

# 圆钢管掺镍铁渣再生混凝土柱抗震性能及恢复力模型研究

罗才松<sup>1,2</sup>, 许力<sup>1,2\*</sup>, 陈华艳<sup>1,2</sup>, 付朝江<sup>1,2</sup>, 祁皑<sup>3</sup>

(1. 福建理工大学 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福州 350118; 2. 福建理工大学 土木工程学院, 福州 350118; 3. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108)

**摘要:** 为实现建筑和工业废弃物的再利用, 采用镍铁渣代替部分水泥、再生粗骨料代替天然骨料制备镍铁渣再生混凝土(RFC)。进一步地, 将RFC填入圆钢管中形成钢管掺镍铁渣再生混凝土(RFCFST)柱。对11根RFCFST柱进行水平低周往复抗震性能试验研究。试验变量包括再生粗骨料取代率、轴压比、约束水平和剪跨比。试验结果表明, RFCFST柱与传统钢管混凝土柱的破坏模式相似。 $P-\Delta$ 效应会显著降低柱的抗侧能力和变形能力, 尤其是在大轴压比和大剪跨比情况下。骨料取代率对RFCFST柱的承载力、变形能力和耗能能力几乎无影响。随着轴压比的增大, 柱的变形能力降低, 但单圈耗能能力增强。试件的水平承载力和延性随着套箍水平的提高而提高, 随着剪跨比的增大而降低。基于试验结果和理论分析, 提出了RFCFST柱水平力-位移角恢复力模型。

**关键词:** 再生骨料混凝土; 镍铁渣; 钢管混凝土; 抗震性能; 恢复力模型

中图分类号: TU398<sup>+</sup>.9, TU352.1<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0104-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20230923001

## Seismic Behavior and Hysteretic Model of Recycled Aggregate Concrete with Ferronickel Slag-Filled Circular Steel Tubular Columns

LUO Caisong<sup>1,2</sup>, XU Li<sup>1,2\*</sup>, CHEN Huayan<sup>1,2</sup>, FU Chaojiang<sup>1,2</sup>, QI Ai<sup>3</sup>

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

\*Corresponding author: xuli@fjut.edu.cn

**Abstract:** To reuse construction and industrial waste, this study adopted ferronickel slag to partially replace cement and recycled coarse aggregate (RCA) to replace natural aggregate to prepare recycled aggregate concrete with ferronickel slag (RFC). Further, the RFC was filled into the circular steel tube to form the RFC-filled steel tubular (RFCFST) columns. Eleven RFCFST columns were tested under combined axial and cyclic lateral loading. The test variables included the RCA replacement ratio, the axial load ratio, the confinement level, and the shear-span ratio. The test

收稿日期: 2023-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(5227080392), 福建省自然科学基金(2023J05190), 福建理工大学科研启动基金(GY-Z220224)

作者简介:

罗才松(1982—), 男, 博士, 正高级实验师, 主要从事钢-混凝土组合结构及工程结构抗震性能方面的研究。

E-mail: 0716jpu@163.com。

通信作者:

许力(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事钢-混凝土组合结构及工程结构抗震性能方面的研究。E-mail: xuli@fjut.edu.cn。

results demonstrated that the failure mode of RCFST columns was similar to that of CFST columns. The  $P-\Delta$  effect caused a significant diminution in the lateral load resistance and deformation capacity, especially for columns with a high axial load ratio and high shear-span ratio. The RCA replacement ratio had little effect on the load-carrying capacity, deformability, and energy dissipation of the RCFST columns. With the increase in axial load ratio, the deformability of the column decreased, but the single-cycle energy dissipation capacity increased. The lateral load-carrying capacity and ductility increased with the increase in confinement level but declined with the increase in shear-span ratio. Based on the test results and theoretical analysis, a lateral load-drift level restoring force model for RCFST columns was proposed.

**Keywords:** recycled aggregate concrete; ferronickel slag; concrete filled-steel tube; seismic performance; restoring force model

建筑废弃混凝土是指城市更新中产生的建筑垃圾,其总量庞大。将废弃混凝土块经破碎筛分后形成再生粗骨料(recycled coarse aggregate, RCA),这种材料能够部分或全部代替天然粗骨料,配置形成再生骨料混凝土(recycled aggregate concrete, RAC)。再生骨料的回收利用有利于节约自然资源,减轻环境污染。与此同时,学者们也在关注水泥的辅助胶凝材料,如粉煤灰<sup>[1]</sup>、矿渣粉<sup>[2]</sup>和镍铁渣<sup>[3]</sup>。其中,镍铁渣(ferronickel slag, FNS)是镍合金冶炼过程中产生的固体废弃物,采用高炉生产工艺时,每生产1 t纯镍需要排出约14 t的废渣<sup>[4]</sup>。仅中国每年的镍铁渣产量就达到3 000万 t以上。目前,镍铁渣的处理方式多为堆存和填埋,这不仅浪费了资源,还加剧了环境污染。因此,同样需要对镍铁渣进行资源再利用处理。镍铁渣中含有 $C_3S$ 、 $C_2S$ 等矿物相,同时含有大量玻璃体,具备用作胶凝材料的潜力<sup>[5]</sup>。将镍铁渣研磨成粉作为矿物掺合料生产混凝土,是镍铁渣再利用的一个可行途径。为了综合回收利用废弃混凝土和镍铁渣,本文采用废弃混凝土破碎得到的再生粗骨料代替部分或全部天然粗骨料、镍铁渣粉代替部分水泥,形成掺镍铁渣的再生骨料混凝土(recycled aggregate concrete with ferronickel slag, RFC)。考虑到再生混凝土在破碎过程中可能产生微裂纹,同时再生骨料和水泥浆体界面之间可能存在弱黏结带,这些因素会导致RFC力学性能的缺陷。因此,本研究采用RFC填充圆钢管,利用钢管的约束作用克服再生材料潜在的力学性能缺陷,形成圆钢管掺镍铁渣再生混凝土(recycled aggregate concrete with ferronickel slag-filled circular steel tube, RCFST)柱。

不少学者对圆钢管再生混凝土(recycled aggregate concrete-filled steel tube, RACFST)柱的受压性能进行了试验研究<sup>[6-7]</sup>。研究表明:RACFST柱与钢管混凝土(concrete-filled steel tube, CFST)对比试件的破坏过程和模态相似。大部分研究中再生骨料混凝土的强度随着RCA取代率的增大而呈现下降趋势,也有部分研究<sup>[8]</sup>中出现了再生骨料混凝土强度随着RCA取代率的增大而增大的现象,但总体而言强度的变化幅度在15%以内。对于RACFST柱的抗震性能,同样也有大量研究。

YANG等<sup>[9]</sup>对28根RACFST柱进行了抗震性能试验研究。结果表明,RACFST柱具有与普通CFST柱相似的抗震性能,且同样具有良好的耗能能力和延性。刘锋等<sup>[10]</sup>、张向岗等<sup>[11]</sup>通过低周往复试验,评估了RCA取代率对RACFST柱抗震性能的影响。结果表明,再生骨料取代率对构件的破坏过程及最终破坏模态无影响;试验柱的抗侧刚度不会因再生骨料的使用而降低;RACFST柱的滞回特性受再生骨料取代率的影响不大。TANG等<sup>[12]</sup>进行了RACFST柱和CFST对比试件的低周往复加载试验研究。结果表明,相比于CFST柱,RACFST柱具有更优异的变形能力,但耗能能力略低。ZHANG等<sup>[13]</sup>进行了RACFST柱的滞回试验和有限元分析,结果表明,RACFST柱的抗震性能指标受再生骨料取代率的影响较小,而含钢率、轴压比等参数对这些指标的影响较大。YANG等<sup>[14]</sup>对再生骨料取代率为100%的RACFST柱的抗震性能进行了研究。结果表明,由于钢管的约束作用,RACFST柱的整体抗震行为与CFST对比试件的抗震行为相近,延性指数均大于3.0,并提出了RACFST柱承载力的计算方法。

以上研究证实了将再生混凝土灌入钢管能够克服RAC可能存在的性能缺陷,所形成的RACFST柱具有良好的抗震性能;再生骨料取代率对混凝土强度的影响与其采用的水胶比及再生混凝土的物理特性等有关。然而,现有研究主要集中于RACFST柱,对掺镍铁渣再生钢管混凝土柱的研究尚显不足,因此本文对RCFST柱的抗震性能进行了研究,研究参数包括再生粗骨料取代率、轴压比、钢管约束水平和试件长径比。分析了RCFST柱的破坏过程、滞回特性、 $P-\Delta$ 弯矩的影响以及各参数对抗震性能指标的影响,最后提出了RCFST柱的恢复力模型。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

本试验共设计制作了11个试件。图1所示为RCFST柱的构造。试件所用的圆钢管为Q345级无缝钢管,钢管两端焊接有厚度为30 mm的端板。试验采用

的圆钢管截面尺寸共有3种,其外径 $D$ 和厚度 $t$ 分别为:140 mm×4.5 mm、168 mm×5 mm以及168 mm×7 mm,相应的宽厚比 $D/t$ 分别为31、34和24。

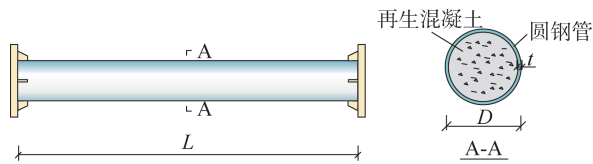


图1 试件构造

Fig. 1 Details of specimen

不同截面尺寸的钢管提供不同的约束水平,各试件约束水平通过套箍系数 $\xi$ 反映:

$$\xi = \frac{f_y A_s}{f_c A_c} \quad (1)$$

式中: $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度; $f_y$ 为钢管屈服强度; $A_c$ 和 $A_s$ 分别为核心混凝土和钢管的横截面面积。除了约束水

平外,试验研究参数还包括再生粗骨料取代率 $r$ (砖骨料在总粗骨料中的质量比)、轴压比 $n$ 以及长径比 $L/D$ ( $L$ 为钢管的长度)。再生粗骨料取代率为掺入的再生粗骨料的质量与总粗骨料质量的比值。试验共采用4种水平的取代率,分别为:0%、30%、70%和100%。试验的轴压比 $n$ 定义如下:

$$n = \frac{N}{f_c A_c + f_y A_s} \quad (2)$$

式中: $N$ 为轴压荷载。试验轴压比的变化范围为0.15~0.65。试件的长径比 $L/D$ 为8、10。

试件参数如表1所示。试件编号中,字母“A”、“B”和“C”分别表示截面外径 $D$ 和厚度 $t$ 为“140 mm×4.5 mm”、“168 mm×5 mm”以及“168 mm×7 mm”的钢管;字母后面的数字表示长径比的数值;“0%”、“30%”、“70%”和“100%”表示再生粗骨料取代率,最后的数字表示试验采用的轴压比。

表1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of specimens

试件编号	$L/\text{mm}$	$D/\text{mm}$	$L/D$	$h/D$	$t/\text{mm}$	$f_y/\text{MPa}$	$r$	$f_c/\text{MPa}$	$\xi$	$n$	$F_{cm}/\text{kN}$
A8-0%-0.4	1 120	140	8	4.8	4.5	362	0	33.4	1.54	0.40	51.3
A8-30%-0.4	1 120	140	8	4.8	4.5	362	30	38.8	1.33	0.40	53.4
A8-70%-0.4	1 120	140	8	4.8	4.5	362	70	31.2	1.65	0.40	50.4
A8-100%-0.4	1 120	140	8	4.8	4.5	362	100	35.7	1.44	0.40	52.2
A10-70%-0.15	1 400	140	10	5.8	4.5	362	70	31.2	1.65	0.15	43.3
A10-70%-0.4	1 400	140	10	5.8	4.5	362	70	31.2	1.65	0.40	41.8
A10-70%-0.65	1 400	140	10	5.8	4.5	362	70	31.2	1.65	0.65	30.1
B8-70%-0.35	1 344	168	8	4.7	5.0	420	70	31.2	1.76	0.35	80.5
B10-70%-0.35	1 680	168	10	5.7	5.0	420	70	31.2	1.76	0.35	66.3
C10-70%-0.35	1 680	168	10	5.7	7.0	391	70	31.2	2.39	0.35	86.5
C10-30%-0.35	1 680	168	10	5.7	7.0	391	30	38.8	1.92	0.35	89.1

注: $h$ 为平面铰中心至夹具边缘的距离; $F_{cm}$ 为计算预估的试验柱侧向峰值荷载。

## 1.2 材料性能

试验混凝土采用的配料包括硅酸盐水泥、镍铁渣、硅灰、天然粗骨料、再生粗骨料、天然河砂、水和高效减水剂。不同再生粗骨料取代率的混凝土材料用量如表2所示。试验所用硅酸盐水泥的强度等级为42.5R。所用的镍铁渣粉(图2a))的密度为 $2.86 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,比表面积为 $425.6 \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 。采用激光粒度仪测试镍铁渣的粒径分布,结果显示主要粒径分布在 $1\sim 100 \mu\text{m}$ ,平均粒径为 $13.95 \mu\text{m}$ 。镍铁渣和水泥的主要化学成分如表3所示。文献[15]研究表明:随着镍铁渣粉掺量的增加,镍铁渣-

水泥胶砂的抗压强度呈下降趋势;掺入适量的硅灰则可提高镍铁渣-水泥胶砂的强度;当镍铁渣粉和硅灰的总掺量不超过30%,且镍铁渣和硅灰的质量比为2:1时,镍铁渣-水泥胶砂与纯水泥胶砂的力学性能相当。因此,本次试验采用的镍铁渣和硅灰的掺量分别占总胶凝材料质量的20%和10%。采用细度模数为2.7、级配良好的天然河砂作为细骨料。再生粗骨料由废弃混凝土管桩经过破碎筛分得到(图2b)),其粒径为 $5\sim 14 \text{ mm}$ 的连续级配。天然粗骨料与再生粗骨料的粒径范围相同。两种粗骨料的物理性能指标如表4所示。试验采用的水胶比为0.32

(无再生粗骨料情况下)。考虑到再生粗骨料比天然粗骨料的吸水率大,因此对于RACFST柱,根据再生粗骨料的吸水率,分别掺入对应的附加用水。减水剂采用减水率为25%~35%的聚羧酸高效减水剂。

表2 不同RCA取代率的RFC材料用量

Table 2 Material consumption of RFC with different RCA replacement ratios

kg·m<sup>-3</sup>

RCA 取代率	胶凝材料			粗骨料		河砂	水	减水剂
	水泥	镍铁渣	硅灰	天然	再生			
0%	382.2	109.2	54.6	1 074.6	0	6.55	175.0	6.55
30%	382.2	109.2	54.6	725.2	322.4	6.55	180.9	6.55
70%	382.2	109.2	54.6	322.4	725.2	6.55	188.8	6.55
100%	382.2	109.2	54.6	0	1 074.6	6.55	194.7	6.55

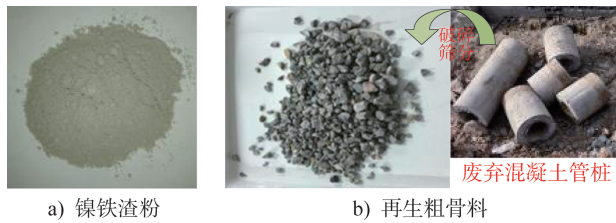


图2 再生材料

Fig. 2 Recycled materials

表3 镍铁渣和水泥主要化学成分含量

Table 3 Primary chemical composition contents of FNS and cement

材料	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	其他
镍铁渣	37.47	24.82	21.37	10.53	1.72	0.32	0.68
水泥	21.69	62.55	4.38	2.05	3.34	2.89	1.59

每种再生粗骨料取代率(*r*)的混凝土均制作6个标准立方体试块。*r*为0%、30%、70%和100%的混凝土立方体的平均抗压强度 $f_{cu}$ 分别44 MPa、51 MPa、41 MPa和47 MPa,相应的轴心抗压强度 $f_c$ 分别为33.4 MPa、38.8 MPa、

31.2 MPa和35.7 MPa。可以看出,不同再生粗骨料取代率下的混凝土强度存在一定差异,且*r*=30%时混凝土强度最高。这可能是因为再生骨料表面附着的老砂浆具有吸水性和返水性能,能够改善骨料与水泥浆体的界面过渡区,进而提高混凝土的强度。然而,随着*r*的进一步增大,用水量的增加会导致混凝土的孔隙率增大,相应地降低了混凝土的密实性和强度<sup>[16]</sup>。

每种试验用的钢管均制作3个材性试样,其实测材料性能如表5所示。

### 1.3 加载装置和量测方案

本研究采用的试验加载装置如图3所示。试验柱水平放置,两端各连接一平面铰,平面铰另一侧与带端板的钢棒通过螺栓连接,钢棒固定在反力墩上,反力墩通过锚杆固定在实验室刚性地面上。轴压荷载*N*通过左侧反力墩和钢棒之间的液压千斤顶施加。侧向往复荷载(相对于柱轴线)通过竖向作动器施加于试验柱中部。在试验柱跨中位置安装一个宽度为160 mm的夹具,并与竖向作动器连接。图4所示为试验装置示意图。由于柱两端安装有平面铰,平面铰中心处弯矩近似为0 N·mm;此外,

表4 粗骨料材料特性

Table 4 Material properties of coarse aggregate

粗骨料类型	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	松散堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	吸水率/%	压碎指标/%
天然	2 716.5	1 415.5	0.42	4.54
再生	2 539.5	1 311.4	1.83	6.57

表5 钢管材料特性

Table 5 Material properties of steel tube

圆钢管类型	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	断裂伸长率/%
A (140 mm×4.5 mm)	204	362	544	20.7
B (168 mm×5 mm)	206	420	556	27.5
C (168 mm×7 mm)	197	391	533	24.6

侧向荷载施加于跨中位置,根据对称平衡条件,柱两端支座各自承担一半的作动器输出的力。假定作动器输出的力为 $2F$ ,则两侧平面铰的反力为 $F$ 。因此,根据隔离体力的平衡条件,试验柱夹具边缘的弯矩 $M$ 为:

$$M = Fh + N\Delta \quad (3)$$

式中: $h=L/2+115$ ,为平面铰中心至夹具边缘的距离; $\Delta$ 为作动器的竖向位移。值得注意的是,本研究采取的这种加载方式使得试件的实际剪跨比为 $h/D$ 。各试件的 $h/D$ 值如表1所示。



图3 加载装置现场

Fig. 3 Loading setup site

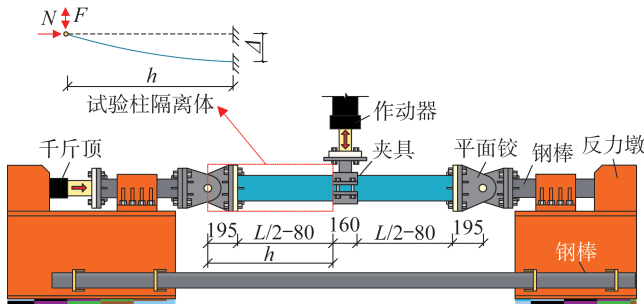


图4 加载装置示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of loading setup(unit:mm)

试验测量方案如图5所示。在夹具两侧的钢管表面对称布置应变片;在距夹具边缘10 mm高度处横截面(图5中A-A截面)的上下边缘以及前后两侧中部位置各布置1个双向应变片;在距夹具约 $2D$ 高度范围内的上下两侧边缘各布置4个纵向应变片(分别距夹具40 mm、110 mm、210 mm和310 mm),以监测塑性铰区应变的发展。

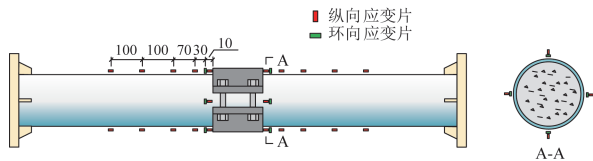


图5 测点布置(单位:mm)

Fig. 5 Arrangement of measurement points(unit:mm)

### 1.4 加载制度

试件制作和试验均在常温环境下进行。首先采用千

斤顶对试件施加轴向荷载并保持恒定,随后施加侧向往复荷载。根据ATC-24<sup>[17]</sup>的建议,侧向荷载采用力-位移混合控制,加载制度如图6所示。首先,采用力控制加载,共分为3个加载级,每级荷载依次为 $0.20F_{cm}$ 、 $0.50F_{cm}$ 和 $0.75F_{cm}$ ;其中, $F_{cm}=M_{cm}/h$ , $M_{cm}$ 为按照《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)<sup>[18]</sup>计算得到的圆钢管混凝土压弯承载力。在力控制阶段,每级加载循环2次。力控制加载结束后采用位移控制加载。定义屈服位移 $\Delta_y = F_{cm}/K_{sec}$ , $K_{sec}$ 为荷载达到 $0.75F_{cm}$ 时侧向力-侧向位移( $F-\Delta$ )曲线的割线刚度。按以下顺序依次施加侧向位移: $\Delta_y$ 、 $1.0\Delta_y$ 、 $1.5\Delta_y$ 、 $2.0\Delta_y$ 、 $3.0\Delta_y$ 、 $5.0\Delta_y$ 、 $7.0\Delta_y$ 。当 $\Delta \leq 2.0\Delta_y$ 时,每级加载循环3次;当 $\Delta > 2.0\Delta_y$ 时,每级加载循环2次。当试件荷载 $F$ 下降至85%的试验最大荷载或当侧向位移加至 $7.0\Delta_y$ 时,停止加载。

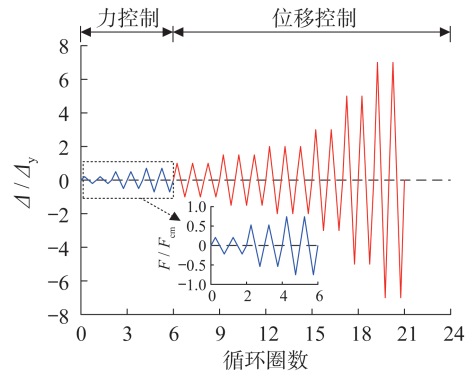


图6 加载制度

Fig. 6 Loading system

## 2 试件现象及破坏模式

所有试验柱的破坏过程均较为相似,影响其破坏进程的主要因素是轴压比。当轴压比 $n=0.65$ 时,钢管初始屈服发生在位移角 $\theta=1.0\%$ ( $\theta=\Delta/h$ )的加载过程中。当 $\theta$ 加载至 $2.5\%$ 时,夹具两侧边缘处的钢管开始发生鼓曲(如图7中试件A10-70%-0.65所示)。对于其余试件(轴压比 $n \leq 0.4$ ),由于施加的轴压比相对较小,钢管初始屈服约发生在 $\theta=2.0\%$ 的加载过程中,随后钢管初始局部屈曲发生在 $\theta=3.0\% \sim 4.5\%$ 的加载过程中。随着加载位移的增大,夹具两侧边缘处的钢管鼓曲范围不断扩大,并逐渐形成环状鼓曲(如图7中试件A10-70%-0.15所示)。

由图7可以看出,所有试件均发生典型的压弯破坏,破坏位置均集中在最大弯矩所在的夹具两侧塑性铰区,表现为受压侧的环状鼓曲,这与普通CFST柱在侧向循环荷载下的破坏模式一致<sup>[14]</sup>。试验结束后,部分试件塑性铰区的钢管被移除。图8所示为代表性试件塑性铰区的破坏模式。可以看出,混凝土压溃区域与钢管屈曲部位基本重合,混凝土损伤高度与轴压比等参数无明显关联,均在 $D/3 \sim D/2$ 范围内。



图7 代表性试件的整体破坏模式  
Fig. 7 Overall failure modes of representative specimens

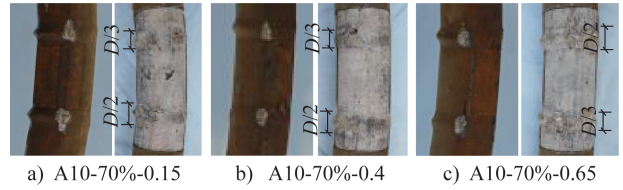


图8 代表性试件塑性铰区的最终破坏模式  
Fig. 8 Final failure modes of plastic hinge zone in representative specimens

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 滞回性能

图9所示为各试件的 $F-\theta$ 滞回曲线。由图可知:(1)当 $\theta \leq 1.5\%$ 时,试件卸载后残余变形很小,滞回环不明显。这是因为该阶段钢管还未屈服或者刚发生屈服。(2)钢管屈服后,随着 $\theta$ 的增大,滞回环包围的面积不断增加,且滞

回环越来越饱满。这是因为:随着 $\theta$ 的增大, $P-\Delta$ 弯矩不断增大。当水平力卸载后开始反向再加载时,水平力不仅要克服构件自身的力,还需要抵抗 $P-\Delta$ 弯矩(此时二阶弯矩的方向与水平力产生的弯矩方向相反,如图9a)所示)。(3)相比于其他试件,试件A10-70%-0.65(图9g)的滞回环较小,这是因为该试件的轴压比最大,增大轴压比导致其变形能力显著下降,极限位移角仅为3.0%,远小于其他试件的极限位移角。(4)对于除最后一个加载级之外的其他位移水平,后一圈滞回环几乎与前一圈滞回环重合。该现象表明试件的承载力没有因循环加载产生的累积损伤而出现明显的退化,体现了RFCFST柱具有良好的工作性能。

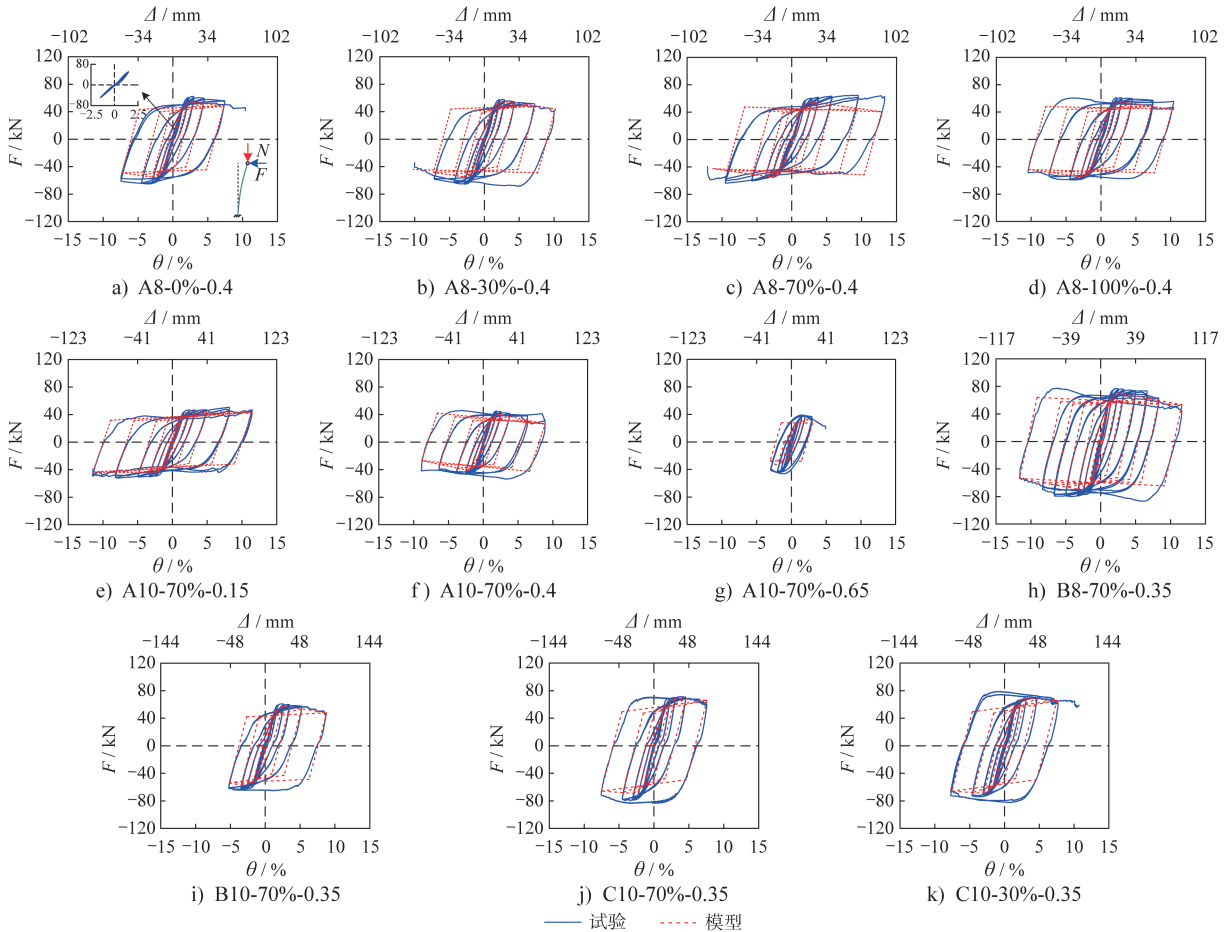


图9 各试件 $F-\theta$ 曲线

Fig. 9  $F-\theta$  curves of specimens

### 3.2 P- $\Delta$ 弯矩效应

如式(3)所示,试验柱端部(即夹具边缘处)弯矩由两个分量组成,分别为水平力产生的弯矩和和轴力产生的弯矩(即P- $\Delta$ 弯矩)。图10所示为不同轴压比试件的两个弯矩分量和总弯矩的滞回曲线。可以看出:(1)由于钢材的循环强化效应<sup>[19]</sup>以及钢管和核心混凝土之间的组合作用,RFCFST柱的总弯矩在整个加载过程中呈不断增大

的趋势;(2)P- $\Delta$ 弯矩分量随着 $\theta$ 的增大近似呈线性增加。P- $\Delta$ 弯矩显著降低了构件的水平荷载抵抗能力,且轴压比越大降低作用越显著。这是因为构件弯矩抗力的增长抵消不了二阶弯矩的影响,从而导致水平承载力的下降。当 $\theta \approx 6.0\%$ 时,试件B10-70%-0.35和A10-70%-0.65的总弯矩近似达最大值,但此时其水平承载力已分别降至最大值的88%和47%。

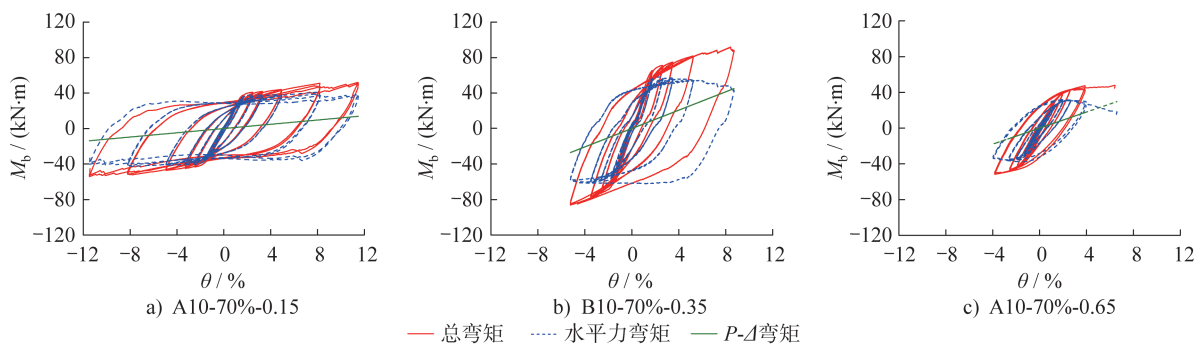


图10 弯矩分量

Fig. 10 Bending moment components

### 3.3 主要性能指标评估

本节将从承载力、变形能力和耗能能力等方面评估RFCFST柱的抗震性能。各试件特征点对应的位移角、峰值承载力 $F_m$ 和延性比 $\mu$ 汇总于表6。屈服位移角 $\theta_y$ 定义为4/3倍的0.75 $F_m$ 对应的位移角<sup>[20]</sup>。峰值位移角 $\theta_m$ 定义为峰值承载力对应的位移角。对于部分试件,其 $F$ - $\theta$ 骨架曲线无下降段,而有强化段。尽管试验终止时的位移角对应着最大荷载,但此时构件变形非常大( $\theta > 5.0\%$ ),不适宜将其作为峰值承载力的指标。因此本文采用最大拉应变为0.01时对应的承载力作为该类试件的峰值承载力。极限位移角 $\theta_u$ 定义为荷载下降至0.85 $F_m$ 时对应的位移角,若试件荷载未下降至0.85 $F_m$ ,则 $\theta_u$ 取加载停止时最后一圈加载级对应的位移角。延性系数 $\mu = \theta_u / \theta_y$ 。

由表6可知:(1)大部分试件 $\theta_y$ 的范围约为1.3%~1.8%;(2)即使试验施加的最大轴压比高达0.65,但所有RFCFST试件的 $\theta_u$ 值(取正负方向平均值)均大于3.0%,表明了RFCFST柱具有良好的变形能力。

下文将从承载力、变形能力和耗能能力等方面分析各参数(再生粗骨料取代率、轴压比、约束水平及剪跨比)对RFCFST柱的影响。

#### 3.3.1 再生粗骨料取代率的影响

图11所示为再生粗骨料取代率 $r$ 对RFCFST柱抗震性能的影响,其中试件每个单圈循环耗散的能量通过该循环 $F$ - $\Delta$ 曲线所包围的面积来度量。由图11a)和表6可知:(1)随着 $r$ 的增加,试件的水平承载力无显著变化

表6 试验结果

Table 6 Test results

试件编号	加载方向	$\theta_y / \%$	$\theta_m / \%$	$F_m / \text{kN}$	$\theta_u / \%$	$\mu$
A8-0%-0.4	正向	1.70	2.83	62.2	8.29	4.88
	负向	1.89	3.46	65.3	7.47	3.95
A8-30%-0.4	正向	1.55	2.72	57.8	8.02	5.17
	负向	1.74	2.86	65.5	7.60	4.37
A8-70%-0.4	正向	1.72	2.55	61.2	13.31	6.72
	负向	1.85	2.50	58.8	11.90	5.38
A8-100%-0.4	正向	1.61	2.97	61.1	10.42	6.47
	负向	1.79	3.99	59.5	9.65	5.39
A10-70%-0.15	正向	1.65	2.40	47.1	11.47	6.75
	负向	1.77	2.58	49.8	11.48	6.49
A10-70%-0.4	正向	1.40	1.90	45.2	8.58	6.13
	负向	1.30	2.54	46.8	6.34	4.88
A10-70%-0.65	正向	1.16	1.85	38.5	3.09	2.66
	负向	1.12	1.98	44.7	2.97	2.65
B8-70%-0.35	正向	1.42	2.20	76.7	7.90	5.56
	负向	1.48	4.25	80.1	8.20	5.54
B10-70%-0.35	正向	1.55	2.36	60.8	7.96	5.14
	负向	1.72	3.39	63.4	5.24	3.05
C10-70%-0.35	正向	1.73	3.97	71.1	7.89	4.56
	负向	1.99	4.65	82.1	7.86	3.95
C10-30%-0.35	正向	1.70	4.67	69.2	10.70	6.29
	负向	1.90	4.69	77.1	7.74	4.07

(差异在5%以内)。尽管 $r=30\%$ 时混凝土强度相对较高,但这些试件的水平承载力相比于其他试件并无显著区别。这是由于在压弯荷载作用下,尤其对于轴压比不大的情况,混凝土受压区高度较小,相应地由混凝土承担的压力较小,CFST截面的弯矩主要依靠钢管承担。因此混凝土强度的提高对构件受弯承载力影响不大<sup>[21]</sup>。  
(2)  $r$ 的变化对试件延性也无显著影响,其延性比 $\mu$ 均大

于3.0(图11b))。(3) 所有试件在 $\theta < 2.0\%$ 时耗能基本为0。这与钢管在 $\theta = 2.0\%$ 时发生屈服的试验现象相吻合。如前文所述,在同一加载级下,RFCFST柱基本无承载力退化,因此后一圈循环与前一圈循环的耗能基本一致。此外,不同 $r$ 下各试件的耗能几乎相同。以上结果均表明再生粗骨料取代率对RFCFST柱的抗震性能几乎无影响。

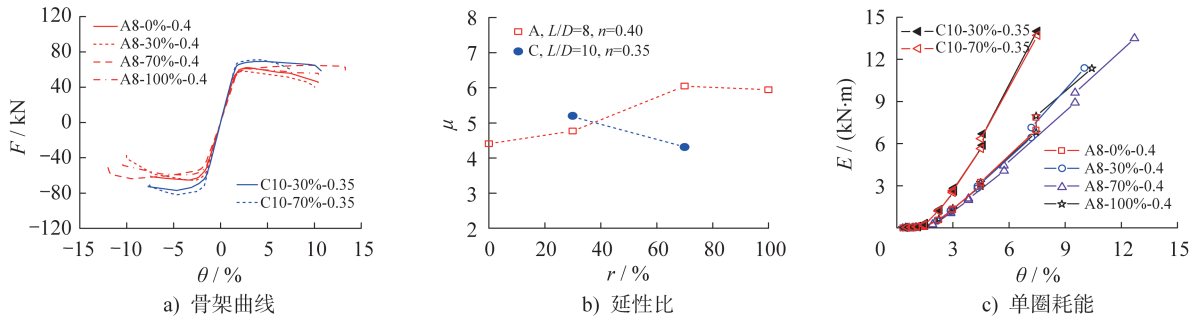


图11 再生粗骨料取代率的影响  
Fig. 11 Effects of RCA replacement ratios

### 3.3.2 轴压比的影响

图12所示为轴压比对RFCFST柱抗震性能的影响。由图12和表6可知:(1) 随着轴压比的增大,试件的水平承载力呈下降趋势。轴压比从0.15增大至0.65,试件的峰值承载力降低了16%(图12a))。(2) 轴压比的增大导致试件的变形能力显著降低。此原因有两个方面,首先是前述的 $P-\Delta$ 效应;其次是更大的轴压比使受压区钢管和混凝土承受更大的压力,更容易导致钢管的压曲和核心混凝土的

压溃。(3) 尽管轴压比较大试件的水平承载力较低,然而在同一位移角水平下,轴压比越大,单圈耗能越大。此现象的原因正如前文所述,一方面更大轴压比的试件在卸载后再加载时需克服更大的 $P-\Delta$ 弯矩,另一方面更大的轴力能更有效地限制混凝土的开裂,从而提高反向加载时试件的抗弯刚度,导致其滞回环更加饱满。但需要强调的是,尽管大轴压比试件的单圈耗能可能略高,但由于其变形能力较差,因此总耗能远小于小轴压比试件的总耗能。

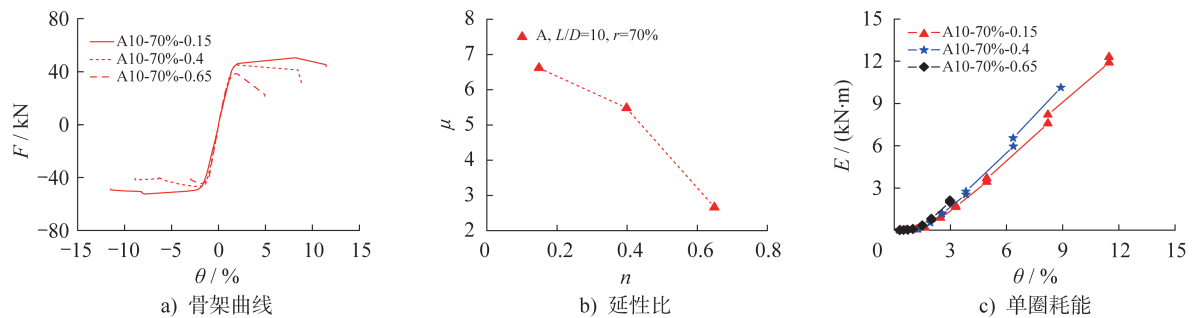


图12 轴压比的影响  
Fig. 12 Effects of axial load ratios

### 3.3.3 约束水平的影响

图13所示为约束水平对RFCFST柱抗震性能的影响。采用式(1)定义的套箍系数 $\xi$ 来反映构件截面的约束水平。为使试件具有可比性,图13中所选的对比如试件仅钢管厚度不同,其余的几何和材料特性均相同。可以看出:(1) 由于钢管对RFCFST柱抗弯承载力的贡献较

大,因此提高套箍系数(实际上是提高试件的厚度)能有效提高构件受弯承载力,从而提高构件水平承载力。(2) RFCFST柱的变形能力随着约束水平的提高也有一定程度提升。这是因为提高约束水平能够改善混凝土的塑性变形能力,此外还能提升钢管的局部稳定性能<sup>[21]</sup>。(3) 由于约束水平的提升导致试件承载力提高,因此其

耗能能力也相应提升。

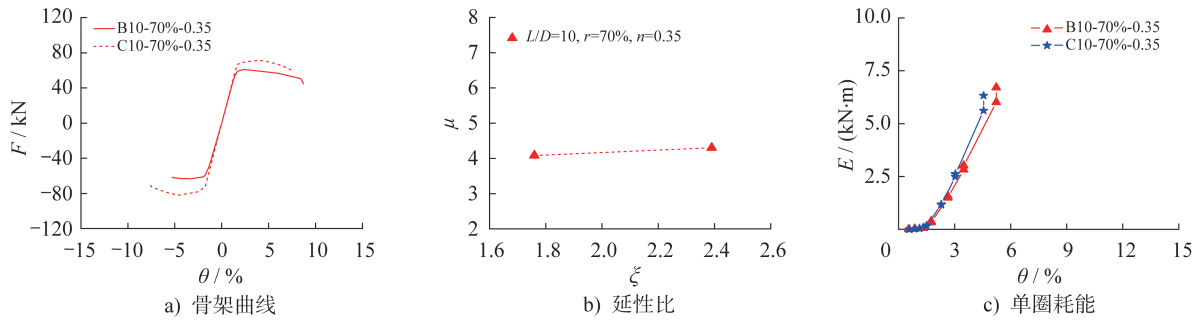


图 13 约束水平的影响

Fig. 13 Effects of confinement levels

### 3.3.4 剪跨比的影响

图 14 所示为剪跨比对 RFCFST 柱抗震性能的影响。可以看出：(1) 如预期，剪跨比越大，试件水平承载力越低。(2) 试件的延性比随着剪跨比的增大而降低。这是因为在给定的位移角下，剪跨比大的试件发生了更大的

侧向变形 ( $\Delta=h\theta$ )，相应的  $P-\Delta$  弯矩更显著，因此对其变形能力的降低作用更明显。(3) 剪跨比对试件耗能的影响无显著规律。这是因为同一位移角下，剪跨比大的试件虽然水平承载力更低，但侧向变形更大，因此耗能没有呈现出显著的差异。

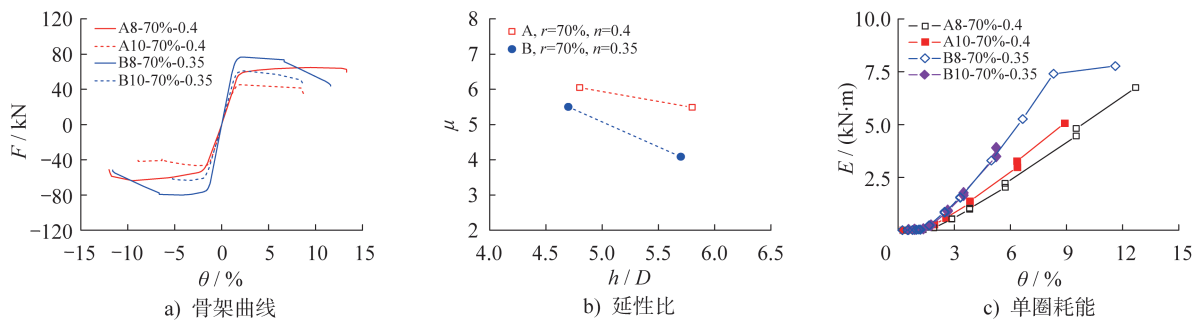


图 14 剪跨比的影响

Fig. 14 Effects of shear-span ratios

## 4 恢复力模型

为了方便 RFCFST 柱在工程应用中的推广，本节研究 RFCFST 柱的  $F-\theta$  滞回模型。由试验结果可知，水平荷载下 RFCFST 柱的  $F-\theta$  骨架曲线经历了弹性、弹塑性和塑性这 3 个阶段，因此可将其近似简化为三折线模型，如图 15 所示。

在弹性阶段，RFCFST 柱的初始刚度  $K_1$  可按式 (4) 计算：

$$K_1 = 3(E_s I_s + \alpha E_c I_c) / h^3 \quad (4)$$

式中： $E_s$  和  $E_c$  分别为钢材和混凝土的弹性模量； $I_s$  和  $I_c$  分别为钢管和核心混凝土的截面惯性矩； $\alpha$  为核心混凝土开裂导致的刚度降低系数，通过试验数据拟合可得  $\alpha=0.6$ 。弹性阶段结束时对应的屈服承载力  $F_{y,c}$  约为 80% 的峰值荷载 ( $F_{m,c}$ )，因此取  $F_{y,c}=0.8F_{m,c}$ 。

由试验结果可知，峰值点对应的位移角  $\theta_{m,c}$  与试验参

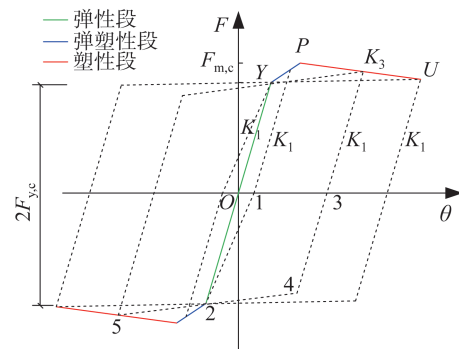


图 15 建议的恢复力模型

Fig. 15 Proposed restoring force model

数的影响关系不大，均约为 2.5%。因此，取峰值位移角  $\theta_{m,c}=2.5\%$ 。相应地，水平峰值荷载则可按式 (5) 计算：

$$F_{m,c} = (M_{m,c} - 0.025hN) / h \quad (5)$$

式中： $M_{m,c}$  为 RFCFST 柱的抗弯承载力。截至目前，尚

未有专门针对 RCFST 柱承载力的设计规范。鉴于 RCFST 结构行为与 RACFST 柱相似,因此,本文采用《钢管再生混凝土结构技术规程》(T/CECS 625—2019)<sup>[22]</sup>来预测 RCFST 柱的抗弯承载力。

下降段的刚度  $K_3$  参考文献[23]提出的适用于 CFST 柱的公式,并结合本文试验数据进行拟合得到:

$$K_3 = \frac{-9.5n^{1.3}\lambda^{0.75}f_y}{E_s\xi} \cdot K_1 \quad (6)$$

式中: $\lambda$ 为柱的长细比。

当荷载从弹塑性段卸载时,卸载线按弹性刚度  $K_1$  进行卸载;当荷载卸至零时,沿屈服点反向再次加载(图 15 中 1 点至 2 点)。

当荷载从塑性段卸载时,卸载线按弹性刚度  $K_1$  进行卸载;当荷载卸至零时,继续按弹性刚度反向加载。当卸载段和反向加载段的总高度达到  $2F_{y,c}$  时,沿目标位移角反向再次加载(图 15 中 3 点至 4 点再至 5 点)。

基于上述恢复力模型的滞回规则,计算得到的滞回曲线和试验曲线的对比如图 9 所示。可以看出,计算结果与试验结果整体吻合较好,预估的峰值承载力略低于试验承载力,尤其是在大轴压比情况下,结果偏保守。

## 5 结论

(1) RCFST 柱与普通 CFST 柱的破坏模式相同。钢管的局部屈曲和内填混凝土的压碎均发生在最大弯矩区域,混凝土的压碎高度约为  $D/3 \sim D/2$ 。

(2) 虽然柱的抗弯承载力随着位移角的增加而不断增大,但弯矩抗力的增加无法抵消  $P-\Delta$  弯矩的影响,导致柱水平抗力下降。随着柱轴压比和剪跨比的增大,这种下降更加显著。

(3) 尽管镍铁渣再生混凝土的强度随再生粗骨料取代率的变化而变化(轴心抗压强度的变化范围为 31.2~38.8 MPa),但再生粗骨料取代率对 RCFST 柱的承载力、变形能力和耗能能力几乎无影响。

(4) 随着轴压比的增大,RCFST 柱的延性降低,但单圈耗能能力提高。水平承载力和延性随着约束水平的提高而提高,但随着剪跨比的增大而降低。耗能能力随着约束水平的提高而提高,但随剪跨比的变化趋势不明显。

## 参考文献:

[1] XU Y, CHEN Y J, CHEN Q, et al. Influence of curing system on static and dynamic mechanical properties of fly ash concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 371: 130714. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130714.

[2] TRAN T M, TRINH H T M K, NGUYEN D, et al. Development of sustainable ultra-high-performance concrete containing ground granulated blast furnace slag and glass powder: mix design investigation [J]. Construction and

Building Materials, 2023, 397: 132358. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132358.

[3] QI A, LIU X H, WANG Z W, et al. Mechanical properties of the concrete containing ferronickel slag and blast furnace slag powder[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117120. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117120.

[4] SAHA A K, SARKER P K. Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 135-142. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.144.

[5] KIM H, LEE C H, ANN K Y. Feasibility of ferronickel slag powder for cementitious binder in concrete mix [J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 693-705. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.166.

[6] 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. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.02.010.

[7] CHEN W G, XU J J, LI Z P, et al. Load-carrying capacity of circular recycled aggregate concrete-filled steel tubular stub columns under axial compression: reliability analysis and design factor calibration [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66: 105935. DOI: 10.1016/j.job.2023.105935.

[8] 陈宗平, 张士前, 王妮, 等. 钢管再生混凝土轴压短柱受力性能的试验与理论分析 [J]. 工程力学, 2013, 30(4): 107-114. CHEN Zongping, ZHANG Shiqian, WANG Ni, et al. Experimental study and theoretical analysis on axial compress capacity of recycled aggregate concrete-filled circle steel tube short column [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 107-114. (in Chinese)

[9] YANG Y F, HAN L H, ZHU L T. 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. DOI: 10.1260/136943309788251605.

[10] 刘锋, 余银银, 李丽娟. 钢管再生骨料混凝土柱抗震性能研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(增刊 2): 178-184. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2013.s2.032. LIU Feng, YU Yinyin, LI Lijuan. A seismic performance analysis of recycled concrete filled circular steel tube columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (Suppl. 2): 178-184. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2013.s2.032. (in Chinese)

[11] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳, 等. 钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(9): 45-56. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2014.09.032. ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Experimental study on seismic behavior of recycled aggregate concrete filled steel tube columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47 (9): 45-56. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2014.09.032. (in Chinese)

[12] TANG Y C, LI L J, FENG W X, et al. Seismic performance

- of recycled aggregate concrete-filled steel tube columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 133: 112-124. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.02.006.
- [13] ZHANG X G, GAO X. The hysteretic behavior of recycled aggregate concrete-filled square steel tube columns [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109523. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109523.
- [14] YANG Y B, CHEN G L, WU Y X, et al. A case study on seismic behavior of circular-sectional steel tubular columns filled with concrete of 100% recycled aggregates [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16: e00992. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00992.
- [15] 罗才松, 陈华艳, 刘旭宏, 等. 镍铁渣粉对水泥基复合材料性能的影响研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2022(6): 91-95. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2022.06.091.05.  
LUO Caisong, CHEN Huayan, LIU Xuhong, et al. Influence of ferronickel slag powder on properties of cement-based composites [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2022(6): 91-95. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2022.06.091.05. (in Chinese)
- [16] YILDIRIM S T, MEYER C, HERFELLNER S. Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 91: 288-296. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.045.
- [17] Applied Technology Council. *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures: ATC-24* [S]. Redwood City: Applied Technology Council, 1992.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. *组合结构设计规范: JGJ 138—2016* [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Code for Design of Composite Structures: JGJ 138—2016* [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [19] 石永久, 王萌, 王元清. 循环荷载作用下结构钢材本构关系试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(3): 293-300. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.03.001.  
SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing. Experimental study of structural steel constitutive relationship under cyclic loading [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(3): 293-300. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.03.001. (in Chinese)
- [20] PARK R. State-of-the-art report on ductility evaluation from laboratory and analytical testing [C]// *Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo: [s.n.], 1988.
- [21] XU L, HU H S, LAN Y T, et al. Numerical study on the behavior of eccentrically loaded square spiral-confined high-strength concrete-filled steel tube columns [J]. *Structures*, 2023, 55: 2112-2123. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.07.030.
- [22] 中国工程建设标准化协会. *钢管再生混凝土结构技术规程: T/CECS 625—2019* [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
China Association for Engineering Construction Standardization. *Technical Specification for Recycled Aggregate Concrete-Filled Steel Tubular Structures: T/CECS 625—2019* [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [23] 韩林海. *钢管混凝土结构: 理论与实践* [M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016: 664-666.  
HAN Linhai. *Concrete filled steel tubular structures: theory and practice* [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016: 664-666. (in Chinese)