

钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点 耐火性能分析

张波^{1,2}, 秦笑笑¹, 徐光朋³, 任庆新⁴

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省交通高等专科学校建筑工程系, 辽宁 沈阳 110122; 3. 中国建筑第八工程局有限公司东北分公司, 辽宁 大连 116021; 4. 佛山科学技术学院
交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528225)

摘要 目的 研究钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点耐火性能, 为实际工程提供参考。方法 通过 ABAQUS 有限元分析软件建立 ISO-834 标准火灾下钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点的温度场模型和力学模型; 在试验与有限元模拟相吻合的基础上, 分析此类构件空间节点的温度场分布、破坏模态、变形和内力分布等工作机理。结果 由于梁板的保护作用, 节点区温度远低于非节点区; 当梁、柱火灾荷载比相同, 梁由2根增加至3根、4根时, 空间节点耐火极限分别降低了41.58%和43.75%; 高温和轴向荷载的共同作用下, 内部钢管混凝土承担内力从常温的43.27%增加至180 min的52.9%。结论 钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点具有较好的耐火性能, 能够满足实际工程中对耐火性能的要求。

关键词 钢管混凝土叠合柱; RC梁; 空间节点; 工作机理; 耐火性能

中图分类号 TU398

文献标志码 A

引用格式: 张波, 秦笑笑, 徐光朋, 等. 钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点耐火性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(2): 259-266. (ZHANG Bo, QIN Xiaoxiao, XU Guangpeng, et al. Fire resistance analysis of the space nodes for CFSTRC column-RC beam[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(2): 259-266.)

Fire Resistance Analysis of the Space Nodes for CFSTRC Column-RC Beam

ZHANG Bo^{1,2}, QIN Xiaoxiao¹, XU Guangpeng³, REN Qingxin⁴

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Department of Structural Engineering, Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang, China, 110122; 3. Northeast Branch China Construction Eighth Engineering Division Co. Ltd., Dalian, China, 116021; 4. School of Transportation, Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Foshan, China, 528225)

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808351); 沈阳市科学技术计划项目(21-108-9-34)

作者简介: 张波(1979—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事装配式建筑、道路工程及隧道工程等方面研究。

Abstract: To investigate the fire resistance of CFSTRC column-RC beam space nodes and provide a reference for practical engineering. The ABAQUS software was used to establish temperature and mechanical field models of CFSTRC column-RC beam space nodes under ISO-834 standard fire. On the basis of the results from test and FEA are in good agreement, the working mechanism of the temperature field distribution, failure mode, deformation and internal force distribution of these members' spatial nodes were analyzed. The CFSTRC column-RC beam temperature at the beam-column joint regions is well below the temperature at the non-joint regions due to the protection of the beam-slab. The fire resistance limit of the joint nodes decreases by 41.58% and 43.75% under the same load ratio of beam and column when the beam increases from 2 to 3 and 4. The core concrete filled steel tube with axial force increases from 43.27% room temperature to 52.9% at 180 min under high temperature and axial compression. CFSTRC column-RC beam space nodes have good fire resistance, which can meet engineering requirements.

Key words: CFSTRC column; RC beam; space nodes; mechanism; fire resistance

钢管混凝土叠合柱和钢筋混凝土梁组合而成的框架结构是目前工程中最常见的组合结构形式,根据梁的根数及平面位置、柱所处位置不同,可将钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点类型分为“L”形、“T”形、“十”字形等空间节点。目前针对钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点的耐火性能研究较少,实际工程中缺乏该类结构的应用。

国内外学者针对钢管混凝土叠合柱和梁-柱空间节点耐火性能进行了大量研究:徐蕾等^[1-2]和侯舒兰等^[3]分别对不同受火边界工况下的钢管混凝土叠合柱开展了耐火性能研究,并对升温阶段和降温阶段进行分析,研究表明,钢管混凝土叠合柱耐火性能主要受到受火方式和降温时间比的影响。T. Y. Song^[4]采用试验与模拟相结合的方法对CFST-钢梁节点耐火性能进行了研究,研究表明,由于外围钢筋混凝土和梁板的保护作用,节点区温度远低于非节点区温度。S. S. Huang等^[5]对CFST柱-钢梁节点的力学性能进行试验研究,结果表明,该类空间节点具有较好的延性和耐火性。周侃^[6]对轴向荷载和全过程火灾作用下的钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点进行了耐火性能的试验研究与理论分析,得出了空间节点耐火极限随不同参数的变化规律。包延红等^[7-8]对钢管混凝土叠合柱-钢筋混凝土平面框架开展研

究,结果表明,梁、柱荷载比是影响平面框架耐火性能的主要因素。宋天谕^[9]采用试验与理论相结合的方法对钢-混凝土组合框架节点进行耐火研究,结果表明,梁、柱荷载比、升温时间比等是影响耐火性能的主要因素。谭清华^[10]对型钢混凝土柱-混凝土梁在火灾全过程中的力学性能分析,结果表明,节点可能发生梁破坏、柱破坏、梁和柱均破坏的情况。丁发兴等^[11]考虑混凝土的瞬态热应变和高温徐变“CDP”模型中的非弹性应变的影响,将其应用于钢-混凝土组合结构平面框架局部火灾的抗火性能分析。

综上所述,目前针对钢-混凝土组合结构的耐火性能研究主要集中在柱、梁柱平面节点和平面框架,缺乏广泛应用于实际工程的钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点的耐火性能研究。鉴于此,笔者考虑实际受火边界工况,按照节点所处位置设计不同的受火边界工况,采用ABAQUS有限元分析软件分析了其空间节点在火灾下的温度场、耐火性能以及节点破坏模式;研究表明:钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点具有较好的耐火性能,能够满足实际工程中对耐火性能的要求。

1 有限元模型

1.1 模型建立

基于ABAQUS有限元分析软件,通过

“热-力顺序耦合”的方法进行耐火性能的研究。分析模型中外环板式牛腿、钢管和加载端板均选用壳单元,混凝土选用实体单元,钢筋选用桁架单元。钢与混凝土材料的热工参数选用 T. T. Lie^[12] 建议的热工模型计算式。笔者参考实际梁、柱节点所处建筑内部的位置不同,假设钢管混凝土叠合柱四周以及楼板以下所受火灾作用以建筑构件耐火试验方法^[13] 为参考。综合辐射系数取 0.5, 热对流系数在受火面取 $25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 在背火面取 $9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。忽略接触面的热阻, 钢管与混凝土采用“Tie”约束, 钢筋“Embed”混凝土中。钢材选取文献[14]所建议的本构模型, 钢管外围混凝土、梁和板混凝土均采用文献[14]所建议的本构关系, 圆钢管内部核心混凝土选用文献[15]建议的本构关系。对于钢管与混凝土采用面接触, 在其法向采用“硬接触”, 在其切向采用摩擦系数为 0.6 的罚摩擦, 外环板与钢管外表面通过“Tie”约束, 牛腿“Embed”混凝土中。为将有限元模型得到的温度场 (ODB) 文件正确地

导入力学分析模型中, 需要保持两个模型中的网格划分一致。对于混凝土高温徐变和瞬态热应变, 针对硅质混凝土, 参考文献[6]研究成果, 笔者不考虑高温徐变和瞬态热应变的影响; 参考文献[7, 11]所取得成果, 将过镇海^[16] 建议的高温徐变和瞬态热应变叠加至“CDP”模型中的非弹性应变。

1.2 模型验证

由于篇幅有限, 笔者仅展示具有代表性的试验结果与有限元模拟计算结果, 对比温度场具体详见文献[6-7]。

1.2.1 钢管混凝土叠合柱

对文献[6]中钢管混凝土叠合柱耐火试验进行有限元计算, 其中混凝土为硅质混凝土, 具体参数详见文献[6]。图 1(a) 为 S0 组试件截面温度-时间试验关系曲线与有限元模拟曲线对比, 图 1(b) 为 S0 组试件竖向位移-受火时间关系试验曲线与有限元模拟曲线对比。耐火极限试验结果与模拟结果比值的平均值和方差为 0.998 和 0.008, 可见有限元模拟结果可较好地反映试验结果。

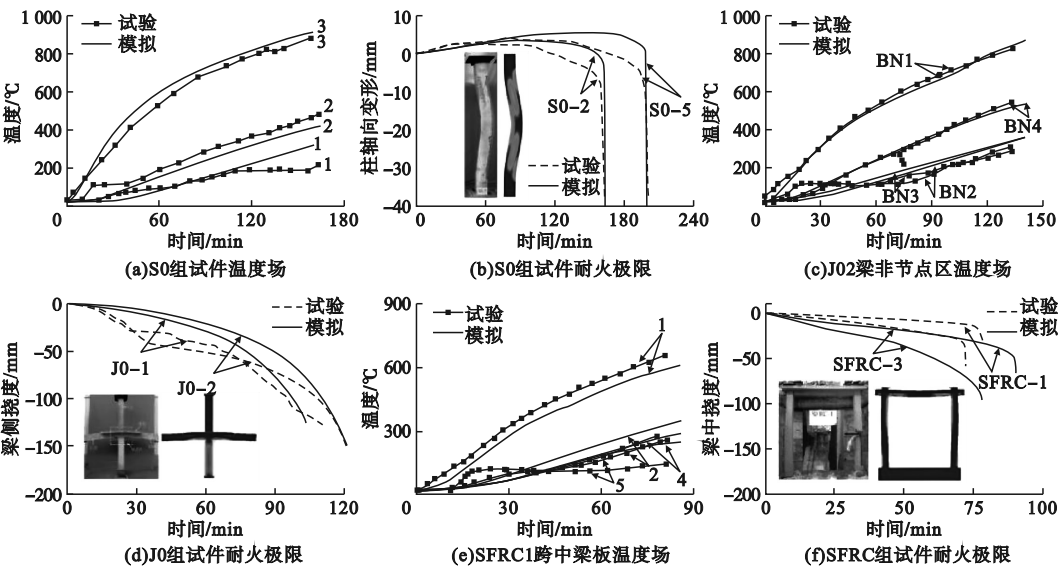


图1 温度场和耐火极限对比

Fig. 1 The comparison results of temperature field and fire resistance limit

1.2.2 钢管混凝土叠合柱-RC梁板节点

选取文献[6]中钢管混凝土叠合柱-RC梁板节点耐火试验进行有限元分析, 其边界

条件为板底受火, 板上部外包石棉, 柱端固接。图 1(c) 为试件 J0-2 梁非节点区温度-受火时间关系曲线, 图 1(d) 为 J0 组试件竖

向位移-受火时间关系试验曲线与有限元模拟结果对比。耐火极限试验结果与模拟结果比值的平均值和方差为 1.045 和 0.05,可见有限元计算结果吻合度较好。

1.2.3 钢管混凝土叠合柱平面框架

选取文献[7]所进行的平面框架耐火性能试验进行有限元模拟,其采用的混凝土为钙质混凝土,选用文献[11]方法考虑混凝土高温徐变和瞬态热应变。图 1(e)为试件 SFRC-1 梁板跨中处温度-受火时间关系曲线,图 1(f)为 SFRC 组试件梁跨中挠度-受火时间关系曲线与 SFRC-1 的破坏模式对

比。耐火极限试验结果与有限元模拟结果比值的平均值和方差分别为 0.901 和 0.038,可见有限元模拟结果与试验值的吻合度较好。

2 耐火性能分析

2.1 模型设计

以周侃^[6]根据钢管混凝土叠合柱结构技术规程^[17]所设计的梁、板、柱的主要参数为参考,笔者所设计的钢管混凝土叠合柱空间节点的受火工况及荷载比见表 1、设计方案见表 2。由于篇幅有限,空间节点具体的受火工况、边界条件和加载方式见图 2。

表 1 空间节点受火工况及荷载比

Table 1 The fire conditions and load ratio of space nodes

节点类型	部件名称	受火工况	荷载比
“L”形空间节点	柱	双面	0.4、0.8
	梁	双面	0.5、0.2
“T”形空间节点	柱	三面	0.4、0.8
	梁	三面、双面	0.5、0.2
“十”字形空间节点	柱	四面	0.4、0.8
	梁	三面	0.5、0.2

表 2 空间节点设计方案

Table 2 The design scheme of space nodes

部件	各部件截面尺寸/mm	抗压强度/MPa	纵筋型号	箍筋型号	屈服强度/MPa
柱	$B_C \times B_C \times H(600 \times 600 \times 6\,000)$	50+80	16 Φ 25	Φ 10@100	400
梁	$B_L \times H_L \times L(400 \times 600 \times 4\,000)$	50	8 Φ 25+4 Φ 22	Φ 8@100/200	400
板	$B \times t(8\,600 \times 120)$	50	—	双层 Φ 10@150	300
钢管	$D_S \times t_S(300 \times 10)$	—	—	—	345
牛腿	$B_n \times H_n \times t_n(500 \times 225 \times 10)$	—	—	—	345

注: B_C 、 H 分别为柱的方形柱的截面边长、柱高; B_L 、 H_L 、 L 分别为梁的宽、高、长; B 、 t 分别为楼板宽和厚; D_S 、 t_S 分别为钢管直径、厚度; B_n 、 H_n 、 t_n 分别为牛腿的高、宽、厚。

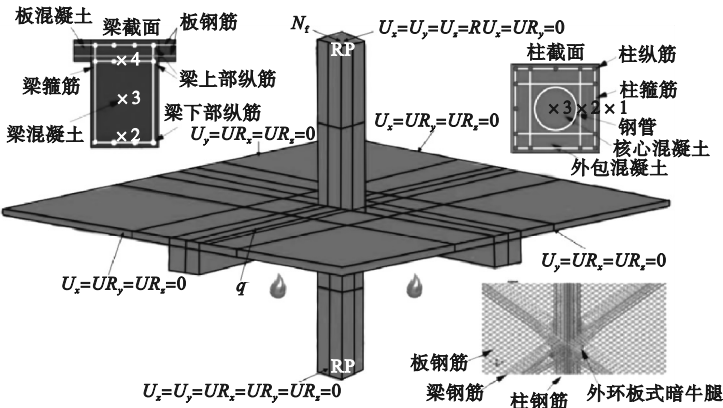


图 2 火灾工况及加载条件

Fig. 2 The on-fire conditions and loading conditions

2.2 计算结果分析

2.2.1 空间节点温度场

图3为构件截面温度-时间($T-t$)关系曲线,其中图3(a)为钢管混凝土叠合柱温度-时间关系曲线。升温240 min时,非节点区测点1处温度610℃远高于节点区温度420℃,这是由于节点区受到外围钢筋混凝土和梁板的保护作用,其测点温度普遍低于

非节点区的温度。图3(b)为梁跨中截面温度-时间关系曲线。由于梁底部处于均匀受火的边界条件,升温240 min时,测点1处的温度为918℃,而测点4处的温度还不足300℃。混凝土具有较好的吸热性能,随着测点距离梁下表面越近,其温度越高,越远离梁下表面,温度越低。

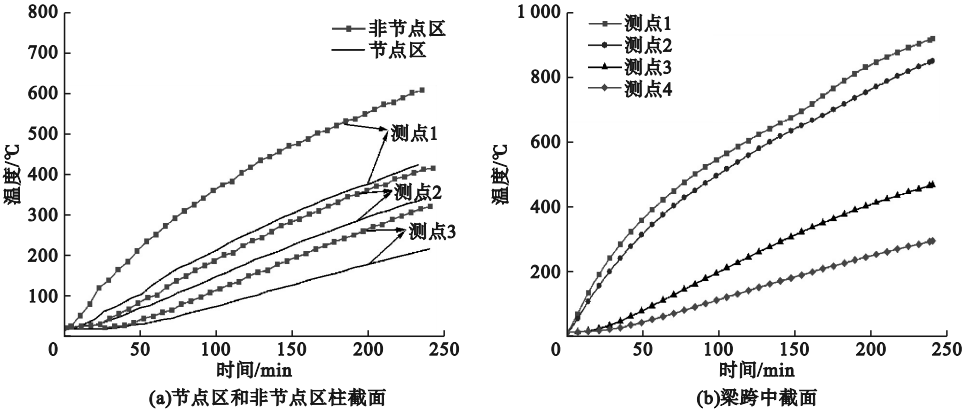


图3 构件截面温度(T)-时间(t)关系曲线

Fig. 3 The curves of sectional temperature T -time t

2.2.2 空间节点变形

图4为钢管混凝土叠合柱-RC梁板空间节点在不同梁、柱荷载比作用下,空间典型节点的竖向位移(Δ)-受火时间(t)关系曲线。试件编号中L表示梁,其后数字分别表示梁

的根数和梁荷载比;Z表示柱,其后数字表示柱荷载比。如试件编号(a)L2-Z04-L05表示为空间节点有2根梁、柱荷载比为0.4、梁荷载比为0.5。

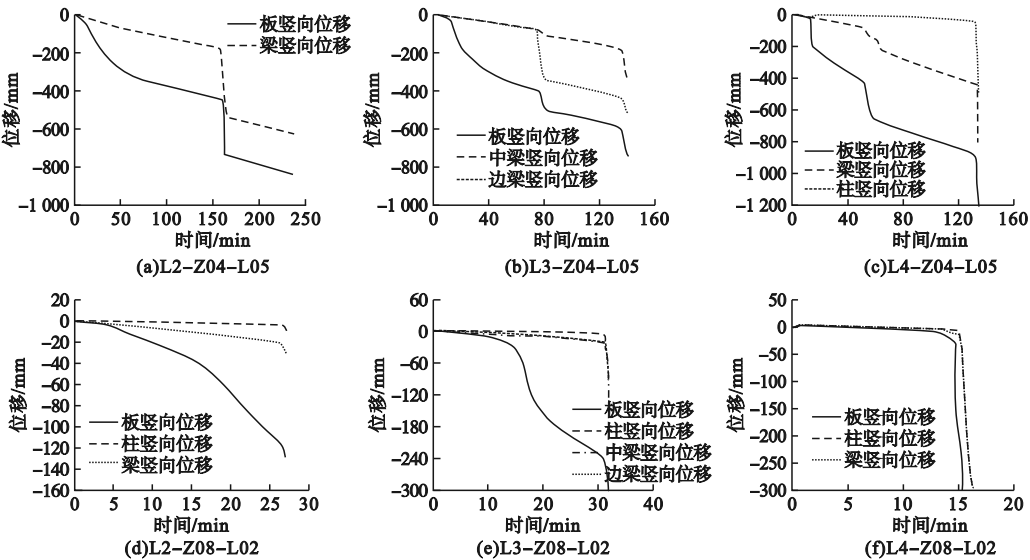


图4 竖向位移-受火时间关系曲线

Fig. 4 The curves of vertical displacement-fire time

由图4可见,空间节点的主要破坏形式有梁破坏、梁与柱先后破坏、柱破坏三种形式。

(1)对于柱的耐火极限大于梁时的空间节点,其梁端竖向位移-受火时间关系曲线可能会呈现“Z”字形。这是由于梁挠曲变形增大后,梁上部受压钢筋转变为受拉钢筋,进而抑制梁的挠曲变形,随着受火时间的增加,梁会出现“二次破坏”的情况。但由于忽略梁在大变形下产生的裂缝,其耐火极限计算值可能偏高。

(2)对于“T”形空间节点,虽然边(东西)梁处于双面受火、中(北)梁处于三面受

火,但边(东西)梁的竖向位移在“一次破坏”后的竖向位移要远大于中(北)梁的竖向位移。

(3)在相同的梁、柱荷载比下,当梁根数由2增加到3和4时,空间节点的耐火极限分别降低了41.58%和43.75%,空间节点的耐火极限随着梁根数的增加而减少。

2.2.3 空间节点破坏模式

图5为钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点在不同的梁、柱荷载比和受火工况作用下,空间典型节点的等效塑性应变云图,可见牛腿区域存在较大的塑性变形。

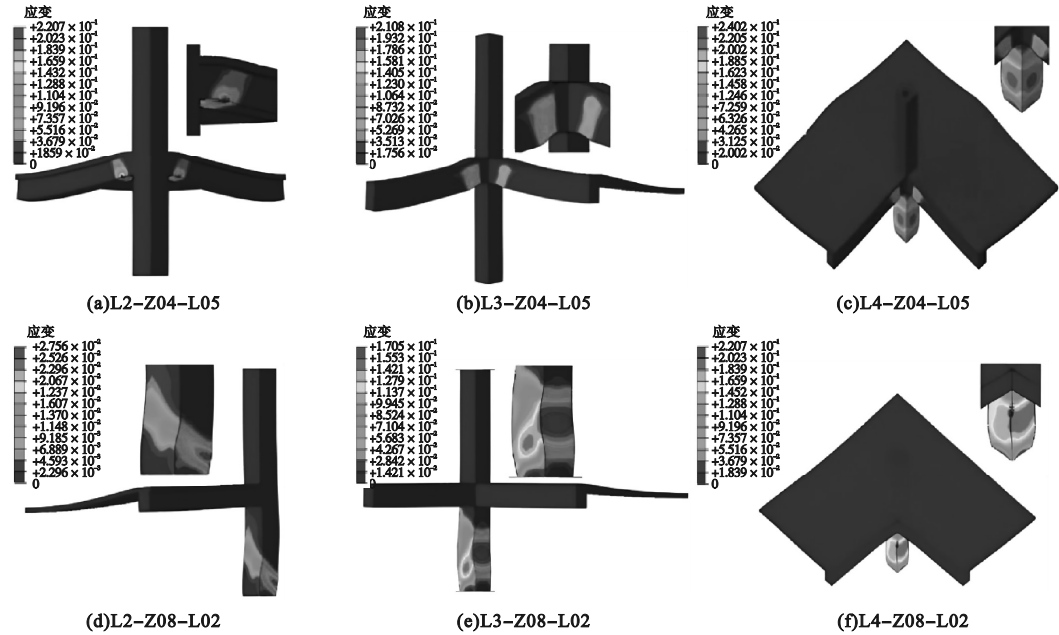


图5 空间节点等效塑性应变云图

Fig. 5 The equivalent plastic strain cloud map of space nodes

(1)对于“L”形空间节点。由于梁均处于双面受火,因温度场分布不呈单轴对称和材料在不同温度下的劣化程度不同,梁会出现不均匀的内力重分布,导致梁会出现一定程度的扭转变形;由于柱处于双面受火和双向压弯的共同作用,破坏时呈现典型的“双向压弯”破坏特征。

(2)对于“T”形空间节点。由于边(东、西)梁处于双面受火、中(北)梁处于三面受火、柱处于三面受火的工况。虽然梁上的荷

载一样,但由于南侧无梁布置,可能导致双面受火的边(东、西)梁在“一次破坏”后的竖向位移远大于三面受火的中(北)梁;由于柱处于三面受火、单向偏压的工况下,柱在破坏时呈现典型“压弯”破坏特征。

(3)对于“十”字形空间节点。由于梁均处于三面受火,当梁的耐火极限小于柱时,各梁的破坏模态与耐火极限均相同;当柱的耐火极限小于梁时,由于初始缺陷的存在,可见柱呈现典型的“压弯”破坏特征。

2.2.4 空间节点内力

图6为钢管混凝土叠合柱轴力-时间关系曲线。在火灾作用下,构件受热膨胀,钢管混凝土叠合柱在高温和外部轴向荷载的作用下引起截面内力重分布。受火初期:核心钢管混凝土和外围钢筋混凝土分别承担轴向荷载的43.27%和56.73%;火灾发展阶段:外围钢筋混凝土材料由于持续高温发生严重的劣化现象,承载能力减弱,不足以承担大量外部轴向荷载,外部荷载逐渐向内传递,核心钢管混凝土承担大部分内力,并逐渐趋于平缓,截面内力出现重分布的现象。此时核心钢管混凝土和钢筋混凝土分别承担轴向荷载的52.9%和47.1%。

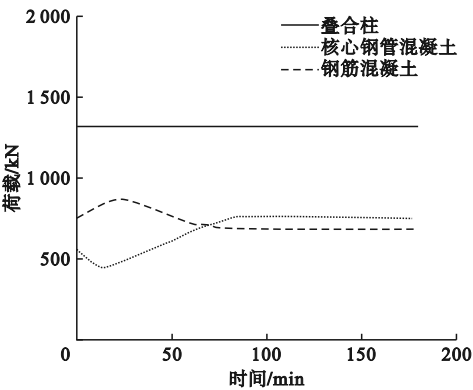


图6 轴力-时间关系曲线

Fig. 6 The axial force-time curves

图7为梁跨中截面弯矩-时间关系曲线。在火灾全过程中,RC梁跨中截面由于火灾和荷载作用下发生了弯矩重分布的现象。

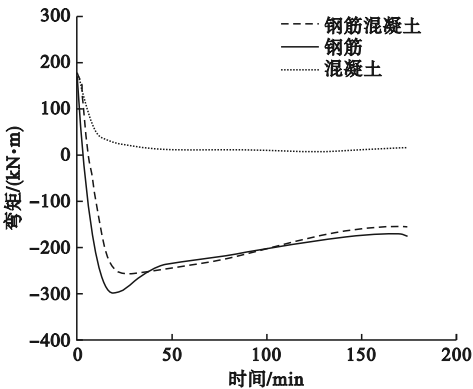


图7 梁跨中弯矩-时间关系曲线

Fig. 7 The moment-time curves of beam

象。常温加载后,RC梁底部受拉;受火作用阶段,由于叠合柱的约束作用,RC梁底部受火发生膨胀,此时在一定程度上削弱了梁底部的弯矩大小;随着受火作用的持续,梁底部出现负弯矩,此时拉弯矩为300 kN·m;随着持续高温,发生材料劣化,负弯矩逐渐减小,直至180 min时弯矩为170 kN·m。

3 结 论

(1)钢管混凝土叠合柱-RC梁空间节点由于其受火工况、构造形式和梁、柱荷载比等条件的复杂性,进而导致“L”形、“T”形、“十”字形空间节点的,破坏主要形式有梁破坏、梁和柱先后破坏、柱破坏。

(2)当梁、柱火灾荷载比相同时,梁由2根增加至3根、4根时,空间节点耐火极限分别降低了41.58%和43.75%;空间节点耐火极限随着梁根数的增加而减低。

(3)当柱的耐火极限远大于梁时,随受火时间的增加,梁会出现“二次破坏”的情况;由于梁竖向变形增大后,梁上部受压钢筋转变为受拉,进而抑制梁的竖向位移,其梁端竖向位移-受火时间关系曲线呈现“Z”字形。

(4)由于高温和轴向荷载的共同作用,空间节点内力出现重分布的现象,外围钢筋混凝土和核心钢管混凝土分别由56.73%和43.27%重分布为47.1%和52.9%,在受火后期,外部荷载主要转移至内部钢管混凝土。

参考文献

[1] 徐蕾,王明涛,王文达. 钢管混凝土叠合柱非均匀受火性能研究[J]. 自然灾害学报,2014,23(4):263-269.
(XU Lei, WANG Mingtao, WANG Wenda. Research on the non-uniform fire performance of concrete filled steel tube reinforced concrete (CFSTRC) column [J]. Journal of natural disasters,2014,23(4):263-269.)

[2] 徐蕾,刘玉彬. 钢管混凝土叠合柱耐火性能研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(6):33-41.

- (XU Lei, LIU Yubin. Research on fire resistance of SFSTRC columns subjected to fire [J]. Journal of building structures, 2014, 35(6): 33–41.)
- [3] 侯舒兰. 均匀受火下钢管混凝土叠合柱耐火性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
(HOU Shulan. Research on fire resistance of concrete-encased CFST column on all sides [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.)
- [4] 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.
- [5] HUANG S S, DAVISON B, BURGESS I W. Experiments on reverse-channel connections at elevated temperatures [J]. Engineering structures, 2013, 49: 973–982.
- [6] 周侃. 钢管混凝土叠合柱-RC梁节点耐火性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
(ZHOU Kan. Fire performance of concrete-encased concrete filled steel tubular column-RC beam joints [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.)
- [7] 包延红. 钢管混凝土叠合柱平面框架结构耐火性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
(BAO Yanhong. Research on behavior of concrete filled steel tube reinforced concrete plane frames subjected to fire [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.)
- [8] 包延红, 孙建刚, 王文达, 等. 钢管混凝土叠合柱-钢筋混凝土梁平面框架耐火性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊1): 47–53.
(BAO Yanhong, SUN Jiangang, WANG Wenda, et al. FEA on CFSTRC column-reinforced concrete beam plane frames subjected to fire [J]. Journal of building structures, 2015, 36(S1): 47–53.)
- [9] 宋天谕. 火灾后钢-混凝土组合框架梁-柱节点的力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
(SONG Tianyi. Research on post-fire performance of steel-concrete composite beam-column joints [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.)
- [10] 谭清华. 火灾后型钢混凝土柱、平面框架力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
(TAN Qinghua. Performance of steel reinforced concrete (SRC) column and portal frame after exposure to fire [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.)
- [11] 丁发兴, 周政, 王海波, 等. 局部火灾下多层钢-混凝土组合平面框架抗火性能分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 23–32.
(DING Faxing, ZHOU Zheng, WANG Haibo, et al. Fire performance analysis of multi-story steel-concrete composite plane frame under local fire [J]. Journal of building structures, 2014, 35(6): 23–32.)
- [12] LIE T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of structural engineering, 1994, 120(5): 1489–1509.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑构件耐火试验方法: 第1部分: 通用要求: GB/T 9978. 1—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Fire-resistance tests-elements of building construction-part 1: general requirements: GB/T 9978. 1—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.)
- [14] LIE T T, CHABOT M. A method to predict the fire resistance of circular concrete filled hollow steel columns [J]. Journal of fire protection engineering, 1990, 2(4): 111–124.
- [15] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2012.)
- [16] 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 Zhenhai, SHI Xudong. Behavior of reinforced concrete at elevated temperature and its calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [17] 清华大学. 钢管混凝土叠合柱结构技术规程: T/CECS188—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
(Tsinghua University. Technical specification for steel tube-reinforced concrete column structure: T/CECS188—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)