įtempiai ilgesniosios skerspjūvio kraštinės kryptimi

Modeliuojant plieniniu apvaskalu sustiprintas mūrines konstrukcijas reikėtų detaliau aprašyti sąlyčio tarp kampuočių ir mūro zoną. Šiuo atveju buvo įvestas tarpinis sluoksnis tarp kampuočių ir mūro, kurio savybės buvo žinomos ir tiek mūras, tiek kampuočiai modelyje buvo visiškai sukibę su tarpiniu sluoksniu ir visas prasislinkimas tarp mūro ir kampuočių vyko per tarpinį skiedinio sluoksnį. Norint modeliuoti konstrukciją be tarpinio sluoksnio reikėtų žinoti mūro gaminių ir plieno trinties koeficientą, kuriam nustatyti reikėtų atlikti papildomus eksperimentus. Šiuo atveju atliktos analizės normalinių išilginių įtempių vertės kampuočiuose ir mūre buvo artimos eksperimentinėms, tačiau labai skyrėsi templėse susidarančių tempimo įtempių vertės.

5.3. Skyriaus išvados

Atlikus sustiprinto gniuždomojo mūro eksperimentinius, analitinius ir taikant elgsenos skaitinį modeliavimą tyrimus, nustatyta, kad:

Bandinių, kuriuose buvo užtikrintas geras apvaskalo ir mūro sukibimas, laikomoji galia vidutiniškai padidėjo iki 42 %.

Mūro gniuždomasis stipris, dėl skersinių deformacijų suvaržymo, vidutiniškai padidėjo iki 15 %.

Eksperimentiškai gautas stiprio prieaugis buvo 15 %, kuris visiškai sutampa su teoriškai apskaičiuotuoju, todėl teoriniai stiprio prieaugio skaičiavimai yra patikimi.

Eksperimento metu gauta 6,2 % didesnė mūro normalinių įtempių vertė, nei kompiuterine analize, tačiau normaliniai gniuždymo įtempiai kampuočiuose buvo 13,1 % didesni kompiuterinės analizės atveju.

Atvejais kai buvo užtikrintas apvalkalo statramsčių ir mūro sukibimas, eksperimentiškai nustatyta bandinių laikomoji galia KS-S1 serijos atveju, buvo 6,0 % didesnė už teorinę, o KS-S2 atveju – 10 % didesnė už teoriškai apskaičiuotą.

Esant patikimam kontaktui tarp plieninio apvalkalo vertikaliųjų juostų ir stiprinamojo mūro, juostos įsijungia į bendrą darbą su stiprinamuoju mūru. Šiuo atveju vertikaliosios juostos stiprio išnaudojimo koeficientas siekia iki 0,61 (vidutiniškai 0,5). Bandiniuose su sumažinta trintimi šis koeficientas buvo iki 6 kartų mažesnis.

BENDROSIOS IŠVADOS

Visi darbe analizuoti mūro stiprinimo būdai yra efektyvūs, turi savo privalumų ir trūkumų, todėl juos rinktis reikėtų pagal konkretų atvejį. Nagrinėjant konstrukcijų stiprinimą polimeriniais apvalkalais pastebėta, kad mokslininkų pateiktų eksperimentų ir skaičiavimo metodikos, aprašytos 4.3 poskyryje, rezultatai yra labai artimi ir todėl atliekant polimeriniais apvalkalais sustiprinto mūro laikomosios galios vertinimą galima pasikliauti šia skaičiavimų metodika. Atliekant stiprinimo metodų analizę pastebėta, kad efektyviausia stiprinti apvalaus arba kvadratinio skerspjūvio kolonas, nes tokiu atveju gaunamas didžiausias efektyviai suvaržyto skerspjūvio plotas. Stiprinant kvadratinio arba stačiakampio kolonas, gaunamas didesnis sustiprinimo efektyvumas, kai kolonų kampai yra suapvalinami bent 25 mm spinduliu. Kai kolonos skerspjūvis yra stačiakampis ir jo kraštinių santykis viršija 3, mūro gniuždomojo stiprio prieaugis dėl skersinių deformacijų suvaržymo yra nedidelis.

Stiprinant mūrą plieniniu apvalkalu būtina užtikrinti gerą sąlyčio paviršių ir sukibimą tarp apvalkalo kampuočių ir mūro, tuomet gaunamas didesnis mūro stipris ir sustiprintų elementų laikomoji galia. Tai akivaizdžiai parodė eksperimentų atliktų, Vilniaus Gedimino technikos universiteto laboratorijoje, rezultatai. Bandiniuose, kuriuose buvo užtikrintas geras apvalkalo statramsčių sukibimas su mūru, gniuždomasis stipris dėl skersinių deformacijų suvaržymo vidutiniškai padidėjo 16,7 %, o laikomoji galia 41,9 %, o bandiniuose, kuriuose buvo sumažinta trintis tarp kampuočių ir mūro, gniuždomasis stipris padidėjo 12,7 %, laikomoji galia 22,7 %. Visuose bandiniuose mūro stipris dėl skersinių deformacijų suvaržymo vidutiniškai padidėjo 15 %. Eksperimentais nustatyta, kad, įrengus apvalkalą, mūro ribinės skersinės tempimo deformacijos šalia gulsčiosios skiedinio siūlės vidutiniškai sumažėjo 2,6 karto. Gautos šias deformacijas varžančių jėgų, kurios susidarė plieninėse tamplėse, reikšmės.

Bandiniuose, kuriuose nėra užtikrintas geras plieninio apvalkalo sukibimas su mūru, vertikaliųjų statramsčių (kampuočių) išnaudojimo koeficientas iki 6 kartų mažesnis, dėl to ir visos konstrukcijos laikomoji galia padidėja neženkiai. Esant patikimam kontaktui tarp plieninio apvalkalo vertikaliųjų juostų ir stiprinamojo mūro, juostos įsijungia į bendrą darbą su stiprinamuoju mūru. Šiuo atveju vertikaliosios juostos stiprio išnaudojimo koeficientas siekia iki 0,61 (vidutiniškai 0,5).

Atliekant plieniniu apvalkalu sustiprinto mūro laikomosios galios skaičiavimą pagal 4.1.2. poskyryje pateiktą metodiką gaunami patikimi rezultatai. Eksperimentinės ir teorinės stiprio padidėjimo reikšmės buvo beveik lygios, tačiau laikomosios galios reikšmės kai bandiniuose buvo sumažinta trintis eksperimentų metu buvo mažesnės už teoriškai

apskaičiuotas, nes šiais atvejais kampuočių išnaudojimo koeficientas yra mažesnis už 0,35, todėl įrengiant tokio tipo apvalkalą yra būtina laikytis įrengimo rekomendacijų. O atvejais, kai sukibimas yra užtikrintas ir apvalkalas dirba tik per trintį, kampuočių išnaudojimo koeficientą γ_b galima priimti lygų 0,4.

NAUDOTA LITERATŪRA

- Aiello, M. A; Micelli, F; Valente, L. 2009. FRP Confinement of Square Masonry Columns, *Journal of Composites for Construction* 13(2): 148-158
- Aprile, A; Benedetti, A; Grassucci, F. 2001. Assessment of cracking and collapse for old brick masonry columns, *Journal of Structural Engineering* 124(12)
- Berto, L; Saetta, A; Scotta, R; Vitaliani, R. 2005. Failure mechanism of masonry prism loaded in axial compression: computational aspects, *Materials and Structures* 38: 249-256
- Binda, L; Baronio, G. 1987. Mechanisms of masonry decay due to salt crystallization, *Durability of Buildings Materials*, 4:227 –40
- Borri, A; Castori, G; Corradi, M. 2013. Masonry Confinement Using Steel Cords, *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(12): 1910-1919
- Campione, G; Miraglia, N. 2003. Strenght and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP, *Cement and Concrete Composites*, 25: 31-41.
- Castori, G; Borri, A; Corradi, M. 2014. Strengthening of fair face masonry columns with steel hooping, *Materials and Structures*.
- Corradi, M; Grazini, A; Borri, A. 2006. Confinement of brick masonry columns with CFRP materials, *Composites Science and Technology* 67: 1772-1783
- Domone, P; Illston, J. Construction Materials: Their Nature and Behaviuor, New York: Taylor & Francis 2010.
- Gaze, M. E; Crammond, N. J. 2000. The formation of thaumasite in a cement: lime: sand mortar exposed to cold magesium and potassium sulfate solutions, *Cement & Concrete Composites*, 22: 209-222.
- Hess, R. P. J; Binda, L; Papayianni, I; Toumbakari, E. 2004. Characterisation and damage analysis of old mortars, *Materials and Structures* 37: 644-648.
- Jokūbaitis, V; Šiaučiuvėnas, G. Statinių konstrukcijų techninės būklės vertinimas, Vilnius: Technika 2012. 200 p.
- Jurina, L. 2010. Tecniche di cerchiatura di colonne in muratura, *Structural*, 164:38-49
- Kaushik, H. B; Rai, D. C; Jain S.K. 2007. Stress-strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(9).
- Larbi, J. A. 2004. Microscopy applied to the diagnosis of deterioration of brick masonry, *Construction and building Materials* 18: 299-307.
- LST EN 1015-11:2004 Mūro skiedinio bandymo metodai. 11 dalis. Sukietėjusio skiedinio stiprio lenkiant ir gniuždant nustatymas. Vilnius, 2004. 11 p.

- LST EN 1996-1-1:2006 Eurokodas 6. Mūrinių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios armuotųjų ir nearmuotųjų mūrinių konstrukcijų taisyklės. Vilnius, 2007. 102 p.
- LST EN 772-1:2011 Mūro gaminių bandymo metodai. 1 dalis. Gniuždymo stiprio nustatymas. Vilnius, 2011. 13p.
- Мальганов А. И., Плесков В.С., Полищук А.И. 1990. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий. Томск. 320 с.
- Masia, M. J; Shrive, N.G. 2003. Carbon fibre reinforced polymer wrapping for the rehabilitation of masonry columns, *Canadian Journal of Civil Engineering* 30: 734-744
- Micelli, F; Aiello, M.A; Valente, L. 2007. Structural Upgrading of Masonry Columns by Using Composite Reinforcements, *Journal of Composites for Construction*, 11(6)
- 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.
- Scrivener, K. L; Young, J. F. 1997. Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems, *Proceedings of Materials Research Society* 27-30
- Toutanji, H; Deng, Y. 2002. Strength and durability performance of concrete axially loaded members confined with AFRP composite sheets, *Composites* 33:255-61
- Waghmare P. B. 2011. Materials and jacketing technique for retrofitting of structures, *International journal of advanced engineering research and studies* 1(1): 15-19
- Zucchini, A; Lourenco, P. B. 2006. *Mechanics of masonry in compression: Results from a homogenisation approach.*