

方钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究

张向冈^{1,2}, 陈宗平^{1,3}, 薛建阳¹, 苏益声^{1,3}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 河南理工大学 土木工程学院, 河南焦作 454000;
3. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西南宁 530004)

摘要: 为研究方钢管再生混凝土柱的抗震性能, 设计并制作了 6 个试件, 对其进行拟静力试验。考虑再生粗骨料取代率和轴压比 2 个变化参数, 观察试件受力的全过程和破坏形态, 分析试件的滞回曲线、骨架曲线、延性、耗能性能和刚度退化等, 并采用相关规程计算低周反复荷载作用下方钢管再生混凝土柱的压弯承载力。试验研究和计算结果表明: 试件破坏过程以及破坏形态均与普通钢管混凝土柱试件相似, 主要表现为试件根部钢管的鼓曲破坏; 试件的滞回曲线比较饱满, 滞回曲线的形状从梭形发展到弓形; 在试验选取的再生粗骨料取代率参数范围内, 试件的滞回曲线受其影响不大; 试件的平均位移延性系数接近 3; 破坏时等效黏滞阻尼系数介于 0.323 ~ 0.360 之间; 建议对采用规程 GJB 4142—2000 计算的反复荷载作用下方钢管再生混凝土柱的压弯承载力乘以 0.92 的折减系数; 对采用规程 DBJ 13-51—2003 计算的反复荷载作用下方钢管再生混凝土柱的压弯承载力乘以 1.13 的扩大系数。

关键词: 方钢管再生混凝土; 再生粗骨料取代率; 拟静力试验; 抗震性能指标; 承载力计算

中图分类号: TU398.9 TU317.1 文献标志码: A

Experimental study on seismic behavior of recycled aggregate concrete filled square steel tube columns

ZHANG Xianggang^{1,2}, CHEN Zongping^{1,3}, XUE Jianyang¹, SU Yisheng^{1,3}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To study the seismic behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubular (RACFST) columns, six specimens with different replacement rates of recycled coarse aggregate and axial compression ratios were tested under the cyclic reversed loading. The entire loading process and failure mode were observed, the hysteretic curve, skeleton curve, ductility, dissipation capacity and stiffness degradation were analyzed, and then the ultimate compression and flexural capacities under cyclic reversed loading were calculated using existing theories. It is shown that the failure process and failure mode of RACFST columns are similar to those of concrete filled steel tubular columns, in which the circular steel tube at the bottom is buckled. All the hysteretic curves which change from bow shape to arch shape are plump, and within the parameters selected in test, the influence of replacement rate on hysteretic curves is little. The average displacement ductility factor is close to 3.0. The equivalent viscous damping coefficients at failure point are between 0.323 and 0.360. It is suggested that design formulas with the consideration of a reduction factor 0.92 and an amplification factor 1.13 in GJB 4142-2000 and DBJ 13-51-2003 respectively can be used to design the compression and flexure strength of RACFST columns under cyclic reversed loading.

Keywords: recycled aggregate concrete filled square steel tube; replacement rate of recycled coarse aggregate; quasi-static test; seismic behavior index; bearing capacity calculation

基金项目: 国家自然科学基金项目(51268004) 广西科技攻关项目(桂科攻 12118023-3) 广西自然科学基金项目(2012GXNSFAA053203), 广西理工科学实验中心重点项目(LGZX201102)。

作者简介: 张向冈(1986—) 男, 河南夏邑人, 工学博士。E-mail: xgzhang1986@126.com

通信作者: 陈宗平(1975—) 男, 广西玉林人, 工学博士, 教授。E-mail: zpchen@gxu.edu.cn

收稿日期: 2013 年 7 月

0 引言

近年来,再生混凝土技术^[1]的研究与应用使建筑垃圾资源化利用增加了一条有效途径。再生混凝土(recycled aggregate concrete, RAC)是指利用废弃混凝土破碎加工而成的再生集料,部分或全部代替天然集料制作而成的新混凝土。但由于RAC中很大一部分原料来源于已拆除的混凝土强度等级较低的既有建筑,且再生骨料在破碎过程之中,骨料内部出现了大量的微裂缝或裂纹,相应地由再生骨料配制出的混凝土抗压强度不高,弹性模量也较低,致使RAC一般应用于路基回填等非承重或承重较小的结构之中。因此,将RAC推广应用于承重结构中,将是科研工作者面临的一个重要课题^[2]。

钢管混凝土结构因承载力高、抗震性能好等优点而被广泛应用于单层和多层工业厂房、高层和超高层建筑以及设备构架、支架等各种承重结构中^[3]。而钢管再生混凝土(recycled aggregate concrete filled steel tube, RACFST)结构^[4]是将RAC灌入钢管内部而形成的新型组合结构。目前,国内外学者对钢管再生混凝土结构的研究^[5-6]主要集中在静力受压性能方面。在抗震性能方面,文献[7]采用梁式加载方法对15根方钢管再生混凝土柱进行了抗震性能试验,研究了再生粗骨料取代率和轴压比等参数对试件抗震性能的影响,结果表明:方钢管再生混凝土柱的抗震性能与普通钢管混凝土相似,方钢管再生混凝土柱表现出较高的延性和水平承载力。文献[8]采用大尺度(最大直径为80~150mm)废弃混凝土块体作为RAC组成材料,通过15根薄壁方钢管再生混合柱在定常轴力和水平往复荷载作用下的拟静力试验,研究了废弃混凝土取代率、钢管壁厚和轴压比等参数对试件抗震性能的影响,结果表明:中、低轴压比薄壁方钢管再生混合柱应用于抗震结构是可行的。

本文作者在课题组前期研究^[9-11]的基础上,以普通粒径的再生粗骨料为RAC组成成分,以取代率和轴压比为变化参数,采用悬臂柱式加载方法,开展方钢管再生混凝土柱试件的抗震性能试验研究,分析试件的滞回曲线、骨架曲线、延性、耗能和刚度退化等,并采用相关规程计算试件的压弯承载力。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计了6个试件,考虑了再生粗骨料取代率 γ 和轴压比 n 共2个变化参数。试件具体设计参数见表1。其中,取代率单参数变化试件分别为S-1、

S-2、S-3、S-4 相应的取代率分别为0%、30%、70%和100%;轴压比单参数变化试件分别为S-4、S-5、S-6,相应的轴压比分别为0.8、0.7和0.6。轴压比变化通过采用不同强度等级混凝土实现,即轴压比 $n = N/(f_c A_c)$,其中,保持各试件在试验过程中所施加的轴向力 N 恒定,改变RAC的粗骨料取代率从而改变RAC轴心抗压强度 f_c ;含钢率 $\alpha = A_s/A_c$, A_s 为外部钢管的截面面积, A_c 为核心RAC的截面面积;套箍系数 $\theta = A_s f_y/(A_c f_c)$, f_y 为实测的钢管屈服强度;试件长细比 $\lambda = 2\sqrt{3}L_0/B$, L_0 为计算高度,上部钢筋混凝土加载端由两块刚度较大的钢板夹紧,从而实现水平荷载的传递,加载端近似为刚体,在反复加载过程中,加载端弯曲变形可忽略不计,故计算高度取为 L (850mm), B 为方钢管外边长,取为150.9mm,方钢管实测管壁厚度为5.0mm。试件几何尺寸及构造如图1所示。所有试件的几何尺寸及构造保持一致,并在钢管表面喷涂黄色油漆,目的是便于在钢管表面划线定位,以及观察钢管开始鼓曲时,油漆的起皮和脱落,易于发现鼓曲部位。

表1 试件设计参数
Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	γ / %	n	α	θ	λ	L / mm	B / mm
S-1	0	0.8	0.15	1.61	19.51	850	150.9
S-2	30	0.8	0.15	1.62	19.51	850	150.9
S-3	70	0.8	0.15	1.56	19.51	850	150.9
S-4	100	0.8	0.15	1.62	19.51	850	150.9
S-5	100	0.7	0.15	1.62	19.51	850	150.9
S-6	100	0.6	0.15	1.62	19.51	850	150.9

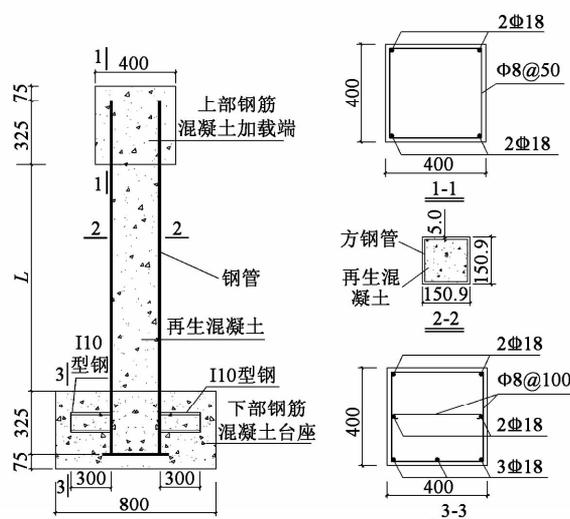


图1 试件几何尺寸及构造

Fig. 1 Physical dimension and construction of specimens

试验采用Q235级直焊缝方形钢管,P.O 42.5R级水泥,普通天然河砂,城市自来水以及天然粗骨料和再生粗骨料。再生粗骨料和天然粗骨料采用同一

筛网筛分,最大粒径为 20 mm 均为连续级配的碎石。再生粗骨料的取代率 γ 以 0% 为基准,有 0%、30%、70%、100% 共 4 种,混凝土试配强度等级为 C40。对于不同取代率的 RAC,保持水泥、砂子成分不变,在粗骨料总质量相等的前提下,改变天然粗骨料与再生粗骨料的质量组成比例。RAC 的各组分含量见表 2。

表 2 RAC 各组分含量
Table 2 Constituent content of RAC

取代率 γ / %	水胶比	砂率 / %	组分含量 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)				
			水	水泥	砂	天然粗骨料	再生粗骨料
0	0.47	33.6	204.8	435.7	564.3	1115.2	0.0
30	0.47	33.6	204.8	435.7	564.3	780.6	334.6
70	0.47	33.6	204.8	435.7	564.3	334.6	780.6
100	0.47	33.6	204.8	435.7	564.3	0.0	1115.2

1.2 材料性能

根据 JCJ 53—1992《普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法》^[12],对试验随机预留的天然碎石粗骨料和再生碎石粗骨料进行物理性能试验,实测其基本性能指标见表 3。

表 3 粗骨料基本物理性能

粗骨料类型	粒径 / mm	表观密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	吸水率 / %	含水率 / %
天然	5~20	2722	1435	0.05	0.00
再生	5~20	2655	1270	3.16	1.82

根据 GB/T 228—2002《金属材料: 室温拉伸方法》^[13],分别对 3 个钢材试样进行拉伸试验。实测钢管抗拉强度为 478.3 MPa,弹性模量为 2.18×10^5 MPa,泊松比为 0.272,屈服应变为 1.865×10^{-3} 。由于钢管材料属于硬钢,在材料拉伸过程中,没有发现明显的屈服点,依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[14],取抗拉强度 f_u 的 85% 作为条件屈服点,即钢管屈服强度取为 406.5 MPa。

针对 RAC 不同的取代率,制作 3 个立方体标准试块和 3 个棱柱体标准试块,与试件同条件养护,参照 GB 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法》^[15]进行抗压强度试验。实测的材性指标见表 4。

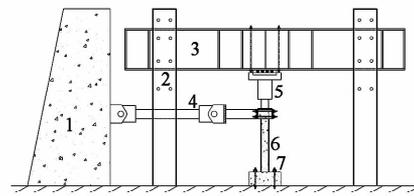
表 4 RAC 实测材料性能

Table 4 Measured mechanical properties of RAC				
γ / %	f_{cu} / MPa	f_c / MPa	f_c/f_{cu}	E_c / MPa
0	46.8	37.1	0.79	3.72×10^4
30	50.8	36.9	0.73	3.84×10^4
70	53.8	38.2	0.71	3.89×10^4
100	50.1	36.8	0.73	3.67×10^4

注: E_c 、 f_{cu} 和 f_c 分别为 RAC 的弹性模量、立方体抗压强度和轴心抗压强度。

1.3 加载装置

试验在广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室完成。试验加载装置如图 2 所示。



注: 1. 反力墙; 2. 竖向反力钢架; 3. 反力钢梁; 4. 推拉电液伺服作动器; 5. 1 500 kN 油压千斤顶; 6. 试件; 7. 钢压梁。

(a) 加载装置示意



(b) 加载现场

图 2 加载装置

Fig. 2 Test setup

试验时,首先通过 1 500 kN 油压千斤顶在柱顶施加恒定竖向荷载。按照 JGJ 101—1996《建筑抗震试验方法规程》^[16]的规定,水平加载采用力和位移联合控制的方式,试件屈服前,采用荷载控制分级加载,每级荷载增量为 5 kN,直至柱底钢管达到屈服应变,试件屈服,每级荷载循环 1 次;试件屈服后,采用位移控制,取屈服位移 Δ_y 的倍数为级差进行控制加载,为便于同级循环位移下试验数据的对比分析,参考第 1 个加载试件的屈服位移,将所有试件的屈服位移统一取为 10 mm,每级位移循环 3 次,直至荷载下降到峰值荷载的 85% 以下时停止加载。水平荷载加载制度见图 3。

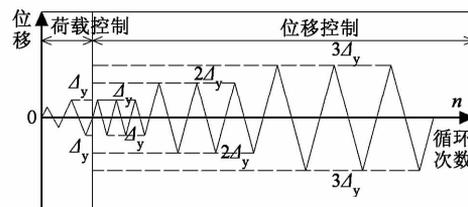


图 3 水平荷载加载制度

Fig. 3 Loading protocol of horizontal load

1.4 测量装置

试验测量装置主要为位移测量装置和应变采集系统。柱顶水平位移由推拉电液伺服作动器自身所配置的位移传感器测得,钢管应变片布置见图 4。

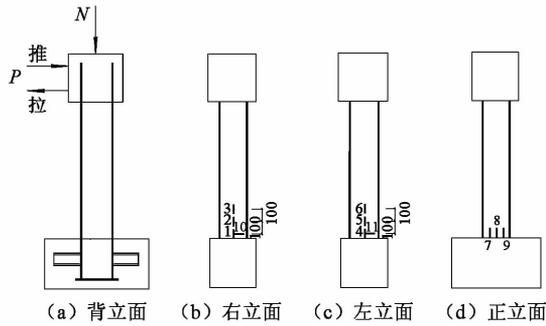


图4 试验测量装置

Fig. 4 Test measurement equipment

2 宏观破坏特征分析

对6个方钢管再生混凝土柱试件进行低周反复加载试验,观察到其整体破坏特征如下:

1) 如图5所示,试件破坏过程及破坏形态与普通钢管混凝土柱试件相似,主要表现为试件根部钢管的鼓曲破坏,试件侧面形成一个明显的鼓曲波形。

2) 试验结束后,人工切割外部钢管,观察核心RAC的破坏形态。由图5g可见,沿柱高范围内,均未发现横向裂缝,RAC的破坏形态主要表现为底部RAC被压碎,破坏范围主要集中在距离试件根部20 cm内。

3) 试件的方钢管均采用直焊缝焊接,在整个加载过程,焊缝均没有开裂。

4) 取代率单参数变化试件S-1~S-4的塑性铰区域平均高度为4.5~5.9 cm,喷漆脱落范围中心的平均高度为8.3~11.7 cm;轴压比单参数变化试件S-4~S-6的塑性铰区域平均高度为4.8~5.9 cm,喷漆脱落范围中心的平均高度为8.8~11.7 cm。所有试件钢管底部的塑性铰区域贯穿整个钢管横截面。总体上,喷漆脱落范围中心平均高度约为平均塑性铰区域高度的2倍。

5) 在卸载以及反向加载时,鼓曲波逐渐被拉平,

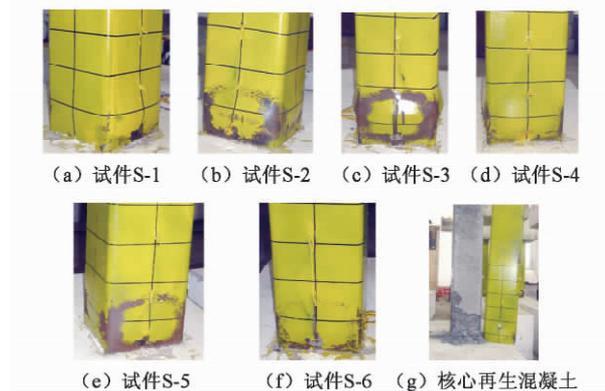


图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

同时受压侧钢管鼓曲波越来越明显。加载结束时,钢管角部鼓曲不大,且钢管四面均向外发生鼓曲,钢管底部形成较为明显的压弯塑性铰,塑性铰区域布满整个钢管截面,在与推拉方向垂直的试件侧面上,钢管的鼓曲程度明显大于与推拉方向平行的试件侧面。

6) 试件破坏前,钢管与核心RAC黏结性能良好;试件破坏后,通过金属锤子敲击试件钢管表面,发现试件从钢管底部开始出现了较为严重的脱黏现象,脱黏区高度距试件根部13~64 cm不等。

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线

试验实测的 $P-\Delta$ 滞回曲线如图6所示,其中, P 表示水平荷载, Δ 表示柱端水平位移,符号“□”表示试件屈服荷载点,“○”表示试件峰值荷载点,“△”表示试件破坏荷载点。由图6可知:

1) 在荷载控制加载阶段,所有试件的滞回曲线呈线性变化,且重合成一条直线,初始弹性刚度无明显变化,荷载控制加载结束时,没有发现明显的残余变形,试件基本处于弹性工作状态。

2) 在位移控制加载阶段,荷载有部分提高,达到峰值荷载之后,荷载开始下降,水平荷载卸载为零时,位移不再为零,此时试件已产生残余变形,说明在低周反复加载的过程中,与荷载相比,位移存在一定的滞后,且随着循环位移的增加,残余变形越来越大。每级位移循环3次所得到的滞回曲线逐渐发生倾斜,且向位移轴靠拢,反映了试件承载力和刚度的逐级退化,损伤逐级增加。

3) 所有试件的滞回曲线均比较饱满,形状从梭形发展到弓形,捏缩现象不显著,滞回性能稳定。

4) 对于取代率单参数变化试件,其滞回曲线与普通钢管混凝土(试件S-1)基本相似,表明取代率对试件的滞回曲线影响不大。

5) 对于轴压比单参数变化试件,随着轴压比的增加,各级循环位移下的滞回环饱满,其耗能能力增强,这是由于轴压比较大时,承载力较高,滞回环的面积较大, $P-\Delta$ 滞回曲线较为饱满。

3.2 骨架曲线

部分试件由于在试件制作过程之中,钢管的垂直度存在一定偏差,致使滞回曲线及骨架曲线并不对称,为了便于说明,对部分有偏差试件取骨架曲线在正负两个方向绝对值的平均值。图7为试件 $P-\Delta$ 骨架曲线,由图7可知:

1) 各试件的骨架曲线基本相似,包括上升段、峰值点以及下降段。试件骨架曲线下降段比较平稳,后期变形能力强,位移延性较好,其形状与未发生局

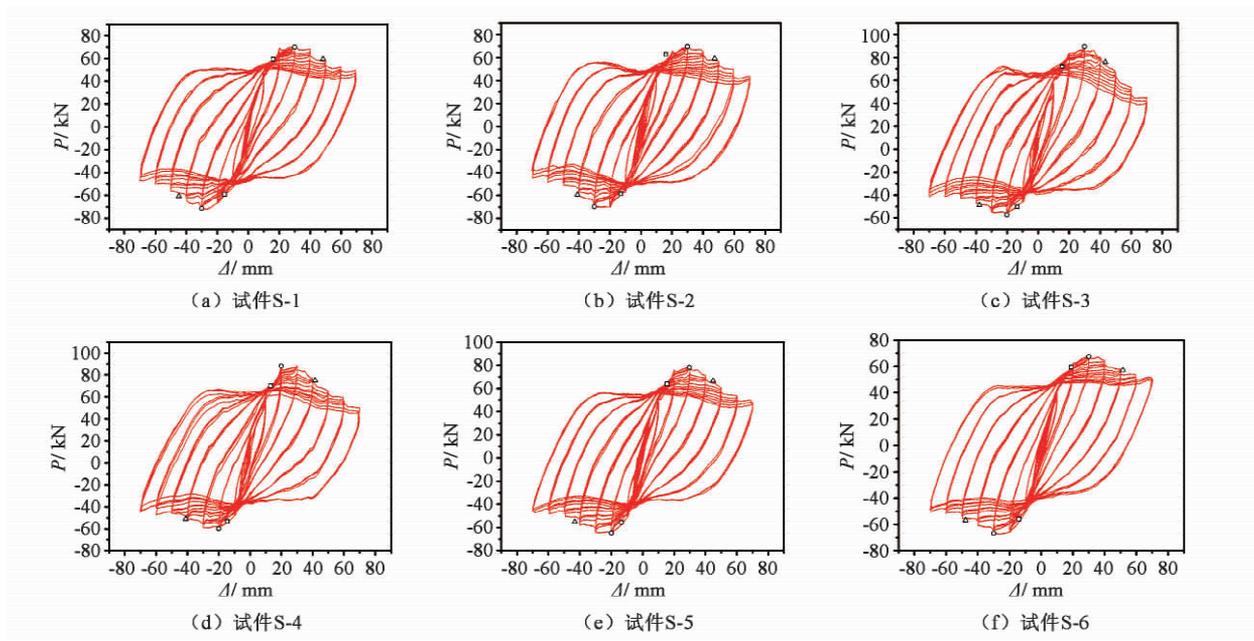
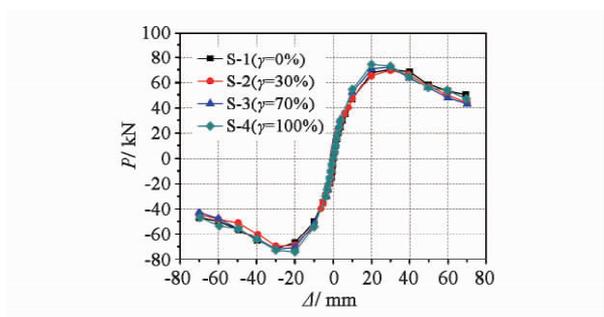
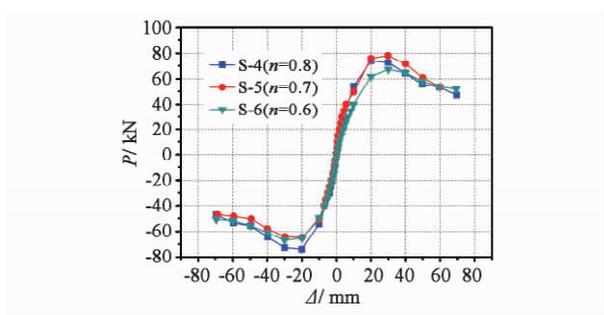


图6 方钢管再生混凝土试件滞回曲线
Fig. 6 Hysteretic loops of RACFST specimens



(a) 取代率单参数变化试件



(b) 轴压比单参数变化试件

图7 方钢管再生混凝土试件骨架曲线
Fig. 7 Skeleton curves of RACFST specimens

部失稳的钢结构类似^[3],这主要是由于钢管对RAC的约束作用,使其处于三向受压状态,RAC的抗压强度和变形能力得到提高;同时,RAC的支撑作用,延缓或阻止了钢管的内凹屈曲,钢管的稳定承载力得到提高。钢管与核心RAC之间协同工作,保证了两种材料性能的充分发挥。

2) 对于取代率单参数变化试件,骨架曲线形状相似,弹性段基本重合,表明取代率在0~100%之间

变化时,试件初始弹性刚度受其影响不大;达到峰值荷载时,各曲线有小幅度的偏离,但在下降段,曲线又基本重合。总体上,在钢管内部填充废弃混凝土并不会削弱试件的下降段刚度。

3) 对于轴压比单参数变化试件,骨架曲线的下降段表现不一,试件S-4轴压比最大,下降段比较陡峭,破坏位移较小,变形能力较试件S-5、S-6减小。

3.3 位移延性系数

采用能量等值法计算试件屈服位移 Δ_y ,进而计算位移延性系数 μ , $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, Δ_u 为极限位移,取为峰值荷载 P_m 下降到85%时对应的位移值。通过能量等值法确定初始屈服点的示意图见图8。计算求得的位移延性系数及各特征值见表5。

从表5中可以看出:

1) 试件的平均延性系数接近3,试件的变形性能良好。

2) 对于取代率单参数变化试件,屈服荷载、峰值荷载和破坏荷载以及相应的位移比较接近,位移延性系数变化不大,取代率对特征点荷载、位移没有较大的影响。

3) 对于轴压比单参数变化试件,随着轴压比的增加,试件的屈服荷载、峰值荷载和破坏荷载均有所提高,试件的屈服位移、峰值位移和破坏位移均有所降低。

3.4 耗能能力

采用等效黏滞阻尼系数 h_e 来评价试件的耗能能力,其表达式为

$$h_e = S_{(ABC+CD A)} / (2\pi S_{(\triangle OBE + \triangle ODF)}) \quad (1)$$

表5 试件各特征点荷载、位移实测值

Table 5 Measured load and displacement at characteristic points

试件编号	加载方向	屈服点		峰值点		破坏点		μ
		P_y /kN	Δ_y /mm	P_m /kN	Δ_m /mm	P_u /kN	Δ_u /mm	
S-1	正向	59.47	16.04	70.12	30.01	59.60	48.44	3.02
	反向	59.12	15.22	71.44	30.03	60.72	44.78	2.94
	平均	59.30	15.63	70.78	30.02	60.16	46.61	2.98
S-2	正向	62.96	16.06	69.55	29.88	59.12	47.39	2.95
	反向	58.41	13.01	69.54	30.01	59.11	40.73	3.13
	平均	60.69	14.54	69.55	29.95	59.12	44.06	3.04
S-3	正向	72.08	15.58	89.43	30.01	76.02	43.33	2.78
	反向	50.07	13.37	57.31	19.98	48.71	37.81	2.83
	平均	61.08	14.48	73.37	25.00	62.37	40.57	2.80
S-4	正向	70.12	13.19	88.06	19.99	74.85	41.49	3.15
	反向	53.05	14.64	59.79	20.03	50.82	41.10	2.81
	平均	61.59	13.92	73.93	20.01	62.84	41.30	2.98
S-5	正向	63.85	15.45	78.01	29.85	66.31	44.85	2.90
	反向	55.50	13.37	64.75	19.88	55.04	43.22	3.23
	平均	59.68	14.41	71.38	24.87	60.68	44.04	3.07
S-6	正向	59.34	18.88	67.20	30.02	57.12	51.50	2.73
	反向	55.86	13.92	66.79	30.01	56.77	47.66	3.42
	平均	57.60	16.40	67.00	30.02	56.95	49.58	3.08

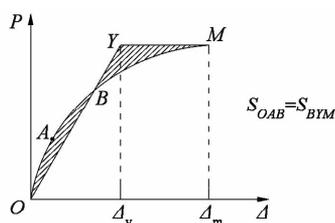


图8 能量等值法示意图

Fig. 8 Diagram of energy equivalent method

其中: $S_{(ABC+CDA)}$ 表示滞回环面积, $S_{(\triangle OBE+\triangle ODF)}$ 表示滞回环峰值点对应的三角形面积 如图9所示。

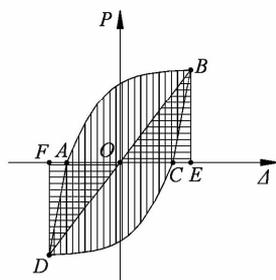


图9 h_e 计算示意

Fig. 9 Calculation diagram of h_e

h_e 取每级循环位移下第1次循环的等效黏滞阻尼系数如图10所示,可见随着循环位移的增加,试件的 h_e 逐渐增大,加载结束时, h_e 达到了0.4以上,说明低周反复荷载作用下,方钢管再生混凝土柱具有良好的耗能能力。

为便于对比分析,表6给出了各试件特征点对应的 h_e ,可见:

1) 所有试件屈服时 h_e 介于0.126~0.178之间,

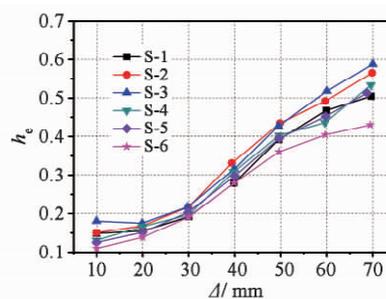


图10 试件 h_e - Δ 曲线

Fig. 10 Curves of h_e versus Δ

峰值时 h_e 介于0.167~0.197之间,破坏时 h_e 介于0.323~0.360之间。而普通钢筋混凝土柱破坏时的等效黏滞阻尼系数一般为0.1~0.2,仅相当于方钢管再生混凝土试件屈服时的 h_e 。

2) 相对试件S-1,试件S-2、S-3、S-4的 h_e 有小幅度的降低,总体上,再生粗骨料取代率的增加并没有改变试件耗能能力。

表6 试件各特征点实测 h_e

Table 6 Measured h_e at characteristic points

试件编号	h_e		
	屈服点	峰值点	破坏点
S-1	0.153	0.192	0.358
S-2	0.159	0.192	0.358
S-3	0.178	0.197	0.324
S-4	0.145	0.167	0.323
S-5	0.137	0.176	0.338
S-6	0.126	0.191	0.360

3.5 刚度退化

采用割线刚度来表示试件的刚度退化,各级加载第 i 次循环的割线刚度表达式为

$$K_i = (|+F_i| + |-F_i|) / (|+X_i| + |-X_i|) \quad (2)$$

其中, $|+F_i|$ 、 $|-F_i|$ 分别表示试件第 i 次循环的正、负最大荷载绝对值, $|+X_i|$ 、 $|-X_i|$ 分别表示试件第 i 次循环的正、负最大位移绝对值。

对刚度-位移进行归一化分析,见图 11。其中, K_e 为试件弹性阶段初始刚度, K_{j1} 为第 j 级加载位移下,第 1 次循环的割线刚度。从图 11 可见:

1) 对于取代率单参数变化试件,刚度退化曲线基本重合。其他试件较试件 S-1 刚度退化速率略大,这是因为其他试件的再生粗骨料表面附着一部分水泥砂浆,降低了 RAC 弹性模量,在低周反复荷载作用下,加速了 RAC 开裂或被压碎的趋势。但总体上,不同再生粗骨料取代率下,方钢管再生混凝土试件的刚度退化规律基本一致。

2) 对于轴压比单参数变化试件,随着轴压比的增加,试件的刚度退化速率逐渐增大。这主要与试验后期越来越明显的二阶效应有关。

表 7 给出了方钢管再生混凝土试件各阶段特征刚度实测值。其中, K_e 为弹性刚度, K_y 为屈服刚度, K_m 为峰值刚度, K_u 为破坏刚度。由表 7 可见:加载初期,试件的刚度较大;达到屈服点时,刚度锐降,仅

表 7 试件刚度特征点实测值

Table 7 Measured stiffness of specimens at characteristic point

试件 编号	$K_e /$ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	$K_y /$ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	$K_m /$ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	$K_u /$ ($\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$)	$K_y /$ K_e	$K_m /$ K_e	$K_u /$ K_e
S-1	14.15	3.79	2.36	1.29	0.27	0.17	0.09
S-2	13.16	4.18	2.32	1.34	0.32	0.18	0.10
S-3	14.20	4.22	2.94	1.54	0.30	0.21	0.11
S-4	13.35	4.43	3.69	1.52	0.33	0.28	0.11
S-5	12.27	4.14	2.87	1.38	0.34	0.23	0.11
S-6	8.40	3.51	2.23	1.15	0.42	0.18	0.09

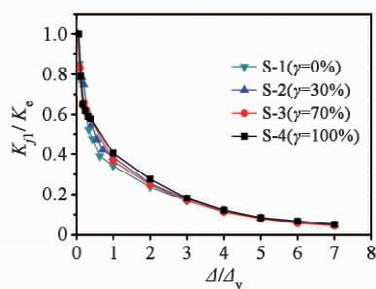
为 $0.3 K_e$ 左右,达到峰值及破坏点时,刚度降低缓慢,峰值刚度基本维持在 $0.2 K_e$ 左右,破坏刚度基本维持在 $0.1 K_e$ 左右。

4 压弯承载力计算

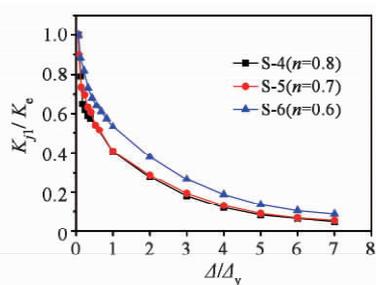
目前,国内外对钢管混凝土结构的研究较为成熟,并制订了一系列的相关规范或规程,国内如 CECS 254: 2012^[17], GJB 4142—2000^[18], DBJ 13-51—2003^[19], CECS 159: 2004^[20]; 国外如美国 AISC-LRFD^[21], 英国 BS 5400^[22] 以及欧洲 EN 1994-1-1: 2004^[23] 等。研究^[24]表明:低周反复荷载作用下试件的骨架曲线与静力加载下荷载-变形曲线较为接近。为了考察现有的静力加载下方钢管混凝土构件的受压承载力计算方法是否适用于低周反复荷载作用下方钢管再生混凝土试件,文中基于试验实测数据,利用上述各规范或规程,计算试件的受压承载力,并将实测结果 $N_{u,t}$ 与计算结果 $N_{u,c}$ 进行对比分析,对比结果及统计特征值见表 8、9。由表 8、9 可见:

1) 规程 CECS 159: 2004、BS 5400、EN 1994-1-1: 2004 计算结果比试验实测结果大很多,设计偏于不安全。而规程 CECS 254: 2012 计算结果比试验实测结果小,变化幅度达到 24%,设计偏于安全。

2) 关于规范 GJB 4142—2000、DBJ 13-51—2003 和 AISC-LRFD 计算值与试验结果的对比,由于国内设计人员使用国外设计规程的诸多不便,建议 AISC-LRFD 不宜用于反复荷载作用下方钢管再生混凝土柱压弯承载力的设计计算。规程 GJB 4142—2000 计算值与试验值偏离幅度达 8%,设计稍显不安全;规程 DBJ 13-51—2003 计算值与试验值偏离幅度达 13%,设计稍显保守。建议对采用规程 GJB 4142—2000 计算反复荷载作用下方钢管再生混凝土柱的压弯承载力乘以 0.92 的折减系数;对采用规程 DBJ 13-51—2003 计算反复荷载作用下方钢管再生混凝土柱的压弯承载力乘以 1.13 的扩大系数。两个修正系数分别小于 1 和大于 1,这是因为规程 DBJ 13-51—2003



(a) 取代率单参数变化试件



(b) 轴压比单参数变化试件

图 11 试件刚度-位移归一化曲线

Fig. 11 Uniformization analysis of stiffness versus displacement

表8 试件 $N_{u,j}$ 与 $N_{u,e}$ 对比结果Table 8 Contrast result between $N_{u,j}$ and $N_{u,e}$

试件 编号	$N_{u,j}$ kN	CECS 254:2012		GJB 4142—2000		DBJ 13-51—2003		CECS 159:2004		AISC-LRFD		BS 5400		EN 1994-1-1:2004	
		$N_{u,e}$ kN	$N_{u,j}/N_{u,e}$	$N_{u,e}$ kN	$N_{u,j}/N_{u,e}$										
S-1	62.84	48.73	1.29	66.12	0.95	53.42	1.18	99.54	0.63	51.65	1.22	121.39	0.52	74.70	0.84
S-2	60.16	47.24	1.27	64.08	0.94	52.95	1.14	95.96	0.63	50.28	1.20	123.98	0.49	75.04	0.80
S-3	59.12	46.78	1.26	63.18	0.94	53.04	1.11	95.52	0.62	49.24	1.20	125.93	0.47	75.23	0.79
S-4	62.37	47.43	1.31	64.37	0.97	52.99	1.18	96.37	0.65	50.50	1.24	124.04	0.50	74.97	0.83
S-5	60.68	49.66	1.22	67.47	0.90	53.56	1.13	101.54	0.60	53.85	1.13	108.54	0.56	90.94	0.67
S-6	56.95	51.90	1.10	70.58	0.81	53.90	1.06	106.73	0.53	57.21	1.00	93.03	0.61	106.48	0.53

注:采用规程 CECS 254:2012、GJB 4142—2000、DBJ 13-51—2003 和 CECS 159:2004 计算承载力时,混凝土抗压强度取为轴心抗压强度实测值;采用 AISC-LRFD 和 EN 1994-1-1:2004 计算承载力时,混凝土抗压强度取为圆柱体抗压强度实测值,由立方体抗压强度实测值乘以 0.8 换算得到;采用 BS 5400 计算承载力时,混凝土抗压强度取为三轴抗压强度实测值,由立方体抗压强度实测值通过相关公式^[22]换算得到。

表9 试件 $N_{u,j}/N_{u,e}$ 的统计特征值Table 9 $N_{u,j}/N_{u,e}$ demographic characteristics of specimens

$N_{u,j}/N_{u,e}$ 统计特征值	CECS 254:2012	GJB 4142—2000	DBJ 13-51—2003	CECS 159:2004	AISC-LRFD	BS 5400	EN 1994-1-1:2004
平均值	1.24	0.92	1.13	0.61	1.16	0.52	0.74
方差	0.006 1	0.003 4	0.002 0	0.001 6	0.008 0	0.002 8	0.014 4
变异系数	0.062 6	0.063 7	0.039 5	0.066 5	0.077 0	0.100 8	0.161 2

和 GJB 4142—2000 均把钢管混凝土看作是一种组合材料,将各种受力状态下的钢管混凝土构件统一在组合性能指标上,并采用统一的设计公式来进行承载力计算。其设计公式是基于大量的试验结果,通过数据回归和总结得到的,但两者得到的设计公式并不一致。由于本文的试件数量较少,并不能给出具有代表性的修正系数。

5 结论

1) 试件破坏过程及破坏形态均与普通钢管混凝土柱类似,主要表现为试件根部钢管的鼓曲破坏,试件前后两侧所形成的一个鼓曲波形非常明显。

2) 所有试件的滞回曲线均比较饱满,其形状从梭形发展到弓形,捏缩现象不显著,滞回曲线稳定。

3) 方钢管再生混凝土柱滞回曲线与普通钢管混凝土柱基本相似,取代率分别为 0%、30%、70% 和 100% 时,试件的滞回曲线受再生粗骨料的取代率影响不大。

4) 试件的平均位移延性系数接近 3,试件的变形性能良好。

5) 试件屈服时 h_e 介于 0.126 ~ 0.178 之间;达到峰值荷载时 h_e 介于 0.167 ~ 0.197 之间;破坏时 h_e 介于 0.323 ~ 0.360 之间,相对普通钢筋混凝土柱破坏时的等效黏滞阻尼系数一般为 0.1 ~ 0.2 有大幅提高。

6) 建议对采用规程 GJB 4142—2000 计算反复荷

载作用下方钢管再生混凝土柱的压弯承载力乘以 0.92 的折减系数;对采用规程 DBJ 13-51—2003 计算反复荷载作用下方钢管再生混凝土柱的压弯承载力乘以 1.13 的扩大系数。

参 考 文 献

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 1-9. (XIAO Jianzhuang. Recycled aggregate concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 1-9. (in Chinese))
- [2] Abdelgadir A, Gholamreza F. Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(8): 555-563.
- [3] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007: 1-30. (HAN Linhai. Steel tube concrete structure: theory and practice[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 1-30. (in Chinese))
- [4] Yang Youfu, Han Linhai. Experimental behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(12): 1310-1324.
- [5] 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. (in Chinese))

- [6] Konno K, Sato Y, Uedo T. Mechanical property of recycled concrete under lateral confinement [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, 20 (3): 287-292.
- [7] Yang Youfu, Zhu Lintao. Recycled aggregate concrete filled steel SHS beam-columns subjected to cyclic loading [J]. Steel and Composite Structures, 2009, 9 (1): 19-38.
- [8] 吴波 张金锁 赵新宇. 薄壁方钢管再生混合柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 38-48. (WU Bo, ZHANG Jinsuo, ZHAO Xinyu. Tests on seismic behavior of square thin-walled steel tubular columns filled with demolished concrete blocks [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9): 38-48. (in Chinese))
- [9] 陈宗平 柯晓军 薛建阳,等. 钢管约束再生混凝土的受力机理及强度计算[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 70-77. (CHEN Zongping, KE Xiaojun, XUE Jianyang, et al. Mechanical performance and ultimate bearing capacity calculation of steel tube confined recycled coarse aggregate concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 70-77. (in Chinese))
- [10] 张向冈 陈宗平 薛建阳,等. 钢管再生混凝土轴压长柱试验研究及力学性能分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 12-20. (ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Experimental study and mechanical behavior analysis of recycled aggregate concrete filled steel tubular long columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9): 12-20. (in Chinese))
- [11] 张向冈 陈宗平 王讲美,等. 钢管再生混凝土长柱偏压性能研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 331-340. (ZHANG Xiang-gang, CHEN Zong-ping, WANG Jiang-mei, et al. Study on eccentric compression behaviors of recycled aggregate concrete filled steel tubular long columns [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 331-340. (in Chinese))
- [12] JCJ 53—1992 普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. (JCJ 53—1992 Technical requirements and test method of gravel and crushed stone for ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993. (in Chinese))
- [13] GB/T 228—2002 金属材料: 室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002. (GB/T 228—2002 Metallic materials: tensile testing at ambient temperature [S]. Beijing: China Standards Press, 2002. (in Chinese))
- [14] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [15] GB 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (GB 50081—2002 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese))
- [16] JGJ 101—1996 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—1996 Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [17] CECS 254: 2012 实心与空心钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (CECS 254: 2012 Technical specification of hollow and solid concrete-filled steel tubular structures [S]. Beijing: China Planning Press, 1992. (in Chinese))
- [18] GJB 4142—2000 战时军港抢修早强型组合结构技术规程[S]. 北京: 中国人民解放军总后勤部, 2000. (GJB 4142—2000 Technical specifications for early-strength model composite structure used for naval port emergency repair in wartime [S]. Beijing: People's Liberation Army General Logistics Department, 2000. (in Chinese))
- [19] DBJ 13-51—2003 钢管混凝土结构技术规程[S]. 福州: 福建省建设厅, 2003. (DBJ 13-51—2003 Technical specification for concrete-filled steel tubular [S]. Fuzhou: Provincial Department of Construction of Fujian, 2003. (in Chinese))
- [20] CECS 159: 2004 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004. (CECS 159: 2004 Technical specification for structures with concrete filled rectangular steel tube members [S]. Beijing: China Planning Press, 2004. (in Chinese))
- [21] AISC-LRFD Load and resistance factor design specification for structural steel buildings [S]. 2nd ed. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1999.
- [22] BS 5400 Steel, concrete and composite bridges: part 5: code of practice for design of composite bridges [S]. London: British Standards Institutions, 2005.
- [23] EN 1994-1-1: 2004 Design of composite steel and concrete structure: part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2004.
- [24] 朱伯龙. 结构抗震试验 [M]. 北京: 地震出版社, 1989: 134-141.