

火灾后加劲型方钢管混凝土柱轴压力学性能研究

李学锋¹,王慧峰¹,刘振辉²

(1. 沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168;2. 辽宁省建设科学研究院有限责任公司,辽宁 沈阳 110005)

摘要 目的 对火灾后加劲型钢管混凝土柱轴压性能及受力全过程工作机理进行研究。方法 通过借助相关文献中的试验进行有限元模型验证后,利用有限元软件 ABAQUS 对试件变形形态进行分析,研究受火时间、加劲肋厚度以及钢材屈服强度对试件承载力的影响。结果 常温下普通钢管混凝土柱以及火灾前后加劲型钢管混凝土柱在轴向荷载作用下均表现为中部鼓曲,且加劲肋出现局部屈曲;受力全过程中试件混凝土荷载分担比经历了先增大后减小的过程,荷载分担比最大为 40.11%;通过参数分析发现,当采用 ISO-834 标准升温曲线对试件进行升温处理后,试件承载力显著降低;改变加劲肋厚度以及钢材强度对试件承载力影响相对较小。结论 加劲肋的存在能有效提高试件的承载能力,经历火灾后的加劲型钢管混凝土柱仍具有足够的安全储备空间。

关键词 火灾;加劲型钢管混凝土柱;轴压性能;有限元

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Study on Axial Compression Performance of Stiffened Concrete-Filled Square Steel Tube Columns after Fire

LI Xuefeng¹, WANG Huifeng¹, LIU Zhenhui²

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Construction Science Research Institute Limited, Shenyang, China, 110005)

Abstract: To study the axial compression performance and the working mechanism of the whole process of the stiffened concrete-filled steel tube column afterward firing. After the finite element verification with the help of the test in the related references, the finite element software ABAQUS is used to analyze the deformation of the tested piece, at the same time, the effects of fire time, stiffener thickness and steel yield strength on the bearing capacity of the tested pieces were studied. The normal temperature of ordinary steel tube concrete columns and the stiffened steel tube

收稿日期:2021-01-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52078310)

作者简介:李学锋(1963—),男,副教授,主要从事建筑经济等方面研究。

concrete columns before and after fire showed central bulge under axial load, and the stiffeners appeared partial buckling, the concrete load-bearing ratio of the tested pieces has experienced a process of increasing at first and then decreasing during the whole stress process, and the maximum load-bearing ratio is 40.11%; Through parameter analysis, when the ISO-834 standard heating curve is used to treat the tested pieces, the bearing capacity of the tested pieces is significantly decreased, and the influence of changing the thickness of the stiffener and the strength of the steel on the bearing capacity of the tested pieces is relatively small. The existence of stiffeners can effectively improve the load-bearing capacity of the tested pieces, the stiffened steel tube concrete column after fire still has enough safety capacity.

Key words: fire; stiffened concrete-filled steel tube column; axial compression performance; finite element analysis

钢管混凝土柱作为结构承重构件,由于充分利用了混凝土和钢材各自的优点而被广泛应用于实际工程中。根据截面形式的不同分为方形截面试件和圆形截面试件。已有研究发现^[1-2],方形截面试件的混凝土在不同位置处受钢管约束效果不同,主要表现为角部约束较强,侧面中部约束较弱,同时,当试件承受轴向荷载作用时,四面钢板极易发生鼓曲,进而产生脱空现象,最终导致承载力逐渐降低。

为了保证钢管对混凝土具有足够的约束效果,研究人员在钢管内壁设置通长加劲肋,从而形成加劲型钢管混凝土柱。目前,国内外学者针对加劲型钢管混凝土柱做了大量研究。徐兵等^[3]以加劲型方钢管混凝土柱为研究对象进行试验,分析了其力学性能及工作机理;任德斌等^[4]通过数值模拟分析了加劲型钢管混凝土柱双向偏压力学性能,研究了不同参数对试件承载力、抗弯刚度以及延性的影响规律;董宏英等^[5]针对不同腔体构造的试件进行了试验研究,同时结合有限元模拟对构造参数进行分析,最终建立了加劲型钢管混凝土柱轴压承载力计算公式。以上研究均是针对常温下的试件,而对于火灾后加劲型钢管混凝土柱力学性能的研究鲜见报道。基于此,笔者设计了9个试件,通过有限元分析软件研究火灾后试件在轴向荷载作用下的变形形态及工作机理,分析了受火时间、加劲肋厚度以及钢材屈服强度等参数对试件力学性能的影响。研

究表明,加劲肋的存在能有效提高试件的承载能力,经历火灾后的加劲型钢管混凝土柱仍具有足够的安全储备空间。

1 有限元分析

1.1 建立有限元模型

1.1.1 材料热工参数及本构关系

对火灾后加劲型钢管混凝土柱进行轴压力学性能分析之前,首先要建立温度场有限元模型,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,文中钢材和混凝土的热工参数可通过文献^[6]提供的关系模型进行计算。

完成温度场分析后,采用热力顺序耦合方法进行力学性能分析,将温度场计算结果作为受力分析的初始条件以预定义场形式导入力学模型中^[7-8]。在进行火灾后轴压力学性能分析时,需要选用合理的材料本构关系,高温后钢管采用由韩林海等^[1]提出的双折线强化模型进行计算;混凝土受钢管约束,经历火灾后的混凝土可采用文献^[9]中的应力-应变关系进行计算。根据上述模型计算发现,钢管和混凝土在经历不同温度后,强度将发生不同程度的折减,强度折减系数与温度关系曲线如图1所示。由图可见,当温度低于200℃时,钢管混凝土强度基本不变;温度继续升高,当温度高于400℃后,材料强度大幅度下降,导致试件损伤程度加剧。

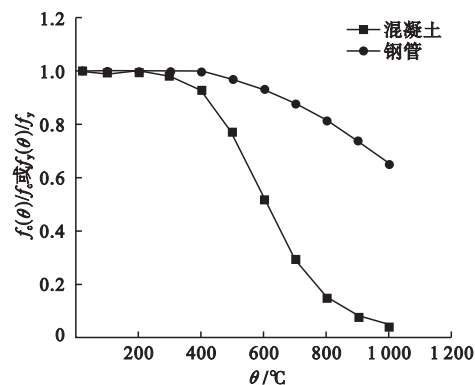


图1 不同温度下钢管及混凝土强度折减系数
Fig. 1 Strength reduction coefficient of steel and concrete at different temperatures

1.1.2 边界条件及加载方式

在进行火灾后加劲型钢管混凝土短柱轴压性能有限元计算时,为了真实模拟平铰加载,需要预先在试件两端端板中心处建立参考点,将参考点与端板表面进行耦合,将底部参考点 X、Y、Z 方向的位移和绕 X、Y、Z 的转角进行约束,顶部参考点约束 X、Y 方向的位移以及绕 X、Y、Z 的转角,在 Z 方向施加位移,从而实现位移加载^[10]。

1.1.3 网格划分及单元类型

试件主要由加劲型钢管、混凝土及端板组成。建模过程中加劲型钢管采用壳体,混凝土与端板采用实体,网格划分时保证钢管与混凝土边界网格及整体网格尺寸相近。

进行热分析时,所有单元采用热传递单元,其中加劲型钢管采用四节点热传递壳单元(DS4),混凝土与端板采用八节点缩减积分传热单元(DC3D8)。在进行力学性能分析时,采用结构单元进行计算^[11]。

1.1.4 相互作用

有限元建模过程中,所涉及的相互作用主要包括钢管与混凝土、端板与试件两端混凝土以及端板与钢管之间。定义钢管与混凝土相互接触,法向为硬接触,切向采用库伦摩擦模型,摩擦系数取 0.3^[12],不考虑加劲肋与混凝土的相互作用;端板与试件两端混凝土采用 Tie 进行约束^[13-14];在建模过程中由于钢管

采用壳体,为了保证钢管与混凝土变形协调,将端板与钢管采用实壳耦合进行约束^[15]。

1.2 有限元模型验证

目前,对于火灾后加劲型钢管混凝土短柱轴压试验研究未见报道,为了验证有限元模型的正确性,笔者选用文献[1]中关于高温后钢管混凝土柱轴压试验中的两组试件 S-800 和 S-900 进行有限元验证。

试件 S-800 和 S-900 经历的最高温度分别为 800 °C 和 900 °C,降温冷却后分别对两组试件施加轴向荷载,当试件最终破坏时,两组试件的钢管均发生鼓曲变形。通过有限元计算后发现,S-800 和 S-900 有限元计算得到的变形形态与试验结果基本一致,试件变形形态如图 2、图 3 所示。

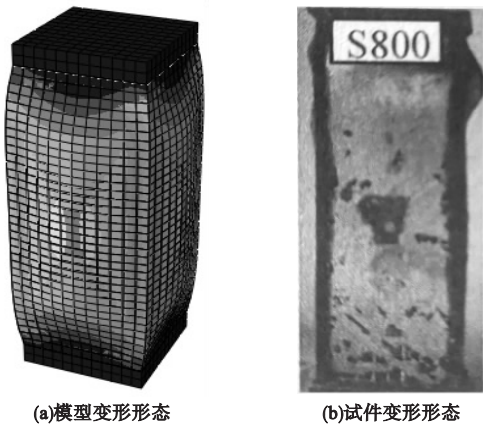


图2 S-800 试件变形形态
Fig. 2 Deformation of S-800 tested pieces

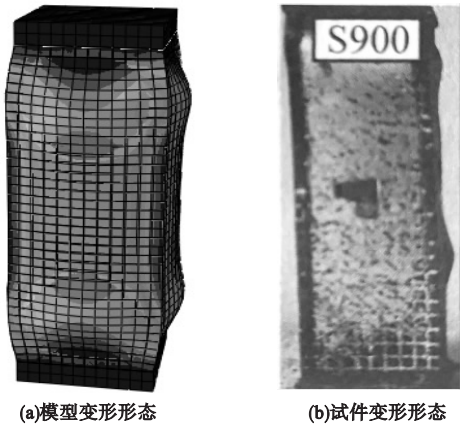


图3 S-900 试件变形形态
Fig. 3 Deformation of S-900 tested pieces

试件荷载-应变曲线如图4所示。由图4可知,通过有限元计算得到的荷载-应变曲线与试验实测的荷载-应变曲线基本吻合,且通过观察试件S-800与S-900试验实测的荷载-

应变曲线发现,其强度承载力试验值分别为668 kN和541 kN,与有限元计算得到的强度承载力偏差分别为13.8%和7.5%,均在15%以内,由此可以证明有限元模型是可靠的。

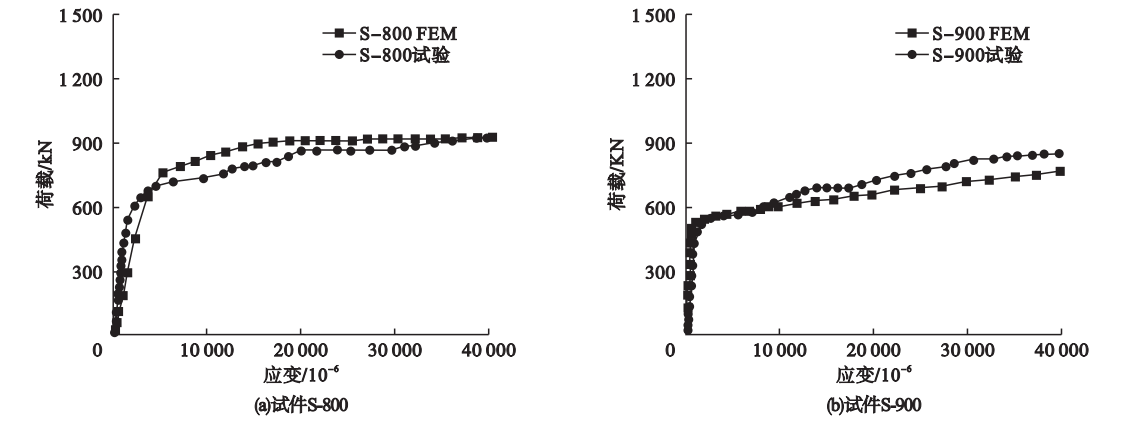


图4 试件荷载-应变曲线

Fig. 4 Load-strain curves of tested pieces

2 火灾后加劲型钢管混凝土柱轴压性能研究

2.1 试件设计

为了研究不同参数变化对火灾后加劲型钢管混凝土短柱轴压性能的影响,笔者设计

了9个试件进行了有限元计算,试件参数见表1。其中试件SSC1和SSC2为常温下试件,其余7个试件均施加了火灾作用。文中所研究的加劲型钢管混凝土柱区别于传统钢管混凝土柱,其是在钢管内壁焊接通长加劲肋形成的,试件构造及截面形式如图5所示。

表1 试件参数

Table 1 Tested piece data table						
试件编号	$H \times B / \text{mm}$	T / mm	t_s / mm	b_s / mm	t / min	f_y / MPa
SSC1	900 × 300	7	—	—	0	414
SSC2	900 × 300	7	5	90	0	414
SSC3	900 × 300	7	—	—	60	414
SSC4	900 × 300	7	5	90	30	414
SSC5	900 × 300	7	5	90	60	414
SSC6	900 × 300	7	3	90	60	414
SSC7	900 × 300	7	7	90	60	414
SSC8	900 × 300	7	5	90	60	345
SSC9	900 × 300	7	5	90	60	464

2.2 变形形态分析

图6分别为常温下钢管混凝土柱(SSC1)、常温下加劲型钢管混凝土柱(SSC2)、火灾后加劲型钢管混凝土柱(SSC5)在轴向荷载作用下的变形形态。通过观察试件在受力全过程的变形形态发现,

加载初期,试件未出现明显变形,当继续加载至某一时刻,试件中部区域钢管出现鼓曲,持续加载,鼓曲程度与范围将进一步扩大,钢管中部发生褶皱,对于加劲型钢管混凝土柱SSC2和SSC5,在加载后期加劲肋也发生局部屈曲。

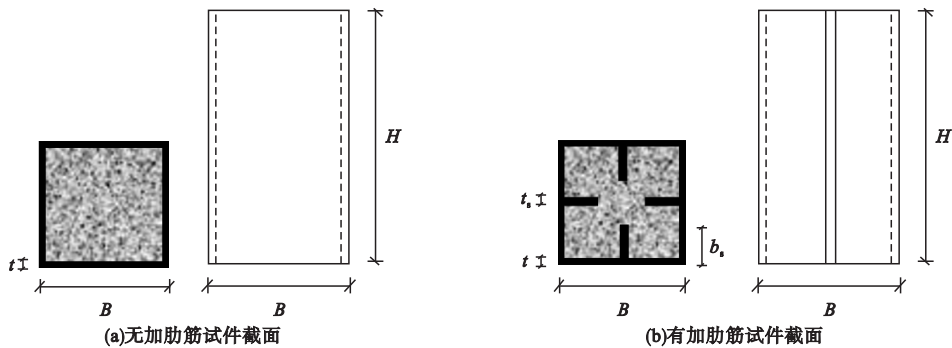


图 5 试件设计及截面形式

Fig. 5 The design and cross-sectional form of tested pieces

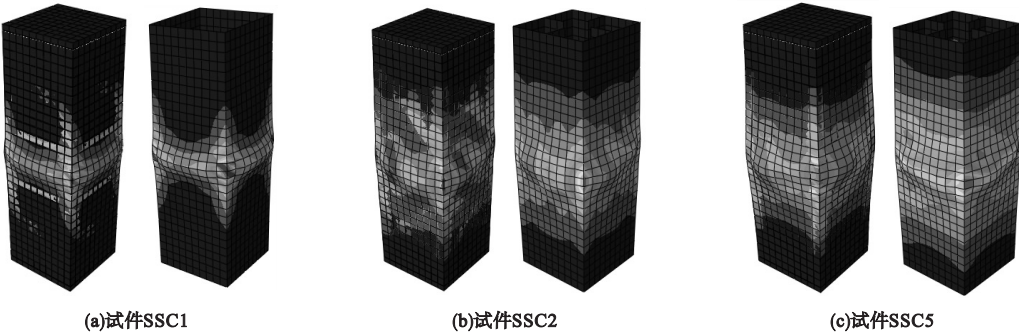


图 6 试件变形形态

Fig. 6 Deformation mode of tested pieces

2.3 受力全过程工作机理分析

为了研究火灾后加劲型钢管混凝土柱的工作机理,笔者选取试件 SSC5 作为典型算例进行分析。SSC5 高度为 900 mm,截面长为 300 mm×300 mm,混凝土立方体抗压强度为 55.6 MPa,钢管厚度为 7 mm,钢管内壁设置加劲肋,加劲肋沿试件长度方向通长设置,厚度为 5 mm。图 7 为试件 SSC5 荷载-位移曲线。笔者在曲线上定义了 5 个特征点,将荷载-位移曲线分为四个阶段。

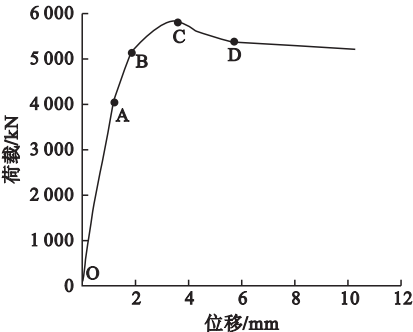


图 7 试件 SSC5 荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of SSC5

图 8 为典型算例中部截面混凝土受力全过程纵向应力分布状况,图 9 为典型试件各组分荷载-位移曲线。由图 8 和图 9 得出以下规律。

(1)OA 段:典型算例处在弹性阶段,试件中部截面混凝土纵向应力随加载过程的持续进行而逐渐增大,当达到特征点 A 时,混凝土截面纵向应力呈现由外向内逐渐增大趋势,最大应力处在截面核心处,其值可达到峰值强度的 55.96%。由于加劲肋的存在能有效避免钢管的局部屈曲,因此钢管在此阶段始终处于弹性状态。

(2)AB 段:在该阶段混凝土应力持续增大,达到 B 点时,混凝土纵向应力最大值达到峰值强度的 72.84%,与此同时,钢管也即将进入弹塑性状态。

(3)BC 段:混凝土纵向应力持续增加,但增长幅度逐渐降低,直至达到特征点 C 时,混凝土纵向应力达到了峰值强度。

(4)CD段:当超过特征点C后,混凝土纵向应力迅速降低,且降低幅度经历了先增后减小的过程,达到特征点D时,混凝土纵向应力仅为峰值强度的82.24%。

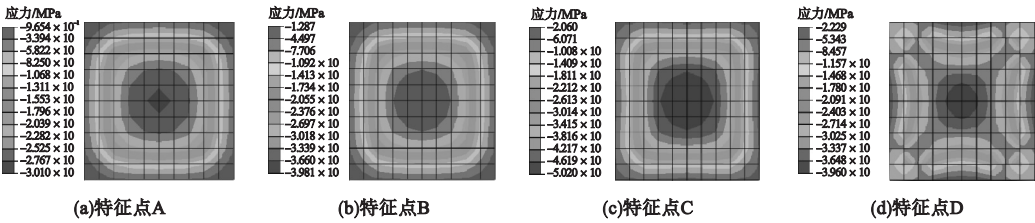


图8 典型算例中部截面混凝土受力全过程纵向应力分布状况

Fig. 8 The longitudinal stress distribution of the middle part concrete section of the typical sample

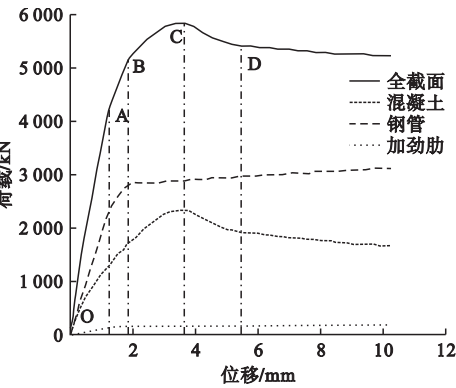


图9 典型试件各组分荷载-位移曲线

Fig. 9 The load-displacement curves of each component of a typical specimen

轴向荷载作用下试件各组分在不同受力阶段所承担的轴力有所不同,为了研究混凝土在受力全过程的荷载分担状况,笔者引入荷载分担比 K_N ,即混凝土所承担的轴力占全截面轴力的比值,荷载分担比 K_N 与位移的变化曲线如图10所示。由图10可知,荷载分担比的变化经历了先增大后减小的过程,特征点A、B、C、D所对应的荷载分担比分别为31.25%、33.02%、40.11%、35.59%。分析其原因,主要是在达到极限荷载85%之前,由于加劲肋的存在避免了钢管过早屈曲,钢管与混凝土协同作用,共同承担轴向荷载,因此混凝土荷载分担比逐渐增大;超过极限荷载的85%之后,钢管开始屈服,大部分荷载主要由混凝土来承担,荷载分担比的增长幅度变大;达到极限承载力后,混凝土最终因达到峰值强度最终破坏,荷载分担比 K_N 迅速降低。

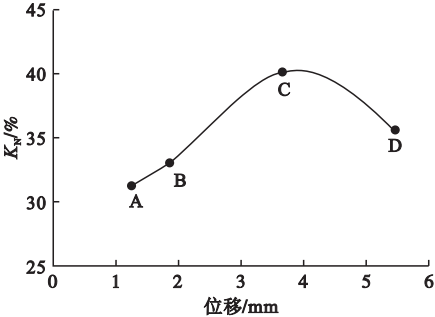


图10 典型试件中部截面混凝土荷载分担比曲线

Fig. 10 The load bearing ratio of the middle part concrete middle section of typical sample

2.4 参数分析

2.4.1 受火时间

经历火灾后的加劲型钢管混凝土柱将产生劣化现象,且随着受火时间的增加,承载力、刚度及延性将发生不同程度的降低。图11为常温下、受火30 min、60 min、90 min、120 min后试件荷载-位移曲线。由图可知,当试件处在常温状态时,其极限承载力为

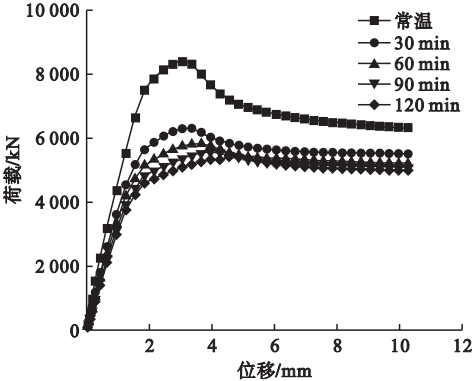


图11 不同受火时间后试件荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of specimen after different fire time

8 411 kN, 极限承载力所对应的位移为 3.05 mm。当受火时间分别延长至 30 min、60 min、90 min、120 min 后, 承载力较常温状态下分别降低了 24.9%、30.6%、33.7%、35.5%, 且极限承载力所对应的位移逐渐增大, 由此说明受火时间对试件承载力及刚度影响较大。

2.4.2 加劲肋厚度

为了研究加劲肋厚度对试件力学性能的影响, 笔者选取试件 SSC3、SSC5、SSC6、SSC7 进行分析, 依次对应无加劲肋、加劲肋厚度为 5 mm、3 mm 和 7 mm, 试件受火时间均为 60 min, 钢管壁厚为 7 mm。图 12 为不同厚度加劲肋试件荷载-位移曲线。由图可知, 加劲肋厚度的变化对试件初始阶段的轴向刚度影响较小, 随着加载持续进行, 加劲肋厚度对于试件刚度影响效果愈加明显; 分析试件的极限承载力发现, 试件 SSC3 的极限承载力为 5 204 kN, 试件 SSC5、SSC6、SSC7 相比于 SSC3, 极限承载力分别提高了 7.2%、12.1% 和 17.0%, 由此说明有无加劲肋以及加劲肋厚度对试件承载力影响较大。产生这一现象的原因: 一方面, 加劲肋厚度的增大使得试件含钢率增加; 另一方面, 设置在钢管内壁上的加劲肋能有效延缓方钢管的屈曲, 有效避免了因局部屈曲而造成的脱空现象, 且随着加劲肋厚度的增大, 防屈曲效果也愈加显著。

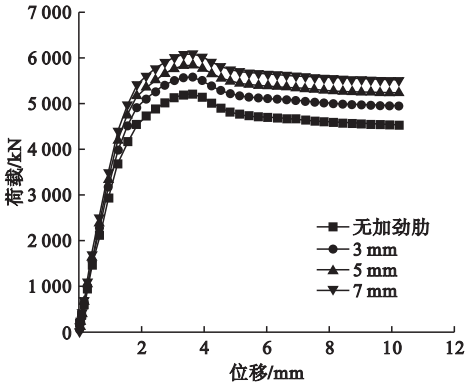


图 12 不同厚度加劲肋试件荷载-位移曲线
Fig. 12 Load-displacement curves of stiffeners of different thicknesses

2.4.3 钢材屈服强度

进行数值模拟分析时, 笔者选用三种类型的钢材, 钢材屈服强度分别为 345 MPa、414 MPa、464 MPa。图 13 为不同屈服强度的钢材所对应试件的荷载-位移曲线。由图可知, 当选用屈服强度为 345 MPa 的钢材时, 试件所对应的极限承载力为 5 245 kN, 当屈服强度为 414 MPa 和 464 MPa 时, 试件的极限承载力分别为 5 836 kN、6 265 kN, 二者承载力相对于钢材强度为 345 MPa 的试件分别提高了 11.3%、19.4%, 由此说明钢材强度的变化对试件承载力影响较大。

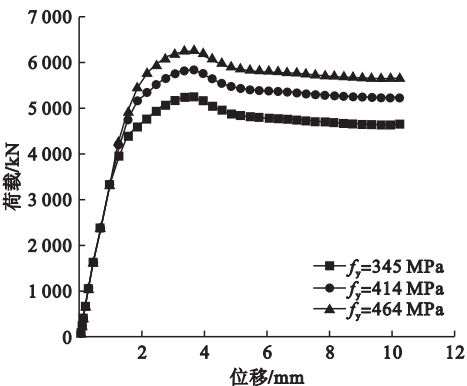


图 13 不同屈服强度钢材对应试件荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of steel with different yield strengths

3 结 论

(1) 通过对比常温下普通钢管混凝土柱与火灾前后加劲型钢管混凝土柱在轴向荷载作用下的变形形态发现, 试件在破坏时均在试件中部区域发生鼓曲, 钢管出现褶皱现象, 对于加劲型钢管混凝土柱, 内部加劲肋也发生局部屈曲。

(2) 通过典型算例的受力全过程分析明确了试件纵向应力分布状况, 同时对混凝土在不同受力阶段的荷载分担情况研究表明, 受力全过程中混凝土荷载分担比经历了先增大后减小的过程。

(3) 通过参数分析发现, 受火时间、加劲

肋厚度以及钢材屈服强度对试件承载力影响较为显著。随着受火时间的增加,材料强度发生不同程度的折减,使得试件承载力降低;加劲肋厚度的增大使得试件含钢率增加,能够有效延缓钢管发生局部屈曲,提高试件承载力;改变钢材的屈服强度对试件刚度影响较小。

参考文献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构 - 理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2016.)
- [2] 柯晓军, 但宇, 龙虹任, 等. 冷却方式对高温后方钢管再生混凝土短柱轴压性能的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1): 182-192.
(KE Xiaojun, DAN Yu, LONG Hongren, et al. Influence of cooling method on axial pressure performance of short column of regenerative concrete of steel pipe after high temperature [J]. Journal of applied foundation and engineering sciences, 2021, 29(1): 182-192.)
- [3] 徐兵, 吴发红, 徐桂中, 等. 不同加劲的方钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2018, 44(6): 43-46.
(XU Bing, WU Fahong, XU Guizhong, et al. Experimental study on the axial compressive performance of CFST short columns with different stiffeners [J]. Sichuan building science, 2018, 44(6): 43-46.)
- [4] 任德斌, 张正涛, 李泊飞, 等. 加劲型方钢管混凝土柱双向偏压力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 421-428.
(REN Debin, ZHANG Zhengtao, LI Bofei, et al. Study on biaxial eccentric compression behavior of concrete-filled square steel tubular columns stiffened with reinforced ribs [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2020, 36(3): 421-428.)
- [5] 董宏英, 李瑞建, 曹万林, 等. 不同腔体构造矩形截面钢管混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 69-81.
(DONG Hongying, LI Ruijian, CAO Wanlin, et al. Axial compression performance of rectangular concrete-filled steel tubular columns with different cell details [J]. Journal of building structures, 2016, 37(5): 69-81.)
- [6] LIE T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of structural engineering, 1994, 120(2): 1489-1509.
- [7] 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.)
- [8] 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.)
- [9] 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 sfter fire [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.)
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] BALTAY 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.
- [13] 谢旺军. 高温后圆与方钢管混凝土柱轴压性能对比分析[J]. 大众科技, 2020, 22(11): 39-43.
(XIE Wangjun. Comparison and analysis of axial compression performance of concrete columns with square steel pipe at high temperature [J]. Mass technology, 2020, 22(11): 39-43.)
- [14] 任德斌, 王溥麟, 王芬. 火灾后钢管混凝土柱与H型钢梁节点抗震性能的有限元分析[J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38(6): 70-74.
(REN Debin, WANG Pulin, WANG Fen. Finite element analysis of seismic properties of concrete-filled steel tube columns and h steel beam joints post fire [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2019, 38(6): 70-74.)
- [15] 李鲲鹏, 李俊华, 黄子川, 等. 空心圆钢管混凝土短柱轴压力学性能试验[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(1): 96-101.
(LI Kun, LI Junhua, HUANG Zichuan, et al. Experimental study on shaft pressure performance of concrete short columns with hollow steel spherical steel tube [J]. Journal of Yangtze university(natural science edition), 2020, 17(1): 96-101.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)