

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201812011



高强冷弯矩形钢管混凝土 短柱轴压承载力试验

饶玉龙¹, 张继承¹, 李勇¹, 黄泳水¹, 李迪²

(1. 长江大学 城市建设学院结构工程与防灾研究所, 湖北 荆州 434023;

2. 武汉市汉阳市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430050)

摘要: 为研究高强冷弯矩形钢管混凝土(CFHCST)短柱在轴向荷载作用下的承载力,以钢管壁厚、钢材强度和截面尺寸 3 个不同参数进行实验.实验记录相关破坏现象,并分析试件荷载-位移和荷载-应变曲线在不同参数下的变化.结果表明:CFHCST 短柱在承受轴向荷载时,实验过程主要描述弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段,其与普通钢管混凝土短柱的工作机理大致相同;宽厚比的取值越小,构件的延性越低,但核心混凝土受到外部钢管的约束作用增大,且构件的极限承载能力也得到提高;长宽比越小,构件延性越低,但构件承载力增强;随着钢材强度的提高,构件极限承载力提升较为明显,但构件延性却降低.

关键词: 高强冷弯钢管混凝土短柱;轴心受压;参数分析;极限承载力

中图分类号: TU 398; U 441

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)03-0338-06

Experiment on Mechanical Behavior of Concrete-Filled High-Strength Cold-Formed Steel Tube Short Column Under Axial Load

RAO Yulong¹, ZHANG Jicheng¹, LI Yong¹,
HUANG Yongshui¹, LI Di²

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction,
School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

2. Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Company Limited, Wuhan 430050, China)

Abstract: The mechanical properties of Concrete-filled high-strength cold-formed steel tube (CFHCST) short column was studied under axial load for 3 parameters, including the wall thickness of the tube, the strength of the steel and the dimensions of the section. The damage in the experiment, the variation of load-displacement curve and load-strain curve under different parameters were analyzed. The results show that the experimental process of CFHCST short column under axial load is divided into three stages, namely the mainly elastic, elastic-plastic and broken stages, which is similar to the common steel tube short column. As the ratio of width to thickness decreases, the ductility of the specimen decreases, but the confinement of the steel tube to the core concrete increases, and the ultimate bearing capacity also increases. As the aspect ratio decreases, the ductility

收稿日期: 2018-11-08

通信作者: 张继承(1976-),男,副教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构理论与设计的研究. E-mail: 100995@yangtzeu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778065);湖北省教育厅科学技术研究项目(D20151304)

of the specimen decrease, and the bearing capacity increases. As the strength of steel increases, the ultimate bearing capacity increases obviously, but ductility decreases.

Keywords: concrete-filled high-strength cold-formed steel tube short column; axial compression; parameter analysis; ultimate bearing capacity

钢管混凝土组合结构的外包钢管的成型方式主要包括热轧钢材焊接和钢板冷弯. 关于钢管混凝土组合结构的设计已经具有较为成熟的技术规范^[1-6], 这些规程中的钢管主要针对热轧钢材经焊接后成型的钢管. 目前, 对于钢混结构力学性能的研究主要集中于热轧钢材经过拼焊形成, 而对于冷弯钢管方面的研究相对欠缺. 冷成型钢管相较于热轧钢材经焊接后, 不仅成型的钢管残余应力和残余变形较小, 而且冷成型组合结构可以节省施工工期. 因此, 未来冷成型钢混结构的应用将越来越广泛. 目前, 对于冷成型钢混组合结构的研究大多集中于薄壁钢管混凝土柱. 陶忠等^[7]通过抗压试验表明, 冷成型钢管混凝土结构具有良好的力学性能. Uy^[8]提出试件局部屈曲受钢管截面宽厚比的影响较大. Shanmugam 等^[9]提出一种新的轴力-弯矩相关曲线. 王秋萍^[10]在轴向荷载作用下, 推导出适用于薄壁钢混构件的承载力计算方法. 梁扬滨等^[11]研究新型钢板笼混凝土轴压承载力实验, 分析钢板笼对混凝土的套箍作用. Chang 等^[12]在碳钢管的相关参数(管厚、管径和屈服强度等)对该复合管柱影响的基础上, 推导一种新的适用于不锈钢钢管柱的混凝土核心应力-应变模型. Young 等^[13]观察构件破坏模式, 给出混凝土填充冷弯高强不锈钢管柱的柱强度和荷载-轴向应变的关系, 并提出相关设计规范的参考意见. Elchalakani 等^[14]确定圆形冷弯型钢管混凝土柱抗震性能的变形延性需求. Gupta 等^[15]研究承载力的影响因素, 并提出圆形钢管混凝土柱受弯承载力的失效模式. Zhu 等^[16]通过对冷弯效应的研究, 对现行冷弯中厚壁钢管混凝土承载力计算公式提出修正建议. 张达^[17]参照现有的计算规范提出轴压、偏压的实用性公式. 杜文超等^[18]在轴向荷载作用下, 推导出适用于椭圆钢混短柱的极限承载力计算方法. 黄泳水等^[19]对高强矩形截面钢管混凝土柱在偏压荷载下进行实验研究. 根据 GB 200018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》的要求^[20], 目前, 使用较多的钢材为普通 Q235 或 Q345 钢材, 而关于高强冷弯矩形钢混组合柱的研究较少, 且关于该钢混组合结构承载力计算公式的研究报道也比较有限. 本文以钢管宽厚比、截面长宽比和钢材强度 3 个参数设计 9 根高强冷弯钢混短柱, 并进行轴压试验, 从而研究高强冷弯矩形钢管混凝土(CFHCST)短柱在轴向荷载作用下的承载力.

1 试验部分

1.1 试件设计

实验中涉及到的柱横截面形式, 如图 1 所示. 图 1 中: l 为钢管截面长度(钢管最左侧边缘到最右侧边缘距离); b 为钢管截面宽度(钢管最上侧边缘到最下侧边缘距离); d 为钢管壁设计厚度. 钢管中填充的混凝土为 C40 型混凝土, 外包钢管采用高强冷成型钢管.

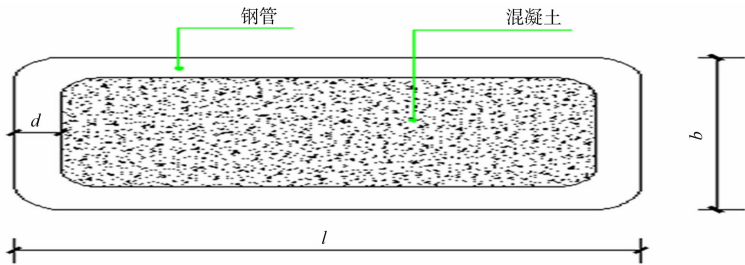


图 1 截面示意图
Fig. 1 Cross section

采用正交方法共设计 9 个高强冷弯钢管混凝土柱试件, 实验控制参数包括长宽比、宽厚比和钢材强度等级, 具体相关参数, 如表 1 所示. 表 1 中: P_u 为极限承载力; 所有短柱高均为 600 mm.

实验采用的混凝土配合比为水泥: 水: 砂: 石子 = 1.00 : 0.42 : 1.42 : 3.15, 减水剂掺加量为 1%, 混凝土立方体抗压强度平均值为 $38.5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. 钢材的性能参数, 如表 2 所示. 表 2 中: d_o 为钢管

壁实际厚度; $\bar{\sigma}_s$ 为屈服强度均值; $\bar{\sigma}_b$ 为抗拉极限强度均值;实验混凝土设计强度等级为 C40.

表 1 构件的基本参数

表 2 钢材的性能参数

Tab. 1 Basic parameters of specimen

Tab. 2 Parameters of steel performance

试件 编号	钢材 强度	$l \times b \times d /$ mm \times mm \times mm	l/b	b/d	P_u / kN	试件 编号	$l \times b /$ mm \times mm	d_0 / mm	$\bar{\sigma}_s / \text{MPa}$	$\bar{\sigma}_b / \text{MPa}$
1	Q345	200 \times 200 \times 6	1.00	33.33	3671.8	1	200 \times 200	5.8	362.56	452.70
2	Q390	200 \times 200 \times 6	1.00	33.33	4052.2	2	200 \times 200	6.1	406.30	520.30
3	Q420	200 \times 200 \times 6	1.00	33.33	4144.7	3	200 \times 200	5.8	440.50	571.30
4	Q420	150 \times 200 \times 4	1.33	50.00	2475.2	4	150 \times 200	3.4	426.30	530.33
5	Q420	150 \times 200 \times 5	1.33	40.00	3092.2	5	150 \times 200	5.1	427.00	589.00
6	Q420	150 \times 200 \times 6	1.33	33.33	3183.5	6	150 \times 200	5.6	410.00	533.00
7	Q420	100 \times 200 \times 5	2.00	40.00	2292.2	7	100 \times 200	4.9	415.00	528.00
8	Q420	150 \times 200 \times 5	1.33	40.00	3126.7	8	150 \times 200	5.2	427.00	589.00
9	Q420	200 \times 200 \times 5	1.00	40.00	3553.4	9	200 \times 200	4.8	407.50	571.30

1.2 加载装置及测点布置

在构件制作中,确保构件两端平整.试验过程中将一个球铰置于试件顶端,同时,需要确保加载中心与试件截面中心保持一致,以便轴向荷载加载均匀.试验正式加载前,应先采取预加载-卸载的方式调试加载装置和数据采集系统.沿横向和纵向相互垂直的应变片分别布置在试件的 4 个侧面的中央截面高度处,同时,4 个竖向位移计分别布置在构件的 4 个侧面.试验加载装置,如图 2 所示.

1.3 实验加载制度

预施加轴力参考蔡绍怀^[21]提出的钢管混凝土柱极限承载力的计算公式(表 1).整个试验通过分级加载的方式进行加载,并将整个加载过程分为 4 个阶段: P_1 (试件与压力机接触之前),位移为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; P_2 (弹性阶段),该阶段的力为 $(1/10) \cdot P_u$; P_3 (弹塑性阶段),该阶段的力为 $(1/20) \cdot P_u$; P_4 (屈服或破坏阶段,其中,当试件位移突然增大时,表示试件已经屈服),该阶段的力为 $(1/20) \cdot P_u$.

每级荷载等待 2 min 稳定后采集,采集后,继续施加下一级荷载, P_4 时,应连续采集.当荷载下降为原构件承载力的 85%,或者构件纵向变形的高度超过未加载构件高度的 5%时,终止加载,停止试验.

2 试验现象

试件试验结果,如图 3 所示.由图 3 可知:冷成型钢混柱受力特征和普通钢混柱受力特征十分相似.试件采用压力机从 0 开始加载,刚开始加载时,无明显变化;当加载到一定值时,钢管外表面一侧中上部会出现微鼓,随着轴向载荷继续增加,钢管外壁更加突出,垂直位移继续增大,其原因为混凝土浇筑时与上部顶板有空隙,造成上部较薄弱,易压坏鼓曲;当荷载进一步增大时,钢管壁 4 面的中部、上部均出现不同程度的鼓曲现象;将荷载继续增大到一定值时,钢管变形迅速被破坏,承载力迅速下降,位移迅速增加,其原因为钢管混凝土发挥明显的中部套箍作用,使其出现理想的腰部鼓曲,钢管内混凝土压碎荷载

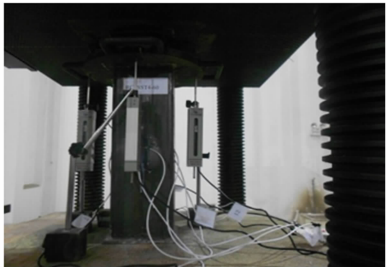


图 2 加载装置
Fig. 2 Loading setup



(a) 编号 1 (b) 编号 2 (c) 编号 3 (d) 编号 4 (e) 编号 5



(f) 编号 6 (g) 编号 7 (h) 编号 8 (i) 编号 9

图 3 试件的破坏形态

Fig. 3 Damage modes of specimens

全部由钢管承担,钢管延性发挥后,承载力迅速下降.

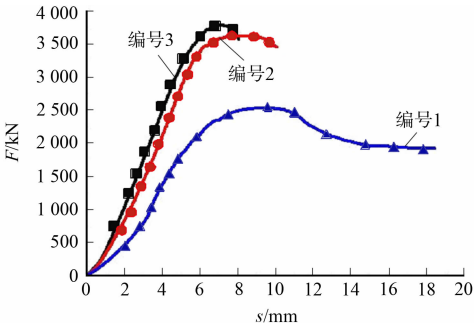
由图 3 还可知:编号 4,5,6 试件在实验过程中,可听到明显的混凝土被压碎的声音;编号 1 试件钢管有明显变形,且出现对接焊缝破坏,其原因为焊缝加工没有达到实验要求,应该终止试验,从裂缝空隙中可以明显看到内部混凝土已被压碎.

3 试验结果及分析

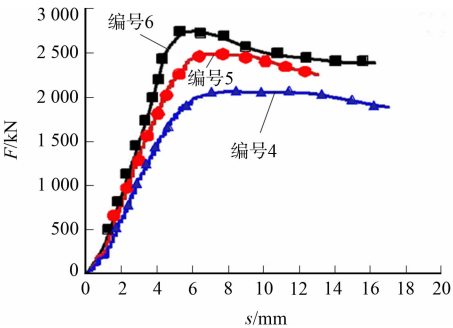
3.1 荷载-位移关系

材料的延性是体现材料性质的重要指标,表示结构的某个截面从屈服开始到承载能力没有明显下降或基本不降低期间的变形能力. 各试件的荷载(F)-位移(s)曲线,如图 4 所示.

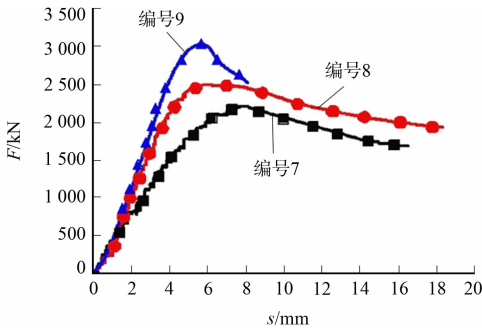
由图 4 可知:各试件荷载-位移曲线走势基本一致. 在整个荷载施加过程中,试件分为弹性、屈曲、破坏 3 个阶段,由于施加轴向荷载钢管混凝土柱中,钢材的屈服为渐进过程,荷载-位移曲线中没有明显的屈服点;在加载到破坏阶段时,承载力没有垂直下降,说明构件延性较好,从钢材破坏的空隙中可以看到钢管内部混凝土已被压碎,这是由于钢管的套箍作用,构件依旧具有部分承载力;钢管混凝土的增强机理为轴向受压时,外围钢管对核心混凝土产生套箍作用,使管内混凝土处于 3 向受压状态,试件在轴压荷载作用下,钢管的套箍效应显著,一定程度上提高试件的整体承



(a) 不同钢材强度



(b) 不同宽厚比



(c) 不同长宽比

图 4 轴向压力作用下试件的荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve of specimen under axial compression

载能力.

由图 4(a)可知:在截面尺寸和宽厚比不变时,钢材强度的增强对极限承载力有促进作用,但对延性有不利影响,其原因为钢材强度越高,材料脆性越明显.

由图 4(b)可知:在截面尺寸和钢材强度不变时,宽厚比的减小对极限承载力和延性均有促进作用.

由图 4(c)可知:在宽厚比和钢材强度不变时,通过减小截面尺寸长宽比,可以提高试件的极限承载力和延性.

3.2 横向(纵向)平均应变-荷载关系

在轴向荷载作用下,各构件 4 个面的横向和纵向的算术平均值代表水平和垂直的平均应变.各种负载下,各构件的载荷(F)-横向平均应变(ϵ_h)-纵向平均应变(ϵ_z)曲线,如图 5 所示.

由图 5 可知:荷载施加到极限荷载之前,整条曲线基本是光滑的;在弹性阶段,应变与轴压力基本呈现线性关系,整条曲线斜率随着荷载的增大而逐渐减小.

由图 5(a)可知:该曲线具有一定的规律趋势,主要反映钢材强度与承载力的关系,强度越高,其极限承载力越大.在弹性阶段,刚开始施加荷载时,钢管与混凝土相互作用较小,两者曲线斜率基本一致,当应变达到一定值时,钢材强度随着应变的增大而增强,其承载力也越大,钢材 Q420 试件比 Q390, Q345 试件极限承载力更高;在破坏阶段,曲线快速下降,但 Q345 试件斜率最高,其次,依次为 Q390, Q420 试件, Q345 试

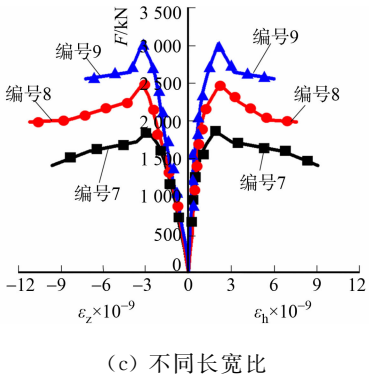
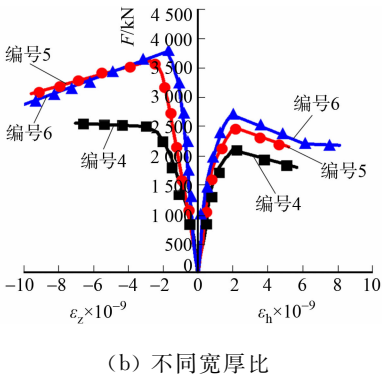
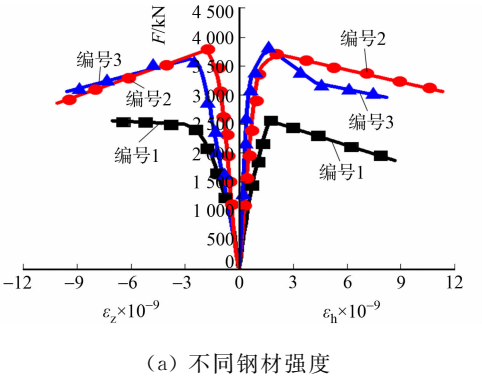


图 5 在轴向压力作用下荷载-横向/纵向平均应变曲线

Fig. 5 Load-transverse/longitudinal average strain curve under axial compression

件延性最好, Q420 试件延性最差.

由图 5(b)可知:当钢材强度和试件长宽比保持不变时,随着宽厚比的减小,钢管对核心混凝土围压作用越明显,使得极限承载力更高.在荷载施加的弹性阶段,3 条曲线相似,但随着轴向荷载施加的增大,曲线曲率开始发生变化,即随着宽厚比斜率越小,试件极限承载力越高;在破坏阶段,曲线快速下降,但斜率最高的壁厚为 4 mm 试件,其次,依次为 5, 6 mm 试件,延性最好的壁厚为 4 mm 试件,壁厚为 6 mm 的试件延性最差.

由图 5(c)可知:当钢材强度和试件宽厚比保持不变,施加轴向荷载,三条曲线曲率基本一致,说明在弹性阶段,试件长宽比对试件承载力影响不大,但随着轴向荷载施加的增大,曲线曲率开始发生变化,即随着长宽比斜率越小,试件极限承载力越高;在破坏阶段,曲线快速下降,但长宽比最小试件斜率最高,长宽比最大试件斜率最低,长宽比最大试件延性最好,长宽比最小试件延性最差.

4 结论

通过对高强冷弯钢管混凝土短柱进行轴压试验,得出以下 4 点结论.

- 1) 在轴向荷载作用下,高强冷弯钢管混凝土柱工作机理可以分为弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段,与普通钢管混凝土柱工作机理基本一致.
- 2) 试件长宽比越小,承载力则越高,延性越低.长宽比大于 1 的试件,沿短边的横向约束强于沿长边的横向约束.
- 3) 试件宽厚比越小,钢管对其核心混凝土约束作用越大,其极限承载力越高,延性越低.
- 4) 试件钢材强度越高,极限承载力则越高,延性越低.

参考文献:

- [1] ARCHIT J. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318R-95) by ACI committee 318[J]. Journal of Architectural Engineering, 1996, 2(3): 120. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0431(1996)2:3(120.3).
- [2] American institute of steel construction. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings [S]. Chicago: AISC Committee on Specification and Approved by the AISC Board of Directors, 1999.
- [3] European committee for standardization. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures: DD ENV 1994-2; 2001[S]. London: British Standards Institution, 2004.
- [4] Architectural Institute of Japan. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1997.
- [5] 中国工程建设标准化协会. 矩形钢管混凝土结构技术规程: CECS 159: 2004[S]. 北京: [s. n.], 2004.
- [6] 中华人民共和国国家军用标准. 战时军港抢修早强型组合结构技术规程: GJB 4142—2000[S]. 北京: 中国人民解放军总后勤部, 2001.
- [7] 陶忠, 王志滨, 韩林海. 矩形冷弯型钢钢管混凝土柱的力学性能研究[J]. 工程力学, 2006, 23(3): 147-155. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4750. 2006. 03. 025.
- [8] UY B. Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(3): 341-352. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:3(341).
- [9] SHANMUGAM N, LIEW J, LEE S. Thin-walled steel box columns under biaxial loading[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(11): 3076-3094. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:11(2706).
- [10] 王秋萍. 薄壁钢管混凝土轴压短柱力学性能的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- [11] 梁扬滨, 曾志兴, 苏江林, 等. 钢板笼约束混凝土短柱轴压承载力分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 576-580. DOI: 10.11830/ISSN. 1000-5013. 2014. 05. 0576.
- [12] CHANG Xu, RU Zhongliang, ZHOU Wei, *et al.* Study on concrete-filled stainless steel-carbon steel tubular (CF-SCT) stub columns under compression[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 63: 125-133. DOI: 10.1016/j. tws. 2012. 10. 002.
- [13] YOUNG B, ELLOBODY E. Experimental investigation of concrete-filled cold-formed high strength stainless steel tube columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(5): 484-492. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2005. 08. 004.
- [14] ELCHALAKANI M, ZHAO Xiaoling, GRZEBIETA R. Concrete-filled steel circular tubes subjected to constant amplitude cyclic pure bending[J]. Engineering Structures, 2004, 26(4): 2125-2135. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2004. 07. 012.
- [15] GUPTA P, SARDA S, KUMAR M. Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(2): 182-193. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2006. 04. 004.
- [16] ZHU Aizhu, CHEN Xianchuan, ZHU Hongping. Analysis of concrete-filled unstiffened and stiffened cold-formed stub columns[C]// Eleventh International Symposium on Structural Engineering. 广州: 国家自然科学基金委员会, 2010: 246-252.
- [17] 张达. 方形冷弯中厚壁钢管混凝土短柱承载力研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [18] 杜文超, 赵均海, 张常光, 等. 椭圆钢管混凝土轴压短柱承载力分析[J]. 混凝土, 2016(4): 46-49. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-3550. 2016. 04. 013.
- [19] 黄泳水, 张继承, 饶玉龙, 等. 高强冷弯矩形截面钢管混凝土柱偏压性能试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 179-185. DOI: 10.11830/ISSN. 1000-5013. 201811015.
- [20] 中华人民共和国建设部. 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 200018—2002[S]. 武汉: 湖北省发展计划委员会, 2003.
- [21] 蔡绍怀. 套箍混凝土轴心受压构件的强度计算[J]. 建筑结构, 1980(4): 25-31. DOI: 10.19701/j. jzjg. 1980. 04. 007.

(编辑: 李宝川 责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)