

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201801023

型钢再生混凝土高轴压比柱抗震性能试验

曹万林, 郭晏利, 乔崎云, 谢翔

(城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124)

摘要: 为研究3种不同再生粗骨料取代率的足尺型钢再生混凝土柱试件在高轴压比及较低轴压比下的抗震性能差异, 本文通过40 000 kN多功能试验机对4个柱试件进行了低周反复荷载试验. 观察分析各试件的受力性能及破坏特征, 得到不同设计变量对试件的水平承载力、滞回性能、骨架曲线、耗能、变形及刚度等的影响规律. 结果表明: 4个柱试件的最终破坏形态均为弯剪破坏; 各试件滞回曲线较饱满, 试件耗能性能较好; 再生粗骨料取代率增大, 会使试件的变形能力有所降低, 但对试件水平承载力及刚度退化影响不大; 轴压比增大, 试件的水平承载力、刚度及耗能性能提高, 但承载力下降加快, 刚度退化加剧, 延性降低. 总体来看, 型钢再生混凝土柱在高轴压比下仍然能保持较好的抗震性能, 可为后续的理论研究及实际工程应用提供依据.

关键词: 型钢再生混凝土柱; 高轴压比; 足尺试件; 低周反复试验; 抗震性能

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)06-0047-09

Experimental study on seismic behavior of steel reinforced recycled concrete columns with high axial compression ratio

CAO Wanlin, GUO Yanli, QIAO Qiyun, XIE Xiang

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering(Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: To study the seismic behaviors of full-scale steel reinforced recycled concrete columns under high axial compression ratio, the columns with three types of recycled coarse aggregate replacement rate under different axial compression ratios were designed, and four specimens were experimented on the 40 000 kN multi-function testing machine under low cyclic reversed loading. The influences of different design variables on horizontal load bearing capacity, hysteretic behavior, skeleton curves, energy dissipation, deformation and stiffness degradation of specimens were obtained after observing the mechanical processes and failure patterns. The results show that the ultimate failure pattern of the four specimens is the bending-shear failure and the hysteresis loop of each column is relatively plump, indicating that the columns show good energy dissipation behavior. The increase of the recycled coarse aggregate replacement rate decreases the deformability, but it has little influence on the bearing capacity and stiffness degradation of the specimens. With the increase of axial compression ratio, the load-bearing capacity, stiffness and energy dissipation behavior of specimens raise, but the stiffness and bearing capacity degradation intensifies and the ductility declines acutely. The steel reinforced recycled concrete columns with high axial compression ratio can still maintain good seismic performance, and this study provides the basis for subsequent theoretical research and practical engineering application.

Keywords: steel reinforced recycled concrete column; high axial compression ratio; full-scale specimen; low cyclic reversed loading test; seismic behavior

以一定掺量再生骨料代替天然骨料制备的再生混凝土^[1]可以节约天然砂石资源,减少废弃混凝土堆放等引起的环境污染,是一种新型绿色混凝土,已成为国内外热点研究方向之一.目前,国内外相关研究^[2-8]发现再生骨料残留水泥基、较大孔隙率、较高吸水率等会导致其制成的再生混凝土及其构件的性能稍差,限制了其应用领域.为有效推广再生混凝土,

可将其应用于钢-混凝土组合结构中,对此,国内学者已做了一些相关研究.文献[9-10]研究了钢管再生混凝土构件在力学性能等方面的改善.文献[11]研究了型钢再生混凝土偏压柱的破坏形式以及再生骨料取代率对其承载力的影响.文献[12-14]已对较小截面型钢再生混凝土柱在不同设计参数下的抗震性能展开了研究,发现各参数对型钢再生混凝土柱承载力等性能的影响规律类似于普通混凝土柱.

型钢混凝土结构由于在混凝土中配置了型钢,与钢筋混凝土结构相比,承载力提高,刚度增

收稿日期: 2018-01-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51438007)

作者简介: 曹万林(1954—),男,教授,博士生导师

通信作者: 乔崎云, qiaoqiyun@bjut.edu.cn

大,延性变好等,已在大跨结构和高层、超高层建筑中广泛应用.本课题结合了型钢与再生混凝土各自的特点,充分利用废旧混凝土设计组合柱,符合高性能且节能环保的理念,具有实际应用价值.此外,位于高层建筑底层的框架柱承受较大轴力,为高轴压比柱,其滞回特性很大程度上决定着整个结构的抗倒塌性能.而目前,型钢再生混凝土构件的抗震性能研究大部分都是低轴压比下的缩尺试验.缩尺试件中型钢尺寸与截面边长的比值小于实际工程构件,试验结果相对于实际工程构件不真实,其次,直接生产出来的再生粗骨料表面包裹着老旧水泥砂浆,而部分缩尺试件所需再生粗骨料粒径较小,需进行缩尺破碎,使得部分骨料表面为天然骨料成分,会使再生混凝土材料本构及其与钢筋黏结-滑移本构和实际工程不符.因此需要补充对高轴压比下足尺试件抗震性能等方面的研究.基于此,本文通过设计试验,对比分析了不同再生粗骨料取代率的型钢再生混凝土柱在高轴压比及较低轴压比下的抗震性能差异.

1 试验概况

1.1 试件设计

本文设计了 4 个型钢再生混凝土柱试件,各相关参数见表 1,实际剪跨比 $\lambda = H/h$,设计轴压比 $n_d = N_d / (f_c A_c + f_a A_a)$,其中, H 为基础顶面至仪器球铰转动中心的距离(柱身高 1 500 mm+柱顶距球铰转动中心的距离 250 mm=1 750 mm), h 为柱截面高度, N_d 为柱的轴向压力设计值, f_c 为混凝土抗压强度设计值, f_a 为型钢屈服强度设计值.4 个柱试件的尺寸完全一致,柱截面为边长 600 mm 的方形截面,柱身高 1 500 mm,柱身纵筋采用 16 根直径 22 mm 的 HRB400 级钢筋,配筋率 1.82%;柱身箍筋采用直径 12 mm、间距 100 mm 的 HPB300 级钢筋,配箍率 1.13%,在柱顶区域箍筋加密,间距为 50 mm.所用型钢为普通热轧 HM 型钢,高 390 mm,宽 300 mm,腹板厚 10 mm,翼缘厚 16 mm,材质等级为 Q345.型钢的面积含钢率为 3.66%.基础梁采用长宽高为 1 800 mm×900 mm×600 mm 钢板(厚 8 mm)围焊箱体内存混凝土形式,其内部用无缝钢管设置了 8 个内径为 52 mm 的孔洞,用于试验时将柱试件与 40 000 kN 多功能电液伺服试验系统的刚性滑板底座用高强螺杆连接.柱中箍筋外表面距柱截面边缘 20 mm,型钢翼缘外侧距柱截面边缘 100 mm,翼缘端部距柱截面边缘 150 mm.试件尺寸及内部配筋见图 1.

1.2 试件制作

在试件制作时,先焊好基础底部及四周的钢板,

将 8 根无缝钢管定位后焊在基础底板上;接着将纵筋和型钢焊在基础梁底部钢板上,再绑扎好基础及柱身钢筋骨架,并用钢筋棒将钢筋骨架顶部和型钢顶部焊在一起;然后将中央开有柱截面大小的方孔的基础顶盖板与基础四周钢板焊接形成基础梁箱体;随后通过方孔先将基础浇筑密实,再支好柱身的模板,浇筑柱身.当混凝土浇筑至柱顶时将焊接的钢筋棒熔断后继续完成浇筑,这样可防止浇筑混凝土时钢筋骨架和型钢的位置错位以及钢筋骨架上部晃动引起的误差.

表 1 试件主要参数

Tab.1 Parameters of specimens

试件编号	再生粗骨料取代率 $r/\%$	柱高/ mm	实际剪跨比 λ	设计轴压比 n_d	试验轴压比 n_t
SRRC1	0	1 500	2.92	0.8	0.46
SRRC2	50	1 500	2.92	0.8	0.46
SRRC3	100	1 500	2.92	0.8	0.47
SRRC4	50	1 500	2.92	0.5	0.29

注: $n_t/n_d = 0.519 + 0.276 / (1 + A_{af} f_c / A_a f_a)$, f_c 、 f_a 分别为混凝土抗压强度、型钢屈服强度实测值.

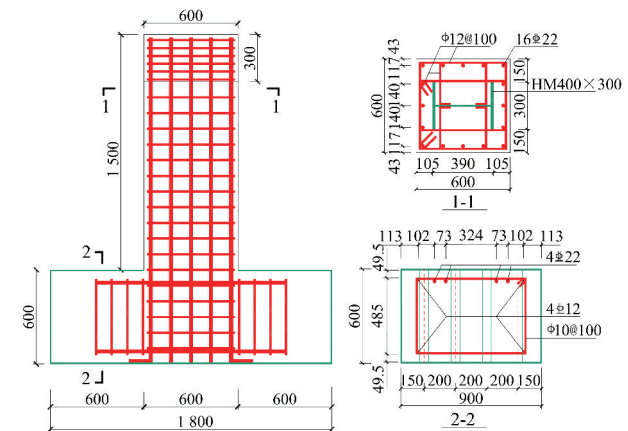


图 1 试件几何尺寸及配筋 (mm)

Fig.1 Geometry dimensions and reinforcement of specimens (mm)

1.3 材料性能

本次试验采用唐山冀东牌 42.5R 级普通硅酸盐水泥配制水胶比为 0.32 的再生混凝土;所用的再生粗骨料为北京市的一个高层建筑物拆除后经一系列工序处理制备得到的,骨料粒径为 5~25 mm,压碎指标为 13%,表观密度为 2 575 kg/m³,吸水率为 3%;天然骨料为连续级配的山碎石和河砂.表 2 为再生混凝土配合比及立方体实测抗压强度平均值,其中理论水为参与水化反应的理论需水量,拌和时的实际用水量需将现场实测的再生粗骨料的含水量及吸水量考虑进去.钢材经材性试验测得的力学性能见表 3.

表 2 再生混凝土配合比及强度

Tab.2 Mix proportion and properties of recycled concrete

再生粗骨 料取代率 $r/\%$	水胶比	材料用量/kg								立方体抗压强度 f_{cu}/MPa
		水泥	粉煤灰	矿粉	天然砂	山碎石	再生粗骨料	理论水	减水剂	
0	0.32	434	54	54	757	926	0	175	10.80	63.75
50	0.32	434	54	54	757	463	463	175	10.80	66.55
100	0.32	434	54	54	757	0	926	175	10.80	60.76

表 3 钢材力学性能

Tab.3 Mechanical properties of steel

钢材种类	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 $E/10^5 \text{ MPa}$	屈服应变 $\epsilon/10^{-6}$	最大力总伸长率 $\delta/\%$
型钢腹板	375.0	562.5	2.06	1820	28.5
型钢翼缘	377.0	565.3	2.06	1830	28.6
$\phi 22$ 纵筋	430.5	621.0	2.00	2153	23.0
$\phi 12$ 箍筋	335.3	552.7	2.10	1597	33.2

1.4 试验加载方案

本次试验采用悬臂式加载,在北京工业大学结构试验中心 40 000 kN 多功能试验机上进行.试验前将两块特制的角钢用螺栓固定在试验机上部竖向加载端板上,然后再用穿过角钢的高强螺栓(水平向)将柱顶夹紧,见图 2,柱顶可绕试验机上部和加载端板相连的球铰转动而不发生水平移动从而实现铰结.试件基础用 8 根高强螺栓固定在试验装置底部可以水平滑动的刚性底座上,水平加载系统通过其对试件施加低周反复荷载;竖向加载系统施加竖向荷载于柱顶.试验装置简图见图 3.根据《建筑抗震试验方法规程》^[15],试验前先进行预加载,调试试验仪器及仪表,然后依据由试验轴压比算得的轴力值施加竖向荷载,当加到指定荷载后持荷,水平加载按照图 4 所示的位移角加载控制,在每级位移角下循环 1 次,直到试件水平荷载下降到峰值荷载的 85% 时,停止试验.其中,位移角 $\theta = \Delta/H$, H 为基础顶面至仪器球铰转动中心的距离(柱身高 1 500 mm+柱顶距球铰转动中心的距离 250 mm=1 750 mm), Δ 为基础顶面的水平位移.

1.5 测点布置

试件位移计布置见图 3,在水平滑动底座、柱基础中部、柱高 300 mm、柱高 600 mm、柱高 900 mm、柱高 1 200 mm 处分别布置拉线位移计,以测定相应水平位移,同时监测基础与滑板底座间是否有滑移及加载过程中柱身水平位移随柱高变化的规律;在柱顶布置百分表以监测柱顶是否有水平位移.此外,在柱底关键受力区域(距基础顶面 50~550 mm)的纵筋、箍筋和型钢翼缘上分别粘贴应变片,在型钢腹板相应位置布置应变花,以获得各测点应变.应变片

(花)编号及具体布置如图 5 所示,纵筋应变片编号 Z1~Z7,箍筋编号 G1~G5,型钢翼缘应变片 X1~X3、X7,型钢腹板应变花编号 X41~43~X61~63.

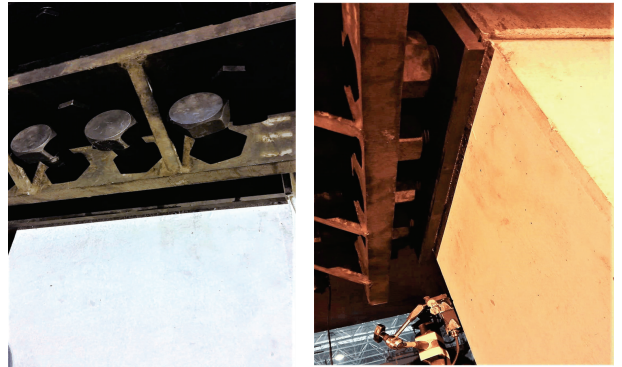


图 2 柱顶角钢安装图

Fig.2 Installation of angle steel

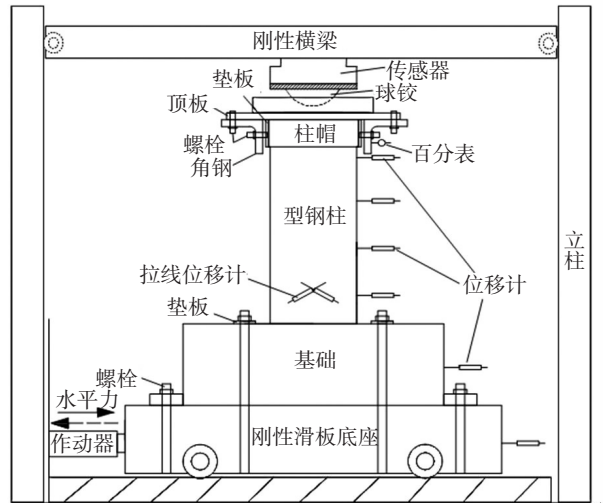


图 3 试验装置及位移计布置

Fig.3 Test set-up and displacement meter layout

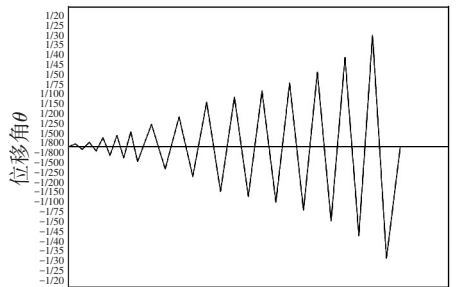


图 4 位移角加载制度

Fig.4 Loading procedure

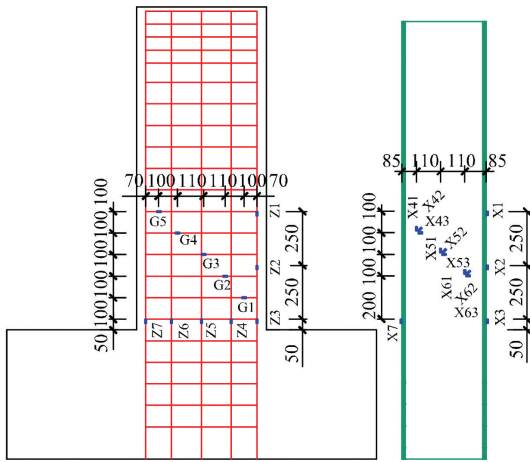


图 5 应变测点布置

Fig.5 Location of strain gauge

2 受力过程和破坏形态

试件 SRRC1~SRRC4 的最终破坏形态相似,见图 6,均发生弯剪型破坏.试验中,与水平加载方向垂

直的两个面为南面和北面,与水平加载方向平行的两个面为西面和东面.加载初期的荷载和位移较小,试件未发生明显变化;继续加载,当位移角达 $1/270 \sim 1/250$ 时,在南、北面柱根距基础顶面 $50 \sim 300 \text{ mm}$ 范围内出现细小水平裂缝;继续加载,水平裂缝逐渐变宽并延伸至东、西两面,在东、西面水平延伸一段后转为斜向下发展,形成少量斜裂缝,此时试件柱脚部被压碎,出现几条竖向裂缝;位移角继续增大,柱根水平弯曲裂缝迅速增多,原弯曲裂缝继续延伸变宽且基本贯通,斜裂缝也延伸变宽,但发展较缓慢,未形成较宽的交叉主斜裂缝,此外,柱根四脚部竖向裂缝逐渐向上延伸;当位移角达 $1/110 \sim 1/75$ 时,试件屈服;继续加载,原裂缝继续延伸变宽,柱根混凝土保护层被压碎剥落,试件发出噼啪声;当位移角达 $1/51 \sim 1/45$ 时,试件水平荷载逐渐下降,柱下部水平裂缝间的混凝土保护层大面积剥离,可见柱底部三、四根箍筋外露,纵筋压屈,试件丧失承载力,停止试验.



图 6 试件弯剪破坏现象

Fig.6 The phenomenon of the specimens suffered the bending-shear failure

3 结果及分析

3.1 滞回性能

图 7 为各试件底部水平荷载 F 与水平位移角 θ 形成的滞回曲线.由图 7 可得:

1) 各型钢再生混凝土柱试件的滞回曲线相似,滞回曲线均较饱满,均表现出较好的耗能性能.加载

初期,各试件滞回环呈细长形,环包围的面积很小,曲线斜率基本不变;随着位移角的增大,试件开裂至屈服,滞回环变为饱满的梭形,曲线斜率逐渐减小,试件的刚度明显退化,残余变形也逐渐增大,试件处于弹塑性阶段;当位移角达 $1/51 \sim 1/45$ 后,试件水平荷载逐渐降低,水平位移迅速增加,滞回环面积进一步增大.

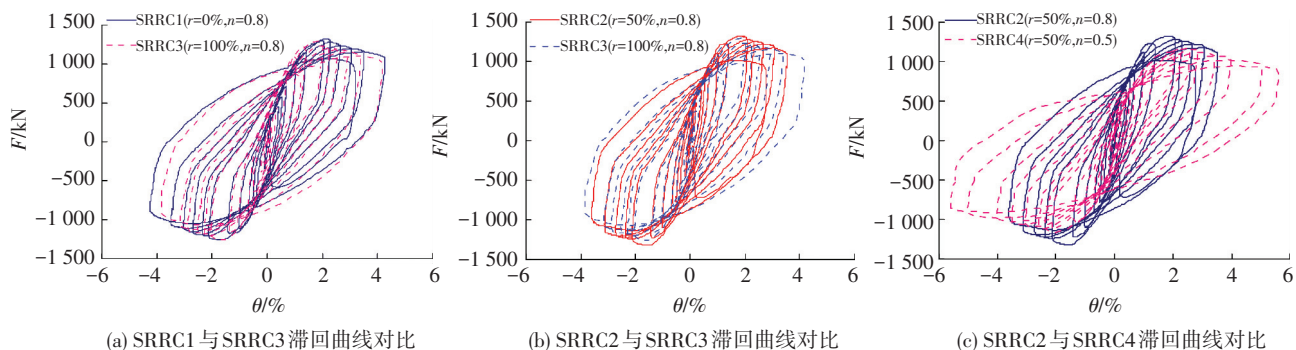


图 7 试件底部水平荷载 F 与水平位移角 θ 滞回曲线

Fig.7 $F-\theta$ hysteretic loops of specimens

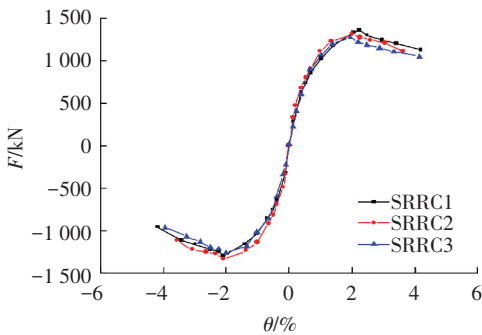
2)由图7(a)、(b)可得,高轴压比(0.8)下,各试件的滞回曲线均比较饱满,表现出较好的耗能性能;再生粗骨料取代率增大,滞回环的面积有所减小,试件的耗能性能有一定降低。

3)由图7(c)可得,型钢再生混凝土柱试件在高轴压比(0.8)下的滞回曲线明显没有在较低轴压比(0.5)下的曲线饱满,水平荷载在峰值点后降低更为迅速,加载循环减少,试件破坏时的水平极限位移角减小,说明试件的滞回性能受轴压比的影响较大。

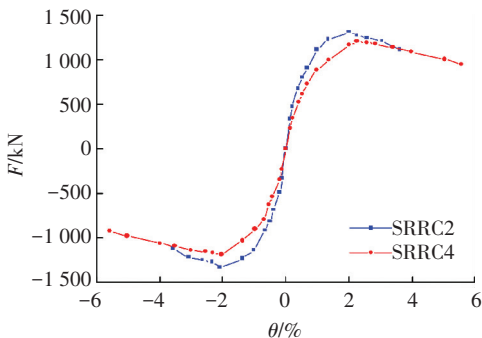
3.2 骨架曲线

图8为各试件的骨架曲线,即为将各试件 $F-\theta$ 滞回曲线每级加载环的峰值点连接形成的外包络线。由图8可见:

1)各型钢再生混凝土柱试件的骨架曲线均大致呈3个发展阶段。试件达到屈服前,骨架曲线斜率降低较小,此阶段为快速增长段;继续加载至水平荷载达到峰值,骨架曲线斜率明显减小,进入缓慢增长阶段;加载达到峰值点后,试件水平位移角继续增大而水平荷载逐渐降低,此阶段为荷载下降段。



(a) 高轴压比试件骨架曲线对比



(b) 不同轴压比50%取代率试件骨架曲线对比

图8 各试件骨架曲线

Fig.8 Skeleton curves of specimens

2)图8(a)为高轴压比(0.8)下不同再生粗骨料取代率的试件骨架曲线的对比,由图可见,再生粗骨料取代率100%的试件(SRRC3)先达到峰值点,其次是再生粗骨料取代率50%的试件(SRRC2),最后是型钢普通混凝土试件(SRRC1),由此可得出,随着再生粗骨料取代率的增大,试件的峰值荷载会有

一定程度的下降;在峰值点后,三条曲线的下降趋势基本相近,说明高轴压比下试件水平承载力受再生粗骨料取代率的影响不大。

3)由图8(b)对比试件SRRC2和SRRC4可得,轴压比增大,试件骨架曲线快速增长段的斜率增大,即试件的刚度变大,试件在同一加载级下的水平荷载增大,骨架曲线的峰值点上移,荷载下降段变陡,水平荷载降低的速度和幅度变大,这说明试件的水平承载力及刚度会随着轴压比的增大而有所提高,但其衰减及退化加剧,延性变差。

3.3 应变

试件SRRC1~SRRC4($\lambda=2.92$)发生弯剪破坏,图9为发生弯剪破坏的柱试件底部钢筋及型钢的水平荷载-应变关系曲线(以SRRC3为例,纵筋应变片编号Z3,箍筋应变片编号G1,型钢翼缘X3,型钢腹板X63),由图可得:开始加载至柱底再生混凝土开裂前,柱内底部钢筋(Z3、G1)和型钢(X3、X63)的应变较小,各水平荷载-应变曲线细长狭窄;继续加载,柱底再生混凝土开裂至试件屈服,底部纵筋(Z3)及型钢翼缘(X3)的应变迅速增大,明显快于箍筋(G1)及型钢腹板(X63)应变的缓慢增长速度;加载继续进行,水平荷载和位移继续增加,当试件达到峰值荷载时,柱底纵筋(Z3)及型钢翼缘(X3)均达到其屈服应变,而箍筋(G1)及型钢腹板(X63)均未达到屈服。由此可知,试件虽然在试验过程中产生较多剪切斜裂缝,但最终破坏仍是由试件正截面应力控制而非斜截面剪应力,当试件达到一定的水平荷载,正截面受力超出其承载力时,试件就发生破坏,最终呈弯剪破坏形态。

3.4 水平承载力及变形能力

延性及变形能力的大小可以通过延性系数、屈服位移角、峰值位移角及极限位移角来综合衡量^[16]。表4列出了各试件的开裂荷载 F_{cr} 、屈服荷载 F_y 、峰值荷载 F_p 、极限荷载 F_u 及相应的水平位移 Δ 和位移角 θ 、延性系数 μ 各参数。开裂荷载 F_{cr} 定义为加载过程中肉眼观测到的第一条水平裂缝出现时对应的水平荷载;屈服荷载 F_y 为名义屈服点对应的水平荷载,名义屈服点由能量等值法^[17]确定;将水平荷载下降到峰值荷载的85%时对应的荷载值作为极限荷载 F_u ; Δ_y 、 Δ_p 、 Δ_u 分别为屈服荷载 F_y 、峰值荷载 F_p 及极限荷载 F_u 对应的水平位移;各位移角特征值由公式 $\theta=\Delta/H$ 计算得,延性系数 μ 根据公式 $\mu=\Delta_u/\Delta_y$ 计算得。

图10为高轴压比(0.8)下各试件的位移角特征值及各水平荷载特征值随再生粗骨料取代率增大而呈现的变化规律。

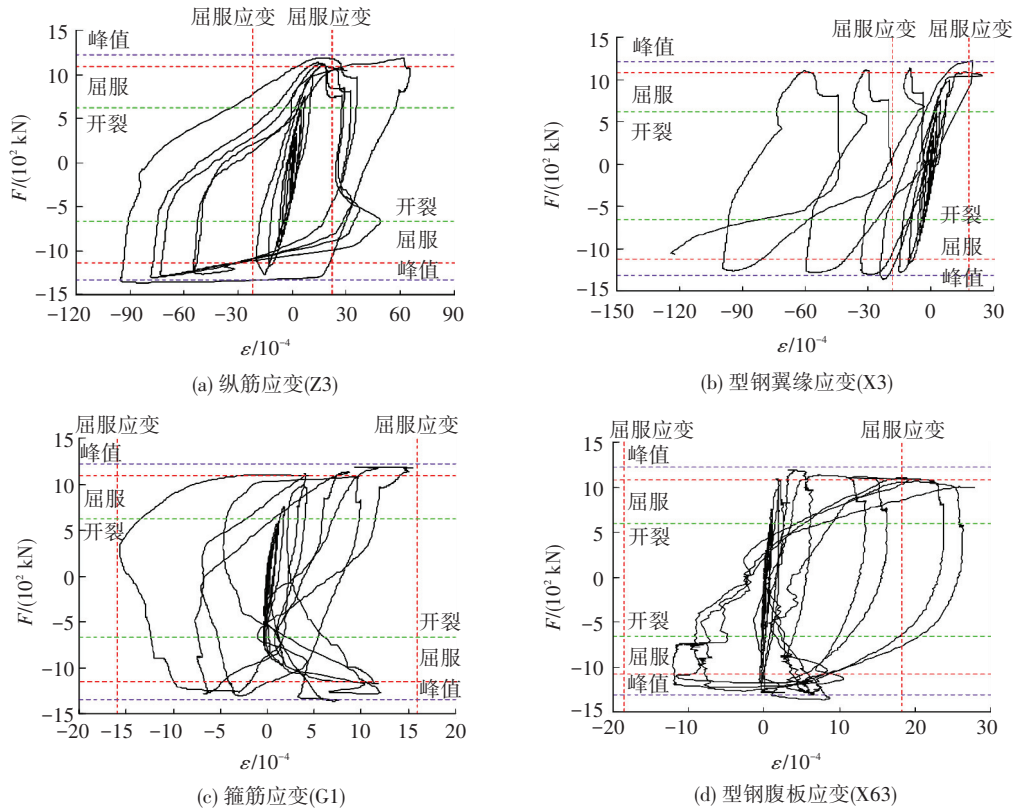


图 9 试件弯剪破坏时钢筋及型钢荷载-应变曲线

Fig.9 $F-\varepsilon$ curves of reinforcement and steel for the specimens suffered the bending-shear failure

表 4 试验结果

Tab.4 Experimental results of specimens

试件 编号	开裂点		屈服点		峰值点		极限点		θ_y	θ_p	θ_u	μ
	F_{cr}/kN	F_y/kN	Δ_y/mm	F_p/kN	Δ_p/mm	F_u/kN	Δ_u/mm					
SRRC1	777.8	1 137.4	22.41	1 355.6	39.04	1 152.2	69.08	1/82	1/45	1/26	3.10	
	-739.6	-1 085.4	-20.34	-1 347.0	-39.01	-1 128.6	-63.23					
SRRC2	726.2	1 125.8	17.84	1 321.4	35.16	1 114.6	62.99	1/97	1/49	1/28	3.48	
	-747.5	-1 141.8	-18.17	-1 334.4	-36.48	-1 118.9	-62.28					
SRRC3	704.1	1 085.4	16.75	1 272.6	33.92	1 081.7	63.75	1/106	1/51	1/29	3.78	
	-748.6	-1 070.5	-16.27	-1 270.7	-35.18	-1 074.2	-59.44					
SRRC4	528.2	977.7	22.96	1 189.5	39.30	1 000.1	89.00	1/78	1/47	1/20	3.83	
	-540.3	-992.1	-21.87	-1 186.4	-35.68	-1 008.4	-82.67					

注:水平作动器推力为正值,拉力为负值。

1)由图 10 (a)可见,试件 SRRC2 和 SRRC3 的屈服位移角 θ_y 分别比试件 SRRC1 减小 15.57%、25.41%,极限位移角 θ_u 分别减小 5.29%、8.47%,说明高轴压比下增大试件的再生粗骨料取代率会使试件的变形能力减弱,这是由于再生粗骨料残留水泥基,使得再生混凝土中天然骨料含量较相同强度的普通混凝土少,水泥凝胶体与粗骨料间的结合面相对减少,结合减弱,导致共同变形能力减弱。

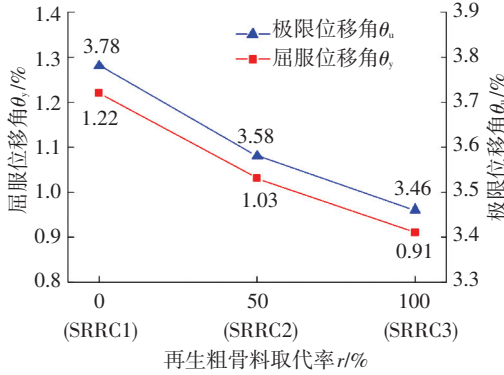
2)由图 10 (b)可见,随着再生粗骨料取代率增大,试件的水平荷载特征值 F_{cr} 、 F_p 、 F_u 降低较小, F_y 先有所增加后又降低,说明高轴压比下试件水平承载力受再生粗骨料取代率的影响较小,而前文得到:对于只承受轴向压力的混凝土立方体试块,再生粗

骨料取代率 50%的混凝土强度稍高于取代率为 0%的,而 100%的最小,这是由于再生粗骨料在破碎时产生的结构损伤以及表面残留水泥基、孔隙率大等因素,使得其配制而成的混凝土强度等性能稍弱于普通混凝土,但在取代率为 50%时,由于再生粗骨料与天然石子各占一半,所形成的级配良好,导致所配混凝土强度较普通混凝土有所提高.笔者认为再生粗骨料取代率对试件承载力及立方体强度影响规律不一致的原因有两点,一是在再生混凝土中加型钢后形成的组合柱在受力状态上不同于再生混凝土立方体试块单纯的轴向受压状态,复杂受力状态下的组合柱的水平承载力受再生粗骨料的材料特性及含量的影响不明显;二是在高轴压比下,再生粗骨料

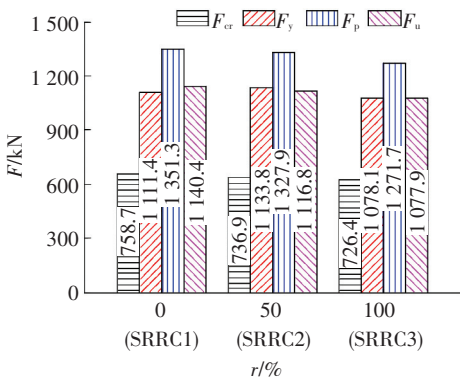
对组合柱水平承载力的影响在一定程度上被削弱,没有高轴压比对柱水平承载力及刚度的影响明显。

3.5 刚度退化

刚度退化是指试件在低周反复荷载作用下产生累积损伤后刚度随着加载位移(角)的增加而逐渐降低的现象.这里的刚度为割线刚度,即取每级加载形成的滞回环正负向峰值荷载与对应水平位移之比.各试件的刚度退化曲线见图 11.由图 11 可得,各试件在加载前期由于再生混凝土开裂以及在反复荷载下产生的损伤效应累积,导致试件刚度退化速度较快;当试件达到屈服后,截面塑性逐渐发挥,新裂缝不再产生,且累积损伤已达到一定程度,试件的刚度退化会趋于平缓。



(a) 高轴压比试件水平位移角随取代率变化



(b)高轴压比试件水平荷载随取代率变化

图 10 取代率对试件位移角和水平荷载的影响

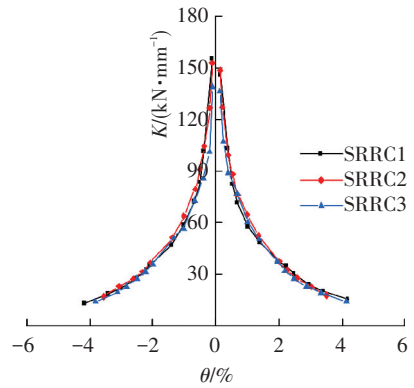
Fig.10 The influence of replacement ratio on the displacement angle and bearing capacity

由表 4 可知:

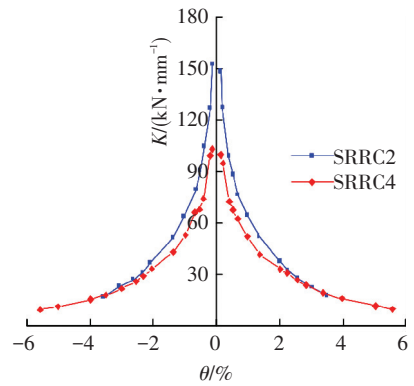
1)各试件延性系数均大于 3,极限位移角均大于 1/30,高于抗震规范规定的框架的弹塑性层间位移角限值 1/50,说明各试件的延性及弹塑性变形能力均满足抗震规范要求^[18]。

2)对比试件 SRRC1~SRRC3 的屈服位移角 θ_y 、峰值位移角 θ_p 及极限位移角 θ_u ,得到:高轴压比(0.8)下再生粗骨料取代率增大,3 个特征位移角均有所减小,说明表面残留水泥基的再生粗骨料增多,使水泥凝胶体与粗骨料间的结合面相对减少,会在一定程度上影响柱试件的变形能力;对比该 3 个试件的延性系数 μ ,发现:试件的延性系数随再生粗骨料取代率的增大而有所增大,这是由于各试件屈服位移 Δ_y 随取代率增大而减小的幅度大于极限位移 Δ_u 的减小幅度,因而由 Δ_u/Δ_y 得到的延性系数 μ 就会增大,这也说明再生粗骨料取代率增大会使试件水平荷载降低变慢。

3)对比试件 SRRC2 和 SRRC4,发现高轴压比下(0.8)的试件 SRRC2 的延性系数和各位移角特征值均小于较低轴压比(0.5)下的试件 SRRC4,说明增大轴压比会使试件的延性及变形能力降低。



(a) 高轴压比试件刚度曲线对比



(b)不同轴压比 50%取代率试件刚度曲线对比

图 11 各试件刚度退化曲线

Fig.11 Stiffness degradation curves of specimens

1)由图 11(a)可见:关于高轴压比(0.8)下试件的初始刚度,试件 SRRC2 与试件 SRRC1 相差较小,试件 SRRC3 较前两个试件有所降低,可推断出当再生粗骨料取代率超过 50%后,再生粗骨料弹性模量较小等材料特性会逐渐表现出对柱试件初始刚度的不利影响;随着加载级的增加,三条曲线均下降较陡,刚度退化迅速,在加载后期曲线基本重合,即后期三个试件刚度退化速度及幅度基本一致,说明高轴压比(0.8)下再生粗骨料取代率对试件的刚度退化影响不明显,这与薛建阳、马辉^[12]研究得到的结果相近。

2)由图 11(b)可见:型钢再生混凝土柱在高轴

压比(0.8)下每级加载循环的刚度均比较低轴压比(0.5)下的大,而且刚度退化曲线下降更陡,说明轴压比增大,会使试件的刚度有所提高,但同时会加剧试件的刚度退化,使退化速率加快,这是由于较高轴力的存在会对试件产生一定的约束力,从而使试件在剪力方向不易产生变形,即刚度增大,但同时进行低周反复荷载试验,试件产生损伤后的累积效应更加明显,水平承载力及刚度的退化加剧。

3.6 耗能性能

图 12 为各试件在各级位移角加载循环下累积耗能值与水平位移角的关系曲线.对比试件 SRRC1 ~ SRRC3 可得,加载前期,3 条曲线相距很近,加载后期,试件 SRRC3 的累积耗能值略小于试件 SRRC2,试件 SRRC2 累积耗能值略小于试件 SRRC1,说明高轴压比(0.8)下,随再生粗骨料取代率的增大,试件的累积耗能值有所降低,这是由于耗能是由水平承载力及变形综合决定的,在试件水平承载力变化不明显而变形能力减弱的情况下,试件滞回曲线包围的面积会相应减小,即反映出试件的耗能能力减弱.对比试件 SRRC2 和 SRRC4 可得,试件 SRRC2 在各级加载循环下的累积耗能值均高于试件 SRRC4,说明轴压比增大,试件的累积耗能值有所增加,这是由于较高轴压比在一定程度上使水平承载力提高的程度较大而使水平位移减小的幅度较小,综合对这两者的影响结果,又考虑到试件在较高轴力下的残余变形增大,所以形成的滞回环面积变大,试件的耗能性能会有所提高。

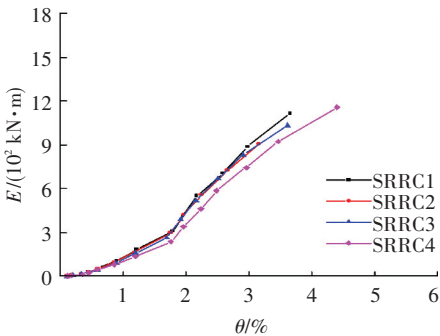


图 12 试件耗能曲线

Fig.12 Energy dissipation curves of specimens

如图 13 所示,由滞回环的面积可以求得等效黏滞阻尼系数 h_e ,根据公式(1)可计算得^[15].本文同时用它来分析试件的耗能性能。

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{(S_{ABC} + S_{CDA})}{(S_{OBH} + S_{ODC})} \quad (1)$$

图 14 为各试件等效黏滞阻尼系数与水平位移角的关系曲线.由图 14 得:

1) 各曲线整体呈增长趋势,说明随着加载位移的增大,各试件的耗能增加;各试件的等效黏滞阻尼系数在 0.33~0.5。

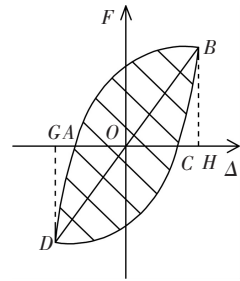


图 13 滞回曲线

Fig.13 F-Δ hysteretic curve

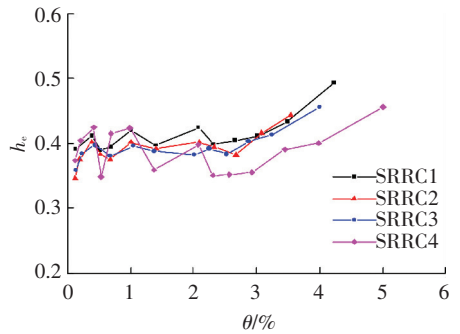


图 14 等效黏滞阻尼系数与水平位移角关系曲线

Fig.14 h_e -θ curves of specimens

2) 每条曲线均有 3 个下降段,均大约先后出现在试件达到开裂点、屈服点、峰值点附近;加载初期,随着荷载和位移的增大,试件的耗能相应增加;当试件开裂后,试件内部应力发生重分布,受力和变形会受到一定影响,耗能相应地有所下降;继续加载,裂缝不断张开闭合,会使试件产生较大的位移,耗能随之又增加;继续加载至试件屈服,其内部受力纵筋屈服,试件内部又一次发生应力重分布,耗能又会有所降低;钢筋屈服后随着水平荷载的继续增加而逐渐进入强化阶段,变形能力增加,试件的耗能会有所增加;当加载达到峰值后,试件承载力开始降低,耗能会稍微减小;之后,随着各裂缝的继续张开闭合及钢筋的反复变形,试件水平位移大幅增加,试件的耗能又会不断增加,直至试件最后破坏。

3) 对比试件 SRRC1 ~ SRRC3 可知,高轴压比(0.8)下,增大再生粗骨料取代率,试件等效黏滞阻尼系数有所减小,说明再生粗骨料取代率增大,对试件耗能不利;对比试件 SRRC2 和 SRRC4 可知,高轴压比下试件的等效黏滞阻尼系数比较低轴压比下的大,说明较高轴压比会使试件的耗能性能有所提高,这与由图 12 得出的结论一致。

4 结 论

通过 4 个足尺型钢再生混凝土柱的低周反复荷载试验研究,得到以下主要结论:

1) 型钢再生混凝土柱的受力过程和主要破坏形态与型钢普通混凝土柱相似,均为弯剪破坏。

2)各试件的滞回曲线均较饱满,具有较好的耗能性能。

3)高轴压比(0.8)下,增大再生粗骨料取代率会使试件的变形能力有所减弱,而对试件水平承载力及刚度退化的影响不明显。

4)轴压比增大,试件的水平承载力及刚度增大,但其退化加快,试件变形能力减弱,延性变差,而耗能会有所增加。

5)各型钢再生混凝土柱极限位移角均高于1/50,型钢再生混凝土柱在高轴压比(0.8)下仍可以保持较好的延性和变形能力,满足抗震要求,可为实际工程提供依据。

参考文献

- [1] 肖建庄.再生混凝土[M].上海:中国建筑工业出版社,2007.
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Shanghai: China Architecture & building Press, 2007.
- [2] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等.再生混凝土的抗压强度研究[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(12):1558-1561.
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, SUN Zhenping, et al. Study on compressive strength of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(12): 1558-1561.
- [3] BELÉN G F, FERNANDO M A, DIEGO C L, et al. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate [J]. Construction & Building Materials, 2011, 25(5): 2335-2342.
- [4] 吴波,计明明,赵新宇.再生混合混凝土及其组合构件的研究现状[J].工程力学,2016,33(1):1-10.
WU Bo, JI Mingming, ZHAO Xinyu. State-of-the-art of recycled mixed concrete (RMC) and composite structural members made of RMC [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 1-10.
- [5] 胡琼,卢锦.再生混凝土柱抗震性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(2):23-27.
HU Qiong, LU Jin. Experimental research on hysteretic behavior of recycled concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(2): 23-27.
- [6] 柳炳康,陈丽华,周安,等.再生混凝土框架梁柱中节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(11):109-115.
LIU Bingkang, CHEN Lihua, ZHOU An, et al. Experimental study on seismic behavior of recycled aggregate concrete beam-column interior-joints [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 109-115.
- [7] 张静,周安,柳炳康,等.不同轴压比再生混凝土框架柱抗震性能试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(4):503-507,566.
ZHANG Jing, ZHOU An, LIU Bingkang, et al. Experimental study of seismic behavior of recycled concrete frame columns with different axial compression ratios [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2012, 35(4): 503-507, 566.
- [8] 曹万林,李东华,周中一,等.再生混凝土柱足尺试件轴心受压性能试验研究[J].结构工程师,2013,29(6):144-150.
CAO Wanlin, LI Donghua, ZHOU Zhongyi, et al. Experimental study on axial compression performance of full scale recycled concrete columns [J]. Structural Engineers, 2013, 29(6): 144-150.
- [9] 曹万林,牛海成,周中一,等.圆钢管高强再生混凝土柱重复加载偏压试验[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(12):31-37.
CAO Wanlin, NIU Haicheng, ZHOU Zhongyi, et al. Experimental study on high strength recycled concrete-filled circular steel tube columns under repeated eccentric loading [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(12): 31-37.
- [10] 王玉银,陈杰,纵斌,等.钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能对比试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(12):170-177.
WANG Yuyin, CHEN Jie, ZONG Bin, et al. Mechanical behavior of axially loaded recycled aggregate concrete filled steel tubular stubs and reinforced recycled aggregate concrete stubs [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 170-177.
- [11] 崔卫光.型钢再生混凝土组合柱正截面受力性能试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
CUI Weiguang. Experimental study on the normal-section mechanical behavior of steel reinforced recycled concrete composite columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.
- [12] 薛建阳,马辉,刘义.反复荷载下型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2014,47(1):36-46.
XUE Jianyang, MA Hui, LIU Li. Experimental study on seismic performance of steel reinforced recycled concrete columns under low-cyclic reversed loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1): 36-46.
- [13] 薛建阳,马辉.低周反复荷载下型钢再生混凝土短柱抗震性能试验研究[J].工程力学,2013,30(12):123-131.
XUE Jianyang, MA Hui. Experimental study on seismic performance of steel reinforced recycled concrete short column under low-cyclic reversed loading [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12): 123-131.
- [14] 薛建阳,马辉.不同剪跨比下型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2013,33(4):228-234.
XUE Jianyang, MA Hui. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced recycled concrete column under different shear-span ratios [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 228-234.
- [15] 建筑抗震试验方法规程:JGJ 101-1996[S].北京:中国建筑工业出版社,1997.
Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ 101-1996 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [16] 郭子雄,吕西林.高轴压比框架柱恢复力模型试验研究[J].土木工程学报,2004,37(5):32-38.
GUO Zixiong, LV Xilin. Experimental study on the hysteretic model of RC columns with high axial compressive ratio [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5): 32-38.
- [17] 朱伯龙.结构抗震试验[M].北京:地震出版社,1989:20-37.
ZHU Bolong. Seismic experiment of structure [M]. Beijing: Seismological Press, 1989: 20-37.
- [18] 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for seismic design of building: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.