

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Edgaras GEDA

LAYER MODEL FOR REINFORCED CONCRETE MEMBERS UNDER FIRE

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES
CIVIL ENGINEERING (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2002–2009.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Prof Dr Habil Gintaris KAKLAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Civil Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Jonas Gediminas MARČIUKAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Members:

Prof Dr Habil Romualdas MAČIULAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T),

Assoc Prof Dr Arūnas Aleksandras NAVICKAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

Prof Dr Vitalija RUDZKIENĖ (Mykolas Romeris University, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Assoc Prof Dr Antanas ŠAPALAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Opponents:

Prof Dr Habil Jonas BAREIŠIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

Assoc Prof Dr Bronius JONAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 2 p. m. on 4 March 2010.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 3 February 2010.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Edgaras GEDA

AUKŠTA TEMPERATŪRA VEIKIAMŲ
GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ
SLUOKSNIŲ MODELIS

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Disertacija rengta 2002–2009 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

prof. habil. dr. Gintaris KAKLAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Jonas Gediminas MARČIUKAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

prof. habil. dr. Romualdas MAČIULAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T),

doc. dr. Arūnas Aleksandras NAVICKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

prof. dr. Vitalija RUDZKIENĖ (Mykolo Romerio universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

doc. dr. Antanas ŠAPALAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Oponentai:

prof. habil. dr. Jonas BAREIŠIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

doc. dr. Bronius JONAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2010 m. kovo 4 d. 14 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2010 m. vasario 3 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 1720-M mokslo literatūros knyga.

Introduction

Topicality of the problem

From the constructional point of view, buildings and structures at fire have to carry mechanical loadings and thus provide safe people evacuation (rescue) and safe firemen work. Analysis of structures due to mechanical loading and high temperature is a very complex problem. High temperatures have a very significant adverse effect on thermo-mechanical properties of materials. Hiconcrete and steel, the bond and causes strains and deflections. Load bearing capacity of structure decreases in and in critical ways it may fail.

A constitutive model, called the Flexural, aiming at deformation analysis of bending reinforced concrete members, has been developed at Vilnius Gediminas Technical University. The Flexural model assures higher accuracy of deflection predictions in comparison to the design code methods. An efficient combination of accuracy and simplicity has been achieved in the Flexural model. This allowed to incorporate it into a simple engineering technique based on classical principles of strength of materials extended to layered approach and use of full material diagrams. In this study, Flexural layered model has been applied to perform stress and strain analysis of flexural RC members subjected to high temperature, taking into account non-linear physical and thermo-mechanical materials properties.

Research object

The object of present study is stress-strain analysis of reinforced concrete members subjected to elevated temperatures. This object has been investigated at macrolevel.

Main objective and tasks

Based on the Flexural layer model, to propose a technique for stress and strain analysis of flexural RC members subjected to high temperature, taking into account non-linear thermo-mechanical material properties.

In order to achieve this objective, the following problems had to be solved:

1. To perform analysis of various models which characterise thermal properties of concrete and reinforcement (thermal conductivity, thermal capacity).
2. To perform analysis of various models which characterise physical and mechanical parameters of the materials (tensile and compressive strength of, modulus of elasticity, thermal strain, stress-strain diagram of concrete and reinforcement and transient creep strain and ultimate strain for concrete).

3. Based on the flexural layered model, to develop an algorithm for stress-strain analysis of reinforced concrete members subjected to high temperatures and mechanical loadings.

4. Based on variable thermal properties of concrete and reinforcement, to assess numerically temperature distribution across the section of the member.

5. To compare numerically (calculated using FE package ATENA and Flexural layered model) and experimentally obtained deflections and failure time of RC slabs reported in literature.

Research methods

This thesis uses experimental, analytical, statistical and numerical research methods.

Scientific novelty

1. The Flexural layer model has been applied for the stress and strain analysis of flexural RC members subjected to high temperature, taking into account non-linear physical and thermo-mechanical materials properties. These problems can be solved by the proposed method: 1) to calculate time, which mechanically loaded reinforced concrete structure able to withstand thermal effect; 2) to determine stress-strain state and load bearing capacity of reinforced concrete structure subjected to fire.

2. Comparison of different material models characterising thermal, physical and mechanical properties of concrete and steel reinforcement has been carried out.

Practical value

The proposed algorithm, based on the Flexural layered model, can assess the stress-strain state, load bearing capacity and failure time of reinforced concrete members. This algorithm is very effective in terms of computer resources, i. e. the calculation time decreases hundreds of time in comparison to standard non-linear finite element programs (MSC.MARC, DIANA, ATENA).

Basic statements to be defended

1. The proposed algorithm, based on the Flexural layered model, can accurately assess the stress-strain state, load bearing capacity and failure time of reinforced concrete members.

2. The proposed model is simple, universal and computationally effective.

The scope of the scientific work

The dissertation consists of introduction, four Chapters, general conclusions and a list of literature. Eight annexes are supplied in the enclosed compact disc.

The total scope of dissertation – 118 pages without annexes, 186 expressions, 59 pictures, 6 tables and 146 references.

1. Fire effect. Evaluation principles and methods

This Chapter reviews fire scenarios, basic parameters having thermal effect on fire resistance of reinforced concrete structures, physical-chemical processes in concrete under high temperature, temperature propagation in structure, and thermal material properties at high temperature. Design code and numerical methods for determining fire resistance of reinforced concrete members are also reviewed.

It has been concluded that recent fires with fatalities stimulate new investigation wave for providing fire resistance in reinforced concrete structures subjected to high temperature. Analytical and numerical methods are widely used for analysis of fire resistance in reinforced concrete structures. However, advanced finite element methods based on non-linear material models are highly expensive in terms of the computational time. Therefore, their application is limited to simple cases.

Based on these conclusions, this main objective has been set: based on the Flexural layer model, to propose a technique for stress and strain analysis of flexural RC members subjected to high temperature, taking into account non-linear thermo-mechanical material properties.

2. Physical-mechanical material models and their analysis

This Chapter reviews physical and mechanical models of concrete and steel at high temperatures. Stress-strain diagram, strength in compression and tension, modulus of elasticity, the peak strain (corresponding to the peak stress), and transient creep strain have been discussed for concrete. Such basic characteristics as modulus of elasticity, yielding strength and stress-strain diagram have been discussed regarding reinforcement behaviour under fire. Bond strength between concrete and reinforcement has been also discussed. Comparison of the theoretical models with the test data reported in the literature has been performed.

The analysis has shown that: 1) until now it has not been proposed a universal thermal and physical-mechanical models for concrete. Due to limited experimental and theoretical investigation of behaviour of reinforced concrete members, the material models are not accurate. 2) Compressive strength of concrete is not a sufficient parameter characterising thermal, physical and mechanical properties of concrete at elevated temperatures. 3) Most physical and thermo-mechanical parameters are most accurately characterized by the *Eurocode* (LST EN 1992-1-2:2005).

3. Flexural layered model for RC members subjected to elevated temperatures

Flexural layered model for RC members subjected to elevated temperatures is based on the following assumption and approaches:

- 1) Smeared crack approach, i. e. average stresses and strains are used.
- 2) Linear distribution of strain within the depth of the section, i. e. the Bernulli Hypothesis is adopted.
- 3) Perfect bond between concrete and reinforcement is assumed; reinforcement slippage occurring at advanced stress-strain states is included into stress-strain diagram of tensile concrete.
- 4) Temperature is increasing, i. e. the cooling-down stage is not considered.
- 5) Thermal strain as well as transient creep strain are assessed as equivalent axial forces and bending moments.

Behaviour of compressive concrete and reinforcement is modelled according to *Eurocode* (LST EN 1992-1-2:2005). Behaviour of tensile concrete is modelled by the bilinear stress-strain relationship shown in Fig. 1. with tensile strength and modulus of elasticity taken from *Eurocode* (LST EN 1992-1-2:2005). As proposed by G. Kaklauskas, the descending branch of the diagram is characterized by the ultimate strain $\varepsilon_{ct,u}$:

$$\varepsilon_{ct,u} = \left(32,8 - 27,6\rho + 7,12\rho^2 \right) \frac{f_{ct}}{E_c}, \quad (1)$$

where f_{ct} – tensile strength of concrete; E_c – modulus of elasticity of concrete; ρ – reinforcement percentage.

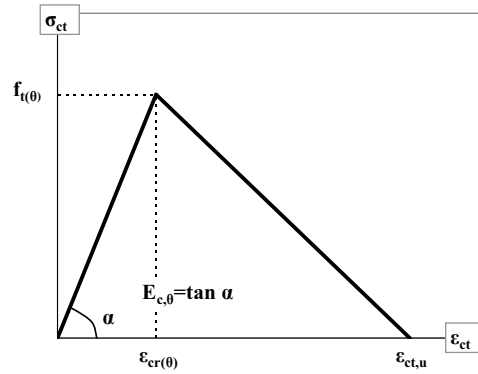


Fig. 1. Stress-strain relationship for cracked tensile concrete

A cross-section as shown in Fig. 2 a and b is divided into a number of horizontal layers corresponding to either concrete or reinforcement. Temperature gradient (Fig. 2 c) within the section was determined in the using the approaches and assumptions of heat transfer theory. In this study, finite element software ATENA was used for determining temperature fields of the member. Nonlinear distribution of high temperatures was replaced by equivalent axial force and bending moment.

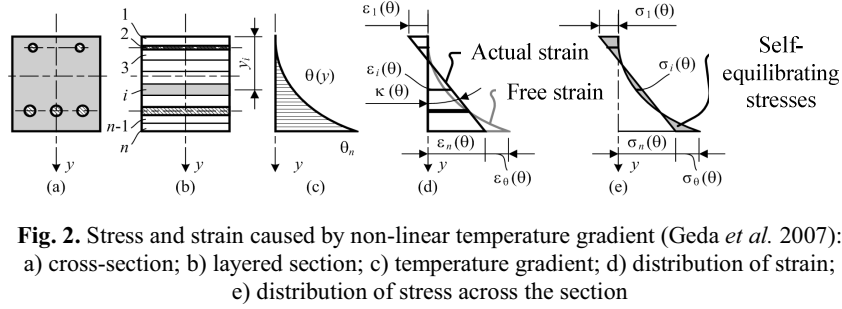


Fig. 2. Stress and strain caused by non-linear temperature gradient (Geda *et al.* 2007):
a) cross-section; b) layered section; c) temperature gradient; d) distribution of strain;
e) distribution of stress across the section

Variable mechanical and physical properties of every layer can be evaluated in the analysis due to loading and temperature effect. Cross-section of reinforced concrete members is replaced by transformed concrete sections. This is performed by multiplying area of i -th layer by ratio of modulus of elasticity $\bar{E}_i(\theta, \epsilon_\sigma)/E_c(20^\circ C)$, where $\bar{E}_i(\theta, \epsilon_\sigma)$ – the secant modulus of elasticity of i -th layer, $E_c(20^\circ C)$ – modulus of elasticity of concrete at normal temperature. Geometrical characteristics of transformed cross-section (area $A_{c,eff}$, first moment $S_{c,eff}$ and second moment $I_{c,eff}$) determined about the top edge of the section.

$$\begin{cases} A_{c,eff} = \sum_{i=1}^n b_i t_i \frac{\bar{E}_i(\theta, \epsilon_\sigma)}{E_c(20^\circ C)}, & S_{c,eff} = \sum_{i=1}^n b_i t_i y_i \frac{\bar{E}_i(\theta, \epsilon_\sigma)}{E_c(20^\circ C)}, \\ I_{c,eff} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_i t_i^3}{12} + b_i t_i y_i^2 \right) \frac{\bar{E}_i(\theta, \epsilon_\sigma)}{E_c(20^\circ C)}. \end{cases} \quad (2)$$

where n is the total number of layer; b_i and t_i is the width and thickness of the i -th layer; y_i is the distance of i -th layer from the top.

Concrete total strain can be expressed as follows:

$$\varepsilon_{tot}(T, \sigma) = \varepsilon_{\sigma}(T, \sigma) + \varepsilon_{th}(T, 0) + \varepsilon_{ttc}(T, \sigma), \quad (3)$$

where $\varepsilon_{\sigma}(T, \sigma)$ – strain caused by stress; $\varepsilon_{th}(T, 0)$ – thermal strain and $\varepsilon_{ttc}(T, \sigma)$ – strain due to short-term thermal creep.

Strain induced by temperature in the i -th layer can be expressed as follows:

$$\varepsilon_{th,i}(\theta) = \alpha_i \Delta\theta_i, \quad (4)$$

where α_i – coefficient of thermal expansion of i -th layer according LST EN 1992-1-2:2005; $\Delta\theta_i$ – increment of temperature in this layer.

Transient creep strain for tensile concrete layers is neglected. Thermal creep strain for compressive concrete layers can be expressed according to Anderberg and Thelandersson:

$$\varepsilon_{ttc,i}(T, \sigma) = -\varepsilon_{th,i}(\theta) \beta \sigma_i / f_c(20^\circ\text{C}), \quad (5)$$

where β – material coefficient in the range: 1,8 – 2,35; σ_i – compressive concrete stress in the i -th layer; $f_c(20^\circ\text{C})$ – compressive concrete strength at normal condition. Short-term thermal creep strain ε_{ttci} is taken negative. If strain is restrained, then thermal creep strain redistribute into internal stresses of the element.

In general, temperature distribution at fire across the element depth is non-uniform. Besides physical and mechanical properties of layers vary. Free extension and shrinkage of every layer is limited by adjacent layer, therefore bending stresses (Fig. 2 e) arise in the element cross-section due to layer mutual interaction.

Influence of strains $\varepsilon_{th,i}(\theta)$ and $\varepsilon_{ttc,i}(T, \sigma)$ on the stress-strain state of RC member can be evaluated by adding equivalent axial forces ΔN_{th} and ΔN_{ttc} (6) and bending moments ΔM_{th} and ΔM_{ttc} (7). Equivalent axial forces ΔN_{th} and ΔN_{ttc} can be determined by summing stresses $\Delta\sigma_{th}$ and $\Delta\sigma_{ttc}$:

$$\begin{cases} \Delta N_{th} = \int \Delta \sigma_{th} dA = \int \varepsilon_{th} \bar{E}(\theta) dA = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{th,i} \bar{E}_i(\theta, \varepsilon_\sigma) b_i t_i, \\ \Delta N_{ttc} = \int \Delta \sigma_{ttc} dA = \int \varepsilon_{ttc} \bar{E}(\theta) dA = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ttc,i} \bar{E}_i(\theta, \varepsilon_\sigma) b_i t_i. \end{cases} \quad (6)$$

where $A_{c,eff} = \int dA$ – area of transformed section.

Equivalent bending moments ΔM_{th} and ΔM_{ttc} can be determined using following formulas:

$$\begin{cases} \Delta M_{th} = \int \Delta \sigma_{th} y dA = \int \varepsilon_{th} \bar{E}(\theta) y dA = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{th,i} \bar{E}_i(\theta, \varepsilon_\sigma) b_i t_i y_i, \\ \Delta M_{ttc} = \int \Delta \sigma_{ttc} y dA = \int \varepsilon_{ttc} \bar{E}(\theta) y dA = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ttc,i} \bar{E}_i(\theta, \varepsilon_\sigma) b_i t_i y_i. \end{cases} \quad (7)$$

where $S_{c,eff} = \int y dA$ – first moment of transformed area about the top edge of the section.

The above equivalent forces are added to the external forces.

$$N = \Delta N_{ext} + \Delta N_{th} + \Delta N_{ttc}, \quad (8)$$

$$M = M_{ext} + \Delta M_{th} + \Delta M_{ttc}, \quad (9)$$

where M_{ext} is the bending moment due to short-term loading.

Top fibre strain $\varepsilon_1(\theta)$ and curvature $\kappa(\theta)$ for the cross-section under consideration can be expressed as follows:

$$\varepsilon_1(\theta) = -\frac{I_{c,eff} N + S_{c,eff} M}{E_c(20^\circ C) (A_{c,eff} I_{c,eff} - S_{c,eff}^2)}. \quad (10)$$

$$\kappa(\theta) = \frac{S_{c,eff} N + A_{c,eff} M}{E_c(20^\circ C) (A_{c,eff} I_{c,eff} - S_{c,eff}^2)}. \quad (11)$$

Total strain at any point of the section below the top surface is defined in terms of the top fibre strain $\varepsilon_1(\theta)$ and the curvature $\kappa(\theta)$:

$$\varepsilon_{tot,i}(\theta) = \varepsilon_1(\theta) + y_i \kappa(\theta). \quad (12)$$

Strain caused by stress from expression (3) can be determined as follows:

$$\varepsilon_{\sigma,i}(\theta, \sigma) = \varepsilon_{tot,i}(\theta, \sigma) - \varepsilon_{th,i}(T, 0) - \varepsilon_{tc,i}(T, \sigma). \quad (13)$$

$\varepsilon_{tc,i}(T, \sigma)$ – for reinforcement and tensile concrete layers is equal to zero.

Then stresses at every i -th layer is calculated by the following formula:

$$\sigma_i(\theta) = \varepsilon_{\sigma,i}(\theta, \sigma) \bar{E}_i(\theta, \varepsilon_{\sigma}). \quad (14)$$

A computer program has been developed for assessing average stress-strain state at any point of a member as well as for calculation of curvatures and deflections. The computation is performed in iterations by the following steps:

In the first iteration, linear materials properties are assumed both for concrete and steel layers taking into account temperature effects.

1. Geometrical characteristics are calculated for the transformed cross-section by (2).

2. Equivalent axial forces ΔN_{th} , ΔN_{tc} and equivalent bending moments ΔM_{th} , ΔM_{tc} are calculated by expressions (6) and (7). In the first iteration forces ΔN_{tc} and ΔM_{tc} are equal to zero. Total axial force N_i and bending moment M_i duo to thermal and mechanical loading are calculated by (8) and (9).

3. Top fibre strain and curvature are calculated by (10) and (11).

4. Total strain $\varepsilon_{tot,i}(\theta)$ is calculated for each layer by (12).

5. For the assumed material models of steel and concrete, stresses at every i -th layer is obtained by (14). Secant deformation modulus is determined as $\bar{E}_i(\theta, \varepsilon_{\sigma}) = \sigma_i(\theta) / \varepsilon_{\sigma,i}(\theta, \sigma)$.

6. $\bar{E}_i(\theta, \varepsilon_{\sigma})$ values obtained for every layer are compared with the previously assumed or computed ones. If the agreement is not within the assumed errors limits, a new iteration is started from step 2.

After deformation modulus $\bar{E}_i(\theta, \varepsilon_{\sigma})$ converges for all the layers, final values of strains, stresses and curvatures are assessed. For deflection calculation which is performed by Mohr's integral technique, analogous computations are carried out for other sections of the member.

4. Comparison of analysis results with test data of RC slabs

This Chapter presents deformational analysis results, obtained by the Flexural layered model and finite element package ATENA, with the test data of reinforced concrete slabs reported in the literature. The analysis employed experimental data of six reinforced concrete slabs (produced from normal strength concrete) subjected to elevated temperature were used. The experimental specimens were produced and tested in Cardington, the Great Britain, at the Building Research Centre.

Main slab parameters are presented in Fig. 3 and Table 1.

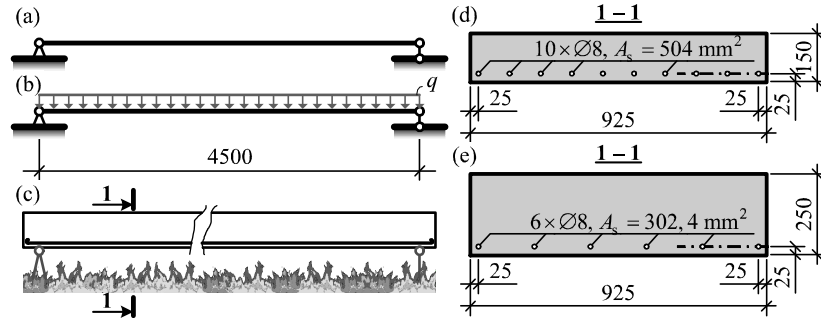


Fig. 3. Cross section and loading scheme of slabs: a) non-loaded slabs P1, P3, P5, P10; b) loaded slabs P2, P6; c) general scheme of experimental slabs; d) slabs P1, P2, P3; e) slabs P5, P6, P10

Table 1. Material characteristics

Parameters		Value	Temperature dependence (Yes/No)
f_c	Compressive strength, MPa	24,0	Yes
f_t	Tensile strength, MPa	1,9	Yes
E_c	Modulus of elasticity, GPa	31	Yes
G_f	Fracture energy in tension, MN/m	$4,5 \times 10^{-5}$	Yes
μ	Poisson coefficient	0,2	No
α_c	Coefficient of thermal expansion	$1,2 \times 10^{-5} (^\circ\text{C})^{-1}$	Yes
	Volumetric weight of cement, MN/m ³	0,66	No
W/C	Water/cement ratio	0,5	No
	Humidity constant	0,9728	No
λ_c	Thermal conductivity, W/m °C	1,333	Yes
C_c	Thermal capacity, J/m ³ °C	$2,07 \times 10^6$	Yes

Reinforcement parameters		Value	Temperature influence (Yes/No)
f_{sy}	Yield strength, MPa	460	Yes
E_s	Modulus of elasticity, GPa	210	Yes
α	Coefficient of thermal expansion	$1,2 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$	No

Slabs were simply supported and were nominally 4,7 m long (span 4,5 m) and 0,925 m wide. The slab area (4,0m length and 0,9 m width) was subjected to one of the two fire modes (standard fire curve and Norwegian petroleum fire curve). The slabs had a rectangular cross-section with the depth of 150 or 250 mm (Fig. 3 d), e).

Concrete was produced from siliceous aggregate (20 mm silicon gravel) with natural sand (volumetric weight 2400 kg/m³). All the slabs had the same material properties: $f_c = 24$ MPa as concrete compressive strength; $f_{ct} = 1,9$ MPa as concrete tensile strength; $E_c = 31,5$ GPa as modulus of elasticity of concrete; $E_s = 210$ GPa as modulus of elasticity of reinforcement; $f_{sy} = 460$ MPa as yielding strength reinforcement. Humidity of concrete across the slab depth varied from 3,5% till 4,5% (taking by the weight). These parameters varied for the test slabs: the depth, external loading (0 or uniformly distributed 1,5 kN/m²), reinforcement percentage and the fire curve. Fig. 4 illustrates temperature distribution across the depth of slab modelled by finite element package ATENA.

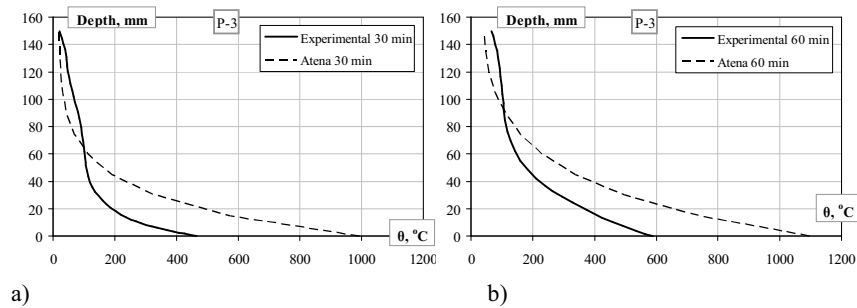
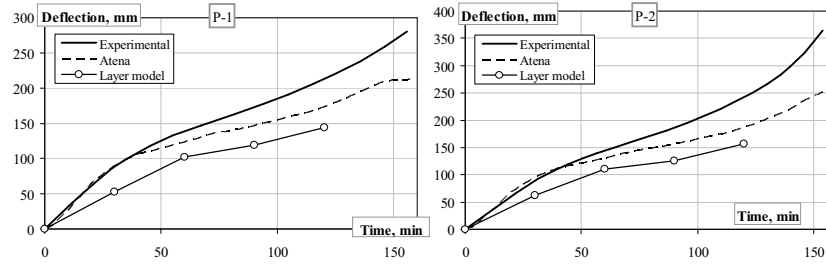
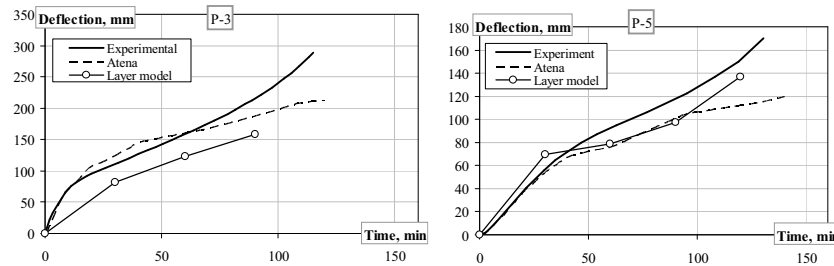


Fig. 4. Comparison of experimental and numerical thermal distribution across the depth of slab P3: a) heating time 30 min; b) heating time 60 min

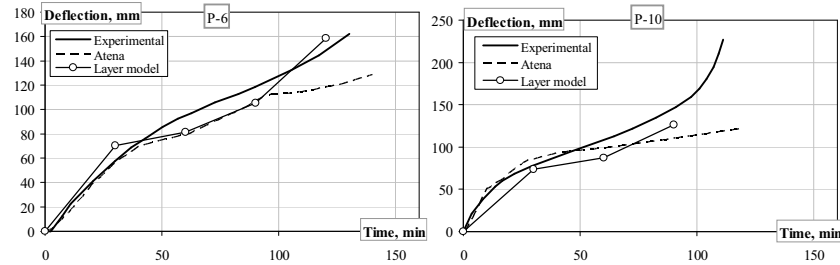
The slab mid-section deflections were calculated by FE software ATENA and Flexural layered model. Comparison of experimental and numerically obtained mid-section deflections with heating time is illustrated in Figs. 5–7.



a) b)
Fig. 5. Comparison of experimental and numerical mid-section deflection of slabs with heating time: a) P1; b) P2



a) b)
Fig. 6. Comparison of experimental and numerical mid-section deflection of slabs with heating time: a) P3; b) P5



a) b)
Fig. 7. Comparison of experimental and numerical mid-section deflection of slabs with heating time: a) P6; b) P10

Despite of the difference between the numerically calculated and experimentally obtained thermal fields (Fig. 4), satisfactory agreement has been obtained for deflections as well as failure time of RC slabs. The deflections due to temperature may exceed the deflections due to mechanical loading by more than 10 times.

General conclusions and results

1. The literature review has shown that the behaviour of reinforced concrete structures at elevated temperatures is very complex. With rising temperature, thermal, physical and mechanical properties of concrete and reinforcement significantly change. In most practical cases, simplified analytical-empirical methods are employed for the analysis of reinforced concrete exposed to high temperature or accidental fire. However, such methods are not capable to assess adequately the stress-strain state of RC members under elevated temperatures and mechanical loading. On the other hand, advanced finite element (FE) methods based on universal principles can include all possible non-linear effects due to high temperatures. However, such methods are highly demanding in terms of the computational recourses. Besides, the constitutive laws taking into account the high temperature effects are not accurate enough.

2. The analysis performed by the author has shown that no universal material models (neither thermal nor physical-mechanical) have been proposed so far. Lack of experimental and theoretical investigations on behaviour of reinforced concrete members under high temperatures, hamper development of the constitutive laws. Compressive strength does serve as a sufficient parameter to characterise thermal, physical and mechanical properties of concrete at elevated temperatures.

3. A comparative analysis with test data has shown that most physical-mechanical characteristics (such as tensile and compressive strength and stress-strain diagram of concrete and yield strength and thermal strain of steel) are most accurately predicted by the *Eurocode* (LST EN 1992-1-2:2005).

4. Some characteristics of concrete were best predicted by other models: modulus of elasticity by J. Xiao ir G. Konig, strain corresponding to maximal stress by A. Khennane ir G. Baker, limit strain by M. J. Terro, transient creep strain by Y. Anderberg ir S. Thelandersson.

5. The Flexural layered model has been applied to perform stress and strain analysis of flexural RC members subjected to high temperature, taking into account non-linear physical and thermo-mechanical material properties. Flexural layered model can assess the stress-strain state, load carrying capacity and failure time of reinforced concrete members. This model is simple and

versatile. Its simplicity is due to use of classical formulas of mechanics of materials. Application of a uniform model in the short- and long-term analysis (including shrinkage and creep) for both non-prestressed and prestressed RC members under normal and high temperatures characterises the versatility of the model.

6. The proposed algorithm is very effective in terms of computer resources, i. e. the calculation time decreases hundreds of times (from hours to few seconds) in comparison to standard non-linear finite element programs.

7. Comparison of the results of the numerical analysis performed by the layer model and FE software ATENA with the test data (reported in the literature) of RC slabs has shown satisfactory agreement. On average, disagreement was 17 and 16% for the failure time and deflections calculated by the layer model. The corresponding numbers for the ATENA analysis were 11 and 5%.

List of Publications by the Author on the Topic of the Dissertation

Papers in the reviewed scientific journals included into international data bases

Bacinskas, D.; Kaklauskas, G.; Geda, E. 2004. FE software ATENA applications to non-linear analysis of RC beams subjected to high temperatures, *Journal of Civil Engineering and Management* 10(Suppl. 1): 11–18 (Scopus). ISSN 1392-3730 (print), ISSN 1822-3605 (online).

Bacinskas, D.; Kaklauskas, G.; Gribniak, V.; Geda, E. 2007. Mechanical simulation of reinforced concrete slabs subjected to fire (Gelžbetoninių plokščių, veikiamų gaisro poveikio, modeliavimas), *Technological and Economic Development Economy* 13(4): 295–302 (Scopus). ISSN 1392-8619 (print), ISSN 1822-3613 (online).

Reviewed papers in the conference proceedings included into THOMSON ISI Proceedings data base

Bacinskas, D.; Kaklauskas, G.; Geda, E. 2004. Nonlinear numerical analysis of reinforced concrete beams under high temperature, in *Proc of the Eighth International Conference: Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Vilnius: Technika, 417–424. ISBN 9986-05-757-4.

Bacinskas, D.; Kaklauskas, G.; Gribniak, V.; Geda, E. 2007. Computationally effective tool for mechanical simulation of reinforced concrete members subjected to fire, in *Proc of the Ninth International Conference: Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Vilnius: Technika, 2:461–467. ISBN 978-9955-28-201-3.

In other editions

Geda, E. 2003. Gelžbetoninių sijų, paveiktų aukšta temperatūra, skaitinis įtempių – deformacijų būvio modeliavimas, iš 6-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ leidinio. *Sekcija Statyba*. Vilnius: Technika, 100–106. ISBN 9986-05-618-7.

Geda, E.; Bacinskas, D.; Kaklauskas, G. 2004. Nonlinear numerical analysis of reinforced concrete beams under high temperature, in 7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ leidinio. *Sekcija Statyba*. Vilnius: Technika, 1–5. ISBN 9986-05-775-2.

Janusevičius, D.; Geda, E. 2006. Gaisro temperatūra paveiktų gelžbetonio plokščių elgsenos netiesinė analizė baigtinių elementų metodu, iš 9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ leidinio. *Sekcija Statyba*. Vilnius: Technika, 171–176. ISBN 978-9955-28-108-5.

Bacinskas, D.; Geda, E.; Kaklauskas, G.; Gribniak, V. 2009. Simplified layered approach for analysis of RC slabs subjected to fire, in *Proc of the International Symposium: Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events*, Praha, 2009, 258–264. ISBN 978-999-09-44-40-2.

About the author

Edgaras Geda was born in Lazdijai in June 22, 1976. Bachelor degree in Fire Safety Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 1998. Master of Science in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2000. PhD student of Vilnius Gediminas Technical University, 2002–2007. From 1997 works at Fire and Rescue Department under the Ministry of the Interior, responsible for normalisation of fire risk.

AUKŠTA TEMPERATŪRA VEIKIAMŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ SLUOKSNIŲ MODELIS

Mokslo problemos aktualumas

Konstruciniu požiūriu pastatai ir statiniai gaisro metu turi tam tikrą laiką atlaikyti mechanines apkrovas ir taip užtikrinti saugią žmonių evakuaciją (gelbėjimą) bei saugų ugniagesių darbą. Mechaninių apkrovų bei aukštų temperatūrų veikiamų konstrukcijų analizė yra sudėtingas uždavinys. Skaičiavimo algoritme turi būti nustatytas aukštų temperatūrų kitimas laike bei temperatūrų įtaka medžiagų šiluminėms ir mechaninėms savybėms. Aukštos temperatūros poveikis gelžbetoninėms konstrukcijoms sukelia struktūrinius

medžiagos fizikinių ir mechaninių savybių pokyčius, todėl mažėja betono ir armatūros stiprumo rodikliai, blogėja jų sukibimas, atsiranda plyšiai, didėja deformacijos ir įlinkiai. Tai lemia konstrukcijų laikančiosios galios sumažėjimą, o kritiniais atvejais – ir konstrukcijų suirimą.

Prof. habil. dr. G. Kaklauskas sukurtas integralinis gelžbetoninių elementų sluoksnių modelis, kuriuo lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įlinkiai apskaičiuojami tiksliau nei normų ir skaitiniais metodais. Integraliniame modelyje pasiektas racionalus paprastumo ir tikslumo aspektų derinys leido jį panaudoti nesudėtingame algoritme, kuriame taikomas sluoksnių modelis, medžiagų atsparumo formulės bei pilnosios medžiagų diagramos. Šiame darbe integralinis sluoksnių modelis pritaikytas aukšta temperatūra ir mechanine apkrova veikiamų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų būsenos analizei atlikti.

Tyrimo objektas

Darbe nagrinėjama aukšta temperatūra veikiamų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų analizės problema. Objektas tiriamas makrolygiu.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Remiantis integraliniu sluoksnių modeliu, pasiūlyti aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų apskaičiavimo metodą, įvertinant netiesines šilumines, fizikines ir mechanines medžiagų savybes. Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti skirtingų modelių, apibūdinančių betono ir armatūros šilumines charakteristikas (šilumos laidumas, šiluminė talpa), analizę.
2. Atlikti analizę modelių, apibūdinančių medžiagų fizikines ir mechanines charakteristikas (betono ir armatūros tempiamasis ir gniuždomasis stipris, tamprumo modulis, temperatūrinė deformacija, įtempių ir deformacijų diagrama ir betono trumpalaikė temperatūrinė varžymo bei ribinė deformacija).
3. Sukurti gelžbetoninių elementų, veikiamų aukštos temperatūros ir mechaninės apkrovos, įtempių ir deformacijų skaičiavimo sluoksnių metodo algoritmą.
4. Įvertinant kintamas armatūros ir betono šilumines savybes, skaitiškai nustatyti temperatūros pasiskirstymą gelžbetoninio elemento skerspjūvyje.
5. Surinkus mokslinėje literatūroje paskelbtų lenkiamųjų gelžbetoninių plokščių duomenis, palyginti sluoksnių modeliu ir baigtinių elementų metodu apskaičiuotus ir eksperimentinius įlinkius bei suirimo laiką.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti eksperimentiniai, analitiniai, statistiniai ir skaitiniai metodai.

Mokslinis naujumas ir jo reikšmė

1. Integralinis sluoksnių modelis pritaikytas aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių elementų įtempimų ir deformacijų analizei atlikti, įvertinant netiesines šilumines, fizikines ir mechanines medžiagų savybes. Naudojant sukurta modelį galima spręsti dvejopus uždavinius: 1) apskaičiuoti laiką, kurį mechanškai apkrauta gelžbetoninė konstrukcija sugeba priešintis gaisro poveikiui; 2) nustatyti gelžbetoninės konstrukcijos, veikiamos gaisro, įtempimų ir deformacijų būvį bei laikomąją galią.

2. Atlikta skirtingų modelių, apibūdinančių betono ir armatūros šilumines, fizikines ir mechanines charakteristikas, analizė.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Pasiūlytasis algoritmas, paremtas sluoksnių modeliu, leidžia pakankamai tiksliai apskaičiuoti gelžbetoninių elementų, veikiamų aukšta temperatūra, įtempimų ir deformacijų būvį, laikymo galią bei suirimo laiką. Šis algoritmas yra labai efektyvus kompiuterinių išteklių prasme, kai skaičiavimo laikas sumažėja šimtus kartų, palyginti su standartinėmis netiesinėmis baigtinių elementų programomis (MSC.MARC, DIANA, ATENA).

Ginamieji teiginiai

1. Pasiūlytasis algoritmas, paremtas sluoksnių modeliu, leidžia pakankamai tiksliai apskaičiuoti gelžbetoninių elementų, veikiamų aukšta temperatūra, įtempimų ir deformacijų būvį, laikymo galią bei suirimo laiką.

2. Pasiūlytasis modelis yra pakankamai paprastas, universalus ir efektyvus kompiuterinių išteklių prasme.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, darbo pabaigoje pateikiami pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados, literatūros sąrašas ir autoriaus publikacijos disertacijos tema. Taip pat yra aštuoni priedai.

Darbo apimtis yra 118 puslapių, be priedų, tekste panaudotos 183 numeruotos formulės, 55 paveikslai ir 6 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 145 literatūros šaltiniai.

Įvadiniame skyriuje nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra. Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Antrajame skyriuje pateikta medžiagų modelių analizė. Trečiajame skyriuje aprašytas pasiūlytas aukšta temperatūra veikiamų

gelžbetoninių elementų sluoksnių modelis. Pateiktas skaitinis modelio taikymo pavyzdys. Ketvirtajame skyriuje pateikta eksperimentinių bei sluoksnių ir baigtinių elementų metodais apskaičiuotų gelžbetoninių plokščių įlinkių ir suirimo laiko palyginimas.

Pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados

1. Apibendrinus mokslinės literatūros analizės rezultatus, galima teigti, kad: gelžbetoninių konstrukcijų elgsena gaisro metu yra labai sudėtinga, nes kintant temperatūrai, labai žymiai keičiasi betono ir armatūros šiluminės, fizikinės ir mechaninės savybės. Praktikoje dažniausiai taikomi supaprastinti analiziniai-empiriniai metodai netiksliai įvertina sudėtingą įtempių ir deformacijų būvį. Taikant šiuolaikinius skaitinius (baigtinių elementų) metodus, teoriškai galima įvertinti daugelio svarbių fizikinių reiškinių įtaką. Deja, skaitiniam modeliavimui būtinos didelės kompiuterinės sąnaudos, o medžiagų modeliai nėra pakankamai tikslūs.

2. Autoriaus atlikta analizė parodė, kad kol kas nėra pasiūlyta universalių betono šiluminių, fizikinių ir mechaninių modelių. Eksperimentinių ir teorinių tyrimų gelžbetonio elgsenos aukštoje temperatūroje stoka sąlygoja nemažas medžiagų modelių paklaidas. Betono gniuždomasis stipris nėra pakankama charakteristika, apibūdinanti betono šiluminės, fizikines ir mechanines savybes aukštesiose temperatūrose.

3. Atlikta palyginamoji analizė parodė, kad: dauguma fizikinių ir mechaninių charakteristikų (betono gniuždomasis ir tempiamasis stipriai, gniuždymo įtempių ir deformacijų diagrama ir plieno takumo riba bei šiluminė deformacija) tiksliausiai modeliuojama, remiantis LST EN 1992-1-2:2005 nuostatomis.

4. Pradinis betono tamprumo modulis tiksliausiai aprašomas J. Xiao ir G. König modelių. Betono maksimalius įtempius gniuždomajame betone atitinkanti deformacija tiksliausiai aprašoma A. Khennane ir G. Baker, ribinė deformacija – M. J. Terro, o trumpalaikė temperatūrinė valkšnumo deformacija – Y. Anderberg ir S. Thelandersson pasiūlytaisiais modeliais.

5. Integralinis sluoksnių modelis pritaikytas aukšta temperatūra veikiamų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų analizei atlikti, įvertinant netiesines šiluminės, fizikines ir mechanines medžiagų savybes. Sukurtuoju modeliu galima apskaičiuoti gelžbetoninės konstrukcijos įtempių ir deformacijų būvį, laikymo galią bei suirimo laiką. Modelis yra paprastas ir universalus. Jo paprastumo sąlyga – tai klasikinių medžiagų atsparumo formulių taikymas, o sudėtingi fizikiniai reiškiniai, sukeliantys armatūros ir betono temperatūrines deformacijas ir betono trumpalaikę temperatūrinę valkšnumo deformaciją, įvertinami ekvivalentinėmis įrašomis: ašine jėga ir lenkimo momentu. Universalumo savybė yra ta, kad vienodas algoritmas gali būti taikomas

paprastojo ir įtemptojo gelžbetonio elementams, trumpalaikėms ir ilgalaikėms deformacijoms apskaičiuoti (įvertinant susitraukimą bei valkšnumą) bei esant temperatūriniais poveikiams.

6. Naudojant pasiūlytą algoritmą skaičiavimo laikas sutrumpėja šimtus kartų (nuo kelių valandų iki kelių sekundžių), palyginti su standartinėmis netiesinėmis baigtinių elementų programomis (MSC.MARC, DIANA, ATENA), todėl sutaupomi kompiuteriniai ištekliai.

7. Sluoksnių modeliu ir baigtinių elementų programa ATENA sumodeliavus literatūroje aprašytų eksperimentinių gelžbetoninių plokščių, paveiktų aukšta temperatūra, elgseną, gautas pakankamas apskaičiuotų ir eksperimentinių rezultatų sutapimas. Sluoksnių modeliui gautos vidutinės 17 ir 16% paklaidos, apskaičiuojant plokščių suirimo laiką ir įlinkius. Skaičiuojant baigtinių elementų programa ATENA, gautos atitinkamai 11 ir 5% paklaidos.

Trumpos žinios apie autorių. Edgaras Geda gimė 1976 m. birželio 22 d. Lazdijuose. 1998 m. įgijo gaisrinės inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos fakultete. 2000 m. įgijo Statybos inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos fakultete. 2002–2007 m. Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas. Nuo 1997 m. dirba Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamente prie Vidaus reikalų ministerijos, atsakingas už gaisro rizikos normavimą.

Edgaras GEDA

LAYER MODEL FOR REINFORCED CONCRETE MEMBERS
UNDER FIRE

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)

AUKŠTA TEMPERATŪRA VEIKIAMŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ
SLUOKSNIŲ MODELIS

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

2010 01 19. 1,5 sp. l. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius
<http://www.kopija.lt>