

# 火灾下钢筋混凝土墙计算模型及影响因素分析

郑永乾<sup>1</sup>, 蔡雪峰<sup>1, 2</sup>

(1. 福建工程学院 土木工程系, 福州 350108; 2. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108)

**摘要:**采用有限元软件 ABAQUS 对火灾下钢筋混凝土墙的变形全过程进行了计算, 计算结果与以往实验结果吻合较好。在此基础上, 系统分析了轴压比、侧向荷载比、高厚比、墙厚度、混凝土抗压强度、钢筋屈服强度、配筋率和混凝土保护层厚度对钢筋混凝土墙变形和耐火极限的影响规律。研究表明, 受火过程中, 钢筋混凝土墙在无侧向荷载且轴压比或墙厚度较大、高厚比较小等情况下容易发生反向挠度现象, 在工程常用参数范围内, 墙耐火极限随着轴压比、侧向荷载比、高厚比、钢筋屈服强度或配筋率的增加而减小, 随着墙厚度或混凝土强度的增加而增加。

**关键词:**钢筋混凝土; 墙; 计算模型; 影响因素; 有限元

**中图分类号:** TU352.5    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2011)01-0024-07

## Computational Model and Influencing Factor Analysis of Reinforced Concrete Walls under Fire

ZHENG Yong-qian<sup>1</sup>, CAI Xue-feng<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, P. R. China;  
2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China)

**Abstract:** The finite element software ABAQUS is used to calculate the deformation of reinforced concrete walls under fire. The calculated results agree well with previous experimental results. Based on the finite element model, the influences of such parameters as axial load level, lateral load level, height-to-thickness ratio, wall thickness, concrete compressive strength, steel reinforcement yield strength, steel reinforcement ratio and concrete protection thickness on deformation and fire resistance of walls are analyzed systematically. It is found that, under the conditions of big axial load level or wall thickness without lateral load and small height-to-thickness ratio, the reverse deflection of reinforced concrete walls in fire is apt to occur. Within the work range of parameters in common use, the fire resistance of walls decreases with the increase of axial load level, lateral load level, height-to-thickness ratio, steel reinforcement yield strength or steel reinforcement ratio, and increases with the increase of wall thickness or concrete compressive strength.

**Key words:** reinforced concrete; walls; computational model; influencing factors; finite element

钢筋混凝土墙具有刚度大、抗震性能好等优点, 在高层民用建筑中的应用日益广泛, 而该类构件的火灾情况也时有发生<sup>[1]</sup>, 因此深入研究其耐火性能

并进行合理的抗火设计非常重要。以往已有一些学者对钢筋混凝土墙的高温力学性能进行研究, 例如 Crozier 和 Sanjayan<sup>[2]</sup>、Ongah 等<sup>[3]</sup>、任红梅<sup>[4]</sup>、肖建

**收稿日期:** 2010-05-09

**基金项目:** 福建省高校服务海西建设重点项目(闽教高[2009]8号); 福建省教育厅科技项目(JA08172); 福建工程学院  
预研基金项目(GY-Z09071)

**作者简介:** 郑永乾(1979-), 男, 博士, 主要从事建筑结构抗火研究, (E-mail) yongqianzheng@163.com。

庄等<sup>[5]</sup>。这些研究中含有珍贵的实验资料,但在理论方面,多数未考虑钢材高温蠕变、混凝土瞬态热应变等的影响,计算模型的可靠性未能得到充分的验证。目前有关钢筋混凝土墙耐火极限的设计规范有:欧洲规范 Eurocode 2、英国规范 BS 8110-2、美国混凝土学会标准 ACI 216R-89、澳大利亚规范 AS 3600-2001、挪威规范 NS 3473E-1992、新西兰规范 NZS 3101、中国防火规范 GB 50045-95 和 GB 50016-2006,他们的防火设计方法主要是基于耐火极限设计表格或曲线,其适用的参数范围和条件比较有限<sup>[1]</sup>。

拟采用 ABAQUS 软件建立火灾下钢筋混凝土墙力学性能分析的有限元模型,并将计算结果与以往实验结果进行对比,验证有限元模型的正确性。在此基础上,分析轴压比、侧向荷载比、墙高厚比、墙厚度、混凝土抗压强度、钢材屈服强度、配筋率和混凝土保护层厚度对钢筋混凝土墙高温性能的影响规律,从而为进一步探讨科学合理的设计方法创造条件。

## 1 计算模型

### 1.1 有限元分析模型

采用顺序热力耦合方法,即先进行纯热分析获得温度场,然后引入温度场的结果进行结构分析,因此建立的三维温度分析模型和结构分析模型必须一致。钢筋和混凝土热工参数均根据 Lie 和 Denham<sup>[6]</sup>提供的表达式确定,同时考虑了水蒸汽对混凝土热工参数的影响<sup>[7]</sup>。混凝土采用实体单元 DCC3D8D 模拟,分布筋采用杆单元 DCC1D2D 模拟。钢筋混凝土墙一般为单面受火,受火面同时存在对流和辐射 2 种换热,对流换热系数取  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ <sup>[8]</sup>,综合辐射系数取  $0.7$ <sup>[9-10]</sup>;背火面的对流换热系数取  $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ <sup>[8]</sup>,综合辐射系数取  $0.9$ <sup>[7]</sup>。火焰温度按照国际标准 ISO-834<sup>[11]</sup>进行升温。墙体各个节点初始温度为  $20^\circ\text{C}$ ,计算时假设钢筋与混凝土之间完全传热,采用约束方程 Equation 定义相应节点温度相同,也可采用 Surface-to-surface 定义接触。

在温度和应力共同作用下钢筋的总应变( $\epsilon_s$ )组成部分为<sup>[12]</sup>:

$$\epsilon_s = \epsilon_{\sigma} + \epsilon_{\text{sth}} + \epsilon_{\text{scr}} \quad (1)$$

其中, $\epsilon_{\sigma}$ 为应力作用产生的应变,通过高温下钢筋的应力-应变关系确定,采用 Lie 和 Denham<sup>[6]</sup>提供的模型,该模型已被不少研究者采用并取得良好效果<sup>[13-15]</sup>,Han 等<sup>[13]</sup>给出了不同温度下钢筋的应力

一应变关系曲线; $\epsilon_{\text{sth}}$ 为自由膨胀应变,可根据 Lie 和 Denham<sup>[6]</sup>取值; $\epsilon_{\text{scr}}$ 为钢筋的高温蠕变,可采用 AIJ<sup>[16]</sup>给出的表达式和系数。

在温度和应力共同作用下混凝土的总应变 $\epsilon_c$ 为<sup>[12]</sup>:

$$\epsilon_c = \epsilon_{\sigma} + \epsilon_{\text{eth}} + \epsilon_{\text{tr}} + \epsilon_{\text{ccr}} \quad (2)$$

其中, $\epsilon_{\sigma}$ 为应力作用产生的应变,受压区混凝土采用 Lie 和 Denham<sup>[6]</sup>提供的模型,Han 等<sup>[13]</sup>给出高温下受压区混凝土的应力-应变关系曲线,受拉区混凝土采用 Rots 等提出的模型,表达式参考 Cai 等<sup>[17]</sup>; $\epsilon_{\text{eth}}$ 为自由膨胀应变,根据 Lie 和 Denham<sup>[6]</sup>确定; $\epsilon_{\text{tr}}$ 为瞬态热应变,采用 Anderberg 和 Thelandersson 提出的模型,并参考 Li 和 Purkiss<sup>[18]</sup>将混凝土瞬态热应变考虑到总应力-应变关系曲线中; $\epsilon_{\text{ccr}}$ 为混凝土高温徐变,该应变比其他应变小得多,且在 ABAQUS 中塑性损伤模型难以考虑高温徐变<sup>[19]</sup>,因此暂不考虑其影响。

图 1 所示为火灾下钢筋混凝土墙有限元分析模

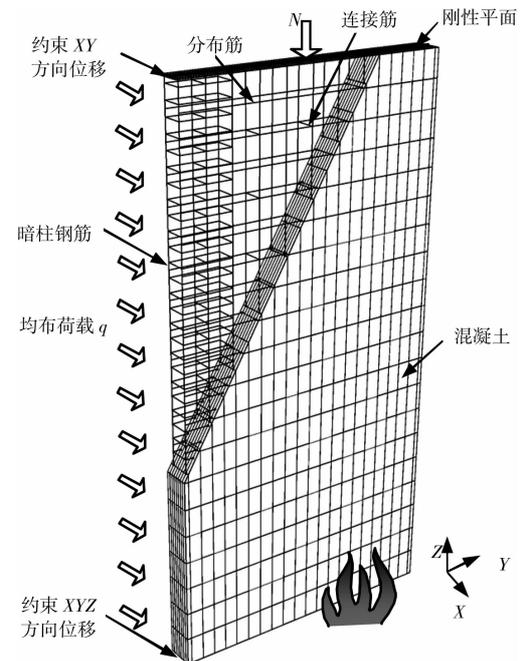


图 1 有限元分析模型

型,为清楚显示暗柱及墙体部分钢筋,去除左上角的混凝土。图中混凝土采用三维实体单元 C3D8R 模拟,暗柱钢筋、分布筋、连接筋采用三维线性杆单元 T3D2 模拟。为施加轴向荷载  $N$  并防止应力集中,墙体两端设置刚性平面,采用三维线性离散刚体单元 R3D4 模拟。钢筋混凝土墙单面受火,背火面承受均布面荷载  $q$ ,墙体两端铰接。高温下钢筋与混凝土粘结滑移的研究尚不深入,高温粘结本构关系

比较缺乏,该文暂按钢筋与混凝土之间无相对滑移考虑,将钢筋 Embedded 到混凝土中。刚性平面与混凝土法向硬接触、切向库伦摩擦。根据构件实际受力情况,首先在构件加载位置施加荷载  $N$  及均布面荷载  $q$ ,保持外荷载不变,调用温度场分析结果计算。

## 1.2 模型验证

采用上述计算模型,对 Crozier 和 Sanjayan<sup>[2]</sup> 报道的钢筋混凝土墙体火灾实验曲线进行计算,计算结果得到实验结果的验证,该文只给出部分普通强度混凝土墙的挠度-时间关系曲线,如图 2 所示。图中,编号中字母  $I$  表示有轴向荷载, $L$  表示有侧向荷载,字母后数字分别为墙厚度(mm)-混凝土圆柱体抗压强度(MPa),实验试件长 3 600 mm,宽 1 200 mm,分布筋间距 200 mm,截面配筋率 0.25%,荷载偏心距为 1/2 墙厚。

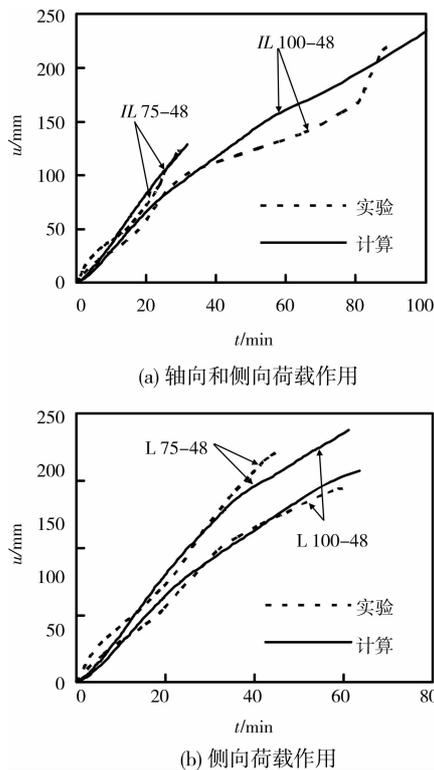


图 2 挠度-时间关系曲线计算结果与实验结果对比

在合理确定高强混凝土本构关系模型的基础上,还可对高强混凝土墙的高温变形曲线进行计算,计算结果与实验结果吻合较好<sup>[20]</sup>。

## 2 影响因素分析

依据《混凝土结构设计规范》GB 50010-2002 和《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3-2002 对钢筋混凝土墙的设计要求,选择较为合理常见的截面尺

寸、荷载比、配筋率、材料强度等计算参数。取典型算例:高  $H \times$  宽  $B \times$  厚  $t_w = 4\ 000\ \text{mm} \times 2\ 000\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ ,高厚比  $H/t_w = 20$ ,双排配筋,水平和竖直钢筋  $\phi 12@200\ \text{mm}$ ,配筋率 0.57%,连接筋  $\phi 10@400\ \text{mm}$ ,暗柱边长 400 mm,配筋  $6\phi 18$ ,配筋率 1.91%,箍筋  $\phi 10@100\ \text{mm}$ ,纵向受力钢筋的混凝土保护层厚度为 20 mm,钢筋强度  $f_y = 335\ \text{MPa}$ ,混凝土强度  $f_{cu} = 50\ \text{MPa}$ ,轴压比  $n = 0.3$ ,侧向荷载比  $m = 0.3$ 。钢筋混凝土墙上下两端铰支,单面受火。

参数分析时选取的重要参数及其变化范围为:轴压比  $n = 0.05 \sim 0.6$ ,侧向荷载比  $m = 0 \sim 0.6$ ,高厚比  $H/t_w = 10 \sim 40$ ,墙厚度  $t_w = 100 \sim 400\ \text{mm}$ ,混凝土抗压强度  $f_{cu} = 20 \sim 60\ \text{MPa}$ ,钢筋屈服强度  $f_y = 235 \sim 500\ \text{MPa}$ ,配筋率  $\rho = 0.2\% \sim 1.8\%$ ,混凝土保护层厚度  $c = 15 \sim 40\ \text{mm}$ 。

### 2.1 轴压比

图 3 所示为轴压比对高温下钢筋混凝土墙变形

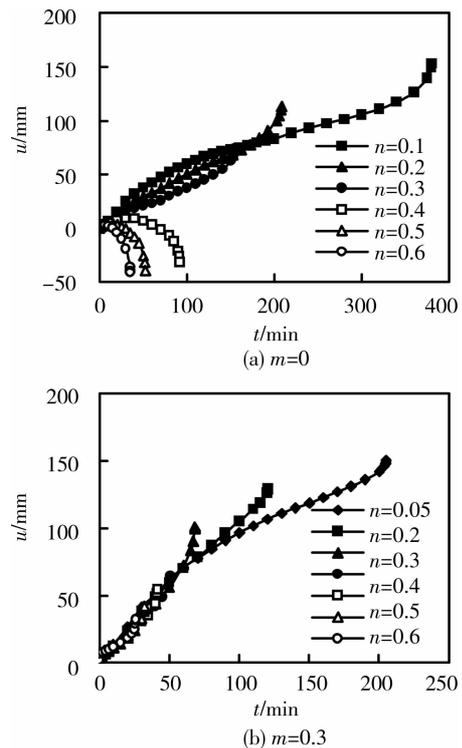


图 3 轴压比的影响

及耐火极限的影响规律,其中正值表示朝向受火面的变形。可见,随着轴压比的增大,截面单元更快进入塑性状态,耐火极限明显降低。无侧向荷载时,轴压比  $n$  为 0.1、0.3 和 0.5 对应的耐火极限分别为 381、155 和 53 min;侧向荷载比 0.3 时,轴压比  $n$  为 0.1、0.3 和 0.5 对应的耐火极限分别为 121、51 和 32 min。在无侧向荷载情况下, $n \leq 0.3$  时,随着轴压比的增加,抑制了墙体裂缝的发展,延迟了开裂状

态的出现,构件受压破坏的特征也更加明显,因此侧向挠度的增长有所迟缓直至接近破坏时迅速增加; $n \geq 0.4$ 时,热膨胀的作用使得墙受火面边缘沿着宽度出现反向弯曲,在热膨胀和较大轴压力的作用下,墙反向挠度不断增长直至破坏。在侧向荷载比 0.3 的情况下,轴压比对前期墙体挠度的发展影响不大,由于侧向荷载的作用,钢筋普通混凝土墙未出现反向挠度。

## 2.2 侧向荷载比

图 4 所示为侧向荷载比的影响规律,可见,侧向荷载比的增加使得更多截面单元进入塑性状态,促进了墙体裂缝的开展,加快了火灾下跨中挠度的发展,耐火极限也就下降。例如,对于轴压比 0.1 的墙,侧向荷载比  $m$  为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 对应的耐火极限分别为 278、180、120、89、69 和 53 min,比无侧向荷载的耐火极限(381 min)分别下降了 27%、52.8%、68.2%、76.6%、81.9% 和 86.1%。从图中还可看出,随着侧向荷载比的进一步增加,耐火极限的降低幅度逐渐减小。

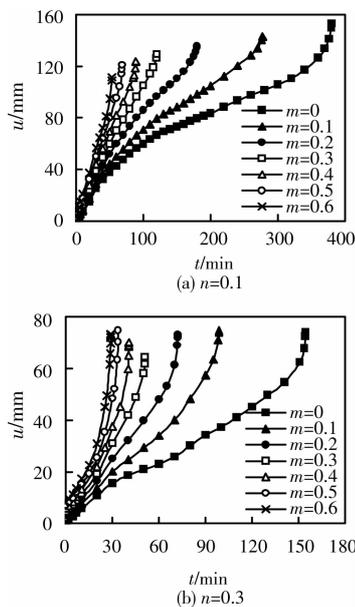


图 4 侧向荷载比的影响

## 2.3 墙高厚比

墙高厚比的影响较为显著,同时也可能引起墙反向挠度的出现,如图 5 所示。随着墙高厚比的增加,火灾下二阶效应更加明显,总体上墙体更快达到耐火极限。对于无侧向荷载的墙体,高厚比在 15~20 情况下耐火极限变化不大,高厚比 20~25 时耐火极限降低幅度较大,下降了 107 min,高厚比大于 25 之后耐火极限变化趋于不明显。侧向荷载比 0.3 的墙体,高厚比小于 25 时耐火极限下降较快,高厚

比 15~20 对应的耐火极限为 242~51 min,减少了 191 min,可见耐火极限下降迅猛,高厚比大于 25 时,耐火极限变化亦趋于平缓。在高厚比不大的情况下(例如  $m=0$  时,  $H/t_w \leq 18$ ;  $m=0.3$  时,  $H/t_w \leq 15$ ),钢筋混凝土墙在受火过程中出现了反向挠度,这主要是因为受火面温度较高,发生了向低温方向的弯曲,高厚较小时,外荷载作用下构件挠度前期增长不大,而沿着宽度方向的膨胀作用相对明显,弯曲作用达到一定程度时,在热膨胀和轴向荷载的作用下就发生了反向挠度。

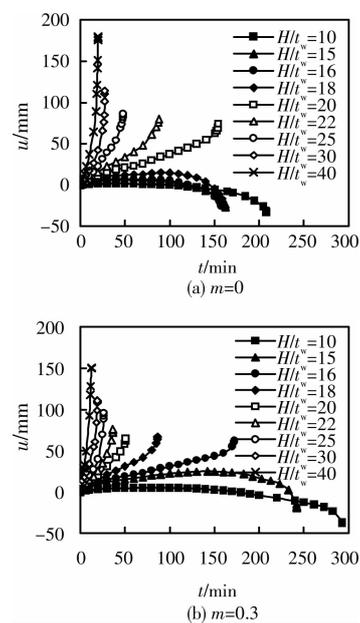


图 5 墙高厚比的影响

## 2.4 墙厚度

墙厚度是影响钢筋混凝土墙高温变形和耐火极限的重要影响参数,其影响规律如图 6 所示。随着墙厚度的增加,截面混凝土的面积就越大,混凝土吸热作用就越明显,同时受火面温度传到背火面也越慢,耐火极限不断增加。无侧向荷载和侧向荷载比 0.3 时,墙厚度 100~350 mm 对应的耐火极限分别为 36~359 min 和 25~204 min。无侧向荷载情况下,当墙厚度  $t_w < 250$  mm,随着墙厚度的增加,火灾下墙承载力损失较小,跨中挠度发展较慢;当  $t_w \leq 250$  mm,前期墙的热膨胀作用不够明显,外荷载作用下跨中挠度正向发展,但变化比较平缓,随着温度的进一步升高,沿着宽度方向的膨胀作用相对明显,使得在轴向荷载作用下发生了反向挠度,而对于  $m=0.3$  的钢筋混凝土墙,侧向荷载使得墙体弯曲作用增强,抑制了反向挠度的发生。

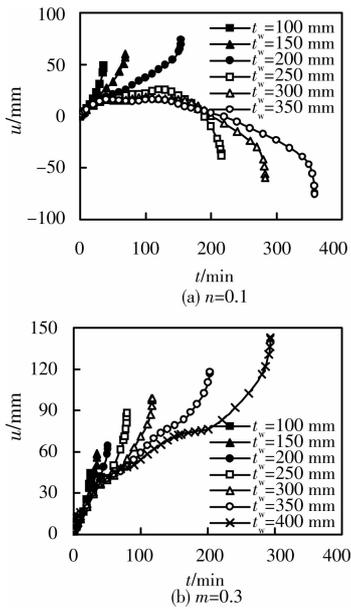


图 6 墙厚度的影响

## 2.5 混凝土抗压强度

图 7 所示为混凝土抗压强度的影响规律,可见,随着混凝土抗压强度的增加,构件承载力提高,在火灾下跨中挠度的发展也较慢,耐火极限增加。对于无侧向荷载的墙,抗压强度 20、30、40 MPa 对应的耐火极限分别为 88、130、150 min,抗压强度大于 40 MPa 后对耐火极限的影响较小;对于侧向荷载比 0.3 的墙,随着抗压强度的增长,耐火极限的增长趋势有所提高,抗压强度 20、30、40、50 和 60 MPa 对应的耐火极限分别为 39、41、45、51 和 59 min。

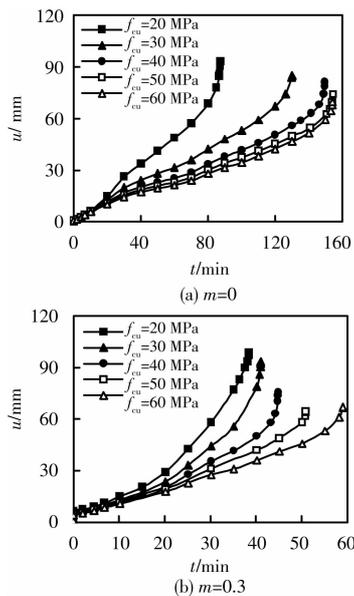


图 7 混凝土抗压强度的影响

## 2.6 钢筋屈服强度

在其他参数不变的情况下,随着钢筋屈服强度

的增加,钢筋混凝土墙极限承载力提高,而钢筋的混凝土保护层厚度不大,在火灾作用下,受火面钢筋升温较快,因此火灾下墙体承载力的提高较常温下的慢,跨中挠度的发展加快,耐火极限有减小的趋势,如图 8 所示。对于  $m=0$  和  $m=0.3$  的墙,钢筋屈服强度 235~500 MPa 对应的耐火极限分别为 156~140 min 和 61~44 min,降低幅度分别为  $f_y=235$  MPa 墙体耐火极限的 10.3% 和 27.9%。

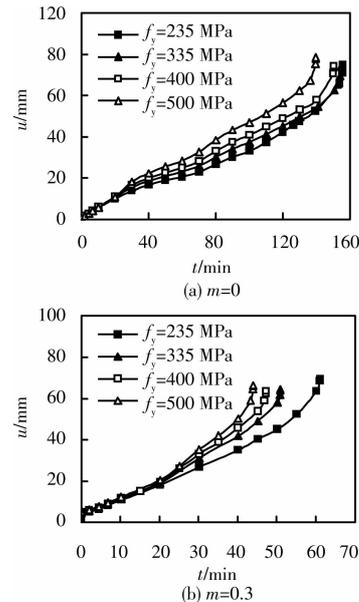


图 8 钢筋屈服强度的影响

## 2.7 配筋率

在火灾作用下,受火面钢筋温度较高,材料性能劣化比较严重,随着配筋率的增大,钢筋混凝土墙在火灾下的承载力提高较常温下提高的慢,跨中挠度的发展加快,耐火极限总体上有所减小的趋势,对于无侧向荷载且配筋率小于 1%、侧向荷载比 0.3 且配筋率超过 1% 的墙,其耐火极限变化很小,如图 9 所示。

## 2.8 混凝土保护层厚度

图 10 所示为混凝土保护层厚度的影响情况,可见,  $m=0$  和  $m=0.3$  情况下混凝土保护层厚度的影响差别较大。对于无侧向荷载的墙,随着混凝土保护层厚度的增加,尽管受火面钢筋升温有所延缓,但钢筋形心越靠近中心,墙极限承载力下降,火灾下挠度发展加快,耐火极限不断减少。混凝土保护层厚度从 15 增加到 40 mm,耐火极限减少了 68 min,降低幅度达到 40%,而且耐火极限下降基本呈线性关系。混凝土保护层厚度 15 mm 的墙体由于前期正向挠度增长较慢,随着温度的进一步升高,热膨胀作用使得挠度在 140 min 时向反向发展,并最终在 169

min 时达到耐火极限。对于侧向荷载比 0.3 的墙,火灾下侧向荷载增加了弯曲作用,使得钢筋形心位置变化的作用变得不明显,钢筋在侧向荷载下充分地发挥了作用,因此混凝土保护层厚度对火灾下钢筋混凝土墙的跨中挠度和耐火极限影响不大。

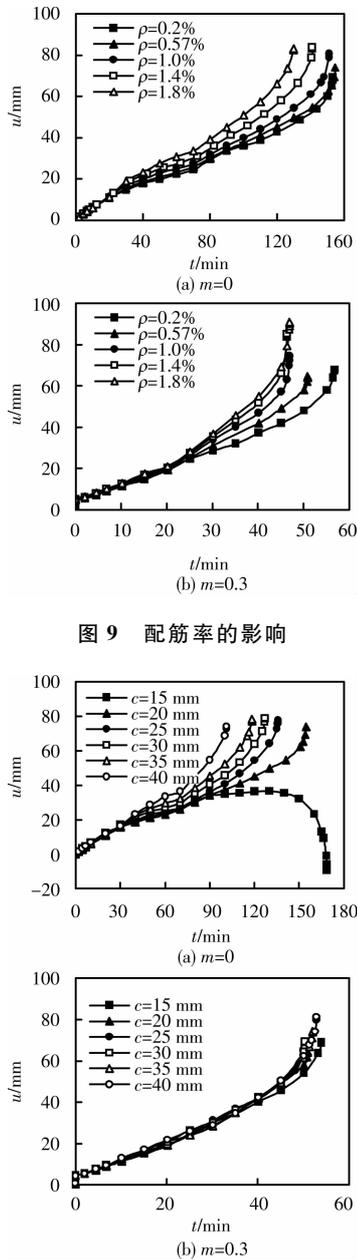


图 9 配筋率的影响

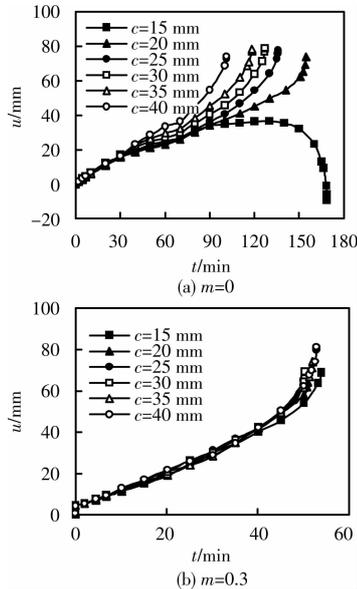


图 10 混凝土保护层厚度的影响

### 3 结论

1) 采用有限元软件 ABAQUS 建立了火灾下钢筋混凝土墙力学性能分析模型,模型中考虑了水蒸汽、钢筋高温蠕变、混凝土瞬态热应变的影响,计算结果与以往实验结果吻合较好。

2) 当钢筋混凝土墙在火灾下正向挠度增长不大时,随着温度的进一步升高,热膨胀作用可能使墙发

生反向弯曲,该文典型算例中的钢筋混凝土墙在以下情况下容易发生这种现象:高厚比较小( $m=0$  时,  $H/t_w \leq 18$ ;  $m=0.3$  时,  $H/t_w \leq 15$ );无侧向荷载时,轴压比较大( $n \geq 0.4$ )、墙厚度较大( $t_w \geq 250$  mm)、混凝土保护层厚度较小( $c=15$  mm)。

3) 在工程常用参数范围内,随着轴压比、侧向荷载比、墙高厚比、钢筋屈服强度或配筋率的增加,钢筋混凝土墙耐火极限有不同程度的减小,而随着墙厚度或混凝土强度的增加,耐火极限也有不同程度的增加,其中轴压比、侧向荷载比、墙高厚比、墙厚度的影响十分显著。无侧向荷载时,墙耐火极限随着混凝土保护层厚度的增加呈线性减小趋势,侧向荷载比 0.3 时,混凝土保护层厚度对耐火极限影响较小。

### 参考文献:

- [1] 郑永乾. 钢筋混凝土剪力墙耐火性能及抗火设计[J]. 建材世界, 2009, 30(3): 37-41.  
ZHENG YONG-QIAN. Discussion on fire performance and fire resistance design of reinforced concrete shear walls [J]. The World of Building Materials, 2009, 30(3): 37-41.
- [2] CROZIER D A, SANJAYAN J G. Tests of load-bearing slender reinforced concrete walls in fire [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(2): 243-251.
- [3] ONGAH R, MENDIS P A, SANJAYAN J G. Fire performance of high strength reinforced concrete walls [C]// LOO Y C, CHOWDHURY S H, FRAGOMENI S. Proceedings of 17th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM17), June 12-14, 2002, Queensland, Australia: 199-204.
- [4] 任红梅. 高性能混凝土剪力墙火灾反应理论与抗火设计[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2006.
- [5] 肖建庄, 李杰, 吴树勋, 等. 矿渣高性能混凝土剪力墙火灾反应试验研究[J]. 同济大学学报, 2003, 31(7): 783-787.  
XIAO JIAN-ZHUANG, LI JIE, WU SHU-XUN, et al. Experimental study on fire-response of high-performance-concrete with blast-furnace-slag shear walls [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(7): 783-787.
- [6] LIE T T, DENHAM E M A. Factors affecting the fire resistance of square hollow steel columns filled with bar-reinforced concrete [R]. Ottawa: National Research Council Canada, 1993.
- [7] HARMATHY T Z. Fire safety design and concrete [M]. UK: Longman Group UK Limited, 1993.
- [8] EUROCODE 2. Design of Concrete Structures—Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design [S]. EN 1992-1-2: 2004, European Committee for Standardization, Brussels, 2004.

- [9] ELLOBODY E, BAILEY C G. Modelling of unbonded post-tensioned concrete slabs under fire conditions [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(2): 159-167.
- [10] BAILEY C G, ELLOBODY E. Whole-building behaviour of bonded post-tensioned concrete floor plates exposed to fire [J]. Engineering Structures, 2009, 31(8): 1800-1810.
- [11] ISO 834-1. Fire-resistance Tests-elements of Building Construction-Part 1: General Requirements [S]. International Standard ISO 834. Geneva, 1999.
- [12] KODUR V, DWAIKAT M, RAUT N. Macroscopic FE model for tracing the fire response of reinforced concrete structures [J]. Engineering Structures, 2009, 31(10): 2368-2379.
- [13] HAN L H, ZHENG Y Q, TAO Z. Fire performance of steel reinforced concrete beam-column joints [J]. Magazine of Concrete Research, 2009, 61(7): 499-518.
- [14] 郑永乾, 韩林海, 经建生. 火灾下型钢混凝土梁力学性能的研究[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 118-125, 148. ZHENG YONG-QIAN, HAN LIN-HAI, JIN JIAN-SHENG. Research on behavior of steel reinforced concrete (SRC) beams in fire [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9): 118-125, 148.
- [15] SONG T Y, HAN L H, UY B. Performance of CFST column to steel beam joints subjected to simulated fire including the cooling phase [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(4): 591-604.
- [16] AIJ. Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures [S]. Architectural Institute of Japan (AIJ), Tokyo, Japan, 1997.
- [17] CAI J, BURGESS I, PLANK R. A generalised steel/reinforced concrete beam-column element model for fire conditions [J]. Engineering Structures, 2003, 25(6): 817-833.
- [18] LI L Y, PURKISS J. Stress-strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures [J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(7): 669-686.
- [19] HUO J S, HUANG G W, XIAO Y. Effects of sustained axial load and cooling phase on post-fire behaviour of concrete-filled steel tubular stub columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8-9): 1664-1676.
- [20] 郑永乾, 庄金平. 高强混凝土墙耐火性能的有限元分析[J]. 福建工程学院学报, 2009, 7(3): 210-215. ZHENG YONG-QIAN, ZHUANG JIN-PING. Finite element analysis on fire performance of high strength concrete (HSC) walls [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2009, 7(3): 210-215.

(编辑 胡 玲)

(上接第 23 页)

- [12] SHEIKH S A, YAU G. Seismic behavior of concrete columns confined with steel and fiber-reinforced polymers [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(1): 72-81.
- [13] OZBAKKALOGLU T, SAATCIOGLU M. Seismic behavior of high-strength concrete columns confined by fiber-reinforced polymer tubes [J]. Journal of Composites for Construction ASCE, 2006, 10(6): 538-549.
- [14] 顾冬生, 吴刚, 吴智深, 等. CFRP 加固高轴压比钢筋混凝土短圆柱抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(6): 71-77. GU DONG-SHENG, WU GANG, WU ZHI-SHEN, et al. Experimental study on seismic performance of RC short circular columns strengthened with CFRP composites under high level compression [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(6): 71-77.
- [15] BINICI B. Design of FRPs in circular bridge column retrofits for ductility enhancement [J]. Engineering Structures, 2008, 30: 766-776.
- [16] XIAO Y, WU H, Martin G R. Prefabricated composite jacketing of RC columns for enhanced shear strength [J]. J. Struct. Eng. 125(3), 255-264.
- [17] LI Y F, Sung Y Y. A study on the shear-failure of circular sectioned bridge column retrofitted by using CFRP jacketing [J]. J. Reinf. Plast. Comp. 2004, 23(8), 811-830.
- [18] 王震宇, 芦学磊, 李伟, 等. 塑性铰区碳纤维约束高强混凝土圆柱抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(2): 21-24. WANG ZHEN-YU, LU XUE-LEI, LI WEI, et al. Experimental research on seismic performance of high strength concrete circular column confined with carbon fiber sheets at plastic hinge zone [J]. Building Structure, 2009, 39(2): 21-24.
- [19] HUSSEIN M E, MEDHAT A H. Seismic design guidelines for squat composite-jacketed circular and rectangular reinforced concrete bridge columns [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(4): 505-514.

(编辑 胡 玲)