

EVALUATION OF CONCRETE LINEAR CREEP IN DETERMINATION OF STRESS STATE AND STEEL PRESTRESS LOSSES IN CONCRETE MEMBERS

R. Balevičius & E. Dulinskas

To cite this article: R. Balevičius & E. Dulinskas (1999) EVALUATION OF CONCRETE LINEAR CREEP IN DETERMINATION OF STRESS STATE AND STEEL PRESTRESS LOSSES IN CONCRETE MEMBERS, *Statyba*, 5:6, 364-373, DOI: [10.1080/13921525.1999.10531491](https://doi.org/10.1080/13921525.1999.10531491)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/13921525.1999.10531491>



Published online: 26 Jul 2012.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 70

BETONO TIESINIO VALKŠNUMO ĮVERTINIMAS, NUSTATANT GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ĮTEMPIMŲ BŪVĮ IR ARMATŪROS IŠANKSTINIO ĮTEMPIMO NUOSTOLIUS

R. Balevičius, E. Dulinskas

1. Įvadas

Betono tiesiniam valkšnumui įvertinti, nustatant gelžbetoninių elementų armatūros išankstinio įtempimo nuostolius, taikomos priklausomybės, pagrįstos valkšnumo teorija arba gautos apibendrinant eksperimentinių tyrimų rezultatus. Analogiškos priklausomybės taikomos ir šiems nuostoliams reglamentuoti [1, 2].

Betono valkšnumo sukeltiems armatūros išankstinių įtempimų nuostoliams apskaičiuoti Lietuvoje taikomos normos [1] (toliau SNirT), kurios remiasi įtemptojo gelžbetonio elementų tyrimais ir yra netiesiogiai susijusios su elementų įtempimų ir deformacijų būviu per laiką t . Todėl betono valkšnumo įtaka konstrukcijų ilgalaikiam būviui koreguojama papildomais koeficientais [1].

Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių skaičiavimui pagal Euronormas [2, 3] (toliau EC-2) yra pateikti bendresniam atvejui ir grindžiami vienetinėmis betono valkšnumo charakteristikomis.

Gelžbetoninio elemento armatūros išankstinio įtempimo nuostoliai dėl betono valkšnumo per laiką t yra susiję su įtempimų ir deformacijų būvio pokyčiu. Normose EC-2 šis pokytis įvertinamas valkšnumo charakteristika, pagrįsta armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo skaičiavimo formule, o normose SNirT – empirine priklausomybe, kurioje nuostoliai labiausiai priklauso nuo betono apgniuždymo intensyvumo. Akivaizdu, kad vienu [1] ir kitu [2] atveju tas pats įtempimų ir deformacijų pokytis vertinamas skirtingais parametrais. Todėl svarbu sukurti universalų metodą, kuris būtų pagrįstas betono valkšnumo vienetiniais rodikliais.

Darbe analizuojami minėtų normų nuostatų ypatumai ir pateikiamas gelžbetoninių strypinių elementų armatūros įtempimų nuostolių dėl betono tiesinio valkšnumo skaičiavimo modifikuotas metodas, atitin-

kantis abiejų normų nuostatas. Šis metodas tinka ir gelžbetoninių elementų ilgalaikių bandymų rezultatų analizei.

2. Armatūros įtempimų nuostolių skaičiavimo uždavinio formulavimas

Nagrinėjamas įtemptojo gelžbetonio strypinis elementas, veikiamas armatūros išankstinio apspaudimo jėgų, kurios kinta per laiką priklausomai nuo armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo (1 pav.).

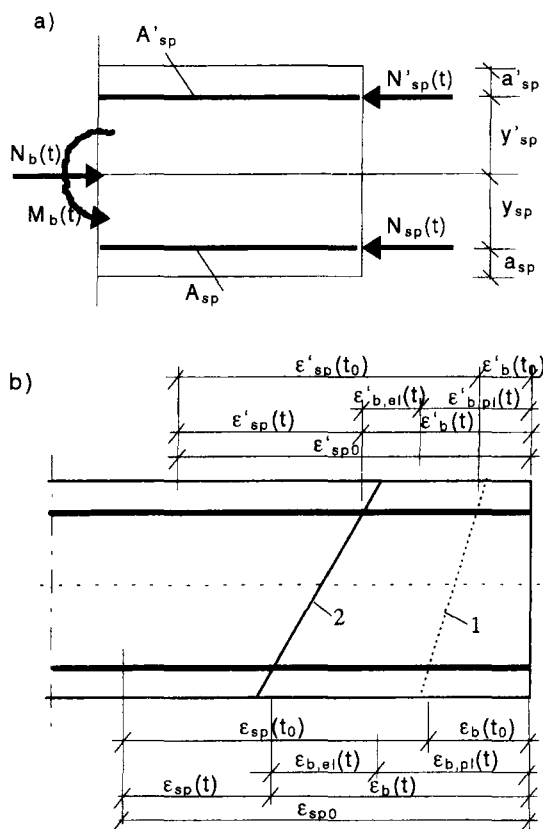
Strypinio gelžbetoninio elemento ilgalaikio poveikio įtempimų deformacijų būvis nustatomas taikant žinomas pusiausvyros ir betono valkšnumo įvertinimo integralines diferencialines priklausomybes [4–8] bei armatūros ir betoninio skerspjuvio geometrinius rodiklius.

Nagrinėjamu laiko momentu t (1 pav.) nusisto- vėjusios elemento įrašos:

$$\begin{aligned} N_{sp,tot}(t) &= N_{sp}(t) + N'_{sp}(t) = \\ &= \sigma_{sp}(t)A_{sp} + \sigma'_{sp}(t)A'_{sp}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} M_{sp,tot}(t) &= N_{sp}(t)y_{sp} - N'_{sp}(t)y'_{sp} = \\ &= \sigma_{sp}(t)A_{sp}y_{sp} - \sigma'_{sp}(t)A'_{sp}y'_{sp}, \end{aligned} \quad (2)$$

čia $N_{sp,tot}(t)$ – jėga, kurią sukelia armatūros išankstinis įtempimas; $M_{sp,tot}(t)$ – armatūros išankstinio įtempimo sukeltas momentas betoninio skerspjuvio svorio centro atžvilgiu; $\sigma_{sp}(t)$, $\sigma'_{sp}(t)$ – armatūrų A_{sp} ir A'_{sp} išankstiniai įtempimai per laiką t ; A_{sp} , A'_{sp} – apatinės ir viršutinės armatūrų skerspjuvių plotai; y_{sp} , y'_{sp} – apatinės ir viršutinės armatūrų centrų atstumai iki betoninio skerspjuvio svorio centro.



1 pav. Įtempėjo gelžbetonio strypinio elemento įrašos ir deformacijos normaliniame pjūvyje: 1 – apspaudimo momentu, kai $t = t_0$, 2 – kai $t = t$: a) įrašos; b) deformacijų būvis

Fig 1. Forces and strains in cross-section of prestressed concrete linear member, 1 – at the moment of prestress when $t = t_0$ and 2 – at the moment when $t = t$: a) forces; b) strain state

Betono įtempimai atitinkamai ties A_{sp} ir A'_{sp} armatūrų svorio centrais per laiką t :

$$\sigma_b(t) = \frac{N_{sp,tot}(t)}{A_b} + \frac{M_{sp,tot}(t)y_{sp}}{I_b}, \quad (3)$$

$$\sigma'_b(t) = \frac{N_{sp,tot}(t)}{A_b} - \frac{M_{sp,tot}(t)y'_{sp}}{I_b}, \quad (4)$$

čia A_b – betono skerspjūvio plotas; I_b – betoninio skerspjūvio inercijos momentas svorio centro atžvilgiu.

Armatūrų A_{sp} ir A'_{sp} svorio centruose laiko momentu t bendros betono ir armatūrų deformacijų lygtys yra šios:

$$\epsilon_{sp0} = \epsilon_b(t) + \epsilon_{sp}(t) = \epsilon_{b,el}(t) + \epsilon_{b,pl}(t) + \epsilon_{sp}(t), \quad (5)$$

$$\epsilon'_{sp0} = \epsilon'_b(t) + \epsilon_{sp}(t) = \epsilon'_{b,el}(t) + \epsilon'_{b,pl}(t) + \epsilon'_{sp}(t), \quad (6)$$

čia ϵ_{sp0} , ϵ'_{sp0} , $\epsilon_{sp}(t)$, $\epsilon'_{sp}(t)$ – armatūros išankstinio įtempimo santykinės deformacijos atitinkamai A_{sp} ir A'_{sp} armatūrų svorio centrų lygyje apspaudimo momentu t_0 ir momentu t ; $\epsilon_{b,el}(t)$, $\epsilon'_{b,el}(t)$, $\epsilon_{b,pl}(t)$, $\epsilon'_{b,pl}(t)$ – santykinės betono tampriosios ir plastinės deformacijos, armatūrų svorio centrų lygyje per laiką t (1 pav.).

Esant betono įtempimų $\sigma_b(t)$ ir $\sigma'_b(t)$ pokyčiui tiesinio valkšnumo srityje, jo deformacijos laikotarpiu $t - t_0$ nustatomos taikant žinomas išraiškas [4–8]:

$$\epsilon_b(t) = \sigma_b(t_0)\delta(t, t_0) + \int_{t_0}^t \frac{\partial \sigma_b(\tau)}{\partial \tau} \delta(t, \tau) d\tau = \frac{\sigma_b(t)}{E_b(t)} - \int_{t_0}^t \sigma_b(\tau) \frac{\partial \delta(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau = \frac{\sigma_b(t)}{E_b(t)} + \sigma_{\xi}(t, t_0) C^*(t, t_0), \quad (7)$$

$$\epsilon'_b(t) = \frac{\sigma'_b(t)}{E_b(t)} + \sigma_{\xi}(t, t_0) C^*(t, t_0), \quad (8)$$

čia $\sigma_b(t_0)$, $\sigma'_b(t_0)$ – per laiką t_0 apkrauto betono įtempimai atitinkamai ties A_{sp} ir A'_{sp} armatūrų svorio centrais; $\delta(t, t_0)$ – betono vienutinės suminės deformacijos laikotarpiu $t - t_0$; $\delta(t, \tau)$ – betono vienutinės suminės deformacijos laikotarpiu $t - \tau$; $E_b(t)$ – betono tamprumo modulis nagrinėjamu laiko momentu t ; $\sigma_{\xi}(t, t_0)$, $\sigma'_{\xi}(t, t_0)$ – vidutiniai ekvivalentiniai betono įtempimai atitinkamai ties A_{sp} ir A'_{sp} armatūrų svorio centrais laiko intervalu $t - t_0$, sukeliantys tokias pačias betono valkšnumo deformacijas kaip ir kintamieji betono įtempimai $\sigma_b(t_0) \leq \sigma_b(\tau) \leq \sigma_b(t)$, $\sigma'_b(t_0) \leq \sigma'_b(\tau) \leq \sigma'_b(t)$; $C^*(t, t_0)$ – betono grynasis valkšnumo matas [4] laikotarpiu $t - t_0$.

Kai laikotarpis $t - t_0$ suskirstomas į n intervalų [8, 9], o (7) ir (8) priklausomybių integralai sprendžiami skaitmeniniu būdu, tuomet betono deformacijos momentu t nustatomos taip:

$$\epsilon_b(t_i) = \frac{\sigma_b(t_i)}{E_b(t_i)} + \sum_{i=1}^n \sigma_{\xi}(t_i, t_{i-1}) \times [C^*(t_i, t_0) - C^*(t_{i-1}, t_0)], \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

$$\epsilon'_b(t_i) = \frac{\sigma'_b(t_i)}{E_b(t_i)} + \sum_{i=1}^n \sigma'_{\xi}(t_i, t_{i-1}) \times [C^*(t_i, t_0) - C^*(t_{i-1}, t_0)], \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

Įvertinus (1)–(8) išraiškas, gaunama:

$$\begin{cases} \sigma_{sp}(t) = \sigma_{sp0} - \sigma_b(t)\alpha(t) - \sigma_{\xi}(t, t_0)C^*(t, t_0)E_{sp} \\ \sigma'_{sp}(t) = \sigma'_{sp0} - \sigma'_b(t)\alpha(t) - \sigma'_{\xi}(t, t_0)C^*(t, t_0)E_{sp}. \end{cases} \quad (11)$$

Lygčių sistemoje (11) esantys betono ekvivalentiniai įtempimai $\sigma'_{\xi}(t, t_0)$ ir $\sigma_{\xi}(t, t_0)$ yra integraliniai nagrinėjamo intervalo betono kintamųjų įtempimų $\sigma'_b(t)$ ir $\sigma_b(t)$ vidutiniai dydžiai, kurie apskaičiuojami sprendžiant integralą skaitmeniniu būdu. Sprendimas atliekamas dalijant nagrinėjamą laikotarpį į intervalus ir sprendžiant minėtą lygčių sistemą. Be abejo, sprendimo tikslumas šiuo atveju priklauso nuo pasirinkto laiko intervalo dydžio [6, 9].

Skaičiavimo pradžioje imamas intervalas

$$t_0 \leq [(t - t_0)/n] \leq t, \quad (12)$$

čia n – laiko intervalų; o $i=n+1$ – laiko momentų fiksavimo skaičius.

Nagrinėjant bet kurią laiko intervalą $t_i - t_{i-1}$, momentu t_i nusistovėjusių armatūrų išankstinių įtempimų sukelti betono įtempimai apskaičiuojami iš (11) lygčių sistemos:

$$\begin{aligned} \sigma'_b(t_i) = & \left[\left[\sigma_{sp0} - E_{sp} \sum_{i=1}^n \sigma_{\xi}(t_i, t_{i-1}) \times \right. \right. \\ & \times [C^*(t_i, t_0) - C^*(t_{i-1}, t_0)] k_{r1}(t_i) + (\sigma'_{sp0} - E_{sp} \times \\ & \times \sum_{i=1}^n \sigma'_{\xi}(t_i, t_{i-1}) [C^*(t_i, t_0) - C^*(t_{i-1}, t_0)] k'_{r1}(t_i) \times \\ & \left. \left. \times k_{r2}(t_i) \right], \right. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sigma_b(t_i) = & \left(\sigma_{sp0} - E_{sp} \sum_{i=1}^n \sigma_{\xi}(t_i, t_{i-1}) \times \right. \\ & \times [C^*(t_i, t_0) - C^*(t_{i-1}, t_0)] k_{r4}(t_i) + (\sigma'_{sp0} - E_{sp} \times \\ & \times \sum_{i=1}^n \sigma'_{\xi}(t_i, t_{i-1}) [C^*(t_i, t_0) - C^*(t_{i-1}, t_0)] k'_{r4}(t_i) \left. \right), \end{aligned} \quad (14)$$

čia priklausomybės:

$$k_{r1}(t_i) = \frac{m_{b2}(t_i)m_{s1}}{m_{b1}(t_i)} + m_{s2}, \quad (15)$$

$$k'_{r1}(t_i) = \frac{m_{b2}(t_i)m'_{s1}}{m_{b1}(t_i)} + m'_{s2}, \quad (16)$$

$$k_{r2}(t_i) = \frac{m_{b1}(t_i)}{-m_{b2}(t_i)m'_{b1}(t_i) + m'_{b2}(t_i)m_{b1}(t_i)}, \quad (17)$$

$$k'_{r2}(t_i) = \frac{m'_{b1}(t_i)}{-m_{b2}(t_i)m'_{b1}(t_i) + m'_{b2}(t_i)m_{b1}(t_i)}, \quad (18)$$

$$k_{r3}(t_i) = \frac{m_{s1}}{m_{b1}(t_i)}, \quad (19)$$

$$k'_{r3}(t_i) = \frac{m'_{s1}}{m_{b1}(t_i)}, \quad (20)$$

$$k_{r4}(t_i) = k_{r1}(t_i)k'_{r2}(t_i) + k_{r3}(t_i), \quad (21)$$

$$k'_{r4}(t_i) = k'_{r1}(t_i)k'_{r2}(t_i) + k'_{r3}(t_i), \quad (22)$$

$$m_{b1}(t_i) = 1 + \alpha(t_i) \frac{A_{sp}}{A_b} + \frac{y_{sp}^2}{I_b} A_{sp} \alpha(t_i), \quad (23)$$

$$m'_{b1}(t_i) = -\alpha(t_i) \frac{A'_{sp}}{A_b} + \frac{y_{sp} y'_{sp}}{I_b} A'_{sp} \alpha(t_i), \quad (24)$$

$$m_{b2}(t_i) = -\alpha(t_i) \frac{A_{sp}}{A_b} + \frac{y_{sp} y'_{sp}}{I_b} A_{sp} \alpha(t_i), \quad (25)$$

$$m'_{b2}(t_i) = 1 + \alpha(t_i) \frac{A'_{sp}}{A_b} + \frac{(y'_{sp})^2}{I_b} A'_{sp} \alpha(t_i), \quad (26)$$

$$m_{s1} = \frac{A_{sp}}{A_b} + \frac{y_{sp}^2}{I_b} A_{sp}, \quad (27)$$

$$m'_{s1} = \frac{A'_{sp}}{A_b} - \frac{y_{sp} y'_{sp}}{I_b} A'_{sp}, \quad (28)$$

$$m_{s2} = \frac{A_{sp}}{A_b} - \frac{y_{sp} y'_{sp}}{I_b} A_{sp}, \quad (29)$$

$$m'_{s2} = \frac{A'_{sp}}{A_b} + \frac{(y'_{sp})^2}{I_b} A'_{sp}. \quad (30)$$

Sprendžiant integralines betono deformacijų lygtis skaitmeniniu būdu pagal (9–10) priklausomybes, linearizuojamos betono įtempimų ties A'_{sp} ir A_{sp} armatūrų svorio centrais kitimo kreivės. Šių centrų lygyje vidutiniai ekvivalentiniai intervalo įtempimai nustatomi taip:

$$\sigma'_{\xi}(t_i, t_{i-1}) = \frac{\sigma'_b(t_{i-1}) + \sigma'_b(t_i)}{2}, \quad (31)$$

$$\sigma_{\xi}(t_i, t_{i-1}) = \frac{\sigma_b(t_{i-1}) + \sigma_b(t_i)}{2}. \quad (32)$$

Bet kurį laiko intervalą atitinkantys $t_i - t_{i-1}$ A'_{sp} ir A_{sp} armatūrų išankstinio įtempimo nuostoliai $\sigma'_{cp}(t_i, t_0)$ ir $\sigma_{cp}(t_i, t_0)$ gaunami sumuojant atskirų intervalų nuostolius:

$$\begin{aligned} \sigma'_{cp}(t_i, t_0) &= \sigma'_{sp0} - [\sigma'_{sp}(t_i) + \sigma'_b(t_i)\alpha(t_i)] = \\ &= E_{sp} \sum_{i=1}^n \sigma'_\xi(t_i, t_{i-1}) [C^*(t_i, t_0) - C^*(t_{i-1}, t_0)], \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cp}(t_i, t_0) &= \sigma_{sp0} - [\sigma_{sp}(t_i) + \sigma_b(t_i)\alpha(t_i)] = \\ &= E_{sp} \sum_{i=1}^n \sigma_\xi(t_i, t_{i-1}) [C^*(t_i, t_0) - C^*(t_{i-1}, t_0)]. \end{aligned} \quad (34)$$

Skaičiavimai baigiami, kai $t_i = t_n = t$. Pateikta skaičiavimo eiga tinka bet kuriam strypinio elemento armavimo atvejui.

Kai elementas armuotas simetriškai ir įtemptoji armatūra išdėstyta geometriniam centre, tuomet $A'_{sp} = 0$, $y_{sp} = y'_{sp} = 0$, $\sigma'_{sp} = 0$ ir koeficientai:

$$m_{b1}(t_i) = 1 + \alpha(t_i) \frac{A_{sp}}{A_b}, \quad m_{b2}(t_i) = -\alpha(t_i) \frac{A_{sp}}{A_b},$$

$$m'_{b1}(t_i) = 0, \quad m'_{b2}(t_i) = 1, \quad m'_{s1} = m'_{s2} = 0, \quad k_{r2}(t_i) = 1,$$

$$k'_{r2}(t_i) = k'_{r3}(t_i) = k'_{r4}(t_i) = 0, \quad m_{s1} = m_{s2} = \frac{A_{sp}}{A_b},$$

$$k'_{r1}(t_i) = 0.$$

Kai elementas armuotas vienpusiškai ir įtemptoji armatūra išdėstyta skerspjuvio apačioje, tuomet $A'_{sp} = 0$, $y'_{sp} = 0$, $\sigma'_{sp} = 0$ ir koeficientai:

$$m_{b1}(t_i) = 1 + \alpha(t_i) \frac{A_{sp}}{A_b} + \frac{y_{sp}^2}{I_b} A_{sp} \alpha(t_i), \quad m_{s2} = \frac{A_{sp}}{A_b},$$

$$m_{b2}(t_i) = -\alpha(t_i) \frac{A_{sp}}{A_b}, \quad m_{s1} = \frac{A_{sp}}{A_b} + \frac{y_{sp}^2}{I_b} A_{sp},$$

$$m'_{b1}(t_i) = 0, \quad m'_{b2}(t_i) = 1, \quad m'_{s1} = m'_{s2} = 0,$$

$$k'_{r2}(t_i) = k'_{r3}(t_i) = k'_{r4}(t_i) = 0, \quad k'_{r1}(t_i) = 0,$$

$$k_{r2}(t_i) = 1.$$

Gelžbetoninio elemento ilgalaikį įtempimų deformacijų būvį galima įvertinti, taikant kintamą nagrinėjamą intervalą, kuris priklauso nuo pasirinkto [9–11] sprendimo tikslumo. Be to, vykdant iteracinį sprendimą laiko momentu t_i galima nagrinėti tik du

intervalus atskaitant nuo apkrovimo pradžios momento t_0 . Tuomet laiko intervalu $t_i - t_0$ sumuojami ankstesnių skaičiavimo intervalų vidutiniai ekvivalentiniai betono įtempimai ir nustatomi bendri vidutiniai įtempimai intervalui $t_i - t_0$, taikant suminius aproksimacijos koeficientus $k_\xi(t_0, t_i)$ ir $k_\xi(t_i, t_{i-1})$. Taikomas metodas ir koeficientų $k_\xi(t, t_0)$ nustatymo metodika pateikta mūsų straipsnyje [9].

Toks sprendimo būdas yra pranašesnis už sprendimą, taikytą [6, 10], nes skaičiuojant šiuo būdu laikotarpių koeficientais $k_\xi(t, t_0)$ susiejami bet kurio atskiro intervalo vidutiniai ekvivalentiniai įtempimai su ankstesnio intervalo ekvivalentiniais įtempimais arba su pradiniu intervalu, įvertinant sprendimo paklaidą.

3. Eksperimentinių rezultatų analizė

Yra atlikta nemaža eksperimentų tiriant betono valkšnumo deformacijas ir nustatant ilgalaikį gelžbetoninių elementų įtempimų deformacijų būvį. Šių duomenų analizei taikomos įvairios metodikos, kurių prielaidos turi reikšmės analizės išvadoms.

Taikant gelžbetoninių elementų analizei 2 skyriuje pateiktą metodiką, gaunamas bendras metodas, leidžiantis betoninių ir gelžbetoninių elementų valkšnumą vertinti vienodais rodikliais (t. y. valkšnumo matu arba valkšnumo charakteristika), nustatytais pagal ekscentriškai apspausių (centriškai apspausių pateiktas [9]) elementų eksperimentinių tyrimų rezultatus.

Betono valkšnumo tyrimais per laiką t matuojamos deformacijos bei nustatomi betono fizikiniai mechaniniai rodikliai. Taikant superpozicijos principą, tiesinio valkšnumo srityje betono plastines deformacijas charakterizuojantis valkšnumo matas nepriklauso nuo matavimų bazės padėties. Pagal (35–36) priklausomybes išmatuotos betono deformacijos ties apatinės A_{sp} ir viršutinės A'_{sp} armatūros svorio centrais:

$$\begin{aligned} \varepsilon_b(t, t_0) &= \varepsilon_{b,el}(t) + C^*(t, t_0) \sigma_\xi(t, t_0) = \varepsilon_{b,el}(t) + \\ &+ \sigma_\xi(t, t_0) \left[C(t, t_0) + \frac{1}{E_b(t_0)} - \frac{1}{E_b(t)} \right] = \varepsilon_{b,el}(t) + \\ &+ \sigma_\xi(t, t_0) C(t, t_0) + \sigma_\xi(t, t_0) \left[\frac{1}{E_b(t_0)} - \frac{1}{E_b(t)} \right], \end{aligned} \quad (35)$$

$$\varepsilon'_b(t, t_0) = \varepsilon'_{b,el}(t) + \sigma'_\xi(t, t_0) C(t, t_0) +$$

$$+ \sigma'_\xi(t, t_0) \left[\frac{1}{E_b(t_0)} - \frac{1}{E_b(t)} \right]. \quad (36)$$

Netampriosios betono deformacijos ties A_{sp} ir A'_{sp} armatūrų svorio centrais:

$$\varepsilon_{b,pl}(t, t_0) = C^*(t, t_0) \sigma'_\xi(t, t_0), \quad (37)$$

$$\varepsilon'_{b,pl}(t, t_0) = C^*(t, t_0) \sigma'_\xi(t, t_0). \quad (38)$$

Atitinkamai A_{sp} ir A'_{sp} armatūros išankstinio įtempimo nuostoliai laiko intervalu $t - t_0$:

$$\sigma_{cp}(t, t_0) = \varepsilon_{b,pl}(t, t_0) E_{sp} = C^*(t, t_0) \sigma'_\xi(t, t_0) E_{sp}, \quad (39)$$

$$\sigma'_{cp}(t, t_0) = \varepsilon'_{b,pl}(t, t_0) E_{sp} = C^*(t, t_0) \sigma'_\xi(t, t_0) E_{sp}. \quad (40)$$

Kai armatūra ir betonas dirba kartu, per laiką $t - t_0$ išmatuotos betono bendros deformacijos $\varepsilon_b(t, t_0)$ ir įtemptosios armatūros deformacijų pokytis $\Delta \varepsilon_{sp}(t, t_0)$ yra vienodi:

$$\Delta \varepsilon_{sp}(t) = \varepsilon_{sp0} - \varepsilon_{sp}(t) = \varepsilon_b(t, t_0), \quad (41)$$

$$\Delta \varepsilon'_{sp}(t) = \varepsilon'_{sp0} - \varepsilon'_{sp}(t) = \varepsilon'_b(t, t_0). \quad (42)$$

Priklausomybėse (41–42) deformacijos ties armatūrų A_{sp} ir A'_{sp} svorio centrais susietos su įtempimais:

$$\sigma_{sp0} - \sigma_{sp}(t) = \varepsilon_b(t, t_0) E_{sp}, \quad (43)$$

$$\sigma'_{sp0} - \sigma'_{sp}(t) = \varepsilon'_b(t, t_0) E_{sp}. \quad (44)$$

Kai betono įtempimai lygūs nuliui, armatūrų A_{sp} ir A'_{sp} įtempimai:

$$\sigma_{sp0}(t) = \sigma_{sp0} + (\varepsilon_{b,el}(t) - \varepsilon_b(t, t_0)) E_{sp}, \quad (45)$$

$$\sigma'_{sp0}(t) = \sigma'_{sp0} + (\varepsilon'_{b,el}(t) - \varepsilon'_b(t, t_0)) E_{sp}. \quad (46)$$

Įvertinus (43–44) ir (45–46) lygybes, armatūros išankstinių įtempimų skirtumas, esant betono nuliams įtempimams laiko momentais t_0 ir t , lygus armatūrų A_{sp} ir A'_{sp} išankstinio įtempimo nuostoliams dėl betono valkšnumo:

$$\sigma_{cp}(t, t_0) = \sigma_{sp0} - \sigma_{sp0}(t) = \varepsilon_b(t, t_0) E_{sp} - \sigma_b(t) \alpha(t) \quad (47)$$

$$\sigma'_{cp}(t, t_0) = \varepsilon'_b(t, t_0) E_{sp} - \sigma'_b(t) \alpha(t). \quad (48)$$

Priklausomybėse (47–48) yra nežinomi betono įtempimai $\sigma_b(t)$ ir $\sigma'_b(t)$ nagrinėjamu momentu t , todėl jie apskaičiuojami įvertinant (13–14), (43–44) ir (47–48) priklausomybes.

Analizuojant bet kurį laiko intervalą $t_i - t_{i-1}$ (kur $i=1, 2, \dots, n$), betono įtempimai $\sigma_b(t_i)$ ties armatūros A_{sp} ir $\sigma'_b(t_i)$ – ties armatūros A'_{sp} svorio centrais skaičiuojami taikant (49–50) formules, vidutiniai ekvivalentiniai įtempimai – pagal (31–32), o grynojo valkšnumo matas $C^*(t_i, t_0)$ bei valkšnumo charakteristika $\Phi^*(t_i, t_0)$ – atitinkamai pagal (51) ir (52) priklausomybes:

$$\sigma'_b(t_i) = \left(\left[(\sigma_{sp0} - \varepsilon_b(t_i, t_0) E_{sp}) + (\sigma_{sp0} - \varepsilon_b(t_i, t_0) E_{sp}) k_{r4}(t_i) + (\sigma'_{sp0} - \varepsilon'_b(t_i, t_0) E_{sp}) k'_{r4}(t_i) \right] \times \right. \\ \left. \times \zeta_2(t_i) k_{r1}(t_i) + (\sigma'_{sp0} - \varepsilon'_b(t_i, t_0) E_{sp}) k'_{r1}(t_i) k_{r2}(t_i) \right] \zeta_1(t_i) \zeta_3(t_i) \right), \quad (49)$$

$$\sigma_b(t_i) = \left\{ (\sigma_{sp0} - \varepsilon_b(t_i, t_0) E_{sp}) k_{r4}(t_i) + (\sigma'_{sp0} - \varepsilon'_b(t_i, t_0) E_{sp}) \left[(\sigma_{sp0} - \varepsilon_b(t_i, t_0) E_{sp}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left[(\sigma_{sp0} - \varepsilon_b(t_i, t_0) E_{sp}) k_{r4}(t_i) + (\sigma'_{sp0} - \varepsilon'_b(t_i, t_0) E_{sp}) k'_{r4}(t_i) \right] \zeta_2(t_i) k_{r1}(t_i) + (\sigma'_{sp0} - \varepsilon'_b(t_i, t_0) E_{sp}) k'_{r1}(t_i) \right] \times \right. \\ \left. \times k_{r2}(t_i) \right] \zeta_1(t_i) \zeta_3(t_i) \alpha(t_i) k'_{r4}(t_i) \zeta_4(t_i) \right\}, \quad (50)$$

$$C^*(t_i, t_0) = \frac{\sigma_{cp}(t_i, t_{i-1}) + \sigma'_\xi(t_i, t_0) C^*(t_i, t_0) E_{sp}}{(\sigma'_\xi(t_i, t_{i-1}) k_{\xi}(t_i, t_{i-1}) + \sigma'_\xi(t_i, t_0) k_{\xi}(t_i, t_0)) E_{sp}} = \frac{\sigma'_{cp}(t_i, t_{i-1}) + \sigma'_\xi(t_i, t_0) C^*(t_i, t_0) E_{sp}}{(\sigma'_\xi(t_i, t_{i-1}) k_{\xi}(t_i, t_{i-1}) + \sigma'_\xi(t_i, t_0) k_{\xi}(t_i, t_0)) E_{sp}}, \quad (51)$$

$$\Phi^*(t_i, t_0) = \frac{[\sigma_{cp}(t_i, t_{i-1}) + \sigma_{\xi}(t_i, t_0)C^*(t_i, t_0)E_{sp}]E_b(t_0)}{(\sigma_{\xi}(t_i, t_{i-1})k_{\xi}(t_i, t_{i-1}) + \sigma_{\xi}(t_i, t_0)k_{\xi}(t_i, t_0))E_{sp}} = \frac{[\sigma'_{cp}(t_i, t_{i-1}) + \sigma'_{\xi}(t_i, t_0)C^*(t_i, t_0)E_{sp}]E_b(t_0)}{(\sigma'_{\xi}(t_i, t_{i-1})k_{\xi}(t_i, t_{i-1}) + \sigma'_{\xi}(t_i, t_0)k_{\xi}(t_i, t_0))E_{sp}}. \quad (52)$$

Lygybėse (49–50) įrašyti koeficientai išreiškiami taip:

$$\zeta_1(t_i) = \frac{1}{1 - \alpha(t_i)k'_{r1}(t_i)k_{r2}(t_i)}, \quad (53)$$

$$\zeta_2(t_i) = \frac{\alpha(t_i)}{1 - \alpha(t_i)k_{r4}(t_i)}, \quad (54)$$

$$\zeta_3(t_i) = \frac{1}{1 + \zeta_2(t_i)(1 - \zeta_1(t_i))}, \quad (55)$$

$$\zeta_4(t_i) = \frac{1}{1 - \alpha(t_i)k_{r4}(t_i)}. \quad (56)$$

Priklausomybėse (51–52) $k_{\xi}(t_{i+1}, t_i)$ ir $k_{\xi}(t_i, t_0)$ – suminiai aproksimacijos koeficientai nustatomi pagal [9] darbe pateiktas priklausomybes.

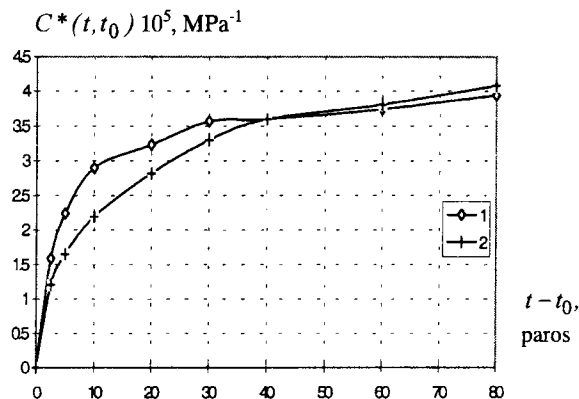
Pateikta metodika leidžia analizuoti eksperimentinių tyrimų rezultatus ir empirines normų išankstinio įtempimo nuostolių priklausomybes, nustatant bendrus betono valkšnumo rodiklius.

Kadangi eksperimentiniais tyrimais sudėtinga valkšnumo deformacijas atskirti nuo susitraukimo deformacijų, nes jos vyksta kartu, todėl daugeliu atvejų pateikiamos tik suminės valkšnumo ir susitraukimo deformacijos.

Ekscentriškai apspausių elementų betono valkšnumo deformacijos ties A'_{sp} armatūros svorio centru būna mažesnės už deformacijas ties armatūros A_{sp} svorio centru, todėl nuo apytikslio betono susitraukimo deformacijų įvertinimo priklauso valkšnumo deformacijų ir valkšnumo mato paklaidos ties A'_{sp} armatūros svorio centru. Todėl nustatant valkšnumo rodiklius, patikimus rezultatus galima gauti tik remiantis didesnėmis betono valkšnumo deformacijomis, išmatuotomis ties A_{sp} armatūros svorio centru, nes ten susitraukimo deformacijų netikslus įvertinimas duoda mažesnę paklaidą.

Taikant šiame skyriuje išdėstytą metodiką pagal ekscentriškai apspausių elementų armatūros išankstinio įtempimo eksperimentinių tyrimų [12] rezultatus, apskaičiuotas betono grynojo valkšnumo matas $C^*(t, t_0)$ (2 pav.). Šis matas taip pat buvo nustatytas, remiantis normų [1] armatūros išankstinio įtempimo

nuostolių skaičiavimo nuostatų duomenų analize [11]. Valkšnumo mato rodikliai pateikiami 2 pav.



2 pav. Grynojo valkšnumo matas $C^*(t, t_0)$: 1 – pagal eksperimentinius ekscentriškai apspausių elemento išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo tyrimų [12] rezultatus, 2 – pagal normų [1] nuostatas ir tyrimų [11] duomenis

Fig 2. Pure specific creep $C^*(t, t_0)$: 1 – according to experimental investigations of prestress losses due to concrete creep in eccentrically prestressed member [12], 2 – according to data of the Code [1] and investigation [11]

4. Normų EC-2 ir SNiT rekomendacijų vertinimas

Pagal normas EC-2 [2] betono pradinių apkrovimo įtempimų $\sigma_b(t_0)$, kurie laiko intervalu $t_i - t_{i-1}$ kinta pokyčiu $\Delta\sigma_b(t_i)$, stebėjimo momentu t_i sukelta betono deformacija:

$$\varepsilon_b(t) = \sigma_b(t_0)J(t, t_0) + \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_b(t_i)J(t, t_0), \quad (57)$$

čia $J(t, t_0)$ – vienatinės santykinės betono valkšnumo deformacijos, $\Delta\sigma_b(t_i) = \sigma_b(t_i) - \sigma_b(t_{i-1})$ – betono įtempimų pokytis laikotarpiu $t_i - t_{i-1}$.

Esant nedideliame betono įtempimų pokyčiui, jo deformacijos pagal EC-2 [2] apskaičiuojamos taip:

$$\varepsilon_b(t) = \sigma_b(t_0)J(t, t_0) + (\sigma_b(t) - \sigma_b(t_0)) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{E_b(t_0)} + \lambda \frac{\Phi(t, t_0)}{E_{b28}} \right), \quad (58)$$

$$\text{čia } J(t, t_0) = \frac{1}{E_b(t_0)} + \frac{\Phi(t, t_0)}{E_{b28}}, \quad (59)$$

$E_b(t_0)$ ir E_{b28} – betono tamprumo modulis apkrovimo momentu t_0 ir po 28 parų; $\Phi(t, t_0)$ – betono valkšnumo koeficientas (charakteristika) pagal EC-2; $\lambda=0,8$ – relaksacijos vertinimo koeficientas pagal [2, 3, 13].

Būtina pastebėti, kad priklausomybė (58) yra apytiksli, ir pagal ją apskaičiuotų rezultatų tikslumą lemia koeficiento λ reikšmės, kurias galima patikslinti, sprendžiant integralą remiantis (7) priklausomybe [4, 5, 6, 8, 13] pagal pateiktą metodiką.

Atitinkantis EC-2 nuostatas grynojo valkšnumo matas

$$C^*(t, t_0) = \frac{1}{E_b(t_0)} - \frac{1}{E_b(t)} + \frac{\Phi(t, t_0)}{E_{b28}} = \frac{1}{E_b(t_0)} - \frac{1}{E_b(t)} + \frac{C(t, t_0)E_b(t_0)}{E_{b28}}, \quad (60)$$

čia $C(t, t_0)$ – valkšnumo matas pagal EC-2 nuostatas.

Priklausomybėje (60) betono tamprumo modulis kinta intervalu $E_b(t_0) \leq E_b(t) \leq E_{b28}$.

Nustatant elemento su vienpusia armatūra įtempimų ir deformacijų būvį taikant pasiūlytą metodą (2 skyrius) ir įvertinus EC-2 nuostatas, gaunama įtempimų nuostolių dėl betono valkšnumo armatūros A_{sp} svorio centre skaičiavimo priklausomybė, kuri pateikta [14]:

$$\sigma_{cp} = \sigma_b(t_0)[\alpha(t_0) - \alpha(t)] + E_{sp} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_b(t_{i-1})}{E_{b28}} [\Phi(t_i, t_0) - \Phi(t_{i-1}, t_0)] \frac{1 + \alpha(t)m_{s1}}{1 + \alpha(t_0)m_{s1}}, \quad (61)$$

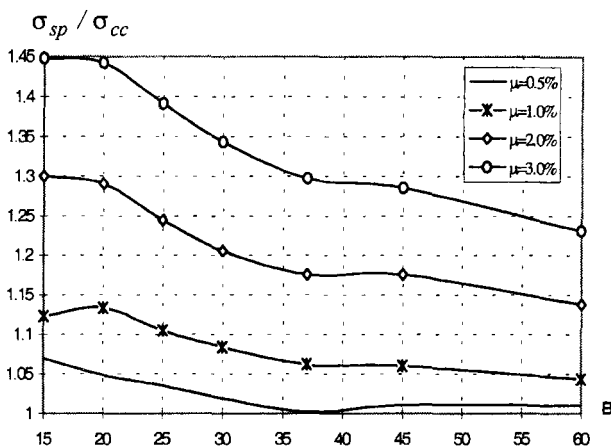
Normose EC-2 [2] pateikta šių nuostolių skaičiavimo priklausomybė yra tokia:

$$\Delta\sigma_{p,c} = \frac{\alpha(t_{28})\Phi(t, t_0)\sigma_b(t_0)}{1 + \alpha(t_{28})m_{s1}(1 + 0,8\Phi(t, t_0))}, \quad (62)$$

70 metų amžiui prognozuojamų vienpusiškai armuotų elementų armatūros išankstinio įtempimo nuostolių, apskaičiuotų pagal (61) ir normų EC-2 (62) priklausomybes bei taikant valkšnumo mato išraišką (60), santykiai pavaizduoti 3 pav. Skaičiavimai varijavo pagal armatūros kiekį.

3 pav. pateikti rezultatai rodo, kad esant dažniausiai pasitaikančiam elementų armavimui 1–2%, valkšnumo nuostolių nesutapimas gali neišeiti iš 4%–30% ribų. Analogiški rezultatai gaunami, kai nuostolių skaičiavimui taikomos EC-2 (58–59) ir (62) priklausomy-

bės, kas nustatyta [14]. Reikia pastebėti, kad skaičiuojant nuostolius pasiūlytu metodu (2 skyrius), kai įvertinamas betono valkšnumo matas pagal (60) priklausomybę, rezultatai yra artimi apskaičiuotiems pagal (61) formulę.



3 pav. B15 (C12/15) – B60 (C50/60) klasės betonų armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo elemente su vienpuse armatūra, apskaičiuotų pagal pasiūlytą sprendimo metodiką σ_{cp} bei normų EC-2 [2] metodiką $\Delta\sigma_{pc}$, santykis, esant skirtingiems armatūros kiekiams (elemento skerspjuvio aukštis $h=0,5$ m, plotis $b=0,3$ m, pradiniai armatūros įtempimai $\sigma_{sp0}=1000$ MPa, armatūros svorio centro atstumas iki betoninio skerspjuvio svorio centro $y_{sp}=0,17$ m, apkrovimo laikas $t_0=28$ paros)

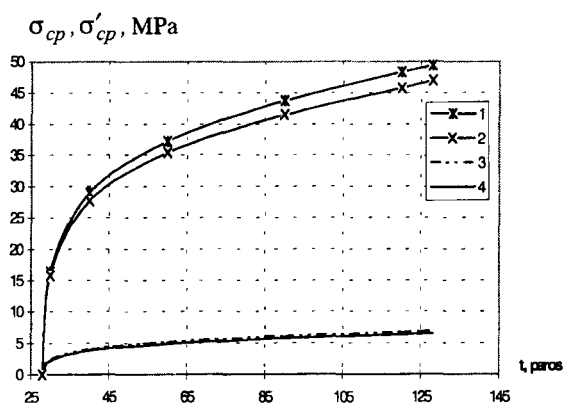
Fig 3. Ratio between steel prestress losses due to creep in a member with steel in one side determined by the method of analysis proposed σ_{cp} and that of EC-2 Code [2] $\Delta\sigma_{pc}$ at different amount of steel for concrete of B15(C12/15) - B60(C50/60) classes (cross-sectional depth $h=0.5$ m, width $b=0.3$ m of the member, initial steel prestress $\sigma_{sp0}=1000$ MPa, distance between centroids of steel and of concrete cross-sections $y_{sp}=0.17$ m, loading time $t_0=28$ days)

Normų EC-2 [2] metodika nereglamentuoja dvipusiskai armuotų elementų išankstinio armatūros įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo skaičiavimo. Todėl čia siūloma šią metodiką modifikuoti.

Esant nedideliame betono įtempimų pokyčiui ties A'_{sp} ir A_{sp} armatūrų svorio centrais, išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo skaičiavimui abiejų armatūrų lygyje galima pritaikyti (62) priklausomybę. Tuomet skaičiuojant išankstinio įtempimo nuostolius armatūros A'_{sp} svorio centre taikomas koeficientas m'_{s2} pagal (30) priklausomybę, o skaičiuojant nuostolius armatūros A_{sp} svorio centre – koeficientas m_{s1} pagal (27). Priklausomybėje (62) įrašyti betono

nuostolius armatūros A_{sp} svorio centre – koeficientas m_{s1} pagal (27). Priklausomybėje (62) įrašyti betono įtempimai apsaudio momentu t_0 apskaičiuojami atitinkamai ties A'_{sp} ir A_{sp} armatūrų svorio centrais, įvertinus (13), (14) išraiškas:

$$\sigma'_b(t_0) = [\sigma_{sp0} k_{r1}(t_0) + \sigma'_{sp0} k'_{r1}(t_0)] k_{r2}(t_0), \quad (63)$$



4 pav. Dvipusiškai armuoto elemento armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo skaičiavimo rezultatai: 1 – apatinės armatūros nuostoliai pagal pateiktos metodikos (33) priklausomybę, 2 – tas pat pagal EC-2 priklausomybę (62), įvertinus (64) išraišką, 3 – nuostoliai viršutinėje armatūroje pagal pateiktos metodikos (34) priklausomybę, 4 – tas pat pagal EC-2 priklausomybę (62), įvertinus (63) išraišką

Fig 4. Calculation results of steel prestress losses due to concrete creep in doubly reinforced prestressed member: 1 – losses in the bottom steel according to the relationship (33) of proposed method, 2 – the same according to modified relationship of EC-2 (62) and (64), 3 – losses in the upper steel according to relationship (34) of proposed method, 4 – the same according to modified relationship (62) of EC-2 and (63)

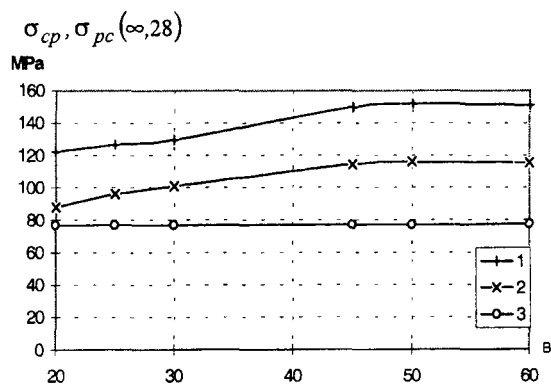
$$\sigma_b(t_0) = \sigma_{sp0} k_{r4}(t_0) + \sigma'_{sp0} k'_{r4}(t_0). \quad (64)$$

Panašios prielaidos taikomos ir normų SNiT nuostatose.

Apskaičiuotų armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo pagal EC-2 [2] metodikos (62) priklausomybę, taikant betono pradinių įtempimų skaičiavimui (63), (64) formules ir 2 skyriuje aptariamo metodo (33), (34) išraiškas, skirtumai pateikti 4 pav. Kadangi daugelio dvipusiai iš anksto įtemptą armatūrą armuotų elementų viršutinės armatūros A'_{sp} kiekis būna nedidelis, tai apskaičiuoti nuostoliai pagal (62) priklausomybę, taikant betono

pradinių įtempimų skaičiavimui (63) išraišką, yra artimi EC-2 taikomai metodikai.

Prognozuojami 70 metų amžiui apskaičiuoti armatūros įtempimo nuostoliai dėl betono tiesinio valkšnumo pagal normų SNiT [1] ir EC-2 [2] nuostatas pateikti 5 pav., esant betono apsaudio intensyvumui $\sigma_b(t_0) / R_{bp} = 0,3$.



5 pav. Prognozuojami 70 metų amžiui armatūros išankstinio įtempimo dėl betono valkšnumo nuostoliai pagal SNiT ir EC-2 nuostatas, kai elementų betono klasės B20 (C16/20) – B60 (C50/60), aplinkos drėgmė RH=70%, armatūros pradinis apsaudio lygis $\sigma_{sp0} = R_{s,ser} = 1100$ (Bp-II): 1 – pagal EC-2, kai sąlyginis matmuo $h=50$ mm; 2 – tas pats, kai sąlyginis matmuo $h=600$ mm; 3 – pagal SNiT nuostatas

Fig 5. Predicted steel prestress losses due to concrete creep after 70 years for concrete of B20(C16/20) – B60(C50/60) classes according to Code SNiT and EC-2 regulations. 1 – according to EC-2 when conventional dimension $h=50$ mm; 2 – the same when conventional dimension $h=600$ mm; 3 – according to SNiT regulations. Ambient humidity RH=70%; initial prestress level $\sigma_{sp0} = R_{s,ser} = 1100$ (Bp-II)

Šie grafikai liudija, kad pagal SNiT nuostatas armatūros išankstinio įtempimo nuostoliai dėl betono valkšnumo nepriklauso nuo skerspjūvio matmenų ir betono klasės, kas neatitinka [3, 4, 6] tyrimų duomenų, o Euronormos [2] įvertina visus pagrindinius betono valkšnumo deformacijas lemiančius faktorius. Pagal EC-2 nuostatas, esant sąlyginiam matmeniui $h=600$ mm, šie nuostoliai yra didesni 1,5 karto (iki 2 kartų, kai sąlyginis matmuo $h=50$ mm) už normų SNiT [1] reglamentuojamus nuostolius.

Reikia pastebėti, kad projektuojant įtemptojo gelžbetonio konstrukcijas pagal EC-2 normas, užtikrinamos reikiamos konstrukcijų eksploatacinės savybės,

tačiau tam reikia didesnio armatūros kiekio, negu jas projektuojant pagal Lietuvoje galiojančias normas [1].

5. Išvados ir rekomendacijos

1. Pasiūlytas gelžbetoninių strypinių elementų armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono tiesinio valkšnumo skaičiavimo modifikuotas metodas leidžia nagrinėti įtempimų deformacijų būvį, įvertinant skaičiavimo iteracijų tikslumą. Metodas ne tik atitinka SNiT ir EC-2 normų nuostatas, bet ir išplečia EC-2 nuostolių skaičiavimo metodikos taikymą dvipusiai nesimetriškai armuotiems elementams.

2. Nustatyta, kad armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo skaičiavimui taikant normų EC-2 reglamentuotas valkšnumo funkcijų priklausomybes (57–59) ir skaičiuojant tuos pačius nuostolius pagal EC-2 (62) formulę gaunami skirtingi rezultatai.

3. Prognozuojami 70 metų amžiui armatūros išankstinio įtempimo nuostoliai dėl betono tiesinio valkšnumo pagal EC-2 nuostatas yra iki 2 kartų didesni negu pagal SNiT nuostatas priklausomai nuo skerspjūvio mastelio faktorių.

4. Taikant EC-2 [2] normų nuostatas armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo skaičiavimui, visais atvejais padidinami konstrukcijos standumo ir atsparumo supleišėjimui rodikliai, tačiau sunaudojamas didesnis armatūros kiekis, palyginti jį su apskaičiuotu pagal normų SNiT [1] nuostatas.

Literatūra

1. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. М.: Госстрой СССР, 1989. 80 с.
2. ENV 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings, 1991. 114 p.
3. J. Eibl. Concrete structures Euro – design hand book. Berlin: Ernst & Sohn, 1995. 764 p.
4. С. В. Александровский. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. М.: Стройиздат, 1973. 432 с.
5. Н. Х. Арутюнян, А. А. Зевин. Расчет строительных конструкций с учетом ползучести. М.: Стройиздат, 1988. 256 с.
6. А. Б. Гольшев. Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций с учетом длительных процессов. М.: Стройиздат, 1964. 151 с.
7. Г. В. Марчюкайтис, Е. Ю. Дулинскас. Напряжено-деформированное состояние преднапряжен-

ных железобетонных конструкций при теплообработке. Вильнюс, 1975. 122 с.

8. И. Е. Прокопович, В. А. Зедгенидзе. Прикладная теория ползучести. М.: Стройиздат, 1980. 240 с.
9. E. Dulinskas, R. Balevičius. Armatūros išankstinio įtempimo nuostolių dėl betono valkšnumo skaičiavimo uždaviniai, taikant galiojančių Lietuvoje ir Euronormų nuostatas // VI tarp. konf. „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“, įvykusios Vilniuje 1999 m. gegužės 19–22 d., straipsniai. III t. V.: Technika, 1999, p. 121–126.
10. E. Dulinskas, R. Balevičius, L. Kairytė. Įtemptojo gelžbetonio centriškai armuotų elementų betono ilgalaikių netamprių deformacijų ir fizinių mechaninių rodiklių kitimo įvertinimas // Statyba ir architektūra: Konferencijos medžiaga. Kaunas, 1998, p. 145–152.
11. E. Dulinskas, R. Balevičius, L. Kairytė. Gelžbetoninių konstrukcijų betono netamprių deformacijų ir fizinių mechaninių rodiklių kitimo įvertinimas // V tarp. konf. „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“, įvykusios Vilniuje 1997 m. gegužės 21–24 d., straipsniai. III t. V.: Technika, 1997, p. 45–56.
12. Н. А. Маркаров. Исследование потерь напряжений от ползучести и усадки в предварительно напряженных элементах, армированных высокопрочной проволокой периодического профиля // Исследования предварительно напряженных железобетонных конструкций промышленных зданий. Труды НИИЖБ. Вып. 24. М.: Госстройиздат, 1961, с. 240–253
13. Beton – Kalender 1993. Taschenbuch für Beton – Stahlbeton – und Spannbetonbau sowie die verwandten Fächer. Teil II. Schriftleitung o. Professor Dr. -Ing. Josef Eibl Karlsruhe. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften. Berlin: Ernst & Sohn, 1993. S. 815.
14. R. Balevičius, E. Dulinskas, J. Pukėnas. Gelžbetoninių strypinių elementų įtemptos armatūros įtempimų nuostolių dėl betono tiesinio valkšnumo skaičiavimas // VI tarp. konf. „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“, įvykusios Vilniuje 1999 m. gegužės 19–22 d., straipsniai. III t. V.: Technika, 1999, p. 127–134.

Įteikta 1999 10 15

EVALUATION OF CONCRETE LINEAR CREEP IN DETERMINATION OF STRESS STATE AND STEEL PRESTRESS LOSSES IN CONCRETE MEMBERS

R. Balevičius, E. Dulinskas

Summary

Determination of stress-strain state imposed by concrete linear creep and specification of steel prestress losses in linear prestressed concrete member is discussed in this article. Particularities of regulations of the Code acting in Lithuania [1] and of Eurocode [2] are analysed and a modified method for calculation of steel prestress losses due to concrete linear creep in prestressed concrete linear members suitable for assessment of Code regulations is presented. Also, the method is used for analysis of results of long-term tests of reinforced concrete members.

In Lithuania, a code based on investigations of prestressed concrete members is used for calculation of steel prestress losses due to concrete creep. Therefore calculation of losses is associated with stress-strain state of the member in time t in empirical way only and time dependent stress-strain state is adjusted by additional coefficients to take into consideration concrete creep. Analogous calculations of steel prestress losses by Eurocode are presented in a more general form and are based on creep theory. It is clear that in the first [1] and the second [2] cases the same change in stress-state is evaluated by different parameters. Therefore it is important to create a general method based on concrete creep characteristics.

General case of eccentrically reinforced prestressed concrete linear member under the action of prestressing forces changing with time in relation to prestress losses due to concrete creep is analysed (Fig 1).

Stress-strain time dependent state of such member with the changing concrete stress $\sigma_b(t)$ and $\sigma'_b(t)$ is determined using well-known equations of equilibrium (1–4) and integral differential equations (7–8) for evaluation of concrete creep deformations [4–8]. These equations are solved by numerical method (9–10) dividing time period considered in intervals. In reference [9] a more particular solution method evaluating variation of interval magnitude in relation to accuracy of solution is presented.

In such a way it is possible to assess reduction of concrete stress (13–14) at time moment t when loss of steel prestress due to concrete creep takes place (33–34).

There are many experiments performed for investigating concrete creep and determinating time dependent stress-strain state of reinforced concrete members. Various methods are applied for analysis of these data. Assumptions of these methods influence the conclusions of the analysis. In this article there is presented a general method giving opportunity to assess creep of concrete members by the same characteristics, when specific creep (51) or coefficient of creep (52) is determined by tests on eccentrically prestressed linear members (the case of axially prestressed members is presented in [9]). Pure specific creep $C^*(t, t_0)$ values determined according to the method proposed in this article and results of experimental investigations [12] of prestress in steel of eccentrically prestressed concrete members and also according to data of analysis [11] of the Code [1] are presented in Fig 2.

Using the same creep characteristics method of the Code EC-2 and proposed in this article losses of prestress in steel due to concrete creep were calculated according to EC-2 and the method proposed. Values of these losses and their ratio are presented in Fig 3 and 4.

In Fig 5, losses of prestress in steel due to creep predicted after 70 years were calculated in accordance with data of the Code SNIIP [1] analysis [11] and regulations of the Code EC-2 [2].

Relationships (62) including (63), (64) formulas are modified EC-2 method for regulation of steel prestress loss due to concrete creep calculation for doubly reinforced members are proposed in the article.

Results of analysis of regulations of Eurocode EC-2 and the Code SNIIP indicate that design according to Code [2] method for steel prestress loss due concrete creep calculation in all cases gives increased values of stiffness and crack resistance characteristics of the structure, but larger amount of steel is to be used in comparison with the design according to SNIIP [1].

Robertas BALEVIČIUS. PhD student. Dept of Reinforced Concrete and Masonry Structures. Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Saulėtekio al. 11, LT-2040 Vilnius, Lithuania.

MSc (civil engineering, 1996). Co-author of 4 scientific articles. Scientific interests: evaluations of time – dependent non-elastic concrete deformations in concrete structures.

Egedijus DULINSKAS. Doctor, Associate Professor. Director of Research Laboratory of Buildings, Structures and Materials. Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Saulėtekio al. 11, LT-2040 Vilnius, Lithuania.

Doctor (1974, engineering sciences), Assoc Professor (1980). Joint research of concrete structures and visits to Germany (1986–90). Author of 80 articles and 5 monographs. Research interests: mechanics of concrete, concrete and masonry structures, time dependent actions, construction in railway transport, renovation and strengthening of buildings and construction works.