



## NESUPLEIŠĖJUSIŲ IŠ ANKSTO ĮTEMPTŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ILGALAIKIŲ DEFORMACIJŲ APSKAIČIAVIMAS, TAIKANT INTEGRALINĮ BEI NORMŲ METODUS

**Renata Zamblauskaitė<sup>1</sup>, Gintaris Kaklauskas<sup>2</sup>, Povilas Vainiūnas<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>*Tiltų ir specialiųjų statinių katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva. El. paštas [bridge@st.vtu.lt](mailto:bridge@st.vtu.lt)*

<sup>3</sup>*Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva. El. paštas [povva@st.vtu.lt](mailto:povva@st.vtu.lt)*

*Įteikta 2006-03-09; priimta 2006-06-15*

**Santrauka.** Šiame straipsnyje pateiktas lenkiamųjų gelžbetoninių (su ir be išankstinio įtempio) elementų trumpalaikių bei ilgalaikių deformacijų apskaičiavimo modelis, pagrįstas sluoksnių ir efektyviojo modulio metodais. Neatsiejama siūlomojo modelio dalis yra gniuždomojo bei tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos. Pasiūlytajame metode integruotai įvertintos betono valksnumo bei traukimosi deformacijos. Eksperimentinių nesupleišėjusių iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų ilgalaikiai išlinkiai palyginti su apskaičiuotaisiais, taikant pasiūlytąją metodiką bei įvairių šalių projektavimo metodus.

**Reikšminiai žodžiai:** valksnumas, traukimas, iš anksto įtemptas gelžbetoninis elementas, ilgalaikės deformacijos, kreivis, išlinkis.

## LONG-TERM DEFORMATION ANALYSIS OF NON-CRACKED PC MEMBERS USING FLEXURAL CONSTITUTIVE MODEL AND DESIGN METHODS

**Renata Zamblauskaite<sup>1</sup>, Gintaris Kaklauskas<sup>2</sup>, Povilas Vainiūnas<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>*Department of Bridges and Special Structures, Vilnius Gediminas Technical University,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. E-mail: [bridge@st.vtu.lt](mailto:bridge@st.vtu.lt)*

<sup>3</sup>*Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. E-mail: [povva@st.vtu.lt](mailto:povva@st.vtu.lt)*

*Received 9 March 2006; accepted 15 June 2006*

**Abstract.** In this paper, an attempt has been made to extend application of the recently proposed *Flexural constitutive model* to long-term deformation analysis of prestressed concrete members. The effect of non-linear time effects of creep and shrinkage are taken into account. Effective modulus method is used for modeling of long-term deformations. The proposed calculation technique is based on the layered approach and use of material stress and strain relationships. Curvatures and deflections prediction results were tested against experimental data of prestressed concrete beams reported in the literature.

**Keywords:** prestressed concrete member, creep, shrinkage, long-term deformation analysis, curvature, deflection.

## 1. Įžanga

Betono valkšnumo bei traukimosi veiksniai, jo mechaninių rodiklių kitimas laike turi didelę įtaką ilgalaikę apkrova veikiamų gelžbetoninių (be ir su išankstiniu įtempiu) konstrukcijų įtempių ir deformacijų būviui. Eksperimentiniai [1–3] bei teoriniai [4] tyrimai parodė, kad ilgalaikės deformacijos dėl betono valkšnumo ir traukimosi gali 3–4 kartus viršyti trumpalaikes deformacijas. Ilgalaikiai procesai lemia deformacijų ir įtempių persiskirstymą tarp armatūros ir betono [4, 5], neutraliosios ašies padėties pokytį, o esant išankstiniam apspaudimui – armatūros išankstinių įtempių mažėjimą (nuostolius) [6–8] gelžbetoniniuose elementuose.

Įtemptųjų gelžbetoninių elementų eksperimentiniai tyrimai ir ilgalaikio deformacijų būvio vertinimo sprendiniai, pagrįsti valkšnumo teorijomis, parodė, kad nuostoliai, išlinkiai bei įlinkiai priklauso nuo armatūros išankstinių įtempių didumo, elemento apspaudimo momento, betono įtempių intensyvumo, armatūros ir betono fizinių mechaninių savybių, iš anksto įtemptos armatūros padėties elemento skerspjūvyje, elemento dydžio ir formos, konstrukcijos gamybos būdo, aplinkos temperatūros ir santykinio drėgnumo, neįtemptosios išilginės armatūros kiekio ir jos padėties elemento skerspjūvyje, apkrovimo išorine apkrova laiko momento bei jos dydžio. Šių veiksnių poveikis yra įvairus ir priklauso nuo daugelio kitų veiksnių, kuriuos įvertinti yra sunku. Todėl praktiškai skaičiuoti taikomi supaprastinti, prielaidomis pagrįsti metodai.

Platų teoriškai apskaičiuotų bei eksperimentiniu būdu nustatytų iš anksto įtemptųjų gelžbetoninių elementų išankstinių įtempių nuostolių, ilgalaikių išlinkių bei įlinkių dėl betono valkšnumo ir traukimosi deformacijų reikšmių nesutapimo diapazoną gali lemti netikslus tam tikrų parametrų įvertinimas, ypač tuo atveju, kai eksperimentų autoriai nepateikia išsamių vieno ar kelių veiksnių eksperimentinių reikšmių dydžių, turinčių įtakos bandymų rezultatams.

Bandymo metodikų nepatikimumas, skirtingos bandymo sąlygos, eksperimentinių rezultatų analizei taikomos įvairių metodikų prielaidos taip pat gali nulemti analizės išvadas. Būtina pažymėti, kad geometriniai iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų matmenys, stiprumo ir deformacinės medžiagų charakteristikos, išilginio armavimo charakteristikos, parametrai, charakterizuojantys išankstinio armatūros įtempio dydį, betono valkšnumo koeficientas bei laisvojo traukimosi deformacija, aplinkos santykinis drėgnis ir kiti veiksniai, darantys įtaką elementų trumpalaikiam bei ilgalaikiam įtempių ir deformacijų būviui, yra atsitiktinio dydžio. Todėl netikslus jų įvertinimas teoriškai skaičiuoti gali turėti įtakos analizės išvadoms.

SNiP [9], PCI [10] bei STR [11] ilgalaikių deformacijų skaičiavimo metodikos tiesiogiai neįvertina betono klasės, armavimo procento, elemento dydžio, aplinkos drėgmės veiksnių bei valkšnumo mato. Šie veiksniai daro įtaką be-

tono valkšnumui ir reglamentuojami EC2 normose [12]. PCI normose [10] nėra įvertinamas laiko veiksnys – čia reglamentuojamos tik ribinės išlinkių dėl betono ilgalaikių deformacijų reikšmės. SNiP [9] ir STR [11] normose laiko veiksnys, įvertinamas empiriniu koeficientu.

Būtina pažymėti, kad EC2 normų [12] metodika neregulamentuoja nesimetriškai armuotų elementų išankstinių įtempių nuostolių apskaičiavimo. Šiose normose pateikta nuostolių nustatymo priklausomybė tinka tik vienpusiškai ar centriškai armuoto elemento išankstinių įtempių nuostoliams dėl betono valkšniųjų bei traukimosi deformacijų apskaičiuoti.

## 2. Ilgalaikę apkrova veikiamų gelžbetoninių elementų įtempių bei deformacijų būvio analizės metodai

Ilgalaikių įlinkių (išlinkių) analizei daugelyje darbų [8, 13–16 ir kt.] skirta daug dėmesio. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų ilgalaikiams išlinkiams (įlinkiams) vertinti pasiūlyta daug įvairiomis prielaidomis pagrįstų empirinių [14, 17–20 ir kt.] bei analitinių [15, 21–23 ir kt.] metodų. Analitiniais metodais gaunami patikimi apskaičiavimo rezultatai, tačiau jų kūrimą ypač komplikuoja sudėtingas matematinis aparatas, dažnai reikalingas supaprastinimų bei prielaidų. Ne tokie patikimi yra empiriniai metodai, kurių priklausomybės gautos apdorojus eksperimentinių tyrimų duomenis. Šių metodų praktinis taikymas dažniausiai nesukelia didesnių sunkumų, todėl kai kurie iš jų yra aprobuoti įvairių šalių normose [9, 10–12].

Betono deformacijos  $\varepsilon_c(t, t_i)$  stebimuoju laiko momentu  $t$  apskaičiuojamos taip:

$$\varepsilon_c(t, t_i) = \varepsilon_{c,el}(t_0) + \varepsilon_{c,cr}(t, t_0) + \varepsilon_{c,shr}(t, t_s) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} + \frac{\sigma_c(t, t_0)}{E_c(t)} \phi(t, t_0) + \varepsilon_{c,shr}(t, t_s), \quad (1)$$

čia  $\varepsilon_{c,el}(t_0)$  – betono tampriosios deformacijos elemento apkrovimo metu;  $\varepsilon_{c,cr}(t, t_0)$  ir  $\varepsilon_{c,shr}(t, t_s)$  – betono valkšnumo bei traukimosi deformacijos bet kuriuo laiko momentu  $t$ ;  $t_s$  ir  $t$  – betono amžius, atitinkamai prasidėjus traukimuisi bei stebimuoju laiko momentu (dienomis);  $\sigma_c(t_0)$  ir  $\sigma_c(t, t_0)$  – betono įtempiai, atitinkamai laiko momentais  $t_0$  bei  $t$ ;  $\phi(t, t_0)$  – valkšnumo koeficientas bet kuriuo laiko momentu  $t$ ;  $i = t_s, t_0$ .

Kiekybinės charakteristikų  $\phi(t, t_0)$  bei  $\varepsilon_{c,shr}(t, t_s)$  reikšmės nustatomos eksperimentais arba taikant vieną iš betono valkšnumo bei traukimosi analizės modelių.

Empiriniai ilgalaikių deformacijų apskaičiavimo metodai pateikti Europos [12], JAV [10], Rusijos [9], Lietuvos [11], Australijos bei kitų šalių normose. Taip pat pasiūlyta nemažai analitinių metodų, iš kurių paminėtini efektyviojo modulio (EM), modifikuotas *Dishinger*, skaitinio integra-

vimo (SI), senėjančios medžiagos efektyviojo modulio (AEM) bei valkšniųjų deformacijų augimo metodai [24].

Toliau šiame skyriuje apžvelgiami žinomiausi empiriniai iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų ilgalaikių įlinkių (kreivių) vertinimo metodai. Pateikiamos šių metodų matematinės išraiškos, aptariami jų privalumai ir trūkumai. Detali istorinė apžvalga bei nuorodos į bibliografinius leidinius, skirtus lenkiamųjų gelžbetoninių elementų (su ir be išankstinio įtempio) ilgalaikių įlinkių analizei, atitinkamai pateikta [17, 25] darbuose.

EC2 normų nesupleišėjusių elementų ilgalaikių deformacijų įvertinimo metodas [12] pagrįstas efektyviojo modulio metodu. Ilgalaikis kreivis nuo apspaudimo jėgos  $P$  bei išorinių jėgų ar savojo svorio sukulto lenkimo momento  $M$  apskaičiuojamas taip:

$$\kappa = \frac{Pe_{0p} + M}{E_e(t, t_0) I_{red}}, \quad (2)$$

čia  $e_{0p}$  – išankstinės apspaudimo jėgos ekscentricitetas;  $I_{red}$  – redukuoto skerspjuvio inercijos momentas;  $E_e(t, t_0)$  – efektyvusis betono modulis bet kuriuo laiko momentu  $t$  nustatomas taip:

$$E_e(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{[1 + \phi(t, t_0)]}, \quad (3)$$

čia  $\phi(t, t_0)$  – valkšnumo koeficientas bet kuriuo laiko momentu  $t$ ;  $E_c(t_0)$  – betono tamprumo modulis laiko momentu  $t_0$ .

Reikia pažymėti, kad formulėje (3) vietoje dydžio  $E_e(t, t_0)$  įstačius pradinį betono tamprumo modulį  $E_c(t_0)$ , kreivis apskaičiuojamas nuo trumpalaikio apspaudimo bei išorinių jėgų poveikio.

Kreivis dėl betono traukimosi deformacijų  $\kappa_{shr}(t, t_s)$  nustatomas taip:

$$\kappa_{shr, I(II)}(t, t_s) = \varepsilon_{c, shr}(t, t_s) \frac{E_{s(sp)} S}{E_e(t, t_s) I}, \quad (4)$$

čia  $E_{s(sp)}$  – paprastos ar iš anksto įtemptos armatūros tamprumo modulis;  $S$  ir  $I$  – elemento armatūros statinis momentas apie elemento skerspjuvio centrinę ašį ir elemento inercijos momentas.

Būtina pažymėti, jei apspaudimo momentu ties įtemptą armatūrą betono įtempiai ( $\sigma_{c, p0}$ ) viršija tiesinio valkšnumo ribą [12], t. y.  $\sigma_{c, p0} \geq 0,45 f_{cm}(t_0)$ , čia  $f_{cm}(t_0)$  – cilindrinis gniuždomojo betono stipris elemento apspaudimo (apkrovimo) momentu, apskaičiuojant ilgalaikes deformacijas reikia įvertinti pasireiškusį netiesinį betono valkšnumą.

PCI normų metodas [10] reglamentuoja ribines įlinkių (išlinkių) dėl betono valkšnumo bei traukimosi deformaci-

jų nustatymo reikšmes, apkraunant elementą praėjus 1–2 mėnesiams nuo jo apgniuždymo ir bet kuriuo laiko momentu jį apkrovus išorine apkrova. Išlinkių (įlinkių) augimas, kurį sukelia betono valkšniosios bei traukimosi deformacijos, atsižvelgiant į apkrovos poveikį, įvertinamas koeficientais  $k_i^*(t, t_0)$  ir  $k_i(t, t_0)$ .

Suminiai išlinkiai (įlinkiai) dėl trumpalaikio ir ilgalaikio apkrovos poveikio gaunami, padauginus trumpalaikius išlinkius (įlinkius) iš daugiklių  $k_i^*(t, t_0)$  ir  $k_i(t, t_0)$ :

$$f(t, t_0) = f_P(t, t_0) + f_g(t, t_0) + f_p(t, t_0), \quad (5)$$

$$\begin{cases} f_P^*(t, t_0) = f_{P0}(t_0) k_P^*(t, t_0), \\ f_g^*(t, t_0) = f_g(t_0) k_g^*(t, t_0), \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} f_P(t, t_0) = f_P(t_0) k_P(t, t_0), \\ f_g(t, t_0) = f_g(t_0) k_g(t, t_0), \\ f_p(t, t_0) = f_p(t_0) k_p^p(t, t_0), \end{cases} \quad (7)$$

čia  $f(t, t_0)$  – suminis išlinkis (įlinkis) nuo trumpalaikės bei ilgalaikės apkrovos bet kuriuo stebimuoju laiko momentu  $t$ ;  $f_{(P+g+p)}(t_0)$  ir  $f_{(P+g+p)}(t, t_0)$  – trumpalaikis bei ilgalaikis išlinkis (įlinkis), atitinkamai nuo išankstinės apspaudimo jėgos, savojo elemento svorio bei išorės apkrovų;  $k_{(P+g)}^*(t, t_0)$  ir  $k_{(P+g+p)}^*(t, t_0)$  – koeficientai, įvertinantys valkšnumo bei traukimosi efektų įtaką išlinkių (įlinkių) augimui, parenkami, atsižvelgiant į apkrovos tipą. Būtina pažymėti, kad koeficientai  $k_i^*(t, t_0)$  ir  $k_i(t, t_0)$  neįvertina betono ir armatūros deformacijų savybių, aplinkos sąlygų, armatūros praslydimo betone veiksnių, supleišėjus elementui, taip pat netiksliai įvertina betono amžių elemento apkrovimo išorine apkrova metu; skaitinės jų reikšmės pateikiamos PCI normų [10] norminėse lentelėse.

Dar vienas PCI ilgalaikių išlinkių (įlinkių) prognozavimo metodo [10] trūkumų yra tas, kad betono valkšniosios bei traukimosi deformacijos kiekvieno poveikio atveju įvertinamos vienu daugikliu, t. y. nėra galimybės nustatyti atskiro efekto įtakos išlinkių (įlinkių) augimui. Turint mišriai armuotą elementą, neįtemptos išilginės armatūros įtaka ilgalaikių išlinkių (įlinkių) augimui dėl betono valkšniųjų bei traukimosi deformacijų įvertinama A. F. Shaikh ir D. E. Branson [13] pasiūlytu koeficientu  $C_2(t, t_0)$ :

$$C_2(t, t_0) = \frac{C_1(t, t_0) + \sum_{i=1}^n A_{si} / \sum_{i=1}^n A_{spi}}{1 + \sum_{i=1}^n A_{si} / \sum_{i=1}^n A_{spi}}, \quad (8)$$

čia  $C_1(t, t_0)$  – koeficientas, įvertinus apkrovos poveikį bei laiko veiksnius, atitinkamai yra lygus  $k_{(P+g)}^*(t, t_0)$  arba  $k_{(P+g+p)}^*(t, t_0)$ .

SNiP [9] normų metode ilgalaikių deformacijų augimas, laikui bėgant, įvertinamas apytiksliai, taikant empirinius koeficientus.

Nesupleišėjusio ruožo kreivis dėl trumpalaikio apspaudimo jėga  $P$  bei savojo elemento svorio (ar išorinių apkrovų) sukkelto lenkimo momento apskaičiuojamas taip:

$$\left(\frac{1}{r}\right) = \frac{-Pe_{0p} + M}{\varphi_{b1}E_b(t_0)I_{red}}, \quad (9)$$

čia  $\varphi_{b1}$  – koeficientas, kuriuo įvertinamos trumpalaikės apkrovos sukeltos valkšniosios betono deformacijos;  $E_b(t_0)$  – betono tamprumo modulis laiko momentu  $t_0$ .

Nesupleišėjusio ruožo kreivis dėl ilgalaikio apkrovos poveikio apskaičiuojamas taip:

$$\left(\frac{1}{r}\right) = \frac{M\varphi_{b2}}{\varphi_{b1}E_bI_{red}}, \quad (10)$$

čia  $\varphi_{b2}$  – koeficientas, įvertinantis betono valkšnumo įtaką nesupleišėjusio elemento deformacijoms, veikiant ilgalaikiai apkrovai ( $\varphi_{b2} = 2$  ir  $3$ , esant sunkiajam betonui, kai aplinkos drėgmė, atitinkamai  $RH = 40-70\%$  ir  $RH < 40\%$ ).

Išlinkusio elemento kreivumas dėl betono susitraukimo ir valkšnumo deformacijų apskaičiuojamas taip:

$$\left(\frac{1}{r}\right) = \frac{(\varepsilon_b - \varepsilon_b')}{h_0}, \quad (11)$$

čia  $\varepsilon_b = \sigma_b / E_{sp}$  – santykinė betono deformacija ties apatinės armatūros centru;  $\varepsilon_b' = \sigma_b' / E_{sp}$  – santykinė betono deformacija gniuždomosios zonos kraštiniame sluoksnyje;  $h_0$  – naudingasis skerspjūvio aukštis. Įtempius  $\sigma_b$  ir  $\sigma_b'$  rekomenduojama sąlygiškai prilyginti armatūros išankstinių įtempių nuostoliams dėl betono valkšnumo bei traukimosi deformacijų, apskaičiuotiems ties apatinės armatūros centru bei kraštiniame gniuždomosios zonos sluoksnyje.

Būtina pažymėti, kad empiriniai koeficientai, įvertinantys ilgalaikius efektus, nepriklauso nuo betono savybių, betono amžiaus apkrovimo metu, apkrovimo trukmės bei kitų veiksnių, darančių įtaką įtempių ir deformacijų būvio kitimui. Todėl SNiP normų [9] reglamentuojami ilgalaikiai išlinkiai (įlinkiai) dėl betono valkšnumo bei traukimosi deformacijų dažnai neatitinka eksperimentinių rezultatų.

Laiko veiksniai įvertinti šiose normose [9] rekomenduojamas koeficientas  $\varphi_t$ , įvertinantis betono amžių apkrovimo metu [26, 27 ir kt.]:

$$\varphi_t = \frac{4t}{100 + 3t}, \quad (12)$$

čia  $t$  – laikas (dienomis) nuo elemento apspaudimo iki jį apkraunant išorine apkrova.

Būtina pažymėti, kad parametras neįvertina laiko

veiksnių valkšnumo deformacijoms, betoną apkraunant (apspaudžiant) ankstyvajame jo kietėjimo amžiuje. Ši tendencija pastebėta daugelyje eksperimentinių tyrimų [26, 27]. Todėl buvo siūloma keisti arba tobulinti koeficiento  $\varphi_t$  išraišką. Istorinė apžvalga ir nuorodos į bibliografinius rinkinius, skirtus šiam uždaviniui spręsti, paskelbtos šaltinyje [17].

Išankstinių įtempių nuostoliai dėl betono traukimosi, esant normaliam aplinkos drėgnumui, pagal SNiP normas [9], atsižvelgiant į betono klasę, betono sudėtį bei betono kietėjimo sąlygas kinta nuo 30 iki 70 MPa. Jei elemento apkrovimo išorine apkrova metu yra žinomas betono amžius, tai nuostoliai dėl betono traukimosi taip pat dauginaimi iš koeficiento  $\varphi_t$ , čia  $t$  – laikas (dienomis) nuo betonavimo pabaigos iki apkraunant elementą išorine apkrova.

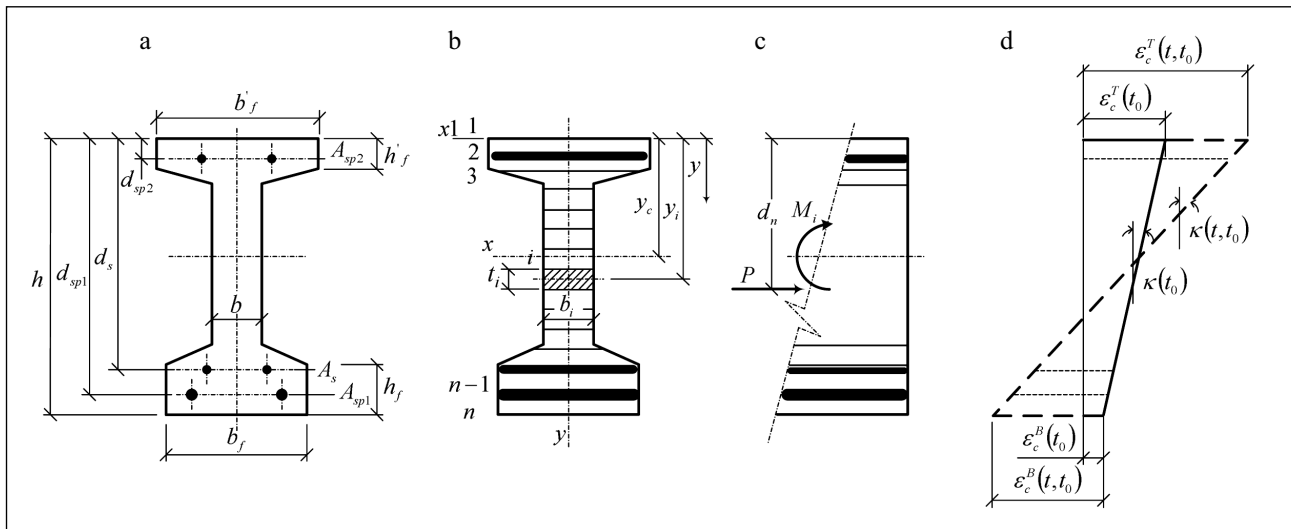
STR metodas [11] trumpalaikėms bei ilgalaikėms deformacijoms apskaičiuoti paremtas SNiP [9] metodika. Būtina pažymėti, kad minėtos trumpalaikių bei ilgalaikių deformacijų nustatymo metodikos neįvertina arba apytiksliai įvertina neįtemptosios armatūros įtaką deformacijoms mišriai amuotuose gelžbetoniniuose elementuose.

*Integralinis modelis.* Pasiūlytas trumpalaikė bei ilgalaikė apkrova veikiamų gelžbetoninių (be ir su išankstinių įtempių) elementų įlinkių (kreivių) apskaičiavimo sluoksnių metodu algoritmas, paremtas medžiagų (betono ir armatūros) įtempių ir deformacijų priklausomybių taikymu [28, 29], EM metodu [24, 30, 31] bei iteraciniu skaičiavimu.

Lenkiamųjų iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų deformacijų vertinimo modelis pagrįstas tokiais prielaidomis: deformacijos skerspjūvio aukštyje kinta tiesiškai; armatūros ir betono sukibimas laikomas idealiu; armatūros praslydimas betone įvertinamas tempiamojo betono fizine priklausomybe; modelis pagrįstas vidutinių plyšių koncepcija, t. y. skaičiuojant taikomi vidutiniai įtempiai bei vidutinės deformacijos; visiems tempiamojo ir gniuždomojo betono sluoksniams galioja ta pati įtempių ir deformacijų diagrama; šlyties deformacijų įtaka nevertinama; ilgalaikės apkrovos atveju betono valkšnumas elemento įtempių ir deformacijų būviui įvertinamas, taikant efektyvųjų modulį  $E_e$  ((3) išraiška); armatūros valkšniosios deformacijos neįvertinamos, t. y. armatūros įtempių ir deformacijų diagramos trumpalaikio bei ilgalaikio apkrovimo atvejų yra identiškos; betono traukimosi deformacijos skerspjūvio aukštyje pasiskirsto tolygiai.

Nagrinėjamas mišriai armuotas iš anksto įtemptas gelžbetoninis elementas, veikiamas pastovaus išorinio lenkimo momento  $M$  bei išankstinės apspaudimo jėgos  $P$  (1 pav.). Elemento skerspjūvis sudalijamas į horizontalius armatūros ir betono sluoksnius (1 pav., b). Armatūros  $A_{si(spi)}$  strypai pakeičiami ekvivalentinio ploto armatūros sluoksniu.

Betono netiesinės savybės bei pleišėjimas, taip pat betono valkšnumas bei traukimas lemia betono efektyviojo



**1 pav.** Iš anksto įtempto lenkiamojo gelžbetoninio elemento: a – skerspjūvis; b – skerspjūvio sudalijimas sluoksniams; c – veikiančios jėgos; d – deformacijų pasiskirstymas: (—) trumpalaikės ir (- - - -) ilgalaikės apkrovos atvejais

**Fig 1.** PP section and strain diagram for case of short- and long-term loading: a – cross-section; b – layered section; c – acting forces; d – strain compatibility: (—) – for case of short-term loading; (- - - -) – for case of long-term loading

modulio, išankstinės apspaudimo jėgos ir transformuoto skerspjūvio ploto bei svorio centro padėties kitimą laikui bėgant. Nagrinėjant įtempių ir deformacijų būvį bet kuriuo laiko momentu  $t$ , pasirenkama atskaitos ašis, kurios padėtis visą apkrovimo laiką nekinta. Geometriniai skerspjūvio rodikliai (statinis bei inercijos momentai) trumpalaikio bei ilgalaikio apkrovimo atvejais nustatomi skerspjūvio viršutinio krašto atžvilgiu, taikant tokias priklausomybes:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_e = \sum_{i=1}^n b_i t_i \frac{E_i}{E_e(t, t_0)}, \\ S_e = \sum_{i=1}^n b_i t_i y_i \frac{E_i}{E_e(t, t_0)}, \\ I_e = \sum_{i=1}^n \left( \frac{b_i(t_i)^3}{12} + b_i t_i (y_i)^2 \right) \frac{E_i}{E_e(t, t_0)}, \end{array} \right. \quad (13)$$

čia  $A_e$ ,  $S_e$  ir  $I_e$  – redukuoto skerspjūvio plotas, statinis bei inercijos momentai viršutinio sluoksnio ( $x_1$  ašies) atžvilgiu (1 pav., b);  $b_i$ ,  $t_i$  –  $i$ -tojo sluoksnio plotis ir storis ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $y_i$  –  $i$ -tojo sluoksnio koordinatė redukuoto skerspjūvio viršutinio krašto atžvilgiu.

Veikiant ilgalaikėi apkrovai, bet kurio sluoksnio išilginė deformacija  $\varepsilon_i(t, t_0)$  (1 pav., c, d) nagrinėjamoju laiko momentu  $t$  apskaičiuojama taip:

$$\varepsilon_i(t, t_0) = \varepsilon_c(t, t_0) + y_i \kappa(t, t_0) - \varepsilon_{shr}(t, t_0), \quad (14)$$

čia  $y_i$  – nagrinėjamojo sluoksnio atstumas nuo viršutinio

skerspjūvio krašto;  $\varepsilon_c(t, t_0)$  ir  $\kappa(t, t_0)$  – skerspjūvio viršutinio sluoksnio deformacija bei kreivis nustatomi taip:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \frac{-S_e F_1 - I_e F_2}{E_e(t, t_0) \left( A_e I_e - (S_e)^2 \right)}, \quad (15)$$

$$\kappa(t, t_0) = \frac{A_e F_1 + S_e F_2}{E_e(t, t_0) \left( A_e I_e - (S_e)^2 \right)}, \quad (16)$$

$$F_1 = M + M_{ns} - P d_n + M_{shr}(t, t_0), \quad (17)$$

$$F_2 = P + N_{shr}(t, t_0), \quad (18)$$

$$N_{shr}(t, t_0) = -A_c E_e(t, t_0) \varepsilon_{shr}(t, t_0), \quad (19)$$

$$M_{shr}(t, t_0) = S_c E_e(t, t_0) \varepsilon_{shr}(t, t_0), \quad (20)$$

čia  $d_n$  – išankstinio apspaudimo jėgos padėties ekscentricitetas skerspjūvio viršutinio taško atžvilgiu;  $M_{ns}$  – elemento savojo svorio sukeltas lenkimo momentas;  $N_{shr}(t, t_0)$ ,  $M_{shr}(t, t_0)$  – betono traukimosi deformacijų sukeltos jėgos;  $A_c$  ir  $S_c$  – betono skerspjūvio (armatūra neįvertinama) plotas bei statinis momentas viršutinio sluoksnio atžvilgiu.

Trumpalaikio poveikio įtempių ir deformacijų būvis nustatomas taikant analogišką skaičiavimo principą kaip ir ilgalaikio apkrovimo atveju, keičiant efektyvųjį modulį  $E_e(t, t_0)$  pradiniu betono tamprumo moduliu  $E_c(t_0)$ .

### 3. Nesupleišėjusių iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų ilgalaikių deformacijų įvertinimas integraliniu bei normų metodais

#### 3.1. Eksperimentiniai iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų duomenys

Šiame skyriuje atlikta nesupleišėjusių iš anksto įtemptų gelžbetoninių sijų ilgalaikių išlinkių (61 sija) statistinė analizė. Eksperimentinių sijų išlinkiai buvo palyginti su apskaičiuotais, taikant sluoksnių, EC2 [12] bei PCI [10] normų metodus.

Ilgalaikė apkrova veikiamų iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų deformacijų analizei atlikti buvo taikyti B. Espion ir kt. [18], A. F. Shaikh ir kt. [13], A. S. Dmitrejevo ir kt. [32], E. Dulinsko [33], I. I. Ulickio ir kt. [34, 35], M. Simonovo ir kt. [36], V. A. Černojarovo [37], T. G. Černojarovos ir kt. [38], E. A. Jasenko ir kt. [39] eksperimentinių tyrimų duomenys. Eksperimentinių sijų pagrindinės charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

35 sijos buvo stačiakampio, 26 sijos – dvitėjo skerspjūvio. Visų elementų armatūra buvo tempiama į atsparas. Eksperimentiniai elementai buvo skirtingai armuoti. Pagrindiniai sijų parametrai kito labai plačiai: betono amžius apspaudimo momentu – nuo 2 iki 28 dienų, stebėjimo trukmė – nuo 48 iki 1870 dienų, armatūros pradiniai įtempiai – nuo 136 iki 1320 MPa, pradinis elementų apspaudimas neviršijo netiesinės valkšnumo ribos [12], skerspjūvio aukštis – nuo 10 iki 40 mm, skerspjūvio plotis – nuo 5,3 iki 34 cm, armavimo procentas – nuo 0,31 iki 3,53 %, gniuždomojo betono kubinis stiprumas apspaudimo metu  $f_{c,15}(t_0)$  – nuo 19,1 iki 52,2 MPa.

Daugeliu atvejų eksperimentų autoriai, paskelbę išsamias publikacijas apie atliktus tyrimus, nepateikė vieno ar kelių parametru eksperimentinių reikšmių, turinčių įtakos bandymų rezultatams. Tarp trūkstamų duomenų daugeliu atvejų yra betono tamprumo modulis  $E_c(t_0)$ , paprastosios bei iš anksto įtemptos armatūros stiprio bei deformacinės charakteristikos  $\sigma_{s(sp),y}$ ,  $\sigma_{sp,0,2}$ ,  $E_{s(sp)}$ , pradiniai armatūros įtempiai  $\sigma_{sp0}$ , o kai kuriuose šaltiniuose betono valkšnumo bei traukimosi charakteristikos. Nežinomiems duomenims įvertinti buvo taikomos arba pačių autorių siūlomos empirinės išraiškos (jeigu tokios buvo), arba kitos žinomos priklausomybės. Tempiamojo betono stipriui ir betono tamprumo moduliu apskaičiuoti taikytos empirinės formulės [9].

Reikia pažymėti, kad daugelyje eksperimentinių tyrimų stiprumo ir deformacinės betono savybės nustatytos, kai betono amžius mažesnis arba didesnis nei 28 paros. Betono stiprio bei tamprumo modulio kitimui laike įvertinti (jei to nebuvo padaryta eksperimentiniuose tyrimuose) buvo taikomos EC2 normose [12] reglamentuojamos priklausomybės.

Betono valkšnumo koeficientams  $\phi(t, t_0)$  ir traukimo-

si deformacijoms  $\varepsilon_{c,shr}(t, t_0)$  nustatyti (jei nebuvo eksperimentinių duomenų) taikytos EC2 normų [12] priklausomybės. Galima pažymėti, kad nebuvo surinkti eksperimentinių tyrimų, skirtų betono valkšnumo bei traukimosi deformacijoms nustatyti, duomenys. Todėl nebuvo atlikti minėtų veiksnių lyginamieji statistiniai skaičiavimai, taikant skirtingus traukimosi bei valkšnumo analizės metodus.

Galima teigti, kad vienu ar kitu atveju betono valkšnumo koeficientui bei traukimosi deformacijoms nustatyti, taikant EC2 normų [12] rekomenduojamas priklausomybes, nėra tiksliai įvertinamas ilgalaikis elemento įtempčių ir deformacijų būvis tam tikru stebimuoju laiko momentu  $t$ .

Ilgalaikėms betono deformacijoms didelę įtaką turi aplinkos santykinis drėgnumas  $RH$ . Tai lemia iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų ilgalaikį įtempčių ir deformacijų būvį, išankstinio įtempio nuostolių kitimą laike. Paprastai eksperimentinių tyrimų metu neįmanoma išlaikyti pastovių oro sąlygų. Todėl įvairių tyrimų autoriai dažniausiai pateikia aplinkos santykinio drėgno vidutinės skaitines reikšmes arba jo kitimo ribas.

Šio veiksnio įvertinimas labai svarbus tuo atveju, kai bandymų autoriai nepateikia betono valkšnumo bei traukimosi deformacijų charakteristikų. Todėl minėtus parametrus skaičiuojant pagal EC2 normų [12] rekomendacijas, imant eksperimentiniuose tyrimuose pateiktas vidutinės santykinės oro drėgmės reikšmes, nėra tiksliai įvertinama šio veiksnio įtaka ilgalaikėms betono deformacijoms tam tikru stebimuoju laiko momentu  $t$ .

Atsižvelgiant į sudėtingas gelžbetoninių elementų gamybos sąlygas, galima teigti, kad elemento skerspjūvio geometriinių rodiklių, pradinių armatūros įtempčių ir kitų parametru netikslus įvertinimas gali turėti didelę įtaką skaičiuojant ilgalaikes betono deformacijas. Daugeliu atvejų iš anksto įtempti gelžbetoniniai elementai buvo gaminami stenduose. Todėl įvairių tyrimų autoriai dažniausiai pateikia visų eksperimentiniais tyrimais bandytų elementų vienodas elemento skerspjūvio geometriinių rodiklių skaitines reikšmes arba jų kitimo ribas. Taip pat teoriniams skaičiavimams naudojami medžiagų vidutiniai stiprumo charakteristikų rodikliai, nustatyti bandant standartinius bandinius eksperimentinių tyrimų metu. Šiuos parametrus įvertinti labai svarbu tuo atveju, kai eksperimentinių tyrimų autoriai nepateikia betono valkšnumo bei traukimosi deformacijų charakteristikų.

#### 3.2. Nesupleišėjusių iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų ilgalaikių išlinkių statistinė analizė

Vertinant atskiro metodo tikslumą santykiniais įlinkiams  $f_{th}(t)/f_{exp}(t)$  (čia  $f_{th}(t)$  apskaičiuotas, o  $f_{exp}(t)$  – eksperimentinis išlinkis) buvo nustatytos svarbiausios statistinės charakteristikos – vidurkis ir standartas. Atlikta atskirai kiekvieno autoriaus duomenų bei visai eksperimentinių duomenų imties statistinė analizė.

**1 lentelė.** Eksperimentinių iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų pagrindinės charakteristikos**Table 1.** Main characteristics of specimens

Eil. Nr.	Autorius	Elemento skerspjūvio tipas	Armavimo būdas	Armavimo tipas	Išankstiniai armatūros įtempiai, MPa	Betono amžius apspaudimo (apkrovimo) momentu, dienos	Stebėjimo trukmė, dienos	Skaičiuojamasis ilgis, m	Aukštis, $\times 10^{-2}$ , m	Plotis, $\times 10^{-2}$ , m	Armavimo procentas, %	$f_{c,15}(t_0)$ , MPa
1	A. F. Shaikh ir kt. [13] **	1	3	5,7	850–1200	7	123–172	4,6	20,3	15,2	0,31–0,62	26,6–31,2
2	I. I. Ulickis ir kt. [34, 35] *	1	3	6	263–268	17	180	2,3	20,0	10,0	2,24	22,4
3	M. Simonovas ir kt. [36] **	1	3	4	136–155	14–28	134–148	1,5	14,0	8,0	3,53	22,1–25,6
4	E. A. Jasenko ir kt. [39] *	1	3	5	393–617	9	378	1,8	18,0	10,0	1,33–2,02	36,4
5	E. Dulinskas [33] #	2	3	7	966–1011	2–14	48–138	1,6	16,6	5,3	1,57	41,5–52,2
6	A. Dmitrijevas ir kt. [32] **	1	3	7	250–877	9÷10	90–110	2,1	18,1–18,6	14,5–15,2	1,3–2,8	19,1–23,1
7	B. Espion ir kt. [18] **	1	3	5	1 320	14(28,85)	1 870	8,0	40,0	34,0	1,05–1,26	40,3–45,4
8	Černojarovas ir kt. [37] **	1	3	5	210–645	28	105	1,0	10,0	10,0	2,55	26,1
9	Černojarova ir kt. [38] #	1	3	8	596–710	20	144	2,2	20,0	8,6?14,2	1,14–1,92	39,9

Pastabos:

- |                  |  |
|------------------|--|
| 1 – stačiakampis | 4 – centrinis, vienpusis, be mišraus armavimo  |
| 2 – dvitėjis     | 5 – nesimetris, dvipusis, mišrusis armavimas   |
| 3 – į atsparas   | 6 – nesimetris, vienpusis, be mišraus armavimo |
|                  | 7 – nesimetris, dvipusis, be mišraus armavimo  |
|                  | 8 – centrinis, dvipusis, be mišraus armavimo   |

\* betono valkšnumo koeficientas ir laisvojo traukimosi deformacija imti iš eksperimentinių tyrimų

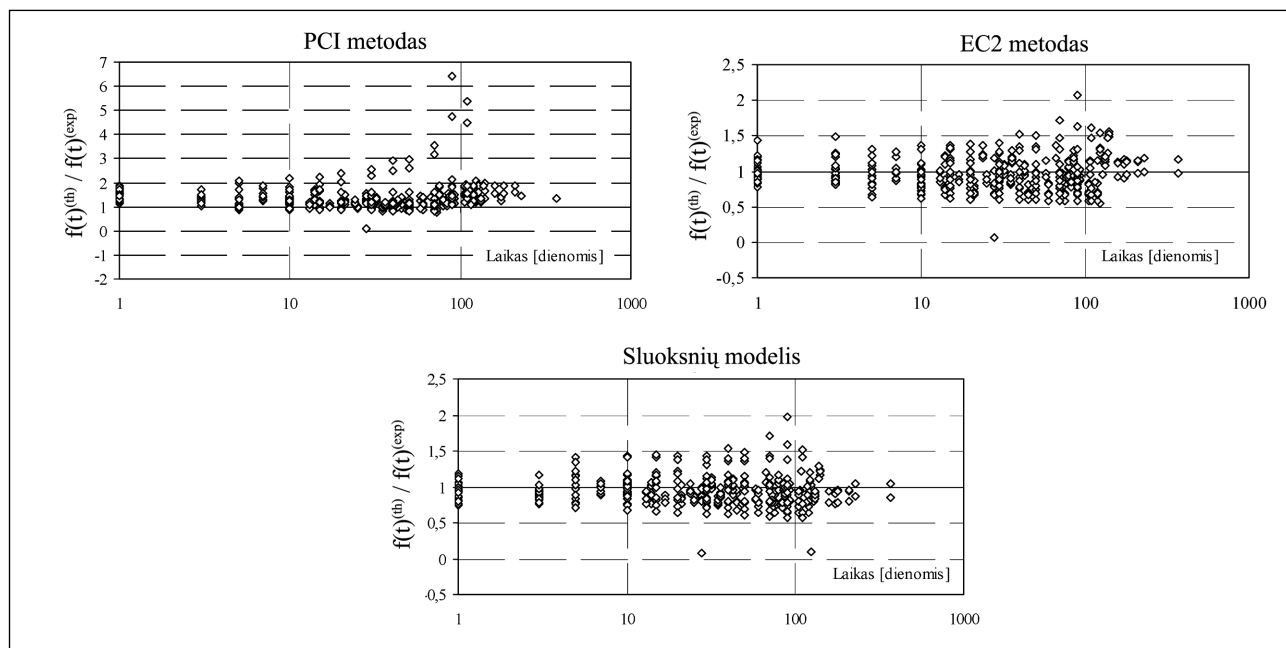
\*\* betono valkšnumo koeficientas ir laisvojo traukimosi deformacija nustatyti EC2 metodu [12]

# betono laisvojo traukimosi deformacija imta iš eksperimentinių tyrimų; betono valkšnumo koeficientas nustatytas EC2 metodu [12]

– pradinis apspaudimo intensyvumas  $\eta = \sigma_c(t_0) / f_{c,cyl}(t_0) < 0,45$ , čia  $\sigma_c(t_0)$ ,  $f_{c,cyl}(t_0)$  – atitinkamai betono įtempiai ties iš anksto įtempta armatūra ir cilindrinis gniuždomojo betono stipris elemento apkrovos momentu,–  $E_{sp} = 2,0 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ ,  $E_s = E'_s = 2,0 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ ;–  $f_{c,15}(t_0)$  – gniuždomojo betono 150 mm kubelių stipris apspaudimo momentu.**2 lentelė.** Nesupleišėjusių iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų santykinų išlinkių ( $f_{th}(t) / f_{exp}(t)$ ), apskaičiuotų įvairiais metodais pagal skirtingų autorių eksperimentinius duomenis, vidurkis bei standartas**Table 2.** Mean value and standard deviation for relative cambers ( $f_{th}(t) / f_{exp}(t)$ ), estimated by different methods for experimental data of each author

Eil. Nr.	Metodas Autorius	PCI [10]		EC2 [12]		Integralinis metodas	
		vidurkis	standartas	vidurkis	standartas	vidurkis	standartas
1	A. F. Shaikh ir kt. [13]	1,528(1,271)	0,264(0,319)	1,311(1,155)	0,194(0,215)	1,048(0,954)	0,139(0,141)
2	I. I. Ulickis ir kt. [34, 35]	1,683(1,650)	0,194(0,213)	1,106(1,102)	0,095(0,096)	0,926(0,924)	0,080(0,081)
3	M. Simonovas ir kt. [36]	1,336(1,382)	0,335(0,393)	0,731(0,734)	0,079(0,081)	0,833(0,845)	0,100(0,108)
4	E. A. Jasenko ir kt. [39]	1,590(1,557)	0,235(0,236)	1,215(1,219)	0,129(0,121)	1,082(1,085)	0,120(1,112)
5	E. Dulinskas [33]	1,244	0,213	1,006	0,147	0,918	0,107
6	A. S. Dmitrijevas ir kt. [32]	1,179(1,148)	0,275(0,281)	0,931(0,923)	0,179(0,174)	0,996(1,003)	0,202(0,194)
7	B. Espion ir kt. [18]	1,426(1,385)	0,211(0,231)	0,965(0,965)	0,151(0,143)	0,980(0,985)	0,120(0,114)
8	Bendras (380 stebėjimo taškų)	1,312	0,283	0,966	0,201	0,931	0,160

Pastaba: skliaustuose pateikiami statistinės analizės, įvertinant ir trumpalaikių išlinkių sklaidą, rezultatai.



2 pav. Skirtingais metodais apskaičiuotų nesupleišėjusių iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų santykinų išlinkių ( $f_{th}(t)/f_{exp}(t)$ ) sklaida laikui bėgant

Fig 2. Scatter of relative camber ( $f_{th}(t)/f_{exp}(t)$ ) estimated by different methods

Apskaičiavimo rezultatai, pateikti 2 lentelėje, parodė, kad nesupleišėjusių iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų ilgalaikiai išlinkiai tiksliausiai įvertinti sluoksnų modeliu (vidurkis – 0,93, standartas – 16 %) bei EC2 normų metodu [12] (vidurkis – 0,97, standartas – 20,1 %). PCI [10] normų metodu gauta didesnė paklaida (vidurkis – 1,31 ir standartas – 28,3 %).

2 pav. pateikiama įvairiais metodais apskaičiuotų iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų santykinų išlinkių sklaida laiko atžvilgiu. Gauti rezultatai akivaizdžiai parodo, kad pernelyg supaprastintas PCI [10] metodas neleidžia užtikrinti patikimo išlinkių prognozavimo. SNiP [9] metodu nesupleišėjusių iš anksto įtemptų gelžbetoninių elementų ilgalaikių išlinkių lyginamoji analizė atlikta nebuvo.

#### 4. Išvados

Atlikti lyginamieji statistiniai skaičiavimai, kuriuose sluoksnų metodas lygintas su normų metodais. Statistiniai rodikliai (vidurkis, variacijos koeficientas ir standartas) nustatyti santykinėms išlinkio (kreivio) reikšmėms (61 elementas, 380 eksperimentinių taškų) ( $f_{th}(t)/f_{exp}(t)$ ) (čia  $f_{th}(t)$  – teoriškai apskaičiuotas, o  $f_{exp}(t)$  – eksperimentiškai nustatytas išlinkis (kreivis)).

Nustatyta, kad ilgalaikiai išlinkiai tiksliausiai įvertinti sluoksnų modeliu (vidurkis – 0,93, standartas – 16 %) bei EC2 normų metodu [12] (vidurkis – 0,97, standartas – 20,1 %); PCI [10] normų metodu gauta didesnė paklaida (atitinkamai vidurkis – 1,31 ir standartas – 28,3 %).

#### Literatūra

1. *CEB–FIP Model Code 90*. Comité Euro–International du Béton–Fédération Internationale de la Précontrainte, Ed. Thomas Telford, London. 1993.
2. Tazawa, E. I.; Miyazawa S. Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Research*, 25, December, 1995, p. 1633–1638.
3. Zhang, J.; Li, V. C.; Wu, C. Influence of reinforcing bars on shrinkage stresses in concrete slabs. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 126(12), Dec. 2000, p. 1297–1300.
4. Alwis, W. A. M. Stress redistribution in RC beams and columns. In: *Proc. of 6th International Symposium on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi–Brittle Materials (CONCREEP–6&MIT)*. Cambridge, USA, 20–22 Aug. 2001, p. 803–808.
5. Ghali, A.; Azarnejad, A. Deflection prediction of members of any concrete strength. *ACI Structural Journal*, 96(5), Sept. – Oct. 1999, p. 807–816.
6. Batchelor, B. D.; Srinivasan, J.; Green, M.F. Losses in partially prestressed concrete. *Canadian Journal*, 15(5), 1988, p. 890–899.
7. Gilbert, R. I. Shrinkage, cracking and deflection—the serviceability of concrete structures. *Electronic Journal of Structural Engineering* 1, 2001, p. 15–37.
8. Saje, F.; Lopatic, J. A Time–dependent analysis of reinforced, prestressed and composite concrete plane frames. *International Journal for Engineering Modelling*, Split, 10 (1–4), 1997, p. 17–24.
9. *SNiP 2.03.01–84. Building Code: Concrete and reinforced concrete structures* (СНИП 2.03.01–84\*. Бетонные и железобетонные конструкции. Строительные нормы и правила). Moscow: Gosstroj SSSR, 1985. 71 p. (in Russian).



10. *Pre-cast/Prestressed Concrete Institute. PCI Design Handbook. Pre-cast and prestressed concrete.* Fourth edition. PCI Industry Handbook Committee. Chicago, Illinois, 1992. 350 p.
11. *STR 2.05.05:2005. Building Code: Concrete and reinforced concrete structures (STR 2.05.05:2005. Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas).* Lietuvos Respublikos Aplinkos ministerija, 2005. 121 p. (in Lithuanian).
12. *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings.* European Committee for Standardization. Pr-EN 1992–1, October 2001. 230 p.
13. Shaikh, A. F.; Branson, D. E. Non-tensioned steel in prestressed concrete beams. *PCI Journal*, 15(1), Jan.–Febr. 1970, p. 14–36.
14. Al-Azi, K. Y. M.; Sumec, J. Time-dependent behaviour of uncracked sections of composite prestressed concrete beams under sustained loads using a general method. *Building Research Journal*, 47(1), 1999, p. 1–26.
15. Ghali, A., Azamejad, A. Deflection prediction of members of any concrete strength. *ACI Structural Journal*, 96(5), Sept. – Oct. 1999, p. 807–816.
16. Tazawa, E. I.; Miyazawa, S. Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Research*, 25, December, 1995, p. 1633–1638.
17. Bacinskas, D. *Integral model for long-term deformation analysis of flexural reinforced concrete members.* PhD thesis, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, 2002. 103 p. (in Lithuanian).
18. Espion, B. Application of some time-dependent prediction models to the analysis of structural elements under sustained load. In: *Proc. preprints of the 4th RILEM International Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete: Mathematical Modelling.* Northwestern University, Evanston Illinois, Aug. 26–29, 1986, p. 609–622.
19. Kawakami, M., Ghali, A. Time-dependent stresses in prestressed concrete sections of general shape. *PCI Journal*, 41(3), May–June 1996, p. 96–105.
20. Krizma, M.; Jerga, J., Balaz, M. *Rheological deformations of RC beams.* CTU Report, 4(2), Prague: Czech Technical University, 2000, p.77–81.
21. Nie, J., Cai, Ch. S. Deflection of cracked RC beams under sustained load. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol 126, No 6, June 2000, p. 708–716.
22. Prasada, R. A. S.; Jayaraman, R.; Vimalanandam, V. and Sai Babu, S. Predicting creep and shrinkage effects in cracked concrete elements. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120(10), Sept. 1994, p. 2784–2792.
23. Sato, R.; Xu, M.; Ujike, I. Effect of tension softening on time-dependent deformation and crack width of reinforced concrete flexural members. In: *Proc. of 3rd International Symposium of Fracture Mechanics of Concrete Structures.* Ed. by H. Mihashi and K. Rokugo. Freiburg: AEDIFICATIO Publishers, 1998, p. 1341–1352.
24. Gilbert, R. I. *Time-effects in concrete structures.* Elsevier Science Publishers, Amsterdam–Oxford–New–York–Tokyo, 1988. 321 p.
25. Zamblauskaitė, R. *Layer model for stress and strain analysis of prestressed concrete members.* PhD thesis, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, 2005. 154 p. (in Lithuanian).
26. Lemys, L. L. Calculation of RC constructions using full diagrams of concrete and reinforcement. *Concrete and reinforced (Бетон и железобетон)*, 7, 1991, p. 21–23 (in Russian).
27. Xolmianskij, M. M. *Concrete and reinforced concrete: deformation and strength (Бетон и железобетон: деформативность и прочность).* Moscow: Stroizdat, 1997. 576 p. (in Russian).
28. Kaklauskas, G. *Integral flexural constitutive model for deformational analysis of concrete structures.* Monograph. Vilnius: Technika, 2001. 140 p.
29. Kaklauskas, G. Flexural layered deformational model of reinforced concrete members. *Magazine of Concrete Research*, 56(10), December 2004, p. 575–584.
30. Gutierrez, S. E.; Cudmani, R. O.; Danesi, R. F. Time-dependent analysis of reinforced and prestressed concrete members. *ACI Structural Analysis Journal*, July–August, 1996, p. 420–427.
31. Neville, A. M. *Properties of Concrete.* 4th edition. Longman Scientific & Technical, England, 1997. 844 p.
32. Dmitriev, A. S.; Maxto, R. K.; Birulin, J. F. Influence of initial prestress on cracking, deformation and strength of prestressed concrete elements. *Concrete and reinforced (Бетон и железобетон)*, No 2, Moscow: Stroizdat, 1969, p. 190–209 (in Russian).
33. Dulinskas, E. *Research of the influence of steam curing conditions on the strength of PC beams (Исследование усталости и жесткости преднапряженных железобетонных балок с учетом напряженного состояния в процессе теплообработки).* PhD thesis. Vilnius, 1973. 258 p. (in Russian).
34. Ulickij, I. I. et al. *Long-term deformation analysis of reinforced concrete members (Железобетонные конструкции с учетом длительных процессов).* Kijev: Gostroiizdat, 1960. 494 p. (in Russian).
35. Ulickij, I. I. *Theory and calculation of long-term deformations of reinforced concrete members (Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов).* Kijev: Budivelnik, 1967. 348 p. (in Russian).
36. Simonov, M. ; Matuzov, G. G.; Karapetian. Using of high strength concrete in prestressed concrete members. *Concrete and reinforced (Бетон и железобетон)*, No 5, 1958 (in Russian).
37. Cernojarov, V. A. *Tests on the prestress losses of prestressed concrete beams (Экспериментальные исследования потерь преднапряжения арматуры в центрально обжатых железобетонных элементах. Исследования по бетону и железобетонным конструкциям).* Moscow: Stroizdat, 1974 (in Russian).
38. Cernojarova, T. G.; Jasin, A. V. *Long-term sustained loading tests on PC beams (Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных железобетонных балок под воздействием усилий обжатия и длительной нагрузки. Прочность и жесткость железобетонных конструкций).* Moscow: Stroizdat, 1971 (in Russian).
39. Jasenko, E. A.; Kornilova, S. V.; Bobin, A. A.; Sosu, G. *Theory of concrete creep in reinforced concrete structures (Теория ползучести железобетонных конструкций).* Pridneprovsk, 2000. 600 p. (in Russian).
40. Vaikov, B. H.; Sigalov E. E. *Reinforced concrete structures (Железобетонные конструкции).* Moscow: Stroizdat, 1991. 767 p. (in Russian).

**Renata ZAMBLAUSKAITĖ.** Younger science employer at the Department of Bridges and Special Structures, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Lithuania. PhD (2005) at VGTU. Research interests: deformation of RC and PC structures.

**Gintaris KAKLAUSKAS.** Professor and Head of Dept of Bridges and Special Structures at VGTU, Lithuania. PhD and Dr Habil at VGTU. Recipient of Fulbright Fellowship (for research work at the University of Illinois, Urbana-Champaign, 1996) and Marie Curie Fellowship (experienced researcher category, 2002–2003). Member of the FIB Task Group 4.1 “Serviceability Models”. Research interests: various topics of RC, particularly constitutive modelling and numerical simulation of RC structures.

**Povilas VAINIŪNAS.** Doctor, Professor. Dean of Civil Engineering Faculty at Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania. PhD (1970) from Kaunas Polytechnical Institute (presently Kaunas Technological University). Chairman of national group of International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). Former vice-president (1992–95) and board member (since 1995) of Association of European Civil Engineering Faculties (AECEF). Chairman of scientific committee of biennial intern. conference „Modern building materials, structures and techniques“ held at VGTU, Lithuania. Author and co-author of over 70 research papers. Research interests: mechanics of reinforced concrete, theory of durability and reliability, design of buildings, development of territory planning and building coder system of Lithuania and real estate assessment.