



AUKŠTOS TEMPERATŪROS ĮTAKOS BETONO IR ARMATŪROS SAVYBĖMS BEI JŲ BENDRAI ELGSENAI ANALIZĖ

Robertas Zavalis¹, Arnoldas Šneideris²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹robertas.zavalis@vgtu.lt; ²arnoldas.sneideris@vgtu.lt

Gauta 2009 11 16; priimta 2009 12 20

Santrauka. Nagrinėjama gelžbetonio ir jo komponentų (betono ir armatūros) elgsena aukštoje temperatūroje, tiriamos betono stiprumo ir deformatyvumo savybės kintant temperatūrai. Atliekama teorinių ir eksperimento būdu gautų rezultatų lyginamoji analizė. Aptariami pagrindiniai atsparumo ugniai skaičiavimo principai. Pasinaudojus baigtinių elementų metodo programa COSMOS/M, suskaičiuoti gelžbetoninio elemento skerspjuvio temperatūros pasiskirstymo laukai pagal standartinio gaisro kreivę. Pagal gautus temperatūrinius laukus zonų metodu nustatyta teorinių ir eksperimento rezultatų skirtumo įtaka elemento laikomajai galiai.

Reikšminiai žodžiai: gelžbetonis, temperatūra, gaisras, temperatūrinės zonos, atsparumas ugniai.

1. Įvadas

Bendrieji gaisrinės saugos reikalavimai – kilus gaisrui apriboti riziką, kilusią asmeniniam, visuomeniniam ir kaimynų turtui, o prireikus ir aplinkai.

Statybos gaminių direktyvoje 89/106/EEC pateiktas toks esminis reikalavimas gaisro rizikai apriboti: statinius reikia taip suprojektuoti ir pastatyti, kad kilus gaisrui galima tarti, jog konstrukcijų laikomoji galia yra pakankama nustatytu laikotarpiu, ugnies ir dūmų susidarymas statinyje yra ribotas, gaisro plitimas į gretimas konstrukcijas yra ribotas, esantys statinyje gali išeiti iš jo arba gali būti išgelbėti kitokiomis priemonėmis, yra atsižvelgta į gelbėjimo komandų saugumą.

Statybinių konstrukcijų projektavimo euronormų gaisro saugos dalyse (Jonaitis, Papinigis 2006) nagrinėjami būdingieji pasyviosios apsaugos nuo gaisro aspektai, taikomi projektuojant konstrukcijas ir jų dalis taip, kad jos būtų pakankamos laikomosios galios ir reikiamai ribotų gaisro plitimą. Paskirtis ir naudojimo savybių lygius galima apibrėžti standartinio atsparumo gaisrui laipsniavimo sąvokomis, kurios paprastai pateikiamos nacionalinėse gaisrinės saugos normose.

Rengiant gaisrinius projektus, reikia įvertinti konstrukcinės sistemos elgseną veikiant gaisro temperatū-

roms, galimą šilumos poveikį ir teigiamus aktyviųjų ir pasyviųjų apsaugos prieš gaisrą sistemų efektus kartu su šių trijų savybių neapibrėžtumais ir konstrukcijos griuvimo pasekmėmis. Metodai, pateikti euronormose, skirti pastatams, gaisro apkrovą siejant su pastatu ir jo naudojimu. Nagrinėjami gaisro veikiamų konstrukcijų šiluminiai ir mechaniniai poveikiai, numatoma, kad bus atsižvelgta į gaisrinio projektavimo dalis, kuriose pateiktos konstrukcijų gaisro atsparumui projektuoti taisyklės (Jonaitis, Papinigis 2005).

Laikančiosios konstrukcijos, be gaisro atskyrimo funkcijų, turi būti projektuojamos ir konstruojamos taip, kad jų atlaikymo funkcija R būtų pakankama.

Gaisro veikiamos konstrukcijos ir elementai, turintys ugnies atskyrimo funkcijų, turi būti projektuojami ir konstruojami taip, kad būtų pakankamas jų sandarumas E – neturi atsiverti didelių plyšių, susidaryti skylių ir kitokių ertmių, kurios leistų gaisrui plisti į kitas patalpas; izoliavimas P – šilumą izoliuojančios savybės turi būti tokios, kad gaisro sąlygomis neušidegtų tiesiogiai gaisro neveikiami konstrukcijų paviršiai, gaisro nepaliesta pusė būtų apsaugota nuo šilumos spinduliavimo (Jonaitis, Papinigis 2005; Purkiss 2007; Милованов 1998).

Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento duomenimis, Lietuvoje kasmet kyla apie 15 500 gaisrų, iš kurių apie 4000 kilo gyvenamuosiuose, gamybinuose ir pramoniniuose bei viešosios paskirties pastatuose.

Gaisro metu patalpoje temperatūra gali pakilti iki 1000–1200 °C, o pramoniniuose pastatuose – iki 1600 °C. Tokia aukšta temperatūra gali išsilaikyti iki 3 val. ar net ilgiau. Priklausomai nuo gaisro kilimo vietos, vyravusios temperatūros ir trukmės, pastato konstrukcijos gali būti smarkiai pažeistos. Dėl atsiradusių pažeidimų konstrukcijos gali būti netinkamos toliau eksploatuoti ar net sukelti griūtį. Siekiant išvengti didesnių gaisro padarinių, reikia atkreipti ypatingą dėmesį į gelžbetoninių konstrukcijų atsparumo gaisrui skaičiavimus. Nagrinėjant aukštos temperatūros pažeistas konstrukcijas, būtina tinkamai įvertinti gaisro metu vyravusią temperatūrą, atsiradusius pažeidimus – likusią laikomąją konstrukcijos galią (Fib Bulletin 38, 2007; Fib Bulletin 46, 2008).

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 veiksniai, veikiantys elementų elgseną. Skaitiniams metodams reikia daug kompiuterinių išteklių, todėl jų taikymas yra ribotas netgi nesudėtingoms (statiškai išsprendžiamoms) gelžbetoninėms konstrukcijoms (sijoms, plokštėms ir t. t.) (Gribniak *et al.* 2006; Bačinskas *et al.* 2007).

Gaisro paveiktų gelžbetoninių konstrukcijų įtempių ir deformacijų būvis yra labai sudėtingas. Gelžbetonis yra kompleksinė medžiaga, ir jo komponentai (betonas ir plienas) į aukštą temperatūrą reaguoja skirtingai. Siekiant numatyti gelžbetonio elgseną kilus gaisrui, reikia atskirai įvertinti betono ir plieno fizinių bei mechaninių savybių kitimą aukštoje temperatūroje.

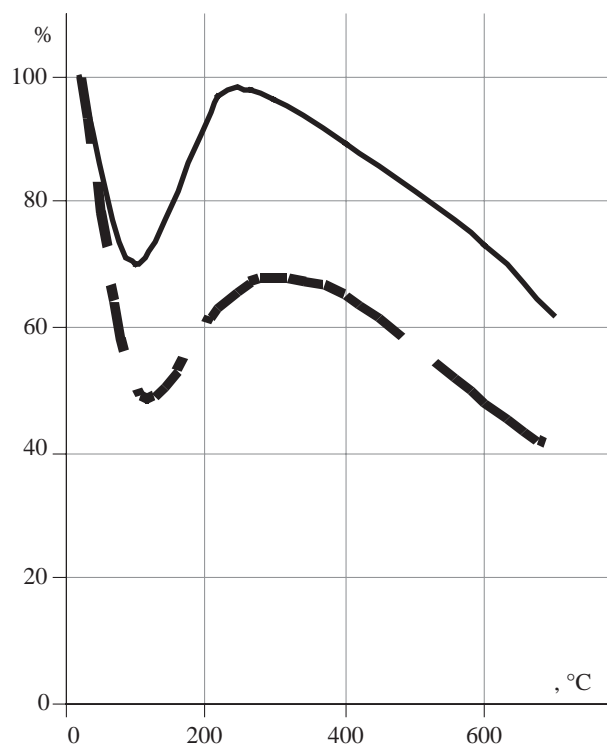
2. Betono elgsena

Viena svarbiausių betono teigiamų savybių – gebėjimas veiksmingai priešintis gniuždymo apkrovoms – veikiama gaisro temperatūros visiškai pakinta. Kaitinant betoną vyksta fiziniai ir cheminiai procesai, kurių neigiami rezultatai priklauso nuo temperatūros lygio, jos kitimo greičio ir poveikio trukmės, betono drėgnio, jo sudėties ir struktūros, užpildų ir sąlyčių zonų savybių, gaminio gamybos technologijos, jo dydžio, geometrinės skerspjūvio formos, apkrovos pobūdžio ir t. t.

Sunkiojo natūralaus kietėjimo ir normalaus drėgnumo betono stiprumo pokyčius dėl aukštos tempe-

ratūros trumpalaikio poveikio galima suskirstyti į tris etapus (1 pav.) (Милованов 1998).

Pirmuoju kaitinimo etapu, iki 100 °C temperatūros, sunkiojo betono gniuždomasis stipris sumažėja 35–20 % (labiausiai temperatūrų intervale nuo 60 °C iki 90 °C).



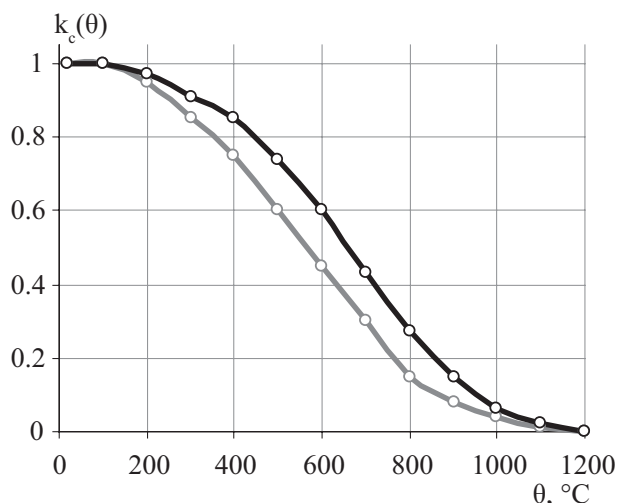
1 pav. Sunkiojo betono gniuždomojo (1) ir tempiamojo (2) stiprio pokytis dėl temperatūros poveikio

Fig. 1. Change in the compressive (1) and tensile (2) strength of normal-weight concrete affected by temperature

Antrajame kaitinimo etape, kai yra 200–400 °C temperatūrų diapazonas, stiprumo savybės visiškai atkuriamos ir netgi nedaug (apie 5–10 %) padidėja gniuždomasis stipris.

Trečias, kai betonas įkaitinamas daugiau kaip iki 400 °C temperatūros, jo stipris vėl sumažėja. Kai pasiekama 600 °C temperatūra, lieka apie 65 % pradinio betono gniuždomojo stiprio, o kai pasiekama 700 °C temperatūra yra 50 %.

Betoną paveikus aukšta temperatūra, kinta visos jo savybės: betono tūrinis tankis, mažėja betono gniuždomasis stipris, išauga plastinės deformacijos dėl tamprumo modulio sumažėjimo, keičiasi specifinė betono šiluma ir šiluminis laidumas (Eurocode 2-1-2: 2005). Betono su silicininiais ir kalkiniais užpildais santykinio gniuždomojo stiprio pasiskirstymas, kintant temperatūrai, parodytas 2 pav.



2 pav. Santykinis gniuždomojo betono su siliciniai (1) ir kalkiniai (2) užpildais stipris kintant temperatūrai

Fig. 2. Relative strength of compressed concrete with chert (1) and limestone (2) fillings in case of changes in temperature

3. Armatūros elgsena

Armatūrinių plienų takumo aikštelė, didėjant temperatūrai, mažėja ir aukštesnėje kaip 300 °C temperatūroje visiškai pradingsta. Dauguma plienų, naudojamų kaip armatūra gelžbetoninėse konstrukcijose, aukštos temperatūrose yra gana plastiški (Topçu, Karakurt, 2008).

Įkaitintų armatūrinių plienų mechaninės savybės blogėja.

200–350 °C temperatūroje S240 klasės armatūra šiek tiek sustiprėja.

400 °C temperatūroje stiprumas ir takumo riba stipriai sumažėja, tačiau labai išauga jos plastiškumas.

Plienai su legiruojančiais priedais S600, S800, S1000 elgiasi labai panašiai kaip ir angliniai plienai. Sąlyginė takumo riba taip pat mažėja.

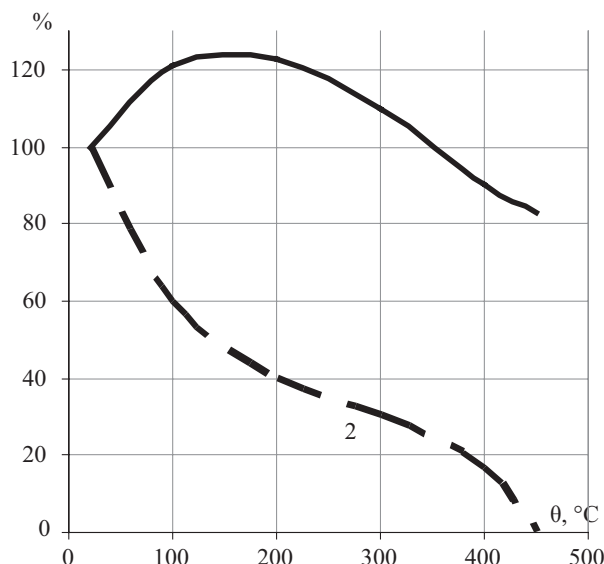
4. Bendras betono ir armatūros darbas aukštoje temperatūroje

Veikiamas aukštos temperatūros ir kietėdamas betonas traukiasi, jo tūris mažėja ir apspaudžia armatūros strypus. Armatūra, kuri turi didesnę temperatūrinį plėtimosi koeficientą, kaistant plečiasi ir „stumia“ betoną (Милованов 1975; Ильин 1979). Kylant temperatūrai šie veiksniai didina trinties jėgą ir betono sukibtį su armatūra.

Labai aukštos temperatūrose armatūros ir betono sukibtis mažėja. 100 °C temperatūroje lygaus paviršiaus armatūros sukibtis su sunkiuoju betonu sumažėja 25 %, o 450 °C temperatūroje santykinis sukibties dydis lygus nuliui (3 pav.). Lygaus paviršiaus armatūros sukibtį su betonu lemia armatūros ir betono paviršių

trintis, atsirandanti dėl išorinės apkrovos, veikiančios strypą, bei cementinio akmenų klijujumas, kuris tiesiogiai proporcingas jo stipriui.

Paprastojo sunkiojo betono sukibtis su karštais



3 pav. Betono ir armatūros sukibties priklausomybė nuo temperatūros: 1 – rumbuoti; 2 – lygi armatūra

Fig. 3. The bond between steel and concrete dependence on temperature, when 1 – threaded, 2 – plain reinforcement bars

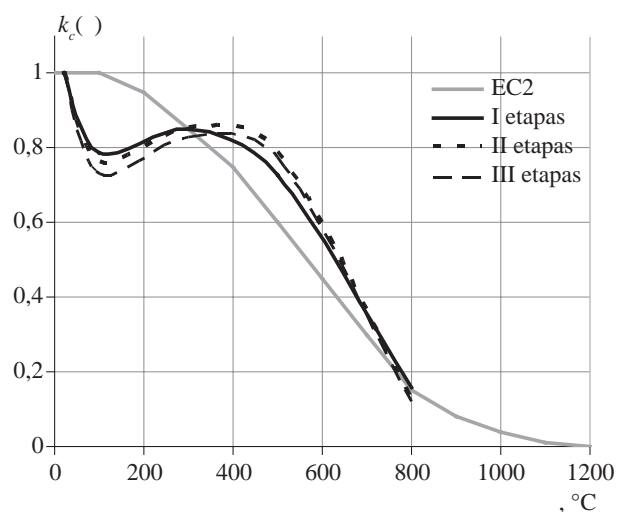
valcuota rumbuotojo paviršiaus armatūra įkaitinus iki 350 °C temperatūros yra didesnė, palyginti su normalių sąlygų bandiniais. Kylant temperatūrai sukibtis mažėja, o 450 °C temperatūroje sudaro tik 3/4 sukibties dydžio, esančio normaliomis sąlygomis (šioje temperatūroje betono struktūra būna stipriai pažeista) (Ильин 1979).

5. Mechaninių betono savybių palyginimas

Teorinės – aukštos – temperatūros, paveiktų medžiagų charakteristikos imamos iš Eurokodo 2. Praktiniams rezultatams gauti buvo atliktas eksperimentas. Jo metu trimis etapais užbetonuoti kubeliai (100×100×100 mm) ir prizmės (100×100×400 mm), betono gniuždomojo stiprio bei tamprumo moduliui nustatyti. Kiekvieną partiją sudarė 20 kubelių ir 16 prizmių. Papildomai buvo betonuojamos prizmės su įdėtu armatūros strypu (Ø 12 S400), kurio apsauginis sluoksnis buvo lygus 25 mm. Šios prizmės kaitinamos kartu su betono charakteristikoms nustatyti skirtais bandiniais. Buvo stebimi temperatūriniai apsauginio sluoksnio pažeidimai kintant temperatūrai.

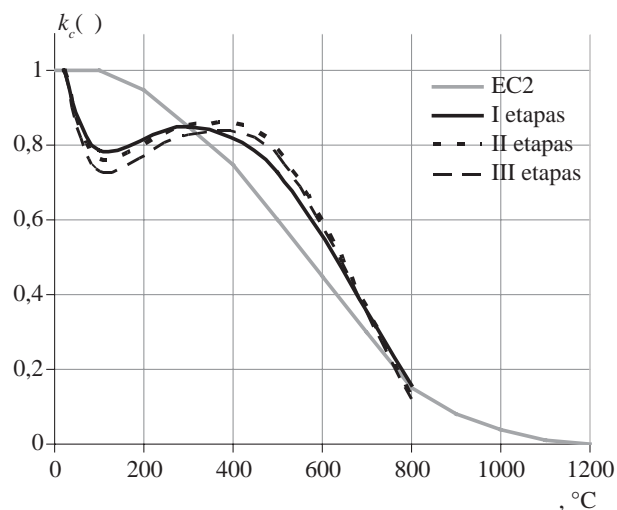
Gniuždomasis stipris ir tamprumo modulis buvo nustatomi bandinius paveikus šiomis temperatūromis: 20 °C (normaliomis šiomis sąlygomis), 100 °C, 300 °C,

500 °C, 800 °C. Temperatūra krosnyje buvo keliama 150 °C intervalu, kiekvienoje pakopoje bandinius išlaidant vieną valandą. Bandiniai buvo atvėsinti iki normalios temperatūros (20 °C) ir išbandyti gniuždymo mašina. Gauti rezultatai pateikti 4 ir 5 pav.



4 pav. Teorinių ir eksperimentinių betono gniuždymo rezultatų palyginimas

Fig. 4. Comparison of theoretical and experimental results of compressed concrete



5 pav. Teorinių ir eksperimentinių betono tamprumo modulio rezultatų palyginimas

Fig. 5. Comparison of the theoretical and experimental results of the modulus of elasticity of concrete

Iš 4 pav. akivaizdu, kad eksperimentais gautų rezultatų kreivės skiriasi nuo teorinių rezultatų. Pagal Eurokode 2 pateiktą betono su siliciniais užpildais santykinio stiprio priklausomybę nuo temperatūros matome, kad stipris mažėja tolygiai kylant temperatūrai. Iš eksperimentinių bandymų kreivių pastebime, kad

gniuždomasis stipris keičiasi netolygiai. Šių kreivių pobūdis panašus į 1 pav. pateikto sunkiojo betono gniuždomojo stiprio pokytį dėl temperatūros poveikio. Betonai, įkaitintas iki 100 °C, gali prarasti apie 20 % ar daugiau gniuždomojo stiprio, o aukštesnėse temperatūrose stiprumas iš dalies atsistato.

Grafike (5 pav.) matome betono tamprumo modulio redukavimo koeficiento, teorinių ir eksperimentinių rezultatų kreives. Jų kitimo pobūdis yra ganėtinai panašus, tik 100 °C temperatūroje eksperimentiniai rezultatai yra mažesni už teorinius.

Galutiniame euronormų variante betonų su skirtingais užpildais koeficientas k_c pateikiamas grafiškai (4.1 pav., EC 2-1-2:2005).

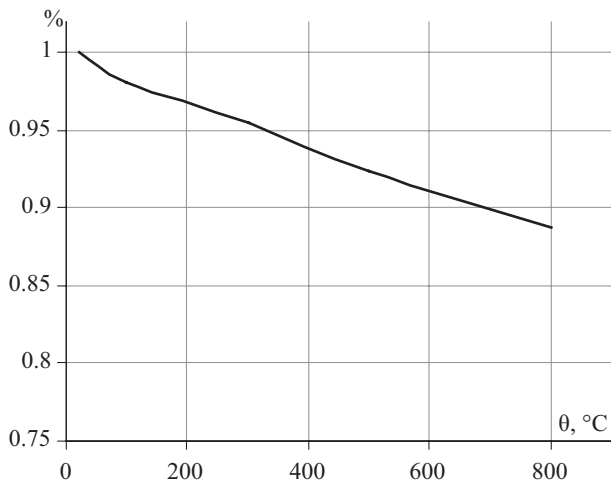
800 °C temperatūroje kaitinti bandiniai buvo smarkiai pažeisti. Dėl atsiradusių pažeidimų nebuvo galimybės ištirti tamprumo modulio (6 pav.), todėl jis prilygintas nuliui.



6 pav. Betoninė prizmė kaitinta 800 °C temperatūroje

Fig. 6. Concrete element subjected to heating at 800 °C

Tiriant betono gniuždomąjį stiprį ir tamprumo modulį, buvo stebimas bandinių tankio pokytis kylant temperatūrai. Tai apibūdinantis grafikas pateiktas 7 pav. Pastebėta, kad kylant temperatūrai betono tankis mažėja tiesine priklausomybe. Mažėjant tankiui, keičiasi ne tik mechaninės, bet ir šiluminės betono savybės: šiluminis laidumas ir specifinė šiluma.



7 pav. Betono tankio mažėjimo kreivė kylant temperatūrai

Fig. 7. The curve of concrete density decrease in case of temperature rise

6. Atsparumo ugniai skaičiavimo principai

Konstrukcijų atsparumas ugniai nustatomas norminiais dokumentais, standartais. Yra keturi pagrindiniai reikalavimai, kurie turi būti įvykdyti, kad pastatas būtų saugus (EC 2-1-2:2005; Purkiss 2007; Fib Bulletin 38, 2007; Fib Bulletin 46, 2008).

- konstrukcija privalo atlaikyti jai tenkančias apkrovas;
- apsaugoti žmones nuo dūmų ir kenksmingų dujų;
- apsaugoti žmones nuo karščio;
- netrukdyti ugniagesių darbui.

Tiriant gaisro poveikį reikia įvertinti konstrukcinės sistemos elgseną, veikiant gaisro temperatūroms, galimą šilumos poveikį ir aktyvių bei pasyvių apsaugos nuo gaisro sistemų įtaką. Laikančiosios konstrukcijos, be gaisro atskyrimo funkcijų, turi būti projektuojamos ir konstruojamos taip, kad jų atlaikymo funkcija R (angl. *resistance*) būtų pakankama. Gaisro veikiamos konstrukcijos ir elementai su ugnies atskyrimo funkcijomis turi būti projektuojami taip, kad būtų pakankamas jų sandarumas E (angl. *separation*) – neturi atsiverti didelių plyšių, susidaryti skylių ir kitokių ertmių, kurios leistų gaisrui plisti į kitas patalpas. Izoliavimas I (angl. *isolation*) – šilumos izoliavimo savybės – turi būti tokios, kad gaisro sąlygomis neužsidegtų tiesiogiai gaisro neveikiami konstrukcijų paviršiai (Purkiss 2007).

Elementams skaičiuoti, veikiant gaisro temperatūroms, šiuo metu taikomi keli metodai: projektavimas naudojantis lentelių duomenimis, paprastieji skaičiavimo metodai (taikomi tik tam tikriems elementams,

veikiant tik lenkimo momentams ir ašinėms jėgoms) ir bendrieji skaičiavimo metodai (STR 2.05.11:2005; EC 2-1-2:2005). Šiame straipsnyje detaliau nagrinėjami paprastieji skaičiavimo metodai.

Paprastuoju skaičiavimo metodu nustatoma kaitinamojo skerspjuvio laikomoji geba. Šis metodas tinka konstrukcijoms, paveiktoms standartinio gaisro iki didžiausiosios gaisro temperatūros. Metodas taip pat tinka skaičiuoti laikomajai gebai pasirinktu laiko momentu kilus bet kokiam kitam gaisrui, jeigu temperatūrų laukai, atitinkantys tą laiko momentą, yra žinomi arba apskaičiuoti, o medžiagų savybės yra žinomos (STR 2.05.11:2005; EC 2-1-2:2005).

Iš pradžių nustatomi temperatūrų laukai skerspjuviuose, tada sumažinamas skerspjuvis, betono ir armatūros stipris, tamprumo modulis ir galiausiai apskaičiuojama laikomoji geba, įvertinant sumažintą skerspjuvį, vadovaujantis gelžbetoninių konstrukcijų skaičiavimo ir konstravimo reikalavimais. Elementai turi būti sukonstruoti taip, kad neatplyštų apsauginis betono sluoksnis, elemento suirimo dėl betono sprogmimo, armatūros inkaravimo pažeidimo arba nepakankamos gebos sukimo momentui atlaikyti tikimybė būtų mažesnė, negu suirimo dėl lenkimo momento, skersinės arba išilginės jėgos veikimo (Jonaitis, Papienis 2005).

Skaičiuotinis betono gniuždomasis stipris apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$f_{cd}(\theta) = k_c(\theta) \cdot f_{ck}(20^\circ\text{C}). \quad (1)$$

Sumažėjęs betono tamprumo modulis:

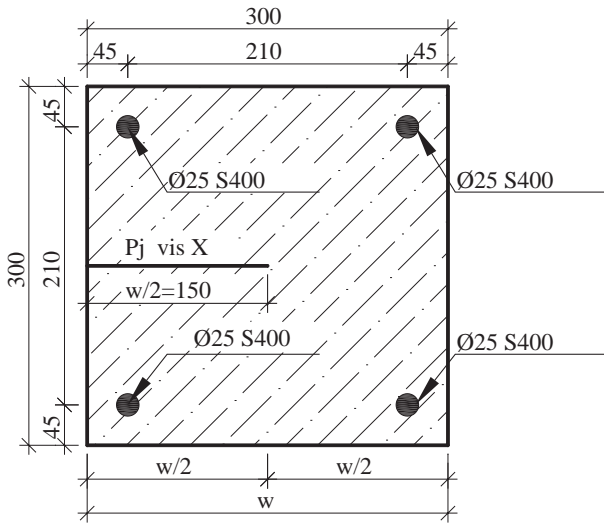
$$E_{cd}(\theta) = (k_c(\theta))^2 \cdot E_{ck}(20^\circ\text{C}). \quad (2)$$

Šiuo principu yra paremtas zonų metodas ([Fib Bulletin 38, 2007; Fib Bulletin 46, 2008).

7. Temperatūros pasiskirstymo modeliavimas gelžbetoniniame elemente

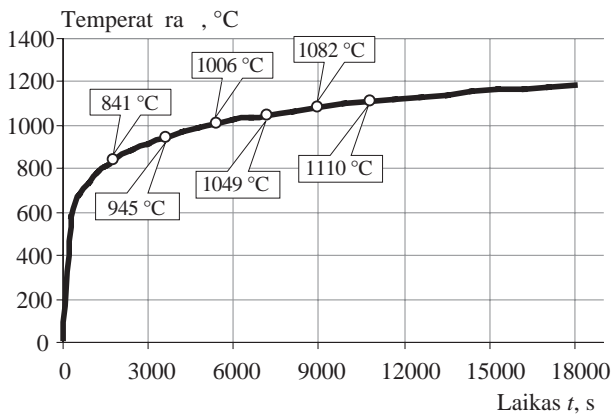
Temperatūriniai laukai modeliuojami baigtinių elementų metodo COSMOS/M programa kvadratinio skerspjuvio 300×300 mm elementui (8 pav.).

Elementas kaitinamas iš visų keturių pusių pagal standartinio gaisro kreivę (9 pav.). Kadangi aukštoje temperatūroje keičiasi ne tik mechaninės, bet ir šiluminės betono savybės, buvo naudotos ir betono šiluminio laidumo λ_c (10 pav.), specifinės šilumos priklausomybės C_c (11 pav.). Modelyje naudojama apatinė šiluminio laidumo riba.



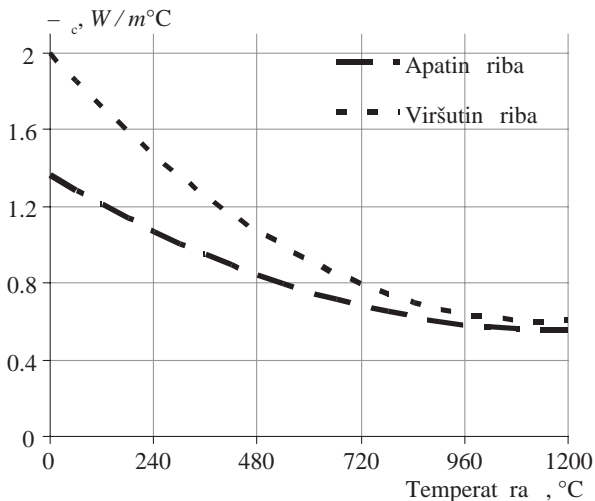
8 pav. Nagrinėjamo gelžbetoninio elemento schema

Fig. 8. The structural scheme of reinforced concrete element



9 pav. Standartinio gaisro kreivė

Fig. 9. The curve of standardized fire



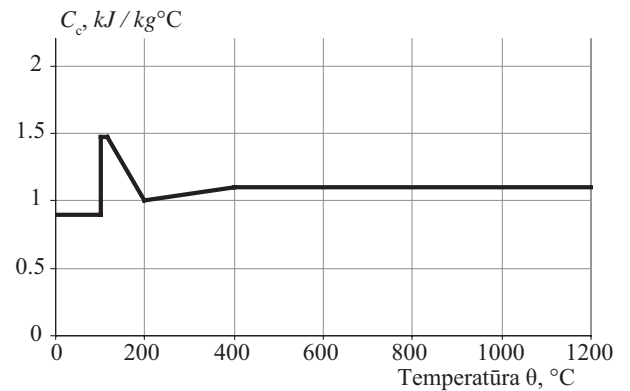
10 pav. Betono šiluminis laidumas

Fig. 10. Concrete heat conduction

Gauti rezultatai pateikiami grafiškai (12 pav.). Temperatūriniai laukai nustatyti ir reikšmės paimtos per pjūvį X, kuris parodytas 8 pav. Rezultatai išvedami keturiems standartinio gaisro etapams nuo 0,5 h iki 2 h kas 30 min.

Skaičiuojant taikyti šiluminiai armatūros parametrai pateikti 1 lentelėje.

Kad rezultatą galima būtų palyginti su euronormomis, visos medžiagų charakteristikos skaičiuoti baigtinių elementų programa buvo taikomos pagal EC 2-1-2:2005.



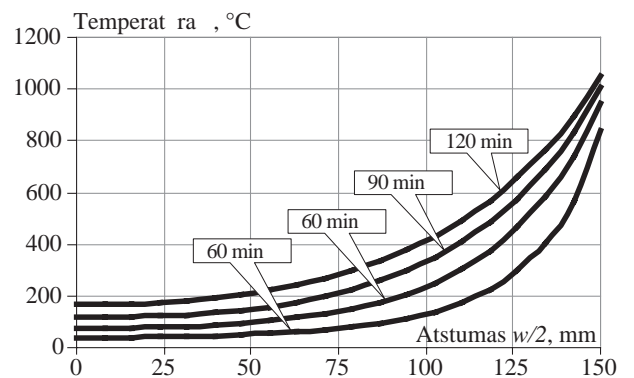
11 pav. Betono specifinės šilumos priklausomybė nuo aukštos temperatūros esant 1,5 % betono drėgmės kiekiui

Fig. 11. The dependence of concrete specific heat on high temperature in case of 1,5 % moisture rate in concrete

1 lentelė. Šiluminiai armatūros parametrai

Table 1. Reinforcement heat factors

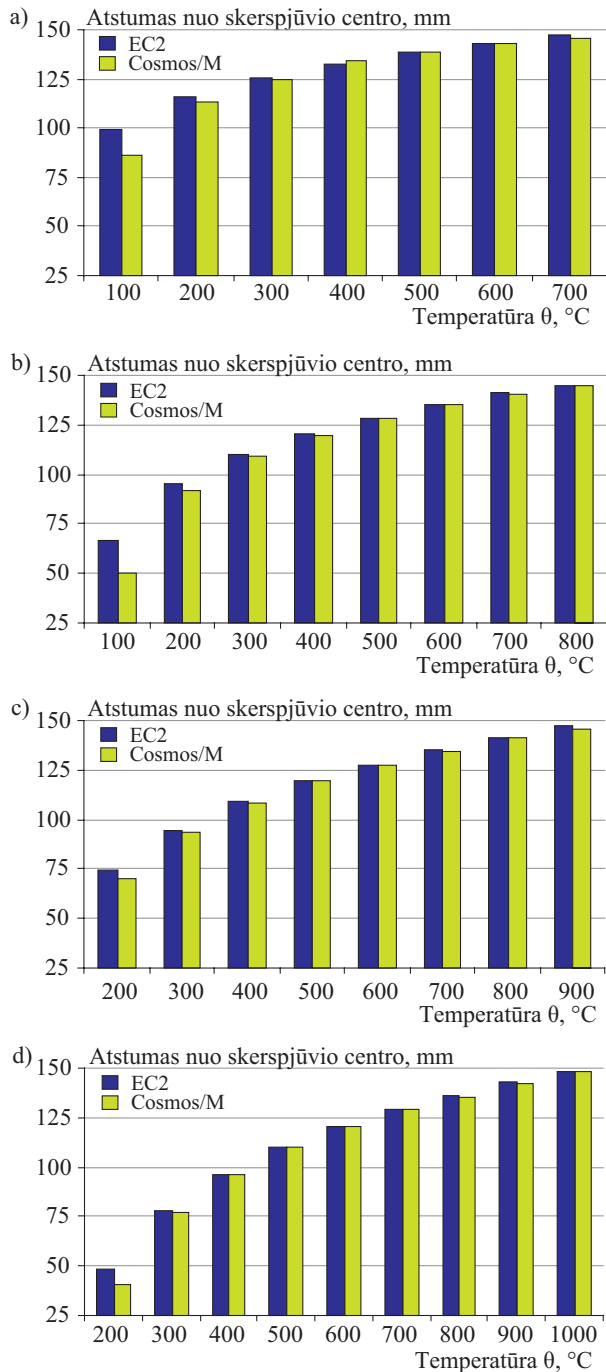
Parametras	Reikšmė
Specifinis šilumos laidumas λ_S	$47 \frac{W}{(m^{\circ}K)}$
Specifinė šiluma C_S	$440 \frac{J}{(kg^{\circ}K)}$



12 pav. Temperatūros pasiskirstymas skerspjūvyje tam tikru laiko momentu

Fig. 12. Temperature distribution in the cross-section at a definite time moment

Gautas temperatūrinių laukų pasiskirstymas baiginių elementų programa lyginamas su literatūroje (STR 2.05.11:2005; EC 2-1-2:2005) pateikiamomis izotermomis. Palyginimas diagramų pavidalu pateiktas 13 pav., čia pateiktas tam tikros temperatūros (100, 200, ..., 1000 °C) nuotolis nuo skerspjūvio centro.



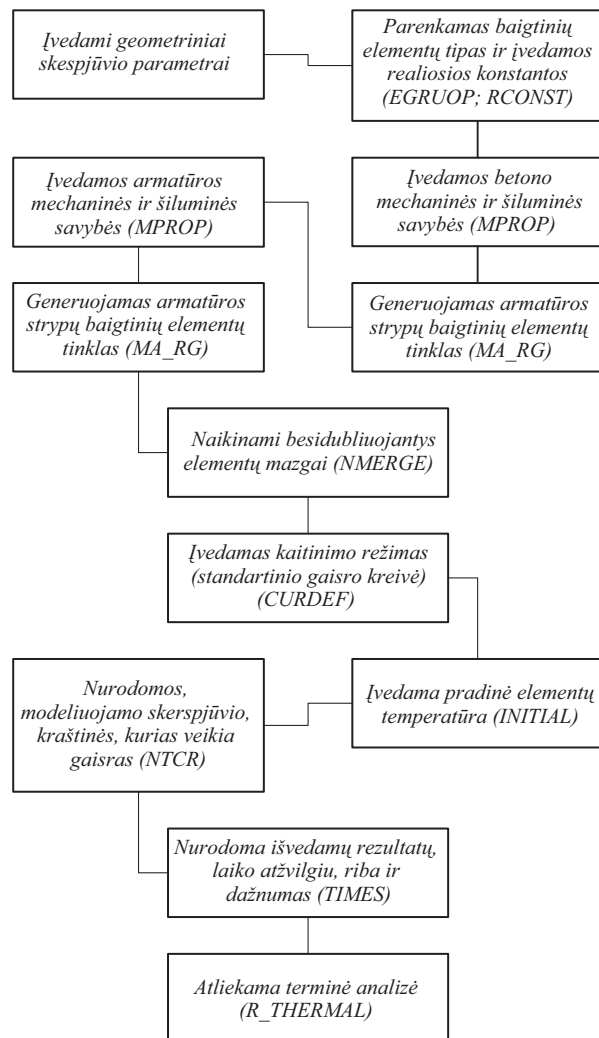
13 pav. Izotermų nuotoliai nuo skerspjūvio centro pagal EC 1-1-2: 2004 ir gauti programa COSMOS/M: a) po 30 min; b) po 60 min; c) po 90 min; d) po 120 min

Fig 13. The distance of isotherms from the centre of the cross-section according to EC 1-1-2:2004 which were obtained using programme COSMOS/M for time period of a) 30 min, b) 60 min, c) 90 min, d) 120 min

Iš šio paveikslo matoma, kad teorijoje pateikiamos izotermos skiriasi nuo programa COSMOS/M sumodeliuoto temperatūrų pasiskirstymo. Skirtumas tarp literatūroje pateikiamų ir gautų rezultatų 300 °C bei didesnėse temperatūrose siekia tik apie 1 %, o 100 °C ir 200 °C temperatūrose skirtumas yra nuo 10 iki 23 %. Kadangi skirtumai nėra labai dideli, galima teigti, kad temperatūrinių laukų modeliavimo algoritmas gelžbetonio skerspjūvio elementams yra ganėtinai tikslus.

8. Algoritmas gelžbetonio elemento temperatūrinių laukų pasiskirstymui gauti

Sudarytą modelio algoritmą (14 pav.) galima suskirstyti į 11 etapų.



14 pav. Algoritmas Fig. 14. Algorithm

Pagal šį algoritmą atlikti pateikto elemento skaičiavimai (8 pav.). 15 pav. pateiktas skaičiavimo pavyzdys programa COSMOS/M ir suskirstymas į atskirus etapus.

Komanda COSMOS/M aplinkoje	Etapas
PT,1,0,0,0	
CREXTR,1,1,1,Y,0.3	
CREXTR,1,1,1,X,0.3	
CREXTR,3,3,1,Y,0.3	
CRLINE,4,2,4	
PT,5,0.045,0.045,0	
PT,6,0.255,0.045,0	
PT,7,0.045,0.255,0	
PT,8,0.255,0.255,0	
CREXTR,5,8,1,Z,-0.2	
CREXTR,5,8,1,X,0.1	
CRLINE,13,5,9	
CRCIRCLE,13,5,9,13,0.0125,360,4	
CRCIRCLE,17,6,10,14,0.0125,360,4	
CRCIRCLE,21,7,11,15,0.0125,360,4	
CRCIRCLE,25,8,12,16,0.0125,360,4	1
ACTKEEP,PT,1	
CRDEL,5,12,1	
ACTKEEP,PT,0	
PTDEL,9,16,1	
CT,1,0,0.008,5,1,2,3,4,1,0	
CT,2,0,0.008,5,13,14,15,16,13,0	
CT,3,0,0.008,5,17,18,19,20,17,0	
CT,4,0,0.008,5,21,22,23,24,21,0	
CT,5,0,0.008,5,25,26,27,28,25,0	
RG,1,5,1,2,3,4,5,0	
RG,2,1,2,0	
RG,3,1,3,0	
RG,4,1,4,0	
RG,5,1,5,0	
EGROUP,1,SHELL3T,0,0,0,0,0,0,0	2
RCONST,1,1,1,1,0.1	
MPROP,1,DENS,7850	
MPROP,1,KX,50	3
MPROP,1,C,450	
MA_RG,2,5,1,3,1,0	4
MPROP,2,DENS,2400	
CURDEF,TEMP,1,1,0,1.36,120,1.21,240,1.07,360,0.94,480,0.84,600,0.75,720,0.68,840,0.62,960,0.58,1200,0.55	
MPROP,2,KX,1	5
CURDEF,TEMP,2,1,0,900,100,900,100,1470,115,1470,200,1000,400,1100,1200,1100	
MPROP,2,C,1	
MA_RG,1,1,1,3,1,0	6
NMERGE,1,1550,1,0.0001,0,0,0	7
NCOMPRESS,1,1550	
CURDEF,TIME,3,0,"C:\PROGRAM FILES\COSMOS APPLICATIONS\WORKING\TIME.XCR"	8
NTCR,1,1,4,1	9
INITIAL,TEMP,1,1502,1,20	
TIMES,0,10800,1800	10
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0,0	11
R_THERMAL	

15 pav. Skaičiavimo pavyzdys programa COSMOS/M
 Fig. 15. The example of calculation using program COSMOS/M

Pateikiami išskirtų etapų paaiškinimai:

- 1-ame etape įvedami nagrinėjamo skerspjūvio geometriniai parametrai. Šiuo konkrečiu atveju pagal (14 pav.) sudaromas skerspjūvis, kuris parodytas 8 pav.
- 2-ame etape parenkamas baigtinių elementų tipas ir įvedamos reikalingos realiosios konstantos.
- 3-iam etape įvedamas armatūros mechaninės ir šiluminės charakteristikos. Šiame modelyje įvesti: armatūros tankis, šiluminis laidumas ir specifinė šiluma.
- 4-ame etape generuojamas armatūros strypų baigtinių elementų tinklas.
- 5-ame etape įvedamas betono tankis ir šiluminės jo charakteristikos: šiluminio laidumo ir specifinės šilumos priklausomybės nuo temperatūros.
- 6-ame etape generuojamas betoninės dalies baigtinių elementų tinklas.
- 7-ame panaikinami besidubliuojantys elementų mazgai.
- 8-ame nurodomas išorinis failas, kuriuo aprašoma standartinio gaisro kreivė (9 pav.).
- 9-ame nurodomos modeliujamo skerspjūvio kraštinės, kurias veikia gaisras, ir pasirenkama pradinė temperatūra.
- 10-ame etape nurodoma išvedamų rezultatų laiko atžvilgiu riba ir dažnumas.
- 11-ame atliekama terminė analizė.

Pasinaudojus šiuo COSMOS/M programai sudarytu algoritmu galima sumodeliuoti temperatūrinius laukus bet kokios geometrijos gelžbetoniniam skerspjūviui. Tai galima padaryti paliekant 2–11 etapus ir keičiant tik 1-ojo etapo duomenis.

9. Bendro betono ir armatūros darbo (elgsenos) vertinimas remiantis teoriniais ir eksperimento rezultatais

Pasinaudojant gautais temperatūriniais laukais, skaičiuojami du atvejai gelžbetoninio elemento (8 pav.) laikomajai galiai nustatyti:

- naudojant $f_c(\theta) / f_c(20^\circ\text{C})$ priklausomybę pagal STR 2.05.11:2005 ir EC 2-1-2:2005;
- taikant eksperimentinius rezultatus ir imant vidutinę trijų betonavimo etapų $k_c(\theta)$ reikšmę (4 pav.).

Abiem atvejais armatūros stiprumo savybės įvertinamos pagal literatūroje pateiktus duomenis (EC 2-1-2:2005). Tokiu būdu siekiama išsiaiškinti betono

gniūždomosios galios kritimą 100 °C temperatūroje, jo įtaką konstrukcijos laikomajai galiai. Skaičiuojama zonų metodu pagal EC 2-1-2:2005.

Atliktų skaičiavimų rezultatai pateikti 16 pav. Iš šio paveikslo matoma, kad liekamasis elemento stiprumas pagal teorinę betono stiprio redukavimo kreivę yra didesnis nei pagal eksperimento rezultatus apie 5 % tik po 30 ir 60 min. Po 90, 120 min. elemento stiprumas apie 2 % didesnis, kai skaičiuoti naudojama eksperimento būdu gauta $k_c(\theta)$ priklausomybė.

Tokių laikomosios galios pasiskirstymą galima paaiškinti skaičiuojant atmetamo pažeisto sluoksnio a_z kitimu. Naudojant eksperimentinę $k_c(\theta)$ priklausomybę dydis a_z kinta netolygiai, tam įtakos turi koeficientas $k_c(\theta_M)$. Grafike (16 pav., a) matoma, kad a_z dydžio krintanti dalis sutampa su nagrinėjamo skerspjūvio centrinės dalies įkaitimu iki temperatūros, arti-

mos 100 °C. Šioje temperatūroje pagal grafiką (4 pav.) koeficiento $k_c(\theta)$ reikšmė krinta apie 20 %, tai ir turėjo įtaką a_z reikšmėms. Laikomajai galiai (16 pav., b) skaičiuoti įvertinta maksimali atmetamo sluoksnio a_z reikšmė pagal Eurocode 2.

10. Išvados

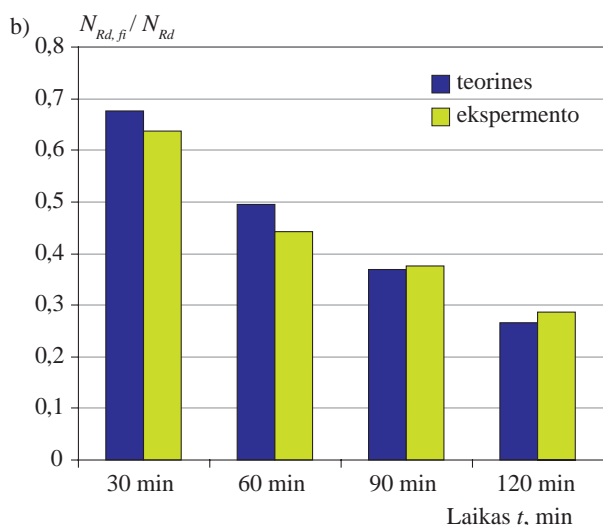
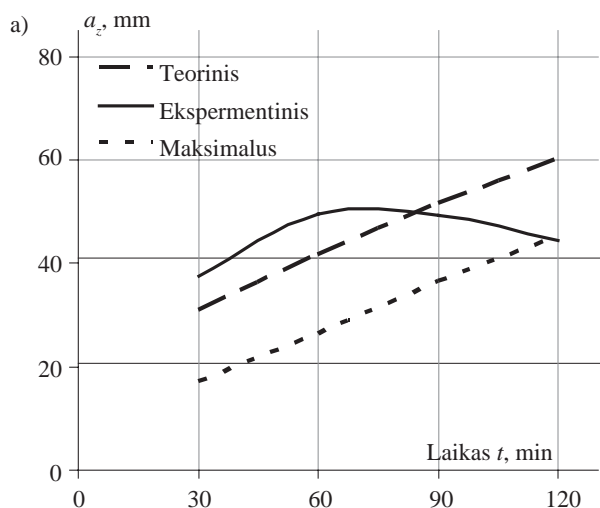
1. Teorinė betono charakteristinio stiprio f_{ck} redukavimo koeficiento $k_c(\theta)$ priklausomybė skiriasi nuo eksperimento būdu gauto grafiko (4 pav.). Skirtumas 100 °C zonoje siekia iki 20 %.

2. Liekamasis elemento stiprumas pagal teorinę betono stiprio redukavimo kreivę yra didesnis nei pagal eksperimento rezultatus apie 5 %, tik po 30 ir 60 min. Po 90, 120 min. elemento stiprumas apie 2 % didesnis, kai skaičiuoti naudojama eksperimento būdu gauta priklausomybė. Tokiam liekamojo elemento stiprumui įtaką turėjo atmetamos zonos dydis, kurį lėmė betono stiprio redukavimo koeficiento reikšmės kritimas esant 100 °C temperatūrai.

3. Aukštos temperatūros poveikis gelžbetoniui ir jo komponentams turi didelę įtaką jų mechaninėms bei fizinėms savybėms. Bendras armatūros ir betono darbas pažeidžiamas 400 °C temperatūroje. Atlikti bandymai parodė, kad 500 °C temperatūroje apsauginis armatūros sluoksnis pažeidžiamas ir panaikinama sukibtis tarp betono ir armatūros. Apsauginis sluoksnis suskeldėja ir atšoka. Tai paaiškinama kritine armatūros temperatūra, kuri S240-S400 klasių yra apie 360°C.

Literatūra

- Bačinskas, D.; Kaklauskas, G.; Gribniak, V.; Geda, E. 2007. Gelžbetoninių plokščių veikiamų gaisro, modeliavimas, *Technological and Economic Development of Economy* 13(4): 295–302.
- EC 1-1-2:2004. LST EN 1991-1-2:2004. *Poveikiai konstrukcijoms. 1–2 dalis. Bendrieji poveikiai. Gaisro poveikiai konstrukcijoms* [Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–2: General actions - Actions on structures exposed to fire]. Vilnius.
- EC 2-1-1:2004. LST EN 1992-1-1:2004. *Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1–1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės* [Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–1: General rules and rules for buildings]. Vilnius.
- EC 2-1-2:2005. LST EN 1992-1-2:2005. *Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1–2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų elgsenos ugnyje skaičiavimas* [Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules - Structural fire design]. Vilnius.
- Fib Bulletin* 38. 2007. Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling. State-of-art report. 214 pages, ISBN 978-2-88394-086-4, July 2008.
- Fib Bulletin* 46. 2008. Fire design of concrete structures – structural behaviour and assessment. State-of-art report. 106 pages, ISBN 978-2-88394-078-9, April 2007.



16 pav. a_z kitimo grafikas (a); laikomosios galios palyginimo grafikas (b)

Fig. 16. Chart of changes in a_z (a), chart of comparing bearing capacity (b)

- Gribniak, V.; Bačinskas, D.; Kaklauskas, G. 2006. Gaisro temperatūra veikiamų laikančiųjų gelžbetoninių tunelio elementų elgsenos skaitinio modeliavimo strategija, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 1(1): 5–9.
- Jonaitis, B.; Papinigis, V. 2006. Nauja Europos sąjungos gaisro veikiamų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo metodika, *Technological and Economic Development of Economy* 12(2): 108–117.
- Jonaitis, B.; Papinigis, V. 2005. Ilgalaiškės apkrovos ir gaisro temperatūrų įtaka betono mechaninėms savybėms, *Journal of Civil Engineering and Management* 11(4): 283–288.
- LST EN 1363-1:2000. *Atsparumo ugniai bandymai. 1 dalis. Bendrieji reikalavimai* [Fire resistance tests. Part 1: General requirements]. Vilnius.
- LST EN 1365-4:2000. *Laikančiųjų elementų atsparumo ugniai bandymai. 4 dalis. Kolonos* [Fire resistance tests for load bearing elements. Part 4: Columns]. Vilnius.
- Purkiss, J. A. 2007. *Fire Safety Engineering Design of Structures*. Second Edition.
- STR 2.05.11:2005. *Gaisro temperatūrų veikiamų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. Vilnius. 125 p.
- Topçu, İ. B.; Karakurt, C. 2008. Properties of reinforced concrete steel rebars exposed to high temperatures, *Research Letters in Materials Science* 2008, Article ID 814137, 4 pages. doi:10.1155/2008/814137
- Ильин, Н. А. 1979. *Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции*. Москва.
- Милованов, А. Ф. 1975. *Расчет жаростойких железобетонных конструкций*. Москва.
- Милованов, А. Ф. 1998. *Стойкость железобетонных конструкций при пожаре*. Москва.

THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

R. Zavalis, A. Šneideris

Abstract. The article represents the behaviour of reinforced concrete and its components (concrete and reinforcement) under high temperature. The comparing analysis of the experimentally and theoretically obtained results has been performed. The carried out experiment has disclosed that the mechanical properties of concrete alters differently in cases of temperature rise and theoretical reference. The most visible difference has been noticed at a temperature of 100 °C (Fig 4, Fig 5). The main fire resistance calculation basics are discussed. The temperature fields of the reinforced concrete element cross-section are calculated according to the standard fire curve using the program COSMOS/M of the finite element method. Concrete thermal properties, thermal conductivity and specific heat capacity dependence on temperature are taken into account in the model (Fig 10, Fig 11). By means of this model, the corresponding algorithm (Table 2) was made and can be used for obtaining temperature distribution for the reinforced concrete element of different cross-sections. According to the received temperature fields and applying the zone method, the influence of differences in theoretical and experimental results on element load bearing capacity is determined. The residual strength of the element considering the theoretical reduction curve of concrete strength is 5% larger than the results obtained in cases of 30 and 60 minutes heating. 90 and 120 minutes heating indicates that element strength is only 2% larger than the results calculated experimentally. The reduced zone dimension determined due to a decrease in the reduction coefficient at a temperature of 100 °C has affected residual element strength.

Keywords: reinforced concrete, temperature, fire, fields of temperature, fire resistance.

Robertas ZAVALIS. Ph.D. student at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University. Research interests: evaluation of the existing reinforced concrete and masonry structures, evaluation of fire resistance to reinforced concrete and masonry structures.

Arnoldas ŠNEIDERIS. Assoc. Prof. Dr at the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University. Research interests: evaluation of the existing reinforced concrete and masonry structures, evaluation of fire resistance to reinforced concrete and masonry structures.