

强化再生骨料混凝土柱抗震性能研究

张锋剑¹, 朱丽华², 王浩楠³, 武海荣¹, 师政^{1,4}, 曹夫利^{1,4}, 张远^{1,4}

(1. 河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467036; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 4. 华北水利水电大学 土木与交通工程学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 为研究粗骨料强化的再生混凝土柱和普通混凝土柱抗震性能的差异, 设计并制作了 5 根强化再生骨料混凝土柱和 3 根普通混凝土柱, 选取轴压比和体积配箍率为参数变量, 进行低周反复荷载试验。结果表明: 框架柱试件在低周反复荷载作用下经历了弯曲破坏和弯剪破坏; 轴压比为 0.10、0.25、0.40 时, 强化再生骨料混凝土柱承载力较普通混凝土柱承载力稍大, 该强化方式对柱承载力提升效果明显; 通过增大强化骨料再生混凝土柱的体积配箍率, 可以提高强化再生骨料混凝土柱的承载能力与变形能力, 减缓强度衰减速度, 降低刚度退化速度, 增强其抗震性能。

关键词: 粗骨料强化; 再生混凝土; 框架柱; 低周反复荷载; 抗震性能

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)01-0001-10

Experimental study on seismic behavior of enhanced recycled aggregate concrete columns

ZHANG Fengjian¹, ZHU Lihua², WANG Haonan³, WU Hairong¹,
SHI Zheng^{1,4}, CAO Fuli^{1,4}, ZHANG Yuan^{1,4}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Henan Univ. of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

4. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: To study the difference in seismic performance between Enhanced Recycled Coarse Aggregate (ERCA) concrete columns and Natural Coarse Aggregate (NCA) concrete columns, five reinforced recycled aggregate concrete columns and three ordinary concrete columns were designed and fabricated, and the specimens were tested under low cyclic loads with the axial compression ratio and volume stirrup ratio as parametric variables. The results showed that the specimens experienced two failure modes, namely, bending-shear failure and bending failure. The lateral bearing capacities of ERCA columns increased compared to those of NCA columns corresponding to the axial compression ratios of 0.10, 0.25, and 0.40, respectively, indicating that this strengthening method could provide a significant increase in bearing capacities. Increasing the volume stirrup ratio could enhance the bearing capacity and deformation capacity, decrease the strength degradation and stiffness degradation rate, and improve the seismic performance for ERCA columns.

Key words: strengthening coarse aggregates; recycled concrete; frame columns; reversed cyclic loading; seismic behavior

近年来, 我国基础建设迅速发展, 但也产生了很多建筑垃圾, 与此同时天然粗骨料也越来越缺乏, 利用建筑垃圾生产再生骨料混凝土便成为解决以上

问题的途径之一^[1-3]。由于建筑垃圾经破碎后获得的再生粗骨料微裂缝多、压碎指标高、吸水率大等缺陷, 影响了配制混凝土的力学性能与耐久性^[4]。近

收稿日期: 2021-05-15

修改稿日期: 2022-01-08

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(21B560001、21A560003); 河南省住房和城乡建设科技计划项目(豫建科[2021]228号); 郑州市建设科技项目(2022年度)

第一作者: 张锋剑(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事再生混凝土及再生混凝土砌体结构研究。E-mail: zjf9608@163.com

通信作者: 朱丽华(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗震和再生混凝土研究。E-mail: zhulihuaxa@163.com

年来,再生粗骨料强化方法研究较多^[5-7],主要方法有物理强化法^[8]和化学强化法^[9-11],再生骨料通过强化可以提升配置混凝土的力学性能^[12].

目前,国内外学者对强化骨料再生混凝土主要集中在混凝土材料性能方面的研究^[13],对强化后再生骨料所制作的构件抗震性能研究较少.为此,本文通过普通混凝土柱和强化再生骨料混凝土柱的拟静力试验,研究其滞回曲线、骨架曲线、延性、刚度退化、耗能能力和强度衰减等指标,并提出结构设计建议.

1 试验概况

1.1 材料试验

试验所用粗骨料分为天然粗骨料(NCA)、再生粗骨料(RCA)和强化再生粗骨料(ERCA).天然粗骨料为普通碎石,连续级配,粒径为(5~40

mm);再生粗骨料是通过实验室废弃构件破碎制备,粒径为(5~40 mm);强化再生粗骨料是将再生粗骨料经过外掺 10%硅粉的水泥浆液(水灰比为 1.1:1)浸泡 4 小时后得到,硅粉物理性能见表 1,三种粗骨料性能见表 2.

表 1 硅粉物理性能指标

Tab. 1 Physical properties of silicon powder

外观	SiO ₂ 含量/%	容重 /kg·m ⁻³	比表面 积/m ² ·g ⁻¹	平均细 度/μm
灰色粉末	94~98	200~250	18.3	0.1~0.3

配置标准混凝土立方体试块^[14]进行抗压强度试验,试块尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,试块与试验试件同时浇筑,测得混凝土强度指标见表 3.各试件箍筋采用 HPB300 钢筋,纵筋采用 HRB400 钢筋,每种钢筋分别预留 3 个标准拉伸试件,测得力学性能指标见表 3.

表 2 粗骨料基本力学性能

Tab. 2 Basic mechanical properties of coarse aggregate

骨料种类	表观密度/kg·m ⁻³	堆积密度/kg·m ⁻³	10min 吸水率/%	24h 吸水率/%	压碎指标/%
ERCA	2 429.2	1 183.7	1.64	2.71	16.8
RCA	2 415.9	1 210.5	2.53	3.68	18.1
NCA	2 701.3	1 444.4	—	0.82	6.2

表 3 混凝土及钢筋材料性能

Tab. 3 Properties of concrete and reinforced materials

试件类型	立方体抗压 强度/N·mm ⁻²	钢筋类别	钢筋直径 /mm	弹性模量 /N·mm ⁻²	极限强度 /N·mm ⁻²	屈服强度 /N·mm ⁻²
ERCA	43.6	HRB400	12	2×105	496	394
RCA	33.0	HPB300	10	2×105	463	334
NCA	36.2	HPB300	8	2×105	446	305

1.2 试件设计

为了对比普通混凝土柱与强化再生骨料混凝土柱的抗震性能,研究轴压比和体积配箍率对粗骨料强化的再生混凝土柱抗震性能的影响,试验设计制作了 3 个普通混凝土柱和 5 个强化再生骨料混凝土

柱,混凝土强度等级为 C30,尺寸等参数见图 1 和表 4.为控制各试件有效水灰比^[1]一致,强化再生骨料混凝土采用添加附加水的方法确定最终配合比,其中附加水以粗骨料 10 min 吸水率计算确定,在拌制时与自由水一并加入搅拌,详细配合比见表 5.

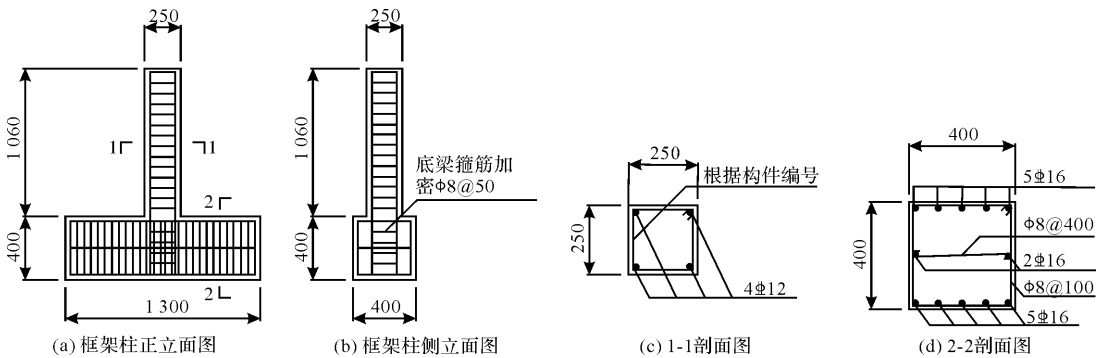


图 1 试件截面及配筋

Fig. 1 Cross section and reinforcement of test piece

表 4 试件尺寸、参数
Tab. 4 Component dimensions and parameters

试件名称	实际柱高/mm	计算柱/mm	试验轴压比	剪跨比	体积配箍率/%	箍筋直径/mm	箍筋间距/mm
NCA-0.10-1.99	1 060	900	0.10	3.6	1.99	10	75
NCA-0.25-1.99	1 060	900	0.25	3.6	1.99	10	75
NCA-0.40-1.99	1 060	900	0.40	3.6	1.99	10	75
ERCA-0.10-1.99	1 060	900	0.10	3.6	1.99	10	75
ERCA-0.25-1.28	1 060	900	0.25	3.6	1.28	8	75
ERCA-0.25-1.66	1 060	900	0.25	3.6	1.66	10	90
ERCA-0.25-1.99	1 060	900	0.25	3.6	1.99	10	75
ERCA-0.40-1.99	1 060	900	0.40	3.6	1.99	10	75

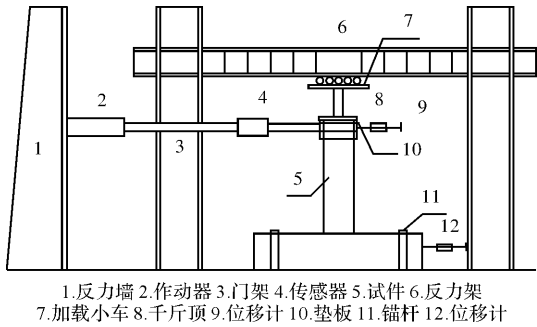
注:“NCA”表示普通粗骨料混凝土柱;“ERCA”表示强化再生粗骨料混凝土柱;“0.10”、“0.25”和“0.40”表示试验轴压比 $n=N/(f_cA)$,其中 N 为竖向轴力, f_c 为混凝土轴心抗压强度, A 为全截面面积;“1.28”、“1.66”和“1.99”表示体积配箍率 ρ_{sv} ;剪跨比根据 $\lambda=H_0/h$ 确定, h 为截面高度。

表 5 混凝土配合比
Tab. 5 Concrete mix ratio

试件类型	水灰比	水泥/kg	水/kg		砂子/kg	粗骨料/kg		
			附加水	自由水		ERCA	RCA	NCA
ERCA	0.48	398	19	192	635	1 180	—	—
RCA	0.48	398	30	192	635	—	1 180	—
NCA	0.48	398	—	192	635	—	—	1 180

1.3 加载方式

拟静力试验的竖向荷载由轴压比确定,并在试验过程中保持恒定^[14]。水平加载采用力-位移混合加载制度,首先以 10 kN 为级差逐级加载,每级循环 1 次,当纵筋达到屈服强度后使用位移控制加载,位移控制加载级差取柱顶屈服位移,每一级循环 3 次。加载装置如图 2,加载制度如图 3。



1.反力墙 2.作动器 3.门架 4.传感器 5.试件 6.反力架
7.加载小车 8.千斤顶 9.位移计 10.垫板 11.锚杆 12.位移计

图 2 加载装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the loading device

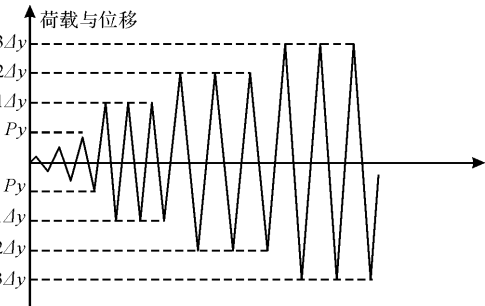


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading system

2 破坏过程及破坏形态

2.1 弯剪破坏

柱 ERCA-0.25-1.28 与柱 ERCA-0.40-1.99 发生了弯剪破坏,具体破坏过程如下:

加载初期,柱顶荷载-位移基本呈斜直线,荷载随侧向位移增大而增大,表明试件基本处于弹性阶段。随位移增大,框架柱根部混凝土开裂后,裂缝水平延伸、变宽,当水平裂缝延伸至纵筋位置时,裂缝与水平面之间的夹角开始增大,水平位移继续增大,纵向钢筋屈服。

随加载继续进行,斜裂缝出现,水平裂缝产生的位置变高,并不断向中性轴延伸,在反复荷载作用下,柱根部的水平裂缝相互延伸并贯通。当荷载加至极值 P_{max} 后,斜裂缝倾角大于 45° ,斜裂缝的发展明显快于水平裂缝,同时混凝土保护层出现竖向裂缝并开始剥落,纵筋屈曲向外凸起,部分箍筋及纵筋裸露;当荷载降至 $0.85 P_{max}$ 后,试验结束,此时纵筋屈服,塑性铰区混凝土压碎,破坏形态见图 4。

2.2 弯曲破坏

普通混凝土柱 NCA-0.10-1.99、NCA-0.25-1.99、NCA-0.40-1.99 与强化再生骨料混凝土柱 ERCA-0.10-1.99、ERCA-0.25-1.66、ERCA-0.25-1.99 都发生了典型的弯曲破坏。

加载初期,试件处于弹性阶段,当水平荷载

超过 $0.1 P_{\max}$ 时, 柱出现水平裂缝; 随着水平荷载的增大, 柱顶侧向位移也随之增大, NCA 柱和 ERCA 柱的水平裂缝数量逐渐增加, 水平裂缝的位置升高, 原水平裂缝向中性轴延伸。

随荷载继续增大, 塑性铰区混凝土表面出现少量竖向裂缝, 当水平裂缝向内延伸约 75 mm 以后, 纵筋屈服, 继续加载, 框架柱根部出现的水平裂缝多而密, 随后逐渐向内部延伸, 裂缝宽度

增大并贯通, 混凝土保护层开始脱落, 纵筋屈曲和外凸使箍筋及纵筋裸露, 荷载下降至 $0.85 P_{\max}$ 试验结束。

2.3 各试件破坏形态对比

各试件破坏形态见图 4, 根据图 4(a)、(d)、(e)、(f)、(g) 与 (h), ERCA 框架柱在轴压比适中时破坏不严重, 与 NCA 框架柱相比无明显劣势, 轴压比较大时破坏严重。

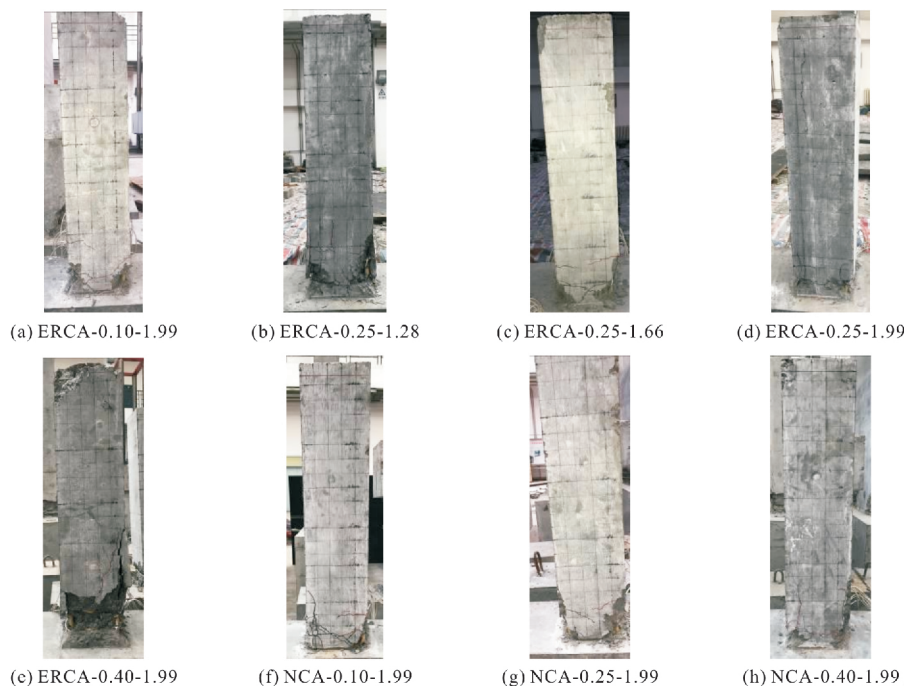


图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Component failure pattern

观察图 4(b)、(c)、(d), ERCA 柱破坏受体积配箍率影响明显, 适当增大体积配箍率可以减少混凝土脱落。

3 滞回特性

3.1 滞回曲线

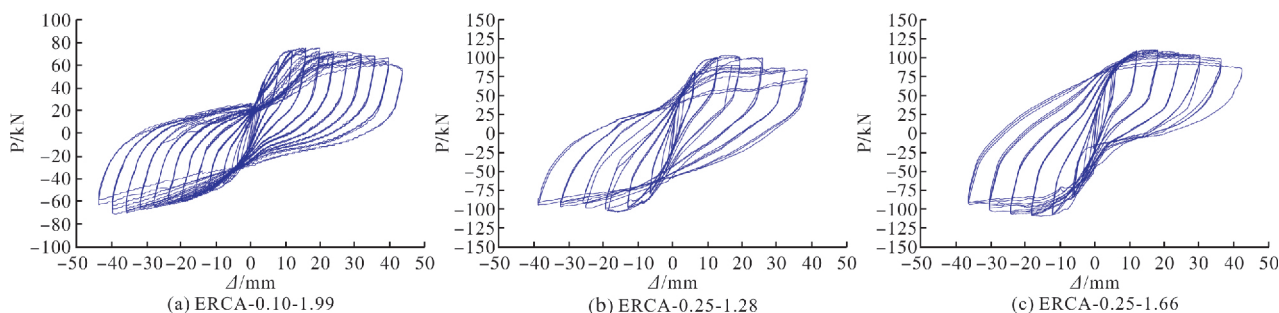
各试件滞回曲线见图 5 所示。

根据图 5 各试件有如下特征:

(1) 加载初期, 试件处于线弹性状态, 试件在荷载下的变形可以完全恢复, 滞回曲线近似为一条直线, 此阶段无地震能量的吸收, 试件刚度不

变。随后试件进入弹塑性状态, 试件产生裂缝, 滞回曲线由直变曲, 试件刚度减小, 消耗地震能量。屈服位移后, 滞回环包围的面积逐渐增大, 更加饱满, 试件吸收能量更多。峰值荷载后, 试件承载力下降, 滞回环更加扁平, 耗能能力下降。

(2) 观察图 5(a) 和 (f)、(d) 和 (g)、(e) 和 (h) 可以发现, 两种混凝土试件滞回环均有不同程度捏缩现象, 与 NCA 框架柱滞回环相比, ERCA 框架柱滞回环虽然较为扁平, 但并没有明显劣势, 抗震能力相差不大, 主要由于硅粉的颗粒微小, 混凝土很致密, 使抗震性能有所提高。



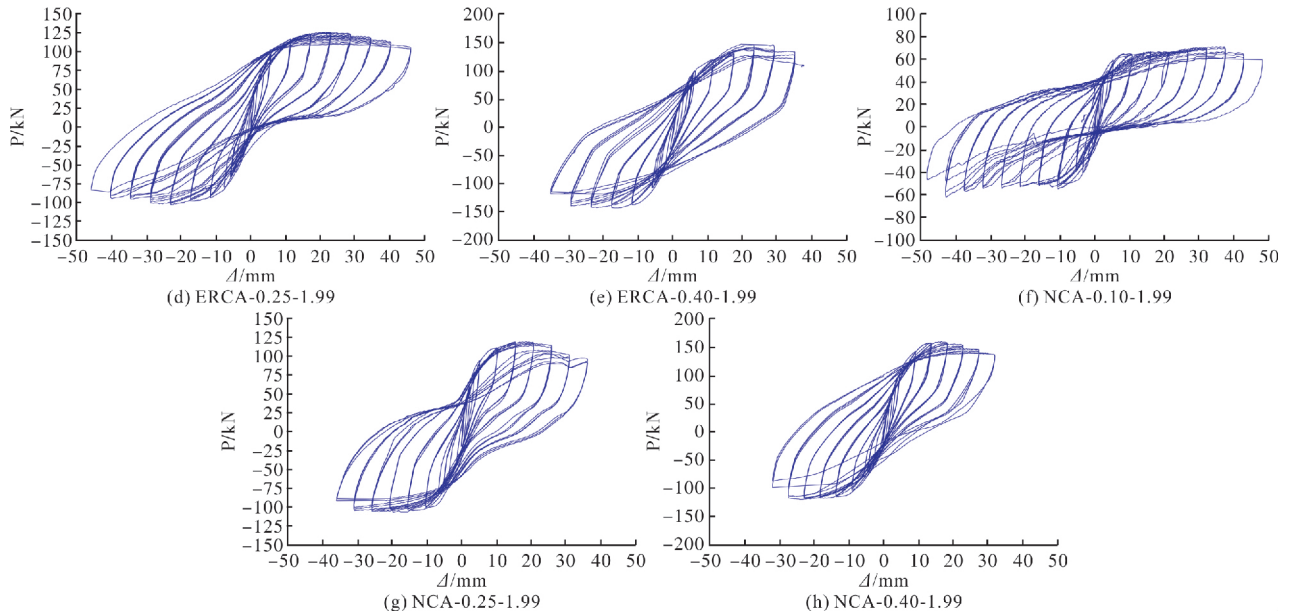


图 5 试件滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curve of components

3.2 骨架曲线

根据试件滞回曲线(见图 5), 绘制出顶点荷载-位移($P-\Delta$)骨架曲线, 如图 6 所示, 相关特征值见表 6.

(1)轴压比为 0.10、0.25、0.40 时, ERCA 柱承载力的平均值较 NCA 柱分别增大 10.3%、1.3%和 4.1%, 该强化方式对承载力的提升效果明显. 轴压比为 0.40 时图 6(c), 从骨架曲线可以看出, NCA 柱的推、拉承载力之差较大, 这表明 NCA 柱的损伤累积在高轴压比时严重; 轴压比为 0.25 时图 6(b), ERCA 柱与 NCA 柱承载力基本

一致, 但前者极限变形较大; 轴压比为 0.10 时图 6(a), NCA 柱的极限位移大于 ERCA 柱的极限位移, 这表明在低轴压比时, ERCA 柱的极限变形能力差于 NCA 柱, 但承载能力达到峰值时, ERCA 柱的承载能力迅速下降, 破坏速度更快. 原因分析: NCA 柱开裂后, 由于骨料相对完整, 几何形状规则, 破碎的混凝土较快掉落, 而 ERCA 柱的破碎混凝土, 棱角较多, 不会立即下落, 仍会在裂缝中分担一部分承载力, 减缓了试件的破坏速度, 但是在高轴压比作用下, ERCA 柱的破坏速度加快.

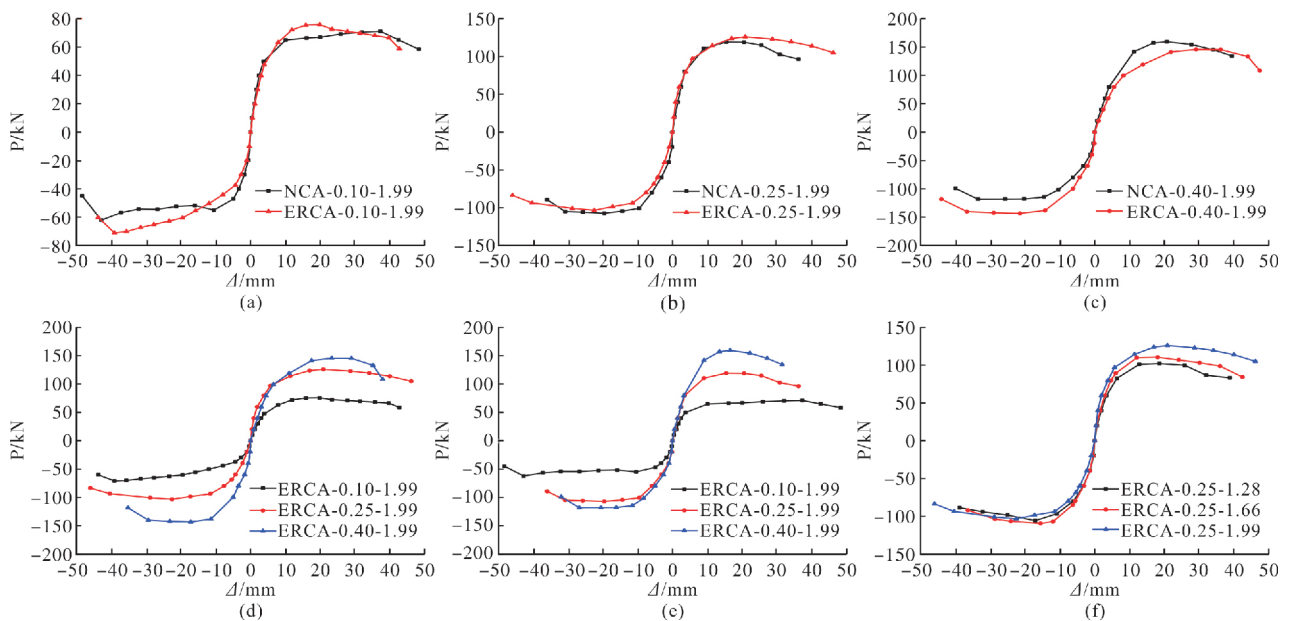


图 6 试件骨架曲线对比图

Fig. 6 Comparison of component skeleton curves

表6 试验实测特征值与位移延性系数

Tab. 6 Experimental measured characteristic values and displacement ductility coefficient

试件编号	方向	开裂点		屈服点		峰值点		极限点		延性系数
		Δ_{cr}/mm	P_{cr}/kN	Δ_y/mm	P_y/kN	Δ_{max}/mm	P_{max}/kN	Δ_u/mm	P_u/kN	
NCA-0.10-1.99	推	0.32	8.58	5.71	52.13	37.30	71.03	46.57	60.38	8.01
	拉	0.20	10.00	5.83	53.29	42.84	62.12	45.81	52.80	
NCA-0.25-1.99	推	1.77	57.94	5.72	91.95	15.38	119.10	31.92	101.24	5.08
	拉	2.12	40.00	7.51	88.92	19.65	107.26	35.39	91.17	
NCA-0.40-1.99	推	3.21	60.00	7.77	128.11	16.55	159.33	31.05	135.43	4.05
	拉	0.11	32.42	7.68	97.29	26.82	118.09	31.63	100.38	
ERCA-0.10-1.99	推	0.55	10.00	5.64	58.03	19.88	75.72	40.54	64.36	7.90
	拉	0.12	7.14	5.01	40.45	39.06	71.10	43.64	60.44	
ERCA-0.25-1.28	推	0.49	15.41	5.93	79.06	18.56	102.13	31.97	86.81	6.51
	拉	0.04	13.38	4.71	62.84	17.06	105.70	37.26	89.85	
ERCA-0.25-1.66	推	0.41	17.34	5.31	84.34	18.11	110.50	38.14	93.93	7.15
	拉	0.42	20.00	5.03	75.37	15.56	109.30	35.77	92.91	
ERCA-0.25-1.99	推	0.39	20.00	4.73	88.08	20.89	125.90	44.75	107.02	7.61
	拉	0.74	18.25	6.88	80.85	22.52	103.34	43.57	87.84	
ERCA-0.40-1.99	推	0.53	13.44	9.73	113.10	23.31	145.67	36.21	123.82	4.03
	拉	0.02	18.58	7.74	116.16	17.16	143.23	34.27	121.75	

(2)由表6可见,NCA柱与ERCA柱随轴压比增大,水平承载力提高.由图6-d和图6-e,可以发现轴压比是两种框架柱骨架曲线的重要影响因素,试件的初始刚度及水平承载力随着轴压比的增加而增大.高轴压比试件载荷达到峰值以后,承载力下降较快,且延性低,在低轴压比的情况下,承载力下降平缓.NCA试件极限变形能力随着轴压比增大而降低,而对于ERCA试件,轴压比增大过程中,极限变形先升后降,说明在一定范围内通过增大轴力提高其抗震性是可行的.

(3)当轴压比为0.25时,ERCA柱与体积配箍率为1.99%、1.66%和1.26%相应的水平承载力平均值分别为114.6 kN、109.9 kN和103.9 kN,表明ERCA柱的承载力随体积配箍率降低而减小.由图6-f,体积配箍率是ERCA试件骨架曲线的重要影响因素.对于高体积配箍率试件,由曲线前半段看出,试件的刚度下降缓慢,曲线达到峰值点之后,几乎沿直线下降.对于低体积配箍率试件,由曲线前半段看出,试件的刚度下降较快,曲线峰值点低,达到峰值点后,曲线迅速下降,但加载结束之前,曲线下降速率变小.试件的极限变形能力、承载力和刚度都随着体积配箍率的增加而增加,表明箍筋和纵向钢筋对混凝土有很好的约束作用,ERCA试件的抗震性能可以通过提高体积配箍率来改善.

3.3 变形能力

对于框架柱而言,延性是衡量变形能力的重

要参数,是衡量结构或试件在破坏前所能承受的弹性变形的能力^[15].本文将延性定义为极限位移与屈服位移的比值,见下式.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

$$\Delta_y = \frac{|\Delta_y^+| + |\Delta_y^-|}{2} \quad (2)$$

$$\Delta_u = \frac{|\Delta_u^+| + |\Delta_u^-|}{2} \quad (3)$$

式中: Δ_y 的取值根据通用“屈服弯矩法确定”,如图7,计算结果见表6.

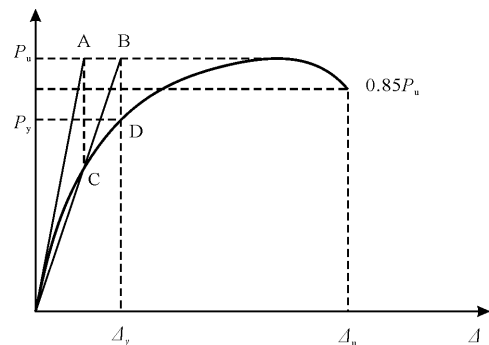


图7 屈服弯矩法

Fig. 7 Yield moment method

(1)普通混凝土柱与强化再生骨料混凝土柱比较

在体积配箍率和轴压比相同的情况下,比较NCA试件和ERCA试件的延性系数.当轴压比为0.10时,ERCA试件的延性系数较NCA试件降低1.3%;当轴压比为0.25时,ERCA试件比NCA

试件的延性系数高 49.8%; 轴压比为 0.40 时, 两者延性系数相近, 可以得出, ERCA 试件拥有良好的延性性能。

(2) 变量为轴压比

观察不同试件的延性系数, 轴压比越高, NCA 试件的延性系数越低, NCA 试件延性系数受轴压比影响较大, 可以通过降低轴压比提高其抗震性能。试件 ERCA-0.10-1.99 和 ERCA-0.25-1.99 延性系数分别为 7.90 和 7.61, 表明轴压比由 0.10 增大至 0.25, 试件变形能力并未明显减低; 试件 ERCA-0.40-1.99 的延性系数较试件 ERCA-0.25-1.99 降低明显 47.0%, 表明轴压比在该增长范围内, ERCA 柱的变形性能大幅度降低。

(3) 变量为体积配箍率

ERCA 柱与体积配箍率为 1.99%、1.66% 和 1.26% 相应的延性系数分别为 7.61、7.15 和 6.51, 表明提高体积配箍率会改善 ERCA 柱的延性性能。

(4) 破坏形态与延性系数

图 8 为框架柱位移延性系数与破坏形态的关系,

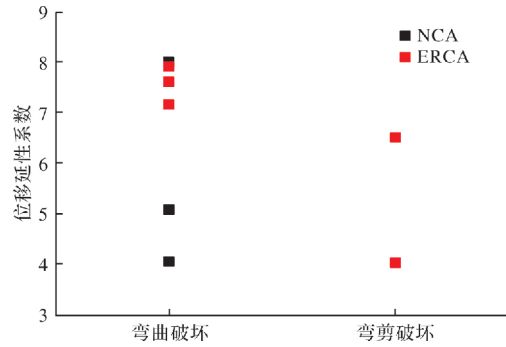


图 8 位移延性系数与破坏形态关系

Fig. 8 Relationship between displacement ductility coefficient and failure morphology

发生弯曲破坏的试件延性更好。

3.4 刚度退化

在低周往复加载试验中, 常常取折算割线刚度来替代切线刚度, 其基本公式为

$$K_i = \frac{|P_i^+| + |P_i^-|}{|\Delta_i^+| + |\Delta_i^-|} \quad (4)$$

式中: K_i 为第 i 个循环滞回环折算割线刚度; P_i^+ 、 P_i^- 、 Δ_i^+ 、 Δ_i^- 分别为第 i 循环滞回曲线推拉方向峰值点对应荷载与位移, 柱刚度退化见图 9。

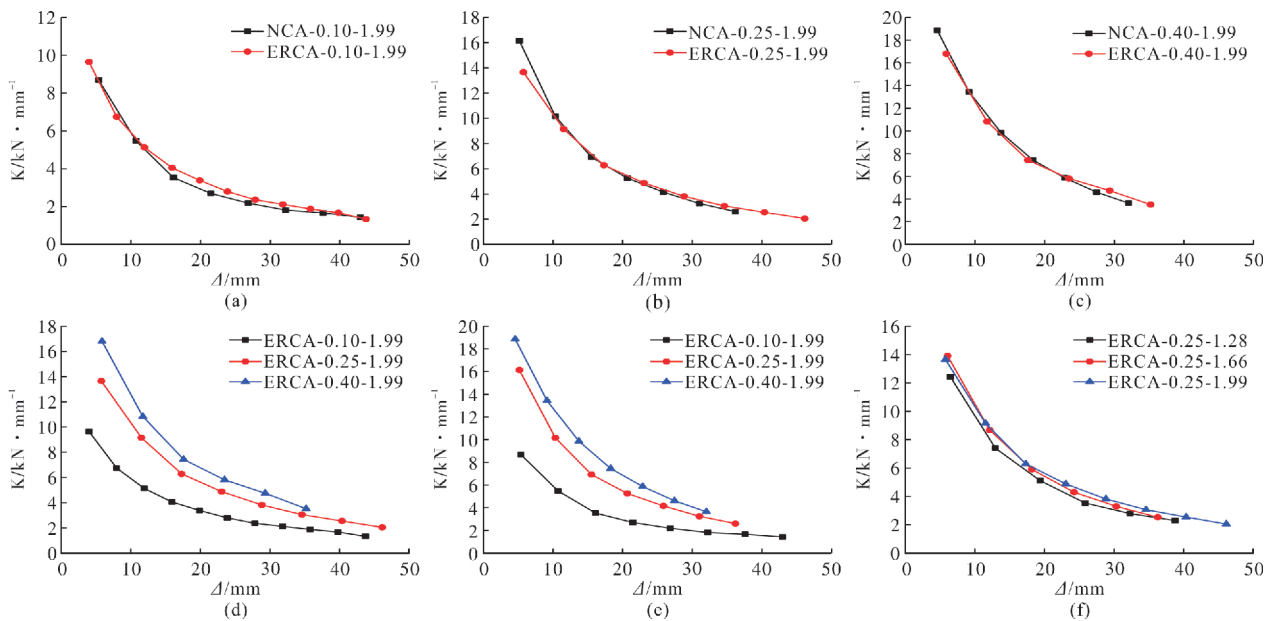


图 9 柱刚度退化对比

Fig. 9 Comparison of column stiffness degradation

(1) NCA 柱与 ERCA 柱刚度退化差异由图 9 (a)、(b)、(c) 可知, 轴压比为 0.40 时, NCA 柱与 ERCA 柱刚度退化基本一致; 轴压比为 0.25 时, NCA 柱与 ERCA 柱刚度退化有所差异, 在相同位移下, ERCA 柱相对刚度大于 NCA 柱; 轴压比为 0.10 时, 与 ERCA 柱相比, NCA 柱刚度退化先慢后快, 两种材料柱刚度退化相差不大。

(2) 变量为轴压比

根据图 9(d)、(e), 轴压比为 0.10 时, NCA 柱水平位移由 4 mm 至 10 mm 加载过程中, 刚度退化速度较快, 之后刚度退化速度减缓; ERCA 柱的刚度退化曲线较为接近, 表明刚度退化受轴压比影响较小。

(3) 变量为体积配箍率

由图 9(f), 三条曲线的前半段基本重合, 刚

度退化程度基本相同,曲线后半段,配箍率为1.99%的试件刚度退化最慢,增大配箍率有助于减缓刚度退化。

3.5 能量耗散

按等效粘滞阻尼系数 h_e [16] 计算方法,算出各试件等效粘滞阻尼系数,见表7,图10为 h_e 与位移 Δ 关系。

表7 试件等效粘滞阻尼系数计算值

Tab. 7 Calculated values of component equivalent viscous damping coefficients

试件编号	h_{ey}	h_{em}	h_{eu}
NCA-0.10-1.99	0.157	0.240	0.272
NCA-0.25-1.99	0.157	0.204	0.334
NCA-0.40-1.99	0.168	0.215	0.285
ERCA-0.10-1.99	0.156	0.205	0.305
ERCA-0.25-1.28	0.145	0.196	0.257
ERCA-0.25-1.66	0.147	0.198	0.296
ERCA-0.25-1.99	0.174	0.254	0.25
ERCA-0.40-1.99	0.148	0.235	0.325

注:其中 h_{ey} 、 h_{em} 、 h_{eu} 分别为试件在屈服荷载 P_y 、峰值荷载 P_m 、破坏荷载 P_u 对应的等效粘滞阻尼系数。

(1) NCA 柱与 ERCA 柱耗能差异

由图10(a)可以看到,轴压比为0.10,在位移不大时,NCA试件与ERCA试件等效粘滞阻尼系数有较大差异,NCA试件等效粘滞阻尼系数大,耗能性能好,随着位移增大,二者差距越来越大,在位移为20 mm时差距最大,随后NCA试件等效粘滞阻尼系数逐渐降低,并在位移为32 mm左右时小于ERCA试件,加载末期NCA试件耗能能力

低于ERCA试件。由图10(b),轴压比为0.25时,NCA试件与ERCA试件等效粘滞阻尼系数稳步上升,NCA试件耗能能力一直比ERCA试件强。由图10(c),轴压比为0.40,加载初期ERCA试件等效粘滞阻尼系数较小,在位移达到10 mm后,NCA试件耗能能力开始强于ERCA试件且二者差距逐渐拉大。NCA耗能性能优于ERCA耗能性能。

(2) 变量为轴压比

对于NCA试件如图10(d),曲线的前半段,随着轴压比增大,试件耗能能力下降,且随着位移增加,三者有规律地依次降低,轴压比为0.10的试件先下降,其次是轴压比为0.25的试件,最后是轴压比为0.40的试件,在位移到达25 mm左右时三条曲线交汇于一点,试件接近破坏时,轴压比越大,三者耗能能力越小。对于ERCA试件,如图10(e),三者耗能能力在前半段很接近,在位移达到30 mm左右时,耗能能力有所差异,轴压比为0.10的试件耗能能力稳步上升,轴压比为0.40的试件耗能能力上升最快,轴压比为0.25的试件耗能能力上升较慢。总体而言,NCA试件耗能能力受轴压比影响较大,ERCA试件耗能能力受轴压比影响较小。

(3) 变量为体积配箍率

分析ERCA试件耗能性能受体积配箍率影响如图10(f),三个试件在加载前期等效粘滞阻尼系数基本相同,耗能能力相近,随着位移增大,配箍率为1.99%的试件耗能能力增长缓慢,加载后期,配箍率为1.66%的试件耗能能力最强,说明要合理选择配箍率,以提高试件耗能能力。

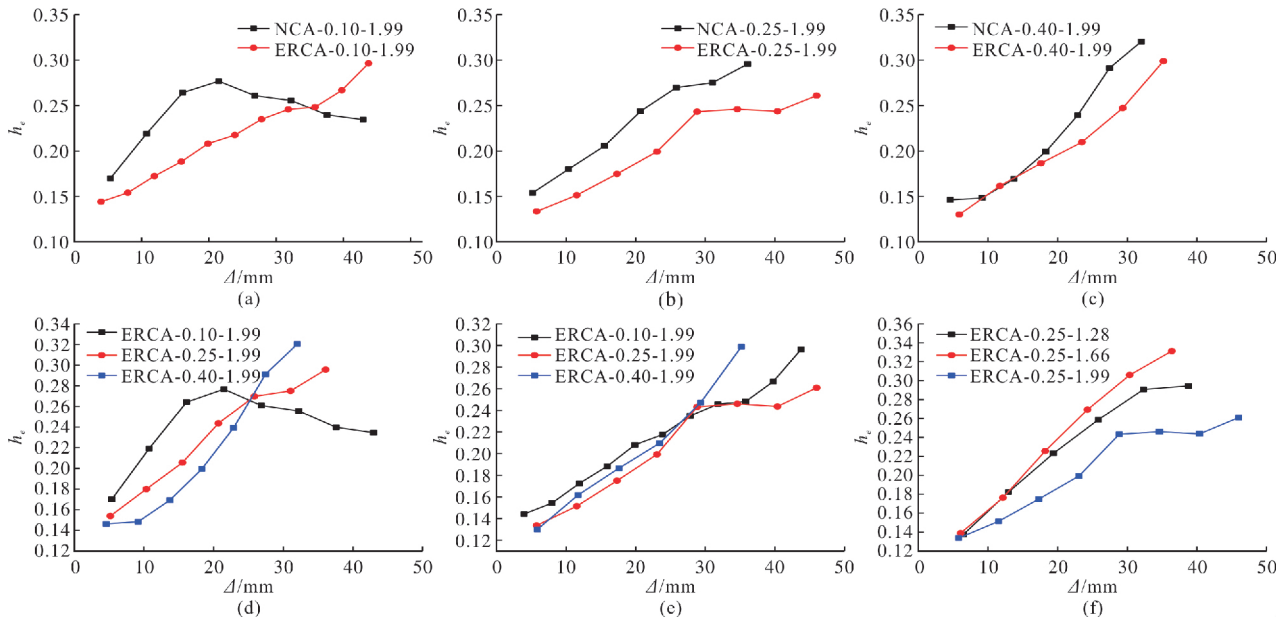


图10 等效粘滞阻尼系数对比

Fig. 10 Comparison of equivalent viscous damping coefficients

3.6 强度衰减

强度衰减^[15]是试件在同一位移下往复加载中, 承载力有所降低的现象. 承载力衰减率 λ_i 用公式表示如下.

$$\lambda_i = \frac{P_i^2}{P_i^1} \quad (5)$$

式中: P_i^1 与 P_i^2 分别为第 i 级位移加载循环时第 1 次循环峰值与第 2 次循环峰值, 各柱强度衰减见图 11.

(1) NCA 试件与 ERCA 试件强度衰减对比

由图 11(a)、(b) 和 (c), 轴压比为 0.10 时, 两种混凝土试件的强度衰减系数及变化规律相似, 再生混凝土试件无明显劣势; 轴压比为 0.25 时, 两种试件的曲线稍有差异, 但总体变化保持一致; 轴压比为 0.40 时, 两种试件的强度衰减曲线差异较大, 可以看到高轴压比时 NCA 试件强度衰减较严重. 总体上看, ERCA 试件在抵抗强度衰减方面稍有优势.

(2) 变量为轴压比

由图 11(d), 对于 ERCA 试件, 随着轴压比增大, 试件强度衰减并没有明显的减小或增大, 但强度衰减曲线的上下波动范围变大, 稳定性下降. 由图(e)可以看到, NCA 试件受轴压比影响较大, 轴压比从 0.10 到 0.25 时, 加载前期二者差距不大, 但加载后期轴压比为 0.25 的试件强度衰减明显, 到轴压比 0.40 时, 强度衰减更加明显.

(3) 变量为体积配箍率

由图 11(f), 试件强度衰减受体积配箍率影响较大, 配箍率从 1.99% 到 1.66% 变化中, 加载后期, 试件强度衰减更严重, 对于配箍率为 1.28% 的试件, 强度衰减曲线与前两种试件相差较大, 强度衰减严重, 加载后期强度衰减更加严重. 总体而言, ERCA 试件随着体积配箍率减小, 强度衰减更严重.

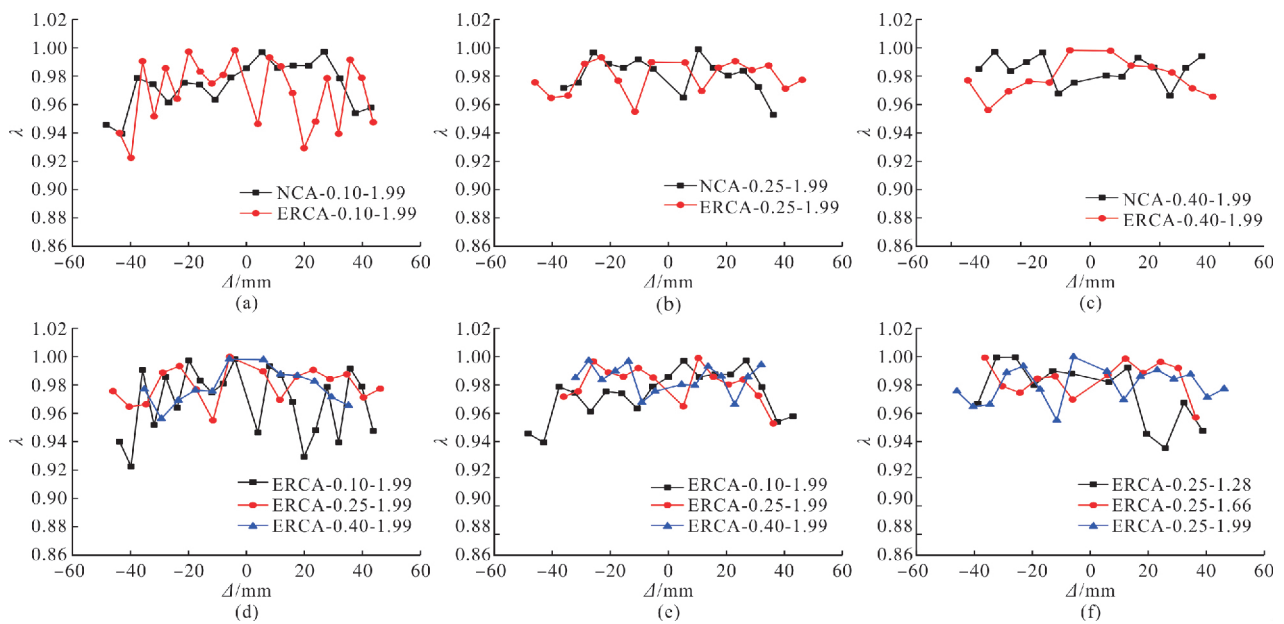


图 11 各柱强度衰减对比

Fig. 11 Comparison of intensity attenuation of each column

4 结论

(1) 在低轴压比(0.10 和 0.25)作用下, 强化骨料再生混凝土柱与普通混凝土柱的抗震性能无明显差异, 强化再生骨料性能可以充分利用.

(2) 轴压比为 0.10、0.25、0.40 时, ERCA 柱承载力较 NCA 柱稍大, 表明强化再生粗骨料混凝土柱的承载性能有所提高, 该强化方式对承载力的提升效果明显.

(3) 通过增大强化骨料再生混凝土柱体积配箍率, 可以提高强化再生骨料混凝土柱变形能力和

承载力, 减小强度衰减, 降低刚度退化速度, 增强其抗震性能.

(4) 针对强化再生骨料混凝土柱的实际工程应用, 通过降低轴压比, 提高体积配箍率, 可使该类再生混凝土的性能充分发挥, 并能保证结构的承载能力及延性性能.

参考文献 References

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- XIAO Jianzhuang. The recycled concrete [M]. Bei-

- jing: China Building Industry Press, 2008.
- [2] XIAO J, LI W, FAN Y, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011) [J]. Construction and Building Materials, 2012, 31(6): 364-383.
- [3] 白国良, 张锋剑, 安昱峰, 等. 再生混凝土承重砌块试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(1): 7-12.
- BAI Guoliang, ZHANG Fengjian, AN Yuyi, et al. The research of recycled bearing concrete hollow blocks[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2011, 43(1): 7-12.
- [4] SAEZ del Bosque I F, ZHU W, HOWIND T, et al. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate[J]. Cement & Concrete Composites, 2017, 4(11): 25-34.
- [5] 李秋义, 李云霞, 朱崇绩, 等. 再生混凝土骨料强化技术研究[J]. 混凝土, 2006(1): 74-77.
- LI Qiuyi, LI Yunxia, ZHU Chongji, et al. Strengthening technique of recycled concrete aggregate[J]. Concrete, 2006(1): 74-77.
- [6] 郭远新, 李秋义, 孔哲, 等. 再生粗骨料强化处理工艺对再生混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(6): 11-17.
- GUO Yuanxin, LI Qiuyi, KONG Zhe, et al. Effect strengthening process of reccycled coarse aggregate on properties of recycled[J]. China Concrete and Cement Products, 2015(6): 11-17.
- [7] 杨宁, 王崇革, 赵美霞. 再生骨料强化技术研究[J]. 新型建筑材料, 2011(3): 45-47.
- YANG Ning, WANG Chongge, ZHAO Meixia. Research on intensifying technique of recycled aggregate [J]. New Building Materials, 2011(3): 45-47.
- [8] 李秋义, 李云霞, 朱崇绩. 颗粒整形对再生粗骨料性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2005(12): 579-585.
- LI Qiuyi, LI Yunxia, ZHU Chongji. The influence of a particle shape correcting technique in properties of recycled coarse aggregate [J]. Material Science & Technology, 2005(12): 579-585.
- [9] 张学兵, 王干强, 方志, 等. RPC 强化骨料掺量对再生混凝土强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3): 400-408.
- ZHANG Xuebing, WANG Ganqiang, FANG Zhi. Effect of mixing amount of aggregate intensified by RPC on the strength of recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3): 400-408.
- [10] TAM V W Y, TAM C M, LEK N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50(1): 82-101.
- [11] ZENG W, ZHAO Y, ZHENG H, et al. Improvement in corrosion resistance of recycled aggregate concrete by anno silica suspension modification on recycled aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 106: 103-467.
- [12] 李磊, 徐培蓁, 朱亚光, 等. 强化后再生骨料混凝土单轴受压本构关系[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020(10): 717-724.
- LI Lei, XU Peizhen, ZHU Yaguang, et al. Constitutive relationship of strengthened recycled coarse aggregate concrete under uniaxial compression[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020(10): 717-724.
- [13] XU J. J. CHEN Z P. XUE J Y. et al. A review of experimental results of steel reinforced recycled aggregate concrete members and structures in China (2010-2016)[J]. Procedia Engineering. 2017, 210: 109-119.
- [14] 住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- MOHURD. Standard for test method of concrete structure: GB/T 50152-2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [15] 沈聚敏, 周锡元. 抗震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- SHEN Jumin, ZHOU Xiyuan. Aseismic engineering [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2000.
- [16] CLOUGH R, PENZIEN J. Dynamics of structures [M]. Berkeley: Criticare Systems, Inc, 2004.

(编辑 桂智刚)