

文章编号:1673-9469(2024)02-0030-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.02.005

再生粗骨料取代率及粒径对混凝土抗压性能 影响试验研究

安新正,郭永民*,张龙娇,蒋毓晋,王李鑫,王燕杰

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 为研究单轴受压情况下再生粗骨料粒径范围、取代率对再生混凝土抗压性能的影响规律,分别以粒径范围5~10、10~20和20~31.5 mm,以及取代率分别为0%、10%、30%和50%为参量设计制作再生混凝土棱柱体试件,并对其开展单轴抗压性能试验研究。结果表明:在取代率相同时,粒径范围为5~10 mm时再生混凝土的抗压强度及峰值应变均比粒径范围为10~20、20~31.5 mm时的大;在粒径范围相同情况下,随取代率增大,再生混凝土抗压强度呈现出逐渐减小的变化趋势,而峰值应变则呈现出逐渐增大的变化趋势。根据试验数据,得出了再生混凝土抗压强度和峰值应变的函数关系式。

关键词: 再生粗骨料取代率;再生粗骨料粒径范围;再生混凝土;轴心抗压强度;峰值应变

中图分类号:TU502+.6

文献标识码:A

Experimental Study on the Effect of Replacement Rate and Particle Size of Recycled Coarse Aggregate on the Compressive Properties of Concrete

AN Xinzheng, GUO Yongmin*, ZHANG Longjiao, JIANG Yujin, WANG Lixin, WANG Yanjie

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: To study the influence of particle size range and substitution rate of recycled coarse aggregate on the compressive performance of recycled concrete under uniaxial compression, recycled concrete prism specimens were designed and manufactured with particle size ranges of 5~10, 10~20, and 20~31.5 mm, as well as substitution rates of 0%, 10%, 30%, and 50%, respectively. Uniaxial compressive performance tests were conducted on them. The results show that the compressive strength and peak strain of recycled concrete in the particle size range of 5~10 mm are higher than those in the particle size range of 10~20 mm and 20~31.5 mm when the substitution rate is the same. Under the same particle size range, as the substitution rate increases, the compressive strength of recycled concrete shows a gradually decreasing trend, while the peak strain shows a gradually increasing trend. Based on the experimental data, a functional relationship between the compressive strength and peak strain of recycled concrete was obtained.

Key words: recycled coarse aggregate substitution rate; recycled coarse aggregate particle size range; recycled concrete; axial compressive strength; peak strain

随着基础设施建设和城市化的快速发展,旧建筑的拆除或改造导致建筑垃圾量急剧增加,建

筑垃圾约占城市固体垃圾的30%~40%^[1],造成环境污染问题^[2]。将建筑垃圾中废弃混凝土破碎制

收稿日期:2022-12-16

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2021402028);河北省科学技术研究与发展计划资助项目(15273609D)

作者简介:安新正(1963-),男,河南镇平人,博士,副教授,研究方向为结构耐久性理论与设计。

*通信作者:郭永民(1997-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事再生混凝土材料及其结构的研究工作。

备成再生骨料加以循环利用,不仅减少了对自然资源的索取,而且可以有效地解决混凝土废弃物对环境的污染问题。为了推广使用再生骨料,国内外学者对其开展了大量的研究工作,并取得了丰富的成果。如谭艺师等^[3]通过试验发现,在混凝土中掺入再生细骨料会降低其自身的抗压强度,增大其峰值应变。姚宇峰等^[4]研究发现,用干燥状态的再生粗骨料浇筑的再生混凝土试件,其抗压强度和劈裂拉伸强度均比用潮湿状态的再生粗骨料浇筑的再生混凝土试件高。王宝媛等^[5]对粗骨料最大粒径为 10、20、30、40 和 60 mm 的混凝土试件进行抗压试验研究,认为其抗压强度随粗骨料最大粒径增加呈现逐渐增大的变化趋势。陈杰等^[6]研究认为,再生混凝土中掺入碎红砖会使再生混凝土的峰值应变和泊松比增大。Park 等^[7]通过试验研究提出了考虑再生粗骨料取代率的抗压强度与弹性模量关系的预测模型。Belén 等^[8]研究发现,再生混凝土的峰值应变和极限应变随取代率增加而逐渐增大,但泊松比随之减小。Ozbakkaloglu 等^[9]对小粒径再生粗骨料的再生混凝土进行了抗压试验研究,发现具有相同抗压强度的再生混凝土其耐久性能受粗骨料尺寸和掺量的影响较大。

综上所述,国内外大多数学者针对再生粗骨料粒径范围及取代率对其抗压性能影响的研究还相对偏少^[10-12]。为此,本文以再生粗骨料粒径范围和取代率为参量,制作棱柱体试件并对其进行单轴抗压试验,分析再生粗骨料取代率及粒径范围对再生混凝土抗压性能的影响规律,以期对再生混凝土的推广应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

粗骨料:采用以天然粗骨料为基础粗骨料,再掺加一定比例的再生粗骨料的混合粗骨料。其中,天然粗骨料采用破碎卵石粗骨料,粒径为 5~31.5 mm 连续级配(其中粒径为 5~10、10~20 和 20~31.5 mm 的粗骨料按 1:1:1 分配),天然粗骨料颗粒级配见表 1 所示。再生粗骨料采用废弃混凝土梁,经破碎、筛分等工艺制成粒径范围分别为 5~10、10~20 和 20~31.5 mm 的再生粗骨料。再生粗骨料以取代率为 0%、10%、30%和 50%等质量取代天然粗骨料;细骨料:采用天然河砂,细度模数为 2.4,含泥量为 0.8%;水泥:采用金隅牌

P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥;粉煤灰:采用马头电厂生产的 II 级粉煤灰;拌合水:采用邯郸市自来水;减水剂:采用中国科学院生产的高效聚羧基液态减水剂,减水率为 25%。粗骨料的主要物理性能指标见表 2。

表 1 天然粗骨料颗粒级配

Tab. 1 Natural coarse aggregate particle gradation

粒径范围/mm	天然粗骨料	
	分计筛余/%	累计筛余/%
31.5~37.5	2.8	2.8
20~31.5	32	34.8
10~20	32	66.8
5~10	32	98.8
0~5	1.2	100.0

注:实际使用的天然粗骨料会剔除粒径小于 5 mm 和粒径大于 31.5 mm 的粗骨料。

表 2 粗骨料主要物理性能指标

Tab. 2 Physical index of coarse aggregate

性能指标	再生粗骨料				天然粗骨料
	5~10	10~20	20~31.5	5~31.5	
堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 310	1 390	1 360	1 545	
表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 510	2 520	2 589	2 650	
压碎指标/%	14.1	13.7	13.0	10.3	
24 h 吸水率/%	5.3	5.5	5.1	2.6	
含泥量/%	0.39	0.41	0.43	0.41	

1.2 混凝土配合比设计

以再生粗骨料取代率 r (0%、10%、30%和 50%) 和粒径范围 D (5~10、10~20 和 20~31.5 mm) 为参量,再生粗骨料按照同粒径范围等质量取代天然粗骨料,并依照文献[13]中给出的混凝土配合比设计方法,共设计 10 组试验试件(表 3)。表 3 中:“NC”表示破碎卵石粗骨料混凝土(基准混凝土 $r=0\%$);“RC10- D_1 ”中,“RC10”表示 $r=10\%$ 的再生混凝土,“ D_1 ”表示再生粗骨料的粒径范围为 5~10 mm,其他以此类推。由于再生粗骨料的吸水率较大,混凝土配合比设计时还需要考虑附加用水量(W_f)^[14-15], W_f 按再生粗骨料 24 h 吸水率计算得到。

1.3 试件制作与试验方法

依照每组试件的设计配合比拌制混凝土,并将搅拌好的混凝土拌合物浇筑入尺寸为 150 mm×150 mm×300 mm 的棱柱体试件钢模中,然后在振动台上振捣密实后,放置室内静止 24 h 后拆模移至标养室养护 28 d 备用。再生混凝土拌合物的工

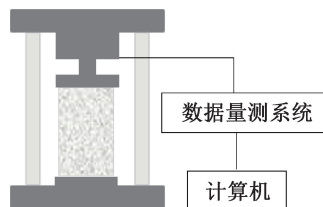
表3 混凝土配合比
Tab. 3 Mix proportion of concrete

试件组 编号	拌和水	水泥	细骨料	天然粗骨料/mm			再生粗骨料/mm			粉煤灰	减水剂	附加水 用量 W_f
				5~10	10~20	20~31.5	5~10	10~20	20~31.5			
NC	185	400	580	430	430	430	0	0	0	43	6.65	0.0
RC10- D_1	185	400	580	387	430	430	43	0	0	43	6.65	3.8
RC30- D_1	185	400	580	301	430	430	129	0	0	43	6.65	9.2
RC50- D_1	185	400	580	215	430	430	215	0	0	43	6.65	18.4
RC10- D_2	185	400	580	430	387	430	0	43	0	43	6.65	4.1
RC30- D_2	185	400	580	430	301	430	0	129	0	43	6.65	9.5
RC50- D_2	185	400	580	430	215	430	0	215	0	43	6.65	30.8
RC10- D_3	185	400	580	430	430	43	0	0	43	43	6.65	6.2
RC30- D_3	185	400	580	430	430	129	0	0	129	43	6.65	18.5
RC50- D_3	185	400	580	430	430	215	0	0	215	43	6.65	19.0

作性能依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)进行测试,试件的抗压性能试验采用1 000 kN微机控制电液伺服试验量测系统,并依照文献[16]中的相关要求。抗压试验图见图1。



(a) 试验现场图



(b) 试验示意图

图1 抗压试验图

Fig. 1 Compression test diagram

2 试验结果与分析

2.1 再生混凝土拌合物的工作性能

各组再生混凝土拌合物坍落度见表4所示。由表4数据显示,各组混凝土拌合物的坍落度在120~150 mm之间,这是由于在配合比设计时添加的附加用水未参加水泥水化反应,其作用是补偿再生粗骨料的高吸水量,保证了混凝土流动性相对稳定。在水灰质量分数比和砂率一定的条件下,再生混凝土拌合物坍落度与普通混凝土相比略低,主要因为再生骨料表面粗糙、棱角多,混

土在搅拌时摩擦力增大,降低了再生混凝土拌合物的坍落度,导致流动性较弱于普通混凝土。再生混凝土拌合物的坍落度值随着再生骨料取代率的增大而略有降低,主要是因为再生骨料表面粗糙,吸水性大,所以再生骨料含量越高,混凝土坍落度值就越低,而骨料粒径对混凝土坍落度的影响规律不明显。

表4 各组再生混凝土拌合物坍落度

Tab. 4 Slump of recycled concrete mixture in each group

试验组编号	坍落度/mm	试验组编号	坍落度/mm
NC	144	RC30- D_2	125
RC10- D_1	137	RC50- D_2	120
RC30- D_1	127	RC10- D_3	141
RC50- D_1	120	RC30- D_3	136
RC10- D_2	132	RC50- D_3	124

2.2 试件的抗压破坏特征

观察分析各试件组抗压破坏全过程可以发现,取代率 r 和粒径范围 D 对试验试件的宏观破坏特征的影响主要表现为:当 r 取50%、 D 取20~31.5 mm时(RC50- D_3 试件组),试验试件的抗压破坏特征与基准混凝土试件的抗压破坏特征存在较大差异,表现为当试件表面一旦出现几条斜纵向微小裂缝,这些裂缝便迅速延伸、扩展成为主斜裂缝而宣告破坏;而 r 和 D 取其他值时,各组试验试件的破坏特征均与基准混凝土试件相似,表现为试验荷载接近极限荷载时试件表面出现斜纵向微小裂缝均较多,且仅有部分微小裂缝延伸扩展,荷载增加至极限荷载值时,裂缝数量继续增多,部分裂缝扩展、交结发展为主斜裂缝,试件表面开始膨胀,并伴有小块混凝土剥离、脱落而宣告破坏。

2.3 再生粗骨料取代率对抗压强度的影响

由试验结果可知,与基准混凝土($r=0%$)轴心抗压强度相比,在破碎卵石粗骨料中掺入再生粗骨料,无论再生粗骨料取代率及粒径范围如何变化,所配制再生混凝土的轴心抗压强度均有所降低。在再生粗骨料粒径范围($D_1=5\sim 10\text{ mm}$ 、 $D_2=10\sim 20\text{ mm}$ 和 $D_3=20\sim 31.5\text{ mm}$)下,再生混凝土轴心抗压强度随再生粗骨料取代率的变化关系曲线如图 2 所示。由图 2 可知,在任一再生粗骨料粒径范围 D 下,再生混凝土轴心抗压强度均随取代率 r 增大呈逐渐减小的变化趋势。 $r=10\%$ 、 30% 和 50% 与 $r=0\%$ 相比, D_1 的轴心抗压强度分别降低了 1.71% 、 3.1% 、 5.64% , D_2 的轴心抗压强度分别降低了 2.82% 、 4.52% 、 7.21% , D_3 的轴心抗压强度分别降低了 3.0% 、 6.2% 、 10.15% 。主要原因是再生粗骨料表面存在旧砂浆,经破碎后具有孔隙大、裂缝多等特点, r 越高,再生混凝土内部存在的孔隙和裂缝越多,弱化了再生粗骨料和水泥砂浆的界面黏结强度,且再生粗骨料自身强度较低、吸水率大,对试件轴心抗压强度造成不利影响,试验加载过程中混凝土更容易开裂破坏^[17],故再生混凝土的轴心抗压强度低于基准混凝土。

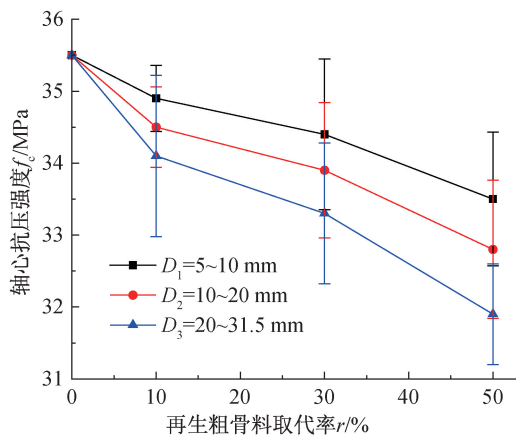


图 2 轴心抗压强度随再生粗骨料取代率的变化关系曲线
Fig. 2 Relationship curve of axial compressive strength with the replacement rate of recycled coarse aggregate

2.4 再生粗骨料粒径范围对抗压强度的影响

在破碎卵石粗骨料中掺入一定比例的再生粗骨料($r=10\%$ 、 30% 和 50%)后,再生混凝土轴心抗压强度随再生粗骨料粒径范围 D 的变化关系见图 3 所示。由图 3 可知,在再生粗骨料取代率 r 相同的条件下,随再生粗骨料粒径范围 D 从 D_1 ($5\sim 10\text{ mm}$)到 D_2 ($10\sim 20\text{ mm}$),再到 D_3 ($20\sim 31.5\text{ mm}$)依次变化,再生混凝土的轴心抗压强度呈依次减

小趋势。当 $r=10\%$ 、 30% 和 50% 时,再生粗骨料粒径范围为 D_1 时的再生混凝土轴心抗压强度分别比粒径范围为 D_2 时的再生混凝土轴心抗压强度提高 1.15% 、 1.47% 、 2.13% ,比粒径范围为 D_3 时的轴心抗压强度提高 2.35% 、 3.30% 、 5.06% 。其原因主要是大粒径的再生粗骨料在破碎时会产生较多的裂缝,初始损伤相对较大,导致粗骨料自身强度降低^[18],故其制备的再生混凝土轴心抗压强度随之降低。由此可知,采用较小粒径的再生粗骨料配制再生混凝土可小幅度提高再生混凝土的轴心抗压强度,减小再生粗骨料的天然缺陷对混凝土强度的影响。

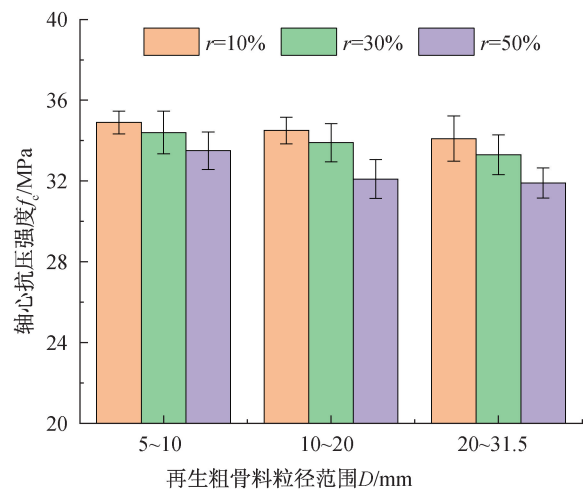


图 3 轴心抗压强度随再生粗骨料粒径范围的变化曲线
Fig. 3 Relationship between axial compressive strength and particle size range of recycled coarse aggregate

2.5 再生粗骨料取代率对峰值应变的影响

由试验结果可知,与基准混凝土($r=0%$)峰值应变相比,在破碎卵石粗骨料中掺入再生粗骨料,无论再生粗骨料取代率及粒径范围如何变化,所配制再生混凝土的峰值应变均有所提高。图 4 给出了在再生粗骨料粒径范围 $D_1=5\sim 10\text{ mm}$ 、 $D_2=10\sim 20\text{ mm}$ 和 $D_3=20\sim 31.5\text{ mm}$ 下,再生混凝土峰值应变随再生粗骨料取代率的变化关系曲线。由图 4 可知,三种粒径范围的再生混凝土峰值应变均随取代率 r 增加呈逐渐增大的变化趋势, r 与峰值应力呈现正相关关系。当 $r=10\%$ 、 30% 和 50% 时相较于 $r=0\%$ 时,粒径范围为 D_1 的再生混凝土峰值应变分别增加了 1.81% 、 6.47% 、 8.87% ,粒径范围为 D_2 的再生混凝土峰值应变分别增加了 6.87% 、 9.21% 、 9.59% ,粒径范围为 D_3 的再生混凝土峰值应变分别增加了 15.24% 、 13.55% 、 9.59% ,主要由于再生粗骨料的弹性模量低于天然

粗骨料,抵抗变形的能力较小,自身变形增大,导致再生混凝土峰值应变低于基准混凝土^[19]。

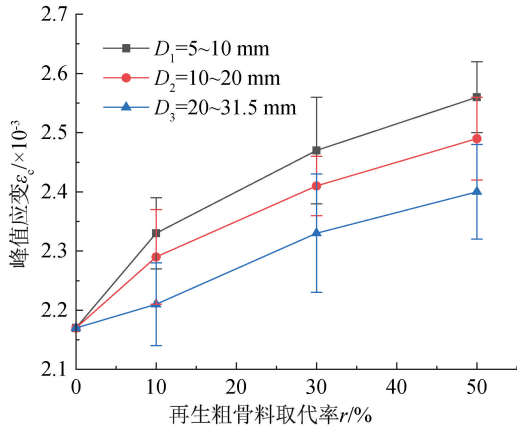


图4 峰值应变随再生粗骨料取代率的变化关系曲线
Fig. 4 Relationship between peak strain and replacement rate of recycled coarse aggregate

2.6 再生粗骨料粒径范围对峰值应变的影响

在破碎卵石粗骨料中掺入一定比例的再生粗骨料($r=10\%$ 、 30% 和 50%)后,再生混凝土峰值应变随再生粗骨料粒径范围 D 的变化关系见图5所示。由图5可知,在再生粗骨料取代率 r 相同条件下,随再生粗骨料粒径范围 D 从 $D_1(5\sim 10\text{ mm})$ 到 $D_2(10\sim 20\text{ mm})$ 再到 $D_3(20\sim 31.5\text{ mm})$ 依次变化,再生混凝土的峰值应变呈依次减小趋势。当 $r=10\%$ 、 30% 、 50% 时,粒径范围为 D_1 的峰值应变相比于粒径范围为 D_2 峰值应变提高了 1.75% 、 2.12% 、 2.53% ,相比于粒径范围为 D_3 的峰值应变提高了 7.25% 、 4.12% 、 6.35% 。这是因为在破碎废弃混凝土的过程中,硬化水泥浆体比骨料更容易破碎成较小颗粒,由于硬化水泥浆体颗粒的弹性模量较低,而粒径范围较小的再生粗骨料中又

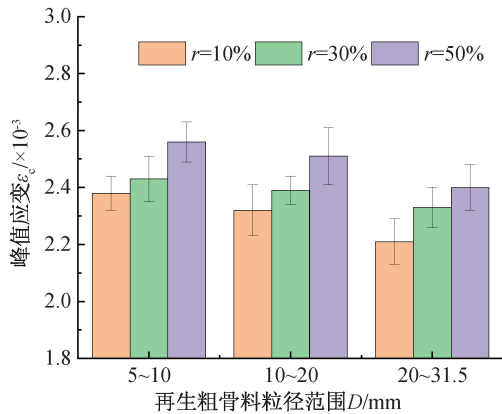


图5 峰值应变随再生粗骨料粒径范围的变化关系
Fig. 5 Relationship between peak strain and particle size range of recycled coarse aggregate

含有较多的硬化水泥浆体颗粒,所以粒径范围为 D_1 的再生混凝土抵抗变形的能力降低,变形性能增加,最终导致峰值应变增大^[20]。由此可见,使用较小粒径的再生粗骨料会小幅度提高再生混凝土的变形性能。

2.7 再生混凝土抗压强度与峰值应变的关系

在再生粗骨料取代率 $r=0\%$ 、 10% 、 30% 和 50% ,粒径范围 $D=5\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 和 $20\sim 31.5\text{ mm}$ 条件下,再生混凝土峰值应变与轴心抗压强度的关系图如图6所示。根据试验数据,对再生混凝土试件的峰值应变 ε_c 和轴心抗压强度 f_c 进行回归拟合分析,可得到两者的相关关系式为

$$\varepsilon_c = (-0.02659f_c^2 + 1.73375f_c - 25.81) \times 10^{-3}$$

将不同情况下 f_c 的实测值代入上式中,得到 ε_c 计算值与 ε_c 实测值的比值在 $0.95\sim 1.04$ 之间,其均值为 0.994 ,标准差为 0.023 。由此可见,计算值与实测值吻合较好,上式在一定程度上可以很好地反映 f_c 与 ε_c 的相关关系。由于试验测值较少,试验数据不全面,且试验采用的材料均来自邯郸地区,故该关系式仅为研究再生混凝土轴心抗压强度与峰值应变的变化关系提供参考。

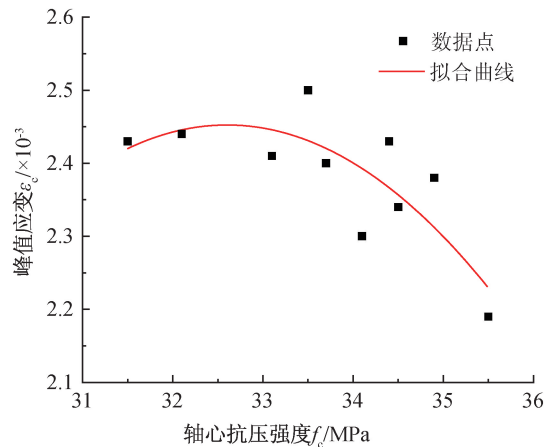


图6 峰值应变与轴心抗压强度的关系图
Fig. 6 Relation curve between peak strain and axial compressive strength

3 结论

1) 在水灰质量分数比和砂率一定的条件下,在配合比设计时添加附加用水可以保证再生混凝土具有相对稳定的工作性能。

2) 当再生粗骨料取代率取 50% 、粒径范围取 $20\sim 31.5\text{ mm}$ 时,试验试件的抗压破坏过程与基准混凝土试件存在明显的差异;而取代率和粒径范

围取其他值时,各组试验试件的破坏特征均与基准混凝土试件的相似。

3)再生粗骨料粒径范围相同的情况下,再生混凝土的轴心抗压强度随取代率的增大呈逐渐减小的趋势,而峰值应变有所提高,呈现出逐渐增大的变化趋势。在取代率相同的情况下,随着再生粗骨料粒径范围从 5~10、10~20、20~31.5 mm 的依次变化,再生混凝土的轴心抗压强度、峰值应变依次减小,再生粗骨料粒径范围对再生混凝土轴心抗压强度及峰值应变的影响较为显著。

4)基于试验数据建立了再生混凝土轴心抗压强度与峰值应变的函数计算式,其计算数据与试验数据标准差为 0.023,吻合较好。

参考文献:

- [1] XIAO J J, LI W G, FAN Y H, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996—2011)[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31: 364-383.
- [2] WANG Y, ZHANG S H, NIU D T, et al. Strength and chloride ion distribution brought by aggregate of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 11.
- [3] 谭艺帅,彭有开,吴 徽. 不同再生细骨料取代率下的再生混凝土单轴受压本构关系[J]. *混凝土*, 2019(03): 65-70.
- [4] 姚宇峰,金宝宏,梁少阳,等. 干湿再生粗骨料对再生混凝土力学性能的影响[J]. *混凝土*, 2018(01): 88-90+95.
- [5] 王宝媛,刘秀杰,纪海军,等. 粗骨料最大粒径对混凝土性能影响的试验研究[J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2012, 13(4): 13-14+18.
- [6] 陈 杰,耿 悦,王玉银,等. 含碎红砖再生混凝土基本力学性能及其应力-应变关系[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(12): 184-192.
- [7] PARK W J, NOGUCHI T, SHIN S H, et al. Modulus of elasticity of recycled aggregate concrete[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2015, 67(11): 585-591.
- [8] BELÉN G F, FERNANDO M A, DIEGO C L, et al. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5): 2335-2342.
- [9] OZBAKKALOGLU T, GHOLAMPOUR A, XIE T. Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete: Effect of recycled aggregate properties and content[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(2): 04017275.
- [10] HU X, LU Q, XU Z, et al. Compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete under cyclic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 193: 72-83.
- [11] XIAO J, LI H, YANG Z. Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 681-688.
- [12] 张亚飞,安新正,牛 薇,等. 再生细骨料对再生骨料混凝土抗压性能影响研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(02): 71-74.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [14] 安新正,刘浩楠,张翠霞,等. 破碎卵石再生混凝土折压比试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(02): 14-18+103.
- [15] 付向红. 多步搅拌工艺对高性能混凝土强度和抗冻性的影响[J]. *混凝土*, 2014(02): 106-108+113.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [17] 安新正,张翠霞,刘浩楠,等. 再生粗骨料取代率对破碎卵石混凝土抗压性能影响研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(1): 47-52.
- [18] 贾艳东,李 苓,刘晓华,等. 不同粒径再生骨料混凝土性能试验分析[J]. *交通科技与经济*, 2009, 11(5): 59-61+92.
- [19] 王瑞骏,赵 叶,缙彦强,等. 不同粒径再生粗骨料混凝土单轴受压应力-应变关系试验研究[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(05): 193-198.
- [20] GOKCE A, NAGATAKI S, SAEKI T, et al. Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5): 2426-2431.

(责任编辑 周雪梅)