

文章编号:1673-9469(2008)01-0009-05

齐平式端板连接组合节点温度场分布研究

李饶婷,李国强

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

摘要:通过有限元方法分析了平端板组合节点连接在升温过程中的温度场分布情况,总结了端板组合节点在高温下温度分布特性,并且结合理论方法给出了此类组合节点温度场实用计算公式,为组合节点抗火性能研究奠定基础。

关键词:组合节点;高温;温度场;齐平式端板

中图分类号: TU 391

文献标识码: A

Research of temperature distribution for flush end - plate composite joints

LI Jiao-ting, LI Guo-qiang

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, the temperature distribution in elevated temperature of flush end - plate composite joints has been presented by the finite element analysis. Conclusions were given for the characteristics of composite joints with different styles of concrete slab. Some formulas for calculating the temperature distribution of composite joints were also presented in this paper. These works above give a good support for further works on the research of failure mechanism for composite connections in high temperature.

Key words: composite joints; high temperature; temperature distribution; flush end plate

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。在进行钢结构的抗火设计时,对于钢构件四面受火或三面受火常假定其截面温度均匀分布^[1]。但是在组合结构中,混凝土楼板不仅起隔火作用,而且能够减缓与之相连钢构件的升温速度,使钢构件截面温度存在一定的梯度,这种构件截面温度的不均匀分布会影响其耐火极限,因此有必要对此类钢构件在火灾下的升温进行较深入的研究。

1 有限元分析

1.1 有限元基本约定

钢材和混凝土为各向同性,钢构件和混凝土板均为等截面构件。

钢构件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。

不考虑由于结构变形导致的局部热边界条件的改变,如:端板与钢柱翼缘之间脱开后受火边界的改变等。

假定室内空气的温度均匀一致,火灾模型采用标准升温曲线^[2](如式(1))。

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

式中 T_g —空气温度(℃); t —时间(s)。

假定非连续体接触面的导热系数为无穷大。

1.2 热分析有限元分析模型

本文采用通用有限元分析软件 Ansys 对端板连接组合节点进行温度场分析。连接均采用三维热实体单元 SOLID70^[3]建模以模拟其内部的三维热传导,构件表面的热对流、热辐射效应采用三维热表面效应单元 SURF152 模拟,非连续体之间的接触传热问题采用三维面面接触单元(目标单元 TARGE170 和接触单元 CONTA173)模拟。

收稿日期:2007-10-17

基金项目:土木防灾国家自然科学基金创新研究群体(50621062)

作者简介:李饶婷(1983-),女,江西人,博士研究生,从事钢结构抗火研究工作。

文中梁柱齐平式端板连接组合节点(以下简称平端板组合节点)的热分析有限元建模主要考虑中柱连接形式。根据连接的对称性,中柱连接采用1/4模型计算,其相应的单元网格划分如图1所示。对于边界条件,对称面设为绝热边界,在SURF152单元表面施加热对流、热辐射边界,热对流系数为 $25\text{W}/\text{m}^2\text{C}$,综合辐射率为0.66,标准升温过程作用于Extra node处。

钢柱尺寸为 $H240 \times 240 \times 12 \times 14$,钢梁尺寸为 $H300 \times 150 \times 8 \times 12$,螺栓采用8.8S高强螺栓。楼板厚度为140mm。平端板组合节点又根据楼板形式分为压型钢板型组合节点(BC-EX-C-N)和平板型组合节点(BC-EX-F-N)。

钢材的密度 $\rho_s = 7850\text{kg}/\text{m}^3$,比热 $c_s (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C}))$ 和导热系数 $\lambda_s (\text{m} \cdot \text{C})$ 为温度的函数,分别采用公式(2)和公式(3)^[4];混凝土板密度 $\rho_c = 2250\text{kg}/\text{m}^3$,比热 $c_c (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C}))$ 和导热系数 $\lambda_c (\text{m} \cdot \text{C})$ 分别采用公式(4)和公式(5)^[5]。

$$c_s = 470 + 0.2t + 0.00038t^2 \quad (2)$$

$$\lambda_s = 52.57 - 1.541 \times 10^{-2}t - 2.155 \times 10^{-5}t^2 \quad (3)$$

$$c_c = 840 + 0.494t \quad (4)$$

$$\lambda_c = 1.6 - 7.059 \times 10^{-4}t \quad (5)$$

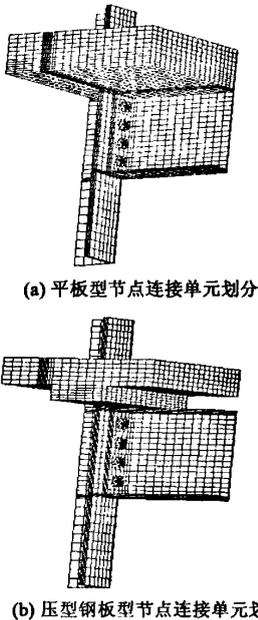


图1 节点单元划分

Fig.1 Division of node unit

2 节点温度场分布确定方法

梁柱齐平式端板连接组合节点连接较为复杂,其主要组件如端板、钢柱翼缘、螺栓、钢梁下翼缘的温度场分布直接影响节点的高温性能。文献[2]给出无防火保护钢构件四面和三面受火下的截面平均温度计算公式

$$T_s(t + \Delta t) - T_s(t) = \frac{\alpha}{\rho_s c_s} \cdot \frac{F}{V} \cdot [T_g(t + \Delta t) - T_s(t)] \Delta t \quad (6)$$

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (7)$$

式中 T_s —钢构件温度,℃; T_g —空气温度,℃; α_r —空气与构件表面之间的热辐射传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; α_c —热对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; V —构件单位长度的体积, m^3/m ; F —单位长度构件的受火表面积, m^2/m ; t —时间,(s)。

2.1 柱腹板

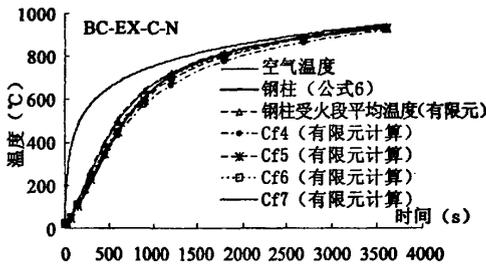
图2为钢柱有限元计算时分段示意图。C1段是混凝土板背火面以上部分,与空气接触;对于平板型组合节点,C2、C3段处于混凝土保护中;对于压型钢板型节点,C2段处于混凝土保护中,C3段为受火段;C4~C6为钢柱和钢梁节点连接区域;C7段为节点连接区域以下受火段。



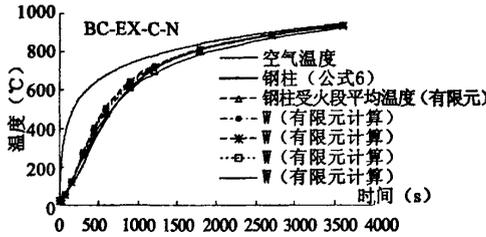
图2 钢柱分段示意图

Fig.2 The diagram of steel section

对于压型钢板型节点,从有限元计算结果看(图3),Cf4段~Cf7段、Cw4段~Cw7段的温度依次升高,但是这种差别不是很大,并且翼缘和腹板之间的温度差别也只在40度左右,可以保守地取受火区域非连接段的平均温度(采用公式(6)计算)作为连接区域柱腹板和柱翼缘的平均温度。



(a) 钢柱翼缘各段的温度



(b) 钢柱腹板各段的温度

图3 压型钢板型组合节点钢柱受火段温度场

Fig.3 The temperature distribution of flush end-plate composite joints of pressure plate-floor

对于平板型节点, C4 段的温度要比 C5 ~ C7 段的温度低大约 100℃ 左右, 公式(6)计算的值与 C5 ~ C7 段有限元计算结果较为接近, 如图 4。根据热量守恒法对公式(6)计算后进行修正如下:

$$dT'_{c, bolt1} = \frac{(a + 2) dT_{c, bolt1} + a \cdot dT_{c, slab, 0.02}}{2(a + 1)} \quad (8)$$

式中 $dT_{c, bolt1}$ —第一排螺栓所在钢柱段的温度增量, 按照公式(6)计算; $dT_{c, slab, 0.02}$ —距楼板下表面 20mm 处混凝土的温度增量, 计算方法见公式(10); $dT'_{c, bolt1}$ —修正后第一排螺栓所在钢柱段的平均温度增量; a —通过有限元数据拟合, 可取为 1。

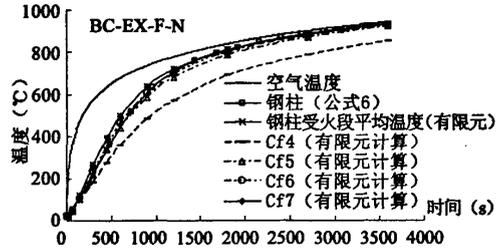
图 5 为 C4 段修正后实用方法和有限元的比较, 可见数据吻合较好。另外, 经有限元算例比较, 发现混凝土厚度变化对 C4 段的平均温度几乎没有影响。

2.2 节点连接处钢梁段

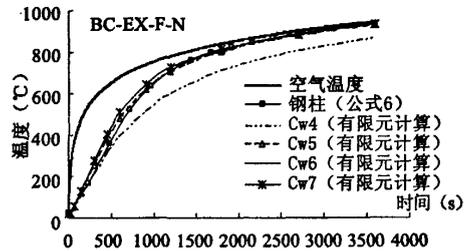
节点连接处梁段腹板受剪和梁下翼缘受压是强柱弱梁节点梁破坏时容易首先出现屈服的部位。紧靠端板区段的梁段 B1 段(图 6)由于受到端板温度场的影响, 其温度要低于 B3 段的温度, 因此选取 B3 段的温度作为连接节点中钢梁腹板和下翼缘的最不利温度。

对于钢梁上翼缘, 压型钢板型节点在升温

20min 后上翼缘和腹板的温度相差在 50℃ 左右; 但在平板型混凝土节点中, 这种温度差异将达到 100℃ 左右, 原因在于上翼缘和混凝土板接触面积更大, 上翼缘向混凝土传热更多。由于上翼缘较腹板和下翼缘温度要低, 基本上不会成为节点破坏的关键区域, 因此这里不做上翼缘温度分析。



(a) 钢柱翼缘各段的温度



(b) 钢柱腹板各段的温度

图4 平板型组合节点钢柱受火段温度场

Fig.4 The temperature distribution of flush end-plate composite joints

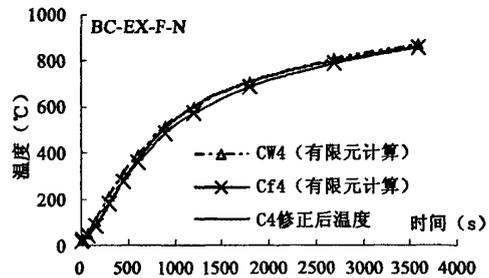


图5 C4段修正后温度比较

Fig.5 The comparison of temperature after modification of C4 section

图 7 为两种组合节点形式梁腹板、下翼缘的温度场实用计算方法与有限元分析结果比较。在压型钢板型算例中, 钢梁计算的体形系数为 $258m^{-1}$, 为四面均匀受火, 较接近于实际情况, 和有限元数据吻合很好; 对于平板型, 同样采用四面受火计算的体形系数, 和有限元结果也很接近。以上说明混凝土板的形式对钢梁腹板温度和下翼缘温度影响很小, 可不予考虑。实用公式计算时,

不论压型钢板型或平板型,下翼缘和腹板的温度可直接取为梁截面按四面受火情况计算的温度。

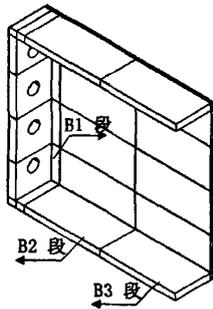
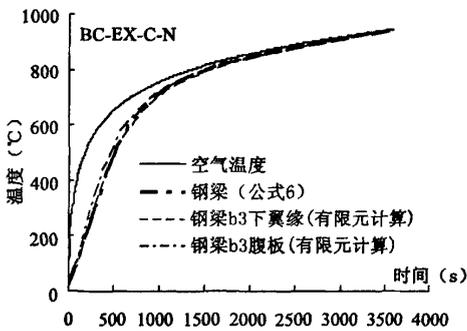
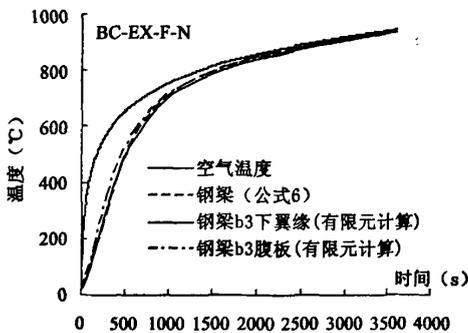


图6 钢梁分段示意图

Fig.6 The diagram of girder subsection



(a) 压型钢板型组合节点



(b) 平板型组合节点

图7 梁腹板与下翼缘的受火温度

Fig.7 The temperature of web splice and lower flange

2.3 端板

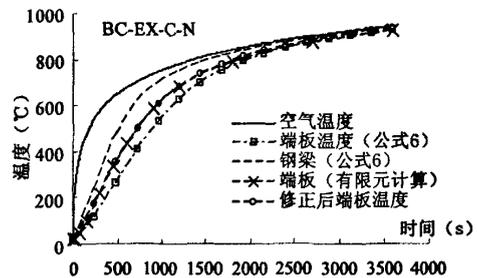
端板的温度不但受到钢梁腹板温度场的影响,而且还受到混凝土温度场的影响,这一特点在平板型节点中表现的更为明显。

图8为两种组合节点形式端板的温度场实用计算方法与有限元分析结果比较。对于压型钢板型如图(a),实用方法要比有限元计算的结果偏低。原因在于,通常情况下端板和钢柱组合体的 F/V 要比钢梁的 F/V 小,这样实用公式计算的端板平均温度要低于钢梁平均温度,从数据上看这种差别大概在 100°C 左右。因此在计算端板平均温度时应考虑钢梁温度对其的影响。本文依据文献^[6]中的方法,采用下式对其进行修正:

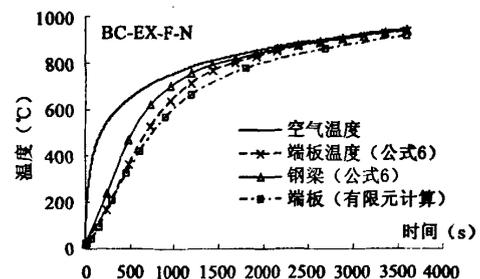
$$T'_{ep} = \frac{2}{2 + \eta} T_{ep} + \frac{\eta}{2 + \eta} T_b \quad (9)$$

式中 T_{ep} —端板和钢柱翼缘组合体按式(6)计算的的温度; T_b —钢梁四面受火按式(6)计算的的温度; T'_{ep} —修正后的端板平均温度; η —修正系数,通过数据拟合获得,在这里取 1.5。

对于平板型组合节点,式(6)计算的端板平均温度却要比有限元计算结果偏高(图8b),原因在于,虽然钢梁向其端板传热,但是由于混凝土板温度更低,端板和柱翼缘组合体、柱腹板和钢梁上翼缘还需向混凝土板传热,特别是随着加热时间的推移,混凝土板和钢构件之间的温度差别增大,这种传热途径更为明显,从而使得端板有限元计算值偏低。从数据上看,误差在 15min 后才较为明显,误差值最大在 40°C 左右,由于此时节点的温度已经超过 600°C ,这种误差可以接受。



(a) 压型钢板型组合节点



(b) 平板型组合节点

图8 端板受火温度

Fig.8 The temperature of end-plate

2.4 混凝土板

建筑火灾为室内火灾,火灾发生时一般组合楼板的底面为迎火面,顶面为背火面,上下表面的温差较大。文献[7]在建立室内火灾传热模型基础上,运用有限差分技术编制计算程序,以分析火灾下压型钢板-混凝土组合楼板在不同时刻的温度场。文献[8]采用有限差分法计算了组合楼板的温度场分布,并通过拟合的方法给出了压型钢板在距凸槽中面下表面距离 d 处温度的计算公式为

$$T_c = \left[\frac{0.6 \exp\left(-\frac{w_2}{w_4}\right) - 0.1}{H} d + 1 \right] \times \left[T_0 + \frac{1}{8} \exp \times \left(\frac{0.05 + 0.135(t/20) - 0.005(t/20)^2 - d}{0.007 + 0.0145(t/20) - 0.0005(t/20)^2} \right) \right] \quad (10)$$

式中 T_c —混凝土楼板温度(°C); w_2 —混凝土波槽上宽度; w_4 —混凝土波槽下宽度; H —混凝土楼板总高度(m); T_0 —初始温度(°C); t —时间(min)。

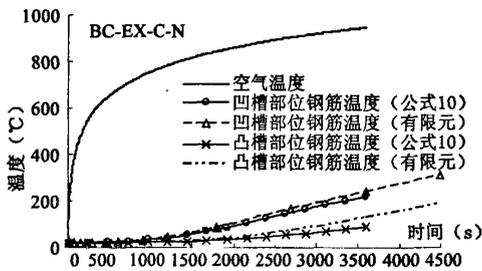


图9 压型钢板型楼板凹槽和凸槽部位温度

Fig.9 The temperature of groove and convex parts of pressure plate-floor

从图9可以看出,式(10)能较为精确地模拟混凝土板温度场的分布。升温一小时后凹槽部位

的温度要比凸槽部位高出100°C,因此钢筋的温度应该保守地取凹槽部位的温度作为其计算温度。

3 结语

通过对基于均匀温度分布假定的构件截面温度计算公式的修正,获得了更为合理的组合节点温度场实用计算方法。修正后的实用计算方法和有限元计算结果吻合的较好。另外研究发现,由于组合节点各构件升温速度不同会导致构件之间温度场的相互影响,在进行此类节点的高温性能研究时应考虑这种温度分布特点。最后应该指出,对于钢构件有防火保护的组合节点也可以依照上述方法获得其温度场分布情况。

参考文献:

- [1] DGTJ08-008-2000, 建筑钢结构防火技术规程[S].
- [2] 李国强, 蒋首超, 林桂祥. 钢结构抗火计算与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [3] 张朝晖, 范群波, 贵大勇, 等. ANSYS 8.0 热分析教程与实例解析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [4] The Steel Construction Institute (SCI). Fire Resistant Design of Steel Structures - A handbook to BS5950: Part 8[Z]. 1990.
- [5] 陆洲导. 钢筋混凝土梁对火灾反应的研究[D]. 上海: 同济大学, 1989.
- [6] 楼国彪. 钢结构高强度螺栓外伸式端板连接抗火性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [7] 徐朝晖, 陆洲导. 压型钢板-混凝土组合楼板抗火性能非线性分析[J]. 建筑结构学报. 2002, 23(5). 73-77.
- [8] 李国强, 殷颖智. 火灾下组合楼板的温度场分析[J]. 工业建筑, 1999, 29(12). 47-49.

(责任编辑 刘存英)

齐平式端板连接组合节点温度场分布研究

作者: [李饶婷](#), [李国强](#), [LI Jiao-ting](#), [LI Guo-qiang](#)
作者单位: [同济大学, 建筑工程系, 上海, 200092](#)
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2008, 25(1)
被引用次数: 1次

参考文献(8条)

1. DGTJ 08-008-2000. 建筑钢结构防火技术规范
2. 李国强;蒋首超;林桂祥 [钢结构抗火计算与设计](#) 1999
3. 张朝晖;范群波;贵大勇 [ANSYS 8.0热分析教程与实例解析](#) 2005
4. The Steel Construction Institute [Fire Resistant Design of Steel Structures-A handbook to BS5950:Part 8](#) 1990
5. 陆洲导 [钢筋混凝土梁对火灾反应的研究](#) 1989
6. 楼国彪 [钢结构高强度螺栓外伸式端板连接抗火性能研究](#)[学位论文] 2005
7. 徐朝晖;陆洲导 [压型钢板-混凝土组合楼板抗火性能非线性分析](#)[期刊论文]-[建筑结构学报](#) 2002(05)
8. 李国强;殷颖智 [火灾下组合楼板的温度场分析](#)[期刊论文]-[工业建筑](#) 1999(12)

引证文献(1条)

1. 杨颖, 殷福新 [火灾下外加强环式组合节点温度场研究](#)[期刊论文]-[低温建筑技术](#) 2011(1)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200801003.aspx