

# 钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究

张向冈<sup>1,2</sup> 陈宗平<sup>1,3</sup> 薛建阳<sup>3</sup> 苏益声<sup>1,3</sup>

(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, 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:** 为研究钢管再生混凝土柱的抗震性能, 设计并制作 10 根圆形试件进行拟静力试验。考虑再生粗骨料取代率、长细比、轴压比和含钢率等 4 种变化参数, 观察试件受力的全过程和破坏形态, 获取滞回曲线、骨架曲线、延性、耗能性能和刚度退化等各项抗震性能指标, 并采用数部相关规程计算低周反复荷载作用下圆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相似, 主要表现为钢管底部的鼓曲破坏; 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; 在现有的取代率参数变化范围内, 试件的滞回曲线受其影响不大, 基于抗震性能需求, 再生混凝土可以应用于工程承重结构之中; 试件的位移延性系数大于 3; 破坏时等效黏滞阻尼系数介于 0.305 ~ 0.460 之间; 建议采用规程 DL/T 5085—1999 用于反复荷载作用下圆钢管再生混凝土柱压弯承载力的设计计算。研究结果可为钢管再生混凝土结构的进一步推广和应用提供参考。

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

**中图分类号:** TU352.1<sup>1</sup> TU528.59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-431X(2014)09-0045-12

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

Zhang Xianggang<sup>1,2</sup> Chen Zongping<sup>1,3</sup> Xue Jianyang<sup>3</sup> Su Yisheng<sup>1,3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of the Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** To study the seismic behavior of recycled aggregate concrete filled steel tube (RACFST) columns, ten circular specimens with different replacement ratio of recycled coarse aggregate, slenderness ratio, axial compression ratio and steel ratio were tested under the cyclic reversed loading. The entire loading process and failure mode were observed, and the seismic behavior indexes including hysteretic curve, skeleton curve, ductility, dissipation capacity and stiffness degeneration were obtained. The bearing capacity of compression and flexure under the cyclic reversed loading was calculated by several existing codes. It is shown that the failure process and failure mode of RACFST columns are similar to those of concrete filled steel tube columns. The main phenomenon was that the bottom of the circular steel tube buckled. All the hysteretic curves are plump, whose shapes change from fusiformis to arch. Within the variation range of existing replacement ratio parameter, the hysteretic curves are influenced little. Based on the request for seismic performance, recycled aggregate concrete (RAC) can be used in engineering capacity-bearing structures. The displacement ductility factors are more than 3.0 and the equivalent viscous damping coefficients at failure point are between 0.305 and 0.460. The DL/T 5085—1999 Code can be used to calculate the compression and flexure strength of RACFST columns under the cyclic reversed loading. The research results can provide reference for further extension and application of RACFST structures.

**Keywords:** recycled aggregate concrete filled circular steel tube; pseudo static test; seismic behavior index; replacement

**基金项目:** 国家自然科学基金(51268004), 广西科技攻关项目(桂科攻 12118023-3), 广西自然科学基金(2012GXNSFAA053203), 广西理工科学实验中心重点项目(LGZX201102)和 2013 年广西研究生教育创新计划(T32737)

**作者简介:** 张向冈, 博士

**收稿日期:** 2013-07-29

ratio of recycled coarse aggregate; calculation of bearing capacity

E-mail: zpchen@ gxu. edu. cn

## 引 言

再生混凝土 ( recycled aggregate concrete, 简称 RAC) 由于在破碎过程中, 产生了大量的微裂纹和裂缝, 初始损伤积累较多, 且再生粗骨料表面含泥量较大, 常常被用于基坑回填、道路路基等非承重结构之中, 这严重限制了 RAC 结构的工程应用范围, RAC 的绿色环保优势并没有得到充分的发挥。如何将 RAC 应用于工程承重结构之中成为推广和应用 RAC 所必须要解决的一个问题<sup>[1]</sup>。钢管混凝土结构以其较高的结构承载力、优良的抗震性能、较快的施工速度和低廉的造价等优势, 广泛应用于工业厂房、大跨结构和民用建筑等之中。在钢管混凝土结构较为成熟的研究基础上, 提出了钢管再生混凝土 ( Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tube 简称 RACFST) 结构<sup>[2]</sup>。即在钢管内部填充 RAC 所形成的新型组合结构。RACFST 有效地处理了建筑垃圾污染和天然骨料短缺的问题, 但其力学性能尤其是抗震性能与普通钢管混凝土差别如何, 能否应用于抗震设防地区的高层以及超高层建筑之中, 这需要对 RACFST 结构进行深入的研究和分析。由于我国是一个多地震国家, 汶川、舟曲等震害给国民心理带来了很大恐惧, 研究 RACFST 柱的抗震性能, 获取其抗震性能指标, 明确 RACFST 柱能否适应于地震区的建筑中, 这无疑具有极为重要的意义。

目前, 国内外关于 RACFST 结构的研究并不多<sup>[3]</sup>, 且主要集中在静力单调受压方面, 在抗震性能方面, 国内文献<sup>[4]</sup>以 80 ~ 150mm 的废弃混凝土块体为再生粗骨料进行了 30 个 RACFST 构件的抗震性能试验, 结果表明: 薄壁钢管再生混合柱应用于地震区中低轴压比情况是可行的; 文献<sup>[5]</sup>采用了两端铰接的加载方式进行了 13 个试件的抗震性能试验, 结果表明: RACFST 柱的滞回性能与普通钢管混凝土相似, RACFST 柱同样可以表现出较高的延性和良好的能量

耗散能力。文献<sup>[6]</sup>以再生粗骨料取代率为变化参数, 进行了 6 根试件的抗震性能试验, 结果表明: 试件的耗能能力、延性和滞回特性随着再生粗骨料取代率的改变而略有改变。国外则没有发现 RACFST 结构抗震性能方面的文献报道。在课题组前期研究的基础<sup>[7-9]</sup>之上, 本文以普通粒径再生粗骨料为 RAC 组成材料, 以再生粗骨料取代率、长细比、轴压比和含钢率为变化参数, 采用悬臂柱式的加载方法, 进行了 10 根圆 RACFST 柱的抗震性能试验, 并采用数部规程计算试件的压弯承载力, 以推动 RACFST 结构的研究和应用。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

本试验所采用的材料为直焊缝圆钢管, P. O42. 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。选用钢材牌号为 Q235, 第一种圆钢管实测内径为 157. 0mm, 实测管壁厚度为 4. 6mm; 第二种圆钢管实测内径为 159. 1mm, 实测管壁厚度为 2. 7mm。再生粗骨料和天然粗骨料采用同一筛网筛分, 最大粒径为 20mm, 均为连续级配的碎石。再生粗骨料的取代率以 0% 为基准, 共有 0%、30%、70%、100% 四种, 混凝土试配强度为 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 的配合比见表 1。

设计并制作了 10 个构件。立面图见图 1。考虑再生粗骨料取代率 ( $\gamma$ )、长细比 ( $\lambda$ )、轴压比 ( $n$ ) 和含钢率 ( $\alpha$ ) 4 个变化参数。试件具体设计参数见表 2。

在表 2 中, 由于加载末期, 试件的竖向力大部分由核心 RAC 承担, 所以为了反映试件的最终的传力路径和受力状态, 本文选取的轴压比只与混凝土有关。即轴压比  $n = N/f_{ck}A_c$ , 其中,  $N$  为试验过程之中所施加的轴向力,  $f_{ck}$  为实测的 RAC 轴心抗压强度; 含钢率  $\alpha$

表 1 RAC 的配合比  
Table 1 Mix proportion of RAC

| 取代率  | 水胶比  | 砂率 (%) | 净用水 (kg) | 水泥 (kg) | 砂 (kg) | 天然粗骨料 (kg) | 再生粗骨料 (kg) |
|------|------|--------|----------|---------|--------|------------|------------|
| 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     |

表 2 试件设计参数  
Table 2 Design parameter and of specimens

| 编号        | C-1   | C-2   | C-3   | C-4   | C-5   | C-6   | C-7   | C-8   | C-9   | C-10  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\gamma$  | 0%    | 30%   | 70%   | 100%  | 100%  | 100%  | 100%  | 100%  | 100%  | 100%  |
| $\lambda$ | 20.46 | 20.46 | 20.46 | 20.46 | 18.05 | 15.64 | 20.67 | 20.67 | 20.67 | 20.67 |
| $n$       | 0.8   | 0.8   | 0.8   | 0.8   | 0.8   | 0.8   | 0.8   | 0.7   | 0.6   | 0.5   |
| $\alpha$  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.12  | 0.07  | 0.07  | 0.07  | 0.07  |
| $\theta$  | 1.35  | 1.36  | 1.31  | 1.36  | 1.36  | 1.36  | 0.70  | 0.70  | 0.70  | 0.70  |

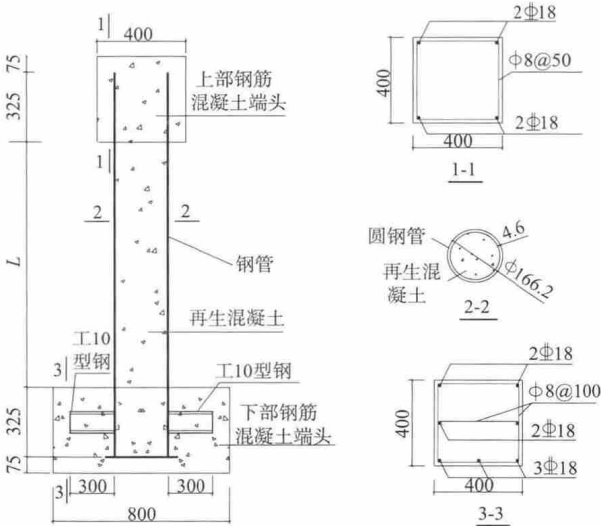


图 1 构件立面图  
Fig. 1 Elevation of specimens

$= A_s/A_c$ , 其中  $A_s$  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  $\theta = A_s f_{yk}/A_c f_{ck}$ ,  $f_{yk}$  为实测的钢管屈服强度。试件长细比  $\lambda = 4L_0/D$ ,  $L_0$  为计算高度, 取为  $L$ ,  $D$  为钢管外径。

1.2 材料力学性能

在试件制作过程之中, 根据现行国家标准《金属材料室温拉伸方法》<sup>[4]</sup>, 针对两种壁厚, 分别预留 3 个样品, 进行拉伸试验; 根据现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》<sup>[11]</sup>, 针对不同的取代率, 预留了标准立方体和棱柱体试块, 与试件同条件自然养护, 并进行抗压强度试验。实测的材料性能指标见表 3~5。

表 3~5 中,  $f_y$  和  $f_u$  分别表示钢管屈服强度和极限抗拉强度;  $E_s$  和  $E_c$  分别表示钢管和 RAC 弹性模量;  $\varepsilon_y$  表示钢管屈服应变;  $f_{cu}$  和  $f_c$  分别表示立方体抗压强度和轴心抗压强度。  $\nu_s$  和  $\nu_c$  表示钢管和 RAC 泊松比。

表 3 钢管实测力学性能

Table 3 Measured mechanical properties of steel tube

| 钢管壁厚  | $f_y$ (MPa) | $f_u$ (MPa) | $E_s$ ( $\times 10^5$ MPa) | $\nu_s$ | $\varepsilon_y$ ( $\mu\varepsilon$ ) |
|-------|-------------|-------------|----------------------------|---------|--------------------------------------|
| 4.6mm | 416.0       | 489.4       | 2.08                       | 0.296   | 2000                                 |
| 2.7mm | 366.8       | 431.6       | 1.98                       | 0.257   | 1853                                 |

表 4 RAC 实测强度指标

Table 4 Measured strength indexes of RAC

| $\gamma$ | $f_{cu}$ (MPa) | $f_c$ (MPa) | $f_c/f_{cu}$ |
|----------|----------------|-------------|--------------|
| 0%       | 46.8           | 37.1        | 0.79         |
| 30%      | 50.8           | 36.9        | 0.73         |
| 70%      | 53.8           | 38.2        | 0.71         |
| 100%     | 50.1           | 36.8        | 0.73         |

表 5 RAC 实测变形性能

Table 5 Measured deformation properties of RAC

| $\gamma$ | $\nu_c$  |          |          |          | $E_c$<br>( $\times 10^4$ MPa) |
|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------------------|
|          | $0.2f_c$ | $0.4f_c$ | $0.6f_c$ | $0.8f_c$ |                               |
| 0%       | 0.16     | 0.19     | 0.20     | 0.21     | 3.72                          |
| 30%      | 0.17     | 0.19     | 0.19     | 0.22     | 3.84                          |
| 70%      | 0.18     | 0.18     | 0.21     | 0.21     | 3.89                          |
| 100%     | 0.18     | 0.19     | 0.20     | 0.21     | 3.67                          |

由表 4 可见, 不同取代率下, RAC 的  $f_{cu}$  与  $f_c$  均相差不大, 4 种取代率下的  $f_{cu}$  变化幅度分别为 8.55%, 5.91% 和 -6.88%;  $f_c$  变化幅度分别为 -0.54%, 3.52% 和 -3.66%, 处于工程误差允许范围之内, 表明 RAC 的强度指标受取代率的影响并不显著。

由表 5 可见, 随着应力水平的增加, RAC 的泊松比逐渐增大, 但是不同取代率下 RAC 的泊松比始终变化不大, 表明随着取代率的增加, RAC 的横向变形性能并没有发生较大的改变; 且不同取代率下 RAC 的弹性模量变化幅度分别为 3.23%, 1.30% 和 -5.66%, 处于工程误差允许范围之内, 表明随着取代率的增加, RAC 的纵向变形性能变化较小。

由表 4 和表 5 的分析可知, 在材料层面上, RAC 的力学性能受取代率的影响并不大, 甚至在取代率达到 100% 的情况下, RAC 的强度以及变形性能并没有被弱化。

1.3 加载及测量装置

构件的悬臂柱式加载装置如图 2 所示, 加载装置实拍照片如图 3 所示。

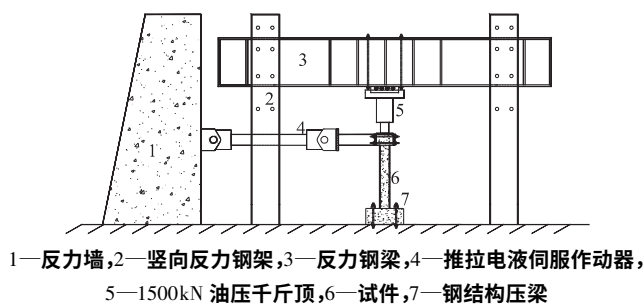


图2 试验加载装置示意图

Fig. 2 Test equipment diagram



图3 试验加载装置实拍照片

Fig. 3 Test equipment photo

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,钢管的应变由应变片测得,钢管应变片布置见图4。

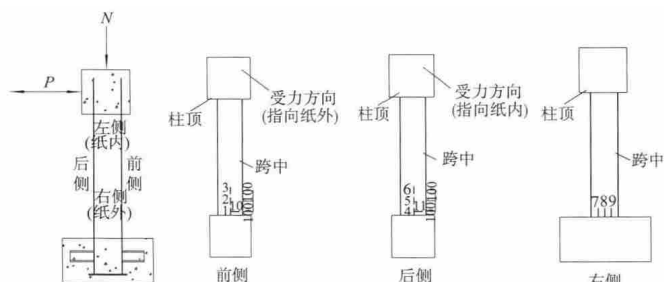


图4 试验测量装置

Fig. 4 Test measure equipment

#### 1.4 加载制度

首先通过 1500kN 油压千斤顶在柱顶施加竖向恒定荷载。按照《建筑抗震试验方法规程》<sup>[2]</sup> 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,加载级数为 5kN,直至试件达到屈服荷载  $P_y$ ,对应于每个荷载步循环一次;试件屈服后,采用位移控制,取屈服位移  $\Delta_y$  的倍数为级差进行控制加载,对应于每级位移循环三次,直至荷载下降到峰值荷载的 85% 左右时停止试验。试验中保持加载和卸载速度一致,以保证试验数据的稳定。水平荷载加载制度见图6。

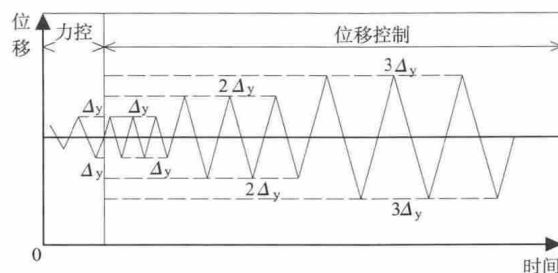


图5 水平荷载加载制度

Fig. 5 Loading system of level load

## 2 宏观破坏特征

(1) 如图6所示,试件破坏过程以及破坏形态均与普通钢管混凝土柱相似,主要表现为钢管底部的鼓曲破坏,试件前后两侧形成了一道较为明显的鼓曲波。

(2) 试件发生鼓曲破坏时,外部钢管应变早已达到屈服应变,所以钢管鼓曲属于弹塑性屈曲。

(3) 试验结束后,人工切割试件的外部钢管,观察核心 RAC 的破坏形态。由图6可见,沿柱高范围内,均没有发现横向裂缝,底部 RAC 被压碎,破坏范围主要集中在距离试件最底部 4cm 内。

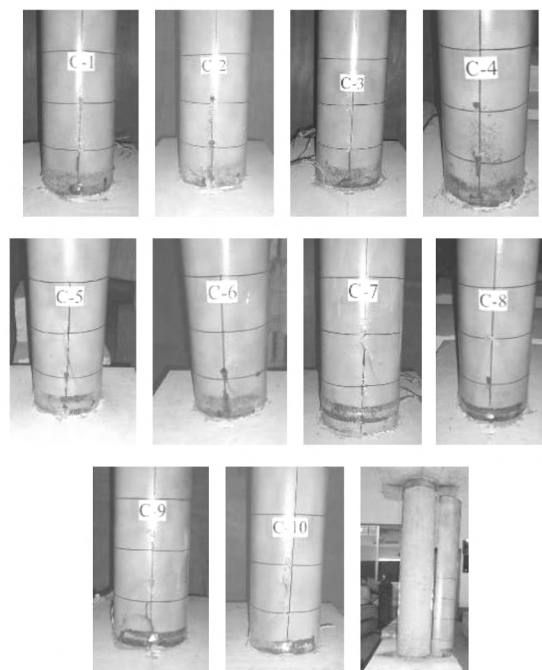


图6 试件破坏形态

Fig. 6 Failure mode of specimen

(4) 所有试件外部钢管的成型方式均采用直焊缝焊接,在整个加载过程,焊缝均没有开裂,焊接水平达到了技术要求。

(5) 取代率单参数变化试件的塑性较平均高度为 2.7cm ~ 3.0cm,塑性铰沿钢管表面的平均长度为

15.8cm~19.0cm, 喷漆脱落范围中心的平均高度为4.8cm~5.6cm, 加载结束时对应的最大位移转角为 $1/12 \sim 1/14$ ; 长细比单参数变化试件的塑性铰平均高度为2.9cm~3.0cm, 塑性铰沿钢管表面的平均长度为14.1cm~16.8cm, 喷漆脱落范围中心的平均高度为4.8cm~5.6cm, 加载结束时对应的最大位移转角为 $1/21 \sim 1/14$ ; 轴压比单参数变化试件的塑性铰平均高度为1.6cm~5.0cm, 塑性铰贯穿整个钢管表面, 喷漆脱落范围中心的平均高度为3.5cm~5.5cm, 加载结束时对应的最大位移转角为 $1/13$ 。总体上来讲, 喷漆脱落范围中心平均高度约为塑性铰平均高度的2倍。

(6) 试件破坏前, 外部钢管与核心 RAC 黏结性能良好; 试件破坏后, 通过金属锤子敲击试件外部钢管

表面, 发现试件黏结性能依然良好, 没有发生脱粘现象, 表明圆钢管对核心 RAC 的约束效果良好, 在反复推拉的过程之中, 试件能够较好地作为一个整体抵抗外界的地震作用。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 滞回曲线

试验实测的  $P-\Delta$  滞回曲线如图7所示, 其中,  $P$  表示水平荷载,  $\Delta$  表示柱端水平位移, 符号“□”表示试件屈服点, “○”表示试件峰值点, “△”表示试件破坏点。由图7可知, RACFST 柱的滞回曲线具有以下特征:

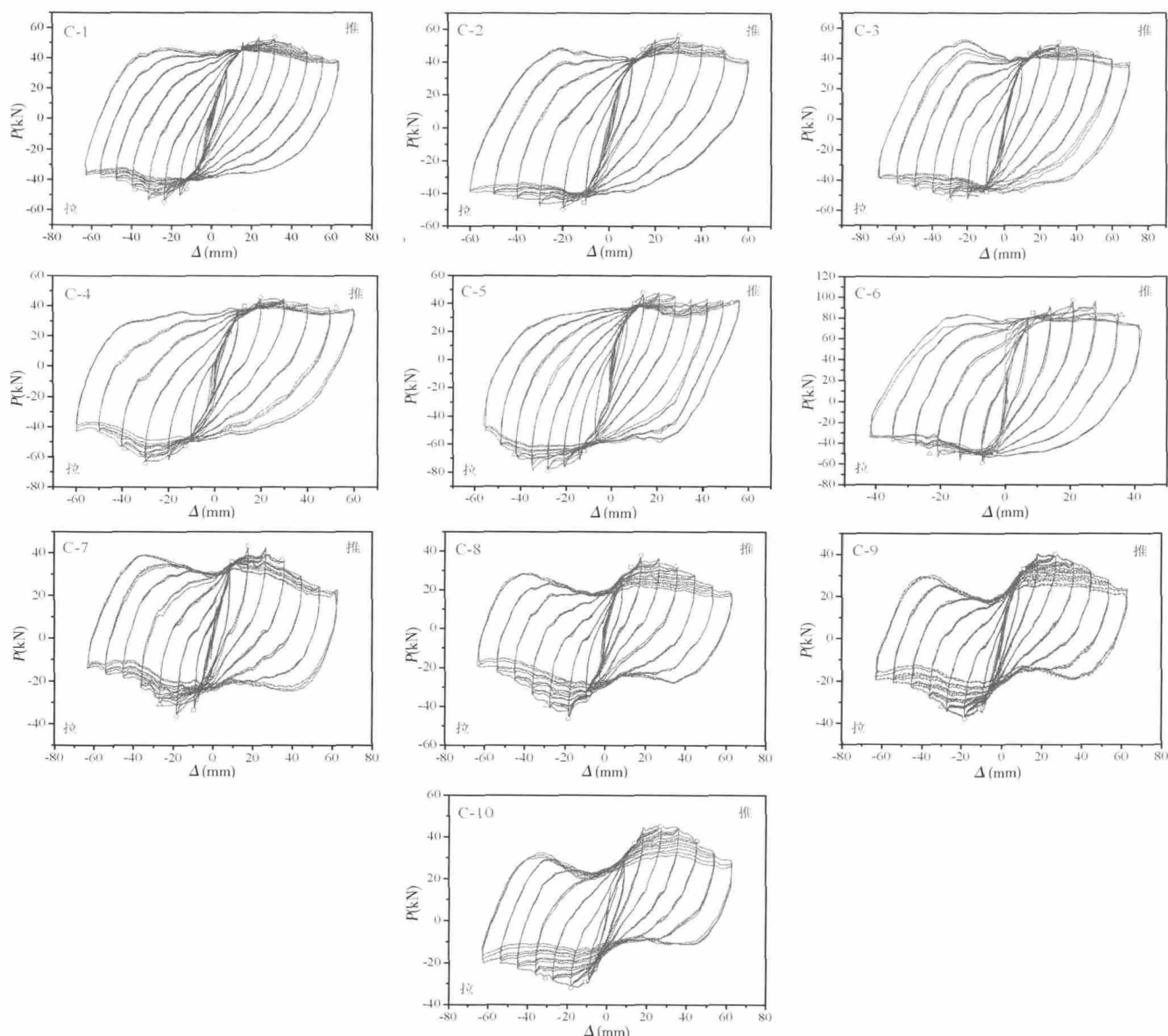


图7 RACFST 试件滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curves of RACFST specimens

(1) 在力控阶段,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,力控加载阶段结束时,没有发现明显的残余变形,试件基本上处于弹性工作状态。

(2) 在位移控制阶段,荷载有部分提高,达到峰值荷载之后,承载力开始下降,水平荷载卸载为零时,位移不再为零,此时试件开始存在残余变形,说明与荷载相比,在低周反复加载的过程之中,位移存在一定的滞后性能,且随着循环位移的增加,残余变形越来越大,位移的滞后性能愈发的明显。而且每级位移三次循环所得到的滞回曲线逐渐地发生倾斜,越来越向位移轴靠拢,反映了加载过程之中,强度和刚度的逐级退化,构件的损伤逐级增加。但是滞回环越来越饱满,其耗能能力逐渐增加。

(3) 所有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,除轴压比单参数变化试件外,试件的滞回曲线捏缩现象不显著,表现出良好的稳定性。

(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基本相似,表明在现有取代率参数变化范围内,试件的滞回曲线受其影响不大。

(5) 对于长细比单参数变化试件,随长细比的增加,试件的屈服荷载、峰值荷载以及破坏荷载逐渐的加大,且对应于各特征点(屈服点、峰值点和破坏点)

处的滞回环越来越饱满,耗能能力逐渐提高。

(6) 对于轴压比单参数变化试件,后期滞回曲线捏缩现象比较显著,特别是轴压比较小时,该现象更为显著。这主要是由于试件含钢率较小,其对核心混凝土的约束作用较弱,尤其是后期加载阶段,钢管底部局部屈曲现象较为严重,其约束作用更是弱上加弱。且轴压比较小时,核心 RAC 的横向变形有可能小于外部钢管,致使钢管与 RAC 没有达到最紧密的接触状态,相应地钢管对 RAC 的环向约束也没有达到最佳的状态。

(7) 对于轴压比单参数变化试件,随着轴压比的增加,试件各特征点处承载力变化不大,有的甚至变小,这主要和试验设计的较小轴压比有关。文献[3]也曾有过类似的报道。

(8) 对于两种不同含钢率的试件 C-4 和 C-7,最明显的区别在于由于壁厚较小,试件 C-7 滞回曲线的后期出现了捏缩现象,表明与试件 C-4 相比,试件 C-7 后期的耗能能力较弱。

### 3.2 骨架曲线

图 8 为所有试件的  $P-\Delta$  骨架曲线。部分试件由于在试件制作过程之中,在钢管垂直度方面存在一定偏差,致使滞回曲线及骨架曲线并不对称,为了便于说明问题,对部分有偏差的试件取骨架曲线在正负两个方向绝对值的平均值。由图 8 可知:

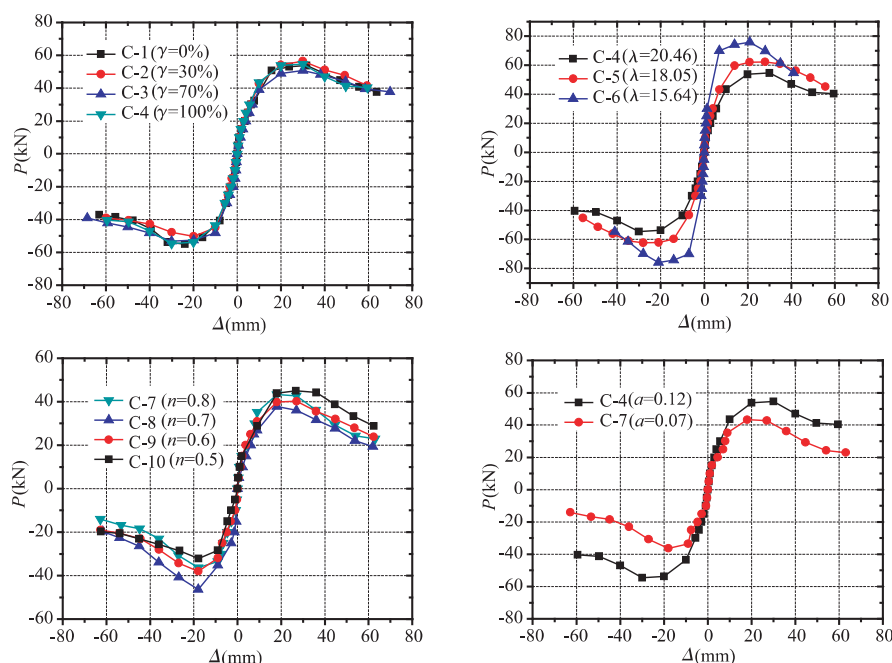


图 8 RACFST 试件骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curve of RACFST specimens

(1) 所有试件的骨架曲线较为完整,有上升段,峰

值段以及下降段。除试件 C-6 因为长细比较大外,试



件骨架曲线下降段比较平滑,后期变形能力强,位移延性较好,其形状类似于没有发生局部失稳的钢结构,这主要是由于钢管对核心 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,核心 RAC 的支撑作用延缓或阻止了钢管的内凹屈曲,外部钢管的稳定性得到加强。外部钢管与核心 RAC 之间协同互补、共同工作、互成整体的优势,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,弹性阶段几乎重合,表明设计取代率的变化对初始弹性刚度的影响不大;当曲线达到峰值荷载时,曲线有小幅度的分离,但达到下降段时,除取代率为 100% 的试件 C-4 有细微差别外,曲线又较好的重合在一起,总体上来讲,在钢管内部填充废弃混凝土并不会劣化试件的负刚度段行为。试件 C-4 之所以会出现细微的差别,其原因可能是试件内部的核心 RAC 其粗骨料全部由再生粗骨料组成,而在机械破碎、生产的过程之中,再生粗骨料内部可能会出现微裂缝等初始缺陷,积累了一定的原始损伤,在加载前期由于钢管对核心 RAC 的良好约束作用,这种损伤表现并不明显,但随着钢管鼓曲程度的增加,损伤逐渐地突显出来,以至于影响到了后期下降段的刚度。

(3) 对于长细比单参数变化试件,骨架曲线差异比较明显,在弹性阶段,随着长细比的减小,曲线变陡,弹性阶段和强化阶段刚度加大,试件的峰值承载力相应的增加,但试件 C-6 的曲线下降段急促,后期变形能力较弱。

(4) 对于轴压比单参数变化试件,轴压比的增大而带来的变化,在骨架曲线的下降段表现较为突出,试件 C-7 轴压比最大,但下降段比较陡峭,破坏位移较小,变形能力不大。

(5) 对于试件 C-4 和 C-7,随着含钢率的增加,弹性阶段的刚度有所增加,峰值承载力增加尤为突出,但试件 C-4 的骨架曲线下降段试件 C-7 近似平行,这主要是因为含钢率在一定范围内变化时,由于在加载后期钢管鼓曲严重,两种壁厚的钢管对核心 RAC 的横向约束力均较小,因为壁厚较大而带来的优势被弱化,加之本试验选取的轴压比只有 RAC 有关,施加给试件 C-4 和 C-7 的竖向力相等,在加载后期,钢管因为屈曲而失去了大部分竖向荷载承载能力,试件的竖向力大部分由核心 RAC 承担,此时试件 C-4 与 C-7 核心 RAC 所承担的轴向压力近似相等,导致试件 C-7 和 C-4 下降段刚度变化不大。

### 3.3 延性

本文采用能量等值法计算构件的位移延性系数  $\mu$ 。  $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ , 其中,  $\Delta_y$  为屈服位移,由能量等值法求得,  $\Delta_u$  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示意图如图 9 所示: 面积  $OAB$  = 面积  $BYM$ ,  $\Delta_y$  即为所求的初始屈服位移。计算求得的位移延性系数及各特征值见表 6, 其中,  $P_y$  和  $P_u$  分别为  $\Delta_y$  和  $\Delta_u$  对应的荷载值,  $\Delta_m$  为  $P_m$  对应的位移值。

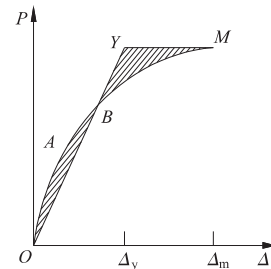


图 9 能量等值法示意图

Fig. 9 Diagram of energy equivalent method

表 6 试件各特征点荷载-位移实测值

Table 6 Measured load and displacement at characteristic points

| 编号  | 加载方向 | 屈服点        |                 | 峰值点        |                 | 破坏点        |                 | $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ | $\mu$ 平均 |
|-----|------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|-----------------------------|----------|
|     |      | $P_y$ (kN) | $\Delta_y$ (mm) | $P_m$ (kN) | $\Delta_m$ (mm) | $P_u$ (kN) | $\Delta_u$ (mm) |                             |          |
| C-1 | 正向   | 46.19      | 13.81           | 53.71      | 31.75           | 45.65      | 45.26           | 3.28                        | 3.18     |
|     | 反向   | 46.57      | 12.42           | 54.93      | 23.87           | 46.69      | 38.31           | 3.08                        |          |
|     | 平均   | 46.38      | 13.12           | 54.32      | 27.81           | 46.17      | 41.79           |                             |          |
| C-2 | 正向   | 47.80      | 14.27           | 56.43      | 29.97           | 47.97      | 47.96           | 3.36                        | 3.58     |
|     | 反向   | 45.40      | 10.73           | 50.16      | 19.92           | 42.64      | 40.78           | 3.80                        |          |
|     | 平均   | 46.60      | 12.50           | 53.30      | 24.95           | 45.31      | 44.37           |                             |          |
| C-3 | 正向   | 43.30      | 14.18           | 50.8       | 29.97           | 43.18      | 51.30           | 3.62                        | 4.24     |
|     | 反向   | 47.66      | 9.89            | 53.25      | 29.96           | 45.26      | 48.10           | 4.86                        |          |
|     | 平均   | 45.48      | 12.04           | 52.03      | 29.97           | 44.22      | 49.70           |                             |          |

续表 6

| 编号   | 加载方向 | 屈服点        |                 | 峰值点        |                 | 破坏点        |                 | $\mu = \Delta_u/\Delta_y$ | $\mu_{\text{平均}}$ |
|------|------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|---------------------------|-------------------|
|      |      | $P_y$ (kN) | $\Delta_y$ (mm) | $P_m$ (kN) | $\Delta_m$ (mm) | $P_u$ (kN) | $\Delta_u$ (mm) |                           |                   |
| C-4  | 正向   | 39.96      | 13.04           | 45.66      | 20.01           | 38.81      | 52.54           | 3.98                      | 3.58              |
|      | 反向   | 52.53      | 12.35           | 64.24      | 30.01           | 54.60      | 38.61           | 3.12                      |                   |
|      | 平均   | 46.25      | 12.70           | 54.95      | 25.01           | 46.71      | 45.58           |                           |                   |
| C-5  | 正向   | 39.97      | 10.19           | 47.75      | 13.98           | 40.59      | 52.70           | 5.18                      | 4.43              |
|      | 反向   | 64.94      | 11.63           | 79.29      | 27.97           | 67.40      | 42.83           | 3.70                      |                   |
|      | 平均   | 52.46      | 10.91           | 63.52      | 20.98           | 54.00      | 47.77           |                           |                   |
| C-6  | 正向   | 85.30      | 8.47            | 99.08      | 24.48           | 84.22      | 35.35           | 4.17                      | 5.75              |
|      | 反向   | 49.56      | 3.40            | 58.84      | 7.01            | 50.01      | 24.92           | 7.33                      |                   |
|      | 平均   | 67.43      | 5.94            | 78.96      | 15.75           | 67.12      | 30.14           |                           |                   |
| C-7  | 正向   | 35.91      | 9.68            | 43.31      | 18.02           | 36.81      | 34.91           | 3.54                      | 3.32              |
|      | 反向   | 32.57      | 8.85            | 36.35      | 18.01           | 30.90      | 26.77           | 2.86                      |                   |
|      | 平均   | 34.24      | 9.27            | 39.83      | 18.02           | 33.86      | 30.84           |                           |                   |
| C-8  | 正向   | 31.80      | 13.12           | 37.72      | 17.99           | 32.06      | 35.37           | 2.70                      | 3.19              |
|      | 反向   | 33.32      | 7.81            | 46.33      | 18.04           | 39.38      | 28.7            | 3.67                      |                   |
|      | 平均   | 32.56      | 10.47           | 42.03      | 18.02           | 35.72      | 32.04           |                           |                   |
| C-9  | 正向   | 33.17      | 11.31           | 40.21      | 27.02           | 34.18      | 39.74           | 3.51                      | 3.17              |
|      | 反向   | 33.10      | 10.57           | 37.95      | 17.93           | 32.26      | 29.95           | 2.83                      |                   |
|      | 平均   | 33.14      | 10.94           | 39.08      | 22.48           | 33.22      | 34.85           |                           |                   |
| C-10 | 正向   | 37.12      | 14.01           | 45.01      | 26.72           | 38.26      | 45.33           | 3.24                      | 3.04              |
|      | 反向   | 29.06      | 10.8            | 32.07      | 17.91           | 27.26      | 30.82           | 2.85                      |                   |
|      | 平均   | 33.09      | 12.41           | 38.54      | 22.32           | 32.76      | 38.08           |                           |                   |
|      | 平均   | 57.60      | 16.40           | 67.00      | 30.02           | 56.95      | 49.58           |                           |                   |

由表 6 可见: 试件的延性系数大于 3,表现出良好的抗震变形性能。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,取代率对特征值没有较大的影响。

3.4 耗能性能

采用等效黏滞阻尼系数  $h_e$  来评价试件的能量耗散能力。 $h_e = S_{(ABC+CDA)} / (2\pi \cdot S_{(OBE+ODF)})$ , 式中:  $S_{(ABC+CDA)}$  表示滞回环面积,  $S_{(OBE+ODF)}$  表示滞回环峰值点对应的三角形面积,如图 10 虚线所示。 $h_e$  取为每级循环位移下第一次循环的等效黏滞阻尼系数,见表 7。

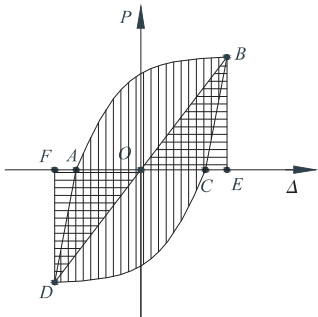


图 10  $h_e$  计算示意图  
Fig. 10 Calculation diagram of  $h_e$

表 7 试件各特征点实测  $h_e$

Table 7 Measured  $h_e$  at characteristic points

| 试件编号            | C-1   | C-2   | C-3   | C-4   | C-5   |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta_y$ (mm) | 0.152 | 0.190 | 0.175 | 0.179 | 0.161 |
| $\Delta_m$ (mm) | 0.248 | 0.257 | 0.299 | 0.234 | 0.213 |
| $\Delta_u$ (mm) | 0.402 | 0.406 | 0.460 | 0.433 | 0.433 |
| 试件编号            | C-6   | C-7   | C-8   | C-9   | C-10  |
| $\Delta_y$ (mm) | 0.157 | 0.187 | 0.163 | 0.163 | 0.160 |
| $\Delta_m$ (mm) | 0.212 | 0.234 | 0.239 | 0.233 | 0.210 |
| $\Delta_u$ (mm) | 0.378 | 0.356 | 0.338 | 0.335 | 0.305 |

由表 7 可见: 所有试件屈服时  $h_e$  介于 0.152 ~ 0.190 之间,峰值时  $h_e$  介于 0.210 ~ 0.299 之间,破坏时  $h_e$  介于 0.305 ~ 0.460 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,只是相当于 RACFST 试件屈服时的  $h_e$ ,相当于 RACFST 试件峰值时  $h_e$  的 1/2,相当于 RACFST 试件破坏时  $h_e$  的 1/3。

3.5 刚度退化

本文采用割线刚度来表示反复荷载作用试件的刚度退化。割线刚度表达式为:



$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|}$$

其含义为: 试件第  $i$  次的割线刚度等于第  $i$  次循环的峰值点荷载(  $+F_i$  和  $-F_i$  ) 的绝对值之和与相应变形(  $+X_i$  和  $-X_i$  ) 绝对值之和的比值。

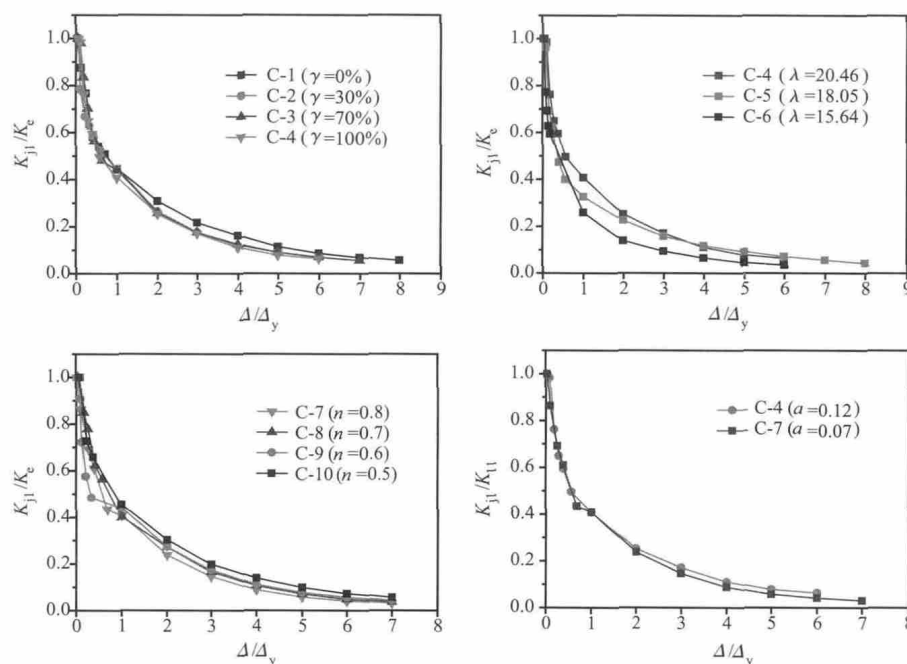


图 11 试件刚度-位移归一化分析

Fig. 11 Uniformization analysis of stiffness versus displacement

(1) 对于取代率单参数变化试件, 刚度退化曲线基本重合, 试件 C-1 刚度退化速率略小, 这主要是因为再生粗骨料表面附着一部分水泥砂浆, 有可能会降低 RAC 的弹性模量, 在低周反复荷载作用下, 加速了 RAC 开裂或被压碎的趋势。但总体上来说, 试件 C-1 刚度退化速率不是特别明显, 即不同再生粗骨料取代率下, RACFST 试件的刚度退化规律基本一致。

(3) 对于长细比单参数变化试件, 试件屈服前后, 随长细比的增加, 刚度退化较慢。而随着循环位移的增加, 刚度退化速率基本一致。

(4) 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依次增大。这主要是与试验后期越来越明显的二阶效应有关。

(5) 对于试件 C-4 和 C-7, 刚度退化曲线基本重合, 退化速率基本一致。试验再次证明, 在现有含钢率参数变化范围, 壁厚优势在下降段刚度方面并不明显。

表 8 给出了试验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。

为了解单参数变化试件的刚度退化规律, 对刚度-位移按照设计参数进行归一化分析, 见图 11。其中,  $K_e$  为试件弹性阶段初始刚度,  $K_{y1}$  为每级循环位移下, 第一次循环的割线刚度。由图 11 可见:

#### 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, 并出台了一系列的相关规范, 国内如 CECS 254: 2012<sup>[14]</sup>, DL/T 5085—1999<sup>[15]</sup>, DBJ 13-51—2003<sup>[16]</sup>; 国外如美国规范 AISC-LRFD (1999)<sup>[17]</sup>, 英国规范 BS5400<sup>[18]</sup> 以及欧洲规范 EC4 (1994)<sup>[19]</sup> 等。大量研究表明<sup>[20]</sup>: 低周反复荷载下构架的骨架曲线与静力单调条件下荷载-变形曲线较为接近。为了考察现有的静力单调条件下钢管混凝土构件的强度计算方法是否适用于低周反复荷载作用下 RACFST 构件, 本文基于试验实测数据, 利用上述各规范或规程, 计算试件的压弯强度, 并将实测结果  $N_u^t$  与计算结果  $N_u^c$  进行对比分析, 试件对比结果及统计特征值见表 9~10。

由表 9 和表 10 可见:

(1) 规程 AISC-LRFD (1999)、BS5400 (2005) 计算结果比试验实测结果小很多, 设计偏于保守。这主要是因为两种规范均采用的是叠加计算理论。在外部钢管与核心混凝土承载力叠加的过程之中, 规范 BS5400

表 8 试件特征点刚度实测值  
Table 8 Measured stiffness at characteristic point

| 试件编号 | $K_e$ (kN/mm) | $K_y$ (kN/mm) | $K_m$ (kN/mm) | $K_u$ (kN/mm) | $K_y/K_e$ | $K_m/K_e$ | $K_u/K_e$ |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| C-1  | 10.43         | 3.54          | 1.95          | 1.10          | 0.34      | 0.19      | 0.11      |
| C-2  | 9.87          | 3.73          | 2.14          | 1.02          | 0.38      | 0.22      | 0.10      |
| C-3  | 9.90          | 3.78          | 1.74          | 0.89          | 0.38      | 0.18      | 0.09      |
| C-4  | 10.64         | 3.64          | 2.20          | 1.02          | 0.34      | 0.21      | 0.10      |
| C-5  | 18.87         | 4.81          | 3.03          | 1.13          | 0.25      | 0.16      | 0.06      |
| C-6  | 38.46         | 9.62          | 5.60          | 2.23          | 0.25      | 0.15      | 0.06      |
| C-7  | 9.32          | 3.70          | 2.21          | 1.10          | 0.40      | 0.24      | 0.12      |
| C-8  | 8.60          | 3.70          | 2.21          | 1.10          | 0.43      | 0.26      | 0.13      |
| C-9  | 7.93          | 3.03          | 1.74          | 0.95          | 0.38      | 0.22      | 0.12      |
| C-10 | 6.99          | 2.67          | 1.73          | 0.86          | 0.38      | 0.25      | 0.12      |

表 9 试件  $N_u^t$  与  $N_u^c$  对比结果  
Table 9 Contrast result between  $N_u^t$  and  $N_u^c$

| 编号   | $N_u^t$ (kN) | CECS 254: 2012 |               | DL/T 5085—1999 |               | DBJ 13-51—2003 |               | AISC-LRFD( 1999) |               | BS5400( 2005) |               | EC4( 1994)   |               |
|------|--------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
|      |              | $N_u^c$ (kN)   | $N_u^t/N_u^c$ | $N_u^c$ (kN)   | $N_u^t/N_u^c$ | $N_u^c$ (kN)   | $N_u^t/N_u^c$ | $N_u^c$ (kN)     | $N_u^t/N_u^c$ | $N_u^c$ (kN)  | $N_u^t/N_u^c$ | $N_u^c$ (kN) | $N_u^t/N_u^c$ |
| C-1  | 54.32        | 44.21          | 0.76          | 60.47          | 0.90          | 69.00          | 0.79          | 37.90            | 1.45          | 28.71         | 1.74          | 47.88        | 0.92          |
| C-2  | 53.30        | 42.13          | 0.77          | 58.79          | 0.91          | 68.25          | 0.78          | 36.82            | 1.47          | 30.01         | 1.63          | 48.15        | 0.90          |
| C-3  | 52.03        | 41.66          | 0.76          | 58.82          | 0.88          | 68.29          | 0.76          | 36.01            | 1.47          | 31.03         | 1.54          | 48.35        | 0.88          |
| C-4  | 54.95        | 42.38          | 0.80          | 58.95          | 0.93          | 68.32          | 0.80          | 37.00            | 1.51          | 29.88         | 1.69          | 48.10        | 0.93          |
| C-5  | 63.52        | 48.57          | 0.81          | 66.84          | 0.95          | 78.23          | 0.81          | 42.00            | 1.53          | 30.94         | 1.91          | 54.64        | 0.95          |
| C-6  | 78.96        | 40.92          | 1.04          | 64.83          | 1.22          | 82.51          | 0.96          | 34.00            | 2.37          | 49.09         | 1.50          | 59.47        | 1.26          |
| C-7  | 39.83        | 23.65          | 0.93          | 37.18          | 1.07          | 39.85          | 1.00          | 14.25            | 2.88          | 23.59         | 1.58          | 27.51        | 1.24          |
| C-8  | 42.03        | 26.74          | 0.91          | 39.61          | 1.06          | 41.14          | 1.02          | 16.33            | 2.63          | 20.64         | 1.91          | 42.95        | 0.99          |
| C-9  | 39.08        | 29.83          | 0.79          | 42.03          | 0.93          | 41.87          | 0.93          | 18.41            | 2.16          | 17.69         | 2.07          | 43.04        | 0.91          |
| C-10 | 38.54        | 32.93          | 0.74          | 44.45          | 0.87          | 42.04          | 0.92          | 20.49            | 1.90          | 14.75         | 2.45          | 43.12        | 0.90          |

表 10 试件  $N_u^t/N_u^c$  的统计特征  
Table 10  $N_u^t/N_u^c$  demographic characteristics of specimens

| 统计特征值 | CECS 254: 2012 | DL/T 5085—1999 | DBJ 13-51—2003 | AISC-LRFD( 1999) | BS5400( 2005) | EC4( 1994) |
|-------|----------------|----------------|----------------|------------------|---------------|------------|
| 平均值   | 0.83           | 0.97           | 0.88           | 1.94             | 1.80          | 0.99       |
| 方差    | 0.0095         | 0.0123         | 0.0097         | 0.2913           | 0.0854        | 0.0202     |
| 变异系数  | 0.1171         | 0.1140         | 0.1121         | 0.2785           | 0.1623        | 0.1439     |

( 2005) 核心混凝土虽然采用了三轴受压的强度,但对核心混凝土承载力进行了小幅度的折减,使得叠加后的计算结构小于实测结果;而规范 AISC-LRFD ( 1999) 采用了不考虑承载力提高的计算公式,外部钢管的套箍效应没有得到体现,故计算得到的极限承载力明显低于实测值。在设计上,规范 AISC-LRFD( 1999) 比规范 BS5400( 1979) 更加偏于保守。

( 2) 与规范 AISC-LRFD( 1999) 、BS5400( 2005) 相

比,采用 EC4( 1994) 计算得到的极限承载力与试验值吻合较好,这主要是由于 EC4( 1994) 考虑了钢管的套箍效应,使得计算承载力提高较多,但考虑到国内设计人员使用国外设计规程的诸多不便之处,建议 EC4 ( 1994) 不宜用于反复荷载作用下 RACFST 柱压弯承载力的设计计算。

( 3) 规范 CECS 254: 2012、DL/T 5085—1999 和 DBJ 13-51—2003 中关于 RACFST 柱压弯承载力计算

方法采用的是统一理论,即各种受力状态下的钢管混凝土构件统一在同一个理论基础上,并采用一个统一公式来进行承载力计算。其设计方法是基于大量的试验结果,通过数据回归和总结得到的。由规程 DL/T 5085—1999 计算得到的圆形 RACFST 试件的极限承载力与试验实测数据离散性不大,吻合较好。建议用于反复荷载作用下 RACFST 柱压弯承载力的设计计算。而规程 CECS 254:2012 和 DBJ 13-51—2003 试验结果均小于计算结果,容易引起安全隐患。两者均不适用于反复荷载作用下 RACFST 构件的强度设计。

## 5 结论

通过 10 个圆 RACFST 柱试件的抗震性能试验研究以及压弯承载力计算分析,主要得到以下结论:

(1) 试件破坏过程以及破坏形态均与普通钢管混凝土柱相似,主要表现为钢管底部的鼓曲破坏,试件前后两侧形成了一道较为明显的鼓曲波。

(2) 所有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,除轴压比单参数变化试件外,试件的滞回曲线捏缩现象不显著,表现出良好的稳定性。

(3) 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基本相似,表明在现有取代率参数变化范围内,试件的滞回曲线受其影响不大,基于抗震性能需求,RAC 可以应用于工程承重结构之中。

(4) 所有 RACFST 试件的位移延性系数大于 3,表现出良好的抗震变形性能。

(5) 所有试件屈服时  $h_e$  介于 0.152 ~ 0.190 之间,峰值时  $h_e$  介于 0.210 ~ 0.299 之间,破坏时  $h_e$  介于 0.305 ~ 0.460 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,只是相当于 RACFST 试件屈服时的  $h_e$ ,相当于 RACFST 试件峰值时  $h_e$  的 1/2,相当于 RACFST 试件破坏时  $h_e$  的 1/3。

(6) 建议采用规程 DL/T5085—1999 用于反复荷载作用下 RACFST 柱压弯承载力的设计计算。

## 参考文献

- [1] 杨有福. 钢管再生混凝土构件力学性能和设计方法若干问题的探讨 [J]. 工业建筑, 2006, 36(11): 1-5, 10 (Yang Youfu. Discussion on several problems of mechanical behavior and design method of recycled concrete-filled steel tubular members [J]. Industrial Construction, 2006, 36(11): 1-5, 10 (in Chinese))
- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2007: 1-30
- [3] Yang Youfu, Han Linhai. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(12): 1310-1324
- [4] 吴波, 赵新宇, 杨勇. 采用大尺度废弃混凝土的再生混合构件研究进展 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2012, 40(10): 174-183 (Wu Bo, Zhao Xinyu, Yang Yong. Regeneration structural members containing large-size demolished concrete: a review [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(10): 174-183 (in Chinese))
- [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): 183-194
- [6] 黄一杰, 肖建庄. 钢管再生混凝土柱抗震性能与损伤评价 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(3): 330-335, 354 (Huang Yijie, Xiao Jianzhuang. Seismic behavior and damage assessment of recycled aggregate concrete-filled steel tube columns [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2013, 41(3): 330-335, 354 (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 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))
- [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 (Zhang Xianggang, Chen Zongping, Wang Jiangmei, 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))
- [10] 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: Standards Press of China, 2002 (in Chinese))
- [11] GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003 (GB/T 50081—2002 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture &

- Building Press, 2003 ( in Chinese) )
- [2] 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) )
- [3] 李黎明, 李宁, 陈志华, 等. 方钢管混凝土柱的抗震性能试验研究 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38(4): 817-822 ( Li Liming, Li Ning, Chen Zhihua, et al. Anti-seismic test on concrete-filled square steel tube column [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(4): 817-822( in Chinese) )
- [4] 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, 2012( in Chinese) )
- [5] 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 ( DL/T 5085—1999 Code for design of steel-concrete composite structure [S]. Beijing: China Electric Power Press, 1999( in Chinese) )
- [6] DBJ 13-51—2003 钢管混凝土结构技术规程 [S] ( DBJ 13-51—2003 Technical specification for concrete-filled steel tubular structure [S] ( in Chinese) )
- [7] Load and resistance factor design specification for structural steel buildings [S]. 2nd edition. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1999
- [8] BS 5400-5: 2005 Steel, concrete and composite bridges. Part 5: code of practice for design of composite bridges [S]. London: British Standards Institution, 2005
- [9] EN 1994-1-1: 2004 Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004
- [10] 朱伯龙. 结构抗震试验 [M]. 北京: 地震出版社, 1989

张向冈( 1986- ), 男, 博士。主要从事钢与混凝土组合结构研究。

陈宗平( 1975- ), 男, 博士, 教授。主要从事钢与混凝土组合结构、再生混凝土结构、异形柱结构研究。

薛建阳( 1970- ), 男, 博士, 教授。主要从事钢与混凝土组合结构及工程结构抗震研究。

苏益声( 1956- ), 男, 硕士, 教授。主要从事钢结构与组合结构研究。