

墙板对火灾下钢柱截面温度分布的影响*

李明菲¹ 李国强^{2,3} 王银志²

(1. 上海天华建筑设计有限公司; 2. 同济大学土木工程学院;
3. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室)

摘要 在钢结构的抗火设计中,必须了解钢构件截面温度随时间的变化。本文对侧带有墙板的钢柱在火灾下的升温 and 截面温度分布进行了有限元分析研究,通过数据拟合并对比现有计算方法,得到了带墙板钢柱截面平均温度和温度分布的简化方法,为进一步进行这种条件下钢柱的抗火设计提供了基础。

关键词 钢结构; 墙板; 钢柱; 抗火; 升温; 温度分布

1 研究背景

由于钢材对温度的敏感性较大,钢结构的耐火性能很差。随着钢结构在我国的飞速发展,我国钢结构的抗火研究也正一步一步的深入。目前,上海已经编制了我国第一部钢结构抗火设计标准——《建筑钢结构防火技术规程》(DG/T08-008-2000)^[2](以下简称《规程》),该规程对不同类型钢结构建筑的抗火要求、钢构件抗火验算方法、钢结构防火保护措施等都有较完整的规定。在进行钢结构的抗火设计时,无论钢柱四面受火或三面受火(图1)均假定钢柱截面温度均匀分布。然而在某些钢结构建筑中(如钢结构住宅),钢柱外侧往往与轻质墙板相连接,如图2。墙板不仅起隔火作用,还对钢柱起吸热作用,因此墙板的存在不仅减缓钢柱的升温,还会使钢柱截面温度不均匀,这种钢柱受火边界条件的不同会使截面升温产生较大的差异,致使在抗火计算时影响到耐火极限的计算结果,因此有必要对此类钢柱火灾下的升温进行较深入的研究。本文对此类钢构件在火灾下的升温进行了有限元分析,与《规程》中的计算方法进行了比较,并提出了一种较为简单的计算方法,可供进行此类钢柱抗火设计时参考。

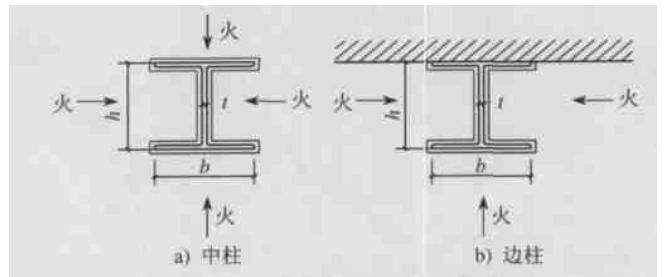


图1 钢柱的受火

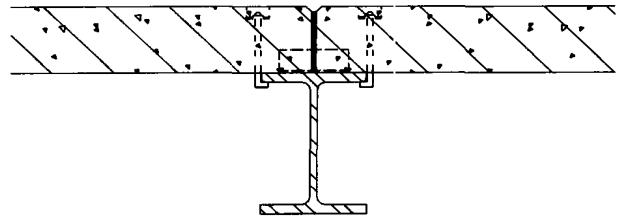


图2 轻质混凝土墙板与钢柱连接示意图

2 有限元分析

2.1 基本假定

本文利用 ANSYS 有限元程序进行高温下带墙板钢柱外涂防火涂料时的截面温度分布的传热学有限元计算,并采用如下的基本假定:

1) 火灾空气升温符合 ISO 834 标准升温曲线^[1]:

$$T_g - T_g(0) = 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

式中 T_g 为空气温度($^{\circ}\text{C}$), t 为时间(s)。

2) 钢柱温度分布与应力水平无关。即在进行温度分析时不考虑构件变形、应力应变等因素对材料热工参数和热传导的影响。

* 国家杰出青年科学基金(50225825)和高等学校优秀青年教师奖励计划资助

李明菲,男,1978年9月生,同济大学结构工程专业硕士,现工作于上海天华建筑设计有限公司,主要从事结构设计工作。

李国强,男,1963年生。1982年毕业于天津大学土木工程系结构工程专业,1985年在重庆建筑工程学院获硕士学位,1988年在同济大学获博士学位,1993年获英国 Royal Fellowship 赴英国诺汉大学访问工作。现任同济大学教授、博士生导师。主要从事多高层建筑钢结构及钢结构抗火研究。

3) 钢柱内部的温度在各瞬时沿长度方向都是均匀分布的, 仅考虑截面上温度不均匀分布, 即为二维热传导问题。

4) 钢构件与混凝土墙板均为等截面构件, 且防火被覆均匀分布。

2.2 模型建立与分析

本文选用两种基本单元建立模型, 分别是二维实体热传导单元 PLANE55 和二维热表面效应单元 SURF151, 如图 3。

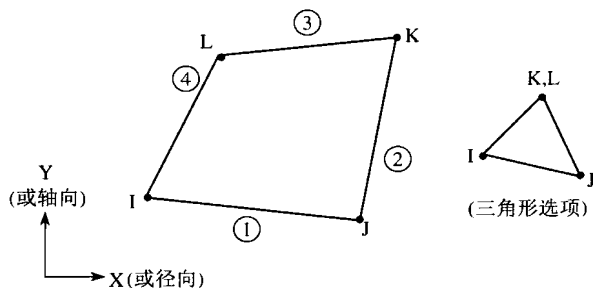


图 3a PLANE55 单元示意图

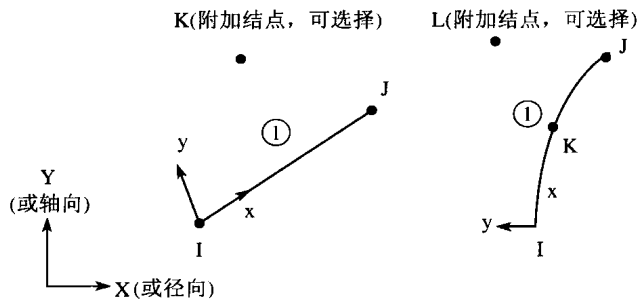


图 3b SURF151 单元示意图

钢材的热工性能按照《规程》中选取, 比热取常数 $c_s = 600 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 密度 $\rho_s = 7850 \text{ kg}/\text{m}^3$, 导热系数取常数 $\lambda = 45 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

轻质墙板的材料选取了江苏省工程建设标准设计站提供的蒸压轻质加气混凝土 (ALC 板), 材料热工性能为^[3]: 传导系数 $\lambda_c = 0.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; 比热 $c_c = 1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; 密度 $\rho_c = 500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

选用的防火涂料热工性能参数为: 传导系数 $\lambda_f = 0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; 比热 $c_f = 1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; 密度 $\rho_f = 680 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

本文选取了厚度为 100mm 和 200mm 的两种墙板与柱连接形式进行截面温度分析, 得到各时刻下截面的温度分布。钢构件尺寸为 $\text{H}200 \times 100 \times 10 \times 14$ 。图 4 为与 100mm 厚墙板连接的有限元模型。考虑对称性, 取半结构进行分析。通过有限元的瞬态传热分析, 可以得到每一时刻下截面每一点的温度值。

2.3 有限元分析结果

图 5 为 100mm 厚 ALC 墙板影响下, 20mm 厚防火保护层下, 5400s (1.5h) 时刻钢柱半截面温度分布情况。由计算结果可以看出钢柱两侧翼缘温度分布都比较均匀, 靠近墙板一侧翼缘 (图中上侧翼缘) 温度最低, 另一侧温度最高, 两翼缘温差将近 100°C ; 腹板温度变化比较明显, 从靠近墙板一侧温度较低到另一侧温度逐渐升高, 温度变化基本为线性; 构件翼缘和腹板厚度方向温度基本相同。

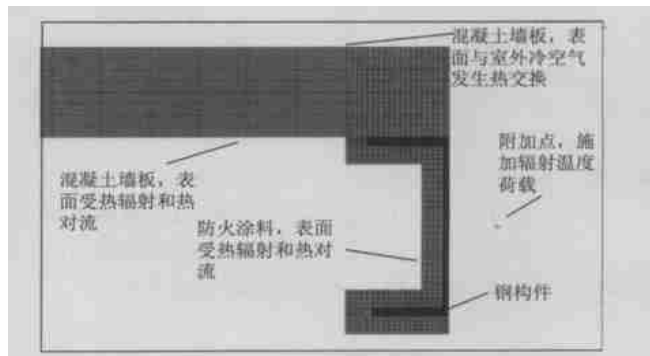


图 4 有限元模型网格划分图

在本例的计算中, 两侧翼缘温差达到 100°C , 已经不能认为截面温度均匀分布。截面温度的不均匀分布会在钢构件截面内产生较大的温度应力, 从而影响到钢构件的抗火承载力。



图 5 截面温度计算结果

通过瞬态传热分析, 我们可以得到截面上各点温度随时间变化的曲线, 图 6 为钢柱与 100mm 厚墙连接时钢柱截面各处温度随时间的变化情况。由计算知, 钢柱与 200mm 厚墙板连接时钢柱截面温度与 100mm 厚墙板的情况基本相同, 即墙板的厚度对钢柱的升温影响很小。与 ALC 墙板连接一侧的翼缘, 由于连接到墙板的一面没有受到空气升温的作用, 并且因为墙板外测是室外, 没有火灾发生, 所以这一侧翼缘温度最低。火灾发生 1h 后, 两侧翼缘温度差基本保持不变, 保持在 $70 \sim 100^\circ\text{C}$ 之间。且墙板材料绝热性好, 吸热量大, 因此轻质混凝土墙板厚度

对钢柱截面温度变化的影响不大。

截面平均温度与腹板中央的温度十分接近,因此在计算中也可以采取腹板中央的温度代替截面平均温度。

3 参数分析与简化计算方法的研究

3.1 钢构件截面平均温度

带墙板的钢柱有一侧不受火灾作用,且轻质墙板导热系数低,绝热性好,因此此类钢柱接近于三面受火,如图1(b)所示。本文将有限元计算所得的钢柱截面平均温度随时间变化的曲线与分别按照《规程》中四面和三面受火的计算结果相比较,发现有限元的计算结果与《规程》中钢柱三面受火时的结果比较接近,如考虑保护层吸热的影响,则《规程》计算结果与有限元计算更为接近,在截面温度小于600℃时精度令人满意,如图7。

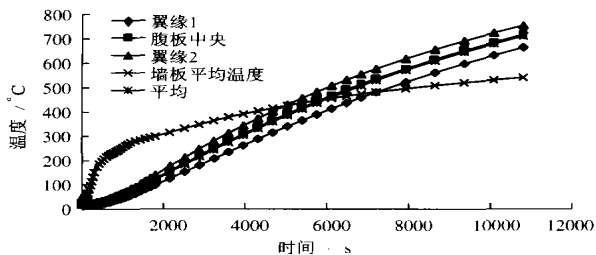


图6 100mm厚墙板与钢柱连接的截面温度升高

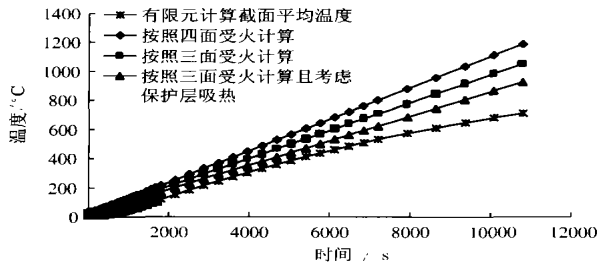


图7 有限元计算与《规程》计算结果的比较

本文用 ANSYS 有限元程序还分析考察了墙板混凝土的材料特性对钢柱截面平均温度的影响,如图8所示。图8中,热扩散系数是代表混凝土导热性的综合参数^[4],它综合了导热系数 λ_c 、比热 c_c 和密度 ρ_c ,表达式如下: $\delta_c = \frac{\lambda_c}{c_c \cdot \rho_c}$ 。普通混凝土的热扩散系数典型值的范围介于 $5.6 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-6}$,而轻质混凝土的热扩散系数介于 $2 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 。

分析表明,混凝土材料的热扩散系数对钢构件截面平均温度影响不大,且平均温度比 $\delta_c = 0$ 时略低($\delta_c = 0$ 代表材料绝热),所以按照墙板材料绝热计算钢构件平均温度较为安全,且比较精确。因此本文建议在计算带墙板钢柱截面平均温度时,采用《规程》中三面受火模型公式,即

$$T_s = (\sqrt{0.044 + 5 \times 10^{-25} B} - 0.2) + T_g(0) \quad (2)$$

$(T_s \leq 600^\circ\text{C})$

式中 $B = \frac{\lambda_c \cdot F_i}{d_i \cdot V} \left[\frac{1}{1 + 1/2} \right] \quad (3)$

F_i/V 为截面形状系数 $\frac{F_i}{V} = \frac{2h + 3b - 2t}{A} \quad (4)$

T 为钢柱时刻 t 的截面平均温度, $^\circ\text{C}$; t 为时间, s ; F_i 为单位长度保护层的内表面积, m^2/m ; V 为单位长度构件的体积, m^3/m 。

$$\mu = \frac{c_i \rho_i d_i F_i}{c_s \rho_s V} \quad (5)$$

c_i 为保护层比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_i 为保护层密度, kg/m^3 ; c_s 为钢材比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_s 为钢材密度, kg/m^3 ; λ_c 为保护层导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; d_i 为保护层厚度, m 。

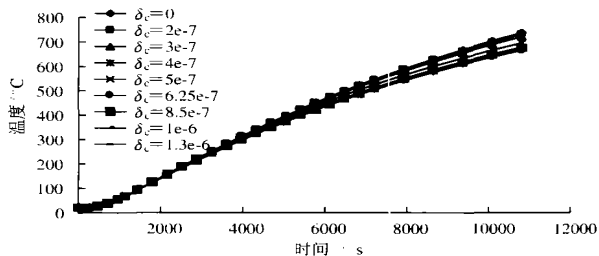


图8 墙板材料热扩散系数对截面平均温度变化曲线的影响

3.2 截面温度不均匀分布的研究

3.2.1 参数分析

实际上带墙板钢柱的截面温度分布是不均匀的,因此除了考察截面的平均温度之外,本文还对截面温度的不均匀分布程度进行了基于有限元计算的参数分析。

选取混凝土热扩散系数 δ_c 、截面的宽高比 b/h 、防火涂料导热系数与保护层厚度比值 λ/d_i 、钢柱翼缘和腹板厚度为参数,分析得出各参数影响下截面温差随时间变化的曲线如图9~11和表1所示。

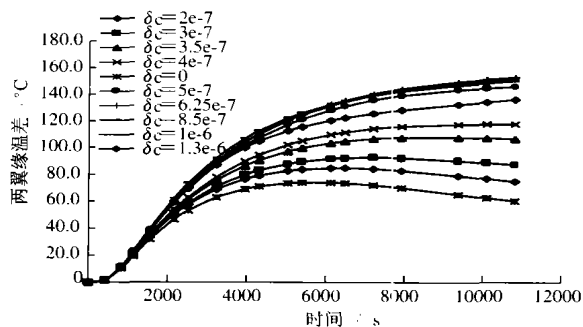


图9 墙板混凝土热扩散系数对钢柱的截面温差变化曲线的影响

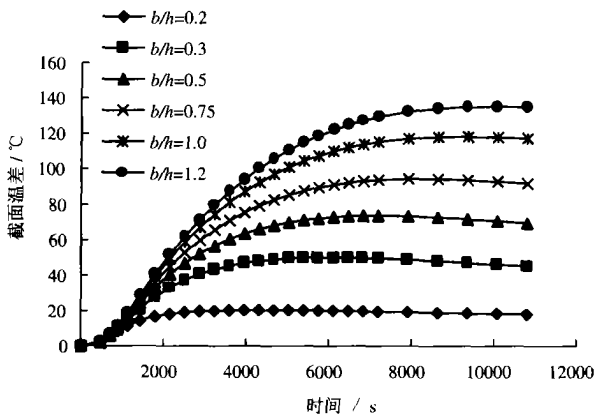


图 10 钢构件截面 b/h 对钢柱的截面温差变化曲线的影响

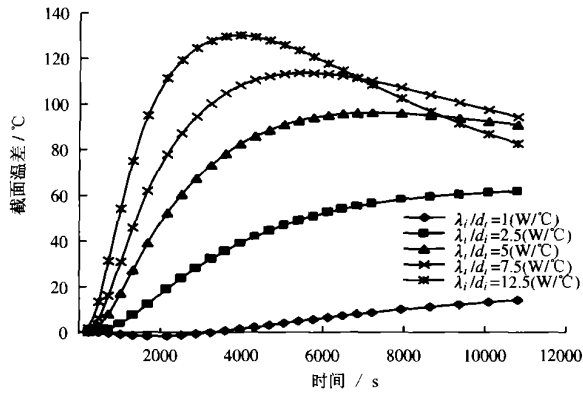


图 11 防火保护层参数对钢柱的截面温差变化曲线的影响

λ_i 为保护层的导热系数, $W/(m \times ^\circ C)$; d_i 为保护层厚度, m ;

表 1 钢柱翼缘和腹板厚度对钢柱的截面温差的影响

时间 (min)	腹板和翼缘平均厚度 t (mm)			
	2.5	5	10	20
30	100	63	38	27
60	158	106	63	40
90	170	117	72	41
120	168	114	71	39

通过参数分析知, 1) 混凝土热扩散系数 δ_c 越大, 两翼缘的温差越大, 且 100min 至 180min 阶段, 截面的温差最大。但当 δ_c 处于普通混凝土范围时, 截面的温差受 δ_c 影响不大; 2) 钢构件截面宽高比 b/h 越大, 则两侧翼缘的温度差越大; 3) 保护层的 λ_i/d_i 越大, 即其隔热效果越差, 两侧翼缘温度差别就越大, 而且最大温差出现的时间也越早; 4) 钢柱腹板和翼缘的厚度越大, 两侧的温差就越小, 反之则越大。

3.2.2 简化计算方法

由于两个翼缘本身温度分布比较均匀, 腹板温度沿高度接近于线性变化, 所以本文选取截面的温度梯度作为表达钢构件温度不均匀分布的参数。令两侧翼缘温度差为 ΔT , 温度变化梯度 $G = \Delta T/h$ ($^\circ C/mm$)。本文通过对参数分析所得结果回归拟合, 得到了近似计算截面温度梯度的方法。如下:

对应设计耐火时间分别为 30min、60min、90min、120min、180min, 可以按照以下 5 组经验公式计算截面的温度变化梯度 G 。对于其余的耐火时间要求, 可以由插值计算其 G 。

1) 30min:

墙板材料为轻质混凝土时

$$G = a_{30} b_{30} \left[-1.45 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda_i}{d_i} \right)^2 + 6.4 \times 10^{-2} \left(\frac{\lambda_i}{d_i} \right) - 0.07 \right] \quad (^\circ C/mm) \quad (7)$$

墙板材料为普通混凝土时

$$G = a_{30} \left[-1.58 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda_i}{d_i} \right)^2 + 6.99 \times 10^{-2} \left(\frac{\lambda_i}{d_i} \right) - 0.076 \right] \quad (^\circ C/mm) \quad (8)$$

式中

$$a_{30} = \frac{3.92 \times b}{ht} + \frac{7.06}{t} \quad (9)$$

$$b_{30} = 2.93 \times 10^5 \cdot \delta_c + 0.92 \quad (10)$$

2) 60min:

墙板材料为轻质混凝土时

$$G = a_{60} \cdot b_{60} \left[-5.07 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda_i}{d_i} \right)^2 + 0.124 \left(\frac{\lambda_i}{d_i} \right) - 0.105 \right] \quad (^\circ C/mm) \quad (11)$$

墙板材料为普通混凝土时

$$G = a_{60} \left[-6.17 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda_i}{d_i} \right)^2 + 0.151 \left(\frac{\lambda_i}{d_i} \right) - 0.128 \right] \quad (^\circ C/mm) \quad (12)$$

$$a_{60} = \frac{6.57 \times b}{ht} + \frac{5.07}{t} \quad (13)$$

$$b_{60} = 5.61 \times 10^5 \cdot \delta_c + 0.847 \quad (14)$$

3) 90min:

墙板材料为轻质混凝土时

$$G = a_{90} \cdot b_{90} \left[-6.96 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda_i}{d_i} \right)^2 + 0.144 \left(\frac{\lambda_i}{d_i} \right) - 0.093 \right] \quad (^\circ C/mm) \quad (15)$$

墙板材料为普通混凝土时

$$G = a_{90} \left[- 9.35 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda}{d_i} \right)^2 + 0.194 \left(\frac{\lambda}{d_i} \right) - 0.125 \right] \quad (\text{°C/mm}) \quad (16)$$

$$a_{90} = \frac{8.32 \times b}{ht} + \frac{3.76}{t} \quad (17)$$

$$b_{90} = 8.16 \times 10^5 \cdot \delta_c + 0.778 \quad (18)$$

4) 120min:

墙板材料为轻质混凝土时

$$G = a_{120} \cdot b_{120} \left[- 7.70 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda}{d_i} \right)^2 + 0.144 \left(\frac{\lambda}{d_i} \right) - 0.065 \right] \quad (\text{°C/mm}) \quad (19)$$

墙板材料为普通混凝土时

$$G = a_{120} \left[- 11.2 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda}{d_i} \right)^2 + 0.21 \left(\frac{\lambda}{d_i} \right) - 0.095 \right] \quad (\text{°C/mm}) \quad (20)$$

$$a_{120} = \frac{9.44 \times b}{ht} + \frac{2.92}{t} \quad (21)$$

$$b_{120} = 1.06 \times 10^6 \cdot \delta_c + 0.711 \quad (22)$$

5) 180min:

墙板材料为轻质混凝土时

$$G = a_{180} \cdot b_{180} \left[- 7.37 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda}{d_i} \right)^2 + 0.125 \left(\frac{\lambda}{d_i} \right) - 0.0075 \right] \quad (\text{°C/mm}) \quad (23)$$

墙板材料为普通混凝土时

$$G = a_{180} \left[- 12.4 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda}{d_i} \right)^2 + 0.21 \left(\frac{\lambda}{d_i} \right) - 0.013 \right] \quad (\text{°C/mm}) \quad (24)$$

$$a_{180} = \frac{10.74 \times b}{ht} + \frac{1.94}{t} \quad (25)$$

$$b_{180} = 1.51 \times 10^6 \cdot \delta_c + 0.589 \quad (26)$$

由以上经验公式得到钢构件截面的温度变化梯度, 结合由式 2 所计算截面平均温度, 则可以得到较全面的火灾下带墙板钢柱截面温度分布情况。

4 简化计算方法的应用

本文将用一简单例子说明钢柱截面温度的计算。假定钢柱截面 $H200 \times 150 \times 10 \times 14$ 。与 100mm 厚 ALC 蒸压轻质混凝土墙板连接, 轻质混凝土材料 $\lambda = 0.15W/(m \cdot \text{°C})$, $c_c = 1100J/(kg \cdot \text{°C})$, $\rho_c = 500kg/m^3$ 。钢柱外包

防火涂料, 涂料厚度 20mm, $\lambda_s = 0.1W/(m \cdot \text{°C})$, $c_i = 1000J/(kg \cdot \text{°C})$, $\rho_i = 680kg/m^3$, 空气升温按照 ISO 834 标准升温曲线。计算 120min 时钢柱的截面的平均温度和温度梯度:

$$\mu = \frac{c_i \rho_i d_i F_i}{c_s \rho_s V} = \frac{1000 \times 680 \times 0.02}{600 \times 7800} \times \frac{2 \times 0.2 + 3 \times 0.15 - 2 \times 0.01}{6060 \times 10^{-6}} = 0.396$$

$$\frac{F_i}{V} = \frac{2h + 3b - 2t}{A} = 137$$

$$B = \frac{\lambda}{d_i} \cdot \frac{F_i}{V} \cdot \left(\frac{1}{(1 + \mu/2)} \right) = \frac{0.01}{0.02} \times$$

$$137 \times \frac{1}{(1 + 0.396/2)} = 572$$

平均温度: °C

$$T_s(\sqrt{0.044 + 5 \times 10^{-5} B - 0.2})t + T_g(0) = 0.0694 \times 7200 = 499 \text{°C}$$

$$a_{120} = \frac{9.44 \cdot b}{ht} + \frac{2.92}{t} =$$

$$\frac{9.44 \times 150}{200 \times 12} + \frac{2.90}{12} = 0.833$$

$$b_{120} = 1.06 \times 10^6 \cdot \delta_c + 0.711 =$$

$$1.06 \times 10^6 \times \frac{0.15}{1100 \times 500} + 0.711 = 1$$

温度梯度:

$$G = a_{120} \cdot b_{120} \left[- 7.70 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda}{d_i} \right)^2 + 0.144 \left(\frac{\lambda}{d_i} \right) - 0.065 \right] = 0.385 \quad (\text{°C/mm})$$

用有限元计算 120min 时截面平均温度为 490°C, 温度梯度为 0.4°C/mm, 与简化计算结果相近。

5 结论

1) 本文通过有限元分析研究了火灾下一侧连接墙板的钢柱的截面升温情况, 研究发现: (1) 对一侧连接墙板的钢柱, 应用三面受火模型并考虑保护层吸热的影响计算钢柱截面平均温度较为精确; (2) 墙板混凝土的热工性能, 钢柱的截面尺寸及保护层材料特性对钢柱截面的温度分布状况都会有不同程度的影响。

2) 结合现有《规程》的计算方法, 得到了计算截面平均温度和温度不均匀分布情况的近似公式。

3) 由于截面温度不均匀分布会产生温度应力等效应, 而带墙板钢柱截面温差较大, 不宜忽略, 因此通过计算截面温度变化梯度, 也为构件的防火分析考虑截面温度不均匀分布的影响提供了必要的前提。

参考文献

- [1] 李国强, 蒋首超, 林桂祥. 钢结构抗火计算与设计, 中国建筑工业出版社北京, 1999年6月
- [2] 北京上海市工程建设规范. 建筑钢结构防火技术规程(DG/TJ08-008-2000), 上海, 2000年10月

- [3] 江苏省工程建设标准设计站. 蒸压轻质加气混凝土(ALC)板构造图集, 2002
- [4] A. M. 内维尔著. 李国洋, 马贞勇译. 混凝土的性能. 中国建筑工业出版社, 1983
- [5] ECCS (European Convention for Constructional Steelwork). European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures, 1983

The Effect of Wall Panels on the Temperature Distribution of a Steel Column Connected with Wall Panels in a Fire

*Li Mingfei*¹ *Li Guoqiang*^{2,3} *Wang Yinzi*²

(1. Tianhua Architecture Design Ltd. Co; 2. School of Civil Engineering, Tongji University;
3. State Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering)

Abstract Light wall panels are often used as cladding in steel buildings. Connected with a steel column at the flange of the column, the wall panels will give thermal effect on the column at elevated temperatures and causing an uneven temperature's distribution in the section of the column. Based on a series of thermal FE simulation and a parametric study, a simplified method for calculating the distribution of temperature in the section of a steel column connected with wall panel is provided.

Keywords Steel structure; Wall panels; Column; Temperature distribution; Finite element method