

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.12.006

圆钢管高强再生混凝土柱重复加载偏压试验

曹万林¹,牛海成^{1,2},周中一¹,董宏英¹

(1.北京工业大学 建筑工程学院,100124 北京;2.河南理工大学 土木工程学院,454000 河南 焦作)

摘 要:为研究圆钢管高强再生混凝土柱偏心受压性能,完成了4个试件的单调重复加载试验.4个试件分为两组,第一组试件包括圆钢管普通混凝土柱和圆钢管再生混凝土柱,偏心距100 mm;第二组试件与第一组试件相同,区别在于偏心距为160 mm.通过试验,得到了荷载-位移曲线、荷载-应变曲线、应变沿截面高度分布情况,分析了各试件的破坏特征、承载力、刚度、延性和耗能等.利用国内外相关规程对圆钢管再生混凝土偏心受压柱进行承载力计算,并与试验结果对比.研究表明:圆钢管高强再生混凝土偏心受压柱的损伤破坏过程与普通混凝土柱相似,承载能力和变形性能较普通混凝土试件有所提高;截面应变分布与平截面假定符合较好;随着偏心距增大,试件承载力降低,刚度退化加剧,变形能力增强.

关键词:圆钢管混凝土柱;高强再生混凝土;偏心受压;试验研究

中图分类号: TU398.9; TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)12-0031-07

Experimental study on high strength recycled concrete-filled circular steel tube columns under repeated eccentric loading

CAO Wanlin¹, NIU Haicheng^{1,2}, ZHOU Zhongyi¹, DONG Hongying¹

(1.College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, 100124 Beijing, China;

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, 454000 Jiaozuo, Henan, China)

Abstract: The eccentric compression performance of concrete filled circular steel tubular (CFCST) columns using high-strength recycled aggregate concrete (RAC) instead of normal concrete (NC) was studied through repeat load tests on four specimens in this paper. Four specimens were divided into two groups; the first set of two specimens included a CFCST column filled with RAC and a normal CFCST column, the eccentricity was 100 mm. The second group had the same specimens and the difference was that the eccentricity was 160 mm. Load-deformation and stress-strain curves as well as the strain distribution over the cross section were obtained through the experiment. The failure characteristic, load-bearing capacity, stiffness, ductility, energy dissipation and residual deformation of the specimens were analyzed. The obtained results are compared with the ultimate strengths of CFCST columns predicted by existing design codes. The test results indicate that damage development and failure mode of CFCST columns with RAC are similar to those of normal CFCST columns. The replacement of NC with RAC has beneficial effects on the load-carrying capacity and deformation properties. The strain distribution was found to accord well with the plane section assumption. With the incensement of eccentricity, the load-carrying capacity decreased, the stiffness degradation intensified, and the deformation ability improved.

Keywords: concrete-filled circular steel tube; high strength recycled aggregate concrete; eccentric compression; experimental research

再生骨料是将废弃混凝土块破碎、分级,并按一定级配混合后形成的骨料,由于再生骨料表面附着

较多原有水泥砂浆以及破碎过程中产生的裂纹,使再生混凝土的综合力学性能比普通混凝土有所降低^[1-4].将再生混凝土灌入钢管形成钢管再生混凝土,利用外包钢管对内部再生混凝土的约束作用,可显著改善再生混凝土的性能缺陷,从而推广再生混凝土在实际工程中的应用.

目前,国内外对钢管再生混凝土受压力学性能的研究主要集中于轴心受压,偏心受压的研究成果

收稿日期: 2014-11-10.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51438007);“十二五”国家科技支撑计划(2015BAL03B01);国家自然科学基金青年基金(51208183).

作者简介: 曹万林(1954—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 牛海成, niuhch@126.com.

非常少.由于施工误差,结构布置和抗震设计的需要,钢管混凝土柱大多受到弯矩和轴力共同作用.因此,钢管再生混凝土柱偏心受压力学性能与普通钢管混凝土柱差异如何,能否应用于单层与多层工业厂房、桥墩以及高层与超高层等建筑结构中的承重构件,尚需进行系统深入的研究.Yang 等^[5]通过 20 个圆、方形钢管混凝土柱(直径 165 mm,边长 150 mm,C40)偏压试验,发现圆、方形普通混凝土试件承载力比再生混凝土试件分别高 1.7%~9.1%、1.4%~13.5%;张卫东等^[6]对 15 根外径 219 mm、不同再生粗骨料取代率(0、25%、50%、75%和 100%)的钢管再生混凝土短柱(C35)进行偏压试验,结果表明:钢管再生混凝土偏压承载力随再生粗骨料取代率的增大而降低;陈宗平等^[7-9]进行了 20 个钢管再生混凝土柱(直径 113.5 mm,边长 120 mm,C40)的偏压试验,结果表明:偏心距、长细比对钢管再生混凝土偏压柱的受力性能影响显著,再生粗骨料取代率对其影响不大;Ferhoun^[10]研究了 16 个矩形钢管矿渣混凝土柱(截面尺寸 100 mm×70 mm,C25)偏压性能,分别沿两个主轴方向施加荷载,得到了与陈宗平等相似的结论.综上所述,现有研究成果多基于缩尺模型试件,试件截面尺寸较小,原型试件试验十分欠缺;而且再生混凝土的强度等级主要集中在 C30~C40,没有发现高强再生混凝土的研究报道.本文设计了 4 个圆钢管高强再生混凝土柱,通过单调重复加载偏心受压试验,分析了不同偏心距下圆钢管高强再生混凝土柱与普通钢管混凝土柱承载力、耗能、延性、刚度等力学性能的差异.

1.2 加载制度与测点布置

加载制度:采用北京工业大学工程结构实验中心的 4 000 t 多功能电液伺服加载系统对试件进行

1 试 验

1.1 试件设计

设计了 4 个直径 508 mm、高 2 500 mm 的圆钢管高强混凝土试件,编号分别为 YGXPY-1、YGXPY-2、YGDY-1、YGDY-2.YGXPY-1 为圆钢管高强普通混凝土柱;YGXPY-2 为圆钢管高强再生混凝土柱,偏心距 100 mm;YGDY-1 为圆钢管高强普通混凝土柱;YGDY-2 为圆钢管高强再生混凝土柱,偏心距 160 mm.钢管采用 Q345B 级钢材,壁厚 8.8 mm,截面含钢率 7.3%.为保证高强混凝土的和易性,通过掺入粉煤灰和矿粉制备设计强度等级为 C70 的高强普通混凝土和再生混凝土.再生粗骨料来自北京市某拆除混凝土房屋,经破碎、除杂、清洗、筛分后得到粒径 5~25 mm 的再生粗骨料,其物理指标见表 1.混凝土配合比为水:水泥:矿粉:粉煤灰:砂:石=0.38:1.00:0.13:0.13:1.34:1.85,各试件设计见图 1.

表 1 粗骨料性能指标

粗骨料 类型	表观密度/ (kg·m ⁻³)	紧密孔隙 率/%	含水率 /%	压碎指 标/%
天然	2 660	40.3	0.87	8.12
再生	2 390	45.5	2.01	12.51

实测材料力学性能:圆钢管钢材屈服强度 355.8 MPa,极限强度 441.9 MPa,弹性模量 2.06×10⁵ MPa,延伸率 30.3%.试验前,实测普通混凝土立方体抗压强度 70.91 MPa,弹性模量 3.54×10⁴ MPa;再生混凝土立方体抗压强度 72.36 MPa,弹性模量 3.17×10⁴ MPa.

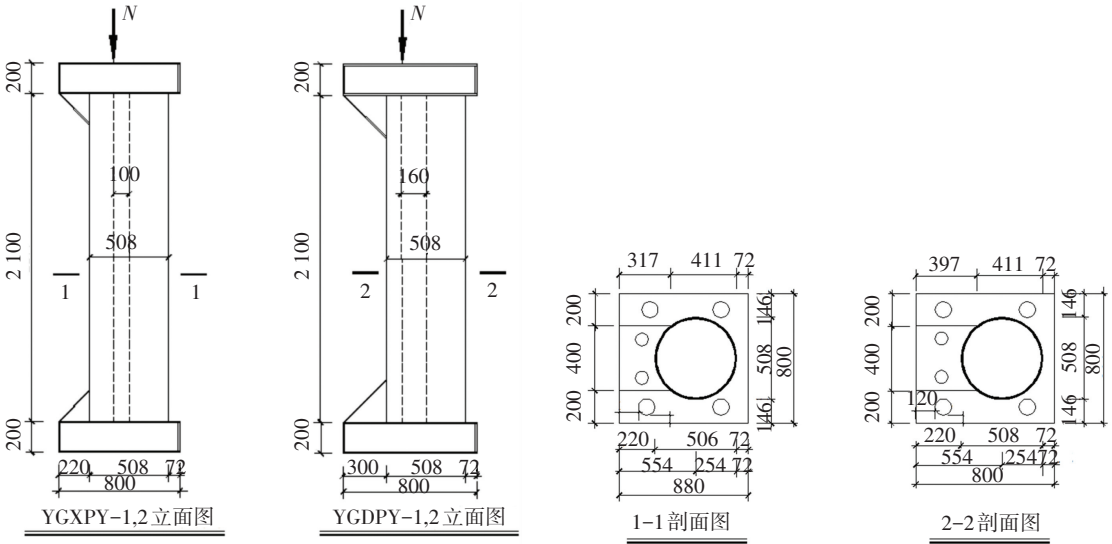


图 1 试件设计(mm)

加载,试件两端设置滚轴铰支座.采用单向重复加载,即加载-卸载-再加载的方式以研究试件在弹塑性变形过程中刚度随循环加载次数的退化过程和残

余变形的发展过程.为防止试件完全卸载后在重力作用下外倾,每次加载后仅卸载至 2 000 kN,以保持试件的稳定性.试验加载装置见图 2.正式加载前,首先预加载 2 000 kN,持荷 5 min,观察各测点是否正常工作.随后,正式加载开始,按预估极限荷载分级,每级加载约为极限荷载的 10%,持荷 5~10 min,观测试件变形和损伤情况.加载至极限荷载的 80%后,每级加载改为极限荷载的 5%,同时降低加载速率.达到极限荷载后采用位移控制加载,试件承载力显著下降时试验结束.试验过程中,用 IMP 数据采集系统记录荷载、位移和应变,人工记录试件损伤破坏过程.



图 2 加载装置

测点布置:为量测试件的轴向变形,共布置 3 个位移计.位移计 1-1 测量试件的总体竖向变形,位移计 1-2、1-3 分别布置在柱受压侧与受拉侧,以测量试件中部 1 200 mm 标距范围内的变形;在垂直于柱的水平方向,沿高度共布置 5 个位移计,以测量试件的侧向变形.每个试件中部截面沿半个圆周均匀布置电阻应变片,共 7 个测点,每个测点沿环向及纵向各布置一个应变片.位移测点及应变测点布置见图 3.

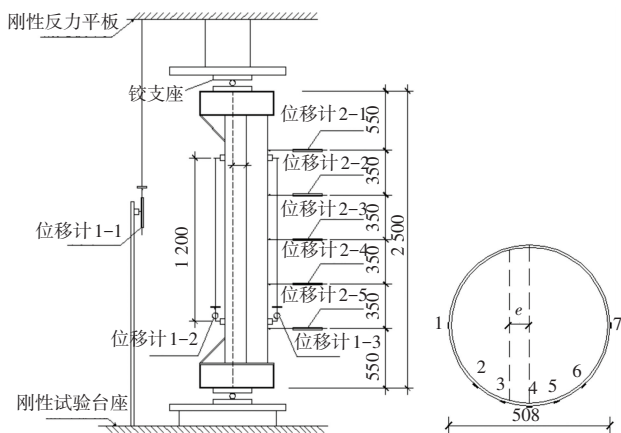


图 3 加载装置和测点布置 (mm)

2 结果及分析

2.1 破坏特征

试件 YGXPY-1:加载初期,试件处于弹性阶

段,钢管应力较小,轴向变形和跨中侧向变形与荷载呈线性变化,加载至 8 123 kN 时,试件端部出现均匀的斜向短滑移线,随后,滑移线向跨中延伸并逐渐形成交叉滑移线.荷载增至 10 236 kN(峰值荷载)时,跨中侧向位移动达 12.21 mm,滑移线处漆皮褶皱并发生轻微开裂;随着弹塑性变形的发展,承载力逐渐下降,侧向位移急剧增大,跨中受压区漆皮爆裂,钢管鼓屈并逐渐形成水平鼓曲环,受拉区未出现明显的局部屈曲.承载力下降至峰值荷载的 85%(8 714 kN)时,侧向位移为 33.86 mm.停止试验时,试件由于整体丧失稳定而破坏,中部出现明显侧向弯曲变形.试件破坏形态见图 4(a).

试件 YGXPY-2:加载过程中,试件损伤过程和破坏形态与试件 YGXPY-1 相似.当荷载达到 9 045 kN 时,跨中受压区出现明显的滑移线;试件峰值荷载为 11 258 kN,相应的侧向位移为 13.13 mm.与试件 YGXPY-1 相比,破坏形态主要区别在于受压区漆皮爆裂范围大,钢管向外鼓屈严重.当承载力下降至峰值荷载的 85%(9 573 kN)时,侧向位移动达 45.13 mm,试件破坏形态见图 4(b).

试件 YGDPY-1:加载初期,试件的轴向变形和侧向变形较小,处于弹性工作阶段;加载至 7 069 kN 时,试件受压区中部出现若干条斜向长滑移线,随着荷载的增加,受压区钢管漆皮起鼓且起鼓范围向试件两端缓慢扩展;荷载增至 7 890 kN(峰值荷载)时,跨中侧向位移动达 17.15 mm,受压区中上部漆皮开裂;随着弹塑性变形的发展,承载力缓慢下降,侧向位移急剧增大,跨中受压区漆皮爆裂,钢管发生局部屈曲但不明显;承载力下降至峰值荷载的 85%(6 781 kN)时,侧向位移动达 49.81 mm,试件破坏形态见图 4(c).

试件 YGDPY-2:加载过程中,试件损伤过程和破坏形态与试件 YGDPY-1 相似.荷载达到 7 196 kN 时,受压区上部出现若干条短滑移线;试件峰值荷载为 8 633 kN,相应的侧向位移为 18.11 mm.与试件 YGDPY-1 相比,破坏形态主要区别在于受压区中部钢管鼓屈严重,形成明显的鼓曲环.当承载力下降至峰值荷载的 85%(7 364 kN)时,侧向位移为 58.95 mm,试件破坏形态见图 4(d).

2.2 荷载-位移曲线

实测各试件荷载 N -竖向位移 Δ 曲线见图 5,纵坐标 N 为对试件施加的竖向荷载,横坐标 Δ 为试件中段 1 200 mm 标距内的相对位移. Δ 取 1 200 mm 标距受压侧与受拉侧位移计实测相对位移的均值,试件骨架曲线比较见图 6.

由图 5 可见,加载初期,4 个试件的荷载-位移

曲线基本呈弹性,试件刚度保持不变,卸载后残余变形很小;随着荷载的增加,试件进入弹塑性阶段,曲线滞回环顶点处由尖角逐渐变得圆滑,说明试件屈服后塑性变形逐渐增大,刚度逐步退化;当竖向荷载

达到极限承载力后,曲线出现微小水平段,偏心距较大的试件水平段较长;随着加载循环次数的增加,试件承载力缓慢下降,竖向位移迅速增大,刚度退化加剧,卸载后残余变形逐渐增大。



图 4 试件破坏形态

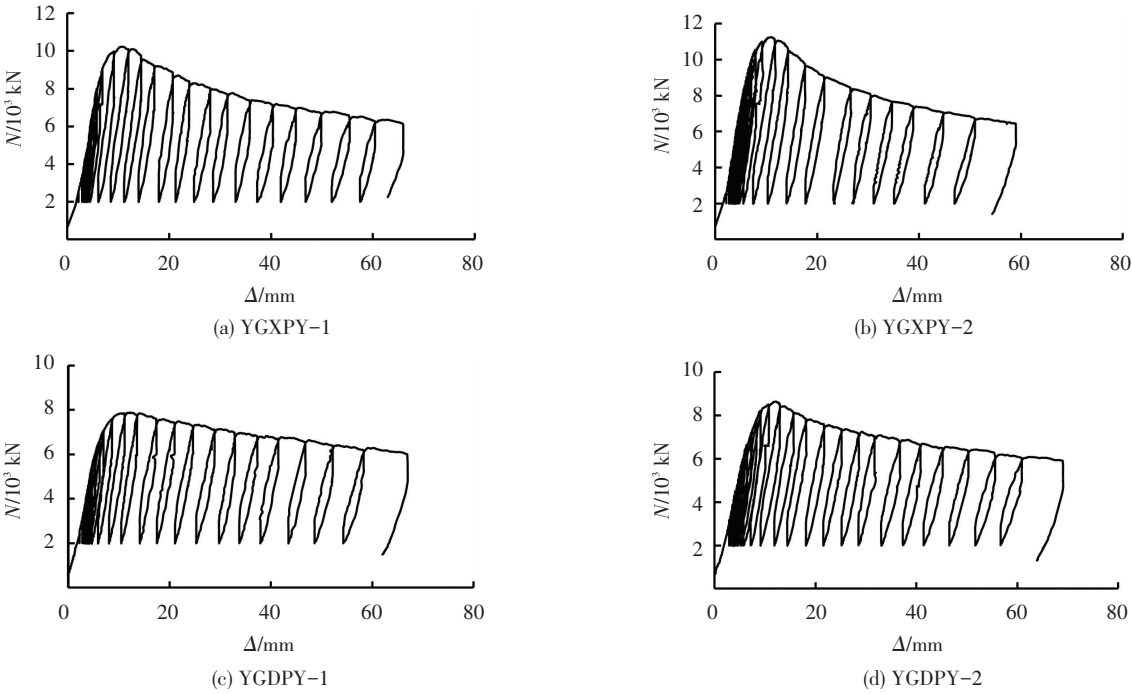


图 5 荷载-竖向位移曲线

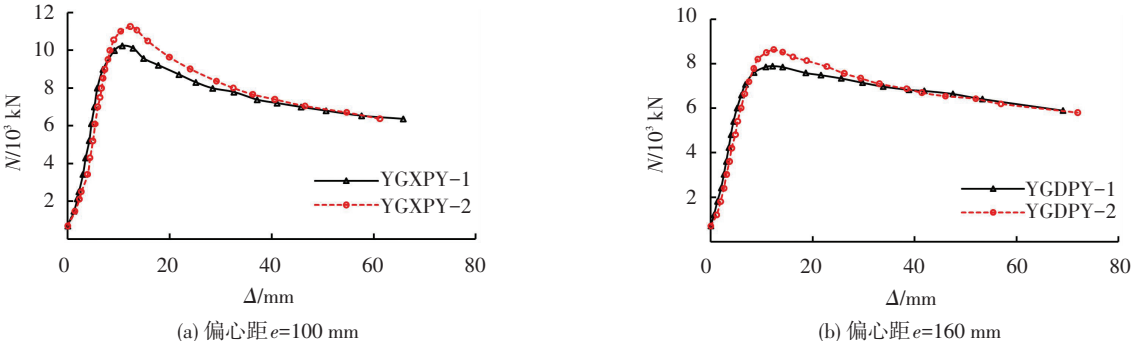


图 6 骨架曲线比较

分析图 6 可知:1)不论偏心距大小,试件达到峰值荷载之前,骨架曲线基本重和,说明钢管再生混凝土

土试件与普通混凝土试件偏压力学性能非常接近.再生混凝土试件刚度比普通混凝土试件略低,同级荷载

作用下轴向变形略大.峰值荷载之后,再生混凝土试件曲线下降段逐渐与普通混凝土试件重合,说明前者承载力降低速率略快于后者;2)偏心距对试件承载力影响较大,随着偏心距大的增大,试件极限承载力降低,但峰值荷载后曲线下降段平缓,延性更好.

2.3 承载力

实测各试件特征点荷载列于表 2, N_y 为屈服荷载,它为实测柱高中部 1 200 mm 标距范围内平均应变达到钢材屈服应变 (1.727×10^{-3}) 时的荷载值; N_u 表示峰值荷载, N_y/N_u 为屈强比.

由表 2 可知:1) 不论偏心距大小,钢管再生混凝土试件的屈服荷载与普通混凝土试件非常接近,但峰值荷载比普通混凝土试件高 10% 左右,主要原因是再生混凝土抗压强度比普通混凝土略高,说明混凝土类型对圆钢管混凝土柱承载力影响不大;2) 偏心距由 100 mm 增至 160 mm 时,与试件 YGXPY-1 相比,试件 YGDPY-1 屈服荷载和峰值荷载分别降低 25.29% 和 22.92%;试件 YGDPY-2 屈服荷载和峰值荷载相较于试件 YGXPY-2 分别降低 25.36% 和 23.32%,说明偏心距对承载力影响较大;3) 钢管再生混凝土试件的屈强比比普通混凝土试件低,说明再生混凝土试件从屈服到破坏历程较长,

安全储备较高.

表 2 试件屈服荷载与峰值荷载对比

试件编号	N_y/kN	N_u/kN	N_y/N_u
YGXPY-1	7970	10236	0.779
YGXPY-2	8064	11258	0.716
YGDPY-1	5954	7890	0.755
YGDPY-2	6019	8633	0.697

2.4 荷载-轴向应变曲线

实测各试件跨中截面不同测点荷载-轴向应变关系 ($N-\varepsilon$) 曲线见图 7, 1~7 表示跨中截面不同测点钢管轴向应变值,具体位置见图 3.

由图 7 可见:1) 不论偏心距大小,各试件轴向应变发展过程,大部分测点应变始终为负值(受压),少部分测点始终为正值(受拉),个别测点由负值变为正值;2) 随偏心距增大,始终受拉的应变计数量增多,同时峰值拉应变值也有所增大;3) 距中和轴较远的应变片,无论受拉或是受压,均已达到屈服应变值,其中部分受压应变在承载力达到峰值荷载 80%~90% 时发生突变,出现较长的流幅,发展非常迅速,破坏时达到屈服应变的 10 倍左右;4) 由于是偏心受压,不论偏心距大小,中和轴附近的测点,试件破坏时尚未达到屈服应变.

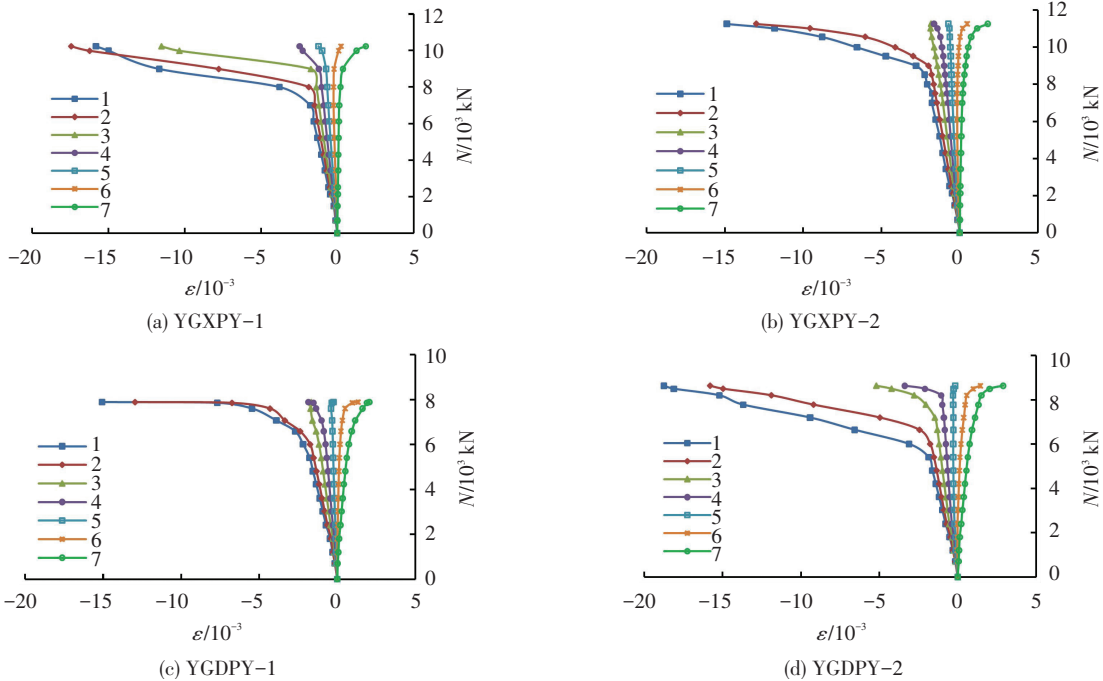


图 7 荷载-轴向应变曲线

2.5 平截面假定验证

4 个试件跨中截面在各级荷载作用下不同位置测点(见图 3)轴向应变值沿截面高度分布规律见图 8, N_u 表示各试件峰值荷载.由图 8 可见:1) 不论偏心距大小,在弹性受力阶段,钢管再生混凝土试件跨中截面轴向应变分布规律与普通混凝土试件相似,与

平截面假定符合较好,说明钢管可与高强再生混凝土较好地协同工作;2) 平截面假定在加载初期的吻合程度要好于加载后期,偏心距小的试件平截面假定吻合程度要好于偏心距大的试件;3) 偏心距较大的试件较早地进入弹塑性阶段,当承载力达到峰值荷载的 60% 时,截面应变分布即呈现出非线性发展的趋势.

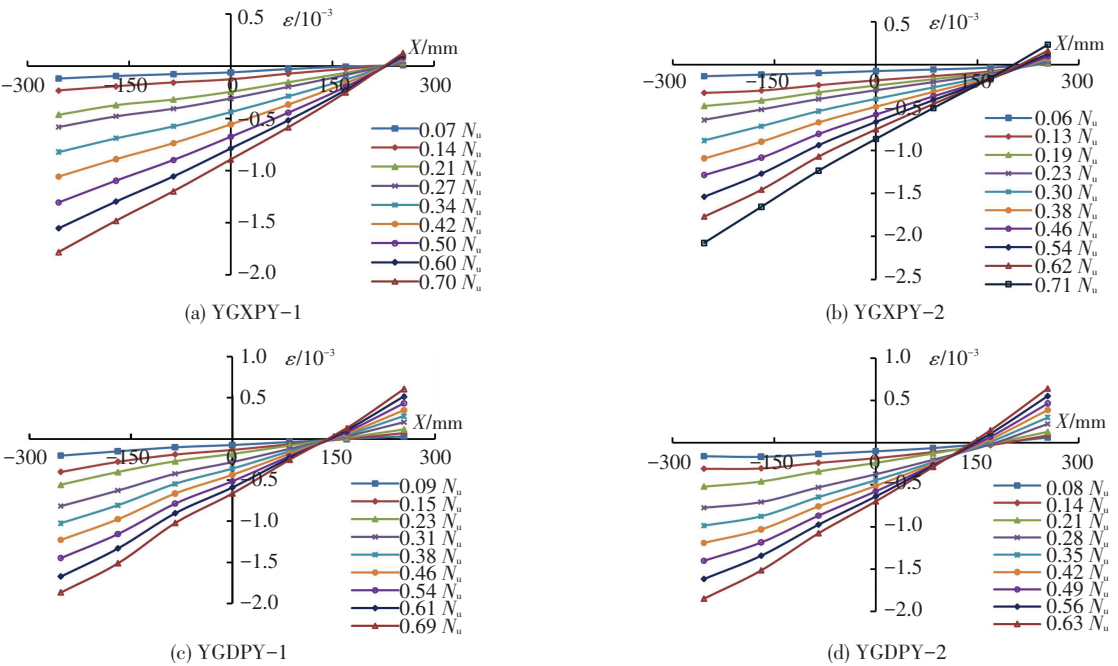


图 8 跨中截面轴向应变沿截面高度分布

2.6 延性

延性常用位移延性系数 μ 来衡量, $\mu=\Delta_u/\Delta_y$.实测各试件特征点位移值见表 3, Δ_y 为屈服位移, Δ_p 为峰值位移, Δ_u 为极限位移,取试件承载力下降至峰值荷载 85%时对应的弹塑性位移.

由表 3 可知:1)各试件位移延性系数均大于 3,表现出良好的抗震变形性能;2)再生混凝土试件各特征点位移均比普通混凝土试件略大,计算所得 μ 值较大,延性较好;3)偏心距由 100 mm 增至 160 mm 时,普通混凝土试件和再生混凝土试件位移延性系数分别提高 25.2%和 27.6%,说明随着偏心距增大,试件破坏时发生的弹塑性变形增大,延性有所提高.

表 3 试件特征点位移实测值

试件编号	Δ_y/mm	Δ_p/mm	Δ_u/mm	μ
YGXPY-1	5.38	10.68	20.91	3.89
YGXPY-2	5.85	12.27	24.41	4.17
YGDPY-1	5.10	12.11	24.82	4.87
YGDPY-2	5.28	13.35	28.09	5.32

2.7 耗能

在荷载-轴向变形曲线图 6 中,利用骨架曲线与横轴围成的面积来反映结构或构件耗散的能量.计算各试件分别达到屈服点、峰值点和破坏点时消耗的能量见表 4,相应的柱状图见图 9.

由表 4 和图 9 可知:1) $e=100\text{ mm}$ 时,钢管再生混凝土试件各特征点耗能值较普通混凝土试件分别提高 7.9%、9.8%、11.2%; $e=160\text{ mm}$ 时,再生混凝土试件各特征点耗能值较普通混凝土试件分别提高 6.4%、11.2%、13.8%,说明钢管再生混凝土试件耗能能力强于普通混凝土试件;2)试件承载力达到屈服点、峰值点时,偏心距大的试件耗能平均值比偏心距

小的试件分别低 30.7%和 6.5%,而达到极限点时,反而高 15.53%,主要原因是偏心距大的试件虽然峰值荷载有所下降,但曲线下降段非常平缓,破坏时发生的弹塑性变形较大,耗能能力更强;3)偏心距 100 mm 时,试件破坏时的平均耗能值是峰值点平均耗能的 2.38 倍,偏心距增至 160 mm 时,上述比值为 2.94,说明偏压试件的耗能能力主要集中在峰值点直至破坏这一过程,即承载后期耗能能力较强,且具有随偏心距增大而增强的趋势.

表 4 试件特征点耗能值

试件编号	屈服点	相对值		峰值点	相对值		破坏点	相对值	
		相对值	绝对值		相对值	绝对值		相对值	绝对值
YGXPY-1	18.048 0	1.000	60.488 5	1.000	142.919 2	1.000			
YGXPY-2	19.474 1	1.079	66.372 4	1.098	158.903 9	1.112			
YGDPY-1	12.598 5	1.000	56.174 7	1.000	163.073 5	1.000			
YGDPY-2	13.404 8	1.064	62.466 3	1.112	185.614 5	1.138			

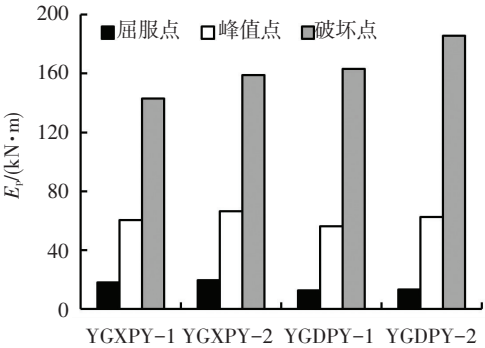


图 9 试件耗能对比

2.8 刚度

实测各试件抗压刚度 K -轴向应变 ε 的关系曲线见图 10,纵坐标 K 为抗压刚度,由竖向荷载 N 与实测 1 200 mm 标距段相对位移均值的比值确定;横坐标为 1 200 mm 标距段相对位移均值的平均应变,可取各级加载循环弹塑性位移峰值的均值与

1 200 mm 的比值. 以加载过程中荷载首次达到 2 500 kN 时测得数据作为初始刚度.

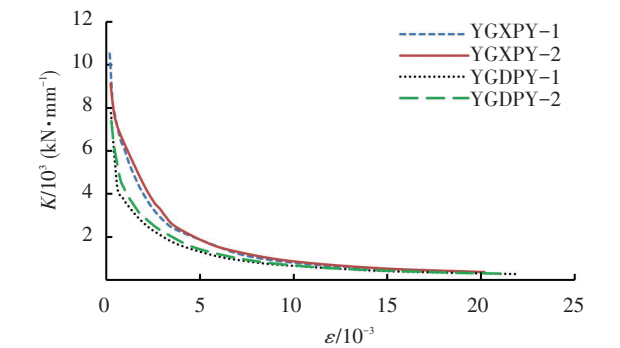


图 10 刚度-应变关系曲线

由图 10 可见: 1) 钢管再生混凝土试件的初始刚度比普通混凝土试件略低, 刚度退化过程大致相同; 2) 偏心距小的试件刚度退化速度慢于偏心距大的试件, 原因在于偏心受压试件的二阶效应对轴向

刚度的衰减过程有一定影响.

3 承载力计算

目前, 计算圆钢管混凝土偏压承载力的规程主要有中国的 DBJ 13-51—2003^[11], CECS28 : 90^[12], DL/T 5085—1999^[13], GB 50936—2014^[14], 日本规范 AIJ^[15] 等. 利用上述规范或规程, 基于实测材料强度, 计算各试件极限承载力, 计算结果见表 5, N_{uc} 为试验值, N_{uc} 为计算值.

由表 5 可知, 规程 CECS28 : 90, AIJ 计算结果与试验值偏差量较小, 吻合较好, 且具有一定的强度储备; 而规程 DBJ 13-51—2003, DL/T 5085—1999, GB 50936—2014 计算结果偏保守, 材料利用不充分, 建议采用规程 CECS28 : 90, AIJ 计算圆钢管再生混凝土柱偏心受压极限承载力.

表 5 计算值与试验值比较

试件 编号	N_{uc}/kN	DL/T 5085—1999		DBJ13-51—2003		CECS28 : 90		AIJ		GB 50936—2014	
		N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{uc}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{uc}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{uc}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{uc}	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{uc}
YGXPY-1	10 236	9 391	1.09	8 979	1.14	9 749	1.05	9 842	1.04	8 890	1.15
YGXPY-2	11 258	9 502	1.18	9 153	1.23	9 875	1.14	9 963	1.13	9 153	1.23
YGDPY-1	7 890	6 921	1.14	6 686	1.18	7 108	1.11	7 173	1.10	6 870	1.15
YGDPY-2	8 633	7 019	1.23	6 798	1.27	7 194	1.20	7 255	1.19	7 019	1.23

4 结 论

1) 圆钢管高强再生混凝土柱偏心受压损伤发展过程和破坏形态与普通混凝土柱相似, 钢管可以与再生混凝土协同工作, 变形性能良好.

2) 圆钢管高强再生混凝土柱与普通混凝土柱相比, 承载力略高, 延性与耗能有所提高, 刚度退化过程相似.

3) 偏心距对钢管再生混凝土柱承载力影响较大, 随着偏心距增大, 承载力降低, 刚度退化加剧, 延性略有提高.

4) 建议采用规程 CECS28:90, AIJ 计算圆钢管再生混凝土偏心受压承载力, 计算结果与试验实测值吻合较好.

参考文献

[1] 骆行文, 管昌生. 再生混凝土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2440-2444.

[2] OLORUNSOGO F T, PADAYACHEE N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(2): 179-185.

[3] RYU J S. An experimental study on the effect of recycled aggregate concrete properties [J]. Magazine of Concrete Research, 2002, 54(1): 7-12.

[4] 肖建庄, 李佳彬, 兰阳. 再生混凝土技术最新研究进展与

评述[J]. 混凝土, 2003(10): 17-20.

[5] YANG Y F, HAN L H. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(12): 1310-1324.

[6] 张卫东, 王振波, 丁海军. 钢管再生混凝土短柱偏压性能实验 [J]. 大庆石油学院学报, 2011, 32(12): 170-176.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] FERHOUNE N. Experimental behaviour of cold-formed steel welded tube filled with concrete made of crushed crystallized slag subjected to eccentric load [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 80: 159-166.

[11] DBJ 13-51—2003 钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

[12] CECS 28:90 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 1992.

[13] DL/T 5085—1999 钢-混凝土组合结构设计规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[14] GB 50936—2014 钢管混凝土结构技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[15] AIJ—1997 Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures[S]. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 1997. (编辑 赵丽莹)