

文章编号: 1005-0523(2022)02-0027-08



## 取代率对再生陶瓷粗骨料混凝土抗压强度的影响

黄宏<sup>1,2</sup>, 曾建涛<sup>1,2</sup>, 王伊<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学土木工程国家实验教学示范中心, 江西 南昌 330013)

**摘要:**为研究取代率对再生陶瓷粗骨料混凝土抗压强度的影响, 制作了10组不同取代率的再生陶瓷粗骨料混凝土试块及1组普通混凝土对比试块, 分别养护7 d和28 d后做单轴抗压试验。对比分析了不同取代率试块破坏的过程与现象, 研究了不同取代率对混凝土抗压强度及峰值应变的影响, 并提出了再生陶瓷粗骨料混凝土7 d和28 d抗压强度的计算方法。研究结果表明: 再生陶瓷粗骨料混凝土抗压强度随着取代率的增加而降低, 峰值应变随取代率的增加先减小后增大, 取代率为40%时, 混凝土的峰值应变最小。

**关键词:**再生陶瓷粗骨料; 取代率; 抗压强度; 峰值应变

中图分类号: TU528

文献标志码: A

本文引用格式: 黄宏, 曾建涛, 王伊. 取代率对再生陶瓷粗骨料混凝土抗压强度的影响[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(2): 27-34.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20220314.006

## Influence of Replacement Rate on Compressive Strength of Recycled Ceramic Coarse Aggregate Concrete

Huang Hong<sup>1,2</sup>, Zeng Jiantao<sup>1,2</sup>, Wang Yi<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to study the effect of replacement ratios on compressive strength of recycled ceramic coarse aggregate concrete, 10 groups of recycled ceramic coarse aggregate concrete test blocks with different replacement ratios and 1 group of ordinary concrete comparison test blocks were made. Uniaxial compression tests were performed on the test blocks after curing for 7 d and 28 d respectively. The failure process and phenomena of the specimens with different replacement ratios were compared and analyzed. The effects of different replacement ratios on compressive strength and peak strain of concrete were studied. The calculation method of 7 d and 28 d compressive strength of recycled ceramic coarse aggregate concrete was put forward. The research results show that the compressive strength of recycled ceramic coarse aggregate concrete decreases with the increase of the replacement ratio, and the peak strain first decreases and then increases with the increase of the replacement ratio. When the replacement ratio is 40%, the peak strain is the smallest.

**Key words:** recycled ceramic coarse aggregate; replacement ratio; compressive strength; peak strain

**Citation format:** HUANG H, ZENG J T, WANG Y. Influence of replacement rate on compressive strength of recycled ceramic coarse aggregate concrete[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(2): 27-34.

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868020); 江西省自然科学基金重点项目(20192ACBL21002)

混凝土是由粗骨料、细骨料、水、水泥拌制而成,由于天然骨料的开采对环境造成了巨大的负担,研究者们开始寻找其他材料替代天然骨料<sup>[1]</sup>。与此同时,陶瓷制备时产生大量的废料,用陶瓷废料替代天然骨料,制备再生陶瓷骨料混凝土,不仅可以减少陶瓷废料埋埋所占用的土地资源,还可以解决天然资源紧张的问题。

陶瓷废料加工成粒径不同的颗粒,分别可作为再生陶瓷粗骨料、细骨料<sup>[2-3]</sup>和掺合料<sup>[4-5]</sup>。针对再生陶瓷作为粗骨料制备成再生陶瓷粗骨料混凝土,国内外学者开展了大量的研究。为了解决陶瓷吸水率高的问题,Brito等<sup>[6]</sup>指出可以采取预加湿的方法。吴本英等<sup>[7]</sup>通过研究陶瓷的吸水率、表观密度、堆积密度以及陶瓷粗骨料混凝土的工作性能等,推导出陶瓷粗骨料混凝土配合比的计算方法。许开成等<sup>[8]</sup>将陶瓷放在不同浓度的硅烷偶联剂 KH-550 溶液中浸泡不同时间,提出了较优的浸泡方案。然而,不同学者研究陶瓷取代率对混凝土抗压强度的影响,得出了不同结论。沈阳等<sup>[9]</sup>和 Pacheco-Torgal 等<sup>[10]</sup>研究发现,随着陶瓷粗骨料取代率的增加,混凝土的抗压强度有所提高,在取代率为 100%时,抗压强度分别提高了 7.2%和 8%。然而,宿晓如等<sup>[11]</sup>、Rajprasad 等<sup>[12]</sup>和 Nepomuceno 等<sup>[13]</sup>研究表明,陶瓷粗骨料混凝土较普通混凝土的抗压强度有所降低。Anderson 等<sup>[14]</sup>和苏有文等<sup>[15]</sup>研究了不同种类废陶瓷粗骨料的取代率对混凝土抗压强度的影响,发现随着取代率的增加,混凝土抗压强度先升高后降低。由以上研究可知,陶瓷粗骨料取代率是影响混凝土抗压强度非常重要的因素。而随着取代率的增加,混凝土抗压强度呈现不同的变化规律,可能是由于陶瓷的来源和混凝土配合比的设计不同。

本文针对瓷板加工的颗粒,将其等质量替换天然碎石,采用基于自由水灰比的混凝土配合比设计<sup>[7]</sup>,制作了 11 组不同取代率的混凝土立方体试块,分别养护 7 d 和 28 d 后开展试块的单轴抗压试验。通过对比不同取代率试块的破坏过程与现象,研究陶瓷粗骨料取代率对混凝土试块抗压强度和峰值应变的影响。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

本试验中所使用的水泥为海螺牌 P.O42.5 级

普通硅酸盐水泥;细骨料采用细度模数 2.84 的赣江江砂,其表观密度为 2 647 kg/m<sup>3</sup>,堆积密度为 1 513 kg/m<sup>3</sup>;粗骨料包括天然碎石和陶瓷粗骨料,天然碎石取自江西高安的花岗岩碎石,如图 1(a),陶瓷粗骨料取自高安市某废弃陶瓷加工厂利用瓷板加工的颗粒,如图 1(b),粗骨料粒径分布如图 2 所示,粗骨料主要性能指标见表 1 和表 2;拌和水为实验室自来水。



(a) Natural gravel (b) Ceramic coarse aggregate

图1 粗骨料

Fig.1 Coarse aggregate

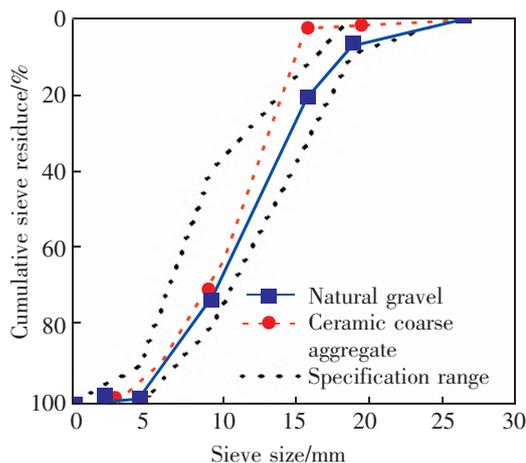


图2 粗骨料粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of coarse aggregate

表1 粗骨料性能指标

Tab.1 Performance index of coarse aggregate

Aggregate type	Aggregate size/mm	Water absorption /%	Apparent density/(kg/m <sup>3</sup> )	Bulk density/(kg/m <sup>3</sup> )
Natural gravel	5~20	0.40	2 726	1 429
Ceramic coarse aggregate	5~20	9.77	2 392	1 202

表 2 不同陶瓷取代率粗骨料的压碎指标  
Tab.2 Crushing indicators of coarse aggregates with different ceramic replacement ratios

Ceramic replacement rate/%	0	20	40	60	80	100
Crush index/%	11.24	11.23	10.99	10.87	9.25	9.50

### 1.2 配合比设计

混凝土设计强度等级为 C40。再生陶瓷粗骨料取代率  $r$ , 定义为陶瓷在水中浸泡 10 min 后的质量与粗骨料总质量的比值。本试验设计了 11 种取代率, 即  $r$  为 0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%。

搅拌混凝土前测得天然碎石的吸水率为 0.40%, 陶瓷粗骨料的吸水率为 9.77%。与天然碎石相比, 陶瓷具有较高的孔隙率和较强的吸水性, 以普通混凝土配合比设计方法设计配制的再生陶瓷粗骨料混凝土, 其坍落度不符合施工要求。所以, 本试验采用了基于自由水灰比的混凝土配合比设计方法<sup>[8]</sup>, 即搅拌混凝土的水由两部分组成: 其中一部

分为自由水, 调整混凝土的流动性, 并与水泥发生水化反应; 另一部分为附加水, 在搅拌混凝土过程中, 被陶瓷完全吸收, 对混凝土的工作性能无影响。将自由水与水泥用量之比称之为自由水灰比。经试配, 附加水用量采用陶瓷粗骨料 10 min 的吸水量。

再生陶瓷粗骨料混凝土附加水用量计算公式为

$$\Delta W = \omega \cdot m_{RCCA} \quad (1)$$

$$m_{RCCA} + \Delta W = r \cdot m \quad (2)$$

式中:  $\Delta W$  为附加水用量, kg;  $\omega$  为再生陶瓷粗骨料 10 min 的吸水率 (其中陶瓷粗骨料 10 min 的吸水率为 6.61%, 约为饱和吸水率的 68%);  $m_{RCCA}$  为再生陶瓷粗骨料的质量, kg;  $r$  为再生陶瓷粗骨料的取代率;  $m$  为粗骨料的总质量, kg。

按照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2011)<sup>[6]</sup>, 计算出每立方米强度等级为 C40 的普通混凝土各材料的用量。再根据式(1)和式(2), 计算出不同取代率再生陶瓷粗骨料混凝土的附加水用量以及天然碎石和陶瓷粗骨料的用量, 计算结果见表 3。

表 3 再生陶瓷粗骨料混凝土配合比  
Tab.3 Mix ratio of recycled ceramic coarse aggregate concrete

Specimen number	W/C	Natural gravel/(kg/m <sup>3</sup> )	Ceramic coarse aggregate/(kg/m <sup>3</sup> )	Sand/(kg/m <sup>3</sup> )	Cement/(kg/m <sup>3</sup> )	(Water/Additional water)/(kg/m <sup>3</sup> )	Slump/mm
NC	0.48	1 162	-	625	448	215	90
RC-10	0.48	1 045	109	625	448	215/7	80
RC-20	0.48	929	219	625	448	215/14	70
RC-30	0.48	813	328	625	448	215/20	70
RC-40	0.48	697	437	625	448	215/27	90
RC-50	0.48	581	547	625	448	215/34	75
RC-60	0.48	465	656	625	448	215/41	80
RC-70	0.48	348	766	625	448	215/48	85
RC-80	0.48	232	875	625	448	215/54	65
RC-90	0.48	116	984	625	448	215/61	70
RC-100	0.48	-	1 094	625	448	215/68	65

Note: NC in this paper stands for ordinary concrete. In RC-10, RC stands for recycled ceramic coarse aggregate concrete, 10 stands for ceramic coarse aggregate replacement rate of 10%, and other numbers are numbered in the same way.

### 1.3 试验方法

本试验的搅拌方法为二次搅拌工艺中的全骨料造壳法, 即按照表 3 的配合比, 将骨料(天然碎

石、再生陶瓷粗骨料和砂)全部投入 30 L 的单卧轴混凝土搅拌机中搅拌 60 s, 再将所需水量的一半倒入搅拌机中搅拌 60 s, 使骨料充分吸水, 再加水泥

搅拌 30 s, 最后将剩下的另一半水倒入搅拌机中搅拌 120 s。混凝土搅拌均匀后, 装入边长为 150 mm 的立方体模具中(每组浇筑 6 个试块), 放在振捣台上振捣 1 min, 用抹刀抹平后盖上保鲜膜, 将其放在标准养护室带模养护 48 h 后拆模并编号。将试块继续放在养护室中养护至 7 d 和 28 d, 再分别对其进行强度测试。

试块强度测试的仪器为华东交通大学材料实验室的微机控制压力试验机, 其型号为 WHY-2000。试块从养护室取出后, 选择试块相对光滑的表面与试验机的上、下压板接触, 将试块缓慢的移动至压力试验机中心。参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)<sup>[17]</sup> 相关规定, 以 0.6 MPa/s 的速度持续均匀的加载, 直到试块被压坏, 试验结束。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 试块破坏的过程及现象

压力加载初期, 试块表面无明显变化。当快到峰值荷载时, 试块出现从角往上延展的斜裂缝或从底边向上延展的轴向裂缝。轴向位移增大的同时, 裂缝逐渐变宽, 裂缝附近区域快速出现大量的微裂

缝, 达到峰值荷载后, 裂缝迅速贯通试块表面, 形成 45° 角左右正倒相连的四角锥, 试块表面外鼓并剥落, 试块内部伴有劈裂声响, 荷载继续增加, 试块突然破坏且丧失承载力。从破坏的过程看出, 再生陶瓷粗骨料混凝土与普通混凝土相比较无明显差异。但取代率越大, 试块破坏时的劈裂声越剧烈, 试块表面混凝土脱落面积越大。

图 3 为不同取代率再生陶瓷粗骨料混凝土试块 28 d 的破坏形态, 从图 3(a) 凹凸不平的断面形态可以看出, 普通混凝土的破坏主要是在于碎石-水泥石界面破坏和砂浆基体内部开裂, 碎石断裂占少部分。从图 3 中可以看出, 随着陶瓷取代率的增加, 混凝土断面凹凸不平逐渐变得平整, 说明再生陶瓷粗骨料混凝土的裂缝主要出现在陶瓷粗骨料内部及砂浆基体内部, 少部分在陶瓷粗骨料与水泥基材料界面。出现这现象的原因一方面陶瓷粗骨料大致呈不规则多面体形状, 棱角分明且表面粗糙多孔(除釉面外), 与浆体具有更好的黏结性; 另一方面在再生陶瓷粗骨料破碎的过程中, 其内部会产生细小的微裂缝, 由此会在混凝土里面形成比较脆弱的连接面, 这会使得再生陶瓷粗骨料混凝土的裂缝主要出现在陶瓷粗骨料的内部。

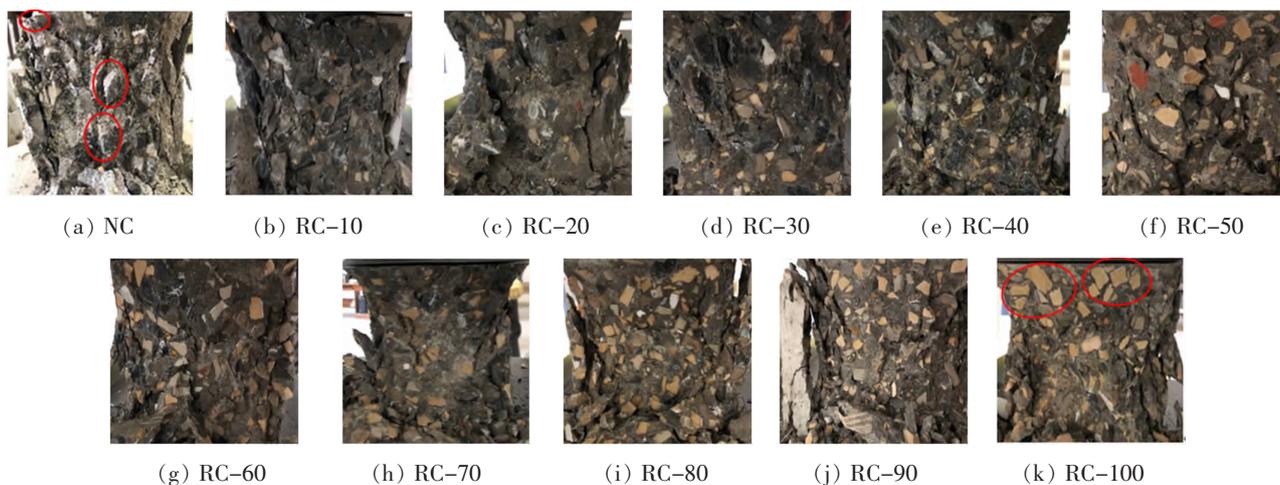


图 3 不同取代率再生陶瓷粗骨料混凝土试块 28 d 的破坏形态

Fig.3 The 28 d failure morphology of recycled ceramic coarse aggregate concrete specimens with different replacement ratios

### 2.2 再生陶瓷粗骨料混凝土应力-应变全曲线

依据试验机采集系统自动采集的荷载和纵向位移数据, 将其转化为应力  $\sigma$  和应变  $\varepsilon$  并绘制成应力-应变全曲线。每组有 3 个试块对应的应力-应变全曲线, 由于混凝土具有一定的离散性, 同组 3 个

试块应力-应变全曲线具有差异, 不宜通过平均值作比较, 故取 3 个试块应力-应变全曲线中应力中间值所对应的曲线作比较, 如图 4 所示。为了便于比较, 将 11 组再生陶瓷粗骨料混凝土的应力-应变全曲线分 3 个图展示。由图 4 可以看出, 再生陶瓷

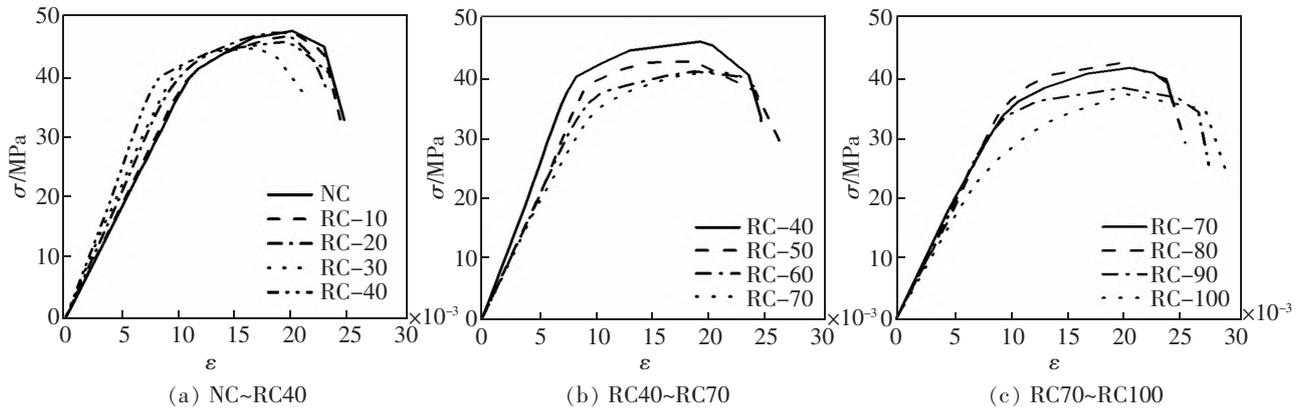


图 4 不同取代率再生陶瓷粗骨料混凝土 28 d 的应力-应变全曲线

Fig.4 28 d stress-strain curves of recycled ceramic coarse aggregate concrete with different replacement ratios

粗骨料混凝土应力-应变全曲线的变化趋势与普通混凝土基本相同。陶瓷取代率为 0~40% 时,随着取代率的增加,混凝土应力-应变全曲线弹性阶段斜率逐渐增大,峰值应力逐渐降低,峰值应变逐渐减小;陶瓷取代率为 40%~100% 时,混凝土应力-应变全曲线弹性阶段斜率逐渐减小,峰值应力逐渐降低,峰值应变逐渐变大。说明随着陶瓷粗骨料取代率的增大,混凝土抗压强度逐渐降低,峰值应变先减小后增大,取代率为 40% 时,混凝土的峰值应变最小。

### 2.3 抗压强度和峰值应变与取代率的关系

依据试验机采集系统自动采集的荷载和纵向位移数据转化的应力-应变全曲线,可得到每组取代率再生陶瓷粗骨料混凝土试块 28 d 的抗压强度与峰值应变。试验结果采用每组 3 个试块的平均值(3 个值中的最大值或最小值与中间值的差值超过中间值的 15% 时,取中间值作为该组试件的抗压强度值),以降低离散性对混凝土力学性能结果的影响。

为更清楚了解不同取代率  $r$  的再生陶瓷粗骨料混凝土抗压强度与普通混凝土之间的关系。根据再生陶瓷粗骨料混凝土 7 d 和 28 d 试验数据,回归得到不同取代率再生陶瓷粗骨料混凝土 7 d 和 28 d 抗压强度的计算方法,分别为式(3)和式(4)。

$$f_{cu,7}^r = f_{cu,7}^r (-0.13r + 1) \quad (3)$$

$$f_{cu,28}^r = f_{cu,28}^r (-0.2r + 1) \quad (4)$$

式中: $f_{cu,7}^r$  为再生陶瓷粗骨料混凝土 7 d 抗压强度,MPa; $f_{cu,7}^r$  为普通混凝土 7 d 抗压强度,MPa; $f_{cu,28}^r$  为再生陶瓷粗骨料混凝土 28 d 抗压强度,MPa; $f_{cu,28}^r$

为普通混凝土 28 d 抗压强度,MPa。

通过实验数据回归得到普通混凝土与再生陶瓷混凝土的关系式,如式(3)和式(4)所示。由式(3)和式(4)得到的计算值与试验值的比值如表 4 所示。此计算方法分别是基于普通混凝土 7 d 和 28 d 抗压强度提出的,针对本研究所用的再生陶瓷和配合比设计方法制备的再生陶瓷混凝土可参考此式。

图 5 显示了再生陶瓷粗骨料混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度随陶瓷取代率的变化情况。随着取代率的增加,混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度均降低。普通混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度分别为 40.79 MPa 和 46.9 MPa,陶瓷取代率为 100% 时,再生陶瓷粗骨料混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度分别为 34.52 MPa 和 36.5 MPa,较普通混凝土分别降低了 15.4% 和 22.2%。导致此结果有 3 方面原因:一是为了保证再生陶瓷粗骨料混凝土的工作性能,在再生陶瓷粗骨料混凝土的配合比中添加了附加水,搅拌时附加水被陶瓷所吸附,但陶瓷吸附的附加水会随混凝土内部水泥水化消耗水分而向陶瓷外迁移,向外迁移的水就残留在混凝土中,形成水泡或蒸发后形成气孔,导致混凝土不密实,从而使得混凝土的强度降低;二是由于陶瓷的表观密度比天然碎石小,即相同质量陶瓷的体积大于碎石,这就使得每个试块中骨料的量变多且浆体的量变少。浆体在混凝土中起到包裹骨料和填充骨料间的作用,由于在一定范围内,浆体的减少导致混凝土骨料间的粘聚力降低,从而导致混凝土的强度降低;三是因为陶瓷粗骨料级配比天然碎石差,由于陶瓷粗骨料的粒径主要分布在 4.75~16 mm,粒径分布不均匀,其空隙率比碎

表4 不同取代率再生陶瓷粗骨料混凝土抗压强度和峰值应变

Tab.4 Compressive strength and peak strain of recycled ceramic coarse aggregate concrete with different replacement ratios

Specimen number	7 d compressive strength /MPa		28 d compressive strength /MPa		Calculated value/tested value /MPa		28 d peak strain /( $\times 10^{-3}$ )
	Tested value	Calculated value	Tested value	Calculated value	7 d	28 d	
NC	40.79	40.52	46.90	47.00	0.99	1.00	19.16
RC-10	39.84	39.98	45.18	46.05	1.00	1.02	19.00
RC-20	38.66	39.43	44.38	45.11	1.02	1.02	18.56
RC-30	39.19	38.89	45.41	44.17	0.99	0.97	18.09
RC-40	38.78	38.34	43.47	43.22	0.99	0.99	18.05
RC-50	37.80	37.80	42.79	42.28	1.00	0.99	18.12
RC-60	36.83	37.25	41.10	41.34	1.01	1.01	18.52
RC-70	37.47	36.71	41.32	40.39	0.98	0.98	19.09
RC-80	36.49	36.16	39.19	39.45	0.99	1.01	19.38
RC-90	35.60	35.62	38.75	38.51	1.00	0.99	19.93
RC-100	34.52	35.07	36.50	37.56	1.02	1.03	21.60

石大,故混凝土强度降低。从图5混凝土7d和28d抗压强度曲线下下降的斜率可以看出,随着取代率的增加,混凝土7d抗压强度的降低速度比28d慢。普通混凝土7d抗压强度达到28d的86.97%,而取代率为100%时,混凝土7d抗压强度达到28d的94.58%。说明取代率越大,混凝土的早期强度越高。

图6为再生陶瓷粗骨料混凝土28d同组3个试块峰值应变的平均值,从图6可以看出,随取代率的增加,再生陶瓷粗骨料混凝土的峰值应变呈先减小后增大的趋势。取代率为40%时,混凝土的峰

值应变最小,其值为 $18.05 \times 10^{-3}$ ,普通混凝土的平均峰值应变为 $19.16 \times 10^{-3}$ ,取代率为100%时,混凝土的平均峰值应变为 $21.6 \times 10^{-3}$ 。

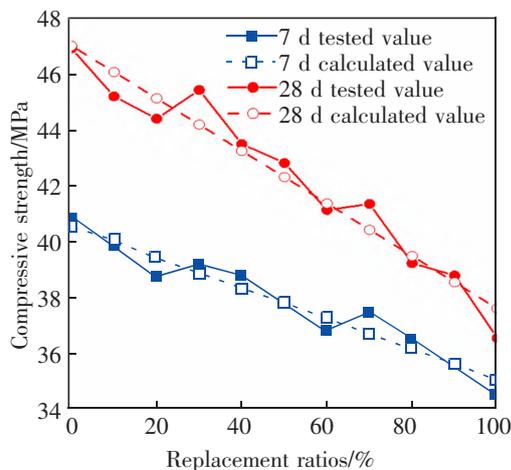


图5 再生陶瓷粗骨料混凝土的抗压强度

Fig.5 Compressive strength of recycled ceramic coarse aggregate concrete

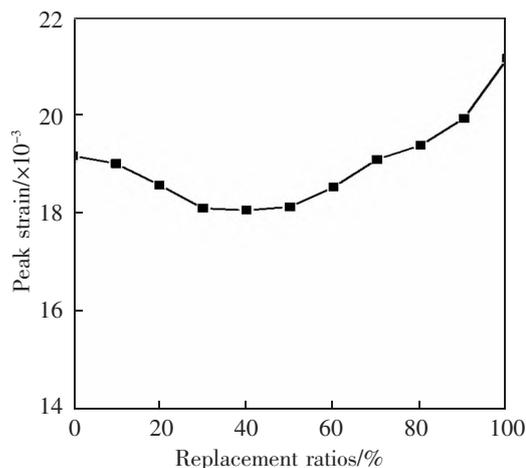


图6 再生陶瓷粗骨料混凝土28d的峰值应变

Fig.6 28 d peak strain of recycled ceramic coarse aggregate concrete

### 3 结论

1) 普通混凝土的破坏主要是在于碎石-水泥石界面破坏和砂浆基体内部开裂,碎石断裂占少部分,随着取代率的增加,试块的裂缝更多的出现在陶瓷粗骨料的断裂和砂浆基体内部,少部分出现在陶瓷粗骨料-水泥石界面处。

2) 使用瓷板加工的颗粒等质量替换天然碎石,并采用自由水灰比配制的再生陶瓷粗骨料混凝土,其7 d和28 d的抗压强度随着取代率的增加呈现不同程度降低。峰值应变随取代率的增加先减小后增大,取代率为40%时,混凝土的峰值应变最小。

3) 通过实验数据,提出了普通混凝土与不同取代率的再生陶瓷混凝土7 d和28 d抗压强度的关系式。此计算方法分别是基于普通混凝土7 d和28 d抗压强度提出的,针对本研究所用的再生陶瓷和配合比设计方法制备的再生陶瓷混凝土可参考此公式计算。

### 参考文献:

- [1] 余大鹏,易金,宋兆萍,等. 骨料粒径对珊瑚混凝土力学性能影响[J]. 华东交通大学学报,2020,37(4):1-6.  
YU D P, YI J, SONG Z P, et al. Effects of coral aggregate particle size on mechanical properties of coral concrete[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(4): 1-6.
- [2] 程云虹,杨四辉,张靖瑜,等. 陶瓷细骨料替代方式对混凝土抗压强度的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2020,41(11):1661-1666.  
CHENG Y H, YANG S H, ZHANG J Y, et al. Effect of substitution of ceramic fine aggregate on compressive strength of concrete [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2020, 41(11): 1661-1666.
- [3] 毋雪梅,李勇,杨久俊. 废弃陶瓷再生砂配制砂浆、混凝土的研究[J]. 混凝土,2008(9):50-52.  
WU X M, LI Y, YANG J J. Masonry mortar and concrete producing with recycled ceramic aggregate producing[J]. Concrete, 2008(9): 50-52.
- [4] 陈梦成,袁明胜,刘宇翔. 陶瓷粉混凝土正交设计试验研究[J]. 混凝土,2018(4):102-106.  
CHEN M C, YUAN M S, LIU Y Y. Experimental study on orthogonal design of ceramic powder concrete[J]. Concrete, 2018(4): 102-106.
- [5] 乔宏霞,彭宽,陈克凡,等. 陶瓷粉再生混凝土冻融破坏可靠性分析[J]. 材料导报,2020,34(10):10035-10040.  
QIAO H X, PENG K, CHEN K F, et al. Reliability analysis of freeze-thaw damage of ceramic powder recycled concrete [J]. Material Guide, 2020, 34(10): 10035-10040.
- [6] BRITO J D, PEREIRA A S, CORREIA J R. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates[J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27(4): 429-433.
- [7] 吴本英,周锡武,曾鸿钰,等. 陶瓷粗骨料混凝土配合比设计和性能试验[J]. 公路,2015,60(1):149-155.  
WU B Y, ZHOU X W, ZENG H Y, et al. Mix design and performance test of ceramic coarse aggregate concrete[J]. Highway, 2015, 60(1): 149-155.
- [8] 许开成,方苇,陈梦成,等. 陶瓷再生粗骨料混凝土力学性能研究[J]. 实验力学,2014,29(4):474-480.  
XU K C, FANG W, CHEN M C, et al. On the mechanical properties of ceramic recycled coarse aggregate concrete[J]. Experimental Mechanics, 2014, 29(4): 474-480.
- [9] 沈阳,王功勋,裴启文,等. C30废陶瓷再生骨料混凝土的抗压强度和弹性模量研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(12):3795-3801.  
SHEN Y, WANG G X, PEI Q W, et al. Research on compressive strength and elastic modulus of C30 waste ceramic recycled aggregate concrete[J]. Silicate Bulletin, 2018, 37(12): 3795-3801.
- [10] PACHECO-TORGAL F, JALALI S. Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete [J]. Materials and Structures, 2011, 44(1): 155-167.
- [11] 宿晓如,谢悦,王和兴,等. 再生陶瓷增强混凝土材料抗压强度和弹性模量的实验分析[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(5):186-191.  
SU X R, XIE Y, WANG H X, et al. Experimental analysis for compressive strength and elastic modulus of concrete reinforced with recycled ceramic[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(5): 186-191.
- [12] RAJPRASAD J, SARATH B K, PANNIRSELVAM N. Experimental investigation on partially additional of coarse aggregate with ceramic in concrete[J]. IOP conference series. Materials Science and Engineering, 2020, 912(6): 62074.
- [13] NEPOMUCENO M C S, ISIDORO R A S, CATARINO J P G. Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste[J]. Construction & Building Materials, 2018, 165(MAR, 20): 284-294.
- [14] ANDERSON D J, SIMTH S T, AU F T K. Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2016, 117: 20-28.
- [15] 苏有文,李娇,李雪莹,等. 粗骨料取代率对废陶瓷混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2019(3):97-100.  
SU Y W, LI J, LI X Y, et al. Influence of coarse aggregate replacement rate on mechanical properties of waste ceramic concrete[J]. Concrete and Cement Products, 2019(3): 97-100.

- [16] 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:JGJ55-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design specification for ordinary concrete mix ratio:JGJ 55-2011[S]. Beijing:China Building Industry Press, 2011.

- [17] 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.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Test Methods of Physical and Mechanical Properties of Concrete:GB/T 50081-2019[S]. Beijing:China Building Industry Press, 2019.



第一作者:黄宏(1977—),女,教授,博士,博士生导师,江西省青年科学家(井冈之星)培养对象,中国钢结构协会组合结构分会理事,江西省土木工程学会空间结构分会副主任委员,江西省土木工程学会地下空间及轨道交通专业委员会委员,研究方向为组合结构。E-mail:huanghong1977@foxmail.com。

(责任编辑:李根 姜红贵)