

三面受火的方钢管约束钢筋混凝土柱 耐火极限研究

叶友林,孙雅珍,张玉琢

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究方钢管约束钢管混凝土柱在三面受火情况下的耐火极限,为其抗火设计提供依据. 方法 在合理选取材料属性与边界条件的前提下,利用 ABAQUS 有限元软件建立三面受火的方钢管约束钢筋混凝土柱的数值模型;在模型合理基础上,分析荷载比、长细比、截面尺寸、荷载偏心率和含钢率等参数对构件耐火极限的影响. 结果 荷载比和长细比对结构的耐火极限具有更显著的影响,耐火极限随荷载比和长细比的增大而减小;构件荷载比由 0.4 增至 0.6,其耐火极限下降 54.60%;长细比由 20 升至 40,耐火极限下降 25.68%;当含钢率由 2% 上升至 4% 时,构件的耐火极限上升 10.94%;荷载偏心率对结构的耐火极限影响较为复杂,构件耐火极限在 $e/i = -0.2$ 时极限承载力迅速提高. 结论 减小构件长细比,并增大含钢率,可有效提高构件耐火极限.

关键词 三面受火;方钢管约束钢筋混凝土;有限元模拟;耐火极限

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Study on Fire Resistance of Square Steel Tube Confined Reinforced Concrete Column Exposed to Three-side Fire

YE Youlin, SUN Yazhen, ZHANG Yuzhuo

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

Abstract: The fire resistance of square steel tube confined reinforced concrete column under three-side fire has been studied for the purpose of fire resistance design. On the basis of proper material properties and boundary condition, the study established a simulation model for square steel tube confined reinforced concrete column under three-side fire by the finite element software ABAQUS. The model has been testified by existed experimental results, subsequently, the effects of load ratio, slenderness ratio, section size, load eccentricity and steel ratio on fire resistance have

收稿日期:2020-04-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51808352);辽宁省自然科学基金项目(2018011666-301);沈阳市建委科技计划项目(SYJW2019002)

作者简介:叶友林(1985—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事地下空间结构安全预警方面研究.

been analyzed. The results showed that the load ratio as well as slenderness ratio are the main factors. The fire resistance decreases with the increase of load ratio and slenderness ratio. The simulation results are showed as below in detail: the load ratio increases from 0.4 to 0.6, the fire resistance decreases by 54.60%; the slenderness ratio increases from 20 to 40, the fire resistance decreases by 25.68%. On the contrary, with the steel ratio increase from 2% to 4%, the fire resistance also increases with the amplitude of 10.94%. While the effects of load eccentricity are quite complex that the ultimate bearing capacity rapidly improved with $w/i = -0.2$. In conclusion, using small slenderness ratio and high steel ratio can promote the fire resistance of square steel tube confined reinforced concrete column under uniform fire.

Key words: three-sided fire; square tubed reinforced concrete; finite element simulation; fire resistance

钢管混凝土是一种兼具钢材和混凝土优点的钢-混凝土组合结构^[1]。钢-混凝土组合结构因其优越的性能,引起了学者的关注,其应用不仅限于柱^[2],还应用于梁-楼板^[3]、柱-剪力墙节点^[4]。在传统钢管混凝土柱的基础上形成了新的结构形式——钢管约束混凝土,该类构件钢管不直接承受轴向压力,利用钢管对混凝土提供更有效的横向约束,以减缓结构破坏。近年来,建筑物在火灾下的性能劣化逐渐引起了学者的重视。已有相当一部分学者对钢管约束混凝土柱在火灾下及火灾全过程中的力学性能进行研究^[5-7],并涉及偏心受荷的情况^[8-9],发现该类构件在建筑结构受火时的稳定性更好,更加安全。

而在实际上,建筑物室内结构复杂,主要结构存在单面受火、两面受火、三面受火的可能,称为非均匀受火。已有的非均匀受火研究主要是针对钢管混凝土构件^[10-15],对钢管约束钢筋混凝土柱的研究较少。基于此,笔者对三面受火的方钢管约束混凝土柱的耐火极限进行有限元分析,研究分析构件荷载比、长细比、偏心率、含钢率等参数的影响,并探讨其对耐火极限的影响。研究表明:三面受火构件的温度场截面与力学场应力云图截面均呈现单轴对称,荷载比和长细比是影响构件极限承载力最主要的因素。

1 模型建立

选用 ABAQUS 有限元软件,对结构三面

受火情况下方钢管约束混凝土柱建立模型,分析其温度场模型与热力学场模型。

在温度场模型选用混凝土 8 节点三维实体热分析单元 DC3D8, 4 节点壳体热分析钢管单元 DS4, 一维桁架热分析纵筋单元 DC1D2。在混凝土与钢管内表面模拟中采用面面接触,钢管的内表面与钢筋之间采用束缚(tie)来定义。通过 ISO-834 标准升温曲线模拟构件在火灾中的升温情况,为后续高温力学的计算提供各节点的升温曲线。

笔者考虑构件的热工边界条件包括热对流和热辐射,受火面和背火面的热对流传热系数分别为 $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 和 $9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,综合辐射系数为 0.5。构件材料其他热工参数和边界条件均参考 T. T. Lie^[16] 的建议。混凝土含水率假定为 5%,并考虑水分对构件受火情况的影响^[16-17]。采用 ISO-834:1999《耐火实验建筑构件第一部分:一般要求》中建议的标准升温曲线,公式如下:

$$T = 345 \lg(8t + 1) + 20. \quad (1)$$

式中: T 为温度, $^\circ\text{C}$; t 为火灾持续时间, min。

以温度场模型作为热力学场模型基础,选用混凝土 8 节点三维实体单元 C3D8R, 钢管 4 节点壳单元 S4R, 两节点一维线性索纵筋单元 T3D2。考虑构件初始缺陷,按构件长度 $1/1\ 000$ 取值。其中构件钢材与混凝土的本构关系均参考 T. T. Lie^[16-17] 的建议。构件的上下采用刚性约束(rigid body)绑定,且仅

点选混凝土为端面,以满足钢管约束混凝土构件不承受轴向力的特点.切分网格设置时,温度场与力学场中网格划分须保持一致.

2 模型验证

利用笔者所建立的模型对文献[6,11,12]中的方钢管约束混凝土柱试验结

果进行验算.文献[6,11,12]中构件的具体设计参数如表1所示.其中:构件钢管的截面边长为 D ,钢管的厚度为 d_s ,钢管的长度为 L ,构件的荷载比为 $n(n = N/N_u)$,实际作用在构件上的荷载为 N ,构件的常温极限承载力为 N_u),构件的耐火极限实测值为 $t_{R,e}$,构件的耐火极限模拟值为 t_R .

表1 文献试件设计参数

Table 1 Design parameters of the test piece in the references

来源	试件	D/mm	d_s/mm	L/mm	纵筋	f_{cu}/MPa	n	$t_{R,e}/min$	t_R/min
文献[6]	STCRC-1	150	2.75	3 810	8 Φ 20	33.7	0.250	116.50	112.24
	STCRC-2	150	2.75	3 810	8 Φ 20	33.7	0.330	82.50	82.66
文献[11]	S1	300	5.80	3 810	—	59.3	0.600	14.00	15.24
	S2	300	5.80	3 810	—	59.3	0.400	33.00	29.55
文献[12]	NC-0.345-0	300	5.90	3 750	—	53.2	0.345	33.96	36.00
	RC50-0.354-0	300	5.90	3 750	—	49.4	0.354	40.60	40.00

模型验证的实验数据对比如图1所示.

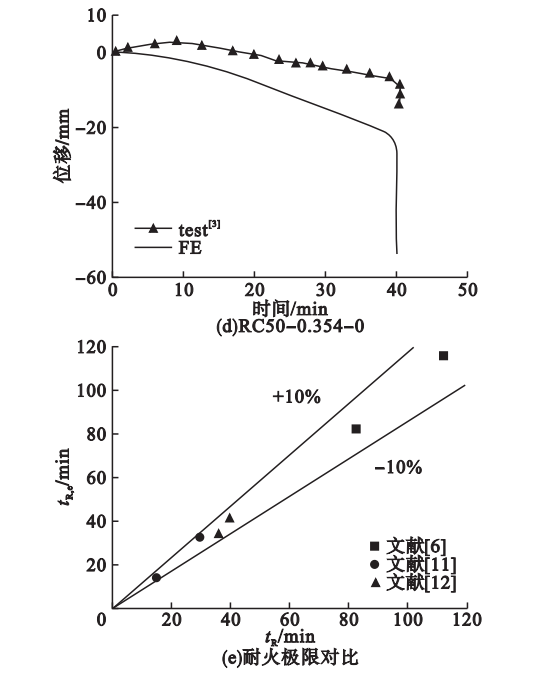
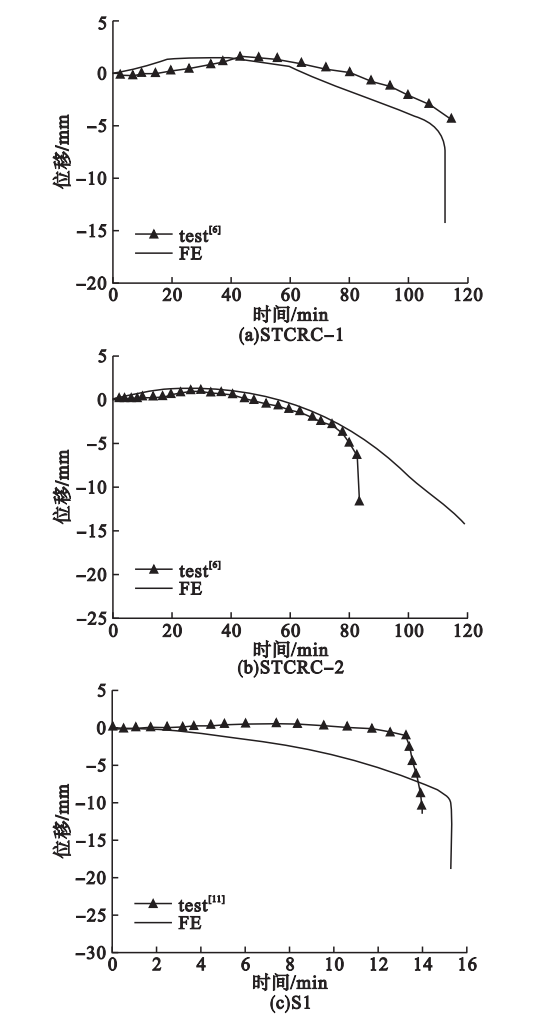


图1 模型验证数据结果对比

Fig.1 Comparison results of the model verification data

由图1可知:试件的荷载与位移曲线模拟数据同试验数据结果吻合较好,趋势一致,两者耐火极限差值在10 min 以内.

3 典型算例

3.1 温度场分析

选取典型算例构件的截面尺寸与受火方

式如图 2 所示. 构件长细比为 40, 截面边长为 400 mm, 保护层厚度为 40 mm, 配置 8Φ20 纵筋, 钢管壁选取 4 mm. 假定构件温度延长度均匀分布, 故可将其截面作为温度场研究对象. 图 3 为 150 min 时构件跨中截面的温度分布云图. 根据云图分析可得, 在三面受火条件下, 受火边界和截面单轴对称分布, 受火面温度变化剧烈, 距离核心混凝土越近温度越低, 且温度梯度变化越缓慢.

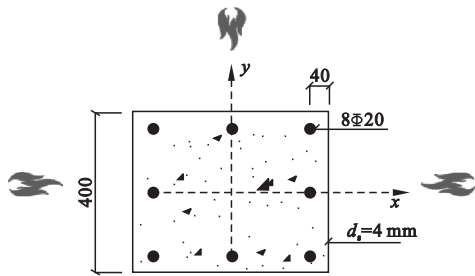


图 2 受火方式
Fig. 2 Fire mode

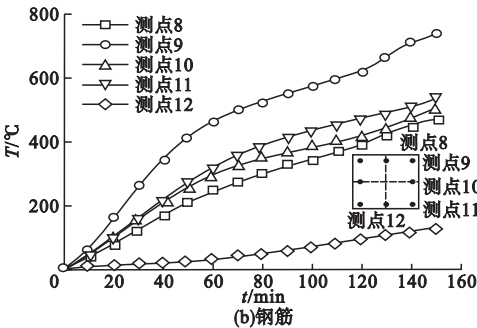
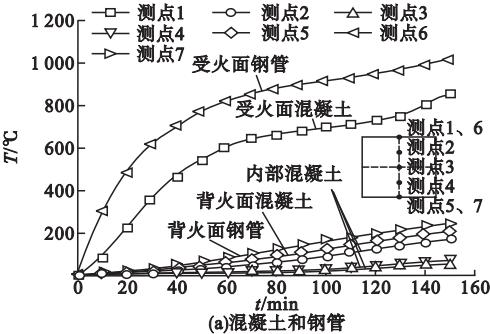


图 4 温度场测点温度 - 时间曲线

Fig. 4 Temperature-time curves of the temperature field at the measurement point

界, 测点 11 为受火面与背后面交界. 如图 4 所示受火面的测点升温最为迅速, 当测点温度在 50 min 时达到 800 °C, 随后测点的升温情况逐渐平缓. 背火面的升温相比于受火面要缓慢且平稳, 温度相对于受火面有大幅度的降低, 但由于钢材的传热性能优于混凝土, 所以相对于混凝土测点的温度依然较高. 由于混凝土的热容大、导热系数低, 混凝土测点的温度均较低, 其中中心测点的升温最为缓慢, 温度也最低.

3.2 热力学场分析

在热力学场模型中, 有限元模型采用与

上小节相同参数的基础上, 构件中混凝土强度等级取 C30 级, 钢管与钢筋强度均选取为 235 MPa, 通过建立常温力学场计算出钢筋约束混凝土柱构件常温极限承载力为 23 663. 6 kN, 取荷载比 $n = 0.4$ 作为典型算例中火灾下施加的恒定荷载值, 建立火灾下力学场进行分析. 图 5 为构件的截面示意图, 其中红色标点为偏心荷载作用示意点, e 为构件荷载偏心距, 以偏向背火面为负.

图 6 为构件轴向位移 - 时间关系曲线. 图中以压缩变形为负. 由图可知, 构件在升温前后经历了膨胀、加速破坏及最终破坏三个阶段后

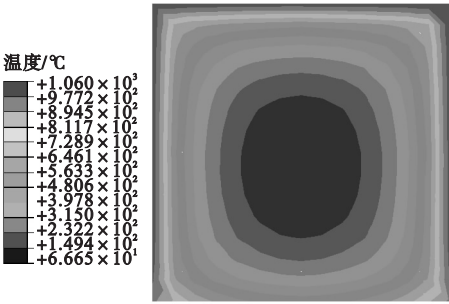


图 3 构件温度场截面示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the temperature field of the component

构件上设置 1 ~ 12 号, 共计 12 个测点. 图 4 显示了构件各个测点的温度 - 时间曲线. 图 4(a) 中, 测点 6 和测点 7 为钢管测点, 分别位于构件的受火面和背火面, 测点 1 ~ 5 为混凝土测点, 自受火面边缘向背火面边缘, 两点间间隔 100 mm, 沿竖向中线排列; 图 4(b) 为钢筋测点, 其中测点 9 为两受火面交

达到耐火极限,构件完全破坏.图7为构件的侧向挠度-时间关系曲线,构件跨中挠度取受火面挠度为正.由于材料受热膨胀,试验初期构件向受火面挠曲,随时间增加和温度升高,受火面材料不断劣化,最终构件向背火面挠曲.

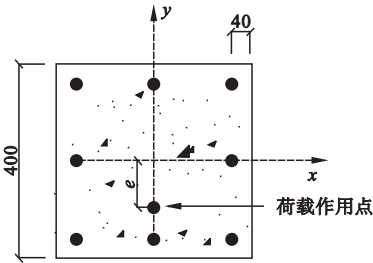


图5 截面示意图

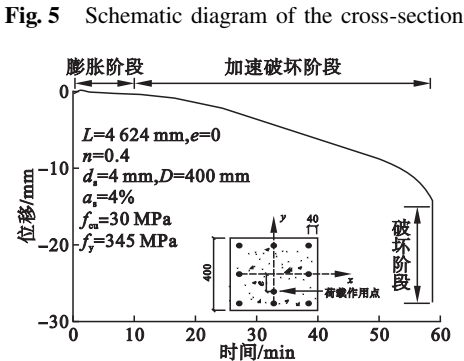


图6 轴向位移-时间关系

Fig. 6 Axial displacement-time curve

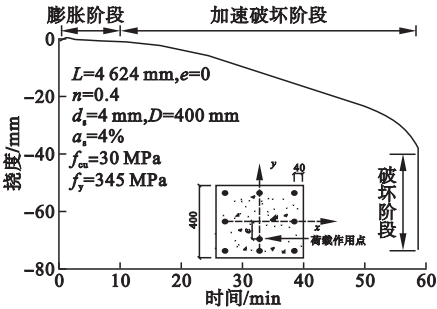


图7 侧向挠度-时间关系

Fig. 7 Lateral deflection-time curve

图8所显示的是构件在受火过程中,构件跨中截面的混凝土轴向应力应变随时间变化的分布情况.图中构件截面下方为背火面,应力分布以受拉为正.选取构件受火过程中4个时间节点进行分析:

- (1)当 $t=0$ min时,构件加载完毕,可以看出由于初始缺陷,构件背火面边缘应力较大.
- (2)当 $t=18$ min时,试件轴向受压,角部应力增大明显,构件混凝土中心区域应力变化小于边缘区域.
- (3)当 $t=36$ min时,构件随受火时间的增加,混凝土逐渐劣化,构件混凝土中心区域与角部受压区域扩大.可以观察到混凝土内

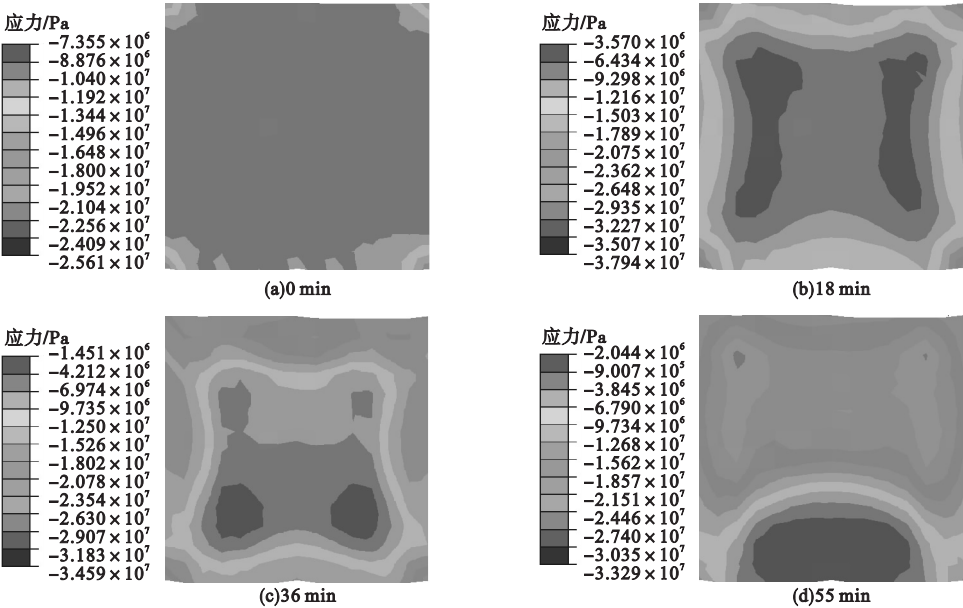


图8 构件跨中截面混凝土轴向应力分布

Fig. 8 Axial stress distribution of concrete members across mid-section concrete

部应力较小区域向背后面转移。

(4) 当 $t = 55\text{ min}$ 时构件达到耐火极限, 构件迅速发生失稳破坏, 截面下部即背火面应力分布显示为受拉状态, 构件向背火面弯曲。

图 9 为构件的钢管部分在三面受火条件下的 Von Mises 应力云图。此处构件钢管应力云图选取时间同截面选取时间一致。图中右侧面为三个相邻受火面的中间面, 亦为最终的受压面。

(1) 当 $t = 0\text{ min}$ 时, 构件加载完毕, 可以

看出构件角部应力较大。

(2) 当 $t = 18\text{ min}$ 时, 可以观察到, 由于构件开始受压弯曲, 钢管角部的应力变化明显增大, 其中受火面的增大最为明显, 可以看出应力在向中心区域扩大。

(3) 当 $t = 36\text{ min}$ 时, 构件钢管角部应力持续增大, 并出现向跨中区域聚集的趋势。

(4) 当 $t = 55\text{ min}$ 时, 此时构件几乎达到耐火极限。构件整体发生失稳破坏, 受火面跨中出现鼓曲, 沿纵向分布。

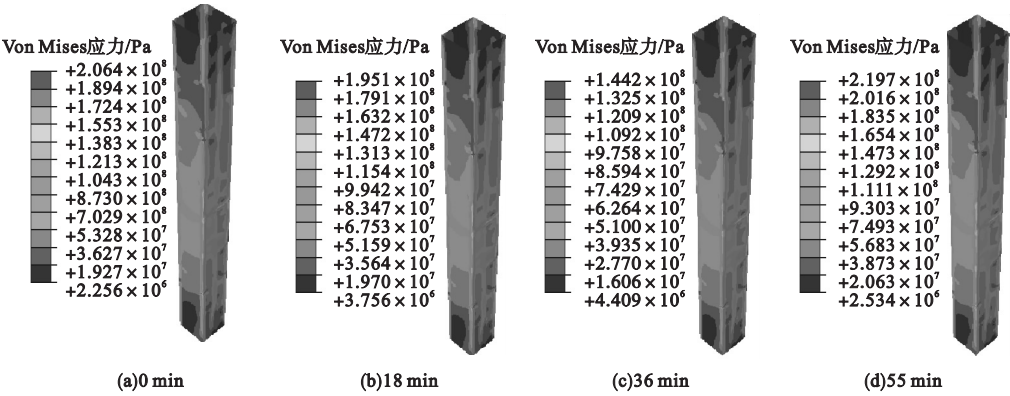


图 9 钢管 von mises 应力分布云图

Fig. 9 Cloud map of steel tube von mises stress distribution

图 10 为构件中钢筋跨中部位的纵向应力-时间关系曲线, 选取了试件上部受火面与背火面中间的钢筋, 分别标记为测点 A 和测点 B。可以观察到两测点在试验开始均受到压应力, 由于构件材料受热膨胀影响, 受火面测点 A 压应力高于背火面测点 B。随温度升高, 受火面材料劣化程度不断加剧, 试件开始向背火面挠曲。

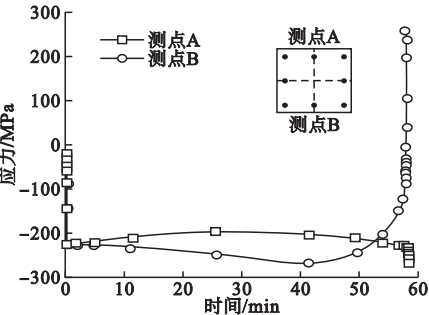


图 10 钢筋纵向应力-时间关系曲线

Fig. 10 Longitudinal stress-time curve of steel bars

随着受火面钢筋压应力不断增加, 背火面则持续下降, 最终出现拉应力, 两者达到屈服强度。

4 参数分析

笔者考虑的影响构件耐火极限的参数包括荷载比(n)、长细比(λ)、截面边长(D)、荷载偏心率(e/i)以及含钢率(α_s)。采用控制变量的形式, 通过上文所建立的模型对三面受火的钢筋约束混凝土柱耐火极限的影响规律进行参数分析^[18-19]。各参数的具体取值见表 2。其中, e/i 为构件荷载偏心率(荷载偏心距为 e , 取正方向为背火面, 反之为负。构件的截面回转半径为 $i, i = (I/A)^{1/2}$, 截面关于 y 轴的惯性矩为 I, A 表示截面面积), 构件的含钢率为 $\alpha_s (\alpha_s = A_s/A_c, \text{钢管截面面积为 } A_s, \text{核心混凝土所占截面面积为 } A_c)$ 。

表2 参数分析取值范围

Table 2 Range of parameters

项目	荷载比 n	长细比 λ	截面边长 D/mm	荷载偏心率 e/i	含钢率 $\alpha_s/\%$
参数取值范围	0.4、0.5、0.6、 0.7、0.8	20、30、40、 50、60	400、600、800、 1 000、1 200	-0.6~0.6	2、4、6、8、10
变量基本量	0.4	40	400	0	4

4.1 荷载比

图 11 为荷载比对钢管约束混凝土柱耐火极限的影响. 如图可知:①增大构件的荷载比对耐火极限的影响显著,随构件荷载比的增大,耐火极限快速下降. 可以解释为,由于构件在标准火灾作用下,其本身的材料强度已经有所损失,外部荷载进一步加剧了构件在高温下达到耐火极限的过程,使构件更早破坏. ②试件的长细比越低,构件的耐火极限随荷载比下降的越快. 当长细比为 20 时,构件荷载比从 0.4 增加至 0.6 时,耐火极限急剧下降,降低 54.6%. 而当长细比取 60 时,构件荷载比从 0.4 增加至 0.6 的降低的程度明显减缓,降低百分比为 42.16%.

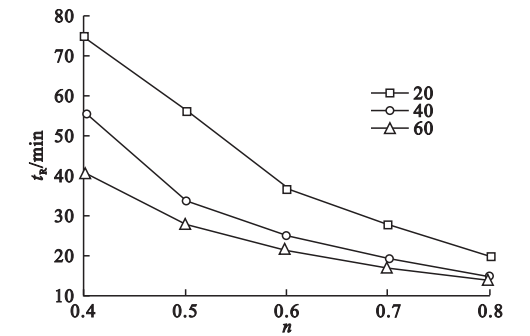


图 11 荷载比的影响

Fig. 11 Effect of load ratio

4.2 长细比

图 12 为长细比对不同荷载比作用下的钢管约束钢筋混凝土柱的耐火极限影响. 随着构件长细比的增大,二阶效应的影响逐渐显现. 当荷载比为 0.4 时,构件随长细比变化最为迅速,当构件的长细比由 20 增至 40 时,耐火极限下降 25.68%,当长细比增至 60 时,耐火极限再次下降 27.16%. 当荷载比增

大时,构件耐火极限将大幅度降低. 然而随着长细比的不断增大,构件耐火极限下降将趋于缓慢.

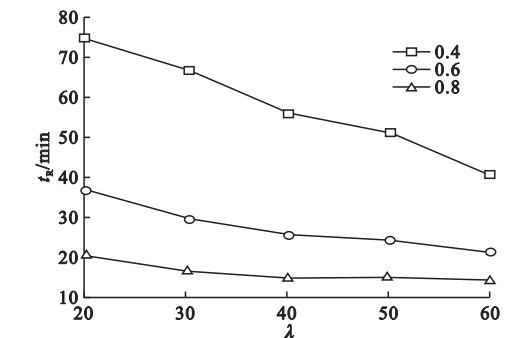


图 12 长细比的影响

Fig. 12 Effect of slenderness ratio

4.3 截面尺寸

在模拟试验中,设置三种截面尺寸,分别探究不同截面尺寸对于构件的耐火极限的影响. 在保证长细比一样的前提下,增大截面尺寸使构件的耐火极限承载力得到了增加. 当荷载比为 0.4 时,截面尺寸对耐火极限的影响最大. 截面尺寸对材料耐火极限的影响如图 13 所示.

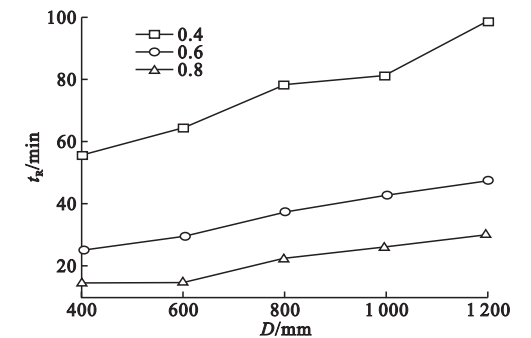


图 13 截面尺寸的影响

Fig. 13 Effect of section size

由图 13 可知,随着荷载比的增大,内部混凝土温度与背火面温度显著降低,材料的

劣化程度也相应减小,可以解释为混凝土本身具有的热惰性,在截面尺寸较大时,延缓了热量向核心混凝土的传播速度,使构件的耐火极限得以延长。

4.4 含钢率

图 14 是改变构件的含钢率对三面受火的钢管约束钢筋混凝土柱耐火极限的影响情况。由图 14 可知,随着含钢率的增加对耐火极限的影响较为平缓。例如荷载比为 0.6 的曲线,当含钢率由 2% 上升至 4% 时,构件的耐火极限上升 10.94%,当构件的含钢率由 4% 上升至 6% 时,构件的耐火极限上升 7.74%。可以发现增大构件的含钢率,耐火极限相应提升。由于钢材的传热性能优于混凝土,构件中钢材用量增加,在提高构件的坚固性的同时,也增大了构件整体受高温的影响,故在三面受火条件下,构件耐火极限随含钢率增大变化缓慢。

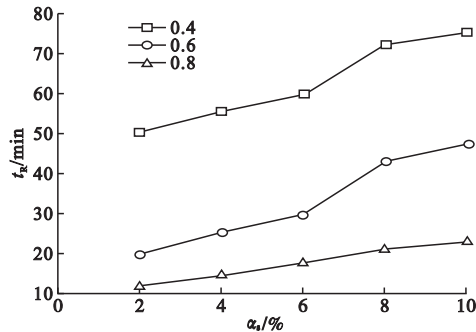


图 14 含钢率的影响

Fig. 14 Effect of steel ratio

4.5 荷载偏心率

图 15 为不同荷载偏心率对三面受火钢管约束钢筋混凝土构件的耐火极限影响。文中由截面的中点起,分别沿构件的 y 轴正负向取 13 个点。由图可知,当 $e/i \leq 0$ 时,构件随偏心点向中心点的移动而增大,当 $e/i = -0.2$ 时构件的耐火极限达到峰值。可解释为构件在高温影响下,材料劣化程度加剧,使构件强度中心向背火面偏移,荷载作用于背火面一侧,使构件的耐火极限出现显著增强;荷载作用点继续向受火面移动,构件的

耐火极限快速下降,直至到达轴心,继续向受火移动,耐火极限变化较小。长细比为 20、40 的构件耐火极限有微量增加,上升趋势更平缓,长细比为 60 的构件荷载偏心率大于 0 时,耐火极限整体偏低,这是由于此时构件的荷载作用点作用在受火后材料性质劣化严重的部分,与构件破坏挠曲方向一致,加速了构件的破坏。

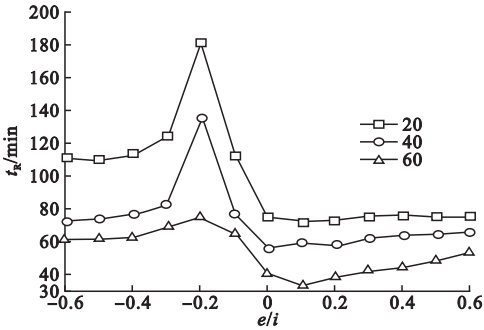


图 15 荷载偏心率的影响

Fig. 15 Effect of load eccentricity ratio

5 结 论

(1) 三面受火构件的温度场截面与力学场应力云图截面均呈现单轴对称。构件在升温初期受火面混凝土热膨胀变形较大,试件向受火面挠曲,随温度升高,受火面材料逐渐劣化,构件最终向背火面挠曲。

(2) 荷载比、长细比是影响构件极限承载力的主要因素。在适当范围内,降低试件的荷载比与长细比均可提升构件的耐火极限。

(3) 荷载偏心率的改变对构件的极限承载力也具有较大影响,但变化更为复杂。构件耐火极限在荷载偏心率 $e/i = -0.2$ 时突然增大,所以对于三面受火构件,适当的荷载偏心率可以使构件的耐火极限承载力显著增大。

参考文献

[1] 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.)

- [2] 杨文伟,李顺涛,杨霞. GFRP 管约束钢管混凝土组合短柱受压试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(2):229-238.
(YANG Wenwei, LI Shuntao, YANG Xia. Experimental study on axial compression of steel-encased concrete filled GFRP tubular short column [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(2): 229-238.)
- [3] 贾连光,王宇涵,王留生,等. 钢管蜂窝梁-混凝土楼板组合梁抗火性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(5):769-776.
(JIA Lianguang, WANG Yuhuan, WANG Liusheng, et al. Study on fire resistance of steel castellated beam-concrete slab composite beams [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(5): 769-776.)
- [4] 吴潜,李嗣昌,罗元伟,等. 矩形钢管混凝土键连接剪力墙框架柱的力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(5):839-848.
(WU Qian, LI Guochang, LUO Yuanwei, et al. Study on mechanical properties of shear wall and frame column connected with CFRSTs keys [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(5): 839-848.)
- [5] 潘雁翀. 受火后圆钢管约束钢筋混凝土轴压短柱静力性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
(PAN Yanchong. Static behavior of circular tubed reinforced concrete stub columns under axial compressive loading after exposure to fire [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [6] 刘发起. 火灾下与火灾后圆钢管约束钢筋混凝土柱力学性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
(LIU Faqi. Fire and post-fire behaviors of circular steel tube confined reinforced concrete columns [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.)
- [7] ZHOU K, HAN L. Experimental performance of concrete-encased CFST columns subjected to full-range fire including heating and cooling [J]. Engineering structures, 2018, 165: 331-348.
- [8] GUO Z, WANG X, ZHANG X, et al. Effects of boundary restraints on concrete-filled steel tubular columns with reinforcements exposed to fire [J]. Thin-walled structures, 2019, 142: 52-63.
- [9] ALBERO V, ESPINOS A, REMERO M L, et al. Interaction diagram based method for fire resistance design of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns [J]. Thin-walled structures, 2018, 130: 641-651.
- [10] 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 behavior and design of concrete-filled SHS in non-uniform fires [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [11] 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.)
- [12] 张磊. 钢管再生混凝土柱耐火性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
(ZHANG Lei. Study on fire performance of recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.)
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [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] LIE T T, STRINGER D C. Calculation of the fire resistance of steel hollow structural section columns filled with plain concrete [J]. Canadian journal of civil engineering, 1994, 21(3): 382-385.
- [18] 李嗣昌,杨宇,杨志坚,等. 工字形 CFRP-高强方钢管高强混凝土轴压短柱有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(5):779-786.
(LI Guochang, YANG Yu, YANG Zhijian, et al. Finite element analysis of I-shaped CFRP high strength square steel tube high-strength concrete axially compressed short column [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(5): 779-786.)
- [19] 闻洋,姜雯丽霞,韩洪鹏,等. 基于正交的圆钢管再生混凝土柱力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(3):462-469.
(WEN Yang, JIANG Wenlixia, HAN Hongpeng, et al. Research on mechanical properties of reinforced concrete column based on orthogonal circular steel tube [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(3): 462-469.)
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)