

钢管再生混凝土柱抗震性能与损伤评价

黄一杰¹, 肖建庄^{1,2}

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以再生粗骨料取代率、混凝土强度为主要参数, 完成了 6 个钢管再生混凝土柱试件的低周反复试验, 研究了其破坏形态和滞回特性, 分析其承载力、刚度退化、延性、耗能能力、破坏形态等抗震性能。结果表明: 钢管再生混凝土柱具有良好的抗震性能; 试件的耗能能力、延性、滞回特性随着再生粗骨料取代率、混凝土强度的改变而略有变化; 考虑粘结滑移与否对试件的抗震性能影响很小; 钢管再生混凝土柱极限承载力受再生粗骨料取代率的影响并不明显。最后, 提出了基于 Miner 原理的改进损伤评估模型, 通过对比表明该模型能较好地反映钢管再生混凝土柱的抗震损伤水平, 与试验结果符合良好。

关键词: 钢管再生混凝土; 再生粗骨料取代率; 抗震性能; 粘结滑移; 损伤指标

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

Seismic Behavior and Damage Assessment of Recycled Aggregate Concrete-filled Steel Tube Columns

HUANG Yijie¹, XIAO Jianzhuang^{1,2}

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper presents a low frequency cyclic loading test for six recycled concrete-filled steel tube (RCFS) columns. The main parameters in this study include the recycled coarse aggregate (RCA) replacement percentage and the strength of core concrete. The bearing capacity, stiffness degradation, ductility, energy dissipation capacity and failure pattern of columns with different RCA replacement percentage are experimentally studied. Research findings indicate that the RCFS columns exhibit fine seismic behavior. The energy dissipation ability, ductility and hysteresis performance change slightly with the variation of the RCA replacement percentage and concrete strength. It is also figured out that

the bond-slip has little effect on the seismic behavior of the RCFS columns, and the RCA replacement percentage does not influence the bearing capacity of confined recycled concrete columns obviously. Finally, an improved damage assessment model which is based on the Miner principle is developed. The damage level of RCFS columns is better reflected by this model, and the analysis results are in accordance with the test ones.

Key words: recycled aggregate concrete-filled steel tube column; recycled coarse aggregate replacement percentage; seismic behavior; bond-slip effect; damage index

再生混凝土作为一种新型环保建筑材料, 其强度发展^[1]、弹性模量、收缩、徐变^[2]等性能都与普通混凝土有一定的差异。为改善再生混凝土较差的性能, 将再生混凝土与钢管结合, 形成钢管再生混凝土(RCFS), 是一种良好的改性方法。由于钢管的约束作用, 使得再生混凝土与外界隔离, 改善了其耐久性。二者的组合有效地发挥了两种材料的优点, 互补二者不足, 成为一种有效的结构形式。

目前, 已有国内外相关学者研究了钢管再生混凝土构件的静力性能。吴波等^[3]、肖建庄等^[4]研究了钢管再生混凝土的轴压力学性能。结果表明: 竖向荷载作用下钢管再生混凝土构件的承载力与变形能力与普通混凝土试件相似, 较素再生混凝土试件都有明显提高, 且试件的承载力与变形能力随着再生粗骨料取代率的增加而降低。

但是, 目前对钢管再生混凝土柱抗震性能的研究较少^[5], 未有针对钢管再生混凝土构件在地震作用下损伤评估模型。本文从滞回耗能出发, 研究了钢管再生混凝土柱在低周反复荷载作用下的耗能和累积损伤问题; 并基于文献和试验分析, 得出了钢管再生混凝土构件损伤评估模型, 为钢管再生混凝土结

收稿日期: 2011-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(51178340), 上海市科委项目(10231202000)

作者简介: 黄一杰(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为再生混凝土力学性能。E-mail: 302huangyijie@163.com

通讯作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为再生混凝土材料与结构。E-mail: jzx@tongji.edu.cn

区出现了较为明显的“象腿”现象,钢管的鼓曲随反复加载方向的变化而改变,产生的塑性变形也逐渐增加;当加载至接近破坏时,钢管鼓曲位置处出现环向水平开裂,受此影响试件的承载力快速下降;最终,柱子根部钢管混凝土在压弯共同作用下发生破坏,试件典型的破坏状态如图 3 所示。

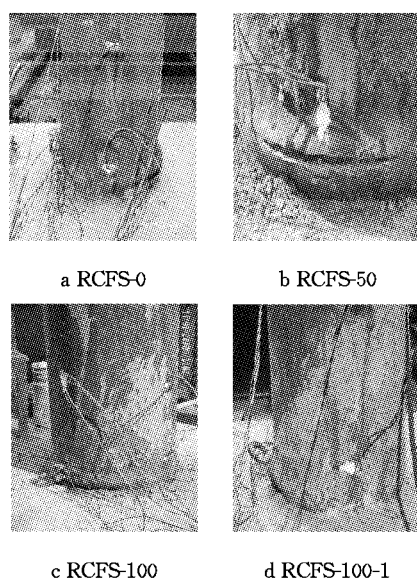


图 3 钢管再生混凝土柱典型破坏模式

Fig. 3 The failure pattern of RCFS columns

2.2 特征荷载

试件的计算屈服荷载(P_y),峰值荷载(P_{max})与

极限荷载(P_u)见表 3. 其中试件 P_y 大小按能量等值法来确定,能量等值法是利用等效骨架线与实际骨架线包围面积相等的原则来确定试件屈服点. 极限荷载是试件承载力降低为峰值点 85%时所对应的值. 由表 3 得出: 近似核心混凝土强度条件下, RCFS-0 的屈服荷载比 RCFS-70、RCFS-100、RCFS-100-1 分别高 3.7%、2.2%、2.4%,而 RCFS-30 与 RCFS-50 的屈服荷载分别比 RCFS-0 高 2.1%与 0.9%。

在近似同强混凝土条件下, RCFS-0 峰值荷载比 RCFS-70、RCFS-100 和 RCFS-100-1 分别高 6.0%、6.2%和 6.5%; RCFS-30 峰值荷载比 RCFS-50 高 1.8%. 由表 3 可得出,钢管再生混凝土柱的峰值荷载随着再生粗骨料取代率的增加而有所降低. 这主要是因为随再生粗骨料含量的增加,再生混凝土中存在的老界面、新老砂浆之间的薄弱区增加等因素引起的. 对比 RCFS-100 与 RCFS-100-1 的峰值荷载,其差值很小,说明对于本文条件考虑滑移与否对试件的峰值荷载没有明显影响。

2.3 特征位移

试件的计算屈服位移(Δ_y)、峰值位移(Δ_{max})和极限位移(Δ_u)见表 3. 用位移延性系数($\mu = \Delta_u / \Delta_y$)与极限位移转角($R_u = \Delta_u / H$)来反映结构延性的大小. H 为柱子的名义高度。

表 3 钢管再生混凝土柱特征位移与特征荷载

Tab. 3 The characteristic displacement and characteristic load of RCFS columns

试件	P_y/kN	P_{max}/kN	P_u/kN	Δ_y/mm	Δ_{max}/mm	Δ_u/mm	μ	R_u
RCFS-0	56.76	69.05	58.69	10.86	24.15	52.83	4.87	1/24.23
RCFS-30	57.93	68.83	58.51	10.93	24.20	52.46	4.80	1/24.40
RCFS-50	57.26	67.63	57.49	10.99	23.33	53.26	4.85	1/24.45
RCFS-70	54.71	65.15	55.38	10.73	26.77	51.28	4.78	1/24.96
RCFS-100	55.50	65.00	55.25	11.89	26.79	54.13	4.55	1/23.65
RCFS-100-1	55.44	64.82	55.10	11.84	26.79	54.12	4.57	1/23.65

由表 3 得出: 钢管混凝土柱的延性系数均高于 4.5, 表明钢管再生混凝土柱具有良好的变形性能与延性. 由表可以得出, 延性随再生粗骨料取代率的增加而相应降低. RCFS-100 与 RCFS-100-1 相比, μ 值近似相等, 这说明考虑滑移与否对柱的延性没有明显影响。

6 个试件的极限位移转角在 1/23.6~1/25 之间(表 3), 均大于规范关于框架结构弹塑性层间位移角限值 1/50 的规定(《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)). 本次试验轴压比为 0.3, 表明在较低轴压比条件下, 试件具有良好的弹塑性变形性能. 试件变形曲线如图 4 所示, 变形整体呈弯曲型特征. 位

移计 D6、D7 在加载期间的数值大小, 其值较小可忽略不计。

3 抗震性能分析

3.1 滞回曲线

钢管再生混凝土柱典型的水平力—侧移($P-\Delta$)滞回曲线如图 5 所示. 对比各图可得出:

(1) 试件屈服之前, 滞回曲线加载和卸载所包围的范围狭长, 试件耗能较少, 试件屈服之后, 滞回曲线逐渐偏向水平方向, 滞回环包围的面积逐渐增大, 耗能能力增加。

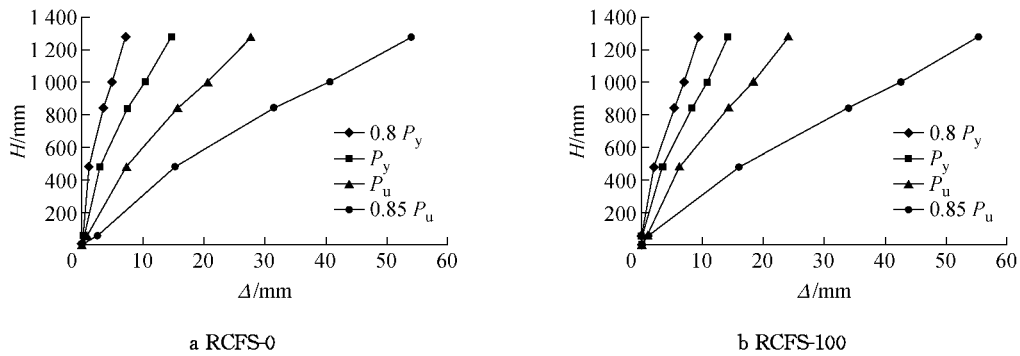


图4 钢管再生混凝土柱侧移曲线

Fig.4 The lateral displacement curve of RCFS columns

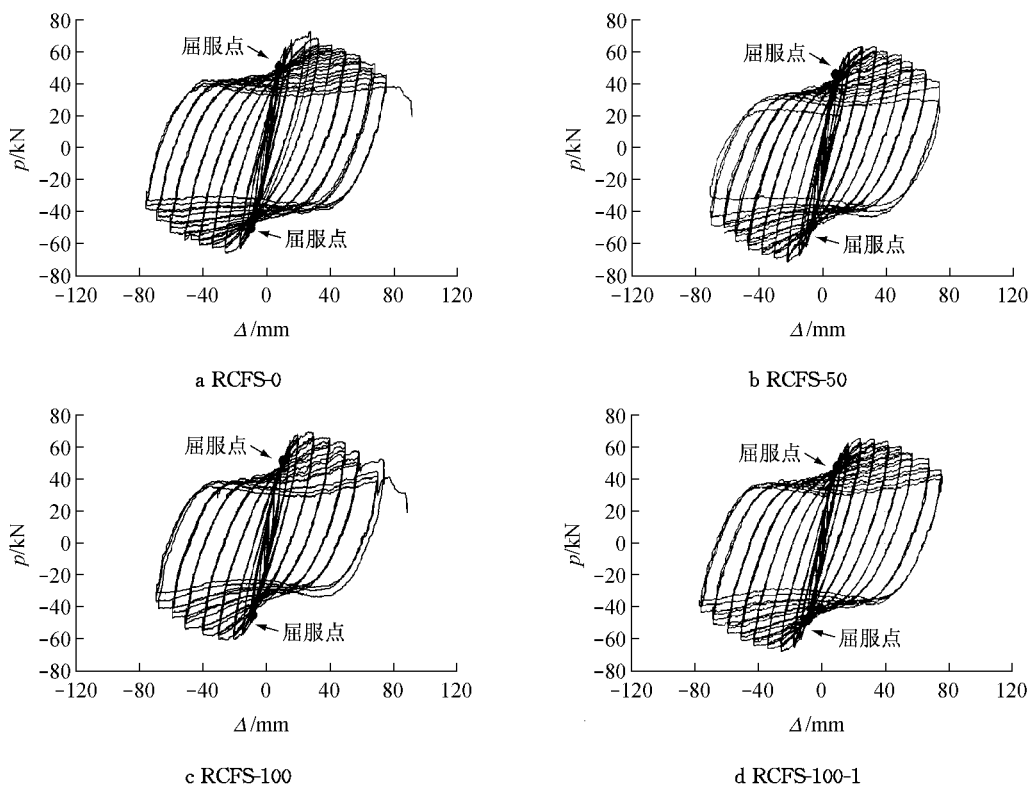


图5 钢管再生混凝土柱滞回曲线

Fig.5 The hysteresis loop of RCFS columns

(2) 钢管再生混凝土柱的滞回曲线形状基本相同,都呈明显纺锤形,没有发生“捏拢”现象,表明钢管再生混凝土柱具有良好的耗能性能.再生粗骨料取代率和考虑粘结滑移与否对曲线的形状影响不大.

(3) 随着循环次数的增加,耗能能力不断增强.在同一加载阶段,后一次循环达到的荷载值均低于前一次,反映了构件损伤累积的影响.

3.2 刚度退化

钢管再生混凝土柱的刚度退化曲线如图6所示.图中, k_s 为钢管再生混凝土柱刚度.由图6可得出:钢管再生混凝土柱与钢管普通混凝土柱的初始

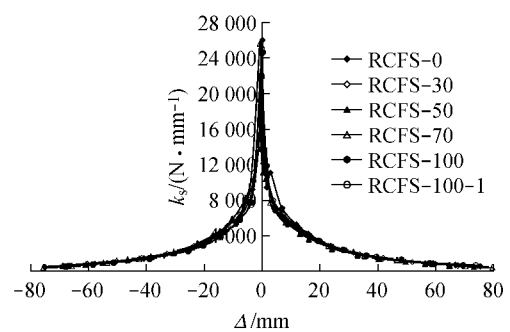


图6 钢管再生混凝土柱刚度退化

Fig.6 The rigidity degeneration of RCFS columns

刚度相差不大,其退化趋势基本接近,再生粗骨料取代率对刚度的退化没有明显影响.考虑粘结滑移的

影响, RCFS-100 初始刚度较 RCFS-100-1 高。

3.3 耗能能力

常用等效粘滞阻尼比(h_e)来判断试件的耗能能力, h_e 定义为滞回环包围面积与外力与位移乘积之比。钢管再生混凝土柱的等效粘滞阻尼比如图 7 所示,从图中可得出:试件屈服之后,耗能能力非线性递增。最终所有试件的 h_e 均超过 0.2,表明钢管再生混凝土柱有良好的耗能能力。RCFS-0 的耗能要优于其他试件,但相差不超过 10%。试件的耗能能力随着再生粗骨料含量的增加有降低的趋势。考虑粘结滑移作用对试件耗能影响不大。

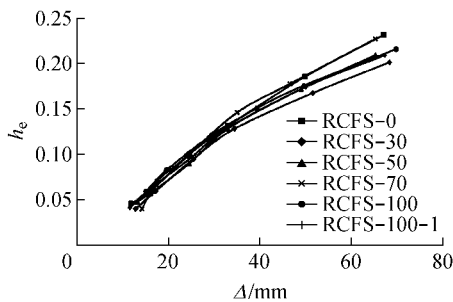


图 7 等效粘滞阻尼比

Fig. 7 The equivalent viscous damping ratio

4 累积滞回耗能及损伤评估分析

如何反映再生混凝土对试件抗震性能的全过程影响,较为有效的方法即建立一套针对钢管再生混凝土试件的损伤评估模型。目前,国内外对钢管混凝土构件在拟地震作用下的累积损伤性能研究很少^[6-8],而对钢管再生混凝土构件的损伤性能研究目前尚无相关资料。

4.1 钢管混凝土滞回耗能能力分析基础

4.1.1 钢管混凝土单循环耗能

根据文献[9-10]的结论并结合文献[6-8]的计算公式,钢管混凝土构件在同幅低周反复加载下,其每半个滞回环的平均耗能与构件的屈服荷载和承受的位移幅值有关,其大小可按式(1)~(2)计算:

$$E_{ch} = P_y \Delta, \quad \omega \geq 2 \quad (1)$$

式中: E_{ch} 为每半周循环所耗能的大小; P_y 为屈服荷载; Δ 为侧移值; ω 为试件的位移比, $\omega = \Delta / \Delta_y$ 。

文献[9]中钢管混凝土每半周循环耗能计算式如下(亦即本文试验结果):

$$E_{ch} = P_y \Delta_y \left[\left(0.5 + 2.34 \frac{\Delta_f}{\Delta_y} \right) (\omega - 1) + \left(0.78 - 1.54 \frac{\Delta_f}{\Delta_y} \right) \right], \quad 1.5 \leq \omega < 2 \quad (2)$$

式中, Δ_f 是屈服时试件的弯曲位移,对于以弯曲破坏为主的钢管混凝土构件,忽略钢管与混凝土之间的滑移,参考文献[11]的结果, Δ_f / Δ_y 近似取为 0.9。

对于 $1 \leq \omega < 1.5$ 条件下钢管再生混凝土柱的平均耗能,本文采用近似假定的计算方法。考虑到钢管再生混凝土构件在达到屈服之前,钢管与核心混凝土之间的组合作用并不明显,试件性能与同含钢率下普通钢筋混凝土试件接近,因此,参考文献[8]的计算方法,钢管混凝土构件在刚达到屈服时的每个循环的耗能定为 $E_{cw} = 0.5 P_y \Delta_y$ 。其余数值中间内插。钢管未屈服之前,构件耗能可近似计算如下:

$$E_{cw} = (0.77\omega - 0.22) P_y \Delta_y \quad (3)$$

d, t 为钢管的外径与壁厚;钢管混凝土其径厚比 d/t 满足一定条件才能发挥组合作用,参考文献[6-10],式(1)~(3)适用范围为: $20 \leq d/t \leq 70$; $20 \leq f_{cu} \leq 50$; 试件长径比为 $4 \leq L/d \leq 20$ 。

4.1.2 钢管混凝土循环次数

依据文献[6]、[8]的试验结果,钢管混凝土构件的循环次数主要与位移的延性有关,但根据文献[7]的结果,钢管混凝土构件低周反复循环次数与试件的偏移率(δ)、钢管的径厚比以及核心混凝土强度有关。总结以上文献数据,钢管混凝土构件在低周反复荷载作用下,偏移率 δ 与试件低周反复半循环次数 N_f 之间的关系如下:

$$\delta = 20 \cdot [\ln(d/t)]^{0.2309} \cdot (N_f)^{-0.1519 \cdot \ln(d/t)} \quad (4)$$

$$\delta = \frac{\Delta}{H} \times 100\% \quad (5)$$

式中, H 是试件的高度。

4.1.3 钢管混凝土累计耗能能力

确定了钢管混凝土试件每半个滞回环的平均耗能(E_{ch})与半循环次数(N_f),即可得出在某一位移下钢管混凝土构件在达到极限状态时累计耗能大小如下:

$$E_{cz} = N_f \cdot E_{ch} \quad (6)$$

式(6)计算的钢管混凝土柱的累计耗能值(E_{cz})与文献[8]的试验结果(E_{cz}^*)对比如图 8 所示。公式计算值与试验值符合良好,可用于预测累计耗能值。

4.2 基于耗能的累积损伤模型和损伤评估

在低周反复荷载作用下,通常将破坏状态表示成累积损伤指数(D)和极限状态(γ)的形式,对于发生累积损伤破坏的结构或构件其最终破坏状态满足下式:

$$D \geq \gamma \quad (7)$$

由文献[10]可知:钢管混凝土试件累计损伤模型须考虑位移和加载次数的影响。参考文献[12]认

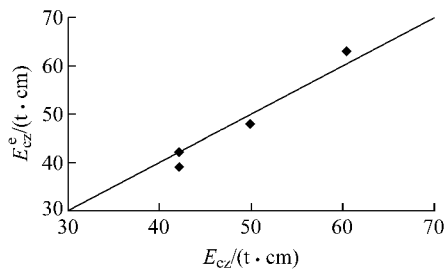


图8 计算耗能能力与试验值之比

Fig.8 The comparison between the calculated results and the experiment results

为:按照加载次序,结构构件在任意变形下的损伤是线性累积的,但每一次循环对结构构件造成的损伤按照基于耗能的疲劳寿命模型进行计算.本文基于

Miner 的线性累积损伤理论所建立的钢管再生混凝土试件累积损伤模型如下:

$$D = \sum_{j=1}^n D_j = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{E_c^i}{E_c} \right) \right) \quad (8)$$

式中: D_j 表示在第 j 个加载位移循环下的损伤指标; E_c^i 表示在第 j 个加载位移下第 i 次循环的耗能. $D \geq 1$, 表示试件已倒塌或完全损坏.

通过式(6)~(8),并结合本次试验数据,可得到钢管再生混凝土柱在达到极限位移时所对应的损伤指标大小见表4.由表4可得出,当到达极限荷载点时,所有试件并未有完全破坏或倒塌(即 $D \geq 1$),这也与文献[13]的结论相近.为此,钢管混凝土最终破坏可取为荷载下降20%时的状态.

表4 不同侧移下损伤指标

Tab.4 The damage index under different lateral displacements

侧移	损伤指标 D					
	RCFS-0	RCFS-30	RCFS-50	RCFS-70	RCFS-100	RCFS-100-1
$H/100$	0.065	0.066	0.064	0.071	0.094	0.067
$H/50$	0.163	0.166	0.167	0.213	0.225	0.175
$H/25$	0.832	0.803	0.929	0.844	0.842	0.997
Δ_u	0.917	0.862	1.020	0.846	0.946	1.060
$H/20$	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000

钢管再生混凝土柱的损伤指标见表4.对于混凝土结构或构件的损伤情况,对比文献[14]对损伤状态的定义并结合表4中的数据可得,柱子的侧移小于 $H/50$ 时,构件处于轻微损坏状态;但当侧移达到 $H/25$ 时,试件已进入严重损坏或临近倒塌的状态.另外,在相同侧移与同核心混凝土强度下,试件的损伤随着再生粗骨料取代率的增加而增大.

5 结论

(1)钢管再生混凝土柱的破坏过程和破坏形态与钢管普通混凝土柱相类似,均有屈服—鼓曲—极限—破坏4个阶段.最终破坏时钢管再生混凝土柱发生明显的塑性变形,外钢管鼓曲,内部核心混凝土压碎.

(2)在混凝土同强度条件下,钢管再生混凝土柱承载力随再生粗骨料含量增加有降低趋势;另外,试件的延性和耗能能力也有随之降低,但相差不大.钢管再生混凝土的刚度以及退化趋势与钢管普通混凝土相似.

(3)试件的承载力和整体抗震性能在考虑滑移作用的影响前后并没有发生明显变化.

(4)基于改进的 Miner 损伤评估模型对钢管再生混凝土构件抗震性能进行损伤评估.结果表明:试

件的损伤指数随着再生粗骨料取代率的增加而略有增大.

参考文献:

- [1] Ravindrarajah R S, Tam C T. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate[J]. Magazine of Concrete Research, 1985, 37(130): 29.
- [2] Hansen T C, Boegh E. Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete[J]. ACI Journal, 1985, 82(5): 648.
- [3] 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.
WU Bo, LIU Wei, LIU Qiongxiang, 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.
- [4] 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.
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.
- [5] YANG Youfu, HAN Linhai, ZHU Lintao. Experimental performance of recycled aggregate concrete-filled circular steel tubular columns subjected to cyclic flexural loadings [J]. Advances in Structural Engineering, 2009, 12(2): 183.

(下转第354页)