



LENKIAMŪJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ĮSTRIŽOJO PJŪVIO STIPRUMO PAGAL STR IR EC2 ANALIZĖ

Šarūnas Kelpša¹, Mindaugas Augonis²

Kauno technologijos universitetas, Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas, Lietuva

El. paštas: ¹sarunas.kelpsa@stud.ktu.lt; ²mindaugas.augonis@ktu.lt (corresponding author)

Įteikta 2012 02 23; priimta 2012 06 08

Santrauka. Straipsnyje apžvelgtos ir palygintos STR ir EC2 įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo metodikos stačiakampio skerspjūvio elementams. Normatyve neapibrėžtas EC2 metodikos santvaros modelio spyrių posvyrio kampo skaičiavimas, lemiantis galutinį įstrižojo pjūvio stiprumą. Straipsnyje pateikiamos kampo θ apskaičiavimo lygtys, atsižvelgiant į apkrovimo pobūdį. Norint supaprastinti pateiktų lygčių sprendimą siūlomas grafoanalitinis sprendimo būdas, pritaikant papildomus koeficientus. EC2 neapibrėžia skaičiavimo išraiškų, kai skersinis armavimas yra apkabos ir atlankos. Minėtos išraiškos suformuluotos ir pateiktos straipsnyje. Nustačius EC2 metodikos dėsningumus siūlomas alternatyvus apytikslis skaičiavimo būdas atlankomis ir apkabomis armuotiems elementams. Straipsnyje apžvelgtos abi – STR ir EC2 – metodikos, išskiriant pagrindinius skirtumus ir dėsningumus.

Reikšminiai žodžiai: įstrižasis pjūvis, skersinė armatūra, apkabos, atlankos, santvaros modelis, spyriai, ryšiai.

1. Įvadas

Įstrižojo pjūvio stiprumas – viena daugiausiai tirtų gelžbetoninių elementų darbo sričių. Vis dėlto, nepaisant visų šių pastangų, nėra bendro įstrižojo pjūvio darbą apibrėžiančio modelio (Nilso *et al.* 2004; Beeby, Narayanan 2005). Kalbant apie skersinę armatūrą armuotų elementų įstrižojo pjūvio stiprumą, Lietuvoje taikomos dvi skaičiavimo metodikos: STR 2.05.05:2005 (toliau – STR) ir Eurokodas 2 (toliau – EC2) (LST EN 1992). Nors jomis remiantis gaunami kiek skirtingi rezultatai, vis dėlto jos abi pagrįstos daugelio bandymų duomenų analizavimu ir empirinėmis išraiškomis (Jokūbaitis *et al.* 1992; Beeby, Narayanan 2005). Skirtingos įstrižojo pjūvio skaičiavimo metodikos skiriasi ne tik skirtingomis išraiškomis, bet ir iš principo šio pjūvio stiprumo skaičiuojamuoju modeliu. Rezultatai, gaunami skaičiuojant pagal šias metodikas, dažnai skiriasi gana stipriai.

Šiuo metu Lietuvoje taikomi du norminiai dokumentai, reglamentuojantys įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimą. Todėl aktualu išanalizuoti pagrindinius

jų reglamentuojamo skaičiavimo skirtumus ar panašumus bei, remiantis šia analize, pasiūlyti skaičiavimo supaprastinimą.

Amerikos projektavimo normos ACI reglamentuoja šio pjūvio stiprumo skaičiavimo principą panašų, koks pateikiamas EC2 (ACI 318-05; Beeby, Narayanan 2005).

2. Elementų, nearmuotų skersine armatūra, įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo apžvalga ir analizė

Gelžbetoniniuose elementuose, veikiamuose apkrovų, sukeliančių lenkimo momentus ir skersines jėgas juose, susidaro sudėtingas įtempių ir deformacijų būvis. Apskaičiuojant įstrižojo pjūvio stiprumą, tikrinamas pjūvis yra palyginti arti atramos, o čia įtempių pasiskirstymas yra sudėtingas (1 pav.) ir kintamas atsižvelgiant į apkrovimo tipą (Jokūbaitis *et al.* 1992).

Pagal STR pateiktą metodiką įstrižojo pjūvio stiprumas tikrinamas pagal 2 stiprumo sąlygas (STR 2.05.05:2005 Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų

projektavimas, STR 2.05.05:2005 Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 3 priedas. Praktinio taikymo vadovas):

1. Gniuždomojo betono tarp įstrižųjų plyšių stiprumas.

$$V_{Ed,max} \leq V_{Rd} = 0,3 \cdot \varphi_{w1} \cdot \varphi_{c1} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d. \quad (1)$$

2. Tempimo įtempius perimančio betono stiprumas įstrižųjų plyšių viršūnėse.

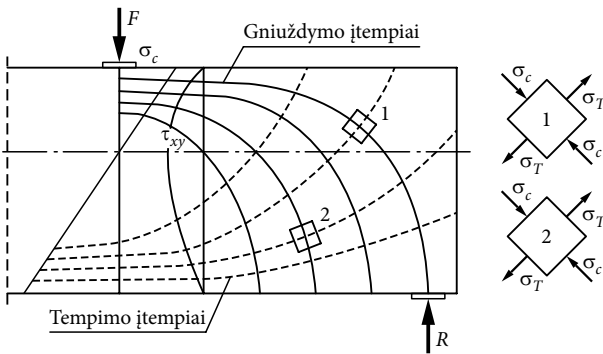
$$V_{Ed,max} \leq 2,5 \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d, \quad (2)$$

$$V_{Ed} \leq \begin{cases} V_{Rd,ct} = \frac{\varphi_{c4} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d^2}{c} \\ V_{Rd,ct,min} = \varphi_{c3} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d \end{cases}, \quad (3)$$

čia $\varphi_{c1}, \varphi_{c4}, \varphi_{c3}$ – empiriniai koeficientai, priklausantys nuo betono savybių; φ_n – koeficientas, darantis įtaką įstrižojo pjūvio stiprumui dėl ašinių jėgų poveikio; φ_{w1} – koeficientas, skirtas atsižvelgti į skersinio armavimo įtaką stiprumui tarp įstrižųjų plyšių, šiuo atveju jis yra lygus 1; c – įstrižojo pjūvio horizontalioji projekcija nuo atramos krašto iki įstrižojo pjūvio viršūnės. Kai elementas nearmuotas skersine armatūra, šis dydis negali būti didesnis nei c_{max} (STR 2.05.05:2005 3 priedo 6.6 formulė).

Taigi, veikiant koncentruotosioms jėgoms, visi pavojingieji pjūviai tikrinami ilgyje $c \leq c_{max}$. Veikiant išskirstytajam krūviui, apskaičiuotas pavojingųjų pjūvių projekcijos ilgis c gali viršyti reikšmę c_{max} , tuomet įstrižajame pjūvyje tempimo įtempius perimančio betono stiprumo reikšmė $V_{Rd,ct}$ tampa lygi $V_{Rd,ct,min}$ (3).

Jeigu skaičiuojant atsižvelgiama į normalinių plyšių nebuvimą šalia atramų, įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmė gali būti ir didesnė (STR 2.05.05:2005 Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 3 priedas. Praktinio taikymo vadovas).



1 pav. Įtempių pasiskirstymas pavojingiausioje įstrižųjų plyšių susidarymo atžvilgiu zonoje

Fig. 1. Stress distribution in the most dangerous zone, according to formation of shear cracks

Pagal EC2 pateiktą metodiką bendruoju atveju nearmuoto skersine armatūra elemento įstrižojo pjūvio stiprumas apskaičiuojamas pagal (4) išraišką (Beeby, Narayanan 2005; LST EN 1992; Mosley *et al.* 2007). Šis stiprumas pagal EC2 metodiką lyginamas su didžiausia skersine jėga prie atramos krašto.

$$V_{Ed} \leq \begin{cases} V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \\ V_{Rd,c,min} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \end{cases} \quad (4)$$

Koeficientas k apibrėžia skerspjūvio aukščio įtaką įstrižojo pjūvio stiprumui. Nors (4) išraiškoje jau yra efektyvusis skerspjūvio aukštis, tačiau šis empirinis koeficientas aprašo iš daugelio atliktų tyrimų rezultatų pastebėtą dėsningumą, kad įstrižojo pjūvio stiprumas nėra tiesiogiai proporcingas skerspjūvio aukščiui. Nustatyta, kad mažesnių skerspjūvių šis stiprumas, palyginti su didesnio skerspjūvio aukščio elementais, yra santykinai didesnis (Beeby, Narayanan 2005).

Išilginės tempiamos armatūros skerspjūvio plotas taip pat turi įtakos įstrižojo pjūvio stiprumui. Ši įtaka įvertinamas koeficientu ρ_l . Tačiau, kaip matoma lygtyse (4), nuo išilginės armatūros skerspjūvio ploto įstrižojo pjūvio stiprumas priklauso netiesiogiai, taip pat kaip ir nuo betono gniuždomojo stiprio.

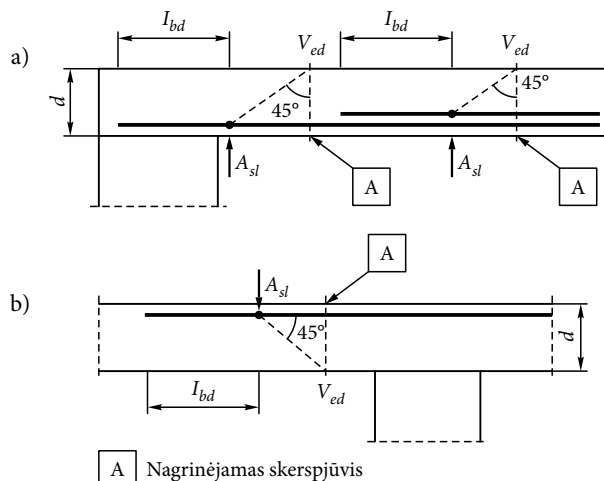
$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} < 0,02. \quad (5)$$

Šioje išraiškoje imamas skaičiuotinis išilginės tempiamosios armatūros skerspjūvio plotas, kuris už nagrinėjamo pjūvio turi būti inkaruotas ilgiu, ne mažesniu nei $(l_{db} + d)$ (kaip parodyta 2 pav.).

Gniuždymo įrašos elemente iki tam tikros ribos taip pat laikomos teigiamu veiksmu įstrižojo pjūvio stiprumui. Kiti koeficientai yra empiriniai, jie gali būti naudojami atsižvelgiant į EC2 nurodytas rekomendacines reikšmes arba pagal kiekvienos šalies nacionalinius priedus (LST EN 1992).

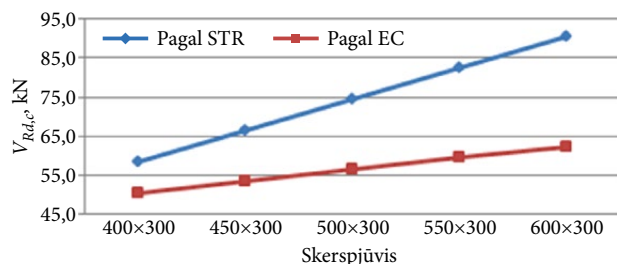
Norint palyginti šių dviejų metodikų rezultatus, apskaičiuota ir pateikta įstrižojo pjūvio stiprumo priklausomybė nuo skerspjūvio aukščio pokyčio bei tempiamosios išilginės armatūros skerspjūvio ploto (3 pav.).

Iš 3 pav. pateikto grafiko matyti, kad skaičiuojant pagal EC2 metodiką, įstrižojo pjūvio stiprumas gaunamas mažesnis. Taip pat pastebima, kad kintant skerspjūvio aukščiui, skaičiuojant pagal EC2 metodiką, šis stiprumas didėja ne taip sparčiai, kaip pagal STR metodiką.



2 pav. Skaičiuotinio išilginės armatūros skerspjūvio ploto A_{sp} nagrinėjame pjūvyje parinkimo schema

Fig. 2. The scheme of choice of longitudinal reinforcement design cross-section area A_{sp} in analysed section

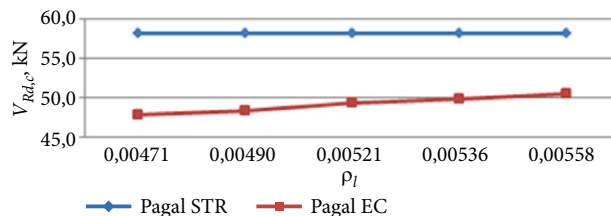


3 pav. Lenkiamųjų elementų be skersinės armatūros įstrižojo pjūvio stiprumo priklausomybė nuo skerspjūvio aukščio

Fig. 3. The relationship between shear strength of bending elements without shear reinforcement and cross-section height

4 pav. pateiktame grafike pastebimas nežymus įstrižojo pjūvio stiprumo didėjimas, didėjant tempiamosios išilginės armatūros skerspjūvio plotui. Čia skerspjūvis 400×300 mm, o išilginė armatūra imta tokia, kad atlaikytų lenkiamąjį momentą nuo apkrovų, nesukeliančių narmuotojo skersine armatūra elemento įstrižojo pjūvio suirimo ($V_{Ed} < V_{Rd}$). Taigi realių (nepararmuotų) elementų išilginės tempiamosios armatūros įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui yra palyginti nedidelė.

Kai nenaudota skersinė armatūra, elementai įstrižajame pjūvyje suyra staiga – taip įvyksta trapijoji irtis. Dėl šios priežasties daugelis normatyvų, įskaitant ir EC2 bei STR, reglamentuoja, kad daugelį gelžbetoninių elementų būtina konstrukciškai armuoti bent minimaliu skersinės armatūros kiekiu. Šie reikalavimai netaikomi plokštėms, kur galimas skersinių apkrovų persiskirstymas, ir mažų gabaritų sąramoms, kurios neturi didesnės įtakos bendrai konstrukcijos laikomajai galiai (Marčiukaitis *et al.* 2007; LST EN 1992; STR 2.05.05:2005).



4 pav. Narmuotų skersine armatūra lenkiamųjų elementų įstrižojo pjūvio stiprumo priklausomybė nuo išilginio armavimo koeficiento

Fig. 4. The relationship between shear section strength of bending elements without shear reinforcement and longitudinal reinforcement ratio

3. Elementų su vertikaliąja skersine armatūra įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo apžvalga ir analizė

Kai elementai armuojami skersine armatūra, pasikeičia ne tik jų įstrižojo pjūvio stiprumas, bet ir suirties pobūdis. Suirtis tampa plastiškoji. Prieš suyrant formuojasi aiškiai matomi įstrižieji plyšiai, apatinė elemento dalis šalia atramų ištįsta. Į bendrą elemento darbą labai efektyviai įtraukiama skersinė armatūra. Nepaisant skersinio armavimo, vis dar galima suirtis dėl per didelių betono gniuždymo įtempių tarp įstrižųjų plyšių (Jokūbaitis *et al.* 1992). Tokiu atveju suirtis yra trapijoji, tačiau tai pasitaiko rečiau. Kadangi šiandienėje praktikoje naudojamas vis didesnis stiprumo betonas, tokiam suirties pobūdžiui pasiekti skersinis armavimas turėtų būti labai intensyvus.

Skaičiuojant pagal STR metodiką skersine armatūra armuotų gelžbetoninių elementų įstrižojo pjūvio stiprumas, kaip minėta, apribojamas gniuždomojo betono tarp įstrižųjų plyšių stiprumu (apskaičiuojama pagal 1 formulę). Šiuo atveju koeficientas ϕ_{w1} nebeimamas lygus 1, tačiau skaičiuojamas atsižvelgiant į skersinio armavimo intensyvumą. Ši sąlyga patikrinama pirmiausia ir jeigu ji yra netenkinama, reikia keisti elemento geometriją.

Kai tenkinama 1 lygtis, elemento, armuoto skersine armatūra, įstrižojo pjūvio stiprumas apskaičiuojamas pagal (6) išraišką, kurioje yra šios dedamosios:

- gniuždymo įtempius perimančio betono įstrižojo pjūvio stiprumo dedamoji $V_{Rd,c}$;
- skersinės armatūros, perimančios tempimo ir kirpimo įtempius, dedamoji $V_{Rd,sw}$;
- dedamoji, įvertinanti skersinės jėgos sumažėjimą ties įstrižojo pjūvio viršūne (ši dedamoji taikoma tik tais atvejais, kai elementas apkrautas tolygiai išskirstyta apkrova):

$$V_{Ed,max} \leq V_{Rd,s} = V_{Rd,c} + V_{Rd,sw} + q_{eff,d} \cdot c. \quad (6)$$

$$V_{Rd,sw} = v_{sw} \cdot c_0. \quad (7)$$

$$V_{Rd,c} = \frac{\varphi_{c2} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d^2}{c}. \quad (8)$$

Tempimo įtempius perimančio betono įstrižojo pjūvio stiprumo dedamoji apskaičiuojama analogiškai kaip ir nearmuotų skersine armatūra elementų, tačiau koeficientas φ_{c4} pakeičiamas didesniu φ_{c2} . Šio koeficiento padidinimas grindžiamas tuo, kad skersinis armavimas panaikina staigaus suirimo pobūdį, todėl atsarga gali būti mažinama, geriau išnaudojant betono stiprumo savybes (Jokūbaitis *et al.* 1992; Golyshv *et al.* 1985). Pavojingiausia įstrižojo pjūvio projekcija (kai apkrova išskirstytas krūvis) ir jos didžiausioji reikšmė apskaičiuojama taip pat imant φ_{c2} koeficientą (STR 2.05.05:2005 3 priedo 6.39 formulė).

Skersinės armatūros strypai išilgai elemento įtempius perima nevienodai, dėl to, skaičiuojant skersinio armavimo dedamąją, įstrižojo pjūvio horizontalioji projekcija c_0 imama mažesnė nei c (STR 2.05.05:2005 3 priedo 6.34 formulė). Ši reikšmė turi apribojimų (STR 2.05.05:2005 3 priedo 6.3 išraiška). Šiuo metu Rusijoje naudojamo SP 52-101-2003 pateiktoje skaičiavimo metodikoje c_0 yra pateikiamas 25 proc. trumpesnis nei visa įstrižojo pjūvio horizontaliosios projekcijos c reikšmė (Posobie po proektirovaniu... 2003).

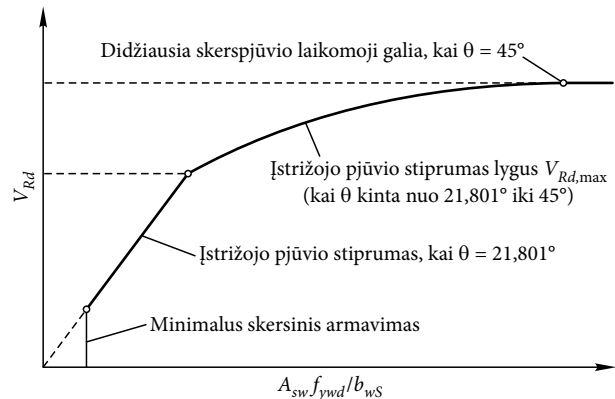
EC2 normatyve įstrižojo pjūvio stiprumui skaičiuoti pateikiama visiškai kitokia metodika. Čia sudaromas santvaros modelis, kurios juostos yra tempiamoji armatūra ir gniuždomasis betonas. Šios santvaros tinklėlių sudaro tempiamieji ryšiai – skersinė armatūra ir menami gniuždomojo betono spyriai (Mosley *et al.* 2007; LST EN 1992).

Bendruoju atveju įstrižojo pjūvio stiprumas prilyginamas silpnesnio iš kintamos geometrijos santvaros tinklelio elementų stiprumui (9). $V_{Rd,max}$ – gniuždomųjų betono spyrių stiprumas, V_{Rds} – tempiamųjų ryšių (stygų) stiprumas.

$$V_{Ed,max} \leq \begin{cases} V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} \\ V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \end{cases}. \quad (9)$$

Santvaros metodas taikomas daugelyje pasaulio šalių normatyvų, tačiau EC2 pateiktoje metodikoje gniuždomojo betono spyrio pasvyrimo kampas yra kintamas. Skaičiuojant įstrižojo pjūvio stiprumą šis kampas imamas atsižvelgiant į galimą suirimo pobūdį.

Mažai armuotų skersine armatūra elementų įstrižojo plyšio atsivėrimo kampas yra artimas $21,8^\circ$, o didinant skersinį armavimą šis kampas statėja iki 45° (5 pav.). Šio kampo statėjimą veikia ir koncentruotosios apkrovos atstumas nuo atramų (Beeby, Narayanan 2005).



5 pav. Gniuždomojo betono spyrio posvyrio kampo θ įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui

Fig. 5. The impact of concrete compression strut angle θ to the shear resistance

Gniuždomojo betono spyrio posvyrio kampas ribojamas:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5. \quad (10)$$

Optimalu, kai (9) išraiškos abi lygtys yra lygios. Kadangi (9) išraiškos abi lygtys priešingai proporcingos kampui θ , vadinasi, galima apskaičiuoti tokį kampą θ , kuriam esant šios abi lygtys ir bus lygios. Pagrindinė apribojimo sąlyga šiuo atveju yra (10). Jei ši sąlyga būtų netenkinama, reikėtų imti ribinę kampo reikšmę. Priešingu atveju gautume, kad pagal (9) sąlygą įstrižojo pjūvio stiprumas būtų didžiausias, nes abi išraiškos tampa lygios. Daugelyje kitų normatyvų, pavyzdžiui, ACI 318-05 ir BS 8110, naudojamas pastovaus 45° posvyrio gniuždomojo betono spyrio santvaros modelis. Tokiu atveju įstrižojo pjūvio stiprumas gali būti gaunamas mažesnis už tikrąjį. Siekiant išvengti šios paklaidos, minėtose normose teigiama, kad tempimo įtempius perima ne tik tempiamieji armatūros ryšiai, bet iš dalies ir betonas. Tuomet prie tempiamojo ryšio laikomosios galios pridedamas nearmuoto skersine armatūra įstrižojo pjūvio betono stiprumas, gaunamas pagal (4) išraiškos pirmąją lygtį. Tai yra esminis santvaros metodų, taikomų skirtinguose normatyvuose, skirtumas (Beeby, Narayanan 2005; Perera, Vique 2009).

EC2 metodika neapibrėžia optimalaus gniuždomojo betono spyrio posvyrio kampo θ nustatymo. Kai apkrova yra koncentruotos jėgos, šio kampo kotangentas apskaičiuojamas sulyginus (9) išraiškos lygtis:

$$\cot \theta = \sqrt{\frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot s}{A_{sw} \cdot f_{ywd}} - 1}. \quad (11)$$

Pagal EC2 6.2.1.8 punktą kai apkrova daugiausia yra išskirstytasis krūvis, tempiamojo ryšio laikomoji galia gali būti padidinta. Tuomet (9) išraiškos apatinė lygtis pakeičiama į tokią:

$$V_{Rds} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta + q_{eff,d} \cdot d. \quad (12)$$

Šiuo atveju kampą θ apskaičiuoti jau sudėtingiau. Kaip ir koncentruotos apkrovos atveju, sulyginus gniuždomojo spyrio ir tempiamojo ryšio laikomąsias galias bei pertvarkius gautą reiškinį, gaunama kubinė lygtis (13), kurios vienas sprendinių tenkina apribojimus ir yra ieškomo kampo θ reikšmė:

$$\frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot f_{ywd} \cdot \cot^3 \theta + q_{eff,d} \cdot \cot^2 \theta - (\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot v_1 \cdot f_{cd} - \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot f_{ywd}) \cdot \cot \theta + q_{eff,d} = 0. \quad (13)$$

EC2 6.2.3.5 punktas nurodo, kad nesant skersinės jėgos netolygumo elemento ilgyje (pavyzdžiui, kai apkrova – tik tolygiai išskirstytas krūvis) tempiamojo ryšio laikomoji galia gali būti padidinta dydžiu $l \cdot q_{eff,d}$. Tačiau nereikia pamiršti, kad gniuždomasis betono spyris perims didžiausią skersinę jėgą prie atramos briaunos. Šiuo atveju (9) išraiškos apatinė lygtis pasikeis į:

$$V_{Rds} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta + l \cdot q_{eff,d}. \quad (14)$$

Ilgis l apskaičiuojamas atsižvelgiant į kampą θ :

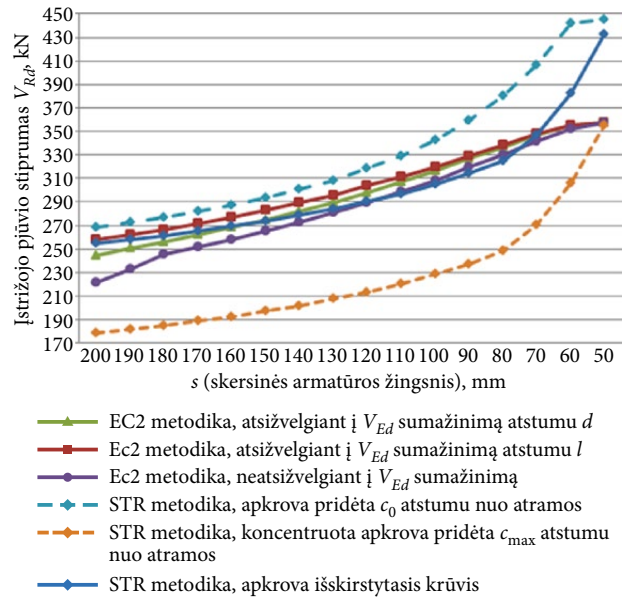
$$l = z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha). \quad (15)$$

Nagrinėjamoju atveju kampas θ gali būti apskaičiuojamas pagal (16) išraišką:

$$\cot \theta = \sqrt{\frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot v_1 \cdot f_{cd} - \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} - q_{eff,d}}{\frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} + q_{eff,d}}}. \quad (16)$$

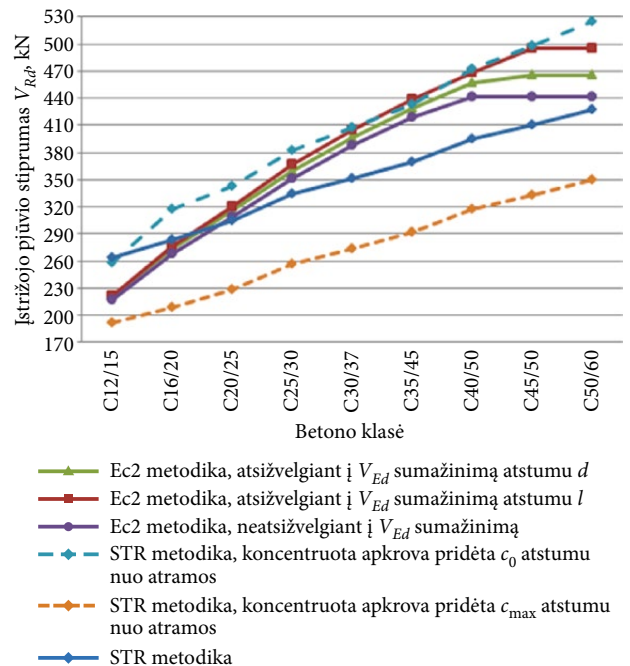
Taigi matyti, kad įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimui tiek pagal STR, tiek pagal EC2 metodikas daro įtaką apkrovimo pobūdis.

Pagal šias dvi metodikas gautų skaičiavimo rezultatų palyginimas pateiktas 6 ir 7 pav. Skaičiavimai atlikti su 400x300 skerspjūvio elementu, armuotu $A_{sw} = 1,57 \text{ cm}^2$ skerspjūvio ploto skersine S400 klasės armatūra. 6 pav. grafikuose pateikta įstrižojo pjūvio stiprumo priklausomybė, kai kinta skersinio armavimo intensyvumas (žingsnis). Skaičiuojant pagal STR metodiką, apkrovimo pobūdžio įtaka (šiuo atveju imama ta pati koncentruotosios ir išskirstytosios apkrovų at-



6 pav. Armuotų skersine armatūra lenkiamųjų elementų įstrižojo pjūvio stiprumo priklausomybė nuo skersinės armatūros (apkabų) žingsnio

Fig. 6. The relationship between shear strength of bending elements with shear reinforcement and shear reinforcement (stirrups) spacing



7 pav. Armuotų skersine armatūra lenkiamųjų elementų įstrižojo pjūvio stiprumo priklausomybė nuo betono klasės

Fig. 7. The relationship between shear strength of bending elements with shear reinforcement and the class of concrete

stojamoji, t. y. atraminė reakcija abiem atvejais yra vienoda) gaunama gerokai didesnė, nei skaičiuojant pagal EC2. Veikiant koncentruotajai apkrovai didžiausias įstrižojo pjūvio stiprumas gaunamas, kai įstrižojo pjūvio

projekcija yra mažiausia, ir atvirksčiai, mažiausias, kai ji didžiausia. Kai apkrova yra išskirstytasis krūvis, ši stiprumo reikšmė bus tarpinė tarp mažiausios ir didžiausios, gautų apkrovus koncentruota apkrova.

Atliekant skaičiavimus pagal santvaros modelį apkrovimo pobūdžio įtaka gauta mažesnė ir priklauso nuo išskirstytojo krūvio didumo. Skaičiuojant imta 65,0 kN/m išskirstytosios apkrovos reikšmė. Didėjant išskirstytajam krūviui didėja ir apkrovimo pobūdžio įtaka. Pagal šią skaičiavimo metodiką, kai apkrova yra koncentruotos jėgos, gaunamas mažesnis įstrižojo pjūvio stiprumas. Be to, kai koncentruota apkrova pridėta arčiau nei 2d atstumu nuo vidinio atramos paviršiaus, įstrižojo pjūvio stiprumas gali būti padidinamas, tačiau šis veiksnys čia nenagrinėtas.

Iš 7 pav. pateiktų grafikų matomas stiprumų priklausomybės dėsningumas, analogiškas jau aptartajam. Šiuo atveju buvo skaičiuota, kai skersinio armavimo žingsnis – 100 mm. Kintamasis – betono klasė. Matyti, kad didinant betono klasę, auga apkrovimo pobūdžio įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui skaičiuojant pagal EC2 metodiką. Kai kintamasis – skerspjuvio plotis, įstrižojo pjūvio stiprumo kitimo dėsningumas išlieka analogiškas aptartajam. Keičiant elementų skerspjuvio aukštį, įstrižojo pjūvio stiprumas didėja tiesiškai. Taip pat didėja ir apkrovimo pobūdžio įtaka.

Vis dėlto, kai apkrova yra daugiausia išskirstytas krūvis, įstrižojo pjūvio stiprumą skaičiuoti pagal EC2 metodiką yra keblu. Pateiktos kubinės lygties sprendimas iš projektuotojų gali atimti nemažai laiko. Siekiant supaprastinti skaičiavimus pagal EC2 metodiką, pateikiamas grafoanalitinis skaičiavimo būdas.

4. Elementų, armuotų vertikaliąja skersine armatūra, įstrižojo pjūvio stiprumo nustatymas grafoanalitiniu būdu

Gniuždomojo betono spyrio posvyrio kampą patogu nustatyti grafiškai. Norėdami tai padaryti, (9) išraiškoje pateiktas santvaros tinklelio elementų stiprumą aprašantis lygtis užrašykime kaip kampo θ funkcijas:

$$f_{Rd,max}(\theta) = \frac{0,36 \cdot k_c}{(\cot\theta + \tan\theta)}, \quad (17)$$

$$f_{Rd,s}(\theta) = 0,7826 \cdot k_s \cdot \cot\theta, \quad (18)$$

čia koeficientai k_c ir k_s apibūdina gniuždomojo betono spyrio ir tempiamojo ryšio stiprumą veikiančius veiksnius, tokius kaip elemento geometrija, naudojamų medžiagų charakteristikos ir skersinio armavimo parametrai (19 ir 20):

$$k_c = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot d \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \cdot f_{ck}, \quad (19)$$

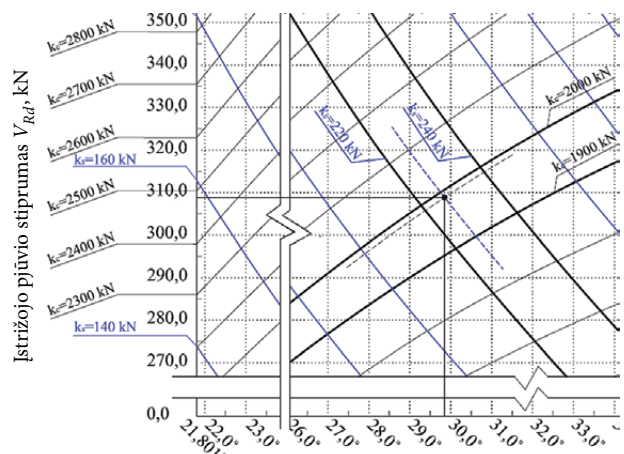
$$k_s = \frac{A_{sw}}{s} \cdot d \cdot f_{yk}. \quad (20)$$

Šių funkcijų reikšmių kitimą galima nubraižyti grafiškai 9 ir 10 pav. Remiantis grafikais patogu nustatyti ne tik kampo θ, bet ir įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmes. Apskaičiavus konkretaus elemento koeficientus k_c ir k_s pagal minėtuose brėžiniuose pateiktas kreives, suinterpoliuojamas įstrižojo pjūvio stiprumas, o kartu ir gniuždomojo betono spyrio posvyrio kampas. Interpoliacinių kreivių susikirtimo taškas charakterizuoja ieškomus dydžius ordinačių ir absčių ašyse.

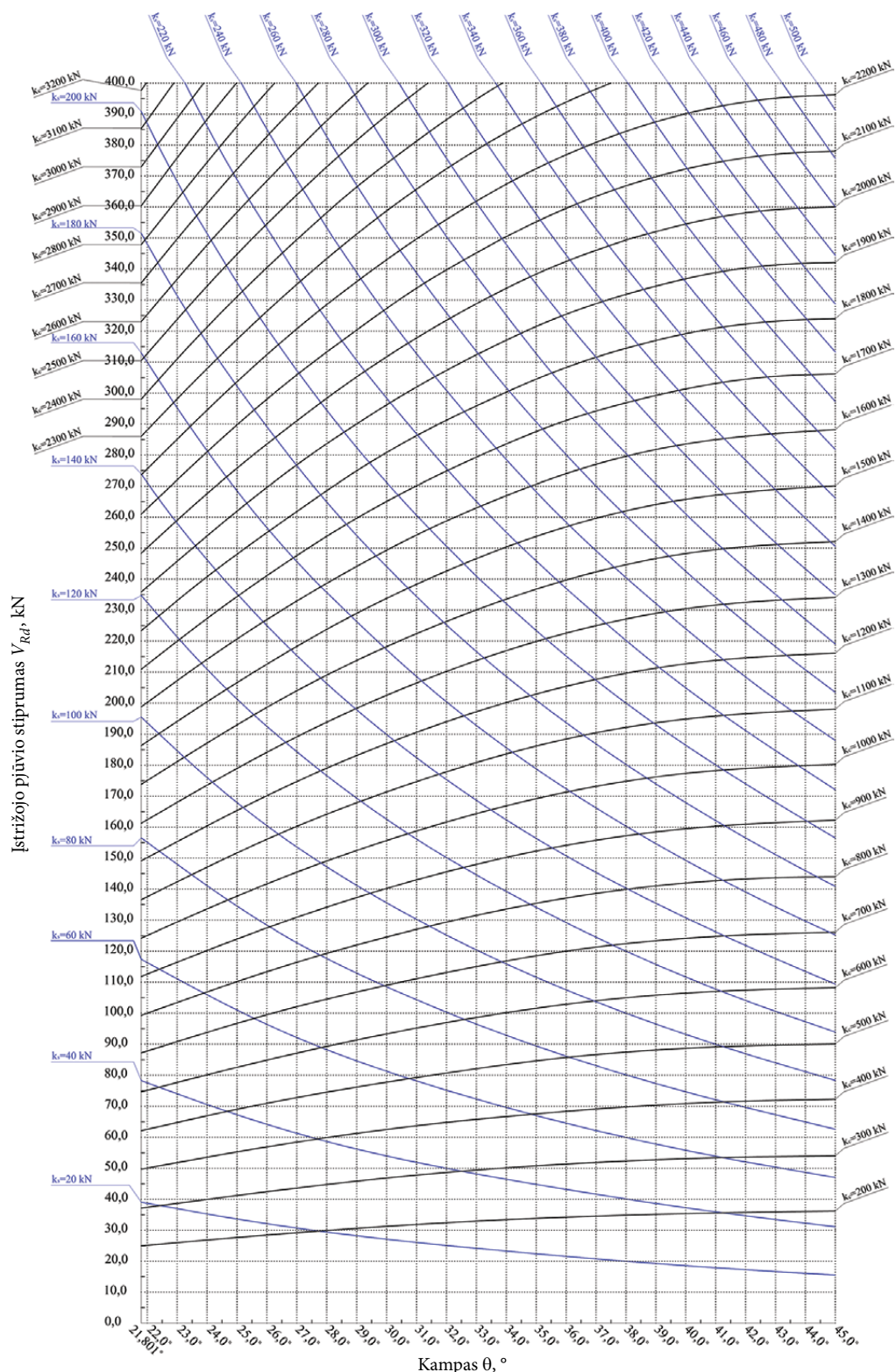
8 pav. pateiktas grafoanalitinio įstrižojo pjūvio stiprumo nustatymo pavyzdys, čia $k_c = 1987$ kN, $k_s = 226,1$ kN, o gautas įstrižojo pjūvio stiprumas $V_{Rd} = 309,0$ kN, kai kampas $\theta = 29,85^\circ$. Šiuo būdu nustatant įstrižojo pjūvio stiprumą svarbu nepamiršti, kad grafikai vaizduoja atskirų santvaros tinklelio elementų stiprumą. Jeigu, apskaičiavus koeficientus k_s ir k_c , interpoliacinės kreivės nesikerta, tai pjūvio stiprumas bus lygus silpnesnio iš tinklelio elementų stiprumui. Jo reikšmė bus taške, kuriame žemiau esanti tinklelio elemento stiprumo kreivė (menama – interpoliacinė) kerta kampo θ ribą.

Pateikti grafikai grafoanalitiniam įstrižojo pjūvio stiprumo nustatymui sudaryti laikant, kad apkrova yra koncentruotosios jėgos. Kai apkrova yra išskirstytasis krūvis ir galima atsižvelgti į V_{Ed} sumažinimą pagal EC2 6.2.1.8 punktą, tuomet tempiamojo ryšio stiprumą aprašo (21) funkcija:

$$f_{Rd,s}(\theta) = 0,7826 \cdot k_s \cdot \cot\theta + q_{eff} \cdot d \cdot d. \quad (21)$$



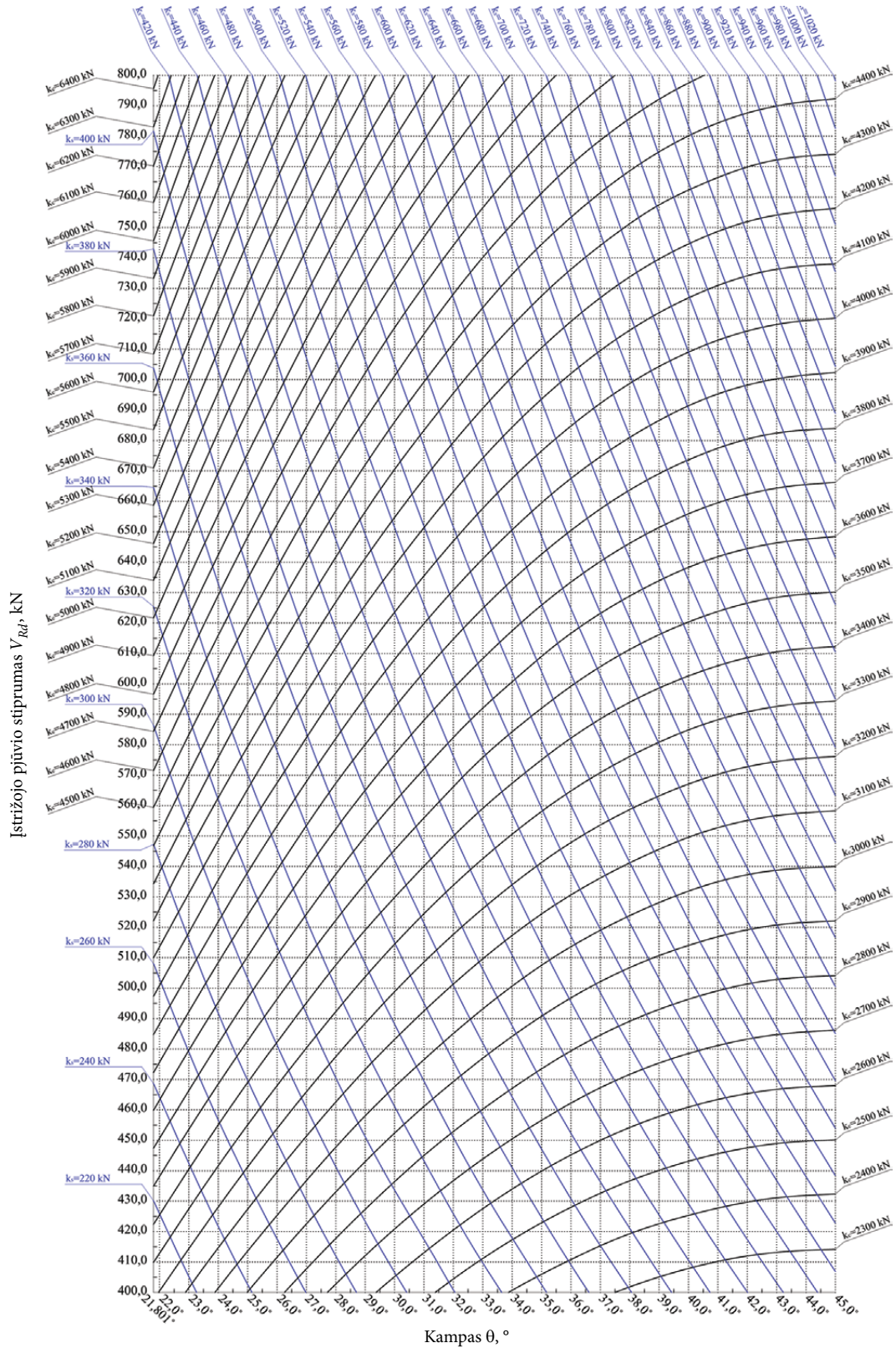
8 pav. Grafinio įstrižojo pjūvio stiprumo nustatymo pavyzdys
Fig. 8. The example of graphic Shear strength identification



9 pav. Lenkiamųjų elementų, armuotų vertikaliąja skersine armatūra, ištrižojo pjūvio stiprumo nustatymo 1 grafikas
 Fig. 9. The 1st graphic of shear strength identification of bending elements with vertical shear reinforcement

Vis dėlto priartėjimo būdu, taikant grafoanalitinį skaičiavimo metodą, galima išvengti kubinės (13) lygties sprendimo ir gauti ištrižojo pjūvio stiprumą, paskirstytosios apkrovos atveju naudojantis 9 ir 10 pav.

Tokiu atveju pagal (19) ir (20) išraiškas apskaičiuojami koeficientai k_s ir k_c . Pasinaudojus 9 ir 10 pav. apskaičiuojamas gniuždomojo betono spyrio posvyrio kampas θ (šis kampas gali būti apskaičiuojamas ir pagal



10 pav. Lenkiamųjų elementų, armuotų vertikaliąja skersine armatūra, įstrižojo pjūvio stiprumo nustatymo 2 grafikas

Fig. 10. The 2nd graphic of shear strength identification of bending elements with vertical shear reinforcement

(11) formulę). Žinant šį kampą apskaičiuojamas koeficientas $k_{s,q}$ (22). Tuomet dar kartą pasinaudojus 9 ir 10 pav. interpoliuojant gali būti nustatomas išskirstytąja apkrova apkrauto elemento apytikslis įstrižojo pjūvio stiprumas ir artimesnis tikrajam apytikslis kampas θ :

$$k_{s,q} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot d \cdot f_{yk} + \frac{q_{eff,d} \cdot d}{0,7826 \cdot \cot \theta}. \quad (22)$$

Ši stiprumo reikšmė yra apytikslė, tačiau labai artima tikrajai (apskaičiuotai išsprendus (13) lygtį ir gavus tikrąjį reikiamą kampą θ). Paklaidos didumas priklauso nuo $q_{eff,d} \cdot d$ dedamosios didumo, santvaros elementų stiprumų bei elemento skerspjūvio aukščio.

Vis dėlto norint gauti rezultatą, kuris būtų dar tikslesnis (faktiškai lygus tikrajam), reikia atlikti antrą priartėjimą, tam tikrais atvejais ir trečią, atsižvelgiant į norimą paklaidos dydį. Šiuo atveju pagal k_c ir $k_{s,q}$ suinterpoliuotas kampas θ dar kartą naudojamas koeficiento $k_{s,q}$ reikšmei perskaičiuoti (22). Perskaičiavus pagal $k_{s,q}$ ir k_c , naudojantis 9 ir 10 pav., nustatomas reikiamas įstrižojo pjūvio stiprumas. Po šio perskaičiavimo įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmės paklaida dažniausiai nesiekia nė pusės procento. Trečias priartėjimas tikslingas tik tuomet, kai siekiama gauti ypač tikslius rezultatus.

Apytikslis įstrižojo pjūvio stiprumas gali būti analitiškai apskaičiuotas pagal (17) išraišką, įstačius apytikslį kampą θ , gautą pasinaudojus (23) išraiška. Čia tikrasis stiprumas ir tikrasis kampas θ gaunami priartėjimo būdu, analogiškai kaip aptarta grafiniam sprendimo būdui:

$$\cot \theta_q = \sqrt{\frac{0,36 \cdot k_c}{0,7826 \cdot k_{s,q}} - 1}. \quad (23)$$

Šio skaičiavimo metodo rezultatai gaunami tokie pat, kaip ir skaičiuojant pagal EC2 normatyve pateiktas išraiškas. Pranašumas tas, kad išvengiama kubinės lygties sprendimo kampui θ nustatyti. Tai patogiu projektuojams, nes rezultatas – įstrižojo pjūvio stiprumas gaunamas greičiau ir paprasčiau.

5. Elementų su įstrižąja ir vertikaliąja skersine armatūra įstrižojo pjūvio stiprumas

Elementų, armuotų apkabomis ir atlankomis, įstrižojo pjūvio skaičiavimas pagal STR pateiktą metodiką iš principo beveik toks pat kaip ir armavimo vien apkabomis atveju. Skirtumas tas, kad tempimo ir kirpimo įtempius perima ne tik betonas ir vertikali skersinė armatūra, bet ir atlankos. Todėl prie (6) išraiškos dar

pridedama viena dedamoji – $V_{Rd,s,inc,i}$. Tai atlankų, perimančių tempimo ir kirpimo įtempius dedamoji:

$$V_{Rd,s,inc,i} = f_{swy} \cdot A_{s,inc} \cdot \sin \alpha. \quad (24)$$

Armavimas atlankomis yra efektyvesnis nei apkabomis. Atlankų posvyrio kampas galimas nuo 90° iki 45°. Kuo šis kampas mažesnis, tuo įstrižojo pjūvio stiprumas didesnis. Vis dėlto armuoti tik atlankomis neleidžiama, nes labai sunku tokį armavimą tinkamai įgyvendinti be papildomų apkabų. Taip pat tokio armavimo tinkamai neįgyvendinus, įstrižojo pjūvio stiprumas sumažėja ir atsiranda suirimo galimybė. Dėl šios priežasties projektavimo normos nustato bent pusę skersinio armavimo atlikti apkabomis (Beeby, Narayanan 2005; LST EN 1992; STR 2.05.05:2005).

Skaičiavimas pagal STR metodiką remiasi nuostata, kad skersinis armavimas atlankomis yra tik papildomas. Skaičiuojant taip armuoto elemento įstrižojo pjūvio stiprumą, tikrinamas nebe vienas pjūvis, bet visi pjūviai, kertantys atskirai kiekvieną atlanką. Skaičiavimas tampa sudėtingesnis ne tik dėl įstrižųjų pjūvių projekcijų nustatymo, bet ir dėl jų gausos. Kuo atlankų mažiau, tuo skaičiavimas trumpesnis (STR 2.05.05:2005 Praktinio taikymo vadovas).

EC2 metodika, pagrįsta santvaros modeliu, apibrėžia skaičiavimą, kai skersinis armavimas yra tik atlankos. Tai lyg prieštaravimas, nes normatyvas neleidžia skersinio armavimo atlikti tik atlankomis, tačiau pateikta metodika būtent tokia. Vis dėlto elementų, armuotų tik atlankomis, įstrižojo pjūvio stiprumas apskaičiuojamas pagal (25) išraišką:

$$V_{Ed,max} \leq \begin{cases} V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta} \\ V_{Rd,s,\alpha} = \frac{A_{sw,\alpha}}{s_\alpha} \cdot z \cdot f_{ywd,\alpha} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \end{cases}. \quad (25)$$

Šiuo atveju reikiamas gniuždomojo betono spyrio posvyrio kampas apskaičiuojamas pagal (26) lygtį. Ši išraiška gaunama sulyginus abi (25) išraiškos lygtis.

$$\cot \theta = \sqrt{\frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot s}{A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha}} - 1. \quad (26)$$

(26) lygtis tinkama, kai apkrova yra koncentruota. Kai apkrova – išskirstytasis krūvis, analogiškai kaip ir apkabų atveju, prie apatinės (25) lygčių sistemos lygties pridedama dar viena skersinės jėgos ties pjūvio viršūne sumažinimo dedamoji. Kai skersinė jėga sumažinama dydžiu $q_{eff,d} \cdot d$, tuomet kampas θ apskaičiuojamas išsprendus kubinę lygtį:

$$\begin{aligned} & \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot f_{ywd} \sin \alpha \cdot \cot^3 \theta + \left(\frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot f_{ywd} \cdot \cos \alpha + \right. \\ & \left. + q_{eff,d} \right) \cdot \cot^2 \theta + \left(\frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot f_{ywd} \sin \alpha - \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot \right. \\ & \left. \cdot v_1 \cdot f_{cd} \right) \cot \theta + \left(\frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha - \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot \right. \\ & \left. \cdot v_1 \cdot f_{cd} \right) \cdot \cot \alpha + q_{eff,d} = 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Analogiškai, kai skersinė jėga sumažinama dydžiu $q_{eff,d} \cdot l$, kampas θ apskaičiuojamas išsprendus tokią kubinę lygtį:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} \sin \alpha + q_{eff,d} \right) \cdot \cot^3 \theta + \left(\frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} \cdot \sin \alpha + \right. \\ & \left. + \cot \alpha \cdot q_{eff,d} \right) \cdot \cot^2 \theta + \left(\frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} \sin \alpha - \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot \right. \\ & \left. \cdot v_1 \cdot f_{cd} + q_{eff,d} \right) \cot \theta + \left(\frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} \cdot \sin \alpha - \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot \right. \\ & \left. \cdot v_1 \cdot f_{cd} + q_{eff,d} \right) \cdot \cot \alpha = 0. \end{aligned} \quad (28)$$

EC2 nepateiktos modelio, kur tinklę sudaro ir apkabos, ir atlankos, santvaros elementų stiprumo nustatymo išraiškos. Vis dėlto tokios santvaros laikmoji galia bus lygi silpnesnei tinklelio grandžiai – arba gniuždomųjų betono spyrių stiprumui, arba tempiamųjų ryšių stiprumui. Kadangi tempiamuosius ryšius sudaro ir apkabos, ir atlankos, o jų stiprumai, veikiant koncentruotosioms jėgoms, atskirai aprašomi apatinėmis (9) ir (25) išraiškų lygtimis, todėl šių dviejų skersinio armavimo dedamųjų stiprumų suma ir sudarys tempiamųjų ryšių stiprumą (Bleshik *et al.* 2003). Skaičiavimo patogumui, atlikus kai kuriuos supaprastinimus, sudaroma (31) lygčių sistema. Čia viršutinė lygtis aprašo gniuždomojo betono spyrio stiprumą, o apatinė – tempiamojo ryšio stiprumą:

$$v_{sw} = \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd}}{s}. \quad (29)$$

$$v_{sw,\alpha} = \frac{A_{sw,\alpha} \cdot f_{ywd,\alpha}}{s_\alpha}. \quad (30)$$

$$V_{Ed,max} \leq \begin{cases} V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot (\cot \theta + \cot \beta)}{1 + \cot^2 \theta} \\ V_{Rd,s,\beta} = V_{Rd,s} + V_{Rd,s,\alpha} = v_{sw} \cdot z \cdot \cot \theta + v_{sw,\alpha} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (31)$$

Gniuždomojo betono spyrio stiprumo skaičiavimo formulėje naudojamas kampas β , kuris aprašo atstojamąjį tempiamojo ryšio posvyrio kampą horizontalios išilginės elemento ašies atžvilgiu. Šis kampas apskaičiuojamas pagal (32) išraišką. Gniuždomojo betono spyrio stiprumas gali būti apskaičiuotas pagal (25) lygčių sistemos 1 lygtį (Bleshik *et al.* 2003). Šiuo

būdu gaunamas šiek tiek per didelis įstrižojo pjūvio stiprumas.

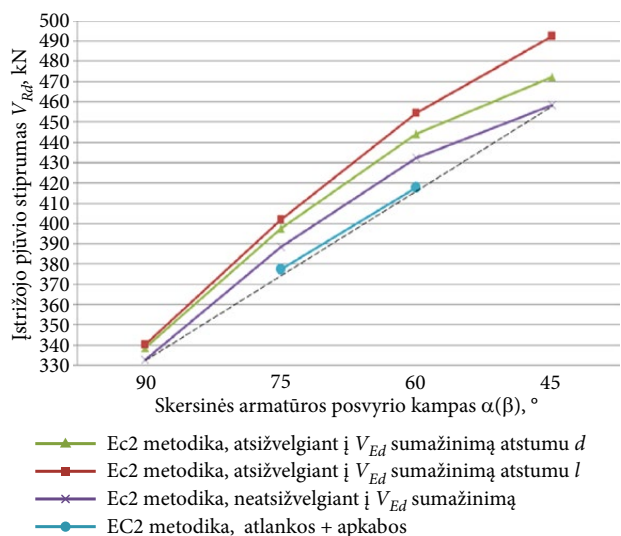
$$\beta = \frac{v_{sw} \cdot 90^\circ + v_{sw,\alpha} \cdot \alpha}{v_{sw} + v_{sw,\alpha}}. \quad (32)$$

Skaičiuojant su kampu β , santvaros gniuždomųjų betono spyrių posvyrio kampas θ gaunamas išsprendus (33) lygtį:

$$\begin{aligned} & (v_{sw} + v_{sw,\alpha} \cdot \sin \alpha) \cdot \cot^3 \theta + v_{sw,\alpha} \cdot \cos \alpha \cdot \cot^2 \theta + (v_{sw} + \\ & + v_{sw,\alpha} \cdot \sin \alpha - \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot v_1 \cdot f_{cd}) \cot \theta + v_{sw,\alpha} \cdot \cos \alpha - \\ & - \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \cot \beta = 0. \end{aligned} \quad (33)$$

(31) išraiška sudaryta elementams, veikiamiems koncentruotųjų jėgų. Jeigu apkrova būtų išskirstytas krūvis, tuomet, analogiškai ankstesniems atvejams, reikėtų pakoreguoti tempiamojo ryšio stiprumo lygtį. Kampo θ skaičiavimas, taikant vieną iš skersinės jėgos sumažinimo reikšmių, išliktų analogiškas aptartam anksčiau, t. y. sudaroma atitinkama kubinė lygtis, sulyginus santvaros tinklelio elementų stiprumus. Skaičiuojant pagal EC2 metodiką, išlieka tas pats įstrižojo pjūvio stiprumo priklausomybės nuo apkrovimo pobūdžio dėsningumas, kaip ir armavimo apkabomis atveju.

Iš 11 pav. matyti, kad su gana nedidele paklaida įstrižojo pjūvio stiprumą būtų galima apskaičiuoti tiesinio interpoliavimo būdu. Šiuo atveju interpoliavimas atliekamas tarp elementų, armuotų vienodu skersinio armavimo intensyvumu tik atlankomis arba tik sankabomis.



11 pav. Atlankomis (ir apkabomis) armuotų lenkiamųjų elementų įstrižojo pjūvio stiprumo priklausomybė nuo atlankų posvyrio kampo

Fig. 11. The relationship between the shear strength of bending elements with shear reinforcement (bends and stirrups) and the bend inclination angle

Skaičiuojant pagal STR metodiką rezultatai gali skirtis daugiau nei pusantro karto. Šis atvejis galimas, kai krūvis išskirstytas apkrova arba koncentruota jėga. Tokie skirtumai galimi dėl įstrižojo pjūvio viršūnės atstumo nuo atramos bei dėl to, kad, skaičiuojant daugelį pavojingų įstrižųjų pjūvių, atsižvelgiama į atskirą kiekvienos atlankos darbą. EC2 metodikoje yra priešingai, čia laikoma, kad vystantis įstrižajam plyšiui, įstrižąjį pjūvį gali sustiprinti ne atskiros atlankos, individualia pavojingiausia įstrižojo plyšio vystymosi kryptimi, o atlankų visuma.

6. Išvados

1. Visais atvejais nearmuotų skersine armatūra gelžbetoninių elementų įstrižojo pjūvio stiprumas, apskaičiuotas pagal STR, yra didesnis nei pagal EC2. Nors EC2 metodikoje atsižvelgiama į tempiamosios išilginės armatūros kiekį, ši metodika yra saugesnė ir griežčiau riboja svarbiausiuosius tempimo įtempius betone.
2. Armuotų vertikaliaja skersine armatūra gelžbetoninių elementų įstrižojo pjūvio stiprumo pagal STR metodiką skaičiavimas grindžiamas įstrižojo pjūvio horizontaliosios projekcijos nustatymu. Čia stiprumo reikšmė labai priklauso nuo apkrovimo pobūdžio ir jo dydžio, nes tai daro įtaką įstrižojo pjūvio horizontalios projekcijos ilgiui. EC2 metodika iš principo kitokia, čia sudaromas kintamosios geometrijos santvaros modelis, kur jos tinklelio elementų stiprumas apibrėžia įstrižojo pjūvio stiprumą. Skaičiuojant kintamosios geometrijos santvaros metodu svarbu apskaičiuoti reikiamą gniuždomojo betono spyrio posvyrio kampą θ . Atsižvelgiant į apkrovimo pobūdį, tai gali būti gana sudėtinga.
3. Įstrižojo pjūvio stiprumą ir gniuždomojo betono spyrio posvyrio kampą patogiu nustatyti grafoanalitiniu būdu, stiprumą išreiškiant anksčiau minėto kampo funkcijomis. Kai apkrova yra išskirstytasis krūvis, šie dydžiai grafoanalitiniu būdu nustatomi priartėjimo būdu, atlikus vieną arba du priartėjimus. Ši siūloma metodika spartesnė ir patogi projektuotojams.
4. Kai elementas armuotas apkabomis ir atlankomis, STR metodika išlieka beveik tokia pat kaip ir armuojant tik apkabomis, bet atsiranda atlankų, perimančių dalį skersinės jėgos, dedamoji. Taip pat padaugėja tikrinamų įstrižųjų pjūvių. EC2 nereglamentuoja apkabų ir atlankų bendo darbo, nors

atskiruose punktuose nurodo, kad armuoti tik atlankomis negalima. Jame pateikiamas santvaros modelis, kur skersinis armavimas yra tik apkabos arba tik atlankos. Atlankomis ir apkabomis armuotų elementų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal EC2 gali būti apskaičiuojamas sudarius redukuotą santvaros modelį, kurio tempiamuosius „ryšius“ sudaro apkabos ir atlankos.

Literatūra

- ACI 318-05. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. 2005. American Concrete Institute. 430 p.
- Beeby, A. W.; Narayanan, R. S. 2005. *Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2. Eurocode 2: Design of Concrete Structures; General Rules and Rules for Buildings and Structural Fire Design*. London: Thomas Telford. 220 p.
- Bleshik, N. P.; Zhukov, D. D.; Lazovskij, D. N.; Kazachek, B. G.; Kondrachik, A. A.; Pecol'd, T. M.; Tura, V. V. 2003. *Zhelezobetonnye konstruksii. Osnovy teorii rascheta i konstruirovaniia* [Reinforced Concrete Structures. Basics of the theory, calculation and design]. Brest. 380 p.
- BS 8110. 1997. *Structural Use of Concrete. Part 1: Code of Practice for Design and Construction*. British Standard. 174 p.
- Golyshev, A. B.; Bachinckij, V. Ia.; Polishchuk, B. P.; Kharpenko, A. V.; Pubenko, I. V. 1985. *Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruksij* [Design of Concrete Structures]. Kiev. 496 p.
- Jokūbaitis, V.; Jurkša, A.; Kamaitis, Z., et al. 1992. *Gelžbetoninės ir mūrinės konstrukcijos* [Reinforced concrete and masonry structures]. Vilnius: Moksas. 392p.
- LST EN 1992. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. Bendrosios ir pastatų taisyklės* [Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings]. 2007. Vilnius. 232 p.
- Marčiukaitis, G.; Jonaitis, B.; Papinigis, V.; Valivonis, J. 2007. *Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas pagal euronormas* [Design of reinforced concrete structures according to Eurocodes]. Vilnius: Technika. 339 p.
<http://dx.doi.org/10.3846/948-S>
- Mosley, B.; Bungey, J.; Hulse, R. 2007. *Reinforced Concrete Design to Eurocode 2*. London: Palgrave Macmillan. 409 p.
- Nilso, A. H.; Darwin, D.; Dolan, C. W. 2004. *Design of Concrete Structures*, 13th ed. The McGraw-Hill. 734 p.
- Perera, R.; Vique, J. 2009. Strut-and-tie modelling of reinforced concrete beams using genetic algorithms optimization, *Journal Construction and Building Materials* 23: 2914–2925.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.016>
- Posobie po proektirovaniu betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksij iz tiazhologo betona bez predvaritel'nogo napriazheniia armatory (k SP 52-101-2003) [Designer's guide of concrete and reinforced concrete structures, without prestressed reinforcement (to SP 52-101-2003)]. 2003. Gosstroj Rossii. Moskva. 108 p.
- SP 52-101-2003. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii bez predvaritel'nogo napriazheniia armatory* [Concrete and reinforced concrete structures without prestressed reinforcement]. 2003. Gosstroj Rossii. Moskva. 71 p.

STR 2.05.05:2005 *Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas* [Design of Concrete and Reinforced Concrete Structures]. Vilnius, 2005.

STR 2.05.05:2005 *Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 3 priedas. Praktinio taikymo vadovas* [Design of Concrete and Reinforced Concrete Structures. Appendix 3. Practical use guide]. Vilnius, 2005.

THE ANALYSIS OF SHEAR STRENGTH OF FLEXURAL RC ELEMENTS ACCORDING TO EC2 AND STR

Š. Kelpša, M. Augonis

Abstract. When the various reinforced concrete structures are designed according to EC2 and STR, the difference of calculation results, is quite significant. In this article the calculations of shear strength of bending reinforced concrete elements are investigated according to these standards. The comparison of such calculations is also significant in the sense that the shear strength calculations are carried out according to different principles. The STR regulations are based on work of the shear reinforcement crossing the oblique section and the compressed concrete at the end of the section. In this case, at the supporting zone, the external bending moment and shear force should be in equilibrium with the internal forces in reinforcement and compressed concrete, i.e., the cross section must be checked not only from the external shear force, but also from bending moment. In EC2 standard, the shear strengths are calculated according to simplified truss model, which consists of the tension shear reinforcement bars and compressed concrete struts. The bending moment is not estimated. After calculation analysis of these two methods the relationships between shear strength and various element parameters are presented. The elements reinforced with stirrups and bends are investigated additionally because in EC2 this case is not presented.

According to EC2 the simplified truss model solution depends on the compression strut angle value θ , which is limited in certain interval. Since the component of tension reinforcement bar directly depends on the angle θ and the component of compression strut depends on it conversely, then exists some value θ when the both components are equal. So the angle θ can be found when such two components will be equated. However, such calculation of angle θ became complicated if the load is uniform, because then the components of tension bar are estimated not in support cross section but in cross section that are displaced by distance d . So, the cube equation should be solved. For simplification of such solution the graphical method to find out the angle θ and the shear strength are presented. In these graphics the intersection point of two components (shear reinforcement and concrete) curves describes the shear strength of element.

Keywords: Oblique section, shear reinforcement, stirrups, bends, truss model, struts, ties.

Šarūnas KELPŠA. M.A. Student at the Department of Engineering Structures of Kaunas University of Technology. Research interests: strength of engineering structures.

Mindaugas AUGONIS. Assoc. Prof., Dr at the Department of Engineering Structures of Kaunas University of Technology. Research interests: strength and stability analysis of reinforced concrete structures.