

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202008025



内配螺旋箍筋方钢管高强 混凝土柱的轴压试验

林佳鑫¹, 王浩祚¹, 邓杨鹏¹, 胡红松^{1,2}

(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: 为研究内配螺旋箍筋方钢管高强混凝土柱的轴压性能,对内填混凝土强度为 112 MPa 的 3 个内配螺旋箍筋方钢管混凝土(SCCFST)试件和 1 个方钢管混凝土(CFST)试件进行单调轴压加载,试验参数为螺旋箍筋的体积配箍率和屈服强度.结果表明:相较于 CFST 试件,SCCFST 试件的轴压承载力基本没有提高,但峰值后性能有明显改善;每一次螺旋筋的断裂会导致 SCCFST 试件承载力显著下降;SCCFST 柱承载力实测值与 CFST 柱承载力计算值的吻合程度较好.

关键词: 钢管混凝土;螺旋箍筋;高强混凝土;体积配箍率;轴压承载力

中图分类号: TU 398.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2021)03-0336-07

Axial Compressive Behavior of Square Spiral-Confined High-Strength Concrete-Filled Steel Tube Columns

LIN Jiaxin¹, WANG Haozuo¹, DENG Yangpeng¹, HU Hongsong^{1,2}

(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: In order to study the axial compressive behavior of high-strength concrete-filled square steel tube columns with internal spiral stirrups, three square spiral-confined concrete-filled steel tube (SCCFST) specimens and one square concrete-filled steel tube (CFST) specimen with internal concrete strength of 112 MPa were subjected to monotonic axial compression, the test parameters were volume stirrup ratio and yield strength of the spiral stirrups. The result shows: by comparison with CFST specimens, the axial bearing capacity of SCCFST specimens is not improved, but the post-peak performance is improved significantly. Each rupture of the spiral stirrups decreases significantly the bearing capacity of SCCFST specimens. The measured value of bearing capacity of SCCFST column agrees well with the calculation value of bearing capacity of CFST column.

Keywords: concrete-filled steel tube; spiral stirrup; high-strength concrete; volume stirrup ratio; axial bearing capacity

相较于圆钢管混凝土(CFST)柱,方钢管混凝土柱对内填混凝土的约束能力较弱,因此,方钢管混凝土柱的抗变形能力小于圆钢管混凝土柱.此外,当内填混凝土采用高强混凝土时,方钢管混凝土柱的

收稿日期: 2020-08-18
通信作者: 胡红松(1986-),男,教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构的研究. E-mail: huhs@hqu.edu.cn.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608210, 51878303);福建省自然科学基金资助项目(2019J06016);华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18633086001)

抗变形能力将进一步减弱,这对承受地震作用的结构构件极为不利. 为了提高方钢管混凝土柱及内填高强混凝土柱的抗变形能力,学者们已经提出了许多技术措施,例如,在钢管混凝土柱中内置螺旋箍筋,从而提高抗变形能力.

目前,已有众多学者对方钢管混凝土柱和螺旋箍筋约束钢筋混凝土柱的性能进行研究,一些研究采用了高强混凝土(内填混凝土的圆柱体抗压强度 $f'_c \geq 80$ MPa). 文献[1-7]对方钢管混凝土柱进行研究,文献[8-10]对螺旋箍筋约束钢筋混凝土柱进行研究,但关于内配螺旋箍筋方钢管混凝土(SCCFST)柱的研究却较为少见. Ding 等^[11]使用了 6 个螺旋箍筋体积配箍率不同的 SCCFST 柱试件,对不同加劲构造下方钢管混凝土柱的轴压性能进行研究. Teng 等^[12]对采用高强螺旋箍筋约束的 SCCFST 柱进行轴压试验,试件的参数为螺旋箍筋间距. 陈宗平等^[13]对 20 个 SCCFST 试件和 3 个 CFST 对比件进行轴心受压破坏试验,主要参数为螺旋箍筋间距、螺旋箍筋直径、螺旋圈与方钢管的径宽比、方钢管壁厚、混凝土强度等级和纵筋. 上述研究均表明,在 CFST 柱中配置螺旋箍筋可以在一定程度上改善 CFST 柱的轴压性能. 然而,在上述试验中,除了 Teng 等^[12]采用的内填混凝土抗压强度达到 80 MPa,其余试验的内填混凝土抗压强度均低于 50 MPa. 因此,需要开展更为系统的试验对内配螺旋箍筋方钢管高强混凝土柱的轴压性能进行研究.

基于此,本文对内填混凝土强度为 112 MPa 的 3 个内配螺旋箍筋方钢管混凝土试件和 1 个方钢管混凝土对比件进行单调轴压加载,对 SCCFST 试件的轴压承载力、峰值后性能和破坏模式进行研究.

1 试验方案

1.1 试件设计

试验共设计 4 个方钢管混凝土柱试件,包含 3 个内配螺旋箍筋方钢管混凝土柱(编号为 UC-N-2.0, UC-H-2.0, UC-H-2.9, H, N 分别表示内配螺旋箍筋母材为高强钢筋和普通钢筋,数字表示内配螺旋箍筋试件的体积)和 1 个方钢管混凝土柱(编号为 UC-O). 试件的外包方钢管都是由厚度为 5.6 mm 的钢板焊接而成,方钢管的截面宽度和高度分别为 200, 600 mm.

内配螺旋箍筋方钢管混凝土柱的构造,如图 1 所示. 图 1 中:试件上、下端板 100 mm 范围内为螺旋箍筋的加密区,加密区的箍筋间距为对应中部区的一半,以保证破坏不发生在试件的端部.

试件主要参数,如表 1 所示. 表 1 中: D 为箍筋约束区的直径; d_{sp} 为螺旋箍筋的直径; A_{sp} 为螺旋箍筋的横截面积; s 为箍筋间距; f_{yp} 为螺旋箍筋的屈服强度; ρ_s 为螺旋箍筋的体积配箍率(ρ_s 为 1.95%~2.94%),其定义为

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{D_s} \times 100\%.$$

(1)

表 1 试件的主要参数

Tab. 1 Main parameters of specimens

试件编号	D /mm	d_{sp} /mm	A_{sp} /mm ²	s /mm	f_{yp} /MPa	ρ_s /%
UC-O	—	—	—	—	—	0
UC-N-2.0	172	8.0	50.3	60	365	1.95
UC-H-2.0	171	8.0	50.3	60	1 511	1.96
UC-H-2.9	171	8.0	50.3	40	1 511	2.94

1.2 材性实测

钢材的应力-应变($\sigma\epsilon$)曲线,如图 2 所示. 图 2 中:钢板的厚度为 5.6 mm;普通钢筋和高强钢筋的直

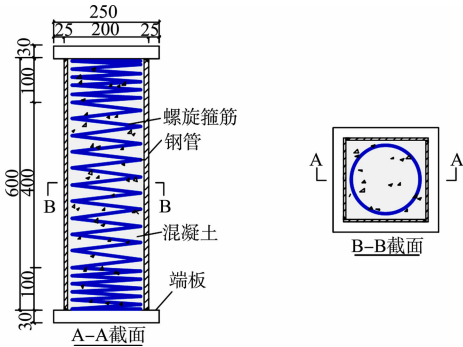


图 1 内配螺旋箍筋方钢管混凝土柱的构造(单位:mm)
Fig.1 Construction of square SCCFST columns (unit: mm)

径均为 8 mm. 由于高强钢筋的应力-应变曲线没有明显的屈服平台段, 故将塑性应变为 0.2% 时对应的应力值作为名义屈服极限.

钢板、普通钢筋和高强钢筋的材性性能, 如表 2 所示. 表 2 中: E_s 为弹性模量; f_y 为屈服强度; f_u 为极限强度; η 为断后伸长率.

采用内填混凝土的圆柱体抗压强度设计值为 110 MPa 的高强混凝土, 并制作 8 个同批次的圆柱体 (150 mm×300 mm (直径×高)) 试块, 所有试块在相同的环境下进行密封养护, 测得试验中内填混凝土圆柱体抗压强度为 112 MPa.

表 2 钢材的材性性能
Tab. 2 Material properties of steel

钢材种类	E_s /GPa	f_y /MPa	f_u /MPa	η /%
钢板	204	397	554	26.90
普通钢筋	205	365	545	21.20
高强钢筋	210	1 511	1 638	3.79

1.3 加载方案及量测

试验的加载装置和测点布置, 如图 3 所示. 采用 10 MN 电液伺服控制压力机对试件进行单调轴压加载. 为测量试件的轴向压缩量, 沿试件四周布置 4 个位移传感器 (LVDT); 钢管的 4 个侧面各粘贴 1 个应变片; 内配螺旋箍筋试件的螺旋箍筋上均布置 8 个应变片, 其中, 箍筋中部区布置 6 个应变片, 端部加密区布置 2 个应变片.

采用位移控制的加载制度, 位移加载速度参照每秒轴向应变增长 2.0×10^{-5} 的速率进行连续加载, 加载至轴向应变为 5% 或外包方钢管的竖向焊缝开裂时, 停止加载.

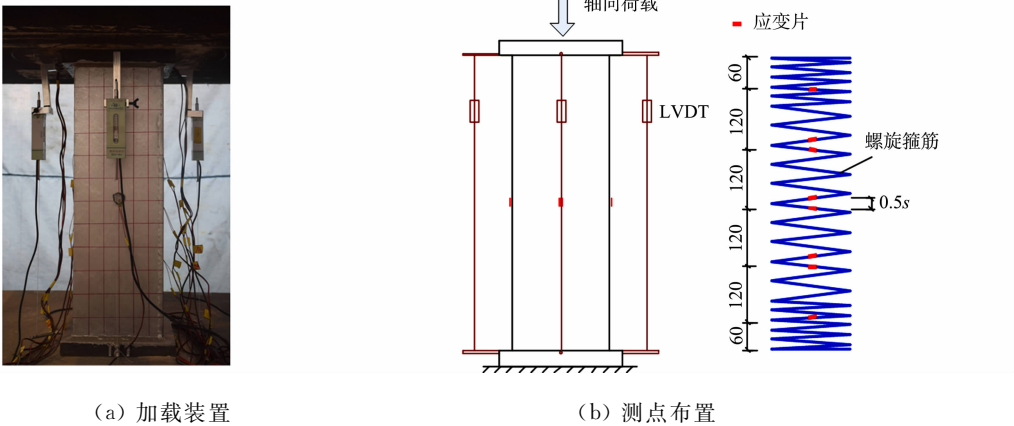


图 3 试验的加载装置和测点布置 (单位: mm)
Fig. 3 Loading device and measuring point arrangement of test (unit: mm)

2 实验结果与分析

2.1 轴力-轴向应变曲线

试件的轴力-轴向应变 ($N-\epsilon_1$) 曲线, 如图 4 所示. 由图 4 及相关计算可知: 4 条曲线的上升段基本相同且近似呈直线状, 无明显拐点; 当轴向应变超过 2% 后, 试件 UC-H-2.9 的残余强度低于螺旋配筋较少的试件 UC-H-2.0, UC-N-2.0, 这是由于试件 UC-H-2.9 发生螺旋断裂的次数更多, 导致试件整体强度下降地更加明显; 当试件 UC-O 加载至峰值承载力后, 内填混凝土的压溃导致试件轴压承载力迅速下降, 曲线进入下降段; 当试件的轴压承载力降至峰值承载力的 70% 时, 轴压承载力的下降速率开始减

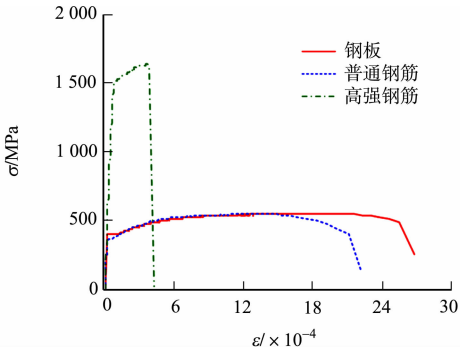


图 2 钢材的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of steel

缓; 试件 UC-O 在方钢管竖向焊缝开裂前, 其残余强度约为峰值承载力的 50%, 钢管竖向焊缝开裂时对应的轴向应变为 1.85%。

综上可知, SCCFST 试件的峰值承载力和 CFST 对比件基本相近, 但 SCCFST 试件展现出明显优于 CFST 对比件的峰值后变形能力; 随着螺旋箍筋的体积配箍率和屈服强度的提高, 试件在螺旋箍筋第 1 次断裂的峰值后轴压性能越好。

2.2 试件破坏过程

以试件 UC-N-2.0 为例, 其螺旋箍筋的应变发展曲线, 如图 5 所示。图 5 中: ϵ_2 为横向应变; 1st, 2nd 为螺旋箍筋中应变发展最早的两个应变片。由于试件中内填混凝土压溃区的位置不同, 对应箍筋应变发展较快的区域也可能不同。由图 5 及相关计算可知: 在试件加载至峰值承载力时, 螺旋箍筋的应变发展较为缓慢, 实测箍筋最大应变均低于 7.0×10^{-4} 。对 SCCFST 试件而言, 螺旋箍筋的应变发展存在一个拐点(大致为试件加载至峰值承载力开始下降时对应的试件轴向应变), 当箍筋应变发展至此拐点后, 应变增长率大幅提高, 并在较小的试件轴向应变区间内超过 0.015。

SCCFST 试件的螺旋箍筋在试验加载结束前均发生数次断裂(以试验中钢筋拉断发出的响声作为判断依据)。高强螺旋箍筋第 1 次断裂时对应的轴向应变分别为 1.42%, 1.56%; 相较于高强钢筋, 普通钢筋的断后伸长率达到 21.20%, 然而, 普通螺旋箍筋第 1 次断裂时对应的试件轴向应变为 2.45%。这表明在普通螺旋箍筋断裂时, 内填混凝土已发生严重的膨胀现象。内配高强螺旋箍筋试件每次箍筋断裂均导致轴向承载力的明显下降, 且下降程度随螺旋箍筋体积配箍率的提高而增大。内配普通螺旋箍筋试件因箍筋断裂导致轴向承载力下降的现象并不明显。当试件 UC-N-2.0 加载至轴向应变为 5% 时, 钢管竖向焊缝尚未开裂; 试件 UC-H-2.9 的钢管竖向焊缝开裂时对应的试件轴向应变均超过 4%; 试件 UC-O 钢管竖向焊缝开裂时对应的试件轴向应变为 1.85%。这是因为螺旋箍筋可有效地约束核心混凝土的膨胀, 延缓钢管竖向焊缝过早达到极限拉应变。

在轴力作用下, 混凝土会发生侧向膨胀, 使螺旋箍筋处于持续拉伸的状态。螺旋箍筋与核心混凝土间的作用, 如图 6 所示。图 6 中: f 为混凝土强度; d_{cor} 为箍筋直径; f_{yt} 为钢管的极限强度; A_{st} 为钢管的横截面积。螺旋箍筋的拉伸会对混凝土产生横向约束力, 限制混凝土的侧向膨胀, 进而减小混凝土与钢管之间的作用力, 减小钢管的侧向膨胀, 因此, 可延缓钢管的焊缝开裂。

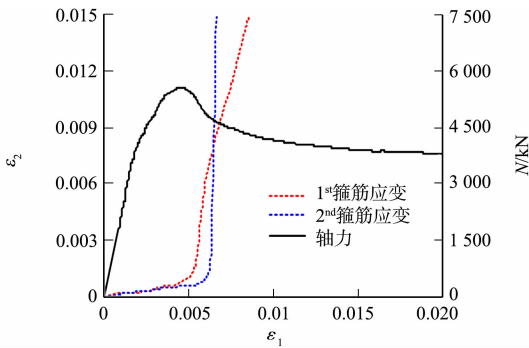


图 5 螺旋箍筋的应变发展曲线
Fig. 5 Strain development curves of spiral stirrup

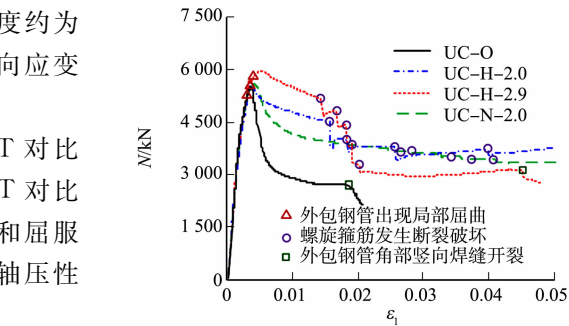


图 4 试件的轴力-轴向应变曲线
Fig. 4 Axial load-axial strain curves of specimens

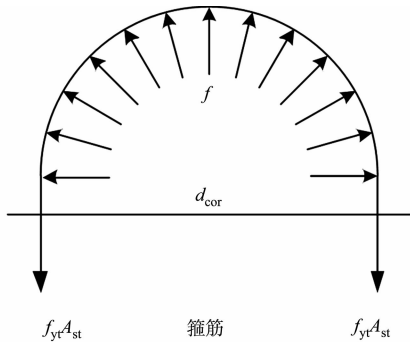


图 6 螺旋箍筋与核心混凝土间的作用
Fig. 6 Interaction between spiral stirrup and core concrete

2.3 试件的最终破坏形态及特征点

由于试件 UC-H-2.9 的破坏形态没有特别现象, 故仅展示试件 UC-O, UC-N-2.0, UC-H-2.0 的最终破坏形态, 如图 7 所示。由图 7 可知: 3 个试件均出现混凝土压溃现象; SCCFST 试件的螺旋箍筋约束区外部混凝土的破坏程度明显大于箍筋约束区内的混凝土, 进一步证明螺旋箍筋能有效地约束核心混

凝土;在混凝土严重压溃的区域,螺旋箍筋存在断裂处,验证此前加载过程中对箍筋断裂的判断;内填混凝土严重压溃处对应钢管局部屈曲最严重的部位。

参照文献[14]的 CFST 柱轴压承载力计算公式,以此预测 SCCFST 柱和 CFST 柱的轴压承载力计算值 N_0 ,有

$$N_0=f'_cA_c+f_{yt}A_{st}.$$

(2)

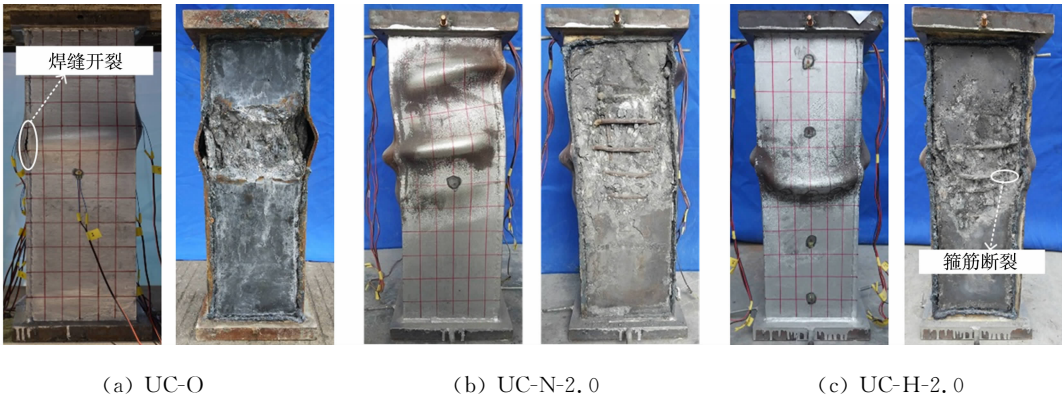


图 7 试件的最终破坏形态
Fig. 7 Final failure modes of specimens

试件的主要试验结果,如表 3 所示.表 3 中: N_m 为轴压承载力实测值; N_m/N_0 为轴压承载力实测值与计算值的比值; ϵ_m 为轴向峰值载荷对应的轴向应变; ϵ_b 为局部屈曲开始时的轴向应变; ϵ_r 为螺旋箍筋第 1 次破裂对应的轴向应变; ϵ_f 为垂直焊缝断裂对应的轴向应变。

综上可知,内配螺旋箍筋对 CFST 柱的轴压承载力提高有限; N_m 与 N_0 的比值为 0.96~1.04,这在研究的参数变化范围内^[1-7];式(2)可较好地预测 SCCFT 柱的轴压承载力。

表 3 试件的主要试验结果
Tab. 3 Main test results of specimens

试件	N_m/kN	N_0/kN	N_m/N_0	$\epsilon_m/\%$	$\epsilon_b/\%$	$\epsilon_r/\%$	$\epsilon_f/\%$
UC-O	5 512	5 721	0.96	0.35	0.34	—	1.85
UC-N-2.0	5 581	5 721	0.98	0.40	0.38	2.45	—
UC-H-2.0	5 538	5 721	0.97	0.35	0.31	1.56	—
UC-H-2.9	5 968	5 721	1.04	0.52	0.39	1.42	4.50

3 延性分析

3.1 延性指标

延性比是衡量延性的一个常用指标,其定义为强度下降到峰值承载力的 85%时对应的位移与屈服位移的比值.然而,对于承载力过峰值点后迅速下降,但在下降段后期仍保持较高承载力的试件(类似情况常发生于约束混凝土柱中),延性比的评价方法并不适用.为了克服延性比的不足,Foster 等^[15]提出了基于能量概念的延性指标。

基于能量法的延性分析,如图 8 所示.图 8 中: σ_c 为混凝土应力; ϵ_y 为屈服应变;点 A,B,C 对应的横坐标分别为 $\epsilon_y, 3.0\epsilon_y, 5.5\epsilon_y$ 。

延性指标 I_5 为曲线 OB,OA 与横坐标轴之间的面积之比.Foster 等^[15]建议屈服应变 ϵ_y 取上升段中 $0.75s_{cm}$ 对应应变的 4/3 倍,其中, s_{cm} 为内填混凝土的峰值应力;同理,延性指标 I_{10} 为曲线 OC,OA 与横坐标轴间的面积之比.根据试验现象,当应变达到

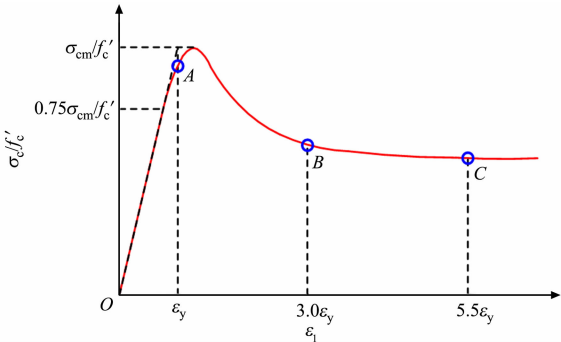


图 8 基于能量法的延性分析
Fig. 8 Ductility analysis based on energy method

5. $5\epsilon_y$ 时,大部分试件中的箍筋已经发生多次断裂,构件的轴压承载力出现明显的下降.为了减小箍筋断裂对构件延性造成的影响,采用 I_5 进行钢管混凝土的延性分析.

常规的轴压试验无法直接得出内填混凝土和钢管各自承担的轴力,故 I_5 的计算是基于试件轴力-应变曲线,而不是内填混凝土应力-应变曲线.

3.2 延性指标-配箍特征值曲线

为了确定延性指标 I_5 和配箍特征值 λ_s 的关系,根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[16],给出配箍特征值 λ_s 的计算公式为

$$\lambda_s = \frac{\rho_s f_{yp}}{f_c} \tag{3}$$

基于式(3),拟合延性指标 I_5 与配箍特征值 λ_s 的关系,如图 9 所示.由于有理方程能比线性方程更加合理地表现出 I_5 与 λ_s 的关系,因此,采用有理方程进行回归分析,可得

$$I_5 = \frac{4.77\lambda_s + 0.10}{\lambda_s + 0.02} \tag{4}$$

通过 MATLAB 软件计算得到回归方程判定系数 $R^2=0.930\ 1$.一般认为, R^2 大于 0.75,表示模型拟合度很好.因此,式(4)与试验数据吻合较好.

4 结论

文中研究了内配螺旋箍筋方钢管高强混凝土柱的轴压性能,对内填混凝土强度为 112 MPa 的 3 个 SCCFST 试件和 1 个 CFST 对比件进行单调轴压加载,主要参数为螺旋箍筋的体积配箍率和屈服强度.研究得出以下 5 个主要结论.

- 1) 对于无螺旋箍筋约束的 CFST 柱,内填高强混凝土在峰值后阶段表现出较严重的脆性. SC-CFST 试件的轴向承载力与 CFST 试件相近.然而,与 CFST 试件相比,SCCFST 试件的峰值后性能有显著的提高.随着螺旋箍筋的体积配箍率和屈服强度的增加,试件峰值后性能的提高幅度也会增加.
- 2) 螺旋箍筋的应变在试件加载初期发展较为缓慢,当试件加载至峰值点时,螺旋箍筋应变开始快速发展.在试件加载过程中,SCCFST 试件中的螺旋箍筋均发生断裂现象.对于内配高强螺旋箍筋的试件,每一次螺旋筋的断裂均会导致试件承载力的显著下降,而且试件承载力下降的程度随内配螺旋箍筋的体积配箍率的增大而愈发明显.对于内配普通螺旋箍筋的试件,螺旋筋断裂引起的承载力下降程度较为轻微.
- 3) 螺旋箍筋有效限制了核心混凝土的侧向膨胀,延缓钢管竖向焊缝过早达到其极限拉应变.因此,SCCFST 试件中钢管竖向焊缝的性能优于 CFST 试件.
- 4) 在研究参数的变化范围内,文献[14]给出的普通 CFST 柱的轴压承载力计算公式可较好地预测 SCCFT 柱的轴压承载力.
- 5) 公式(4)可通过配箍特征值较好地反映 CFST 和 SCCFT 试件延性的变化.

参考文献：

[1] VARMA A H, RICLES J M, SAUSE R, *et al.* Experimental behavior of high strength square concrete-filled steel tube beam-columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(3): 309-318. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:3(309).

[2] SAKINO K, NAKAHARA H, MORINO S, *et al.* Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 180-188. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(180).

[3] LIU Dalin, GHU W M. Axial load behaviour of high-strength rectangular concrete-filled steel tubular stub columns [J]. Thin-Walled Structures, 2005, 43(8): 1131-1142. DOI:10.1016/j.tws.2005.03.007.

- [4] YU Qing,TAO Zhong,WU Yingxing. Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular columns[J]. Thin-Walled Structures,2008,46(4):362-370. DOI:10. 1016/j. tws. 2007. 10. 001.
- [5] TAO Zhong,UY B,HAN Linhai,*et al.* Analysis and design of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns under axial compression[J]. Thin-Walled Structures,2009,47(3):1544-1556. DOI:10. 1016/j. tws. 2009. 05. 006.
- [6] XIONG Mingxiang,XIONG Dexin,LIEW J Y R. Axial performance of short concrete filled steel tubes with high-and ultra-high-strength materials[J]. Engineering Structures,2017,136(6):494-510. DOI:10. 1016/j. engstruct. 2017. 06. 016.
- [7] KHAN M,UY B,TAO Zhong,*et al.* Behaviour and design of short high-strength steel welded box and concrete-filled tube (CFT) sections[J]. Engineering Structures,2017,147(3):458-472. DOI:10. 1016/j. engstruct. 2017. 01. 037.
- [8] RAZVI S R,SAATCIOGLU M. Circular high-strength concrete columns under concentric compression[J]. ACI Structural Journal,1999,96(5):817-826.
- [9] LI Bing,PARK R,TANAKA H. Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high-and normal-strength transverse reinforcements[J]. ACI Structural Journal,2001,98(3):395-406.
- [10] KIM S W,KIM Y S,LEE J Y,*et al.* Confined concrete with varying yield strengths of spirals[J]. Magazine of Concrete Research,2017,69(5):217-229. DOI:10. 1680/jmacr. 16. 00053.
- [11] DING Faxing,ZHU Jiang,CHENG Shanshan,*et al.* Comparative study of square stirrup-confined concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading[J]. Thin-Walled Structures,2016,98(2):443-453. DOI:10. 1016/j. tws. 2015. 10. 018.
- [12] TENG Jingguang,ZHANG Jing,WANG Jingjing,*et al.* Concrete-filled steel tubular columns with internal confinement by high strength steel spirals[C]//8th International Conference on Steel and Aluminium Structures. Hong Kong:[s. n.],2016:501-509.
- [13] 陈宗平,经承贵,宁璠. 螺旋筋增强方钢管混凝土柱的轴压性能及参数分析[J]. 土木工程学报,2018,51(1):13-22, 57.
- [14] European Committee of Standardization. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1994-1-1: 2004[S]. Brussels:European Committee of Standardization, 2004.
- [15] FOSTER S J,ATTARD M M. Experimental tests on eccentrically loaded high strength concrete columns[J]. ACI Structural Journal,1997,94(3):295-303.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)