

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201901029



不锈钢管约束混凝土短柱 轴压性能试验

叶勇^{1,2}, 邓江聪¹, 彭译琳¹, 丁金鹏¹,
郑庶贤¹, 孙小乔¹, 张世江¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为研究混凝土在不锈钢侧向约束下的受压力学性能,开展不锈钢圆管约束混凝土短柱的轴压试验研究.在试验中,设置素混凝土短柱和碳素钢管约束混凝土短柱作为对比,主要研究参数为加载边界条件和不锈钢管壁厚.试验结果表明:素混凝土短柱出现沿竖向劈裂破坏,破坏前变形较小;其余约束混凝土短柱均呈现较好的变形能力,破坏表现为钢管外屈及相应位置混凝土压溃破坏;在圆不锈钢管约束下,混凝土短柱的轴压承载力和变形能力均得到显著提升;不锈钢管混凝土短柱的初始刚度大于不锈钢约束混凝土短柱;随着不锈钢管壁厚的增大,约束混凝土短柱的轴压承载力近似呈线性增长;采用不锈钢管约束混凝土的承载力高于采用相近屈服强度的碳素钢管约束混凝土.

关键词: 不锈钢; 约束混凝土; 短柱; 轴压承载力; 变形能力

中图分类号: TU 398

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)04-0476-07

Experimental Study on Circular Stainless Steel Tube Confined Concrete Stub Columns Under Axial Compression

YE Yong^{1,2}, DENG Jiangcong¹, PENG Yilin¹, DING Jinpeng¹,
ZHENG Shuxian¹, SUN Xiaoqiao¹, ZHANG Shijiang¹

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

2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Axial compression tests were carried out on stainless steel tube confined concrete stub columns, to investigate the effect of lateral confinement of stainless steel tube on the axial compressive performance of concrete stub columns. The main test parameters included the loading boundary and wall thickness of stainless steel tube. The plain concrete stub column and concrete stub column confined with carbon steel tube were conducted for comparison. The test results show: the plain concrete stub column splits longitudinally with minor deformation; while all the confined concrete stub columns present ductile failure modes with outward local buckling of steel tube and crush of concrete inside; the load-carrying capacity and deformation capacity of con-

收稿日期: 2019-01-07

通信作者: 叶勇(1985-),男,副教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构的研究. E-mail: qzyeyong@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51808234);福建省高校青年自然科学基金重点项目(JZ160410);福建省大学生创新创业训练计划立项项目(201710385091)

crete stub columns are significantly enhanced by the lateral confinement of stainless steel tubes; the initial stiffness of concrete-filled stainless steel tube is greater than the stiffness of stainless steel tube confined concrete; as wall thickness increases, the load-carrying capacity of the stainless steel tube confined concrete increases approximately linearly; the stainless steel tube confined concrete owns a higher strength than the carbon steel tube confined concrete.

Keywords: stainless steel; confined concrete; stub column; axial compressive strength; deformation capacity

钢管混凝土结构具有较好的力学性能、抗震性能和耐火性能,且施工方便,在高层建筑和大跨桥梁等领域得到广泛应用^[1]. 目前,钢管混凝土结构广泛采用碳素钢,由于碳素钢耐久性及耐腐蚀性能较弱,需进行防腐、防锈处理,因此,增加了普通钢管混凝土结构的全寿命周期成本^[2]. 不锈钢材料具有优越的耐久性和耐腐蚀性,且维护费用低,近年来逐渐受到结构工程师的关注,且在越来越多的工程结构中得到应用^[3]. 目前,国内外学者对不锈钢管混凝土的研究已相继展开. 廖飞宇^[4]采用有限元分析方法对不锈钢管混凝土和普通钢管混凝土短柱的轴压性能进行对比研究. Han 等^[5]研究新型不锈钢混凝土普通钢中空夹层钢管混凝土组合柱在轴压下的受力性能. Tao 等^[6]建立方形不锈钢管混凝土短柱在轴压作用下的精细有限元分析模型. Uy 等^[7]研究不锈钢管混凝土短柱和细长柱在轴压、轴压与弯矩共同作用下的受力性能. 陈誉等^[8]进行热成型不锈钢圆管混凝土短柱轴压性能的试验研究. 赵秋红等^[9]通过有限元方法研究圆端形不锈钢管混凝土桥墩的滞回性能. Liao 等^[10]研究不锈钢管混凝土柱的抗震性能. Ye 等^[11-13]通过试验和有限元分析方法研究圆形和方形不锈钢碳素钢复合管混凝土构件的轴压性能. 郭浩等^[14]建立圆形不锈钢-碳素钢复合管混凝土轴拉构件的精细化有限元分析模型. 钢管约束混凝土兼具钢管混凝土和型钢混凝土的特点,它是另一种钢-混凝土组合结构. 相较于普通碳素钢,不锈钢具有更好的后期应变强化能力和变形性能^[11],当用于钢管约束混凝土结构中可具有较好的约束效果. 然而,目前关于不锈钢管约束混凝土力学性能的研究仍较为少见. 基于上述研究背景,本文开展圆不锈钢管约束混凝土短柱的轴压性能试验,研究外不锈钢管的约束作用对核心混凝土在轴向压力作用下的破坏形态和力学性能的作用,并分析不同参数的影响规律.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计制作了 7 个轴压试件,主要研究参数为加载边界条件和不锈钢管壁厚,相应的试件信息,如表 1 所示. 表 1 中:C-1,C-2 为素混凝土试件;CFSST 为圆不锈钢管混凝土试件;CT3 为碳素钢管约束混凝土试件;ST2,ST3,ST5 为圆不锈钢管约束混凝土试件; D 为试件外径; d 为钢管厚度; D/d 为钢管径厚比; α 为截面含钢率, $\alpha=A_s/A_c$,其中, A_s,A_c 分别为钢管、核心混凝土的横截面面积; f_y 为钢材屈服强度,对于不锈钢,取名义屈服强度; F_{ue} 为试验测得的轴压承载力,取试件竖向平均应变为 $10^{-2}\epsilon$ 时所对应的荷载^[15].

表 1 试件参数和主要试验结果
Tab. 1 Parameters and test results of specimens

试件编号	D/mm	d/mm	D/d	α	f_y/MPa	F_{ue}/kN
C-1	114	—	—	—	—	202.3
C-2	114	—	—	—	—	185.3
CFSST	120	3.1	40	0.112	285	460.8
CT3	120	3.0	40	0.108	294	371.1
ST2	120	1.9	60	0.066	285	303.0
ST3	120	3.1	40	0.112	285	379.7
ST5	120	4.9	24	0.186	285	417.7

试件所用钢管外径均为 120 mm. 素混凝土试件采用外径为 120 mm,壁厚为 3 mm 的钢管作为模板浇筑而成,浇筑完成的素混凝土试件外径为 114 mm. 所有试件的长度均为 360 mm,混凝土的实测立方体抗压强度平均值为 25.1 MPa. 碳素钢与不锈钢全过程应力(σ)-应变(ϵ)的关系曲线,如图 1 所示. 图 1

中:插图为虚线方框的放大图.

1.2 加载装置及加载制度

对于 CFSST 试件,采用全截面加载的形式,即外钢管和核心混凝土同时直接承受外加轴向荷载;而对于 ST,CT 系列试件,在试件上、下设置直径略小于核心混凝土外径的钢块(直径 \times 高=110 mm \times 50 mm),以实现轴向荷载施加于核心混凝土.

采用 2 000 kN 液压试验机对试件施加轴向荷载,加载装置,如图 2 所示.在试件的弹性阶段,采用力控制加载,加载速率约为 0.1 MPa \cdot s $^{-1}$;钢管屈服后,转位移控制,慢速连续加载.

1.3 量测内容及测点布置

为量测加载过程中试件的轴向变形,在试验机上、下端板之间安置 3 个位移计,沿试件环向均匀布置.由于试件两端的钢块刚度大,可忽略钢块变形的影响.因此,位移计量测得的结果视为核心混凝土的轴向变形值.为研究在加载过程中,外钢管的受力情况以及对核心混凝土的约束作用,在试件钢管的跨中截面沿环向均匀布置轴向和环向各 3 组应变计,以量测测点处钢管的轴向和环向应变.具体的测点布置情况,如图 3 所示.图 3 中: F 为荷载.试验过程中,试验机输出的荷载值与其他量测内容同步采集.

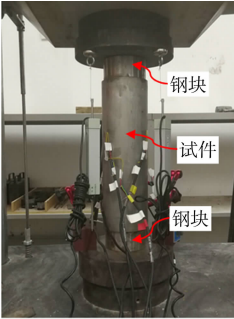


图 2 加载装置
Fig. 2 Loading set-up

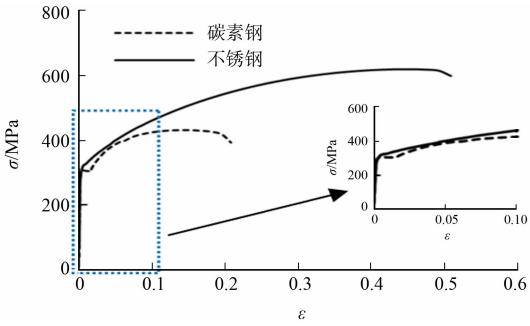


图 1 碳素钢与不锈钢全过程应力-应变关系
Fig. 1 Whole-range stress-strain relationships of carbon steel and stainless steel

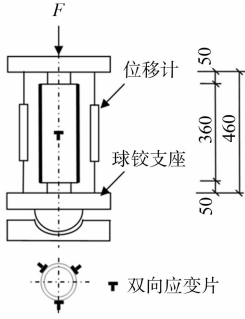


图 3 加载装置及测点布置示意图(单位:mm)
Fig. 3 Schematic diagram of loading set-up and measuring point layout (unit: mm)

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

试验过程中,对试件的变形情况进行全程观察,如图 4 所示.由图 4 可知:C 试件破坏前的变形较小,且破坏突然,呈现明显的脆性性能;ST,CT 系列试件和 CFSST 试件的破坏过程相似,均表现出较好的后期承载能力和变形能力.由图 4(a),(b)可知:初始加载时,C 试件处于弹性工作阶段,无明显变形;当荷载加至 160 kN 左右时,混凝土开始出现竖向裂缝并逐渐发展,最终导致试件丧失承载力.由图 4(c)可知:随着荷载的增加,钢管变形开始增大,CFSST 试件中部逐渐向外凸出,在靠近柱高中部的位置出现褶皱形局部屈曲现象.由 4(d)~(g)可知:钢管中部鼓曲,管壁无明显褶皱.

试件的典型破坏形态,如图 5 所示.由图 5 可知:设置外钢管可有效约束混凝土竖向裂缝的产生和发展,使得在破坏截面处,混凝土的裂缝范围更广;同时,相比于全截面受压的钢管混凝土形式,采用约束混凝土的形式可减小外钢管的局部屈曲现象,可更充分发挥钢管对核心混凝土的



(a) C-1



(b) C-2

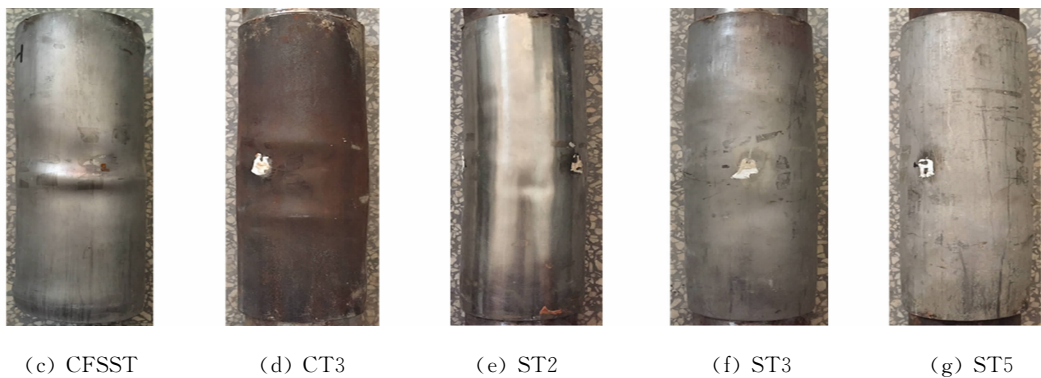


图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of specimens

约束作用;相较于碳素钢管,不锈钢管的约束作用更为显著.

2.2 荷载-轴向变形曲线

各试件的荷载-轴向变形关系曲线,如图 6 所示.图 6 中: Δ 为轴向变形,核心混凝土的轴向变形取 3 个位移计所测变形的平均值;图 6(a)中的插图为虚线方框的放大图.

由图 6 可知:所有钢-混凝土组合结构柱的荷载-轴向变形关系曲线发展过程相近,均呈现较好的延性性能.与素混凝土试件相比,钢-混凝土组合结构柱的承载力和变形能力均得到显著提高.

对比图 6(b),(e)可知:在弹性阶段,不锈钢管约束混凝土试件的刚度相对较小,随着荷载的增大,不锈钢管约束混凝土试件的承载能力和刚度逐渐接近不锈钢管混凝土试件;在弹塑性阶段,不锈钢管约束混凝土的钢管因不直接承担纵向荷载而未发生局部屈曲,因此,钢管可更有效地限制混凝土的变形和破坏.故不锈钢管约束下的混凝土承载力的提高幅度超过不锈钢管混凝土中钢管对纵向承载力的贡献,

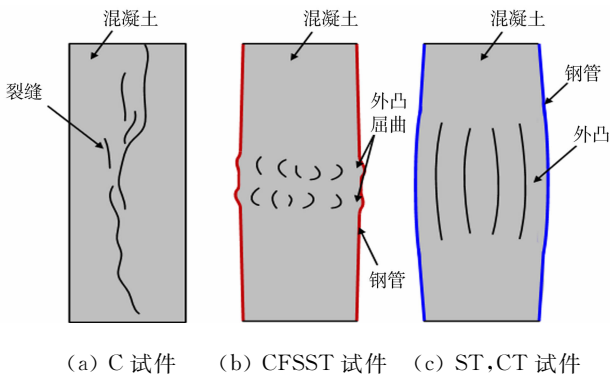
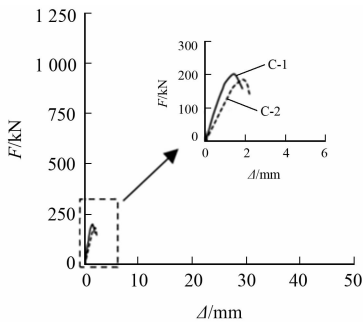
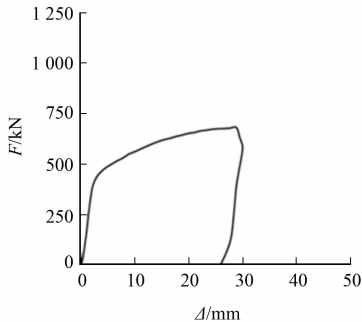


图 5 典型破坏形式

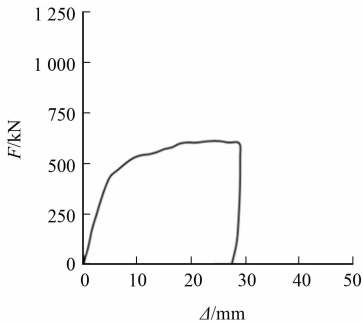
Fig. 5 Typical failure modes



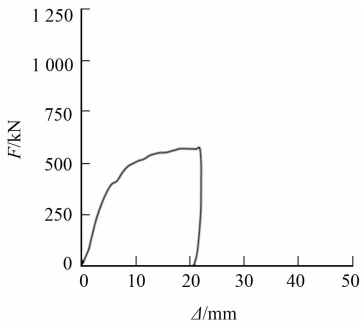
(a) C-1, C-2



(b) CFSST



(c) CT3



(d) ST2

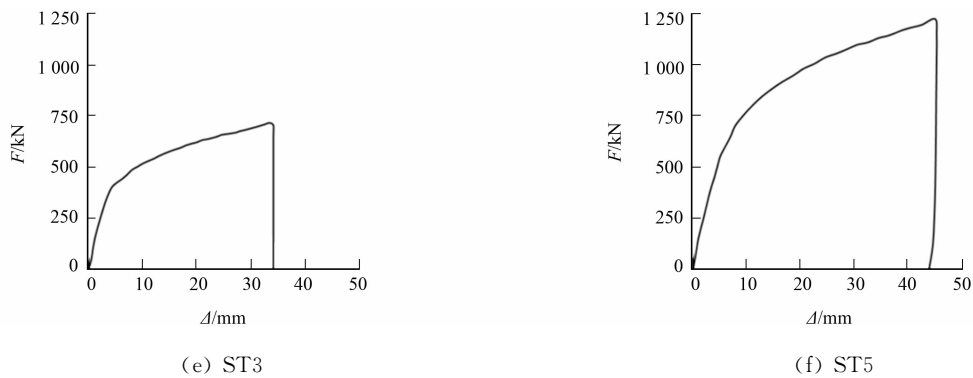


图 6 荷载-轴向变形全过程关系曲线

Fig. 6 Whole-range curves of load-axial deformation

从而使不锈钢管约束混凝土柱具有更高的后期承载力。

对比图 6(c),(e)可知:在弹性阶段,不锈钢管约束混凝土试件与碳素钢管约束混凝土试件的荷载-变形曲线发展过程基本一致;而在弹塑性阶段,不锈钢管约束混凝土试件承载能力明显高于碳素钢管约束混凝土试件;在加载后期($\Delta=25\text{ mm}$),ST3 试件的承载力提高了 10.7%。这是因为与碳素钢相比,不锈钢具有更高的后期塑性变形能力和应变强化性能,使得构件进入弹塑性阶段后,不锈钢管对核心混凝土约束效应逐渐增强,从而提高不锈钢管约束混凝土试件的承载能力。

对比图 6(d)~(f)可知:在弹性阶段,不同壁厚的钢管对不锈钢管约束混凝土的刚度和承载力的影响不明显,这是由于约束混凝土为被动约束类型,核心混凝土的侧向变形很小,钢管的约束作用尚未发挥;在弹塑性阶段,随着钢管壁厚 d 的增大,钢管对核心混凝土的约束作用增强,试件的承载能力和屈服后刚度明显增大;与 ST2 试件相比,在相同变形下($\Delta=20\text{ mm}$),ST3,ST5 试件的承载力分别提高了 25.3%,69.6%。

典型不锈钢管约束混凝土试件的荷载-纵向平均应变的关系曲线,如图 7 所示。图 7 中: F_{\max} 为荷载最大值; $\bar{\epsilon}$ 为纵向平均应变;试件的关系曲线分为弹性阶段和弹塑性阶段;点 A 为弹性阶段和弹塑性阶段的分界点;点 B 为弹塑性阶段的结束点。

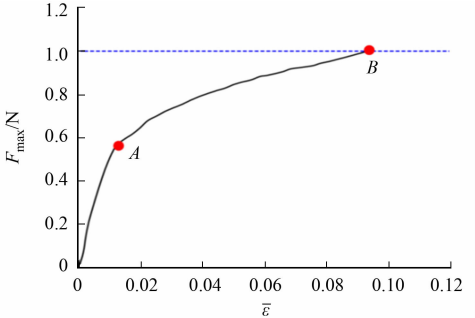


图 7 ST 试件荷载-纵向平均应变关系曲线

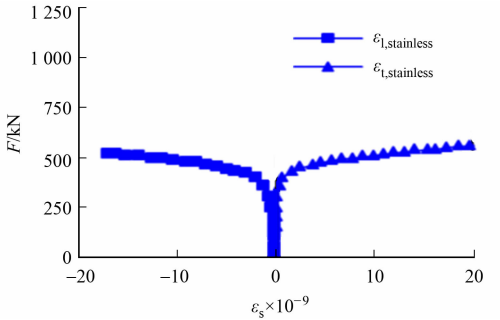
Fig. 7 Load-average axial strain curve for ST specimens

由图 7 可知:试件在弹性阶段的荷载-轴向变形曲线呈线性关系;在达到点 A 所对应的荷载后,试件进入弹塑性阶段直至结束(点 B)。在弹塑性阶段中,核心混凝土沿横向迅速膨胀,导致不锈钢管开始向外鼓曲,曲线斜率明显降低;同时,由于不锈钢材料的应变强化性能,试件的轴压承载力随着不锈钢管的约束效应的提高而提高。

2.3 荷载-钢管钢材应变曲线

试件的荷载-钢管钢材应变关系曲线,如图 8 所示。图 8 中: ϵ_s 为钢管钢材应变; $\epsilon_{l,\text{stainless}}, \epsilon_{t,\text{stainless}}$ 分别为不锈钢管的轴向和环向应变; $\epsilon_{l,\text{carbon}}, \epsilon_{t,\text{carbon}}$ 分别为碳素钢管的轴向和环向应变。

由图 8 可知:在轴压作用下,所有试件钢管的塑性均得到较为充分的发展。在相同荷载下,CFSST 试件钢管的纵向应变始终大于环向应变;在弹性阶段,ST,CT 系列试件钢管的轴向应变和环向应变相差不明显;相同钢管壁厚的 ST3,CT3 试件的 $F-\epsilon_s$ 曲线基本一致,但在钢管屈服后(试件进入弹塑性阶段),由于核心混凝土破坏,混凝土迅速横向膨胀,导致钢管的横向应变迅速增大,钢管对混凝土的约束作用开始充分发挥;与 CT3 试件相比,ST3 试件在弹性阶段的荷载增加幅度更大,这是因为不锈钢具有比碳素钢更高的应变强化性能,在弹塑性阶段后,相同壁厚的不锈



(a) CFSST

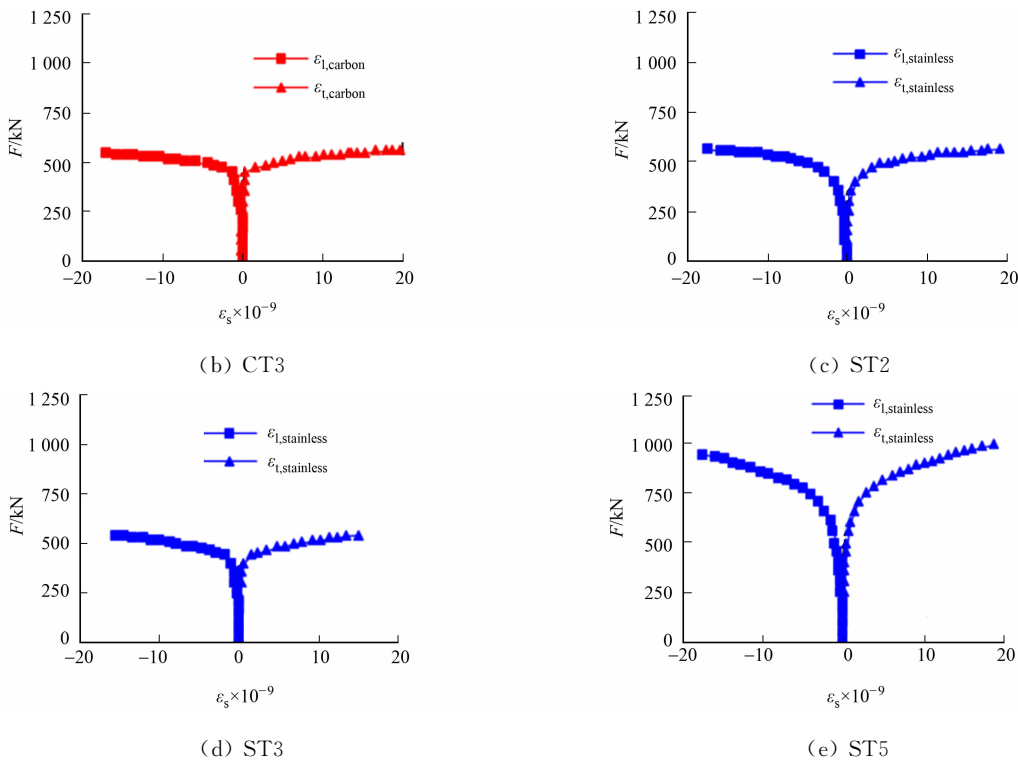


图 8 荷载-钢管应变关系曲线
Fig. 8 Load-steel strain curves

钢管对核心混凝土约束效应比碳素钢管更强.

2.4 试验参数对轴压承载力的影响

各试件的轴压承载力试验值,如表 1 所示.由表 1 可知:相同钢管壁厚的 ST 系列试件的轴压承载力低于 CFSST 试件;与 CFSST 试件相比,ST3 试件的轴压承载力降低了 17.6%;相同钢管壁厚的 ST3 试件与 CT3 试件的轴压承载力相近;与 C 试件相比,ST3,CT3 试件的轴压承载力分别提升了 95.9%,91.5%.

不同含钢率对 ST 短柱轴压承载力的影响,如图 9 所示.由图 9 可知:含钢率对不锈钢管约束混凝土试件的轴压承载力具有显著影响,试件的轴压承载力随着含钢率的增大而近似呈线性增长;与 C 试件相比,ST2,ST3,ST5 试件的轴压承载力分别提升了 56.3%,95.9%,115.5%.

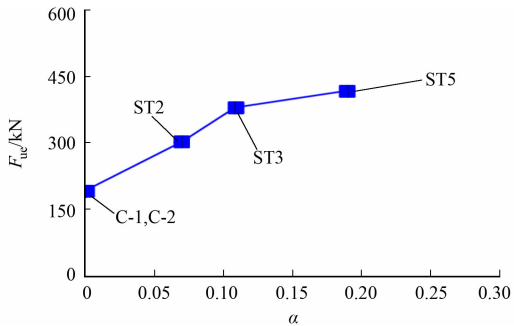


图 9 含钢率对 ST 短柱轴压承载力的影响
Fig. 9 Effects of steel ratio on axial strength of ST stub columns

3 结论

对不锈钢管约束混凝土短柱的轴压力学性能进行性能试验,在研究参数为加载边界条件和不锈钢管壁厚的范围内,得到以下 4 点主要结论.

- 1) 不锈钢管约束混凝土短柱在轴压荷载作用下的破坏形态为核心混凝土压溃,钢管中部较均匀外鼓,未出现明显的局部屈曲现象,呈现出较好的承载变形性能及对核心混凝土的约束作用.
- 2) 不锈钢管约束混凝土短柱的承载力相比素混凝土短柱有显著提升,且其轴压承载力随着含钢率的增大而近似呈线性增长.
- 3) 在钢管壁厚相同时,不锈钢管约束混凝土短柱的轴压承载力低于不锈钢管混凝土短柱;随着轴压变形的发展,不锈钢管约束混凝土短柱的承载能力和刚度逐渐接近和超过不锈钢管混凝土试件,显示出良好的后期承载能力.
- 4) 在弹塑性阶段时,相同钢管壁厚的不锈钢管约束混凝土短柱与碳素钢管约束混凝土短柱的刚度

和承载能力相近;但在后期强化阶段,不锈钢管约束混凝土短柱的刚度和承载力更高.

参考文献:

[1] 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.

[2] GARDNER L, CRUISE R B, SOK C P, *et al.* Life cycle costing of metallic structures[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, 2007, 160(4): 167-177.

[3] CRAIG B, ESTHER R, LEROY G. Testing, simulation and design of cold-formed stainless steel CHS columns[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 130: 297-312. DOI: 10. 1016/j. tws. 2018. 05. 006.

[4] 廖飞宇. 圆不锈钢管混凝土轴压力学性能的有限元分析[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2009, 38(6): 659-662.

[5] HAN Linhai, REN Qingxin, LI Wei. Tests on stub stainless steel concrete-carbon steel double-skin tubular (DST) columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(3): 437-452. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2010. 09. 010.

[6] TAO Zhong, UY B, LIAO Feiyu, *et al.* Nonlinear analysis of concrete-filled square stainless steel stub columns under axial compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(11): 1719-1732. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2011. 04. 012.

[7] UY B, TAO Zhong, HAN Linhai. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(3): 360-378. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2010. 10. 004.

[8] 陈誉, 李凤霞, 王江. 热成型不锈钢圆管混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(2): 106-112.

[9] 赵秋红, 张建周, 李忠献. 圆端形不锈钢管混凝土桥墩滞回性能有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(增刊 1): 435-443.

[10] LIAO Feiyu, HAN Linhai, TAO Zhong. Experimental behavior of concrete-filled stainless steel tubular columns under cyclic lateral loading[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(4): 04016219(1-15). DOI: 10. 1061/(ASCE)ST. 1943-541X. 0001705.

[11] YE Yong, HAN Linhai, SHEEHAN T, *et al.* Concrete-filled bimetallic tubes under axial compression: Experimental investigation[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 108: 321-332.

[12] YE Yong, HAN Linhai, GUO Zixiong. Concrete-filled bimetallic tubes (CFBT) under axial compression: Analytical behaviour[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 119: 839-850.

[13] YE Yong, ZHANG Shijiang, HAN Linhai, *et al.* Square concrete-filled stainless steel/carbon steel bimetallic tubular stub columns under axial compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 146: 49-62. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2018. 03. 015.

[14] 郭浩, 叶勇, 高毅超, 等. 双金属复合管混凝土轴拉性能有限元分析[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(1): 41-47. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201805019.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

(编辑: 李宝川 责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)