

引用本文:张玉琢,刘雨杰,吕学涛. 相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱抗火性能[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(3):91-98.
ZHANG Yu-zhuo, LIU Yu-jie, LYU Xue-tao. Fire Resistance of Square Tubed Steel Reinforced Concrete Columns in Relative Fires[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 91-98.

DOI:10.19815/j.jace.2018.05050

相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱抗火性能

张玉琢¹, 刘雨杰², 吕学涛³

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中铁建工集团山东有限公司, 山东 青岛 266000;
3. 佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528000)

摘要:为研究相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱的耐火极限,运用 ABAQUS 建立了 ISO 834 标准火灾作用下方钢管约束型钢混凝土柱的有限元模型,包括温度场分析模型和耐火极限分析模型,用已有的相关试验进行验证,并分析了截面温度场和力学性能的变化规律。在此基础上分析荷载比、计算长度、型钢含钢率、截面尺寸、混凝土强度等参数对构件耐火极限的影响规律。基于上述规律并结合大量计算结果定量给出了相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱的耐火极限简化计算式。结果表明:荷载比和计算长度对构件耐火极限影响较大,随着荷载比和计算长度的增加,构件的耐火极限呈线性降低;截面尺寸对构件的耐火极限影响较大,随着截面尺寸的增加,构件的耐火极限呈线性增加;随着型钢含钢率的增加,构件的耐火极限增加并不明显;耐火极限计算式计算精度良好,可为相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱抗火设计提供参考。

关键词:方钢管约束型钢混凝土柱;相对两面受火;抗火性能;含钢率

中图分类号: TU352.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)03-0091-08

Fire Resistance of Square Tubed Steel Reinforced Concrete Columns in Relative Fires

ZHANG Yu-zhuo¹, LIU Yu-jie², LYU Xue-tao³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;

2. China Railway Construction Engineering Group Shandong Co., Ltd, Qingdao 266000, Shandong, China;

3. School of Transportation and Civil Engineering, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: In order to study the fire resistance of square tubed steel reinforced concrete columns in relative fires, the finite element model of square tubed steel reinforced concrete columns under ISO 834 standard fire curve was established by using ABAQUS, including temperature field analysis model and fire resistance analysis model. The model was analyzed and verified by the existing related experiments. The change rules of the temperature field and mechanical properties of the section were analyzed. On this basis, the influences of load ratio, calculation length, steel content of steel, dimensions, concrete strength and other parameters on the fire resistance of the

收稿日期:2019-06-07

基金项目:辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902027);天津重大专项项目(18ZXGDGX00030)

作者简介:张玉琢(1988-),男,辽宁阜新人,副教授,工学博士,E-mail:zhangyuzhuo@sjzu.edu.cn.

通信作者:吕学涛(1979-),男,河北保定人,副教授,工学博士,E-mail:lxwww30@sina.com.

component were analyzed. Based on the above rules and combined with a large number of calculation results, the simplified calculation formula for the fire resistance of the confined steel concrete columns with square steel tubes on two sides subjected to fire was given quantitatively. The results show that the load ratio and the calculated length have great influence on the fire resistance, with the increase of the load ratio and the calculation length, the fire resistance of components decrease linearly. The section dimensions has a greater influence on the fire resistance of the component, and the fire resistance of the component increases with the section dimensions. With the increase of the steel content of steel, the increase of the fire resistance of the components is not obvious. The formula has a good calculation accuracy and can be used for the concrete column fire resistance of square steel tubes confined by two sides of fire.

Key words: square tubed steel reinforced concrete column; relative fire; fire resistance; steel content

0 引言

钢管约束混凝土柱(Steel Tube Confined Concrete Column)是指在钢管中填充混凝土,钢管不直接承受竖向荷载,而主要为核心混凝土提供侧向约束作用的一种组合构件^[1-4]。钢管约束混凝土柱具有很好的承载力、抗震性能,钢管本身可以直接作为永久模板,减少施工难度和模板用量,提高施工速度^[5],近年来在大跨结构及高层建筑中得到应用。把承受竖向荷载的型钢置于钢管约束混凝土柱的内部,钢管不承担竖向荷载,对混凝土起约束作用,火灾下型钢力学性能损失更少,有利于提高构件和结构的防火性能。乔建刚^[6]设计并制作了3个圆形截面和3个方形截面钢管约束型钢高强混凝土短柱试件、1个圆形截面和1个方形截面箍筋约束型钢高强混凝土短柱对比试件,试验表明:试件型钢与混凝土黏结破坏,发生了严重的整体剪切破坏;与箍筋约束型钢高强混凝土短柱相比,外包钢管推迟了构件破坏形态的出现时间,显著提高了构件的承载力和延性。

钢管约束混凝土柱的研究日趋成熟,其在抗火方面有很好的表现,刘发起^[7]进行了4个ISO 834标准火灾作用下钢管约束钢筋混凝土柱足尺明火试验及1个钢管混凝土柱对比试验,考察了荷载比和构件模式对火灾下钢管约束钢筋混凝土柱的变形和耐火极限的影响,研究表明:与钢管混凝土柱相比,钢管约束钢筋混凝土柱具有更好的防火性能。与传统的型钢混凝土柱及钢管混凝土柱相比,钢管约束型钢混凝土柱由于外包钢管的约束作用使得核心混凝土从柱受压之初就处于三向受压状态,同时能有效避免保护层脱落、箍筋屈服、纵筋失稳等现象的发生,且受火过程中由于混凝土对型钢的保护作用,可

大大提高构件的承载力和延性。王卫永等^[8]利用有限元软件 ABAQUS 对火灾下钢管约束型钢混凝土柱的受力性能进行研究,提出处于 ISO 834 标准火灾作用下的轴心受压钢管约束型钢混凝土柱承载力计算方法,并对影响构件耐火极限的因素进行了参数分析。

构件的非均匀受火不同程度地降低了方钢管约束型钢混凝土柱的整体温度,亦使材料的损伤程度较四面均匀受火情况有所减轻;受火方式的改变使方钢管约束型钢混凝土柱产生温度变形和附加偏心距,使非均匀受火的方钢管约束型钢混凝土柱的受力机理和防火性能与四面受火情况有较大差异。因此,研究非均匀受火后方钢管约束型钢混凝土柱的过火性能,可为火灾后该类结构构件的损伤评估与加固修复提供建议,对于尽快恢复建筑结构的使用功能及降低火灾造成的经济损失具有重要意义。

鉴于国内外对方钢管约束型钢混凝土柱抗火研究较少,相关试验局限于均匀受火方式,而实际工程中由于建筑构造和功能性等要求,构件在火灾下处于非均匀受火状态,本文采用有限元软件 ABAQUS 分析 ISO 834 标准火灾作用下相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱耐火极限的影响参数及其影响规律,并定量给出耐火极限简化计算公式。

1 有限元模型及其验证

1.1 温度场模型

基于 ABAQUS 有限元分析软件,混凝土和型钢采用八节点三维热分析实体单元 DC3D8,钢管采用四节点热分析壳单元 DS4。材料的热工参数直接影响温度场模型计算结果的准确性,选用 Lie^[9] 建议的混凝土及钢材热工参数,通过调整混凝土比热

容以考虑 5% 含水率的影响,且假定温度超过 100 ℃ 时水分全部蒸发。整个受热过程采用 ISO 834 标准升温曲线,构件与外部环境的热交换按第三类边界条件(对流换热和热辐射)确定,受火面对流换热系数取 $25\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$,背火面对流换热系数取 $9\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$,综合辐射系数取 $0.5^{[10]}$ 。

1.2 热力学分析模型

本文混凝土和型钢采用八节点三维实体单元 C3D8R,钢管采用四节点壳单元 S4R,钢筋采用二节点索单元 T3D2。混凝土材料本构关系参考欧洲规范 Eurocode 4^[11],混凝土采用塑性损伤模型,钢管与型钢的本构关系参考 Lie 等^[12]的建议。钢管和混凝土表面切向按库仑摩擦实现,常温时摩擦因数选取 0.6,高温时取 0.3,法向按硬接触实现。型钢与外包混凝土之间的界面认为接触面上钢和混凝土几何位置相同的点具有相同的位移或变形,采用

Embedded 约束实现。采用平面内受力分析,对于轴压试件,由于受火状态下压弯方向的不确定性,采用线铰约束,设置柱底端自由度 $U_1=U_2=U_3=R_2=R_3=0$;设置柱顶端自由度 $U_1=U_2=R_2=R_3=0$,并考虑 1/1 000 柱长的初始缺陷。

1.3 模型验证

目前,有关方钢管约束型钢混凝土柱非均匀受火试验还未见报道,本文分别就已有试验的型钢混凝土柱温度场^[13]和钢管约束型钢混凝土柱力学场^[14-15]进行模拟验证。表 1 为试件的参数,其中 D , B 分别为试件直径和边长, L 为试件长度, f_y 为钢材屈服强度, f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度, N_u 为试件轴压承载力, α_H 为型钢含钢率($\alpha_H=A_H/A_c$, A_H , A_c 分别为型钢和混凝土截面面积)。从图 1,2 可以看出,试件温度-时间和荷载-挠度($N-u$)、荷载-应变($N-\epsilon$)曲线的模拟值与试验值拟合较好,可以验证

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

数据来源	试件编号	D/mm	B/mm	L/mm	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	N_u/kN	H 型钢型号	$\alpha_H/\%$
文献[10]	ZYN-1	300	300	3 810	235	30			
文献[11]	STSRC-200-2.0-3-0	200	200	600	235	60	3 496	HW100×100	5.8
文献[12]	CTSRC-240-6-2-0	240	240	1 440	235	60	3 797	HW100×100	4.8

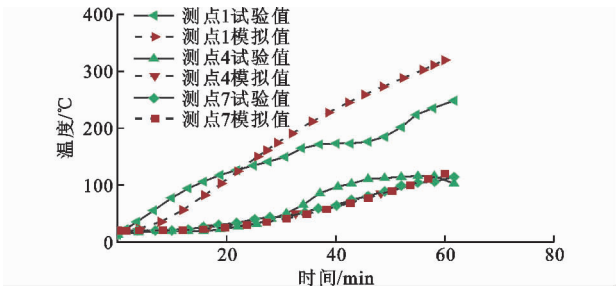


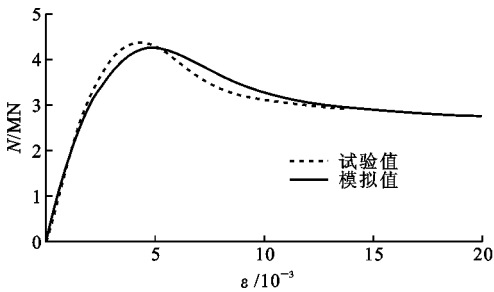
图 1 ZYN-1 温度场模型验证

Fig. 1 Model Verification of Temperature Field of ZYN-1
所建模型的有效性。

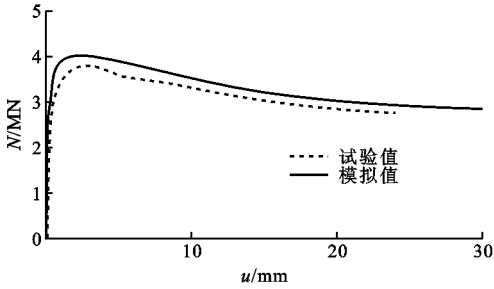
2 抗火性能分析

2.1 温度场分析

算例基本条件:计算长度 $L=3\ 000\text{ mm}$,截面边长 $B=300\text{ mm}$,钢管厚度 $t_s=4\text{ mm}$,型钢选用 HW150×150,型钢含钢率 $\alpha_H=4.3\%$,图 3 为有限元模型。图 4 给出了方钢管约束型钢混凝土柱不同测点温度-时间($T-t$)曲线。由图 4 可知,受火 100 min 时,型钢温度差值最大为 70 ℃,升温过程中测点 1(型钢翼缘中点)、测点 2(型钢翼缘端点)温度均高于测点 4(型钢腹板中心),在 40 min 左右测点 3(型钢腹板和翼缘交点)温度开始高于测点 4,对比



(a) 试件 STSRC-200-2.0-3-0



(b) 试件 CTSRC-240-6-2-0

图 2 力学场模型验证

Fig. 2 Model Verification of Mechanical Field

文献[16],可能由于翼缘距离受火侧较近,热量从受火面传递到型钢翼缘,再沿型钢传递。图 5 为不同受火时刻的截面对称轴上温度梯度分布,其中, d 为柱对称轴到柱边缘的距离。由图 5 可知,高温及温

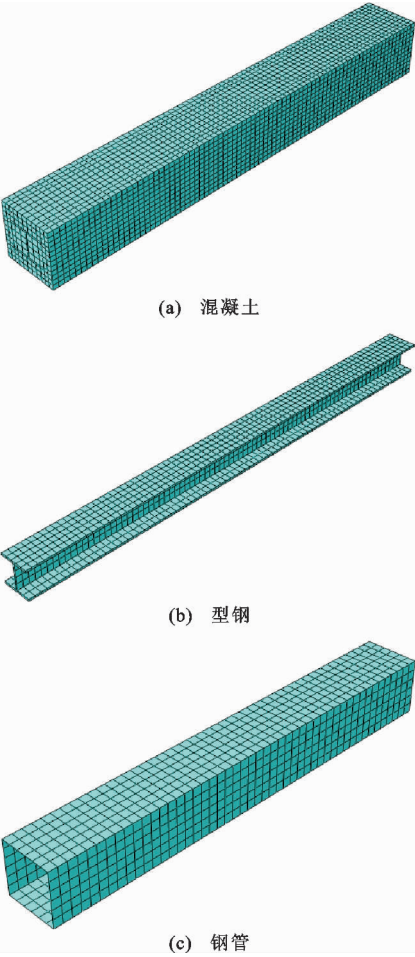


图3 有限元模型
Fig. 3 Finite Element Models

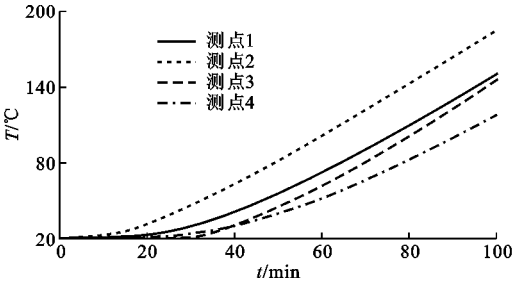


图4 测点温度-时间关系

Fig. 4 Temperature-time Curves of Measuring Points

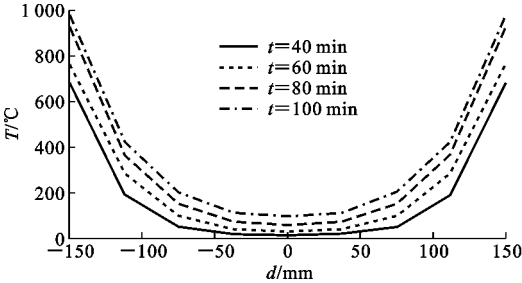


图5 试件截面温度梯度

Fig. 5 Temperature Gradient of Specimen Cross Section

度变化剧烈的区域集中在受火面附近,且距受火面越远,温度梯度变化越缓。这是因为混凝土导热系数小、比热容大,且外围混凝土的体积比较大,吸热能力大,越靠近混凝土中心对环境温度变化的反应越滞后。相对两面受火情况下受火边界双轴对称,导致截面温度分布也呈双轴对称,且柱截面温度最低区域位于截面中心。受火 40,60,80,100 min 时,最大温度差值分别为 650,720,850,860 °C,可见随着受火时间的增加,热传导使得构件内部温度持续升高,截面最大温差先增加后逐渐变缓。

2.2 耐火极限分析

采用第 2.1 节典型算例的参数,建立构件常温力学场和火灾下力学场典型算例模拟,荷载比 n 取 0.6,混凝土强度等级取 C40,荷载偏心率 e/r_a (e 为荷载作用点到截面形心距离, $r_a=B/2$) 取 0。之后对相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱进行顺序热力耦合分析。图 6 为不同受火时刻构件跨中截面混凝土纵向应力云图。由图 6 可知: $t=10$ min 时,型钢附近混凝土纵向高应力较为集中,由于混凝土受火材性劣化,受火面附近混凝土纵向应力较弱,由截面形心向翼缘两侧递减; $t=40$ min 时,受火面附近混凝土进一步劣化,致使纵向应力降低,核心混凝土纵向应力提高,混凝土纵向应力梯度增加; $t=70$ min 时,构件失稳,受拉侧出现拉应力。图 7 为构件跨中截面型钢纵向应力云图。由图 7 可知: $t=10$ min 时,型钢翼缘纵向应力大于腹板,呈双轴对称分布; $t=40$ min 时,型钢纵向应力进一步提高; $t=70$ min 时,型钢跨中挠度增加,偏向受拉侧翼缘出现拉应力,偏向受压侧翼缘受压。图 8 为钢管 Mises 应力云图。由图 8 可知: $t=10$ min 时,钢管角部应力较大,背火面跨中偏向受压侧应力集中,向外扩散、递减,此时构件开始失稳; $t=40$ min 时,钢管角部应力减弱,背火面跨中偏向受压侧应力集中加剧,向外扩散、递减; $t=70$ min 时,构件失稳,背火面跨中偏向受压侧出现鼓曲,沿纵向分布,鼓曲处应力较大。受火过程中,型钢纵向应力大于混凝土纵向应力,偏向受拉区型钢翼缘拉应力大于偏向受拉区混凝土拉应力。

3 影响因素分析

选取影响构件耐火极限的参数^[17-19]:荷载比、计算长度、型钢含钢率、截面尺寸、混凝土强度,利用所建立的有限元模型分析 ISO 834 标准火灾作用下各参数对构件耐火极限的影响规律。参数范围:荷载

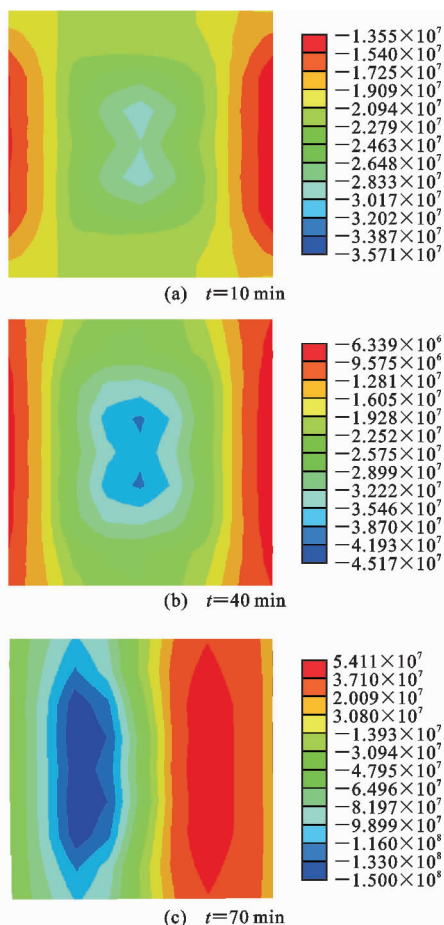


图 6 跨中截面混凝土纵向应力云图 (单位: Pa)

Fig. 6 Longitudinal Stress Clouds of Concrete in Mid-span Cross Section (Unit: Pa)

比取 0.5~0.8, 计算长度取 2.4~3.3 m, 截面边长取 250~400 mm, 混凝土强度等级取 C30~C50, 型钢含钢率取 2.34%~5.55%, 分别选取 HW100×100, HW125×125, HW150×150, HW175×175。

3.1 荷载比

图 9 为荷载比对相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱耐火极限的影响, 其中, t_R 为构件耐火极限计算值。由图 9 可知, 荷载比对构件的耐火极限影响较大, 随着荷载比的增加, 构件的耐火极限呈线性降低。以计算长度等于 3 m 为例, 荷载比由 0.5 提高到 0.6 时耐火极限降低 13.4%, 荷载比由 0.6 提高到 0.7 时耐火极限降低 22.9%, 荷载比由 0.7 提高到 0.8 时耐火极限降低 30.96%, 表明荷载比越大, 其对耐火极限的影响越明显。

3.2 计算长度

图 10 为计算长度对相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱耐火极限的影响。由图 10 可知, 计算长度对构件的耐火极限影响较大, 随着计算长度

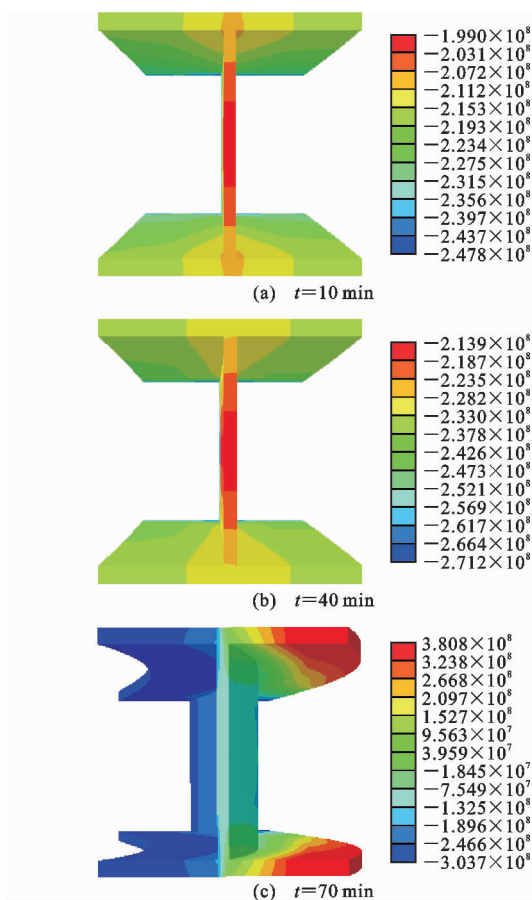


图 7 跨中截面型钢纵向应力云图 (单位: Pa)

Fig. 7 Longitudinal Stress Cloud of Section Steel in Mid-span Cross Section (Unit: Pa)

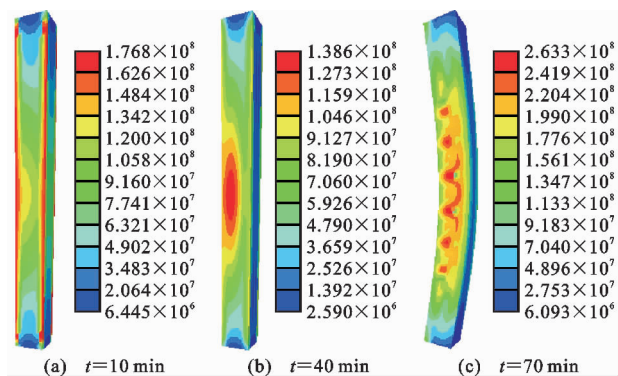


图 8 钢管 Mises 应力云图 (单位: Pa)

Fig. 8 Mises Stress Clouds of Steel Tube (Unit: Pa)

的增加, 构件的耐火极限呈线性降低。构件在火灾作用下屈曲, 即构件在达到强度极限状态前就已经丧失整体稳定, 构件为相对两面受火, 截面温度场为双轴对称, 热膨胀变形不产生附加侧向挠度, 所以构件为轴心受压, 轴心受力构件长细比越大, 构件刚度越小, 稳定承载力越低, 相应构件耐火极限越低。计算长度相同时, 混凝土强度对构件耐火极限的影响

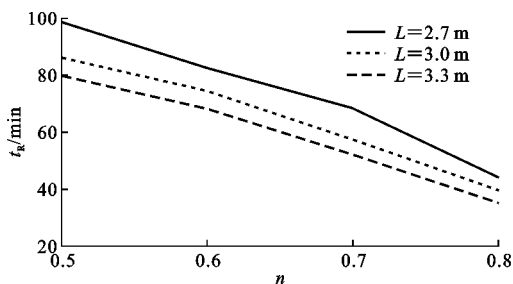


图 9 荷载比的影响

Fig. 9 Effect of Load Ratio

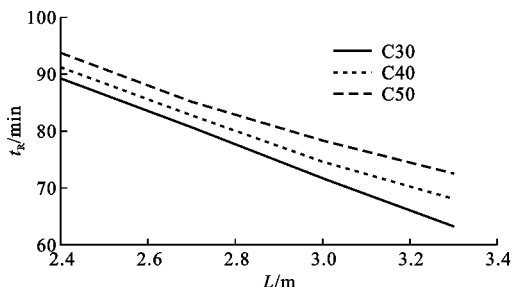


图 10 计算长度的影响

Fig. 10 Effect of Calculation Length

并不明显,这是因为在荷载比相同条件下,混凝土强度的提高使得火灾下构件受压荷载增大。以混凝土强度 C40 为例,计算长度由 2.4 m 提高到 2.7 m 时耐火极限降低 9.21%,计算长度由 2.7 m 提高到 3 m 时耐火极限降低 9.89%,计算长度由 3 m 提高到 3.3 m 时耐火极限降低 8.72%。

3.3 型钢含钢率

图 11 为型钢含钢率对相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱耐火极限的影响。由图 11 可知,型钢含钢率对构件的耐火极限影响较小,随着型钢含钢率增加,构件耐火极限增加并不明显。型钢含钢率增加对构件常温极限承载力的提高作用明显,荷载比相同时,火灾下施加荷载增大,并且随着型钢含钢率的增加,型钢截面面积越大,混凝土保护层厚度越小,混凝土对型钢的保护作用降低,因此型钢含钢率对构件的耐火极限影响较小。以荷载比等于 0.6 为例,型钢含钢率由 2.3% 提高到 3.3% 时,耐火极限提高 0.4%,型钢含钢率由 3.3% 提高到 4.3% 时,耐火极限提高 5.8%,型钢含钢率由 4.3% 提高到 5.6% 时,耐火极限提高 0.66%。

3.4 截面尺寸

图 12 为截面尺寸对相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱耐火极限的影响。由图 12 可知,截面尺寸对构件的耐火极限影响较大,随着截面尺寸增加,构件的耐火极限呈线性增加,这是因为混凝土

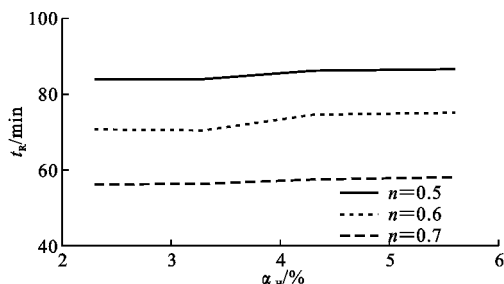


图 11 型钢含钢率的影响

Fig. 11 Effect of Steel Content of Section Steel

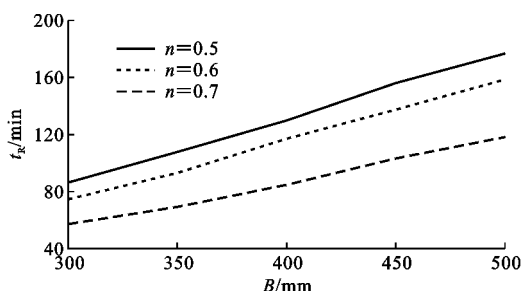


图 12 截面尺寸的影响

Fig. 12 Effect of Section Dimensions

截面面积增加,构件吸热能力增强;混凝土具有热惰性,核心混凝土和型钢整体温度降低,二者强度折减程度降低。以荷载比等于 0.6 为例,截面边长由 250 mm 增到 300 mm 时耐火极限提高 38.17%,截面边长由 300 mm 增到 350 mm 时耐火极限提高 24.65%,截面边长由 350 mm 增到 400 mm 时耐火极限提高 25.95%,可见截面尺寸对构件耐火极限的提高作用明显。

4 耐火极限简化公式

基于上节分析的各参数对构件耐火极限影响规律,以荷载比、计算长度、型钢含钢率、截面尺寸、混凝土强度为基本变量,回归了相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱耐火极限简化公式(1)^[20]。公式(1)参数适于工程常用范围:荷载比取 0.5~0.8,计算长度取 2.4~3.3 m,型钢含钢率取 2.34%~5.55%,截面边长取 250~400 mm,混凝土强度等级取 C30~C50 级。

$$t_R = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5 \quad (1)$$

式中: $\beta_1 = d_1 n^2 + d_2 n + d_3$; $\beta_2 = d_4 L + d_5$; $\beta_3 = d_6 f_{cu} + d_7$; $\beta_4 = d_8 \alpha_H + d_9$; $\beta_5 = d_{10} B + d_{11}$; $d_1 \sim d_{11}$ 为系数,取值见表 2。

图 13 为构件耐火极限模拟计算值 t_{Rf} 与回归公式计算值 t_R 的比较,二者相关系数为 0.996,二者之比平均值为 0.998,均方差为 0.033。总体对比结

表 2 系数 $d_1 \sim d_{11}$ 取值
Tab.2 Values of Coefficients $d_1 \sim d_{11}$

系数	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}
取值	0.322	-2.521	6.403	-1.864	2.025	0.004	0.838	0.457	0.256	0.909	-103.457

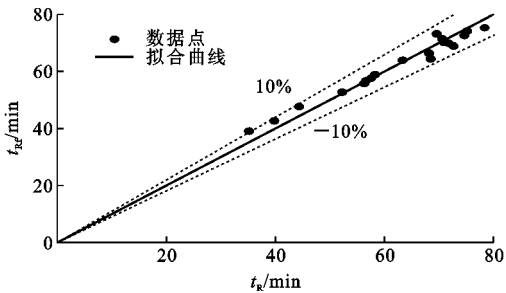


图 13 耐火极限模拟计算值与回归公式计算值的比较
Fig.13 Comparison of Simulation Values and Regression Values for Fire Resistance

果较好,表明公式(1)具有一定精度,可为该类构件抗火设计提供参考。

5 结 语

(1)相对两面受火的截面温度场呈双轴对称,距受火面越远,温度梯度变化越缓;火灾作用下混凝土对型钢具有很好的保护作用,对提高构件抗压能力和延性有利。

(2)荷载比和计算长度对构件耐火极限影响较大,随着荷载比和计算长度增加,构件的耐火极限呈线性降低;截面尺寸越大,构件耐火极限越大;型钢含钢率对构件的耐火极限影响较小。

(3)以荷载比、计算长度、截面尺寸、混凝土强度为基本变量,基于参数分析,回归了相对两面受火的方钢管约束型钢混凝土柱耐火极限的简化公式,该公式计算有良好精度。

参考文献:

References:

[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 Xu-hong, LIU Jie-peng. Performance and Design of Steel Tube Confined Concrete Column[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[2] TOMII M, SAKINO K, WATANBE K, et al. Lateral Load Capacity of Reinforced Concrete Short Columns Confined by Steel Tube[C]//ASCCS. Proceedings of the International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin: ASCCS, 1985:19-26.

[3] SAKINO K, SUN Y P, TOSHIHIKO N. Behaviour of

Concrete Confined in Square Steel Tube Under Axial Compression: Part 1: Details of Test Specimens[C]//AIJ. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan: Structures II. Tokyo: AIJ, 1991: 215-216.

[4] 马忠吉, 乔雷涛, 王伟, 等. 矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱滞回性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(8): 21-25.
MA Zhong-ji, QIAO Lei-tao, WANG Wei, et al. Experiment on the Rectangular Tubed RC Ultra Short Columns Under Axial Compression and Lateral Cyclic Load[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(8): 21-25.

[5] 杨有福, 孟春媛. 方中空夹层钢管混凝土横向局压性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(4): 92-98.
YANG You-fu, MENG Chun-yuan. Research on Performance of Square CFDST Under Lateral Partial Compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(4): 92-98.

[6] 乔建刚. 钢管约束型钢高强混凝土短柱滞回性能试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
QIAO Jian-gang. Experimental Research on Seismic Behavior of Steel Tube Confined Steel Reinforced High Strength Concrete Short Columns[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.

[7] 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 Fa-qi. Fire and Post-fire Behaviours of Circular Steel Tube Confined Reinforced Concrete Columns[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[8] 王卫永, 宋柯岩, 刘界鹏. 高温下钢管约束型钢混凝土柱的受力性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3): 58-66.
WANG Wei-yong, SONG Ke-yan, LIU Jie-peng. Fire Performance of Circular Tubed Steel Reinforced Concrete Columns[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(3): 58-66.

[9] LIE T T. Fire Resistance of Circular Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(5): 1489-1509.

[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.
LV Xue-tao. Fire Resistance Behaviour and Design of

- Concrete-filled Square Hollow Columns in Non-uniform Fires[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [11] BS EN 1994-1-2: 2005, Eurocode 4. Design of Composite Steel and Concrete Structures — Part 1-2: General Rules Structural Fire Design[S].
- [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] 成晓娟. 轴压型钢混凝土(SRC)柱抗火全过程试验研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2010.
- CHENG Xiao-juan. Experimental Study on the Centrally Axial Loaded SRC Columns Under Fire Including Whole Process of Heating and Cooling [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2010.
- [14] 王宣鼎. 钢管约束型钢混凝土短柱轴压及偏压力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- WANG Xuan-ding. Research on Axial and Eccentric Behavior of Tubed Steel Reinforced Concrete Stub Concrete Stub Columns[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [15] 闫 标. 钢管约束型钢混凝土中长柱静力性能及设计方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- YAN Biao. Research on Static Behavior and Design Method of Tubed Steel Reinforced Concrete Slender Columns[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [16] 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.
- LV Xue-tao, YANG Hua, ZHANG Su-mei. 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.
- [17] LIU F Q, YANG H, GARDNE L. Post-fire Behaviour of Eccentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined by Circular Steel Tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122: 495-510.
- [18] 刘发起, 潘雁翀, 杨 华. 考虑端部轴向约束的火灾下钢管混凝土柱力学性能有限元研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增 1): 310-317.
- LIU Fa-qi, PAN Yan-chong, YANG Hua. FEA on Mechanical Behavior of Axially Restrained Concrete-filled Steel Tubular Columns Subjected to Fire[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S1): 310-317.
- [19] 吕学涛, 刘雨杰, 张玉琢. 阴角邻面火灾作用下 L 形钢管混凝土柱耐火极限研究[J]. 火灾科学, 2018, 27(1): 30-37.
- LV Xue-tao, LIU Yu-jie, ZHANG Yu-zhuo. Fire Resistance of L-shaped Concrete Filled Steel Tubular Columns with Adjacent Fire[J]. Fire Safety Science, 2018, 27(1): 30-37.
- [20] 张玉琢, 刘雨杰, 吕学涛. 中空夹层方钢管再生混凝土柱耐火极限研究[J]. 钢结构, 2018, 33(4): 110-115.
- ZHANG Yu-zhuo, LIU Yu-jie, LYU Xue-tao. Research on Fire Resistance Limit of Recycled Concrete Filled Double Skin Steel Tubular Columns with Square Hollow Section[J]. Steel Construction, 2018, 33(4): 110-115.