

引用本文:陈旭勇,艾阳正,程书凯,等.再生粗骨料性能指标分布及相关性分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(2):1-10.

CHEN Xuyong, AI Yangzheng, CHENG Shukai, et al. Performance indexes distribution and correlation analysis of recycled coarse aggregate [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 1-10.

DOI:10.19815/j.jace.2021.10082

## 再生粗骨料性能指标分布及相关性分析

陈旭勇,艾阳正,程书凯,徐 雄

(武汉工程大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**影响再生粗骨料质量等级的因素与指标众多,在对再生粗骨料进行分级时不便于实际操作,因此需要从众多的因素和指标中筛选出适合对再生粗骨料进行分级的指标,为再生粗骨料的分级奠定基础。通过试验测得11种不同批次的再生粗骨料各项性能指标,对每批再生粗骨料所含成分进行检测,同时结合不同文献中74种不同批次再生粗骨料,利用SPSS统计分析软件研究了吸水率、压碎指标、表观密度、堆积密度的分布特点,并对其进行Shapiro-Wilk正态性检验,以变异系数评估了指标的离散程度。然后采用Pearson相关系数和Spearman相关系数分析了各指标的相关性,最后通过试验测得的再生粗骨料各项性能指标,拟合了表观密度与吸水率、吸水率与压碎指标、压碎指标与表观密度的线性方程。结果表明:微粉含量、针片状含量、杂物含量可从工艺和程序上进行改进,可作为控制再生骨料质量的限制性因素;表观密度、吸水率、压碎指标服从正态分布,且吸水率和压碎指标的离散程度更大,因此提出了以吸水率和压碎指标作为分级指标的建议;从相关性角度分析,吸水率与密度类指标具有较高的相关程度,进一步说明吸水率可以代表密度类指标作为分级指标。

**关键词:**再生粗骨料;分级指标;正态性检验;相关性分析;骨料性能

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)02-0001-10

## Performance indexes distribution and correlation analysis of recycled coarse aggregate

CHEN Xuyong, AI Yangzheng, CHENG Shukai, XU Xiong

(College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** There are many factors and indexes affecting the quality grade of recycled coarse aggregate, which is not convenient for practical operation. Therefore, it is necessary to select the suitable index for the classifying of recycled coarse aggregate from many factors and indexes and lay a foundation for the classifying of recycled coarse aggregate. The performance indexes of 11 batches of recycled coarse aggregate were measured and the components of each batch of recycled coarse aggregate were detected. At the same time, combined with 74 different batches of recycled coarse aggregate in different literature, the distribution characteristics of water absorption, crushing index, apparent density and bulk density were studied by using SPSS statistical analysis

收稿日期:2021-10-12

基金项目:湖北省重点研发计划项目(2020BAB071);武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2021115)

作者简介:陈旭勇(1979-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:Chenxy@wit.edu.cn.

通信作者:程书凯(1989-),男,工学博士,讲师,硕士生导师,E-mail:chengsk@wit.edu.cn.

software, and the Shapiro-Wilk normality test was carried out. The dispersion degree of the index was evaluated by the coefficient of variation. The correlation of each index was analyzed by Pearson correlation coefficient and Spearman correlation coefficient. Through the performance indexes of recycled coarse aggregate measured in the test, the linear equations of apparent density and water absorption, water absorption and crushing index, crushing index and apparent density were fitted. The results show that the micro powder content, needle and flake content and impurity content can be reduced through process adjustment and equipment modification, and can be used as the limiting factor to control the quality of recycled aggregate. The apparent density, water absorption and crushing index obey the normal distribution, and the dispersions of water absorption and crushing index are greater. Therefore, it is proposed to take water absorption and crushing index as classifying indexes. From the correlation analysis, the water absorption has a high correlation with the density indexes, which further shows that the water absorption can represent the density indexes as the classifying index.

**Key words:** recycled coarse aggregate; classifying index; normality test; correlation analysis; aggregate performance

## 0 引言

伴随中国建筑与交通行业的迅猛发展,作为建筑材料的天然骨料被大量开采使用,不但造成资源的紧缺,还对环境造成了一定的影响<sup>[1]</sup>。与此同时,一些老旧的建筑、道路、桥梁等混凝土设施达到了服役年限,经拆除之后产生了大量的混凝土固废。因此,中国建筑业面临着天然资源匮乏以及混凝土固废处理的两大问题,如果能将混凝土固废再利用,那么这两大问题都将得到解决。

再生粗骨料由废弃混凝土破碎得到,由于再生粗骨料表面附着砂浆,使其各项性能劣于天然粗骨料<sup>[2]</sup>,由再生粗骨料制得的再生混凝土的破坏往往发生在新旧混凝土界面薄弱的过渡区,再生混凝土的各项性能也逊色于天然混凝土。再生粗骨料来源广泛<sup>[3]</sup>,堆积环境与时长、破碎方式不同,这就导致了其性质不一,有的性质与天然骨料相媲美,可以应用于部分结构构件,而有的性质很差,仅能运用于非结构构件。如果能够对再生粗骨料进行分级优选,提高再生骨料利用层次和利用率,这对固废资源化应用以及环境的保护有重要的意义。

国外发达国家对废旧混凝土的再生利用研究相对较早,对再生骨料分级研究已取得较好的成果,并制定了相关的再生骨料质量标准 and 规范。国际材料与结构研究实验室联合会(RILEM)<sup>[4]</sup>采用再生粗骨料吸水率、表观密度、不同表观密度的颗粒含量、有机物含量对再生粗骨料进行分级;日本在1994年颁布《再生混凝土材料质量试行条例》,通过压碎指

标和吸水率对其进行分级<sup>[5]</sup>;BS<sup>[6]</sup>和 ASTM<sup>[7]</sup>也对应用于不同工程的再生骨料各项指标进行了划分,主要划分指标为最低表观密度、最大吸水率、最大针片状含量、最大冲击值、最大氯含量、最大硫酸盐含量;德国和比利时等采用吸水率和饱和表观干密度作为再生粗骨料分级控制指标<sup>[8]</sup>。目前大量中国研究者<sup>[8-11]</sup>对再生粗骨料的分级做出研究,在分级指标的选择上有所不同,其中表观密度、吸水率、压碎指标、砖含量、杂物含量、毛细孔空隙率等被用作分级指标。中国现行的《混凝土用再生粗骨料》(GB 25177—2010)<sup>[12]</sup>将微粉和泥块含量、吸水率、压碎指标、表观密度、有害物质含量等作为对再生粗骨料的分级指标。

本文测定了11种不同批次再生粗骨料的压碎指标、吸水率、表观密度、堆积密度、针片状含量、微粉含量、所含杂物成分及含量,结合文献[9]~[11]、[13]~[41]中74种不同批次的再生粗骨料,研究了各指标的分布特点、各指标之间的相关性,讨论通过线性拟合各指标之间关系的可能性,从不同角度为再生粗骨料分级指标的选择提供可行性建议。

## 1 试验概况

### 1.1 试验原料及仪器

试验原料来自于武汉市汉阳区建筑弃料再生材料厂、湖北惠迪再生资源开发利用有限公司的11种不同批次再生粗骨料,经筛分得到5~25 mm连续级配。各批次再生粗骨料的压碎指标、吸水率、表观密度、堆积密度、针片状含量、微粉含量见表1。

表 1 各批次再生粗骨料性能指标

Table 1 Performance indexes of each batch of recycled coarse aggregate

批次	压碎指标/%	吸水率/%	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	针片状含量/%	微粉含量/%
RCA-1	12.08	4.52	2 600	1 355	1.7	0.7
RCA-2	8.52	3.03	2 617	1 365	1.4	1.1
RCA-3	14.71	5.72	2 564	1 307	2.3	0.9
RCA-4	11.00	3.90	2 589	1 350	1.6	1.3
RCA-5	18.81	7.26	2 542	1 263	2.6	1.2
RCA-6	12.90	5.20	2 587	1 353	1.4	0.5
RCA-7	17.90	6.50	2 554	1 300	2.3	0.8
RCA-8	14.30	5.25	2 577	1 335	1.8	1.1
RCA-9	17.00	6.40	2 550	1 305	2.2	0.6
RCA-10	14.90	5.90	2 568	1 325	1.8	1.2
RCA-11	15.12	6.35	2 560	1 302	3.1	1.3

所用仪器设备包括计量计数电子天平、立式鼓风干燥箱、RFP-03 型智能测力仪、受压试模、摇筛机、方孔筛、针状规格仪与片状规格仪、吊篮、有溢水孔的盛水容器、毛巾、陶瓷盘若干。

1.2 试验过程

1.2.1 再生粗骨料各项指标测试

压碎指标、针片状含量根据《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)<sup>[42]</sup>中对应的测试方法进行。

吸水率根据《轻集料及其试验方法》(GB/T 17431.2)<sup>[43]</sup>中对应的测试方法进行。

表观密度根据《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)<sup>[42]</sup>表观密度测试方法中的液体比重天平法进行测试。

堆积密度根据《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)<sup>[42]</sup>中松散堆积密度的测试方法进行。

微粉含量根据《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)<sup>[42]</sup>中含泥量的测试方法进行。

再生粗骨料各项指标测试结果如表 1 所示。

1.2.2 再生粗骨料成分检测

当前对建筑物的拆除主要通过爆破等快捷的手段,导致混凝土固废不可避免地与其他物质混合在一起;再生粗骨料来源广泛,所含杂物种类不同,各式的破碎传输工艺也使对杂物的筛除程度不同,常见的杂物有沥青、砖粒、木屑、塑料、玻璃等,这些材料的存在会对再生混凝土的强度和刚度有较强的负面影响<sup>[44]</sup>。因此,对 11 种不同批次的再生粗骨料的成分进行取样检测,部分批次再生粗骨料如图 1 所示,检测结果显示,虽然不同批次的再生粗骨料所含杂物成分与含量不同,但都达到了《混凝土用再生粗骨料》(GB 25177—2010)<sup>[12]</sup>中对杂物含量的限制。杂物中的轻物质便于分离,而砖、沥青等难于分



(a) RCA-1



(b) RCA-11

图 1 部分批次再生粗骨料外观形貌

Fig.1 Appearance of some batches of recycled coarse aggregate

离且在部分混凝土固废中会出现大量存在的情况,其中砖含量经常被作为分级指标之一,鉴于杂物成分复杂、难以分离,应当作为一个限制类指标。笔者建议从精细化的拆除手段到破碎拆分的工艺过程中进行优化,一者最大程度地避免混凝土废弃物与杂

物混杂,二者提高杂物筛除能力。

测得的再生粗骨料的针片状含量介于 1.4%~3.1%之间,远低于《混凝土用再生粗骨料》(GB 25177—2010)<sup>[12]</sup>中针片状含量小于 10%的要求,这表明当前的破碎传输工艺能够很好地控制针片状含量。微粉含量介于 0.5%~1.3%之间,部分达到该指标Ⅰ类骨料要求,其余的则在Ⅱ类骨料范畴中,由于再生粗骨料经过简单冲洗便能除去大量的微粉,故微粉含量通常不作为再生粗骨料主要的分级指标。

## 2 结果与讨论

### 2.1 指标的分布特点及正态性检验

无论是在数学领域,还是工程等领域,正态分布都是非常重要的一个概率分布,如果一个指标服从正态分布,那么就可以对指标进行频数分布估计、95%范围上下限划分、控制试验中测量误差。在分级指标的选取上期望该指标服从正态分布。

将试验所得 11 种不同批次再生粗骨料并结合文献中 74 种不同批次再生粗骨料,绘制了再生粗骨料吸水率、表观密度、压碎指标、堆积密度的频率直方图(图 2),并用 Shapiro-Wilk 检验对各指标的分布做正态性检验,最后通过变异系数对各指标的离散程度进行分析。

Shapiro-Wilk 检验用于验证一个随机样本数据是否来自正态分布。检验使用的统计量  $W$  定义为

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{1}$$

式中: $\bar{y}$  为样本均值; $y_i$  为样本数据; $a_i$  为常数项; $n$  为样本数量。

$a = (a_1, \cdots, a_n)^T$  符合以下条件: $(\sum_{i=1}^n a_i y_i)^2$  为  $(n-1)\sigma^2$  的最佳线性无偏估计, $\sigma$  为样本数据的正态分布标准差。 $a$  的确切值为

$$a = (m^T V^{-1} V^{-1} m)^{-\frac{1}{2}} m^T V^{-1} \tag{2}$$

式中: $V$  为协方差矩阵,属于  $n$  个标准正态分布随机变量的顺序统计量; $m$  为这些变量的期望组成的向量。

统计量  $W$  的最大值为 1,且统计量的值越大,则认为样本接近正态分布的程度越大。有了统计量,再设定一个显著性水平  $\alpha=0.05$ ,通过计算 P-value 可知,如果 P-value 大于显著性水平  $\alpha$ ,则认为

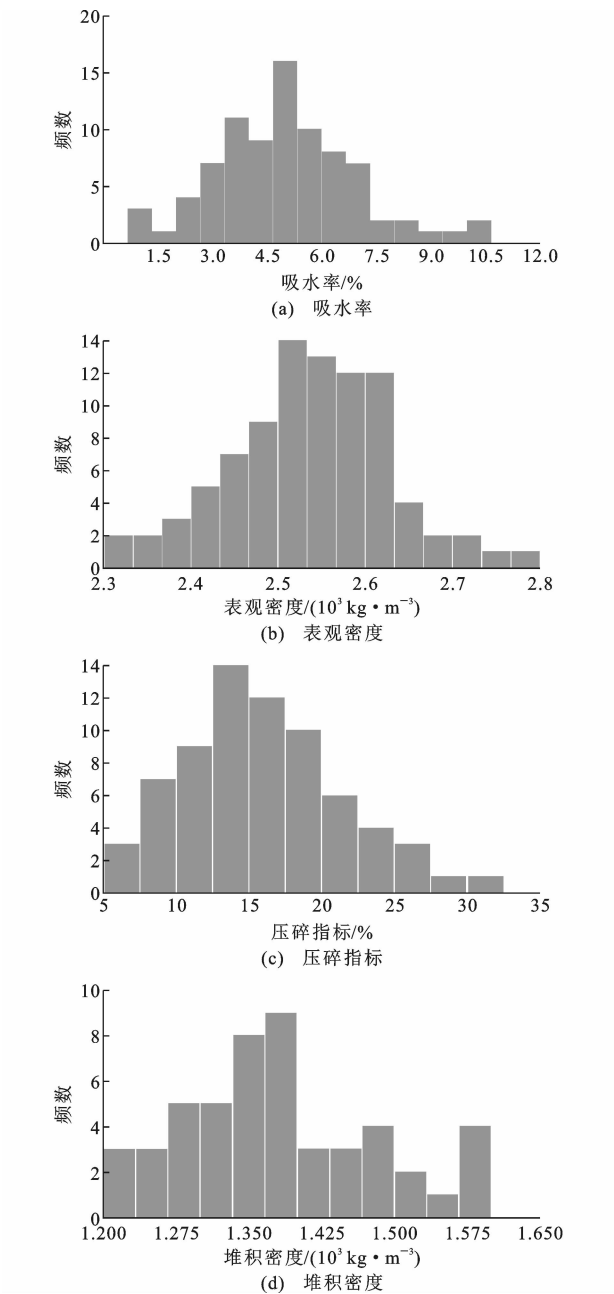


图 2 指标的频率直方图

Fig. 2 Frequency distribution histograms of indexes  
接受样本服从正态分布的假设,反之则拒绝样本服从正态分布。

利用 SPSS 统计分析软件,得到的 Shapiro-Wilk 检验结果如表 2 所示。

表 2 Shapiro-Wilk 检验结果  
Table 2 Shapiro-Wilk test results

指标	P-value	W
吸水率	0.205	0.980
压碎指标	0.195	0.970
表观密度	0.604	0.988
堆积密度	0.019	0.840

通过图 2 能够大致能看出吸水率、压碎指标、表观密度呈现“中间高,两边低”且对称等正态分布的特点,而堆积密度则没那么明显。进一步通过表 2 可知,吸水率、压碎指标、表观密度的 P-value 大于显著性水平  $\alpha=0.05$ ,则认为接受这 3 个指标服从正态分布的假设,比较吸水率、压碎指标、表观密度的统计量  $W$ ,在接近正态分布的程度上表观密度大于吸水率大于压碎指标。堆积密度的 P-value 仅为 0.019,小于显著性水平  $\alpha=0.05$ ,即拒绝该指标服从正态分布的假设。

2.2 指标的分布及离散程度

如果指标离散的程度越大,分布的范围越广,那么利用该指标对再生骨料分级区间的划分越有利。当两组数据不是同一数量级或数据量纲不同的时候,直接采用标准差来比较数据的离散程度是不合适的,为了除去量纲和测量尺度的影响,采用变异系数  $C$  来比较数据的离散程度,变异系数  $C$  是一个量纲为 1 的数,这样比较起来就比较客观。变异系数  $C$  表示为

$$C=\frac{\sigma}{\bar{y}} \tag{3}$$

各项指标的标准差  $\sigma$ 、均值  $\bar{y}$  和离散程度分析结果如表 3 所示。

表 3 离散程度分析结果

Table 3 Dispersion degree analysis results

指标	$\sigma$	$\bar{y}$	$C$
吸水率	1.93	5.04	0.38
压碎指标	5.52	15.84	0.35
表观密度	91.43	2 536.91	0.04
堆积密度	100.95	1 383.47	0.07

由表 3 可知,吸水率和压碎指标具有较大的变异系数,分别达到 0.38 和 0.35,这表明相较于表观密度和堆积密度,吸水率和压碎指标的离散程度更大,故对于再生粗骨料分级指标的选择,从离散程度的角度出发时,应优先考虑压碎指标和吸水率。

2.3 指标相关性分析与方程拟合

2.3.1 指标的相关性

大量的研究表明<sup>[1,45-46]</sup>,再生粗骨料与天然粗骨料最大的区别在于再生粗骨料附着了大量的砂浆,在再生混凝土中这些旧砂浆与新砂浆形成的界面过渡区成为了最薄弱的区域,细小的裂缝也最易于在这里形成,紧接着发展成贯穿整个混凝土的裂缝,造成混凝土构件的破坏。

附着砂浆松散、多孔的性质降低了再生粗骨料

的密度类指标,提高了再生粗骨料的吸水率、压碎指标,因此这几个指标是骨料自身性质的体现,也使得指标之间具有一定的线性关系。杂物含量、针片状含量更大程度上受外部因素的影响,它们的分布呈离散状,与前面一些指标通常不具有线性关系。附着砂浆含量的测试方法主要有强酸浸泡法和球磨法,但这些方法不便于工程的实际应用,因此,有的学者研究了再生粗骨料的一些指标和附着砂浆含量的关系<sup>[47-48]</sup>,拟合了再生粗骨料各指标与附着砂浆含量的表达式。

总的来说,再生粗骨料表面附着砂浆越多,它的吸水率越高,密度类指标越低,压碎指标越高,再生粗骨料的质量越差。虽然各指标总体上有这样的一种趋势,但各指标之间相关性到底如何,如何定量地描述指标间的相关性,还具有很大的研究价值。

笔者重点研究了吸水率、压碎指标、表观密度、堆积密度间的相关性,描述两组变量的相关性的方法有 Pearson 相关系数、Spearman 相关系数、Kendall 相关系数,其中 Pearson 相关系数要求两组变量是连续数据,总体是正态分布,且二者之间是线性关系,Kendall 相关系数要求变量为有序分类变量,当不满足上面两种情况时,则采用 Spearman 相关系数。

在上面的研究中,吸水率、压碎指标、表观密度大致呈现正态分布且为连续数据,也具有线性关系,因此采用 Pearson 相关系数描述它们之间的相关性。Pearson 相关系数  $\rho_{x,y}$  可以表示为

$$\rho_{x,y}=\frac{\sum(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})}{\sqrt{\sum(X-\bar{X})^2\sum(Y-\bar{Y})^2}} \tag{4}$$

式中: $X$ 、 $Y$  分别为两组变量的数据值; $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  为两组变量的平均值。

计算得到吸水率、压碎指标、表观密度之间的相关系数如表 4 所示。

表 4 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient

变量	$\rho_{x,y}$		
	吸水率	压碎指标	表观密度
吸水率	1.00	0.52	-0.74
压碎指标	0.52	1.00	-0.48
表观密度	-0.74	-0.48	1.00

Pearson 相关系数介于 0~1 之间时,说明两变量之间呈正相关,介于 -1~0 之间时,说明两变量呈负相关,相关系数的绝对值越接近 1,则说明相关程度越大,其中 0~0.2 称为极弱相关或无相关,

0.2~0.4 称为弱相关,0.4~0.6 称为中等程度相关,0.6~0.8 称为强相关,0.8~1.0 称为极强相关。由表 4 可知,表观密度与吸水率相关系数为-0.74,呈负的强相关,与压碎指标相关系数为-0.48,呈负的中等程度相关,吸水率与压碎指标相关系数为0.52,呈中等程度的正相关。因此,在骨料分级的指标选择中,表观密度和吸水率可以二选一,而在配合比设计时需考虑到再生粗骨料的附加水,因此建议以吸水率作为分级指标之一。

由于堆积密度不满足 Pearson 相关系数正态分布的适用条件,因此采用 Spearman 相关系数。Spearman 相关系数先将两组变量由大到小排序,并定义等级,记为 $(X_i, Y_i)$ ,然后利用公式(5)计算 Spearman 相关系数 $\rho$ 。

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \tag{5}$$

式中: $d_i = X_i - Y_i$ 。

堆积密度与吸水率、压碎指标、表观密度的 Spearman 相关系数结果如表 5 所示。

表 5 Spearman 相关系数

Table 5 Spearman correlation coefficient

变量	$\rho$		
	吸水率	压碎指标	表观密度
堆积密度	-0.78	-0.43	0.52

由表 5 可知,堆积密度与压碎指标的相关系数为-0.43,呈中等程度的负相关。堆积密度与表观密度同作为密度类指标,并没有预期较高的相关程度,相关系数为0.52,仅在中等程度相关范畴,原因在于表观密度是骨料质量与其表观体积(骨料排开水的体积)之比,侧重于骨料自身的密实程度,而堆积密度是单位装填体积(包含骨料间的堆积空隙)下骨料的质量,一定程度上反映了骨料的堆积特性。堆积密度与吸水率的相关系数达到了-0.78,相较于表观密度与吸水率有更强的负相关关系,由此推测吸水率与密度类指标都有着较好的相关性。综合前面堆积密度的分布和离散程度,通常不将堆积密度作为再生粗骨料分级的指标。

2.3.2 指标的方程拟合

已有大量的研究者<sup>[30,49-51]</sup>拟合了再生粗骨料表观密度与吸水率、压碎指标与吸水率之间的线性方程,但不同研究者所拟合的方程不同,拟合优度也有大有小,原因可能在于再生粗骨料种类广泛,所取样本的级配以及试验方法不同。本文采用杂物、砖含

量低于1%、粒径为5~25 mm 连续级配的再生碎石粗骨料,结合试验测得的11种再生粗骨料,拟合了表观密度与吸水率、吸水率与压碎指标、压碎指标与表观密度的线性方程,如图3所示。

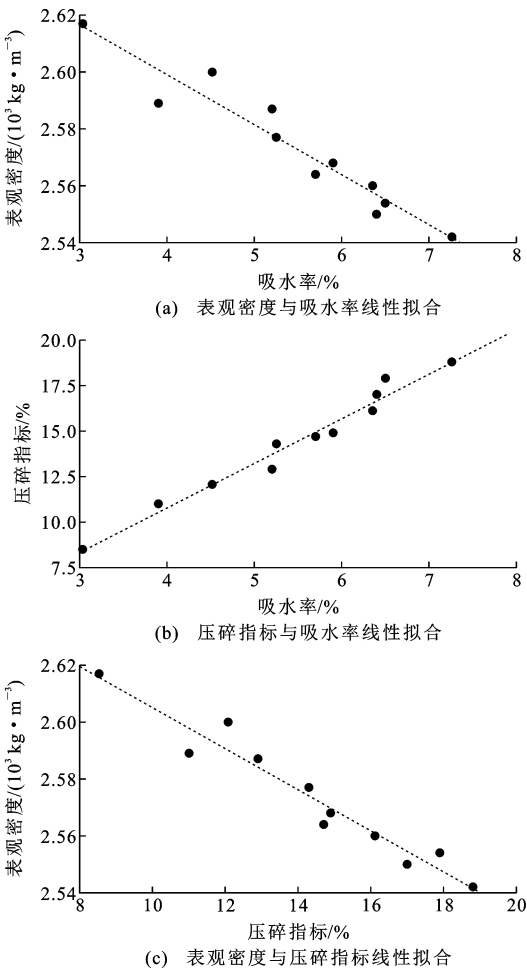


图 3 指标的线性拟合

Fig. 3 Linear fitting of index

由图 3 可知,表观密度与吸水率拟合方程表达式为

$$p = 2\,670 - 17.64s \quad R^2 = 0.922 \tag{6}$$

式中: $p$  为表观密度; $s$  为吸水率。

压碎指标与吸水率拟合方程表达式为

$$c_1 = 1.07 + 2.44s \quad R^2 = 0.972 \tag{7}$$

式中: $c_1$  为压碎指标。

压碎指标与表观密度拟合方程表达式如式(8)所示。

$$c_1 = 2\,680 - 7.2p \quad R^2 = 0.942 \tag{8}$$

可以看出,当选用的再生粗骨料在杂物、砖含量很低,且采用相同的级配时,各指标间线性拟合程度很高,而在引入其他文献中再生粗骨料指标数据时,各指标的离散程度增大,线性拟合程度会出现下降

的趋势。这可能是由于不同研究者所选取的再生粗骨料成分、骨料级配、试验条件与方法不同所导致,因此在结合文献拟合方程时,应对文献中的数据进行筛选。

### 3 结 语

(1)再生粗骨料中的杂物种类复杂,部分物质难以分离,杂物的存在会对再生混凝土的强度和刚度有较强的负面影响,建议从精细化的拆除手段到破碎拆分的工艺过程中进行优化,并将杂物含量作为一个限制性的指标,将杂物含量控制在很低的一个范围。

(2)经正态性检验,再生粗骨料的表观密度、吸水率、压碎指标均服从正态分布,堆积密度不服从正态分布。从离散程度的角度出发,吸水率和压碎指标相较于表观密度、堆积密度的离散程度更大。结合指标的分布特点,吸水率和压碎指标更适合作为再生粗骨料分级指标。

(3)吸水率与表观密度和堆积密度有较强的相关性,吸水率与压碎指标、表观密度与压碎指标之间的相关性适中,进一步证明使用吸水率代表密度类指标作为分级指标的可行性。

(4)当选用的再生粗骨料杂物与砖含量很低、试验方法相同且具有相同的级配时,能够很好地拟合各指标间的线性方程,以此通过其中一项指标来估计另一项指标。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 张海燕,胡忠豪,吴波.粗骨料的分类及对再生混凝土抗压强度的影响[J].工业建筑,2018,48(1):138-144.  
ZHANG Haiyan, HU Zhonghao, WU Bo. Classification of coarse aggregates and its effect on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Industrial Construction, 2018, 48(1): 138-144.
- [2] VERIAN K P, ASHRAF W, CAO Y Z. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 133: 30-49.
- [3] 李爽,张金喜,金珊珊,等.再生粗骨料分级方法现状评述及试验探讨[J].公路交通科技(应用技术版), 2008, 4(增1): 208-212.  
LI Shuang, ZHANG Jinxi, JIN Shanshan, et al. Review and experimental discussion on classification methods of recycled coarse aggregate[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 4(S1): 208-212.
- [4] HENDRIKS C F, PIETERSEN H S. The sustainable raw materials-construction and demolition waste[M]. Paris: RILEM Publications, 2000.
- [5] TOMOSAWA F. The recycling of concrete-the Japanese experience[C]//MALHOTRA V M. Proceedings of the 4th Canmet/ACI/JCI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. Tokyo: ACI, 1998: 221-237.
- [6] Specification for aggregates from natural sources for concrete; BS 882[S]. London: British Standards Institution, 1992.
- [7] Standard specification for graded aggregate material for bases or sub-bases for highways or airports; ASTM D2940[S]. Washington DC: ASTM International, 2003.
- [8] 吴瑾,朱磊,景宪航.再生粗骨料的随机特性及分级方法研究[J].工程力学, 2015, 32(2): 97-104, 130.  
WU Jin, ZHU Lei, JING Xianhang. Study on stochastic characteristics and classification criteria of recycled coarse aggregate[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 97-104, 130.
- [9] 苗春,刘昕,倪庆丰.再生粗骨料砂浆含量测定方法及分级研究[J].四川建筑科学研究, 2011, 37(4): 219-222.  
MIAO Chun, LIU Xin, NI Qingfeng. Research on measurement method for mortar content of RCA and its classification[J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(4): 219-222.
- [10] 肖建庄,雷斌,袁飏.废混凝土再生粗集料性能试验与分级标准研究[J].四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(增1): 23-28.  
XIAO Jianzhuang, LEI Bin, YUAN Biao. On the properties and classification standard of recycled coarse aggregate derived from waste concrete[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(S1): 23-28.
- [11] 李爽.再生水泥混凝土粗骨料性能及其分级方法的研究[D].北京:北京工业大学, 2009.  
LI Shuang. Experimental study on the performance and classification systems of recycled concrete coarse aggregate[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
- [12] 混凝土用再生粗骨料: GB 25177—2010[S].北京:中国建筑工业出版社, 2010.  
Recycled coarse aggregate for concrete; GB 25177—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building

- Press, 2010.
- [13] 肖建庄, 雷 斌, 袁 颢. 不同来源再生混凝土抗压强度分布特征研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(5): 94-100.
- XIAO Jianzhuang, LEI Bin, YUAN Biao. Compressive strength distribution of recycled aggregate concrete derived from different origins[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(5): 94-100.
- [14] 贺春鹏, 付兴国, 孙相博, 等. 混凝土用再生粗骨料性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(2): 98-100.
- HE Chunpeng, FU Xingguo, SUN Xiangbo, et al. Study on recycled coarse aggregate for concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2019(2): 98-100.
- [15] 崔正龙, 李 静. 不同吸水率粗骨料对混凝土强度和干燥收缩性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8): 2396-2399.
- CUI Zhenglong, LI Jing. Effect of coarse aggregate with different water absorption on strength and drying shrinkage of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(8): 2396-2399.
- [16] 王晓飞, 李秋义, 罗健林, 等. 再生粗骨料品质和取代率对再生混凝土抗压强度的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(5): 85-88.
- WANG Xiaofei, LI Qiuyi, LUO Jianlin, et al. Effecting of quality and substitution rate of recycled coarse aggregates on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2015(5): 85-88.
- [17] 崔正龙, 童华彬, 吴翔宇. 再生粗骨料的形态及性质对混凝土力学性能影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(9): 2429-2433.
- CUI Zhenglong, TONG Huabin, WU Xiangyu. Shapes and properties of recycled coarse aggregate on mechanical properties of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(9): 2429-2433.
- [18] 李雯霞, 张 雄, 刘 昕. 再生混凝土中再生骨料取代率、浆含量、表观密度和吸水率的关系探讨[J]. 混凝土, 2009(10): 60-63.
- LI Wenxia, ZHANG Xiong, LIU Xin. Mechanical properties of recycled aggregate concrete study of the impact of factors[J]. Concrete, 2009(10): 60-63.
- [19] 聂立武, 韩古月, 滕毓晨. 再生粗骨料对再生混凝土力学性能及碳化性能的影响[J]. 混凝土, 2017(12): 99-101.
- NIE Liwu, HAN Guyue, TENG Yuchen. Effect of recycled coarse aggregate on mechanical properties and carbonation behavior of recycled aggregate concrete[J]. Concrete, 2017(12): 99-101.
- [20] 霍洪媛, 范程程, 陈爱玖, 等. 不同强度等级的再生骨料对再生混凝土基本力学性能影响[J]. 混凝土, 2017(2): 60-62, 65.
- HUO Hongyuan, FAN Chengcheng, CHEN Aijiu, et al. Influence of the recycled aggregate with different strength on recycled concrete[J]. Concrete, 2017(2): 60-62, 65.
- [21] 韩古月, 聂立武. 再生粗骨料品质与掺量对再生混凝土抗冻融性能影响规律[J]. 混凝土, 2018(6): 89-92.
- HAN Guyue, NIE Liwu. Effect of quality and addition of recycled coarse aggregate on freezing-thawing properties of recycled concrete[J]. Concrete, 2018(6): 89-92.
- [22] 孙道胜, 李泽英, 刘开伟, 等. 再生粗骨料的形态及缺陷对再生混凝土干燥收缩和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(11): 11027-11033, 11056.
- SUN Daosheng, LI Zeying, LIU Kaiwei, et al. Influence of shapes and defects in recycled aggregate on drying shrinkage and mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. Materials Reports, 2021, 35(11): 11027-11033, 11056.
- [23] 李 阳. 再生骨料混凝土基本性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(7): 91-94.
- LI Yang. Experimental research on basic performances of recycled aggregates concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2015(7): 91-94.
- [24] DENG Z H, LIU B, YE B L, et al. Mechanical behavior and constitutive relationship of the three types of recycled coarse aggregate concrete based on standard classification[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2020, 22: 30-45.
- [25] 潘丽云, 梁 娜, 胡飞佳, 等. 全再生粗骨料混凝土力学性能试验与评价研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 32-42.
- PAN Liyun, LIANG Na, HU Feijia, et al. Experimental study and evaluation of mechanical properties of full-recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(6): 32-42.
- [26] 李佳彬, 肖建庄, 孙振平. 再生粗骨料特性及其对再生混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(4): 390-395.
- LI Jiabin, XIAO Jianzhuang, SUN Zhenping. Properties of recycled coarse aggregate and its influence on recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(4): 390-395.



- [27] 高磊,贾致荣,袁中玉,等.水泥稳定碎石铣刨粗集料路用性能评价[J].中外公路,2019,39(5):230-233.  
GAO Lei, JIA Zhirong, YUAN Zhongyu, et al. Road performance evaluation of coarse aggregate with milled cement stabilized macadam [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(5): 230-233.
- [28] 肖杰,吴超凡,湛哲宏,等.水泥稳定砖与混凝土再生集料基层的性能研究[J].中国公路学报,2017,30(2):25-32.  
XIAO Jie, WU Chaofan, ZHAN Zhehong, et al. Research on performances of cement stabilized brick and concrete recycled aggregate base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 25-32.
- [29] 孔德玉.天然与再生骨料混凝土水灰比统一规定(I)——粗骨料强度的影响[J].建筑材料学报,2003,6(2):129-134.  
KONG Deyu. Unified Bolomey's formula of concrete made with natural and recycled coarse aggregate (I) — effect of strength of coarse aggregate [J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(2): 129-134.
- [30] 张永娟,何舜,张雄,等.再生混凝土Bolomey公式的修正[J].建筑材料学报,2012,15(4):538-543.  
ZHANG Yongjuan, HE Shun, ZHANG Xiong, et al. Modification of the Bolomey formula in recycled aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4): 538-543.
- [31] 李秋义,王晓飞,罗健林,等.不同取代率再生粗骨料混凝土的鲍罗米强度计算式[J].混凝土,2016(2):60-65.  
LI Qiuyi, WANG Xiaofei, LUO Jianlin, et al. Bowromi strength formula for recycled coarse aggregate concrete with different substitution rate [J]. Concrete, 2016(2): 60-65.
- [32] 王海超,陈晨,赵倩倩,等.强化再生骨料性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2016(4):25-27,32.  
WANG Haichao, CHEN Chen, ZHAO Qianqian, et al. Experimental research on performance of reinforced recycle aggregate [J]. China Concrete and Cement Products, 2016(4): 25-27, 32.
- [33] 肖建庄,周正久,马修斯.再生骨料混凝土板冲切性能试验[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(1):41-46,53.  
XIAO Jianzhuang, ZHOU Zhengjiu, TAWANA M M. Test on punching behavior of recycled aggregate concrete slabs [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(1): 41-46, 53.
- [34] 高丹盈,张丽娟,芦静云,等.再生骨料混凝土配合比设计参数研究[J].建筑科学与工程学报,2016,33(1):8-14.  
GAO Danying, ZHANG Lijuan, LU Jingyun, et al. Research on design parameters of mix proportion for recycled aggregate concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 8-14.
- [35] 权伟博.再生骨料混凝土性能研究[J].四川建材,2021,47(5):243-244.  
QUAN Weibo. Research on performance of recycled aggregate concrete [J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(5): 243-244.
- [36] 李雪良,杨海峰,赵修敏,等.再生混凝土受压应力-应变本构关系研究[J].混凝土与水泥制品,2021(5):16-20.  
LI Xueliang, YANG Haifeng, ZHAO Xiumin, et al. Stress-strain relationship of recycled concrete under uniaxial compressive [J]. China Concrete and Cement Products, 2021(5): 16-20.
- [37] 刘惠,王震,郝亚利,等.再生粗骨料品质对混凝土抗溶蚀性能的影响[J/OL].土木与环境工程学报(中英文):1-7[2023-02-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20210322.1022.002.html>.  
LIU Hui, WANG Zhen, HAO Yali, et al. Effect of quality of recycled coarse aggregate on the corrosion resistance of concrete [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering: 1-7 [2023-02-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20210322.1022.002.html>.
- [38] 王雅思,李润,朱晨航,等.强化处理对再生粗骨料物理性能的影响[J].混凝土,2021(2):82-85.  
WANG Yasi, LI Run, ZHU Chenhang, et al. Influence of strengthening treatment on physical properties of recycled coarse aggregate [J]. Concrete, 2021(2): 82-85.
- [39] 盛朝晖,牛培飞,游文斐.多因素对再生混凝土力学性能及抗冻性的影响[J].中国测试,2021,47(2):140-148.  
SHENG Zhaohui, NIU Peifei, YOU Wenfei. Effect of multiple factors on mechanical properties and frost resistance of recycled concrete [J]. China Measurement & Test, 2021, 47(2): 140-148.
- [40] THOMAS C, DE BRITO J, CIMENTADA A, et al. Macro- and micro- properties of multi-recycled aggregate concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245: 118843.
- [41] QIN Y J, LIANG R, YIBULAYIN A, et al. Research on properties of recycled coarse aggregate [J]. Advanced Materials Research, 2013, 779/780: 144-150.

[42] 建筑用卵石、碎石:GB/T 14685—2001[S]. 北京:中国标准出版社,2001.  
Pebble and crushed stone for building:GB/T 14685—2001[S]. Beijing:Standards Press of China,2001.

[43] 轻集料及其试验方法第 2 部分:轻集料试验方法:GB/T 17431. 2—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.  
Lightweight aggregates and its test method — part 2: test methods for lightweight aggregates: GB/T 17431. 2—2010[S]. Beijing:Standards Press of China, 2010.

[44] MCGINNIS M J, DAVIS M, DE LA ROSA, et al. Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 258-269.

[45] VERIAN K P. Using recycled concrete as coarse aggregate in pavement concrete[D]. West Lafayette: Purdue University, 2012.

[46] PRADHAN S, KUMAR S, BARAI S, et al. Multi-scale characterisation of recycled aggregate concrete and prediction of its performance[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 106: 103480.

[47] BAI G L, 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.

[48] 张永娟,张 雄,刘 昕.再生粗骨料品质及其评价方法研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2012, 25(4): 3-8.  
ZHANG Yongjuan, ZHANG Xiong, LIU Xin. Research on the quality and evaluation method of recycled coarse aggregate[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2012, 25(4): 3-8.

[49] 刘思含,钱晓倩,傅 新,等.再生粗骨料性能指标及其线性拟合适用性讨论[J]. 混凝土, 2017(10): 118-122.  
LIU Sihan, QIAN Xiaoqian, FU Xin, et al. Properties of recycled coarse aggregate and discussing the applicability of linear fitting[J]. Concrete, 2017(10): 118-122.

[50] OMARY S, GHORBEL E, WARDEH G, et al. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties[J]. Construction and Building Materials, 2016, 108: 163-174.

[51] GONZALEZ-FONTEBOA B, MARTINEZ-ABELLA F, EIRAS-LOPEZ J, et al. Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete[J]. Materials and Structures, 2011, 44(10): 1759-1771.