

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.012

# 火灾后方钢管钢筋混凝土短柱承载力分析

张 童, 吕学涛

(辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**在确定了 ISO-834 标准火灾作用后钢材和混凝土应力-应变关系的基础上,首先利用 ABAQUS 有限元软件建立火灾作用后方钢管钢筋混凝土短柱温度场及力学分析模型,计算结果得到以往试验结果验证。然后分析了截面边长、配筋率、受火时间、含钢率、材料强度等参数对火灾作用后钢管钢筋混凝土短柱承载力的影响规律,结果表明,受火时间、截面边长是影响其承载力的主要因素。最后提出了火灾作用后方钢管钢筋混凝土短柱承载力的理论公式,为其灾后修复和加固提供参考。

**关键词:**火灾后;方钢管钢筋混凝土;短柱;承载力

**中图分类号:**TU352.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S2-0049-04

## Bearing Capacity of Bar-Reinforced Concrete-Filled Square Steel Tubular Short Columns After Fire

Zhang Tong, Lyu Xuetao

(College of Engineering and Architecture, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:**Based on the determined stress-strain relationship of steel and concrete after fire, a temperature field and mechanical model of bar-reinforced concrete-filled square steel tubular columns after fire was set up with using ABAQUS, and the model has been validated by testing results. Then this paper analyzed the side of section, bar ratio, fire duration time, steel ratio and material strength parameters on the bearing capacity of bar-reinforced concrete-filled square steel tubular columns after fire. It is found that fire duration time and side of section is the dominant factor. Lastly this paper puts forward a theoretical formula of bearing capacity of bar-reinforced concrete-filled square steel tubular columns after fire, for the post-disaster restoration and provides references for the reinforcement.

**Key words:**after fire; bar-reinforced concrete-filled square steel tubular; short columns; bearing capacity

钢管钢筋混凝土柱是指在钢管素混凝土中填加纵向受力钢筋,相比于钢管素混凝土柱力学性能有较大改善,特别是在火灾作用下,钢筋会延缓混凝土的开裂,提高柱的耐火极限,因此在高层和超高层等建筑结构中的应用将日益广泛。

近些年,学者们对火灾作用下钢管素混凝土柱及钢管钢筋混凝土柱力学性能进行了较为深入的研究,如韩金生等<sup>[1]</sup>、杨华等<sup>[2]</sup>、郑永乾<sup>[3]</sup>、Chabot 等<sup>[4]</sup>,并提出构件耐火极限的计算方法;对火灾后钢管素混凝土柱力学性能的研究也已逐步展开,如霍静思等<sup>[5]</sup>、林晓康等<sup>[6]</sup>、王景玄等<sup>[7]</sup>。但对火灾后钢管钢筋混凝土柱力学性能研究则报道很少,因此对火灾后钢管钢筋混凝土柱力学性能的研究具有重要的理论和使用意义。

在合理选取材料热工性能和火灾后材料本构关系的基础上,利用 ABAQUS 软件建立火灾后方钢管钢筋混凝土短柱力学模型,计算结果得到验证,然后分析了各种因素对火灾作用后构件承载力的影响规律,最后提出简化公式,为其

灾后修复和加固提供有力的依据。

### 1 有限元模型

#### 1.1 温度场分析模型

合理的选择材料热工性能参数是准确建立温度场分析模型的前提条件。热工性能参数主要包括导热系数、比热、容重和热膨胀系数等。目前关于混凝土和钢材热工性能的研究有很多,本文综合考虑选择 Lie<sup>[8]</sup>建议的钢材和钙质混凝土的热工性能表达式,同时考虑了混凝土中水分的影响。

利用 ABAQUS 有限元软件建立温度场分析模型。升温曲线选择 ISO-834 标准升温曲线,首先在 Part 模块中混凝土采用八节点三维实体(solid)单元 DC3D8,钢管采用四节点壳(shell)单元 DS4,钢筋采用二节点一维线(wire)单元 DC1D2;在 Property 模块中材料的热工性能按照文献[8]的方法选取;在 Step 模块中计算时间(Time period)取受火时间,计算方式中选择固定式(Fixed)步长(Increment size)取 30;在 Interaction 模块中对流系数为  $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ ,辐射系

收稿日期:2013-09-30

基金项目:国家青年自然科学基金(51208246)

作者简介:张童(1987-),男,研究生,主要从事钢管混凝土抗火研究,(E-mail):zt\_1987\_zt@163.com。

数为 0.5, 为方便计算假设钢管和混凝土、钢筋和混凝土接触良好, 不考虑两者相对滑移和温度差的存在, 选用绑定 (tie) 约束。

为了验证温度场模型的正确性, 本文模拟了 Lie 等<sup>[9]</sup>所做的 SQ13 和 SQ19 两个方形截面配筋钢管混凝土柱, 计算结果和试验结果如图 1 所示, 其中虚线为试验测量值, 实线为计算值,  $a$  为各点到钢管外表面的距离, mm, 由此可见二者吻合较好。

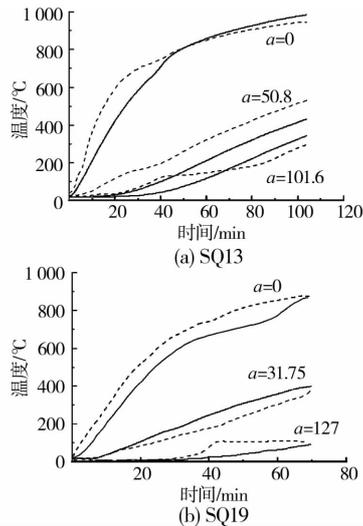


图 1 温度场试验结果与计算结果

## 1.2 火灾后力学分析模型

建立火灾作用后钢管钢筋混凝土短柱力学模型, 必须先合理选择火灾作用后钢材和混凝土的本构关系模型, 本文选用文献<sup>[10]</sup>提出的应力-应变关系模型。

在力学分析模型中, 网格划分以及节点编号要与温度场保持一致, 以便在力学分析过程中正确读入各节点的温度值; 核心混凝土和端板选用 C3D8 单元, 钢管与钢筋分别选用 S4R 单元和 T3D2 单元, 端板刚度较大, 其弹性模量取  $1.0 \times 10^{12}$  N/mm<sup>2</sup>, 泊松比取 0.000 1<sup>[11]</sup>; 钢管与混凝土选用面面接触 (Surface to Surface Contact), 同时考虑二者界面法向的硬接触 (Hard Contact) 和切向的粘结滑移, 摩擦系数取 0.6; 钢管与端板之间选用壳-固体耦合 (shell-to-solid coupling) 约束, 混凝土与端板之间选用面面接触 (Surface to Surface Contact), 混凝土与钢筋之间采用嵌入约束 (Embedded Region); 边界条件为固接, 为获取极限承载力采用位移加载的形式。如图 2 所示为钢管钢筋混凝土短柱的网格划分。

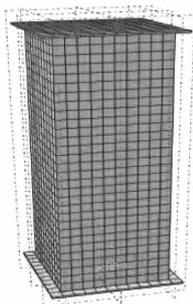


图 2 构件网格划分示意图

由于目前缺少火灾作用后钢管钢筋混凝土短柱的实验研究, 故本文对文献<sup>[12]</sup>中钢管素混凝土柱 S1 和 S3 进行有限元计算, 以证明模型建立的正确性。结果如图 3 所示, 其中虚线为试验值, 实线为计算值, 由此可见二者趋势相同, 计算所得的承载力略低于试验测量值, 原因可能是试验的铰支座不如有限元模拟的理想。

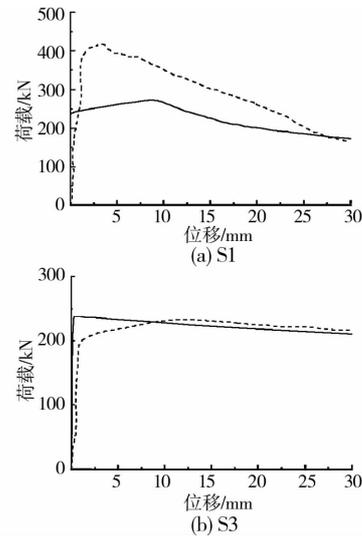


图 3 荷载-中截面挠度关系曲线

## 2 剩余承载力参数分析

影响火灾后钢管钢筋混凝土短柱剩余承载力的因素可能有: 截面边长  $B$ 、配筋率  $\rho$  ( $\rho = \frac{A_b}{A}$ , 其中  $A_b$  为钢筋截面面积、 $A$  为构件截面面积)、受火时间  $t_h$ 、构件截面含钢率  $\alpha$  ( $\alpha = (A_s + A_b)/A_c$ , 其中  $A_s$  为钢管截面面积、 $A_b$  为钢筋截面面积、 $A_c$  为核心混凝土截面面积)、钢管屈服强度  $f_{cy}$ 、混凝土抗压强度  $f_{cu}$ 、钢筋屈服强度  $f_{yb}$  等。

为了便于分析, 定义  $k_r$  为火灾作用后钢管钢筋混凝土柱剩余承载力影响系数, 即:

$$k_r = \frac{N_{cr}}{N_u} \quad (1)$$

其中:  $N_{cr}$  为火灾作用后钢管钢筋混凝土柱剩余承载力;  $N_u$  为常温下钢管钢筋混凝土柱极限承载力<sup>[13]</sup>。

下面利用 ABAQUS 软件分析上述各个参数对火灾作用后方形截面钢管钢筋混凝土短柱剩余承载力的影响规律。选取典型的工程算例:  $B=400$  mm,  $\lambda=3$ ,  $\rho=3\%$ ,  $\alpha=10\%$ ,  $t_h=1\sim 2$  h,  $f_{cy}=235$  MPa,  $f_{cu}=40$  MPa,  $f_{yb}=345$  MPa。

### 2.1 截面边长

图 4 所示为截面边长对剩余承载力影响系数  $k_r$  的影响。由此可见, 随着截面边长的增大,  $k_r$  迅速增加。这是由于随着构件截面边长的增加, 截面面积随之增大, 核心混凝土吸收热量的能力也随之增强, 因而在受火时间相同的情况下, 剩余承载力影响系数变大, 所以截面边长对  $k_r$  的影响很大。

### 2.2 截面配筋率

图 5 所示为截面配筋率对剩余承载力影响系数  $k_r$  的影响。由此可见, 随着截面配筋率的增大,  $k_r$  有增加的趋势, 但增加的幅度很小, 所以截面配筋率对  $k_r$  的影响不是很大。

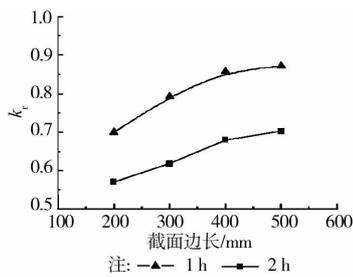


图 4 截面边长的影响

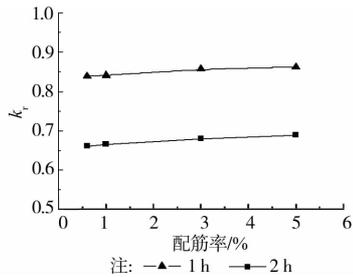


图 5 配筋率的影响

### 2.3 受火时间

图 6 所示为构件受火时间对剩余承载力影响系数  $k_r$  的影响。由此可见,随着受火时间的增大, $k_r$  几乎以反比例函数的形式迅速减小。这是由于受火时间越大,构件截面所经历的最大温度越高,材料劣化程度也越强,所以承载力影响系数迅速下降;反之,构件受火时间短,材料强度损失小,承载力影响系数下降的慢,所以受火时间对  $k_r$  的影响很大。而且从图中还可以看出当受火时间小于 0.5 h 时, $k_r$  为 0.97 左右,即构件承载力损失很小;当受火时间超过 3 h 时, $k_r$  将减少到 0.6 以下,即构件承载力损失严重,应加强修复。

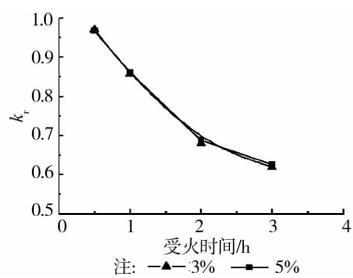


图 6 受火时间的影响

### 2.4 截面含钢率

图 7 所示为截面含钢率对剩余承载力影响系数  $k_r$  的影响。由此可见,随着截面含钢率的增大, $k_r$  变化不大,大体上呈水平直线变化,所以截面含钢率对  $k_r$  的影响总体上不大。

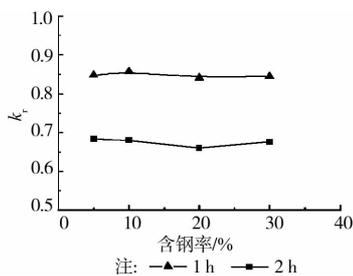


图 7 含钢率的影响

### 2.5 混凝土抗压强度

图 8 所示为核心混凝土抗压强度对剩余承载力影响系数  $k_r$  的影响。由此可见,随着核心混凝土抗压强度的增大, $k_r$  略有减少,所以核心混凝土抗压强度对  $k_r$  的影响很小。

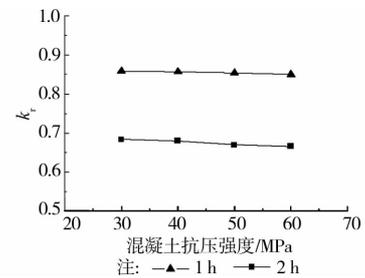


图 8 混凝土强度的影响

### 2.6 钢管屈服强度

图 9 所示为钢管屈服强度对剩余承载力影响系数  $k_r$  的影响。由此可见,钢管屈服强度对  $k_r$  的影响总体上不大, $k_r$  随着钢管屈服强度的增大而略有所减少。这是由于钢管裸露在外面,而且与混凝土相比热容相对较小,整体温度很高,构件力学性能很差,所以钢管屈服强度越大, $k_r$  越小<sup>[13]</sup>。

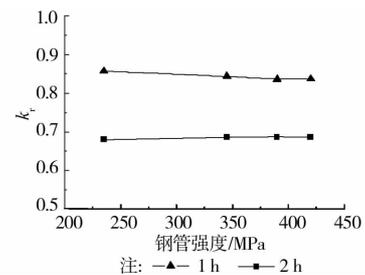


图 9 钢管强度的影响

### 2.7 钢筋屈服强度

图 10 所示为钢筋屈服强度对剩余承载力影响系数  $k_r$  的影响。由此可见,钢筋屈服强度对  $k_r$  几乎没有影响。

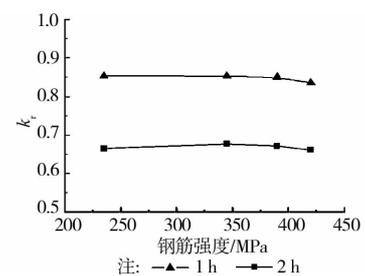


图 10 钢筋强度的影响

## 3 剩余承载力的计算方法

通过上节的参数分析,回归出在 ISO-834 标准火灾作用下后方钢管钢筋混凝土短柱剩余承载力的简化计算公式,如公式(2)所示:

$$k_r = \begin{cases} 1.09 - 0.17 \ln t + 2e^{-3} B - 1.89e^{-6} B^2 & t \leq 60 \\ 0.84 - 9e^{-4} t - 2e^{-3} B + 8.72e^{-6} B^2 - 8.9e^{-9} B^3 & t > 60 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $t$  为受火时间, min;  $B$  为截面边长, mm。

图 11 给出采用简化计算公式(2)的计算结果与数值程序计算结果的对比, 可见两者吻合较好。即只要知道构件的边长和受火时间便可以通过式(1)、(2)得出火灾作用后方钢管钢筋混凝土短柱剩余承载力的近似值, 且该公式只是用于方形截面。

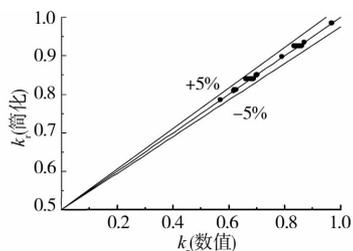


图 11  $k_r$  简化计算值与程序计算值对比

## 4 结 论

通过以上研究分析, 可得到如下结论:

1) 提出了火灾后方钢管钢筋混凝土短柱温度场及力学理论模型, 计算结果得到国内外试验数据的验证。

2) 分析了 ISO-834 标准升温曲线作用后各参数对构件剩余承载力系数的影响规律, 结果表明, 构件截面边长、受火时间对火灾后方钢管钢筋混凝土短柱剩余承载力有较大影响。

3) 提出的简化计算公式与理论值相近, 为进一步提出科学合理的修复加固方法提供参考。

## 参考文献:

- [1] 韩金生, 董毓利, 徐赵东. 钢管混凝土柱抗火性能研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(Sup2): 265-270.
- [2] 杨华, 吕学涛, 张素梅. 单面受火的矩形钢管混凝土柱截面温度场分析[J]. 天津大学学报, 2010, 43(5): 392-399.
- [3] 郑永乾. 方钢管配筋混凝土柱耐火极限的计算[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 44-48.
- [4] Chabot M, Lie T T. Experimental studies on the fire resistance of hollow steel columns filled with bar-reinforced concrete[R]. NRC-CNRC Internal Report, Ottawa, Canada, 1992: 628.
- [5] 霍静思, 韩林海. ISO-834 标准火灾作用后钢管混凝土的轴压刚度和抗弯刚度[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(5): 143-151.
- [6] 林晓康, 陶忠. 火灾后钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(Sup2): 514-518.
- [7] 王景玄, 张鹏鹏, 王文达. 考虑火灾全过程的钢管混凝土组合框架力学性能初步研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(1): 84-88.
- [8] Lie T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(5): 1489-1509.
- [9] 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.
- [10] 宋天诣. 火灾后钢-混凝土组合框架梁-柱节点的力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [11] 王静峰. 高温对钢管混凝土柱节点刚性的影响[R]. 北京: 清华大学, 2007.
- [12] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007.

(编辑 胡 玲)