

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.012

# 再生细骨料残余浆体对混凝土流变性和强度的影响

胡立<sup>1,2</sup>, 詹炳根<sup>1,2</sup>, 洪丽<sup>1,2</sup>, 张赵强<sup>1,2</sup>, 李景哲<sup>1,2</sup>, 陈语阳<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 水泥基材料低碳技术与装备教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章开展再生细骨料残余浆体的定量表征实验、混凝土常规工作性能试验、流变性能试验和力学性能试验,研究不同残余浆体质量分数对再生细骨料混凝土流变性能和力学性能的影响。研究发现,再生骨料表面残余浆体的去除可以明显改善其基本性能,再生细骨料的使用会使新拌混凝土的坍落度和扩展度损失加快,屈服应力增大,塑性黏度降低。随着再生细骨料残余浆体质量分数的减少,用其制备出的再生混凝土的抗压强度和劈裂抗拉随之增大。当浆体质量分数为 14.9%时,骨料水泥界面过渡区粘结紧密,再生细骨料混凝土的 28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度分别为 28.50、2.30 MPa,约为普通混凝土的 89%、77%,表明较低残余浆体质量分数的再生细骨料可取代天然砂应用于混凝土中。

**关键词:**再生混凝土;再生细骨料;残余浆体质量分数;流变性;力学性能

**中图分类号:**TU528.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)02-0220-06

## Effect of residual slurry of recycled fine aggregate on rheological properties and strength of concrete

HU Li<sup>1,2</sup>, ZHAN Binggen<sup>1,2</sup>, HONG Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhaoqiang<sup>1,2</sup>, LI Jingzhe<sup>1,2</sup>, CHEN Yuyang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Engineering Research Center of Low-carbon Technology and Equipment for Cement-based Materials of Ministry of Education, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Quantitative characterization experiments on the residual slurry of recycled fine aggregate were carried out, as well as conventional concrete workability tests, rheological properties tests and mechanical properties tests to investigate the effects of different residual slurry mass fractions on the rheological and mechanical properties of recycled fine aggregate concrete. It is found that the removal of residual slurry on the surface of recycled aggregate can significantly improve its basic properties, and the use of recycled fine aggregate will accelerate the slump and expansion loss, increase the yield stress and decrease the plastic viscosity of fresh concrete. As the mass fraction of residual slurry of recycled fine aggregate decreases, the compressive strength and splitting tensile of the recycled concrete prepared with it subsequently increase. When the mass fraction of slurry is 14.9%, the aggregate-cement interfacial transition zone is tightly bonded, and the 28 d compressive strength and splitting tensile strength of recycled fine aggregate concrete are 28.50 and 2.30 MPa, respectively, which are about 89% and 77% of those of normal concrete. Therefore, the recycled fine aggregate with lower residual slurry mass fraction can replace natural sand in concrete applications.

**Key words:** recycled concrete; recycled fine aggregate; residual slurry mass fraction; rheological properties; mechanical properties

收稿日期:2022-09-19;修回日期:2022-10-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1909902)

作者简介:胡立(1995—),男,安徽安庆人,合肥工业大学硕士生;

詹炳根(1964—),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: bgzhan@hfut.edu.cn.

## 0 引言

随着社会的发展,建筑行业也在不断适应大众需求中稳步前进。但我国建筑业在快速发展的同时,大面积的旧城改造和新建筑开发,带来了大量的建筑垃圾和建筑材料资源不足两大难题<sup>[1]</sup>。

再生细骨料是指废弃混凝土经破碎筛分后粒径小于 4.75 mm 的骨料颗粒,其骨料性能差、数据离散性大是制约其高效利用的主要原因。文献[2]的研究表明,再生细骨料表面附着多孔洞、多裂纹的残余浆体,使其较天然细骨料吸水率高、密度低。残余浆体是影响再生细骨料基本性能及其混凝土制品各项性能的重要因素,其与原始骨料共同组成一个非匀质、不稳定且多变的多相体<sup>[3]</sup>,这也是导致再生细骨料性质差、利用率低的根本原因。

由再生细骨料部分或全部替代天然细骨料制备的再生混凝土(recycled aggregate concrete, RAC)的性质都会劣于普通混凝土。在工作性能上,再生混凝土表现为坍落度小、流动性差,一方面取决于再生混凝土的配合比设计,另一方面由于残余浆体的高吸水性。文献[4]实验表明,与河砂砂浆相比,再生细骨料砂浆会需要更多用水量来达到相同的和易性;文献[5]研究表明,由于再生细骨料中存在微裂纹及内部损伤积累,表观密度越低,再生砂浆吸水率越高、吸水速度越快,导致保水性较差,并且再生细骨料粗糙的表面也会增大新拌再生混凝土的摩擦阻力,使得再生混凝土的屈服应力较大;文献[6]研究表明,再生细骨料的多棱角表面使得骨料空隙增大,需要更多的浆体填充空隙,导致用于润滑的浆体量减少,影响流动性;文献[7-9]研究表明,随着再生细骨料替代率的提高,再生砂浆的需水量也在增加;文献[10]研究发现,再生细骨料的细度模数对再生砂浆的耗水量有密切影响,细度模数越小,再生细骨料的比表面积越大,再生砂浆的需水量越大。从上述研究可以看出,再生细骨料的加入会降低再生混凝土的流动性。

再生细骨料物理性能的劣化也会导致再生混凝土力学性能的劣化。文献[11]研究表明这是由于再生细骨料的替代会增加再生混凝土中毛细孔和凝胶孔的数量,对其力学性能造成负面影响;文献[12-13]研究结果表明,用再生细骨料制备的再生砂浆的力学性能会变差;文献[14]研究发现,再生混凝土的抗压强度随着再生细骨料替代率的增

加而趋于降低;文献[15]采用3种不同来源的再生细骨料代替天然细骨料制备再生砂浆,结果表明再生砂浆强度较天然砂浆强度都有不同程度的降低。另外微观结构分析可知,再生混凝土是一个由再生骨料和新、老砂浆以及新-老砂浆界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)组成的多相体。多重薄弱界面过渡区的存在也是再生混凝土力学性能差的主要原因<sup>[16]</sup>。

国内主要通过体积分数为10%的盐酸溶液腐蚀残余浆体<sup>[17]</sup>和高温劣化残余浆体<sup>[18]</sup>去除再生粗骨料表面的残余浆体,进而以再生粗骨料去除残余浆体前后质量的差值与再生粗骨料去除前质量的比值得出再生粗骨料中残余浆体的质量分数。文献[19]以加热摩擦法、机械撞击法和轻量级的粒子与水分离流法去除再生粗骨料的残余浆体,描述不同残余浆体质量分数对再生粗骨料混凝土性能的影响。

已有的研究多集中在不同掺量、不同来源再生细骨料对再生混凝土性能的影响,但对主要影响再生细骨料性能的残余浆体的研究较少。国内外的研究也多集中于对再生粗骨料残余浆体质量分数的测定,而对再生细骨料残余浆体质量分数的表征研究较少。究其原因,现阶段适用于再生粗骨料残余浆体质量分数测定方法并不适用于再生细骨料。机械剥离法<sup>[20]</sup>通过专业设备对再生骨料进行冲击和研磨,可以最大限度地松散和分离粘附在骨料表面的浆体。但此类方法无法避免再生骨料之间因碰撞、摩擦等作用而出现微裂缝,降低了再生骨料在后续使用中的质量且无法较为准确地定量残余浆体的质量分数。热处理法<sup>[21]</sup>是将再生骨料放置于30℃以上的温度里,加热数小时,进行数次循环,温度应力使骨料和黏附的浆体出现不同程度的膨胀,在温度应力的作用下两者之间的黏结力减弱,界面易破裂出现微裂缝且浆体在高温下脱水后易与骨料结合面脱离。但此类热处理方法只适用于大粒径骨料,因为可以轻易地分辨出脱落的浆体,而对再生细骨料并不适用。酸处理法<sup>[22]</sup>中的水泥浆体水化产物(C-S-H凝胶、Ca(OH)<sub>2</sub>、钙矾石、水化硫铝酸钙等)可以溶解于酸性溶液中,经过一系列化学反应后,再生骨料表面的残余浆体被溶解,经过清洗后可以得到表面无残余浆体的再生骨料,通过浸泡在合适的酸性溶液中可溶解绝大部分浆体,此类方法可较精准定量再生骨料残余浆体的质量分数。

本文首先开展再生细骨料残余浆体测定实

验,利用水杨酸-甲醇溶液浸泡再生细骨料粉末样品,通过抽滤、烘干、称重计算各组再生细骨料残余浆体质量分数,并依据残余浆体质量分数对再生细骨料进行分类制备再生混凝土,研究不同浆体质量分数的再生细骨料对再生混凝土流变性及力学性能的影响。

## 1 原材料及实验方法

### 1.1 原材料

实验所用的水泥是巢湖牌 P·O 42.5R 级水泥,主要化学成分及其质量分数见表 1 所列。实验所采用的再生细骨料由安徽省桐城市某高速公路拆除后,去除其中钢筋并经机械破碎、筛分而生产的再生细骨料,根据再生细骨料浆体质量分数的不同,共分为 6 个实验组,物理性能指标见表 2 所列。

表 1 实验用水泥的主要化学成分

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>
w/%	16.31	6.86	50.11	2.95	0.73	2.74

表 2 再生细骨料和天然细骨料的物理性能指标

细骨料	表观密度/堆积密度/		压碎指标/	吸水率/	ω(浆体)/
	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	%	%	%
NFA	2 597	1 454	18	0.8	0
RFA1	2 551	1 367	19	11.8	14.9
RFA2	2 500	1 324	19	13.0	17.6
RFA3	2 489	1 234	20	16.0	19.6
RFA4	2 451	1 202	21	20.0	20.8
RFA5	2 441	1 162	24	23.0	24.8

所用细骨料为安徽石强新型材料有限公司提供的天然细骨料。所用粗骨料为安徽石强新型材料有限公司提供的 5~10 mm 及 1~20 mm 2 种粒径的天然粗骨料,物理性能指标见表 3 所列。所采用的化学试剂为:500 mL 盐酸溶液(国药集团化学试剂有限公司);250 g 水杨酸固体粉末(天津市恒兴集团有限公司);500 mL 甲醇溶液(成都市科隆化学品有限公司)。所用化学试剂均为分析纯。

表 3 天然粗骨料的物理性能指标

粒径/ mm	含水率/ %	表观密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	堆积密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	空隙率/ %
5~10	20	2 510	1 300	48
10~20	30	2 730	1 650	40

### 1.2 配合比

再生细骨料浆体质量分数为 0 时对应的实验

组为基准组,细骨料采用天然砂,其设计强度为 C35,水灰比为 0.65,粗骨料采用天然粗骨料,基准组混凝土记为 NC。配合比设计见表 4 所列。在此基础上,所制备的再生混凝土分别记为 RFC1、RFC2、RFC3、RFC4、RFC5。

表 4 再生细骨料混凝土的配合比 单位:kg/m<sup>3</sup>

实验组	材料组分				
	水泥	水	天然细骨料	再生细骨料	天然粗骨料
NC	308	185	677	0	1 203
RFC1	308	185	0	677	1 203
RFC2	308	185	0	677	1 203
RFC3	308	185	0	677	1 203
RFC4	308	185	0	677	1 203
RFC5	308	185	0	677	1 203

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 残余浆体质量分数的测定方法

1) 将代表性样品置于干燥箱中,在 105 °C 下烘干至恒重  $m$ ,均匀取样 100 g 作为实验样品。研磨样品直至通过 0.2 mm 筛网。

2) 配制 0.3 g/mL 水杨酸-甲醇溶液,从 100 g 研磨后的样品中均匀取样 0.5 g 浸泡在 50 mL 水杨酸-甲醇溶液中,搅拌 1 h 使其充分反应。

3) 用抽滤装置进行过滤操作,并将甲醇溶液倒入漏斗清洗滤纸上的残余物数次,直至液体变清澈,倾倒甲醇溶液的过程中注意液体溅出。

4) 将残余粉末状固体不溶物置于干燥箱,在 30 °C 下烘干至恒重后称其质量  $m_1$ ,再生细骨料残余浆体质量分数  $w$  的计算公式为:

$$w = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.3.2 再生细骨料基本性能的测定

根据国家标准 GB/T 14684—2022《建设用砂》中的相关规定进行实验,测定再生细骨料的表观密度、堆积密度、压碎指标、吸水率等基本物理性能。

#### 1.3.3 再生细骨料混凝土流变性能的测试

实验使用的 STHB-1 型混凝土流变仪如图 1 所示。对新拌再生细骨料混凝土进行流变性能测试,测试程序如图 2 所示,以参数关系为  $\tau = \tau_0 + \mu\gamma$  表示的 Bingham 模型进行建模,得到屈服应力和塑性黏度等流变参数。由图 2 可知,测试程序包括 20 s 的预剪切期,速度恒定为 0.50 r/s,然后以 0.50~0.05 r/s 的降序下降依次采集 7 个流变曲线点。



图 1 STHB-1 型混凝土流变仪

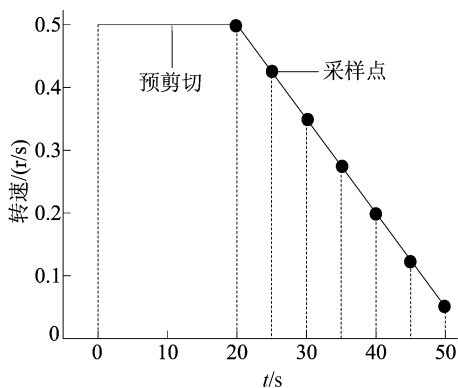


图 2 流变仪测试程序

### 1.3.4 再生细骨料混凝土力学性能的测试

本性能测试的具体过程参照国家标准 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 质量分数对混凝土流变性能的影响

STHB-1 型混凝土流变仪采集的实验结果如图 3 所示,并依据 Bingham 模型计算再生细骨料混凝土的屈服应力和塑性黏度。

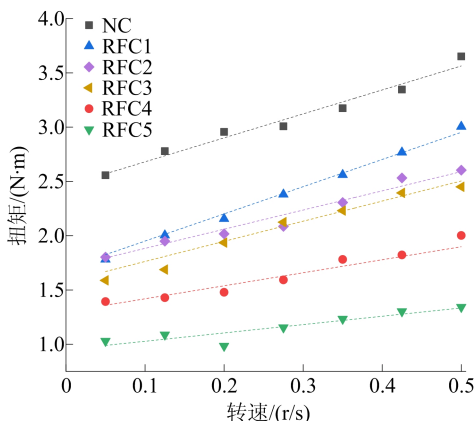


图 3 流变曲线测试结果

再生细骨料浆体质量分数对混凝土屈服应力  $\tau_0$  的影响如图 4 所示。由图 4 可知,NC 组的屈服应力普遍低于 RFC 各组,再生细骨料残余浆体质量分数为 24.8% 时制备的混凝土的屈服应力最高,达到 877.08 Pa,约为 NC 组的 1.34 倍。在 RFC 各组中,残余浆体质量分数越高,再生混凝土屈服应力越大。这是再生细骨料吸水率高、吸水速度快导致的。新拌再生混凝土中自由水不断被再生细骨料表面的残余浆体吸收,使得拌合物中自由水随之降低,导致其屈服应力迅速增大。同时,由于残余浆体的存在,再生细骨料的表面具有棱角、更粗糙,与天然细骨料相比导致其动态屈服应力较大<sup>[23]</sup>。随着再生细骨料残余浆体质量分数逐渐增大,使得新拌再生细骨料混凝土中自由水的含量减小,最终表现为屈服应力的升高<sup>[24]</sup>。

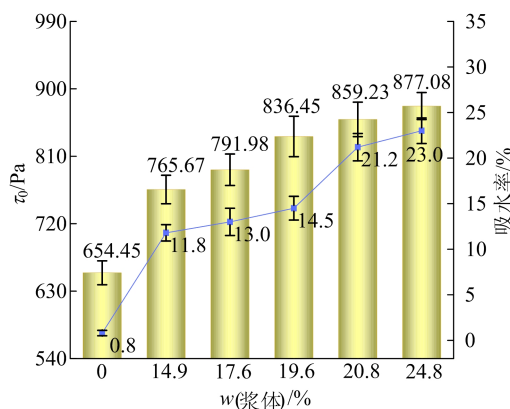


图 4 再生细骨料浆体质量分数对混凝土屈服应力的影响

再生细骨料浆体质量分数对混凝土塑性黏度的影响如图 5 所示。

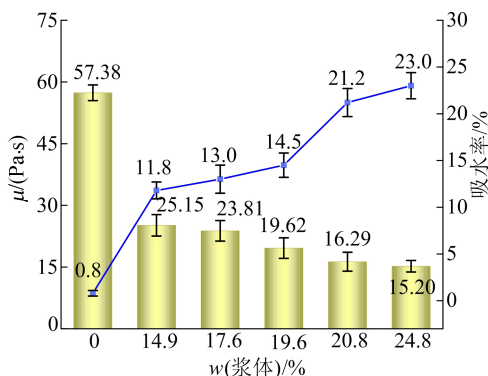


图 5 再生细骨料浆体质量分数对混凝土塑性黏度的影响

由图 5 可知,NC 组的塑性黏度值普遍高于 RFC 各组,这是由于塑性黏度  $\mu$  主要受浆体中水

泥分子间的相互引力影响。因为 RFC 各组的附加水含量均高于 NC 组, 所以其拌合物中水泥颗粒更加分散, 加大了水泥分子间的距离, 导致水泥分子间的相互引力减小, 最终使得 RFC 各组的塑性黏度值低于 NC 组。

综上所述, 再生混凝土的流变性与再生细骨料浆体质量分数呈负相关。

## 2.2 质量分数对混凝土强度的影响

再生细骨料混凝土强度的实验结果见表 5 所列。再生细骨料浆体质量分数对混凝土强度的影响如图 6 所示。

表 5 再生细骨料混凝土各龄期的强度

实验组	抗压强度/MPa			劈裂抗拉强度/MPa		
	7 d	14 d	28 d	7 d	14 d	28 d
NC	23.4	29.8	32.1	2.42	2.73	2.96
RFC1	19.4	26.5	28.5	1.81	2.09	2.30
RFC2	18.3	25.4	27.6	1.65	2.03	2.15
RFC3	17.3	24.9	26.7	1.50	1.81	1.89
RFC4	16.4	23.8	25.5	1.31	1.66	1.72
RFC5	15.9	22.8	25.1	1.19	1.41	1.52

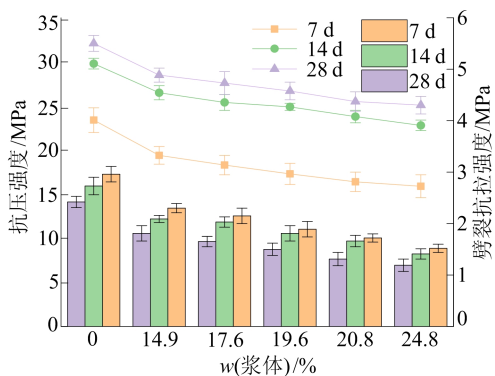


图 6 再生细骨料浆体质量分数对混凝土强度的影响

由图 6 可知, 随着再生细骨料残余浆体质量分数的升高, 用其制备的再生混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度也随之减小。残余浆体质量分数为 24.8% 时, 再生细骨料混凝土的 3、7、28 d 抗压强度分别为 15.9、22.8、25.1 MPa, 相较于天然细骨料混凝土的抗压强度, 只有其强度的 67.8%、76.5%、78.2%; 再生细骨料混凝土的 3、7、28 d 劈裂抗拉强度分别为 1.19、1.41、1.52 MPa, 相较于天然细骨料混凝土的抗压强度, 只有其强度的 49.2%、51.6%、51.4%。其原因在于再生细骨料表面附着的残余浆体会阻碍再生细骨料与水泥浆体之间的粘结<sup>[25-27]</sup>。随着再生细骨料表面的残余浆体逐渐减少, 骨料性能明显改善, 经处理后的

再生细骨料与再生混凝土中的新水泥浆之间界面区域的接触更加紧密。因为水泥浆与骨料之间的界面结合在混凝土结构中至关重要, 并且是支配混凝土强度发展的一个重要因素<sup>[28-29]</sup>, 所以界面区的增强反映了经处理的再生细骨料混凝土强度的提高。同时再生细骨料混凝土具有新旧双界面, 在劈裂破坏时, 新旧双界面均发生断裂<sup>[30]</sup>。并且旧界面断裂能比新界面低, 对再生细骨料混凝土的劈裂抗拉强度影响更大<sup>[31]</sup>。再生细骨料由于残余浆体的存在, 再生混凝土在承受轴向应力时, 其较高的孔隙率容易使旧界面形成应力集中现象, 从而导致再生混凝土抗拉强度下降<sup>[32]</sup>。结合前人研究成果可知<sup>[33-35]</sup>, 对于再生细骨料混凝土而言, 浆体质量分数减小可以减少再生细骨料混凝土双界面的数量, 从而使得劈裂破坏薄弱区减少, 表现为劈裂抗压强度的增大。

## 3 结 论

1) 再生细骨料残余浆体的高吸水率会使新拌混凝土的坍落度和扩展度损失加快, 屈服应力增大, 塑性黏度降低。在 RFC 各组中, 再生细骨料残余浆体质量分数为 24.8% 时制备的混凝土的屈服应力最高, 能够达到 877.08 Pa, 约为 NC 组的 1.34 倍。随着残余浆体质量分数逐渐减少, 再生细骨料表面棱角减少, 吸水率下降, 再生细骨料混凝土的屈服应力逐渐减小, 塑性黏度值逐渐增大。

2) 随着再生细骨料残余浆体质量分数的减小, 用其制备的再生混凝土抗压强度和劈裂抗拉随之增大。当残余浆体质量分数为 14.9% 时, 骨料水泥浆体界面过渡区粘结紧密, 再生细骨料混凝土的 28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度分别为 28.5、2.30 MPa, 约为普通混凝土的 89%、77%。

## [参 考 文 献]

- [1] 杨振武. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报[N]. 人民日报, 2022-03-01(11).
- [2] OUYANG K, SHI C, CHU H, et al. An overview on the efficiency of different pretreatment techniques for recycled concrete aggregate[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 121: 262-264.
- [3] ULSEN C, KAHN H, HAWSCHEK G, et al. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand[J]. Waste Management, 2013, 33(3): 656-662.
- [4] MARTINEZ I, ETXEBERRIA M, PAVON E, et al. Influence of demolition waste fine particles on the properties of recycled aggregate masonry mortar[J]. International Jour-

- nal of Civil Engineering, Transaction A: Civil Engineering, 2018, 16(9):1213-1226.
- [5] CHEN Z P, WANG N, ZHENG S F, et al. Experimental study on mechanical behavior of recycled fine aggregate mortar[J]. Concrete, 2011, 28(8):111-115.
- [6] KWAN A K H, LI L G, FUNG W W S. Wet packing of blended fine and coarse aggregate[J]. Materials and Structures, 2012, 45(6):817-828.
- [7] 陈冲, 刘卫东, 余乃宗. 再生细骨料不同取代率对砂浆性能的影响[J]. 工业建筑, 2016, 21(增刊2):625-626, 647.
- [8] CHEN Z P, WANG N, ZHENG S F. Study on mechanical properties of recycled fine aggregate cement mortar[J]. Concrete, 2011(8):115-117.
- [9] LIU Z L, HU Z P, LIU Y F. Experimental study on preparing green ecological building mortar with construction waste[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2014(2):39-40.
- [10] ZHOU W J, CHEN J L. Experimental study on green recycled mortar[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(7):15-18.
- [11] 崔正龙, 路沙沙, 汪振双. 再生骨料特性对再生混凝土强度和碳化性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2):264-267.
- [12] AL-BAYATI H K A, DAS P K, TIGHE S L, et al. Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2016, 112:284-298.
- [13] RUI D, SUZUKI T, YAMASHITA S, et al. Countermeasure for frost heave of concrete L-type retaining wall backfill with granular wastes[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu C, 2006, 62(3):562-572.
- [14] QIN Y J, LIU Z G. Experimental study on the influence of classified recycled fine aggregate on the properties of building mortar[J]. Concrete, 2014(11):127-131.
- [15] YAN C Y. Experimental study on preparing ecological building mortar with solid waste[J]. Concrete, 2012(9):109-111.
- [16] 肖建庄, 马旭伟, 刘琼, 等. 全再生混凝土概念的衍化与研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(2):1-15.
- [17] 全洪珠, 丁杰东, 朱亚光, 等. 不同品质再生粗骨料对混凝土强度及耐久性影响的实验研究[C]//首届全国再生混凝土研究与应用学术交流会论文集. 上海:中国土木工程学会, 2008:283-289.
- [18] 水中和, 玄东兴, 曹蓓蓓. 热机械力分离制备高品质再生骨料的研究[J]. 混凝土, 2006(12):60-62.
- [19] QUAN H, KASAMI H, TAMAI T. Experimental study on effects of adhered mortar content on quality of recycled coarse aggregate and properties of concrete[C]//International Conference on Waste Engineering & Management. [S. l. : s. n. ], 2010:1-10.
- [20] KIM J H, SUNG J H, JEON C S, et al. A study on the properties of recycled aggregate concrete and its production facilities[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9):1935.
- [21] VENGADESH J, RAMASAMY V. Various treatment techniques involved to enhance the recycled coarse aggregate in concrete: a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 45(7):6356-6363.
- [22] ALODAINI A A, RIDZUAN A R M, FAUZI M A M. Removal of old adhered mortar from crushed concrete waste aggregate(CCWA) with different HCl molarities and its effect on CCW properties[J]. International Journal of Engineering and Technology, 2018, 7:5950-5959.
- [23] ISMAIL S, RAMLI M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44:464-476.
- [24] 陈志武. 饱和面干再生细骨料对超高性能混凝土流动度及强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(5):1503-1509.
- [25] KATZ A. Treatments for the improvement of recycled aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(6):597-603.
- [26] TAM V W Y, TAM C M, LE K N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50(1):82-101.
- [27] BAI G, ZHU C, LIU C, et al. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties[J]. Construction and Building Materials, 2020, 240:117978.
- [28] MARTINEZ I, ETXEBERRIA M, PAVON E, et al. Influence of demolition waste fine particles on the properties of recycled aggregate masonry mortar[J]. International Journal of Civil Engineering, Transaction A: Civil Engineering, 2018, 16(9):1213-1226.
- [29] 施惠生, 张林涛, 吴凯, 等. 不同集料界面过渡区对氯离子传输特性的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(6):1170-1176.
- [31] 肖建庄, 雷斌, 袁飏. 不同再生粗集料混凝土劈裂抗拉强度分布特征[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(2):223-229.
- [32] 周静海, 边晨, 王凤池, 等. 再生骨料的分布对再生混凝土抗拉性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2):267-275.
- [33] 荆慧斌, 赖海珍, 李阳, 等. 掺粉煤灰再生混凝土劈裂抗拉强度研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(11):128-132.
- [34] PURUSHOTHAMAN R, AMIRTHAVALLI R R, KARAN L. Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(5):04014168. 1-04014168. 7.
- [35] 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, 31:364-383.

(责任编辑 张 镛)