

# 钢筋混凝土剪力墙受火性能非线性分析

刘桂荣<sup>\*1,2</sup>, 宋玉普<sup>1</sup>, 曲福来<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024; 2. 华北水利水电学院 土木与交通学院, 郑州 450011)

**摘要:**为了研究钢筋混凝土剪力墙的抗火性能, 本文基于纤维元模型, 提出了一种非线性分析方法。该方法无需计算截面的弯矩-曲率曲线族, 计算过程中采用了高温下耦合的混凝土本构关系, 其中考虑了混凝土高温热膨胀应变、瞬态热应变和徐变。编制了相应的非线性计算分析程序, 程序考虑了轴力二阶效应的影响, 计算得到了剪力墙跨中平面外挠度以及火灾下其跨中截面的各个应变分量和应力分布。为验证计算模型的合理性, 进行了普通混凝土剪力墙火灾试验研究。通过计算平面外挠度与试验值的对比验证了本文计算方法的合理性, 根据截面应力、应变的计算值解释了试验中裂缝出现的原因。

**关键词:**混凝土; 剪力墙; 火灾反应; 耦合本构; 非线性分析

**中图分类号:** TU318      **文献标志码:** A

## 1 引言

火灾作用下钢筋混凝土构件材料性能退化, 导致其承载力降低或变形过大而发生破坏, 故混凝土构件的抗火性能引起了人们的关注。国内外很多学者对高温下混凝土构件的力学性能进行了大量的试验研究<sup>[1-4]</sup>, 但由于火灾试验难度较大, 且对不同工况进行火灾试验既不现实也不经济。因此, 很多研究者致力于发展数值模拟方法来研究钢筋混凝土构件的抗火性能。文献[5, 6]利用有限元方法分析了钢筋混凝土梁、柱的耐火极限及其火灾下的变形规律。计算结果与试验结果符合较好, 但是计算量较大。文献[7]利用纤维模型法对火灾下钢筋混凝土梁的抗火性能进行了非线性分析计算: 将混凝土梁沿长度方向离散为若干小段, 沿横截面离散为多个单元, 通过力的平衡条件计算得到截面的弯矩-曲率关系, 然后利用变刚度有限元方法, 得到了梁的跨中挠度随时间变化规律, 但该方法需计算不同温度场下截面的弯矩-曲率曲线族。

针对上述情况, 本文基于纤维元模型对混凝土剪力墙的火灾反应进行了非线性分析。该方法不

需要计算弯矩-曲率曲线族, 计算效率较高。计算过程中考虑了温度和应力的耦合作用, 通过编制程序计算得到了火灾下剪力墙的变形规律及其截面的应力、应变分布, 与试验值的比较发现计算精度可以满足工程要求。

## 2 热分析

为计算火灾下混凝土剪力墙的力学反应, 首先需要确定剪力墙的温度场。研究表明, 温度场不受结构内力和变形的影响, 可以先于力学性能分析独立进行。

本文采用有限元分析软件, 对单面受火钢筋混凝土剪力墙温度场进行了分析计算。计算过程中假设剪力墙温度场沿其高度方向分布相同, 沿其截面方向分布不同。由于钢筋对温度场的影响较小, 因而不考虑其对温度场的影响, 将截面当成均匀材料处理。本文按照文献[9]给出的相关公式取值。研究发现: 已有文献中混凝土热工参数的取值对温度场的计算结果影响不大<sup>[8]</sup>。

## 3 力学分析

### 3.1 计算基本假定

(1) 在任一温度场下, 平截面假定仍然成立, 即试件变形后的截面仍然保持为平面, 总应变为线性分布。

收稿日期: 2009-10-09; 修改稿收到日期: 2009-12-04.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(200801410005);  
华北水利水电学院高层次人才科研启动(201070)  
资助项目.

作者简介: 刘桂荣\*(1979-), 女, 博士, 讲师  
(E-mail: liuguirong2005@163.com);  
宋玉普(1944-), 男, 教授, 博士生导师.

(2) 钢筋和混凝土无粘结滑移,即同一位置的钢筋与混凝土的应变相等。

(3) 忽略高温下钢筋徐变。

(4) 火灾下剪力墙挠曲线为正弦半波曲线。

### 3.2 材料的高温本构关系

#### 3.2.1 混凝土的应变分量

高温下混凝土总应变  $\epsilon_{tot,c}$  主要由四部分组成:自由热膨胀应变  $\epsilon_{th,c}$ , 高温徐变  $\epsilon_{cr,c}$ , 瞬态热应变  $\epsilon_{tr,c}$  及应力引起的应变  $\epsilon_{\sigma,c}$ 。由此,得到应力引起的应变:

$$\epsilon_{\sigma,c} = \epsilon_{tot,c} - \epsilon_{th,c} - \epsilon_{cr,c} - \epsilon_{tr,c} \quad (1)$$

式中应力以拉为正,压为负,应变以伸长为正,缩短为负。

混凝土自由热膨胀应变  $\epsilon_{th,c}$  为当前温度的函数,采用文献[9]的计算公式:

$$\epsilon_{th,c} = 28 \left[ \frac{T}{1000} \right]^2 \times 10^{-3} \leq 12 \times 10^{-3} \quad (2)$$

混凝土高温徐变  $\epsilon_{cr,c}$  是当前时刻应力和温度的函数,按照下式计算[9]:

$$\epsilon_{cr,c} = \frac{\sigma_c}{f_c^T} \sqrt{\frac{t}{t_0}} \left( \epsilon_{1000}^{\frac{6T}{1000}} - 1 \right) \times 60 \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中  $\sigma_c$  为当前时刻混凝土应力,  $f_c^T$  为温度  $T$  时混凝土棱柱体抗压强度,  $t_0$  取 120 min。

混凝土瞬态热应变  $\epsilon_{tr,c}$  与当前时刻温度和混凝土应力有关,按照 Anderberg 和 Thelandersson 模型计算[10]。

$$\epsilon_{tr,c} = K_{tr} \left[ \frac{\sigma_c}{f_c} \right] \epsilon_{th,c}, T \leq 550 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4a)$$

$$\frac{\partial \epsilon_{tr,c}}{\partial T} = 0.0001 \left[ \frac{\sigma_c}{f_c} \right], T > 550 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4b)$$

式中  $K_{tr}$  为一常数,且  $1.8 \leq K_{tr} \leq 2.35$ ,  $f_c$  为常温下混凝土棱柱体抗压强度。当混凝土纵向受拉时,假设混凝土徐变和瞬态热应变都为零。

#### 3.2.2 混凝土的应力-应变关系

高温下混凝土的受压应力-应变关系按下式计算[9]:

$$\begin{cases} y = \frac{\sigma_c}{f_c^T} = 2.2x - 1.4x^2 + 0.2x^3, x = \frac{\epsilon}{\epsilon_p^T} \leq 1 \\ y = \frac{\sigma_c}{f_c^T} = \frac{x}{0.8(x-1)^2 + x}, x = \frac{\epsilon}{\epsilon_p^T} > 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $f_c^T$  和  $\epsilon_p^T$  为混凝土高温下的峰值应力及应变,

按文献[9]建议取值。

对高温下混凝土的劈拉试验研究发现:高温下混凝土存在应变软化现象。因此,混凝土受拉应力-应变关系按照文献[11]建议计算:

$$\begin{cases} \sigma_t = E_c^T \epsilon, 0 < \epsilon < \epsilon_{p,t}^T \\ \sigma_t = f_t^T \frac{(\epsilon_{u,t}^T - \epsilon)}{(\epsilon_{u,t}^T - \epsilon_{p,t}^T)}, \epsilon_{p,t}^T < \epsilon < \epsilon_{u,t}^T \\ \sigma_t = 0, \epsilon > \epsilon_{u,t}^T \end{cases} \quad (6)$$

式中  $E_c^T$  为高温下混凝土初始切线弹性模量,  $\epsilon_{p,t}^T = f_t^T / E_c^T$  为混凝土高温受拉峰值应变,其中  $f_t^T = 0.1 f_c^T$ ,  $\epsilon_{u,t}^T$  为高温受拉极限应变,假设与温度无关[12],一般为  $0.002 \sim 0.004$ ,本文取  $0.003$ 。

#### 3.2.3 钢筋的应变分量

钢筋高温下总应变  $\epsilon_{tot,s}$  主要由两部分组成:钢筋热膨胀应变  $\epsilon_{th,s}$  及应力引起的应变  $\epsilon_{\sigma,s}$ 。所以,钢筋高温下应力引起的应变为

$$\epsilon_{\sigma,s} = \epsilon_{tot,s} - \epsilon_{th,s} \quad (7)$$

式中  $\epsilon_{th,s}$  按文献[9]计算。

#### 3.2.4 钢筋的应力-应变关系

高温下钢筋的应力-应变关系分两种情况计算,当  $T < 200 \text{ } ^\circ\text{C}$  时,采用常温下的理想弹塑性本构模型;  $T \geq 200 \text{ } ^\circ\text{C}$  时,采用强化弹塑性本构模型,按照下式计算[9]:

$$\begin{cases} \sigma_s = E_s^T \epsilon, \epsilon \leq \epsilon_y^T \\ \sigma_s = f_y^T + (f_u^T - f_y^T) \eta, \epsilon_y^T < \epsilon \leq \epsilon_u^T \end{cases} \quad (8)$$

式中  $E_s^T$ ,  $f_y^T$ ,  $\epsilon_y^T$ ,  $f_u^T$  和  $\epsilon_u^T$  分别为钢筋高温下的弹性模量、屈服应力、屈服应变、极限应力和极限应变,按照文献[9]的公式计算,系数  $\eta = (1.5\xi - 0.5\xi^3)^{0.62}$ , 其中  $\xi = (\epsilon - \epsilon_y^T) / (\epsilon_u^T - \epsilon_y^T)$ 。

### 3.3 理论模型与分析方法

#### 3.3.1 划分单元

取剪力墙跨中截面,将其划分为如图 1 所示的条带。并假设单元中心处的温度、应变、应力代表此单元相应的温度、应变和应力。

#### 3.3.2 求截面应变分布

假设  $t$  时刻跨中截面曲率为  $\varphi_m^t$ , 截面最外边缘混凝土压应变为  $\varphi_m^T$ , 根据平截面假定可以得到混凝土和钢筋单元的总应变分别为

$$\epsilon_{tot,c}^t = \epsilon_c^t + \varphi_m^t y_i, \epsilon_{tot,s}^t = \epsilon_s^t + \varphi_m^t y_j \quad (9a, 9b)$$

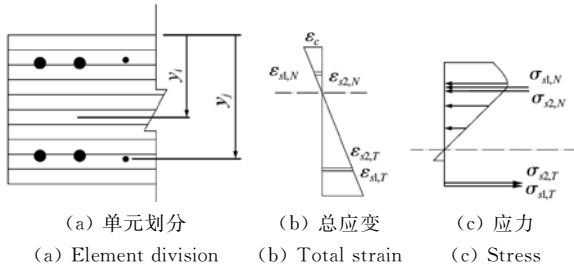


图 1 截面应变、应力分布

Fig. 1 Strain and stress distribution in cross section

由式(1,7) 分别得到当前时刻下混凝土及钢筋由应力引起的应变  $\epsilon'_{\sigma,c}$  和  $\epsilon'_{\sigma,s}$ 。

### 3.3.3 求解单元应力

得到混凝土单元和钢筋单元的应力引起的应变后,根据混凝土和钢筋高温应力 - 应变关系,计算得到混凝土单元和钢筋单元应力(由荷载作用而引起)。

由于  $\epsilon_{tr,c}$  及  $\epsilon_{cr,c}$  不仅与当前时刻温度有关,还与应力相关。因此,具体计算时,混凝土应力的求解是一个不断迭代循环的过程:

(1) 用前一时刻的应力值  $\sigma_c^{t-\Delta t}$  和当前时刻温度求出当前时刻瞬态热应变  $\epsilon'_{tr,c}$  和徐变  $\epsilon'_{cr,c}$ 。

(2) 由式(1) 计算得到应力引起的应变,根据式(5,6) 计算得到混凝土的应力。

(3) 比较得到的应力值与假设应力值是否接近,若相差较大,则不断重复迭代计算,直到假设应力与得到的应力在误差允许范围之内。

### 3.3.4 判断截面轴力平衡

利用平衡条件得到  $t$  时刻截面轴力为

$$N_{in}^t = \sum_{i=1}^n \sigma'_{c,i} A_{c,i} y_{c,i} + \sum_{j=1}^m \sigma'_{s,j} A_{s,j} y_{s,j} \quad (10)$$

截面内力与外力之差为

$$\Delta N^t = N_{in}^t - N \quad (11)$$

式中  $N$  为施加外力,若  $\Delta N$  在误差允许范围之内,则满足轴力的平衡条件。

### 3.3.5 求跨中平面外挠度

根据计算基本假定(4) 得到  $t$  时刻剪力墙跨中平面外挠度为

$$\delta_m^t = (l/\pi)^2 \phi_m^t \quad (12)$$

式中  $l$  为剪力墙计算高度。

### 3.3.6 判断截面弯矩平衡

利用平衡条件得到  $t$  时刻截面弯矩:

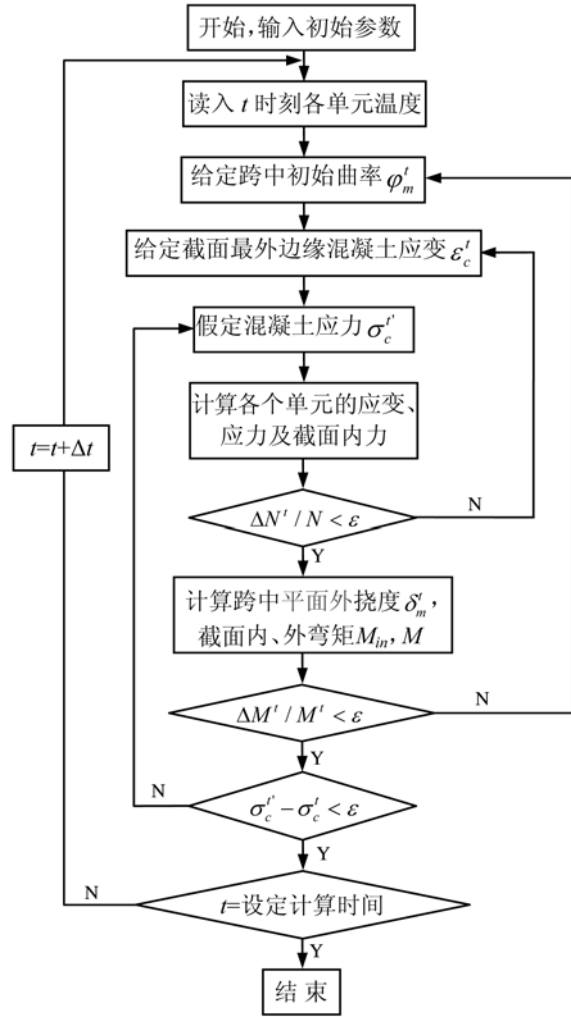


图 2 程序流程图

Fig. 2 Program flow chart

$$M_{in}^t = \sum_{i=1}^n \sigma'_{c,i} A_{c,i} y_{c,i} + \sum_{j=1}^m \sigma'_{s,j} A_{s,j} y_{s,j} \quad (13)$$

截面内弯矩与外弯矩之差为

$$\Delta M^t = M_{in}^t - M^t \quad (14)$$

式中  $M^t$  为外力弯矩,以使截面产生逆时针转动为正,顺时针转动为负。 $M^t = N(e + \delta_m^t)$ ,  $e$  为荷载初始偏心距。若  $\Delta M^t$  在误差允许范围之内,则满足弯矩的平衡条件。

按照以上分析方法,以跨中截面曲率和混凝土边缘压应变为基本变量,建立截面内力平衡方程,通过求解平衡方程,可以得到跨中截面平面外挠度以及应力、应变分布,计算流程如图 2 所示。

## 4 试验验证

为验证本文提出的计算模型的合理性,对普通混凝土剪力墙进行了单面受火火灾试验研究。剪力墙受火 90 min 后自然冷却,火灾试验过程中,承受

200 kN 轴压荷载。剪力墙截面尺寸为 1200 mm × 700 mm，墙厚为 100 mm，墙板内配有  $\phi 6.5$  mm@150 mm 的双层双向钢筋网，墙肢两端设置有 100 mm 宽的暗柱，暗柱内配有 4 $\phi 6$  纵向钢筋及  $\phi 6.5$  mm@100 mm 箍筋，钢筋保护层厚度为 15 mm。实测材料力学性能如下：混凝土常温下立方体抗压强度为 48.6 MPa， $\phi 6.5$  及  $\phi 16$  钢筋屈服强度分别为 360 MPa 和 377 MPa，极限强度分别为 503 MPa 和 579 MPa。

利用有限元分析软件对剪力墙火灾下温度场进行了模拟计算，计算结果如图 3 所示。温度场计算完成后，将剪力墙不同节点的温度值读到一个数据文件，以供力学分析时调用。

本文利用 Visual-Basic 编写了钢筋混凝土剪力墙火灾下非线性反应的程序，得到了混凝土剪力墙在升温时跨中平面外挠度随时间变化规律曲线，与试验结果进行了比较，如图 4 所示。由图 4 可知，在升温 30 min 以内，试验值与计算值差别较大，可能是没有考虑试件初始含水率的缘故<sup>[13]</sup>。30 min 以后，试验值与计算值差别逐渐减小，70 min 以后二者符合很好(误差在 10% 以内)。

图 5 为熄火时剪力墙跨中截面混凝土各应变分量计算值。由于迎火面混凝土温度远大于背火

面，因而迎火面混凝土各个应变分量的数值都远大于背火面的。

无论是迎火面，还是背火面，混凝土自由热膨胀应变值( $\epsilon_{th,c}$ )和瞬态热应变值( $\epsilon_{tr,c}$ )最大，其次是应力引起的应变值( $\epsilon_{\sigma,c}$ )，徐应变值( $\epsilon_{cr,c}$ )最小。但是，迎火面和背火面各应变分量值的相对大小不同：迎火面热膨胀应变值是其应力产生应变值的 10 倍，瞬态热应变值是它的 3 倍，而徐应变值为它的 60%；背火面热膨胀应变值和瞬态热应变值是其应力产生应变值的 1.5 倍，而徐应变值仅有它的 7%。

应力引起的应变( $\epsilon_{\sigma,c}$ )从迎火面至背火面出现了压-拉-压的反复变化。因此，迎火面和背火面均受压应力，且背火面压力值远大于迎火面，在中间一段区域的混凝土受拉应力，但拉应力很小。截面应力分布如图 6 所示。

通过程序计算得到了剪力墙截面各点应变及应力值，从而可以有效地解释火灾试验中出现的裂缝。迎火面：高温导致迎火面产生了很大的热膨胀应变及压应变，但是由于迎火面材料性质的恶化，压应力值并不大，从而出现了许多由于温度作用而产生的细小龟裂缝。背火面：与迎火面相比较，虽然背火面压应变较小，但由于温度较低，材料强度降低有限，背火面纵向产生了很大的压应力，因而其横向出现了由于拉应力而产生的裂缝。

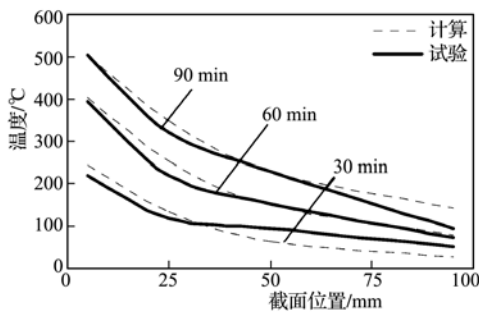


图 3 温度场计算值与试验值比较  
Fig. 3 Calculated and measured temperature field

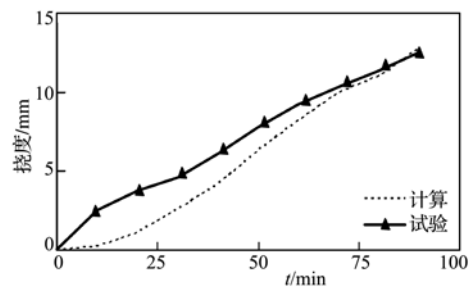


图 4 计算与试验平面外挠度对比  
Fig. 4 Calculated and measured deflection

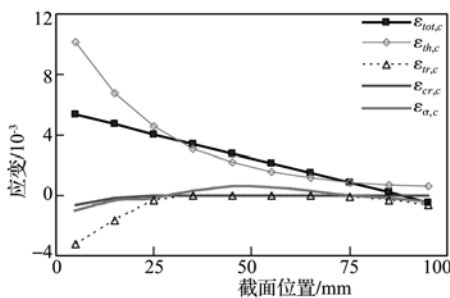


图 5 截面应变分布图  
Fig. 5 Strain distribution

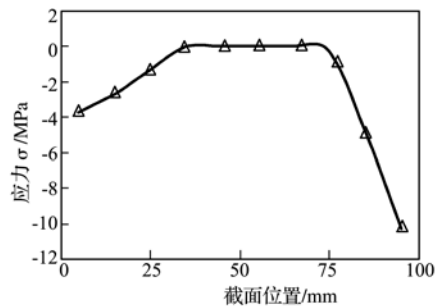
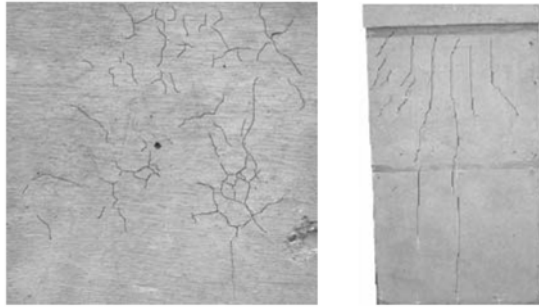


图 6 截面应力分布图  
Fig. 6 Stress distribution



(a) 迎火面局部 (b) 背火面  
(a) Part of fire-exposed side (b) Fire-unexposed side

图7 裂缝图

Fig. 7 Cracks description

## 5 结 论

(1) 基于纤维元模型,并考虑材料的温度-应力耦合本构关系,对钢筋混凝土剪力墙进行了非线性分析。计算了剪力墙跨中平面外挠度随火烧时间的变化曲线,与试验结果的对比发现:试验前期误差较大,试验后期符合较好。

(2) 对于轴压状态下,单面受火混凝土剪力墙,迎火面与背火面混凝土的应变差别很大:迎火面混凝土各个应变分量值都远大于背火面的应变值。

(3) 与常温下剪力墙截面拉压应力连续分布不同,高温下承受轴压荷载的钢筋混凝土剪力墙截面应力分布出现了拉压应力的反复变化。

(4) 程序计算得到了单面受火混凝土剪力墙截面应变、应力分布,合理地解释了迎火面及背火面裂缝出现的原因:迎火面出现的主要是温度裂缝,而背火面出现的主要是拉应力形成的裂缝。

## 参考文献(References):

- [1] 陆洲导,朱伯龙,周跃华. 钢筋混凝土简支梁对火灾反应的试验研究[J]. 土木工程学报,1993,33(6):6-16. (LU Zhou-dao, ZHU Bo-long, ZHOU Yue-hua. Experimental study on fire response of simple supported reinforced concrete beams[J]. *China Civil Engineering Journal*,1993,33(6):6-16. (in Chinese))
- [2] Ellingwood B, Lin T D. Flexure and shear behavior of concrete beams during fires[J]. *Journal of Structural Engineering*,1991,117(2):440-458.
- [3] 苏南,林桐柱, LIE T T. 钢筋混凝土柱的抗火性能[J]. 土木工程学报,1992,25(6):25-36. (SU Nan, LIN T D, LIE T T. Fire resistance of reinforced concrete columns[J]. *China Civil Engineering Journal*,1992,25(6):25-36. (in Chinese))
- [4] Kodur V, Mcgrath R. Fire endurance of high strength concrete columns [J]. *Fire Technology*,2003,39(1):73-87.
- [5] 陈适才,陆新征,任爱珠,等. 火灾下混凝土结构破坏模拟的纤维梁单元模型[J]. 计算力学学报,2009,26(1):72-79. (CHEN Shi-cai, LU Xin-zheng, REN Ai-zhu, et al. Firer beam element model for the collapse simulation of concrete structures under fire[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*,2009,26(1):72-79. (in Chinese))
- [6] Zha X X. Three-dimensional non-linear analysis of reinforced concrete members in fire [J]. *Building and Environment*,2003,38(2):297-307.
- [7] Kodur V K R, Dwaikat M. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams[J]. *Cement and Concrete Composites*,2008,30(5):431-443.
- [8] 刘永军. 钢筋混凝土结构火灾反应数值模拟及软件开发[D]. 大连:大连理工大学,2002. (LIU Yong-jun. Modeling and programming of reinforced concrete structures exposed to fires[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2002. (in Chinese))
- [9] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京:清华大学出版社,2003. (GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. *Behavior of Reinforced Concrete at Elevated Temperature and its Calculation*[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2003. (in Chinese))
- [10] Li L Y, Purkiss J. Stress-strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures [J]. *Fire Safety Journal*,2005,40(7):669-686.
- [11] Terro M J. Numerical modeling of the behavior of concrete structures in fire[J]. *ACI Structural Journal*,1998,95(2):183-193.
- [12] Gedling J S, Mistry N S, Welch A K. Evaluation of material models for reinforced concrete structures [J]. *Computers and Structures*,1986,24(2):225-232.
- [13] Sebastjan B, Miran S, Igor P. The effects of different strain contributions on the response of RC beams in fire[J]. *Engineering Structures*,2007,29(3):418-430.

## Non-linear analysis for predicting fire performance of reinforced concrete shear walls

LIU Gui-rong<sup>\*1,2</sup>, SONG Yu-pu<sup>1</sup>, QU Fu-lai<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** A nonlinear analysis method is presented based on the fiber element model to simulate the response of reinforced concrete (RC) shear walls under fire conditions. This method does not require computations of moment-curvature curve group. A coupling constitutive relation of concrete at elevated temperature is adopted in this analysis, in which the effects of concrete thermal, creep and transient strain are taken into account. Then a corresponding computer program considering the second-order effect of axial forces is developed. The mid-span deflection of the (RC) shear wall as well as the strain and stress distribution of the mid-span section is calculated by this program. Fire test of RC shear walls has been carried out to verify the proposed numerical model. And its validity is established by comparing the calculated deflections with the measured values. In addition, the appearance of cracks during the fire test is reasonably explained by the predictions of the strain and stress on the cross section.

**Key words:** concrete; shear wall; fire behavior; coupling constitutive relation; nonlinear analysis

~~~~~  
(上接第 634 页)

## Numerical simulation of mechanical behaviour of wood under complex stress

CHEN Zhi-yong, ZHU En-chun<sup>\*</sup>, PAN Jing-long

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** A constitutive model of wood suitable for FE modeling of the structures was developed. In the model, wood is orthotropically elastic with different strengths in compression and tension; wood exhibits brittle failure under tension or shear, but yields under compression. The orthotropic symmetry theory was employed to express the relationship between elastic stress and strain. Yamada-Sun criterion was used to judge yield of wood in compression and strain-softening of wood in tension and shear. The strain-softening model of wood was established by introducing the damage factor and the elastic strain energy. The flow rule was derived by yield function according to plastic consistency condition. The strain hardening and the secondary strain hardening of compression perpendicular to grain were modeled by controlling the transition of yield surface from initial yield surface to ultimate yield surface. A user-defined subroutine VUMAT was encoded to include the material constitutive model of wood into ABAQUS, and two FE models were developed to simulate the behaviour of wood in compression and tension, including tension and compression at angle to grain. The constitutive relationship and the FE model were validated by comparison of the numerical results with experimental results and Hankinson strength theory of wood.

**Key words:** wood; orthotropy; constitutive relationship; numerical simulation