

GNIUŽDOMŲJŲ GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ STIPRINIMO
GELŽBETONINIAIS APVALKALAIS ANALIZĖ

Saulius Pilkavičius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: saulius.pilkavicius@vgtu.lt

Santrauka. Šiame straipsnyje analizuojamos dvi pasirinktos gniuždomųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų gelžbetoniniais apvalkalais, laikomosios galios skaičiavimo metodikos. Trumpai aprašomi laikomosios galios skaičiavimo metodikų algoritmai. Pateikiamos elementų laikomosios galios pagrindinės lygtys ir priklausomybės. Siekiant palyginti ir patikslinti laikomosios galios skaičiavimo metodikas, atlikti gniuždomųjų dispersiškai armuotų elementų, sustiprintų gelžbetoniniais apvalkalais, laikomosios galios eksperimentiniai tyrimai. Atliktas teorinių skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentinių tyrimų rezultatais. Trumpai aprašomi analizuotų skaičiavimo metodikų bei eksperimentinių tyrimų privalumai ir trūkumai. Remiantis gautomis skaičiavimo metodikų palyginimo ir eksperimentinių tyrimų išvadomis, pateikiama patobulinta laikomosios galios skaičiavimo metodika.

Reikšminiai žodžiai: gelžbetoninis apvalkalas, laikomosios galios skaičiavimo metodikos, laikomosios galios eksperimentiniai tyrimai, skaičiavimo metodikų privalumai ir trūkumai, patikslinimo rekomendacijos.

Ivadas

Skaičiuojant stiprinamąsias konstrukcijas, pirmiausia atsižvelgiama į viso pastato, o tik paskui – į konstrukcijų ir elementų, tokių kaip gniuždomosios gelžbetoninės kolonos, stulpai ir pan., pradinį įtempį – deformacijų būvį. Įtempių ir deformacijų būvis labai priklauso nuo pradinio konstrukcijos apkrovimo būdo, kadangi gniuždomosios laikančiosios konstrukcijos būvis gali būti pasiekiamas trumpalaikiu, ilgalaikiu gniuždymu ar sudėtingu apkrovimu (Zabulėnas 1992).

Veikiant trumpalaikiam gniuždymui, bandinyje atsiranda skersiniai mikroplyšiai, sumažinantys betono stiprį. Išilginė armatūra taip pat sukelia stiprumo persiskirstymą tarp betono ir armatūros ir tam tikrą laiko momentą skirtingas skersinis gniuždomųjų bandinių armavimas turi neginčijamą įtaką gelžbetoninių elementų stiprumui. Todėl galima teigti, kad skersinis gniuždomųjų elementų armavimas didina konstrukcijų stiprumą skersinių deformacijų kryptimi.

Mokslininkų Emmons, Vaysburg ir kt. eksperimentai parodė, jog skersinio armavimo strypai gniuždomame elemente pradeda dirbti ne iš karto apkrovus konstrukciją, o tik pasiekus $0,4-0,6 f_{c,red}$ betono stiprio, čia $f_{c,red}$ yra redukuotasis betono stipris. Ši skersinės armatūros įsijungimo į darbą stadija veikia mikroplyšių atsiradimą betone ir intensyvų skersinių deformacijų prieaugį.

Sustiprinta konstrukcija ne visada dirba kaip vientisas gelžbetoninis elementas, kadangi jai apkrova gali būti per-

duodama ne tiesiogiai į patį apvalkalą, o sukibimo jėgomis tarp „senojo“ ir „naujojo“ betonu.

Autorių Indelicato, Thomée ir kt., taip pat Daugevičiaus, Marčiukaičio ir kt. nagrinėtų ir analizuotų straipsnių eksperimentų rezultatai rodo, kad po pažeistos konstrukcijos, kuri buvo paveikta apkrovos, sustiprinimo identišku plieniniu ar gelžbetoniniu apvalkalu šios paveiktos konstrukcijos laikomoji galia nebesugrįžta į pradinę laikomąją galią.

Sustiprintų gelžbetoninių elementų laikomoji galia gali būti skaičiuojama remiantis СНИП 2.03.01-84. „Бетонные и железобетонные конструкции“, STR 2.05.05:2005 „Betonių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“, Europos normų „Eurocode 2: Design of concrete structures“, Vokietijos ar kitų šalių skaičiavimo metodikomis.

Analizuojant šiuo metu egzistuojančius skaičiavimo metodus, matyti, kad dauguma iš jų nevisiškai tiksliai apibūdina ir atvaizduoja įtempių ir deformacijų būvį sustiprintose konstrukcijose, kadangi dauguma skaičiavimo metodikų, skirtų šioms konstrukcijoms tikrinti ir projektuoti, paremtos atliktais eksperimentiniais tyrimais ir jų duomenimis.

Šio tyrimo tikslas – atlikti sustiprintų gelžbetoninių apvalkalu bandinių iš dispersiškai armuoto betono teorinius ir eksperimentinius tyrimus, kai apvalkalas apkraunamas per trintį tarp bandinio ir apvalkalo betonu; įvertinti apvalkalo skersinės armatūros įtaką gniuždomųjų bandinių pleišėjimui, deformacijoms ir laikomajai galiai.

Gelžbetoniniai apvalkalais sustiprintų gniuždomųjų gelžbetoninių elementų skaičiavimas pagal Malganovo (Мальганов) ir kt. (1990) metodiką

Centriškai gniuždomo sustiprinto gelžbetoninio elemento gelžbetoniniu apvalkalu laikomoji galia pagal šią metodiką skaičiuojama taip:

$$N \leq N_u = \varphi \cdot \left[(f_{cd} \cdot A_c + f_{scd} \cdot A_s) \cdot \gamma_1 + \gamma_2 \cdot (f_{cd,a} \cdot A_{c,a} + f_{scd,a} \cdot A_{s,a}) \right], \quad (1)$$

čia N – elementą veikianti ašinė jėga;

N_u – elemento atlaikomoji ašinė jėga;

φ – koeficientas, įvertinantis elemento klupumą, apkrovos veikimo trukmę ir armavimą;

f_{cd} – stiprinamojo elemento betono skaičiuotinis gniuždomasis stipris;

A_c – stiprinamojo elemento betono skerspjūvio plotas;

f_{scd} – stiprinamojo elemento pagrindinės armatūros skaičiuotinis gniuždomasis stipris;

A_s – stiprinamojo elemento pagrindinės armatūros skerspjūvio plotas;

$f_{cd,a}$ – gelžbetoninio apvalkalo betono skaičiuotinis gniuždomasis stipris;

$A_{c,a}$ – gelžbetoninio apvalkalo betono skerspjūvio plotas;

$f_{scd,a}$ – gelžbetoninio apvalkalo pagrindinės armatūros skaičiuotinis gniuždomasis stipris;

$A_{s,a}$ – gelžbetoninio apvalkalo pagrindinės armatūros skerspjūvio plotas;

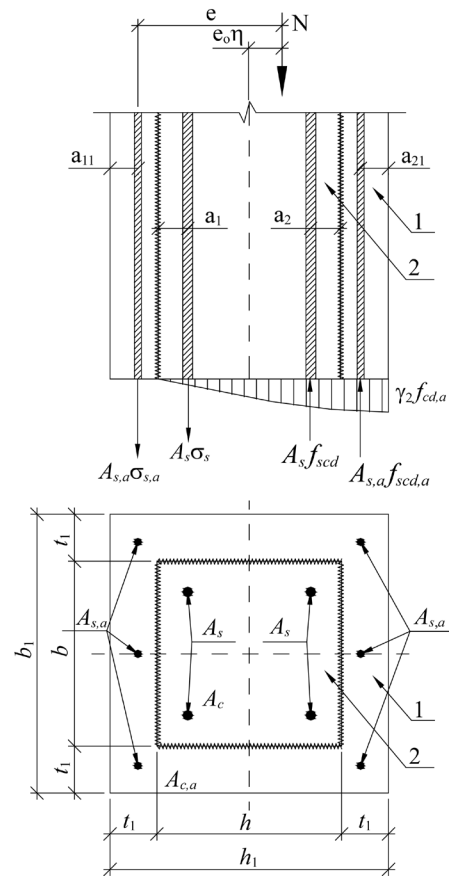
γ_1 – koeficientas, priklausantis nuo stiprinamojo elemento skerspjūvio aukščio. Kai $h \leq 200\text{mm}$, $\gamma_1 = 0,9$; kai $h > 200\text{mm}$, $\gamma_1 = 1,0$;

$\gamma_2 = 0,9$, kai rištinė elemento skersinė armatūra ir elementas prieš sustiprinimą yra nukraunamas ir po sustiprinimo jėga padidėja $\leq 35\%$; $\gamma_2 = 1,0$, kai rištinė elemento skersinė armatūra ir elementas prieš sustiprinimą yra nukraunamas ir po sustiprinimo jėga padidėja $> 35\%$.

Jei (1) sąlyga išpildoma, elemento laikomoji galia pakankama.

Tačiau gniuždomųjų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų skaičiavimo saugos ribiniam būviui metodikos pagal СНиП 2.03.01-84 ir STR 2.05.05:2005 teigia, kad centriškai gniuždomų konstrukcijų praktiškai nebūna, kadangi dėl įvairių gamybos technologijos priežasčių atsiranda nuokrypos gaminiuose, ir tai turi būti įvertinama.

Apskaičiuojant ekscentriškai gniuždomus gelžbetoninius elementus, esant mažų ekscentricitetų atvejui (1 pav.), daroma prielaida, kad ribinis elemento būvis pasiekiamas suirus skerspjūvio gniuždomosios zonos betonui. Todėl skerspjūvio tempiamosios zonos betonas neįvertinamas.



1 pav. Ekscentriškai gniuždomo sustiprinto gelžbetoninio elemento gelžbetoniniu apvalkalu skaičiuojamoji schema (mažų ekscentricitetų atvejis): 1 – gelžbetoninis apvalkalas; 2 – stiprinamasis elementas

Fig. 1. Calculation scheme of eccentrically compressed reinforced concrete element strengthened using reinforced concrete jacket (case of small eccentricities): 1 – reinforced concrete jacket; 2 – enhanced element

Ekscentriškai gniuždomo elemento laikomoji galia, kai yra mažų ekscentricitetų atvejis, skaičiuojama pagal (2) išraišką, kuri gaunama parašius momentų pusiausvyros lygtį apie tempiamą apvalkalo armatūrą:

$$M = N \cdot e \leq M_u = f_{scd,a} \cdot A_{s,a} (h_1 - a_{21} - a_{11}) + f_{scd} \cdot A_s (h_1 - t_1 - a_2 - a_{11}) + 0,85 \cdot \gamma_2 \cdot f_{cd,a} \cdot b_1 \cdot h_1 (0,75 \cdot h_1 - a_{11}) - \sigma_s \cdot A_s (t_1 - a_{11} + a_1), \quad (2)$$

čia $f_{scd,a}, A_{s,a}, f_{scd}, A_s, f_{cd,a}, \gamma_2, A_s, N$ – dydžiai aprašyti (1) išraiškoje;

e – veikiančios jėgos ekscentricitetas;

$h_1, b_1, a_{21}, a_2, a_{11}, a_1, t_1$ – 1 pav. pavaizduoti dydžiai;

σ_s – armatūroje atsirandantys įtempiai, veikiant lenkimo momentui.

Jei (2) išraiškos sąlyga išpildoma, elemento laikomoji galia pakankama.

Kai yra didelių ekscentricitetų atvejis, skaičiavimai atliekami pagal (3) išraišką, kuri gaunama taip pat parašius momentų pusiausvyros lygtį apie tempiamą apvalkalo armatūrą:

$$\begin{aligned} M &= N \cdot e \leq M_u = f_{scd} \cdot A_s (h + t_1 - a_2 - a_{11}) + \\ &\gamma_2 \cdot f_{scd,a} \cdot A_{s,a} (h_1 - a_{21} - a_{11}) + \\ &\gamma_2 \cdot f_{cd,a} \cdot b_1 \cdot x_{eff} (h_1 - a_{11} - 0,5x_{eff}) - \\ &f_{yd} \cdot A_s (t_1 + a_1 - a_{11}), \end{aligned} \quad (3)$$

čia $f_{scd}, A_s, \gamma_2, f_{scd,a}, A_{s,a}, f_{cd,a}, A_s, N, e$ – (1) ir (2) išraiškoje aprašyti dydžiai;

f_{yd} – stiprinamo elemento pagrindinės tempiamosios armatūros skaičiuotinis stipris;

$h_1, b_1, a_{21}, a_2, a_{11}, a_1, t_1$ – 1 pav. pavaizduoti dydžiai;

x_{eff} – betono gniuždomosios zonos aukštis.

Prieš tai turi būti randamas betono gniuždomosios zonos aukštis, parašius pusiausvyros lygtį į vertikaliąją ašį.

Gniuždomųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų gelžbetoniniais apvalkalais, skaičiavimas pagal Krause (1993) metodiką

Pagal šią metodiką centriškai ir ekscentriškai gniuždomo elemento, sustiprinto gelžbetoniniu apvalkalu, laikomoji galia tikrinama dviejuose pjūviuose (2 pav.):

– **pjūvyje 1–1** – viduriniajame elemento pjūvyje.

Šiame pjūvyje dirba visas skerspjūvis (2 pav.).

– **pjūvyje 2–2** – kraštiniame elemento pjūvyje, ties atrama. Šiame pjūvyje į darbą įsijungia skersinė stiprinamojo elemento ir apvalkalo armatūra (2 pav.).

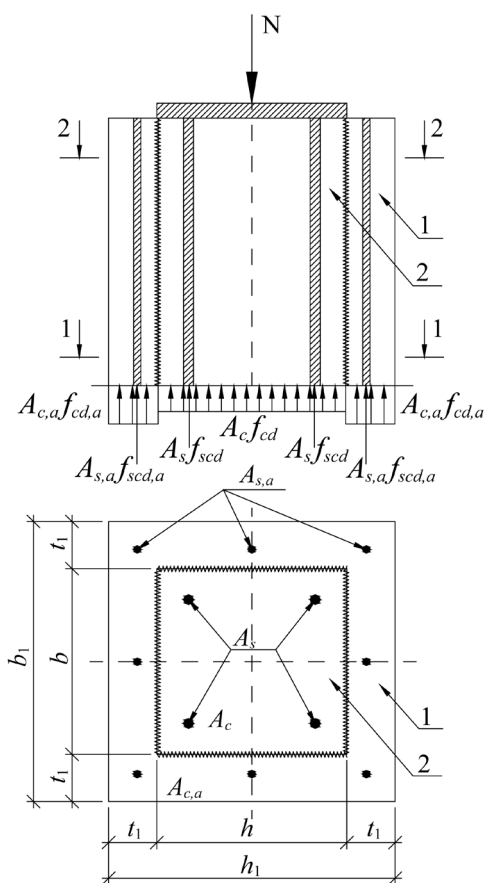
Skaičiuojant centriškai arba ekscentriškai (e) gniuždomo sustiprinto elemento laikomąją galią, turi būti išpildoma stiprumo sąlyga:

$$N_u = \min [N_{u,1-1,(e)}; N_{u,2-2,(e)}] \geq N. \quad (4)$$

Tuomet centriškai gniuždomo sustiprinto elemento laikomoji galia pjūvyje 1–1 skaičiuojama pagal (5) išraišką:

$$N_{u,1-1} = \varphi \cdot \left[\begin{aligned} &(f_{cd} \cdot A_c + f_{scd} \cdot A_s) + \\ &+(\gamma \cdot f_{cd,a} \cdot A_{c,a}) + \\ &+f_{scd,a} \cdot A_{s,a} \end{aligned} \right], \quad (5)$$

čia $\varphi, f_{cd}, A_c, f_{scd}, A_s, f_{cd,a}, A_{c,a}, f_{scd,a}, A_{s,a}$ – (1) išraiškoje aprašyti dydžiai;



2 pav. Centriškai gniuždomo sustiprinto gelžbetoninio elemento gelžbetoniniu apvalkalu skaičiuojamoji schema: 1 – gelžbetoninis apvalkalas; 2 – stiprinamasis elementas

Fig. 2. Calculation scheme of central compressed reinforced concrete element strengthened using reinforced concrete jacket: 1 – reinforced concrete jacket; 2 – enhanced element

γ – koeficientas, priklausantis nuo stiprinamojo elemento betono ir apvalkalo betono amžiaus. Jeigu naujai įrengiamo apvalkalo betono amžius skiriasi mažiau kaip vieneriais metais nuo esamo elemento betono amžiaus, tuomet $\gamma = 0,9$; jeigu daugiau kaip vieneriais metais – $\gamma = 1,0$.

Pjūvyje 2–2 skaičiuojama pagal (6) išraišką:

$$\begin{aligned} N_{u,2-2} &= (f_{cd} \cdot A_c + f_{scd} \cdot A_s) \cdot \\ &\left[1 + \frac{v \cdot \lambda^* \cdot A_w \cdot f_{swd} \cdot (1+k)}{f_{cd} \cdot A_c + f_{scd} \cdot A_s} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

čia $f_{cd}, A_c, f_{scd}, A_s$ – (1) išraiškoje aprašyti dydžiai;

v, λ^*, k – koeficientai apskaičiuojami pagal literatūroje (Krause 1993) aprašytą metodiką;

f_{swd} – stiprinamojo elemento skersinės armatūros skaičiuotinis stipris;

A_w – stiprinamojo elemento skersinės armatūros darbo plotas.

Ekscentriškai gniuždomo elemento sustiprinto gelžbetoniniu apvaskalu laikomosios galios tikrinamieji skaičiavimai taip pat atliekami dviejuose pjūviuose (2 pav.).

Laikomoji galia pjūvyje 1–1 skaičiuojama pagal (7) išraišką:

$$N_{u,1-1,e} = \left(1 - \frac{8 \cdot e_0}{h_{c,a}}\right) \cdot N_{u,1-1}. \quad (7)$$

Laikomoji galia pjūvyje 2–2 skaičiuojama pagal (8) išraišką:

$$N_{u,2-2,e} = N_{u,2-2} \cdot \left(1 - \frac{8 \cdot e_0}{h_{c,a}}\right), \quad (8)$$

čia $h_{c,a}$ – atstumai apvaskale tarp skersinės armatūros išorinių kraštų;

e_0 – veikiančios jėgos ekscentricitetas.

Jei (4) sąlyga išpildoma, elemento laikomoji galia pakankama.

Tyrimų programa ir metodika

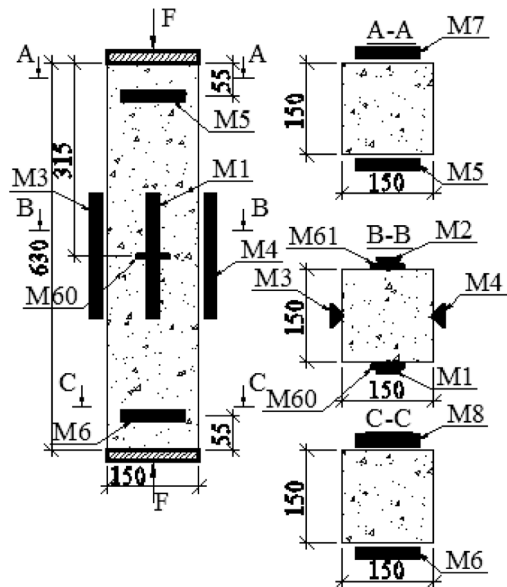
Tyrimams buvo pagaminti 9 dispersiškai armuoti modeliai. Trys nesustiprinti modeliai, kurių matmenys $a(\text{mm}) \times b(\text{mm}) \times h(\text{mm}) = 150 \times 150 \times 630$, bei šeši sustiprinti gelžbetoniniu apvaskalu dispersiškai armuoti modeliai. Pirmąjį modelių pogrupį sudarė trys SP-K1, SP-K2 ir SP-K3 dispersiškai armuoti bandiniai, antrąjį pogrupį – trys SP-R1, SP-R2, SP-R3 dispersiškai armuoti bandiniai, kurie buvo gaminami kartu su pirmojo pogrupio modeliais ir po 28-ių parų kietėjimo buvo sustiprinti, pagaminant rištinį armatūros karkasą su retu skersinės armatūros žingsniu apvaskale ties atramomis. Trečiąjį modelių pogrupį sudarė taip pat trys SP-T1, SP-T2 ir SP-T3 dispersiškai armuoti bandiniai, kurie buvo gaminami kaip ir antrojo pogrupio modeliai, tik skersinė armatūra ties atramomis buvo sutankinama.

Dispersiškai armuoti modeliai buvo gaminami iš betono, kurio klasė C35/45. Į betoną įmaišytos plieno skaidulos, kurios sudarė apie 4–5 % kiekvieno bandinio svorio. Fibrų skersmuo – 1,0–1,05 mm, ilgis – 25–55 mm. Apvaskalai pagaminti iš paprasto sunkiojo betono. Pagrindinė apvaskalo armatūra – S500 klasės keturi $\varnothing 8$ mm strypai ties kampais, skersinė armatūra – S300 klasės $\varnothing 4$ mm.

Bandymo metu apkraunant modelius, viršutinėje jų dalyje apkrova buvo perduodama per du 1 mm storio polietileno sluoksnius, tarp kurių sudaryta tepalo plėvelė, kad būtų iš dalies panaikintas trinties efektas.

Atliekant eksperimentinius tyrimus, bandiniai buvo centruojami, paskui gniuždomi iki jų suirimo. Visų modelių bandymo metu buvo matuojamos skersinės ir išilginės deformacijos. Prietaisų išdėstymas ant modelių pateiktas 3 ir 4 pav.

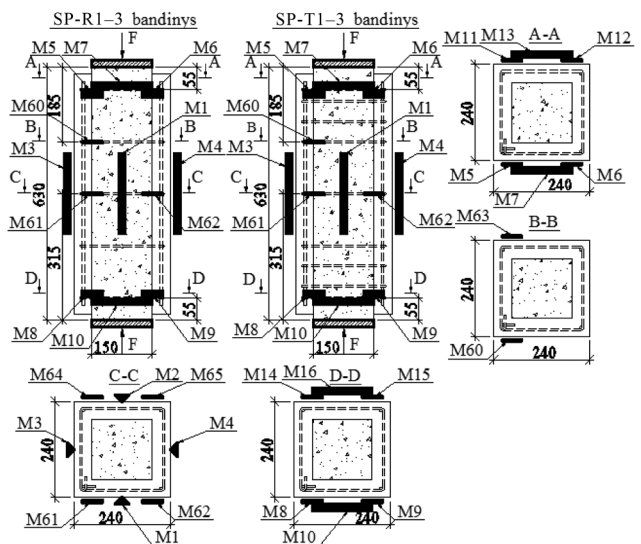
SP-K1–3 matavimo prietaisų išdėstymas



3 pav. SP-K1, SP-K2 ir SP-K3 modelių matavimo prietaisų išdėstymo schema

Fig. 3. Scheme of measuring devices on SP-K1, SP-K2 and SP-K3 models

SP-R1–3 ir SP-T1–3 matavimo prietaisų išdėstymas



4 pav. SP-R1, SP-R2, SP-R3 ir SP-T1, SP-T2, SP-T3 modelių matavimo prietaisų išdėstymo schema

Fig. 4. Scheme of measuring devices on SP-R1, SP-R2, SP-R3 and SP-T1, SP-T2, SP-T3 models

M1–M4 – vertikalieji elektromechaniniai indikatoriai, skirti gniuždomiesiems bandiniams centruoti ir išilginėms deformacijoms matuoti. 3 pav. M5–M8 – horizontalieji elektromechaniniai indikatoriai ir klijuojamieji elektroniniai tenzodavikliai M60 ir M61, skirti skersinėms deformacijoms matuoti. 4 pav. M5–M16 – horizontalieji elektromechaniniai indikatoriai ir elektroniniai tenzodavikliai M60–M65, priklijuoti ties modelio viduriu bei ties aukščiau esančia skersine armatūra, skirti taip pat skersinėms deformacijoms matuoti.

Visas dispersiškai armuotų nesustiprintų ir sustiprintų gelžbetoniniais apvalkalais modelių gniuždymo procesas buvo atliekamas naudojant hidraulinių presą, nešiojamąjį kompiuterį ir valdymo pultą, kuriuo buvo nustatomas norimas ilgalaikės arba trumpalaikės gniuždančiosios apkrovos dydis, jos pridėjimo trukmė bei deformacijų greitis.

Atlikti modelių eksperimentiniai tyrimai mažiau atitinka realias eksploatacines sąlygas, nes bandiniai stiprinami visiškai jų neapkrovus. Tačiau šiuo atveju tai nėra labai svarbu, nes buvo tiriama ir nagrinėjama skersinės armatūros apkabų skirtingo išdėstymo ties atramomis įtaka elementų pleišėjimui, deformacijoms ir laikomajai galiai.

Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir analizė

Nesustiprintų dispersiškai armuotų modelių suirimo pobūdis pavaizduotas 5 pav.

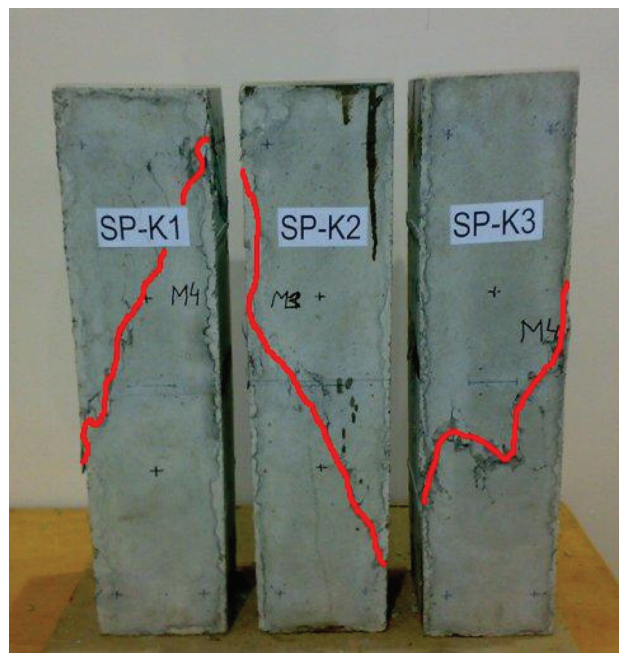
Sustiprintų gelžbetoniniu apvalkalu dispersiškai armuotų modelių suirimo pobūdis pavaizduotas 6 ir 7 pav.

Modelių vidutinių skersinių santykinų deformacijų priklausomybė nuo įtempių ties jų viršumi bei apačia pateikta grafiškai 8 pav.

8 pav. pateiktas grafikas rodo, kad panaikinus viršutinėje atramoje trinties efektą deformacijos padidėja, palyginti su apatine atrama. Deformacijas gerokai sumažina elemento suvaržymas apvalkalu ir skersinės armatūros sutankinimas apvalkale ties atramomis.

Modelių eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad pirmojo pogrupio modelių laikomoji galia yra labai panaši. Iš grafiko matyti, kad modelių stiprinimas gelžbetoniniais apvalkalais turi teigiamą poveikį jų laikomajai galiai. Laikomųjų galių skirtumas nėra labai didelis (9 pav.), kadangi tam įtakos galėjo turėti bandiniams naudojamos medžiagos, jų gamybos technologija, kietėjimo sąlygos, bandymų metodika ir pan.

Kadangi sustiprintas gelžbetoniniu apvalkalu dispersiškai armuotas elementas yra ne kas kita, kaip sluoksniuota konstrukcija. Tai paprasčiausias bendro darbo tarp sluoksnių neužtikrinimas gali labai smarkiai nulemti neryškius laikomosios galios padidėjimus.



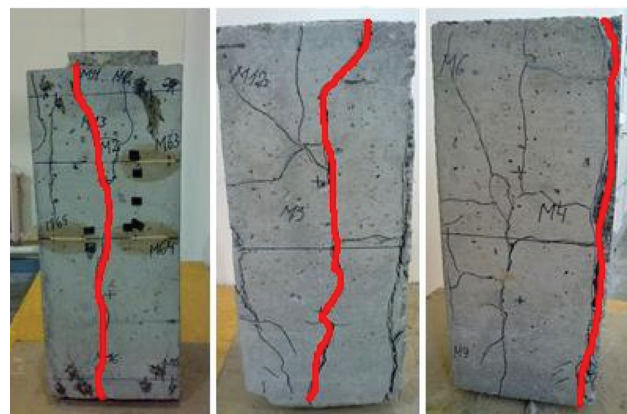
5 pav. SP-K modelių suirimo pobūdis

Fig. 5. Collapse character of SP-K models



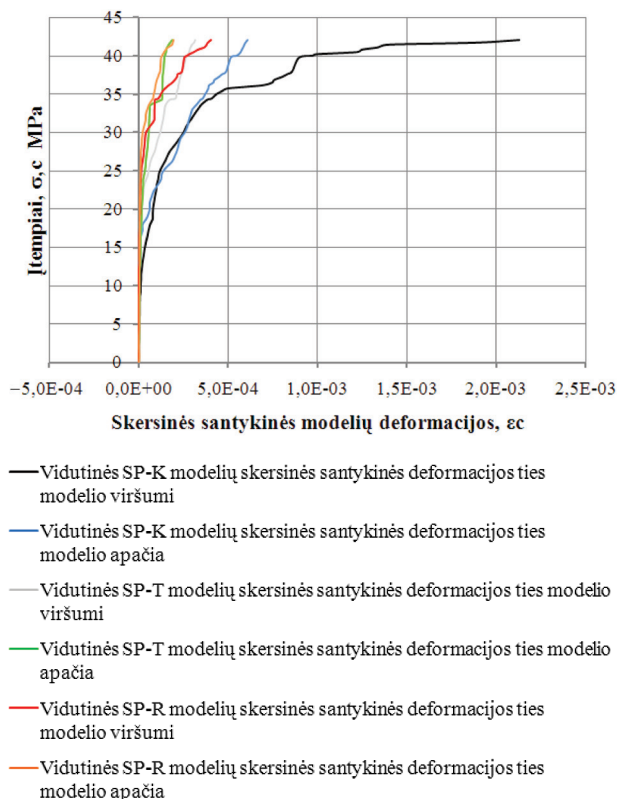
6 pav. SP-R modelių suirimo pobūdis

Fig. 6. Collapse character of SP-R models

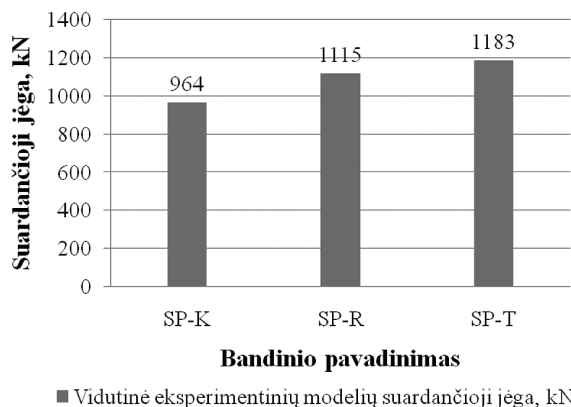


7 pav. SP-T modelių suirimo pobūdis

Fig. 7. Collapse character of SP-T models



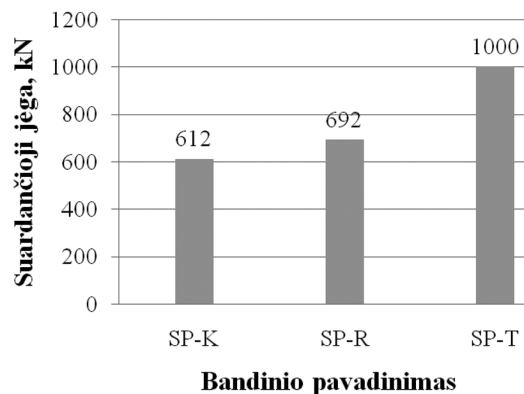
8 pav. Modelių deformacijų priklausomybė nuo įtempių
 Fig. 8. Models stress – strain relationship



9 pav. Vidutinė eksperimentinė nesustiprintų ir sustiprintų modelių suardančioji jėga
 Fig. 9. Average experimental destroying force of not strengthened and strengthened models

Trinties panaikinimas leido iki minimalios reikšmės sumažinti sankabos efektą ties viršutine atrama, o tai leido suprasti pirmųjų plyšių atsivėrimo tendencijas.

Iš 9 pav. pateikto grafiko matyti, kad apvalkalo skersinės armatūros sutankinimas ties atramomis šiek tiek padidino laikomąją galią. Tačiau bandymai parodė, kad skersinio armavimo sutankinimas apvalkale ties atramomis turėjo gana didelę įtaką pirmųjų plyšių atsiradimui (10 pav.).



10 pav. Vidutinė eksperimentinė nesustiprintų ir sustiprintų modelių perimama jėga, kuriai esant pastebėtas pirmasis plyšys
 Fig. 10. Average experimental carrying force of not strengthened and strengthened models, to which was observe the first crack

Kadangi gniuždanti apkrova buvo perduodama tik modelio branduoliui, o apvalkalas viršuje ir apačioje niekur nesirėmė, galima teigti, kad apvalkalas varžė tik skersines elemento deformacijas ir dirbo kaip vientisa apkaba. Dėl trinties panaikinimo viršutinėje modelio dalyje pirmieji plyšiai, pamažu ardydami gelžbetoninį apvalkalą, atsirasdavo būtent ten. Didinant apkrovą, šie plyšiai susijungdavo su apvalkalo plyšiais apačioje. Apvalkalo skersinės armatūros sutankinimas ties atramomis leido pasiekti didesnę jėgą, kuriai esant atsirasdavo pirmieji plyšiai.

Iš 9 pav. pateikto grafiko matyti, kad skirtumas tarp modelių SP-R ir SP-T vidutinių laikomųjų galių yra apie 6 %. Tai rodo, jog apvalkalo skersinės armatūros sutankinimas ties atramomis turi įtakos bendrajam sustiprintų elementų stiprumui.

Gelžbetoninio apvalkalo įtaka bendrajam bandinių stiprumui yra didesnė ir siekia apie 14 %.

Nesustiprintų modelių ir sustiprintų modelių SP-R vidutinė laikomoji galia yra 37 % didesnė nei vidutinė jėga, kuriai esant atsirado pirmieji plyšiai. Tuo tarpu sustiprintų modelių SP-T skirtumas tarp vidutinės laikomosios galios ir tarp vidutinės jėgos, kuriai esant atsirado pirmieji plyšiai, yra daug mažesnis ir siekia tik apie 15 %. Taip yra todėl, kad, panaikinus trintį ties viršutine atrama, pirmieji plyšiai atsiranda būtent ten. Elementams, sustiprintiems apvalkalais, kuriose papildomai sutankinama apvalkalo skersinė armatūra ties atramomis, skersines deformacijas varžo apvalkalas bei skersinė armatūra ir neleidžia taip greitai susidaryti vertikaliems plyšiams. Todėl plyšiai atsiranda beveik prieš pat elemento suirimą kai yra prarandamas sukibimas tarp stiprinamojo elemento ir apvalkalo betonų.

Siūlomos teorinės prielaidos sustiprintojo elemento stiprumui skaičiuoti, kai apvalkalas netiesiogiai apkraunamas

Kai apvalkalas tiesiogiai neapkraunamas, o įjungiamas į darbą per trinties jėgas tarp apvalkalo ir stiprinamojo elemento betonų, turi būti įvedamos papildomos skaičiavimo prielaidos.

Jeigu apkrova perduodama tik stiprinamajam elementui, laikomosios galios skaičiavimui patikslinti galima pritaikyti „Eurocode 2: Design of concrete structures“ 10.9.6.2 skyriuje pateiktą prielaidą, jog koloną veikianti jėga į lizdinio pamato sienelės perduodama per betono trintį. Pritaikius šią prielaidą, galima teigti, kad gniuždomojo elemento branduolio perimama gniuždančioji jėga perduodama apvalkalui per trintį tarp kolonos ir apvalkalo betonų.

Kadangi bandymai parodė, kad elemento laikomąją galią tikslinga skaičiuoti dviejuose pjūviuose, tai centriškai gniuždomo sustiprintojo elemento laikomoji galia viduriniame pjūvyje gali būti skaičiuojama pagal (9) išraišką:

$$N_{u,teor.} = F_1 + F_2 = 0,7 \cdot (f_c \cdot A_c) + 0,3 \cdot (f_{c,a} \cdot A_{c,a} + f_{p,a} \cdot A_{s,a}), \quad (9)$$

čia f_c – stiprinamojo elemento betono gniuždomasis stipris;

A_c – stiprinamojo elemento betono skerspjūvio plotas;

$f_{c,a}$ – gelžbetoninio apvalkalo betono gniuždomasis stipris;

$A_{c,a}$ – gelžbetoninio apvalkalo betono skerspjūvio plotas;

$f_{p,a}$ – gelžbetoninio apvalkalo pagrindinės armatūros gniuždomasis stipris;

$A_{s,a}$ – gelžbetoninio apvalkalo pagrindinės armatūros skerspjūvio plotas.

Imama, kad 70 % gniuždančiosios jėgos perima elemento branduolys, o 30 % – apvalkalas.

Taikant mažų ekscentricitetų atvejį, tempiamos armatūros $A_{st,a}$ tempiamasis stiprumas $\sigma_{p,a}$ išnaudojamas nevysiškai arba ji yra gniuždoma. Tuomet elemento skerspjūvio laikomoji galia viduriniame pjūvyje gali būti skaičiuojama užrašant išorinių ir vidinių jėgų projekcijų lygtį į vertikaliąją ašį, kai $A_{st,a} = A_{sc,a}$:

$$N_{u,e,teor.} = 0,7 \cdot f_c \cdot (h_1 \cdot b_1) + 0,3 \cdot f_{c,a} \cdot ((x_{eff} \cdot b) - (h_1 \cdot b_1)) + 0,3 \cdot (f_{p,a} \cdot A_{sc,a}) + 0,3 \cdot (\sigma_{p,a} \cdot A_{st,a}), \quad (10)$$

čia $f_c, f_{c,a}, f_{p,a}$ – dydžiai, aprašyti (9) išraiškoje;

$\sigma_{p,a}$ – tempiamosios apvalkalo pagrindinės armatūros įtempiai;

h_1, b_1, b – dydžiai, pavaizduoti 1 pav.;

$A_{sc,a}, A_{st,a}$ – gniuždomosios ir tempiamosios apvalkalo pagrindinės armatūros skerspjūvio plotai.

Gniuždomosios zonos aukštis x_{eff} ir įtempiai $\sigma_{p,a}$ apskaičiuojami iš lygčių sistemos, užrašant ir prilyginant nuliui vidinių jėgų momentų pusiausvyros lygtį apie veikiančios gniuždančiosios jėgos pridėties tašką ir įtempių $\sigma_{p,a}$ lygtį.

Ekscentriškai gniuždomo sustiprintojo elemento laikomoji galia pjūviuose ties elemento atramomis skaičiuojama pagal pateiktas skaičiavimo metodikoje Krause (1993) (8) ir (10) išraiškas.

Tačiau atlikus skaičiavimus viduriniame elemento pjūvyje, atsižvelgiant į šią prielaidą ir gautus rezultatus, palyginti su skaičiavimų rezultatais pjūvyje ties elemento atramomis, buvo gauta, kad silpnesnis ir lemiamas elemento pjūvis išlieka ties atramomis.

Sustiprintųjų elementų laikomosios galios skaičiuotinių ir eksperimentinių reikšmių palyginimas

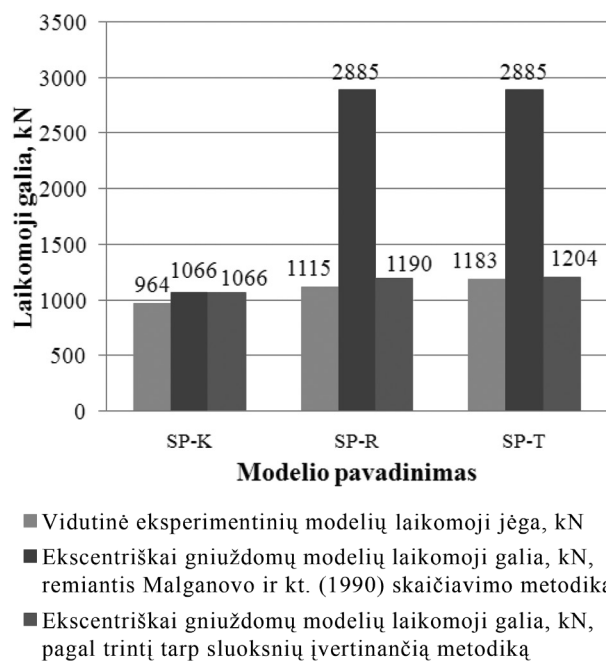
Lyginant eksperimentinių tyrimų rezultatus su teorinių skaičiavimų rezultatais pagal skirtingas skaičiavimo metodikas, matyti, kad daug artimesni eksperimentinių tyrimų rezultatams yra teorinių skaičiavimų rezultatai pagal metodiką, kuri įvertina trintį tarp stiprinamojo elemento ir apvalkalo betonų (11 pav.).

Taip yra todėl, kad pagal Malganovo ir kt. (1990) skaičiavimo metodiką, skaičiavimai atliekami tik viduriniame elemento pjūvyje, ir neįvertinamas dažnai praktikoje pasitaikantis bei šiuose eksperimentiniuose tyrimuose atliktas atvejis, kai apvalkalas tiesiogiai neapkraunamas, o įjungiamas į darbą per trinties jėgas tarp apvalkalo ir stiprinamojo elemento betonų.

Atliekant skaičiavimus pagal Malganovo ir kt. (1990) metodiką, SP-R ir SP-T bandinių laikomoji galia yra visiškai vienoda, nes pagal šią metodiką yra neįvertinamas nei stiprinamojo elemento, nei apvalkalo skersinio armavimo darbas ir skirtingos jo geometrinės sąlygos.

Atlikus sustiprinto elemento skaičiavimus viduriniame pjūvyje, kur skerspjūvis laikomas vientisu, pagal pasiūlytą laikomosios galios skaičiavimo metodiką matyti, kad silpnesnis elemento pjūvis yra ties elemento atramomis, kadangi ten atsiranda daug didesnės skersinės deformacijos, o betonas nesugeba perimti didelių tempimo įtempimų.

Eksperimentinių tyrimų rezultatai (11 pav.) rodo, kad skersinės armatūros sutankinimas apvalkale ties atramo-



11 pav. Eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas su teorinių skaičiavimų rezultatais

Fig. 11. Comparison of experimental and theoretical calculation results

mis padidina elemento laikomąją galią apie 6 %, o teorinių skaičiavimų rezultatai rodo tik apie 1 % padidėjimą. Laikomųjų galių skirtumas tarp eksperimentinių tyrimų rezultatų ir teorinių skaičiavimo rezultatų yra nedidelis. Nesustiprintų dispersiškai armuotų bandinių – apie 10 %, sustiprintų gelžbetoniniais apvalkalais bandinių SP-R – apie 6 %, o sustiprintų gelžbetoniniais apvalkalais bandinių SP-T – tik apie 2 %.

Išvados

Skaičiuojant sustiprinto elemento laikomąją galią pagal Malganovo (Мальганов ir kt. 1990) metodiką, jo laikomoji galia priklauso nuo branduolio ir apvalkalo betono gniuždomųjų stiprių bei nuo branduolio ir apvalkalo pagrindinės armatūros gniuždomųjų stiprių ir labai nedaug – nuo nukrovimo sąlygų stiprinimo metu.

Skaičiuojant sustiprinto elemento laikomąją galią pagal Krause (1993) metodiką, jo laikomoji galia pjūvyje ties elemento viduriu taip pat priklauso nuo tų pačių parametru ir labai nedaug – nuo jų betonų amžiaus skirtumo. Ties atramomis elemento laikomoji galia priklauso nuo branduolio betono gniuždomojo stiprio, nuo jo pagrindinės armatūros gniuždomojo stiprio bei nuo jų skersinio armavimo sąlygų, o nuo apvalkalo betono stiprio nepriklauso.

Gniuždomųjų elementų stiprinimo gelžbetoniniais apvalkalais (Мальганов ir kt. 1990) skaičiavimo metodi-

ka ne tik neįvertina stiprinamojo elemento bei apvalkalo skersinės armatūros darbo, bet ir dažnai praktikoje pasi-taikančio atvejo, kai apvalkalas tiesiogiai neapkraunamas, o įjungiamas į darbą per trinties jėgas tarp apvalkalo ir stiprinamojo elemento betonų.

Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad dispersiškai armuo-tų bandinių sustiprinimas gelžbetoniniais apvalkalais turėjo nedidelę įtaką bandinių laikomajai galių bei stiprumui – apie 14 %. Apvalkalo skersinės armatūros sutankinimas ties atramomis bandinių laikomąją galią padidino apie 6 %, tačiau stipriai nutolino pirmųjų plyšių atsiradimą.

Atliekant elementų laikomosios galios skaičiavimus pagal Krause (1993) metodiką, pjūvyje ties atramomis, kur įvertinami branduolio betono ir jo išilginės armatūros gniuždomieji stipriai, branduolio ir apvalkalo skersinio armavimo sąlygos bei skersinės armatūros tempiamasis stipris, gaunami labai artimi rezultatai eksperimentinių ty-rimų rezultatams.

Kai apvalkalas tiesiogiai neapkraunamas, o įjun-giamas į darbą per trinties jėgas tarp apvalkalo ir sti-prinamojo elemento betonų, skaičiavimai viduriniajame elemento pjūvyje gali būti atlikti pagal pasiūlytą ir aprašytą sustiprintųjų elementų laikomosios galios skaičiavimo me-todiką. Kadangi atlikus laikomosios galios skaičiavimus viduriniajame elemento pjūvyje pagal šią metodiką, buvo gauti daug artimesni rezultatai eksperimentinių tyrimų re-zultatams nei pagal Malganovo ir kt. (1990) bei Krause (1993) skaičiavimo metodikas. Palyginus eksperimentinius rezultatus su skaičiavimų rezultatais pjūvyje ties atramo-mis, matyti, kad silpnesnis ir lemiamas pjūvis išlieka ties elementų galais.

Todėl galima teigti, kad elementų pjūviai ties atramo-mis yra daug pavojingesni ir sustiprintųjų elementų laiko-moji galia dažniausiai priklauso nuo jų stiprumo.

Teoriniai elementų laikomosios galios skaičiavimai pagal pateiktas bei pasiūlytą metodikas buvo atlikti nei-vertinant patikimumo ir atsargos koeficientų, todėl teori-nių laikomosios galios skaičiavimų rezultatai yra nedaug didesni už eksperimentinių tyrimų metu gautus rezultatus.

Literatūra

- Daugevičius, M.; Apinis, R. 2009. Gniuždomų elementų, susti-printų įtemptu anglies pluoštu, darbo analizė, iš *Statybinės konstrukcijos: konferencijos, įvykusios 2009 m. vasario 6 d., straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika, 51–59.
- Emmons, P. H.; Vaysburd, A. M.; Thomas, J. 1998. Strengthening Concrete Structures, Part I, *Concrete International* 20(3): 53–58.
- Emmons, P. H.; Vaysburd, A. M.; Thomas, J. 1998. Strengthening Concrete Structures, Part II, *Concrete International* 20(4): 56–60.

- Indelicato, F. 2002. Steel fibre reinforced concrete: a contribution to the evaluation of the limit of proportionality, *Magazine of Concrete Research* 54(3): 209–213.
doi:10.1680/mac.2002.54.3.209
- Krause, H. J. 1993. Zum tragverhalten und zur bemessung nachträglich verstärkter stahlbetonstützen unter zentrischer belastung, in *Doktor-Ingenieurs. Verlag shaker. Aachen*. 201 s.
- Marčiukaitis, G.; Daugevičius, M.; Valivonis, J. 2010. Anglies pluoštu sustiprintų gelžbetoninių sijų tempiamosios zonos irimo pobūdžio analize, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* 2(4): 129–137. doi:10.3846/skt.2010.17
- Skuturna, T.; Valivonis, J.; Vainiūnas, P.; Marčiukaitis, G.; Daugevičius, M. 2008. Analysis of deflections of bridge girders strengthened by carbon fibre reinforcement, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(3): 145–151.
doi:10.3846/1822-427X.2008.3.145-151
- Thomé, B.; Schikora, K.; Bletzinger, K. U. 2005. *Material modeling of steel fiber reinforced concrete*. Innsbruck, Austria.
- Zabulėnas, A. 1992. Влияние напряженно-деформированного состояния на несущую способность усиливаемых железобетонных элементов при осевом сжатии. Вильнюс, *Техника*. 112 с.
- Мальганов, А. И.; Плевков, В. С.; Полищук, А. И. 1990. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий, в кн. *Атлас схем и чертежей*. Томск.

ANALYSIS OF STRENGTHENING OF COMPRESSED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING REINFORCED CONCRETE JACKETS

S. Pilkavičius

Abstract

This article investigates two chosen calculation methods of compressed reinforced concrete elements strengthened using reinforced concrete jackets. Shortly describe carrying capacity calculation algorithms of these calculation methods. Present elements basic equations and dependences of carrying capacity. For calculation methods of carrying capacity comparison and adjustment executed carrying capacity experimental studies of compressed fiber reinforcement concrete elements strengthened using reinforcement concrete jackets. Were compared theoretical calculations of carrying capacity results with experimental carrying capacity results. Shortly describe advantages and disadvantages of analyzed calculation methods and experimental research. By the comparison of calculation methods conclusions and experimental studies conclusions, produces improved calculation method of carrying capacity.

Keywords: reinforced concrete jacket, calculation methods of carrying capacity, experimental research of carrying capacity, advantages and disadvantages of calculation methods.