

文章编号:1673-2049(2019)01-0076-09

中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力

张玉琢¹, 吕学涛², 李晓婷²

(1. 沈阳建筑大学 BIM 计算研究中心, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:为研究中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余力学性能,运用有限元分析软件 ABAQUS 建立了 ISO 834 标准火灾作用后中空夹层方钢管再生混凝土柱的有限元模型,分析了截面温度场和应力场的变化规律。在此基础上分析了混凝土强度、钢材强度、计算长度、受火时间、空心率、混凝土取代率、偏心率等参数对构件火灾后剩余力学性能的影响;结合大量计算结果给出了中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力简化计算公式。结果表明:构件的火灾后剩余承载力随钢材强度和混凝土强度的增加而增加;构件火灾后剩余承载力随计算长度和受火时间的增加,总体呈降低趋势,当受火时间超过 60 min 时,构件火灾后剩余承载力急剧降低;空心率和混凝土取代率对构件火灾后剩余承载力影响较小,构件火灾后剩余承载力随空心率的增加而降低,随混凝土取代率的增加先增加后降低;构件火灾后剩余承载力随偏心率的增加而降低;所提公式计算精度良好,可为中空夹层方钢管再生混凝土柱抗火设计提供参考。

关键词:方钢管再生混凝土柱;中空夹层;火灾;剩余承载力

中图分类号:TU312

文献标志码:A

Residual Bearing Capacity of Hollow Sandwich Square Steel Tube Recycled Concrete Column After Fire

ZHANG Yu-zhuo¹, LU Xue-tao², LI Xiao-ting²

(1. Computing Research Center of BIM, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;

2. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the residual mechanical properties of hollow sandwich square steel tube recycled concrete column after fire, the finite element model of hollow sandwich square steel tube recycled concrete column under ISO 834 standard fire action was established by using finite element analysis software ABAQUS. The variation of temperature field and stress field of cross section was analyzed after verification of relevant experiments. On the basis, the effects of concrete strength, steel strength, calculated length, fire time, hollow ratio, concrete substitution ratio and eccentricity on the residual mechanical properties of components after fire were analyzed. A simplified formula for calculating the residual bearing capacity of hollow sandwich square steel tube recycled concrete column after fire was given quantitatively based on a large number of calculation results. The results show that residual bearing capacity of components increases with the increase of steel strength and concrete strength after fire. The residual bearing capacity of components decreases with the increase of calculating length and fire

收稿日期:2018-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51208246, 51808352);辽宁省教育厅科学研究一般项目(LJYL033)

作者简介:张玉琢(1988-),男,辽宁阜新人,讲师,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: lxtwww30@sina.com.

time. When the fire time exceeds 60 min, the residual bearing capacity of components decreases sharply after fire. The hollow ratio and concrete substitution ratio have little influence on the residual bearing capacity of components after fire. The residual bearing capacity of components after fire decreases with the increase of hollow ratio, and increases first and then decreases with the increase of concrete substitution ratio. The residual bearing capacity of components decreases with the increase of eccentricity after fire. The calculation accuracy of the proposed formula is good, which can provide reference for fire resistance design of hollow sandwich square steel tube recycled concrete columns.

Key words: square steel tube recycled concrete column; hollow sandwich; fire; residual bearing capacity

0 引言

中空夹层钢管再生混凝土是将 2 层钢管同心放置,并在其间灌入符合承载力要求的再生混凝土。由于中空夹层钢管混凝土^[1-4]中的内层钢管既可以替代实心钢管混凝土中核心混凝土轴压承载力,又可以为结构提供较好的抗弯承载力,所以它还具有更好的抗弯性能,该种结构是一种绿色、环保、经济的建筑结构形式,不仅能够满足建筑结构对承载力、刚度和延性等的要求,还能最大限度节约材料,降低成本,减小结构自重,实现建筑材料的再利用。

中空夹层钢管混凝土具有多种截面形式,即圆套圆、方套方、方套圆。余鑫等^[5]进行了中空夹层钢管混凝土轴压短柱火灾后剩余承载力试验研究,刘晓等^[6]进行了高温后中空夹层钢管混凝土柱轴压性能研究,张磊^[7]完成了 9 个方钢管再生混凝土柱耐火性能的试验研究,结果表明:试件的耐火极限随轴压比增大和防火保护层厚度减小而降低;再生粗骨料取代率从 0%~100%变化时,试件的耐火极限呈现出先增大后减小的变化趋势。罗超宁等^[8]进行了 1 个实心 and 2 个空心率不同的空心截面足尺钢管再生混凝土柱耐火试验,并进行了相同截面尺寸的 3 根足尺钢管普通混凝土对比试验,结果表明钢管再生混凝土柱的耐火极限普遍高于钢管普通混凝土柱的耐火极限。赵均海等^[9]进行了圆中空夹层钢管混凝土柱承载力研究,提出了圆中空夹层钢管混凝土柱的极限承载力计算公式。张向冈等^[10]进行了钢管再生混凝土轴压长柱试验研究及力学性能分析。李文贵等^[11]进行了再生骨料混凝土破坏机理与改性研究,结果表明:界面过渡区是再生骨料混凝土的最薄弱区域,改善再生骨料混凝土的破坏性能最为关键的是强化界面过渡区。

本文选取方中空截面,对该种截面钢管再生混

凝土柱进行火灾后剩余承载力的研究。利用 ABAQUS 有限元软件,对可能影响中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力的参数进行分析,主要包括:混凝土强度、钢材强度、计算长度、受火时间、空心率、取代率、偏心率等。根据参数分析结果,给出火灾后中空夹层方钢管再生混凝土柱剩余承载力简化计算公式,为工程实践中计算该类构件火灾后剩余承载力提供参考。

1 有限元模型的建立

利用有限元软件 ABAQUS 对中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力进行数值分析,分别建立三维温度场和力学场模型。

1.1 三维温度场模型

构件升温全过程采用 ISO 834 标准升温曲线模拟,初始温度设置为 20℃。钢材热工参数选择文献[12]中提供的表达式。再生混凝土热工参数以肖建庄等^[13]所给混凝土导热系数理论公式为基础,计算得到再生混凝土的导热系数与再生粗骨料取代率的变化关系,同时参考欧洲规范^[14]得到不同再生粗骨料取代率混凝土的比热容。钢材的热膨胀系数采用文献[15]中提供的表达式,文献[16]试验证明再生混凝土热膨胀系数与普通混凝土热膨胀系数基本相同,约为 $1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。混凝土采用 8 节点三维实体单元 DC3D8,内、外钢管均采用 4 节点壳单元 DS4 模型。内、外钢管与核心混凝土之间的相互接触类型均设置为 Tie 连接。网格划分采用结构网格划分,钢管与混凝土之间采用 Tie 约束。边界条件为第 3 类边界条件,对流换热系数取 $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,综合辐射系数取 0.5^[17-19]。

1.2 力学场模型

力学场模型中,钢材本构关系参考文献[20],再生混凝土的本构关系采用肖建庄等^[21-22]考虑了再生

粗骨料取代率的混凝土应力-应变曲线,即

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

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

$$b=0.8(7.648\ 3\gamma+1.142)\quad (3)$$

式中: $y=\sigma/f_c$, f_c 为混凝土棱柱体轴心抗压强度, σ 为再生混凝土应力; $x=\varepsilon/\varepsilon_0$, ε 为再生混凝土应变, ε_0 为峰值应变; a,b 为待定参数; γ 为再生混凝土取代率。

混凝土采用 8 节点三维实体单元 C3D8R,钢管采用 4 节点壳单元 S4R。在构件的上、端面各设置上、下端点,并将上、下端点分别与上、端面以 Rigid Body 绑定。力学分析时,约束柱底部沿 X,Y,Z 三个方向的转角和位移,上部约束 X,Z 方向的转角和 X,Y 方向的位移,在 Z 方向可以自由移动^[18]。内、外钢管与混凝土的接触形式均设定为面接触。界面法线方向为硬接触;切线方向为库仑摩擦(摩擦因数为 0.4)。考虑构件的几何非线性并

设置初始缺陷,取构件长度的 1/1 000。划分网格时与上述温度场中划分一致,并将上述温度场中生成的节点温度文件导入到力学场模型中,进而在力学场中得出荷载-变形关系曲线。

2 试验验证

由于目前针对中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后力学性能的试验研究还未见报道,同时考虑本文研究与中空夹层钢管混凝土的火灾后剩余承载力研究和钢管再生混凝土柱常温极限承载力研究相似,因此选取文献[5]中空夹层钢管混凝土柱火灾后性能试验结果和文献[8]中钢管再生混凝土长柱力学性能试验结果进行验算,选取的试件参数见表 1、2。表 1 中 D_i,D_o 分别为试件内、外钢管边长, t_{so} 为试件外钢管厚度(内钢管厚度与外钢管厚度相同), L 为试件计算长度, A_{si},A_{so} 分别为内、外钢管截面面积, A_c 为夹层混凝土截面面积, t 为试件受火时间, N_{ue} 为试件实测的火灾后极限承载力。表 2 中 B 为方钢管边长, λ 为长细比, $N_{ue,0}$ 为构件常温极限承

表 1 文献[5]试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens in Literature [5]

截面形式	试件编号	D_i/mm	D_o/mm	t_{so}/mm	L/mm	A_{si}/mm^2	A_{so}/mm^2	A_c/mm^2	t/min	N_{ue}/kN
方套方	CCSF-F	100	200	2.49	600	971	1 967	28 033	90	820
方套方	SSSC	100	200	2.49	600	971	1 967	28 033	0	1 626

表 2 文献[8]试件参数

Tab. 2 Parameters of Specimens in Literature [8]

截面形式	试件编号	B/mm	t_{so}/mm	L/mm	$\gamma/\%$	λ	$N_{ue,0}/\text{kN}$
方形	S-3	120	2.45	1 200	100	34.64	929.04
方形	S-4	120	2.45	1 500	100	43.30	976.08

载力。

图 1 为文献[5]试件荷载-应变($N-\varepsilon$)关系曲线。图 2 为文献[8]试件荷载-轴向应变关系曲线。由图 1、2 可知,模拟结果与试验结果吻合较好,可以验证所建模型的有效性。

3 温度场及应力场分析

3.1 温度场典型算例

建立典型温度场模型^[23-25],相关建模参数为:计算长度 $L=3\ 500\ \text{mm}$,外钢管厚度 $t_{so}=6\ \text{mm}$,内钢管厚度 $t_{si}=3\ \text{mm}$,构件外钢管边长 B_o 和内钢管边长 B_i 分别取 400、160 mm,空心率 $\chi=0.412$,受火时间 $t=60\ \text{min}$,图 3 为构件的有限元分析模型。图 4 为构件的截面形式。图 5 为受火时间 60 min 的构件横截面温度场云图。从图 5 可以看出:均匀受

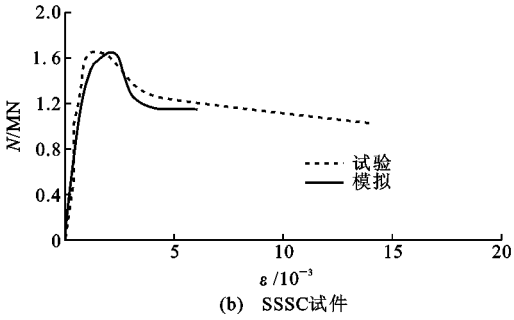
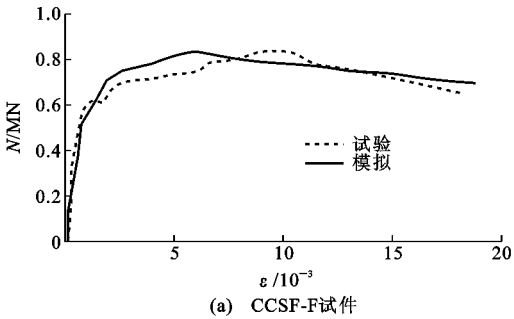


图 1 文献[5]荷载-应变关系曲线

Fig. 1 Load-strain Curves in Literature [5]

火情况下受火边界双轴对称,截面温度场也双轴对称;外钢管和构件四角混凝土温度最高,内钢管与其

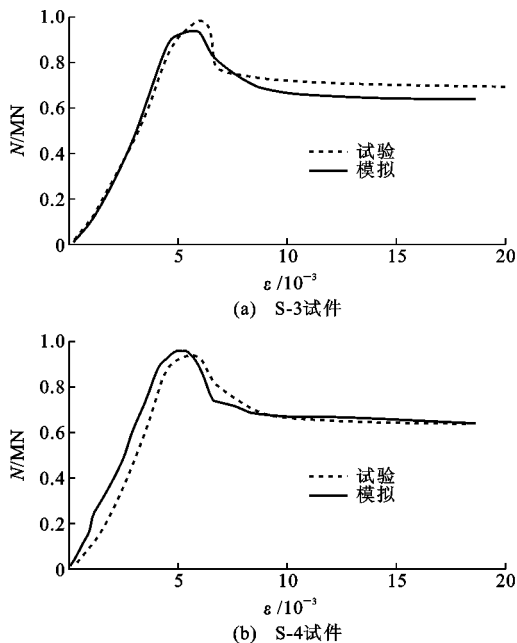


图 2 文献[8]荷载-轴向应变关系曲线

Fig. 2 Load-axial Strain Curves in Literature [8]

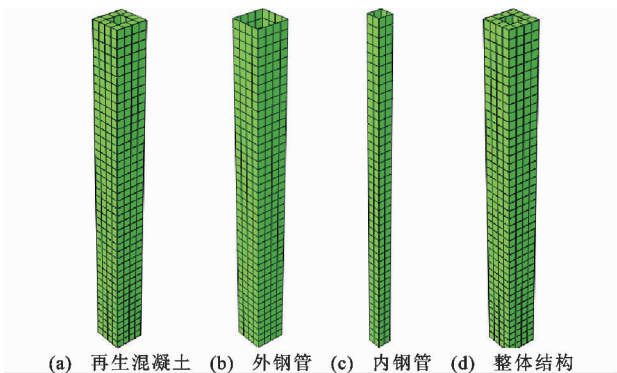


图 3 构件有限元分析模型

Fig. 3 Finite Element Analysis Models of Components

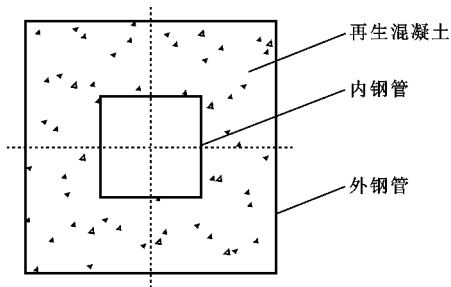


图 4 中空夹层钢管混凝土截面形式

Fig. 4 Cross-section Configuration of Hollow Sandwich Concrete-filled Steel Tube

周围再生混凝土温度最低,由外到内温度逐渐降低,截面最高温差达 445℃。

3.2 力学场典型算例

本文力学场典型算例中的参数选择与上述温度

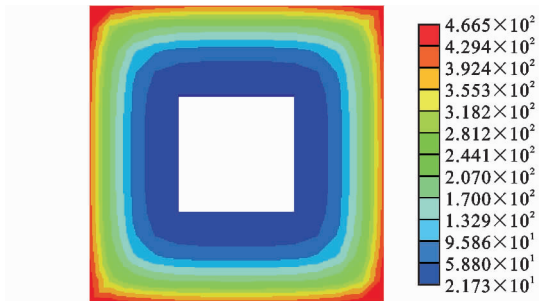


图 5 横截面温度场(单位:℃)

Fig. 5 Cross-section Temperature Field (Unit: °C)

场相同,其余参数取值为:混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 取 C40 级,取代率 γ 取 50%,钢材屈服强度 f_y 取 345 MPa,荷载偏心率 e 取 0。图 6 为构件纵向荷载-轴向位移($N-\Delta$)曲线,取图 6 中 a' (1/2 极限荷载位移点)、 b' (极限荷载点)、 c' (2 倍极限荷载位移点)三点的构件跨中截面混凝土应力分布(图 7)。由图 7 可以看出:在弹性阶段靠近内钢管部分混凝土应力较大,应力由中心向四周递减;弹塑性阶段随着荷载逐渐增大,内钢管周围的混凝土应力有所增大,内角部的应力较弹性阶段减小;在塑性阶段构件各部分应力均有所降低。

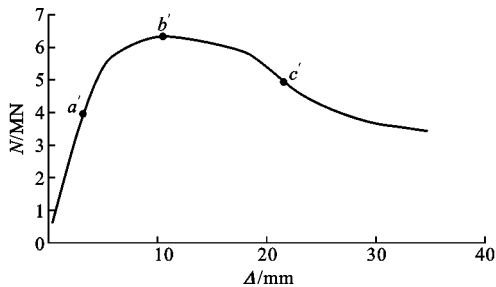


图 6 标准构件荷载-轴向位移曲线

Fig. 6 Load-axial Displacement Curve of Standard Component

长柱在承受轴压荷载有限元模拟过程中,为更好区分受拉区和受压区,本次假定受压面为 α 面,受拉面 β 面。图 8 为外钢管应力-轴向位移($\sigma-\Delta$)关系。从图 8 可以看出:加载初期,随构件轴向位移增大,外钢管应力显著增大;当位移达到 3 mm 时, α 面纵向应力开始降低, β 面纵向应力增长速率放缓;构件轴向位移达到 16 mm 之前, α 面与 β 面的环向拉应力增长较缓慢, α 面应力增长速率高于 β 面。原因在于构件向 β 面挠曲, α 面混凝土压应力较大,产生较大横向变形,导致外钢管约束作用增强,构件轴向位移达到 16 mm 时,环向应力急剧上升,随后呈现小幅度下降。

内钢管应力-轴向位移关系如图 9 所示。由图 9

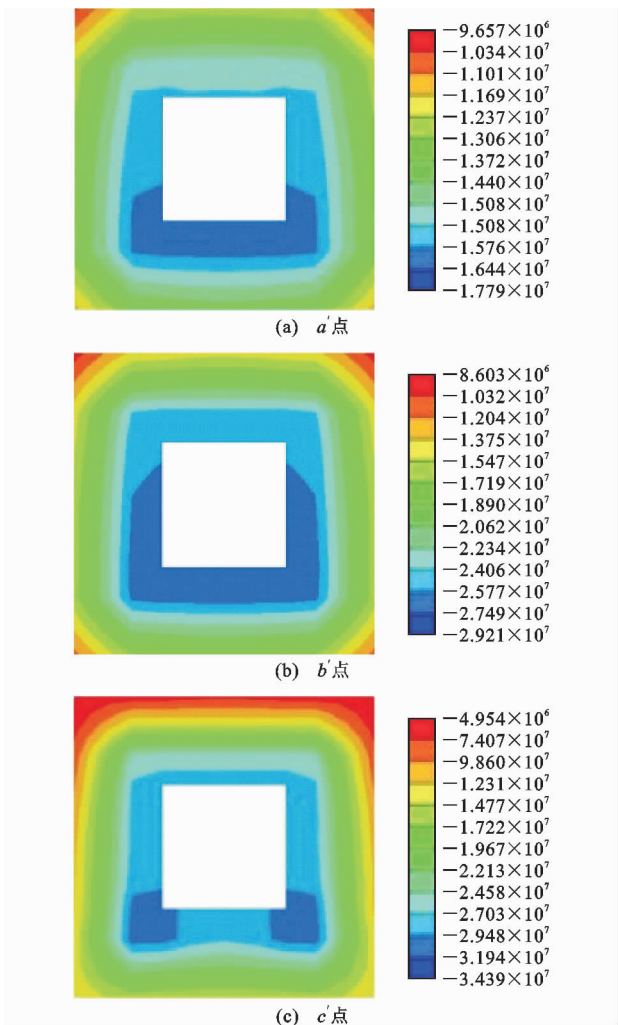


图 7 构件跨中截面混凝土应力分布 (单位:Pa)

Fig.7 Stress Distributions of Concrete in Mid-span Section of Component (Unit:Pa)

可知:加载前期,内钢管 α 面和 β 面轴向压应力(选取应力测点为 α, β 面的中点)保持一致,且上升速率较快;加载至构件轴向位移 5 mm 左右时应力上升速率减缓,由于构件向 β 面挠曲, α 面内钢管压应力大于 β 面压应力;构件轴向位移达到 16 mm 之前,内钢管环向应力接近 0;加载后期,内钢管环向应力有一定程度上升。

4 剩余承载力参数分析

选取影响中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力的若干参数进行分析,包括:混凝土强度 f_{cu} (30, 40, 50 MPa)、钢材强度 f_y (235, 345, 420 MPa)、计算长度 L (3, 3.3, 3.5, 3.8 m)、受火时间 t (30, 60, 90, 120 min)、空心率 χ (0.361, 0.387, 0.412, 0.438, 0.464)、混凝土取代率 γ (0%, 25%, 50%, 75%, 100%)、荷载偏心率 e (0, 0.2, 0.4,

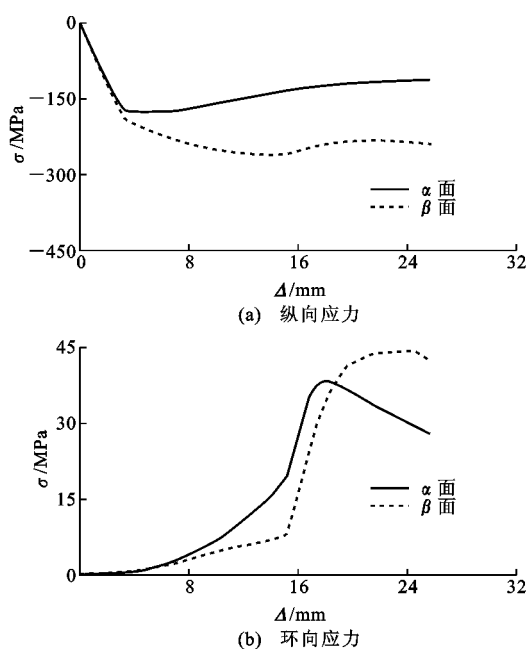


图 8 外钢管应力-轴向位移关系

Fig.8 Relationships Between External Steel Tube Stress and Axial Displacement

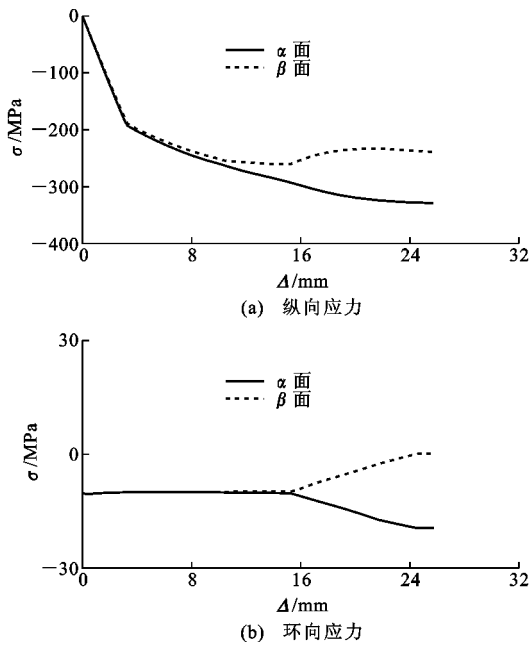


图 9 内钢管应力-轴向位移关系

Fig.9 Relationships Between Internal Steel Tube Stress and Axial Displacement

0.6), 其余参数与典型算例一致。

4.1 混凝土强度

图 10 为混凝土强度 f_{cu} 对中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力 N_c 的影响。由图 10 可知,构件的剩余承载力随着混凝土强度的增加而提高,提高幅度大于 10%,混凝土强度对构件的剩

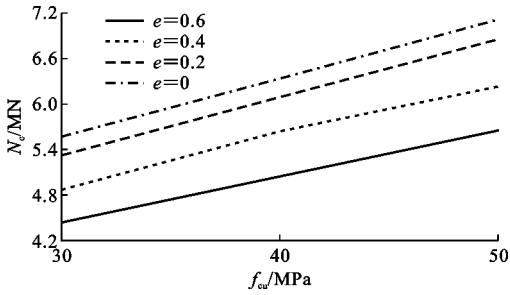


图 10 混凝土强度对构件剩余承载力的影响

Fig. 10 Effect of Concrete Strength on Residual Bearing Capacity of Component

余承载力影响较大,故适当提高混凝土等级可以有效提高构件的火灾后剩余承载力。

4.2 钢材强度

图 11 为钢材强度 f_y 对中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力的影响。由图 11 可知,钢材强度对构件火灾后剩余承载力的影响较大,以混凝土强度 40 MPa 的曲线为例,随着钢材强度的增加,剩余承载力提高约 12%。受火后再生混凝土的受力性能严重劣化,其强度大幅降低,而高温对内钢管钢材高温后屈服强度影响相对较小,因此火灾后试件实际套箍系数较常温试件有所提高,故提高钢材强度可以有效提高构件的火灾后剩余承载力。

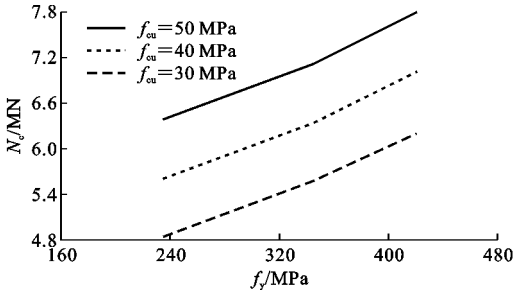


图 11 钢材强度对构件剩余承载力的影响

Fig. 11 Effect of Steel Strength on Residual Bearing Capacity of Component

4.3 计算长度

图 12 为计算长度 L 对中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力的影响。由图 12 可知,火灾后构件剩余承载力随构件计算长度增加而降低。受火时间 30 min 情况下构件剩余承载力最大下降幅度约 16.5%;受火时间 60 min 情况下构件剩余承载力最大下降幅度约 39.3%;受火时间为 90 min 情况下构件剩余承载力最大下降幅度约 43.4%;受火时间 120 min 情况下构件剩余承载力最大下降幅度约 48.3%。受火时间为 90, 120 min 的情况下计算长度影响趋势最为明显。这是由于随着构件计算

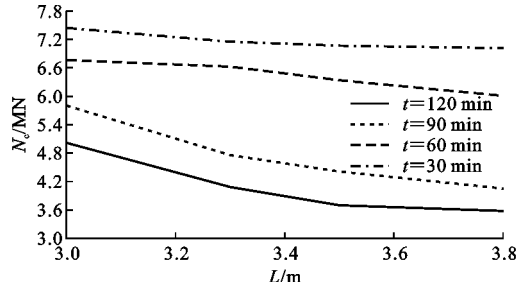


图 12 计算长度对构件剩余承载力的影响

Fig. 12 Effect of Calculated Length on Residual Bearing Capacity of Component

长度的增加,二阶效应的影响逐渐显著,导致构件趋向失稳破坏,同时随着计算长度的增加,其对构件火灾后剩余承载力的影响趋势变缓。

4.4 受火时间

图 13 为受火时间 t 对中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力的影响。由图 13 可知,构件火灾后剩余承载力随着受火时间增加大幅降低,其中 t 由 60 min 延长到 90 min 过程中构件剩余承载力下降速度最快。以取代率为 50% 的曲线为例,与构件常温状态下的极限承载力相比,受火 30 min 的构件剩余承载力下降了 8.19%;受火 60 min 的构件剩余承载力下降了 17.69%;受火 90 min 的构件剩余承载力下降了 42.64%;受火 120 min 的构件剩余承载力下降了 51.93%。这是由于随着受火时间增加,材料劣化程度逐渐增大,使得构件剩余承载力降低。

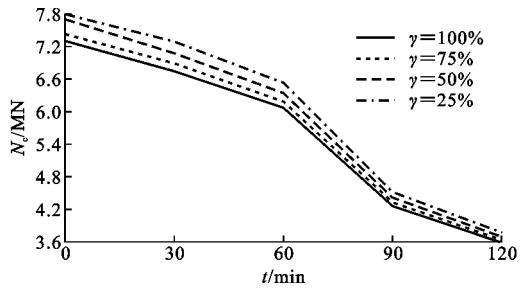


图 13 受火时间对构件剩余承载力的影响

Fig. 13 Effect of Fire Time on Residual Bearing Capacity of Component

4.5 空心率

图 14 为空心率 χ 对中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力的影响。空心率的控制由选取的内钢管边长来决定。由图 14 可知,在 $\chi \leq 0.412$ 时,即内钢管边长 $B_i \leq 160$ mm 的情况下,构件火灾后剩余承载力随着空心率增加而增加。这是由于随着空心率增加,构件截面含钢率增加,延缓了构件的破坏,从而提高了构件火灾后剩余承载力;在

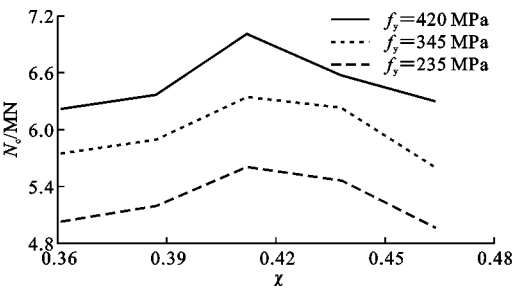


图 14 空心率对构件剩余承载力的影响
Fig. 14 Effect of Hollow Rate on Residual Bearing Capacity of Component

$\chi > 0.412$ 时,即内钢管边长 $B_i > 160$ mm 的情况下,构件的火灾后剩余承载力随着空心率增加而降低。这是因为构件中混凝土截面面积减少使得构件吸热能力减弱,加重了高温下内钢管材料劣化程度,降低了构件的火灾后剩余承载力。空心率增加一方面使得内钢管截面面积增大,对其受力起到积极作用;另一方面又导致了夹层混凝土面积减少,对其受力不利。在空心率增加的过程中,构件火灾后剩余承载力的增加或降低取决于以上两方面因素哪种占优。

4.6 取代率

图 15 为取代率 γ 对中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力的影响。由图 15 可知,混凝土强度相同时,随着取代率增加,构件火灾后剩余承载力逐渐降低。以混凝土强度 40 MPa 的曲线为例,随着取代率由 0% 增加至 100% 的过程中, γ 对构件剩余承载力的影响较小,这与文献[4]中取代率对钢管再生混凝土柱火灾后力学性能的影响一致。构件火灾后剩余承载力降低主要是由于再生骨料的吸水率和孔隙率均高于天然骨料,且再生骨料中含有一定的旧水泥砂浆,随着构件取代率的增加,再生混凝土力学性能逐渐变差。

4.7 荷载偏心率

图 16 为荷载偏心率 e 对中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力的影响。由图 16 可知,构件剩余承载力与荷载偏心率呈负相关趋势,即构件的剩余承载力随荷载偏心率增加而降低,且偏心率越大,剩余承载力下降幅度越大。以钢材强度为 345 MPa 的曲线为例, e 由 0 上升至 0.2 时,剩余承载力下降约 4.0%; e 由 0.2 上升至 0.4 时,剩余承载力下降约 8.0%; e 由 0.4 上升至 0.6 时,剩余承载力下降约 12.0%。这主要是由于荷载偏心率大时,构件实际为压弯受力状态,部分混凝土受拉退出工作,构件受压区混凝土面积减小,进一步导致了构件火灾后剩余承载力降低。

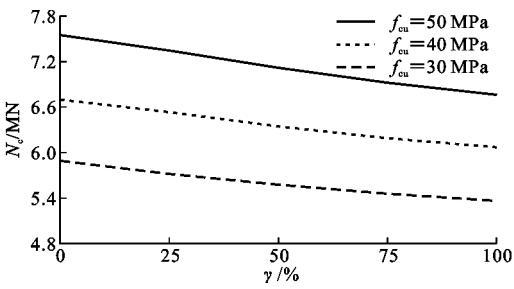


图 15 取代率对构件剩余承载力的影响
Fig. 15 Effect of Substitution Rate on Residual Bearing Capacity of Component

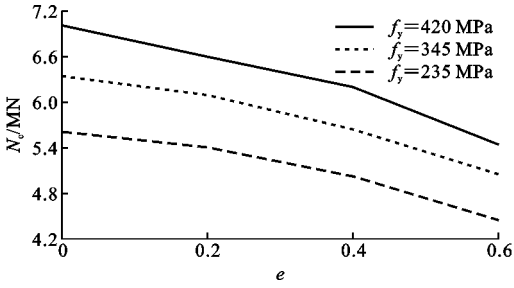


图 16 荷载偏心率对构件剩余承载力的影响
Fig. 16 Effect of Load Eccentricity on Residual Bearing Capacity of Component

承载力下降约 8.0%; e 由 0.4 上升至 0.6 时,剩余承载力下降约 12.0%。这主要是由于荷载偏心率大时,构件实际为压弯受力状态,部分混凝土受拉退出工作,构件受压区混凝土面积减小,进一步导致了构件火灾后剩余承载力降低。

5 火灾后剩余承载力简化计算公式

通过以上影响因素分析,得到了各影响因素对中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力的影响规律。由此回归得出中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力 N_c 的简化计算公式(4)。建议公式(4)的适用范围为: $30 \text{ MPa} \leq f_{cu} \leq 50 \text{ MPa}$, $235 \text{ MPa} \leq f_y \leq 420 \text{ MPa}$, $3 \text{ m} \leq L \leq 3.8 \text{ m}$, $30 \text{ min} \leq t \leq 120 \text{ min}$, $0.361 \leq \chi \leq 0.464$, $0\% \leq \gamma \leq 100\%$, $0 \leq e \leq 0.6$ 。

$$N_c = d_1 f_{cu} + d_2 f_y + d_3 / L + 0.001 d_4 t^3 + d_5 t^2 + d_6 \chi^2 + d_7 \chi + d_8 \gamma + d_9 e^2 + d_{10} \quad (4)$$

式中: $d_1 \sim d_{10}$ 为系数,取值见表 3。

图 17 为中空夹层方钢管再生混凝土火灾后剩余承载力简化公式计算结果与数值模拟结果对比,

表 3 系数 $d_1 \sim d_{10}$ 取值

Tab. 3 Values of Parameters $d_1 \sim d_{10}$

系数	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}
取值	74.99	6.69	14 375.98	2.14	-0.53	-205 707.76	170 389.64	-681.52	-3 401.75	-36 659.40

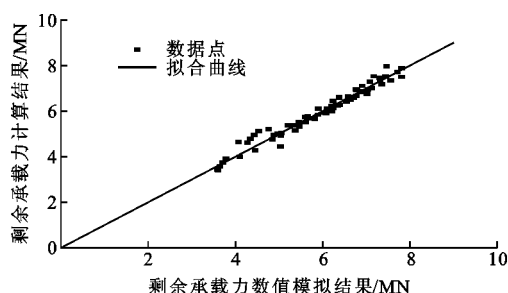


图 17 剩余承载力计算结果与数值模拟结果比较

Fig. 17 Comparison of Calculation Results and Numerical Simulation Results of Residual Bearing Capacity

二者相关系数为 0.982,二者之比的平均值为 1.001,均方差为 0.039。由图 17 可以看出,剩余承载力简化公式的精度较高,可供该类型构件火灾后剩余承载力的计算参考。

6 结 语

(1)构件受火全过程中,外钢管和混凝土外围角部位置温度较高。加载初期,内钢管和外钢管的纵向应力随构件轴向位移的增大呈直线上升趋势。构件受压过程中,内钢管邻近区域的混凝土压应力较大,内外钢管的环向应力微小,其中外钢管的环向应力高于内钢管。

(2)中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力随着计算长度、荷载偏心率、受火时间和取代率的增加而降低。计算长度和受火时间对构件火灾后剩余承载力的影响较大;火灾后剩余承载力随混凝土强度和钢材强度的增加而增加,适当提高混凝土强度和钢材强度有利于提高构件的火灾后剩余承载力;随空心率的增加,火灾后剩余承载力先升高后降低。

(3)基于对计算长度、空心率、混凝土强度、荷载偏心率、钢材强度、受火时间和取代率等参数的分析结果,回归得到中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力简化计算公式,该公式具有较高的精度,可为中空夹层方钢管混凝土柱抗火设计提供参考。

参考文献:

References:

[1] 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.
[2] 周绪红,王宇航,陆国兵,等. 往复纯扭作用下中空夹层钢管混凝土柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增 1): 266-271.
ZHOU Xu-hong, WANG Yu-hang, LU Guo-bing, et al. Mechanical Behavior of Concrete Filled Double Skin Steel Tubular Columns Under Cyclic Pure Torsion[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(S1): 266-271.
[3] WANG Z B, TAO Z, YU Q. Axial Compressive Behaviour of Concrete-filled Double-tube Stub Columns with Stiffeners[J]. Thin-walled Structures, 2017, 120: 91-104.
[4] WANG Z B, TAO Z, HAN L H, et al. Strength, Stiffness and Ductility of Concrete-filled Steel Columns Under Axial Compression [J]. Engineering Structures, 2017, 135: 209-221.
[5] 余鑫,陶忠. 中空夹层钢管混凝土轴压短柱火灾后剩余承载力的试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(4): 9-13.
YU Xin, TAO Zhong. Residual Strength of Concrete-filled Double-skin Steel Tubular Stub Columns After Exposure to Fire[J]. Industrial Construction, 2009, 39(4): 9-13.
[6] 刘晓,麻路,王兵. 高温后中空夹层钢管混凝土柱轴压性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(5): 24-29.
LIU Xiao, MA Lu, WANG Bing. Analysis of Concrete Filled Double Skin Steel Tubular Columns Subjected to Axial Compression Performance After High Temperature[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(5): 24-29.
[7] 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.
[8] 罗超宁,查晓雄. 钢管再生混凝土柱耐火性能研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增 2): 35-41.
LUO Chao-ning, ZHA Xiao-xiong. Research on Fire Resistance of Recycled Concrete Filled Steel Tubular Columns[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2): 35-41.
[9] 赵均海,郭红香,魏雪英. 圆中空夹层钢管混凝土柱承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 50-54.
ZHAO Jun-hai, GUO Hong-xiang, WEI Xue-ying. Re-

- search on Bearing Capacity of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes Column[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 50-54.
- [10] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳, 等. 钢管再生混凝土轴压长柱试验研究及力学性能分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 12-20.
- ZHANG Xiang-gang, CHEN Zong-ping, XUE Jian-yang, et al. Experimental Study and Mechanical Behavior Analysis of Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tubular Long Columns Under Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9): 12-20.
- [11] 李文贵, 龙 初, 罗智予, 等. 再生骨料混凝土破坏机理与改性研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(6): 60-72.
- LI Wen-gui, LONG Chu, LUO Zhi-yu, et al. Review of Failure Mechanism and Modification Research of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(6): 60-72.
- [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] 肖建庄, 黄运标, 任红梅. 混凝土热工参数影响因素及理论计算[J]. 粉煤灰, 2008(5): 17-20.
- XIAO Jian-zhuang, HUANG Yun-biao, REN Hong-mei. Influence Factors of Thermal Properties of Concrete and Theoretical Analysis [J]. Coal Ash, 2008 (5): 17-20.
- [14] BS EN 1994-1-2: 2005, Eurocode 4. Design of Composite Steel and Concrete Structures — Part 1-2: General Rules Structural Fire Design[S].
- [15] LIE T T, IRWIN R J. Fire Resistance of Rectangular Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(5): 797-805.
- [16] 李旭平. 再生混凝土基本力学性能研究(Ⅱ)[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(6): 699-704.
- LI Xu-ping. Study on Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete (Ⅱ)[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(6): 699-704.
- [17] LIU F Q, YANG H, GARDNER 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] TAO Z, WANG Z B, HAN L H, et al. Fire Performance of CFRP-strengthened Concrete-filled Steel Tubular Columns [J]. Methods in Enzymology, 2017, 121: 228-234.
- [20] 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.
- [21] 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 Jian-zhuang. 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.
- [22] 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 Jian-zhuang, HUANG Yun-biao. Residual Compressive Strength of Recycled Concrete After High Temperature [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(3): 255-259.
- [23] 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.
- LU 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.
- [24] 吕学涛, 杨 华, 张玉琢, 等. 高温作用后圆钢管钢筋混凝土轴压短柱力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(2): 133-141.
- LU Xue-tao, YANG Hua, ZHANG Yu-zhuo, et al. Experimental Study on Axial Mechanical Behavior of Reinforced Concrete-filled Circular Steel Tubular Short Columns After Exposure to High Temperatures [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 133-141.
- [25] 张玉琢, 吕学涛, 杨 华, 等. 方钢管钢筋混凝土轴压短柱高温后受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(4): 81-89.
- ZHANG Yu-zhuo, LU Xue-tao, YANG Hua, et al. Experimental Study on Axial Mechanical Behavior of Reinforced Concrete-filled Square Hollow Section Columns After Exposure to High Temperatures [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(4): 81-89.