

文章编号:1673-2049(2015)02-0021-06

钢管/GFRP管约束再生混凝土柱偏心受压试验

肖建庄,刘 胜,TRESSERRAS Joan

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

摘要:以再生粗骨料取代率和膨胀剂掺量为参数,完成了4个钢管约束和4个玻璃纤维增强塑料(GFRP)约束再生混凝土柱试件的偏心受压试验,对钢管约束和GFRP管约束再生混凝土试件的极限荷载和轴向变形进行了对比分析,并对试件的极限荷载试验值与计算值进行了对比。结果表明:100%再生粗骨料取代率再生混凝土试件的极限荷载比普通混凝土试件低,混凝土强度相同时,GFRP管约束再生混凝土试件偏心受压极限荷载比钢管约束试件低;膨胀剂可以提高钢管和GFRP管约束试件的偏心受压极限荷载,并且对GFRP管约束试件作用更为显著;GFRP管约束试件的变形能力比钢管约束试件大,100%再生粗骨料取代率再生混凝土试件的变形能力比普通混凝土试件大。

关键词:再生混凝土;偏心受压试验;约束;钢管;GFRP管;极限荷载;膨胀剂

中图分类号:TU312 **文献标志码:**A

Eccentric Loading Test on Recycled Aggregate Concrete Columns Confined by Steel Tube/GFRP Tube

XIAO Jian-zhuang, LIU Sheng, TRESSERRAS Joan

(Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking the replacement ratio of recycled aggregate concrete and adding amount of expansive agent as parameters, 4 recycled concrete columns confined by steel tube and 4 recycled concrete columns confined by glass fiber reinforced plastics (GFRP) under eccentric loading were tested, and the effects of confinement by steel tube or GFRP on the ultimate load and axial strain of specimens were investigated. The ultimate loads of specimens was compared with the calculated values. The results show that the ultimate loads of 100% replaced recycled concrete specimens are lower than those of normal concrete specimens and the ultimate loads of GFRP confined specimens are lower than those of steel tube confined specimens. Expansive agent can increase the ultimate load of specimen and the effect is more significant on specimens confined by GFRP. The axial strains of specimens confined by GFRP are larger than those of specimens confined by steel tube, and the axial stains of 100% replaced recycled concrete specimens are larger than those of normal concrete specimens.

Key words: recycled aggregate concrete; eccentric loading test; confinement; steel tube; GFRP tube; ultimate load; expansive agent

收稿日期:2014-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51438007);上海市科委创新行动计划项目(14231201300)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn。

0 引 言

近年来,针对再生混凝土的研究越来越多,与普通混凝土相比,再生混凝土有抗压强度低和收缩徐变大等特点^[1],这些阻碍了再生混凝土在结构工程中的广泛应用。吴波等^[2-6]对钢管约束再生混凝土短柱的轴心受压力学性能进行了试验研究,研究表明在钢管的约束作用下,再生混凝土构件的承载力和变形能力都有明显提高,且随再生粗骨料取代率的增加而降低。陈宗平等^[7-8]对钢管约束再生混凝土柱的偏心受压力学性能进行了试验研究,研究表明再生粗骨料取代率对构件的极限承载力影响不大,构件极限承载力随长细比和偏心距的增加而降低。肖建庄等^[9]对 GFRP 约束再生混凝土柱的力学性能进行了试验研究,研究表明在 GFRP 的约束下,再生混凝土的抗压强度提高了约 30%,变形能力也显著提高,但构件的极限荷载随着再生粗骨料取代率的增加而降低。另外,在再生混凝土中添加外加剂也是改善再生混凝土性能的一种措施^[1]。王振波等^[10]研究了膨胀剂对钢管约束再生混凝土柱轴压性能的影响,研究表明掺入适量的膨胀剂能够改善再生混凝土的强度和钢管约束再生混凝土短柱的轴压极限荷载。

本文以再生粗骨料取代率和膨胀剂掺量(质量分数,下同)为参数,固定试件长细比和试验偏心距,对钢管和 GFRP 管约束再生混凝土柱偏心受压力学性能进行对比分析。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验所用水泥为海螺牌 42.5R 普通硅酸盐水泥,砂为普通黄砂,拌和水为自来水。再生粗骨料粒

径分为 5~16.5 mm 和 16.5~31.5 mm,2 种粒径再生粗骨料按质量比 3:2 的比例混合使用。膨胀剂为 ZY 型第 4 代高性能膨胀剂。各试件混凝土采用相同质量配合比,即水泥、砂、天然粗骨料、水比例为 430:559:1118:185。当掺入膨胀剂时,用等质量膨胀剂取代该配合比中的水泥,当掺入再生粗骨料时,用等质量再生粗骨料取代该配合比中的天然粗骨料。试验所用钢管由钢板冷弯直焊而成,钢管管材为 Q345A 钢,外径 220 mm,厚度 4 mm,其性能参数如表 1 所示。试验所用 GFRP 管由玻璃纤维铺设而成,基体为不饱和聚酯树脂,外径 210 mm,厚度 5 mm,其性能参数如表 2 所示。

表 1 钢管材料性能

Tab. 1 Material Properties of Steel Tubes		
屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
366	500	190

表 2 GFRP 管材料性能

Tab. 2 Material Properties of GFRP Tubes			
环向强度/MPa	轴向强度/MPa	环向弹性模量/GPa	纵向弹性模量/GPa
350	68	22	2.1

1.2 试件设计

本文共设计了 4 根钢管约束再生混凝土柱和 4 根 GFRP 管约束再生混凝土柱,所有试件高度均取为 1 m。再生粗骨料取代率取 0%和 100%两种,膨胀剂掺量取 0%和 8%两种。钢管约束再生混凝土柱试件编号以 RCFS-100-8 为例,RCFS 表示钢管约束再生混凝土,100 表示再生粗骨料取代率为 100%,8 表示膨胀剂掺量为 8%。GFRP 管约束再生混凝土柱试件编号以 RCFF-100-8 为例,RCFF 表示 GFRP 管约束再生混凝土,100 表示再生粗骨料取代率为 100%,8 表示膨胀剂掺量为 8%。试件参数如表 3 所示。

表 3 试件参数

Tab. 3 Parameters of Specimens								
试件编号	<i>L</i> /mm	<i>D</i> /mm	<i>t</i> /mm	<i>e</i> /mm	γ /%	β /%	<i>f_c</i> /MPa	<i>E_c</i> /MPa
RCFS-0-0	1 000	220	4	40	0	0	42.08	26 646
RCFS-0-8	1 000	220	4	40	0	8	37.48	25 840
RCFS-100-0	1 000	220	4	40	100	0	32.36	24 757
RCFS-100-8	1 000	220	4	40	100	8	28.29	23 711
RCFF-0-0	1 000	210	5	40	0	0	42.08	26 646
RCFF-0-8	1 000	210	5	40	0	8	37.48	25 840
RCFF-100-0	1 000	210	5	40	100	0	32.36	24 757
RCFF-100-8	1 000	210	5	40	100	8	28.29	23 711

注:*L*为试件高度;*D*,*t*分别为外包钢管或 GFRP 管的外径和壁厚;*e*为偏心距; γ 为再生粗骨料取代率; β 为膨胀剂掺量;*f_c*为混凝土 28 d 抗压强度;*E_c*为混凝土 28 d 弹性模量。

下养护 28 d。制作试件的同时每组各浇筑 3 个 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的立方体和 3 个 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的棱柱体以测量混凝土抗压强度和弹性模量。

1.4 加载装置及测点布置

试验由 500 t 液压千斤顶加载,试件下端平放在反力架横梁上,上端用钢套头夹住以防止试件端部局部受压破坏,在千斤顶与钢套头之间以滚轴施加偏心荷载,加载装置如图 1(a)所示。试验应变测点布置如图 1(b)所示,在沿试件高度方向的 3 个四分点处各设一个量程为 100 mm 的位移计。

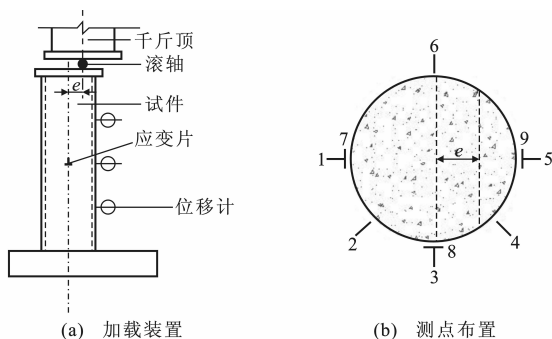


图1 试验加载装置及测点布置

Fig. 1 Test Setup and Measuring Point Locations

1.5 加载方案

试验加载方案采用分级加载制度。在加载至 $0.7P_u$ (P_u 为试件的预估极限荷载)前,按每级 200 kN 施加荷载,在 $0.7P_u \sim 0.9P_u$ 之间,按每级 100 kN 施加荷载,每级荷载持荷 2~3 min,超过 $0.9P_u$ 之后连续缓慢加载。所有试件在正式加载前均进行预加载,预加载荷载为 $0.1P_u$ 。

1.6 试验过程及主要现象

钢管约束再生混凝土柱试验加载过程中,加载至 $0.5P_u$ 左右时,试件开始出现侧向挠曲,加载至 $0.7P_u$ 左右时,钢管表面尤其是受压区铁锈开始脱落,随着加载继续进行,试件上部 1/3 左右处挠度不断增大,当荷载接近极限荷载时,钢管铁锈大量掉落,试件上部约 1/3 处受压区钢管鼓曲,最终焊缝开裂,试件破坏。焊缝开裂处出现在试件顶部或者底部,没有特别规律。

GFRP 管约束再生混凝土柱试验加载过程中,加载至 $0.6P_u$ 时,试件侧向挠度开始比较快速地增长,加载至 $0.75P_u$ 左右时,GFRP 纤维开始断裂,可以观察到外包 GFRP 管开始变白,加载至 $0.85P_u$ 左右时,开始听到清脆的纤维断裂声,当荷载超过 $0.95P_u$ 后,试件不断发出清脆的纤维断裂声,可以

看到管壁纤维断裂并绷开,在试件上部约 1/3 处,GFRP 管受压区出现 1~3 条明显的大横向裂缝,此时试件挠度急剧增长,出于安全考虑,停止加载。

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

钢管约束再生混凝土偏心受压柱的破坏形态如图 2(a)所示。钢管约束再生混凝土偏心受压柱的破坏形态表现为:受压区再生混凝土压碎,钢管鼓曲,最终焊缝开裂,试件破坏。钢管约束再生混凝土轴压柱的破坏形态表现为:试件中部鼓曲,核心再生混凝土顶部呈倒锥形,周围混凝土压碎,呈斜剪破坏形态^[3]。在偏心荷载作用下,试件发生侧向挠曲,挠曲部位受压区再生混凝土压碎,钢管不出现大范围的鼓曲,仅局部出现几处小范围的鼓曲。

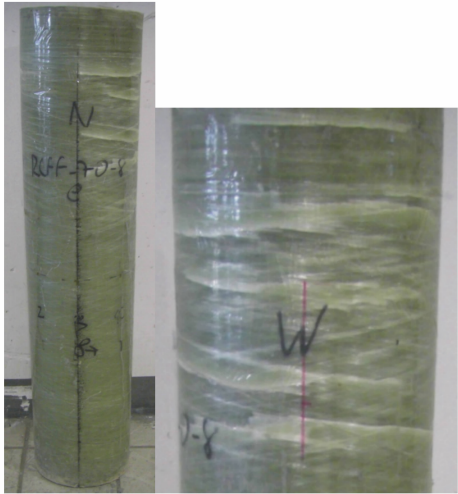
GFRP 管约束再生混凝土偏心受压柱的破坏形态如图 2(b)所示。GFRP 管约束再生混凝土偏心受压柱的破坏形态表现为:受压区再生混凝土压碎,GFRP 管沿环向和纤维缠绕方向断裂,试件破坏。GFRP 管约束再生混凝土轴压柱的破坏形态表现为:GFRP 管出现 1 条纵向贯通的倾斜裂缝,核心再生混凝土呈粉碎状压碎^[9]。在偏心荷载作用下,核心再生混凝土受压区压碎但不呈粉碎状,GFRP 管不出现纵向裂缝,只出现数条环向或沿纤维缠绕方向的裂缝贯通受压区。

2.2 约束材料对试件极限荷载影响

试件极限荷载如图 3 所示。在钢管或 GFRP 管约束时,掺与不掺膨胀剂的情况下,100%取代率再生混凝土试件的极限荷载均比普通混凝土试件的极限荷载低。不掺膨胀剂时,钢管约束 100%取代率再生混凝土试件比钢管约束普通混凝土试件极限荷载低 20.7%,GFRP 管约束 100%取代率再生混凝土试件比 GFRP 管约束普通混凝土试件极限荷载低 18.9%。掺膨胀剂时,钢管约束 100%取代率再生混凝土试件比钢管约束普通混凝土试件极限荷载低 20.1%,GFRP 管约束 100%取代率再生混凝土试件比 GFRP 管约束普通混凝土试件极限荷载低 21.6%。上述分析说明,配合比相同时,再生混凝土对试件偏压极限荷载有很大影响,100%取代率再生混凝土试件偏压极限荷载比普通混凝土试件要低 20%左右。混凝土强度相同时,掺与不掺膨胀剂的 GFRP 管约束试件极限荷载均比钢管约束试件极限荷载要低。不掺膨胀剂时,GFRP 管约束普通混凝土试件极限荷载比钢管约束普通混凝土试件极



(a) 钢管约束再生混凝土柱



(b) GFRP管约束再生混凝土柱

图 2 试件破坏状态

Fig. 2 Failure Appearances of Specimens

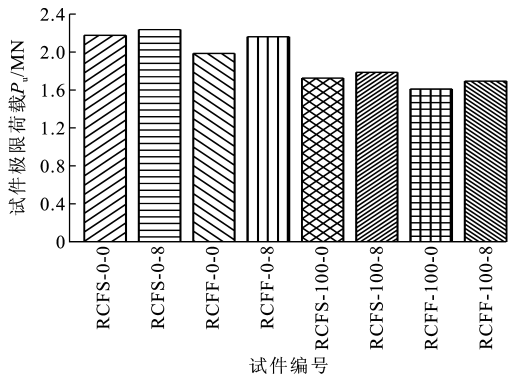


图 3 试件极限荷载

Fig. 3 Ultimate Loads of Specimens

限荷载低 8.8%，GFRP 管约束 100%取代率再生混凝土试件极限荷载比钢管约束 100%取代率再生混凝土试件极限荷载低 6.7%。掺膨胀剂时，GFRP 管约束普通混凝土试件极限荷载比钢管约束普通混凝土试件极限荷载低 3.4%，GFRP 管约束 100%取

代率再生混凝土试件极限荷载比钢管约束 100%取代率再生混凝土试件极限荷载低 5.2%。

2.3 膨胀剂对试件极限荷载影响

从图 3 中可以看出，膨胀剂掺量为 8%的试件极限荷载均比不掺膨胀剂的试件要高。对于普通混凝土试件，膨胀剂掺量为 8%时，钢管约束试件极限荷载比不掺膨胀剂时高 2.7%，GFRP 管约束试件极限荷载比不掺膨胀剂时高 8.8%。对于 100%取代率再生混凝土试件，膨胀剂掺量为 8%时，钢管约束试件极限荷载比不掺膨胀剂时高 3.5%，GFRP 管约束试件极限荷载比不掺膨胀剂时高 5.2%。上述分析说明，相对钢管约束试件而言，膨胀剂对 GFRP 管约束试件的极限荷载提高程度更大。对于钢管约束试件，膨胀剂对再生混凝土试件的影响要比普通混凝土试件大；对于 GFRP 管约束试件，膨胀剂对普通混凝土试件的影响要比再生混凝土试件大。

2.4 轴向应变

试件荷载-轴向应变曲线如图 4 所示。参与不掺膨胀剂情况下，GFRP 管约束试件的变形能力均比钢管约束试件的大。GFRP 是各向异性材料，其环向强度与钢管的屈服强度接近，但轴向强度只有钢管的 1/5 左右。在偏心受压情况下，试件受拉或受压侧的 GFRP 管比钢管先破坏，因此 GFRP 管约束试件的极限荷载要比钢管约束试件的低。同时 GFRP 管的弹性模量比钢管小，因此 GFRP 管约束试件的变形能力要比钢管约束试件大。100%取代率再生混凝土试件的变形能力均比普通混凝土试件大。不掺膨胀剂时，钢管约束普通混凝土试件与钢管约束 100%取代率再生混凝土试件的变形能力相差较大，而 GFRP 管约束普通混凝土试件与 GFRP 管约束 100%取代率再生混凝土试件的变形能力相差较小。膨胀剂掺量为 8%时情况则相反，钢管约束普通混凝土试件与钢管约束 100%取代率再生混凝土试件的变形能力相差较小，而 GFRP 管约束普通混凝土试件与 GFRP 管约束 100%取代率再生混凝土试件的变形能力相差较大。

2.5 承载力计算

2.5.1 钢管约束再生混凝土偏心受压柱

《钢管混凝土结构技术规程》(CECS 28: 2012)[11]中钢管混凝土承载力 N_{su} 的计算方法为

$$N_{su} = \varphi_c A_c f_c (1 + 2.0 \xi)$$
$$\xi = \frac{A_a f_a}{A_c f_c}$$

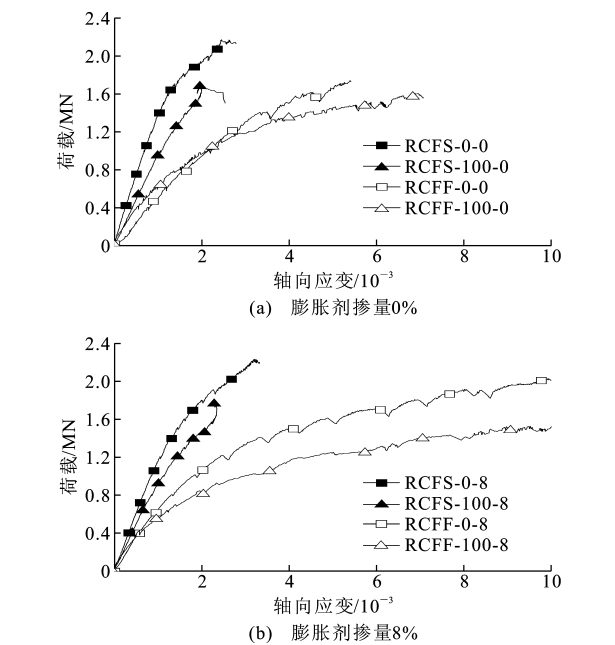


图 4 试件荷载-轴向应变曲线

Fig. 4 Load-axial Strain Curves of Specimens

式中: φ_e 为考虑偏心率影响的承载力折减系数,经计算取 0.60; ξ 为钢管混凝土的套箍系数; A_s 为钢管横截面面积; A_c 核心混凝土横截面面积; f_a 为钢管抗拉强度; f_c 为核心混凝土轴心抗压强度。

根据该计算方法计算所得钢管约束再生混凝土偏心受压柱的承载力如表 4 所示。结果表明根据 CECS 28:2012 计算方法计算所得钢管约束再生混凝土柱偏心受压承载力偏于安全。

表 4 钢管约束试件承载力

Tab. 4 Bearing Capacity of Specimens

Confined by Steel Tube

试件编号	ξ	N_{Su}/kN	
		计算值	试验值
RCFS-0-0	0.633	1 783	2 177
RCFS-0-8	0.710	1 696	2 236
RCFS-100-0	0.823	1 610	1 726
RCFS-100-8	0.941	1 524	1 787

2.5.2 GFRP 管约束再生混凝土偏心受压柱

对于 GFRP 管约束再生混凝土偏心受压柱的承载力计算,目前还没有规范给出明确的计算方法。Bisby 等^[12]依据极限平衡理论提出的 FRP 约束混凝土承载力 N_{Fu} 的计算方法为

$$N_{Fu} = \varphi_e A_c f_c (1 + 1.31 \xi')$$
$$\xi' = \frac{A_m f_h}{A_c f_c}$$

式中: φ_e 经计算取 0.65; ξ' 为 FRP 的约束效应系数; A_m 为 FRP 管横截面面积; f_h 为 FRP 的环向抗拉

强度。

根据该计算方法计算所得 GFRP 管约束再生混凝土偏心受压柱的承载力如表 5 所示。结果表明根据该计算方法计算所得 GFRP 管约束再生混凝土偏心受压柱承载力与试验结果较为接近。

表 5 GFRP 管约束试件承载力

Tab. 5 Bearing Capacity of Specimens

Confined by GFRP Tube

试件编号	ξ	N_{Fu}/kN	
		计算值	试验值
RCFF-0-0	0.792	1 814	1 986
RCFF-0-8	0.889	1 721	2 161
RCFF-100-0	1.030	1 606	1 611
RCFF-100-8	1.178	1 534	1 694

3 结 语

- (1)配合比相同时,钢管和 GFRP 管约束 100% 取代率再生混凝土试件偏心受压极限荷载比普通混凝土试件低 20% 左右。
- (2)混凝土强度相同时,GFRP 管约束试件偏心受压极限荷载比钢管约束试件低,但掺入膨胀剂可以减小二者之间的差距。
- (3)掺入膨胀剂可以提高试件偏心受压极限荷载,且膨胀剂对 GFRP 管约束试件的作用比钢管约束试件大。
- (4)对于钢管约束试件,膨胀剂对再生混凝土试件的影响要比普通混凝土试件大,对于 GFRP 管约束试件,膨胀剂对普通混凝土试件的影响要比再生混凝土试件大。
- (5)GFRP 管约束试件的变形能力比钢管约束试件大,100% 取代率再生混凝土试件的变形能力比普通混凝土试件大。
- (6)钢管和 GFRP 管约束再生混凝土偏心受压柱承载力可分别参考《钢管混凝土结构技术规程》和 Bisby 等提出的计算方法进行计算。

参考文献:

References:

[1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工程出版社,2008.

XIAO Jian-zhuang. Recycled Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2008.

[2] 吴 波,刘 伟,刘琼祥,等. 薄壁钢管再生混合短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(8): 22-28.

- WU Bo, LIU Wei, LIU Qiong-xiang, et al. Axial Behavior of Thin-walled Steel Stub Columns Filled with Demolished Concrete Segment/Lump[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 22-28.
- [3] 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 Jian-zhuang, YANG Jie, HUANG Yi-jie, et al. Experimental Study on Recycled Concrete Confined by Steel Tube Under Axial Compression[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 92-98.
- [4] XIAO J Z, LI J B, ZHANG C. Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Under Uniaxial Loading[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1187-1194.
- [5] XIAO J Z, HUANG Y J, YANG J, et al. Mechanical Properties of Confined Recycled Aggregate Concrete Under Axial Compression [J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 591-603.
- [6] HUANG Y J, XIAO J Z, ZHANG C. Theoretical Study on Mechanical Behavior of Steel Confined Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 76: 100-111.
- [7] 陈宗平, 李启良, 张向冈, 等. 钢管再生混凝土偏压柱受力性能及承载力计算[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 72-80.
CHEN Zong-ping, LI Qi-liang, ZHANG Xiang-gang, et al. Mechanical Behavior and Bearing Capacity Calculation of Recycled Aggregate Concrete-filled Circular Steel Tube Columns Under Eccentric Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 72-80.
- [8] 陈宗平, 郑述芳, 李启良, 等. 方钢管再生混凝土长柱偏心受压承载性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 21-29.
CHEN Zong-ping, ZHENG Shu-fang, LI Qi-liang, et al. Experimental Study on Behavior of Recycled Aggregate Concrete Filled Square Steel Tubular Long Columns Under Eccentric Compression Loading[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9): 21-29.
- [9] 肖建庄, 杨洁. 玻璃纤维增强塑料约束再生混凝土轴压试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(12): 1586-1591.
XIAO Jian-zhuang, YANG Jie. On Recycled Concrete Confined by GFRP Tube Under Axial Compression [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(12): 1586-1591.
- [10] 王振波, 刘飞, 华竹君, 等. 膨胀剂对钢管再生混凝土柱轴压性能影响的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(1): 44-46.
WANG Zhen-bo, LIU Fei, HUA Zhu-jun, et al. Influence of Expansive Agent on Recycled Concrete Filled Steel Tube Columns Under Axial Compression[J]. China Concrete and Cement Products, 2014(1): 44-46.
- [11] CECS 28:2012, 钢管混凝土结构技术规程[S].
CECS 28:2012, Technical Specification for Concrete-filled Steel Tubular Structures[S].
- [12] BISBY L, RANGER M. Axial-flexural Interaction in Circular FRP-confined Reinforced Concrete Columns [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(9): 1672-1681.