

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0236-05

方 CFRP-钢管混凝土(S-CFRP-CFST) 压弯构件滞回性能试验研究

闫 煦, 周 博

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168)

摘 要: 进行了 8 个方 CFRP-钢管混凝土压弯构件的滞回性能试验。试验结果表明, 纵向 CFRP 对方钢管混凝土有很好的增强作用, 可以提高试件的承载力。对试验结果的分析表明, 轴压比可以提高试件的抗弯承载力, 钢管和 CFRP 管的变形协调一致。计算表明: 试件强度均有一定退化; 轴压比和纵向 CFRP 增强系数的增大可以提高试件的刚度, 同时减缓刚度退化; 轴压比在一定范围内有利于试件的抗震。

关键词: 方 CFRP-钢管; 内填混凝土; 压弯构件; 滞回性能; 试验研究

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.S082

EXPERIMENTAL STUDY ON HYSTERETIC BEHAVIOR OF THE CONCRETE FILLED SQUARE CFRP-STEEL TUBULAR (S-CFRP-CFST) BEAM-COLUMN

YAN Xu, ZHOU Bo

(College of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: Overall 8 pieces of specimens were experimentally investigated to study the hysteretic behaviors of the concrete filled square CFRP-steel tubular (S-CFRP-CFST) beam-column. The test results indicated that the longitudinal CFRP can provide strengthening effect for the concrete filled square steel tube (S-CFST) effectively, and the load bearing capacity of the specimen is enhanced. Based on the analysis of the experimental results, it shows that the axial compression ratio can enhance the flexural bearing strength of the specimen, also, the steel tube and the CFRP material can work concurrently both in the longitudinal and transverse directions. The computational result indicates that there are some strength degradation for all of the specimens. The axial compression ratio and the strengthening factor of longitudinal CFRP can enhance the stiffness of members, and they can also delay the stiffness degradation. However, the axial compression ratio is beneficial to aseismic behaviors within a certain range.

Key words: square CFRP-steel tube; in-filled concrete; column-beam; hysteretic behavior; experimental study

以往, 国内外关于圆 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic, 碳纤维增强塑料)-钢管混凝土(CFST)^[1]的研究已经逐渐形成一个热点^[2-6]。参考圆 CFRP-钢管混凝土(C-CFRP-CFST)的研究, 我们可以在方钢管混凝土(S-CFST)的外壁包裹 CFRP 以形成方 CFRP-钢管混凝土(S-CFRP-CFST)从而进一

步改善其受力性能, 这不但可以提高其耐久性, 还可以为服役时间较长的或轻微受损的 S-CFST 结构的加固提供一条新途径。

目前对 S-CFRP-CFST 的研究还不多, 陶忠等进行了轴压短柱和受弯构件的静力性能试验研究, 侧重于构件受火后的 CFRP 加固^[4,6]; 王庆利等进行

收稿日期: 2012-06-18; 修改日期: 2013-03-05

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0865)

通讯作者: 闫煦(1982—), 男, 辽宁人, 实验师, 硕士, 主要从事结构工程研究(E-mail: ceqlwang@sjzu.edu.cn).

作者简介: 周博(1983—), 男, 辽宁人, 博士生, 主要从事结构工程研究(E-mail: wys20020816@163.com).

了轴压短柱和受弯构件静力性能的系统研究,在理论分析的基础上给出了轴压短柱承载力计算表达式^[7-9]。陶忠等^[4]和王庆利等^[10]还进行了 S-CFRP-CFST 压弯构件的滞回性能研究,仅横向包裹 CFRP 而无纵向 CFRP,由于试件承受较大弯矩作用,因此效果并不理想。为此,本文进行了 S-CFRP-CFST 压弯构件(其截面示意图 1)滞回性能的试验研究,横向、纵向均包裹 CFRP,且以纵向 CFRP 为主要参数之一,对其跨中荷载-挠度($P-\Delta$)滞回骨架曲线、跨中弯矩-曲率($M-\phi$)滞回骨架曲线、钢管与 CFRP 的变形协调等进行了研究,最后考察了轴压比和纵向 CFRP 增强系数对试件刚度、刚度退化、强度退化和能量耗散等的影响。

1 试验研究

1.1 试件概况

1.1.1 试件参数

共计 8 个 S-CFRP-CFST 压弯试件,主要参数为轴压比 n 和纵向 CFRP 增强系数 η ^[9],

$$n = N_0 / N_u \quad (1)$$

$$\eta = A_{\text{cfl}} f_{\text{cfl}} / (A_s f_y) \quad (2)$$

$$f_{\text{cfl}} = E_{\text{cf}} \varepsilon_{\text{cflr}} \quad (3)$$

式中: N_0 为施加于试件上的轴力,具体数值见表 1; N_u 为试件的轴压极限承载力^[8]; A_{cfl} 和 f_{cfl} 分别为纵向 CFRP 的横截面积和极限拉伸强度; A_s 和 f_y 分别为钢管的横截面积和屈服强度; E_{cf} 为碳纤维织物的弹性模量; $\varepsilon_{\text{cflr}}$ 为纵向 CFRP 的断裂应变。

试件的计算长度 L 均为 2000mm,钢管的边长 B 均为 140mm,钢管的壁厚 t_s 均为 4mm,横向 CFRP 的层数 m 均为 1。其他参数见表 1,其中, m' 为纵向 CFRP 的层数。

表 1 试件的部分参数

Table 1 Some parameters of the specimens

试件编号	n	η	N_0/kN	$m'/\text{层}$	Δ_y/mm
A-1	0	0.17	0	1	14.11
A-2	0	0.34	0	2	14.10
B-1	0.2	0.17	268	1	11.09
B-2	0.2	0.34	273	2	14.10
C-1	0.4	0.17	536	1	9.07
C-2	0.4	0.34	546	2	8.07
D-1	0.6	0.17	804	1	7.06
D-2	0.6	0.34	819	2	8.14

1.1.2 材料特性

钢管为直缝焊管, Q235 钢,其弯角处的内倒角半径为 5mm。试验前将钢管沿纵向剖开,从钢管

的管壁处取样,做成 3 个标准试件,再进行拉伸试验,从而测得 f_y 、抗拉强度 f_u 、弹性模量 E_s 、屈服应变 ε_y 、泊松比 ν_s 和延伸率 ε' 等指标如表 2 所示。

表 2 钢材材性

Table 2 Properties of the steel material

f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/GPa	$\varepsilon_y/\mu\text{e}$	ν_s	$\varepsilon'(\%)$
298	425	199	2502	0.28	27

混凝土、碳纤维和粘胶等的几何指标和物理指标见文献[11]。试件的具体制作过程见文献[9]。

1.2 加载与测量

试验在沈阳建筑大学的结构工程实验室进行,具体加载装置、加载制度和停机标准等见文献[11]。由竖直方向的 500kN 的 MTS 作动器直接采集 P 和 Δ ,同时绘制荷载 $P-\Delta$ 曲线;如图 1 所示,在跨中截面的 1 点、2 点的钢管和 CFRP 管上各粘贴横向、纵向应变片 1 片以测量应变;由水平方向的 1250kN 的 MTS 作动器直接采集 N_0 和轴向位移 d ;在距离两支座较近的两个四分点处用位移计测量挠度。

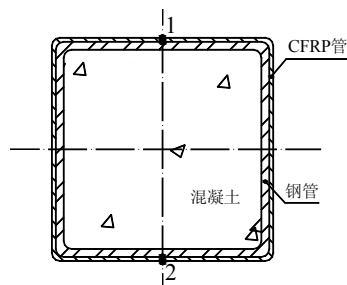


图 1 试件截面示意与应变片布置

Fig.1 General view of cross-section of the S-CFRP-CFST specimens and locations of the strain gauges

1.3 试验现象

对于所有试件,在 $1\Delta_y \sim 2\Delta_y$ 期间(Δ_y 为试件的屈服位移,确定方法见文献[11],具体数值见表 1),跨中附近纵向受拉区横向 CFRP 纤维间微小开裂,随着加载、卸载位移的增加,开裂沿横向不断从上边缘、下边缘向中间扩展,并出现一些新的开裂,最终形成 2 条~3 条较大的开裂。此后,轴压比对试验现象有较大影响。

对于小轴压比($n \leq 0.2$)试件,当加载到 $3\Delta_y$ 时,跨中附近受压区产生微小鼓曲,在随后的卸载及反向加载过程中,鼓曲部分被拉平,并引起另一侧受压区的微小鼓曲,且随着加载、卸载位移的不断增大而增大,同时,可以偶尔听到“啪啪”声,而此时未观察到横向 CFRP 的断裂,说明纵向 CFRP 开始零星断裂;当施加到 $5\Delta_y$ 时,鼓曲开始显著发展并可听到连续的爆裂声,而此时横向 CFRP 仅零星

断裂,说明纵向 CFRP 开始大量断裂(如图 2 所示,试件 A-1 既有横向 CFRP,也有纵向 CFRP,但此时可以看见钢管外壁,说明纵向 CFRP 大量断裂);当施加到 $7\Delta_y \sim 8\Delta_y$ 时,横向 CFRP 开始大量断裂,最终钢管断裂(如图 3 所示)。对于 C-CFRP-CFST 压弯构件^[11],钢管仅有轻微鼓曲而不断裂。

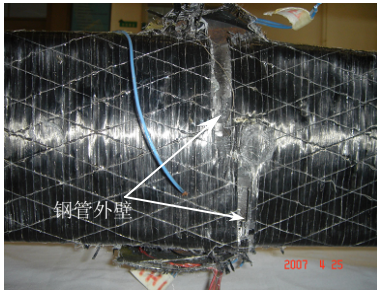


图 2 小轴压比试件(试件 A-1)CFRP 的断裂
Fig.2 Fracture of CFRP of member with low axial compression ratio (specimen A-1)

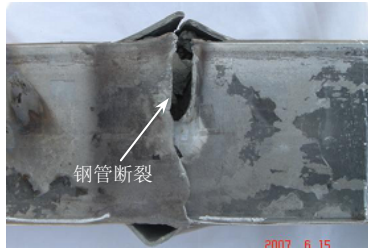


图 3 钢管的破坏形态(试件 A-2)
Fig.3 Failure modes of the steel tubes (specimen A-2)

对于大轴压比($n \geq 0.4$)试件,加载到 $3\Delta_y$ 时,跨中附近受压区发生微小鼓曲;当施加到 $5\Delta_y$ 时,鼓曲显著发展,同时,可以偶尔听到“啪啪”声,此时观察到横向 CFRP 和纵向 CFRP 同时开始渐次断裂(见图 4);当施加到 $7\Delta_y$ 时,横向 CFRP 和纵向 CFRP 大量断裂并伴随着连续的爆裂声;当施加到 $8\Delta_y$ 时,跨中钢管明显鼓曲并最终断裂。

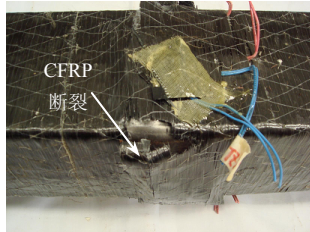


图 4 大轴压比试件(试件 C-1)CFRP 的断裂
Fig.4 Fracture of CFRP of member with high axial compression ratio (specimen C-1)

对于没有纵向 CFRP 的试件^[10],无论轴压比多大,只有在加载后期挠度很大时,横向 CFRP 才开始大量断裂。

试验完毕后,剖开钢管可以发现,混凝土均被

压溃(如图 5 所示);而对于 C-CFRP-CFST 压弯构件^[11],混凝土破坏程度较轻,仅有些许细微裂缝。

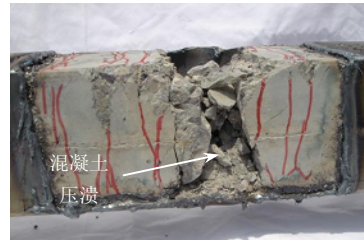


图 5 混凝土的破坏形态(试件 A-2)
Fig.5 Failure modes of the concrete (specimen A-2)

2 试验结果

2.1 跨中荷载-挠度滞回曲线

图 6 为部分试件 $P-\Delta$ 滞回骨架曲线($\eta=0$ 试件见文献[10],下同)。

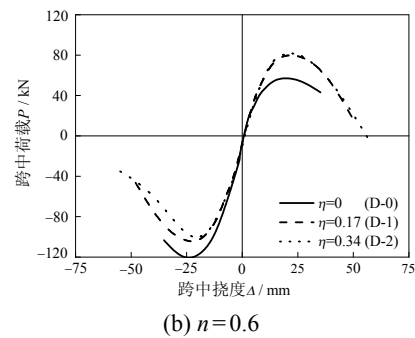
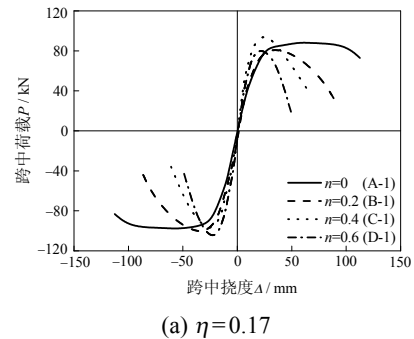


图 6 部分试件 $P-\Delta$ 滞回骨架曲线
Fig.6 $P-\Delta$ hysteretic envelope curves of several specimens

从图 6 可见,试件的承载力随轴压比的增大而降低,随着纵向 CFRP 增强系数的增大而有所提高,这一结论与 C-CFRP-CFST 压弯构件^[11]的结论一致。

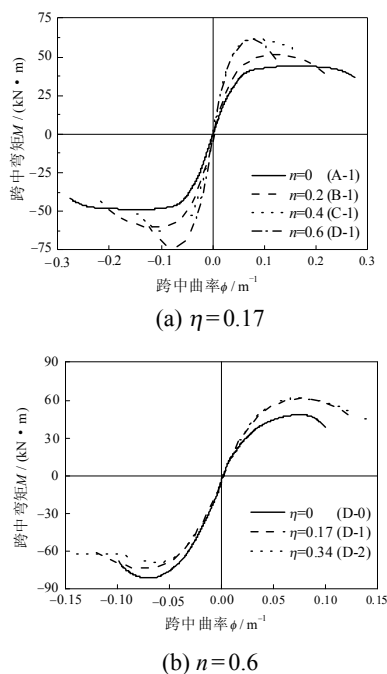
2.2 跨中弯矩-曲率曲线

图 7 为部分试件 $M-\phi$ 滞回骨架曲线,其中:

$$M = PL/4 + N_0 \Delta \quad (4)$$

由于试件的挠曲线均近似为正弦半波曲线,因此可用下式计算曲率:

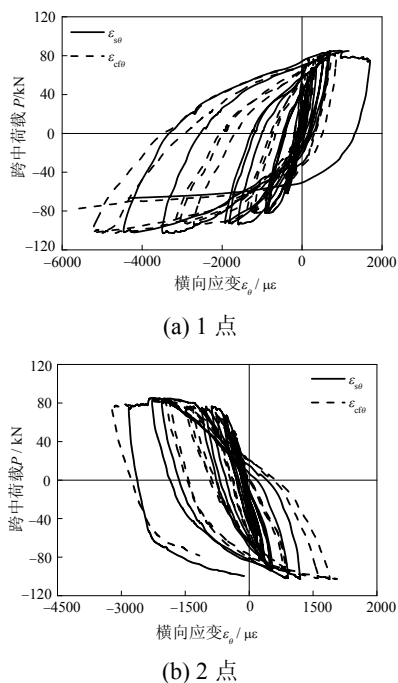
$$\phi = \pi^2 \Delta / L^2 \quad (5)$$

图7 部分试件 $M-\phi$ 滞回骨架曲线Fig.7 $M-\phi$ hysteretic envelope curves of several specimens

从图7可见,轴压比和纵向CFRP增强系数均可以提高试件的抗弯承载力,这一结论也与C-CFRP-CFST压弯构件^[11]的结论一致。

2.3 应变分析

图8为试件B-1的 $P-\varepsilon_\theta$ (横向应变)曲线,其中, $\varepsilon_{s\theta}$ 和 $\varepsilon_{cf\theta}$ 分别为钢管和CFRP的横向应变。可见,在往复荷载作用下,钢管和CFRP的横向应变基本一

图8 试件B-1的 $P-\varepsilon_\theta$ 滞回曲线Fig.8 $P-\varepsilon_\theta$ hysteretic curves of specimen B-1

致,表明钢管与CFRP在横向变形协调一致,对于纵向变形有同样结论,C-CFRP-CFST压弯构件也有相同结论^[11]。

3 指标分析

3.1 刚度和刚度退化

按照文献[12]的方法定义试件的初始抗弯刚度 K_{ie} 和使用阶段抗弯刚度 K_{se} ,图9为所有试件 K_{ie} 和 K_{se} 的比较。可见,试件的初始刚度和使用阶段刚度随着轴压比和纵向CFRP增强系数的增大而增大,C-CFRP-CFST压弯构件也有相同结论^[11]。

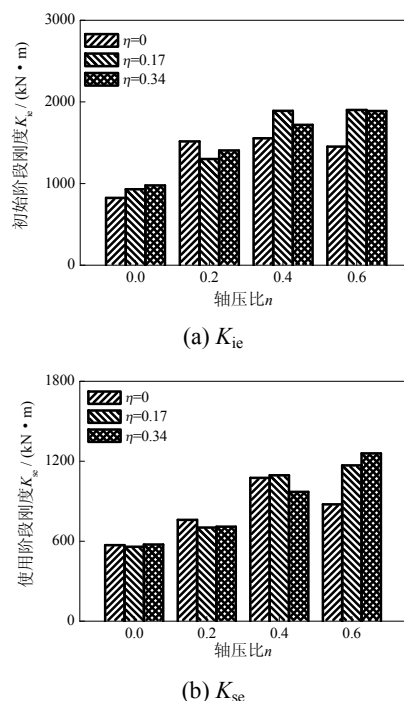
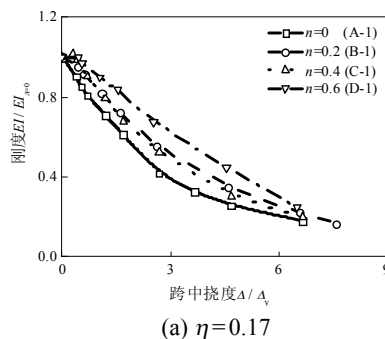


图9 刚度比较

Fig.9 Comparisons of stiffness

按文献[11]的方法确定试件每次循环的刚度,图10为部分试件刚度退化情况,其中 $EI_{A=0}$ 为试件的初始刚度。可见,总体而言,轴压比和纵向CFRP增强系数的增大均可以延缓试件的刚度退化,C-CFRP-CFST压弯构件也有相同结论^[11]。



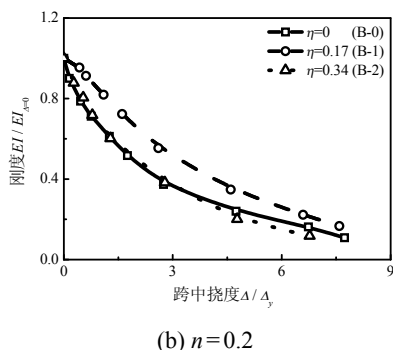
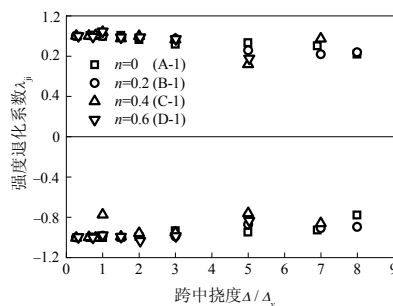


图 10 试件刚度退化

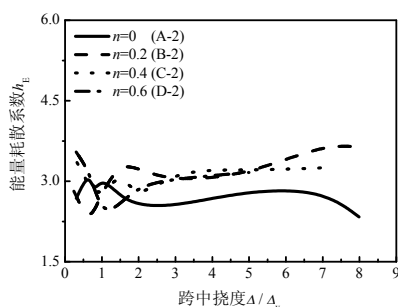
Fig.10 Stiffness degradation of the specimens

3.2 强度退化和能量耗散

按文献[13]的方法确定强度退化系数 λ_{ji} , 图 11 为 $\eta=0.17$ 试件的强度退化情况。可见, 试件的强度退化比较明显, 但 C-CFRP-CFST 压弯构件无明显强度退化^[11]。

图 11 $\eta=0.17$ 试件强度退化Fig.11 Strength degradation of the specimens with $\eta=0.17$

按文献[13]方法确定能量耗散系数 h_E , 图 12 为 $\eta=0.34$ 试件的能量耗散系数情况。可见, 当试件屈服后, 无轴压比试件的能量耗散系数最小, 这说明在一定的范围内轴压比对构件的抗震是有利的, C-CFRP-CFST 压弯构件也有相同结论^[11]。

图 12 $\eta=0.34$ 试件能量耗散系数Fig.12 Energy dissipation coefficient of the specimens with $\eta=0.34$

4 结论

由试验研究和对试验结果的分析, 在本次试验

的参数范围内, 可以初步得到以下结论:

(1) 纵向 CFRP 对方钢管混凝土有很好的增强作用, 可以有效提高试件的承载力。

(2) 轴压比可以提高方 CFRP-钢管混凝土试件的抗弯承载力, 钢管和 CFRP 管在横向和纵向都可以协同工作。

(3) 方 CFRP-钢管混凝土试件均出现强度退化现象; 轴压比和纵向 CFRP 增强系数的增大均可以提高方 CFRP-钢管混凝土试件的刚度, 并且可以延缓试件的刚度退化趋势; 轴压比在一定范围内有利于试件的抗震。

参考文献:

- [1] 王庆利, 赵颖华, 顾威. 圆截面 CFRP-钢复合管混凝土结构的研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2003, 19(4): 272—274.
Wang Qingli, Zhao Yinghua, Gu Wei. A presumption on the concrete filled circular CFRP-steel composite tube structures [J]. Journal of Shenyang Architecture and Civil Engineering Institute, 2003, 19(4): 272 — 274. (in Chinese)
- [2] Che Yuan, Wang Qingli, Shao Yongbo. Compressive performances of the concrete filled circular CFRP-steel tube (C-CFRP-CFST) [J]. International Journal of Advanced Steel Construction, 2012, 8(4): 311—338.
- [3] 王庆利, 车媛, 谭鹏宇, 邵永波. CFRP-钢管混凝土结构研究的进展与展望[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 2): 48—60.
Wang Qingli, Che Yuan, Tan Pengyu, Shao Yongbo. Progress and prospect in research on concrete filled CFRP-steel tubular structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Suppl 2): 48—60. (in Chinese)
- [4] 陶忠, 于清. 新型组合结构柱: 试验、理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 178—223, 188—195, 201—220.
Tao Zhong, Yu Qing. New kinds of composite structural columns-experiment, theory and method [M]. Beijing: Science Press, 2006: 178—223, 188—195, 201—220. (in Chinese)
- [5] 王庆利, 王金鱼, 张永丹. CFRP-钢管砼轴压短柱受力性能分析[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 102—105.
Wang Qingli, Wang Jinyu, Zhang Yongdan. Mechanical property analysis on the concentrically compressed concrete filled circular CFRP-steel tubular stub columns [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 102—105. (in Chinese)
- [6] Tao Zhong, Han Linhai, Zhuang Jinping. Axial loading behavior of CFRP strengthened concrete-filled steel tubular stub columns [J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10(1): 37—46.

(参考文献[7]—[13]转第 247 页)

- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2007: 1-3, 31-65.
Han Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 1-3, 31-65. (in Chinese)
- [3] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构(修订版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 4-7.
Cai Shaohuai. Modern steel tube confined concrete structures (revised edition) [M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 4-7. (in Chinese)
- [4] 曲慧, 王文达. 钢管混凝土柱-梁连接节点弯矩-转角关系计算方法[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 106-114.
Qu Hui, Wang Wenda. Research on practical method for the moment versus rotation relationship of beam to concrete-filled steel tubular column joints [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(5): 106-114. (in Chinese)
- [5] 王文达, 韩林海, 游经团. 方钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点滞回性能实验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 17-25.
Wang Wenda, Han Linhai, You Jingtuan. Experimental studies on hysteretic behavior s of steel beam to concrete filled SHS column connections with stiffening ring [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 17-25. (in Chinese)
- [6] 陈庆军, 蔡健, 徐刚, 等. 节点区柱钢管不连通式钢管混凝土柱-梁节点轴压承载力[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 170-175.
Chen Qingjun, Cai Jian, Xu Gang, et al. The axial compression bearing capacity of the concrete filled steel tubular column-beam joint with the column tube discontinuous in joint zone [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9): 170-175. (in Chinese)
- [7] Azizinamini A, Schneider S P. Moment connections to circular concrete-filled steel tube columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 213-222.
- [8] Nishiyama I, Fujimoto T, Fukumoto T. Inelastic force-deformation response of joint shear panels in beam-column moment connections to concrete-filled tubes [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 244-252.
- [9] Cheng C, Chung L. Seismic performance of steel beams to concrete-filled steel tubular column connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(3): 405-426.
- [10] Park J W, Kang S M, Yang S C. Experimental studies of wide flange beam to square concrete-filled tube column joints with stiffening plates around the column [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 31(12): 1866-1876.
- [11] 蔡健, 黄泰赞, 苏恒强. 新型钢管混凝土中柱劲性环梁式节点的设计方法初探[J]. 土木工程学报, 2002, 35(1): 6-10.
Cai Jian, Huang Taiyun, Su Hengqiang. Basic research on joint design of concrete-filled steel tube middle column [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(1): 6-10. (in Chinese)

(上接第 240 页)

- [7] 王庆利, 薛阳, 邵永波, 等. CFRP 约束方钢管混凝土轴压短柱的静力性能研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3): 24-31.
Wang Qingli, Xue Yang, Shao Yongbo, et al. Study on static performances of concentrically compressed concrete filled square steel tubular stub columns confined by CFRP [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(3): 24-31. (in Chinese)
- [8] 王庆利, 车媛, 叶茂. CFRP 约束方钢管混凝土轴压性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(增 1): 43-50.
Wang Qingli, Che Yuan, Ye Mao. Analysis on axial compressive performance of the concrete filled square CFRP-steel tubes (S-CFRP-CFST) [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(Suppl 1): 43-50. (in Chinese)
- [9] 王庆利, 车媛, 叶茂. CFRP 增强方截面钢管混凝土受弯性能研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增): 17-23.
Wang Qingli, Che Yuan, Ye Mao. Research on flexural performances on the CFRP confined concrete filled steel tube with square cross-section [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(Suppl): 17-23. (in Chinese)
- [10] 王庆利, 王月, 闫煦, 孙涛. CFRP 环向约束方钢管混凝土压弯构件滞回性能[J]. 沈阳建筑大学学报, 2009, 25(4): 704-707.
Wang Qingli, Wang Yue, Yan Xu, Sun Tao. The hysteretic performance of the concrete filled square steel tubular column-beam strengthened by CFRP circumferentially [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2009, 25(4): 704-707. (in Chinese)
- [11] 车媛, 王庆利, 邵永波, 侯婷婷. 圆 CFRP-钢管混凝土压弯构件滞回性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 46-54.
Che Yuan, Wang Qingli, Shao Yongbo, Hou Tingting. Experimental study on hysteretic behaviors of the concrete filled circular CFRP-steel tubular beam-column [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 46-54. (in Chinese)
- [12] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2006: 180.
Han Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2006: 180. (in Chinese)
- [13] JGJ 101-96, 建筑抗震试验方法规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
JGJ 101-96, Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese)