

文章编号:1673-9469(2021)01-0047-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.01.008

再生粗骨料取代率对碎卵石混凝土抗压性能影响研究

安新正,张翠霞*,刘浩楠,边金明,毕 峥

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 设计制作了再生粗骨料取代率 $r=0\%$ 、 30% 、 50% 、 70% 、 100% 的碎卵石混凝土立方体及棱柱体试件,在不同龄期下对其进行抗压试验。研究了五种再生粗骨料取代率下,不同龄期的混凝土立方体抗压强度以及棱柱体抗压强度的变化趋势。结果表明:在龄期为 3 d 和 7 d 情况下, $r=30\%$ 时混凝土的抗压强度较 $r=0\%$ 时无显著变化;当 $r>30\%$ 时,混凝土的抗压强度随 r 的增加呈下降趋势,且下降幅度较明显。在龄期为 14 d 和 28 d 情况下,各组试件的抗压强度随着 r 的增加而降低。提出了考虑再生粗骨料取代率 r 的情况下,混凝土立方体抗压强度与棱柱体抗压强度相关关系计算模型 $f_c = (-0.1903r^2 + 0.148r + 0.7227)f_{cu}$ 。

关键词: 碎卵石混凝土;再生粗骨料;再生粗骨料取代率;抗压强度

中图分类号:TU528

文献标识码:A

Experimental Study on Compressive Performance of Crushed Pebble Concrete Containing Reclaimed Aggregate

AN Xinzheng, ZHANG Cuixia*, LIU Haonan, BIAN Jinming, MI Zheng

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

Abstract: The cube and prism specimens of gravel concrete with replacement ratio of recycled coarse aggregate $r=0\%$, 30% , 50% , 70% and 100% were designed and manufactured. The change trend of cube compressive strength and prismatic compressive strength of concrete at different ages under different replacement rates of recycled coarse aggregate was studied. The results show that the compressive strength of concrete has no significant change when r is 30% when the age is 3 d and 7 d; If r is more than 30% , the compressive strength of concrete tends to decrease when r increases, and the decrease range is obvious. At the age of 14 d and 28 d, the compressive strength decreased with the increase of r . A calculation model for the correlation between cube compressive strength and prismatic compressive strength is proposed when the replacement ratio of recycled coarse aggregate is considered. The model is $f_c = (-0.1903r^2 + 0.148r + 0.7227)f_{cu}$.

Key words: gravel concrete; recycled coarse aggregate; replacement rate of recycled coarse aggregate; compressive strength

将破碎卵石作为天然粗骨料,建筑垃圾作为再生粗骨料部分或全部替代破碎卵石制备成碎卵石混凝土,不仅可以解决卵石资源利用率低、碎石资源紧张的问题,还可以缓解由于建筑垃圾胡乱堆放所造成的生态环境污染的状况^[1-3]。国内外针对混凝土抗压强度的研究较多,宋超等^[4-5]人经

过对碎卵石部分或全部代替碎石制成的混凝土进行抗压性能研究,发现其抗压性能与碎石混凝土相差不大。Abdurrahmaan 等^[6-7]人经过研究后发现随着再生粗骨料取代率的增加其抗压强度呈现出增长的趋势。高旭等人^[8]通过对不同龄期的再生混凝土进行抗压强度的试验,发现龄期较长的

收稿日期:2020-11-13

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2015204111);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。

* 通讯作者:张翠霞(1996-),女,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事再生混凝土基本力学性能的研究工作。

再生混凝土,其立方体抗压强度在后期增长较多。目前,多数学者所研究的混凝土多为以卵石代替碎石作为粗骨料,亦或是天然碎石和破碎混凝土再生骨料共同作为粗骨料制备而成,然而目前拆除的建筑垃圾中不仅有废弃混凝土块,还存在废弃砖块,而对于将碎卵石和含有废混凝土块和废砖块的建筑垃圾共同作为粗骨料制备成碎卵石混凝土的抗压性能的研究较少。为更最大限度地提高上述资源的利用率,对碎卵石混凝土开展研究迫在眉睫。

文章将破碎卵石作为天然粗骨料,建筑垃圾作为再生粗骨料,以再生粗骨料取代率 r 作为研究变量,分析 r 对碎卵石混凝土(下文简称再生混凝土)立方体抗压强度与棱柱体抗压强度的影响规律,并提出考虑再生粗骨料取代率 r 时棱柱体抗压强度与立方体抗压强度之间的相关关系计算模型,以期为实际工程提供参考。

1 试验方案

1.1 试验原材料

水泥:金隅牌 P·O42.5 级普通硅酸盐水泥;细骨料:天然河砂(细度模数为 1.60,含泥量 1.2%,表观密度 $2\ 540\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);天然粗骨料:破碎卵石粗骨料;再生粗骨料:废弃混凝土及砖块经破碎筛分后得到的再生粗骨料(来源:邯郸全有建材有限公司生产,砖粒含量约为 40%~50%);水:邯郸市饮用自来水;粉煤灰:马头电厂 II 级粉煤灰;减水剂:TW-JS 聚羧酸高效减水剂。试验所用的粗骨料如图 1 所示,粗骨料的基本指标如表 1 所示。



(a) 碎卵石



(b) 再生粗骨料

图 1 粗骨料

Fig. 1 coarse aggregate

表 1 粗骨料基本指标

Tab. 1 Basic index of coarse aggregate

种类	粒径范	堆积密度	压碎指	含泥	24 h 吸水
	围/mm				
天然粗骨料	5~31.5	1 384	9.7	0.29	2.63
再生粗骨料	5~31.5	1 147	12.5	0.36	11.12

1.2 试验用配合比

设计了 C30 强度等级的混凝土,以取代率 $r=0\%$ 的碎卵石混凝土作为基准混凝土,为了研究再生粗骨料取代率 r 对再生混凝土抗压性能的影响,研究中设置了 $r=30\%、50\%、70\%、100\%$ (质量取代) 四种再生粗骨料取代率作为参数,来开展相关研究。各试件组编号分别为:SRC-0、SRC-3、SRC-5、SRC-7、SRC-10。依据文献[9]的相关要求对再生混凝土的配合比进行相关计算,结果见表 2 所示。由于再生粗骨料具有吸水率高的特点,为了保证混凝土的水胶比不发生变化,需要增加附加用水量,使各组混凝土的坍落度在 90~120 mm 之间。

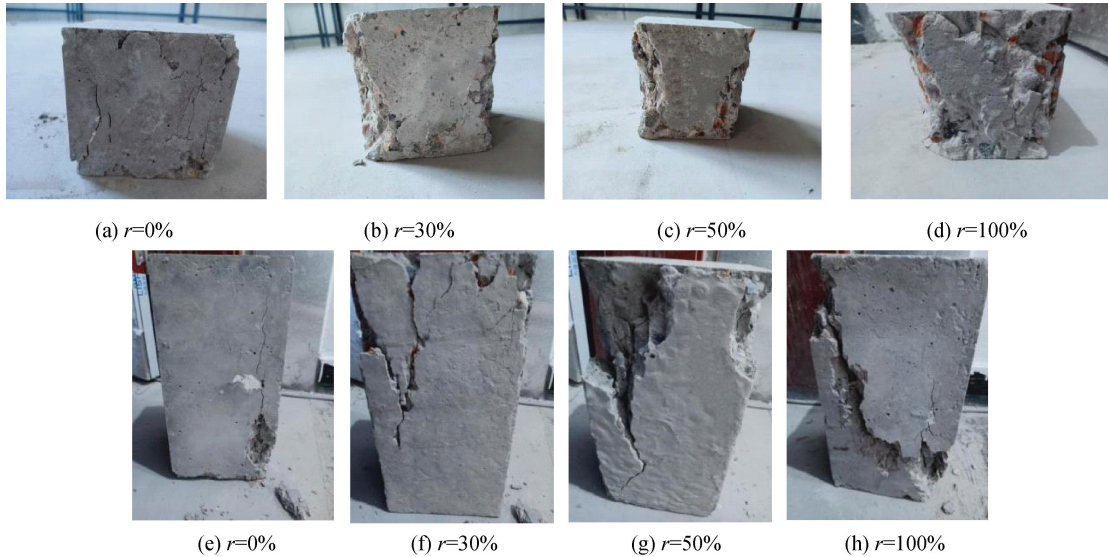
1.3 试件制作及试验方法

试件制作:各试件组分别设计制作 3 个立方体试件(100 mm×100 mm×100 mm),共制作 60 块,用于 3、7、14、28 d 的立方体抗压强度试验;3 个棱柱体试件(150 mm×150 mm×300 mm),共制作 15 个,以测定其 28 d 棱柱体抗压强度。各组试件在温度为 20 ℃、湿度为 96% 的标准养护室养护备用。

试验方法:对满足龄期的立方体和棱柱体试件从养护室取出,其抗压强度的测试方法依照文献[10]提供的测试方法进行。

表 2 混凝土配合比
Tab. 2 Mix proportion of concrete

试件组 编号	$r/\%$	材料用量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)							
		水泥	水	再生粗骨料	天然粗骨料	细骨料	粉煤灰	附加用水量	减水剂
SRC-0	0	279	165	0	1 290	635	31	0	4.65
SRC-3	30	279	165	387	903	635	31	43	4.65
SRC-5	50	279	165	645	645	635	31	72	4.65
SRC-7	70	279	165	903	387	635	31	101	4.65
SRC-10	100	279	165	1 290	0	635	31	145	4.65



注:图(a)、(b)、(c)、(d)为不同取代率下混凝土试块的立方体抗压强度破坏形态;
图(e)、(f)、(g)、(h)为不同取代率下混凝土试块的棱柱体抗压强度破坏形态。

图 2 混凝土试块受压破坏形态

Fig. 2 Failure mode of concrete test block under compression

2 试验结果与分析

2.1 宏观破坏分析

从试验破坏结果来看(图 2),无论是立方体试件还是棱柱体试件,当 r 在 30% 以下时,宏观破坏特征基本一致。当 r 在 30% 以上时,随着再生粗骨料取代率的增加其破坏特征的不同表现得越来越明显,其不同之处具体表现为:随着 r 的增大,裂缝出现的时间逐渐提前,发展的速度也越来越快,破坏面从粗骨料与水泥砂浆的结合面发展为旧砂浆及废砖粒再生粗骨料自身的劈裂现象越来越明显。

2.2 试验结果

各试件组的抗压强度试验值依照文献[10]的计算方法进行计算,其计算结果列于表 3。由表 3 可知,各组混凝土的抗压强度较设计值低,其原因主要是再生粗骨料孔隙大、吸水率高且与天然砂石及凝胶材料之间粘结界面的强度较低,故再生

混凝土的抗压强度普遍较低。

2.3 再生粗骨料取代率对抗压强度的影响

基于立方体抗压强度的试验结果,研究分析了不同龄期下再生粗骨料取代率对立方体抗压强度的影响规律,分析结果如图 3 所示。由图 3 可知,当 r 超过 30% 时,不同龄期下再生混凝土的立方体抗压强度整体上均随着 r 的增加呈现降低趋势,其中 3、7 d 的抗压强度变化幅度较大,而 14、28 d 的抗压强度变化幅度较小。 $r=100\%$ 与 $r=30\%$ 相比,3、7、14、28 d 的抗压强度分别降低 47.42%、46.07%、31.67%、25.81%。其原因主要是再生粗骨料强度低、吸水率大,且自身与水泥砂浆的粘结性较弱。在 3、7、14 d 情况下再生混凝土的立方体抗压强度在 $r=30\%$ 时较 $r=0\%$ 时略有增加,28 d 的抗压强度在 $r=30\%$ 时与 $r=0\%$ 时较为接近,主要是因为再生骨料中含有未充分水化的水泥颗粒,在充分的水的作用下又重新发挥作用,使其立

表3 立方体和棱柱体试件抗压强度试验成果

Tab. 3 Results of compressive strength tests for cube and prism specimens

试件组 编号	立方体抗压强度 f_{cu}/MPa								棱柱体抗压强度 f_c/MPa	
	3 d		7 d		14 d		28 d		28 d	
	测值	均值	测值	均值	测值	均值	测值	均值	测值	均值
SRC-0	20.1	—	—	—	30.1	—	35.1	—	26.4	—
	18.4	18.5	22.4	22.4	27.6	27.2	31.8	32.5	23.2	23.6
	17.1	—	—	—	23.9	—	30.6	—	21.2	—
SRC-3	—	—	28.5	—	32.4	—	—	—	—	—
	19.4	19.4	26.4	26.7	28.7	29.1	31.2	31.2	23.1	23.1
	—	—	25.2	—	26.2	—	—	—	—	—
SRC-5	19.5	—	27.1	—	—	—	31.3	—	23.6	—
	17.0	17.1	24.9	25.3	27.2	27.2	28.4	28.6	21.2	21.5
	14.8	—	23.9	—	—	—	26.1	—	19.7	—
SRC-7	—	—	22.6	—	26.3	—	29.2	—	21.4	—
	14.3	14.3	20.3	20.9	23.9	24.7	25.8	26.1	19.1	19.3
	—	—	19.8	—	23.9	—	23.3	—	17.4	—
SRC-7	11.1	—	—	—	24.3	—	27.3	—	—	—
	9.8	10.2	14.4	14.4	21.9	22.1	24.5	24.8	16.8	16.8
	9.7	—	—	—	20.1	—	22.6	—	—	—

注:表中的“—”表示舍去的数值;表明三个测值中的最大值或者最小值不满足规范要求,故舍去两个最值。

方体抗压强度与基准混凝土相比较为接近甚至略为增强。当 $r=30\%$ 时,28 d 的抗压强度分别比 3、7、14 d 的抗压强度增加了 60.82%、16.85%、7.22%。基于试验结果,在工程实际应用中,建议再生粗骨料取代率取 $r=30\%$ 为好。

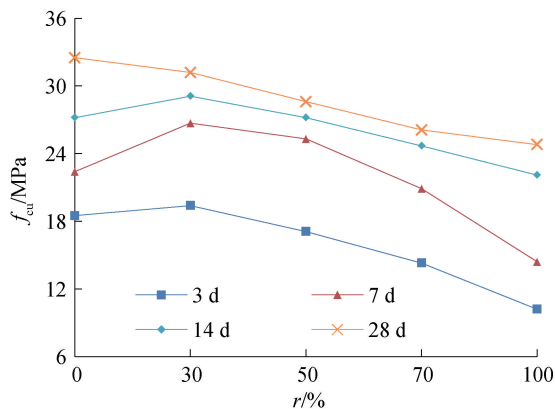


图3 不同龄期下取代率 r 对立方体抗压强度的影响关系曲线

Fig. 3 The influence curve of substitution rate r on the compressive strength of cube at the same age

根据棱柱体抗压强度的试验结果,分析了再生粗骨料取代率 r 对棱柱体抗压强度的影响规律,其结果如图4所示。由图4可以得知,棱柱体抗压强度(28 d)随着 r 的增加而不断下降。在 $r =$

30%、50%、70%、100%时,其棱柱体抗压强度与基准混凝土相比较分别降低了 2.12%、8.90%、18.22%、28.81%,可以看出随着 r 的增加,棱柱体抗压强度降低的幅度越来越明显。

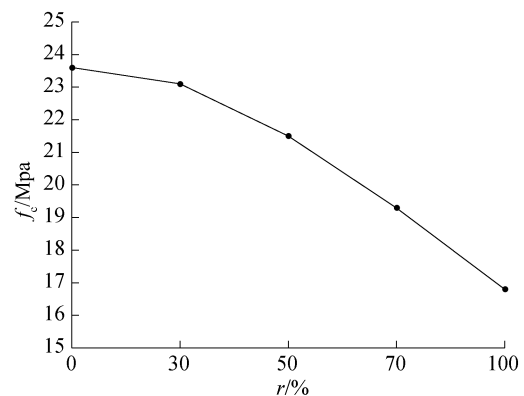


图4 取代率对 28 d 棱柱体抗压强度的影响关系曲线

Fig. 4 The influence curve of substitution rate on compressive strength of 28 d prism

2.4 f_c 与 f_{cu} 相关关系计算模型的建立

根据规范^[11]规定以及肖建庄^[12]的研究,普通混凝土以及再生混凝土的 f_c 与 f_{cu} 之间的换算关系,见式(1)。

$$f_c = 0.76f_{cu} \quad (1)$$

李旭平^[13]经研究发现再生混凝土 f_c/f_{cu} 与普

通混凝土相比略高,得出 f_c 与 f_{cu} 的关系式如式(2)所示。

$$f_c = 0.79f_{cu} \quad (2)$$

陈宗平^[14]发现再生混凝土的 f_c/f_{cu} 在 0.87 左右波动,但变化较小,故提出如式(3)所示的公式。

$$f_c = 0.87f_{cu} \quad (3)$$

碎卵石混凝土 f_c 与 f_{cu} 的关系如图 5 所示,由图 5 可得碎卵石混凝土的棱柱体抗压强度远低于式(1)、式(2),虽与式(3)接近,但没有完全符合。式(1)、式(2)、式(3)的计算值均不能与试验值完全吻合,故上述 3 式均不能表述碎卵石混凝土 f_c 与 f_{cu} 之间的相关关系,需要重新建立碎卵石混凝土 f_c 与 f_{cu} 相关关系计算模型。

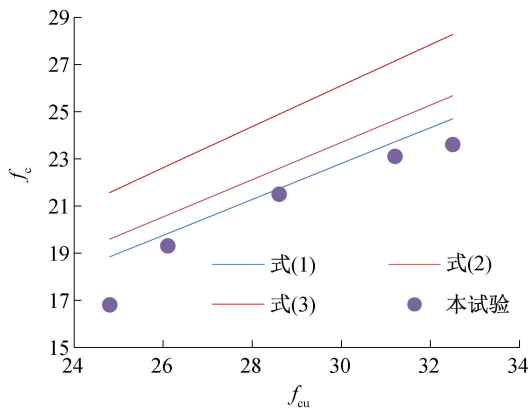


图 5 碎卵石混凝土 f_c 与 f_{cu} 关系曲线

Fig. 5 The relation curve between f_c and f_{cu} of cobble concrete

基于再生混凝土立方体抗压强度与棱柱体抗压强度的相关试验成果,以 f_c/f_{cu} 和 r 为研究对象,给出了 f_c/f_{cu} 和 r 之间的相关关系曲线(图 6)。

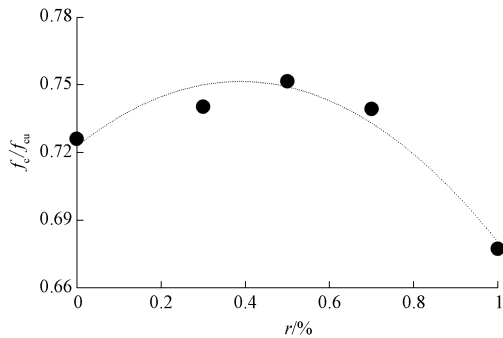


图 6 f_c/f_{cu} 与取代率之间的关系曲线

Fig. 6 The relation curve between f_c/f_{cu} and substitution rate

由图 6 可以看出,随着再生粗骨料取代率 r 的增加, f_c/f_{cu} 先上升后下降,其取值范围为 0.68 ~ 0.75。其中: $r = 50%$ 时, $f_c/f_{cu} = 0.75$, 当 $r = 100%$ 时, $f_c/f_{cu} = 0.68$, 其最高点比最低点高出 10.29%。而再生粗骨料取代率 r 分别为 0%、30%、70% 时,

f_c/f_{cu} 取值分别为 0.73、0.74、0.74。基于以上试验成果,取代率 r 对 f_c/f_{cu} 的变化趋势有着重要影响,基于此在考虑再生粗骨料取代率 r 的情况下,建立 f_c 与 f_{cu} 的相关关系计算模型^[15]。

$$f_c = (ar^2 + br + c)f_{cu} \quad (4)$$

式中, a 、 b 、 c 分别为试验系数。

基于试验结果,运用 MATLAB 软件经编程分析后可以得出: $a = -0.1903$, $b = 0.148$, $c = 0.7227$ 。将 a 、 b 、 c 的值分别代入式(4),可以得到考虑再生粗骨料取代率 r 时, f_c 与 f_{cu} 的相关关系式。

$$f_c = (-0.1903r^2 + 0.148r + 0.7227)f_{cu} \quad (5)$$

根据不同情况下 f_{cu} 的实测值,代入(5)式,可以得到 f_c 的计算值,将 f_c 计算值与实测值进行比较分析,详细结果见表 4 所示。由表 4 可以看出 f_c 计算值与实测值之间的相对误差较小,其误差范围在 0.35 ~ 1.30 之间,这说明式(5)计算模型在一定程度上可以很好地反映 f_c 与 f_{cu} 之间的相关关系。本模型只针对采用邯郸地区的骨料制备成的混凝土经抗压试验所得到的试验结果,并且现有数据不够全面,所以很难保证计算模型的准确性,故可将该模型作为参考进行混凝土抗压方面的研究。

表 4 棱柱体抗压强度实测值与计算值的对比分析
Tab. 4 CoMPArative analysis of the measured and calculated compressive strength of prisms

试件编号	f_c 实测值	f_c 计算值	误差/%
SRC-0	23.6	23.5	0.48
SRC-3	23.1	23.4	1.30
SRC-5	21.5	21.4	0.35
SRC-7	19.3	19.1	0.87
SRC-10	16.8	16.9	0.44

3 结论

1) 随着再生粗骨料取代率 r 的增大,在相同的压应力条件下立方体及棱柱体试件裂缝出现的时间逐渐提前,发展的速度也不断加快,破坏面从粗骨料与水泥砂浆的结合面逐渐发展为再生粗骨料的断裂面。

2) 不同龄期下的立方体抗压强度 f_{cu} 以及棱柱体抗压强度 f_c 均随着再生粗骨料取代率 r 的增加大体上呈现出下降的趋势。当再生粗骨料取代率 r 不超过 30% 时,这些变化不显著,可以认为 r 对立方体及棱柱体抗压强度的影响是可以忽略不计的,而当 r 超过 30% 时,其对立方体及棱柱体抗压强度的影响较为显著。

3)基于试验成果建立了考虑再生粗骨料取代率 r 时 f_c 与 f_{cu} 的相关关系计算模型, $f_c = (-0.1903r^2 + 0.148r + 0.7227)f_{cu}$, 且该计算模型和实测结果吻合性较好。

参考文献:

- [1] SILVA R V, DE BRITO J, DHIR R K. Properties and Composition of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste Suitable for Concrete Production[J]. Construction and Building Materials, 2014, 65(1): 201-217.
- [2] 乔宏霞, 关利娟, 曹辉, 等. 再生骨料混凝土研究现状及进展[J]. 混凝土, 2017(7): 77-82.
- [3] 安新正, 牛薇, 张亚飞, 等. 含砖粒再生混凝土基本性能研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(01): 30-33.
- [4] 宋超, 龚美霞. 碎卵石和碎石对混凝土工作性和强度的影响[J]. 粉煤灰, 2016, 28(03): 7-8.
- [5] 李亚南. 利用碎卵石配制混凝土的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(05): 76-79.
- [6] ABDURRAHMAAN L, MAHMOUD A F. Performance Evaluation of Structural Concrete Using Controlled Quality Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregate[J]. Cement & Concrete Composites, 2015, 61: 36-43.
- [7] 陈宗平, 占东辉, 徐金俊. 再生粗骨料含量对再生混凝土力学性能的影响分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 130-135.
- [8] 高旭, 王宁. 再生混凝土抗压强度试验研究[J]. 水泥工程, 2020(04): 29-30+34.
- [9] JGJ 55-2011, 普通混凝土配合比设计规程[S].
- [10] GB 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [11] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [12] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 52-76.
- [13] 李旭平. 再生混凝土基本力学性能研究(I)——单轴受压性能[J]. 建筑材料学报, 2007(05): 598-603.
- [14] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(01): 24-32.
- [15] 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.

(责任编辑 王利君)