



PLIENINIŲ APVALKALŲ SUSTIPRINTO MŪRO LAIKOMOSIOS GALIOS TYRIMAS

Povilas Petruškevičius

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas: p.petruskevicius@gmail.com*

Santrauka. Straipsnyje yra nagrinėjamas mūro ir plieninio apvalkalo bendras darbas. Nagrinėjimui pasirinktas atvejis, kuomet apvalkalas yra apkraunamas netiesiogiai, o į bendrą darbą su mūru įsijungia per trintį. Aprašomi sustiprinto plieniniu apvalkalu gniuždomo mūro eksperimentiniai tyrimai. Eksperimentais nustatytos plieninio apvalkalo elementų ir sustiprinto mūro deformacijos. Nustatytas apvalkalo kampuočių išnaudojimo koeficientas esant skirtingoms sukibimo su mūru sąlygoms. Gauti eksperimentiniai mūro stiprio suvaržius apvalkalu rezultatai palyginti su teoriškai apskaičiuotais. Gauti rezultatai rodo, kad mūro stiprinimas plieniniu apvalkalu yra efektyvus sprendinys, gauta tiek mūro stiprio padidėjimas dėl skersinių deformacijų suvaržymo, tiek bendras mūro fragmentų laikomosios galios padidėjimas dėl mūro ir apvalkalo bendro darbo.

Reikšminiai žodžiai: sustiprintas mūras, plieninis apvalkalas, suvaržytas mūras, mūro gniuždomasis stipris

Įvadas

Mūras yra plačiai naudojama statybinė konstrukcija. Eksploatavimo metu atsiradus pažeidimams jame ir konstrukcijoms netenkinant saugos ar tinkamumo ribinių būvių reikalavimų, mūrinės konstrukcijos stiprinamos betoniniais, plieniniais, armuoto tinko ar armuoto polimero apvalkalais. Apvalkalai, priklausomai nuo jų konstrukcinio sprendinio, atlaiko dalį apkrovos bei dėl mūro skersinių deformacijų suvaržymo padidina stiprinamojo mūro gniuždomąjį stiprį (Zucchini 2006; Kaushik 2007). Dėl įrengimo paprastumo dažniausiai naudojami plieniniai apvalkalai. Plieniniai apvalkalai ne tik suvaržo gniuždomojo mūro skersines deformacijas, bet ir atlaiko dalį gniuždomosios apkrovos, dėl ko ženkliai padidinama mūro laikomoji galia.

Šiame straipsnyje nagrinėjama mūro sustiprinto plieniniu apvalkalu itempių ir deformacijų būvis. Darbo tikslas yra nustatyti kokią įtaką mūro laikomajai galiai turi mūro skersinių deformacijų suvaržymas plieniniu apvalkalu bei kokią dalį apkrovos atlaiko apvalkalo statramsčiai priklausomai nuo trinties, pasireiškiančios tarp apvalkalo ir stiprinamojo mūro. Eksperimentais siekiama nustatyti kokią jėgos dalį per trintį perima apvalkalo kampuočiai, koks yra jų stiprio išnaudojimo laipsnis. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų laboratorijoje.

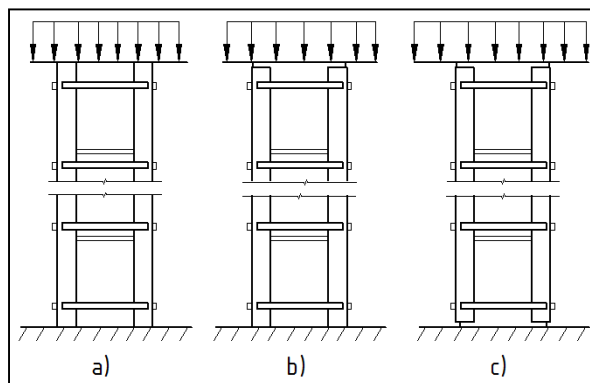
Mūro stiprinimas plieniniu apvalkalu

Plieninių apvalkalų įrengimui dažniausiai naudojami plieniniai kamuočiai ir plieninės juostos. Stiprinant mūrą plieniniu apvalkalu stiprinamo elemento paviršius nuvalomas; kampuočių sąlyčio su konstrukcija dalis padengiama cementinio skiedinio arba epoksidinės dervos sluoksniu ir kampuočiai glaudžiai pripresaudžiami 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 prisispaudžia prie konstrukcijos ir ją apspaudžia). Atstumas tarp plieninių antdeklų arba templių parenkamas atsižvelgiant į kampuočių klupumą, mūrinio elemento skersinių deformacijų suvaržymą ir parenkamas mažesnis už mažiausią mūrinio elemento skerspjūvio matmenį (žr. 1 pav.) (Malganov A.I. 1990; P.B.Waghmare 2011).



1 pav. Kolonos sustiprintos naudojant plieninių kampuočių apvalkalą

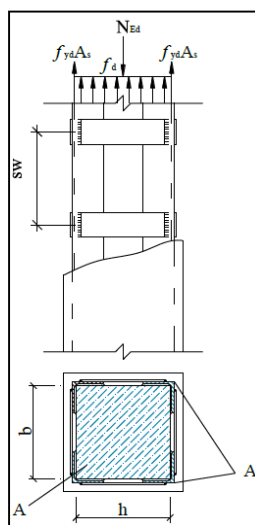
Efektyviausias tokio apvalkalo panaudojimo būdas yra, kai apvalkalas viršutiniame ir apatiniame pjūviuose tiesiogiai apkraunamas vertikaliąja apkrova (2 pav. a), t.y. kuomet jis gniuždymo apkrovą perima tiesiogiai, o ne per susidarančią trintį tarp apvalkalo ir stiprinamojo mūrinio elemento. Mažiau efektyvus stiprinimas yra, kai apvalkalui vertikaliąją apkrovą perduodama viršutiniame arba apatiniame pjūvyje (2 pav. b), 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 tarp apvalkalo statramsčių ir stiprinamojo elemento (2 pav. c).



2 pav. Plieninio apvalkalo apkrovimo ir atrėmimo tipai. a – apvalkalas atrėmtas ir tiesiogiai apkrautas apkrova; b – apvalkalas atrėmtas, bet tiesiogiai neapkrautas apkrova; c – apvalkalas neatrėmtas ir tiesiogiai neapkrautas apkrova.

Sustiprinto gniuždomojo mūro laikomosios galios vertinimas

Plieniniu apvalkalu sustiprinto mūro gniuždomąją galią rekomenduojama apskaičiuoti pagal (Malganov 1990) pateiktą skaičiavimo metodiką. Mūro sustiprinto plieniniu apvalkalu skaičiuotinė schema pateikta 3 pav.



3 pav. Mūro sustiprinto plieninių kampuočių apvalkalu, skaičiuotinė schema

Sustiprinto metaline apkaba mūro kolonos skaičiuotinė gniuždomoji galia:

$$N_{Rd} = \phi_{i,m} \left[\left(\eta_k \cdot f_d + \eta \cdot \frac{2,5\rho}{1+2,5\rho} \cdot \frac{f_{y,w}}{100} \right) \cdot A + \gamma_b \cdot f_{sc} \cdot A_s \right], \quad (1)$$

čia A – stiprinamojo mūrinio elemento skerspjūvio plotas; f_d – nestiprinto mūro gniuždomasis stipris; $\phi_{i,m}$ – koeficientas įvertinantis ekscentricitetų įtaką viršutiniame, apatiniame ir viduriniame pjūviuose; A_s – metalinio apvalkalo skerspjūvio plotas (bendras kampuočių skerspjūvio plotas): $A_s = \sum_1^i A_{si}$, čia A_{si} – vieno kampuočio

skerspjūvio plotas; $f_{y,w}$ – antdėklų (templių) plieno skaičiuotinis stipris; f_{sc} – kampuočių plieno skaičiuotinis stipris; η_k – koeficientas, kuriuo įvertinama elemento būklė: $\eta_k = 1, 0$ - kai stiprinamajame elemente nėra plyšių; $\eta_k = 0, 7$

- kai stiprinamasis elementas yra supleišėjęs; $\eta = 1 - \frac{4e_0}{t}$ - koeficientas priklausantis nuo pradinio ekscentriciteto e_0 ;

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

kaip ir skersai armuotam mūriui: čia V_s – armatūros tūris, V_m – mūro tūris, A_{sw} – antdėklų skerspjūvio plotas, h – stiprinamojo elemento skerspjūvio aukštis, b – skerspjūvio plotis, s_w – antdėklų (templių) žingsnis; γ_b – koeficientas, kuris įvertina plieninio apvalkalo atrėmimo ir apkrovimo pobūdį: $\gamma_b = 1, 0$ – kai apvalkalas yra apkrautas ir atremtas apatiniame pjūvyje; $\gamma_b = 0, 7$ – kai apvalkalas apkrautas, bet apatinėje dalyje neatremtas; $\gamma_b = 0, 35$ – kai apvalkalas neapkrautas ir neatremtas apatiniame pjūvyje (kuomet apvalkalas į darbą įsijungia tik per trintį su mūru).

Gniuždomo mūro laikomoji galia, nevertinant kampuočių įtakos, gali būti apskaičiuota pagal tokią išraišką:

$$N_m = \phi_{i,m} \left(\eta_k \cdot f_d + \eta \cdot \frac{2,5\rho}{1+2,5\rho} \cdot \frac{f_{y,w}}{100} \right) \cdot A, \quad (2)$$

Centriškai apkrauto mūro ($e_0=0$):

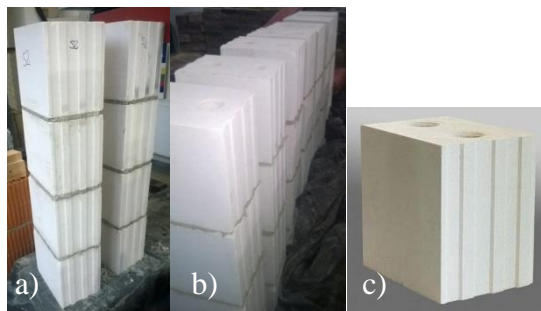
$$N_m = \left(\eta_k \cdot f_d + \frac{2,5\rho}{1+2,5\rho} \cdot \frac{f_{y,w}}{100} \right) \cdot A, \quad (3)$$

Išraiška formulės (3) skliaustuose – tai mūro, kurio skersinės deformacijos yra suvaržytos templėmis gniuždomasis stipris:

$$f_{md} = \eta_k \cdot f_d + \frac{2,5\rho}{1+2,5\rho} \cdot \frac{f_{y,w}}{100}. \quad (4)$$

Medžiagos, bandiniai ir bandymų metodika

Sustiprinto plienine apkaba gniuždomo mūro įtempių deformacijų būvio eksperimentiniams tyrimams pagaminti 9 vnt. gniuždomų elementų fragmentai (bandiniai) (4 pav.). Bandinių pagrindo matmenys 250x180 mm, aukštis 988 mm (4 pav. a ir b). Bandiniai sumūryti iš tuštymėtuju silikatinėju blokų (4 pav. c), mūrijimui naudotas bendrosios paskirties cementinis skiedinys, gulščiųjų siūlių storis 10-12 mm.



4 pav. . 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 trumpalaikė apkrova, statmenai guldomajam paviršiui. Blokų gniuždomasis stipris - 24 N/mm².

Bendrosios paskirties cementinio skiedinio gniuždomasis nustatytas pagal LST EN 1015-11:2001 reikalavimus. Skiedinio S1 gniuždomasis stipris – 33 N/mm², skiedinio S2 – 20 N/mm².

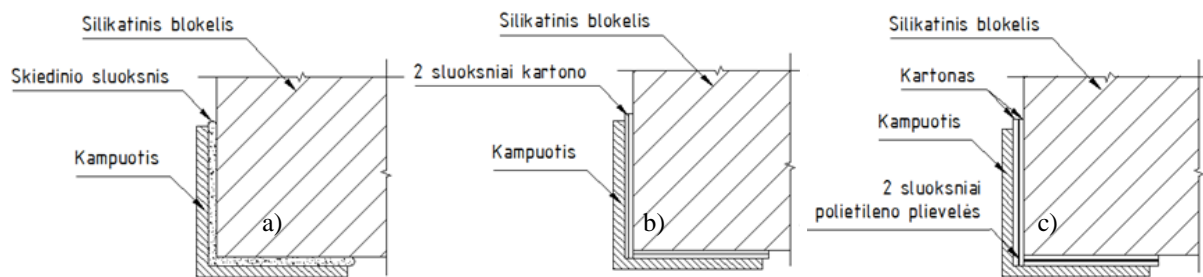
Gniuždomojo mūro stiprinimui sukonstruotas ir pagamintas apvalkalas iš plieninio 50x50x3 mm lygiašonio kampuočio (5 pav.). Apvalkalo vertikaliųjų juostų sujungimui (mūro skersinių deformacijų suvaržymui) panaudotos 20Ø10 plieninės templės. Tam, kad būtų galima apvalkalo vertikaliąsias juostas (kampuočius) glaudžiai prispausti prie mūro fragmento, templių galai buvo įsriegti. Templių plieno savybės (takumo įtempiai, stiprumas ir tamprumo

modulis) nustatytos tempiant $\varnothing 10$ skersmens strypus ir matuojant deformacijas. Templių plieno vidutiniai takumo įtempiai $f_y = 238 \text{ N/mm}^2$, tamprumo modulis – $E_s = 203 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$.

Gniuždomojo mūro bandiniai sustiprinti glaudžiant apkabų vertikaliuosius elementus prie mūro. Siekiant 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 periama ir dalį gniuždančios jėgos. Norint nustatyti skersinių deformacijų suvaržymo įtaką mūro gniuždomajam stipriui, reikia panaikinti (ar sumažinti) trintį tarp apkabos vertikalių juostų ir stiprinamojo mūro. Tam, dalis bandinių buvo sustiprinti glaudžiant kampuočius per kietas medžio plaušo plokštės juostas suglaustas lygiaisiais paviršiais, kiti – dedant tarp dviejų juostų polietileno intarpus (juostas). Apkabos plieninių vertikaliųjų elementų – kampuočių glaudimo prie mūro fragmentų sąlygos parodytos 6 pav. Kad apvalkalas nebūtų tiesiogiai apkraunamas, tarp jo ir preso plokščių paliekamas tarpas, tokiu būdu buvo apkraunamas tik stiprinamasis elementas (mūro fragmentas). Šiuo atveju dalis apkrovos į kampuočius perduodama tik per trintį tarp kampuočio ir stiprinamojo elemento.



5 pav. Plieninis apvalkalas



6 pav. Tarpinių sluoksnių įrengimo schemas; a – kampuočio glaudžiamas per skiedinio sluoksnį; b – kampuočio glaudžiamas per du kartono sluoksnius; c – kampuočio glaudžiamas per du kartono sluoksnius su polietileno intarpu

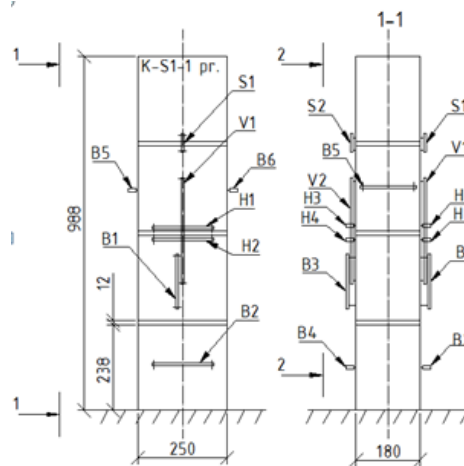
Kampuočiai prie mūro buvo prispaudžiami templėms užveržiant veržles. Visais atvejais tempių pradinis įveržimas buvo vienodas, nesuteikiant ženklų pradinių įtempių. Dalis bandinių buvo skirti mūro gniuždomojo stiprio nustatymui. Kontrolinių ir sustiprintų mūro bandinių charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Bandinių charakteristikos

| Serija | Bandinio šifras | Skiedinio tipas | Gulščiosios skiedinio sūtlės storis, mm | Bandinio tipas | | | | Serijos bandinių skaičius |
|--------|-----------------|-----------------|---|----------------|----------------------------------|----------|----------------------------------|---------------------------|
| | | | | Nesustiprintas | Sustiprintas kampuočių apvalkalu | | | |
| | | | | | Su skiediniu | 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 | |

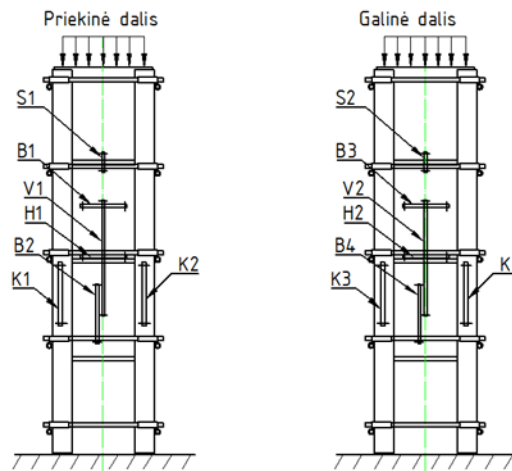
Kontroliniai (nesustiprinto mūro) ir sustiprinto mūro fragmentai buvo bandomi centriškai gniuždant trumpalaikė statine apkrova, apkraunant pastoviu 2-3 kN/s greičiu iki pat suirimo. Bandymo metu buvo matuojamos mūro, mūro

gminių - blokų išilginės bei skersinės deformacijos, bei gulščių 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 7 pav.



Pav. 7. . Deformacijų matavimo prietaisų ant kontrolinių bandinių išdėstymo schema

Bandant sustiprinto mūro fragmentus buvo matuojamos: mūro, mūro gaminių išilginės ir skersinės deformacijos, gulščių siūlių deformacijos bei apvalkalo vertikaliųjų elementų – kampuočių ir tempijų išilginės deformacijos. Deformacijų matavimo prietaisų išdėstymo schema bei bandymo bendras vaizdas pateikti 8 pav.



8 pav. Deformacijų matavimo prietaisų ant sustiprintų bandinių išdėstymo schema

Pastaba:.. gniuždomąją apkrova apkrautas tik stiprinamasis mūro elementas.

Bandymo rezultatų analizė

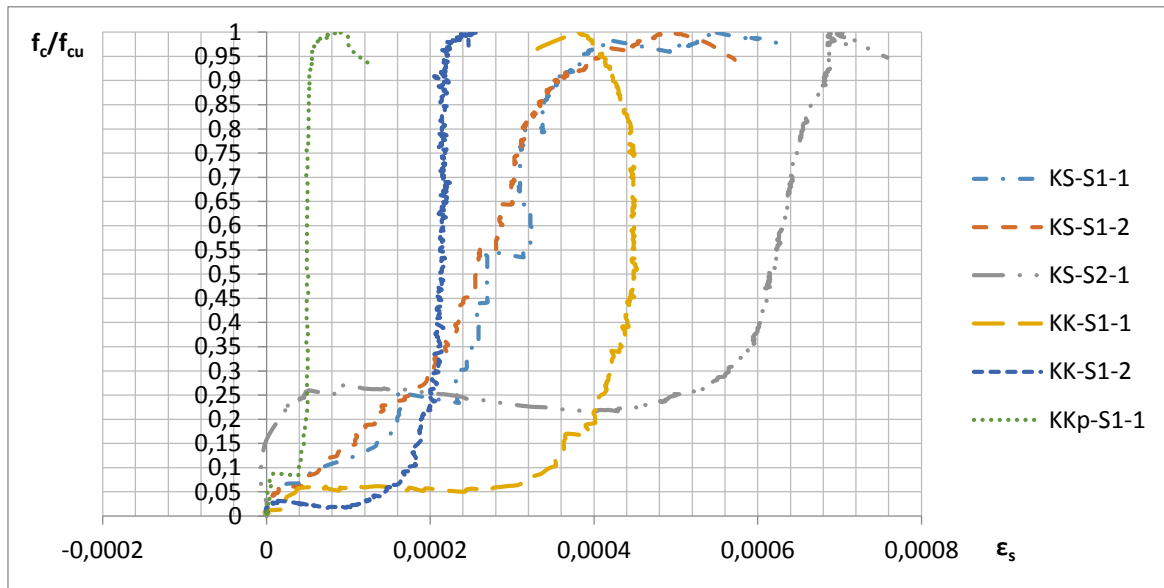
Bandant trumpalaikė statine apkrova nustatyta mūro fragmentų ardančioji apkrova, bei mūro deformacijos. Sustiprintų ir kontrolinių (nesustiprintų) mūro fragmentų gniuždomosios galios tyrimų rezultatai pateikti 2 lentelėje. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad mūro sustiprinto metaliniu apvalkalu gniuždomoji galia priklauso nuo to, kokiu būdu apvalkalo kampuočiai priglauti prie mūro. Tai susiję su kampuočių įjungimo į bendrą darbą su stiprinamuoju mūru laipsnio. Mūro fragmentų sustiprintų metaliniu apvalkalu, priglautu prie mūro per cementinio skiedinio sluoksnį gniuždomoji galia lyginant su kontrolinių (nesustiprintų) bandinių gniuždomąją galia padidėjo iki 39%, kai gulščių siūlių skiedinys S1 ir iki 47%, kai skiedinys - S2. Mažinant trintį tarp apvalkalo ir mūro pastebimas mažesnis laikomosios galios padidėjimas. Sustiprintų apvalkalu fragmentų, kuriuose kampuočiai buvo priglauti per du kartono sluoksnius ir du kartono sluoksnius su polietileno intarpu tarp jų, gniuždomoji galia padidėjo 23%. Analogiškai keitėsi ir pirmųjų vertikaliųjų plyšių susidarymo mūre apkrovos (2 lentelė).

Sustiprinto mūro tyrimų rezultatai parodė, kad gniuždomoji galia labiausiai padidėjo KS-S2 serijos bandinyje (apkaba prie mūro priglauta 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. 2 lentelę).

2 lentelė. Mūro fragmentų gniuždomosios galios tyrimų rezultatai

| Serija | Bandinys | Ardančioji apkrova, $F_{u,obs}$, kN | Plyšio atsiradimo apkrova, $F_{erc,obs}$, kN | $\frac{F_{erc,obs}}{F_{u,obs}}$ | Gniuždomasis stipris, N/mm ² | | $\frac{F_{erc,obs,s}}{F_{erc,obs,m}}$ | $\frac{F_{u,obs,s}}{F_{u,obs,m}}$ |
|--------|----------|--------------------------------------|---|---------------------------------|---|---|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | | | | | Bandinio, $f_{i,obs}$ | 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 |

Apie stiprinamojo mūro ir apvarkalo plieninių kam-puočių bendrą darbą galima spręsti pagal jų išilgines deformacijas bei jų vystymąsi. Apvarkalo kampuočių išilginės santykinės deformacijos pateiktos 9 pav. Iš 9 pav. pateiktų diagramų nesunku pastebėti tai, kad atskiruose bandiniuose apvarkalo 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 (9 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.



9 pav. Kampuočių vertikalių deformacijų priklausomybė nuo santykinio mūro įtempių

Antrojoje diagramos dalyje matoma, kad mūro įtempiai didėja, bet tuo pačiu nuolat didėja ir kampuočių gniuždymo deformacijos, tačiau 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. Galima pastebėti, kad apkrovos lygis, kai kampuočiai įsitraukia į bendrą darbą su stiprinamuoju mūru, skiriasi. KK-S1-1 bandinio kampuočiai didelę apkrovos dalį pradeda perimti kuomet mūro įtempiai sudaro 5% nuo gniuždomojo stiprio, KK-S1-2, kai – 2,5% ir KKp-S1-1 – 8%. KKp-S1-1 bandinio apvarkalo kampuočių išilginių deformacijų diagrama rodo, kad kampuočių slydimas mūro atžvilgiu prasidėjo labai greitai ir kampuočiai vertikaliosios apkrovos beveik neperėmė, todėl visas sustiprinimo efektas buvo gautas dėl skersinių deformacijų suvaržymo.

Vertinant kampuočių santykinės gniuždymo deformacijas akivaizdu, kad mūro elementui suyrant kampuočiai nepasiekia savo takumo stiprio. Skaičiavimuose tai įvertinama priimant atitinkamą kampuočių išnaudojimo laipsnio koeficientą. Teoriškai apskaičiuojant tokių sustiprintų mūro elementų laikomąją galią (1 form.), kuomet kampuočiai

nėra tiesiogiai apkrauti vertikalia apkrova ir neatremti atramoje, o visą vertikalią apkrovą perima trintimi, siūloma priimti kampuočių išnaudojimo koeficiento vertę lygią 0,35 (Malganov 1990). Kadangi eksperimentuose buvo sudarytos skirtingos trinties sąlygos tarp mūro elemento ir plieno, eksperimentiniai apvalkalo vertikaliųjų juostų plieno stiprio išnaudojimo koeficientai gauti skirtingi (3 lentelė).

3 lentelė. . Eksperimentinis kampuočių stiprio išnaudojimo koeficientas γ_b

| 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 |

Nesunku pastebėti, kad glaudžiant kampuočius prie mūro per skiedinio sluoksnį, jų stiprio išnaudojimas vidutiniškai siekė 50 % ir buvo didesnis nei siūloma (Malganov 1990), o bandiniuose, kuriuose buvo mažinama trintis gauta, kad kampuočių išnaudojimo laipsnis ženkliai mažesnis.

Skersinių deformacijų suvaržymo įtaka

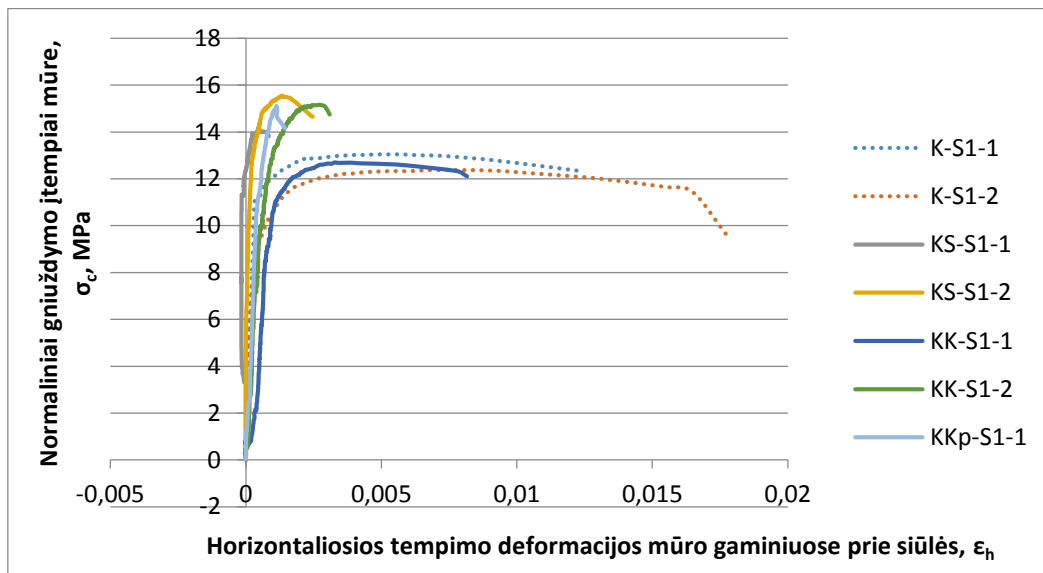
Siekiant nustatyti skersinių deformacijų suvaržymo įtaką sustiprinto mūro gniuždymo stipriui, nustatyta mūro ardančioji apkrova, kuri yra gauta atmetus iš bandinių ardančiosios apkrovos, apkrovos dalį, kurią atlaiko apvalkalo kampuočiai. Pagal ardančiąją apkrovą tenkančią stiprinamajam mūrui nustatytas mūro gniuždymo stipris suvaržius skersines deformacijas (4 lentelė).

4 lentelė. Mūro gniuždymo stipris

| Serija | Bandinys | Mūro gniuždymo 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 |

Kaip žinoma mūras suyra dėl tempimo įtempių susidarančių mūro gaminiuose dėl skirtingų horizontaliųjų skiedinio siūlių ir mūro gaminių deformacijų savybių. Todėl atliekant bandymus buvo matuojamos mūro gaminių deformacijos statmenai jėgos pridėjimo kryptiai šalia skiedinio siūlių (žr 8 pav. H1 ir H2 davikliai). Stiprinant mūrą visų tipų apvalkalai suvaržo šias deformacijas, todėl gaunamas mūro gniuždomojo stiprio padidėjimas.

10 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, kuri kiekviename bandyme tenka kampuočiams. 10 pav. pateiktame grafike matomas ryškus mūro skersinių deformacijų sumažėjimas (bandiniai KS-S1-1, KS-S1-2, KK-S1-2, KKp-S1-1), tačiau bandinyje KK-S1-1 horizontaliųjų deformacijų priklausomybės nuo normalinių įtempių yra artima nestiprinto mūro įtempių deformacijų priklausomybei. Šiuo atveju tik suirimo deformacijos yra mažesnės, lyginant su nestiprintų bandinių (5 lentelė). Bandiniuose, kuriuose tarp kampuočių ir mūro buvo panaudotas skiedinys, gauta, kad susidarė mažiausios horizontaliosios deformacijos t.y. jos buvo geriausiai suvaržytos. Analizuojant šių deformacijų pasiskirstymą bandiniuose, matyti, kad bandiniuose KK-S1-2 ir KKp-S1-1 jos pasiskirsto labai panašiai ir pradeda skirtis tik priartėjus prie suirimo apkrovos (išskyrus bandinį KK-S1-1).



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

Ekspirimentinių rezultatų palyginimas su teoriniais

Pagal ankščiau aprašytą metodiką (1 form.) apskaičiuojamas bandymuose naudoto mūro stiprio padidėjimas dėl skersinių deformacijų suvaržymo plieniniu apvalkalu $\Delta f_d = \frac{2,5\rho}{1+2,5\rho} \cdot \frac{f_{y,w}}{100}$. Skaičiavimo rezultatai pateikti 5 lentelėje.

Nesunku pastebėti, kad skaičiuojant pagal šią formulę stiprio padidėjimas priklauso nuo mūro skerspjūvio matmenų, plieninių tempių žingsnio, tempių skerspjūvio ir plieno stiprio. Taigi, apskaičiavus pagal šią formulę tiek mūriui, kuriam buvo panaudotas S1 skiedinys, tiek, kuriam panaudotas S2 skiedinys, stiprio pokyčio absoliutinė vertė bus ta pati. Pagal ankščiau pateiktus apvalkalo ir mūro duomenis, apskaičiuojamas teorinis stiprio padidėjimas: $\Delta f_d = 1,84 \text{ MPa}$. Apskaičiuotojo ir eksperimentais nustatyto mūro gniuždomojo stiprio padidėjimo reikšmės pateiktos 5 lentelėje.

5 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 | | | | |

Naudojant ankščiau pateiktą (1) formulę apskaičiuota sustiprintų gniuždomų mūro elementų laikomoji galia, kuriai nustatyti naudojamos eksperimentuose nustatytos mūro ir plieninio apvalkalo medžiagų stiprio charakteristikų reikšmės. Gauta teorinė sustiprintų kolonų laikomoji galia palyginta su bandymuose nustatyta (6 lentelė).

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

| Serija | Bandinys | Ekspirimentinė laikomoji galia, $F_{u,obs}$, kN | Vidutinė serijos laikomoji galia, $F_{u,vid,obs}$, kN | Teoriškai apskaičiuota laikomoji galia, F_{cal} , kN | $F_{u,vid,obs} / F_{cal}$ |
|--------|----------|--|--|--|---------------------------|
| 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 | | 0,93 |
| KS-S2 | KS-S2-1 | 772 | 772 | | 701,0 |

Kaip matoma 6 lentelėje, bandinių serijos kuriose tarpinis sluoksnius buvo skiedinys (KS-S1 ir KS-S2 serijos), gauta, kad teoriškai apskaičiuota sustiprinto mūro elemento laikomoji galia yra mažesnė už gautą eksperimentiškai. KS-S1 serijos atveju, eksperimentinė laikomoji galia vidutiniškai buvo 6,0 % didesnė už teorinę, o KS-S2 atveju – 10 % didesnė už teoriškai apskaičiuotą. Tais atvejais kuomet buvo sumažinta trintis tarp kampuočių ir mūro, gauta, kad eksperimentinė laikomoji galia yra mažesnė už teorinę (vidutiniškai 6,5 % mažesnė). Šiuo atveju sumažinus trintį

kampuočių išnaudojimo koeficientas ženkliai sumažėjo ir nebesiekė rekomenduojamo (Malganov 1990) (kampuočių išnaudojimo koeficiento vertes žr. 3 lentelėje).

Išvados ir rekomendacijos

1. Mūro stiprinimas plieninių kampuočių apvalkalu yra efektyvus būdas padidinti mūrinių konstrukcijų laikomąją galią ir paties mūro gniuždomąjį stiprį. Eksperimentų metu nustatyta, kad bandinių, kuriuose buvo užtikrintas geras apvalkalo ir mūro sukibimas, laikomoji galia vidutiniškai padidėjo 41,9 %. O mūro stipris visuose bandiniuose, dėl skersinių deformacijų suvaržymo, vidutiniškai padidėjo 15 %.
2. Eksperimentais nustatyta, kad įrengus apvalkalą, mūro ribinės skersinės tempimo deformacijos šalia gulsčiosios skiedinio siūlės, vidutiniškai sumažėjo iki 2,6 karto.
3. Dėl mūro skersinių deformacijų suvaržymo apvalkalo templėmis, mūro gniuždomasis stipris padidėja iki 1,22 karto (vidutiniškai padidėjo 1,15 karto).
4. Lyginant eksperimentų, kuriuose buvo užtikrintas geras kampuočių sukibimas su mūru ir bandinių, kuriuose trintis tarp kampuočių ir mūro buvo sumažinta, rezultatus, galima teigti, kad stiprinant mūrą plieniniu apvalkalu būtina užtikrinti gerą sąlyčio paviršių ir sukibimą tarp apvalkalo kampuočių ir mūro. Bandiniuose, kuriuose nėra užtikrintas geras plieninio apvalkalo sukibimas su mūru, vertikaliųjų juostų (kampuočių) išnaudojimo koeficientas iki 6 kartų mažesnis, dėl to ir visos konstrukcijos laikomoji galia padidėja neženkliai.
5. 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).
6. Kai plieninis apvalkalas yra tiesiogiai neapkrautas ir į bendrą darbą su stiprinamuoju mūru įsijungia tik per trintį, glaudžiant apvalkalo vertikaliuosius elementus – kampuočius prie mūro per centinio skiedinio sluoksnį ir užtikrinant gerą kontaktą, kampuočių stiprio išnaudojimo koeficientą γ_b galima priimti lygų 0,4.

Padėkos

Dėkoju doc. dr. Broniui Jonaičiui už pagalbą ir pastabas atliekant tyrimą.

Literatūra

- 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).
- LST EN 1015-11:2004 Mūro skiedinio bandymo metodai. 11 dalis. Sukietėjusio skiedinio stiprio lenkiant ir gniuždant nustatymas. 2004.
- LST EN 772-1:2011 Mūro gaminių bandymo metodai. 1 dalis. Gniuždymo stiprio nustatymas. 2011.
- Мальганов А.И., Плесков В.С., Полищук А.И. 1990. Восстановление и усиление строительных конструкций авиационных и реконструируемых зданий. Томск. 320 с.
- 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.*

RESEARCH OF STRENGTHENED MASONRY WITH STEEL JACKETING

Summary

The experimental work allowed investigating on effectiveness of steel jacketing technique for masonry columns. Experiments were carried out on nine masonry columns. Jacketing where installed on 6 columns. The investigation results shows that steel jacketing technique is effective method for strengthening masonry columns. The average increase of load – carrying capacity in strengthened masonry columns where 42 % while increase of compressive strength where 15 %. Transverse strains in strengthened masonry where 2,6 times smaller than transverse strains in unconfined masonry. Also, results of theoretical calculations are close to results of experiments. In experimental work were defined factor of steel angles exploitation, which was smaller 6 times for columns with less friction. The average factor of steel angles exploitation in specimens with normal friction between masonry and steel angles where 0.5.

Keywords: strengthened masonry, steel jacketing, compressive masonry, stress state.