

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201702005



# 火灾后外包薄壁钢管加固钢筋混凝土 轴压柱力学性能的数值模拟

丁楠<sup>1</sup>, 罗漪<sup>1</sup>, 欧婷茹<sup>1</sup>, 徐玉野<sup>1</sup>, 吕金炭<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 福建荣盛钢结构实业有限公司, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 基于有限元 ABAQUS 软件, 通过建立温度场模型与静力加载模型, 对外包薄壁钢管加固 ISO 834 标准火灾作用后的钢筋混凝土(RC)柱的轴压性能进行研究. 分析外包钢管厚度、加固方式和截面形状对外包薄壁钢管加固火灾后 RC 柱的刚度、轴压承载力和极限变形能力等的影响规律. 结果表明: 外包薄壁钢管加固火灾后 RC 柱的刚度、轴压承载力和变形能恢复甚至超过火灾前试件的水平, 且随钢管厚度的增加、加固方式的改变, 以及加固后截面形状的不同, 混凝土柱的受力性能有不同程度的提高.

**关键词:** 薄壁钢管; 加固; 火灾; 钢筋混凝土柱; 力学性能; 数值模拟

中图分类号: TU 375.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2017)02-0158-06

## Numerical Simulation on Axial Compression Mechanical Property of Reinforced Concrete Columns With Wrapped Steel Tube After Fire

DING Nan<sup>1</sup>, LUO Yi<sup>1</sup>, OU Tingru<sup>1</sup>, XU Yuye<sup>1</sup>, LYU Jintan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. RongSheng Steel Structure Industrial Company Limited, Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** Based on numerical simulation (ABAQUS), according to established the temperature model and the static load model, the axial compression performance of the reinforced concrete (RC) columns wrapped with thin-walled steel tube after exposure to ISO 834 standard fire was conducted. The thickness of steel tube, strengthening mode and cross section shape were analyzed to figure out the influence on axial bearing capacity, rigidity and ultimate deformation of the columns. Results show that the axial rigidity, axial bearing capacity and ultimate deformation of RC columns after fire wrapped with thin-walled steel tube may restore or even exceed the level of specimens before fire; as the thickness of steel tube increases, the strengthening mode and cross section change, the mechanical performance of RC columns enhances.

**Keywords:** thin-walled steel tube; strengthening; fire; reinforced concrete column; mechanical property; numerical simulation

火灾的高温作用会极大地降低钢筋混凝土柱的刚度和极限承载力. 已有的火灾后加固方法主要有增大截面法<sup>[1]</sup>、外包钢法<sup>[2]</sup>、粘贴纤维复合材料法<sup>[3]</sup>、高性能水泥复合砂浆钢筋网(HPFL)加固法<sup>[4]</sup>等.

收稿日期: 2016-12-16

通信作者: 罗漪(1976-), 女, 副教授, 博士, 主要从事结构工程和数值模拟的研究. E-mail: luoyi@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51578255); 福建省自然科学基金面上资助项目(2017J01093); 福建省科技计划项目(2014J01195); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1511404001)

在利用钢管加固钢筋混凝土柱方面, 国外较早开展了外包钢管加固柱的强度和变形能力的研究<sup>[5-6]</sup>, 国内对于外包钢管加固钢筋混凝土柱的研究较晚<sup>[7-14]</sup>. 这些研究均表明外包钢管加固的方式可以得到良好效果. 以往研究外包薄壁钢管加固法加固火灾后钢筋混凝土柱的内容, 大多集中在外包钢管加固常温下的老化柱, 而少数对受火后 RC 柱的加固研究也只涉及了各材料性能或受火时间对加固性能的影响. 本文通过 ABAQUS 软件建立外包薄壁钢管加固火灾后混凝土柱的有限元模型<sup>[15]</sup>, 分析了外包钢管厚度、加固方式和截面形状 3 个参数对火灾后混凝土柱承载力、刚度等的影响规律.

# 1 数值模拟

## 1.1 边界条件和温度场分析

混凝土和钢材的热工性能是求解温度场及高温后力学性能的基础. 国内外众多学者已对混凝土和钢筋的热工参数进行了大量研究, 并给出了混凝土及钢筋的热工参数<sup>[16-17]</sup>.

文中参考文献[17]给出的混凝土热工模型. 升温前, 外界及结构温度均等于所处环境温度( $\theta_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )且无热量转移. 钢筋混凝土柱受火时及受火后的传热方式有热对流、热辐射和热传导 3 种, 柱侧面与空气通过热辐射和热对流进行热交换, 柱内部通过热传导进行热量的转移<sup>[18]</sup>. 辐射系数和受火面的对流换热系数分别取  $0.5, 25.0\text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ; 上下表面按实际受力状态设定为绝热面; 模型的属性设置中, Stefan-Boltzmann 常数为  $5.67 \times 10^{-8}\text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$ , 绝对零度取  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 温度曲线采用国际标准组织制定的 ISO 834 标准升温曲线.

混凝土与钢筋均采用 Heat Transfer 单元. 混凝土选用 8 节点三维实体单元 DC3D8, 钢筋选用热分析单元 DC1D2. 进入分析步中, 选用瞬态升温, 时间取为 240 min, 升温段为 90 min, 其后为降温段. 受火后, 方柱与圆柱的 ABAQUS 模拟温度场云图, 如图 1 所示.

## 1.2 火灾后静力加载数值模拟

1.2.1 高温后钢材的本构关系 热轧钢筋在经历低于  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  的高温作用后, 其力学性能恢复较快, 较受火前基本不变<sup>[19]</sup>. 试验中, 钢筋混凝土柱由于保护层的存在, 钢筋骨架的温度始终低于  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 因此, 采用常温下钢筋的本构关系模型. 常温下, 钢筋采用二次塑流模型, 应力-应变关系曲线一般分为弹性段、弹塑性段、塑性段、强化段和二次塑流 5 个阶段<sup>[20]</sup>. 钢管采用应用较为广泛的双线性弹塑性模型, 分为弹性段和强化段, 强化段的模量取  $0.01E_s$ <sup>[20]</sup>.

1.2.2 灌浆料的本构关系 灌浆料采用文献[20]提出的适用于有限元计算的核心混凝土受压单轴应力-应变本构关系, 其方柱的计算公式为

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1, \\ x/[\beta_0 \cdot (x - 1)^\eta + x], & x > 1; \end{cases}$$

圆柱的计算公式为

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1, \\ 1 + q(x^{0.1\xi} - 1), & x > 1, \quad \xi \geq 1.12, \\ x/[\beta_0(x - 1)^2 + x], & x > 1, \quad \xi < 1.12. \end{cases}$$

上两式中:  $x = \epsilon/\epsilon_0$ ;  $y = \sigma/\sigma_0$ ; 其余参数见文献[20].

1.2.3 高温后混凝土的本构关系 由于混凝土热传导性能较差, 是一种热惰性材料, 构件内部存在着明显的温度梯度, 火灾后, 混凝土构件的损伤程度随着离构件表面距离的增加而增加. 因此, 火灾高温后的混凝土应力-应变本构模型的表达式<sup>[19]</sup>为

$$\sigma = f_{cr}(\theta) \left[ -1.371 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_{or}(\theta)} \right)^3 + 1.741 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_{or}(\theta)} \right)^2 + 0.628 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_{or}(\theta)} \right) \right], \quad 0 < \epsilon_0 \leq \epsilon_{or}(\theta),$$

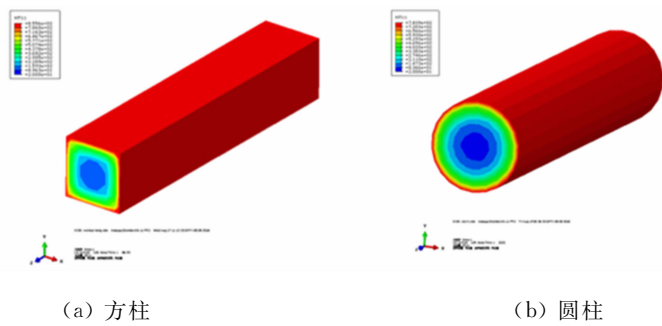


图 1 钢筋混凝土柱的温度场云图  
Fig. 1 Temperature field of reinforced concrete column

$$\sigma = f_{cr}(\theta) \left[ \frac{0.674 \, 2 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_{0r}(\theta)} \right) - 0.217 \, 3 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_{0r}(\theta)} \right)^2}{1 - 1.325 \, 8 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_{0r}(\theta)} \right) + 0.782 \, 7 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_{0r}(\theta)} \right)^2} \right], \quad \epsilon_0 > \epsilon_{0r}(\theta).$$

上式中： $\epsilon_{0r}(\theta)$ 为温度  $\theta$  作用后混凝土峰值应力对应的峰值应变； $f_{cr}(\theta)$ 为高温过火后混凝土强度. 即有

$$\epsilon_{0r}(\theta) = \begin{cases} \epsilon_0, & \theta \leq 200 \text{ }^{\circ}\text{C}, \\ \left[ 0.810 \, 3 + 0.422 \, 4 \left( \frac{\theta}{1 \, 000} \right) + 2.631 \, 5 \left( \frac{\theta}{1 \, 000} \right)^2 \right] \epsilon_0, & \theta > 200 \text{ }^{\circ}\text{C}; \end{cases}$$
$$f_{cr}(\theta) = \begin{cases} \left[ 1.0 - 0.581 \, 94 \left( \frac{\theta - 20}{1 \, 000} \right) \right] f_c, & \theta \leq 200 \text{ }^{\circ}\text{C}, \\ \left[ 1.145 \, 9 - 1.392 \, 55 \left( \frac{\theta - 20}{1 \, 000} \right) \right] f_c, & \theta > 200 \text{ }^{\circ}\text{C}. \end{cases}$$

为了得到受火后核心区混凝土的本构,参照文献[14]的 Python 后处理程序,并对其输出语言进行改进. 通过对受火后的核心混凝土最高温度进行提取,并把各单位节点编号、最大值温度写入“\*.fil”文件,直接写入静力加载模型中的预定义场初始状态;然后,在 ABAQUS CAE 中导入“inp”文件,查看模型的初始温度图(图 2),并进行静力加载模拟. 静力加载分析时,对于网格划分方法,使静力加载模型与温度场数值分析模型保持一致,以便正确读入各单元节点的最高过火温度值.

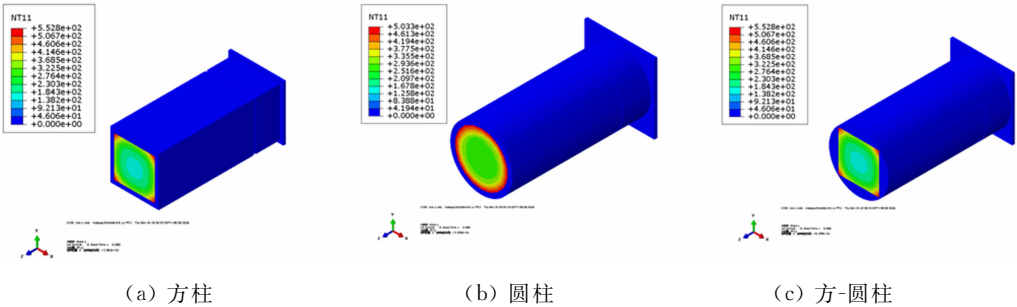


图 2 静力加载模型的初始温度

Fig. 2 Original temperature of static load tests

1. 2. 4 边界与接触处理 根据试验时的实际接触情况,采用如下界面接触处理方法:1) 钢筋与混凝土柱采用嵌入约束;2) 灌浆料与混凝土之间接触面采用绑定约束;3) 薄壁钢管与灌浆料之间接触面采用表面接触,其力学性能中切向考虑摩擦滑移,为罚接触,摩擦系数取 0. 6<sup>[13]</sup>,法向取为硬接触;4) 柱顶端集中力加载点和支座集中力处混凝土与钢垫块采用点面耦合约束;5) 柱两端焊接钢板与钢管,以及混凝土之间接触面采用绑定约束.

2 模拟结果及试验的对比分析

文献[21]的试验共制作 12 根 RC 柱试件,包括 8 根 RC 方柱试件和 4 根 RC 圆柱试件. 其中:方柱截面边长  $b=300 \text{ mm}$  (面积为  $90 \, 000 \text{ mm}^2$ ),圆柱的截面直径  $d=340 \text{ mm}$  (面积为  $90 \, 792 \text{ mm}^2$ ),变截面形状指火灾前边长为  $300 \text{ mm}$  的方形截面试件,火灾后加固成直径是  $340 \text{ mm}$  的圆形截面试件,所有试件高度均为  $1 \, 500 \text{ mm}$ . 构件纵筋采用 HRB 400 钢筋,配置 8C20,箍筋采用 HPB 300 钢筋,配置  $\Phi 8@150$ ,柱头加密配筋  $\Phi 8@50$ . 加固用的外包钢板采用 Q235B 钢板.

2. 1 温度模拟曲线分析

图 3,4 分别为方柱试件和圆柱试件的温度( $\theta$ )测点布置和温度模拟曲线. 图 4 中: $t$  表示时间. 由图 4 可知:与 SC3, C3 试件的试验数据对比,模拟与试验得到的温度曲线发展情况基本一致,表明模拟数据较可靠. 存在

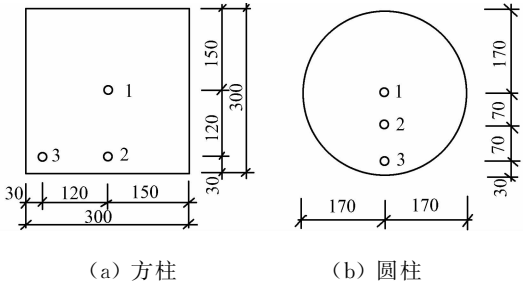


图 3 试件的温度测点位置(单位:mm)

Fig. 3 Location of temperature measuring point of specimen (unit: mm)

误差的主要原因是数值模拟中未考虑水分蒸发和迁移的影响,热电偶的埋设位置误差,热工参数本身存在一定离散性等原因也会造成一定误差。

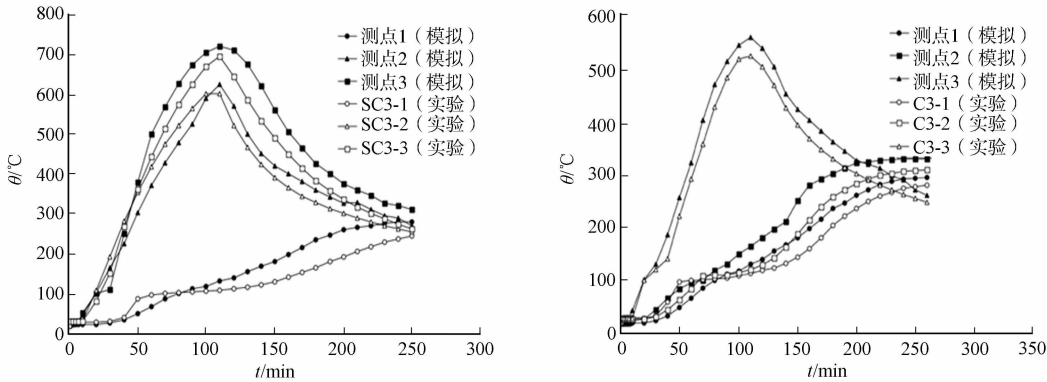


图 4 试件的温度-时间模拟曲线

Fig. 4 Temperature-time curve of specimen

2.2 拟静力试验的破坏形态与承载力分析

外包薄壁钢管加固火灾后 RC 方柱的主要特征点及试验结果,如表 1 所示. 表 1 中:  $t$  为受火时间;  $d$  为钢管厚度;  $N_u$  为极限承载力;  $\Delta_u$  为极限位移,取试件的荷载下降到 85% 极限荷载所对应的位移;上标 t, c 分别代表试验值与模拟值. 模拟与试验的荷载-位移 ( $N-\Delta$ ) 曲线结果对比,如图 5 所示.

表 1 外包薄壁钢管加固火灾后 RC 方柱的试验与模拟结果

Tab. 1 Experiment and simulation results of RC square columns strengthened with external thin walled steel tubes							
试件编号	$t/\text{min}$	$d/\text{mm}$	加固方式	$N_u^t/\text{kN}$	$N_u^c/\text{kN}$	$\Delta_u^t/\text{kN}$	$\Delta_u^c/\text{kN}$
SC1	—	—	—	2 883	3 005	9.94	9.15
SC2	90	—	—	2 249	2 450	12.5	12.03
SC3	90	2	钢管只起约束作用	3 500	3 645	15.35	14.26
SC4	90	3	钢管只起约束作用	3 601	3 720	15.82	14.98
SC5	90	2	钢管承担纵向荷载	3 651	3 804	14.54	13.36
SC6	90	3	钢管承担纵向荷载	3 762	3 947	13.89	13.07
S-C1	90	3	钢管只起约束作用	4 753	4 978	41.82	29.88
S-C2	90	3	钢管承担纵向荷载	4 684	4 880	23.35	24.79
C1	—	—	—	3 060	3 256	10.75	11.69
C2	90	—	—	2 409	2 595	12.51	14.11
C3	90	3	钢管只起约束作用	5 065	5 199	29.78	26.67
C4	90	3	钢管承担纵向荷载	4 803	5 023	34.42	43.59

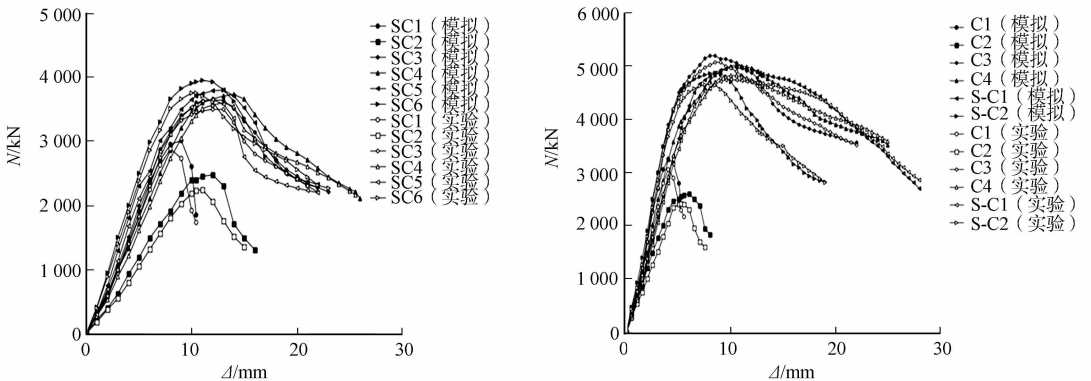


图 5 模拟与试验的  $N-\Delta$  曲线

Fig. 5  $N-\Delta$  curves of simulation and experiment

由表 1 可知:有限元模拟与试验的轴压承载力偏差均控制在 10% 以内,表明所建立的有限元模型能够较好预测加固后试件的轴压承载力. 由图 5 可知:外包薄壁钢管加固火灾后 RC 柱的轴压承载力和变形能力均有显著提高.

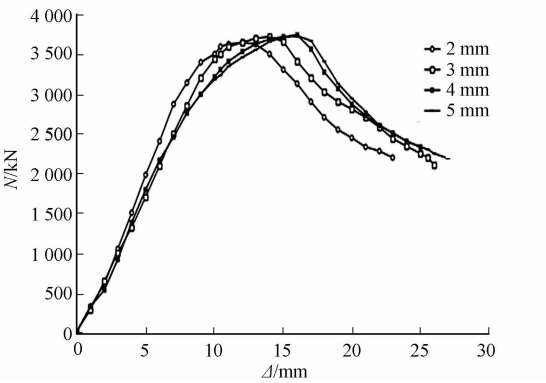
3 影响因素分析

影响薄壁钢管加固受火后钢筋混凝土柱的荷载-位移关系曲线的主要因素有外包钢管厚度、加固方式和截面形状. 将 ABAQUS 有限元模拟结果按照影响因素分类给出  $N-\Delta$  关系曲线,如图 6 所示.

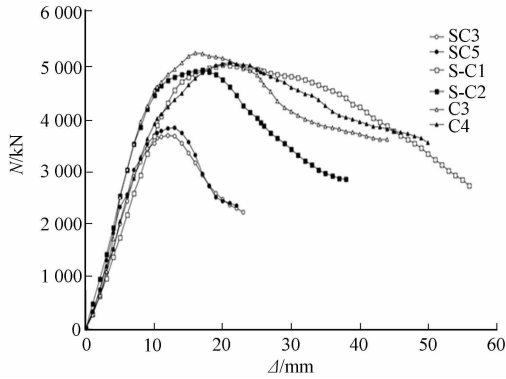
模拟在试验中壁厚(2,3 mm)的基础上,增加了 4,5 mm 两种壁厚参数,为了得到更加清晰的规律,以方形钢管中只起约束作用的加固方式为例,如图 6(a)所示.

1) 由图 6(a)可知:在试验的薄壁壁厚范围内(2~5 mm),随着外包钢管壁厚的增加,在刚度变化不大前提下,加固件的轴压承载力与轴压极限变形均有增大,且随厚度的增加,轴压承载力提高幅度减小. 相比于受火未加固的试件,其增加量依次为 48.8%,51.8%,53.9% 和 54.5%. 因此,实际加固工程中要综合考虑多方面因素进行钢管厚度的设计.

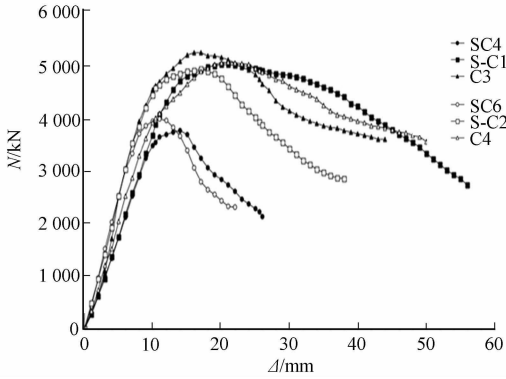
2) 由图 6(b)可知:加固方式对加固件的轴压承载



(a) 管钢厚度



(b) 加固方式



(c) 截面形状

图 6 不同影响因素的  $N-\Delta$  曲线模拟结果

Fig. 6 Simulation results of  $N-\Delta$  curves with different influence factors

力影响不显著. 结合图 5 可得两种加固方式均能提高受火试件的极限变形能力,钢管只起约束作用的加固件的轴压变形能力比钢管承担纵向荷载的加固件的轴压变形能力大. 说明只起约束作用的加固件能更好地发挥钢材的性能;刚度在弹性阶段变化不明显,而在弹塑性阶段略有降低.

3) 由图 6(c)可知:对于同样的外包薄壁壁厚(3 mm),不论是钢管只起约束作用(SC4, S-C1, C3),还是钢管承担竖向荷载(SC6, S-C2, C4),对于方柱加固件,变截面形状加固的轴压承载力比同截面形状提高较大. 即变截面形状加固试件比受火未加固试件提高约 110%,而同截面形状加固试件提高约 60%;轴压变形能力也比同截面形状加固有较大增加,变截面形状加固试件比受火未加固试件增加量达 105% 以上,而同截面形状加固试件只提高 8%~25%,且刚度变化不大. 由图 6(c)还可知:圆形钢管加固较方形钢管加固效果好,且加固前试件的截面形状(方形或圆形)对试件加固后的轴压承载力影响很小. 这主要是加固后试件的截面形状(方形或圆形)起主要影响作用.

4 结论

通过 ABAQUS 对外包薄壁钢管加固火灾后 RC 柱的轴心受压的数值模拟,分析了外包钢管厚度、加固方式和截面形状对外包薄壁钢管加固火灾后 RC 柱加固效果的影响规律. 与试验结果验证,得出以

下2点主要结论.

1) 有限元软件 ABAQUS 建立的模型对外包薄壁钢管加固火灾后 RC 柱的轴心受压性能的分析结果预测较准,可供实际工程参考.

2) 外包薄壁钢管加固火灾后 RC 柱的承载力与刚度能基本恢复甚至略超过火灾前试件的水平. 其轴压承载力随着外包薄壁钢管壁厚的增加而增大,随加固方式的改变影响不显著,但只起约束作用的加固方式的轴向变形能力大于承受纵向荷载的加固方式;加固后试件的截面形状起主要影响作用,且圆形钢管加固较方形钢管加固效果好.

## 参考文献:

- [1] 刘利先,时旭东,过镇海. 增大截面法加固高温损伤混凝土柱的试验研究[J]. 工程力学学报,2003,20(5):18-23.
- [2] 李俊华,唐跃锋,刘明哲,等. 外包钢加固火灾后钢筋混凝土柱的试验研究[J]. 工程力学,2012,29(5):166-173.
- [3] 李俊华,于长海,唐跃锋,等. CFRP 布加固火灾后钢筋混凝土柱的试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(4):48-54.
- [4] 杨凯杰. 高性能复合砂浆钢筋网加固受火 RC 柱正截面承载力研究[D]. 长沙:湖南大学,2012:2-48.
- [5] PRIESTLEY N, SEIBLE M J, XIAO Y, *et al.* Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength-part 1: Theoretical considerations and test design[J]. Aci Structural Journal, 1994, 91(4):394-405.
- [6] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, XIAO Y, *et al.* Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength-part 2: Test results and comparison with theory[J]. Aci Structural Journal, 1994, 85(5):537-551.
- [7] 蔡健,徐进. 圆形钢套管加固混凝土中长柱轴压承载力研究[J]. 铁道科学与工程学报,2005,2(4):62-67.
- [8] 徐进,蔡健. 圆形钢套管加固方形混凝土柱轴心受压性能[J]. 东南大学学报(自然科学版),2006,36(4):580-584.
- [9] 胡巍. 外包钢管加固钢筋混凝土柱承载力试验研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版),2007,25(4):40-43.
- [10] 薛继锋,卢亦焱,梁鸿俊,等. 钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形短柱承载力研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2014,47(6):769-773.
- [11] 卢亦焱,薛继锋,张学朋,等. 外套钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土中长圆柱轴压性能试验研究[J]. 土木工程学报,2013(2):100-107.
- [12] 胡潇,钱永久. 圆形钢套管加固钢筋混凝土短柱的轴心受压性能[J]. 公路交通科技,2013,30(6):100-108.
- [13] 王文达,郭智峰,张鹏鹏. 火灾后钢筋混凝土柱外包钢管加固性能:数值模拟[J]. 自然灾害学报,2012(3):204-210.
- [14] 李丹. 轴向约束混凝土短柱火灾后抗震性能的试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2013:57-58.
- [15] 曹金凤,石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M]. 北京:机械工业出版社,2013:127-131.
- [16] ANDERSON D. Eurocode 4-design of composite steel and concrete structures[M]. Berlin:Springer Berlin Heidelberg,2010:486-486.
- [17] LIE T T, KODUR V K R. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(5):1489-1509.
- [18] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1981:37-85.
- [19] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M]. 北京:科学出版社,2003:47-52.
- [20] 韩林海,陶忠,刘威. 钢管混凝土结构:理论与实践[C]//中国科协青年学术年会. 北京:科学出版社,1998:24-34.
- [21] 欧婷茹. 外包薄壁钢管加固火灾后 RC 柱的轴压性能研究[D]. 厦门:华侨大学,2015:12-63.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)