

文章编号: 1000-4750(2007)02-0161-05

升温过程中混凝土构件轴向变形简化计算

*周建康, 时旭东

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 混凝土的热惰性将导致构件截面温度分布的不均匀性, 由此必然产生温度变形差。采用有限元和试验验证相结合的方法, 对影响混凝土构件温度变形差的主要因素进行了热-力耦合分析, 确定了构件截面尺寸和升温速度等因素的影响程度, 并给出温度变形差和等效温度的简化计算公式。有了等效温度, 即可将升温过程中混凝土构件轴向变形转化为按截面温度分布均匀计算。同时, 它可用来分析不均匀温度场引起的力学问题。

关键词: 混凝土; 高温; 等效温度; 轴向变形; 温度变形差

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A

SIMPLIFIED CALCULATION OF AXIAL DEFORMATION OF CONCRETE MEMBERS EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE

*ZHOU Jian-kang, SHI Xu-dong

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Concrete thermal inertia will result in a nonuniform temperature distribution in the cross section of concrete members exposed to fire and soon afterwards the corresponding strain will be induced. This strain is called the nonuniform temperature distribution strain (NTDS). By finite element method and based on known test results, the thermal-stress coupled properties of the NTDS are analyzed; the influencing extent of these factors, such as the size of cross section, velocity of heating, etc., are determined, and the corresponding simplified calculation formulae for the NTDS and the equivalent temperature are developed. The simplified analysis can transform the problem of the axial deformation induced by the NTDS to that of a uniform temperature distribution in the cross section of concrete members, and the equivalent temperature can be used to analyze mechanical problems of concrete under elevated temperature.

Key words: concrete; elevated temperature; equivalent temperature; axial deformation; nonuniform temperature distribution strain

混凝土是热惰性材料, 在火灾等温度作用下, 混凝土构件截面上形成严重不均匀的温度分布, Khoury 称这种现象为“结构效应”^[1]。由此导致高温下混凝土的变形十分复杂。一般包括温度膨胀变形、温度作用的力应变、应力作用的应力应变以及高温热徐变^[2,3]。因此, 要计算混凝土构件在高温下的变形, 将是非常复杂的。一般采用有限元计算的

方法。本文通过对混凝土构件在升温过程中温度变化的影响因素分析, 结合有限元计算, 给出一个等效温度, 用等效温度来反映复杂的截面不均匀温度分布及由此引起的不均匀截面温度应力, 将升温过程中混凝土构件轴向变形转化为按截面温度分布均匀计算。这个等效温度定义如下:

收稿日期: 2004-06-24; 修改日期: 2006-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(50278049); 教育部留学回国人员科研启动基金(2003)

作者简介: *周建康(1981), 男, 浙江人, 硕士, 从事结构工程研究(E-mail: zjk81@126.com);

时旭东(1960), 男, 安徽人, 副教授, 博士, 从事结构工程研究(E-mail: shind@mail.tsinghua.edu.cn)。

$$T' = T_0 + (T - T_0)/f \quad (1)$$

式中, T , T_0 分别为构件表面温度和初始温度; f 是一个以影响不均匀温度应变大小的有关因素为自变量的函数。

1 计算假定及模型

1.1 计算假定及条件

根据已有的试验研究结果, 给出如下计算假定及条件:

- (1) 构件截面变形符合平截面假定;
- (2) 构件截面温度分布不均匀, 沿纵向温度相同;
- (3) 构件遭受四面火灾作用;
- (4) 构件截面为矩形截面。

1.2 计算模型

已知截面上的温度分布 $T(y, z)$ (图 1), 取截面形心处的变形 ε_0 及曲率 $\kappa_z(\kappa_y)$ 为基本未知量。其中, 正应变 ε_0 以受拉为正, 受压为负; $\kappa_z(\kappa_y)$ 取 $y \geq 0 (z \geq 0)$ 处有拉应变、 $y < 0 (z < 0)$ 处有压应变得到的转动方向为正, 反之为负。于是, 约束变形 ε_c 和自由变形 $\varepsilon_m(y, z)$ 的差值为:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + (\kappa_z y + \kappa_y z) - \varepsilon_m(y, z) \quad (2)$$

若 $\varepsilon_c > 0$, 则混凝土受拉; 反之, 混凝土受压。

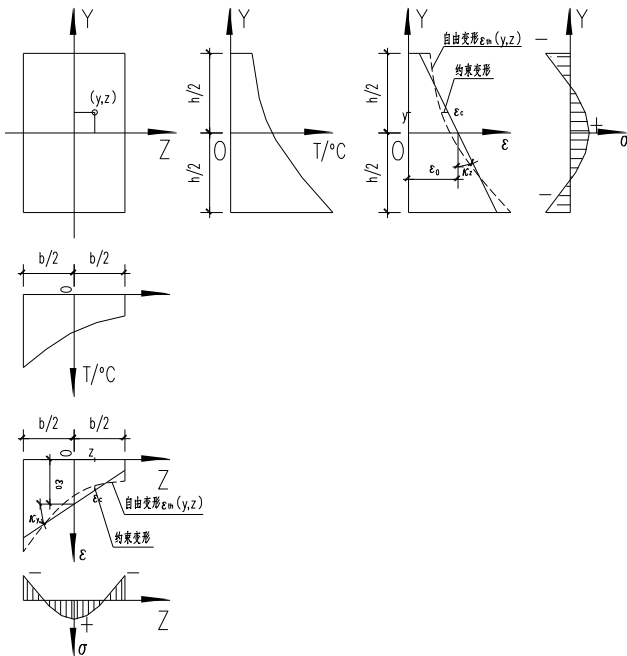


图 1 高温下截面受力分析

Fig.1 Mechanical analysis of concrete cross section under

high temperature

由截面力自平衡, 得

$$\begin{cases} \sum X = 0 & \int_{A_c} \sigma_c dA_c = 0 \\ \sum M_z = 0 & \int_{A_c} \sigma_c y dA_c = 0 \\ \sum M_y = 0 & \int_{A_c} \sigma_c z dA_c = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, σ_c 为截面任一点混凝土的应力; A_c 为混凝土截面面积。

将截面离散, 划分为若干矩形单元, 即可建立有限元模型。然后通过迭代计算得到在升温过程中混凝土构件在截面形心处的变形 ε_0 及曲率 $\kappa_z(\kappa_y)$, 进而由截面上轴力相等得到截面等效温度:

$$T' - T_0 = \varepsilon_0 / \alpha \quad (4)$$

其中, α 为混凝土的热膨胀系数。

由式(1)、式(4)可得

$$f = \varepsilon_{th} / \varepsilon_0 \quad (5)$$

其中, ε_{th} 为升温过程中构件表面的理论热膨胀应变。

当截面温度分布均匀时, $\varepsilon_{th} = \varepsilon_0$, 则

$$f = \varepsilon_{th} / \varepsilon_0 = 1 \quad (6a)$$

$$T' = T_0 + (T - T_0) / f = T \quad (6b)$$

此时等效温度即为构件表面温度。

1.3 计算条件及材料性能

1.3.1 热工性能

材料的热工性能主要有质量密度、导热系数、比热、截面换热系数及热膨胀系数。它们采用如下的表达式^[4~9]:

质量密度 $\rho_c / (\text{kg}/\text{m}^3)$

$$\rho_c = 2400 - 0.56T \quad (7)$$

导热系数 $\lambda_c / (\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}))$ (石灰石骨料)

$$\lambda_c = 1.6 - 0.16 \frac{T}{120} + 0.008 \left(\frac{T}{120} \right)^2 \quad (8)$$

$$20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C}$$

比热 $c_c / (\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$

$$c_c = 900 + 80 \frac{T}{120} - 4 \left(\frac{T}{120} \right)^2 \quad (9)$$

$$20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C}$$

截面换热系数 $\beta / (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}))$

$$\beta = 6.97 \quad (10)$$

热膨胀系数 $\alpha_c^T / (1/^\circ\text{C})$

$$\alpha_c^T = (0.008T + 6) \times 10^{-6} \quad (11)$$

1.3.2 高温强度及变形

高温下混凝土基本力学性能指标采用如下的

表达式^[9]:

$$f_c^T / \text{MPa} \quad f_c^T = \frac{f_c}{1 + 18 \left(\frac{T}{1000} \right)^{5.1}} \quad (12)$$

$$\varepsilon_p^T \quad \varepsilon_p^T = \left(1 + 5 \left(\frac{T}{1000} \right)^{1.7} \right) \cdot \varepsilon_p \quad (13)$$

$$E_0^T / \text{MPa} \quad E_0^T = \frac{f_c^T \cdot \varepsilon_p \cdot E_0}{f_c \cdot \varepsilon_p^T} \quad (14)$$

$$f_t^T / \text{MPa} \quad f_t^T = \left(1 - \frac{T}{1000} \right) f_t \quad (15)$$

其中, f_c 、 f_t 分别为常温下混凝土的轴心抗压强度和抗拉强度; E_0 为混凝土的初始弹性模量; ε_p 为常温下混凝土的抗压峰值应变。

对于高温下普通混凝土的单轴应力—应变全曲线, 文献[3]指出, 不同研究者给出的全曲线在经标准化后, 在 $x \leq 1.6$ 的范围内差别很小。这里采用文献[9]给出的应力—应变全曲线:

$$\begin{cases} y = 2.2x - 1.4x^2 + 0.2x^3 & x \leq 1 \\ y = \frac{x}{0.8(x-1)^2 + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (16)$$

式中, $y = \frac{\sigma}{f_c^T}$; $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p^T}$; σ, ε 分别为混凝土的应力和应变;

f_c^T, ε_p^T 分别为温度 T 时混凝土的棱柱体抗压强度和相应的峰值应变, 按式(12)和式(13)确定。

1.4 模型验证

计算获得的试件外表面和中心温度与试验结果^[3]的比较如图2所示。考虑到混凝土材料的离散

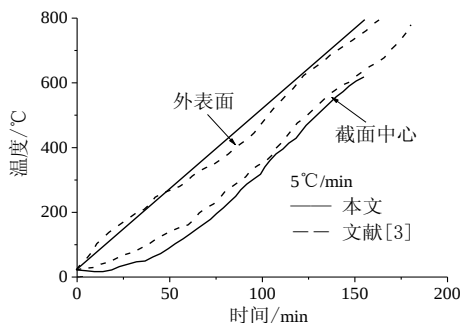


图2 试件外表面和中心温度的试验值与计算值比较

Fig.2 Comparison between experiment and calculation of temperature in furnace and center of cross section

性, 可认为上述模型计算温度分布是合理的。

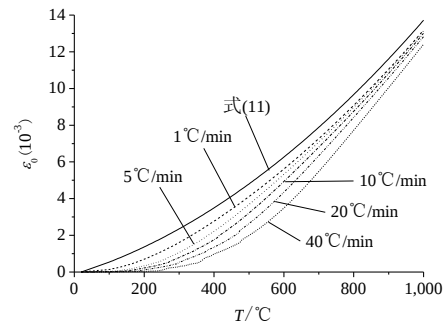


图3 不同升温速度下试件的应变值

Fig.3 Diagram of thermal strain for different velocities of heating

2 影响因素的分析

这里主要对影响混凝土构件截面不均匀温度应变的两个主要因素, 即升温速度及截面尺寸进行有限元计算分析。

2.1 升温速度

取升温速度为 1°C/min、5°C/min、10°C/min、20°C/min 和 40°C/min 五种情况来分析计算。图3是截面为 100mm×100mm 的计算模型在这五种不同升温速度下构件的轴向变形 ε_0 与构件表面的理论热膨胀应变值的比较, 图4为不同升温速度下轴向变形计算值和构件表面理论热膨胀应变计算值的差值 ε_c 随温度变化的曲线。可见升温速度越慢, 其值越小。将 $\varepsilon_c - T$ 曲线标准化后见图5。可看出, 温度较低时, 不均匀温度应变随温度的升高迅速增长。但当达到最大值后, 随温度的升高, 不均匀温度应变不仅逐渐下降, 而且不同升温速度下降的程度明显不同。升温速度越慢, 下降越平缓。

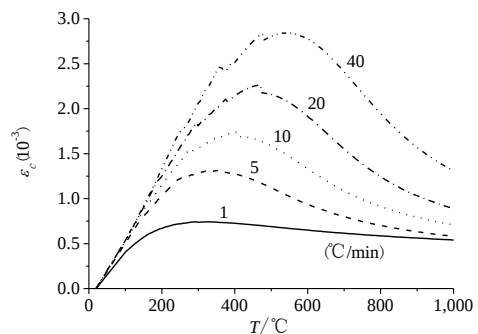


图4 应变随温度变化曲线

Fig.4 Curves of NTDS and temperature relationship

2.2 截面尺寸

取截面尺寸为 80mm×80mm、100mm×100mm、150mm×150mm 和 200mm×200mm 四种

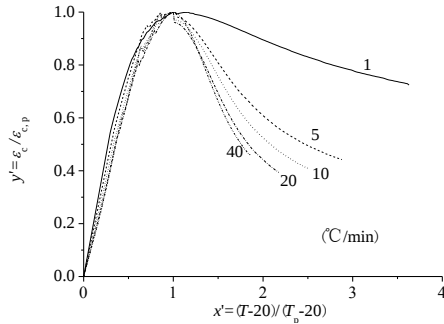


图5 标准化后的应变差曲线

Fig.5 Normalized curves of NTDS and temperature relationship

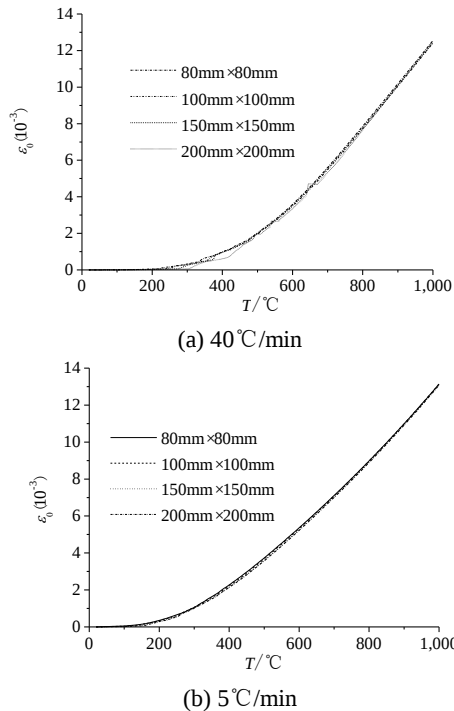


图6 截面尺寸对轴向变形的影响

Fig.6 Diagram of axial thermal strain for different cross section sizes

情况来分析计算。图 6(a)和图 6(b)是分别在 40 °C/min 和 5 °C/min 的升温速度下构件的轴向变形 ε_0 随温度变化曲线。由图 6 可见,不同截面尺寸下的自由膨胀变形——温度曲线尽管有一些变化,但变化非常小。这说明截面较小时,截面尺寸在升温速度不大于 40 °C/min 时对构件轴向变形的影响很小,可忽略。但在较大的升温速度下,随着截面尺寸增大,对构件轴向变形的影响将增大。这是因为,在高升温速率下,构件截面内外温差相差很大,但大部分温差集中在表层,内部温差很小。因此,对于此类截面,可采用平均温度法,取表层范围内温度为线性变化,中部的温度为一常值,然后按温度分布图

体积相等来推导出平均温度作为等效温度。

3 等效温度的确定

3.1 应变差的计算

综上计算分析可知,对于普通混凝土,在升温速度不快的 40 °C/min 且截面尺寸不大时,影响混凝土自由膨胀变形的主要因素是升温速度,截面尺寸及混凝土强度等级对自由膨胀变形的影响可忽略。故计算轴向变形计算值和构件表面理论热膨胀应变计算值的差值 ε_c 时可只考虑升温速度的影响。由图 5 可见, ε_c 随温度变化的曲线形状与混凝土单轴受压应力应变曲线相似。因此采用与混凝土单轴受压应力应变曲线相似的形状^[10], 即

$$\begin{cases} y' = ax' + (3-2a)x'^2 + (a-2)x'^3 & x' \leq 1 \\ y' = \frac{x'}{b(x'-1)^2 + x'} & x' > 1 \end{cases} \quad (17)$$

其中, $x' = \frac{T-20}{T_p-20}$; $y' = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c,p}}$; ε_c 、 T 分别为轴向变形计算值和构件表面理论热膨胀应变计算值的差值和环境温度; $\varepsilon_{c,p}$ 、 T_p 分别为峰值应变差和其对应的温度; a 、 b 均为表征曲线形状的系数。这些参数都与升温速度 $\dot{T}$ 有关。通过回归分析,可得各个参数的表达式为

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c,p} &= (0.11 + 0.72 \ln(\dot{T} + 0.86)) \times 10^{-3} \\ T_p &= 210 + 92 \ln(\dot{T} + 0.023) \\ a &= 1.8 \\ b &= \ln(0.72 + 0.5\dot{T}) \end{aligned} \quad (18)$$

按上述式子计算的应变差 ε_c 与有限元分析计算结果的比较见图 7。可见两者符合得较好。

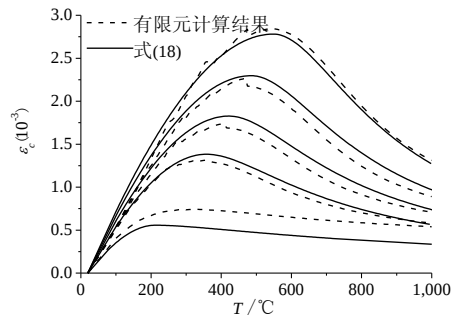


图7 应变差计算公式验证

Fig.7 Curves of calculated NTDS and temperature relationship

3.2 等效温度的确定

综上并结合式(5)可得

$$f(T, \dot{T}) = \frac{\varepsilon_{th}}{\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_0(T, \dot{T}) + \varepsilon_c(T, \dot{T})}{\varepsilon_0(T, \dot{T})} = 1 + \frac{\varepsilon_c(T, \dot{T})}{\varepsilon_0(T, \dot{T})} \quad (19)$$

代入式(1)并经过大量的计算数据回归分析可得指标温度 T' 的简化表达式:

$$T' = T_0 + (k - T_0) \cdot m^n \quad T \leq 1000^\circ\text{C} \quad (20)$$

其中, $k = 1000 - 22\dot{T}^{0.38}$, $n = 1 + 0.02\dot{T}$; $m = \frac{T - T_0}{1000 - T_0}$; $\dot{T}$ 为升温速度; T 为环境温度; T_0 为

初始环境温度。

当升温速度 $\dot{T} = 0$ 时, $T' = T$ 。

3.3 试验验证

图 8(a)为文献[3]在不同升温速度下构件自由膨胀变形的试验结果。当炉温用等效温度(式(20))表示时,两条曲线如图 8(b)所示,它们几乎重合。可见,用式(20)确定的等效温度来描述自由膨胀变形,可以忽略构件截面内温度分布不均匀的影响。

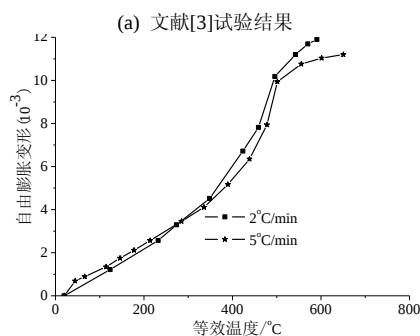
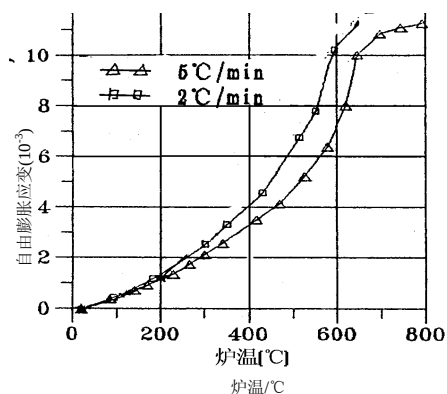


图 8 自由膨胀变形曲线

Fig.8 Curve of free thermal expansion stain

3.4 任意升温曲线等效温度的确定

现假设一构件遭受如下的火灾作用

$$T = g(t) \quad ^\circ\text{C} \quad (21)$$

其中 t 为时间, 单位为 min。于是任意时刻的升温

速度 $\dot{T}$

$$\dot{T} = \frac{dT}{dt} = g'(t) \quad (22)$$

将升温曲线按时间段 Δt 进行离散, 在 Δt 时间内, $\dot{T}$ 为一常数, 代入式(20)即可得到任意时刻的等效温度 T' 。

有了等效温度, 则构件的轴向变形 ε_0 即可按下式计算:

$$\varepsilon_0 = \alpha T' \quad (23)$$

其中, α 为混凝土的热膨胀系数。

4 结论

在试验结果验证的基础上, 通过对高温下混凝土不均匀温度分布引起的力学问题的分析计算, 可得出如下主要结论:

(1) 对于普通混凝土来说, 当截面尺寸不大时, 升温速度是影响混凝土产生温度变形差的主要因素。

(2) 文中给出的等效温度反映了混凝土不均匀受热变形的特性, 使复杂问题简单化, 便于用来分析不均匀温度场引起的力学问题。

参考文献:

- [1] Khoury G A. Strain of concrete during first heating from 600°C under load [J]. Magazine of Concrete Research. Dec., 1985, (133): 195~215.
- [2] Shi Xudong, Tan TH, Tan KH, Guo Zhenhai. Concrete constitutive relationships under different stress-temperature paths [J]. J. Struct. Eng., ASCE. Dec., 2002, (128): 1511~1518.
- [3] 南建林. 温度-应力耦合作用下混凝土力学性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1994.
Nan Jianlin. Experimental investigation of the mechanical behaviors of concrete considering temperature-stress coupling [D]. Beijing: Tsinghua University, 1994. (in Chinese)
- [4] 路春森, 屈立军. 建筑结构耐火设计[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.
Lu Chunsen, Qu Lijun. Fire resistant design of building structure [M]. Beijing: China Building Material Press, 1995. (in Chinese)
- [5] ENV 1992-1-2: 1996 Eurocode 2: design of concrete structures-part1.2: general rules- Structural fire design [S]. European Committee for Standardization (CEN), 1996.

(参考文献[6]~[10]转第 171 页)