

ANALYTICAL MODELLING OF CONCRETE LONG-TERM AND SHORT-TERM STRAIN

M. Augonis

To cite this article: M. Augonis (2001) ANALYTICAL MODELLING OF CONCRETE LONG-TERM AND SHORT-TERM STRAIN, *Statyba*, 7:1, 15-22, DOI: [10.1080/13921525.2001.10531693](https://doi.org/10.1080/13921525.2001.10531693)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/13921525.2001.10531693>



Published online: 30 Jul 2012.



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



Article views: 43

BETONO TRUMPALAIKIŲ IR ILGALAIKIŲ DEFORMACIJŲ ANALITINIS MODELIAVIMAS

M. Augonis

Kauno technologijos universitetas

1. Įvadas

Betonas susideda iš įvairių komponentų, pasižyminčių nevienodomis fizinėmis bei mechaninėmis savybėmis, todėl jo savybės labai priklauso nuo šių komponentų kiekio ir jų savybių. Siekiant įvertinti skirtingų betono komponentų įtaką jo deformacijoms, betoną tikslinga imti kaip stambiojo užpildo ir skiedininės dalies visumą. Stambiojo užpildo valkšnumas bei susitraukimas, palyginti su skiedinine dalimi, yra žymiai mažesnis, todėl šiuos dydžius galima prilyginti nuliui. Skaičiavimai supaprastėja, nes tada pakanka įvertinti tik skiedinio ilgalaikį deformavimąsi, nustatomą eksperimentiškai. Analitiniai modeliai, kai betono valkšnumas skaičiuojamas pagal sudėtį, neįvertina jo komponentų kilmės, t. y. cemento ar stambiojo užpildo tipo ar jų deformacinių savybių, nors eksperimentais įrodyta [1], jog šie veiksniai turi didelės įtakos betono ilgalaikėms deformacijoms. Autorius siūlo du metodus betono deformacijoms skaičiuoti: betoną laikant kompozitu ir, taikant baigtinių elementų metodą, betoną skaičiuoti kaip stambiojo užpildo ir skiedininės dalies elementų visumą.

2. Betono tamprumo modulis

Trumpalaikės betono deformacijas nusako jo tamprumo modulis. Kompozito tamprumo modulį galima apskaičiuoti žinant jo sluoksnių tampriąsias savybes. Kadangi betonas yra nevienalytė medžiaga, jo tamprumo modulį galima skaičiuoti supaprastintai, t. y. įvertinant betono komponentų tamprumo modulius. Nevienalytės medžiagos tamprumo moduliui skaičiuoti, atsižvelgiant į komponentų sluoksnių išsidėstymą, taikomi du modeliai [2]: lygiagretusis modelis (1 pav.):

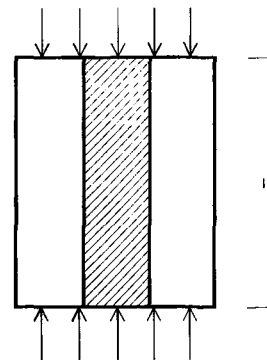
$$E = \sum_{i=1}^n E_i V_i ; \quad (1)$$

ir nuoseklusis modelis (2 pav.):

$$E = \frac{l E_1 E_2 \dots E_n}{l_1 E_2 \dots E_n + l_2 E_1 \dots E_n + \dots + l_n E_1 \dots E_{n-1}} , \quad (2)$$

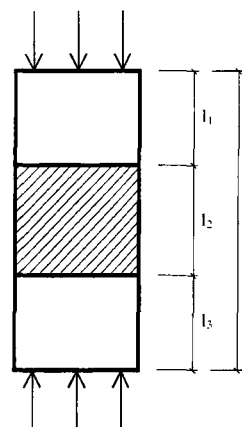
E_i – i-tojo sluoksnio tamprumo modulis; V_i – i-tojo sluoksnio santykinis tūris; l_i – i-tojo sluoksnio ilgis.

Abu šie modeliai grindžiami prielaida, kad nevienalytės medžiagos deformacijų laukas sudaro pastovų dydį.



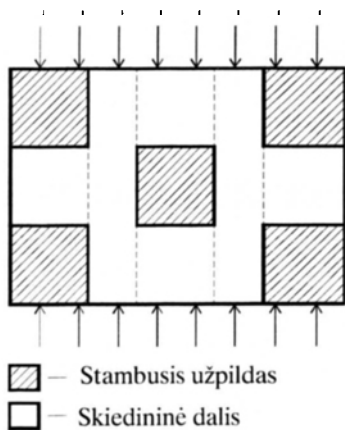
1 pav. Kompozito su išilgai apkrovos išdėstytais sluoksniais schema

Fig 1. Scheme of a composite with layers spaced longitudinally to the load



2 pav. Kompozito su skersai apkrovos išdėstytais sluoksniais schema

Fig 2. Scheme of a composite with layers spaced across the load



3 pav. Betono struktūros fragmentas

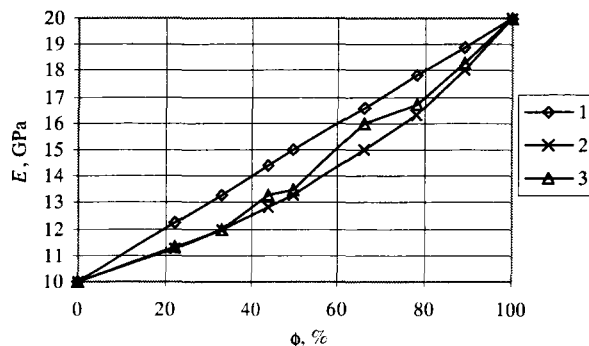
Fig 3. Part of concrete structure

Kadangi betono struktūrą sudaro skiedininėje jo dalyje netolygiai išsibarstę stambiojo užpildo grūdėliai (3 pav.), betono tamprumo modulį reikėtų skaičiuoti taikant abu skaičiavimo modelius. Tuo tikslu betono struktūra yra dalijama į sąlyginius sluoksnius išilgai apkrovos (3 pav.) ir, taikant nuoseklųjį modelį, apskaičiuojami kiekvieno tokio sluoksnio redukuotieji tamprumo moduliai $E_{i,red}$. Betono tamprumo modulis E_c randamas pritaikius lygiagrečiųjį modelį, kuriame išilginių sąlyginių sluoksnių tamprumo moduliai yra jau apskaičiuotieji $E_{i,red}$ [2]:

$$E_c = \sum_{i=1}^n E_{i,red} V_{i,red} . \quad (3)$$

Tokį betono tamprumo modulio skaičiavimo modelį galima būtų pavadinti mišriu ju. Betono tamprumo moduliai, apskaičiuoti pagal pateiktus tris modelius (lygiagrečiųjį, nuoseklųjį ir mišrųjį), pavaizduoti 4 pav. Iš šio paveikslo matyti, jog tamprumo modulis pagal mišrųjį modelį yra tarp lygiagrečiojo ir nuosekljojo modelių, nors esant tam tikroms stambiojo užpildo koncentracijoms ϕ tamprumo modulis E , apskaičiuotas pagal mišrųjį modelį, atitinka nuosekljojo modelio E . Taip yra todėl, kad esant šioms koncentracijoms visų išilgai išskaidytų sluoksnių tamprumo moduliai buvo vienodi, t. y. $E_{i,red} = E_{i+1,red}$, kai $i=1...n-1$.

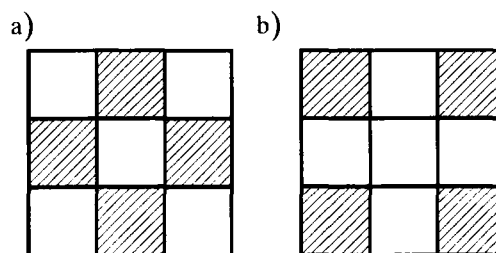
Skaičiavimai atlikti betono struktūrą skaidant tik į tris išilginius sąlyginius sluoksnius (5 pav.). Tamprumo modulio variacija tarp lygiagrečiojo ir nuosekljojo modelių priklauso nuo betono struktūros. Pavyzdžiui, imdami paprasčiausią trijų sluoksnių modelį su ta pačia stambiojo užpildo koncentracija priklausomai nuo struk-



4 pav. Betono tamprumo modulių priklausomybė nuo stambiojo užpildo koncentracijos ϕ pagal: 1 – lygiagrečiųjį modelį; 2 – nuoseklųjį modelį; 3 – mišrųjį modelį

Fig 4. Ratio of coarse aggregate ϕ and concrete moduli of elasticity calculated by: 1 – parallel model; 2 – consecutive model; 3 – mixed model

tūros galime gauti skirtingus to modelio tamprumo modulius. 5 pav. pateiktų modelių tamprumo moduliai (kai $E_{užp} = 20$ GPa, $E_m = 10$ GPa) yra 13,0 ir 13,4 GPa, o tai sudaro ~3%.



5 pav. Betono struktūros, kai stambiojo užpildo koncentracija pastovi

Fig 5. Structures of concrete with the same ratio of coarse aggregate

Betono tamprumo modulį, įvertinant jo komponentų tampriąsias savybes, galima skaičiuoti taikant baigtinių elementų metodą. Kad nereikėtų modeliuoti betono struktūros erdvinio modelio, paprasčiau betono tamprumo modulį E_c skaičiuoti pagal plokščio uždavinio atvejį. Žinant, jog

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{ir} \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{l} , \quad (4)$$

Huko dėsnį galima užrašyti taip:

$$E_c = \frac{F_c l}{A_c \Delta l}, \quad (5)$$

F_c – betono elementą veikianti jėga; l – elemento ilgis; A_c – elemento skerspjūvio plotas; Δl – elemento poslinkis nuo jį veikiančios jėgos F_c .

Baigtinių elementų metodu apskaičiavus betono, kaip stambiojo užpildo ir skiedininės dalies baigtinių elementų visumos, pailgėjimą nuo bet kokios koncentruotosios jėgos F_c iš (5) formulės galima gauti tokio betono tamprumo modulį.

3. Betono susitraukimas

Remiantis tamprumo teorija, galima įvertinti ir betono komponentų deformacinių savybių įtaką jo susitraukimui. Kadangi stambiojo užpildo susitraukimas lygus nuliui, toks betono susitraukimo skaičiavimo metodas pagrįstas betono elemento deformacijų, sukeltų įtempimų, atitinkančių skiedininės dalies susitraukimo deformacijas, skaičiavimu. Žinodami betono skiedininės dalies susitraukimo deformacijas, pirmiausia apskaičiuojame jas atitinkančius įtempimus σ :

$$\sigma = E_m \varepsilon_m, \quad (6)$$

E_m ir ε_m – skiedininės dalies tamprumo modulis ir susitraukimo deformacija.

Betono susitraukimo deformacijos apskaičiuojamos, apkrovus betono elementą σ dydžio įtempimais. Būtent toks skaičiavimo metodas labai patogus skaičiuoti baigtinių elementų metodu (BEM). Tačiau reikia pažymėti, jog skaičiuojant BEM, kai didelė stambiųjų užpildų koncentracija ϕ , (6) lygybės taikyti negalima, kadangi, kai $\phi \rightarrow 100\%$, tai $\sigma \rightarrow 0$, o ši lygybė to neįvertina. Todėl tokiu atveju įtempimų dydis priklausys nuo skiedininės dalies betone ploto A_m :

$$\sigma = \frac{A_m E_m}{A_c}. \quad (7)$$

Jei betoną laikysime kompozitu, tai, kaip ir skaičiuojant betono tamprumo modulį, jį reikia išskaidyti į išilginius sluoksnius. Kiekviename sluoksnyje jėga $F_{i,red}$, atitinkanti to sluoksnio skiedininės dalies susitraukimo deformacijas, yra lygi:

$$F_{i,red} = A_i E_{i,m} \varepsilon_{i,m}, \quad (8)$$

o jėga, atitinkanti viso betono skiedininės dalies susitraukimo deformacijas (sluoksnius veikiančių jėgų atstoja-

moji), yra lygi kiekvieno sluoksnio skiedininės dalies susitraukimą atitinkančių jėgų $F_{i,red}$ sumai:

$$F_c = \sum_{i=1}^n F_{i,red}. \quad (9)$$

Remiantis 3 pav. galima pastebėti, jog betono susitraukimas yra lygus bet kurio išilginio sluoksnio susitraukimui:

$$\varepsilon_{c,sh} = \varepsilon_i, \text{ kai } i=1\dots n. \quad (10)$$

Jei laikytume, kad sąlyginiame sluoksnyje veikia ekvivalentinė jėga $F_i = F_{i,red}$, galėtume užrašyti:

$$\frac{F_c l}{E_c A_c} = \frac{F_i l}{E_i A_i} = \frac{F_{i+1} l}{E_{i+1} A_{i+1}} = \dots = \frac{F_n l}{E_n A_n} \quad (11)$$

arba

$$\frac{F_i}{F_{i+1}} = \frac{E_i A_i}{E_{i+1} A_{i+1}}, \quad (12)$$

F_i – i-tąjį sąlyginį sluoksnį veikianti jėgos F_c ekvivalentinė dalis. Tuomet remiantis (9) lygybe galima užrašyti:

$$F_c = F_i \left[1 + \frac{E_j A_j}{E_i A_i} + \dots + \frac{E_n A_n}{E_i A_i} \right],$$

kai $i=1\dots n$ ir $j \neq i$. (13)

Žinodami bet kurį sluoksnį veikiančią jėgą F_i galime apskaičiuoti viso betono susitraukimo deformacijas:

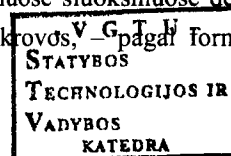
$$\varepsilon_c = \varepsilon_i = \frac{F_c}{A_c E_c} = \frac{F_i}{A_i E_i}. \quad (14)$$

4. Betono valkšnumas

Taikant pasiūlytą mišrųjį modelį betono valkšnumui skaičiuoti reikia įvertinti įtempimų persiskirstymą tarp sluoksnių. Norint išvengti sudėtingų integralinių reiškinių, geriausia taikyti Z. P. Bažant'o pasiūlytą senėjančios medžiagos efektyviojo modulio metodą, pagal kurį deformacijos bet kuriuo laiko momentu t nustatomos pagal formulę [3]:

$$\varepsilon(t, t_0) = \sigma(t_0) \left[\frac{1}{E(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E(t_0)} \right] = \sigma(t_0) J(t, t_0), \quad (15)$$

o atskiruose sąlyginiuose sluoksniuose deformacijos, sukeltos ilgalaikės apkrovos, $V-G-T$ pagal formulę [4]:



$$\varepsilon_i(t, t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E_i(t_0)} + \frac{\sigma(t_0)}{E_i(t)} \sum_{i=1}^n \varphi_i(t, t_0) V_i. \quad (16)$$

Žinant, jog išilgai apkrovos išdėstytų n sluoksnių bendrosios deformacijos yra vienodos:

$$\varepsilon_i(t, t_0) = \varepsilon_{i+1}(t, t_0) = \dots = \varepsilon_n(t, t_0), \quad (17)$$

galima užrašyti:

$$\begin{aligned} \sigma_i(t_0) \left[\frac{1}{E_i(t_0)} + \frac{\varphi_i(t, t_0)}{E_i(t)} \right] = \\ \sigma_{i+1}(t_0) \left[\frac{1}{E_{i+1}(t_0)} + \frac{\varphi_{i+1}(t, t_0)}{E_{i+1}(t)} \right] = \dots \\ \sigma_n(t_0) \left[\frac{1}{E_n(t_0)} + \frac{\varphi_n(t, t_0)}{E_n(t)} \right], \end{aligned} \quad (18)$$

kai $i=1\dots n-1$.

Tarp kompozito atstojamosios išraiškos $F_c(t)$ ir sąlyginių sluoksnių atstojamųjų $F_i(t)$ išraižų sumos turi būti išlaikyta pusiausvyra, t. y.

$$F_c(t) = \sum_{i=1}^n F_i(t). \quad (19)$$

Jeigu tartume, kad kompozitą veikia tam tikri ekvivalentiški įtempimai $\sigma_c(t)$, tai pagal (19) lygtį galima užrašyti:

$$\sigma_c(t, t_0) = \sum_{i=1}^n \sigma_i(t, t_0) V_i \quad (20)$$

arba

$$\begin{aligned} \sigma_c(t, t_0) = \frac{\sigma_i(t, t_0)}{A_c} \times \\ \left[A_i + \frac{E_{i+1} A_{i+1}}{E_i} + \dots + \frac{E_n A_n}{E_i} \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

Iš (21) lygties apskaičiavus kiekviename sąlyginiame sluoksnyje veikiančius įtempimus, galima rasti tų sluoksnių valkšnumo koeficientus:

$$\varphi_{i,red}(t, t_0) = \frac{\sigma_i(t, t_0) \sum_{l=1}^k \frac{\varphi_{i,l}(t, t_0)}{E_{i,l}(t)} V_{i,l}}{\varepsilon(t_0)}. \quad (22)$$

Kadangi

$$E_{i,red}(t_0) = \frac{\sigma_i(t_0)}{\varepsilon_i(t_0)} \quad (23)$$

ir žinant, kad $\varepsilon(t_0) = \varepsilon_i(t_0)$, (22) lygtį galima perrašyti:

$$\varphi_{i,red}(t, t_0) = E_{i,red} \sum_{l=1}^k \frac{\varphi_{i,l}(t, t_0)}{E_{i,l}(t)} V_{i,l}. \quad (24)$$

Kadangi kompozito valkšnumo koeficientas, kai sluoksniai yra išilgai apkrovos, lygus

$$\begin{aligned} \varphi_c(t, t_0) = [E_c(t_0) \varphi_1(t, t_0) \varphi_2(t, t_0) \times \dots \\ \varphi_n(t, t_0)] + [\varphi_2(t, t_0) \dots \varphi_n(t, t_0) \times \\ E_1(t_0) V_1 + \dots + \varphi_1(t, t_0) \varphi_2(t, t_0) \times \dots \\ \varphi_{n-1}(t, t_0) E_n(t_0) V_n] \end{aligned} \quad (25)$$

tai viso kompozito valkšnumo koeficientas

$$\begin{aligned} \varphi_c(t, t_0) = [E_c(t_0) \varphi_{1,red}(t, t_0) \times \dots \\ \varphi_{2,red}(t, t_0) \times \dots \times \varphi_{n,red}(t, t_0)] + \\ [\varphi_{2,red}(t, t_0) \dots \varphi_{n,red}(t, t_0) \times \\ E_{1,red}(t_0) V_1 + \dots + \varphi_{1,red}(t, t_0) \times \dots \\ \varphi_{n-1,red}(t, t_0) E_{n,red}(t_0) V_n] \end{aligned} \quad (26)$$

Betono valkšnumo deformacijų skaičiavimo lygtis remiantis baigtinių elementų metodu išvesta pagal Z. P. Bažant'o senėjančios medžiagos efektyviojo modulio metodą [3], [5]:

$$\left[K^*(t, t_0) \right] \{ \Delta Z(t) \} - \{ F_0(t, t_0) \} = \{ \Delta F(t) \}, \quad (27)$$

čia $\left[K^*(t, t_0) \right]$ – efektyvioji standumo matrica; $\{ \Delta Z(t) \}$ – poslinkių dėl skiedinio valkšnumo vektorius; $\{ F_0(t, t_0) \}$ – mazginių jėgų vektorius; $\{ \Delta F(t) \}$ – jėgų prieaugio dėl skiedinio valkšnumo vektorius.

5. Teorinių skaičiavimų lyginimas su eksperimento rezultatais

Tamprumo modulio teoriniai skaičiavimai pagal (3) ir (5) formules buvo lyginami su G. Skripkiūno atliktų eksperimentų duomenimis [6]. Teorinių tamprumo modulio reikšmių lyginimas su gautais eksperimentiniais duomenimis pateiktas lentelėje. Šiuose bandymuose stambusis užpildas buvo žvirgždo skalda, kurios tamprumo modulis yra 60 GPa. Tamprumo modulių priklausomybė nuo stambiųjų užpildų koncentracijos pateikta 6 pav. Iš jo matyti, kad tamprumo modulis labiau siai kinta apskaičiavus jį baigtinių elementų metodu.

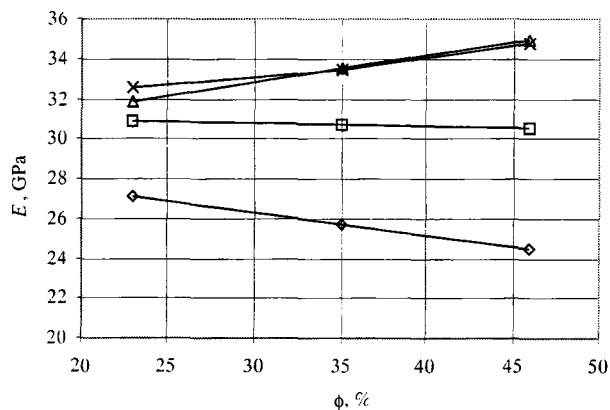
Tamprumo modulių lyginimas

Comparison of moduli of elasticity

Stambiųjų užpildų koncentracija ϕ , %	Skiedininės dalies E_m , GPa	Betono E_c , GPa	E_c , apskaičiuotas pagal BEM, GPa	E_c , apskaičiuotas kaip kompozitui, GPa
23	27,096	30,861	31,856	32,150
35	25,705	30,709	33,547	33,215
46	24,476	30,534	34,913	34,069

Palyginus gautą 11% paklaidą su leistinąja eksperimentine (10%), galima teigti, jog minėtos betono tamprumo modulio skaičiavimo metodikos yra patenkinamos.

Susitraukimo deformacijų teorinės kreivės buvo lyginamos su autoriaus atliktų betono ir jo skiedininės dalies ilgalaikių deformacijų tyrimo duomenimis. Kadangi betonas ir jo skiedininė dalis kietėjo nevienodomis ir nepastoviomis aplinkos sąlygomis, betono susitraukimui nustatyti reikėjo nustatyti aplinkos sąlygų įtaką skiedininės dalies susitraukimui ir tuomet teoriškai apskaičiuoti jos susitraukimą tomis sąlygomis, kuriomis kietėjo betonas. Susitraukimo deformacija yra nuo laiko priklausanti funkcija, todėl minėtoji išraiška buvo pagrįsta žingsnių metodu, t. y. buvo įvertinta visa temperatūros



6 pav. Tamprumo modulių priklausomybė nuo stambiųjų užpildų koncentracijos: 1 – skiedinio eksperimentinė kreivė; 2 – betono eksperimentinė kreivė; 3 – kreivė, apskaičiuota pagal BEM; 4 – kreivė, apskaičiuota kompozitui

Fig 6. Ratio of coarse aggregates and moduli of elasticity. 1 – experimental curve of mortar matrix; 2 – experimental curve of concrete; 3 – theoretical curve of concrete calculated by FEM; 4 – theoretical curve of concrete calculated for a composite

ir santykinės oro drėgmės kitimo eiga skaičiavimus atliekant tam tikrais laiko intervalais. Autoriaus išvesta empirinė išraiška betono skiedininės dalies susitraukimo deformacijoms skaičiuoti yra tokia:

$$\varepsilon_i(t_i) = 5 \left[\frac{(1 + \sqrt{t_i})(K_i + K_{i-1})}{2(t_i - t_{i-1})\sqrt{t_i}} + Q_i + \varepsilon_{i-1}(t_{i-1}) \right] \times 10^{-9},$$

kai $i = 1 \dots n$, (28)

$$K_i = \frac{(t_i^0 - t_{i-1}^0)(11t_i + 33)}{300} - \frac{(H_i - H_{i-1})(t_i + 30)}{300} - \frac{(t_i^0 - t_{i-1}^0)(H_i - H_{i-1})}{2t_i},$$

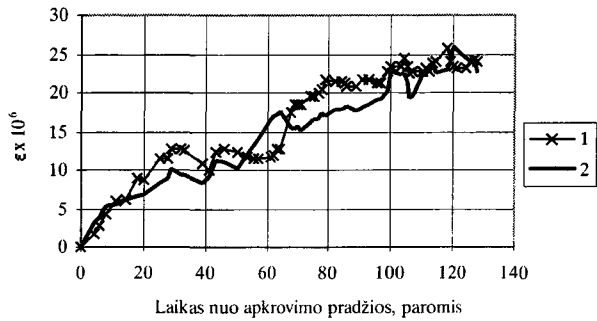
o dydis

$$Q_i = \left[\frac{t_i}{30} \right] \left[\frac{(t_i^0 - t_{i-1}^0)}{0,3\sqrt{t_i}} - \frac{(H_i - H_{i-1})}{1,5\sqrt{t_i}} \right] - \frac{(t_i - t_{i-1})(H_i - H_{i-1})}{2t_i} + \frac{11(t_i - t_{i-1})}{0,14H_i t_i^{3/8}},$$

kai $\varepsilon_0 = K_0 = Q_0 = t_0 = H_0 = 0$.

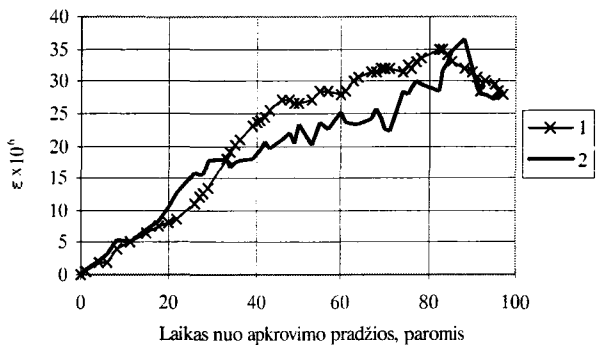
Lygybėse (28–30) $\varepsilon(t)$ – susitraukimo deformacija; t – kietėjimo laikas, kuris pradedamas skaičiuoti praėjus 28 paroms nuo skiedininės dalies kietėjimo pradžios, paromis; H – santykinė oro drėgmė, %; t^0 – oro temperatūra, °C.

Skiedininės dalies eksperimentinė ir apskaičiuota pagal (28) formulę susitraukimo kreivės pateiktos 7 ir 8 pav., kuriuose vidutinis teorinių ir eksperimentinių kreivių nesutapimas yra 9%. Eksperimentinės ir teorinės betono bei pagal (28) formulę (imant betono aplinkos sąlygas) apskaičiuotos skiedininės dalies susitraukimo kreivės pateiktos 9 pav. Iš šio paveikslėlio matyti, kad abiem pateiktais skaičiavimo metodais panašiai apskaičiuojamas betono susitraukimas.



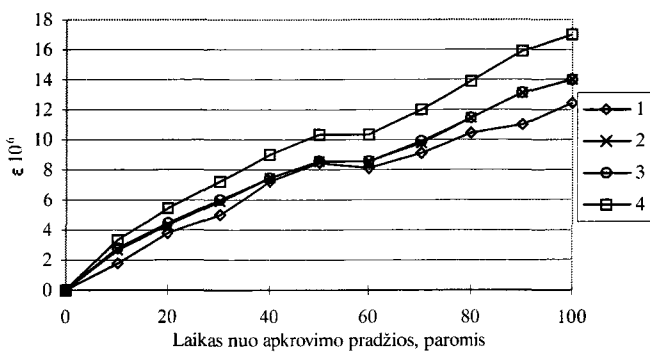
7 pav. I serijos skiedininės dalies susitraukimo kreivės: 1 – gauta eksperimentiškai; 2 – apskaičiuota pagal (28) lygybę

Fig 7. Shrinkage curves of 1st series of mortar matrix: 1 – experimental; 2 – calculated by Eq 28



8 pav. II serijos skiedininės dalies susitraukimo kreivės: 1 – gauta eksperimentiškai; 2 – apskaičiuota pagal (28) lygybę

Fig 8. Shrinkage curves of 2nd series of mortar matrix: 1 – experimental; 2 – calculated by Eq 28



9 pav. Susitraukimo kreivės: 1 – eksperimentinė betono; 2 – apskaičiuota pagal BEM; 3 – apskaičiuota kaip kompozitui; 4 – skiedininės dalies, apskaičiuota pagal (28) lygybę

Fig 9. Shrinkage curves: 1 – experimental, of concrete; 2 – calculated by FEM to concrete; 3 – calculated for a composite; 4 – calculated by Eq 28 for mortar matrix

Betono ($\phi=23\%$) ir jo skiedininės dalies sudėtys 1 m^3 pateiktos 2 lentelėje.

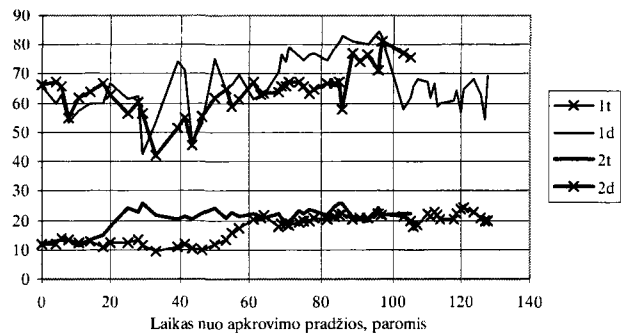
2 lentelė. Betono ir skiedinio sudėtys

Table 2. Composition of concrete and mortar matrix

ϕ	Cementas, kg	Granito skalda, kg	Smėlis, kg	Vanduo, kg	V/C
23	359	599	1189	185	0,52
0	460	0	1524	236	0,51

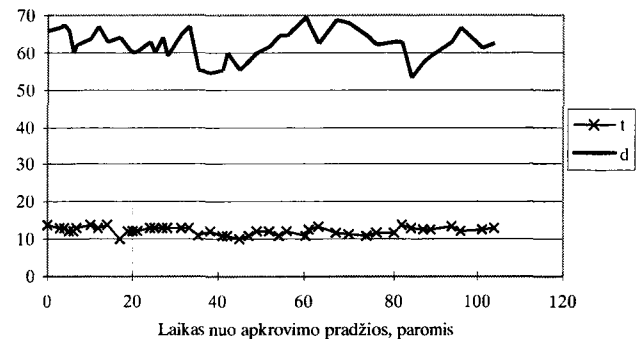
ϕ – stambiojo užpildo koncentracija, %

Betono ir skiedininės dalies bandinių serijos buvo laikomos skirtingomis temperatūros bei santykinės oro drėgmės sąlygomis (10, 11 pav.).



10 pav. Skiedininės dalies: 1t ir 2t – I ir II serijų temperatūros, °C; 1d ir 2d – I ir II serijų santykinės oro drėgmės, %

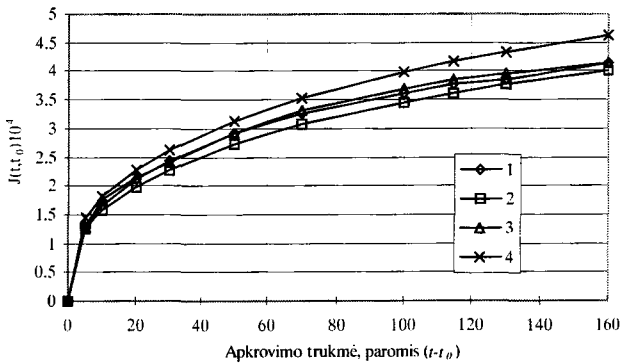
Fig 10. Condition of mortar matrix: 1t and 2t – temperatures of 1st and 2nd series, °C; 1d and 2d – humidity of 1st and 2nd series, %



11 pav. Betono kietėjimo sąlygos: t – temperatūra, °C; d – santykinė oro drėgmė, %

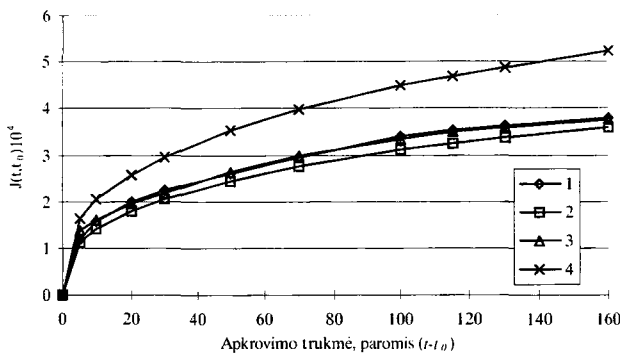
Fig 11. Conditions of concrete hardening: t – temperature, °C; d – humidity, %

Betono valkšnumo deformacijų teorinės kreivės buvo lyginamos su jau minėtais G. Skripkiūno eksperimentiniais betono ir skiedinio ilgalaikių deformacijų tyrimų rezultatais. Gautas valkšnumo funkcijų $J(t, t_0)$ kreivės pateiktos 12–14 pav.



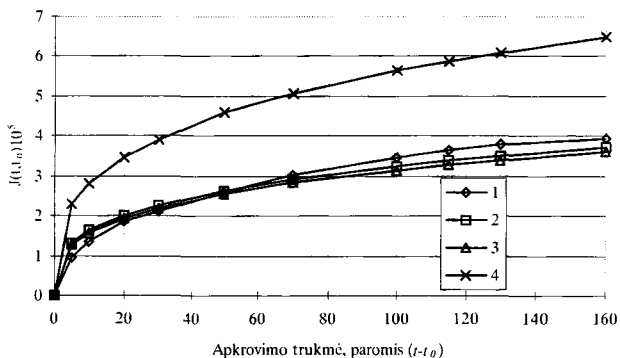
12 pav. Betono ($\phi = 23\%$) valkšnumo kreivės

Fig 12. Concrete ($\phi = 23\%$) creep curves



13 pav. Betono ($\phi = 35\%$) valkšnumo kreivės

Fig 13. Concrete ($\phi = 35\%$) creep curves



14 pav. Betono ($\phi = 46\%$) valkšnumo kreivės

Fig 14. Concrete ($\phi = 46\%$) creep curves

12–14 pav. valkšnumo kreivės sužymėtos tokia tvarka: 1 – eksperimentinė betono; 2 – apskaičiuota pagal BEM; 3 – apskaičiuota kaip kompozitui; 4 – eksperimentinė skiedininės dalies.

In Fig 12–14 creep curves are put by the following order: 1 – experimental, of concrete; 2 – calculated by FEM; 3 – calculated for a composite; 4 – experimental, of mortar matrix.

Bandiniai buvo apkrauti $0,3 R_{pr}$ dydžio apkrovomis; todėl juose pasireiškė tik tiesinis valkšnumas. Aplinkos, kurioje betono ir jo skiedininės dalies bandiniai kietėjo ir buvo laikomi apkrauti, temperatūra buvo 20 ± 3 °C, o drėgmė $70 \pm 10\%$.

6. Išvados

Pateikta betono tamprumo modulio ir ilgalaikių jo deformacijų skaičiavimo metodika, įvertinant betono komponentų kiekius bei jų deformacines savybes, patenkina eksperimentinius duomenis. Stambiojo užpildo frakcijos dydis betono deformacinėms savybėms įtakos beveik neturi, svarbus yra tik jo santykinis kiekis betone, o skaičiavimų rezultatų paklaida dėl skirtingo stambiojo užpildo išsidėstymo betone sudaro ne daugiau kaip 5%.

Vykstant valkšnumo procesui dėl relaksacijos ilgalaikio apkrovimo atveju įtempimai skiedininėje dalyje laikui bėgant mažėja. Vyksta įtempimų persiskirstymas, kurio metu dalis apkrovos, veikiančios skiedininę dalį, persiduoda stambiajam užpildui. Valkšnumą skaičiuojant šiam reiškiniiui įvertinti taikytas Z. P. Bažant'o senėjančios medžiagos efektyviojo modulio metodas, kuris leido išvengti sudėtingų integralinių valkšnumo lygčių.

Literatūra

1. A. M. Neville, W. H. Dilger, J. J. Brooks. Creep of Plain and Structural Concrete. Construction Press, 1983. 361 p.
2. A. Gumuliauskas, G. Skripkiūnas. Sunkiojo betono struktūra ir deformacinės savybės // Konferencijos „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“ pranešimų medžiaga. Vilnius, 1993, p. 335–343.
3. Z. P. Bažant, J.-K. Kim, L. Panula, Y.-P. Xi. Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete // Materials and Structures (RILEM, Paris), Part 2 – Basic creep. Vol 25, 1992, p. 409–421, Part 3 – Creep at drying, p. 21–28.

4. G. Marčiukaitis. Sluoksniuotųjų statybinių kompozitų valkšnumo parametrų nustatymas // *Statyba*, IV t., Nr. 2, Vilnius: Technika, 1998, p. 101–108.
5. I. Cypinas, M. Augonis. Modelling of concrete creep by finite element method // *Materials science*, Vol 6, No 3, 2000, p. 216–222.
6. G. Skripkiūnas. Betono makrostruktūros optimizavimas, atsižvelgiant į jo technologines ir eksploatacines savybes bei žaliavų išteklius / Kauno technologijos universitetas. Technikos mokslų daktaro disertacija. Kaunas, 1993. 177 p.

Įteikta 2000 09 05

ANALYTICAL MODELLING OF CONCRETE LONG-TERM AND SHORT-TERM STRAIN

M. Augonis

Summary

Concrete is not a homogeneous material. However, such an approach does not enable one to precisely determine short-term or long-term strain of concrete which consists of separate materials components with different physical and mechanical properties. Therefore, concrete should be considered a composite of coarse aggregate and mortar. Such a model enab-

les one to take into account different properties of concrete components. The creep or shrinkage of coarse aggregate can be assumed as zero. It is enough to accept only creep or shrinkage of mortar and the present model becomes simpler.

In case of a long term, load stress in matrix decreases because of relaxation. Thus, part of load passes from matrix to coarse aggregate. In order to describe such a phenomenon by integro-differential equations of creep it is necessary to know stress history for each element of matrix. It would be difficult to determine creep in this way. It is by far easier to solve macromechanical model of creep by the method of effective modulus of ageing material developed by Z. P. Bazant. This method requires only the increments of stress and strain.

Figs 6 and 9–12 show that present models give similar results which are quite well-coincident with present experimental data.

.....
Mindaugas AUGONIS. PhD student. Dept of Building Structures. Kaunas University of Technology (KTU), Studentų g. 48, LT-3028 Kaunas, Lithuania.

E-mail: mindaugas.augonis@saf.ktu.lt

A graduate of KTU (1996). Doctoral studies at KTU (1996–2000). Research interests: long-term strain of concrete, mechanics of reinforced concrete.