

双向偏压方钢管混凝土柱三面受火耐火性能有限元分析

张波^{1,2},徐光朋¹,任庆新¹,刘香余¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 辽宁清创高科建筑工业化咨询有限公司,辽宁 沈阳 110179)

摘要 目的 研究双向偏压方钢管混凝土柱在三面受火作用下的耐火性能,为该类型结构的工程应用提供理论依据。方法 采用 ABAQUS 软件建立双向偏压方钢管混凝土柱三面受火的热学分析模型与力学分析模型,分析其受力机理及常见参数对其耐火极限的影响。结果 荷载偏心角、荷载比、长细比、截面边长和偏心率是影响构件耐火极限的主要参数,荷载偏心角越大,荷载比越大,长细比越大,截面边长越小,其耐火极限越小。偏心率在 0~0.3 区间存在明显的极强中心,其耐火极限最大,可比轴压时提高 80% 以上。结论 在参数分析范围内,提出的耐火极限简化计算公式与有限元计算结果吻合较好。

关键词 双向偏压;方形截面;钢管混凝土柱;三面受火;耐火极限

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Finite Element Analysis on Fire Resistance of Square CFST Columns with Biaxial Eccentric Loading under Fire on Three-surface

ZHANG Bo^{1,2}, XU Guangpeng¹, REN Qingxin¹, LIU Xiangyu¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Qingchuang High-tech Building Industrialization Consulting Co. Ltd., Shenyang, China, 110179)

Abstract: The fire resistance performance of square concrete-filled steel tubular (CFST) columns with biaxial eccentric loading under fire on three-surface is studied to provide a theoretical basis for the application of this type of structure in engineering. The thermal analysis model and mechanical analysis model of square CFST columns with biaxial eccentric loading under fire on three-surface are established by ABAQUS, and its stress mechanism and the influence of common parameters on its fire resistance limit are analyzed. Load eccentric angle, load ratio, slenderness ratio, section side length and eccentricity are the main parameters that affect the fire resistance of members. The greater the load eccentric angle, the load ratio and the slenderness ratio, the smaller the side length

收稿日期:2022-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51808351)

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。

of the section, and the smaller the fire resistance limit. When the eccentric ratio is $0 \sim 0.3$, there is a very strong center, and the maximum fire resistance can be increased by more 80% than that of the axial pressure. Within the range of parameter analysis, the simplified calculation formula of fire resistance limit proposed is in good agreement with the results of finite element calculation.

Key words: biaxial eccentric loading; square section; concrete-filled steel tubular (CFST) column; three-surface fire; fire resistance limit

近年来,由于方钢管混凝土柱的设计形式简单、利于施工、布局灵活等优点,被很多建筑物和构筑物所采用,相应地对其耐火性能研究也越来越多。根据建筑内部结构布局,建筑内部结构柱的受火方式不局限于四面受火,其受火方式还包括三面受火等情况^[1]。对此,国内外学者对钢管混凝土柱在三面受火下的耐火性能进行了大量的试验与理论研究。吕学涛等^[1]和 H. Guo 等^[2]指出构件的几何参数和物理参数是影响温度场分布和耐火极限的主要参数。肖会霞等^[3]和 H. Yang 等^[4]指出受火面增多、荷载比增大和截面温度分布不均匀导致的不均匀膨胀变形削弱了构件的耐火性能。叶友林等^[5]和张玉琢等^[6]指出荷载偏心率对耐火极限影响最高可达 50%。张玉琢等^[7]和 Y. Yao 等^[8]指出空心率越大,长细比越大,耐火极限越小。F. Meng 等^[9]指出刚度中心的改变使其破坏形式由局部屈曲变为整体失稳。

上述国内外学者的试验和理论研究^[1-9]大多针对于轴压和偏压结构柱,当结构柱在水平荷载作用下产生的附加偏心距和荷载偏心角使结构柱转为双向偏压时,现行设计方法的安全性需进一步探讨。基于此,笔者为探究双向偏压方钢管混凝土柱在三面受火下的耐火性能,运用性能化结构耐火设计方法^[10]研究几何参数和荷载参数对其耐火性能的影响规律,以影响耐火极限的主要参数为变量,以耐火极限有限元计算结果为样本,得到耐火极限简化计算方法,并与有限元计算结果进行对比分析,验证简化计算方法的合理性。

1 有限元模型建立

采用 ABAQUS“热-力顺序耦合”方法,建立方钢管混凝土柱力学和热学分析模型。

在力学分析模型中^[3],混凝土和钢管均采用实体单元(C3D8R),钢管与混凝土接触面法向约定为硬接触,切向摩擦系数定为 0.6 的库伦摩擦;混凝土和钢材分别选择韩林海^[11]和 T. T. Lie 等^[12]建议的升温阶段本构关系;将参考点分别与柱底和柱顶表面耦合,对柱顶参考点施加轴向荷载或位移,初始偏心距按构件高度 1/1 000 取值^[13-14]。

在热学分析模型中^[7],混凝土和钢管均采用实体传热单元(DC3D8),采用绑定约束模拟钢管与混凝土之间的传热;受火面和背火面热对流系数分别取 25 和 9 W/(m²·℃),受火面和背火面综合辐射系数取 0.5;升温曲线选取 ISO-834^[15];混凝土和钢材选择 T. T. Lie^[16]建议的热工参数。方钢管混凝土柱有限元模型及受火方式如图 1 所示。

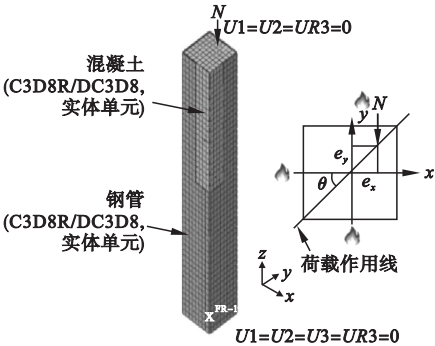


图 1 有限元模型及受火方式

Fig. 1 Finite element analysis model and case of fire exposure

2 有限元模型验证

2.1 常温力学性能

笔者对文献[17]、文献[18]中双向偏压方钢管混凝土柱试验结果进行计算,图2为试件荷载(N) - 挠度(u_m)曲线对比。图3为试件承载力计算值(N_{uc})和实测值(N_{uc})对比。可见,模型可较好地预测双向偏压钢管混凝土柱常温力学性能。

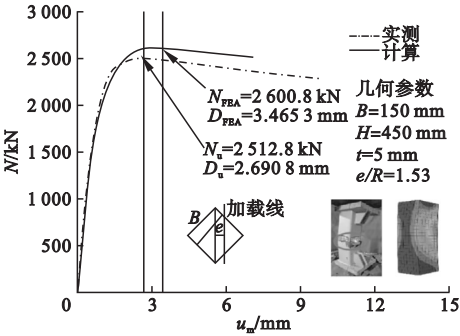


图2 试件荷载 - 挠度曲线

Fig. 2 Load-deflection curve of test piece

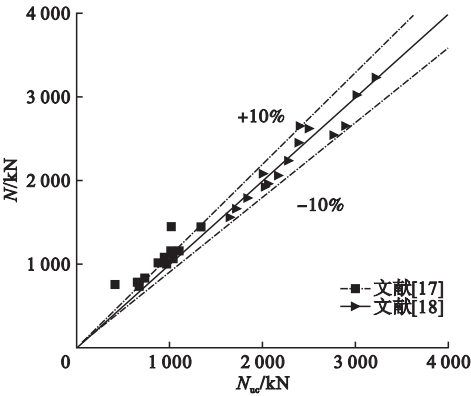


图3 试件承载力计算值和实测值对比

Fig. 3 Comparison of bearing capacity calculation and actual measurement

2.2 耐火性能

对文献[19]中方钢管混凝土柱在三面受火下的试验结果进行计算,图4为试件测点温度(T) - 受火时间(t)变化曲线对比,图5为试件轴向变形(Δ_c) - 受火时间(t)变化曲线对比。可见,模型可较好地预测方钢管混凝土柱在三面受火下的耐火性能。

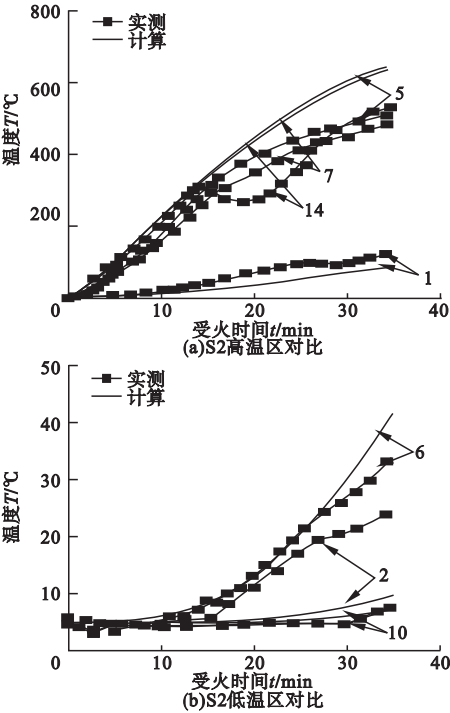


图4 试件测点温度 - 受火时间变化曲线

Fig. 4 Temperature-fire time change curve of test piece measuring point

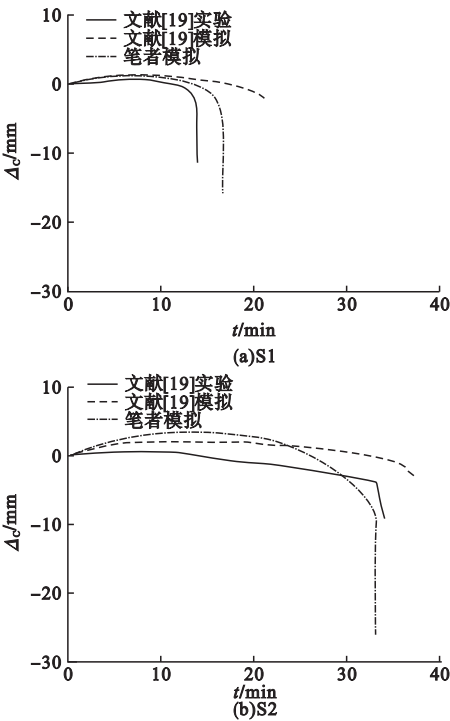


图5 试件轴向变形 - 受火时间变化曲线

Fig. 5 Axial deformation-fire time curve of test piece

3 受力机理

典型构件设计参数: 截面边长 $B = 500\text{ mm}$ 、长细比 $\lambda = 20$ 、含钢率 $\alpha = 0.1$ 、荷载偏心角 $\theta = 45^\circ$ 、偏心率(靠近背火面为正) $e = \pm 0.4$ 、混凝土为 C50、钢管屈服强度为 235 MPa 、荷载比 $n = 0.5$ 。

3.1 受火方式

图 6 为不同受火方式下构件轴向变形 (Δ_c) - 受火时间 (t) 变化曲线对比。

受火面减少使构件吸收热量速率减小, 背火面增加使构件散去热量速率增加, 导致四面受火下构件的耐火极限小于三面受火。

正向偏心时, 加载点靠近背火面, 此时低温受压区分担大部分荷载; 负向偏心时, 加载点靠近受火面, 此时高温受压区分担大部分荷载, 导致正向偏心时构件的耐火极限大于负向偏心。

可见, 四面受火下构件的耐火极限小于三面受火。负向偏心时构件的耐火极限小于正向偏心。

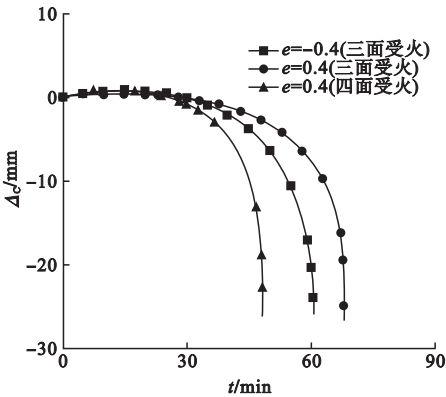


图 6 不同受火方式下构件轴向变形 - 受火时间变化曲线

Fig. 6 Variation curve of axial deformation-fire time of members under different fire condition

3.2 内力分析

图 7 为构件各组分内力 (N) - 受火时间 (t) 变化曲线对比, 其中压力为正值。常温加载结束时, 钢管承担 55.6% 的外荷载, 随着

受火时间的增加, 钢管在正向偏心时最多承担 75.93% 的外荷载, 钢管在负向偏心时最多承担 72.67% 的外荷载。

在受火初期, 钢管相对温度较高, 其高温膨胀变形大于混凝土, 钢管分担内力增大, 混凝土分担内力减小。在受火中后期, 钢管温度不断升高, 钢材因高温劣化导致强度降低, 钢管分担内力减小, 混凝土分担内力增大。

可见, 随着受火时间的增加, 钢管分担的内力先增大再减小, 混凝土分担的内力先减小再增大。

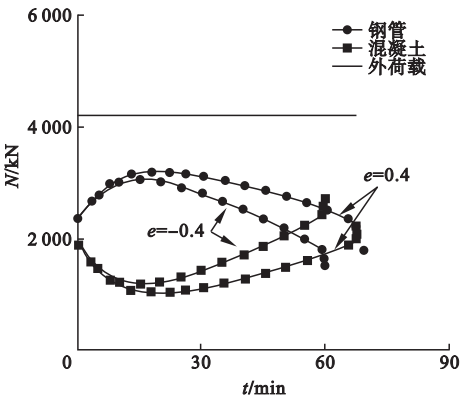


图 7 构件各组分内力 - 受火时间变化曲线
Fig. 7 Test piece's each component internal force-fire time curve

3.3 轴向变形分析

图 8 为构件轴向变形 (Δ_c) - 受火时间 (t) 变化曲线对比, 其中轴向压缩变形为负值, 轴向膨胀变形为正值。构件轴向变形变化趋势可分为:

- (1) 膨胀阶段。随着受火时间增加, 构件热膨胀变形增大, 使构件沿轴向伸长。
- (2) 加速变形阶段。随着受火时间继续增加, 材料高温劣化加速发展, 构件的轴向压缩变形, 使构件沿轴向收缩。
- (3) 破坏阶段。随着受火时间继续增加, 构件的轴向压缩变形加速发展, 不能承受荷载, 发生强度破坏, 轴向变形与受火时间关系曲线近似垂线。

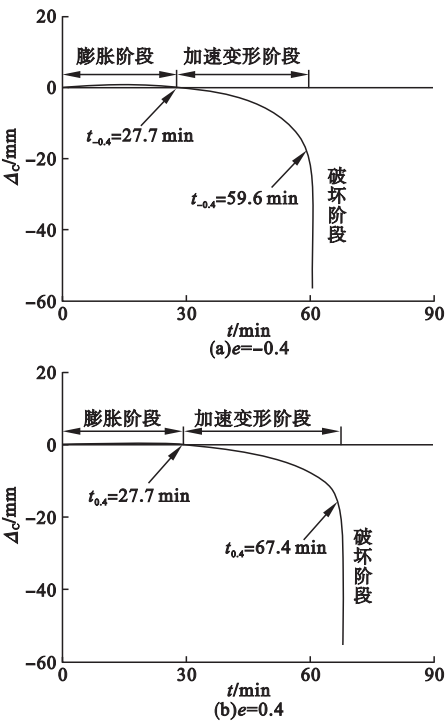


图 8 构件轴向变形 - 受火时间变化曲线

Fig. 8 Axial deformation-fire time curve of member

3.4 应变分析

图 9 为升温破坏时刻构件柱中截面轴向应变分布图,其中轴向压应变为负值,轴向拉应变为正值。

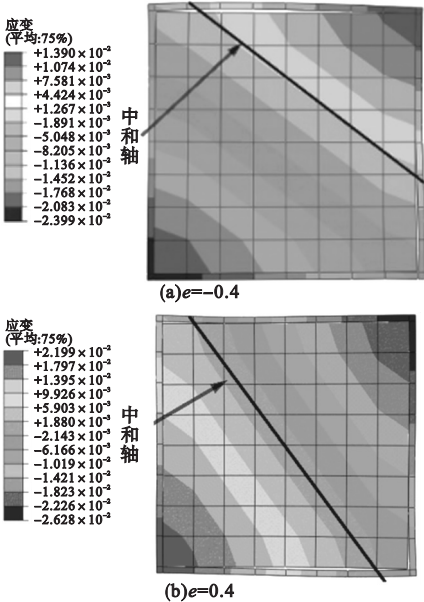


图 9 构件柱中截面轴向应变分布图

Fig. 9 Axial strain distribution map at middle height of steel tube

(1)轴向应变呈“条带”状分布,混凝土最大轴向应变主要集中于“中和轴”受压区及受拉区角部,此区域混凝土易压溃和开裂。

(2)钢管受拉侧和受压侧产生指向“中和轴”方向应变,使“中和轴”上角部钢管产生沿“中和轴”方向应变,导致在“中和轴”上角部钢管“局部鼓曲”与混凝土分离,受火面鼓曲更为明显。

可见,“中和轴”两侧受压区和受拉区角部混凝土易发生破坏,“中和轴”上角部钢管易“局部鼓曲”与混凝土分离。

3.5 应力分析

图 10 为升温破坏时刻构件柱中截面钢管轴向应力(σ_s) - 受火时间(t)变化曲线,其中轴向压应力为负值,轴向拉应力为正值。

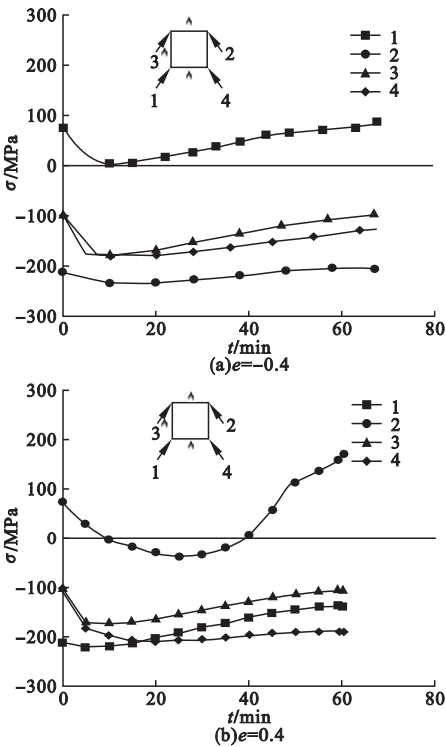


图 10 构件柱中截面钢管轴向应力 - 受火时间关系曲线

Fig. 10 Axial stress-Fired time curve of steel pipe in the middle section of component column

(1)在受火初期,钢管温度相对较高,其高温膨胀变形大于混凝土,使钢管压应力增大,拉应力减小。

(2)在受火中后期,钢管温度持续升高,钢材因高温劣化导致强度降低,使钢管的压应力减小,拉应力增大。

4 参数分析

对影响双向偏压方钢管混凝土柱三面受火耐火极限的荷载偏心角、偏心率、荷载比、长细比和截面边长等主要参数进行分析。

4.1 荷载偏心角

荷载偏心角对构件的耐火极限影响见图 11(a)。正向偏心时,加载点随荷载偏心角增大而移向高温区,低温区分担内力减少,极强偏心率由 0.3 下降至 0.1,耐火极限最大值由 104.71 min 下降至 61.12 min。负向偏心时,加载点位于高温区,耐火极限变化较弱。

可见,随着荷载偏心角增大,构件的耐火极限减小,极强偏心率减小。

4.2 荷载比

荷载比对构件的耐火极限影响见图 11(b)。随着荷载比增大,构件的耐火极限的

最大值由 174.77 min 下降至 29.94 min,构件的极强偏心率由 0.15 下降至 0.1。荷载比为 0.5 时,出现构件耐火极限小于轴压下耐火性极限的情况。

可见,随着荷载比增大,构件的耐火极限减小,极强偏心率减小。

4.3 长细比

长细比对构件耐火极限的影响见图 11(c)。随着长细比增大,构件的耐火极限最大值由 71.84 min 下降到 48.88 min,构件的极强偏心率由 0.1 下降到 0。

可见,构件长细比越大,其耐火极限越小,极强偏心率越小。

4.4 截面边长

截面边长对构件耐火极限的影响见图 11(d)。随着截面边长增大,构件的耐火极限最大值由 48.13 min 上升到 85.64 min,构件的极强偏心率保持 0.1 不变,截面边长对耐火极限(t_R) - 偏心率(e)曲线发展趋势保持不变。

可见,构件截面边长越大,其耐火极限越大。

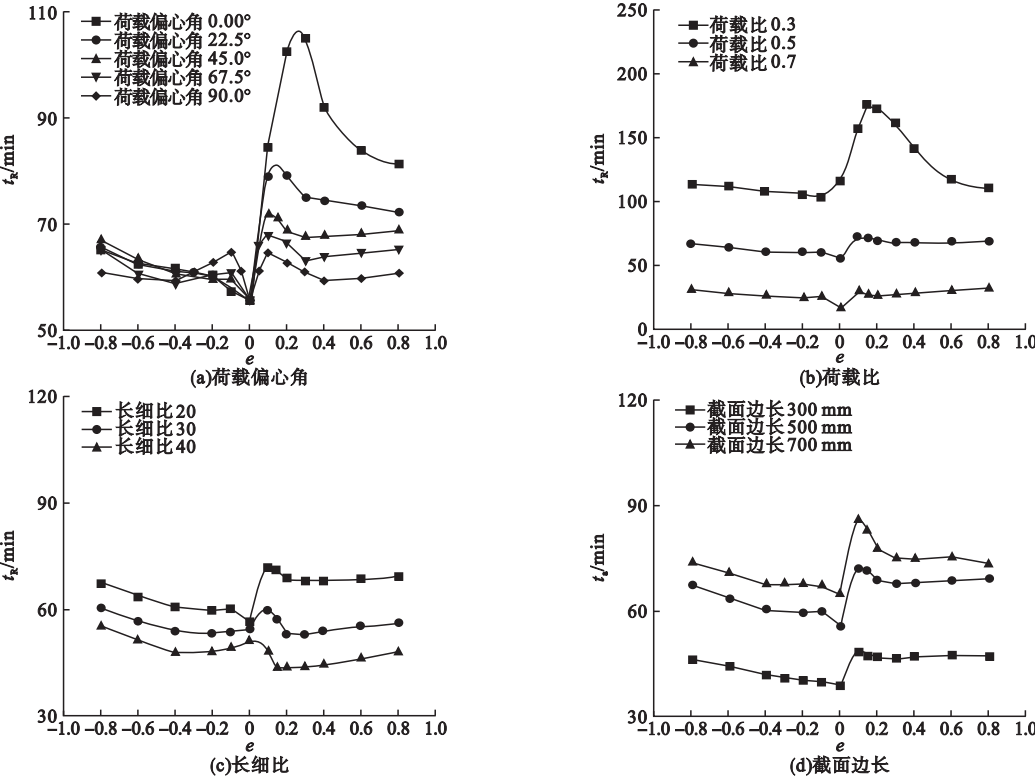


图 11 不同参数对耐火极限影响

Fig. 11 Influence of different parameters on fire resistance limit

5 耐火极限实用计算公式

由参数分析可知,长细比、截面尺寸、荷载比、荷载偏心角和荷载偏心率是影响构件耐火极限的主要参数。荷载偏心率对其耐火极限的影响较为复杂,故将荷载偏心率以 0 为界限分为两部分进行耐火极限计算公式回归分析。分析中长细比 λ (20~40)、截面尺寸 B (300~700 mm)、荷载比 n (0.3~0.7)、荷载偏心角($0^\circ\sim90^\circ$)和荷载偏心率 e (-0.8~0.8)为变量,以参数分析结果为样本,回归得到了双向偏压方钢管混凝土柱三面受火耐火极限简化计算公式(1)和(2),即:

$$e \leq 0 \text{ 时:}$$
$$t_R = \left[\frac{(1-n)B^{0.332}}{0.329\lambda^{0.104}\exp(0.069e)} \right]^{1.848} \quad (1)$$
$$e > 0 \text{ 时:}$$

$$t_R = A \left[\frac{(1-n)B^{0.306}}{0.18\lambda^{0.302}[1+(e-0.474)^3]} \right]^{2.05} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{2\sqrt{3}L}{B} \quad (3)$$

$$e = \begin{cases} \frac{2e_x}{B}, & 0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ; \\ \frac{2e_y}{B}, & 45^\circ < \theta \leq 90^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

$$A = [(1-1.105C)\sin(0.321e-0.551)C+1]. \quad (5)$$

$$C = \frac{\theta-45^\circ}{90^\circ}. \quad (6)$$

式中: t_R 为耐火极限, min; L 为构件高度, mm; B 为截面宽度, mm; θ 为荷载偏心角, ($^\circ$); λ 为长细比. n 为荷载比; e 为偏心率。

图 12 为构件耐火极限采用简化计算公式计算结果(t_R)与有限元计算结果($t_{R,FEA}$)对比情况,采用式(1)计算结果比值的平均值为 0.993 4,均方差为 0.050 4;采用式(2)计算结果比值的平均值为 0.933 5,均方差为 0.098 9。可见整体吻合程度较好,且偏于安全。

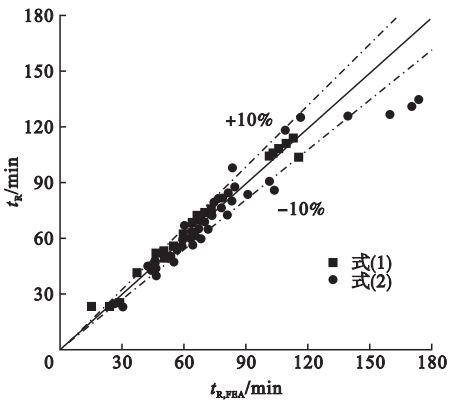


图 12 公式计算结果与有限元计算结果对比

Fig. 12 Comparison between formula calculation results and finite element calculation results

6 结 论

- (1) 构件在三面受火作用下的变形趋势可分为膨胀阶段、加速变形阶段和破坏阶段,钢管和混凝土发生两次内力重分布。
- (2) 构件荷载偏心角越小,荷载比越小,长细比越小,截面边长越大,其耐火极限越大;偏心率为 0~0.3 时构件存在明显的极强中心。
- (3) 在参数分析范围内,提出的双向偏压方钢管混凝土柱三面受火耐火极限简化计算公式,可为方钢管混凝土柱的耐火设计提供参考。

参考文献

[1] 吕学涛,杨华,张素梅. 非均匀火灾作用下方钢管混凝土柱受力机理研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(3):35-44.
(Lü Xuetao, YANG Hua, ZHANG Sumei. Fire resistance behavior and mechanism of concrete-filled square hollow columns in non-uniform fires [J]. Journal of building structures, 2013, 34(3):35-44.)

[2] GUO H, LONG X, YAO Y. Fire resistance of concrete filled steel tube columns subjected to non-uniform heating [J]. Journal of constructional steel research, 2017, 128:542-554.

[3] 肖会霞,王景玄,王文达. 三面受火的方钢管混凝土柱火灾全过程力学性能分析[J]. 防灾减灾工程学报,2015,35(1):100-105.
(XIAO Huixia, WANG Jingxuan, WANG Wenda. Analysis of mechanical performance of

- concrete-filled square hollow section columns exposed to three-surface fire [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2015, 35(1): 100 – 105.)
- [4] YANG H, LIU F Q, ZHANG S M, et al. Experimental investigation of concrete-filled square hollow section columns subjected to non-uniform exposure [J]. Engineering structures, 2013, 48: 292 – 312.
- [5] 叶友林, 孙雅珍, 张玉琢. 三面受火的方钢管约束钢筋混凝土柱耐火极限研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 603 – 611.
(YE Youlin, SUN Yazhen, ZHANG Yuzhuo. Study on fire resistance of square steel tube confined reinforced concrete column exposed to three-side fire [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(4): 603 – 611.)
- [6] 张玉琢, 陈新华, 张冠华, 等. 钢管约束钢筋再生混凝土柱三面受火下的耐火极限[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(1): 86 – 94.
(ZHANG Yuzhuo, CHEN Xinhua, ZHANG Guanhua, et al. Fire resistance of reinforced recycled concrete column confined by square steel tube under three-surface fire [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(1): 86 – 94.)
- [7] MENG F, ZHU M, CLIFTON C G, et al. Performance of square steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns subject to non-uniform fire [J]. Journal of constructional steel research, 2020, 166: 1 – 10.
- [8] 张玉琢, 吕学涛, 刘发起, 等. 三面受火的方中空夹层钢管混凝土柱耐火极限分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(S1): 156 – 162.
(ZHANG Yuzhuo, Lü Xuetao, LIU Faqi, et al. Fire resistance analysis of concrete filled double skin steel tubular columns under three-sided fire [J]. Journal of building structures, 2019, 40(S1): 156 – 162.)
- [9] YAO Y, LIU M, GUO H. Concrete filled double skin steel tubular columns subjected to non-uniform heating [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 158: 263 – 278.
- [10] 李国强, 王卫永. 钢结构抗火安全研究现状与发展趋势[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 1 – 8.
(LI Guoqiang, WANG Weiyong. State-of-the-art and development trend of fire safety research on steel structures [J]. China civil engineering journal, 2017, 50(12): 1 – 8.)
- [11] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.)
- [12] 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.
- [13] 李佳奇, 王蕊, 赵晖, 等. 外包不锈钢中空夹层钢管混凝土柱耐火性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 125 – 133.
(LI Jiaqi, WANG Rui, ZHAO Hui, et al. Study on the fire performance of concrete-filled double-skin tubular columns with external Stainless steel tubes [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 125 – 133.)
- [14] WON D H, HAN T H, KIM S, et al. Fire resistance of double-skinned composite tubular columns including concrete confinement [J]. Materials and structures, 2016, 49(4): 1269 – 1284.
- [15] ISO-834. Fire-resistance tests-elements of building construction [S]. International Standard, ISO834: Amendment 1, Amendment 2, 1980.
- [16] LIE T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of structural engineering, 1994, 120(5): 1489 – 1509.
- [17] 曹文正. 基于 Q550 以上钢材的高强方钢管高强混凝土双向偏压柱受力性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
(CAO Wenzheng. Research on mechanical behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube columns based on strength Q550 subjected to Bi-axial eccentric loading [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.)
- [18] 黄海清. 新型不锈钢管混凝土柱双向偏压力学性能研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
(HUANG Haiqing. Experimental behavior of innovative concrete-filled stainless steel tubes under biaxial eccentric compression [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.)
- [19] 吕学涛. 非均匀受火的方钢管混凝土柱抗火性能与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
(Lü Xuetao. Fire resistance behaviour and design of concrete-filled SHS in non-uniform fires [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)