

引用本文:刘 坚,彭林苗,陈盼盼,等.圆钢管约束型钢再生混凝土短柱抗震性能[J].建筑科学与工程学报,2023,40(6):27-34.

LIU Jian, PENG Linmiao, CHEN Panpan, et al. Seismic performance of circular steel tube confined steel reinforced recycled concrete short columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6): 27-34.

DOI:10.19815/j.jace.2022.01078

圆钢管约束型钢再生混凝土短柱抗震性能

刘 坚^{1,2}, 彭林苗¹, 陈盼盼¹, 刘长江^{1,2}, 任 达^{1,2}, 陈 原^{1,2},

肖海鹏¹, 招 渝¹, 杨勤鹏¹

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006;

2. 广州大学 广东省复杂钢结构工程技术研究中心, 广东 广州 510006)

摘要:针对圆钢管约束型钢再生混凝土短柱的抗震性能进行研究,在验证了分析模型合理性的前提下,考虑了圆钢管径厚比、再生粗骨料取代率和轴压比等设计参数对试件力学性能的影响规律,获取了试件滞回曲线、骨架曲线、延性系数、等效黏滞阻尼系数等抗震性能指标和试件的峰值承载力,并与已有试验进行了对比分析。结果表明:在再生混凝土取代率、轴压比、含钢率等参数基本相同时,圆钢管约束型钢再生混凝土短柱比型钢再生混凝土柱和圆钢管型钢再生混凝土柱表现出更好的变形和耗能能力;再生粗骨料取代率对滞回曲线等抗震性能指标影响不大,可基本满足工程抗震要求,并可广泛应用于工程的承重结构中;在取代率和轴压比相同时,随着径厚比的增大,试件弹性阶段初始刚度、峰值承载力和耗能能力逐渐下降,但延性会有一定幅度的提升,延性变形能力可提高30%~40%;在取代率和径厚比相同时,随着轴压比的增大,试件的峰值承载力和耗能能力变化不大,延性越来越差。

关键词:圆钢管型钢混凝土;再生混凝土柱;径厚比;再生粗骨料;取代率;轴压比;抗震性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)06-0027-08

Seismic performance of circular steel tube confined steel reinforced recycled concrete short columns

LIU Jian^{1,2}, PENG Linmiao¹, CHEN Panpan¹, LIU Changjiang^{1,2}, REN Da^{1,2},

CHEN Yuan^{1,2}, XIAO Haipeng¹, ZHAO Yu¹, YANG Qinpeng¹

(1. College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

2. Guangdong Engineering Technology Research Center for Complex Steel Structures,

Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: The seismic performance of circular steel tube confined steel reinforced recycled concrete short columns was studied. On the premise of verifying the rationality of the analysis model, the influence of design parameters such as diameter-thickness ratio of circular steel tube, replacement rate of recycled coarse aggregate and axial compression ratio on the mechanical properties of the specimens was considered. The seismic performance indexes such as hysteresis

收稿日期:2023-02-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51678168);广建装配式建筑成套技术研究项目(19C00001);

广东省自然科学基金项目(2017A030313267);广州市科技计划项目(201607010107)

作者简介:刘 坚(1964-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:787196372@qq.com。

curve, skeleton curve, ductility coefficient, equivalent viscous damping coefficient and the peak bearing capacity of the specimens were obtained and compared with the existing tests. The results show that when the parameters such as the replacement ratio of recycled concrete, axial compression ratio and steel ratio are basically the same, the circular steel tube confined steel recycled concrete short column shows better deformation and energy dissipation capacity than the steel recycled concrete column and the circular steel tube steel recycled concrete column. The replacement rate of recycled coarse aggregate has little effect on the seismic performance index such as hysteresis curve, which can basically meet the seismic requirements of the project and can be widely used in the bearing structure of the project. When the replacement rate and axial compression ratio are the same, with the increase of diameter-thickness ratio, the initial stiffness, peak bearing capacity and energy dissipation capacity of the elastic stage of the specimen gradually decrease, but the ductility will be improved to a certain extent, and the ductility deformation capacity can be increased by 30%-40%. When the replacement rate and the diameter-thickness ratio are the same, with the increase of the axial compression ratio, the peak bearing capacity and energy dissipation capacity of the specimens do not change much, and the ductility is getting worse and worse.

Key words: circle steel tube steel reinforced concrete; recycled concrete column; diameter-thickness ratio; recycled coarse aggregate; replacement rate; axial compression ratio; seismic performance

0 引言

再生混凝土是指将废混凝土破碎清洗后按一定比例与级配混合,部分或全部代替天然集料配制而形成的新混凝土^[1]。它可以有效解决废弃混凝土带来的环境污染和难以处理等问题,符合中国可持续发展战略,具有重要的社会价值和经济意义^[2]。目前,国内外专家学者已对再生混凝土的力学性能进行了系统研究,结果表明:组合结构既可以发挥钢材的力学性能,又可以弥补再生混凝土在材料性能上的不足^[3-6]。型钢再生混凝土柱的内部型钢可以提升再生混凝土柱的变形能力,从而提高了结构承载能力和抗震能力^[7],但由于型钢再生混凝土柱内部配置型钢、纵筋、箍筋等导致试件内空间位置复杂,从而造成施工困难、抗震性能较差等问题。钢管再生混凝土柱利用钢管为再生混凝土提供较强的约束作用,对钢管再生混凝土的轴压性能及核心再生混凝土多轴力学性能进行研究发现,钢管再生混凝土柱具有良好的抗震变形和耗能能力^[8-13]。为进一步有效提高再生混凝土的力学性能,又有学者继续研究了钢管型钢再生混凝土柱^[14-16];另外有学者提出钢管约束型钢混凝土组合柱,使钢管仅对核心区混凝土有约束,不直接承受纵向荷载,来克服型钢再生混凝土施工复杂和箍筋对核心混凝土约束效果较差的不足,具有较好的工程应用前景^[17]。周绪红

等^[18-20]对圆钢管约束型钢高强混凝土试件的抗震性能进行了研究,结果表明:圆钢管约束型钢高强混凝土框架短柱的抗震性能良好,随着轴压比的提高,短柱的水平承载力也提高,但对结构延性影响不大,在地震地区有很广阔的应用前景。

目前对于圆钢管约束型钢再生混凝土短柱的抗震性能研究鲜见报道,本文基于二阶非线性理论^[21],采用不同的再生粗骨料取代率、径厚比、轴压比为设计参数,对圆钢管约束型钢再生混凝土短柱的抗震性能进行非线性有限元分析,为圆钢管约束型钢再生混凝土短柱的工程应用提供技术参考。

1 分析模型的有效性验证

1.1 建立分析模型

为了验证材料的本构设置、单元选取及接触条件的适用性,本文利用 ABAQUS 非线性分析软件对文献^[22]的钢管再生混凝土柱试件 C-2 的抗震性能进行模拟分析。该试件的再生混凝土强度为 C40,再生粗骨料的取代率为 30%,轴压比 $n=0.8$,含钢率 $\alpha=0.12$,套箍系数 $\theta=0.36$,柱的有效高度 $L=850\text{ mm}$,直径 $D=157\text{ mm}$,壁厚 $t=4.6\text{ mm}$,钢材型号为 Q235。

1.1.1 材料本构关系

选取的钢材本构模型是应用广泛的双折线随动强化模型,满足 Von Mises 屈服准则,强化段弹性

模量取弹性段弹性模量的 1%。由于外包钢管的约束作用对再生混凝土的受拉性能影响很小,故核心混凝土受拉本构关系按照现行规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)取用,而核心再生混凝土受压本构关系模型是采用张向冈等^[10]所研究的再生混凝土单轴受压应力-应变($\epsilon-\sigma$)关系曲线,其具体公式为

$$y=2x \quad x \leq 1 \quad (1)$$

$$y = \begin{cases} 1 + a(x^{0.1\zeta} - 1) & \zeta \geq 1.12, x > 1 \\ \frac{x}{\beta(x-1)^2 + x} & \zeta < 1.12, x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$x = \frac{\epsilon\epsilon_0}{\epsilon_0}$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

$$\sigma_0 = [1 + (-0.054\zeta^2 + 0.4\zeta)(\frac{24}{f'_{c,R}})^{0.45}]f'_{c,R}$$

$$\zeta = \frac{A_s f_y}{A_c f_{c,R}}; f'_{c,R} = 0.8 f_{cu,R}; a = \frac{\zeta^{0.75}}{2 + \zeta}$$

$$f_{c,R}/f_{cu,0} = 0.19R^2 - 0.249R + 0.789$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_{cc} + [1400 + 800(\frac{f'_{c,R}}{24} - 1)]\zeta^{0.2} \times 10^{-6}$$

$$\epsilon_{cc} = 1300 + 12.5 f'_{c,R} \times 10^{-6}$$

$$\beta = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\zeta - 0.5)^7]} f'_{c,R}^2 \times 3.51 \times 10^{-4}$$

式中: $f_{cu,R}$ 为不同取代率 R 下的混凝土立方体抗压强度; $f_{cu,0}$ 为取代率取 0% 时的立方体抗压强度; $f_{c,R}$ 为棱柱体轴心抗压强度; $f'_{c,R}$ 为不同取代率下的圆柱体轴心抗压强度; f_y 为钢材的屈服强度; A_s 和 A_c 分别为钢管和核心混凝土的横截面积。

1.1.2 单元选取及接触设置

采用三维实体单元(C3D8R)来模拟组合柱的核心再生混凝土、圆钢管并考虑钢管与混凝土接触存在黏结滑移现象,采用库仑摩擦模型,摩擦因数取 0.6^[23],法向接触设为“硬接触”,型钢与混凝土之间的相互作用采用嵌入(Embedded)方式。

模型建立下端固接、上端自由的位移边界条件,在柱的上端创建参考点并进行耦合约束,对参考点施加荷载和位移的加载和约束,采用水平往复加载,在整个加载过程中竖向力保持不变;将短柱的柱顶和柱底设为刚体来简化模型。

1.2 非线性分析模型与试验的对比分析

非线性分析模拟结果与已有试验曲线的对比见图 1。由图 1 可知:采用非线性分析模型计算的峰值承载力与试验结果相对误差在 5% 以内,有效地

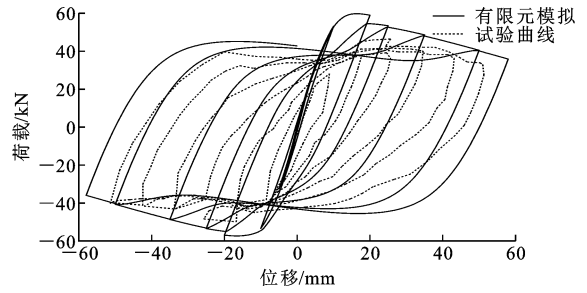


图 1 有限元模拟曲线与已有试验曲线对比

Fig. 1 Comparison between finite element simulation hysteretic curve and existing test curve

验证了分析模型的合理性,但滞回环的面积有一定的差异,一方面是由于钢管与混凝土之间采用面与面接触的方式,并不能消除两者之间的滑移问题,另一方面是由于采用数值仿真分析方法并不能考虑试件材料的选用、制作及试验条件限制等不利因素的影响。

2 试件设计

为了研究影响圆钢管约束型钢再生混凝土短柱抗震性能的因素,本文选取再生粗骨料取代率、径厚比、轴压比为设计参数。组合构件的圆钢管外径为 240 mm,壁厚 4 mm,柱高为 600 mm,型钢配钢率为 5.7%,钢材使用 Q235 钢,再生混凝土强度为 C40。以再生粗骨料取代率 100%、径厚比 60、轴压比 0.5 为基本变化参数,为保证钢管只对核心再生混凝土起约束作用,不直接承受竖向荷载,钢管沿柱上下端 20 mm 处断开,对 9 个长细比为 10.0 的圆钢管约束型钢再生混凝土短柱进行有限元参数模拟分析。短柱及垫板的具体尺寸见图 2,短柱的设计参数见表 1。

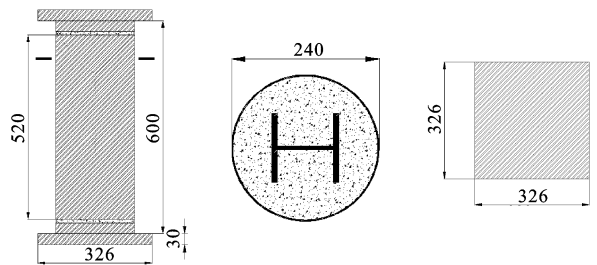


图 2 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimension of specimen (unit:mm)

3 抗震性能

3.1 滞回曲线

不同取代率下试件的滞回曲线如图 3(a)~(d)所示。各试件滞回曲线变化差异很小,滞回曲线均

表 1 短柱试件参数

Table 1 Parameters of short column specimen

试件编号	取代率 $r/\%$	径厚比 D/t	轴压比 n	型钢相关参数
RACSC1	0	60	0.5	H 型钢, $\alpha_s=5.7\%$, $t_w=6\text{ mm}$, $t_r=10\text{ mm}$, $D_s=150\text{ mm}$, $B_s=90\text{ mm}$
RACSC2	30	60	0.5	
RACSC3	70	60	0.5	
RACSC4	100	60	0.5	
RACSC5	100	40	0.5	
RACSC6	100	80	0.5	
RACSC7	100	60	0.4	
RACSC8	100	60	0.6	
RACSC9	100	60	0.7	

注： α_s 为型钢配钢率； t_w 为型钢腹板厚度； t_r 为型钢翼缘厚度； D_s 为型钢高度； B_s 为型钢宽度；因钢管不直接承担竖向荷载，本节选用的轴压比 n 只与核心再生混凝土和型钢有关， $n=N/(f_cA'_c+f_yA_s)$ ， f_c 为再生混凝土轴心抗压强度， A'_c 为再生混凝土横截面面积， f_y 为钢材强度， A_s 为型钢横截面面积。

基本饱满，没有出现捏缩现象，耗能性能较为良好。另外，试件极限峰值承载力和各级加载位移下的峰值荷载变化不大，说明再生骨料的取代率对于短柱的滞回效果影响不大。

不同径厚比下试件的滞回曲线如图 3(d)~(f) 所示，其中 P 为荷载， Δ 为位移。在全再生骨料和相同轴压比条件下，随着径厚比的增大，滞回曲线的面积越来越小，耗能能力越来越差。各曲线的峰值承载力和各级循环位移幅值承载力逐渐下降，RACSC6 与 RACSC4、RACSC5 相比，其峰值荷载后期荷载下降较为缓慢，说明试件的延性和变形性能随径厚比的增大会有一定幅度的提高。

不同轴压比下试件的滞回曲线如图 3(d)、(g)、(h)、(i) 所示。在全再生骨料和相同径厚比条件下，各试件的滞回曲线均较为饱满，耗能能力较为良好。各曲线的峰值承载力和各级循环位移幅值承载力变

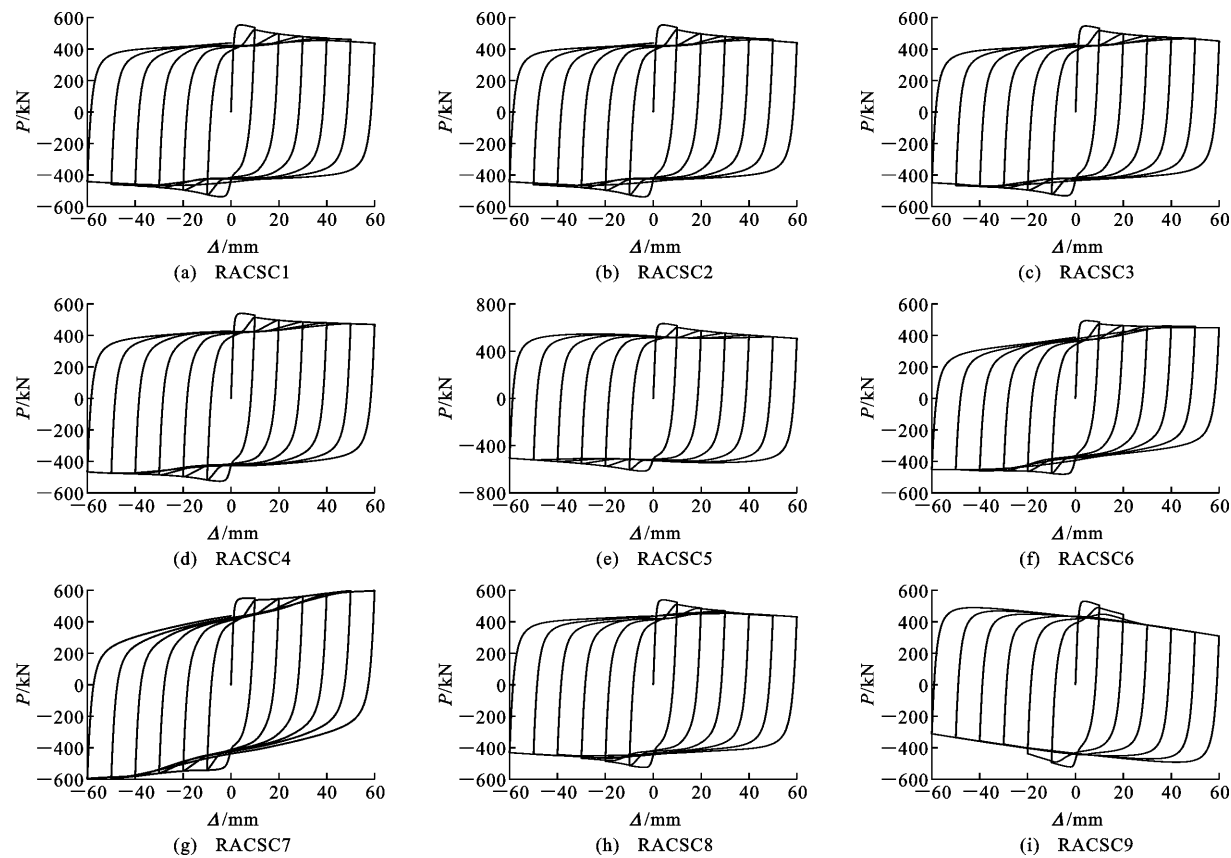


图 3 试件滞回曲线

Fig. 3 Hysteretic curve of specimen

化不大，但 RACSC9 试件峰值承载力过后下降较快，延性较差，说明增大试件的轴压比会使试件的延性和变形能力有所削弱。

3.2 骨架曲线

各试件的骨架曲线以及峰值承载力分别如图 4

和表 2 所示。

由不同取代率下的骨架曲线图 4(a) 和表 2 可知：在弹性阶段，不同取代率下的骨架曲线几乎完全重合，表明再生粗骨料的原始损伤对弹性阶段的初始刚度几乎没有影响。随着再生骨料取代率的提

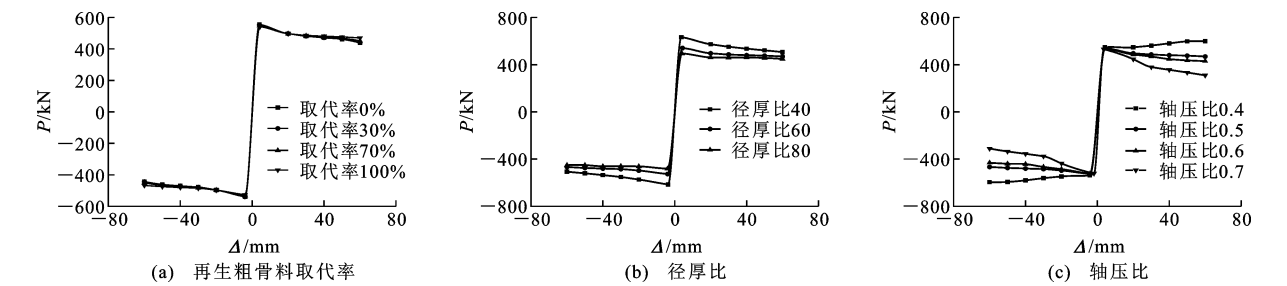


图 4 试件骨架曲线
Fig. 4 Skeleton curve of specimen

表 2 试件峰值承载力

Table 2 Peak bearing capacity of specimen

试件编号	RACSC1	RACSC2	RACSC3	RACSC4	RACSC5	RACSC6	RACSC7	RACSC8	RACSC9
峰值承载力/kN	555.00	552.67	546.23	540.00	632.26	493.01	547.37	537.40	528.58

高,其峰值承载力逐渐减小,试件 RACSC2、RACSC3、RACSC4 相对试件 RACSC1,峰值承载力减小的幅度分别为 0.42%、1.59%、2.73%。整体上试件承载力的变化不大,且变化幅值均小于 5%,误差满足工程中的精度要求。由此可见,再生混凝土与普通混凝土一样,均可满足抗震强度需求,可广泛应用于承重结构中。

由不同径厚比下的骨架曲线图 4(b)和表 2 可知:随着径厚比的提高,试件在弹性阶段的初始刚度略微减小,且承载力相应减小,相比于 RACSC5, RACSC4 的承载力值降低幅度为 14.59%,相比于 RACSC4, RACSC6 的承载力值降低幅度为 8.70%。可以看出,径厚比对试件的峰值承载力影响显著。在试件达到峰值荷载后, RACSC6 的骨架曲线相比于 RACSC4、RACSC5 下降变缓,达到破坏荷载时,其变形位移要比前 2 个试件大,具有较好的变形能力。试件在不同轴压比下的骨架曲线如图 2(c)所示。由图 2(c)和表 2 可知:试件在弹性阶段的初始刚度受轴压比的影响不大,骨架曲线几乎重合。随着轴压比的增大,试件的峰值承载力逐渐降低,试件 RACSC4、RACSC8、RACSC9 相对试件 RACSC7,峰值承载力减小的幅度分别为 1.35%、1.82%、3.44%, RACSC9 试件在达到峰值荷载后,其承载力较 RACSC4、RACSC7、RACSC8 试件下降较快,延性较差。

3.3 延性系数

各试件的延性系数见表 3。由表 3 可知:在保持取代率、径厚比、轴压比及试件高度等条件一致时, RACSC8 的平均延性系数大致为 SRRC-10 的 5 倍,表明圆钢管约束型钢再生混凝土短柱的变形性能比型钢再生混凝土柱效果更加良好;随着取代率

的增加,平均位移延性系数逐渐提高,提升的最大幅度为 24.04%,说明再生骨料取代率对试件的延性变形能力影响较大;在全再生骨料及相同轴压比情况下,当径厚比由 40 增加到 80 时,平均延性系数逐渐增大, RACSC4 相比 RACSC5 平均延性系数提升幅度为 38.32%, RACSC6 相比 RACSC4 平均延性系数提升幅度为 31.79%。说明随着径厚比的增大,试件的延性变形能力可得到很好的提高;在全再生骨料及相同径厚比情况下, RACSC7 滞回曲线一直呈现上升趋势,故无相应的延性系数。除了该试件,其余试件的平均位移延性系数随着轴压比的增大而减小, RACSC8 相比 RACSC4 平均位移延性系数降低幅度达 45.75%, RACSC8 相比 RACSC4 平均位移延性系数降低幅度达 16.89%。

3.4 耗能能力

研究试件抗震性能的一个重要指标就是试件的耗能能力,通过分析求得等效黏滞阻尼系数 h_e 反映试件的耗能能力。表 4、图 5 给出了 9 个试件在各种影响参数下的等效黏滞阻尼系数 h_e 。由表 4、图 5 可知:随着循环位移的加大,各试件的等效黏滞阻尼系数也逐渐增大,最终都达到 0.45 以上,而试验参数基本相同的型钢再生混凝土柱等效黏滞阻尼系数仅为 0.210,圆钢管型钢再生混凝土柱 CSTSRRC-6 与试件 RACSC7 的等效黏滞阻尼系数比较结果表明,圆钢管约束型钢再生混凝土短柱能量耗散能力相比于型钢再生混凝土柱和圆钢管型钢再生混凝土更为优越;随着取代率的提高[图 5(a)],在同级位移下,等效黏滞阻尼系数变化幅度在 5%以内,变化不大,表明再生骨料试件在循环荷载的往复作用下,与普通混凝土一样,均可满足抗震强度需求,可广泛应用于承重结构中;随着轴压比的增大[图 5(b)],

表 3 各试件延性系数
Table 3 Ductility coefficient of each specimen

试件编号	加载方向	屈服位移 Δ_y /mm	极限位移 Δ_u /mm	延性系数 μ	μ 平均值
RACSC1	正向	2.82	39.73	14.09	16.27
	负向	2.76	50.91	18.45	
RACSC2	正向	2.87	40.61	14.15	16.35
	负向	2.82	52.29	18.54	
RACSC3	正向	2.90	52.93	18.25	20.28
	负向	2.76	61.57	22.31	
RACSC4	正向	3.04	71.21	23.42	24.22
	负向	2.83	70.83	25.03	
RACSC5	正向	2.62	40.19	15.34	17.51
	负向	2.62	51.54	19.67	
RACSC6	正向	2.83	84.64	29.91	31.92
	负向	2.90	98.38	33.92	
RACSC7	正向	—	—	—	—
	负向	—	—	—	
RACSC8	正向	2.93	37.34	12.74	13.14
	负向	2.97	40.21	13.54	
RACSC9	正向	2.51	18.31	7.29	10.92
	负向	1.34	19.49	14.54	
CSTSRRC-6 ^[14]	正向	9.00	33.02	3.67	3.19
	负向	10.01	27.02	2.70	
SRRC-10 ^[7]	正向	4.70	13.51	2.87	3.17
	负向	5.45	18.86	3.46	

表 4 试件在各级位移下的等效黏滞阻尼系数
Table 4 Equivalent viscous damping coefficient of specimen under different displacement levels

试件编号	各级位移下的等效黏滞阻尼系数					
	1Δ	2Δ	3Δ	4Δ	5Δ	6Δ
RACSC1	0.351	0.437	0.482	0.509	0.533	0.633
RACSC2	0.351	0.437	0.480	0.508	0.531	0.630
RACSC3	0.353	0.436	0.478	0.504	0.525	0.616
RACSC4	0.354	0.434	0.474	0.498	0.516	0.590
RACSC5	0.365	0.460	0.513	0.550	0.579	0.682
RACSC6	0.347	0.414	0.443	0.458	0.480	0.542
RACSC7	0.347	0.396	0.413	0.415	0.416	0.459
RACSC8	0.356	0.444	0.493	0.541	0.567	0.649
RACSC9	0.354	0.442	0.483	0.531	0.556	0.647
CSTSRRC-6 ^[14]	0.320	0.356	0.380	0.390		
SRRC-10 ^[7]	$h_{ey}=0.074, h_{em}=0.156, h_{eu}0.210$					

注： h_{ey} 为屈服位移下的等效黏滞阻尼系数； h_{em} 为峰值位移下的等效黏滞阻尼系数； h_{eu} 为极限位移下的等效黏滞阻尼系数。

在同级位移下，试件 RACSC4、RACSC7、RAC-SC8 的等效黏滞阻尼系数逐渐增大，而 RACSC9 的等效黏滞阻尼系数增加有所减缓，表明轴压比对组合短柱的等效黏滞阻尼系数影响较为显著，但过大的轴压比对试件耗能能力的提高不明显；随着径厚比的增大[图 5(c)]，在同级位移下，试件的等效黏滞阻尼系数逐渐减小且变化的幅度也逐渐减小，但不同径厚比对应的等效黏滞阻尼系数最大差值呈现上升趋势，说明径厚比对组合短柱的等效黏滞阻尼系数影响同样较为显著。

4 结 语

(1)在相同再生骨料取代率、含钢率和轴压比的条件下，圆钢管约束型钢再生混凝土短柱比型钢再

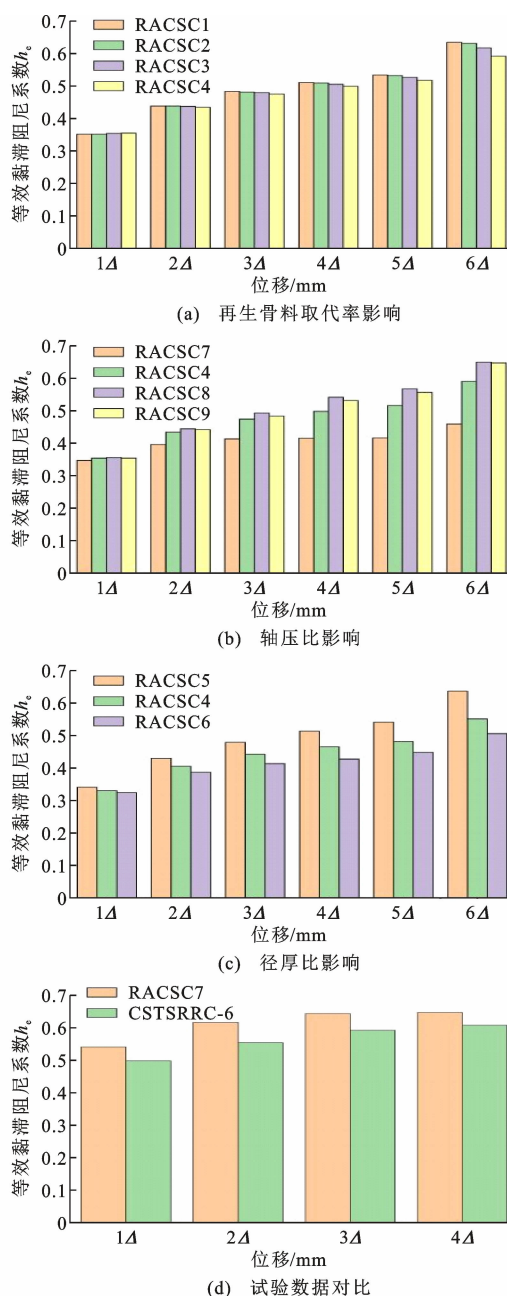


图5 设计参数对试件等效黏滞阻尼系数的影响
Fig.5 Influence of design parameter on equivalent viscous damping coefficient of specimen

生混凝土柱和圆钢管型钢再生混凝土柱表现出更好的耗能能力。

(2)再生粗骨料取代率的变化对试件的滞回曲线、骨架曲线、平均位移延性系数和等效黏滞阻尼系数影响不大,表现和普通混凝土相似,因此,圆钢管约束型钢再生混凝土也可满足抗震强度需求,并可广泛应用于承重结构中。

(3)随着径厚比的增大,弹性阶段的初始刚度、峰值承载力及同级位移下等效黏滞阻尼系数逐渐减小,而平均延性系数逐渐增大,试件的变形能力越来

越好。

(4)随着轴压比的增大,同级位移下等效黏滞阻尼系数逐渐增大,且轴压比越大的试件下降段越明显,表明延性变形能力随轴压比的增大而有所削弱。

参考文献:

References:

- [1] 刘 坚. 钢与混凝土组合结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
LIU Jian. Design principle of steel and concrete composite structure[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] 马 辉, 陈云冲, 赵艳丽, 等. 偏压荷载下圆钢管型钢再生混凝土组合柱非线性行为研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6): 1081-1091.
MA Hui, CHEN Yunchong, ZHAO Yanli, et al. Study on nonlinear behavior of composite columns of RAC-filled circular steel tube and profile steel under eccentric compression loads[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6): 1081-1091.
- [3] BAI G L, LIU B. Nonlinear finite element analysis of bond-slip performance of recycled aggregate concrete filled circular steel tube[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2019, 33(12): 1294-1319.
- [4] YU F, YIN L L, FANG Y A, et al. Mechanical behavior of recycled coarse aggregates self-compacting concrete-filled steel tubular columns under eccentric compression[J]. Structural Concrete, 2019, 20(6): 2000-2014.
- [5] KONNO K, SATO Y, KAKUTA Y, et al. Property of recycled concrete column encased by steel tube subjected to axial compression[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1997, 19: 231-238.
- [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.
- [7] 马 辉. 型钢再生混凝土柱抗震性能及设计计算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
MA Hui. Research on seismic performance and design calculation methods of steel reinforced recycled concrete columns[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [8] 闻 洋, 张迎春, 梁东旭, 等. 薄壁钢管再生混凝土柱轴压敏感因素对比分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(5): 777-785.
WEN Yang, ZHANG Yingchun, LIANG Dongxu, et al. Contrastive analysis on the axial compression sensitive factors of thin-walled steel tube recycled concrete columns[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(5): 777-785.

- [9] 何振军,田亮亮,张晓洁,等. 钢管再生混凝土柱轴压及其核心混凝土多轴力学性能研究[J]. 建筑结构, 2018,48(增2):560-566.
HE Zhenjun, TIAN Liangliang, ZHANG Xiaojie, et al. Study of recycled aggregate concrete filled steel tubular column under axial load and its core recycled concrete under multi-axial mechanics [J]. Building Structure, 2018, 48(S2): 560-566.
- [10] 张向冈,陈宗平,薛建阳,等. 圆钢管再生混凝土柱抗震性能影响因素有限元分析[J]. 世界地震工程, 2017,33(2):211-219.
ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Finite element analysis of seismic performance influence factor for recycled aggregate concrete filled circular steel tube column[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(2): 211-219.
- [11] 王成刚,柳炳康,周 健,等. 方钢管再生混凝土中长柱抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(4): 159-165.
WANG Chenggang, LIU Binggang, ZHOU Jian, et al. Experimental research on seismic behavior of slender square steel tubular columns filled with recycled aggregate concrete[J]. Industrial Construction, 2017, 47(4): 159-165.
- [12] 孟二从,苏益声,陈朋朋,等. 低周反复荷载下方钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(4): 790-797.
MENG Ercong, SU Yisheng, CHEN Pengpeng, et al. Experimental study on seismic behavior of recycled-concrete-filled square steel tube columns under cyclic reversed loading [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2015, 40(4): 790-797.
- [13] MA H, XUE J Y, LIU Y H, et al. Cyclic loading tests and shear strength of steel reinforced recycled concrete short columns[J]. Engineering Structures, 2015, 92: 55-68.
- [14] 席嘉诚. 圆钢管型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究及非线性分析[D]. 西安:西安理工大学, 2021.
XI Jiacheng. Experimental study and nonlinear analysis on seismic behavior of composite columns composed of recycled concrete filled circular steel tube and profile steel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [15] 刘 坚,张鹏程,江 进,等. 圆钢管 H 型钢再生混凝土短柱的轴压承载力分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1280-1286.
LIU Jian, ZHANG Pengcheng, JIANG Jin, et al. Axial bearing capacity analysis of H-section steel-reinforced recycled aggregate concrete filled circular steel tube stub columns[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(6): 1280-1286.
- [16] 刘 坚,田 勇,张鹏程,等. 方钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力分析[J]. 应用力学学报, 2021, 38(5): 2175-2181.
LIU Jian, TIAN Yong, ZHANG Pengcheng, et al. Axial bearing capacity analysis of RRAC filled square steel tube short columns[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(5): 2175-2181.
- [17] 周绪红,刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计[M]. 北京:科学出版社, 2010.
ZHOU Xuhong, LIU Jiepeng. Performance and design of concrete columns confined by steel tubes [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [18] 周绪红,张小冬,刘界鹏. 钢管约束钢筋混凝土柱与型钢混凝土柱滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增1): 121-128.
ZHOU Xuhong, ZHANG Xiaodong, LIU Jiepeng. Seismic behavior of steel-tube reinforced-concrete (STRC) and steel reinforced-concrete (SRC) columns [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30 (S1): 121-128.
- [19] 臧兴震. 钢管约束型钢高强混凝土柱滞回性能研究[D]. 兰州:兰州大学, 2018.
ZANG Xingzhen. Hysteretic behavior of tubed steel reinforced high-strength concrete columns [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [20] 乔建刚. 钢管约束型钢高强混凝土短柱滞回性能试验研究[D]. 西安:长安大学, 2009.
QIAO Jiangang. Experimental research on seismic behavior of steel tube confined steel reinforced high strength concrete short columns[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [21] 刘 坚. 钢结构高等分析的二阶非线性理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2012.
LIU Jian. Second-order inelastic theory and application for advanced analysis of steel structure [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [22] 陈宗平,张向冈,薛建阳,等. 圆钢管再生混凝土柱抗震性能与影响因素分析[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 129-137.
CHEN Zongping, ZHANG Xianggang, XUE Jianyang, et al. Analysis on aseismic performance and influence factors of recycled concrete filled circular steel-tube columns[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(6): 129-137.
- [23] 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, (增2): 178-184.
LIU Feng, YU Yinyin, LI Lijuan. Aseismic performance analysis of recycled concrete filled circular steel tube columns[J]. Journal of Civil Engineering, 2013, (S2): 178-184.