

文章编号: 1005-0523(2025)05-0021-09



圆钢管再生混凝土长柱抗震性能试验研究

朱 铭¹, 陈 正², 吴香国³, 唐昀超⁴, 耿大新¹

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 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; 3. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 东莞理工学院广东省城市生命线工程智慧防灾与应急技术重点实验室, 广东 东莞 523000)

摘要: 为进一步提升钢管再生混凝土构件在地震多发区域的应用水平, 设计制作了 10 根圆钢管再生混凝土长柱试件(RACSTC), 对其进行低周往复加载, 以轴压比与钢管壁厚为影响参数, 研究 RACSTC 的破坏机理, 以及滞回性能、骨架曲线与延性系数、耗能与割线刚度退化等的变化规律。研究表明, RACSTC 的滞回曲线饱满无捏缩, 骨架曲线经历弹性阶段、弹塑性阶段和下降阶段, 表现出良好的延性, 屈服位移角和极限位移角均满足相关规范的要求。RACSTC 在破坏阶段的等效粘滞阻尼系数介于 0.49~1.07 之间, 表明其具有良好的变形性能和抗震能力。研究结果能够为钢管再生混凝土构件的实际应用提供参考依据。

关键词: 钢管再生混凝土; 低周往复加载; 滞回曲线; 骨架曲线; 延性

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

本文引用格式: 朱铭, 陈正, 吴香国, 等. 圆钢管再生混凝土长柱抗震性能试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(5): 21-29.

Experimental Study on Seismic Behavior of Recycled Aggregate Concrete Filled Circular Steel Tubular Long Column

Zhu Ming¹, Chen Zheng², Wu Xiangguo³, Tang Yunchao⁴, Geng Daxin¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China JiaoTong University, Nanchang 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of China Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Disaster Prevention and Emergency Technologies for Urban Lifeline Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523000, China)

Abstract: In order to further promote the application level of recycled concrete filled steel tube components in earthquake prone areas, 10 recycled aggregate concrete filled circular steel tubular long columns (RACSTC) were designed for low cycle reciprocating loading. The experiment considers axial compression ratio and steel pipe wall thickness as influencing parameters, and conducts in-depth research on the failure mechanism and hysteresis performance, skeleton curve and ductility coefficient, energy dissipation and secant stiffness degradation of RACSTC. The experimental results show that the hysteresis curve of RACSTC is full without any pinching or shrinking, and the skeleton curve goes through the elastic stage, elastic-plastic stage, and descent stage, with

收稿日期: 2024-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52368028); 江西省教育厅科学技术项目(GJJ2405302)

good ductility. The yield displacement angle and ultimate displacement angle meet the standard specifications. The equivalent viscous damping coefficient of RACSTC during the failure stage ranges from 0.49 to 1.07, indicating that they have good deformation performance and seismic resistance. The research results can provide guiding reference for the practical application of recycled concrete filled steel tube components.

Key words: recycled concrete filled steel tube; low cycle reciprocating loading; hysteresis curve; skeleton curve; ductility

Citation format: ZHU M, CHEN Z, WU X G, et al. Experimental study on seismic behavior of recycled aggregate concrete filled circular steel tubular long column[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42 (5): 21-29.

随着旧城改造、农村城镇化和基础设施建设的飞速发展,大量未经处理的建筑垃圾被丢弃在农村地区或垃圾填埋场^[1]。因此,建筑废弃物的高效再生利用成为我国建筑业的迫切需求。再生混凝土孔隙率高、与新旧砂浆粘结强度低,其力学性能不如普通混凝土^[2]。为弥补这些缺点,钢管再生混凝土组合结构应运而生^[3-5]。这种新型组合结构显著增强了钢管再生混凝土的组合强度和钢材的抗屈曲性能,同时带来了显著的经济和社会效益^[6-7]。

地震常导致大量建筑物与基础设施的破坏^[8]。尽管已有研究涉及圆钢管再生混凝土长柱(RACSTC)的力学行为和抗震特性,但在结构应用层面,仍需依据国家规范进行更深入的实验研究、模拟分析和理论探讨^[9-12]。Yang^[13]设计了10根RACSTC和钢管普通混凝土柱试件,经低周往复加载试验的结果表明,RACSTC的抗震性能与钢管普通混凝土柱相似,可用于高烈度设防地区。Tang^[14-15]研究了轴向压缩比、再生骨料混凝土强度、钢管强度和钢管厚度等因素对RACSTC抗震特性的影响,发现尽管RACSTC表现出较低的能量耗散能力,但其延展性表现良好,同时提出了新型RACSTC变形检测方法^[16]与基于机器学习的RACSTC抗震性能的预测模型^[17]。Xu^[18-19]介绍了一种新型的基于纤维的有限元方法模型用于RACSTC的抗震性能评估,仿真分析显示再生骨料替代率对结构整体抗震性能的影响很小。

当前的研究成果主要集中在短柱构件上,对于长柱构件,其二阶效应影响更大,柱底弯矩会被进一步放大从而削弱其抗震性能与承载能力,需要对长细比较大的RACSTC抗震性能开展进一步的研

究。为提升RACSTC在地震多发区的应用广度与深度,开展了10根RACSTC的低周往复加载试验,深入探究了轴压比与钢管壁厚这两个参数的变化对RACSTC抗震行为的具体影响。

1 试验方案

1.1 试件设计

为凸显细长柱的特点,且与本课题组其余试件对比^[14-15],设计并制作了长2 700 mm、外径 d 为203 mm的细长钢管,试件有效高度 H ,即MTS作动器加载中心至钢基座顶部的距离为1 980 mm,如图1。各试件的参数设计见表1。其中,LE、LT、LW系列试件的钢管壁厚 t 分别为8、10、12 mm。

表1 试件设计参数表
Tab.1 Table of design parameters of specimens

试件编号	再生骨料取代率/%	d/mm	t/mm	H/mm	轴压比
LE-1	100	203	8	1 980	0.2
LE-2	100	203	8	1 980	0.4
LE-3	100	203	8	1 980	0.6
LT-1	100	203	10	1 980	0.2
LT-2	100	203	10	1 980	0.4
LT-3	100	203	10	1 980	0.6
LW-1	100	203	12	1 980	0.2
LW-2	100	203	12	1 980	0.4
LW-3	100	203	12	1 980	0.6
LW-3-C	0	203	12	1 980	0.6

基于《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)与《钢管混凝土结构技术规程》(CECS 28:2012)中的方法,可计算得到RACSTC的轴向抗压承载力 N_u ,见表2。其中, f_a 、 f_{cu} 、 f_c 分别为钢管

的屈服强度、混凝土立方体抗压强度、混凝土抗压强度设计值; θ 为套箍指标,反映钢管对混凝土的约束效应; N_u 、 n 、 N 分别为RACSTC的轴向受压承载力、轴压比以及试验时实际施加的轴压力。

表2 试验轴压力计算结果
Tab.2 Calculation results of test axial pressure

试件编号	f_a / MPa	f_{cu} / MPa	f_c / MPa	θ	N_u / kN	n	N / kN
LE-1	283	50.7	33.9	1.488	2 006.4	0.2	401.3
LE-2	283	50.7	33.9	1.488	2 006.4	0.4	802.6
LE-3	283	50.7	33.9	1.488	2 006.4	0.6	1 203.8
LT-1	283	54.3	36.3	1.796	2 294.3	0.2	458.9
LT-2	283	54.3	36.3	1.796	2 294.3	0.4	917.7
LT-3	283	54.3	36.3	1.796	2 294.3	0.6	1 376.6
LW-1	283	50.3	33.6	2.229	2 619.7	0.2	523.9
LW-2	283	50.3	33.6	2.229	2 619.7	0.4	1 047.9
LW-3	283	50.3	33.6	2.229	2 619.7	0.6	1 571.8
LW-3-C	283	51.6	34.5	2.229	2 619.7	0.6	1 572.0

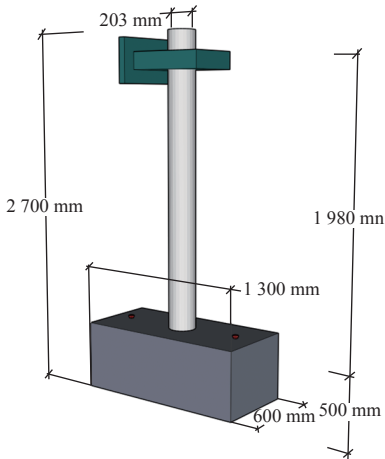


图1 试件构造图
Fig.1 Specimen structure

1.2 材料性能实测

试件中采用Q235无缝钢管。按照《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)中的试验方法,对钢材进行检测,测得钢材的弹性模量为 2.15×10^5 MPa,屈服强度283 MPa,抗拉强度477 MPa。

依据《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52-2006),对再生骨料和天然骨料进行物理特性试验,试验结果见表3。

为探究再生骨料与天然骨料的性能差异,粗集料选用连续级配的再生骨料和天然骨料,细集料为连续级配河砂,混凝土的试配强度等级为C50。按

表3 粗骨料的物理特性
Tab.3 The physical property of coarse aggregate

骨料	粒径/mm	堆积密度/ (kg/m³)	表观密度/ (kg/m³)	吸水率/%
天然骨料	5~20	1 456	2 861	0.83
再生骨料	5~20	1 294	2 624	4.57

照《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准(JGJ 52-2006)》和《再生混凝土应用技术规程》(DG/TJ08-2018-2007)提供的方法计算得到普通混凝土与再生混凝土的配合比,两种混凝土配合比参数见表4。

表4 混凝土配合比
Tab.4 Concrete mix ratio

试件编号	水灰比	材料用量/(kg/m³)				
		水	水泥	砂	再生骨料	天然骨料
LE	0.53	185.04	349.07	640.11	1 226.17	0
LT	0.53	185.03	349.08	640.11	1 226.24	0
LW	0.53	184.39	347.83	637.86	1 221.88	0
LW-3-C	0.53	209.92	395.80	663.63	0	1 179.36

1.3 试验方案

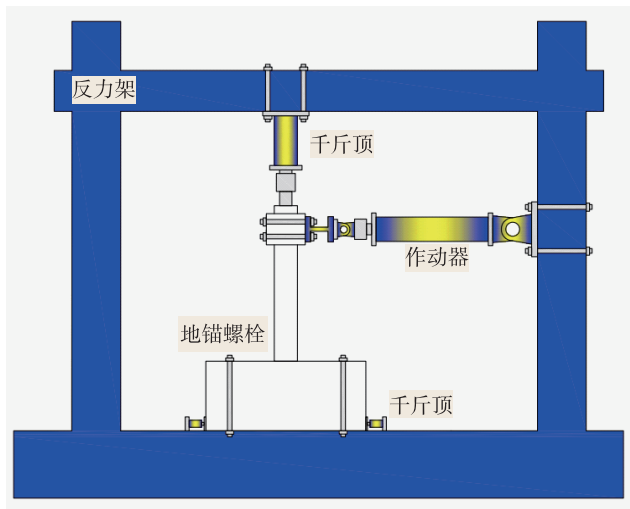
RACSTC采用拟静力的加载方案,即在柱顶施加竖直向下的轴向压力与横向往复力,如图2(a)。轴向压力由竖向液压千斤顶施加,其顶部安装有滚轴,以适应柱顶的横向往复位移。往复力由MTS作动器施加。

加载前取轴压力的50%进行预加载,然后卸载,重复2次。正式加载时,先施加轴力并维持恒定,接着施加横向往复力。按照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101-2015)的要求,以柱顶位移量为标准施加横向往复力。在试件屈服前,以1 mm为位移增量逐级加载,并观察MTS作动器控制系统中的荷载位移曲线,当曲线出现拐点,表明试件进入屈服状态,取拐点位移值作为屈服位移。之后的位移增量取屈服位移的整数倍,各增量水平循环3次。当试件出现明显损伤或横向力降至峰值的85%时,试验终止。

1.4 测点布置及量测

为更好地判定钢管屈服位移及试件破坏机理,将应变片布置在柱底部。由于拉压应力最大处位于试件前后侧,故在柱前后两面距柱底50、150、300 mm处各布置3个竖向应变片和3个环向应变片,左右两面仅布置3个竖向应变片。试件各个面的规定如图3所示,应变片布置情况与编号见图4。

以LE-1试件的1号和13号应变片所记录的应



(a) 试验加载设计图



(b) 试验现场加载图

图2 加载装置

Fig.2 Loading device

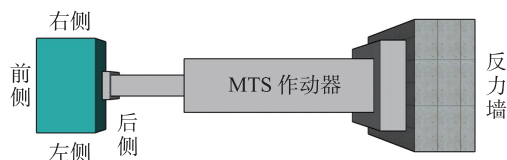


Fig.3 The specimen of each surface (top view angle)

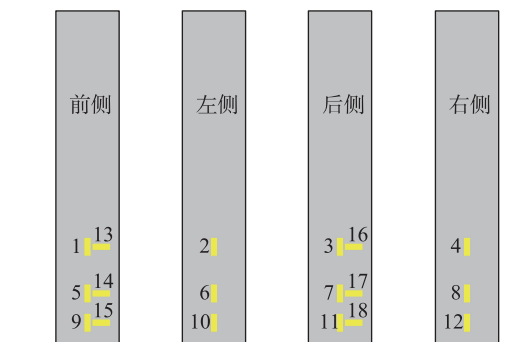


图4 应变片布置及编号(立面角度)

Fig.4 Strain gauge arrangement and number (elevation angle)

变值为例,它们随时间的变化如图5。通过图5可分析试验过程中RACSTC表面应变的变化规律。

钢管未屈服前,由于试件尚未出现塑性,位于前侧的1号竖向应变片的应变值在 $-2\,500\mu\epsilon\sim 1\,000\mu\epsilon$ 之间波动,幅度很小。钢管屈服后,在反复的拉压应力的作用下,应变基于基线上下振荡,且振荡幅度大幅增加。

类似地,钢管屈服前位于前侧的13号横向应变片的应变值变化幅度很小。但进入弹塑性阶段后,

应变值在反复振荡过程中呈单调增长趋势。此外,前侧应变片的拉应变普遍大于后侧对应位置的应变片,且拉应变的增长速度也更快,其原因是钢管在横向力往复载荷的作用下产生了鼓曲变形。

2 结果与分析

2.1 破坏形态与滞回特性

各试件的破坏形态发展进程类似。加载初期,钢管表面无明显变化,且未屈服,横向荷载于2~4倍屈服位移处达到峰值,于5~6倍屈服位移处下降至峰值的85%以下,此时,钢管表面略微鼓曲。最终,试件底部在压弯共同作用下发生破坏。此外,与钢管普通混凝土柱LW-3-C相比,钢管再生混凝土柱LW-3的破坏现象类似,但其屈服位移略小2 mm,横向峰值荷载也略低,这种差异主要是由再生骨料内部存在的初始损伤所引起的。

各试件在试验中具有相似的弹塑性发展历程,在弹性阶段,试件在加、卸载过程中未有塑性变形,整体滞回曲线形状近似为直线。而随着位移循环等级的增加,试件残余变形逐渐累积,此时试件的滞回环面积不断增大,发挥耗能能力。

由图6可知,RACSTC的滞回曲线均十分饱满,未出现“捏缩”现象,展现出优异的滞回与耗能性能,这得益于钢管对再生混凝土的约束效应,抑制了再生骨料内部微裂缝的发展,增强了钢管与核心混凝土的相互作用。

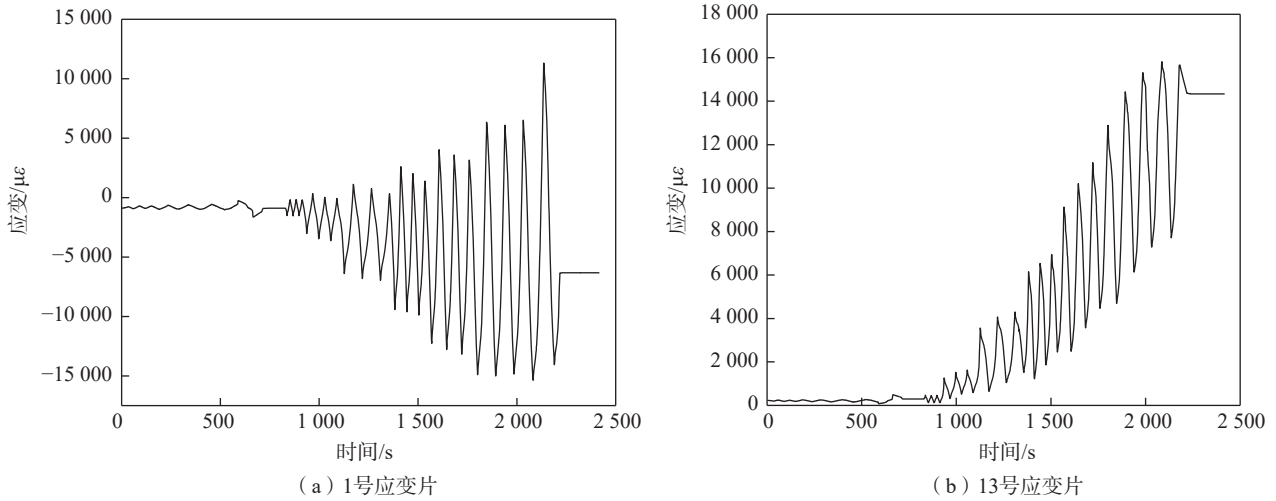


图5 LE-1试件应变变化曲线
Fig.5 Strain variation curve of LE-1 specimen

对比图6中的滞回曲线可知,高轴压比显著提升了试件的横向峰值荷载,滞回曲线更加饱满;类似的,提升钢管壁厚提高了钢管的套箍效应,对核心再生混凝土的约束加大,也使得滞回曲线更加饱满。

2.2 骨架曲线与延性系数

将试件滞回曲线中各级加载第一个滞回环的峰值点相连得到骨架曲线,如图7所示。骨架曲线按照荷载-位移发展进程可分解为弹性阶段、弹塑性阶段和下降阶段。弹性阶段时,骨架曲线沿试件的初始刚度呈斜直线上升。待钢管屈服后,骨架曲线上斜率放缓,开始产生塑性。峰值点过后,骨架曲线斜率为负值,横向承载力开始下降,即将破坏。

轴压比对骨架曲线的发展有重要影响,随着轴压比的增大,试件的初始刚度略微增长,峰值点也提高,但下降阶段的下降速率更快,表明轴压比较高的试件,其横向峰值承载能力有所提高,但破坏时的水平位移降低,变形能力较差。如LE-3试件的峰值荷载比LE-1试件的大9.5 kN,但是极限位移要小29 mm。

厚壁钢管可提高试件的弹性刚度、增大横向承载力及破坏位移,表明厚壁RACSTC有利于提高其承载能力和抵抗变形的能力。如在同一位移循环加载等级下,LW-1试件的水平承载力普遍比LW-1试件高20.0 kN左右。

观察LW-3和LW-3-C两条骨架曲线,发现在相同轴压比和壁厚条件下,RACSTC的承载力稍低且破坏时的位移稍小,但总体无显著差别,表明利用再生骨料替代天然骨料作为钢管内填料是可行的。

在分析各试件的骨架曲线发展趋势时,发现采

用Boltzmann公式可较好预测RACSTC的承载能力与变形,即

$$y = A2 + (A1 - A2) / \left(1 + e^{\left(\frac{x - x_0}{dx} \right)} \right) \quad (1)$$

式中: y 为横向荷载,kN; x 为柱顶位移,mm; $A1$ 、 $A2$ 为拟合参数; x_0 为峰值位移对应横坐标; dx 为曲线斜率参数。

拟合参数与相关系数见表5,以LE-1试件拟合曲线为例,试验骨架曲线与拟合曲线的对比情况见图8。各试件的拟合函数的相关系数均在0.94以上,说明采用Boltzmann公式预测RACSTC的骨架曲线是可行的。

延性系数可有效反馈构件的变形能力,依据通用屈服法确定RACSTC的屈服位移 Δ_y ,骨架曲线的峰值点对应的位移为峰值位移 Δ_m ,极限位移 Δ_u 为横向荷载降至峰值的85%所对应的位移, P_y 、 P_m 、 P_u 为骨架曲线上相对应的荷载值。定义延性系数为 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$,屈服位移角为 $\theta_y = \Delta_y / L$,极限位移角为 $\theta_u = \Delta_u / L$ 。计算结果见表6。

根据骨架曲线特征值的计算结果发现,各试件的延性系数都超过5,显著高于钢筋混凝土构件^[20],说明RACSTC的变形性能优异。另外,RACSTC的 θ_y 在0.007~0.012之间, θ_u 在0.042~0.072之间,均超过《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中对弹性及弹塑性层间位移角的限制标准,说明试件的变形性能与抗震性能均满足规范要求。

对比不同轴压比与壁厚试件的延性系数计算

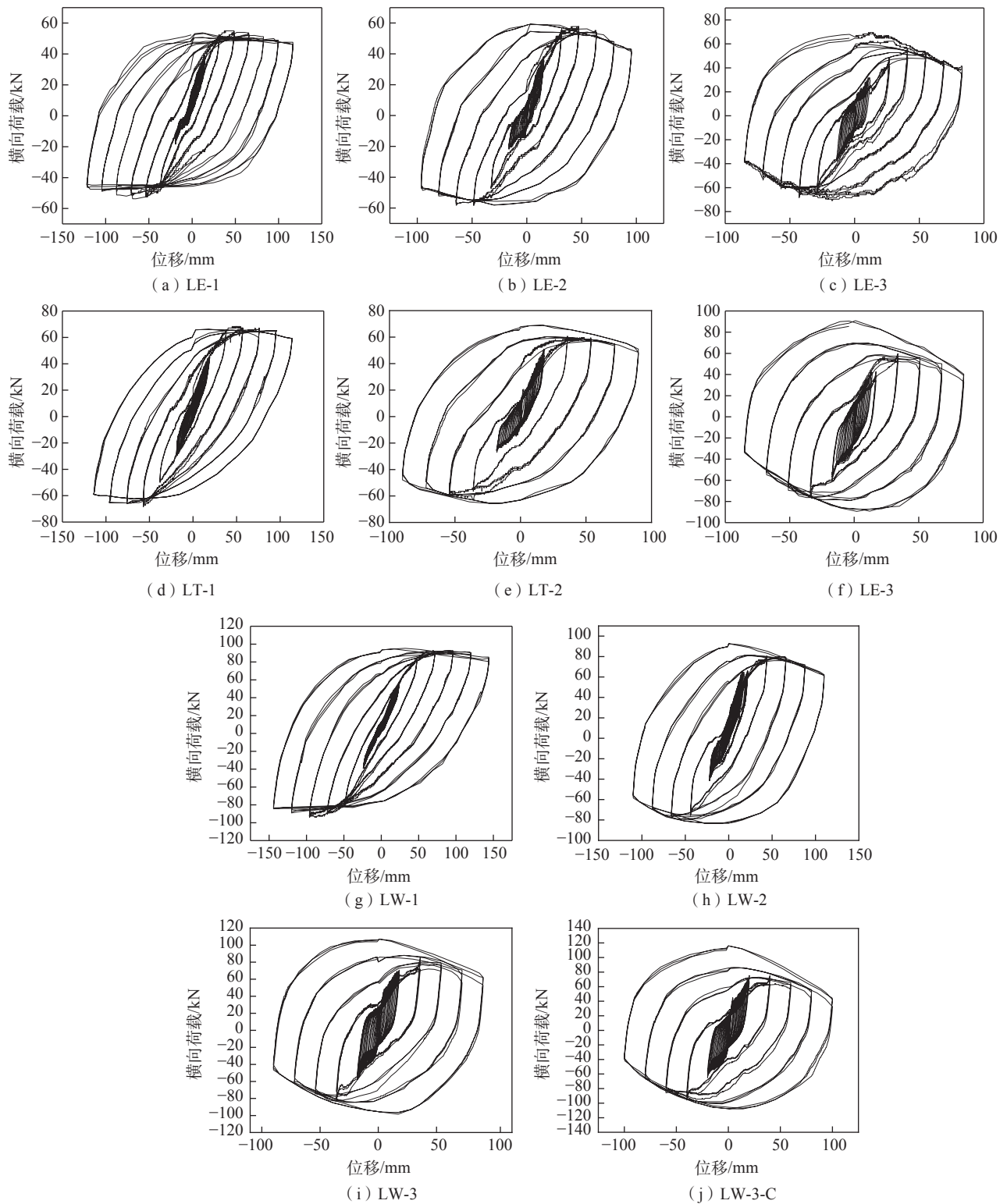


图6 试件滞回曲线

Fig.6 Hysteresis curves of the specimen

结果可知,提高轴压比将大幅降低破坏位移,导致延性系数降低,尤其是低轴压比试件($n=0.2$)的延性系数显著大于中高轴压比的试件($n=0.4, 0.6$),这表

明在较低轴压比条件下,RACSTC具有更优越的变形能力。此外,钢管壁厚较薄的试件延性系数较大,说明使用薄壁钢管能有效地提升试件的延性。

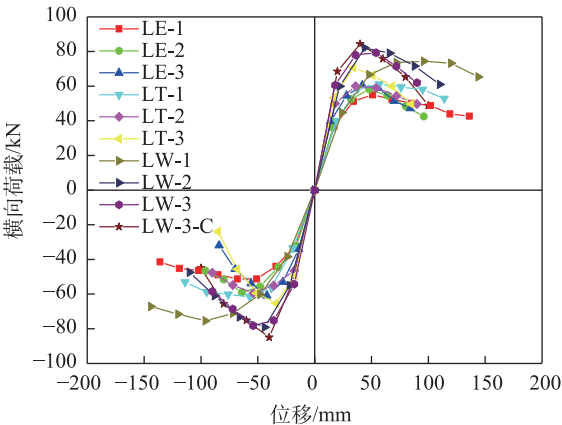


图7 骨架曲线
Fig.7 Skeleton curve

表5 拟合参数与相关系数表
Tab.5 Table of fitting parameters and correlation coefficients

试件 编号	$A1$	$A2$	x_0	d_x	R^2
LE-1	-47.108	49.449	-0.048	9.010	0.992 28
LE-2	-52.442	51.930	-0.930	9.854	0.986 56
LE-3	-48.974	54.826	0.679	7.158	0.971 54
LT-1	-58.740	58.857	-0.948	11.892	0.994 75
LT-2	-54.042	55.962	0.123	6.422	0.992 86
LT-3	-49.213	60.984	1.214	4.987	0.940 49
LW-1	-71.528	72.752	-0.987	17.601	0.996 59
LW-2	-64.978	73.071	1.089	8.409	0.971 98
LW-3	-69.811	72.940	0.109	7.610	0.986 15
LW-3-C	-66.182	69.458	$8.104 \times e^{-4}$	6.186	0.948 24

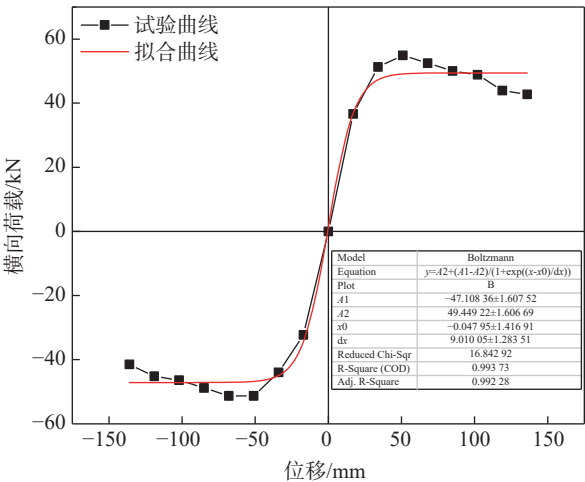


图8 骨架曲线拟合结果对比
Fig.8 Comparison of skeleton curve fitting results

2.3 耗能

耗能是评估结构抗震的关键,试验中所得的滞

回环的面积能直观反映试件的耗能能力,也可采用《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101-2015)中提出的等效粘滞阻尼系数 ζ_{eq} 来量化耗能效果。图9为 ζ_{eq} 与位移循环等级 Δ 的关系曲线。

分析曲线变化趋势可知,试件破坏时的 ζ_{eq} 都大于0.5,显著超过普通钢筋混凝土柱,展现出RACSTC的出色的耗能性能。

另外,高轴压比试件的 $\zeta_{eq}-\Delta$ 曲线一直高于低轴压比试件的 $\zeta_{eq}-\Delta$ 曲线,说明轴压比的提高,加剧了RACSTC的耗能。如LE-3试件的 $\zeta_{eq}-\Delta$ 曲线一直位于LE-1试件的上方,且停止加载时,LE-3试件的 ζ_{eq} 为0.798 33,而LE-1试件的 ζ_{eq} 为0.615 37。

厚壁柱的等效粘滞阻尼系数略大于薄壁柱,但二者相差不大,说明壁厚的变化对钢管再生混凝土柱的耗能影响不大。如LW-1试件与LT-1试件的 $\zeta_{eq}-\Delta$ 曲线十分接近,二者仅相差0.02~0.04。

2.4 刚度退化

图10为RACSTC的割线刚度退化曲线,可有效反映试件的刚度的退化情况。

高轴压比的试件具有更大的初始刚度,但随着加载进程的推进,刚度退化的速率加快,在3~4倍屈服位移时,刚度退化曲线的斜率减小,最终,各试件的残余刚度相差不大。如LE-3的初始刚度为2.49,大于LE-2的初始刚度1.66,但二者的残余刚度均为0.46,说明高轴压试件的刚度退化速率更快。

此外,厚壁试件的初始刚度更大,刚度退化曲线斜率更陡,但到加载后期退化速率变缓,最终残余刚度差距不大。如LW-2试件的初始刚度为2.84,大于LT-2的初始刚度2.13,二者的残余刚度均为0.50左右,说明壁厚增大将加大试件的刚度退化速率。

3 结论

1) RACSTC破坏现象及最终破坏形态类似,在柱底部均出现了钢管鼓曲的现象,试件在受压和弯曲的共同作用下发生破坏。另外,RACSTC的滞回曲线未见“捏缩”,呈现饱满的梭形,其滞回性能十分优异。

2) RACSTC的骨架曲线可划分为弹性阶段、弹塑性阶段和下降阶段。适当提高轴压比可增强试件的弹性刚度,但会加快骨架曲线下降段的衰减速度。增大壁厚将提高RACSIC的横向峰值承载能力。RACSTC的延性系数都超过5,屈服位移角和

表6 试件骨架曲线特征值

Tab.6 Eigenvalues of specimen skeleton curves

试件编号	n	t/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	μ	Θ_y	Θ_u
LE-1	0.2	8	36.62	17	54.93	51	118.76	136	8	0.008 5	0.068 0
LE-2	0.4	8	36.00	16	58.10	48	42.50	96	6	0.008 0	0.048 0
LE-3	0.6	8	39.75	14	60.46	42	47.20	84	6	0.007 0	0.042 0
LT-1	0.2	10	39.99	19	61.20	57	52.83	114	6	0.009 5	0.057 0
LT-2	0.4	10	50.00	18	60.00	36	49.70	90	5	0.009 8	0.049 0
LT-3	0.6	10	53.30	17	70.70	34	49.69	85	5	0.008 5	0.042 5
LW-1	0.2	12	50.40	24	83.70	96	73.53	144	6	0.012 0	0.072 0
LW-2	0.4	12	62.90	22	82.00	44	61.00	110	5	0.011 0	0.055 0
LW-3	0.6	12	65.67	18	79.30	54	62.00	90	5	0.009 0	0.045 0
LW-3-C	0.6	12	68.00	20	84.33	40	48.80	100	5	0.010 0	0.050 0

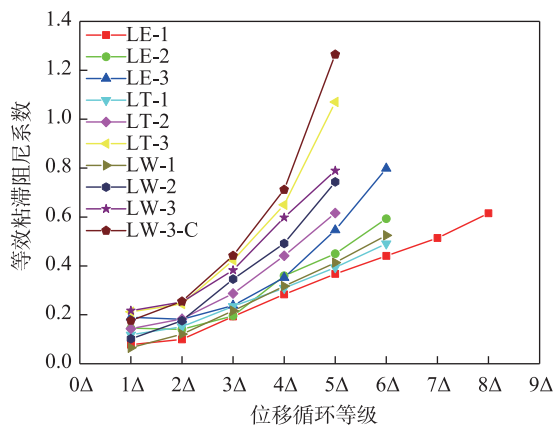
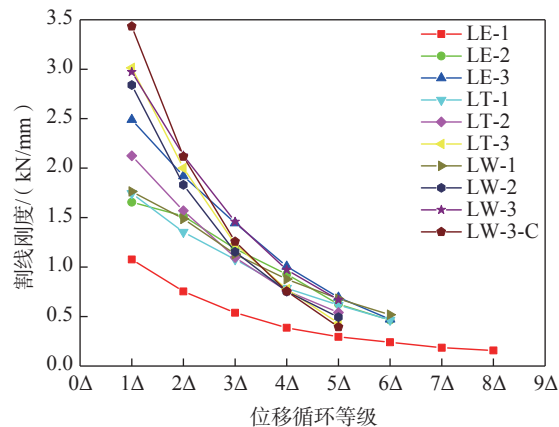
图9 $\zeta_{eq}-\Delta$ 曲线Fig.9 Curves of ζ_{eq} versus Δ 

图10 刚度退化曲线

Fig.10 Curves of stiffness degradation

极限位移角都超过规范对弹性位移角与弹塑性位移角的规定限值,表明其具有良好的延性变形能力。

3) RACSTC破坏时的等效粘滞阻尼系数在0.49~1.07之间,远大于普通钢筋混凝土柱的0.10~0.20,展现出出色的耗能性能。此外,高轴压比下,柱

的耗能与初始刚度显著提升,壁厚变化对耗能的影响却不明显,建议在实际应用时可优先选用薄壁钢管,在提高变形能力的同时,降低加工成本。

参考文献:

- [1] 杜颜胜, 李佳岐, 陈志华, 等. 矩形截面钢管尾矿砂再生混凝土柱抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11): 63-73.
DU Y S, LI J Q, CHEN Z H, et al. Study on seismic performance of rectangular concrete-filled steel tube columns made with tailings and recycled aggregates[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(11): 63-73.
- [2] CHAKRABORTY S, SUBRAMANIAM K V L. Influences of matrix strength and weak planes on fracture response of recycled aggregate concrete[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 124: 103801.
- [3] 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.
- [4] ZHAO H, ZHANG W H, WANG R, et al. Axial compression behaviour of round-ended recycled aggregate concrete-filled steel tube stub columns (RE-RACFST): experiment, numerical modeling and design[J]. Engineering Structures, 2023, 276: 115376.
- [5] ZHAO H Y, HAN L H, HOU C, et al. Performance of recycled aggregate concrete-filled high-strength steel tubes under axial compression, tension and torsion[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 184: 110478.
- [6] 王伊, 黄宏, 帅子坤, 等. 再生陶瓷混凝土抗压强度及弹性模量试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(1): 38-45.

- WANG Y, HUANG H, SHUAI Z K, et al. Experimental study on compressive strength and elastic modulus of recycled ceramic concrete[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(1): 38-45.
- [7] LI X, WANG R, ZHAO H, et al. Bond behaviour of round-ended recycled aggregate concrete filled steel tube (RE-RACFST) columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 201: 107700.
- [8] 王朋, 史庆轩, 王峰, 等. 双向加载路径下型钢-混凝土组合柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(1): 52-60.
- WANG P, SHI Q X, WANG F, et al. Experimental study on seismic behavior of steel-concrete composite columns under biaxial loading path[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(1): 52-60.
- [9] HAN L H, XU C Y, TAO Z. Performance of concrete filled stainless steel tubular (CFSST) columns and joints: summary of recent research[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 152: 117-131.
- [10] YANG Y F, BIE X M, HOU C, et al. Analytical behaviour and design of square CFST subjected to local bearing force[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 159: 198-214.
- [11] 王兴国, 姜茂林, 张向冈, 等. 钢管再生混凝土柱力学性能研究进展[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1256-1266.
- WANG X G, JIANG M L, ZHANG X G, et al. Research progress on mechanical property for recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5): 1256-1266.
- [12] 沈小盛, 张晓勇, 方焰, 等. 冻融循环后圆钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5): 105-114.
- SHEN X S, ZHANG X Y, FANG Y, et al. Experimental research on axial compression behavior of circular CFST short columns after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(5): 105-114.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] TANG Y C, LI L J, FENG W X, et al. Study of seismic behavior of recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 1-15.
- [16] TANG Y C, ZHU M, CHEN Z, et al. Seismic performance evaluation of recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns with field strain detected via a novel mark-free vision method[J]. Structures, 2022, 37: 426-441.
- [17] TANG Y C, WANG Y F, WU D X, et al. An experimental investigation and machine learning-based prediction for seismic performance of steel tubular column filled with recycled aggregate concrete[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2022, 61(1): 849-872.
- [18] XU J J, CHEN Z P, ZHAO X Y, et al. Seismic performance of circular recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns: fem modelling and sensitivity analysis [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 141: 509-525.
- [19] XU J J, CHEN Z P, XUE J Y, et al. Simulation of seismic behavior of square recycled aggregate concrete - filled steel tubular columns[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 553-566.
- [20] XIAO J Z, HUANG X, SHEN L M. Seismic behavior of semi-precast column with recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 988-1001.



第一作者:朱铭(1992—),男,讲师,博士研究生,研究方向为钢-混组合结构。E-mail:2021019081400011@ecjtu.edu.cn。



通信作者:唐昀超(1983—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为结构信息感知和智能建造。E-mail:tangyunchao@dgut.edu.cn。

(责任编辑:李根)