

钢管约束钢筋再生混凝土柱 三面受火下的耐火极限

张玉琢¹,陈新华¹,张冠华²,王佳伟²

(1. 沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168;2. 公路桥梁诊治技术交通运输行业研发中心,辽宁 沈阳 110166)

摘要 目的 研究三面受火的方钢管约束钢筋再生混凝土柱的耐火极限。方法 采用 ABAQUS 有限元软件建立了在 ISO834 标准火灾作用下三面受火的方钢管约束钢筋再生混凝土温度场及耐火极限有限元分析模型,分析了三面受火过程中取代率、荷载比、混凝土强度、长细比、含钢率、荷载偏心率对构件截面温度及其耐火极限的影响。结果 荷载比对试件耐火极限影响显著,随荷载比增大耐火极限降低;含钢率在一定的范围内可以调高构件耐火极限,荷载比为 0.6 时,当含钢率由 5.55% 增加至 7.02% 时,耐火极限提升了 14.77%;当含钢率由 7.02% 提升到 8.51% 时,耐火极限仅提升了 3.09%。荷载偏心率对于构件耐火极限影响较为复杂,当荷载比低于 0.5 时,荷载偏心率对于构件耐火极限的影响主要取决于构件由于受火所引起的挠曲方向。结论 适当减小构件荷载比、增大含钢率,可有效提高三面受火的方钢管约束钢筋再生混凝土柱耐火极限。

关键词 方钢管约束钢筋混凝土柱;再生混凝土;三面受火;耐火极限

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Fire Resistance of Reinforced Recycled Concrete Column Confined by Square Steel Tube under Three-surface Fire

ZHANG Yuzhuo¹, CHEN Xinhua¹, ZHANG Guanhua², WANG Jiawei²

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Highway Bridge Diagnosis Technology of Transportation Industry R&D Center, Shenyang, China, 110166)

Abstract: The fire resistance limitation of reinforced recycled concrete columns confined by square steel tubes under three-side-fire has been studied by finite element software ABAQUS. A finite element model of reinforced recycled concrete columns confined by square steel tubes, which three-

收稿日期:2020-08-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51808352,51808351);辽宁省教育厅基本科研项目(lnqn202024);公路桥梁诊治技术交通运输行业研发中心开放基金项目(2018KFKT-01);辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902027);沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC200143)

作者简介:张玉琢(1988—),男,副教授,博士,主要从事钢管混凝土结构方面研究。

surfaces exposed to ISO-834 standard fire has been established. Based on the verified model through the selection of reasonable material properties and boundary conditions, the effects of the replacement rate, load ratio, concrete strength, slenderness ratio, steel ratio and other parameters on the fire resistance limitation of the component is analyzed. The results show that the load ratio is the major factor that affect the fire resistance which decreases with the increasing load ratio; The fire resistance limitation of the component increases with steel ratio increasing in a certain range, for example, when the load ratio equals to 0.6, the steel ratio increased from 5.55% to 7.02%, the fire resistance increased 14.77%, while the steel ratio up to 8.51%, the fire resistance just increased 3.09%; however, the effect of load eccentricity is complex, as the load ratio below 0.5, the influence of load eccentricity based on the deflection direction of the column under fire. The fire resistance of such kind column is increased by appropriately reducing load ratio and increasing steel ratio.

Key words: square steel tube restraint reinforced concrete column; recycled concrete; three-surface fire; fire resistance

钢-混凝土结构作为国内常见的建筑结构,由传统的混凝土柱结合钢管外围保护所构成。利用混凝土柱具有较高轴向承载力的同时,通过钢管补充混凝土柱所欠缺抗弯能力。而钢管约束混凝土则是在此基础上,将钢管上下端与承力端部分离,进一步减少钢管在结构中所承担的纵向承载力,仅为核心混凝土提供侧向约束的一种结构形式^[1-2]。刘发起等^[3-4]探究了在标准火灾作用下钢管约束钢筋混凝土柱耐火极限受到荷载比和构件模型的影响情况。王尚^[5]探究了6根钢管约束混凝土中柱在IOS-834标准火灾作用下的恒载升温试验中轴压和偏压两种状态对于试件高温热力学性能的影响。张磊^[6]研究了9根方钢管再生混凝土柱耐火性能试验,分析了轴压比、保护层、取代率等对于试件耐火极限的影响。但以上主要是针对钢管约束钢筋混凝土柱在均匀受火条件下开展的。方形截面柱以其优越的抗弯性能、易施工性能及美观性而广泛用于建筑物中,为了获得更大的建筑内部空间,方截面柱一般位于墙角等处,方形柱在受火时可能处于非均匀受火的状态。对于方钢管约束钢筋再生混凝土柱的研究尚处于发展阶段,对于不同的受火形式仍有一定的研究空间。在实际火灾中,结构可能处于单面受火、相邻两面受火、相对面

受火、三面受火等复杂的状态中。吕学涛等^[7]对不同受火形式的方钢管混凝土柱的耐火极限进行研究,分析了包括截面尺寸、荷载偏心率、长细比、荷载比等在内的参数对构件耐火极限的影响。肖霞慧^[8]对三面受火的钢管混凝土柱在火灾全过程中的力学性能进行了分析。三面受火与均匀受火的钢管约束钢筋混凝土柱有着诸多的差异,因此笔者针对三面受火情况下的方钢管约束钢筋再生混凝土柱,通过ABAQUS有限元软件建立数值分析模型,探究取代率、荷载比、混凝土强度、含钢率等参数对耐火极限的影响,以期为实际工程提供理论数据。

1 有限元模型建立

利用ABAQUS有限元软件,建立三面受火情况下的方钢管约束钢筋再生混凝土柱温度场与热力学场模型。

1.1 温度场模型

在温度场模型中,所有的单元均为热分析单元。纵筋选取两节点传热索单元(DC1D2),钢管单元为四节点传热壳体单元(DS4),混凝土选取八节点传热三维实体单元(DC3D8)。钢管表面与外界环境之间的接触采取表面辐射接触和表面对流接触,设置综合辐射系数为0.5,受火面对流传热系

数 $\alpha_c = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 背火面对流传热系数 $\alpha_b = 9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{[9]}$ 。模型中, 钢管内表面和混凝土外表面之间采用面-面接触, 并考虑因混凝土硬化收缩导致的混凝土和钢管之间产生细小缝隙而产生的界面热阻, 取值为 $0.01 (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}^{[10]}$ 。对于混凝土与钢筋之间的约束选用绑定约束(tie), 混凝土、钢材的热工参数均选取 T. T. Lie^[9] 的建议。

由于混凝土中存在水分, 取混凝土质量含水率为 5% 且 $\rho_w \cdot c_w = 4.2 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。再生混凝土本构关系参考肖建庄等^[9-10] 提出的混凝土导热理论公式:

$$y = \begin{cases} ax + (3-2a)x^2 + (a-2)x^3, & x < 1; \\ \frac{x}{b(x-1)^2 + x}, & x \geq 1. \end{cases} \quad (1)$$

$$a = 2.2(0.748\gamma^2 - 1.231\gamma + 0.975). \quad (2)$$

$$b = 0.8(7.6483\gamma + 1.142). \quad (3)$$

式中: $y = \frac{\sigma}{f_c}$; $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$; σ 为再生混凝土应力; ε 为再生混凝土应变; f_c 为再生混凝土棱柱体轴心抗压强度; ε_0 为峰值应变; γ 为再生粗骨料取代率。

1.2 耐火极限有限元模型

耐火极限有限元模型是建立在温度场模型基础之上, 对于再生混凝土高温下压应力-应变模型选取参考文献[11]建议的模型。对于混凝土高温下受拉应力-应变模型选取 T. T. Lie 等^[12] 建议的模型, 选取高温下混凝土受压本构的 9%, 即某一温度下的受拉峰值应力取该温度下受压峰值应力的 9%^[12]。对于钢材选取 BS EN 1993-1-2^[13] 规定的高温钢材本构关系模型, 折减系数参照 BS EN 1992-1-2^[13] 相关规定, 泊松比取 0.3。

在耐火极限有限元模型中, 混凝土选取八节点三维实体单元(C3D8R), 钢管选取四节点壳单元(S4R), 钢筋选取一维线性索单元(T3D2)。柱上端边界 $U_{1,2} = 0, U_{R1,2}, 3 = 0$; 下端边界 $U_{1,2,3} = 0, U_{R1,2,3} = 0$ 。混凝土外表面和钢管内表面之间的作用设置

为面-面接触, 将混凝土设置为主面, 钢管设置为从面。钢筋与混凝土之间采用嵌入约束。在构件混凝土上下端面设置参考点, 将参考点与混凝土上下外表面用 Rigid body 绑定, 随后将构件的荷载情况及边界条件设置在参考点上。同时, 要保证温度场模型与耐火极限模型网格的划分保持一致, 使节点温度可以准确导入。文中构件考虑初始缺陷, 取柱长的 1/1 000。

2 典型算例

2.1 温度场模型分析

选取的典型算例的截面边长为 300 mm 的正方形, 含钢率为 2.89%, 即钢管厚度 t_s 为 4 mm 的方形构件, 计算长度 $l_c = 3\,460 \text{ mm}$, 钢筋选取 8 Φ 20 的纵筋, 再生混凝土保护层厚度选取为 40 mm。假定温度沿构件纵向均匀分布, 则试件模型沿纵向的各处平截面(截面平行于试件上下端部)均可作为温度场的分析对象。划分单元时, 径向网格不少于 10 个, 经验证此时网格密度对温度场的影响较小。

笔者按照文献[3-5]中试验进行了三面受火升温 90 min 的温度场分析模拟。图 1 为钢管约束钢筋再生混凝土的横截面和钢筋温度场云图。在构件升温过程中, 等温线呈单轴对称分布。受火面温度较高、升温较快, 背火面温度较低、且升温速率较慢, 这是因为背火面的热量通过钢管、混凝土热辐射及热传导传递, 而混凝土导热系数低。相邻两个受火面的角部位置受温度影响更明显。通过图 1 的对比可知, 构件横截面在受火面角部的温度高于截面中部, 这是由于角部钢筋在非均匀火灾下升温幅度大于混凝土。在受火面与背火面相交的试件角部位置的温度低于受火面与受火面相交的处的角部区域, 但高于非受火面中部位置, 这也是由于内部约束钢筋在三面受火条件下与内部核心混凝土之间的温度差异造成的。

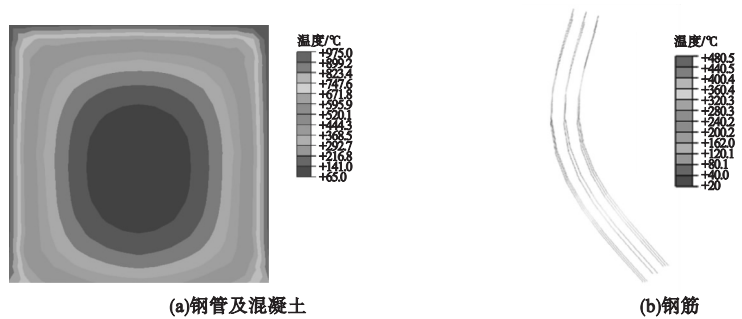


图 1 再生混凝土截面温度场云图

Fig. 1 Temperature field cloud diagram of recycled concrete cross section

图 2 为试件截面测点选取示意图。由于三面受火条件下,试件单轴对称,因此钢管及混凝土测点选取在对称轴上,内部混凝土测点沿对称轴等距分布。钢筋测点 6~10 为模型中钢筋实际所处位置,选取对称轴右侧的约束钢筋作为研究对象。

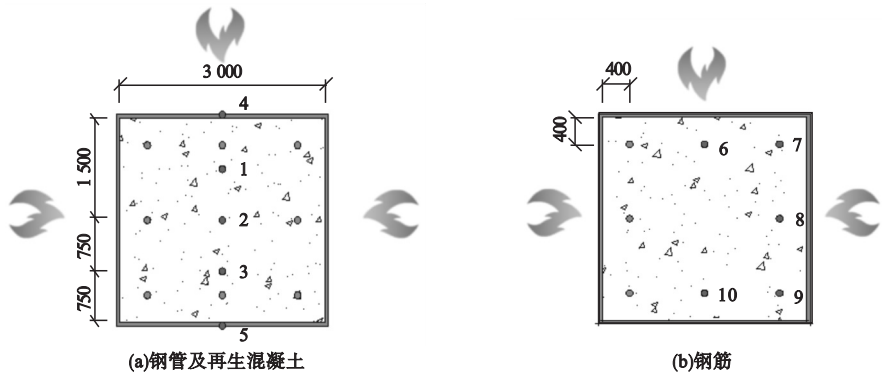


图 2 横截面测点选取示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross-section measurement point

图 3 为构件截面不同位置、钢管及钢筋的温度-时间曲线。图 3 中温度-试件曲线的测点为图 2 选取的截面测点。

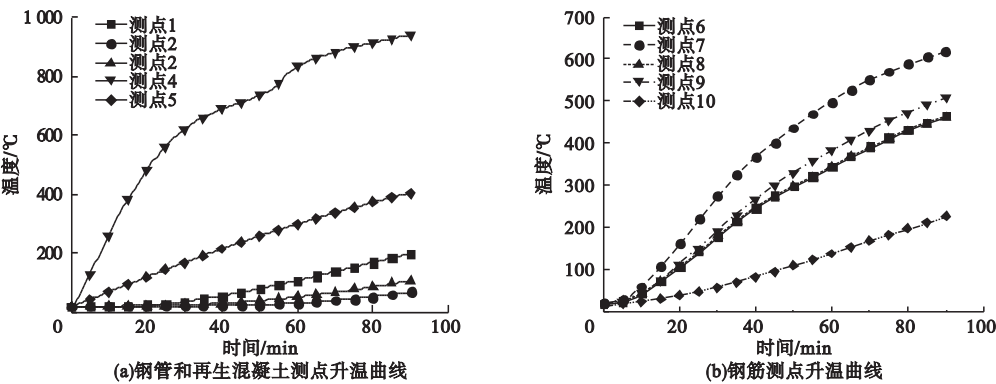


图 3 横截面测点升温曲线

Fig. 3 Heating curve of measurement point

从图 3 可以看出,同一列测点钢管表面的温度要比混凝土表面的温度高,这是由于模型中考虑了钢管和混凝土之间的界面热阻,这种随机离散的点面接触使得二者表面温度产生差异。由于测点关于受火面对称,第三面受火面(该面对侧不受火)混凝土温度最高,混凝土核心处温度最低,温差达到 330 °C。受火面角部钢筋温度最高,这是由于

中部钢筋接触的受火面混凝土面积大于角部,而混凝土吸热能力较强,因此,中部钢筋位置处的热量大部分被混凝土吸收,钢筋温度较低。钢管测点 5 的温度要比混凝土测点 1、2、3 高,这是由于钢材的导热系数要远强于混凝土,背火面两侧受火的钢管通过热传导首先将热量传递至非受火面钢管,其次是混凝土。而混凝土是热的不良导体,传热速度缓慢,因此,非受火面处钢管的温度比受火面相同位置低 100 ~ 500 ℃。

2.2 三面受火下力学场计算模型

在温度场模型的基础上,建立力学场模型。模型采用试件为钢管约束钢筋再生混凝土足尺长柱, $L=3\ 000\text{ mm}$,构件长细比 $\lambda=10$ 。混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}=30\text{ MPa}$,再生混凝土粗骨料取代率为 50%,钢管及钢筋屈服强度都为 $f_{sy}=345\text{ MPa}$,钢管宽厚比 $B/t=75$ 。荷载偏心率为 0,即轴心受压。并且使试件处于高应力状态,荷载比 $n=0.65$ 。图 4 为试件中截面荷载偏心示意图。其中,选取截面中心点为原点,纵横中线分别为坐标线,背火面方向为 x 轴负向,偏心作用点到中心点的距离为 e , a_e 为截面边长 1/2 长度,荷载偏心率表示为 e/a_e 。

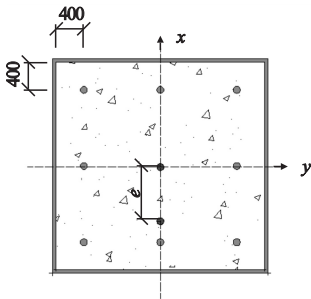


图 4 荷载偏心示意图

图 5 为构件截面形心处轴向位移 - 时间的关系曲线。可以看出在构件升温初期,由于构件初始缺陷,在受荷初期就具有轻微的位移。而后由于初始缺陷,位移方向同最终挠曲方向一致。随着温度不断升高,构件的力学性能不断降低,构件轴向变形不断增大,

最后构件轴向变形速率骤然加大,直到构件破坏。

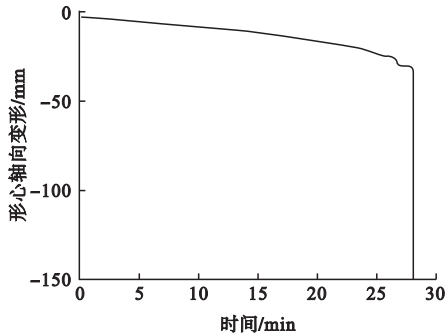


图 5 形心轴向变形 - 时间曲线

图 6 为构件中截面位置处侧向变形 - 时间曲线,侧向变形以朝向受火面方向为正。由图可知,首先构件因受力压缩向背火面挠曲,伴随着受火面材料的不断退化,构件跨中挠曲速率不断增强直至破坏。因为构件在两侧受火面的变形抵消,第三面受火面积较小,构件热膨胀变形较小,因此构件在热力场作用全过程下均表现为全截面受压。

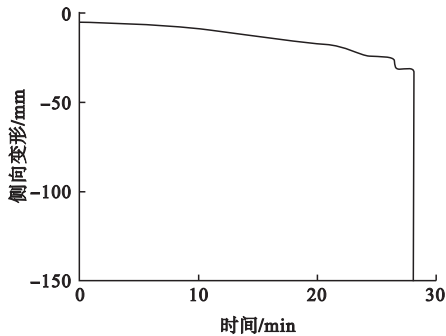


图 6 试件侧向变形时间曲线

Fig. 6 Lateral deformation of specimen under whole loading process

图 7 为构件钢筋纵向应力 - 时间曲线,图中曲线对应试件中钢筋 6、8。初始阶段,钢筋由于轴压均出现相近的压应力,随后可以看出 8 钢筋由于初始缺陷以及受到轴向压力而逐渐挠曲。应力增幅变大,最终构件破坏整体均弯向背火面,钢筋 8 所在一测受拉,转变为拉应力。

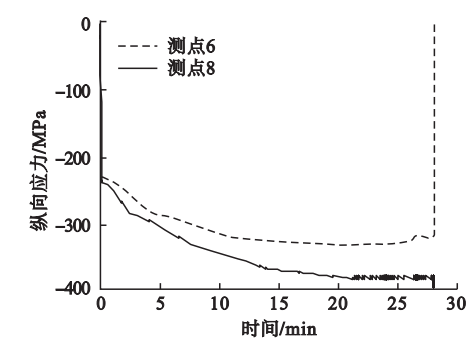


图 7 钢筋纵向应力 - 试件曲线

Fig. 7 Longitudinal stress of reinforce bars of specimen under whole loading process

图 8 为典型算例模型中截面的纵向应力分布云图,分别对应升温 10 min、20 min 和 28 min。从图 8 可知,再生混凝土中截面纵向应力云图大致呈现轴对称分布,模型在初始阶段由于初始缺陷的存在,虽然整体均显示为压应力,但背火面所受压应力明显大于受火面,随着时间增加,当 $t = 20\text{min}$ 时,由于受高温影响,构件材料发生劣化,偏向于背火面弯曲的趋势加深。最终,当到达耐火极限时,构件完全弯向背火面,第三面受火面附近出现大面积受拉应力区域并迅速扩大。

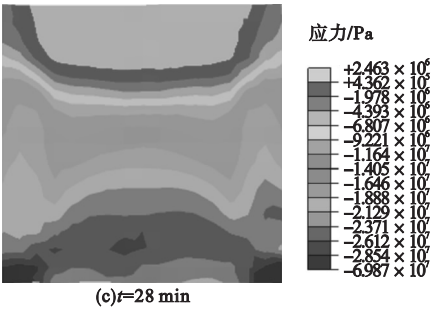


图 8 再生混凝土纵向应力云图

Fig. 8 Longitudinal stress cloud diagram of recycled concrete

图 9 为不同时刻钢管的 von Mises 应力分布云图,同界面选取相同的试件节点。

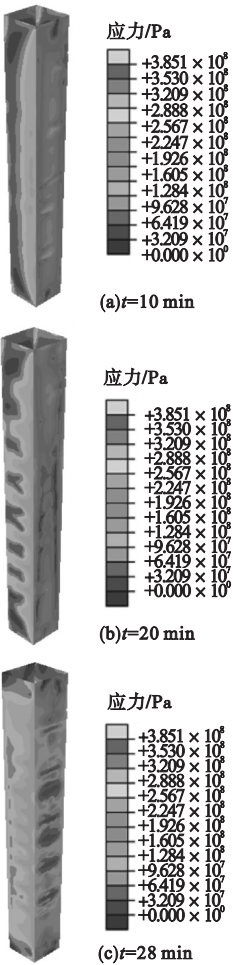
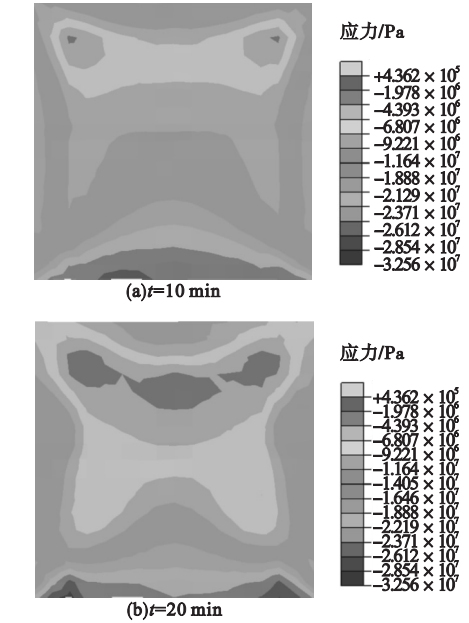


图 9 钢管 Von Mises 应力分布云图

Fig. 9 Stress distribution nephogram of steel tube Von Mises at different time

从图 9 可以看出,当升温时间 $t = 10\text{ min}$ 时,构件向受火面挠曲,随着时间增加,构件



的侧面出现横向条状高应力带。当试件接近耐火极限时,由于挠曲的加深构件受火面所受应力逐渐减小,最终构件向受火面挠曲并发生破坏,背火面出现大量鼓曲,沿纵向分布,鼓曲处应力较大。

3 参数分析

通过对模型的验证,笔者对模型中的部分参数进行调整,探究不同参数对于时间耐火极限的影响。火灾作用下影响构件耐火极限的参数及取值范围参照文献[1],取代率 γ 为0%~100%、含钢率 α 为4.12%~8.51%、荷载比 n 为0.5~0.8、荷载偏心率 e/a_e 为-0.4~0.4。通过建立相关参数的有限元分析模型,探究各参数对构件耐火极限的影响^[14-20]。

3.1 含钢率

图10为含钢率对构件耐火极限的影响。

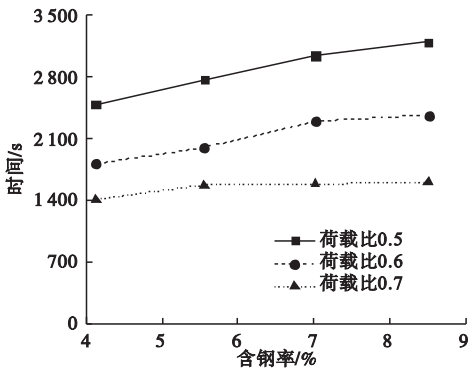


图10 含钢率的影响

Fig. 10 Influence of steel ratio

从图10可以看出,随着含钢率增加,构件耐火极限呈现稳定上升的趋势。但是,从不同荷载比的曲线中,当含钢率增加至7.02%后,试件的耐火极限增幅明显降低,这是由于含钢率主要受钢管壁厚的影响,增加含钢率,即增加钢管壁厚,在火灾中,钢材的导热性能要高于混凝土,所以钢管混凝土的力学性能虽然随含钢率增大而增加,但同时由于钢材含量的增加,结构整体受到高温的影响程度也相应增大。随荷载比的增加,混

凝土和钢管在高温作用下的劣化速度加快。含钢率对耐火极限的影响低于荷载比,荷载比越大,耐火极限增幅越小。当含钢率不变时,荷载比的增大会使构件对火灾作用的抵抗性能下降,从而导致耐火极限的明显下降。

3.2 取代率

取代率对构件的影响如图11所示。由图可知,曲线整体变化趋势较小,通过观察各个试件的耐火极限的具体数值,发现模型的耐火极限由核心普通混凝土被25%再生混凝土取代时,耐火极限比例最高。这是由于再生混凝土的骨料与普通混凝土骨料之间的差异导致的。再生混凝土骨料相比普通混凝土骨料具有更高的吸水率与孔隙率,所以在火灾过程中由于水分蒸发所带走的热量要高于普通混凝土,同时也降低了热量对混凝土力学性能的影响。因此,取代率的变化对于模型的耐火极限的影响较小。

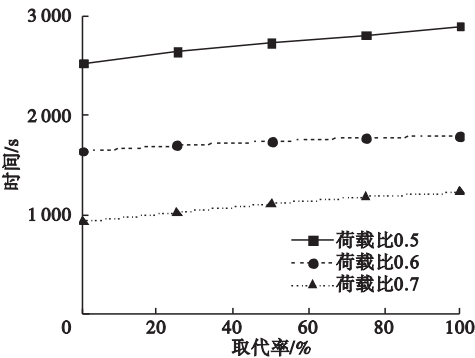


图11 取代率的影响

Fig. 11 Effect of replacement ratio

3.3 荷载偏心率

不同荷载偏心率的耐火极限变化曲线如图12所示。由图可知,对于三面受火条件下的方钢管约束钢筋再生混凝土柱而言,当荷载偏心率为0时,耐火极限最大,荷载偏心点无论移向哪一面耐火极限均降低。而当荷载比较低时,构件在升温初期由于热膨胀向受火面挠曲,但随着受火时间增加,受火面劣化严重,构件逐渐向背火面挠曲。而荷载作用点向背火面偏移时,减缓了受火面劣化后构

件破坏的进程,因此构件的耐火极限相比荷载作用点偏向受火面的构件降低幅值较小。当荷载比较大时,荷载作用点越偏向背火面构件破坏越快。

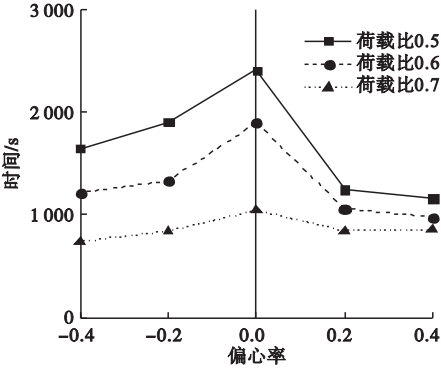


图 12 荷载偏心率的影响

Fig. 12 Effect of load eccentricity

3.4 荷载比与混凝土强度

不同荷载比对于试件耐火极限的影响如图 13 所示。

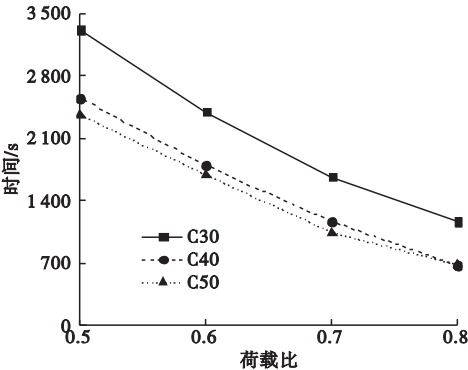


图 13 荷载比与混凝土强度的影响

Fig. 13 Effect of load ratio and concrete strength

由图 13 可知,曲线随荷载比的增大存在明显的下降趋势,说明在受火状态下,轴向荷载作为作用于钢管混凝土纵向的直接荷载,对其本身的力学性能的劣化速度起到了很大的推进作用。以混凝土强度等级为 C40 的模型为例,随着荷载比的提升,耐火极限迅速下降,但同时下降的趋势也在减缓,可以看出,由 0.5 增加到 0.6 时,耐火极限下降的比例要明显高于后续荷载比增加带来的耐火极限的降低比例。同时,图中分别选取混凝土强度等级为 C30、C40 和 C50 来分析不同混

凝土强度对其影响,容易看出,混凝土强度等级的提升降低了试件的耐火极限,这是因为混凝土强度等级提升使火灾情况下的试件所受荷载增加导致的。

4 结 论

(1)三面受火条件下,构件横截面的温度分布及应力分布均沿背火面与其法线方向对应的受火面在截面中点连线呈轴对称形式。

(2)当荷载比为 0.5 时,构件初期由于非均匀受火面的影响,向受火面挠曲。但由于受火面的劣化而最终转变为向背火面挠曲,但当荷载比为 0.6 和 0.7 时,构件破坏进程加快,且为直接向受火面挠曲的破坏模式。

(3)含钢率的提升对于构件的耐火极限具有一定的促进作用,当含钢率由 4.12% 增加至 5.55% 时,耐火极限提升了 10.36%;当含钢率由 5.55% 增加至 7.02% 时,耐火极限增加了 14.77%;当含钢率由 7.02% 增加至 8.51% 时,荷载比增加了 3.09%。随含钢率的升高,材料自身缺陷造成的影响也会越来越明显,耐火极限的增长减缓。

(4)混凝土强度、取代率对三面受火构件的耐火极限影响较小。偏心作用点偏移方向与初始缺陷挠曲方向一致时,会对构件的破坏起到减缓作用,适当的增加构件沿初始缺陷方向的荷载偏心率可以提升耐火极限。

参考文献

[1] 周绪红,刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计 [M]. 北京:科学出版社,2010.
(ZHOU Xuhong, LIU Jiepeng. Performance and design of steel tube confined concrete columns[M]. Beijing: Science Press, 2010.)

[2] LIU F Q, YANG H, GARDNER L. Post-fire behaviour of eccentricity loaded reinforced concrete columns confined by circular tubes [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 122: 495 – 510.

[3] 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 behaviours of circular steel tube confined reinforced concrete

- columns [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.)
- [4] 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.)
- [5] 王尚. 火灾作用下方钢管约束混凝土中柱受力性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
(WANG Shang. Load bearing capacity study on tubed reinforced-concrete intermediate columns at elevated temperature [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.)
- [6] 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.)
- [7] 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.)
- [8] 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.)
- [9] LIE T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of structural engineering, ASCE, 1994, 120(5): 1489-1509.
- [10] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 1445-1449.
(XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J]. Journal of tongji university (natural science), 2007, 35(11): 1445-1449.)
- [11] 肖建庄, 黄运标. 高温后再生混凝土残余抗压强度[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3): 255-259.
(XIAO Jianzhuang, HUANG Yunbiao. Residual compressive strength of recycled concrete after high temperature [J]. Journal of building materials, 2006, 9(3): 255-259.)
- [12] 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.
- [13] HONG S. Analytical modeling of the standard fire behavior of loaded CFT columns [J]. Journal of constructional steel research, 2008, 65(1): 178-192.
- [14] Design of steel structures: part 1-2, general rules; structural fire design; BS EN 1993-1-2 [S]. British Standards Institution, 2004.
- [15] 李幅昌, 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 axial compression behavior of high strength concrete-filled square high strength steel tube with inner I-shaped CFRP [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(5): 779-786.)
- [16] 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. Study on mechanics properties of recycled concrete filled circular steel tube columns based on orthogonal design [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(3): 462-469.)
- [17] 闻洋, 张迎春, 梁东旭, 等. 薄壁钢管再生混凝土柱轴压敏感因素对比分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(5): 777-785.
(WEN Yang, ZHANG Yingchun, LIANG Dongxu, et al. Contrastive analysis on the axial compression sensitive factors of thin-walled steel tube recycled concrete columns [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(5): 777-785.)
- [18] 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.)
- [19] 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.)
- [20] 吴潜, 李幅昌, 罗元伟, 等. 矩形钢管混凝土键连接剪力墙框梁柱的力学性能研究[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.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)