

DOI: 10.15986/j.1006-7930.2015.03.008

# 钢管约束粉煤灰钢筋混凝土轴压短柱力学性能试验研究

高春彦<sup>1,2</sup>, 张欢<sup>1</sup>, 杨华冠<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学建筑与土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 以混凝土中粉煤灰取代率 (0、10%、30%和 50%) 和钢管径厚比 (55、73 和 110) 为主要参数, 完成了 12 个钢管约束钢筋混凝土短柱的轴压试验. 研究了试件的破坏模式、极限承载力、荷载—应变关系等, 分析了试验参数对试件力学性能的影响规律. 试验结果表明: 试验结束时钢管向外凸曲, 径厚比为 110 试件的钢管出现纵向或斜向撕裂; 核心混凝土发生斜向剪切破坏, 钢筋被压屈. 随着钢管径厚比的增加, 试件的承载力和延性均降低; 随着粉煤灰取代率的增加, 试件的承载力降低, 但达到极限荷载时的变形和钢管应变均增加, 因此试件的延性增加. 由试验结果分析可知, 当粉煤灰取代率不大于 30%, 钢管径厚比不大于 100 时, 钢管约束钢筋混凝土轴压短柱的综合力学性能最优, 研究成果可为实际工程应用提供试验依据.

**关键词:** 圆钢管约束钢筋混凝土; 径厚比; 粉煤灰取代率; 轴压承载力; 延性

**中图分类号:** TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2015)03-0354-05

## Experimental study on mechanical behavior of the steel tubular confined reinforced concrete stub columns with fly ash under axial compression

GAO Chunyan<sup>1,2</sup>, ZHANG Huan<sup>1</sup>, YANG Huaguan<sup>1</sup>

(1. Architecture and Civil Engineering Institute, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;  
2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** With the fly ash replacement rate (0, 10%, 30% and 50%) and diameter- thickness ratio (55, 73 and 110) of the steel tube as the main parameters, the axial compression test of 12 circular steel tubular confined reinforced concrete stub columns were accomplished. The failure modes, ultimate bearing capacity and load-strain relations of the specimens were studied, and the influence laws of experimental parameters on the mechanical properties of specimens were analyzed. The test results indicate that the steel tube curved outward, which also were torn along the longitudinal or oblique direction for the specimens with 110 diameter-thickness ratio, the oblique shear failure occurred for the core concrete and the steel bars were buckled at the end of the test. With the increase of diameter- thickness ratio of steel tube, the bearing capacity and ductility of specimens decrease. With the increase of fly ash replacement rate, the bearing capacities of specimens dropped, and as the deformations of specimens and strains of steel tube when reaching the ultimate loads increase, the ductility of the specimen increase. It can be found by analyzing the test results that the mechanical performances of circular steel tube confined reinforced concrete stub columns are optimal when the fly ash replacement rate is not more than 30% and the diameter- thickness ratio of steel tube is not more than 100. The research results can provide experimental basis for practical engineering application.

**Key word:** circular steel tube confined reinforced concrete; diameter-thickness ratio; fly ash replacement rate; axial bearing capacity; ductility

钢管约束混凝土柱由 Tomii 等人于上世纪八十年代初首次提出, 即将钢筋混凝土柱中的箍筋用钢管代替, 且钢管不直接承担轴向荷载, 使得混凝土和钢管之间只存在环向的相互作用, 从而形成钢管约束钢筋混凝土柱<sup>[1]</sup>. 其和普通钢筋混凝土柱相比, 具有更好的抗剪承载力和抗震性能; 柱子整个截面得到有效约束, 一方面能防止纵筋压屈, 纵向钢筋与混凝土间的粘结强度得到提高, 另一方面柱的延性和轴向承载力也明显提高. 和钢管混凝土柱相比, 钢管作为混凝土施工模板的优势不变, 但其仅起到横向钢筋的作用, 与钢筋混凝土梁的连接节

点施工方便, 避免了钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁在节点处连接复杂的问题. 国内外学者肖岩<sup>[2]</sup>、周绪红<sup>[3-4]</sup>、张素梅<sup>[5]</sup>、刘界鹏<sup>[6]</sup>、肖建庄<sup>[7]</sup>、甘丹<sup>[8]</sup>等对钢管约束混凝土柱的力学性能进行了试验研究和理论分析, 取得了阶段性成果. 目前在“大连市体育馆”等大型公共建筑中已成功使用了钢管约束钢筋混凝土柱, 取得了良好的经济效益和综合效益<sup>[9]</sup>.

粉煤灰是火力发电厂燃煤粉锅炉排出的一种工业废渣, 随着电力事业的发展, 粉煤灰的排放量也在逐年增加. 为作好粉煤灰的综合利用, 研究人

收稿日期: 2015-01-13

修改稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金 (11172131); 内蒙古自然科学基金 (2012MS0711)

作者简介: 高春彦 (1978-), 博士生, 副教授. 主要从事土木工程, 组合结构与结构抗震方面研究. E-mail: gao-197844@163.com

员将粉煤灰等量替代一部分水泥作为胶凝材料形成粉煤灰混凝土. 粉煤灰混凝土具有良好的和易性和力学性能, 在钢管混凝土中被大量应用. 由于粉煤灰的活性比较差, 掺入混凝土中会导致水化进程发生改变, 表现出与普通混凝土不同的物理特征. 窦立军、张晶对钢管粉煤灰混凝土短柱的承载能力、徐变机理开展了理论和试验研究<sup>[10][11]</sup>.

到目前为止, 国内外对钢管约束粉煤灰混凝土柱的研究仍为空白. 为扩大粉煤灰混凝土的应用范围, 本文在钢管约束混凝土构件和粉煤灰混凝土材料研究成果的基础上, 以钢管径厚比 (即含钢率) 和粉煤灰取代率为参数, 对钢管约束粉煤灰钢筋混凝土短柱的轴压力学性能进行了试验研究, 考察了钢管径厚比和粉煤灰取代率不同时钢管约束钢筋混凝土短柱的破坏模式、承载力以及应变变化规律等, 给出了该类组合构件的最优含钢率和核心粉煤灰混凝土的最优配比, 本文研究成果将促进钢管约束混凝土结构的应用和发展.

## 1 试验研究

### 1.1 试件设计

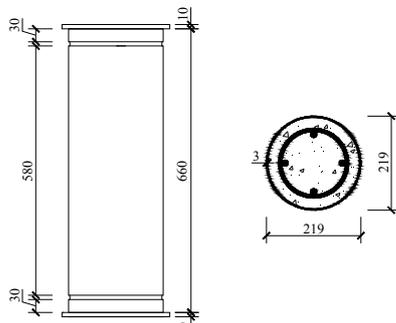


图 1 试件尺寸

Fig.1 Specimen dimension

以钢管径厚比 (55, 73, 110)、混凝土中粉煤灰取代率 (0, 10%, 30%, 50%) 为参数, 进行了 4 组共 12 个圆钢管约束钢筋混凝土轴压短柱的试验研究, 试件尺寸如图 1 所示. 所有试件的钢管外径  $D = 219$  mm, 长度  $L = 660$  mm, 高径比为 3, 钢管内纵筋为  $4\Phi 14$ , 纵筋配筋率为 1.7%, 箍筋为  $2\Phi 8$ , 端板厚 10 mm. 试件编号及参数见表 1. 试件的命名方法以 CTRC-1-2 为例说明, CTRC 表示 circular

表 3 混凝土的力学性能指标

Tab.3 Mechanical properties of concrete

混凝土标号	粉煤灰取代率/%	$28 d f_{cu,k} / \text{N/mm}^2$	试验 $f_{cu,k} / \text{N/mm}^2$	弹性模量/MPa	配合比水泥: 粉煤灰: 沙子: 石子: 水
C30	0	36.8	42.2	$3.20 \times 10^4$	380:0:771:1124:165
	10	35.1	36.5	$3.16 \times 10^4$	342:38:771:1124:165
	30	31.2	33.2	$3.07 \times 10^4$	266:114:771:1124:165
	50	26.0	27.6	$2.92 \times 10^4$	190:190:771:1124:165

注:  $f_{cu,k}$  为立方体抗压强度.

tubed reinforced concrete, 1 表示组别为第 1 组, 该组试件粉煤灰取代率为 0, 2 表示钢管名义壁厚为 2mm. 为保证钢管不直接承担纵向荷载, 只对核心混凝土起约束作用, 用角磨机在距离柱上、下端 30 mm 处各切出一道 10 mm 宽的环向条带.



图 2 加载装置

Fig.2 Test device

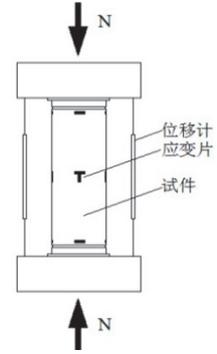


图 3 测量方案

Fig.3 Measurement scheme

本次试验钢管均采用 Q235 热轧无缝钢管, 端板采用 Q235 级钢, 纵筋和箍筋分别采用 HRB400 级钢筋和 HPB300 级钢筋. 钢管中灌注不同粉煤灰取代率的 C30 混凝土, 在浇筑试件的同时, 制备了边长为 100mm 的混凝土立方体试块, 以便试验时确定混凝土的材料力学性能. 钢管和混凝土的材料性能指标见表 2, 3.

表 1 试件参数

Tab.1 Specimen parameters

组别	试件编号	D/mm	名义壁 真实壁		D/t	$\alpha$
			厚/mm	厚/mm		
CTRC-1	CTRC-1-2	219	2	2.06	110	0.037
	CTRC-1-3	219	3	3.14	73	0.057
	CTRC-1-4	219	4	4.30	55	0.077
CTRC-2	CTRC-2-2	219	2	2.06	110	0.037
	CTRC-2-3	219	3	3.14	73	0.057
	CTRC-2-4	219	4	4.30	55	0.077
CTRC-3	CTRC-3-2	219	2	2.06	110	0.037
	CTRC-3-3	219	3	3.14	73	0.057
	CTRC-3-4	219	4	4.30	55	0.077
CTRC-4	CTRC-4-2	219	2	2.06	110	0.037
	CTRC-4-3	219	3	3.14	73	0.057
	CTRC-4-4	219	4	4.30	55	0.077

注: 组别中 1、2、3、4 表示粉煤灰取代率分别为 0、10%、30%、50%.

表 2 钢材的力学性能指标

Tab.2 Mechanical properties of steel

钢材标号	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	伸长率	弹性模量/GPa	
钢管	$\Phi 219 \times 2$	408	435	34%	206
	$\Phi 219 \times 3$	240	294	42%	203
	$\Phi 219 \times 4$	357	401	36%	207

## 1.2 试验装置和量测方案

本次试验在 500t 压力机上进行,加载装置如图 2 所示. 试验加载过程为一次性压溃试验,在弹性范围内每级荷载为预计极限荷载的 1/10;当钢管屈服后,每级荷载约为预计极限荷载的 1/15. 每级荷载的持荷时间约为 2 min,直至试件破坏. 试验过程中应变数据均通过 DHS816 静态应变采集仪自动采集,位移数据和荷载值则人工读取. 试验中在每个试件钢管中部沿圆周方向每隔 90° 粘贴纵向应变片和环向应变片,在钢管顶部和底部环向条带内侧沿圆周每隔 90° 粘贴环向应变片,以考察加载过程中钢管对核心混凝土的约束情况. 在试件周边对称布置四个位移计以量测试件的纵向位移,应变片和位移计布置如图 3 所示.

## 2 试验结果分析

### 2.1 破坏模式分析



图 4 试件破坏模式

Fig.4 Failure modes for specimens

以第四组试件为例,给出试件的破坏模式如图 4 所示. 由图 4 可以看出,不管粉煤灰取代率为何值,试验结束时试件钢管均出现向外凸曲,径厚比为 110 试件的钢管在中部或切口处被撕裂. 剖开钢管后可以发现,核心混凝土都存在明显的剪切斜裂缝,斜裂缝处的混凝土均破碎,纵向钢筋被压屈,如图 5 所示. 在径厚比为 55 和 73 的试件的剪切破坏面的末端,钢管出现了外凸变形. 由于这两种径厚比情况下钢管壁较厚,能有效约束核心混凝土的剪切变形,因此钢管壁没有出现撕裂现象. 径厚比为 110 的试件 CTRC12、CTRC32 和 CTRC42 的钢管在中部沿着斜向或纵向被撕裂;试件 CTRC22 的钢管在上方切口的最薄弱截面处首先被撕裂,之后裂缝一直延伸至中部. 说明在这种径厚比情况下,钢管对核心混凝土的约束作用太小,致使当混凝土发生较大的横向膨胀时,钢管不能起到有效的约束作用,最终导致钢管被撕裂.



图 5 剖开钢管后情况

Fig.5 Condition after splitting the steel tube

由破坏模式可以发现,粉煤灰取代率的变化对试件破坏模式的影响不大,钢管径厚比的取值决定了钢管是否发生撕裂.

### 2.2 荷载-纵向位移曲线分析

各组试件的荷载 (N) -纵向位移 ( $\Delta$ ) 关系曲线如图 6 所示 (注:每组试件粉煤灰取代率相同),其中纵向位移可通过对称布置在试件周边的 4 个位移计测得的位移值进行算数平均求得. 图 6 中钢管中部轴向屈服时对应的荷载点和极限荷载点在荷载-位移曲线中已标出.

由图 6 可知,当粉煤灰取代率相同时,随着径厚比的减小,试件的承载能力提高,达到极限荷载时的纵向位移增加. 径厚比为 73 的试件的承载力小于径厚比为 110 的试件,是由于名义厚度为 3mm 的钢管的屈服强度和极限强度远远小于名义厚度为 2 mm 的钢管造成的. 径厚比的变化对试件弹性阶段的刚度影响不大,对达到极限荷载后下降段的刚度影响较大. 径厚比为 110 的试件在超过极限荷载后,下降段最为陡峭,说明其延性最差;而径厚比为 73 和 55 的试件荷载-位移曲线的下降段均较为平缓,说明具有较好的变形能力. 建议在实际工程中,钢管约束钢筋混凝土短柱的径厚比取不大于 100 为宜.

当钢管径厚比相同时,随着粉煤灰取代率的增加,试件的屈服和极限承载力均降低,但达到极限荷载时的纵向位移增加. 由图可知,粉煤灰取代率为 10%、30%、50%的试件与 0 取代率试件相比,承载力平均降低了 6.2%、15.7%、21.8%,达到极限荷载时纵向位移平均增加了 9.3%、16.6%、68.9%. 粉煤灰取代率为 0 时,试件钢管中部屈服时的荷载点和极限荷载点比较接近,说明钢管中部轴向屈服后不久,试件即达到了极限承载力;而粉煤灰取代率为 50%时,试件钢管中部轴向屈服时对应的荷载点与极限荷载点相距最远,说明对于钢管约束钢筋混凝土短柱而言,核心混凝土中掺入一定数量的粉煤灰,会使得构件的延性增加. 综合考虑

承载力、延性等因素, 建议在实际工程中, 粉煤灰取代率取不大于 30%为宜.

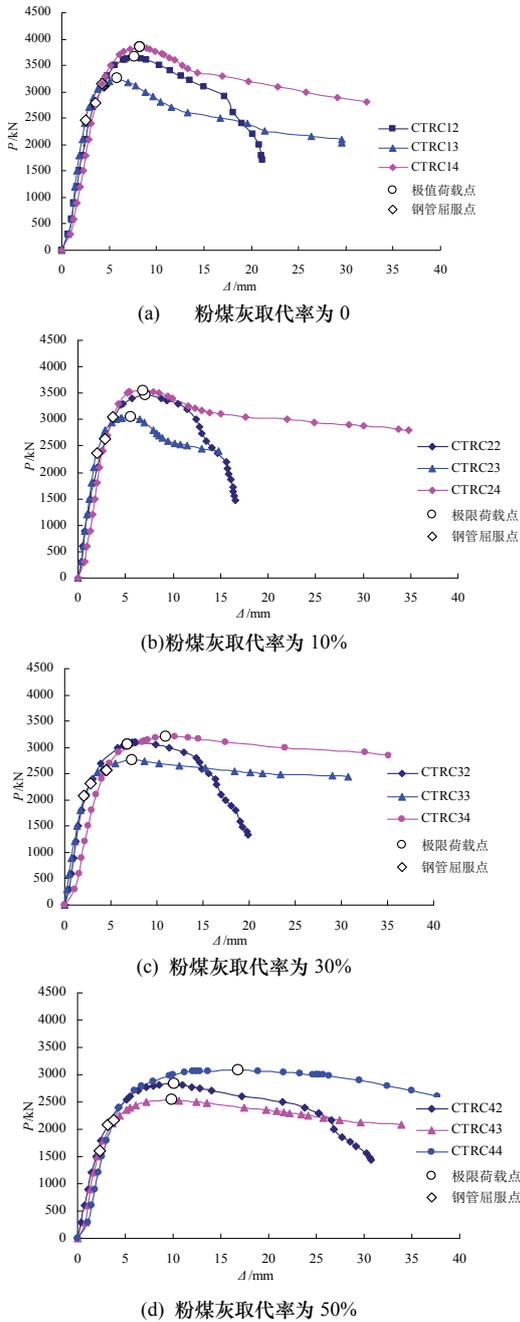


图 6 各组试件的荷载-纵向位移曲线

Fig.6 Load-longitudinal displacement curves for all specimens

### 2. 3 荷载-应变关系分析

各组试件的荷载—钢管中部轴向、环向应变关系曲线如图 7 所示, 图中钢管中部屈服时和达到极限承载力时对应的应变在图中已标出. 其中横坐标正向为环向应变, 负向为纵向应变.

由图 7 可知, 各试件的荷载—应变曲线均经历了弹性阶段、弹塑性上升段和塑性发展阶段. 弹性阶段定义为从开始加载至试件钢管中部达到屈服.

擦, 钢管的环向应变和轴向应变呈线性增长, 两者均在极限荷载之前达到屈服, 且轴向应变的数值大于环向应变, 因此钢管轴向屈服时对应的荷载低于环向屈服时的荷载, 但相差不超过 10%. 当粉煤灰取代率相同时, 径厚比的变化对试件弹性阶段应变的影响不大.

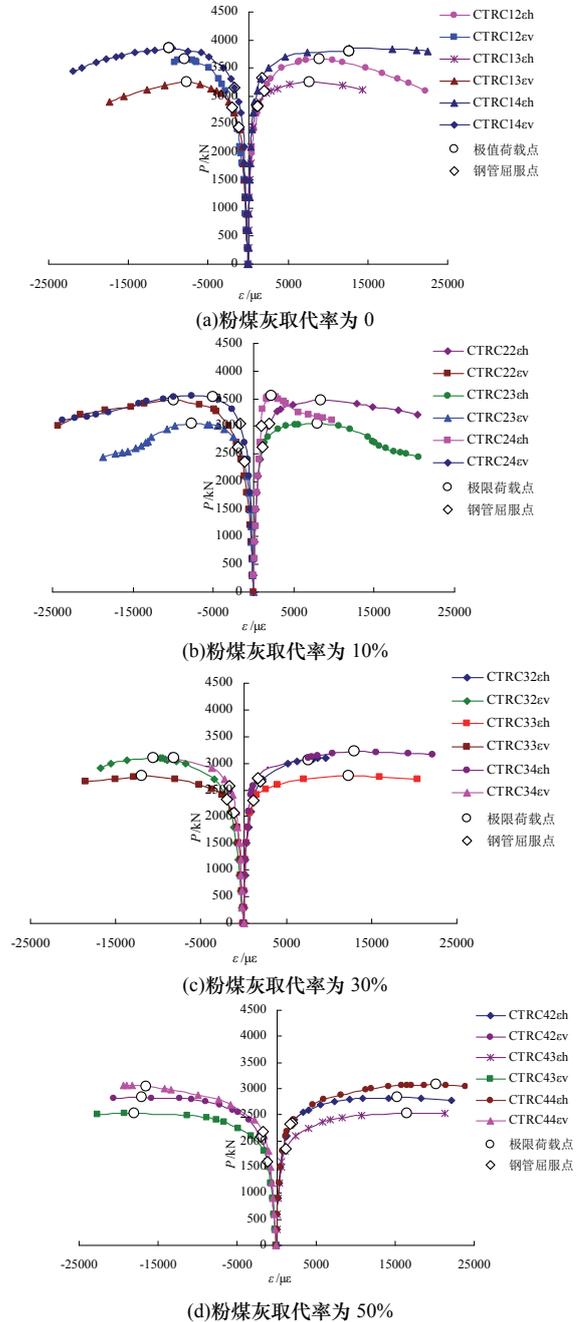


图 7 各组试件的荷载-应变关系曲线

Fig.7 Load-strain curves for all specimens

弹性阶段定义为从试件钢管中部达到屈服至达到极限荷载. 在弹性阶段, 试件应变的增长逐渐大于荷载的增长, 粉煤灰取代率越大, 试件达到极限荷载时对应的轴向和环向应变越大, 说明钢管对混凝土的约束作用发挥得更为充分, 钢管材料的强度得到了充分利用, 说明试件的延性越好.

塑性阶段定义为从试件达到极限荷载至试件破坏。这一阶段钢管中部的应变仍有较大幅度的增长。粉煤灰取代率越大,从试件达到极限荷载到试件破坏应变的变化越小,说明试件达到极限荷载后不久,就发生了破坏。在应变发展的过程中,伴随着钢管的鼓曲和钢管内混凝土的斜向剪切破坏,以及对于钢管径厚比为110的试件,钢管的撕裂破坏。

### 3 结论

通过对掺入一定量粉煤灰的钢管约束钢筋混凝土轴压短柱的静力试验研究,考察了试件的破坏模式、极限承载力、应变发展规律等,探讨粉煤灰取代率、钢管径厚比的变化对试件轴压力学性能的影响,可以得出以下结论:

(1)试件破坏时钢管向外凸曲或被撕裂,钢管内混凝土发生剪切破坏,存在明显的斜向剪切破碎带,纵向钢筋被压屈。本次试验中粉煤灰取代率的变化对试件破坏模式的影响不大,钢管径厚比的取值仅决定了钢管是否发生撕裂。

(2)当钢管径厚比相同时,随着粉煤灰取代率的增加,试件的屈服和极限荷载降低,但极限荷载对应的纵向变形增加,因此试件的延性增加。当粉煤灰取代率相同时,随着钢管径厚比的增加,试件的承载力降低,达到极限荷载后荷载—纵向位移曲线的下降段更为陡峭,说明试件的延性降低。

(3)各试件钢管的轴向和环向应变均在极限荷载之前达到屈服,钢管径厚比的变化对其中部应变的影响不大。随着粉煤灰取代率的增加,试件达到极限荷载时对应的应变大大增加,钢管本身的材料强度以及钢管对混凝土的约束作用得到更为充分的发挥。

(4)根据本文试验结果,建议混凝土中粉煤灰取代率取不大于30%,钢管径厚比取不大于100时,钢管约束钢筋混凝土轴压短柱的综合力学性能最优。

### 参考文献 References

- [1] TOMII M, Sakino K, Xiao Y, Watanabe K. Earthquake resisting hysteretic behavior of reinforced concrete short columns confined by steel tube [C]. Proceeding of the International Specialty Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin, China, 1985: 119-125.
- [2] 肖岩. 套管钢筋混凝土结构的发展与展望[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 8-12.  
XIAO Yan. Development and prospects of tubular

- reinforced concrete column structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4): 8-12.
- [3] 周绪红, 甘丹, 刘界鹏, 等. 方钢管约束钢筋混凝土轴压短柱试验研究与分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 68-74.  
ZHOU Xuhong, GAN Dan, LIU Jiepeng, et al. Experiment and analysis on square tubed reinforced concrete stub columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 68-74.
- [4] 周绪红, 刘界鹏, 张素梅. 圆钢管约束钢筋混凝土短柱抗震性能试验研究. 建筑结构学报, 2010, 31(7): 56-63.  
ZHOU Xuhong, LIU Jiepeng, ZHANG Sumei. Seismic behavior of circular tubed reinforced concrete short columns [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(7): 56-63.
- [5] 张素梅, 刘界鹏, 马乐, 等. 圆钢管约束高强混凝土轴压短柱的试验研究与承载力分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 24-31.  
ZHANG Sumei, LIU Jiepeng, Ma Le, et al. Axial compression test and analysis of circular tube confined HSC stub columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 24-31.
- [6] 刘界鹏, 张素梅, 郭兰慧. 方钢管约束高强混凝土短柱轴压力学性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(10): 1542-1545.  
LIU Jiepeng, ZHANG Sumei, GUO Lanhui. Axial compression of behavior square tube confined high strength concrete (HSC) short columns [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(10): 1542-1545.
- [7] 肖建庄, 杨洁, 黄一杰, 等. 钢管约束再生混凝土轴压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 92-98.  
XIAO Jianzhuang, YANG Jie, HUANG Yijie, et al. Experimental study on recycled concrete confined by steel tube under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 92-98.
- [8] 甘丹. 钢管约束混凝土短柱的静力性能和抗震性能的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.  
GAN Dan. Static and seismic behavior of steel tube confined concrete short columns [D]. Lanzhou University, 2012.
- [9] 张小冬, 马忠吉, 白福波, 等. 大连市体育馆钢管约束钢筋混凝土短柱设计[J]. 建筑结构, 2011, 41(4): 49-51.  
ZHANG Xiaodong, MA Zhongji, BAI Fubo, et al. Design of tubed RC short columns in Dalian Gymnasium [J]. Building Structure, 2011, 41(4): 49-51.
- [10] 窦立军. 钢管粉煤灰混凝土轴心受压构件的承载能力试验研究[J]. 长春工程学院学报, 2010, 11(3): 7-10.  
DOU Lijun. The experiment research on bearing capacity of filled fly ash concrete into steel tube under axis compressive force [J]. Journal of Changchun Institute of Technology, 2010, 11(3): 7-10.
- [11] 张晶. 钢管粉煤灰混凝土轴心受压构件徐变性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
ZHANG Jing. The research of properties for creep of axial compression fly ash concrete-filled steel tubular members [D]. Beijing: Beijing Jiao tong University, 2011.

(编辑 吴海西)