

Ipolitas Židonis

**LENKIAMŲ ELEMENTŲ STIPRUMO
STATMENAME PJŪVYJE APSKAIČIAVIMO METODAS,
KAI ĮTEMPIŲ DIAGRAMA YRA KREIVINĖ**

Mokomoji knyga

Šiauliai, 2013

Ip. Židonis. Lenkiamų elementų stiprumo statmename pjūvyje apskaičiavimo metodas, kai įtempių diagrama yra kreivinė: Mokomoji knyga. Šiauliai, 2013. 44 p. (2 aut. lankai).

Mokomoji knyga „Lenkiamų elementų stiprumo statmename pjūvyje apskaičiavimo metodas, kai įtempių diagrama yra kreivinė“ yra skirta statybos inžinerijos specialybę studijuojantiems bakalaurantams, jau išklaususiems gelžbetoninių konstrukcijų kurso dalį; bakalaurantams, kurie ruošiasi studijuoti magistratūroje; magistrantams; asmenims, kurie ruošiasi studijuoti doktorantūroje; doktorantams; statybinių konstrukcijų projektuotojams ir kitiems statybos inžinerijos srities specialistams. Ši knyga yra priedas prie gelžbetoninių konstrukcijų kurso vadovėlių.

Knygoje parodyta, kaip lenkiamų elementų stiprumą statmename pjūvyje galima apskaičiuoti ZI metodu, kai įtempių diagrama yra kreivinė. Daug dėmesio skirta Eurokodo EN-2 kreivinės diagramos panaudojimui.

Pažymėtina, kad lenkiamų elementų stiprumo statmename pjūvyje apskaičiavimo metodas yra tik nedidelė bendrojo ZI metodo, autoriaus paruošto įtempių-deformacijų būvio parametrų realioms (ne sąlyginėms) reikšmėms elementų statmename pjūvyje teoriškai apskaičiuoti, dalis. Skaičiavimams reikalingos tik medžiagų įtempių-deformacijų diagramos. Konstrukcinių elementų bandymas reikalingas nebent teorinių rezultatų patikrinimui. 8 skyriuje parodyta, kaip lenkiamų elementų stiprumo statmename pjūvyje apskaičiavimo formules galima panaudoti kitokiems uždaviniams spręsti, pavyzdžiui: sijinio elemento, veikiamo naudojimo situacijos lenkimo M_{Ek} momento, įtempių-deformacijų būvio parametrams ties plyšiu teoriškai apskaičiuoti; racionaliam armatūros išankstinio įtempio dydžiui apskaičiuoti.

Formulės gana universalios ir kitu aspektu – galima imti ne tik kreivines, bet ir kitokių formų įtempių diagramas (trikampes, stačiakampes ir pan.) arba įtempių visai nepaisyti. Knygoje daugiausia dėmesio skirta gelžbetoniui. Bet ZI metodiką galima panaudoti ir kitokių medžiagų lenkiamų elementų atveju, pvz. metalo, medžio, plastmasių ir pan. Tik reikia turėti tų medžiagų įtempių-deformacijų priklausomybę, aprašytą ZI metodu. Tai leidžia atlikti įvairiausių tiriamuosius skaičiavimus.

Leidinį rekomendavo Šiaulių universiteto Statybos inžinerijos katedra ir Technologijos fakulteto taryba

Recenzavo: doc. dr. L. Kelpšienė ir dr. J. Šarakauskas

Turinys

| | |
|--|-----------|
| Įvadas..... | 5 |
| 1. ZI metodo pagrindas, esmė ir formulės..... | 5 |
| 2. Praktinis ZI metodo panaudojimas..... | 9 |
| 3. Stačiakampio skerspjūvio sijų M_{Rd} stiprio apskaičiavimas ZI metodu, kai gniuždomos betono zonos įtempiai aprašomi ER-2 reglamentų kreivine diagrama..... | 15 |
| 3.1. Elementų negausaus armavimo atvejis..... | 17 |
| 3.2. Elementų gausaus armavimo atvejis..... | 19 |
| 4. Ribos tarp sijų gausaus ir negausaus armavimo apskaičiavimas..... | 21 |
| 5. Gniuždomos zonos betono ribinių deformacijų ir įtempių diagramos įtaka sijinių elementų stiprumui..... | 22 |
| 6. Skaičiavimo ZI ir EN-2 metodais pavyzdžiai..... | 24 |
| 6.1 Sijų M_{Rd} stiprio apskaičiavimo ZI ir EN-2 metodais pavyzdžiai..... | 25 |
| 6.2 Sijų armavimo (armatūros A_s skerspjūvio ploto) apskaičiavimo ZI ir EN-2 metodais pavyzdžiai..... | 29 |
| 7 Sijų su armatūra ir (arba) lentynomis gniuždomoje zonoje M_{Rd} stiprio skaičiavimas..... | 31 |
| 8. Formulių, skirtų gausiai armuotiems elementams skaičiuoti, kiti galimo panaudojimo pavyzdžiai..... | 31 |
| 8.1. Sijinio elemento, veikiamo naudojimo situacijos lenkimo M_{Ek} momento, įtempių-deformacijų būvio ties plyšiu apskaičiavimas..... | 31 |
| 8.2. Armatūros išankstinio įtempio apskaičiavimas..... | 33 |
| Literatūra..... | 40 |
| Priedas | |
| (Daugiau M_{Rd} stiprio sijos skerspjūvyje apskaičiavimo ZI metodu ir pagal EN-2 formules pavyzdžių [9])..... | 41 |

Ivadas

Pagrindinis statybinių konstrukcijų elementų skaičiavimo metodas yra ribinių būvių metodas. Dažnai tenka apskaičiuoti gelžbetoninių elementų stiprumą, plyšių atsiradimą, įlinkius. Tam šiuo metu norminiuose reglamentuose [1–3] ir vadovėliuose [4–5] panaudojamos vis kitos kiekvienam paminėtam skaičiavimui pritaikytos formulės. Skaičiavimo supaprastinimui kreivinės įtempių diagramos keičiamos paprastesnės formos diagramomis, dažniausia stačiakampėmis. Todėl taip apskaičiuotų parametrų reikšmės būna sąlyginės. Labai netiksliai apskaičiuojamas gniuždomos zonos x aukštis, galimos didelės labiausia gniuždomo krašto ε_c deformacijų apskaičiavimo paklaidos.

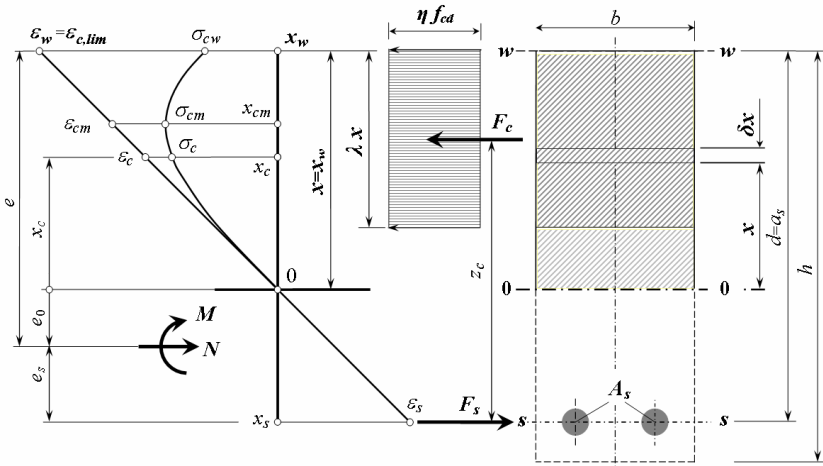
[6–8 ir 10] straipsniuose pateiktas praktiškas gana universalus inžinerinis metodas, kurio pagrindą sudaro netiesinis modelis, leidžiantis pagal vieningą metodiką apskaičiuoti realias, ne sąlygines įtempių-deformacijų būvio parametrų reikšmes statmenuose elementų ašiai pjūviuose bet kurioje apkrovimo stadijoje nuo apkrovimo pradžios iki elemento suirimo. Patogumui šį metodą vadiname ZI metodu. Svarbiausias ribinių būvių metodo būvis yra stiprumo būvis. Kai kuriuos šio metodo formulių parametrus, reikalingus apskaičiuoti ZI metodu gelžbetoninių sijų M_{Rd} stiprumą statmename išilginei ašiai pjūvyje (skerspjuvyje), galima apskaičiuoti iš anksto (1 ir 2 lent.). Tai leidžia išvengti pasikartojančių skaičiavimų ir supaprastina praktišką formulių panaudojimą.

Šiame darbe daugiausia dėmesio yra skirta gelžbetoninėms sijoms. Bet metodas tinka ir lenkiamiems elementams iš kitokių medžiagų (plieno, medžio ir pan.) skaičiuoti. Be to, skaičiavimų supaprastinimui, kaip ir skaičiuojant kitais metodais, taip ir čia tempimo įtempių virš plyšio nepaisoma, nors ZI metode tokia galimybė yra. ZI metodu galima apskaičiuoti ne tik M_{Rd} . Galima spręsti labai daug įvairių kitokių uždavinių [10].

1. ZI metodo pagrindas, esmė ir formulės

ZI metodo pagrindą sudaro stačiakampiam plotelyje (1 pav.) veikiančių statmenųjų įtempių atstojamosios jėgos ir jos momento

apskaičiavimas, kai įtempių-deformacijų diagrama yra kreivalininė.



1 pav. Stačiakampis sijos skerspjūvis, gniuždomos zonos įtempių diagramos ir naudojami žymenys

1 pav. parodyta jėga N – tai gali būti išorinių poveikių jėga arba išankstinio įtempio (pavyzdžiui, iš anksto įtemptos armatūros) P jėga, arba suminė $N + P$ jėga. Siekiant supaprastinti skaičiavimą, kartais būna tikslinga prie išorinių jėgų priskirti (prie N jėgos pridėti) ir gniuždomų lentynų kraštų (konsolių) jėgą.

Linija $w-w$ (1 pav.) – tai ašis, lygiagretė neutraliajai $0-0$ ašiai, nuo kurios matuojami atstumai. Tikslinga $w-w$ imti gniuždomos zonos krašte. Tiesė $\varepsilon_w - \varepsilon_s$ žymi deformacijas, kai taikoma plokščiųjų pjūvių (Bernoulli) hipotezė.

Tamprios plastiškos medžiagos (pavyzdžiui, betono) įtempių-deformacijų $\sigma_c - \varepsilon_c$ priklausomybė išreiškiama taip [6]:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \nu_c, \quad (1)$$

$$\nu_c = 1 + c_1 \eta_c + c_2 \eta_c^2 + c_3 \eta_c^3 + c_4 \eta_c^4 + \dots, \quad (2)$$

$$\eta_c = \varepsilon_c / \varepsilon_{cm}.$$

Pažymėjus $\eta_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cm}} = \frac{x_c}{x_{cm}}$, $\nu_c = \frac{\sigma_{cm}}{E_c \varepsilon_c}$, $E_c = 1,05 E_{cm}$ (E_{cm} – iš

Eurokodo-2 (toliau EN-2) [1–3]) ir $\varphi = \frac{\varepsilon_c}{x_c} = \frac{\varepsilon_{cm}}{x_{cm}} = \frac{\varepsilon_w}{x_w}$, gaunama

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cm} \frac{x_c}{x_{cm}} = \varphi \cdot x_c \text{ ir}$$

$$\sigma_c = \nu_c E_c \varepsilon_c = \nu_c E_c \frac{\varepsilon_w}{x_w} x_c = \varphi \nu_c E_c x_c. \quad (3)$$

b pločio $0-x_w$ intervale (1 pav.) veikianti ašinė F_c jėga

$$\begin{aligned} F_c &= \int_0^{x_w} \sigma_c b \delta x_c = \int_0^{x_w} \varphi E_c x_c \nu_c b \delta x_c = \varphi b E_c \omega_{nc} x_w^2 = b E_c \varepsilon_w \omega_{nc} x_w = \\ &= \omega_{nc} E_c \varepsilon_w b d^2 \xi_w, \end{aligned} \quad (4)$$

F_c jėgos M_c momentas apie $0-0$ ašį

$$\begin{aligned} M_c &= \int_0^{x_c} \sigma_c b x_c \delta x_c = \int_0^{x_c} \varphi E_c x_c^2 \nu_c b \delta x_c = \varphi b E_c \omega_{mc} x_w^3 = b E_c \varepsilon_w \omega_{mc} x_w^2 = \\ &= \omega_{mc} E_c \varepsilon_w b d^2 \xi_w^2. \end{aligned} \quad (5)$$

(4) ir (5) formulėse:

$$\omega_{nc} = \frac{1}{2} + \frac{c_1}{3} \eta_c + \frac{c_2}{4} \eta_c^2 + \frac{c_3}{5} \eta_c^3 + \frac{c_4}{6} \eta_c^4 + \dots, \quad (6)$$

$$\omega_{mc} = \frac{1}{3} + \frac{c_1}{4} \eta_c + \frac{c_2}{5} \eta_c^2 + \frac{c_3}{6} \eta_c^3 + \frac{c_4}{7} \eta_c^4 + \dots, \quad (7)$$

$$\eta_c = \eta_w = \frac{x_w}{x_{cm}} = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{cm}},$$

$$\xi_w = \frac{x_w}{d}. \quad (8)$$

Atstumas nuo neutraliosios 0–0 ašies iki F_c jėgos (ekscentricitetas)

$$e_c = \frac{M_c}{F_c} = \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} x_w = \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} \xi_w d. \quad (9)$$

Atstumas nuo F_c jėgos iki skerspjūvio gniuždomo krašto

$$a_c = x_w - e_c = \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}}\right) \cdot \xi_w d \quad (10)$$

Vidinių jėgų petys (1 pav.)

$$z_c = d - a_c = d - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}}\right) \cdot d \xi_w = \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}}\right) \xi_w\right] \cdot d. \quad (11)$$

F_c jėgos M_c momentas apie $s-s$ ašį (1 pav.)

$$M_s = F_s z_c = F_c z_c = \omega_{nc} \varepsilon_w E_c b d \xi_w \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}}\right) \xi_w\right] \cdot d. \quad (12)$$

Tempiamos armatūros F_s jėga

$$F_s = \sigma_s E_s. \quad (13)$$

Čia:

σ_s – armatūros įtempis,

E_s – armatūros tamprumo modulis.

Poveikių statinės pusiausvyros sąlygos:

$$\left. \begin{aligned} N - F_c + F_s &= 0 \\ N - \omega_{nc} E_c \varepsilon_w b d \xi_w + \sigma_s E_s &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} M_s &= M + N e_s = F_c z_c \\ M_s &= M + N e_s = \omega_{nc} \varepsilon_w E_c b d \xi_w \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} \right) \xi_w \right] \cdot d \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

2. Praktinis ZI metodo panaudojimas

Žemiau pateikiamas ZI metodikos panaudojimo pavyzdys, kai realizuojama EN-2 [1 ir 3] ir reglamente [2] įteisintą betono deformacijų-įtempių tarpusavio priklausomybę:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}; \quad (16)$$

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1},$$

$$k = (1,05 E_{cm} \cdot \varepsilon_{c1}) / f_{cm}. \quad (17)$$

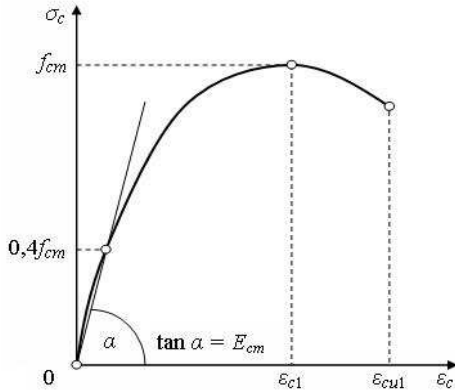
$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$, $E_{cm} = 22 (f_{cm} / 10)^{0,3} \text{ GPa}$, $\varepsilon_{c1} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \text{ ‰}$; $\varepsilon_{cu1} = 3,5 \text{ ‰}$, kai $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ (žr. [1–3] ir 1 lent.), ir $\varepsilon_{cu1} = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4 \text{ ‰}$, kai $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$.

Čia ir toliau ε_{c1} , ε_{cu1} ir σ_c reikšmės – teigiamos. Žymėjimas – kaip reglamentuose [1–3] t.y. betonui (arba gniuždymui) naudojamas indeksas c . Jeigu $E_c = 1,05 E_{cm}$ ir $\nu_c = f_{cm} / E_c \varepsilon_{c1}$, tai $k = 1 / \nu_c$ ir

$$\sigma_c = \frac{\eta / \nu_c - \eta^2}{1 + (1 / \nu_c - 2)\eta} f_{cm}. \quad (18)$$

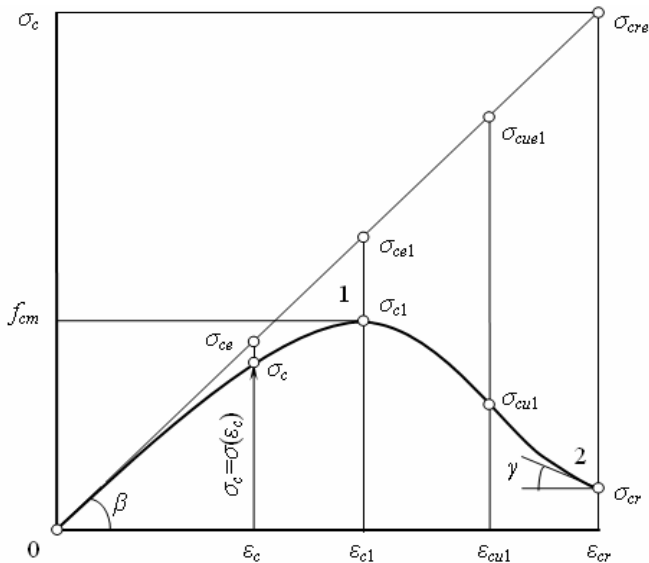
f_{cm} ir E_{cm} reikšmės – iš [1–3].

(16) ir (18) formulių EN-2 grafikas parodytas 2 paveiksle.

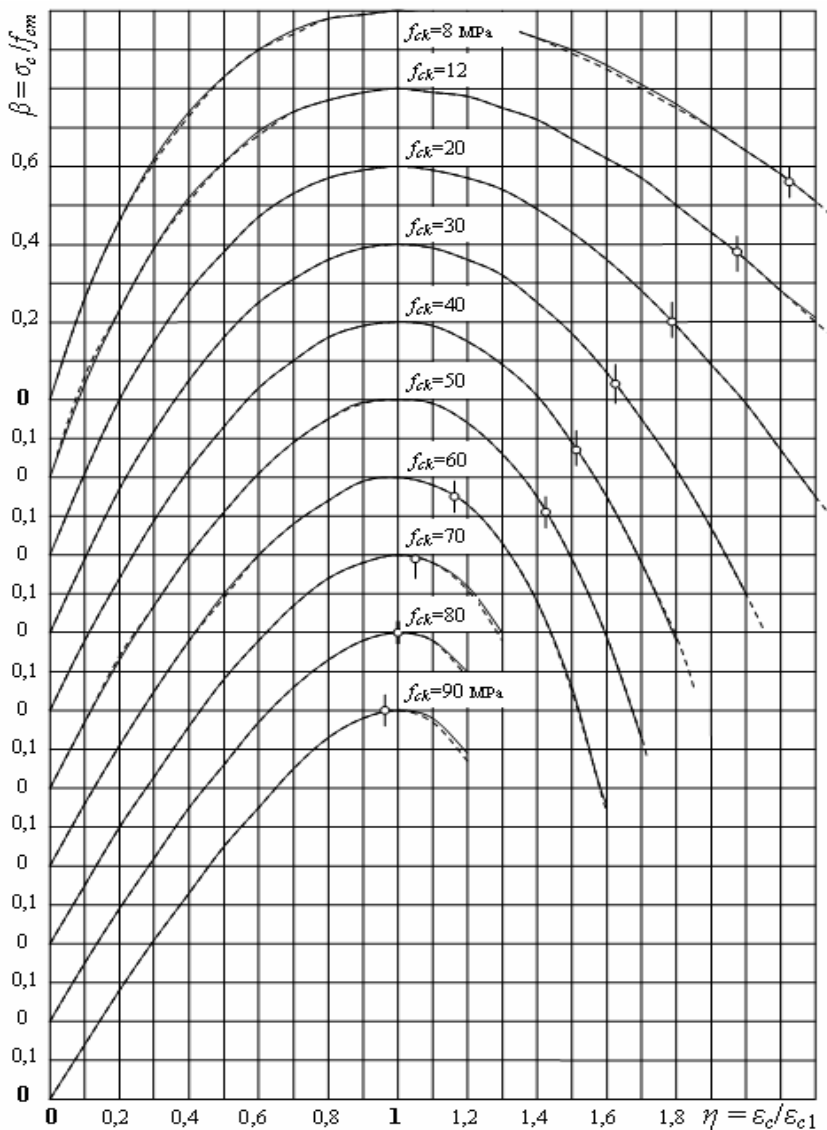


2 pav. Įtempių-deformacijų tarpusavio priklausomybė (16 ir 18)

2 pav. grafikas keičiamas 3 pav. grafiku [7], aprašytu (1) ir (19) lygtimis. Tokio pakeitimo rezultatas parodytas 4 pav. [7].



3 pav. Įtempių-deformacijų tarpusavio priklausomybė (1 ir 19)



4 pav. Įtempių σ_c santykinių reikšmių $\beta = \sigma_c / f_{cm}$ grafikai:

----- $\beta_{EN-2} = \sigma_c / f_{cm}$, kai σ_c iš (16) ir (18) formulių;

— $\beta_{ZI} = \sigma_c / f_{cm}$, kai σ_c iš (1) ir (19) formulių

Imama tokia penkianarė (2) formulės išraiška [7]:

$$v = 1 + c_1\eta + c_2\eta^2 + c_3\eta^3 + c_4\eta^4. \quad (19)$$

c_i koeficientų reikšmės [7]:

$$c_1 = \{2(\eta_r + 1)(1 - \eta_r)^3 - (\eta_r - 1)e_r + [(5\eta_r - 3)n_r + (3\eta_r - 5)\eta_r^3]v_{c1}\} : \eta_r(\eta_r - 1)^3 \quad (20)$$

$$c_2 = \{(\eta_r^2 + 4\eta_r + 1)(\eta_r - 1)^3 + (2\eta_r^2 - \eta_r - 1)e_r + 2[(1 + \eta_r - 5\eta_r^2)n_r + (5 - \eta_r - \eta_r^2)\eta_r^3]v_{c1}\} : \eta_r^2(\eta_r - 1)^3 \quad (21)$$

$$c_3 = \{2(\eta_r + 1)(1 - \eta_r)^3 - (\eta_r^2 + \eta_r - 2)e_r + [(5\eta_r^2 + 5\eta_r - 4)n_r + (4\eta_r^2 - 5\eta_r - 5)\eta_r^2]v_{c1}\} : \eta_r^2(\eta_r - 1)^3 \quad (22)$$

$$c_4 = \{(\eta_r - 1)^3 + (\eta_r - 1)e_r + 2[(1 - 2\eta_r)n_r + (2 - \eta_r)\eta_r^2]v_{c1}\} : \eta_r^2(\eta_r - 1)^3 \quad (23)$$

c_i koeficientai konkrečiai betono stiprio klasei yra pastovūs. Jų reikšmės yra iš anksto apskaičiuotos ir pateiktos 1 lentelėje.

$$\omega_{nc} = \frac{1}{2} + \frac{c_1}{3}\eta_c + \frac{c_2}{4}\eta_c^2 + \frac{c_3}{5}\eta_c^3 + \frac{c_4}{6}\eta_c^4, \quad (24)$$

$$\omega_{mc} = \frac{1}{3} + \frac{c_1}{4}\eta_c + \frac{c_2}{5}\eta_c^2 + \frac{c_3}{6}\eta_c^3 + \frac{c_4}{7}\eta_c^4. \quad (25)$$

Kai $\eta_c = 1$, ω_{nc} ir ω_{mc} parametų reikšmės yra iš anksto apskaičiuotos ir pateiktos 1 lentelėje. Jeigu įvertinama $\sigma_c - \varepsilon_c$ priklausomybės „krentančioji“ dalis, tuomet $\eta_c \neq 1$ ir ω_{nc} ir ω_{mc} parametų reikšmės apskaičiuojamos iš (24) ir (25) formulių. Ir šiuo atveju iš anksto apskaičiuotų ω_{nc} ir ω_{mc} reikšmių yra 2 lentelėje.

Kai mus domina tik „kylanti“ $\sigma_c - \varepsilon_c$ grafiko (3 pav.) šaka (dažnai ir dalis arba net visa „krentanti“ šaka iki ε_{cu1} – taip pat žr. 5 pav.), tuomet galima naudoti paprastesnes formules, būtent:

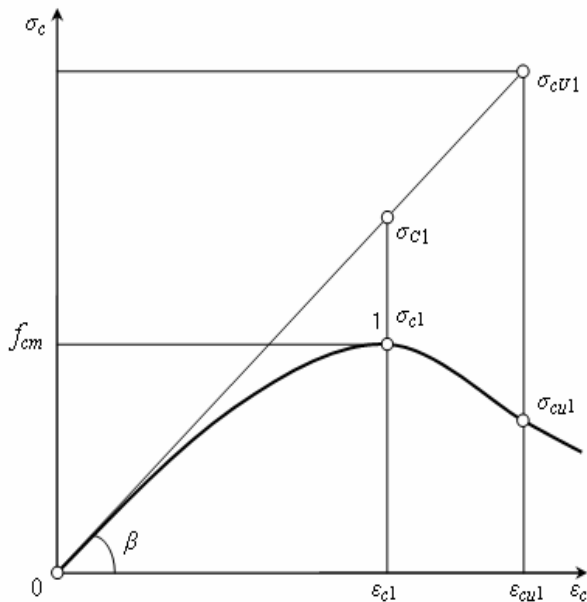
$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c (1 + c_1 \eta + c_2 \eta^2) = \nu_c E_c \varepsilon_c = \nu_c \sigma_{ce} \quad (26)$$

$$\nu_c = 1 + c_1 \eta + c_2 \eta^2 = 1 + (3\nu_{c1} - 2)\eta + (1 - 2\nu_{c1})\eta^2 \quad (27)$$

Čia:

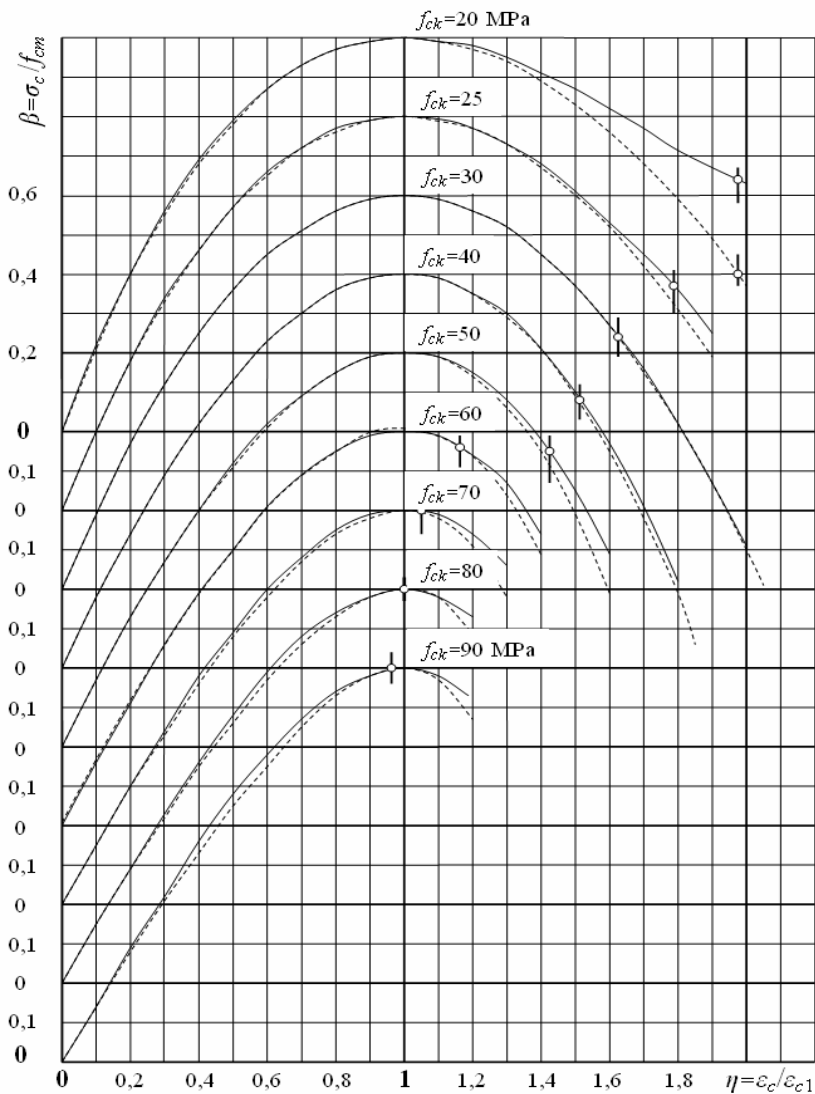
$$c_1 = 3\nu_{c1} - 2, \quad c_2 = 1 - 2\nu_{c1}; \quad E_c = \tan \beta;$$

$$\sigma_{C1} = E_c \varepsilon_{c1}; \quad \sigma_{c1} = \sigma_{cm} = f_{cm}; \quad \nu_{c1} = \sigma_{c1} / \sigma_{C1}.$$



5 pav. Įtempių-deformacijų tarpusavio priklausomybė (26 ir 27)

2 pav. grafiko pakeitimo 5 pav. grafiku, kai imamos paprastesnės (26 ir 27) formulės, rezultatas parodytas 6 pav. [8].



6 pav. Įtempių σ_c santykinių reikšmių $\beta = \sigma_c / f_{cm}$ grafikai:

----- $\beta_{EN-2} = \sigma_c / f_{cm}$, kai σ_c iš (16) ir (18) formulių;

—— $\beta_{ZI} = \sigma_c / f_{cm}$, kai σ_c iš (26) ir (27) formulių

Iš 4 bei 6 pav. grafikų matyti, kad įprasto stiprumo klasių betono 3 pav. grafiko „kylanti“ dalis (iki ε_{c1}), aprašoma 5-to laipsnio (1) ir (19) lygtimis, ir 5 pav. grafiko „kylanti“ dalis (iki ε_{c1}), aprašoma 3-čio laipsnio (26) ir (27) lygtimis, beveik sutampa.

Šio darbo autoriaus atlikti tyrimai parodė, kad grafiko „kylanti“ dalis (iki ε_{c1}), 3-čio laipsnio (26) lygtimi aprašoma gana tiksliai, kai $\nu_{c1} \geq 0,3$ ($f_{ck} \geq 12$ MPa), patenkinamai, – kai $\nu_{c1} \geq 0,25$ ($f_{ck} \geq 08$ MPa).

Tam tikrą 3-čio laipsnio (26) ir (27) lygčių „krentančios“ dalies intervalą galima nagrinėti, kai $\nu_{c1} \geq 0,39$, – $f_{ck} \geq 25$ MPa. Visą krentančios dalies intervalą iki ε_{cul} galima nagrinėti, kai $\nu_{c1} \geq 0,44$, – $f_{ck} \geq 35$ MPa.

3. Stačiakampio skerspjūvio sijų M_{Rd} stiprio apskaičiavimas ZI metodu, kai gniuždomos betono zonos įtempiai aprašomi ER-2 reglamentų kreivine diagrama

Siekiant turėti reikiamą skaičiavimų patikimumą, imamos arba charakteristinės parametrų reikšmės – rašomas k indeksas (patikimumas ne mažesnis, kaip 0,95), arba skaičiuotinės reikšmės – rašomas d indeksas (patikimumas artimas 1,00).

EN-2 (16) formulėje ir 2 pav. grafike panaudotos vidutinės betono stiprio reikšmės (patikimumas apie 0,50). Kadangi ZI metode pagrindu imama ta pati formulė, tai ir

$$F_{cm} = \int_{x_w}^0 \sigma_c b \delta x_c = \omega_{nc} E_c \varepsilon_w b x_w = \omega_{nc} E_c \varepsilon_w b d \xi_w \quad (28)$$

bei

$$M_{cm} = \int_{x_w}^0 \sigma_c b x_c \delta x_c = \omega_{mc} E_c \varepsilon_w b x_w^2 = \omega_{mc} E_c \varepsilon_w b d^2 \xi_w^2 \quad (29)$$

patikimumas yra toks pat, t.y. apie 0,50.

Jėgos ir momento skaičiuotinos F_{cd} ir M_{cd} reikšmės (patikimu-

mas artimas 1,0) gaunamos F_{cm} ir M_{cm} dalinant iš dalinio γ_{Fc} koeficiento:

$$F_{cd} = \frac{F_{cm}}{\gamma_{Fc}} = \frac{\omega_{nc} E_c \varepsilon_w b x_w}{\gamma_{Fc}} = \frac{\omega_{nc} E_c \varepsilon_w b d \xi_w}{\gamma_{Fc}} \quad (30)$$

$$M_{cd} = \frac{M_{cm}}{\gamma_{Fc}} = \frac{\omega_{mc} E_c \varepsilon_w b x_w^2}{\gamma_{Fc}} = \frac{\omega_{mc} E_c \varepsilon_w b d^2 \xi_w^2}{\gamma_{Fc}} \quad (31)$$

(30) ir (31) formulėse laikoma, kad, esant $\varepsilon_c = \varepsilon_w = \varepsilon_{lim}$, yra elemento gniuždomos zonos irimo ribinis būvis. Bendroju atveju elemento gniuždomos zonos betonui ε_{lim} reikšmė gali būti imama intervale nuo ε_{c1} iki ε_{cul} . Bet, apskaičiuojant lenkimo momento dydį nekarpytų sijų plastiškumo lankstuose (šarnyruose), gali būti imama ir $\varepsilon_w > \varepsilon_{cul}$. Toks skaičiavimas ZI metodu yra galimas.

ZI metodikoje imamas jėgos ir lenkimo momento dalinis koeficientas γ_{Fc} , o ne betono stiprio dalinis koeficientas γ_C . Taip daroma tam, kad galėtume panaudoti EN-2 kreivinę betono įtempių-deformacijų priklausomybę ir betono charakteristikas, šiuo metu naudojamas sijų stiprumo M_{Rd} skaičiuotinai reikšmei apskaičiuoti. Šio ptiemonės autorius analizavo ir kitokius variantus, bet čia rekomenduojamas variantas pasirodė priimtinausias. Matomai, galimas ir dar kitoks variantas. 2 pav. grafiką reikėtų pakeisti grafiku, kuriame vietoje f_{cm} ir E_{cm} būtų $f_{ck} = f_{cm} / \gamma_{Ck}$ ir $E_{ckm} = E_{cm} / \gamma_{Ck}$, t.y. charakteristinės reikšmės, kaip ir EN-2 Eurokodo 3.3 ir 3.4 paveiksluose. Tuomet skaičiuotinioms reikšmėms gauti būtų imamas ne γ_{Fc} , bet γ_C dalinis koeficientas, t.y. $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_C$ ir $E_{cdm} = E_{ckm} / \gamma_C$. Galbūt tiktų ir variantas, kai $f_{cd} = f_{cm} / \gamma_{Fc}$ ir $E_{cdm} = E_{cm} / \gamma_{Fc}$. Reikėtų šituos variantus patikrinti, imant $\gamma_{Ck} = 1,3$ ir $\gamma_{Fc} = \gamma_{Ck} \cdot \gamma_C = = 1,3 \cdot 1,5 = 1,95$.

M_{Rd} apskaičiavimo patikimumas, kurį užtikrina betono f_{cd} stiprio dalinis koeficientas $\gamma_C = 1,5$, straipsnyje siūlomoje metodikoje

gaunamas, kai $\gamma_{Fc} = 1,95$. Dėl ribojamos straipsnio apimties, be to ne toks yra ir šios mokymo priemonės tikslas, to įrodymas čia nepateikiamas.

3.1. Elementų negausaus armavimo atvejis

Negausiai (normaliai, įprastai, ekonomiškai) armuotais laikome elementus, kurių gniuždoma zona nesuyra anksčiau, negu tempiamos zonos armatūros įtempiai pasiekia takumo ribą. Jeigu gniuždoma zona suyra anksčiau, negu tempiamos zonos armatūros įtempiai pasiekia takumo ribą, elementai vadinami gausiai armuotais. Gausiai armuoti elementai yra ne ekonomiški.

Negausiai armuotuose sijiniuose elementuose, pradėjus tekėti armatūros medžiagai, armatūros įtempiai yra lygūs armatūros takumo ribai, t.y. $\sigma_s = \sigma_y$. Šio darbo autoriaus atlikti tyrimai parodė, kad, jeigu pradėjus tekėti armatūrai yra didelė gniuždomos zonos stiprumo atsarga, tai elemento faktiško irimo metu armatūros įtempiai gali žymiai viršyti takumo ribos įtempius. Esant armavimo koeficientui $\rho_l \approx 1,4\%$ ir betono stipriui $f_{cm} \approx 40$ MPa, faktiškas sijos irimo M_R momentas gautas apie 35% didesnis už irimo M_R momentą, apskaičiuota prie $\sigma_s = \sigma_y$. Bet tokio sijų būvio statmenieji plyšiai būna labai atsivėrę ir būna labai dideli kreiviai, todėl tokių sijų stiprio atsargų dažnai nepaisoma, t.y. apskaičiuojant M_R laikoma, kad $\sigma_s = \sigma_y = const$. Be to, tai leidžia labai supaprastinti M_R skaičiavimą.

Jeigu laikysime, kad elemento irimo metu $\sigma_s = \sigma_y = const$ ir kad tai atitinka ribinę elemento laikymo galią, t.y. kad tuo metu veikiantis lenkimo M momentas yra lygus elemento irimo M_R momentui, tai armatūros jėga bus

$$F_{sd} = \sigma_{yd} A_s = \frac{\nu_s E_s \varepsilon_{yk}}{\gamma_s} A_s = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} A_s. \quad (32)$$

Čia f_{yk} yra armatūros stiprio charakteristinė reikšmė.

Panaudojama sijos gniuždomos ir tempiamos zonų ribinių reikšmių pusiausvyros sąlyga – abiejų zonų ribiniai būviai. Kai $\varepsilon_s > \varepsilon_y$, tai ε_s deformacijai jau nebūtina taikyti plokščiųjų pjūvių hipotezę. Iš (14) gaunamos poveikių jėgų projekcijos lygtys

$$\left. \begin{aligned} \frac{\omega_{nc} \varepsilon_w E_c b d}{\gamma_{Fc}} \xi_w - \frac{f_{yk}}{\gamma_S} A_s - N &= 0, \\ \gamma_S \omega_{nc} E_c \varepsilon_w \xi_w - \gamma_{Fc} (v_S E_s \varepsilon_{yk} \rho_l + \gamma_S n) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

ir momentų apie F_{sd} lygtys

$$\begin{aligned} M_{Rd} = M_s + N \cdot e_s = F_{sd} z_c &= \frac{\omega_{nc} E_c \varepsilon_w b d \xi_w}{\gamma_{Fc}} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} \right) \xi_w \right] \cdot d = \\ &= \frac{[\omega_{nc} \xi_w - (\omega_{nc} - \omega_{mc}) \xi_w^2] \cdot E_c \varepsilon_w b d^2}{\gamma_{Fc}} \end{aligned} \quad (34)$$

arba

$$\left. \begin{aligned} \xi_w^2 - \frac{\omega_{nc}}{(\omega_{nc} - \omega_{mc})} \xi_w + \frac{\gamma_{Fc} (M + N \cdot e_s)}{(\omega_{nc} - \omega_{mc}) E_c \varepsilon_w b d^2} &= 0, \\ \xi_w^2 - \frac{\omega_{nc}}{(\omega_{nc} - \omega_{mc})} \xi_w + \frac{\gamma_{Fc} (m + n \cdot e_s)}{(\omega_{nc} - \omega_{mc}) E_c \varepsilon_w d} &= 0, \\ \xi_w^2 - u \xi_w + \frac{w}{\varepsilon_w} &= 0, \\ \xi_w^2 - u \xi_w + q &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

(33) ir (35) formulėse:

$$\begin{aligned} \rho_l &= A_s / b d, \\ m &= M / b d, \\ n &= N / b d \text{ ir} \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{\omega_{nc}}{(\omega_{nc} - \omega_{mc})}, \\ w &= \frac{\gamma_{Fc}(m + n \cdot e_s)}{(\omega_{nc} - \omega_{mc})E_c d}, \\ q &= \frac{w}{\varepsilon_w} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

$$\xi_w = u/2 - \sqrt{u^2/4 - q} \quad (37)$$

3.2. Elementų gausaus armavimo atvejis

Lenkiamų elementų gausaus armavimo atveju laikome atveją, kai $\varepsilon_s \leq \varepsilon_y$, t.y. kai gniuždomos zonos betonas pasiekia ribinę stiprio reikšmę anksčiau, negu tempiamos zonos armatūra, arba kartu. Kitaip sakant, elemento tempiama zona stipresnė už gniuždomą zoną arba abiejų zonų stiprumas yra vienodas. Svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad $\varepsilon_s = \varepsilon_y$ sąlyga priskiriama abiem atvejams: ir negausiam, ir gausiam armavimui. Praktiškai dažniausia būna naudinga tai priskirti negausaus armavimo atvejui, nes čia skaičiavimo formulės yra paprastesnės. Tai, kad $\varepsilon_s = \varepsilon_y$ sąlyga tenkina ir negausus, ir gausus armavimo atvejus, yra panaudota 4 punkte.

Gaminant iš anksto įtemptas konstrukcijas kartais lieka armatūros galai, kuriuos įtemptoms konstrukcijoms panaudoti netikslinga. Armatūros galus galima panaudoti neįtemptoms konstrukcijoms armuoti. Tokių konstrukcijų stiprumui apskaičiuoti ir konstrukcijoms su per mažai įtempta armatūra skaičiuoti tinka žemiau pateikiama gausiai armuotų elementų metodika ir formulės. Formules galima panaudoti įtemptųjų konstrukcijų minimaliam stipriosios armatūros įtempimui apskaičiuoti, kad būtų $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$, t.y. turėtume negausų (įprastą, normalų, ekonomišką) armavimą (žr. 8.2 punktą).

Kai $\sigma_{sk} < \sigma_{yk}$ (gausiai armuotų elementų atvejis, taip pat kiti atvejai, kai sijinių elementų gniuždomos zonos betono deformaciją pasiekia ribinę reikšmę anksčiau, negu tempiamos zonos armatūra

pasiekia takumo ribą, pavyzdžiui, panaudojama iš anksto neįtempta stiprioji armatūra), plokščiųjų pjūvių hipotezė taikoma visam skerspjūviui ties plyšiu (betonui ir armatūrai).

$$\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_s} = \frac{x_w}{d - x_w} = \frac{\xi_w}{1 - \xi_w} \quad (38)$$

$$F_{sd} = \frac{F_{sk}}{\gamma_S} = \frac{\nu_S E_s A_s}{\gamma_S} \frac{1 - \xi_w}{\xi_w} \varepsilon_w \quad (39)$$

Panaudojus $m = M/bd$ $n = N/bd$ ir $\rho_l = A_s/bd$ žymenis, gaunama

$$\left. \begin{aligned} N - \frac{\omega_{nc} E_c b d \xi_w}{\gamma_{Fc}} \varepsilon_w + \frac{\nu_S E_s A_s}{\gamma_S} \frac{1 - \xi_w}{\xi_w} \varepsilon_w &= 0 \\ n - \frac{\omega_{nc} E_c \xi_w}{\gamma_{Fc}} \varepsilon_w + \frac{\nu_S E_s \rho_l}{\gamma_S} \frac{1 - \xi_w}{\xi_w} \varepsilon_w &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_w^2 + \frac{\gamma_{Fc} (\nu_S E_s \varepsilon_w \rho_l - \gamma_S n)}{\gamma_S \omega_{nc} E_c \varepsilon_w} \xi_w - \frac{\gamma_{Fc} \nu_S E_s \rho_l}{\gamma_S \omega_{nc} E_c} &= 0 \\ \xi_w^2 + \left(s - \frac{r}{\varepsilon_w} \right) \xi_w - s &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{\gamma_{Fc} n}{\omega_{nc} E_c}, \\ s &= \frac{\gamma_{Fc} \nu_S E_s \rho_l}{\gamma_S \omega_{nc} E_c}, \\ p &= s - \frac{r}{\varepsilon_w} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

$$\xi_w = -p/2 + \sqrt{p^2/4 + s} \quad (43)$$

Kai armatūra metalinė, gausaus armavimo atveju, t.y. (39)–(42) formulėse $\nu_s = 1$. Jeigu $N = 0$, tuomet

$$p = s = \frac{\gamma_{Fc} \nu_s E_s \rho_l}{\gamma_s \omega_{nc} E_c}, \quad (44)$$

$$\xi_w = \frac{\sqrt{s^2 + 4s} - s}{2}. \quad (45)$$

Momentų apie F_{sd} lygtys yra tos pačios (34)–(37) lygtys, kaip ir negausiai armuotų elementų.

4. Ribos tarp sijų gausaus ir negausaus armavimo apskaičiavimas

(14) lygtis yra bendra gausiai ir negausiai armuotų lenkiamų elementų jėgų projekcijų statinės pusiausvyros lygtis. Bendra yra ir (30) formulė. Kai $\sigma_s = \sigma_y$, tai (14) lygtyje $F_{sd} = F_{yd}$ reikšmė abiem atvejais yra vienoda, skiriasi tik apskaičiavimo būdas. Todėl iš $F_{sd} = F_{yd}$ lygybės (32) ir (39) formulėse sąlygos

$$F_{sd} = F_{yd} = \frac{\nu_s E_s \varepsilon_{yk}}{\gamma_s} A_s = \frac{\nu_s E_s A_s}{\gamma_s} \frac{1 - \xi_w}{\xi_w} \varepsilon_w \quad (46)$$

gaunama ribos tarp negausaus ir gausaus armavimo ribinio gniuždomos zonos aukščio $\xi_{w,\lim}$ reikšmė

$$\xi_{w,\lim} = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_w + \varepsilon_{yk}} \quad (47)$$

Ribos tarp negausaus ir gausaus armavimo rodikliu gali būti ne tik $\xi_{w,\lim}$, bet ir ribinė armavimo koeficiento $\mu_{l,\lim}$ reikšmė. Iš to, kad $\xi_{w,\lim}$ reikšmė (33) ir (40) lygtyse yra vienoda, gauname

$$\begin{aligned}\rho_{l,\text{lim}} = \rho_l &= \frac{\gamma_S E_s \omega_{nc} E_c \varepsilon_w^2 - \gamma_{Fc} \gamma_S (E_s \varepsilon_w + f_{yk}) n}{\gamma_{Fc} f_{yk} (E_s \varepsilon_w + f_{yk})} = \\ &= \frac{\gamma_S \omega_{nc} E_c \varepsilon_w^2 - \gamma_{Fc} \gamma_S (\varepsilon_w + \varepsilon_{yk}) n}{\gamma_{Fc} E_s \varepsilon_{yk} (\varepsilon_w + \varepsilon_{yk})}.\end{aligned}\quad (48)$$

Atkreipiame dėmesį į tai, kad (47) ir (48) formulėse vietoje ε_{yk} negalima imti $\varepsilon_{yd} = \frac{\varepsilon_{yk}}{\gamma_S}$, nes γ_S koeficientas jau įvertintas (32), (33), (39) ir (40) lygtyse, todėl antrą kartą to daryti nereikia.

Šio straipsnio formulės galioja, kai $\xi_w \leq 1$. Kai $\xi_w = 1$, tai $\varepsilon_{yk} = 0$.

5. Gniuždomos zonos betono ribinių deformacijų ir įtempių diagramos įtaka sijinių elementų stiprumui

ZI metodas leidžia apskaičiuoti sijų gniuždomos zonos betono ε_w deformacijos dydžio įtaką sijų M_{Rd} stiprumui. Yra analizuoti penki kreivinės diagramos „krentančiosios“ dalies ilgio dydžiai, t.y. penkios sijų gniuždomos zonos betono ribinių deformacijų $\Delta \varepsilon_c = \varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}$ intervalo ε_w reikšmės: $\varepsilon_w = \varepsilon_{w1} = \varepsilon_{c1}$, $\varepsilon_w = \varepsilon_{w2} = \varepsilon_{c1} + \Delta \varepsilon_c / 4$, $\varepsilon_w = \varepsilon_{w3} = \varepsilon_{c1} + \Delta \varepsilon_c / 2$, $\varepsilon_w = \varepsilon_{w4} = \varepsilon_{c1} + 3\Delta \varepsilon_c / 4$ ir $\varepsilon_w = \varepsilon_{w5} = \varepsilon_{cu1}$. Šias deformacijas atitinkančios sijų stiprio M_{Rd} reikšmės yra paženklintos taip: $M_{Rd,c1,ZI} = M_{Rd,w1,ZI}$, $M_{Rd,w2,ZI}$, $M_{Rd,w3,ZI}$, $M_{Rd,w4,ZI}$ ir $M_{Rd,cu1,ZI} = M_{Rd,w5,ZI}$. c1 indeksas tapatus w1 indeksui, o cu1 – w5 indeksui. Vietoje w1 ir w5 indeksų rašant atitinkamai c1 ir cu1 indeksus atkreipiamas dėmesys į tai, kad čia yra ribinės, kraštinės, atitinkančios pradžią ir pabaigą EN-2 reglamente pateikiamos betono įtempių „krentančios“ šakos parametru reikšmės (2 ir 3 pav.).

3 lentelėje pateikiami gausiai armuotų sijų $M_{Rd,wi,ZI}$ ir $M_{Rd,wi,\text{lim}}$ santykiai. Šie momentai apskaičiuoti ZI metodu. Apskai-

čiuojant gausiai armuotų sijų $M_{Rd,wi,ZI}$, imta tikroji gniuždomos zonos x_w reikšmė iš (41) formulės. Šitose formulėse įvertinta tikroji sijos irimo stadijos ε_s reikšmė. Apskaičiuojant $M_{Rd,ci,lim}$, imta $x_w = x_{w,lim} = \xi_{w,lim} d$ iš (47), t.y. $M_{Rd,ci,lim}$ skaičiuotas pagal $x_{w,lim}$ gautą didžiausią sijos gniuždomos betono zonos $N_{Rd,ci,lim}$ jėgos reikšmę, atitinkančią $\varepsilon_w = \varepsilon_{wi}$ ir $x_w = x_{w,lim} = \xi_{w,lim} d$. Toks skaičiavimas (naudojamas net ir reglamentuose) nelogiškas, nes (47) formulėje $x_{w,lim}$ nepriklauso nuo armavimo procento. Iš 3 lentelės duomenų matome, kad šių momentų santykis priklauso ir nuo betono stiprio, ir nuo armavimo procento, ir nuo sijų betono gniuždomos zonos ribinės deformacijos $\varepsilon_w = \varepsilon_{c,lim}$, ir mūsų atveju kinta nuo 0,9477 iki 1,2774 (šie skaičiai 3 lentelėje paryškinti). Vadinasi, gausiai armuotų sijų M_{Rd} skaičiavimas, kai ribojamas sijų gniuždomos zonos aukštis neįvertinant armavimo procento, gali būti labai netikslus. Tiesa, šis netikslumas dažniausia mažina ne patikimumą, bet ekonomiškumą.

Buvo lyginami įvairiai apskaičiuotų M_{Rd} santykiai (4.1 ir 4.2 lent.). Kaip apskaičiuotos $M_{Rd,wi,ZI}$ reikšmės, paaiškinta aukščiau. M_{ES-2} reikšmės apskaičiuotos EN-2 metodu pagal EN-2 reglamentuose rekomenduojamas formules, kuriose imama stačiakampė gniuždomos zonos betono įtempių diagramą.

M_{Rd} momentų $M_{Rd,wi,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ santykių analizė parodė, kad didžiausia $M_{Rd} = M_{Rd,ZI,max}$ reikšmė, esant įvairiam sijos betono stiprumui ir įvairiam armavimo procentui, gaunama, esant įvairioms $\varepsilon_w = \varepsilon_{wi}$ reikšmėms. $M_{Rd,wi,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ santykiai, apskaičiuoti esant įvairioms $\sigma_c - \varepsilon_c$ diagramos „krentančios“ dalies ε_{wi} reikšmėms, kito nuo 0,9826 iki 1,1775. Šios kraštutinės reikšmės gautos atvejui, kai armavimo koeficientas $\rho_l \approx 1\%$: $M_{Rd,cu1,ZI} / M_{Rd,c1,ZI} = 0,9826$, kai $f_{ck} = 16$ MPa, ir $M_{Rd,w4} / M_{Rd,c1,ZI} = 1,1775$, kai $f_{ck} = 8$ MPa (4.1 lentelėje skaičiai pabraukti vienu brūkšniu). ε_{wi} kintant nuo ε_{c1} iki ε_{cu1} , $M_{Rd,ci,ZI}$ gali padidėti, priklausomai nuo armavimo procento ir betono stiprumo, iki 17,75%, sumažėti iki 1,74%.

Siekiant supaprastinti projektavimo skaičiavimus, galima imti $\varepsilon_{w1} = \varepsilon_{c1}$ reikšmę, o pagrindinėmis laikyti $M_{Rd,ci,ZI}$ reikšmes. Toks supaprastinimas bus ne patikimumo, bet ekonomiškumo sąskaita. Šiems skaičiavimams atlikti duomenys pateikiami 1 lentelėje. Realiausiomis laikytinos didžiausios $M_{Rd,ci,ZI}$ reikšmės. Joms apskaičiuoti reikalingi duomenys pateikiami 1 ir 2 lentelėse.

Sijų M_{Rd} apskaičiavimas NE-2 ir ZI metodais parodė, kad kreivinės įtempių diagramos pakeitimas EN-2 metode stačiakampe diagrama gali duoti dideles paklaidas, ypač kai sijų didelis armavimo koeficientas ir nedidelis betono stipris. Gautas negausiai armuotų sijų $M_{ES-2}/M_{Rd,ci,ZI}$ kitimas nuo 0,7696 iki 1,1467, o gausiai armuotų – nuo 0,6644 iki 1,0574 (4.1 ir 4.2 lentelėse skaičiai pabraukti dviem brūkšniais). Stiprumo paklaida siekia net 41,69%. Gausiai armuotų gelžbetoninių sijų M_{Rd} apskaičiavimas EN-2 metodu, imant stačiakampę diagramą ir $\xi_c = \xi_{lim}$, nepriimtinas dar ir dėl to, kad neįvertinama armavimo procento įtaka apskaičiuotam M_{Rd} dydžiui.

M_{Rd} apskaičiavimas pateikiamu ZI metodu yra ne tik korektiškas, logiškas, akivaizdus, bet ir nesudėtingas. Metodas gana universalus. Galima apskaičiuoti ne tik M_{Rd} , bet ir analizuoti M_{Rd} priklausomybę nuo $\varepsilon_w = \varepsilon_c$ dydžio. Metode matematiškai tiksliai realizuojamos realios prielaidos. Panaudojami tie patys, kaip ir EN-2 metode, betono stiprumo ir deformacijų parametrai.

Kai panaudojami autoriaus paruošti ir 1 bei 2 lentelėse pateikti duomenys (jų iš anksto galima paruošti ir daugiau), skaičiavimas siūlomu ZI metodu nėra imlesnis už skaičiavimą EN-2 metodu. Tai patikrinta praktiškai apskaičiuojant įprastai ir gausiai armuotų sijų M_{Rd} ir A_s . Šiuos taiginius iliustruoja žemiau 6 skyrelyje pateikiami pavyzdžiai.

6. Skaičiavimo ZI ir EN-2 metodais pavyzdžiai

ZI metodo EN-2 metodų panaudojimo iliustravimui imama 1 paveiksle parodyta gelžbetoninė sija. Sijos skerspjūvio matmenys: $b = 0,20$ m, $h = 0,50$ m, $d = 0,46$ m. $N = 0$.

Armatūra S400: $E_s = 200 \text{ GPa}$, $f_{sk} = f_{yk} = 400 \text{ MPa}$,

$$\varepsilon_{yk} = \frac{f_{sk}}{E_s} = \frac{400}{200} = 2\text{‰}; \quad f_{sd} = f_{yd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} = \frac{400}{1,1} = 363,6 \text{ MPa (STR'e$$

strypinei armatūrai $\gamma_s = 1,10$, EN-2 reglamentuose šiuo metu

$$\gamma_s = 1,15) \quad \varepsilon_{yd} = \frac{f_{sd}}{E_s} = \frac{363,6}{200} = 1,818\text{‰}.$$

6.1 Sijų M_{Rd} stiprio apskaičiavimo ZI ir EN-2 metodais pavyzdžiai

1 pavyzdys

Sijos betonas: $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$, $\varepsilon_w = \varepsilon_{c1} = 2,069 \cdot 10^{-3}$,
 $\varepsilon_{cu1} = \varepsilon_{cu3} = 0,0035$, kiti parametrai – iš 1 ir 2 lentelių.

$$A_s = 9,82 \text{ cm}^2, \quad \rho_l = 1,011\%, \quad F_{sd} = F_{yd} = f_{yd} A_s = 357 \text{ kN}.$$

Ribinė sijos gniuždomos zonos aukščio reikšmė iš (47) formulės

$$\xi_{\text{lim}1} = \frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{sk}} = \frac{2,069}{2,069 + 2} = 0,5085, \text{ kai skaičiuojama ZI metodu.}$$

$$[4 \text{ ir } 5] \text{ vadovėliuose } \xi_{\text{lim}3} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{yd}} = \frac{3,5}{3,5 + 1,818} = 0,6581, \text{ kai}$$

skaičiuojama EN-2 metodu.

(47) formulėje ε_w reikšmė imama tokia, kaip ir pusiausvyros formulėse; pavyzdžiui, gali būti $\varepsilon_w = \varepsilon_{c1}$ arba $\varepsilon_w = \varepsilon_{cu1} \cdot \varepsilon_{yk} = f_{yk} / E_s$, bet ne $\varepsilon_{sd} = \varepsilon_{yk} / \gamma_s$. Pažymėtina, kad ne visuomet tinka $\varepsilon_w = \varepsilon_{cu1}$. Rekomenduojame imti $\varepsilon_w = \varepsilon_{c1}$, nes ši reikšmė yra patikimesnė.

Irimo momento $M_{Rd} = M_{Rd,ZI}$ apskaičiavimas ZI metodu

Kai gniuždoma zona stipresnė už tempiamą zoną (negausiai armuoti elementai), neutraliosios ašies padėtis (ξ_w parametras) apskaičiuojama iš (33) lygties ($\nu_s < 1$ reikšmė nežinoma, bet ji ir nereikalinga). Kai gniuždoma zona silpnesnė už tempiamą zoną (gausiai

armuoti elementai), – ξ_w apskaičiuojama iš (45) lygties, – tuomet $\nu_s = 1$. Abiem atvejais M_{Rd} apskaičiuojamas iš (34) lygties.

Skaičiavimų apimčiai sumažinti galima panaudoti iš anksto paruoštus 1 ir 2 lentelių duomenis. Kai $f_{ck} = 25$ MPa, tai

$$\frac{10^3}{1,95} \omega_{nc1} \varepsilon_{c1} E_c = \frac{F_{cm}}{\gamma_{Fc} \xi_{c1} bd} = \frac{F_{cd}}{\xi_{c1} bd} = 11380 \text{ kPa} \quad - \text{ iš 1 lentelės,}$$

$$\frac{F_{cd}}{\xi_{c1}} = 11380 bd = 11380 \cdot 0,2 \cdot 0,46 = 1047 \text{ kN.}$$

Jeigu $F_{cd} = F_{sd} = 357$ kN, tai $\xi_{c1} = F_{sd} / 1047 = 0,3410 < \xi_{lim1} = 0,5085$. Iš 2 lentelės $1 - \omega_{mc1} / \omega_{nc1} = 0,377$. Iš (11)

$$z_c = \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} \right) \xi_{c1} \right] \cdot d = [1 - 0,377 \cdot 0,3410] \cdot 0,46 = 0,4009 \text{ m,}$$

$$M_{Rd} = M_{Rd,ZI} = N_{cd} z_c = 357 \cdot 0,4009 = 143,1 \text{ kN}\cdot\text{m.}$$

Irimo momento $M_{Rd} = M_{Rd,EN-2}$ apskaičiavimas EN-2 metodu

Palyginimui žemiau pateikiamas momento M_{Rd} apskaičiavimas pagal EN-2 formules.

Kai $f_{ck} = 25 < 50$ MPa, tai $\eta = 1$, $\lambda = 0,8$.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c = 0,9 \cdot 25 / 1,5 = 15 \text{ MPa,}$$

$$\eta \cdot f_{cd} bd = 1 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 0,46 = 1380 \text{ kN, } \varepsilon_{yd} = 1,815 \text{ ‰,}$$

$$\xi_{eff} = \frac{F_{sd}}{\eta \cdot f_{cd} bd} = \frac{357}{1380} = 0,2587, \quad \xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,2587}{0,8} = 0,3234 <$$

$$< \xi_{lim,u3} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{sd}} = \frac{3,5}{3,5 + 1,815} = 0,6581.$$

$$F_{cd} = F_{sd} = 357 \text{ kN, } z_c = \left(1 - \frac{\xi_{eff}}{2} \right) d = \left(1 - \frac{0,2587}{2} \right) \cdot 0,46 = 0,4005 \text{ m}$$

$$M_{Rd,EN-2} = F_{cd} z_c = 357 \cdot 0,4005 = 143,0 \text{ kN}\cdot\text{m.}$$

Šiame pavyzdžiuose negausaus armavimo atveju abiem metodais apskaičiuotų M_{Rd} reikšmės beveik vienodos:

$$\frac{M_{Ed,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{143,1}{143,0} = 1,001.$$

Bet gausaus armavimo atveju, kai betonas nestiprus, $\frac{M_{Ed,ZI}}{M_{Rd,EN-2}}$

santykis gali būti labai didelis. Pavyzdžiui, kai betono stipris $f_{ck} = 8 \text{ MPa}$ ir armavimo koeficientas $\rho_l = 2,134 \%$, gauta

$$\frac{M_{Ed,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = 1,505.$$

Toliau parodyta, kaip, panaudojant 1 ir 2 lent. duomenis, M_{Rd} reikšmė apskaičiuojama gausaus armavimo atveju.

2 pavyzdys

$$f_{ck} = 12 \text{ MPa}, \quad \varepsilon_w = \varepsilon_{c1} = 0,001772, \quad \varepsilon_{cu1} = \varepsilon_{cu3} = 0,0035.$$

$$A_s = 19,63 \text{ cm}^2, \quad \rho_l = 2,134 \%, \quad F_{sd} = f_{sd} A_s = 363,6 \cdot 10^6 \cdot 19,63 \cdot 10^{-4} = 713747 \text{ N} \approx 714 \text{ kN}.$$

$$\xi_{lim1} = \frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{sk}} = \frac{1,772}{1,772 + 2} = 0,4698, \text{ kai skaičiuojama ZI metodu.}$$

$$\xi_{lim3} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{yd}} = \frac{3,5}{3,5 + 1,818} = 0,6581, \text{ kai skaičiuojama EN-2}$$

metodu.

Irimo momento $M_{Rd} = M_{Rd,ZI}$ apskaičiavimas ZI metodu

$$\text{Iš 1 lentelės } \frac{10^3}{1,95} \omega_{nc1} \varepsilon_{c1} E_c = \frac{F_{cm}}{\gamma_{Fc} \xi_{c1} b d} = \frac{F_{cd}}{\xi_{c1} b d} = 7219 \text{ kPa.}$$

$$\frac{F_{cd}}{\xi_{c1}} = 7219 b d = 7219 \cdot 0,2 \cdot 0,46 = 664 \text{ kN.}$$

Jeigu $F_{cd} = F_{sd} = 714 \text{ kN}$, tai $\xi_{c1} = \frac{F_{cd}}{664} = \frac{714}{664} = 1,0753 > > \xi_{lim1} = 0,4698$ – gausiai armuota sija. Iš 1 lent. $\omega_{nc} = 0,280$,

$$E_c = 28,44 \text{ GPa}, \quad F_{cd}/\xi_{c1}bd = 7219 \text{ kPa}. \quad \text{Iš} \quad (44)$$

$$s = \frac{\gamma_{Fc} \nu_s E_s \rho_l}{\gamma_s \omega_{nc} E_c} = \frac{1,95 \cdot 1 \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 2,134 \cdot 10^{-2}}{1,1 \cdot 0,280 \cdot 28,44 \cdot 10^9} = 0,95012 \cong 0,950.$$

$$\text{Iš (45)} \quad \xi_w = \frac{\sqrt{s^2 + 4s} - s}{2} = \frac{\sqrt{0,950^2 + 4 \cdot 0,950} - 0,950}{2} = 0,6063.$$

$$F_{cd} = 7219bd\xi_{c1} = 7219 \cdot 0,2 \cdot 0,46 \cdot 0,6063 = 402,67 \text{ kN}.$$

$$\text{Iš (11)} \quad z_c = \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} \right) \xi_w \right] d = \left[1 - \left(1 - \frac{0,171}{0,280} \right) \cdot 0,6063 \right] \cdot 0,46 = 0,3518 \text{ m}.$$

$$M_{Rd,ZI} = F_{cd}z_c = 402,67 \cdot 0,3518 = 141,7 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

Irimo momento $M_{Rd} = M_{Rd,EN-2}$ *apskaičiavimas EN-2 metodu*

Kadangi $f_{ck} = 12 < 50 \text{ MPa}$, tai $\eta = 1$, $\lambda = 0,8$.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c = 0,9 \cdot 12 / 1,5 = 7,2 \text{ MPa},$$

$$\eta \cdot f_{cd}bd = 1 \cdot 7,2 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 0,46 = 864 \text{ kN}, \quad \varepsilon_{yd} = 1,815 \text{ ‰},$$

$$\xi_{eff} = \frac{F_{sd}}{\eta \cdot f_{cd}bd} = \frac{714}{864} = 0,8264, \quad \xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,8264}{0,8} = 1,0330 >$$

$$> \xi_{lim,u3} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{sd}} = \frac{3,5}{3,5 + 1,815} = 0,6581.$$

$$\text{Imama } \xi_{eff,lim} = 0,8 \cdot 0,6581 = 0,52648 \cong 0,5265$$

$$F_{cd} = \xi_{eff,lim} f_{cd}bd = 0,5265 \cdot 7,2 \cdot 0,2 \cdot 0,46 \cdot 10^3 = 348,8 \text{ kN}$$

$$z_c = \left(1 - \frac{\xi_{eff}}{2} \right) d = \left(1 - \frac{0,5265}{2} \right) \cdot 0,46 = 0,3389 \text{ m}$$

$$M_{Rd,EN-2} = F_{cd}z_c = 348,8 \cdot 0,3389 = 118,2 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

Šiame pavyzdyje gausaus armavimo atveju gautas net 20% skir-

$$\text{tumas: } \frac{M_{Ed,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{141,7}{118,2} = 1,1988 \cong 1,20.$$

Matome, kad skaičiavimas tikslesniu ir universalesniu ZI metodu ne ilgesnis už skaičiavimą EN-2 metodu. Turint galvoje dar ir tai, kad ZI metodu apskaičiuotos gausiai armuotų sijų M_{Rd} reikšmės daug tikslesnės už apskaičiuotas EN-2 metodu, pirmenybę reikėtų suteikti ZI metodui. Tuo labiau, kad ZI metodas yra pakankamai universalus. Galima spręsti ir daug kitokių uždavinių (žr. 5, 8 punktus, [10]). ZI metodu galima apskaičiuoti įtempių-deformacijų būvio parametrus nekarpytų sijų statmename pjūvyje plastiškumo lankstuoje (šarnyruose), kai $\varepsilon_w = \varepsilon_c \gg \varepsilon_{cu1}$.

Daugiau M_{Rd} apskaičiavimo pavyzdžių pateikta [9] straipsnyje ir priede.

6.2 Sijų armavimo (armatūros A_s skerspjūvio ploto) apskaičiavimo ZI ir EN-2 metodais pavyzdžiai

Abiem atvejais (nepriklausomai nuo armavimo intensyvumo) neutraliosios ašies padėtis (ξ_w parametras) apskaičiuojama iš (35) lygties, o armatūros A_s plotas negausiai armuotų elementų – iš (33) lygties, o gausiai armuotų – iš (40) lygties, imant $\nu_s = 1$.

A_{sd} apskaičiavimas ZI metodu

Sija ta pati, kaip ir skaičiuojant M_{Rd} (1 pav.).

$$M_{Ed} = 197,97 \text{ kN}\cdot\text{m}, \quad m = \frac{M_{Ed}}{bd} = \frac{197,97}{0,200 \cdot 0,460} = 2152 \text{ kN/m}.$$

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}, \quad f_{sd} = 364 \text{ MPa}.$$

$$\text{Iš 1 ir 2 lentelių } (\omega_{nc1} - \omega_{mc1})\varepsilon_w E_c = 8367 \text{ MPa}, \quad F_{cm}/\xi_{c1}bd =$$

$$10^3 \omega_{nc1}\varepsilon_{c1}E_c = 22193 \text{ kPa}, \quad \frac{\omega_{nc1} - \omega_{mc1}}{\omega_{nc1}} = 1 - \frac{\omega_{mc1}}{\omega_{nc1}} = \frac{\Delta\omega_{c1}}{\omega_{nc1}} = 0,377 \text{ ir}$$

$$u = \frac{\omega_{nc1}}{\omega_{nc1} - \omega_{mc1}} = \frac{1}{0,377} = 2,6525. \quad q = \frac{\gamma_{Fcd}m}{(\omega_{nc1} - \omega_{mc1})\varepsilon_w E_c d} =$$

$$= \frac{1,95 \cdot 2152}{8367 \cdot 0,46} = 1,0903. \text{ Iš (37) formulės } \xi_w = u/2 - \sqrt{u^2/4 - q} =$$

$$= 2,6525/2 - \sqrt{2,6525^2/4 - 1,0903} = 0,508546 \cong 0,5085 .$$

$$\xi_{\text{lim}1} = \frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{sk}} = \frac{2,069}{2,069 + 2} = 0,5085 .$$

$\xi_w \cong \xi_{\text{lim}1} = 0,5085$, todėl A_{sd} galima apskaičiuoti tiek iš (33), tiek iš (40) formulės.

$$\begin{aligned} \text{Iš 1 lentelės } 10^3 \omega_{nc1} \varepsilon_{c1} E_c &= F_{cm} / \xi_{c1} bd = 22193 \text{ kPa, o iš (26) -} \\ A_{sd} &= \frac{\omega_{nc1} \varepsilon_w E_c bd \xi_w}{\gamma_{Fc} f_{sd}} = \frac{22,193 \cdot 0,2 \cdot 0,46 \cdot 0,5086}{1,95 \cdot 364} = 0,001464 \text{ m}^2 = \\ &= 14,64 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{arba iš (43) formulės - } A_{sd} &= \frac{\omega_{nc1} E_c bd \xi_w}{\gamma_{Fc}} \cdot \frac{\xi_w}{1 - \xi_w} \cdot \frac{\gamma_S}{E_s} = \\ &= \frac{0,325 \cdot 33,05 \cdot 0,2 \cdot 0,46 \cdot 0,5086}{1,95} \cdot \frac{0,5086}{1 - 0,5086} \cdot \frac{1,1}{200} = 0,001466 \text{ m}^2 = \\ &= 14,66 \text{ cm}^2 . \end{aligned}$$

A_{sd} skaičiavimas EN-2 metodu

Sija ta pati, kaip skaičiuojant M_{Rd} .

$$M_{Ed} = 197,97 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Kai $f_{ck} = 25 < 50$ MPa, tai $\eta = 1$, $\lambda = 0,8$.

$$f_{cd} = \alpha_{ce} f_{ck} / \gamma_c = 0,9 \cdot 25 / 1,5 = 15 \text{ MPa.}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{\eta \cdot f_{cd} bd^2} = \frac{198,1 \cdot 10^3}{1 \cdot 15 \cdot 0,2 \cdot 0,46^2} = 0,312 .$$

$$\xi_{\text{eff}} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,312} = 0,3868 .$$

$$\xi = \frac{\xi_{\text{eff}}}{\lambda} = \frac{0,3868}{0,8} = 0,4835 <$$

$$< \xi_{\text{lim},u3} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{sd}} = \frac{3,5}{3,5 + 1,815} = 0,6581 .$$

$$A_{sd} = \frac{\eta \cdot f_{cd} bd \xi_{\text{eff}}}{f_{sd}} = \frac{1 \cdot 15 \cdot 0,2 \cdot 0,46 \cdot 0,3868}{364} = 14,66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 .$$

Šiuo atveju (negausus armavimas) abiem metodais gaunamas vienodas armatūros A_{sd} plotas. Bet gausaus armavimo atvejais, kai apskaičiuojama M_{Rd} reikšmė, atitinkanti $\xi = \xi_{lim}$ reikšmę galimas ir kitoks rezultatas. Tuomet skaičiavimo EN-2 metodu netikslumas (paklaida) gali būti labai reikšmingas ir didėja, mažėjant betono stiprumui ir didėjant armavimo koeficientui.

7. Sijų su armatūra ir (arba) lentynomis gniuždomoje zonoje M_{Rd} stiprio skaičiavimas

Apskaičiuojant M_{Rd} stiprį, tempiamos zonos briaunos ir lentynų įtakos nepaisome. Imama tik tempiamos armatūros jėga (7 pav.).

Gniuždomos zonos lentynų ir armatūros įtaką galima įvertinti arba ZI metodu, arba EN-2 metodu. Skaičiuojant ZI metodu, gniuždomos armatūros ir (arba) lentynos konsolių jėgą galima pridėti prie N jėgos arba skaičiuoti tiksliau, kaip parodyta [10] darbuose.

8. Formulių, skirtų gausiai armuotiems elementams skaičiuoti, kiti galimo panaudojimo pavyzdžiai

Kaip aukščiau jau minėta, ZI metodas gana universalus. Pagal vieningą metodiką galima spręsti daug uždavinių. Tai neiginčinas jo privalumas. Pavyzdžiui, galima teoriškai apskaičiuoti sijinio elemento įtempių-deformacijų būvio ties plyšiu ir tarp plyšių gniuždomos zonos aukščiu ir kitų parametrų reikšmes, kai naudojimo situacijoje veikia lenkimo M_{Ek} momentas, mažesnis už irimo M_{Rd} momentą (žr. 8.1 punktą). Daugiau šiam tikslui skirtos autoriaus teorinės medžiagos jau pateikta skelbti. Galima apskaičiuoti armatūros išankstinio įtempio racionalų dydį (žr. 8.2 punktą).

8.1. Sijinio elemento, veikiamo naudojimo situacijos lenkimo M_{Ek} momento, įtempių-deformacijų būvio ties plyšiu apskaičiavimas

Statinių konstrukcijų naudojimo metu sijinių elementų lenkimo M_{Ek} momentai neviršija $M_{Rd}/1.3$ ir $\sigma_s \leq \sigma_y$. Todėl 3.2 punkto formulės tinka įtempių-deformacijų būvio parametrams, kuriuos su-

kelia nuolatinėje situacijoje veikiantis lenkimo M_{Ek} momentas, apskaičiuoti. Tuomet žinoma M_{Ek} reikšmė, bet nežinoma nei ξ_w , nei ε_w , nei ε_s reikšmė. Neutraliosios ašies padėčiai (ξ_w reikšmei) apskaičiuoti STR 2.05.05:2005 reglamente naudojama gana sudėtinga empirinė formulė. ZI metode empirinės formulės nereikia, ξ_w reikšmė apskaičiuojama teoriškai iš (49) lygties, gautos išsprendus (35) ir (41) lygčių sistemą:

$$r\xi_w^3 - (ru - w)\xi_w^2 + sw\xi_w - sw = 0 \quad (49)$$

Apskaičiuojant plyšių plotį, labai svarbi yra ε_s reikšmė, o elemento su plyšiais kreivį – dar ir ε_w reikšmė. Kai ξ_w reikšmė jau žinoma, ε_w reikšmė apskaičiuojama iš (35) arba (41) lygties:

$$\varepsilon_w = \frac{w}{(u - \xi_w)\xi_w} \text{ arba } \varepsilon_w = \frac{r\xi_w}{\xi_w^2 + (\xi_w - 1)s} \quad (50)$$

ε_s reikšmė apskaičiuojama iš (38) lygties.

Kai $n = 0$, tuomet ir $r = 0$ – lygtis supaprastėja.

Kai skaičiavimai atliekami veikiant nuolatinės situacijos apkrovoms (patikimumas 95 %), reikia imti tokias dalinių koeficientų reikšmes: $\gamma_{Fck} = 1,3$ (bet ne $\gamma_{Fc} = 1,95$), o $\gamma_s = 1,0$.

ZI metodiką lenkiamų elementų neutraliosios ašies padėčiai nustatyti galima panaudoti ir atvejais, kai armatūros $\sigma_s - \varepsilon_s$ priklausomybė nėra tiesinė. Tuomet skaičiuojama nuoseklaus artėjimo būdu.

ν_s , ω_{nc} ir ω_{mc} reikšmės turi atitikti ε_w reikšmę. Jeigu ν_s , ω_{nc} ir ω_{mc} reikšmes reikia tikslinti, skaičiavimas kartojamas.

Kadangi nuolatinėje situacijoje $\varepsilon_w < \varepsilon_{cl}$, tai ω_{nc} ir ω_{mc} reikšmėms apskaičiuoti tinka ne tik (24) ir (25), bet ir žymiai paprastesnių formulių (žr. (26) ir (27) bei [8]):

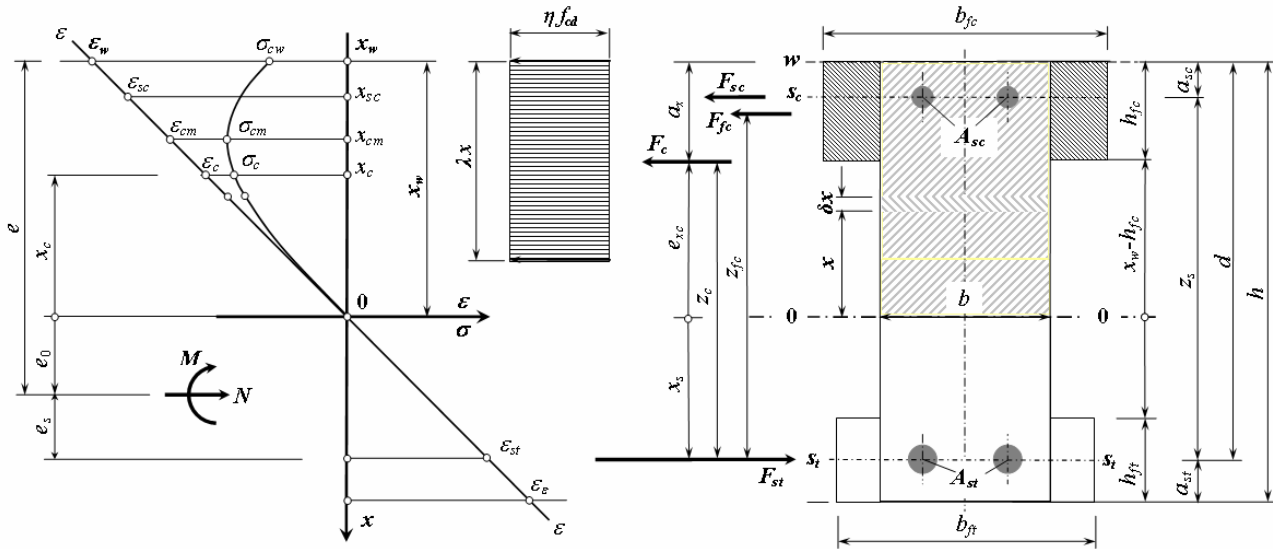
$$\left. \begin{aligned} \omega_{nc} &= \frac{1}{2} + \frac{c_1}{3} \eta_w + \frac{c_2}{4} \eta_w^2, \\ \omega_{nc} &= \frac{1}{3} + \frac{c_1}{4} \eta_w + \frac{c_2}{5} \eta_w^2 \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= 3\nu_{c1} - 2, \\ c_2 &= 1 - 2\nu_{c1} \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

8.2. Armatūros išankstinio įtempio apskaičiavimas

$M_{Ed} \leq M_{Rd}$ momento veikiamo konkretaus lenkiamo elemento su plyšiais tempiamoje zonoje išankstinį armatūros įtempį σ_p galima apskaičiuoti toki, kad $\Delta\sigma_{s,d} = \sigma_s - \sigma_p$ įtempis būtų norimo dydžio. Čia σ_s yra armatūros įtempis, matuojamas nuo armatūros deformavimo pradžios. Tam reikia, panaudojus gausaus armavimo formules (3.2 ir 8.1 punktai), apskaičiuoti $\sigma_s = \sigma_s$, imant $\nu_s = 1$, $P = 0$ ir orientacines ω_{nc} ir ω_{mc} reikšmes. Toliau apskaičiuojamas išankstinis $\sigma_{pI} = \sigma_s - \Delta\sigma_{s,d}$ įtempis. Išankstinio įtempimo $P_I = \sigma_{pI} A_s$ jėga pridedama prie išorinių jėgų, patikslinamos ω_{nc} ir ω_{mc} reikšmės ir vėl apskaičiuojamas jau $\sigma_s = \Delta\sigma_{sI}$. Jeigu šio $\Delta\sigma_{sI}$ apskaičiavimo tikslumas yra nepakankamas, t.y. $|\Delta\sigma_{sI} - \Delta\sigma_{s,d}|$ skirtumas yra per didelis, tai skaičiavimas kartojamas, imant $\sigma_{pII} = \sigma_{pI} + \Delta\sigma_{sI} - \Delta\sigma_{s,d}$, $P_{II} = \sigma_{pII} A_s$ ir patikslintas ω_{nc} ir ω_{mc} reikšmes. Skaičiavimas kartojamas, kol gaunamas norimas apskaičiuoto $\sigma_s = \Delta\sigma_{s,i}$ tikslumas.

Taip σ_p galima apskaičiuoti ir veikiant $M_{Ed} = M_{Rd}$ momentui, t.y. kai $\Delta\sigma_{s,d} = \sigma_y - \sigma_p$. Tuomet ω_{nc} ir ω_{mc} reikšmės yra iš anksto žinomos, jos nekinta ir, kartojant skaičiavimą, jų tikslinti nekinta. Taip galima apskaičiuoti minimalų išankstinį įtempį $\sigma_{p,\min}$.



7 pav. Sijos su lentynomis skerspjūvis, gniuždomos zonos įtempių diagramos ir naudojami žymenys

1 lentelė. Betono stiprumo ir deformacinės savybės

| Parametrai | Betono stiprio klasė | | | | | | | | | |
|---|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 8 | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| f_{ck} , MPa | | | | | | | | | | |
| $f_{cm} = f_{ck} + 8$, MPa | 16 | 20 | 24 | 28 | 33 | 38 | 43 | 48 | 53 | 58 |
| $E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0,3}$, GPa | 25,33 | 27,09 | 28,61 | 29,96 | 31,48 | 32,84 | 34,08 | 35,22 | 36,28 | 37,28 |
| $E_c = 1,05E_{cm}$, GPa | 26,60 | 28,44 | 30,04 | 31,54 | 33,05 | 34,48 | 35,78 | 36,98 | 38,10 | 39,14 |
| $\varepsilon_{c1} = 0,7f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$, ‰ | 1,653 | 1,772 | 1,875 | 1,967 | 2,069 | 2,162 | 2,246 | 2,324 | 2,397 | 2,465 |
| $\nu_{c1} = f_{cm}/(1,05E_{cm}\varepsilon_{c1})$ | 0,364 | 0,397 | 0,426 | 0,453 | 0,483 | 0,510 | 0,535 | 0,558 | 0,580 | 0,601 |
| c_1 | -1,036 | -0,889 | -0,765 | -0,661 | -0,555 | -0,471 | -0,404 | -0,344 | -0,283 | -0,207 |
| c_2 | 0,550 | 0,379 | 0,241 | 0,134 | 0,040 | -0,018 | -0,055 | -0,089 | -0,148 | -0,265 |
| c_3 | -0,173 | -0,107 | -0,056 | -0,023 | -0,003 | -0,001 | -0,005 | 0,003 | 0,046 | 0,158 |
| c_4 | 0,023 | 0,014 | 0,007 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | -0,002 | -0,011 | -0,035 | -0,084 |
| $\omega_{nc} = \omega_{nc1}$ | 0,261 | 0,280 | 0,296 | 0,309 | 0,325 | 0,338 | 0,351 | 0,362 | 0,372 | 0,382 |
| $\varepsilon_w = \varepsilon_{c1}$, | | | | | | | | | | |
| $\omega_{mc} = \omega_{mc1}$ | 0,159 | 0,171 | 0,182 | 0,191 | 0,202 | 0,212 | 0,220 | 0,228 | 0,236 | 0,243 |
| $\eta_w = \varepsilon_w/\varepsilon_{c1} = 1$ | | | | | | | | | | |
| $10^3 \Delta\omega_{nc1}\varepsilon_{c1}E_c$, kPa | 4513 | 5458 | 6378 | 7276 | 8367 | 9427 | 10456 | 11464 | 12457 | 13448 |
| $F_{cm}/\xi_{c1}bd = 10^3 \omega_{nc1}\varepsilon_{c1}E_c$, kPa | 11496 | 14077 | 16618 | 19121 | 22193 | 25212 | 28171 | 31092 | 33981 | 36869 |
| $\frac{F_{cd}}{\xi_{c1}bd} = \frac{10^3 \omega_{nc1}\varepsilon_{c1}E_c}{1,95}$, kPa | 5896 | 7219 | 8522 | 9806 | 11381 | 12929 | 14447 | 15945 | 17427 | 18907 |

2 lentelė. Lenkiamų elementų gniuždomos betono zonos įtempių-deformacijų diagramos su „krentančia“ dalimi parametrai

| Parametrai | | Betono stiprio klasė | | | | | | | | | |
|--|---|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_{ck} , MPa | | 8 | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| $\varepsilon_{c1} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$, ‰ | | 1,653 | 1,772 | 1,875 | 1,967 | 2,069 | 2,162 | 2,246 | 2,324 | 2,397 | 2,465 |
| $\omega_{nc} = \omega_{nc1}$ | $\varepsilon_w = \varepsilon_{c1}$, | 0,261 | 0,280 | 0,296 | 0,309 | 0,325 | 0,338 | 0,351 | 0,362 | 0,372 | 0,382 |
| $\omega_{mc} = \omega_{mc1}$ | $\eta_w = \varepsilon_w / \varepsilon_{c1}$ | 0,159 | 0,171 | 0,182 | 0,191 | 0,202 | 0,212 | 0,220 | 0,228 | 0,236 | 0,243 |
| $\omega_{mc1} / \omega_{nc1} = e_{0,c1} / \xi_w d$ (m) | | 0,607 | 0,612 | 0,616 | 0,619 | 0,623 | 0,626 | 0,629 | 0,631 | 0,633 | 0,635 |
| $\Delta\omega_{c1} = \omega_{nc1} - \omega_{mc1}$ | | 0,102 | 0,108 | 0,113 | 0,118 | 0,122 | 0,126 | 0,130 | 0,134 | 0,136 | 0,139 |
| $1 - \omega_{mc1} / \omega_{nc1} = \Delta\omega_{c1} / \omega_{nc1}$ | | 0,393 | 0,388 | 0,384 | 0,381 | 0,377 | 0,374 | 0,371 | 0,369 | 0,367 | 0,365 |
| $\Delta\varepsilon_w = \Delta\varepsilon_c = 3,5 - \varepsilon_{c1}$, ‰ | | 1,847 | 1,728 | 1,625 | 1,533 | 1,431 | 1,338 | 1,258 | 1,176 | 1,103 | 1,035 |
| $\omega_{nc} = \omega_{nw2}$ | $\varepsilon_w = \varepsilon_{w2}$, | 0,221 | 0,242 | 0,261 | 0,278 | 0,296 | 0,312 | 0,327 | 0,340 | 0,353 | 0,364 |
| $\omega_{mc} = \omega_{mw2}$ | $\eta_w = \varepsilon_{w2} / \varepsilon_{c1}$ | 0,130 | 0,145 | 0,157 | 0,168 | 0,181 | 0,192 | 0,202 | 0,212 | 0,221 | 0,229 |
| $\omega_{nc} = \omega_{nw3}$ | $\varepsilon_w = \varepsilon_{w3}$, | 0,187 | 0,210 | 0,230 | 0,248 | 0,268 | 0,286 | 0,303 | 0,318 | 0,332 | 0,345 |
| $\omega_{mc} = \omega_{mw3}$ | $\eta_w = \varepsilon_{w3} / \varepsilon_{c1}$ | 0,107 | 0,121 | 0,134 | 0,146 | 0,160 | 0,173 | 0,184 | 0,195 | 0,204 | 0,214 |
| $\omega_{nc} = \omega_{nw4}$ | $\varepsilon_w = \varepsilon_{w4}$, | 0,158 | 0,181 | 0,201 | 0,219 | 0,240 | 0,260 | 0,278 | 0,294 | 0,310 | 0,324 |
| $\omega_{mc} = \omega_{mw4}$ | $\eta_w = \varepsilon_{w4} / \varepsilon_{c1}$ | 0,087 | 0,101 | 0,114 | 0,126 | 0,140 | 0,153 | 0,165 | 0,176 | 0,187 | 0,197 |
| $\omega_{nc} = \omega_{ncu1}$ | $\varepsilon_w = \varepsilon_{cu1}$, | 0,133 | 0,154 | 0,174 | 0,192 | 0,213 | 0,233 | 0,252 | 0,269 | 0,286 | 0,301 |
| $\omega_{mc} = \omega_{mcu1}$ | $\eta_w = \varepsilon_{cu1} / \varepsilon_{c1}$ | 0,070 | 0,083 | 0,094 | 0,106 | 0,120 | 0,133 | 0,145 | 0,157 | 0,168 | 0,179 |

3 lentelė. Gausiai armuotų sijų $M_{Rd,wi,ZI}$ ir $M_{Rd,wi,lim}$ santykiai.

Apskaičiuojant $M_{Rd,wi,ZI}$, imta faktiška gniuždomos zonos $x_w = \xi_w d$ reikšmė iš (19) formulės,

o apskaičiuojant $M_{Rd,wi,lim}$, imta $x_w = x_{w,lim} = \xi_{w,lim} d$ iš $\xi_{w,lim} = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_w + \varepsilon_{yk}}$

| f_{ck} (MPa) | | 8 | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
|-------------------|----------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\rho_1 = 1.01\%$ | $M_{Rd,c1,ZI} / M_{Rd,c1,lim}$ | 1,10277 | 1,03622 | | | | | | |
| | $M_{Rd,w2,ZI} / M_{Rd,w2,lim}$ | 1,03998 | | | | | | | |
| | $M_{Rd,w3,ZI} / M_{Rd,w3,lim}$ | 0,94771 | | | | | | | |
| $\rho_1 = 1.60\%$ | $M_{Rd,c1,ZI} / M_{Rd,c1,lim}$ | 1,20757 | 1,14090 | 1,08826 | 1,04448 | 1,00066 | | | |
| | $M_{Rd,w2,ZI} / M_{Rd,w2,lim}$ | 1,12941 | 1,08017 | 1,03936 | 1,00410 | | | | |
| | $M_{Rd,w3,ZI} / M_{Rd,w3,lim}$ | 1,08696 | 1,04717 | 1,01279 | | | | | |
| | $M_{Rd,w4,ZI} / M_{Rd,w4,lim}$ | 1,06306 | 1,02982 | | | | | | |
| | $M_{Rd,cu1,ZI} / M_{Rd,cu1,lim}$ | 0,99271 | 1,02185 | | | | | | |
| $\rho_1 = 2.13\%$ | $M_{Rd,c1,ZI} / M_{Rd,c1,lim}$ | 1,27741 | 1,21175 | 1,15963 | 1,11611 | 1,07230 | | | |
| | $M_{Rd,w2,ZI} / M_{Rd,w2,lim}$ | 1,18750 | 1,14130 | 1,10255 | 1,06873 | 1,03366 | 1,00304 | | |
| | $M_{Rd,w3,ZI} / M_{Rd,w3,lim}$ | 1,13582 | 1,10034 | 1,06909 | 1,04083 | 1,01074 | | | |
| | $M_{Rd,w4,ZI} / M_{Rd,w4,lim}$ | 1,10374 | 1,07570 | 1,04971 | 1,02526 | | | | |
| | $M_{Rd,cu1,ZI} / M_{Rd,cu1,lim}$ | 1,08204 | 1,06042 | 1,03901 | 1,01789 | | | | |

4.1 lentelė. ZI ir EN-2 metodais apskaičiuotų M_{Rd} momentų santykiai. Paryškintos reikšmės, kai $x_w > x_{w,\lim} = \xi_{w,\lim} d$, pasvirusios – konkretaus betono stiprio didžiausių santykių reikšmės

| f_{ck} , MPa | | 8 | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|-------------------|--------------------------------|---------------|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\rho_l = 0.44\%$ | $M_{Rd,w2,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,0041 | 1,0033 | 1,0028 | 1,0026 | 1,0020 | 1,0017 | 1,0015 | 1,0013 | 1,0012 | 1,0010 |
| | $M_{Rd,w3,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,0026 | 1,0026 | 1,0025 | 1,0025 | 1,0022 | 1,0020 | 1,0018 | 1,0017 | 1,0016 | 1,0014 |
| | $M_{Rd,w4,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 0,9966 | 0,9984 | 1,0000 | 1,0003 | 1,0007 | 1,0009 | 1,0011 | 1,0012 | 1,0012 | 1,0012 |
| | $M_{Rd,cu1,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 0,9858 | 0,9907 | 0,9937 | 0,9959 | 0,9973 | 0,9984 | 0,9991 | 0,9996 | 1,0000 | 1,0002 |
| | $M_{Rd,ZI,max} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,0041 | 1,0033 | 1,0028 | 1,0026 | 1,0022 | 1,0020 | 1,0018 | 1,0017 | 1,0016 | 1,0014 |
| | $M_{ES-2} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 0,9332 | 0,9727 | 0,9880 | 0,9952 | 0,9997 | 1,0019 | 1,0031 | 1,0037 | 1,0041 | 1,0043 |
| | $M_{ES-2} / M_{Rd,ZI,max}$ | 0,9294 | 0,9694 | 0,9852 | 0,9926 | 0,9975 | 0,9999 | 1,0013 | 1,0020 | 1,0025 | 1,0028 |
| $\rho_l = 1.01\%$ | $M_{Rd,w2,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1120 | 1,0790 | 1,0077 | 1,0069 | 1,0054 | 1,0045 | 1,0039 | 1,0034 | 1,0100 | 1,0026 |
| | $M_{Rd,w3,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1013 | 1,0767 | 1,0068 | 1,0068 | 1,0058 | 1,0053 | 1,0048 | 1,0044 | 1,0040 | 1,0037 |
| | $M_{Rd,w4,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1775 | 1,0641 | 0,9986 | 1,0009 | 1,0017 | 1,0025 | 1,0028 | 1,0030 | 1,0031 | 1,0031 |
| | $M_{Rd,cu1,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1397 | 1,0409 | <u>0,9826</u> | 0,9889 | 0,9928 | 0,9957 | 0,9976 | 0,9990 | 0,9999 | 1,0006 |
| | $M_{Rd,ZI,max} / M_{Rd,c1,ZI}$ | <u>1,1775</u> | 1,0790 | 1,0077 | 1,0069 | 1,0058 | 1,0053 | 1,0048 | 1,0044 | 1,0040 | 1,0037 |
| | $M_{ES-2} / M_{Rd,c1,ZI}$ | <u>0,7696</u> | 0,9718 | 0,9668 | 0,9869 | 0,9991 | 1,0050 | 1,0081 | 1,0098 | 1,0107 | 1,0110 |
| | $M_{ES-2} / M_{Rd,ZI,max}$ | 0,6536 | 0,9006 | 0,9594 | 0,9801 | 0,9934 | 0,9997 | 1,0033 | 1,0053 | 1,0066 | 1,0073 |

4.2 lentelė. ZI ir EN-2 metodais apskaičiuotų M_{Rd} momentų santykiai. Paryškintos reikšmės, kai

$x_w > x_{w,lim} = \xi_{w,lim} d$, pasvirusios – konkretaus betono stiprio didžiausių santykių reikšmės

| f_{ck} , MPa | | 8 | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|-------------------|--------------------------------|----------------------|---------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\rho_l = 1.60\%$ | $M_{Rd,w2,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1028 | 1,0993 | 1,0952 | 1,0939 | 1,0099 | 1,0072 | 1,0062 | 1,0053 | 1,0047 | 1,0041 |
| | $M_{Rd,w3,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1535 | 1,1537 | 1,1518 | <i>1,1034</i> | <i>1,0106</i> | <i>1,0084</i> | <i>1,0076</i> | <i>1,0069</i> | <i>1,0063</i> | <i>1,0057</i> |
| | $M_{Rd,w4,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1579 | 1,1664 | <i>1,1702</i> | 1,0929 | 1,0041 | 1,0039 | 1,0045 | 1,0048 | 1,0048 | 1,0048 |
| | $M_{Rd,cu1,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,0596 | 1,1395 | 1,1389 | 1,0714 | 0,9897 | 0,9932 | 0,9962 | 0,9984 | 0,9999 | 1,0009 |
| | $M_{Rd,ZI,max} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1579 | 1,1664 | 1,1702 | 1,1034 | 1,0106 | 1,0084 | 1,0076 | 1,0069 | 1,0063 | 1,0057 |
| | $M_{ES-2} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 0,7028 | 0,8826 | 1,0191 | 1,0679 | 0,9998 | 1,0080 | 1,0129 | 1,0154 | 1,0165 | 1,0171 |
| | $M_{ES-2} / M_{Rd,ZI,max}$ | 0,6069 | 0,7567 | 0,8709 | 0,9678 | 0,9894 | 0,9996 | 1,0053 | 1,0084 | 1,0102 | 1,0113 |
| $\rho_l = 2.13\%$ | $M_{Rd,w2,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,0962 | 1,0936 | 1,0903 | 1,0896 | 1,0823 | 1,0780 | 1,0165 | 1,0075 | 1,0065 | 1,0057 |
| | $M_{Rd,w3,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1395 | 1,1414 | 1,1410 | 1,1423 | 1,1356 | <i>1,0871</i> | <i>1,0186</i> | <i>1,0097</i> | <i>1,0088</i> | <i>1,0080</i> |
| | $M_{Rd,w4,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1365 | 1,1471 | 1,1534 | 1,1603 | <i>1,1538</i> | 1,0802 | 1,0141 | 1,0067 | 1,0068 | 1,0067 |
| | $M_{Rd,cu1,ZI} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,0918 | 1,1134 | 1,1286 | 1,1433 | 1,1298 | 1,0637 | 1,0023 | 0,9977 | 0,9998 | 1,0013 |
| | $M_{Rd,ZI,max} / M_{Rd,c1,ZI}$ | 1,1395 | 1,1471 | 1,1534 | 1,1603 | 1,1538 | 1,0871 | 1,0186 | 1,0097 | 1,0088 | 1,0080 |
| | $M_{ES-2} / M_{Rd,c1,ZI}$ | <u>0,6644</u> | 0,8310 | 0,9564 | <u>1,0574</u> | <u>1,1467</u> | 1,0864 | 1,0262 | 1,0217 | 1,0233 | 1,0239 |
| | $M_{ES-2} / M_{Rd,ZI,max}$ | 0,5830 | 0,7245 | 0,8292 | 0,9113 | 0,9938 | 0,9993 | 1,0075 | 1,0118 | 1,0144 | 1,0158 |

Literatūra

1. EN 1992-1-1:2004:E. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. 225p.
2. STR 2.05.05:2005. Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. Vilnius: Rekona, 2005. 123p.
3. LST EN 1992-1-1:2005. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės. 232p.
4. G. Marčiukaitis, J. Valivonis. Statybinės konstrukcijos ir jų projektavimo pagal euronormas pagrindai: vadovėlis. Vilnius: Technika, 2010. 392 p.
5. G. Marčiukaitis, B. Jonaitis, V. Papinigis, J. Valivonis. gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas pagal euronormas: vadovėlis. Vilnius: Technika, 2007. 340 p.
6. Židonis I. Alternative method for the calculation of stress-strain state parameters in normal sections of structural members. *Mechanika*, 2007, 5(67), p.24-32.
7. Židonis I. A simple-to-integrate formula of stress as a function of strain in concrete and its description procedure. *Mechanika*, 2007, 4(66), p.23-30.
8. Židonis I., Venckevičius V. Simplified variant of easily integratable stress-strain relationship for concrete. *Lietuvos taikomųjų mokslų akademijos mokslo darbai. Tarptautinis inovacinis taikomųjų mokslų darbu žurnalas*, 2007, 4, p.71-77.
9. Tankūnas M., Urbonas V., Židonis I. Sijų stiprumo statmename pjūvyje apskaičiavimas pagal kreivinę euronormų gniuždomo betono įtempių diagramą. *Jaunųjų mokslininkų darbai*, 2012, Nr.3 (36), p. 140-148.
10. <http://techno.su.lt/~zidonis/>

Priedas

(Daugiau M_{Rd} stiprio sijos skerspjūvyje apskaičiavimo ZI metodu ir pagal EN-2 formules pavyzdžių [9])

Čia žemiau, skaičiuojant gausiai armuotų sijų M_{Rd} stiprį ZI metodu, imta ne faktiška ξ_w reikšmė, bet $\xi_w = \xi_{lim}$.

Sijos betonas $f_{ck} = 25$ MPa.

Armavimas:

$$f_{sd} = f_{yd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} = \frac{400}{1,1} = 363,6 \cong 364 \text{ MPa}, \quad \varepsilon_{sd} = \varepsilon_{yd} = 1,815 \text{ ‰}.$$

Sijos (1 pav.) skerspjūvio matmenys: $b = 0,20$ m, $h = 0,50$ m, $d = 0,46$ m.

$$\xi_{lim1} = \frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{sd}} = \frac{2,1}{2,1 + 1,815} = 0,5364,$$

$$\xi_{lim,u3} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{sd}} = \frac{3,5}{3,5 + 1,815} = 0,6581.$$

M_{Rd} skaičiavimas ZI metodu

$$F_{sd} = 146,2 \text{ kN}, \quad A_s = 0,402 \text{ cm}^2, \quad \rho_l = 0,00437.$$

$$\text{Iš 1 lentelės } \frac{F_{cd}}{\xi_{c1} b d} = 11381 \text{ kPa.}$$

$$\frac{F_{cd}}{\xi_{c1}} = 11391 b d = 11381 \cdot 0,2 \cdot 0,46 = 1048 \text{ kN.}$$

$$\xi_{c1} = \frac{F_{cd}}{1048} = \frac{F_{sd}}{1048} = \frac{146,2}{1048} = 0,1395 < \xi_{lim1} = 0,5364.$$

$$F_{cd} = F_{sd} = 146,2 \text{ kN.}$$

$$\text{Iš 2 lentelės } \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}}\right) = 0,377.$$

$$z_c = \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_{mc}}{\omega_{nc}} \right) \xi_{c1} \right] \cdot d = [1 - 0,377 \cdot 0,1395] \cdot 0,46 = 0,4357 \text{ m} .$$

$$M_{Rd} = M_{Rd,ZI} = N_{cd} z_c = 146,2 \cdot 0,4357 = 63,70 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Jeigu $F_{sd} = 357,1 \text{ kN}$, $A_s = 9,821 \text{ cm}^2$, $\rho_l = 0,01068$, tai

$$\xi_{c1} = \frac{357,1}{1048} = 0,3407, \quad z_c = 0,4007 \text{ m}, \quad M_{Rd,ZI} = 143,1 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

Jeigu $F_{sd} = 533,8 \text{ kN}$, $A_s = 14,681 \text{ cm}^2$, $\rho_l = 0,01596$, tai

$$\xi_{c1} = \frac{533,8}{1048} = 0,5093, \quad z_c = 0,3713 \text{ m}, \quad M_{Rd,ZI} = 198,1 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

Jeigu $F_{sd} = 713,7 \text{ kN}$, $A_s = 19,629 \text{ cm}^2$, $\rho_l = 0,02134$, tai

$$\xi_{c1} = \frac{713,7}{1048} = 0,6810 :$$

kai imama $\xi_{lim} = \xi_{lim1} = 0,5364$, tai $F_{cd} = 487,2$, $z_c = 0,3666 \text{ m}$,
 $M_{Rd,ZI} = 178,6 \text{ kN}\cdot\text{m}$;

kai imama $\xi_{lim} = \xi_{lim,u3} = 0,6581$, tai $F_{cd} = 689,7 \text{ kN}$
 $z_c = 0,3454 \text{ m}$, $M_{Rd,ZI3} = 238,3 \text{ kN}\cdot\text{m}$.

M_{Rd} skaičiavimas pagal EN-2 formules

Kai $f_{ck} = 25 < 50 \text{ MPa}$, tai $\eta = 1$, $\lambda = 0,8$.

$$A_s = 0,402 \text{ cm}^2, \quad \rho_l = 0,00437$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c = 0,9 \cdot 25 / 1,5 = 15 \text{ MPa}.$$

$$\eta \cdot f_{cd} b d = 1 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 0,46 = 1380 .$$

$$\xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,1059}{0,8} = 0,1324 < \xi_{lim,u3} = 0,6581 .$$

$$F_{cd} = F_{sd} = 146,2 \text{ kN}.$$

$$z_c = \left(1 - \frac{\xi_{eff}}{2} \right) d = \left(1 - \frac{0,1059}{2} \right) \cdot 0,46 = 0,4356 \text{ m}.$$

$$M_{Rd,EN-2} = F_{cd} z_c = 146,2 \cdot 0,4356 = 63,69 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

Jeigu $F_{sd} = 357,1$ kN, $A_s = 0,402\text{cm}^2$, $\rho_l = 0,00437$, tai

$$\xi_{eff} = \frac{357,1}{1380} = 0,2588, \quad \xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,2588}{0,8} = 0,3235 < \xi_{lim,u3} = 0,6581,$$

$$z_c = 0,4005\text{m}, \quad M_{Rd,EN-2} = 143,0 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

Jeigu $F_{sd} = 533,8$ kN, $A_s = 0,402\text{cm}^2$, $\rho_l = 0,00437$, tai

$$\xi_{eff} = \frac{533,8}{1048} = 0,3868,$$

$$\xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,3868}{0,8} = 0,4835 < \xi_{lim,u3} = 0,6581,$$

$$z_c = 0,3710\text{m}, \quad M_{Rd,EN-2} = 198,1 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

Jeigu $F_{sd} = 713,7$ kN, $A_s = 0,402\text{cm}^2$, $\rho_l = 0,00437$, tai

$$\xi_{eff} = \frac{713,7}{1380} = 0,5172,$$

$$\xi = \frac{\xi_{eff}}{\lambda} = \frac{0,5172}{0,8} = 0,6465 < \xi_{lim,u3} = 0,6581,$$

$$z_c = 0,3410 \text{ m}, \quad M_{Rd,EN-2} = 243,4 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

M_{Rd} ir EN – 2 metodais apskaičiuotų M_{Rd} palyginimas:

kai $F_{sd} = 146,2$ kN, armavimo koeficientas $\rho_l = 0,437$ %, tai

$$\frac{M_{Rd,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{63,70}{63,69} = 1,0002;$$

kai $F_{sd} = 357,1$ kN, $\rho_l = 1,011$ %, tai $\frac{M_{Rd,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{143,1}{143,0} = 1,0007;$

kai $F_{sd} = 533,8$ kN, $\rho_l = 1,596$ %, tai $\frac{M_{Rd,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{198,1}{198,1} = 1,0000;$

kai $F_{sd} = 713,7$ kN, $\rho_l = 2,134$ %, tai $\frac{M_{Rd,ZI}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{178,6}{243,4} = 0,7338$ ir

$$\frac{M_{Rd,ZI3}}{M_{Rd,EN-2}} = \frac{238,3}{243,4} = 0,9790.$$

Iš priedo pavyzdžių ir kitų skaičiavimų matyti, kad gausiai armuotų sijų M_{Rd} apskaičiavimas, imant $\xi \leq \xi_{lim}$, neduoda nei EN-2, nei ZI metodu stabilių rezultatų. M_{Rd} reikšmės priklauso nuo ξ_{lim} apskaičiavimo būdo. Be to, čia neįvertinama armavimo procento įtaka.

M_{Rd} skaičiuoti rekomenduojama 3 skyrelyje aprašytu logišku, teoriškai griežtai apibrėžtu, gana universaliu, bet nesudėtingu ZI metodu.