



## GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ NORMALINIŲ PLYŠIŲ PLOČIO SKAIČIAVIMO METODŲ ANALIZĖ

Vidmantas Jokūbaitis<sup>1</sup>, Linas Juknevičius<sup>2</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10233 Vilnius, Lietuva*

*El. paštas: <sup>1</sup>gelz@st.vgtu.lt, <sup>2</sup>lj@st.vgtu.lt*

*Įteikta 2009 04 20; priimta 2009 05 05*

**Santrauka.** Remiantis eksperimentinių gelžbetoninių sijų (be išankstinio armatūros įtempimo) ir surenkamųjų gelžbetoninių perdangų bei stogo briaunotųjų plokščių tyrimų duomenimis, pagal skirtingas metodikas apskaičiuotas atsivėrusių normalinių plyšių plotis tempiamosios armatūros lygyje. Skaičiavimo rezultatai palyginti su tyrimų metu išmatuotais plyšių pločiais. Taip pat palyginti pagal įvairias metodikas apskaičiuoti įtemptojo gelžbetonio sijų plyšių pločiai. Atlikta analizė parodė, kad pagal Lietuvoje galiojančią statybos techninę reglamentą ir euronormas beveik vienodai įvertinamas normalinių plyšių atsivėrimas. Pagal Rusijos projektavimo normų metodiką apskaičiuotos paprastojo gelžbetonio sijų plyšių pločio vertės yra gerokai didesnės. Pateikta plyšio parametrų tarpusavio priklausomybė gali būti panaudota apskaičiuojant plyšių atsivėrimą ar nustatant neutraliosios ašies padėtį elemento skerspjūvyje, kai atliekami konstrukcijų būklės tyrimai ir vertinimas.

**Reikšminiai žodžiai:** gelžbetoninės sijos, plokštės, armatūros įtempiai, plyšio plotis.

### 1. Įvadas

Visose Europos Sąjungos šalyse, taip pat ir Lietuvoje, 2010 m. numatoma įteisinti naujas bendras statybinių konstrukcijų projektavimo normas. Lyginant su šiuo metu veikiančiomis gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normomis (STR 2.05.05:2005), būsimose naujose projektavimo normose EC-2 (Marčiukaitis *et al.* 2007; Eurocode 2 2004, Dulinskas *et al.* 2007) numatomos skirtingos, ypač tikrinant konstrukcijų tinkamumo ribinius būvius, skaičiavimo metodikos. Todėl įdomu palyginti ir įvertinti gelžbetoninių konstrukcijų skaičiavimo rezultatus pagal šias ir kitas (CII 52-101-2003; CII 52-102-2004; Jokūbaitis, Kamaitis 2000) metodikas, naudojantis konkrečiais pavyzdžiais iš eksperimentinių ir natūrinių tyrimų.

Šiame straipsnyje apsiribojama normalinių plyšių atsivėrimo skaičiavimų analize pagal anksčiau nurodytus metodus. Skaičiavimo rezultatai lyginami su stačiakampio skerspjūvio sijų (be išankstinio armatūros įtempimo) eksperimentinių tyrimų duomenimis (Чубриков 1989) ir su išmatuotais briaunotų-

jų perdangos bei stogo plokščių plyšių parametrais (Иокубайтис, Пукялис 1983). Varijuojant įtemptojo gelžbetonio sijų armavimo koeficientu pagal minėtas metodikas apskaičiuoti ir palyginti plyšių pločiai.

### 2. Normalinių plyšių pločių skaičiavimo metodikos

Vidutinis normalinių plyšių atsivėrimo plotis nustatomas iš sąlygos:

$$w_m + \varepsilon_{cr} l_{cr} = \varepsilon_{sm} l_{cr}, \quad (1)$$

t. y. plyšio pločio  $w_m$  ir betono pailgėjimo tarp plyšių (ruože  $l_{cr}$ ) suma yra lygi vidutiniam armatūros pailgėjimui šiame ruože. Šia sąlyga iš esmės remiasi visų projektavimo normų (STR 2.05.05:2005; Eurocode 2 2004; CII 52-101-2003; CII 52-102-2004) plyšių atsivėrimo skaičiavimo metodai.

Pagal šiuo metu Lietuvoje galiojančią statybos techninę reglamentą (STR 2.05.05:2005; Cijunaitis *et al.* 2004) vidutinis plyšio plotis

$$w[STR] \approx \frac{\Psi_s \sigma_s}{E_s l_{cr}} - \varepsilon_{ct} l_{cr} = \delta \varphi_l \eta \frac{\sigma_s}{E_s} 20(3,5 - 100\rho) \frac{\sqrt{\varnothing}}{1,66}, \quad (2)$$

čia:  $\Psi_s$  – tempiamosios armatūros deformacijų sudutininimo koeficientas;  $\sigma_s$  – armatūros įtempiai plyšyje (1 pav., a);  $E_s$  – armatūros tamprumo modulis;  $\delta$  – koeficientas, kuriuo atsižvelgiama į veikiančių įrašų pobūdį;  $\varphi_l$  koeficientu įvertinama apkrovos trukmė;  $\eta$  – koeficientas, kuriuo įvertinama armatūros ir betono sankiba;  $\varnothing$  – armatūros strypo skersmuo, mm.

Didžiausias su 95 % tikimybe plyšio plotis  $w_k = \beta w[STR] \approx 1,66 w[STR]$ .

Euronormose (Marčiukaitis *et al.* 2007; Eurocode 2 2004) vidutinis plyšio plotis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w[EC] = \frac{\Psi_s \sigma_s}{E_s l_{cr}} - \varepsilon_{ct} l_{cr} = \left[ \left( \frac{1 - k_t f_{ct,eff}}{\sigma_s \rho_{p,eff}} \right) \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{k_t f_{ct,eff}}{E_{cm}} \right] \frac{l_{cr}}{1,7}, \quad (3)$$

čia:  $k_t$  – koeficientas, kuriuo įvertinama apkrovos trukmė;  $\sigma_s$  – armatūros įtempiai (1 pav., b);  $f_{ct,eff}$  ir  $\rho_{p,eff}$  – tempiamasis betono stipris ir armavimo koeficientas (armatūros ploto ir tempiamo betono ploto šios armatūros zonoje santykis);  $l_{cr} = S_{r,max} = 3,4c + \frac{0,425 k_1 k_2 \varnothing}{\rho_{p,eff}}$  – atstumas tarp plyšių;  $c$  – armatūros apsauginio sluoksnio storis;  $k_1$  – koeficientas, kuriuo atsižvelgiama į apkrovos trukmę;  $k_2$  koeficientu įvertinamas veikiančių įrašų pobūdis. Plotis  $w_k = 1,7 w[EC]$ .

Pagal Rusijos projektavimo taisyklių rinkinius (СП 52-101-2003; СП 52-1021-2004) vidutinis plyšio plotis

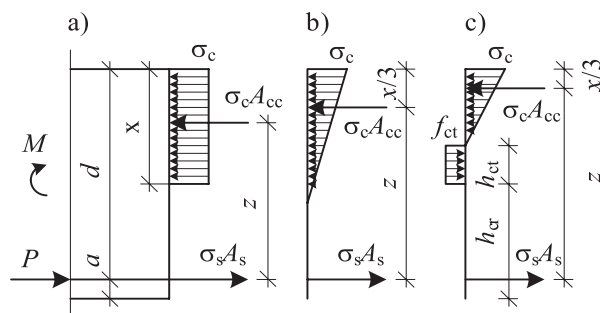
$$w[RU] = \left( \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \Psi_s l_s \frac{\sigma_s}{E_s} \right) / \beta, \quad (4)$$

čia:  $\varphi_1$  ir  $\varphi_2$  – koeficientai, kuriais atsižvelgiama į apkrovos trukmę ir armatūros sankibą su betonu;  $\varphi_3$  koeficientu įvertinamas veikiančių įrašų pobūdis;  $\sigma_s$  – armatūros įtempiai (1 pav., b);  $l_s$  – bazinis atstumas tarp plyšių. (4) formulėje neįvertinta tempiamo betono pailgėjimo  $\varepsilon_{ct,cr}$  įtaka plyšio pločiui (žr. (1) formulę). Skaičiuojant plyšio plotį taikomas santykis  $\beta = w_k / w[RU] \approx 1,7$ .

Iš normalinio plyšio parametrų tarpusavio priklausomybės taip pat galima apskaičiuoti plyšio plotį (Jokūbaitis, Kamaitis 2000):

$$w = \frac{\delta_c h_{cr}}{h_{ct}}, \quad (5)$$

čia:  $\delta_c$  – kritinis plyšio atsivėrimo plotis jo viršūnėje;  $h_{cr}$  – plyšio aukštis (ilgis);  $h_{ct}$  – tempiamosios betono zonos virš plyšio aukštis.



**1 pav.** Skaičiuotinis įtempių būvis pjūvyje ties plyšiu: a – pagal [STR]; b – pagal [EC] ir [RU]; c – pagal Rozenbliumo (Розенблюмас 1966) metodus

**Fig 1.** Design state of stresses in the cracked section: a – according to [STR]; b – according to [EC] and [RU]; c – according to method proposed by (Розенблюмас 1966)

Kai skerspjūvis yra stačiakampio formos arba tėjinis su lentyna gniuždomojoje zonoje, konstanta  $\delta_c$  gali būti apskaičiuota taip (Жидонис *et al.* 1973; Иокубайтис, Вайнюнас 1984; Иокубайтис, Пукялис 1983; Jokūbaitis, Kamaitis 2000):

$$\delta_c = \frac{0,00012 a \sqrt{\varnothing} \varphi_l \eta}{\omega}, \quad (6)$$

čia:  $a$  – armatūros centro atstumas iki labiausiai tempiamo skerspjūvio krašto,  $\omega = 100\rho$ , kai  $\rho \leq 0,005$ ;  $\omega = \sqrt{125\rho}$ , kai  $0,005 \leq \rho \leq 0,008$ ;  $\omega = 1$ , kai  $\rho > 0,008$ ; dydžiai  $\varphi_l$  ir  $\eta$  tokie patys kaip (2) formulėje.

Parametrus  $h_{cr}$  ir  $h_{ct}$  galima apskaičiuoti pagal Rozenbliumo metodiką (1 pav., c). Kai yra žinomas (išmatuotas) plyšio aukštis  $h_{cr}$ , pagal šią metodiką galima tiesiogiai apskaičiuoti dydį  $h_{ct}$  ir nustatyti neutraliosios ašies padėtį (Розенблюмас 1966; Kaklauskas 1997).

Skaičiuojant vidinį jėgų petį  $z$ , betono tamprumo modulis  $E_{cm}$  armatūros redukavimo koeficiente  $\alpha_e$  dauginamas iš koeficiento  $\mu$ :  $\mu = 1$  pagal [EC],  $\mu = f_{ck} / 0,0015 E_{cm}$  pagal [RU],  $\mu = 0,85$  pagal (Розенблюмас 1966). Taigi dydis  $z$  labiausiai sumažintas gali būti pagal [RU] metodikos nuostatas.

### 3. Sijų ir plokščių, kurių armatūra yra be išankstinio įtempimo, tyrimų duomenys

Plyšių pločio apskaičiavimo metodų analizei naudotos trys skirtingo armavimo stačiakampio skerspjūvio

120×300 mm sijos (Чубриков 1989). Sijų tarpatramio ilgis – 2 m, grynojo lenkimo zona – 700 mm ilgio. Jų išilginė tempiamoji armatūra: 2Ø10 S400 ( $\rho = 0,0048$ ,  $d = 275$  mm); 2Ø16 S400 ( $\rho = 0,0124$ ,  $d = 270$  mm); 2Ø28 S400 ( $\rho = 0,0383$ ,  $d = 268$  mm). Betono stipriai  $f_c = 14$  MPa,  $f_{ct} = 1,35$  MPa, tamprumo modulis  $E_{cm} = 23800$  MPa.

Sijų bandymo tikslas – nustatyti betono plyšio plitimo kriterijus. Todėl sijų grynojo lenkimo zonos viduryje buvo padaryta 60 mm gylio įpjova, imituojanti plyšį. Plyšio gylio kitimas buvo fiksuojamas pagal skerspjūvio aukštį užklijuotais 50 mm bazės tenzorezistoriais ir 100 mm bazės indikatoriais. Plyšio pločio kitimo diagrama armatūros lygyje buvo automatizuotai braižoma naudojant ties plyšiu pritvirtinto specialaus matuoklio rodmenis. Armatūros deformacijos plyšyje matuotos 10 mm bazės tenzorezistoriais, užklijuotais ant armatūros strypų. Sijos buvo apkraunamos pakopomis (kas 1/10–1/15 didžiausios apkrovos) iki 90–95 % ardamosios apkrovos.

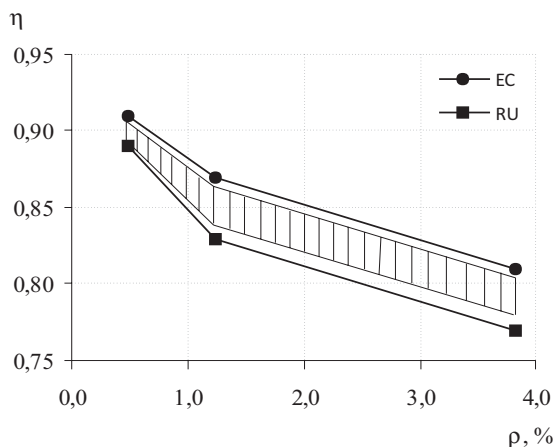
Čiubrikovo publikacijoje (Чубриков 1989) pateikti eksperimentiniai sijų tempiamosios armatūros įtempiai ir plyšių pločiai. Kadangi sijų grynojo lenkimo zonoje buvo tiriamas tik vienas plyšys, jo pločio ir armatūros įtempių lyginimas su apskaičiuotomis teorinėmis vertėmis yra sąlygiškas. Tačiau sprendžiant pagal sijų armavimo koeficientą galima teigti, kad silpnai armuotos ( $\rho = 0,0048$ ) sijos grynojo lenkimo zonoje plyšiai yra išsidėstę labai retai, todėl išmatuoti plyšio pločiai yra ne vidutiniai, o artimi didžiausiam vertei. Sijos, kurios armavimo koeficientas  $\rho = 0,0124$ , išmatuoti plyšio pločiai priskirtini vidutinei jų vertei, ypač kai prie didesnių apkrovos pakopų plyšių plitimas stabilizavosi. Perarmuotos sijos ( $\rho = 0,0383$ ) tiriamo plyšio plitimui, sprendžiant pagal jo parametrų kitimą, turėjo įtakos tankiai išsidėstę gretimi plyšiai, todėl išmatuoti plyšio pločiai gali būti ir mažesni už vidutinę vertę.

Vertinant pastato laikančiųjų konstrukcijų techninę būklę, tyrinėtos surenkamojo gelžbetonio briaunotosios perdangų ir stogo plokštės (Иокубайтис, Пукялис 1983). Perdangų P1-6 markės plokštės ( $b \approx 200$  mm,  $h = 350$  mm,  $b_f = 1190$  mm,  $h_f = 60$  mm, be skersinių briaunų) armuotos strypine S300 arba S400 klasės armatūra, jų armavimo koeficientai skiriasi ( $\rho = 0,0141–0,02$ ). Plokštės buvo apkrautos nuolatine apkrova, virš jų buvo įrengtos ventilacijos kamerų patalpos (ventiliatorių sukeliamą vibraciją buvo nedidelė). Pagal neardomuoju metodu nustatytą betono kubelinį stiprį apskaičiuoti išvestiniai dydžiai:  $f_{ct} = 2,92–3,56$  MPa,  $E_{cm} = 29\,600–33\,160$  MPa. Stogo PKŽ-2 markės plokštės ( $b \approx 190$  mm,  $h = 300$  mm,  $b_f = 1480$  mm,  $h_f = 30$  mm, su skersinėmis briaunomis)

armuotos S300 arba S400 klasės armatūros strypais, jų armavimo koeficientas  $\rho = 0,0081–0,0126$ . Plokštės tyrimo metu buvo apkrautos nuolatine (be sniego) apkrova. Betono stipris  $f_{ct} = 3,02–3,36$  MPa, tamprumo modulis  $E_{cm} = 29\,800–31\,980$  MPa. Plokščių išilginių briaunų normalinių plyšių pločiai ir aukščiai 2 m ilgio viduriniuose ruožuose išmatuoti 24 kartus didinančiu mikroskopu, taip pat išmatuoti atstumai tarp plyšių.

#### 4. Sijų ir plokščių plyšių pločių analizė

Remiantis pjūvio per plyšį skaičiuotiniais įtempių būviais (1 pav.), apskaičiuotos peties  $z$  vertės. Jas leidžiama apskaičiuoti apytiksliai imant  $z = (0,9–0,8)d$  pagal [EC] ir  $z = 0,8d$  pagal [RU]. Šiame darbe  $z$  vertės apskaičiuotos tiksliau, imant  $z = d - (x/3)$ . Gniuždomosios zonos aukštis  $x$  nustatytas iš sąlygos, kad skerspjūvio tempiamosios ir gniuždomosios zonų statiniai momentai apie neutraliąją ašį yra lygūs. Santykio  $\eta = z/d$  priklausomybė nuo armavimo koeficiento  $\rho$  parodyta 2 pav.



2 pav. Santykio  $\eta = z/d$  skaičiuotinės kitimo ribos eksperimentinėse sijose (užbrūkšniuotas plotas –  $\eta$  kitimo laukas pagal [STR])

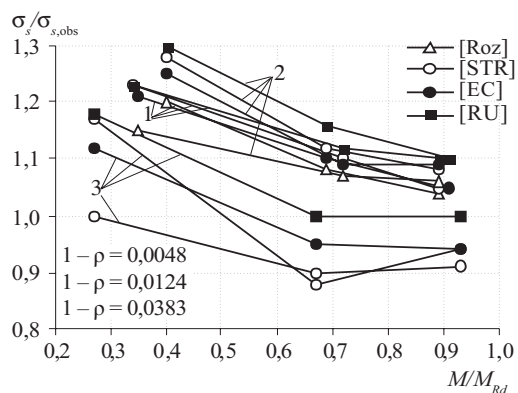
Fig 2. Design limits of ratio  $\eta = z/d$  variation in experimental beams (dashed area represents the  $\eta$  variation field according to [STR])

Didėjant lenkiamųjų elementų armavimo koeficientui vidinių jėgų petys  $z$  mažėja. Kai yra silpnai ir stipriai armuoti elementai,  $z$  vertės gali skirtis nuo verčių, apskaičiuotų apytiksliai (2 pav.).

Sijų armatūros skaičiuotiniai ir eksperimentiniai įtempiai palyginti 3 pav. Skaičiuotinės armatūros įtempiai pagal [STR] ir [EC] vertės tarpusavyje labai gerai sutampa visais atvejais: santykio  $\sigma_s[EC]/\sigma_s[STR]$  vidurkis sijose ir plokštėse yra 0,987 ir 1,017. Didžiausias skirtumas tarp šių įtempių yra 4 %. Tai rodo, kad atliekant sudėtingus ar-

matūros įtempių pagal [STR] skaičiavimus – taikant prielaidą apie gniuždomosios zonos betono įtempių vienodą pasiskirstymą (1 pav., a) ir taisant šią apytikslią prielaidą empiriniais koeficientais – iš esmės imama ta pati trikampė gniuždomosios zonos betono įtempių diagrama kaip ir euronormose (1 pav., b), kuriose armatūros įtempių skaičiavimas yra logiškesnis ir gana paprastas. Matyt, dėl šios priežasties skaičiuojant armatūros įtempius  $\sigma_s$  [RU] taip pat pereita prie tokio paties įtempių būvio – imant trikampę gniuždomosios zonos betono įtempių diagramą.

Lyginant su eksperimentinėmis  $\sigma_{s,obs} = \varepsilon_s E_s$  vertėmis (3 pav.), sijų skaičiuotiniai armatūros įtempiai yra apie 1,1–1,3 karto didesni pradiniu plyšių plitimo etapu (kai  $M/M_{Rd} = 0,2-0,4$ ). Kai plyšių plitimas stabilizavosi (kai  $M/M_{Rd} = 0,6-0,9$  ir armavimo koeficientas  $\rho = 0,0048-0,0124$ ), skaičiuotiniai  $\sigma_s$  įtempiai tik apie 1,1 karto viršija eksperimentinius. Jų didumui pleišėjimo pradžioje galėjo turėti įtakos dirbtinė 60 mm gylio įpjova. Perarmuotos sijos gniuždomajame betone, kai santykis  $M/M_{Rd} \geq 0,6$ , pasireiškia didesnės plastinės deformacijos. Todėl [STR], [EC] ir A. Rozembliumo (Розенблумас 1966) skaičiavimuose  $\sigma_s$  įtempių vertės gautos mažesnės už eksperimentines. Lyginant su jomis, pagal [RU] apskaičiuoti armatūros įtempiai yra didesni, nes [RU] metode atsižvelgiama į gniuždomojo betono plastines deformacijas (tamprumo modulis  $E_{cm}$  mažinamas koeficientu  $\mu$ ).



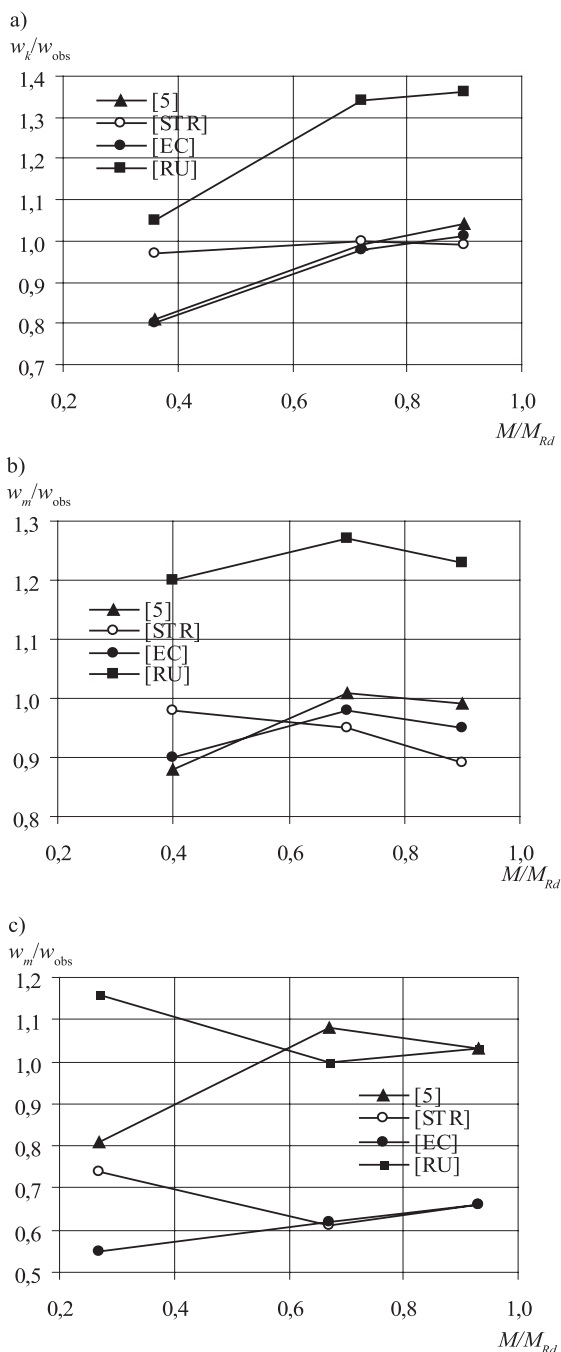
3 pav. Skaičiuotinių ir eksperimentinių sijų armatūros įtempių palyginimas

Fig 3. Comparison of design and experimentally obtained stresses in reinforcement of beams

Plokščių tempiamosios armatūros  $\sigma_s$  [RU] įtempiai beveik nesiskiria nuo apskaičiuotų  $\sigma_s$  [STR] įtempių (didžiausias skirtumas – 4 %). Pagal A. Rozembliumo (Розенблумас 1966) metodiką apskaičiuoti  $\sigma_s$  yra vidutiniškai 3 % mažesni už  $\sigma_s$  [STR] įtempius.

Normalinio plyšio plotis tiesiogiai proporcingas armatūros  $\sigma_s$  įtempiams. Išskyrus siją, kurios  $\rho = 0,0048$ , visų kitų elementų plyšių plotis apskaičiuotas kaip vi-

dotinis. Geriausiai skaičiuotinės ir eksperimentinės sijų plyšio pločio vertės sutampa, kai šis plotis apskaičiuotas pagal (5) formulę, o aukštis  $h_{ct}$  – pagal Rozembliumo (Розенблумас 1966) metodiką, imant tyrimais nustatytas  $h_{cr}$  vertes. Plyšių pločio skaičiuotinės vertės, išskyrus  $w$  [RU] vertes, vidutiniškai yra nedaug (iki 5 %) mažesnės už eksperimentines (4 pav.).

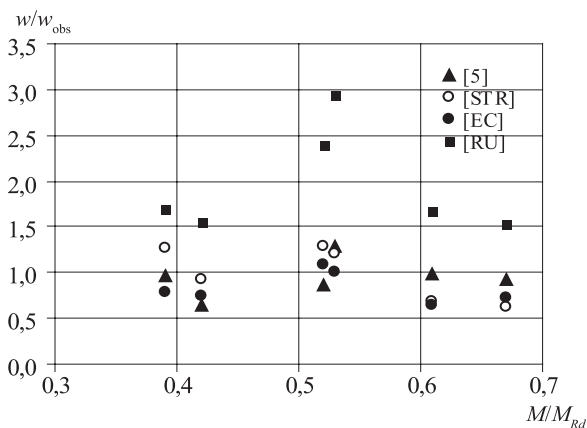


4 pav. Skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių palyginimas, esant skirtingam sijos armavimo koeficientui: a –  $\rho = 0,0048$ ; b –  $\rho = 0,0124$ ; c –  $\rho = 0,0383$

Fig 4. Comparison of design and experimentally obtained crack widths in beams with different reinforcement ratio: a –  $\rho = 0,0048$ ; b –  $\rho = 0,0124$ ; c –  $\rho = 0,0383$

Sijų plyšio pločio matavimo tikslumui pradiniu plyšių plitimo etapu galėjo turėti įtakos 60 mm gylio įpjova. Be to, išmatuoti plyšio parametrai galėjo ne visiškai atitikti visų grynojo lenkimo zonos plyšių pločio vidutines ar didžiausias (charakteristines) vertes. Tai ypač matyti perarmuotos sijos atveju (4 pav., c).

Didelei skaičiuotinių ir išmatuotų plyšių pločių santykių sklaidai plokščių atveju galėjo turėti įtakos apkrovos ir betono rodiklių įvertinimo netikslumai (5 pav.). Plyšių pločio  $w$  [RU] vertės yra didesnės už apskaičiuotas kitais metodais. Jų didumui turi reikšmės ne tik didesni  $\sigma_s$  [RU] įtempiai, bet ir gerokai, ypač plokščių atveju, padidinta  $\phi_2 l_s$  sandauga.



5 pav. Plokščių išilginių briaunų skaičiuotinių ir būklės tyrimų metu nustatytų plyšių pločių palyginimas

Fig 5. Comparison of design and measured crack widths in the longitudinal ribs of slabs

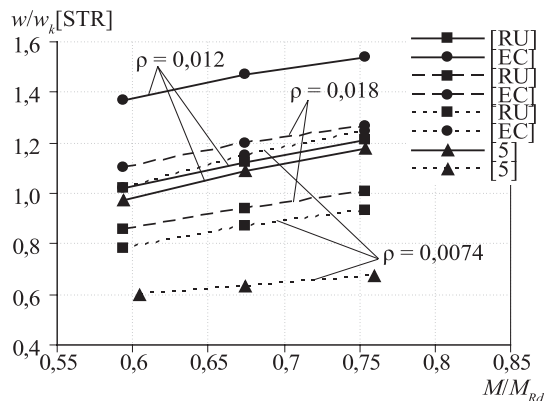
### 5. Įtemptojo gelžbetonio sijų skaičiuotinių plyšių pločių analizė

Kaip skaičiavimo pavyzdžiai pasirinktos trys sijos, kurios skyrėsi tik iš anksto įtemptos armatūros kiekiu ir išankstinio apspaudimo jėgos didumu. Sijų skerspjūvio matmenys: 180×500 mm (naudingasis aukštis  $d = 450$  mm), armavimo koeficientai  $\rho$ : 0,0182 (3Ø25), 0,0121 (2Ø25) ir 0,0074 (3Ø16). Atitinkamai apspaudimo jėgos  $P$ : 230 kN, 153 kN ir 94 kN. Sijų armatūros klasė – S500, betono stipriai  $f_{ck} = 30$  MPa,  $f_{ctk} = 2,5$  MPa, tamprumo modulis  $E_{cm} = 35000$  MPa.

Apskaičiuoti armatūros įtempiai  $\sigma_s$  [STR] ir  $\sigma_s$  [EC], kaip ir elementuose be išankstinio armatūros įtempimo, sutampa labai gerai – skiriasi vidutiniškai tik 2 %. Skaičiuotiniai įtempiai  $\sigma_s$  [RU] vidutiniškai viršija  $\sigma_s$  [STR] vertes 8 % (kai  $\rho = 0,0074$ –10 %). Remiantis Rozembliumu (Розенблумас 1966) apskaičiuoti  $\sigma_s$

[Roz] įtempiai yra mažesni už  $\sigma_s$  [STR] vertes vidutiniškai 12 %. Ši metodika įvertina tempiamojo betono virš plyšio darbą (1 pav., c), todėl skaičiuotiniai armatūros įtempiai ir turi būti mažesni už įtempimus, apskaičiuotus pagal kitas metodikas (Juknevičius *et al.* 2006; Marčiukaitis, Juknevičius 2002; Šalna, Marčiukaitis 2007; Zhang, Stang 1998).

Skaičiuotiniai plyšių pločiai  $w_k$  [EC],  $w_k$  [RU] ir  $w$  [5] buvo palyginti su  $w_k$  [STR] vertėmis (6 pav.). Apskaičiuotos pagal (5) formulę plyšių pločių vertės, lyginant su  $w_k$  [STR] vertėmis, yra mažesnės. Kai sijos armavimo koeficientas  $\rho = 0,0074$ ,  $w$  [5] vertės vidutiniškai net 35 % mažesnės už  $w_k$  [STR]. Plyšio pločiui pagal (5) apskaičiuoti buvo taikomas 1 pav., c, pavaizduotas įtempių būvis (plyšio ir tempiamosios zonos virš plyšio aukščiai  $h_{cr}$  ir  $h_{ct}$  buvo apskaičiuoti pagal A. Rozenbliumo siūlomą metodiką (Розенблумас 1966)). Taigi mažesni įtempiai  $\sigma_s$  [Roz] ir pačioje (5) formulėje esantis dydis  $h_{ct}$  lėmė mažiausias  $w$ [5] vertes.



6 pav. Pagal skirtingas metodikas apskaičiuotų įtemptojo gelžbetonio sijų plyšių pločių  $w$  palyginimas su plyšio pločiu  $w_k$ , apskaičiuotu pagal [STR]

Fig 6. Comparison between the crack width in prestressed reinforced concrete beams  $w_k$  calculated according to [STR] and the crack widths  $w$  calculated according to the various other methods

Nors apskaičiuoti įtempiai  $\sigma_s$  [STR] ir  $\sigma_s$  [EC] beveik nesiskiria, skaičiuotinės  $w_k$  [STR] ir  $w_k$  [EC] vertės, kai  $\rho = 0,018$ , skiriasi gerokai (iki 1,5 karto). Turint omenyje, kad plyšių pločiai buvo apskaičiuoti nuo trumpalaikės apkrovos poveikio ir skaičiuotiniai tempiamosios armatūros įtempimų prieaugiai (taip pat išankstiniai įtempiai) pagal abi metodikas buvo beveik vienodi – galima padaryti išvadą, kad plyšio pločių  $w_k$  [STR] ir  $w_k$  [EC] skaičiavimo formulėse nevienodai įvertinami plyšių atsirėmimą lemiantys veiksniai – tempiamojo betono darbas tarp plyšių (armatūros ir betono sankiba) ir armatūros kiekis skerspjūvyje bei jos skersmuo.

## 6. Išvados

1. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų tempiamosios armatūros skaičiuotiniai įtempiai pagal [STR] ir [EC] sutampa labai gerai. Jų skaičiavimas pagal [EC] yra paprastesnis ir logiškesnis. Skaičiuotiniai įtempiai pagal [RU] yra didesni, nes įvertinamos gniuždomojo betono plastinės deformacijos. Metodika, įvertinanti tempiamojo betono virš plyšio darbą (Розенблюмас 1966), leidžia tiksliau apskaičiuoti tempiamosios armatūros įtempius (3 pav.). Jų skaičiuotinės vertės įtempiojo gelžbetonio sijose, kai aukštis  $h_{ct} \neq 0$  (1 pav., c), ir santykis  $M/M_{Rd}$  kinta 0,65–0,75 intervale, gali sumažėti 10–12 %.
2. Apskaičiuotų pagal [STR] ir [EC] paprastojo gelžbetonio sijų normalinių plyšių pločiai, kai apkrova sudaro apie 70 % irimo apkrovos, yra beveik lygūs eksperimentinėms vertėms. Kai sijų ir plokščių apkrova sudaro vidutiniškai apie 52 % skaičiuotinės irimo apkrovos, apskaičiuoti  $w_k$  [EC] pločiai vidutiniškai yra apie 12 % mažesni už  $w_k$  [STR] vertes. Gerokai didesnis skaičiuotinis  $w_k$  [RU] plyšių plotis. Čia santykis  $\beta$  sijose ir plokštėse vidutiniškai yra lygus atitinkamai 2 ir 3,3. Taigi pagal [RU] projektavimo normas užtikrinama didesnė tikimybė, kad nebus pasiekta ribinė plyšio pločio vertė, kuri, esant aplinkos klasėms XO, XC1, yra vienoda visose minimose projektavimo normose.
3. Įtempiojo gelžbetonio sijų atveju apskaičiuoti plyšio pločio prieaugiai  $w_k$  [EC],  $w_k$  [RU] ir  $w$  [5] didėjant apkrovai yra didesni už  $w_k$  [STR] prieaugį (6 pav.). Lyginant su  $w_k$  [STR] vertėmis, armatūros kiekio didėjimas skerspjūvyje (koeficiento  $\rho$  didėjimas) didesnę įtaką turi pagal kitas metodikas apskaičiuotiems plyšių pločiams. Kai įtempiojo gelžbetonio sijos yra silpnai armuotos ( $\rho \leq 0,008$ ), skaičiuotinių plyšių pločiui didelę reikšmę turi tempiamojo betono zona virš plyšio viršūnės.
4. Vertinant lenkiamųjų gelžbetoninių elementų būklę gali būti panaudota (5) išraiška, leidžianti apskaičiuoti plyšio plotį ar skerspjūvio neutraliosios ašies padėtį, kai žinomi (tyrimais nustatyti ar apskaičiuoti) plyšio ir tempiamosios zonos virš plyšio aukščiai. Apskaičiuotos  $w$  [5] vertės gerai sutampa su eksperimentinių tyrimų duomenimis.

## Literatūra

Cijunaitis, A.; Dulinskas, E.; Vainiūnas, P. 2004. Determination of crack width in reinforced concrete members at the level of reinforcement according to the surface crack widths, in *The 8<sup>th</sup> international conference "Modern building materials, structures and techniques"*: Selected papers. Ed. by E. K. Za-

- vadskas, P. Vainiūnas, F. M. Mazzolani. May 19–21, 2004, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 373–378.
- Dulinskas, E.; Zabulionis, D.; Balevičius, R. 2007. On the equivalence of compressive concrete diagrams in analysis of flexural reinforced concrete elements, in *The 9<sup>th</sup> international conference "Modern building materials, structures and techniques"*: Selected papers, vol. 2. Ed. by M. J. Skibniewski, P. Vainiūnas, E. K. Zavadskas. May 16–18, 2007, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 523–530.
- Eurocode 2: *Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Brussels, 2004. 225 p.
- Jokūbaitis, V.; Kamaitis, Z. 2000. *Gelžbetoninių konstrukcijų pleišėjimas ir remontas*: monografija. Vilnius: Technika. 155 p.
- Juknevičius, L.; Marčiukaitis, G.; Valivonis, J. 2006. Influence of technological factors on the state of stress and strain in three-layer reinforced concrete structures, *Journal of Civil Engineering and Management*, 12(3): 195–204.
- Kaklauskas, G. 1997. A method for determination of stress-strain relations for concrete from experimental data of RC bending members, *Journal of Civil Engineering and Management*, 10(3): 60–68.
- Marčiukaitis, G. ir kt. 2007. *Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas pagal euronormas*: vadovėlis. Vilnius: Technika. 339 p.
- Marčiukaitis, G.; Juknevičius, L. 2002. Influence of the internal layer cracks on cracking of flexural three-layer concrete members, *Journal of Civil Engineering and Management*, 8(3): 153–158.
- STR 2.05.05:2005. *Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. Vilnius: Rekona, 2005. 123 p.
- Šalna, R.; Marčiukaitis, G. 2007. Analysis of stress and strain state of steel fiber reinforced concrete beams subjected to flexure and shear, in *The 9<sup>th</sup> international conference "Modern building materials, structures and techniques"*: Selected papers, vol. 2. Ed. by M. J. Skibniewski, P. Vainiūnas, E. K. Zavadskas. May 16–18, 2007, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 758–762.
- Zhang, J.; Stang, H. 1998. Applications of stress crack width relationship in prediction the flexural behaviour of fibre-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research* 28(3): 439–452.
- Чубриков, В. М. 1989. *Критерии механики разрушения в оценке напряженного состояния в сечении с трещиной изгибаемого железобетонного элемента*. Москва. ВНИИИС. 24 с.
- Иокубайтис, В.; Пукалис, П. 1983. Оценка напряженно - деформированного состояния эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций, *Железобетонные конструкции* 12: 83–92.
- Иокубайтис, В. И.; Вайнюнас, П. П. 1984. Развитие нормальных трещин и взаимосвязь их параметров в предварительно-напряженных железобетонных балках, *Железобетонные конструкции* 13: 94–103.
- Розенблюмас, А. М. 1966. Расчет армированных бетонных конструкций с учетом растягивающих напряжений в бетоне, в кн. *Исследования по железобетонным конструкциям* 1: 3–32.
- СП 52-101-2003. *Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры*. Госстрой России. Москва, 2003. 71 с.

СП 52-102-2004. Предварительно напряженные железобетонные конструкции. Госстрой России. Москва, 2004. 44 с.

Жидонис, И. Ю.; Жидонис, А. Ю.; Иокубайтис, В. И. 1973. Использование статистической взаимосвязи параметров нормальных трещин при расчете кривизны балок, Железобетонные конструкции 11: 75–80.

## ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE WIDTH OF NORMAL CRACKS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

V. Jokūbaitis, L. Juknevičius

**Summary.** The width of normal cracks at the level of tensile reinforcement was calculated according to various methods using the data obtained from experimental tests on reinforced concrete beams (without reinforcement pre-stress), pre-cast reinforced concrete slabs and ribbed roof slabs. The numerical results were compared to actual crack widths measured during the experimental tests. Also, the crack widths of pre-stressed reinforced concrete beams were calculated according to various methods and compared with each other. The following conclusions were reached based on the analysis of numerical and experimental results: 1) Design stresses in tensile reinforcement calculated according to [STR] and [EC] design codes are very similar, although the calculation of such stresses is more logical and simple according to [EC]. Design stresses calculated according to [RU] are greater due to the estimation of the plastic deformations of concrete in the compressive zone. The method proposed by Rozenbliumas (Розенблюмас 1966) estimates tensile concrete above the crack peak, and thus allows a more accurate calculation of stresses in tensile reinforcement (Fig 3). Therefore, the latter stresses in pre-stressed RC beams may be decreased by 10–12 %, when height  $h_{ct} \neq 0$  (Fig 1, c) and ratio  $M/M_{Rd}$  varies between 0,65 and 0,75; 2) The widths of normal cracks in conventional RC beams (subjected to load that corresponds approx. 70 % of their carrying capacity) calculated according to [STR] and [EC] design codes are almost equal to the experimentally obtained crack widths. When beams and slabs are loaded by approximately 52 % of their carrying capacity, design crack widths  $w_k$  [EC] are approximately 12 % less than  $w_k$  [STR], although the design crack width  $w_k$  [RU] is significantly greater. Here, ratio  $\beta$  in the beams and slabs is equal to 2 and 3.3 respectively. Therefore, the design code [RU] ensures higher probability that the crack width will not reach the limit value (for environmental class XO and XC1) equal in all design codes mentioned in this article; 3) In case of loaded prestressed reinforced concrete beams, the calculated increases of crack widths  $w_k$  [EC],  $w_k$  [RU] and  $w$  [5] are greater if compared to  $w_k$  [STR] (Fig 6). The increased reinforcement ratio  $\rho$  has more significant influence on the increases of crack widths calculated according to other design codes if compared to  $w_k$  [STR]. Tensile concrete above the crack peak has significant influence on the design crack width when pre-stressed RC beams are lightly reinforced ( $\rho \leq 0,008$ ); 4) During the evaluation of the state of flexural RC members, expression (5) could be used for calculating the crack width or a position of the neutral axis when the heights of the crack and the tensile zone above the crack are known (calculated or measured experimentally). Design crack widths  $w$  (5) are very similar to the experimentally obtained results.

**Keywords:** reinforced concrete beams, slabs, stress in reinforcement, crack width.

**Vidmantas JOKŪBAITIS.** Assoc. Prof. Dr. Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University. Research interests: evaluation of reinforced concrete structures with cracks in existing buildings.

**Linus JUKNEVIČIUS.** Assoc. Prof. Dr. Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University. Research interests: reinforced concrete structures, layered structures made from concrete-type materials.