



## ARMATŪROS STRYPŲ IŠDĖSTYMO ĮTAKOS TEMPIAMŲJŲ BETONINIŲ ELEMENTŲ DEFORMACIJOMS BEI PLEIŠĖJIMUI EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Arvydas RIMKUS<sup>1</sup>, Auksė VILĖNIŠKYTĖ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos fakultetas, Tiltų ir specialiųjų statinių katedra,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223, Vilnius, Lietuva

El. paštai: <sup>1</sup>[arvydas.rimkus@vgtu.lt](mailto:arvydas.rimkus@vgtu.lt) (corresponding author); <sup>2</sup>[auksevilenskYTE@gmail.com](mailto:auksevilenskYTE@gmail.com)

**Santrauka.** Pateiktame straipsnyje nagrinėjama armatūros strypų išdėstymo įtaka tempiamųjų betoninių elementų deformacijoms bei pleišėjimui. Tyrimų metu atlikti ašinio tempimo bandymai 59 betoniniams elementams, kurių armavimui naudotas skirtingas strypų skaičius. Nustatyta, kad armatūros strypų skaičius sąlygoja elementų standumą plyšių formavimosi metu bei turi įtakos pleišėjimo parametrams. Tyrimo rezultatai parodė, kad įvertinus armatūros strypų išdėstymo skerspjūvyje efektą galima nesudėtingai optimizuoti eksploatacines gelžbetoninių konstrukcijų savybes nedidinant tempiamosios armatūros kiekio.

**Reikšminiai žodžiai:** armuotas betonas, deformacijos, pleišėjimas, eksperimentiniai tyrimai, strypų išdėstymo įtaka, tempiamieji elementai.

### Įvadas

Betonas – plačiausiai pasaulyje taikoma statybinė medžiaga, kurios sunaudojimas siekia 27 mlrd. tonų per metus. Viena sudėtingiausiai nuspėjamų statybinių konstrukcijų savybių – betono pleišėjimas. Konstrukcijų pleišėjimas sąlygoja metalinės armatūros koroziją dėl kurios statiniai praranda eksploatacines savybes. Jų remontas bei priežiūra reikalauja papildomų finansinių išlaidų, todėl konstrukcijų pleišėjimo stebėjimas yra itin aktualus.

Armuoto betono pleišėjimas charakterizuojamas betono ir armatūros deformacijų skirtumu, todėl atliekant pleišėjimo analizę būtina tiksliai žinoti šių parametrų reikšmes. Konstrukcijų betono paviršiaus deformacijų matavimas yra paprastas ir lengvai įgyvendinamas, tuo tarpu armatūros strypo deformacijos dažnai nėra žinomos. Dėl šios priežasties atliekant gelžbetoninių konstrukcijų deformacijų analizę priimama, kad armatūros deformacijos yra lygios tiesiogiai išmatuotoms betono paviršiaus deformacijoms. Svarbu paminėti, kad naudojant tradicinius eksperimentinių bandymų būdus sunku iširti tempiamus elementus armuotus keletu strypų. Jau nuo 1965 metų yra žinoma (Broms *et al.*, 1965, Rostásy *et al.*, 1976, Gilbert *et al.*, 2007, Burns *et al.*, 2008), kad atstumas tarp plyšių priklauso ne tik nuo armatūros kiekio elemento skerspjūvyje, bet ir nuo jos išdėstymo. Šiame darbe eksperimentiškai tiriama armatūros strypų išdėstymo įtakos tempiamųjų betoninių elementų deformacijoms bei pleišėjimui.

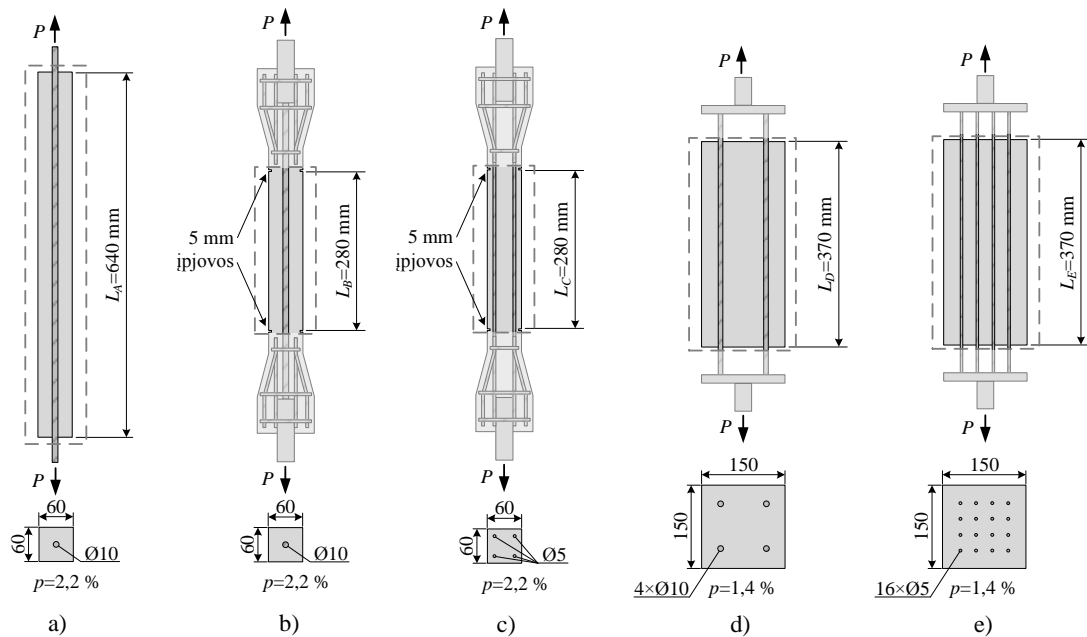
### Ekspperimentiniai tyrimai

Ekspperimentinių tyrimų metu nagrinėta armatūros strypų išdėstymo įtaka tempiamųjų betoninių elementų deformacijoms bei pleišėjimui. Bandymų programą sudarė 59 betono elementai, kurie varijuojant armatūros strypų išdėstymą elemento skerspjūvyje buvo suskirstyti į 5 grupes (1 pav.). Paveiksle 1a, b, c, d ir e pateiktos atitinkamai elementų A, B, C, D ir E armavimo schemos.

Pirmoje eksperimentinių tyrimų stadijoje buvo nagrinėjami elementai (A, B ir C) armuoti vienu ir keturiais strypais. Šių elementų geometriją ir strypų išdėstymą sąlygojo bandymų įrangos techninės galimybės. Įvertinus ribotą bandinių ilgį bei bandymų preso galią (100 kN) bei atsižvelgus į projektinį tempiamojo betono stiprį parinkta racionali bandinių geometrija: bendras ilgis – 640 mm, skerspjūvio matmenys – 60×60 mm. Išlaikant pastovų elementų A, B ir C armavimo koeficientą ( $p=2,2\%$ ), bandiniai armuoti atitinkamai 1×Ø10, 1×Ø10 ir 4×Ø5 mm strypais. Elementams A ir B suformuotas 25 mm apsauginis betono sluoksnis, elementams C – 15 mm.

Ašinio tempimo bandymai elementams A atlikti tempiant už įbetonuotos armatūros strypo. Siekiant užtikrinti centrišką elementų C tempimą bei suvienodinti strypų grupės deformacijas naudotas specialus apkrovos perdavimo būdas elemento galuose formuojant standžias ankerines zonas (1c pav.). Jos sudarytos iš papildomų strypų karkasų, kurie neleidžia elementui suirti bei pleišėti suformuotose zonose. Plyšių lokalizavimui ties elementų ankeriniais karkasais įrengiamos 5 mm gylio įpjovos, tarp kurių fiksuojamas elementų pleišėjimas. Pirmos tyrimų stadijos tikslas buvo palyginti elementų A ir C pleišėjimą ir deformacijas. Naudojant skirtingą bandymo metodiką, negalima

tiesiogiai palyginti bandymų rezultatų, todėl papildomai buvo pagaminti ir išbandyti elementai *B*, kurie atitinka elementų *A* skerspjūvį bei elementų *C* apkrovos pridėjimo būdą.



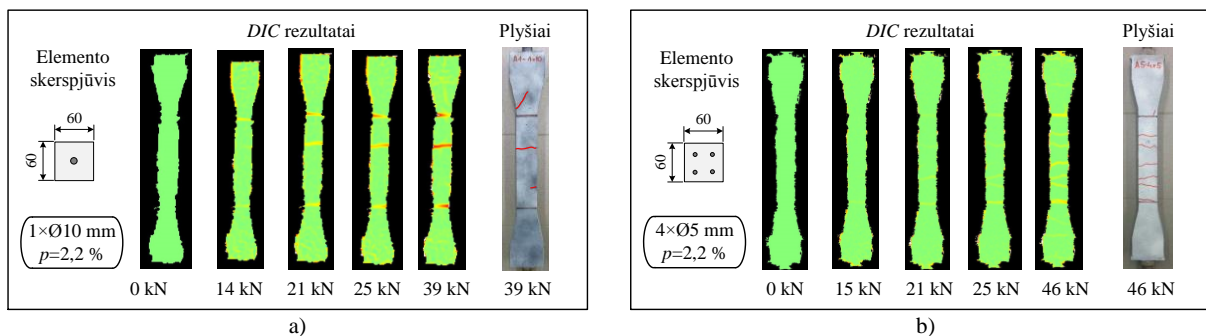
1 pav. Eksperimentiniai bandiniai

Antroje eksperimentinių tyrimų stadijoje buvo nagrinėjami elementai *D* ir *E*. Dėl ribotų bandymų įrangos galimybių parinkta bandinių geometrija: ilgis – 370 mm, skerspjūvio matmenys – 150×150 mm. Išlaikant pastovų elementų *D* ir *E* armavimo koeficientą ( $p=1,4\%$ ), bandiniai armuoti atitinkamai 4×Ø10 ir 16×Ø5 mm strypais. Svarbu paminėti, kad elementams *D* ir *E* suformuotas 30 mm apsauginis betono sluoksnis.

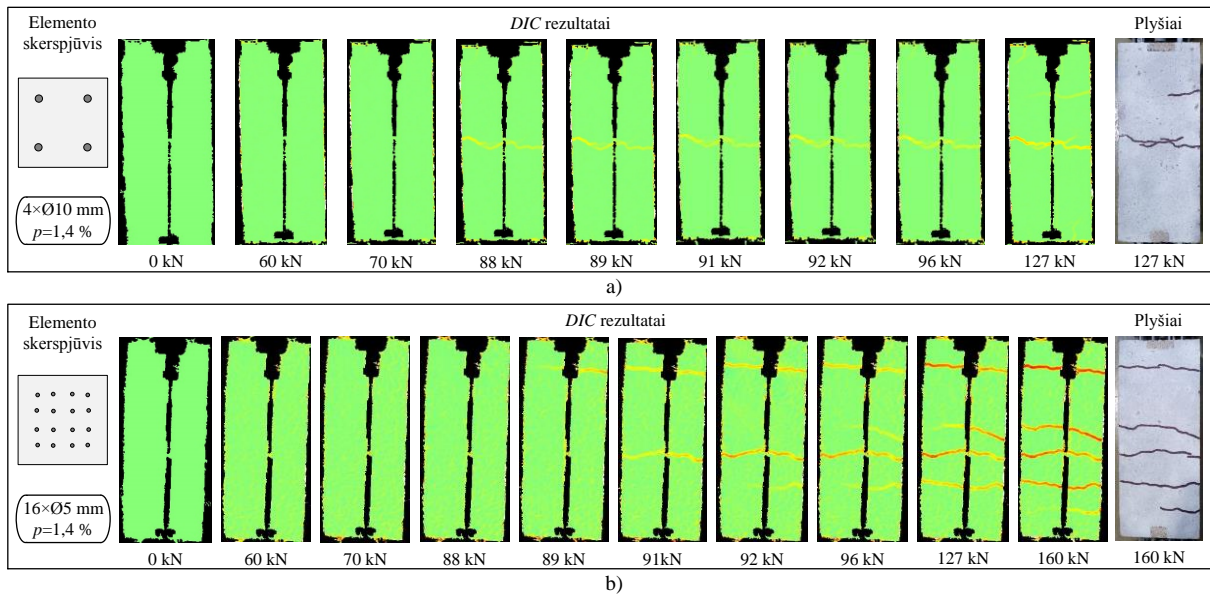
Eksperimentinių bandinių gamybai naudoti C30/37 klasės laboratorijoje paruošti betono mišiniai, bei S500 klasės armatūros strypai. Dėl didelio elementų kiekio ir ribotų laboratorijos galimybių elementai pagaminti 5 etapais, todėl kiekvienos partijos charakteristikų (gniuždomojo stiprio ir tamprumo modulio) nustatymui papildomai buvo gaminami 150×150×150 mm kubeliai bei 300×Ø150 mm cilindrai. Nustatyta, kad gniuždomasis betono stipris 28 dieną po betonavimo siekė 39 MPa, tamprumo modulis – 33,1 GPa. Siekiant sumažinti laisvojo betono traukimosi deformacijas, visi bandiniai (įskaitant papildomus kubelius bei cilindrus) buvo laikomi vandenyje iki bandymo dienos.

Elementai buvo apkraunami poslinkių kontrolės būdu 0,2 mm/min. greičiu. Elektroniniais poslinkio matuokliais *LVDT* (angl. *Linear Variable Displacement Transducer*) fiksuotos betono paviršiaus bei armatūros strypų (tik elementams *A*, *D* ir *E*) vidutinės deformacijos. Betono paviršiaus deformacijoms bei pleišėjimui stebėti naudota *DIC* (angl. *Digital Image Correlation*) sistema.

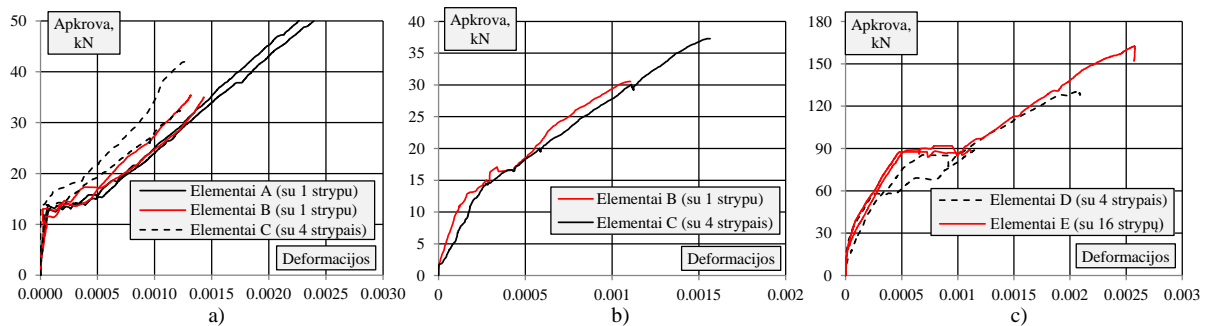
Eksperimentų metu gautos elementų paviršiaus deformacijų pasiskirstymo bei pleišėjimo schemas pateiktos 2 ir 3 paveiksluose. Bandinių paviršiaus deformacijų *DIC* sistemos stebėjimo rezultatai, t. y. paviršiaus deformacijų pasiskirstymas, pateikiami prie charakteringų apkrovimo lygių elementų paviršiuje atsiveriant naujiems plyšiams. Dėl betono paviršiaus deformacijų fiksavimo skaitmeniniais poslinkių matuokliais *LVDT* 3 paveiksle *DIC* sistema gautuose rezultatuose matomi poslinkių matuoklių šešėliai (juoda linija elementų viduryje). Eksperimentų metu gautos apkrovos ir vidutinių deformacijų priklausomybės pateiktos 4 paveiksle. Elementams *A*, *B* ir *C* fiksuotos elementų betono paviršiaus vidutinės deformacijos, o elementams *D* ir *E* – armatūros strypų vidutinės deformacijos.



2 pav. a) Elemento *B* ir b) elemento *C* paviršiaus deformacijų pasiskirstymo ir pleišėjimo schemas



3 pav. a) Elemento *D* ir b) elemento *E* paviršiaus deformacijų pasiskirstymo ir pleišėjimo schemas



4 pav. Eksperimentinių bandinių a) apkrovos ir vidutinių betono deformacijų, b) apkrovos ir bendrųjų elemento deformacijų, c) apkrovos ir vidutinių armatūros deformacijų priklausomybės

## Rezultatų aptarimas

Tyrimų rezultatai analizuojami išskiriant dvi elementų grupes, t. y. elementus armuotus vienu ir keturiais strypais bei elementus armuotus keturiais ir šešiolika strypų. Analizuojamų grupių elementų geometrija ir armavimo koeficientas nekinta, todėl vertinama tik armatūros strypų skaičiaus bei jų išdėstymo įtaka vidutinėms elementų deformacijoms bei pleišėjimui.

1. Esant identiškiems skerspjūvio parametrams, atstumai tarp plyšių elementuose *B* (2a pav.) yra artimi užfiksuotiems elementuose *A*, kuriuos aprašė Gudonis (2015). Panašią elementų elgseną patvirtina ir apkrovos ir vidutinių betono paviršiaus deformacijų priklausomybės pateiktos 4a paveiksle. Analizuojant elementų *B* ir *C* plyšių išdėstymo schemas (2 pav.), galima pastebėti, kad 4 strypais armuotame bandinyje susiformuoja daugiau plyšių: elemente *B* – 2, o elemente *C* – 5. Kaip parodyta paveiksle 4b bendrosios elementų deformacijos, fiksuotos tarp bandinių tvirtinimo taškų, yra panašios. Iš pateiktų rezultatų matyti, kad elementai *B* ir *C* yra tapatūs, todėl siekiant eliminuoti apsauginio betono sluoksnio įtaką pleišėjimui buvo pagaminti ir išbandyti 4 strypais armuoti elementai *D*, kaip etaloniniai elementams *B* ir *C*.
2. Elementų *D* ir *E* skerspjūviai sukomponuoti išlaikant vienodus apsauginius betono sluoksnius, armavimo koeficientus ir skerspjūvio matmenis bei parenkant skirtingus armatūros strypų skaičius. Dėl fiksuoto armavimo koeficiento, riboto minimalaus armatūros skersmens ( $\text{Ø}5$  mm) bei bandinio skerspjūvio matmenų elemento *E* skerspjūvis sukomponuotas naudojant 16 strypų. Iš 3 paveiksle pateiktų elementų *D* ir *E* pleišėjimo schemų galima pastebėti, kad 16 strypų armuotame bandinyje susiformuoja ženkliai daugiau plyšių, nei 4 strypais armuotame elemente (elemente *D* – 2, *E* – 5). Taip pat svarbu paminėti, kad elementai armuoti 16 strypų pleišėjimo stadijoje intervale nuo 60 iki 90 kN deformacijos yra pastebimai mažesnės, lyginant su 4 strypais armuotais bandiniais. Plyšiams pilnai susiformavus elementų standumas tampa vienodas (dėl vienodo armatūros kiekio skerspjūvyje).

Išanalizavus pateiktus rezultatus galima teigti, kad armatūros strypų skaičius sąlygoja elementų standumą plyšių formavimosi metu bei turi įtakos pleišėjimo parametrams. Tyrimo rezultatai parodė, kad įvertinus armatūros strypų išdėstymo skerspjūvyje efektą galima nesudėtingai optimizuoti eksploatacines gelžbetoninių konstrukcijų savybes

nedidinant tempiamosios armatūros kiekio. Tinkamai parinkus bei suderinus armatūros strypų išdėstymą bei elemento pleišėjimo apkrovą (tempiamąjį betono stiprį) atsiranda galimybė sumažinti betoninių elementų skerspjūvį bei sutaupyti medžiagų. Tiksliam strypų išdėstymo įtakos elementų standumui bei pleišėjimui nustatymui būtina atlikti papildomus eksperimentinius tyrimus.

## Išvados

Šis tyrimas skirtas įvertinti armatūros strypų išdėstymo įtaką tempiamųjų betoninių elementų vidutinėms deformacijoms bei pleišėjimui. Eksperimentinių tyrimų metu išbandyti 59 betoniniai elementai, kurių armavimui naudotas skirtingas strypų skaičius. Tyrimų rezultatai leidžia teigti:

1. kad betono apsauginis sluoksnis yra svarbus parametras vertinant elementų pleišėjimą;
2. varijuojant strypų skaičiumi (ir jų skersmeniu) bei betono stipriu galima efektyviai sumažinti elementų deformacijas esant eksploatacinėms apkrovoms;
3. siekiant tiksliai įvertinti strypų skaičiaus bei išsidėstymo įtaką bandinių standumui ir pleišėjimui būtina atlikti papildomus eksperimentinius tyrimus.

## Padėka

Straipsnio autoriai išreiškia padėką *Lietuvos Mokslo tarybai* už finansinę paramą vykdant mokslininkų grupės projektą (Nr. MIP-050/2014).

## Literatūra

- Broms, B. B., Lutz, L. A. 1965. Effects of Arrangement of Reinforcement on Crack Width and Spacing of Reinforced Concrete Members, *ACI Journal Proceedings*, 62(11): 1395-1410.
- Rostásy, F., Koch, R., Leonhardt, F. 1976. Zur Mindestbewehrung für Zwang von Außenwänden aus Stahlleichtbeton, *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton 267*, 1-107 (vokiečių k.).
- Gilbert, R. I. 2007. Tension Stiffening in Lightly Reinforced Concrete Slabs, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 133(6): 899–903.
- Burns, C., Seelhofer, H., Marti, P. 2008. Discussion of ‘Tension Stiffening in Lightly Reinforced Concrete Slabs’ by R. Ian Gilbert, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 134(7): 1262–1264.
- Gudonis, E. 2015. Trumpalaikė ir ilgalaikė apkrova veikiamų tempiamųjų gelžbetoninių elementų deformacijų eksperimentiniai tyrimai ir modeliavimas: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technologijos universitetas, Vilnius.

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF REINFORCEMENT BAR ARRANGEMENT ON DEFORMATION BEHAVIOUR AND CRACKING OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Arvydas RIMKUS, Auksė VILĖNIŠKYTĖ

**Summary.** The present paper provides an experimental study of the influence of reinforcement bar arrangement on deformation behavior and cracking of reinforced concrete (RC) members. The experimental program is based on the tests of 59 concrete ties, reinforced with various number of bars. It was found that the number of reinforcement bars significantly affects the stiffness and cracking parameters of RC members. Evaluation of the arrangement of reinforcement bars allows to optimize the performance of RC structures without increasing tensile reinforcement amount.

**Keywords:** reinforced concrete, strain, cracking, experiment, influence of bar arrangement, tensile elements.