

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.023

板柱节点火灾中力学性能数值模拟

张 帅, 刘永军

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 为了研究火灾中板柱结构的传热过程及力学性能, 模拟分析板柱结构的破坏过程及裂纹开展情况。采用 ABAQUS 软件对钢筋混凝土建立了相应的传热分析模型和热-力耦合分析模型。数值模拟发现, 模型数值模拟值与现场试验值吻合较好; 不同受火时间及不同保护层厚度对板柱节点的温度场和极限承载力有不同的影响。结果表明, 不同受火时间对板柱节点内温度变化影响非常大, 随着构件受火时间的增加构件内温度提高越大; 不同的保护层厚度对楼板的钢筋温度值影响非常大, 随着保护层厚度的增加, 相应的钢筋温度在减小; 板柱节点随着受火时间增加, 相应的极限荷载在减小; 分析了火灾下板柱结构的破坏裂纹扩展情况和应变云图的变化规律, 为进一步建立板柱结构整体模型研究受火失效机理奠定了基础。

关键词: 板柱结构; 火灾; 数值模拟; 温度场; 冲切破坏

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0131-06

Numerical Simulation of Mechanical Properties of Slab Column Connections in Fire

ZHANG Shuai, LIU Yongjun

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: In order to simulate the heat transfer process and mechanical properties of plate-column structure in fire, the failure process and crack development of plate-column structure were simulated and analyzed. The heat transfer analysis model and thermo-mechanical coupling analysis model of reinforced concrete are established by using ABAQUS software. Numerical simulation shows that the numerical simulation results agree well with the field test values; Different fire time and different thickness of protective layer have different effects on the temperature field and ultimate bearing capacity of slab-column joints. The results show that different fire time has a great influence on the temperature change in slab-column joints, and the temperature increases with the increase of fire time; Different thickness of protective layer has a great influence on the temperature of steel bars in floor slabs. With the increase of the thickness of protective layer, the corresponding temperature of steel bars decreases; With the increase of fire time, the corresponding ultimate load decreases; The failure crack propagation and strain nephogram of slab-column structure under fire are analyzed, which could lay a foundation for further models of slab-column structure and the failure mechanism under fire.

Keywords: slab-column structure; fire hazard; numerical simulation; temperature field; punching shear failure

钢筋混凝土板柱结构是指由楼板和柱子构成的结构,分为无柱帽和有柱帽两种,是一种常用的结构形式,它具有施工支模,绑扎钢筋较简单,大多数用于地下车库、立体车库、多层厂房、公用建筑等^[1]。钢筋混凝土板柱结构节点非常容易发生破坏。在意

外火灾的情况下,材料强度衰减会导致这个关键区域的冲剪失效,其次是结构发生连续性倒塌。所以板柱节点在高温下的力学性能应该深入研究^[2]。2012年,开罗大学 Salem 等^[3]对 14 个板柱试件进行了高温冲切试验研究。2014年,台湾交通大学 Liao

收稿日期:2018-09-25

修稿日期:2018-10-23

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(2015020600)

作者简介:张 帅(1993—),男,辽宁阜新人,硕士研究生,研究方向为板柱结构抗火性能。E-mail:285675685@qq.com

通讯作者:刘永军(1966—),男,辽宁海城人,博士,教授,主要从事建筑结构抗火性能、有限元软件开发、科学可视化等方面的工作。

E-mail:ceyjliu@sjzu.edu.cn

等^[4]对 12 个板柱试件进行了高温冲切试验。本文利用有限元分析软件 ABAQUS 建立火灾下钢筋混凝土板柱结构温度场模型、板柱结构热-力耦合分析模型,进而对火灾下的构件应力、变形等进行计算分析^[5]。

1 钢筋混凝土板柱结构温度场模型分析

温度场模拟分析是研究火灾下板柱节点热-力耦合分析的基础。首先用有限元软件 ABAQUS 模拟板柱节点的温度场,为后续高温下的热-力耦合模拟分析提供分析基础。本文高温下的模拟分析对比试验采用 Anberel 等^[6]高温下板柱节点的冲切试验,具体配筋如图 1 所示。

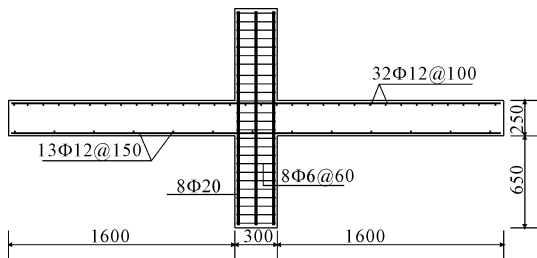


图 1 板柱节点配筋图(单位:mm)

在研究板柱节点的高温力学性能时,首先要确定混凝土和钢材的热工性,建立板柱结构高温下的温度场。国内外众多学者已对混凝土和钢筋的热工参数进行了大量研究,并给出了混凝土及钢筋的热工参数。本文中参考文献^[7]给出的混凝土热工模型。升温前,外界及结构温度均等于所处环境温度($\theta_0 = 20^\circ\text{C}$)且无热量转移。

钢筋混凝土板柱受火时的传热方式有热对流、热辐射和热传导 3 种,柱侧表面和板底面与空气通过热辐射和热对流进行热交换,柱内部通及板内部过热传导进行热量的转移^[8]。辐射系数和受火面的对流换热系数分别取 0.5, 540.0 W/(m²·k);模型的属性设, S- Stefan - Boltzman 常数为 3.402×10^{-6} W/(m²·k⁴),绝对零度取 -273°C ;温度曲线采用国际标准化组织制定的 ISO834 标准^[9]升温曲线。

本文首先对板柱节点做三维非线性有限元分析,采用分离式建模,混凝土与钢筋均采用 Heat Transfer 单元。钢材和混凝土的热工参数主要包括比热,热膨胀系数,热传导率,密度,如表 1 所示。

表 1 材料的热工参数

材料热工参数	钢筋	混凝土
传热导热系数 k_c /(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	$k_c = 54.7 - 0.0329T$	$k_c = \begin{cases} 1.9 - 0.00085T & (0^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}) \\ 1.22 & (T \geq 800^\circ\text{C}) \end{cases}$
热膨胀系数/(m·°C ⁻¹)	1.4×10^{-5}	$(0.008T + 6) \times 10^{-6}$
比热 C_c /(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	4600	1700
密度 ρ_c /(kg·m ⁻³)	7800	2400

钢筋的高温应力-应变关系,不同的学者有不同的建议。韩林海对钢筋混凝土构件高温下的力学性能进行了相关研究,考虑了火在下高温作用下对钢材的力学性能改变的情况,所得结果与试验值拟合较好。本文采用这种本构关系模型,计算式为

$$\sigma_s = \begin{cases} E_{sp}(T_{max})\epsilon_s & \epsilon_s \leq \epsilon_{yp}(T_{max}) \\ f_{yp}(T_{max}) + 0.01 E_{sp}(T_{max})[\epsilon_s - \epsilon_{yp}(T_{max})] & \epsilon_s \epsilon_{yp} > (T_{max}) \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$f_{yp}(T_{max}) = \begin{cases} f_y & T_{max} \leq 400^\circ\text{C} \\ f_y[1 + 2.33 \times 10^{-4}(T_{max} - 20) - 5.88 \times 10^{-7}(T_{max} - 20)^2] & T_{max} > 400^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\epsilon_{yp}(T_{max}) = \frac{f_{yp}(T_{max})}{E_{sp}(T_{max})} \quad (3)$$

T_{max} 表示火灾条件下的最高温度; $E_{sp}(T_{max}) = 2.06 \times 10^5$ N/mm² 为高温钢材的弹性模量,强化阶段弹性模量取 0.01 $E_{sp}(T_{max})$;高温条件和常温条件下的钢材泊松比基本上相差很小,取常温值 $\mu_s = 0.283$ 。

混凝土的高温应力-应变关系,本文采用清华大学过镇海等^[10]运用的混凝土应力-应变曲线计算式为

$$\sigma = \left[2.2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p} \right) - 1.4 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p} \right)^2 + 0.2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p} \right)^3 \right] f_c', \frac{\epsilon}{\epsilon_p} \leq 1 \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right)}{0.8\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p} - 1\right)^2 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right)} f_c^T, \frac{\epsilon}{\epsilon_p} > 1 \quad (5)$$

式中： ϵ 和 σ 分别为高温下混凝土的应变和应力，具体见文献[10]。

1.1 板柱节点温度场模拟结果及实验的对比分析

图 2 为板柱节点温度场云图。由图 2 可知，温度的增大总是从板柱节点模型受火面向构件内部传播，温度值逐渐下降，即板柱节点单元距离受火面越近，其内部单元温度升高越高。

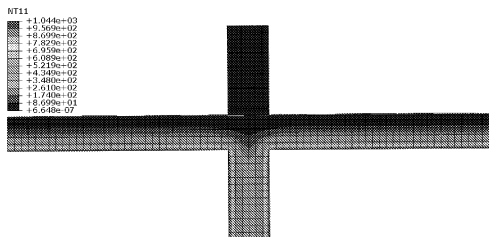


图 2 板柱节点温度场云图

图 3 为板柱节点的温度测点和温度模拟曲线。由图 3 可知：与试件的实验数据对比，模拟与实验得到的温度曲线发展情况基本一致，表明有限元模拟准确。试验数据结果与有限元软件模拟结果基本一致，数据不一致处分析原因可能是数值模拟中未考虑水分蒸发和迁移的影响，热电偶的埋设位置误差，热工参数本身存在一定离散性等原因也会造成一定误差[8]。

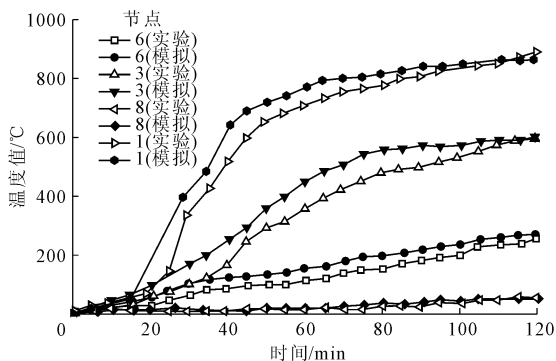


图 3 试件的受火时间 - 温度变化模拟曲线

1.2 不同受火时间对钢筋混凝土板柱节点温度场的影响

板柱节点的受火时间和混凝土保护层厚度对构件模型内的温度场有一定影响，本文分析了板柱节点受火 60 min 和 120 min 下构件温度场的变化。

图 4 是混凝土板柱节点截面内编号。图 5, 图 6 分别为板柱节点在受火 60 min 和 120 min 各节点温度变化曲线，从图 5, 图 6 可以看出，在构件的同一位置处，在受火时间不断增加的情况下，构件内温度也相应的提高。构件温度从外表面至构件内部成梯度降低。

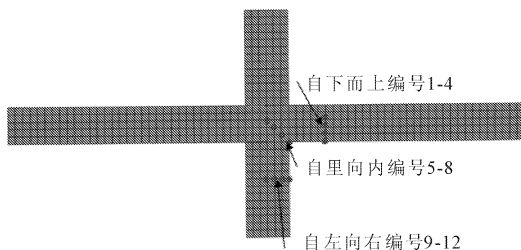


图 4 试件截面内输出温度的各点位置示意图

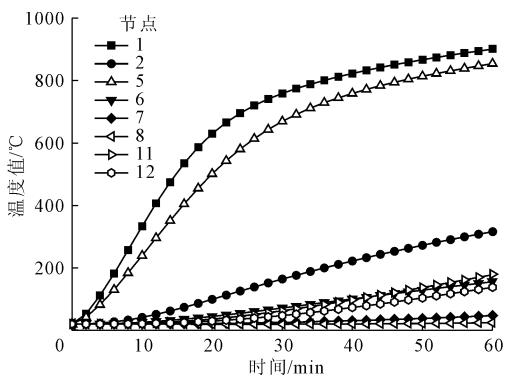


图 5 受火 60 min 各节点温度曲线

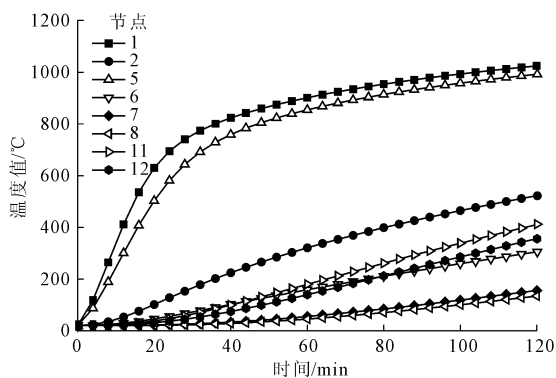


图 6 受火 120 min 各节点温度曲线

1.3 不同保护层厚度对钢筋混凝土板柱节点温度场的影响

混凝土材料可以有效的延缓温度的传递，高温对钢筋的材料性质影响非常大，为此研究不同保护层厚度(10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm)钢筋混凝土板柱节点受力钢筋的温度变化。从图 7 可以看出在相同的受火时间下，当混凝土保护层为 50 mm 时，构件内钢筋的温度提升最低。

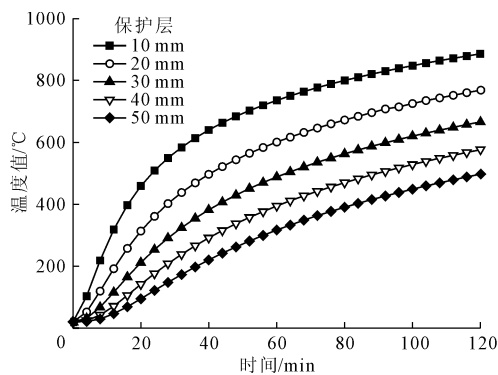


图 7 不同保护层厚度时钢筋温度曲线

2 钢筋混凝土板柱结构中柱节点热 - 力耦合模型分析

由于板柱节点是板柱结构中的薄弱部位,一旦有火灾发生会带来比常温更为严重的后果,因此研究火灾下板柱节点的抗冲切性能变得十分有必要。建立温度和荷载共同作用下的板柱结构热 - 力耦合分析模型^[11]。在具体分析时,需要把温度场的分析结果作为前处理,将温度场的 odb 文件导入到热 - 力学分析模型中。在材料属性中,填入混凝土和钢筋的热力学属性,采用热力学分析单元,分析模型的各个节点自动读入相应分析步中的节点温度,模型单元也被赋予相应温度的热力学属性,进而分析温度场和应力场联合作用下,试件的端部反力,失效荷载和最大主应力情况。

2.1 模拟结果及实验的对比分析

钢筋混凝土板柱结构中柱节点的主要特点及实验结果,如图 8 和图 9 表示的板柱节点实验挠度曲线和模拟挠度曲线。

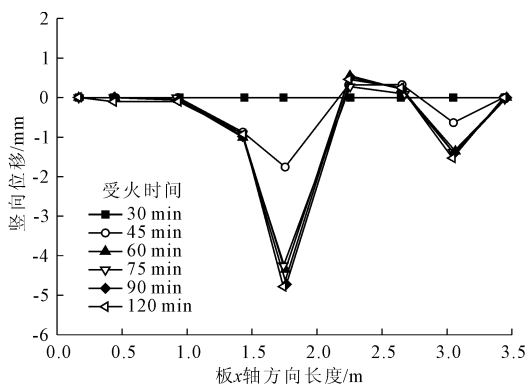


图 8 沿板 x 轴方向挠度曲线(实验)

图 8 中按 ISO834 国际升温曲线加热时沿着板条的变形。图 9 为模拟情况下板的挠度变化。由图 9 可知:模拟结果与参照试验结果基本一致,存在小

的偏差在于数值模拟中未考虑实际混凝土骨料均匀浇筑的影响和迁移的影响,测量的位置误差,热工参数本身存在一定离散性等原因也会造成一定的误差。测量的位置误差,热工参数本身存在一定离散性等原因也会造成一定的误差。

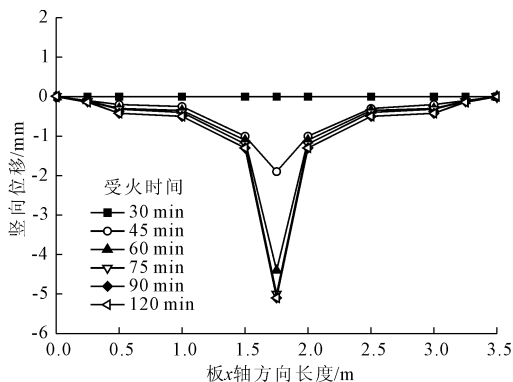


图 9 沿板 x 轴方向挠度曲线(模拟)

2.2 钢筋混凝土板柱结构中柱节点冲切破坏时裂纹分布情况

在塑性损伤模型中,混凝土的应力 - 应变关系模型,都通过能量破坏准则进行描述,即断裂能(G_f) - 开裂位移(u_t)的关系模型^[12],公式为

$$G_f = a \cdot \left(\frac{f'_c}{10}\right)^{0.7} \times 10^{-3} \quad (6)$$

其中, $a = 1.25d_{\max} + 10$, d_{\max} 为混凝土的粗骨料粒径, f'_c 为混凝土的圆柱体抗压强度, G_f 单位为 N/mm^2 。

沈聚敏^[13]给出了混凝土受拉开裂应力计算公式如下

$$\sigma_{t0} = 0.26 \times (1.25f'_c)^{(2/3)} (1 - T/1000), 20^\circ\text{C} \leq T_{\max} \leq 1000^\circ\text{C} \quad (7)$$

式中: f'_c 为圆柱体抗压强度,MPa; T 为温度。

在有限元软件 ABAQUS 分析钢筋混凝土裂纹扩展中,结果分析如下内容:

(1) 受拉损伤云图(DAMAGET):在有限元软件 ABAQUS 里塑性损伤模型中,受拉损伤云图显示了混凝土受拉损伤破坏的趋势和严重程度,云图中有限单元显示颜色越深,代表混凝土单元收到拉力损伤破坏,云图的大致分布可了解板柱节点板面的混凝土开裂趋势及位置情况。

(2) 最大主塑性应变云图(PE, Max, Principal):在 ABAQUS 有限元软件中最大主塑性应变云图是显示混凝土单元的塑性应变和裂纹开展情况。如图 10(a)和图 10(b)分析,受拉损伤云图的扩展和对比试验数据混凝土裂缝扩展是基本吻合的。试验得到

的混凝土裂缝扩展是:显示裂缝向外发散,并有许多同心裂缝。发生了许多辐射裂缝。由图 10(a)混凝土受拉损伤云图和图 10(c)塑性应变云图分析得出:板柱节点的混凝土裂缝大多出现在楼板下中间位置,以柱中心向四周形成裂纹,柱周围混凝土受拉损伤分布及最大主塑性应变均下核心颜色变化最

深,依次向四周逐渐颜色变淡,说明裂纹是从柱四周向外开裂,裂缝分布情况与试验现象相符。由图 10(d)可知:板上钢筋还没有屈服,可知,但混凝土开裂发生冲切破坏时,因为板下部钢筋还未屈服,楼板还具有一定的承载力。

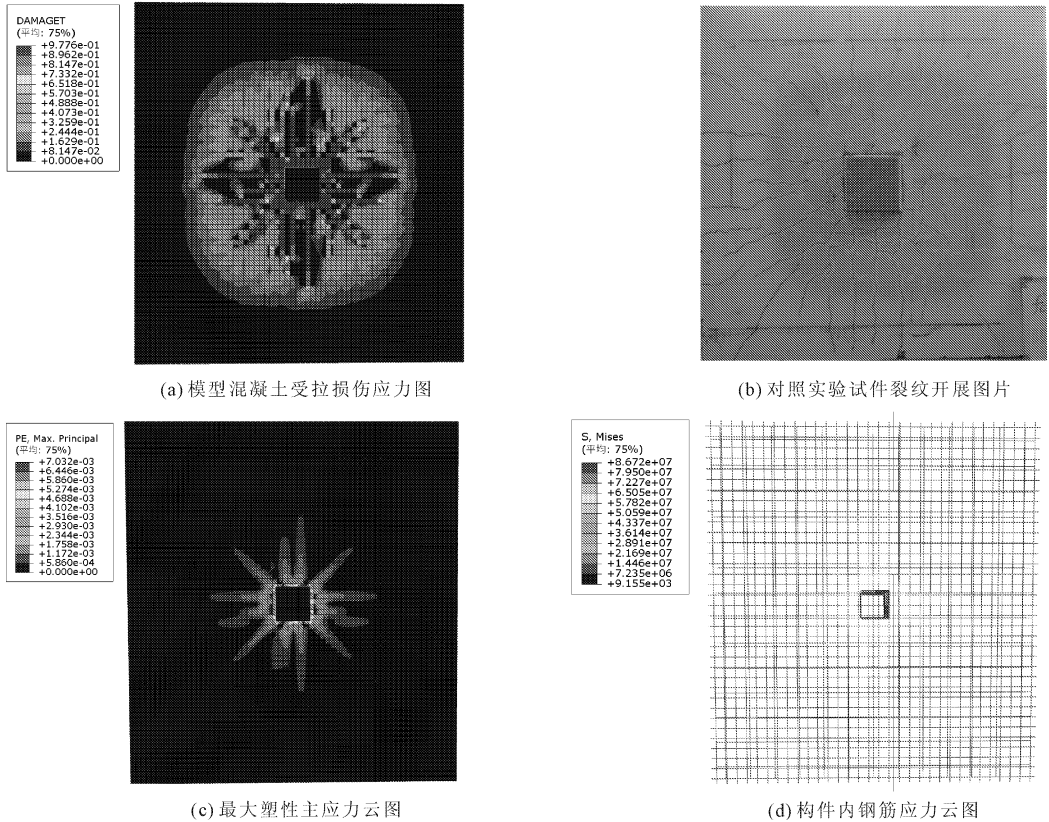


图 10 混凝土裂缝开展情况

2.3 钢筋混凝土板柱结构极限承载力分析

板柱节点在高温下的力学性能是随着温度升高不断变化的。因此在板柱模型柱端部加载位移荷载,将高温下板柱节点温度场导入,研究板柱节点的承载力情况,如图 11 所示为楼板下部受火荷载位移曲线。

从图 11 看出,当受火 120 min 时,荷载达到 1 050 kN 时,板柱节点的极限荷载随着受火时间的增加逐渐减小。

2.4 钢筋混凝土板柱结构最大主应变云图分布情况

为了研究高温下板柱节点的力学性能,研究了板柱节点下面受火荷载 120 min 联合作用下试件的损伤程度,得出了试件在不同条件下的最大主应变云图。

结果显示,第 0 步时,模型只受初始荷载无温度荷载。第 80 步时,模型板达到极限承载力。第 160 分析步时,板柱节点模型截面出现冲切椎体。第 200 步时,楼板发生破坏,楼板达到极限承载力。第 320 步时达到峰值,板柱节点内钢筋达到极限承载力最大值。

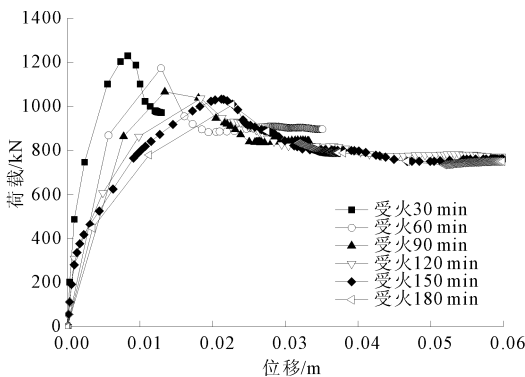


图 11 板柱节点荷载 - 位移曲线

3 结 语

钢筋混凝土板柱结构的数值模拟表明影响板柱节点的温度场参数包括升温曲线,受火时间和保护层厚度。影响高温下板柱节点的力学性能因素及破坏过程有受火荷载方式和受火时间以及影响板柱节点温度场的各种因素^[15]。基于数值分析结果,如下所列可以得出结论。

(1) 试件各测点温度模拟值与现场试验值吻合较好。高温下的热-力耦合分析板下的竖向位移与现场试验值吻合较好,板柱节点模拟裂纹扩展趋势与实验结果基本一致。

(2) 不同的保护层厚度对楼板的钢筋温度值影响非常大,随着保护层厚度的增加,相应的钢筋温度在减小,当保护层 50 mm 时,温度最低。

(3) 在 ISO834 升温曲线下,受火 2 h 后。板柱节点极限荷载是 1 050 kN;随着受火时间的增加,板柱节点的极限荷载相应的降低。

(4) 由高温下得到的板柱节点受拉损伤应力图和应变云图可以发现:板柱节点的冲切破坏也是从板柱连接处开始产生,开始是细小的裂纹,随着温度的升高,裂纹渐渐延展,直至板厚方向贯通。观察混凝土最大主应变云图可以发现,200 分析步时超过混凝土的最大主应变值,说明板柱节点处发生冲切破坏。随着温度的升高,板底钢筋先达到屈服强度,板底钢筋失效。随着板顶温度升高,板顶部的钢筋达到屈服强度,板顶钢筋失效,柱穿出楼板,发生穿透破坏。

参考文献:

- [1] 谷 凡,吴 敏,刘永军.板柱结构抗火性能研究综述[J].建筑与预算,2017(3):32-41.
[2] Arnaot F H, Abid S R, Nildem Taysi, et al. Review of con-

crete flat plate-column assemblies under fire conditions[J]. Fire Safety Journal, 2017,93:39-52.

- [3] Salem H, Issa H, Gheith H, et al. Punching shear strength of reinforced concrete flat slab subjected to fire on their tension sides[J]. HBRC Journal, 2012,8(1):36-46.
[4] Liao Renshou, Cheng Fuping, Chen Chengchi. Fire resistance of concrete slabs in punching shear[J]. Journal of Structural Engineering, 2014,140(1):71-79.
[5] 雷 华,向伟明,黄 鑫.板柱与梁板结构受力性能对比研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):217-222.
[6] Annerel E, Lu L, Taerwe L. Punching shear tests on flat concrete slabs exposed to fire[J]. Fire Safety Journal, 2013, 57(1):83-95.
[7] Lie T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1994,120(5):1489-1509.
[8] 李国强.不同升温条件下钢框架火灾性能的模拟研究[D].天津:天津理工大学,2009.
[9] Fire-resistance tests elements of building construction: ISO 834: 1975[S]. Sydney: Standards Association of Australia, 1975.
[10] 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,2003:23-25.
[11] 丁 楠,罗 漪,欧婷茹,等.火灾后外包薄壁钢管加固钢筋混凝土轴压柱力学性能的数值模拟[J].华侨大学学报(自然科学版),2017,38(2):158-163.
[12] 魏亮亮,陆洲导,俞可权,等.高温后混凝土断裂性能的试验研究及有限元分析[J].混凝土,2012(8):10-13.
[13] 沈聚敏.抗震工程学[M].中国建筑工业出版社,2015.
[14] 王建平,丁 慧,宋 力.抗冲切元件对板柱节点受力性能的影响[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):205-208.
[15] 王顺礼.不平衡弯矩下板柱节点受弯性能参数研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):54-58.