



GELŽBETONINIŲ PLOKŠČIŲ, VEIKIAMŲ GAISRO, MODELIAVIMAS

Darius Bačinskas, Gintaris Kaklauskas, Viktor Gribniak, Edgaras Geda

*Tiltų ir specialiųjų statinių katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva. El. paštas bridge@st.vgtu.lt*

Įteikta 2007 06 08; priimta 2007 12 17

Santrauka. Daugeliui civilinių pastatų ir inžinerinių statinių gresia gaisro pavojus. Gelžbetoninių elementų atsparumo ugniai analizė yra svarbi projektavimo dalis. Tačiau laikančiųjų elementų elgsenos analizė, įvertinus gaisro poveikį, yra labai sudėtinga. Turi būti įvertinti įvairūs faktoriai, veikiantys elementų elgseną. Skaitiniams (baigtinių elementų) metodams reikia pernelyg daug kompiuterinių resursų, todėl jų taikymas yra ribotas netgi nesudėtingoms (statiškai išsprendžiamoms) gelžbetoninėms konstrukcijoms (sijoms, plokštėms ir t. t.). Šiame straipsnyje, taikant *integralinį sluoksnių modelį*, analizuojamas gaisro veikiamų gelžbetoninių konstrukcijų įtempių ir deformacijų būvis. Straipsnyje pateikiamas skaičiuojamasis modelis ir pagrindinės medžiagų savybės, charakterizuojančios šiluminius ir mechaninius pokyčius betone bei armatūroje. Trumpai apžvelgtas efektyvus skaičiavimo būdas, pagrįstas sluoksnių taikymo principu. Pateiktas skaitinis gelžbetoninės plokštės įtempių, deformacijų ir kreivių nustatymo pavyzdys.

Reikšminiai žodžiai: šiluminis ir mechaninis modeliavimas, aukšta temperatūra, skaitiniai modeliai, gelžbetonis.

MECHANICAL SIMULATION OF REINFORCED CONCRETE SLABS SUBJECTED TO FIRE

Darius Bačinskas, Gintaris Kaklauskas, Viktor Gribniak, Edgaras Geda

*Dept of Bridges and Special Structures, Vilnius Gediminas Technical University,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. E-mail: bridge@st.vtu.lt*

Received 8 June 2007; accepted 17 Dec 2007

Abstract. There are many buildings and civil engineering works under construction which are at risk of fire. The fire resistance analysis of reinforced concrete structures constitutes an important part in their design. However, the analysis of the behaviour of load-bearing members under high temperature conditions is very complicated. Various factors that influence the behaviour of the members need to be taken into account. Analytical and computation methods have been developed in the field of reinforced concrete building exposed to high temperature or accidental fire. Unfortunately, such models are computationally too demanding and their application are limited even for a simply supported reinforced concrete members (beams, plates etc). In this paper, an attempt has been made to extend application of the *Flexural model* to stress and strain analysis of flexural reinforced concrete members subjected to high temperature. Constitutive models and key material parameters describing thermo-mechanical behaviour of concrete and reinforcement are discussed. A powerful calculation technique based on layered approach is briefly described. A numerical example of application of present method for calculating of stresses, strains and curvatures of reinforced concrete slab is presented.

Keywords: thermo-mechanical simulation, high temperature, computational models, reinforced concrete.

1. Įvadas

Platus gelžbetonio naudojimas konstrukciniams elementams lėmė būtinybę analizuoti gelžbetoninių elementų, paveiktų gaisro, elgseną [1, 2]. Per paskutiniuosius 20 metų gelžbetonio plėtra pagerino jo savybes ir atitinkamai išplėtė taikymo specializaciją. Užpildų sudėties (vandens kiekio sumažinimas, superplastiklių naudojimas, užpildo dalelių dydžio optimizavimas, fibrų įvedimas ir t. t.) labai pagerino daugelį savybių, tokias kaip stipris, ankstyvas stiprio didėjimas, šviežio betono reologija, elastingumas ir kompaktiškumas. Šie pasiekimai kartu daugeliu atvejų lėmė trapesnę betono elgseną gaisro sąlygomis [3].

Gelžbetoninių konstrukcijų atsparumo ugniai analizė užima svarbią vietą rengiant projektus. Gelžbetoninių konstrukcijų elgsenai gaisro metu nustatyti dažniausiai taikomi analitiniai ir skaitiniai metodai [4–8]. Tokioje analizėje inžinieriai naudoja įvairius atsparumo ugniai nustatymo formules, pateiktas normatyviniuose statybos techniniuose dokumentuose [9], gerai nesuprasdami tikrosios konstrukcijos elgsenos gaisro sąlygomis [6]. Kita vertus, netiesiniai fizikiniai modeliai, taikomi pagal baigtinių elementų (BM) metodą [10, 11], deja, reikalauja pernelyg daug kompiuterinių resursų, todėl šiuo metu jų taikymo sritis apribota iki nesudėtingų (statiškai išsprendžiamų) elementų atsparumo prognozavimo.

VGTU pasiūlytas *integralinis lenkiamųjų gelžbetoninių elementų deformavimo modelis*. Statistiniai tyrimai [12, 13], taikant įvairių autorių eksperimentinius duomenis (per 400 taškų) parodė, kad lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įlinkiai integraliniu modeliu apskaičiuojami tiksliau nei normų ir skaitiniais metodais. Integraliniame modelyje pasiektas racionalus paprastumo ir tikslumo aspektų derinys leido jį naudoti nesudėtingame algoritme, kuriame taikomos klasikinės medžiagų atsparumo formulės, sluoksnių modelis bei pilnosios medžiagų diagramos. Šis modelis gali būti taikomas: 1) paprastojo ir įtemptojo gelžbetonio elementams; 2) trumpalaikėms ir ilgalaikėms deformacijoms (įvertinant susitraukimą bei valkšnumą) įvertinti; 3) plyšio plo-

čiui apskaičiuoti. *Integralinis modelis* buvo pritaikytas ilgalaikėms temperatūros poveikio gelžbetoninėms konstrukcijoms analizei [14], taip pat šiuo metu trumpalaikėms ir ilgalaikėms temperatūros poveikio analizėms iš anksto įtemptose gelžbetoninėse konstrukcijose [15].

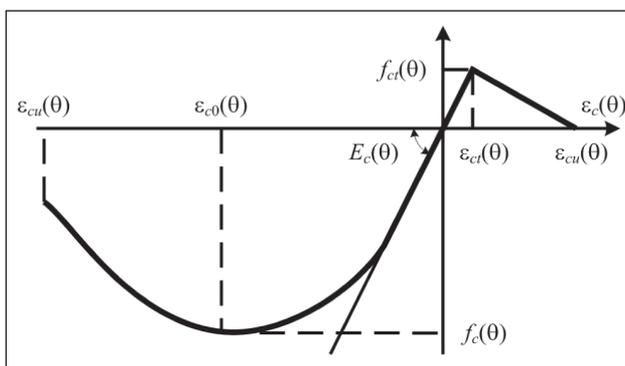
Šiame straipsnyje *integralinis sluoksnių modelis* taikomas, aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių konstrukcijų įtempių ir deformacijų būviui nustatyti. Pateikiamas skaičiavimo modelis ir pagrindinės medžiagų savybės, charakterizuojančios šiluminius ir mechaninius pokyčius betone bei armatūroje. Skaičiavimas pagrįstas sluoksnių taikymo principu. Pateiktas skaitinis pavyzdys, kuriame apskaičiuoti gelžbetoninės plokštės įtempiai, deformacijos ir kreivis.

2. Fizikiniai betono ir armatūros modeliai

Gaisro poveikio analizės rezultatai labai priklauso nuo skaitinių medžiagų modelių ir jų parametrų. Medžiagos savybės labai priklauso nuo temperatūros. Šiame skyriuje trumpai apžvelgiami betono ir armatūros modeliai [9]. Medžiagų modeliai detalčiau pateikti šaltinyje [16].

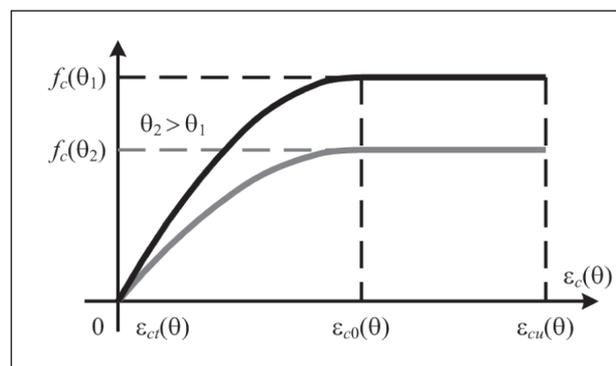
Betono modeliavimas. Gniuždomojo ir tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės pateiktos 1 pav. Gniuždomojo betono kreivę sudaro parabolinė dalis, pereinanti į krintančiąją kreivę, kol įvyksta irtis. Tempiamojo betono kreivę sudaro dvi tiesės. Tempiamojo betono tamprumo modulis yra toks kaip gniuždomojo betono. Tempimo deformacijai viršijus pleišėjimo deformacijos ϵ_{ct} reikšmę, betono įtempių ir deformacijų kreivė ima kristi. Kai tempimo deformacija viršija ϵ_{cu} , betono tempimas yra nevertinamas. Betonui suirus, laikoma, kad jis neturi liekamojo stiprio gniuždant ar tempiant.

Gali būti taikomos ir kitos gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės (2 pav.). Betono su siliiciniais ir kalkiniais užpildais santykinio stiprio gniuždymui pasiskirstymas, kintant temperatūrai, parodytas 3 pav. Stipris gali būti nustatytas normatyviniuose statybos tech-



1 pav. Betono įtempių ir deformacijų priklausomybės

Fig 1. Theoretical model of the stress-strain relationship of concrete



2 pav. Supaprastinta gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų diagrama

Fig 2. Simplified stress-strain relationships for concrete under compression

niniuose dokumentuose nurodytais būdais (pavyzdžiui, *Eu-rokodas 2* [9]) bei taikant alternatyvius metodus ar duomenis iš eksperimentinių tyrimų. Panašios priklausomybės gali būti taikomos deformacijai ϵ_{c0} , ją atitinkantiems didžiausiems įtempiams f_c , tamprumo moduliui E_c ir tempimo stipriui f_{cr} .

Armatūros modeliavimas. Modelis, apibrėžiantis įkai-tinto ir apkrauto plieno elgseną, yra paprastesnis nei betono [16]. Armatūros stiprio ir deformacinės savybės aukšto-se temperatūrose gali būti nustatomos iš įtempių ir defor-macijų priklausomybės 4 pav. [9].

Esant tam tikrai plieno temperatūrai θ , įtempių ir defor-macijų kreivės yra nustatomos pagal tris parametrus: li-nijinį tamprios srities modulį $E_s(\theta)$, proporcinę ribą $f_{sp}(\theta)$ ir didžiausią įtempių lygį $f_{sy}(\theta)$. Kiekvieno iš šių trijų parametrų reikšmės karštai ir šaltai formuotai armatūrai yra pateiktos šaltinyje [9].

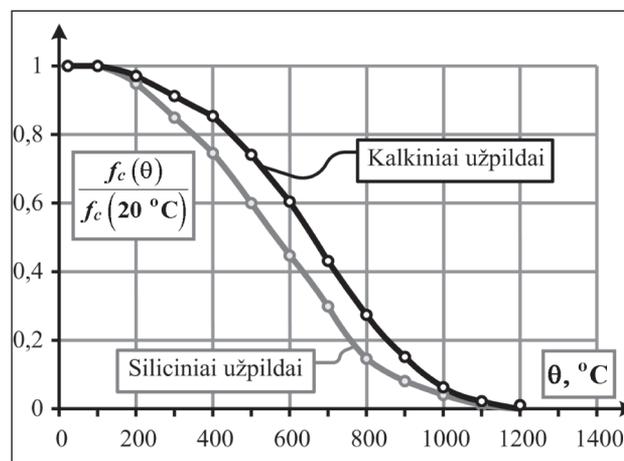
3. Gelžbetoninių elementų, paveiktų aukšta temperatūra, analizė integraliniu sluoksnių metodu

Paprastai konstrukcijų, paveiktų aukšta temperatūra, analizę sudaro du etapai: 1) temperatūros pasiskirstymo ele-mento skerspjūvyje nustatymo; 2) mechaninio atsparumo nustatymo, įvertinant kintančias šiluminės ir mechaninės apkrovas. Bendruoju atveju šiluminė ir mechaninė analizės nėra integruotos, t. y. šiluminis poveikis įvertinamas pirmiausiai visam gaisro laikotarpiui ir tuomet jo rezultatai perkeliama į mechaninės analizės programą, siekiant nu-statyti atsirandančius įtempius ir deformacijas elementuose [1]. Šiame straipsnyje aprašomas antrasis analizės eta-pas. Šiluminei analizei (1 etapas) buvo naudota BM pro-graminė įranga DIANA. Mechaninis poveikis nustatomas, naudojant autorių sukurtą programinę įrangą.

Kaip parodyta 5 pav., a, elementas gali turėti vieną ar daugiau armatūros lygių ir gali būti veikiamas šiluminės ir mechaninės apkrovos. 5 pav., c parodytas temperatūros pasiskirstymas skerspjūvyje. Elemento skerspjūvis suskirs-

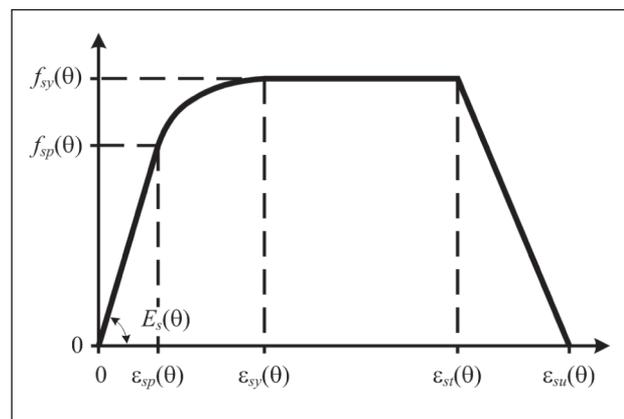
tytas į keletą horizontalių sluoksnių atitinkančių betoną ir armatūrą (5 pav., b).

Medžiagų savybės yra vertinamos iteraciniais skaičia-



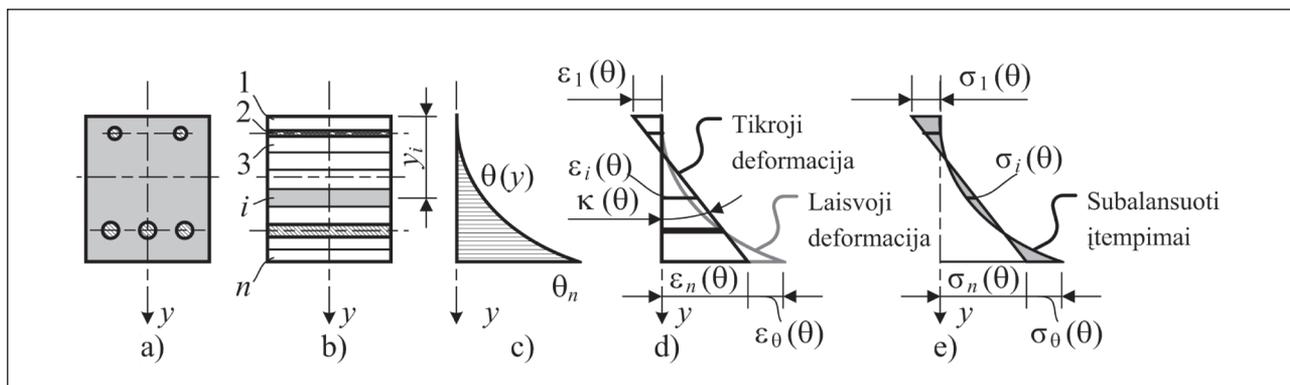
3 pav. Santykinis gniuždomojo betono su siliciniais ir kalkiniais užpildais stipris kintant temperatūrai

Fig 3. Relative compressive strength of concrete with siliceous and calcareous aggregates at elevated temperatures



4 pav. Armatūros įtempių ir deformacijų diagrama

Fig 4. Stress-strain relationship of steel



5 pav. Netiesinio temperatūros gradiento sukelti įtempiai ir deformacijos: a – skerspjūvis; b – sluoksniuotas skerspjūvis; c – temperatūros gradientas; d – deformacijų pasiskirstymas; e – įtempimų pasiskirstymas skerspjūvyje

Fig 5. Stress and strain caused by non-linear temperature gradient: a – cross-section; b – layered section; c – temperature gradient; d – distribution of strain; e – a distribution of stress across the section

vimais, naudojant kirstinį deformacijų modulį. Skerspjūvio analizė atliekama vadinamajam redukuotam skerspjūviui. Surištos armatūros plotas redukuojamas į ekvivalentinį betono plotą. Armatūros sluoksnio storis parenkamas pagal ekvivalentines sąlygas.

Taikomos tokios koncepcijos ir prielaidos: 1) vidutinių plyšių; 2) tolygaus deformacijų pasiskirstymo elemento skerspjūvyje; 3) idealaus armatūros ir betono sukibimo.

Imama, kad plokštieji skerspjūviai išlieka plokščiais, o netiesiniai temperatūriniai gradientai sukuria vidinius, subalansuotus įtempius (5 pav., e) [17]. Kiekvieno sluoksnio laisvas plėtimasis (arba traukimas) yra suvaržytas gretimų sluoksnių. Jei sluoksnis i atstumu y_i žemiau skerspjūvio viršaus (5 pav., b) yra nesuvaržytas gretimų sluoksnių ir gali laisvai deformuotis, temperatūros sukelta deforma-

$$\varepsilon_{\theta i}(\theta) = \alpha_i \Delta \theta_i, \quad (1)$$

čia α_i i -tojo sluoksnio temperatūrinio plėtimosi koeficientas; $\Delta \theta_i$ – temperatūros prieaugis šiame sluoksnyje.

Eurokode 2 [9] pateiktos betono ir armatūros empirinės išraiškos deformacijai ε_{θ} nustatyti, priklausomai nuo temperatūros prieaugio $\Delta \theta$. Deformacija ε_{θ} yra teigiama, temperatūrai augant, ir neigiama, jai krentant.

Jei deformacija suvaržoma, temperatūros pokytis yra lydimas vidinių įtempių pasiskirstymo. Jėgų, reikalingų šioms deformacijoms suvaržyti, suma yra nustatoma integruojant vidinius relaksacinius įtempius $\Delta \sigma_{\theta}$ ir jų sukeltą momentą viršutinio skerspjūvio krašto atžvilgiu:

$$\begin{aligned} \Delta N_{\theta} &= \int \Delta \sigma_{\theta} dA = \int \varepsilon_{\theta} E(\theta) dA = \varepsilon_{\theta} E(\theta) A_{c, eff}, \\ \Delta M_{\theta} &= \int \Delta \sigma_{\theta} y dA = \int \varepsilon_{\theta} E(\theta) y dA = \varepsilon_{\theta} E(\theta) S_{c, eff}, \end{aligned} \quad (2)$$

čia: $A_{c, eff} = \int dA$ – redukuotojo skerspjūvio plotas; $S_{c, eff} = \int y dA$ – pirminis redukuotojo skerspjūvio ploto momentas.

Suvaržymo jėgos pridedamos prie išorinių jėgų. Tokiu būdu nustatomi atstojamieji įtempių ir deformacijų pokyčiai dėl aukštos temperatūros apkrovos.

Užrašomos statinės pusiausvyros lygtys:

$$\begin{aligned} N &= N_{cc} + N_{ct} + N_{sc} + N_{st}, \\ M &= M_{cc} + M_{ct} + M_{sc} + M_{st}, \end{aligned} \quad (3)$$

čia: N_{cc} , M_{cc} ir N_{ct} , M_{ct} – vidinės tempiamojo ir gniuždomojo betono ašinės jėgos ir lenkimo momentai viršutinio skerspjūvio krašto atžvilgiu; N_{sc} , M_{sc} ir N_{st} , M_{st} – atitinkamos analogiškos tempiamosios ir gniuždomosios armatūros įrašos.

Lenkiamų gelžbetoninių konstrukcijų

$$\begin{aligned} N &= \Delta N_{\theta}, \\ M &= M_{ext} + \Delta M_{\theta}, \end{aligned} \quad (4)$$

čia M_{ext} – lenkimo momentas dėl išorinės mechaninės apkrovos.

Ašinių jėgų suma dėl mechaninės ir šiluminės apkrovų nustatoma integruojant įtempių skerspjūvio aukštyje:

$$N = \Delta N_{\theta} = \begin{cases} -\int \sigma_i dA, \\ -E_c(\theta) \left[\varepsilon_{c0}(\theta) \int dA + \kappa(\theta) \int y dA \right], \\ -E_c(\theta) \left[\varepsilon_{c0}(\theta) A_{c, eff} + \kappa(\theta) S_{c, eff} \right]. \end{cases} \quad (5)$$

Lenkimo momentų suma viršutinio krašto atžvilgiu nustatoma taip:

$$M = \begin{cases} \int \sigma_i y dA, \\ E_c(\theta) \left[\varepsilon_{c0}(\theta) \int y dA + \kappa(\theta) \int y^2 dA \right], \\ E_c(\theta) \left[\varepsilon_{c0}(\theta) S_{c, eff} + \kappa(\theta) I_{c, eff} \right], \end{cases} \quad (6)$$

čia $I_{c, eff} = \int y^2 dA$ – redukuoto skerspjūvio inercijos momentas, taip pat nustatomas viršutinio skerspjūvio krašto atžvilgiu.

Redukuoto skerspjūvio plotas $A_{c, eff}$ statinis momentas $S_{c, eff}$ ir inercijos momentas $I_{c, eff}$ išreiškiami taip:

$$\begin{aligned} A_{c, eff} &= \sum_{i=1}^n b_i t_i + \sum_{j=1}^m \frac{E_{sj}(\theta)}{E_c(\theta)} A_{sj}, \\ S_{c, eff} &= \sum_{i=1}^n b_i t_i y_i + \sum_{j=1}^m \frac{E_{sj}(\theta)}{E_c(\theta)} A_{sj} d_j, \\ I_{c, eff} &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_i t_i^3}{12} + b_i t_i y_i^2 \right) + \sum_{j=1}^m \frac{E_{sj}(\theta)}{E_c(\theta)} A_{sj} d_j^2, \end{aligned} \quad (7)$$

čia: n – bendras sluoksnių skaičius; m – armatūros sluoksnių skaičius; b_i ir t_i – i -tojo sluoksnio plotis ir storis; y_i – atstumas nuo i -tojo sluoksnio iki skerspjūvio viršaus; d_j – atstumas nuo j -ojo armatūros sluoksnio iki skerspjūvio krašto; $E_c(\theta)$ ir $E_{sj}(\theta)$ – betono ir j -ojo armatūros sluoksnio moduliai, atitinkantys temperatūrą θ . Normaliomis aplinkos sąlygomis atliekamai analizei ($\theta = 20^\circ \text{C}$) $E_c(\theta) = E_c$ ir $E_{sj}(\theta) = E_{sj}$.

Pertvarkius (5) ir (6) formules, gaunamos viršutinio krašto deformacijos ir kreivio išraiškos:

$$\varepsilon_1(\theta) = -\frac{I_{c, eff} N + S_{c, eff} M}{E_c(\theta) (A_{c, eff} I_{c, eff} - S_{c, eff}^2)}, \quad (8)$$

$$\kappa(\theta) = \frac{S_{c, eff} N + A_{c, eff} M}{E_c(\theta) (A_{c, eff} I_{c, eff} - S_{c, eff}^2)}. \quad (9)$$

Deformacija bet kuriame skerspjūvio taške nustatoma taip:

$$\varepsilon_i(\theta) = \varepsilon_1(\theta) - \varepsilon_{\theta i}(\theta) + y_i \kappa(\theta). \quad (10)$$

Įtempiai $\sigma_i(\theta)$ bet kuriame sluoksnyje yra nustatomi pagal priimtą medžiagos modelį atitinkančią armatūros ar betono deformaciją $\varepsilon_i(\theta)$.

Sukurta programinė įranga mechaniniams uždaviniams spręsti: bet kuriame plokštės taške nustatomas įtempis ir deformacijų būvis, įlinkis ir kreivis.

Skaičiuojama iteracijomis, taikant aštuonių žingsnių procedūrą:

1. Pirmoje iteracijoje imamos tiek betono, tiek armatūros tiesinės medžiagų savybės (atitinkančios nulinių tašką įtempis ir deformacijų diagramoje), įvertinus temperatūrinį poveikį.
2. Pagal (7) nustatomos geometrinės redukuotojo skerspjūvio charakteristikos.
3. Pagal BM programoje DIANA nustatytus temperatūros pasiskirstymo skerspjūvyje laukus, panaudojus (2) išraišką, nustatoma ašinė jėga ΔN_θ ir lenkimo momentas ΔM_θ . Suminė ašinė jėga N_i ir lenkimo momentas M_i sukelti šiluminės ir mechaninės apkrovos, nustatomi pagal (4) išraišką.
4. Viršutinio sluoksnio deformacija ir kreivis nustatomi pagal (8) ir (9) išraiškas.
5. Deformacija $\varepsilon_i(\theta)$, sukurta šiluminės ir mechaninės apkrovos, skaičiuojama kiekvienam sluoksniui pagal (10) išraišką.
6. Kai yra priimti betono ir armatūros medžiagų modeliai, nustatomi įtempiai $\sigma_i(\theta)$, atitinkantys deformaciją $\varepsilon_i(\theta)$. Nustatomas kirstinis deformacijų modulis $E_i(\theta) = \sigma_i(\theta) / \varepsilon_i(\theta)$.
7. $E_i(\theta)$ reikšmės, nustatytos kiekvienam sluoksniui, yra lyginamos su anksčiau priimtomis arba apskaičiuojamos. Jei reikšmių skirtumas viršija leidžiamas ribas, pradedama nauja iteracija nuo 2 žingsnio.
8. Konvergavus visų sluoksnių deformacijų modulius, nustatomos galutinės deformacijų reikšmės, įtempiai ir kreivis. Įlinkiai gali būti apskaičiuoti Moro integralu. Panaši analizė gali būti atliekama kitomis šiluminės ir mechaninės apkrovos sąlygomis.

4. Skaitinis pavyzdys

Skaitiniame pavyzdyje nagrinėjama 6 pav. pateikta gelžbetoninė plokštė, kurios apatinė dalis yra veikiamą šiluminės (gaisro) apkrovos. Plokštės yra 6 000 mm ilgio, 1 000 mm pločio ir 160 mm aukščio. Armatūra apsaugota 20 mm apsauginiu betono sluoksniu.

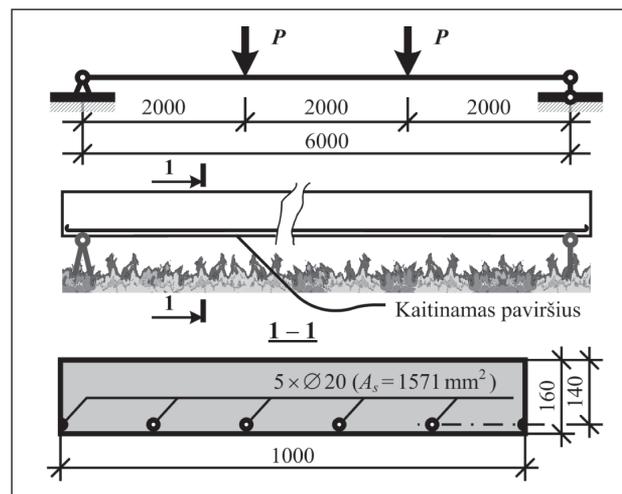
Dviejuose taškuose koncentruotos jėgos dalija plokštę į tris lygias dalis. Kaip parodyta 7 pav., buvo priimta idealizuota linijinė temperatūros ir laiko kreivė su ribinėmis $\theta = 800^\circ\text{C}$ ir $t = 60$ min reikšmėmis.

Šilumos plitimo analizė buvo atlikta, taikant BM programą DIANA. Pagal priimtą temperatūros ir laiko kreivę (7 pav., a), suskaičiuoti šiluminiai laukai skirtingais laiko etapais, pradedant nuo 0 iki 60 min, 10 min intervalu pateikti

7 pav., b. Įvertinant šiluminės apkrovos (gaisro) poveikį, skaičiuota naudojant keturias lenkimo momento reikšmes: 1) $M = 0$; 2) 20 kNm; 3) 50 kNm; 4) 96 kNm. Plokštės pleišėjimo ir ribinis atlaikomasis momentai, atitinkamai lygūs 23 kNm ir 127 kNm, nustatyti imant 20°C temperatūrą.

Plienui ir gniuždomam betonui buvo priimtos idealiai tamprių plastinių medžiagų diagramos, o tempiamajam betonui buvo taikytas trapios elgsenos modelis. Mechaninės ir šiluminės betono bei armatūros savybės pateiktos lentelėje, kur taip pat nurodoma, ar duotasis parametras priklauso nuo temperatūros. Idealizuotos temperatūros ir pagrindinių medžiagų savybių (stipris ir tamprumo modulis) priklausomybės parodytos 8 pav., a ir b.

Betono deformacijos viršutiniame skerspjūvio krašte



6 pav. Konstrukcinė plokštės schema ir skerspjūvis

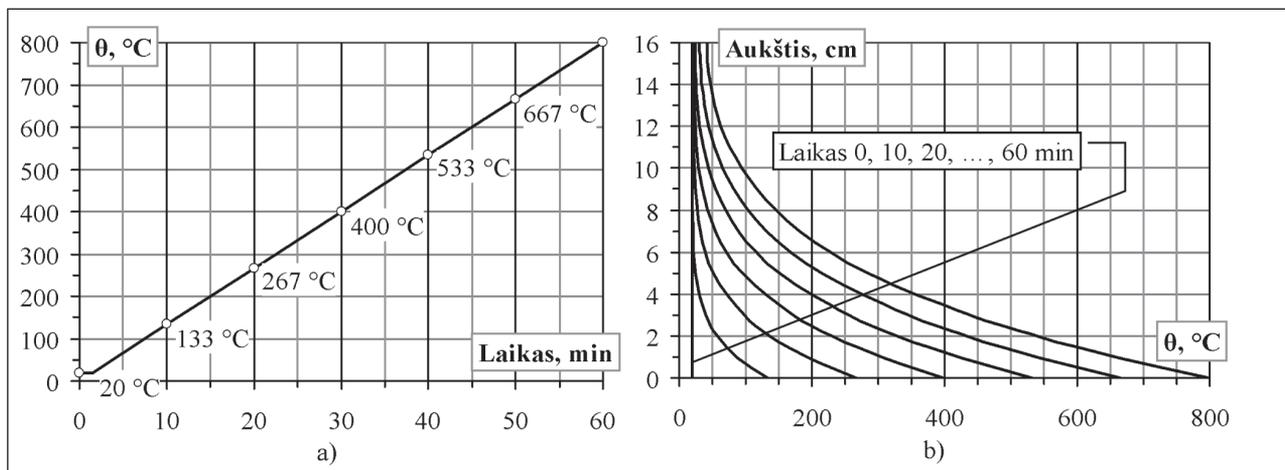
Fig 6. Structural system and cross-section of slab

Medžiagų parametrų, naudojamų analizėje, sąrašas

Parametras	Reikšmė	Priklausomybė nuo temperatūros
Betonas		
Gniuždomasis stipris, f_c	88 MPa	Taip
Tempiamasis stipris, f_{ct}	4,8 MPa	Taip
Tamprumo modulis, E_c	42 GPa	Taip
Specifinis šilumos laidumas, λ_c	$123 \frac{\text{J}}{\text{min} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$	Ne
Šiluminė talpa, C_c	$2,3 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$	Ne
Temperatūrinio plėtimosi koeficientas	$1,2 \times 10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}$	Ne
Armatūra		
Takumo riba, f_s	600 MPa	Taip
Tamprumo modulis, E_s	215 GPa	Taip
Temperatūrinio plėtimosi koeficientas	$1,2 \times 10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}$	Ne

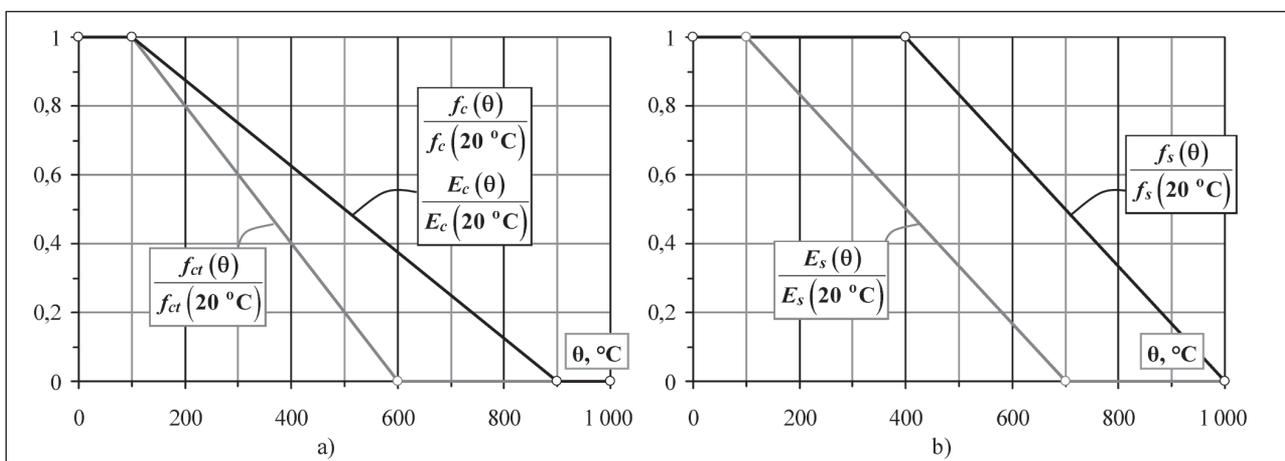
ir armatūros deformacijos, esant skirtingai apkrovai, yra parodytos 9 pav., a ir b. Deformacijų pasiskirstymas plokštės

gylyje skirtingomis laiko ir apkrovos sąlygomis yra pateiktas 10 pav.



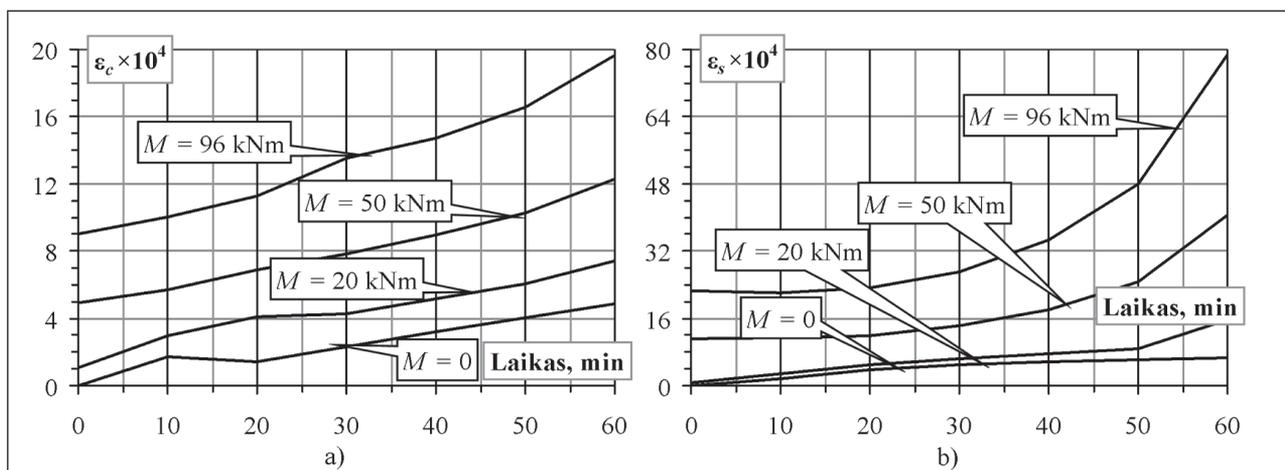
7 pav. Priimtos temperatūros ir laiko diagramos (a) bei temperatūros pasiskirstymas plokštė gylyje (b)

Fig 7. Assumed diagram of temperature versus time (a) and thermal distribution across the depth of slab (b)



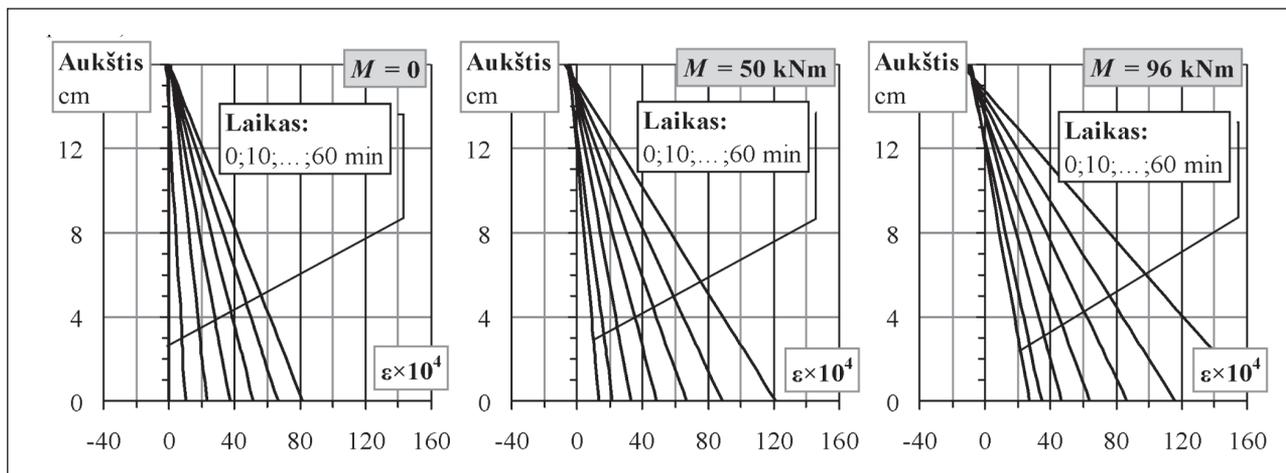
8 pav. Medžiagų charakteristikų mažinimo koeficientai dėl temperatūros poveikio: a – betono gniuždomajam ir tempiamajam stipriui bei tamprumo moduliui; b – armatūros takumo ribai ir tamprumo moduliui

Fig 8. Reduction coefficients allowing for decrease of: a – compressive and tensile strength and modulus of elasticity of concrete; b – yield strength and elastic modulus of reinforcement steel



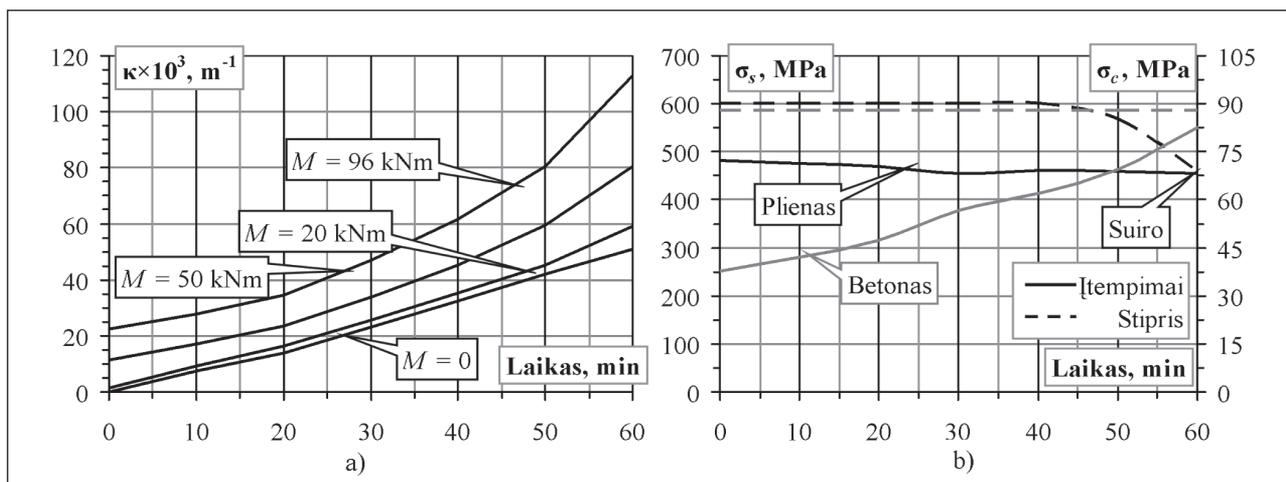
9 pav. Deformacijų kitimas laikui bėgant: a – gniuždomoji viršutinio betono sluoksnio deformacija (parodyta teigiama); b – armatūros deformacija (parodyta teigiama)

Fig 9. Strains of concrete at top edge (a) and reinforcement (b) at different loading levels (compressive concrete strain is taken positive)



10 pav. Deformacijų pasiskirstymas skersai plokštės gylio skirtingomis laiko ir apkrovimo sąlygomis

Fig 10. Strain distribution across the depth of the slab in different time and under loading conditions



11 pav. Vidurinio plokštės pjūvio kreivės skirtinguose apkrovimo lygiuose (a); armatūros ir betono viršutinės ribos įtempimų ir stiprio bei laiko diagramos (b)

Fig 11. Mid-section curvatures of slab at different loading levels (a); stress and strength vs time diagrams for reinforcement and concrete at the top edge (b)

Vidurinio pjūvio kreivės skirtingais apkrovimo atvejais yra pateikti 11 pav., a. Analizė parodė, kad pirmaisiais trimis apkrovimo atvejais plokštė nesuirė. Suirimo laikas ketvirtosios apkrovimo atveju gali būti nustatomas iš 11 pav., b, kuriame pateikti armatūros įtempimų (ištinė linija) ir stiprio (punktinė linija) kaita. Šių kreivių susikirtimo taškas ir rodo plokštės irties laiką. Panašios viršutinio krašto gniuždomojo betono diagramos pateiktos 11 pav., b. Šie tyrimai papildė anksčiau darbo grupės gautus rezultatus [11, 16].

5. Baigiamosios pastabos

Šiame straipsnyje parodomas *integralinio sluoksnių modelio* taikymas, gaisro veikiamų gelžbetoninių konstrukcijų įtempimų ir deformacijų būviui nustatyti. Pateikiamas skaičiuojamasis modelis ir pagrindinės medžiagų savybės, charakterizuojančios šiluminius ir mechaninius pokyčius

betone bei armatūroje. Pasiūlytas efektyvus kompiuterinių resursų prasmės skaičiavimo būdas, pagrįstas sluoksnių principu. Skaitiniame pavyzdyje apskaičiuoti gelžbetoninės plokštės įtempimai, deformacijos ir kreivės.

Padėka

Autoriai nori padėkoti *Europos Bendrijai* ir *Lietuvos Tarptautinei mokslinių ir technologijos programų plėtros agentūrai* už finansinę paramą, suteiktą COST veikloje C26. Autoriai taip pat labai dėkingi už finansinę paramą *Lietuvos mokslo ir studijų fondui*.

Literatūra

1. KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2000, 2(4), p. 429–447.

2. POTHARAJU, M.; SHOBHA, M.; RAMBABU, K. Flexural strength of fly ash concrete under elevated temperatures. *Magazine of Concrete Research*, 2004, 56(2), p. 83–88.
3. KALIFA, P.; MENNETEAU, F. D.; QUENARD, D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(12), p. 1915–1927.
4. HUANG, Z.; BURGESS, I. W.; PLANK, J. R. Nonlinear analysis of reinforced concrete slabs subjected to fire. *ACI Structural Journal*, 1999, 96 (1), p. 127–135.
5. DI CAPUA, D.; MARI, A. R. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire. *Fire Safety Journal*, 2007, 42(2), p. 139–149.
6. BRATINA, S.; CAS, B.; SAJE, M.; PLANINC, I. Numerical modelling of behaviour of reinforced concrete columns in fire and comparison with Eurocode 2. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42(21–22), p. 5715–5733.
7. DOTREPPE, J.-C.; FRANSSEN, J.-M.; VANDERZEYPEN, Y. Calculation method for design of reinforced concrete columns under fire conditions. *ACI Structural Journal*, 1999, 96 (1), p. 9–18.
8. IZZUDDIN, B. A.; ELGHAZOUALI, A. Y. Failure of lightly reinforced concrete members under fire. I: Analytical modelling. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(1), p. 3–17.
9. prEN 1992-1-2. Eurocode 2: *Design of Concrete Structures – Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design*. European Committee for Standardisation, Brussels, July 2001. 102 p.
10. REN, A.; SHI, J.; SHI, W. Integration of fire simulation and structural analysis for safety evaluation of gymnasiums – with a case study of gymnasium for Olympic Games in 2008. *Automation in Construction*, 2007, 16(3), p. 277–289.
11. CERVENKA, J.; SUROVEC, J.; FELLINGER, J.; FERON, C.; WAGENEDER, J.; KAKLAUSKAS, G.; CORSI, F. *FE Simulations of a Suspending Ceiling. Comparison of Fire Test Analyses*. UPTUN report 441, WP 4 (GRD1-2001-40739), UPTUN, 2005. 30 p.
12. KAKLAUSKAS, G. Flexural layered deformational model of reinforced concrete members. *Magazine of Concrete Research*, 2004, 56(10), p. 575–584.
13. KAKLAUSKAS, G.; GHABOUSSI, J. Stress-strain relations for cracked tensile concrete from RC beam tests. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(1), p. 64–73.
14. BACINSKAS, D.; KAKLAUSKAS, G.; VAINIŪNAS, P. Layered approach for long-term deflections analysis of reinforced concrete beams. *Statyba (Civil Engineering)*, 2001, 7(5), p. 380–385.
15. ZAMBLAUSKAITĖ, R.; KAKLAUSKAS, G.; BACINSKAS, D. Deformational analysis of prestressed high strength concrete members using flexural constitutive model. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2005, 11(2), p. 145–151.
16. GRIBNIAK, V.; BACINSKAS, D.; KAKLAUSKAS, G. Numerical simulation strategy of reinforced concrete tunnel bearing members in fire. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2006, 1(1), p. 5–9.
17. GILBERT, R. I. *Time-Effects in Concrete Structures*. Amsterdam-Oxford-New-York-Tokyo: Elsevier Science Publishers, 1988. 321 p.

Darius BAČINSKAS. Assoc Prof of Dept of Bridges and Special Structures at Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Lithuania. Engineering degree PhD (2002) from VGTU. Research interests: material constitutive models, non-linear numerical analysis of reinforced concrete structures.

Gintaris KAKLAUSKAS. Professor and the Head of Dept of Bridges and Special Structures at VGTU, Lithuania. His engineering degrees, PhD and Dr Habil (Dr Sc) from VGTU. Research interests include various topics of reinforced concrete, particularly constitutive modelling and numerical simulation of reinforced concrete structures. Recipient of Fulbright Fellowship (for research work at the University of Illinois, Urbana-Champaign, 1996) and Marie Curie Fellowship (experienced researchers category, 2002–03). Member of the FIB Task Group 4.1 “Serviceability models”.

Viktor GRIBNIAK. Researcher at the Dept of Bridges and Special Structures, VGTU, Lithuania. BSc (2001, civil engineering) and MSc (2003, building structures) from VGTU. A study visit to Polytechnico di Torino (2003). Author of a number of papers. Research interests: mathematical modelling, statistical analysis and numerical simulation of concrete structures.

Edgaras GEDA. Head of Standardisation Division in Fire and Rescue Dept under the Ministry of the Internal Affairs. BSc (2000, civil engineering) and MSc (2002, building structures) from VGTU. Research interests include fire safety engineering and concrete structures under fire conditions.