

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.021

基于残余浆体质量分数的 废弃混凝土再生砂品质评价方法研究

洪学飞^{1,2}, 詹炳根^{1,2,3,4}, 洪丽^{1,2,3,4}, 陈语阳^{1,2}, 余其俊^{1,2,3,4}

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 安徽省水泥基材料低碳技术工程研究中心, 安徽合肥 230009; 3. 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; 4. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽合肥 230009)

摘要:文章针对废弃混凝土再生砂资源属性复杂、基本性能差异性大导致其难以被高效利用的问题,提出了基于再生砂的残余浆体质量分数分类及评价再生砂的方法。对北京、合肥、桐城、广州、成都和重庆的再生砂进行基本性能测试,以再生砂的残余浆体质量分数 α_{RCC} 为基础,综合利用再生砂的表观密度、压碎指标、再生胶砂需水量比和强度比指标将再生砂划分成I类、II类和III类3个等级并与现行规范比较。结果表明:分别以再生砂的残余浆体质量分数 $\alpha_{RCC} \leq 15\%$ 、 $15\% < \alpha_{RCC} \leq 25\%$ 、 $\alpha_{RCC} > 25\%$ 划分再生砂的类别,其对应的各项基本性能指标都满足现行规范的要求;以残余浆体质量分数为基础对再生砂进行更简便精细的分类及品质评价。该分类方法有利于再生砂的差异化高效利用。

关键词:废弃混凝土;再生砂;残余浆体质量分数;分类;评价方法

中图分类号:TU521.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)12-1715-06

Study on evaluation method of recycled fine aggregate quality of waste concrete based on residual cement paste content

HONG Xuefei^{1,2}, ZHAN Binggen^{1,2,3,4}, HONG Li^{1,2,3,4}, CHEN Yuyang^{1,2}, YU Qijun^{1,2,3,4}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Province Engineering Research Center of Low-carbon Technology for Cement-based Materials, Hefei 230009, China; 3. Engineering Research Center of Low-carbon Technology and Equipment for Cement-based Materials of Ministry of Education, Hefei 230009, China; 4. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problem that recycled fine aggregate resource of waste concrete is difficult to be used efficiently due to its complex attribute and great difference in basic performance, this paper proposes a method to classify and evaluate recycled fine aggregate based on its residual cement paste content. The basic performance of recycled fine aggregate in Beijing, Hefei, Tongcheng, Guangzhou, Chengdu and Chongqing was tested. Based on the residual cement paste content α_{RCC} of recycled fine aggregate, the recycled fine aggregate was divided into three grades, namely, Class I, Class II and Class III, by comprehensive utilization of the apparent density, crushing index, water demand ratio and strength ratio of recycled mortar, and compared with the current specifications. The results show that the recycled fine aggregate can be classified according to its residual cement paste content $\alpha_{RCC} \leq 15\%$, $15\% < \alpha_{RCC} \leq 25\%$, $\alpha_{RCC} > 25\%$, respectively, and its corresponding basic performance indexes meet the requirements of current specifications. The recycled fine aggregate can be classified and evaluated more simply and precisely based on the residual cement paste content. This classification meth-

收稿日期:2023-02-24;修回日期:2023-03-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1909902)

作者简介:洪学飞(1996—),男,安徽马鞍山人,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;

余其俊(1962—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

od is conducive to the differential and efficient utilization of recycled fine aggregate.

Key words: waste concrete; recycled fine aggregate; residual cement paste content; classification; evaluation method

随着我国城市化进程不断加快,各种建筑活动产生了大量的建筑垃圾,目前的处置方式多以堆放、填埋为主,不仅占用土地资源还严重污染环境^[1]。建筑垃圾中超过 80% 的废弃混凝土可回收利用^[2-3]。回收废弃混凝土得到的再生骨料中,再生砂等细骨料约占 40%^[4],若能充分利用再生砂就可以减少对天然砂石的开采,保护生态、节约自然资源。

目前,再生骨料的研究和利用主要集中在再生粗骨料方面^[5],由于破碎工艺技术的局限性,导致再生砂的基本性能差异大、表观密度低、微粉质量分数高、吸水率高、压碎指标高等特点^[6-9],严重阻碍再生砂在实际工程中的高效利用^[10]。研究表明,再生砂基本性能差异性大的根本原因是再生砂表面所附着的残余浆体质量分数不同^[11],文献^[12]研究残余浆体质量分数对实验室制备的不同再生砂吸水率的影响,发现再生砂的 3 个较大粒径 0.63~<1.25 mm、1.25~<2.50 mm、2.50~5.00 mm 的吸水率和残余浆体质量分数呈线性趋势,但 0~<0.63 mm 粒级的再生砂由于吸水率难以准确测定,只能依靠线性趋势外推得到;文献^[13]表明再生砂的表面和内部因在破碎过程中受到损伤产生大量裂纹,同时含有硬化水泥浆体,导致性能劣于天然砂;文献^[14]研究也表明残余浆体质量分数的差异性导致再生砂的性能不稳定,密度低、内部裂隙多、坚固性较低。然而,当前对再生砂的分类与品质评价方面,并没有有效的方法。文献^[15]认为与天然砂相比,不同工艺制备的再生砂质量差异巨大,如果不进行品质划分,将会阻碍应用,提出再生胶砂需水量比、再生胶砂强度比 2 项指标用于分类再生砂;现行国家标准《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010)使用多项指标去分类再生细骨料,但是没有考虑再生细骨料的残余浆体质量分数这个指标,使得分类的再生细骨料性能差异较大,难以实现再生细骨料的高效利用。

本文从全国多地收集了废弃混凝土再生砂,通过对再生砂的残余浆体质量分数及基本性能进行测试分析,建立了以残余浆体质量分数为基础,综合再生砂的表观密度、压碎指标、再生胶砂需水量比和再生胶砂强度比等指标的再生砂的分类和

品质评价方法。研究结果表明,所划分的再生砂的基本性能差异性很小,为其差异化高效利用奠定了基础。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥,主要化学成分见表 1 所列。

表 1 水泥主要化学成分 %

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO
w	16.31	6.86	50.11	2.95	2.74	0.73

250 g 水杨酸固体粉末购自天津市恒兴集团有限公司,分析纯;500 mL 无水甲醇购自成都市科隆化学品有限公司,分析纯;水为实验室自来水。

天然砂购自合肥市建材市场;标准砂购自厦门艾思欧标准砂有限公司;再生砂收集于北京、合肥、桐城、广州、成都和重庆 6 个城市共 10 种废弃混凝土再生砂原料。其中:北京来源的再生砂分为母体混凝土强度已知的 C20、C30、C40、C50 和母体混凝土强度未知的第 2 批再生砂(编号为 1 号~5 号);合肥、桐城、广州、成都和重庆的再生砂(编号为 6 号~10 号)母体混凝土强度均未知。为扩大试验样本的数量,利用合肥市水泥研究设计院有限公司的 HRM 立式磨粉磨设备处理桐城和北京第 2 批再生砂,通过组合不同的磨辊压力(3、6、9 MPa)、磨盘转速(500、700、900 r/min)和喂料量(0.3、0.6 t/min)参数,得到 19 种处理后的再生砂,编号分别为 11 号~29 号。

1.2 再生砂残余浆体质量分数测试方法

试验结果表明,水杨酸甲醇溶液能够尽可能溶解再生砂表面的残余水泥浆体,同时几乎不溶解再生砂中的原砂^[12,16],因此本文采用水杨酸-甲醇溶液浸泡法测定再生砂的残余浆体质量分数,具体测试方法如下。

1) 均匀取烘干后的再生砂 100 g,研磨直至能够通过 0.2 mm 筛,采用四分法取出 0.5 g 研磨后的再生砂样品备用。

2) 样品浸泡在 50 mL 质量浓度为 0.3 g/mL

的水杨酸-甲醇溶液中,然后持续搅拌 1 h 使其充分反应。

3) 使用抽滤装置进行过滤,将反应剩余物质在 30 ℃ 烘箱内烘干至恒重后称其质量。

再生砂残余浆体质量分数计算公式为:

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

其中: ω_{RCC} 为再生砂的残余浆体质量分数; m_0 为原再生砂试样质量; m_1 为剩余试样质量。

1.3 再生砂基本性能测试方法

本文基于《建设用砂》(GB/T 1468—2022)和《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010)对所收集的 29 种再生砂的表观密度、压碎指标、再生胶砂需水量比和再生胶砂强度比等基本性能,进行了测试分析。

由于再生砂的粒径与其残余浆体质量分数密切相关^[17],因此本文在测试再生胶砂需水量比时,基于《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010)中规定的 3 个级配区的累计筛余范围的中值来确定各粒径砂的用量,对于 0.15 mm 粒径的砂,累计筛余值取到 100%。

另外,分析再生胶砂需水量比时,为保证再生粗砂(M_x 为 3.16)、再生中砂(M_x 为 2.67)和再生细砂(M_x 为 2.11)的残余浆体质量分数符合要求,其中残余浆体质量分数为 1.11%、5.19%、6.55%、7.44%、10.20%的组采用再生砂与天然砂混合的方法,残余浆体质量分数为 27.04%、30.00%、30.16%、31.22%、32.6%、35.19%的组采用再生砂与硬化水泥浆体混合的方法去调整残余浆体质量分数。

2 试验结果与分析

2.1 再生砂残余浆体质量分数测试结果

再生砂残余浆体质量分数的测定结果如图 1 所示,各编号、各粒段的再生砂均进行 3 次测试,例如,样品 1 号、2 号、3 号均来自于再生砂 1,样品 4 号、5 号、6 号均来自于再生砂 2,以此类推。

从图 1 可以看出,再生砂残余浆体质量分数在 5.0%~34.5%之间,且残余浆体质量分数随着再生砂粒径的增大而减小,这与已有研究结果一致^[12]。这是由于废弃混凝土破碎时,粒径大的再生砂表面的残余水泥浆体因颗粒间的相互挤压、摩擦,更容易被去除,而再生砂的粒径越小,这种剥离的作用越不明显,进而导致小粒径的再生砂残余浆体质量分数越大^[17]。

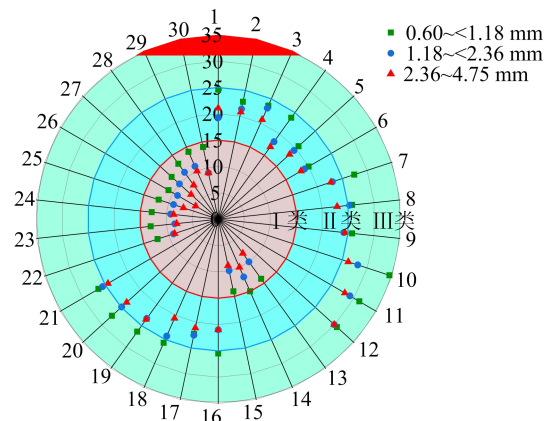


图 1 1号~10号再生砂残余浆体质量分数实测值

2.2 再生砂基本性能测试结果

2.2.1 表观密度测试结果

根据试验得到的各再生砂的表观密度结果,再生砂表观密度与残余浆体质量分数的关系如图 2 所示,此外还收集了文献^[12]的研究数据。

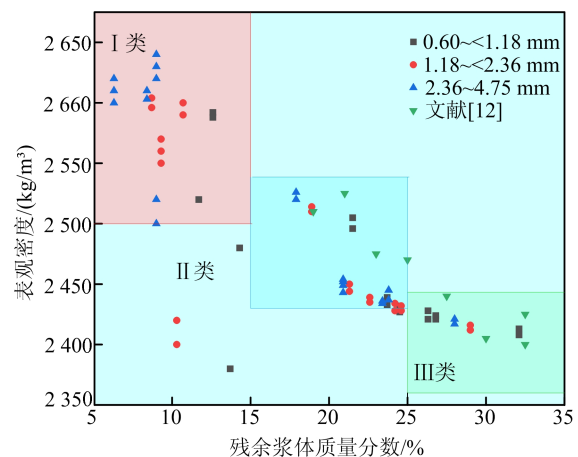


图 2 再生砂表观密度实测值

从图 2 可以看出,再生砂的表观密度分布于 2 400~2 650 kg/m³ 范围内。不同地区同一粒径的再生砂的表观密度均随着残余浆体质量分数的增加而减小,这是由于再生砂表面的残余水泥浆体的表观密度低于砂石等骨料的表观密度,残余浆体质量分数越高,再生砂的表观密度就越低。

2.2.2 压碎指标测试结果

再生砂的压碎指标随其残余浆体质量分数的变化情况如图 3 所示。由图 3 可知,再生砂的压碎指标介于 5%~30%之间,同一地区再生砂的压碎指标随着粒径的增加而增大。另外,对于不同地区的相同粒径的再生砂,压碎指标均随着残余浆体质量分数的降低而减小。这是由于再生砂表面的残余水泥浆体在混凝土破碎的过程中会因

挤压和摩擦产生许多微裂缝,从而导致再生砂的抗压强度显著降低。

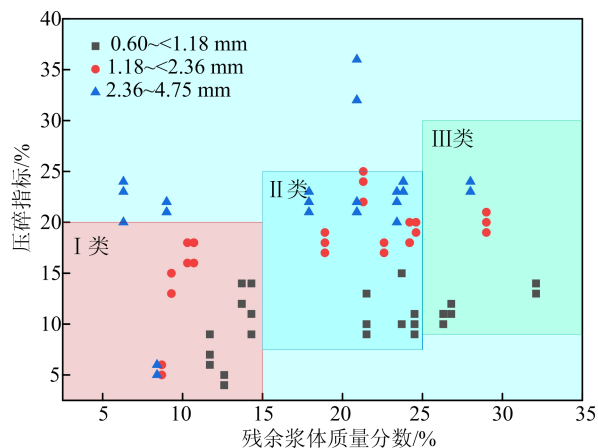


图 3 再生砂压碎指标实测值

2.2.3 再生胶砂需水量比测试结果

再生胶砂需水量比与再生砂残余浆体质量分数之间的关系如图 4 所示。由图 4 可知,不同残余浆体质量分数的再生胶砂需水量比介于 1.1~1.7 之间。对于相同细度模数的再生砂,例如粗砂(M_x 为 3.16),其再生胶砂需水量比随着残余浆体质量分数的增加而增大。这是由于残余水泥浆体中孔隙和裂缝较多,导致再生砂的吸水率增大,从而使再生胶砂的拌合水用量增多。

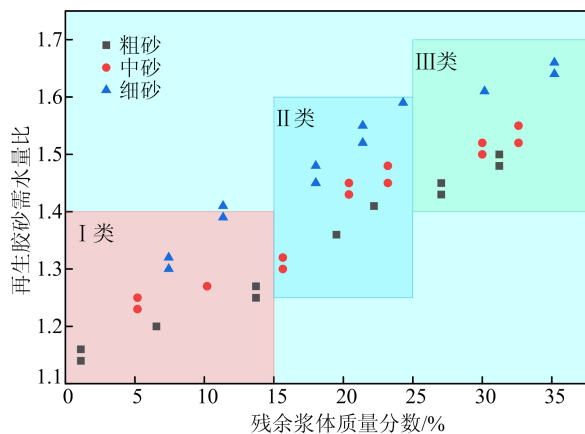


图 4 再生胶砂需水量比实测值

2.2.4 再生胶砂强度比测试结果

再生胶砂强度比与再生砂残余浆体质量分数之间的关系如图 5 所示。由图 5 可知,再生胶砂强度比介于 0.60~0.95 之间,对于相同细度模数的再生砂,例如中砂(M_x 为 2.67),其再生胶砂强度比随着残余浆体质量分数的增大而减小。这主要原因是残余浆体质量分数越高,再生砂的抗压

强度越低。另外,残余浆体质量分数越高,再生胶砂需水量越大,再生胶砂的水灰比随之增大,导致再生胶砂的抗压强度降低。

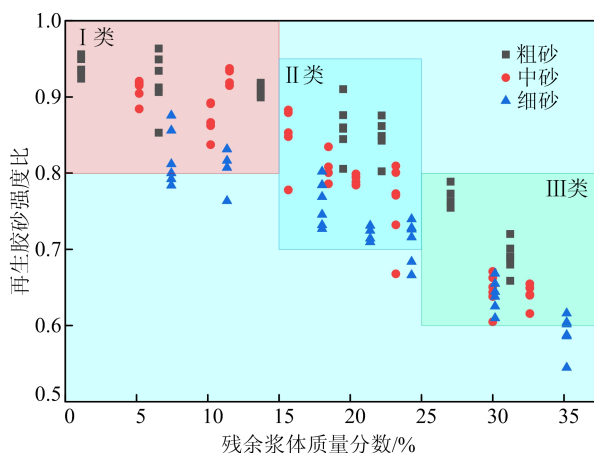


图 5 再生胶砂强度比实测值

2.2.5 微粉质量分数测试结果

再生砂编号为 4 号、5 号、7 号、9 号、11 号、13 号的微粉质量分数如图 6 所示。

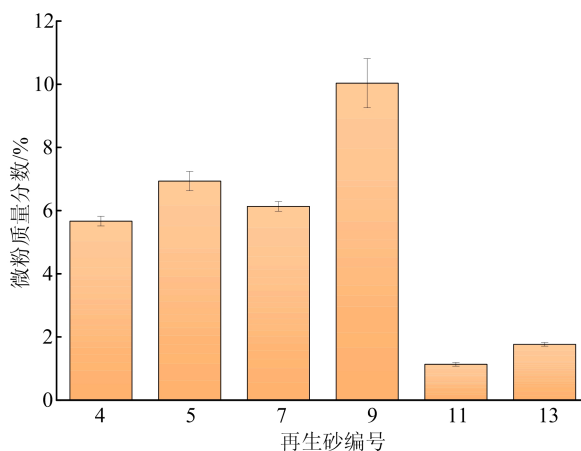


图 6 再生砂微粉质量分数

由图 6 可知:再生砂原料(4 号、5 号、7 号、9 号)的微粉质量分数都较高,微粉质量分数在 6%~12% 范围;对于处理后的再生砂,11 号、13 号微粉质量分数都显著下降,微粉质量分数在 2% 以内。这是由于再生砂经过研磨和除粉处理后去除了大量的微粉,使得微粉质量分数显著降低。

2.2.6 泥块质量分数测试结果

再生砂编号为 5 号、7 号、9 号、11 号、18 号的泥块质量分数如图 7 所示。由图 7 可知:再生砂原料 5 号、7 号、9 号的泥块质量分数较高,泥块质

量分数在 1%~2% 范围;对于处理后的再生砂,11 号、18 号泥块质量分数显著下降,泥块质量分数在 0.2% 以内。这是由于再生砂经过研磨处理后去除了大量的泥块,使得泥块质量分数显著降低。

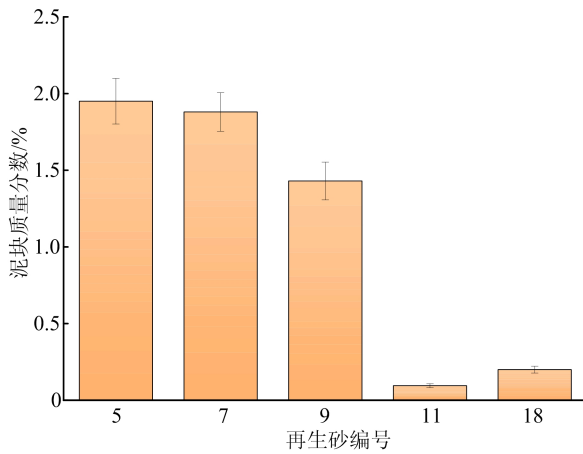


图 7 再生砂泥块质量分数

2.2.7 有害物质质量分数测试结果

本文对 5 号、9 号再生砂进行了有害物质的检测,分别检测其云母、轻物质、有机物、硫化物及硫酸盐、氯化物质量分数,其中有机物均合格,具体检测结果见表 2 所列。

表 2 再生砂有害物质质量分数检测结果 %

编号	云母	硫化物及硫酸盐	氯化物	轻物质
5	0.10	0.10	0.01	0.35
9	0	0.10	0.01	0.75

3 再生砂的分类及品质评价方法

3.1 再生砂的分类

本文在划分类别时,按尽可能将试验数据都包括在内的原则,但由于误差等原因,极少数数据未被包含在内。

3.1.1 残余浆体质量分数分类

基于图 1 所示的再生砂残余浆体质量分数的分布特点,将其划分为 3 类:Ⅰ类再生砂的残余浆体质量分数分布 $w_{RCC} \leq 15\%$,Ⅱ类再生砂的残余浆体质量分数分布 $15\% < w_{RCC} \leq 25\%$,而Ⅲ类再生砂的残余浆体质量分数分布 $w_{RCC} > 25\%$ 。

3.1.2 表观密度分类

根据图 2 所示的表观密度与残余浆体质量分数之间的相关性及其数据分布的特点可知,Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类再生砂对应的表观密度分别为 $\rho_a \geq$

$2\ 500\text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_a \geq 2\ 430\text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_a \geq 2\ 360\text{ kg/m}^3$,均高于我国现行规范《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010)中定义的Ⅰ级($\rho_a \geq 2\ 450\text{ kg/m}^3$)、Ⅱ级($\rho_a \geq 2\ 450\text{ kg/m}^3$)和Ⅲ级($\rho_a \geq 2\ 200\text{ kg/m}^3$)再生细骨料的表观密度值。这是由于本文所针对的再生细骨料是废弃混凝土破碎而来的,不包含红砖、木材等其他建筑固体废弃物,因此所建立的划分标准更严格。

3.1.3 压碎指标分类

依据压碎指标与残余浆体质量分数之间的相关性及其数据分布的特点,按照残余浆体质量分数对压碎指标划分类别,由图 3 可知,Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类再生砂对应的压碎指标分别为 $\delta_c \leq 20\%$ 、 $\delta_c \leq 25\%$ 和 $\delta_c \leq 30\%$,根据分类结果可知与现行规范保持一致。

3.1.4 再生胶砂需水量比分类

由图 4 可知,基于再生胶砂需水量比与残余浆体质量分数之间的相关性及其数据分布的特点,按照残余浆体质量分数对再生胶砂需水量比划分类别。结果显示,Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类再生砂对应的再生胶砂需水量比分别为 $\beta_w \leq 1.4$ 、 $\beta_w \leq 1.6$ 和 $\beta_w \leq 1.7$,比较可知,Ⅰ类和Ⅱ类要求一致,Ⅲ类的要求高于现行规范的 $\beta_w \leq 1.8$ 。

3.1.5 再生胶砂强度比分类

基于再生胶砂强度比与残余浆体质量分数之间的相关性及其数据分布的特点,按照残余浆体质量分数对再生胶砂强度比划分类别。由图 5 可知,Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类再生砂对应的再生胶砂强度比分别为 $\beta_f \geq 0.8$ 、 $\beta_f \geq 0.7$ 和 $\beta_f \geq 0.6$,分类结果与现行规范保持一致。在分类中出现Ⅲ类再生砂的再生胶砂需水量比要求高于现行规范,但是其再生胶砂强度比要求却持平,这可能是由于掺入强度较低、棱角分明的硬化水泥浆体取代了部分再生砂,导致胶砂强度偏低。根据结果可知,即使强度有所下降,也满足现行规范的要求。

3.1.6 其他性能指标分类

微粉质量分数、泥块质量分数和有害物质限量与残余浆体质量分数指标之间没有很好的相关性,本文在所收集到的再生砂的检测结果显示,与现行规范的基础上划分类别,Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类再生砂对应的微粉质量分数分别为 $w_f \leq 2\%$ 、 $w_f \leq 6\%$ 和 $w_f \leq 10\%$,要求高于现行规范的Ⅰ级($w_f \leq 6\%$)、Ⅱ级($w_f \leq 10\%$)和Ⅲ级($w_f \leq 12\%$)再生细骨料的微粉质量分数值;Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类再生砂的泥块质量分数分别为 $w_c \leq 1\%$ 、 $w_c \leq 2\%$ 和 $w_c \leq$

3%,与现行规范一致;经比较发现所收集的再生砂的有害物质质量分数均满足现行规范的要求,因此,有害物质限量要求与现行规范也保持一致。

3.2 分类结果

再生砂各项品质评价指标及分类结果见表 3 所列。

表 3 再生砂的品质评价指标及分类结果

指标	I 类	II 类	III 类
残余浆体质量分数/%	≤15	≤25	>25
表观密度/(kg/m ³)	≥2 500	≥2 430	≥2 360
压碎指标/%	≤20	≤25	≤30
再生胶砂需水量比	≤1.4	≤1.6	≤1.7
再生胶砂强度比	≥0.8	≥0.7	≥0.6
微粉质量分数/%	≤2	≤6	≤10
泥块质量分数/%	≤1	≤2	≤3
云母质量分数/%	≤1	≤2	
有机物质量分数	合格		
ω (硫化物及硫酸盐)/%	≤0.5		
氯化物质量分数/%	≤0.01	≤0.02	≤0.06
轻物质质量分数/%	≤1		

4 结 论

本文收集了来自北京、合肥、桐城、广州、成都和重庆的废弃混凝土再生砂,通过对再生砂的残余浆体质量分数、表观密度、压碎指标、再生胶砂需水量比和强度比等指标进行试验分析,建立再生砂高效分类依据及品质评价方法,结论如下。

1) 再生砂的残余浆体质量分数随着粒径的增大而降低,且残余浆体质量分数越大,再生砂的表观密度越低,压碎指标越大,再生胶砂需水量比越高,再生胶砂强度比越低。

2) 再生砂的残余浆体质量分数小于 15%时,各项基本性能指标,如表观密度、压碎指标、再生胶砂需水量比和强度比指标均满足现行国家标准的要求,本文定义为 I 类再生砂;再生砂的残余浆体质量分数介于 15%~25%时,对应的各项基本性能指标均满足现行国家标准的二级再生细骨料要求,本文定义为 II 类再生砂;残余浆体质量分数高于 25%的再生砂,其基本性能均较差,本文定义为 III 类再生砂。

3) 基于上述分类,建立了再生砂的品质评价方法,为再生砂的差异化高效利用提供理论基础。

[参 考 文 献]

[1] 杨普. 新时代下我国建筑垃圾处理现状和应对对策[J]. 居

业,2022(1):229-231.

- [2] 索伦,赵燕茹,彭鹏,等. 再生混凝土物理力学性能研究综述[J]. 公路交通科技(应用技术版),2014,10(4):241-244.
- [3] 廖琳,李阳,韩继红,等. 城市固废再生建材的应用实践[J]. 绿色建筑,2011,3(2):17-20.
- [4] AGARWAL A, RAMANA G V, DATTA M, et al. Environmental assessment of unprocessed sand-sized construction & demolition waste for geotechnical reuse[J]. Journal of Cleaner Production,2022,363:132504.
- [5] ULSEN C, CONTESSOTTO R, DOS S M R, et al. Quantification of the cement paste and phase's association in fine recycled aggregates by SEM-based image analysis[J]. Construction and Building Materials,2022,320:126206.
- [6] 陈宗平,王妮,郑述芳,等. 再生细骨料水泥砂浆的力学性能研究[J]. 混凝土,2011(8):115-117,120.
- [7] RAVINDRARAJAH R S, TAM C T. Recycling concrete as fine aggregate in concrete[J]. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete,1987,9(4):235-241.
- [8] SONG I H, RYOU J S. Hybrid techniques for quality improvement of recycled fine aggregate[J]. Construction and Building Materials,2014,72:56-64.
- [9] NAWA T, OGAWA H. Improving the quality of recycled fine aggregates by selective removal of brittleness defects[J]. Legislation, Technology and Practice of Mine Land Reclamation,2014,1:371.
- [10] 郑子麟. 全再生细骨料的制备及其在砂浆和混凝土中的应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
- [11] DE J M S, GUTIERREZ P A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate[J]. Construction and Building Materials,2009,23(2):872-877.
- [12] ZHAO Z, REMOND S, DAMIDOT D, et al. Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials,2013,2(3/4):186-203.
- [13] 杜婷,李惠强,吴贤国. 再生混凝土的研究现状和存在问题[J]. 建筑技术,2003(2):133-134.
- [14] 隋玉武,刘述,孟光明,等. 废弃混凝土再生砂加热研磨活化技术及性能研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(8):2594-2599.
- [15] 李秋义,李云霞,姜玉丹. 再生细骨料质量标准及检验方法的研究[J]. 青岛理工大学学报,2005,26(6):6-9.
- [16] GUTTERIDGE W A. On the dissolution of the interstitial phases in Portland cement[J]. Cement and Concrete Research,1979,9(3):319-324.
- [17] ZHANG H, XIAO J, TANG Y, et al. Long-term shrinkage and mechanical properties of fully recycled aggregate concrete: testing and modelling[J]. Cement and Concrete Composites,2022,130:104527.

(责任编辑 吴 亮)