

# 高温后钢骨-方钢管混凝土组合短柱轴压性能研究

孙艳丽<sup>1</sup>, 邹 桢<sup>1</sup>, 刘尚来<sup>2</sup>, 刘振辉<sup>3</sup>, 刘 娟<sup>4</sup>

(1. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连 524009;  
3. 辽宁省建设科学研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110005; 4. 东北财经大学管理科学与工程  
工程学院, 辽宁 大连 116025)

**摘要目的** 对钢骨方钢管混凝土短柱施加火灾作用, 进而研究火灾后试件的轴压力学性能。**方法** 通过数值模拟分析方法, 建立温度场分析模型, 明确试件各组分温度场分布规律, 研究高温后试件在轴向荷载作用下的破坏形态, 并分析受火时间、内置钢骨形式、钢管壁厚以及混凝土强度等参数对试件力学性能的影响。**结果** 是否内置钢骨对试件破坏形态具有一定影响, 无内置钢骨的试件破坏时主要表现为中部发生鼓曲, 钢管褶皱, 内置钢骨的试件在破坏时呈双波型鼓曲; 受火时间增加, 试件劣化程度加剧, 钢管壁厚为 6 mm 和 7.5 mm 的试件极限承载力相对于厚度为 4.5 mm 的试件分别提高了 25.6% 和 30.1%, 混凝土强度等级的变化对试件极限承载力影响较小。**结论** 内置钢骨的存在使得试件各组分协同作用, 试件受力性能良好, 且在高温后仍具有足够的安全储备空间。

**关键词** 高温; 内置钢骨; 短柱; 轴压性能; 承载力

中图分类号 TU391 文献标志码 A

## Study on Axial Compression Behavior of Steel Reinforced Concrete-Filled Square Steel Tubular Short Columns after High Temperature

SUN Yanli<sup>1</sup>, ZOU Zhen<sup>1</sup>, LIU Shanglai<sup>2</sup>, LIU Zhenhui<sup>3</sup>, LIU Juan<sup>4</sup>

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. College of Fisheries and life Sciences, Dalian Ocean University, Dalian, China, 524009; 3. Liaoning Academy of Construction Sciences Co. Ltd., Shenyang, China, 110005; 4. School of Management Science and Engineering, Northeast University of Finance and Economics, Dalian, China, 116025)

**Abstract:** The objective is to study the axial compressive performance of the specimens after fire, through exerting fire effect to square steel tube concrete short column with steel bone. Establish the temperature field analysis model through numerical simulation analysis method, to identify the

收稿日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978421); 辽宁省科技厅公益基金项目(2020JH4/10100048); 辽宁省社会科学规划基金项目(L18BJY030)

作者简介: 孙艳丽(1971—), 女, 副教授, 主要从事建筑与土木工程管理等方面研究。

temperature field distribution rule of each component of the specimen, to study the failure mode of the specimen under axial load after high temperature, and to analyze the influence of the parameters such as the fire time, the form of the embedded steel bone, the thickness of the steel tube and the concrete strength on the mechanical properties of the specimen. Whether the concrete short column is embedded with steel bone or not has certain influence on the failure mode of specimen. The failure of the specimen without embedded steel bone is mainly manifested as buckle in the middle and steel tube wrinkle. The failure of the specimen with embedded steel bone is manifested as double wave buckle. With the increase of fire exposure time, the deterioration of the specimens was intensified. The specimens with the wall thickness of 6 mm and 7.5 mm have the ultimate bearing capacity 25.6% and 30.1% higher than that of the specimens with the thickness of 4.5 mm. The change of the strength grade of concrete had little effect on the ultimate bearing capacity of the specimens. The embedded steel bone makes the components of the specimen cooperate with each other, makes the specimen have good mechanical performance and have enough safe reserve space after high temperature.

**Key words:** high temperature; steel-encased; short column; axial compression behavior; Bearing capacity

近年来,国内外学者针对钢管-钢管混凝土组合柱进行了大量研究。徐亚丰等<sup>[1]</sup>通过数值模拟方法对钢管钢管高强混凝土柱进行了研究,对典型试件受力全过程进行了分析,并建议了轴压承载力计算公式。朱美春等<sup>[2]</sup>对13组试件进行了轴压试验,并对相关参数进行分析,通过试验提出了承载力计算模型。陈兰响等<sup>[3]</sup>借助理论及数值模拟方法,在参数分析的基础上通过回归分析提出了试件承载力简化计算式。以上研究主要针对常温下的试件,但对于钢管钢管混凝土柱研究相对较少。基于此,笔者在有限元验证基础上建立了钢管-钢管混凝土组合短柱的有限元模型,分析了试件在升温过程中的温度场分布状况及分布规律,对高温后试件在轴向荷载作用下的变形形态进行了研究,并且对受火时间、内置钢管形式、钢管壁厚以及混凝土强度等参数对试件力学性能影响规律进行了分析。研究表明,内置钢管的存在使得试件各组分协同作用,试件受力性能良好,且在高温后仍具有足够的安全储备空间。

## 1 有限元模型

### 1.1 材料热工参数及本构关系

对高温后钢管-方钢管混凝土组合短柱

进行力学性能分析之前,首先要建立温度场有限元模型。模型按照ISO-834标准升温曲线进行升温,模型中所定义的热工参数主要包括材料密度、导热系数、比热等,笔者采用T. T. Lie<sup>[4]</sup>提供的热工模型进行计算。计算过程中,需要在有限元软件中定义热对流和热辐射等相关条件,所涉及的相关参数可根据文献<sup>[5]</sup>确定。

建立力学模型时,采用如下本构关系:高温后钢管与内置钢管的应力-应变关系采用韩林海等<sup>[6]</sup>提出的双折线强化模型;混凝土主要受钢管以及内置钢管的约束作用,因此高温后混凝土采用林晓康<sup>[7]</sup>提出的应力-应变关系模型。

### 1.2 模型建立

运用有限元软件ABAQUS对高温后钢管-方钢管混凝土组合短柱进行轴压力学性能分析之前,首先对试件进行热处理,明确试件在整个升温过程中的温度场变化规律。进行热分析时,混凝土、两端盖板以及内置钢管均采用八节点缩减积分传热单元(DC3D8),钢管采用四节点热传递壳单元(DS4)(见图1)。已有研究表明,从火源至受火对象,热量主要通过三种形式进行传递:热对流、热辐射以及热传导。钢管-方钢管混凝土组合短

柱在受热时,外表面温度升高,热量则逐渐向混凝土以及内置型钢转移。当完成温度场的分析之后,需要在力学计算模型中进行预定

义场的设置,此时火灾计算结果(ODB文件)将作为试件力学分析的初始条件<sup>[8]</sup>。

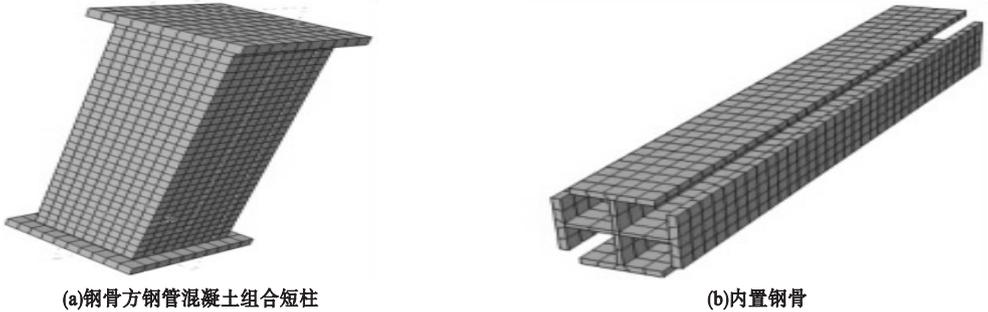


图1 试件网格划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen meshes

对高温后的试件进行受力分析时,单元类型的选择将决定着模型的敛散性,因此在建模过程中单元类型均采用结构单元<sup>[9-10]</sup>,其中两端盖板、混凝土以及内置型钢采用三维实体单元(C3D8R),钢管采用四节点壳单元(S4),钢管厚度可在材料属性当中分别赋予。为了尽可能使模拟工况接近实际工况,需要在有限元建模过程中对各组分之间的相互作用进行设置,钢管与混凝土以及内置型钢与混凝土界面模型由切线方向的库伦摩擦模型与法线方向的硬接触组成,定义高温后钢管与混凝土之间的界面摩擦系数为0.3<sup>[11-13]</sup>。对高温后钢管-方钢管混凝土组合短柱进行轴压力学性能分析时,在构件上下端板中心点处设置参考点,将上下端板与

参考点耦合在一起,对上部参考点 $X$ 、 $Y$ 方向的位移及 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向的转角进行约束,在 $Z$ 方向施加位移,以此实现位移加载,下部参考点按照固定约束方式进行设置<sup>[14]</sup>。

### 1.3 有限元验证

为验证有限元模型的正确性,笔者采用文献[15]中的试件S4-H进行了有限元验证。试件高度 $H$ 为600 mm,宽度 $B$ 为300 mm,高宽比 $H/B$ 为2。钢管壁厚 $d$ 为6 mm,内置型钢采用HW150型钢,内置型钢与钢管的屈服强度 $f_y = 368$  MPa,混凝土轴心抗压强度标准值 $f_{ck} = 47.2$  MPa,试件截面形式及几何构造如图2所示。试件按照ISO-834标准升温曲线进行升温,四面均匀受火,受火时间为180 min。

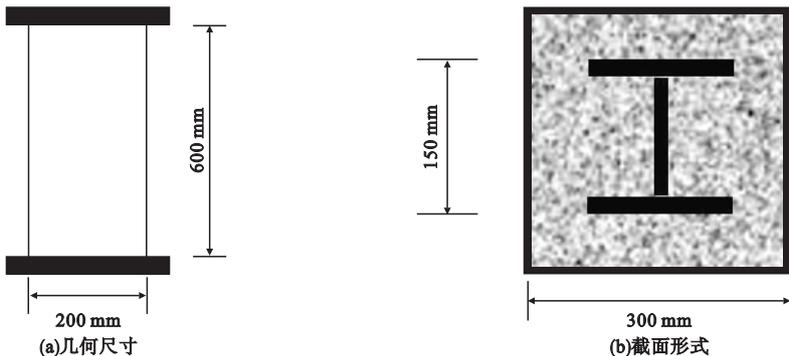
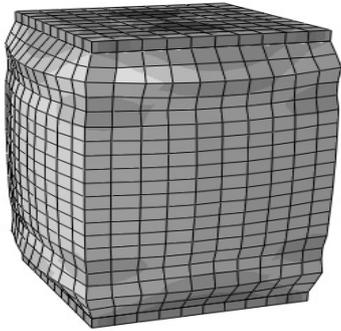


图2 试件截面几何尺寸及构造

Fig. 2 Cross-section dimensions and details of specimens

火灾后轴压试验在 500T 压力试验机上进行,加载后试件的变形形态如图 3 所示。由图可知,在轴向荷载作用下,火灾后钢骨-方钢管混凝土短柱的破坏形态主要表现为靠

近端板位置钢管发生褶皱,试件中部区域发生鼓曲。通过有限元模拟得到了试件的变形形态,通过对比发现,模拟结果与试验结果基本一致。



(a)有限元模拟结果



(b)试验结果

图 3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure mode of specimen

试件荷载-应变曲线如图 4 所示。

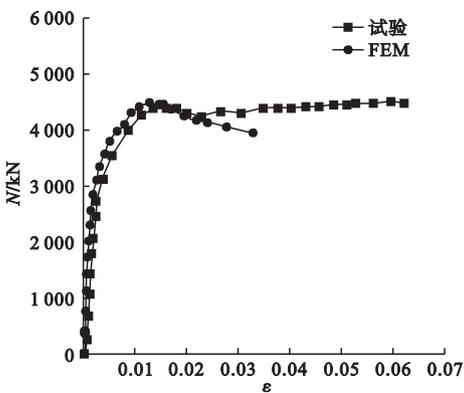


图 4 荷载-应变曲线

Fig. 4 Load-strain curves

从图中可以看出,有限元模拟结果与试验结果变化趋势基本一致,通过试验得到的极限承载力为 4 419 kN,而通过有限元模拟得到的极限承载力为 4 508 kN,二者偏差为 2.01%,进而验证了有限元模型的准确性。

## 2 高温后钢骨-方钢管混凝土组合短柱轴压力学性能

### 2.1 试件设计

为了研究高温后钢骨-方钢管混凝土组合短柱轴压力学性能,笔者设计了 9 个试件,试件参数见表 1。

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	试件宽×高/ mm	内置钢 骨形式	受火时间/ min	钢管壁厚/ mm	混凝土 强度	极限承载力/ kN
SSC1	195×585	十字形	0	4.5	C40	3 172
SSC2	195×585	十字形	30	4.5	C40	2 694
SSC3	195×585	十字形	60	4.5	C40	2 330
SSC4	195×585	工字形	60	4.5	C40	1 955
SSC5	195×585	—	60	4.5	C40	1 734
SSC6	195×585	十字形	60	6	C40	2 456
SSC7	195×585	十字形	60	7.5	C40	2 543
SSC8	195×585	十字形	60	4.5	C30	2 160
SSC9	195×585	十字形	60	4.5	C60	2 430

所设计的钢骨方钢管组合短柱是在普通钢管混凝土柱基础上在试件截面中部内置钢骨形成的,钢骨采用 I-10 工字钢加工而成,

根据钢骨截面形式的不同可分为工字形和十字形,钢骨和钢管均采用 Q345 钢材。试件截面形式及几何尺寸如图 5 所示。

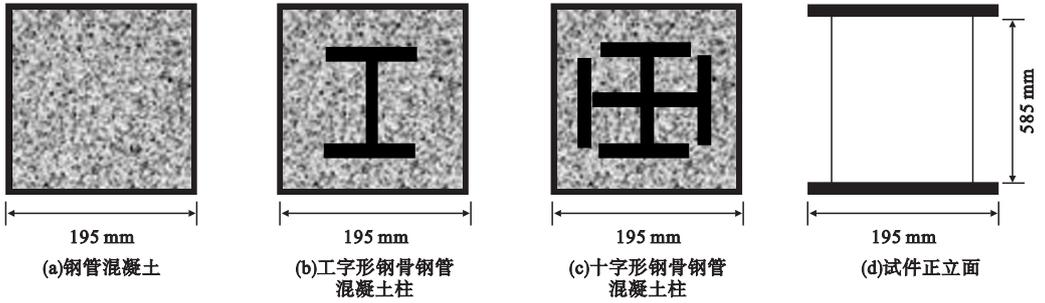


图 5 试件截面形式及几何尺寸

Fig. 5 Crossed-section form and geometric structure of specimen

## 2.2 计算结果分析

### 2.2.1 温度场分析

图 6 为典型试件 SSC3 各组分温度场分布云图。由图可知,当采用 ISO-834 标准升温曲线对试件进行升温时,钢管最先受热,由于钢材具有良好的导热性能,钢管沿试件方向温度场分布相对均匀;试件表面受热之后,

混凝土表面温度迅速升高,热量通过热传导的方式向截面中心传递,通过观察发现,混凝土温度由外向内呈现阶梯状分布,且温度逐渐降低,受火 60 min 后,截面中心区域混凝土温度仅达到 335 °C;受混凝土的保护,内置十字形钢骨升温速率较慢,平均温度仅为 335.2 °C。

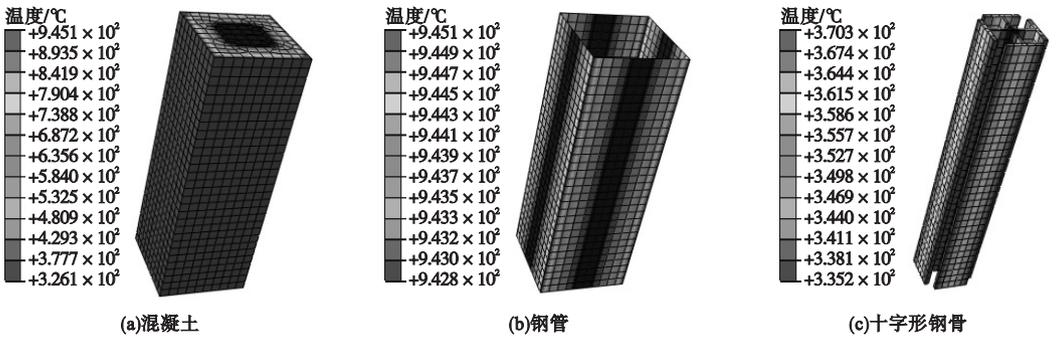


图 6 试件各组分温度场分布云图

Fig. 6 Temperature field distributions of each group of specimen

### 2.2.2 轴向荷载作用下试件破坏模式

高温后的钢骨方钢管混凝土组合短柱因受到受火时间以及内置钢骨形式的影响,其变形形态也略有差异。笔者在研究过程中选取试件 SSC1 ~ SSC5 进行分析,变形形态如图 7 所示,其中试件 SSC1、SSC2、SSC3 分别对应常温下、受火 30 min、60 min 后的试件,SSC4、SSC5 分别为内置工字形钢骨和不含钢骨的试件。通过有限元模拟发现,以上试

件在加载初期均表现为轴向压缩,横向变形较小,继续加载,试件横向变形增大,对于不含钢骨的试件,破坏位置出现在试件中部,主要表现为试件中部钢管发生鼓曲,对于内置工字形和十字形钢骨的试件,主要在试件中部附近区域出现双波型鼓曲;通过对比常温下、受火 30 min 后以及受火 60 min 后的试件发现,随着受火时间的增大,试件变形程度加剧,但变形形态区别不大。

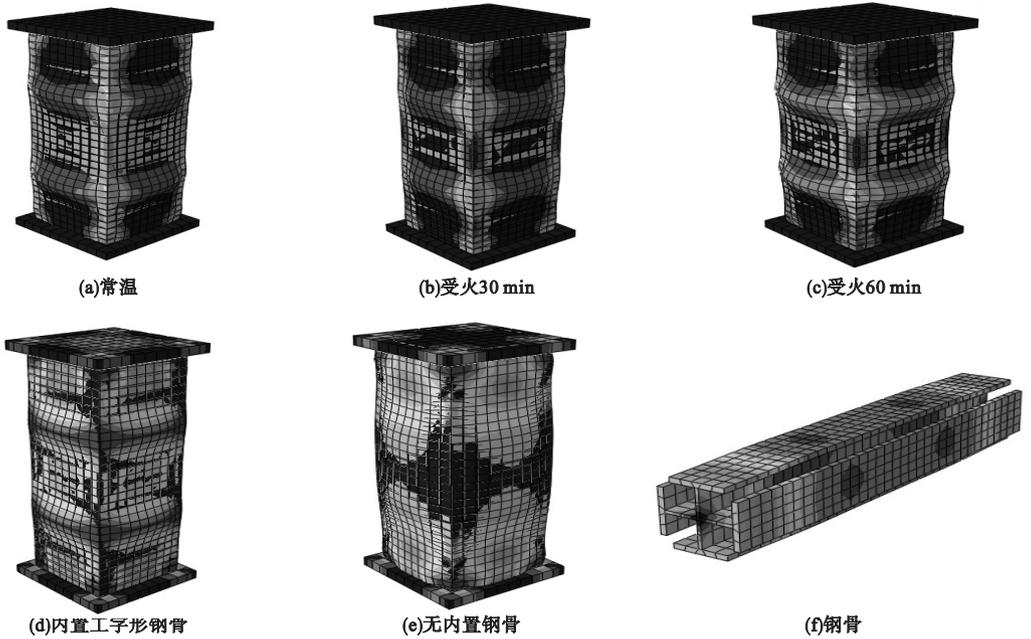


图7 试件变形形态

Fig. 7 Deformation shapes of specimen

2.2.3 荷载-位移曲线

(1) 受火时间

图8为常温下、受火30 min后、受火60 min后钢管-方钢管混凝土组合短柱荷载-位移曲线。

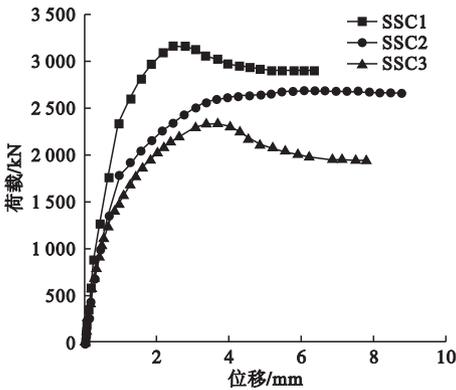


图8 不同受火时间后试件荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of specimens subjected to different fire time

由图8可知,随着受火时间的增加,试件刚度及承载力逐渐降低,常温条件下,试件极限承载力为3172 kN,采用ISO-834标准升温曲线分别将试件升温至30 min、60 min后,所对应试件的极限承载力分别降至2694 kN和

2330 kN,承载力相对于常温下的试件分别降低了15.1%和26.5%。分析原因,当对试件进行升温处理时,钢管温度迅速升高,并以热传导的方式逐渐向试件截面中心扩散,且随着受火时间的增加,混凝土的劣化程度加剧,强度逐渐降低,最终导致试件极限承载力降低。

(2) 内置钢骨形式

试件SSC3、SSC4、SSC5分别对应内置十字形钢骨、工字形钢骨以及未设置钢骨(即钢管混凝土柱)试件,试件受火时间均为60 min。图9为以上三组试件的荷载-位移曲线。由图可知,当试件SSC3和SSC4受轴向荷载作用时,钢管、混凝土以及内置钢骨协同作用,共同承担轴向荷载,且由于内置钢骨的存在,刚度及延性相对于钢管混凝土短柱要大;由于内置钢骨截面形式不同,试件SSC3和SSC4的极限承载力略有差异。研究发现,在截面中心设置十字形钢骨和工字形钢骨的试件,其极限承载力相对于普通钢管混凝土柱分别提高了34.8%和12.7%,但不同截面形式的钢骨对SSC3和SSC4两组试件的初始刚度影响较小。

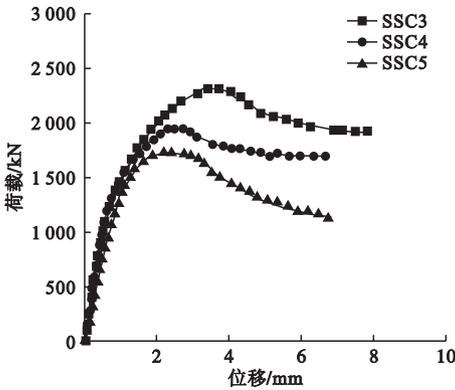


图9 内置不同截面形式钢骨试件荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of the specimens with steel bones of different sections

(3) 钢管壁厚

SSC3、SSC6 和 SSC7 三组试件所对应的钢管壁厚分别为 4.5 mm、6 mm、7.5 mm。图 10 为不同钢管壁厚的试件荷载-位移曲线。由图可知,当钢管壁厚为 4.5 mm 时,所对应试件的极限承载力为 1 955 kN,当钢管壁厚分别增加至 6 mm、7.5 mm 时,其极限承载力分别提高了 25.6%、30.1%,且随着钢管壁厚的增大,试件刚度及延性也逐渐增加。分析原因主要是由于试件在高温冷却后,钢材强度逐渐恢复,且随着钢管壁厚的增加,试件含钢率增大,从而导致承载力、刚度以及延性也逐渐增大。

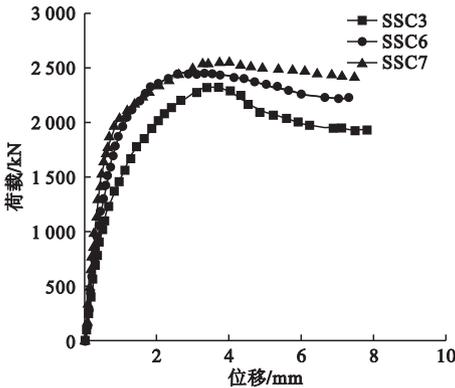


图10 不同钢管壁厚试件荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of steel tube with different wall thickness

(4) 混凝土强度

试件 SSC3、SSC8 和 SSC9 所采用的混

凝土强度等级依次为 C40、C30 和 C60。图 11 为不同混凝土强度等级下试件的荷载-位移曲线。由图可知,当采用 C30 混凝土时,试件极限承载力为 2 160 kN,当采用 C40 和 C60 混凝土时,对应试件的极限承载力相对于 C30 的试件分别提高了 7.2% 和 12.5%,由此可以发现,混凝土强度等级的变化对试件承载力影响较小。分析原因,在对试件进行升温处理时,混凝土将发生劣化现象,强度逐渐降低,且随着温度升高,劣化程度加剧,降温冷却后,混凝土强度基本得不到恢复,部分混凝土退出工作,因此对于经历火灾后的试件而言,混凝土强度的变化对于承载力影响不大。

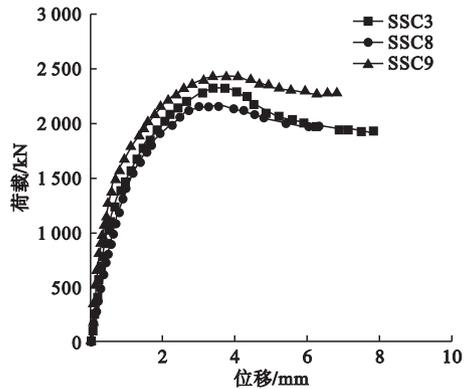


图11 不同混凝土强度等级试件荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of specimen with different strength grade of concrete

3 结论

(1) 通过建立温度场模型,从而对典型算例进行热分析,明确了试件各组分的温度场分布状况以及分布规律。

(2) 在有限元验证的基础上,对典型试件的破坏形态进行了分析,通过研究发现,是否内置钢骨对试件变形形态具有一定影响,内置钢骨的试件在破坏时表现为在中部附近区域出现双波型鼓曲,而对于普通钢管混凝土短柱,主要表现为跨中部位发生鼓曲;受火时间的变化仅对试件变形程度有影响。

(3) 通过参数分析发现,随着受火时间

的增加,试件劣化程度加剧;内置钢筋能有效提高试件的承载力、刚度及延性,随着配骨指标的增加,试件承载力影响较大,但对于刚度影响较小。增加钢管壁厚使得试件含钢率增加,钢管壁厚为6 mm和7.5 mm的试件极限承载力相对于厚度为4.5 mm的试件分别提高了25.6%和30.1%。改变混凝土强度等级对试件极限承载力影响较小。

## 参考文献

- [1] 徐亚丰,金松,牟璐.轴心受压钢管-方钢管高强混凝土组合短柱承载力[J].土木建筑与环境工程,2015,37(增刊2):17-22.  
(XU Yafeng, JIN Song, MOU Lu. Bearing capacity of square steel tube filled with steel-reinforced high strength concrete short composite column under axial load[J]. Journal of civil and environmental engineering, 2015, 37(S2):17-22.)
- [2] 朱美春,王清湘,冯秀峰.轴心受压钢管-方钢管自密实高强混凝土短柱的力学性能研究[J].土木工程学报,2006(6):35-41.  
(ZHU Meichun, WANG Qingxiang, FENG Xiufeng. Behavior of axially-loaded square steel tube short columns filled with steel-reinforced self-consolidating high strength concrete[J]. China civil engineering journal, 2006(6):35-41.)
- [3] 陈兰响,关萍,王怀亮.钢管-钢管混凝土轴压短柱的延性和承载力[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(5):623-627.  
(CHEN Lanxiang, GUAN Ping, WANG Huailiang. Analysis for the ductility and bearing capacity of axially loaded short steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete[J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2015, 34(5):623-627.)
- [4] LIE T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of structural engineering, 1994, 120(2):1489-1509.
- [5] 张正涛,任庆新,任德斌,等.外包钢加固火灾后钢管混凝土叠合短柱轴压性能研究[J].工业建筑,2020,50(573):1-10.  
(ZHANG Zhengtao, REN Qingxin, REN Debin, et al. Study on axial compression behavior of concrete-encased concrete filled steel tubular stub columns strengthened with external steel clad after exposure to fire [J]. Industrial construction, 2020, 50(573):1-10.)
- [6] 韩林海.钢管混凝土结构-理论与实践[M].3版.北京:科学出版社,2016.  
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.)
- [7] 林晓康.火灾后钢管混凝土压弯构件的滞回性能研究[D].福州:福州大学,2006.  
(LIN Xiaokang. Research on hysteretic performance of concrete-filled steel tube compression-bending members after fire [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.)
- [8] 项凯,潘雁翀.火灾后钢管混凝土叠合短柱轴压性能分析[J].消防科学与技术,2017,36(12):1637-1641.  
(XIANG Kai, PAN Yanchong. Axial compression performance analysis of concrete-encased concrete filled steel tubular stub column [J]. Fire science and technology, 2017, 36(12):1637-1641.)
- [9] 李学锋,王慧峰,刘振辉.火灾后加劲型方钢管混凝土柱轴压力学性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,34(4):642-649.  
(LI Xuefeng, WANG Huifeng, LIU Zhenhui. Study on axial compression performance of stiffened concrete-filled square steel tube columns after fire [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 34(4):642-649.)
- [10] ZHOU Kan, HAN Linhai. Modelling the behaviour of concrete-encased concrete-filled steel tube (CFST) columns subjected to full-range fire [J]. Engineering structures, 2019, 183:265-280.
- [11] BALTAÏ P, GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress [J]. Journal of materials in civil engineering, 1990, 2(1):46-49.
- [12] 廖健聪,卢亦焱,李杉,等.外套方钢管自密实混凝土加固RC方柱轴压性能受力分析[J].混凝土,2019(8):47-53.  
(LIAO Jiancong, LU Yiyang, LI Shan, et al. Mechanical analysis on behavior of square RC columns strengthened with self-compacting concrete filled square steel tube under axial load [J]. Concrete, 2019(8):47-53.)
- [13] 王先铁,刘立达,周超,等.方钢管混凝土框架-中间开洞薄钢板剪力墙的力学性能研究[J].建筑结构,2016,46(2):43-48.  
(WANG Xiantie, LIU Lida, ZHOU Chao, et al. Mechanical behavior study of the concrete-filled square steel tube frame-thin steel plate shear wall with middle openings [J]. Building structure, 2016, 46(2):43-48.)
- [14] 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(3):209-221.
- [15] 孟凡钦,朱美春,何宝杰,等.火灾后钢管-方钢管混凝土短柱的轴压力学性能研究[J].工业建筑,2016,46(3):149-154.  
(MENG Fanqin, ZHU Meichun, HE Baojie, et al. Study of axially loaded behavior of square steel tubes short columns filled with steel reinforced concrete after fire [J]. Industrial construction, 2016, 46(3):149-154.)  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)