

基于图像数据和碎石集料级配与用量的碎石集料空隙率快速检测方法

鲁志恒¹, 霍延强^{2*}, 韩汶¹, 杜聪², 刘轶鹏², 张宏博²

(1.山东省交通科学研究院, 山东 济南 250102; 2.山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002)

摘要:为解决传统碎石集料检测方法中存在的破坏性检测、代表性不足、人工操作误差、费时费力及检测不连续等问题,提出一种连续、无损、快速且准确的碎石集料空隙率检测新方法。使用摄像设备采集压实后的碎石集料表面图像,并利用图像处理技术提取碎石集料的表面图像数据;分析提取到的图像信息,建立体现碎石集料表面特征的图像指标体系;使用提取到的图像指标、集料用量和级配信息作为输入数据,采用随机森林方法对碎石集料的空隙率进行预测;设计室内压实模拟试验方案,收集65组不同用量和级配的碎石集料空隙率测定结果,构建用于机器学习模型训练的数据集。结果显示,所提议方法在测试集上的平均绝对百分比误差为1.69%、平均绝对值误差为0.589、均方根误差为0.914、相关指数为0.974、预测精度达到98.31%,可实现连续、无损、快速、准确的碎石集料空隙率实时检测。

关键词:图像处理;随机森林;碎石集料空隙率;施工质量控制;无损检测

中图分类号:TU521

文献标志码:A

引用格式:鲁志恒,霍延强,韩汶,等.基于图像数据和碎石集料级配与用量的碎石集料空隙率快速检测方法[J].山东大学学报(工学版),2024,54(6):89-99.

LU Zhiheng, HUO Yanqiang, HAN Wen, et al. Rapid detection of crushed stone aggregate void fraction based on image data and crushed stone aggregate grading and amounts[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(6):89-99.

Rapid detection of crushed stone aggregate void fraction based on image data and crushed stone aggregate grading and amounts

LU Zhiheng¹, HUO Yanqiang^{2*}, HAN Wen¹, DU Cong², LIU Yipeng², ZHANG Hongbo²

(1. Shandong Institute of Transportation Science, Jinan 250102, Shandong, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

Abstract: To address the challenges associated with traditional methods for detecting void ratio in crushed aggregates, such as destructive testing, lack of representativity, manual operation errors, time consumption and discontinuity, this study proposed a novel method for continuous, non-destructive, rapid, and accurate detection of void ratio in crushed aggregates. Imaging equipment was employed to capture surface images of compacted crushed aggregates, and image processing techniques were utilized to extract surface image data of the aggregates. The extracted image information was analyzed to establish an image index system that reflected the surface characteristics of the crushed aggregates. The extracted image indices, along with aggregate quantity and gradation information, were used as input data for predicting the void ratio of the crushed aggregates using a Random Forest model. An indoor compaction simulation test scheme was designed, and 65 sets of void ratio measurements of crushed aggregates with varying quantities and gradations were collected to construct a dataset for training the machine learning model. The results showed that the proposed method achieved an average absolute percentage error of 1.69%, an average absolute error of 0.589, a root mean square error of 0.914, and a correlation coefficient of 0.974 on the test set, with a prediction accuracy of 98.31%. This method enabled continuous, non-destructive, rapid, and accurate real-time detection of void ratio in crushed aggregates.

Keywords: image processing; random forest; gravel aggregate void ratio; construction quality control; non-destructive testing

收稿日期:2023-06-13

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB2602102)

第一作者简介:鲁志恒(1993—),男,山东济南人,硕士,主要研究方向为交通工程。E-mail:2529874278@qq.com

*通信作者简介:霍延强(2000—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为交通岩土工程、智慧交通车路协同及高速公路差异化收费。

E-mail:202215421@mail.sdu.edu.cn

0 引言

检测碎石集料的空隙率对于工程和建筑行业具有重要作用。在机场、道路、铁路等施工过程中,通过检测碎石集料的空隙率,可以及时发现和纠正碎石集料层的松散、沉降或不均匀压实等问题,确保施工符合质量要求。传统的空隙率检测方法,例如灌水法通常会对碎石集料层造成一定的破坏^[1],并且传统的测量方法是离散的、点式的测量,只能获取有限的样本数据,无法对碎石集料层进行连续检测和全局性评估。因此,需要提出一种连续、无损、快速、准确的碎石集料空隙率实时检测新方法。

定量体视学研究通过测量和计算材料的二维结构定量推断其三维结构特征。根据定量体视学研究方法,通过碎石集料的二维特征定量推断碎石集料的空隙率是目前无损检测碎石集料空隙率的一种新方法。基于定量体视学研究的碎石集料空隙率检测方法主要分为2个类别。第1类方法认为集料的几何特征和碎石集料的空隙率之间具有显著的相关性,并使用多元回归公式回归集料特征和其自然堆积空隙率之间的关系^[2-7],试验结果表明,此类方法具有较好的预测精确度,使用集料的几何特征预测碎石集料的自然堆积空隙率是可行的。但是,对于确定的原材料和级配,粗集料的空隙率和试验方法(力的作用方式、功能^[8]、试验容器容积与集料容积)相关,导致同一类集料经过不同程度的压实之后会具有不同的空隙率,根据原材料的几何特征和级配无法确定具体集料的骨料间隙率(voids of the coarse aggregate, VCA)^[9]。第2类方法则认为通过二维图像中的粗集料面积比可以计算出三维空间中粗集料的体积比,文献[10]提出使用概率统计方法根据多幅二维截面图像上的粗集料面积比计算三维空间中的粗集料体积比,试验结果表明,使用40幅二维截面图像计算出的三维空间中粗集料体积比满足工程精度要求;文献[11]认为在回转压实试验的进程中,试件顶层和底层的空隙率和其本身的空隙率之间具有密切的相关性,根据通过图像处理技术分析得到的顶层和底层二维图像的表面空隙率,推算回转压实试件的真正空隙率。此类方法与集料的几何特征相比,图像中碎石集料的表面空隙率随着压实度的变化而不断变化,更能够反映压实之后的碎石集料的空隙率情况。因此,本研究以碎石集料的表面空隙率为主,碎石

集料的级配和用量信息为辅,使用单幅碎石集料的二维表面图像计算出满足工程精度要求的三维空间中的碎石集料的空隙率。

目前数字图像处理技术和基于深度学习的实例分割算法是获取碎石集料二维图像特征的主流方法。用于碎石集料的图像处理算法主要流程是:先使用中值滤波^[12]和分水岭变换^[13]等算法对图像进行增强并使用Otsu阈值法^[14]获取真实微观结构的二值图像;使用搜索算法找到每一集料对应的具体像素区域,在此基础上统计碎石集料的尺寸^[6,15-16]。此外,一些可行的图像分割和聚类算法,如基于图割理论^[17]的图像切割算法和使用K-means^[18]的图像聚类算法在图像处理领域性能良好,但尚未在碎石集料的图像处理领域得到应用。随着人工智能技术的发展,基于深度学习的实例分割算法逐渐应用在碎石集料检测任务中。文献[19]认为传统的图像分割方法分割效果有限,并且传统方法对灰度变化过于敏感,提出一种针对堆叠集料图像进行分割的深度学习算法,用以计算集料的级配,在自制的碎石集料实例分割数据集上,算法具有较高的精确度。基于深度学习的图像分割方法的分割精度以及对不同环境、不同集料材料和不同集料尺寸的鲁棒性在很大程度上取决于数据集的质量。由于缺乏高质量的碎石集料分割数据集,并且经验证明图像处理技术可以满足本研究的任务需求,因此本研究在进行图像分割时选择数字图像处理技术。

在获取到图像信息之后需要分析输入参数和碎石集料空隙率之间的定量关系,当前主流的分析方法是多元线性回归方法。文献[3]采用基于定量体视学参数的多元回归公式能够较精确地预测粗集料的空隙率;文献[20]使用多元线性回归方法对集料的粒形进行分析,得到碎石集料堆积空隙率和粒形之间的多元回归方程。多元线性回归方法能较好地反映自变量和因变量之间的线性关系,但实际上碎石集料的表面空隙率、级配和用量与空隙率之间存在一定的非线性关系。与多元线性回归方法相比,机器学习领域的很多算法能够更好地建模输入数据和输出数据之间的非线性关系,但这些算法尚未在碎石集料空隙率检测任务上得到应用,例如:朴素贝叶斯算法^[21]、K最邻近算法^[22]、支持向量回归^[23]、随机森林算法^[24]。下面对这4种方法进行详细介绍。

(1)朴素贝叶斯算法是通过先验和数据决定后

验的概率,具体应用在本项任务中,首先需要计算出数据集中碎石集料空隙率、表面空隙率、级配和用量的频率分布以及在特定空隙率条件下碎石集料表面空隙率、级配和用量的频率分布。在给定碎石集料的表面空隙率、级配和用量的条件下,根据贝叶斯公式计算出碎石集料的空隙率。使用贝叶斯公式只能计算空隙在每一区间分布的概率,最优的预测结果也只能将空隙率锁定在某一个区间,因此在具体的应用过程中会有一定的误差。

(2) K 最邻近算法需要先将原始数据按照空隙率的不同分为多个类别,然后设定 K ,根据碎石集料的表面空隙率、用量和级配挑选出距离新加入数据最近的 K 个点。这 K 个点中,哪一类别的数量最多,则新加入其中的点便属于哪一类别。 K 最邻近算法每进行一个“点”的分类都需要进行一次全局运算,当样本容量比较大或者样本数据维度较高时,算法的计算量会比较大。

(3) 支持向量回归方法使用选定的核函数将样本数据从原始空间映射到高维空间,使得样本数据在高维空间是线性可分的,再找到回归数据点时损失函数最小的超平面。应用到碎石集料空隙率检测任务中,将新样本点的表面空隙率、用量和级配组成的原始空间映射到高维空间,根据对应的超平面找到碎石集料的空隙率。支持向量回归方法面对大规模数据时训练比较困难,并且参数调节敏感,需要谨慎选择核函数和正则化参数。当样本噪声比较大时,模型的预测性能会显著下降。

(4) 随机森林属于集成学习算法,将多个弱分类器(决策树)集成为分类效果较好的分类器。随机森林算法引入了随机性,训练出的模型不容易发生过拟合问题。在碎石集料空隙率检测的任务上,相比于前述模型,随机森林算法的优势在于能够较好地处理回归问题和高维数据,充分挖掘输入数据和压实度之间的关系,预测的结果具有更高的精确度。

针对上述情况,本研究提出一种基于图像数据和碎石集料级配与用量的碎石集料空隙率智能检测方法,以期达到无损、快速和准确检测碎石集料空隙率的目标。

1 方法

本研究算法的具体思路如图 1 所示,设计 65 组不同级配和用量的碎石集料振实试验方案,开展室

内振实试验,记录试验数据并使用摄像设备采集碎石集料的表面图像,根据记录的试验数据计算碎石集料的空隙率,使用图像处理算法对碎石集料的表面图像进行处理,计算图像中碎石集料的表面空隙率,作为模型输入的图像数据。使用图像表面空隙率、集料用量和集料级配作为随机森林算法的输入数据,试验测定的碎石集料的空隙率作为验证标签,将 65 组试验记录的数据整理成为用于随机森林模型训练使用的数据集,进而实现通过图像数据和施工前已知的集料级配和用量信息对碎石集料空隙率进行预测的目标。

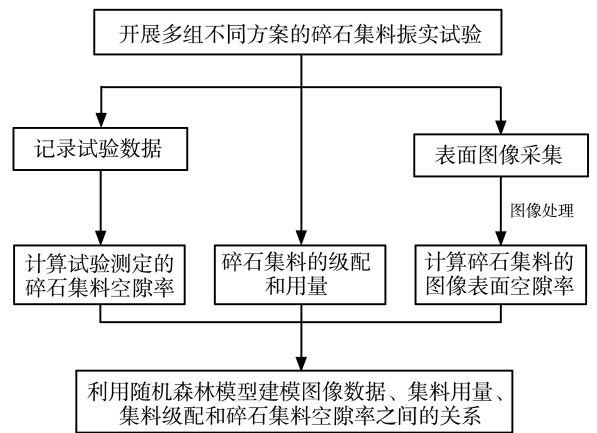


图 1 研究框架

Fig.1 Framework for the research

1.1 图像处理技术

采用摄像设备对碎石集料的表面状况进行拍摄,用图像处理技术分析拍摄到的图片,计算出基于图像特征的表面空隙率。具体的图像处理流程如图 2 所示,可分为图像预处理和图像处理 2 个步骤。

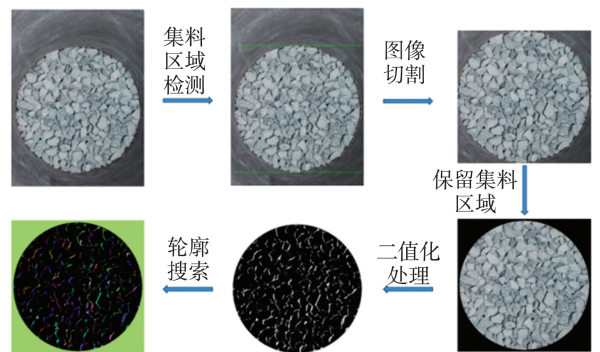


图 2 图像处理流程

Fig.2 Image processing processes

1.1.1 图像预处理

对采集到的图像进行预处理的主要目的是将图像中的碎石集料与其背景信息进行切割,具体的做法是先将彩色图像转化为灰度图像,使用大津

法^[25]对图像进行二值化处理,使用轮廓搜索算法找到图像中面积最大的轮廓区域,绘制出对应区域的最小外接矩形并以此为边界对图像进行切割。根据搜索到的图像最大轮廓绘制碎石集料的最小外接圆,将位于外接圆以外的区域的像素值置为0,所得到的区域便是需要进行分析的碎石集料关键区域。在对图像进行切割的时候有一个值得注意的细节,通常根据轮廓搜索算法计算出的直接结果所绘制的碎石集料最小外接圆包含一部分背景信息,在后续的分析过程中,这部分背景信息在经过二值化处理之后可能被误识别为空隙,这对最后的预测结果造成很大干扰。因此,在进行图像切割的时候,需要适当减小所绘制的碎石集料的最小外接圆半径,在本研究的图像处理过程中,对计算得出的碎石集料的最小外接圆的半径乘以0.97,以确保外接圆所包围的区域不包含背景信息。2种图像切割方法的具体区别如图3所示。



图3 图像切割示意图
Fig.3 Image cutting schematic

1.1.2 图像处理

在将碎石集料所在的区域与背景区域区分开之后,重新读取切分好的图像,将图像转化为灰度图像,并进行二值化处理,处理后的图像中,像素值为255的区域代表空隙,像素值为0的区域代表碎石集料。使用四连通的种子填充算法^[26]搜索每一空隙所对应的像素区域,用不同的颜色对不同的空隙进行填充。此时,根据搜索到的空隙区域所占据的像素点的数量,可以对图像中每一空隙的面积进行计算。但是,同一空隙所占据的像素点的数量会随着图像分辨率的变化而发生变化,为了确保相同的空隙在不同的分辨率下具有相同的面积,同时有利于本研究的分析,对空隙面积 S_v 的计算公式调整为:

$$S_v = \frac{S}{w \times h} \times 10^6,$$

式中: S 为图片中某一空隙所占据的像素点的数量; w 为图片的像素宽度,即图片每一行有多少像素; h 为图片的像素长度,即图片的一列有多少像素。

在此基础上,可以对图像的表面空隙率 n_{sur} 进行计算,公式为:

$$n_{sur} = \frac{S_a}{S_s + S_a},$$

式中, S_a 为图片中空隙面积的总和, S_s 为图片中集料面积的总和。

通过上述流程批量对图像进行处理时,图像中集料和集料相互叠加产生阴影,这些阴影在经过二值化处理之后可能会被误识别为空隙。同样,二值化处理后的图像中存在一些面积很小的噪声点。一些面积很小的空白区域对应着一些噪声点,这些噪声点并不与原始图像中的空隙一一对应,可能仅仅是因为碎石集料的颜色过深,而在算法处理过程中误识别为空隙,具体的图像处理结果如图4所示。



图4 碎石集料表面图像处理

Fig.4 Surface image processing of crushed stone aggregates

在进行图像特征选取的时候需要对数据进行处理,考虑到阴影构成的空白区域的圆度和最大宽度都比较小,因此采用图像中每一空隙的圆度和最大宽度处理图像中的数据,以滤除图像中阴影空隙和噪声点。在计算出每一空隙的圆度和最大宽度之后,通过设定合适的阈值,计算图像的表面空隙率时可以在将小于特定阈值的空隙面积排除在外。

圆度是一项经常用于碎石混合物骨料粒径^[27]分析的图像指标,本研究用其对空隙的形状进行分析。计算图像中每一空隙的圆度需要先使用轮廓提取算法找到图像中每个空隙的轮廓,根据轮廓对空隙的周长进行计算,计算方法与计算图像中每一空隙的面积类似,为保证同一空隙在不同的分辨率下具有相同的周长,本研究对周长的计算方式调整为:

$$C_v = \frac{C}{\sqrt{w \times h}} \times 10^3,$$

式中, C_v 为本研究对某一空隙使用的周长, C 为图片中某一空隙的等值线的像素点数量。

计算出图像中每一空隙的周长之后, 圆度

$$R = 4\pi S / C^2。$$

图像中每一空隙的最大宽度是本研究新提出的一项用于碎石集料空隙形状评价的指标, 使用轮廓提取算法找到图像中每一空隙的轮廓之后, 遍历每一空隙所有被轮廓包围的像素, 计算每个像素可以绘制的空隙最大内切圆的直径, 比较每个像素绘制的内切圆的直径, 最大直径可以认为是这个空隙的最大宽度。图像中空隙的最大宽度计算方法示意图如图5所示。

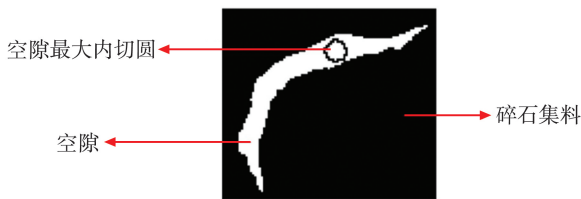


图5 图像中空隙的最大宽度计算方法示意图
Fig.5 Diagram of how to calculate the maximum width of a void in an image

1.2 碎石集料级配和用量

图像表面空隙率仅仅依靠空隙面积的简单加和进行碎石集料空隙率检测的精度相对较低, 因此, 在施工前, 可以采集一些与碎石集料相关的信息, 以辅助提高模型对碎石集料空隙率的检测精度。大量研究表明^[28-33], 碎石集料的级配是影响其空隙率的重要因素, 通常情况下, 其级配信息可以在施工前获取, 根据碎石集料在每一筛孔的分级筛余百分比对这一指标进行表征。碎石集料在单位面积上的用量是影响其空隙率的又一重要因素^[34]。通常, 碎石集料在施工过程中可以摊铺为单独的一层, 也可以与其他材料(沥青或水泥)混合后在道路上进行摊铺, 这两种情况都需要对其进行压实, 而碎石集料压实后的空隙率与其用量有着很紧密的关系。面对相同的压实功率, 当碎石集料用量较小时, 其自然堆积形成的骨架结构无法抵抗振动带来的扰动, 振动会将其骨架结构重塑为更密实的状态; 而碎石集料用量较多时, 其自然堆积形成的骨架结构能够在一定程度上抵抗振动带来的扰动, 振动只能在局部对其骨架结构造成影响。

1.3 随机森林模型

在构建多指标与碎石集料之间的回归关系时, 需要对不同的指标赋予不同的权重, 提高重要指标在预测过程中的影响力, 减弱不利指标的影响权

重。随机森林是一种能够解决这一问题的机器学习模型, 该方法结合了决策树^[35]和随机特征选择技术。随机森林的核心思想是通过组合多个决策树的预测结果获得更准确的整体预测结果, 对于处理高维数据和具有大量特征的问题, 随机森林具有很好的性能。随机森林一般由多个决策树组成, 每个决策树都是一个弱分类器, 通过在不同的数据子集上训练而产生差异, 每个决策树所获得的输入特征和训练数据都具有随机性, 每个决策树都会将输入特征中对结果影响最大的指标排在最重要的位置。模型的具体流程如图6所示。

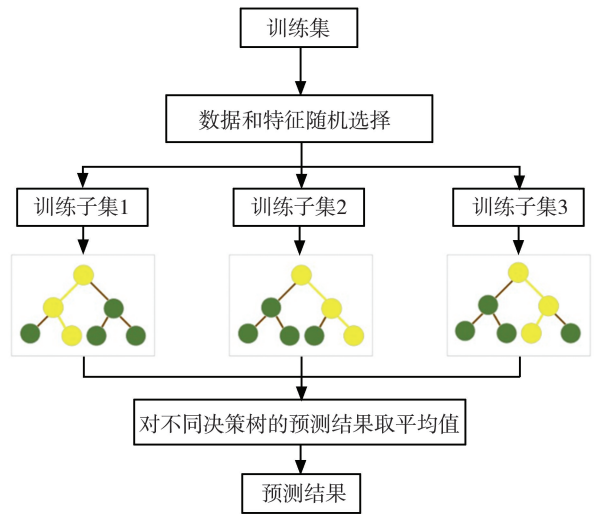


图6 随机森林算法流程
Fig.6 Random forest algorithm flow

从原始数据集中重复抽样形成多个训练子集, 每个子集包含部分样本, 同时, 对于每个决策树的训练, 随机从所有特征中选择一部分特征用于训练, 利用这种方法能够有助于减少特征之间的相关性, 提高模型的多样性。使用选定的特征子集和训练样本子集训练决策树模型。训练过程中, 算法基于特征子集对样本子集逐层划分, 决策树根据特征的值进行分割, 生成一系列决策节点从而构建出一棵决策树。重复进行特征选择和决策树训练, 生成多个决策树, 当需要对新的输入样本进行回归时, 随机森林对每个决策树的预测结果取平均值, 得到最终的预测结果。对于碎石集料空隙率检测任务而言, 模型的输入特征是碎石集料的表面空隙率、用量和级配, 随机森林算法更适用于二维数据, 输出结果是碎石集料的空隙率。

1.4 试验

搭建完成理论方法框架之后, 本研究提出一种室内试验的方法验证模型的性能。考虑到碎石集料在具体施工项目中会使用到不同的用量和级配,

本研究设计了13种不同的玄武岩碎石集料级配方案,对每种方案的碎石集料开展2、4、6、8和10 kg等5种不同用量下的碎石集料空隙率测定试验,共试验65次,碎石集料的具体级配信息见表1。

表1 不同粒径的玄武岩碎石集料的分级筛余百分比

Table 1 Graded sieve residual percentages of basalt aggregates of different grain sizes

| 级配方案 | 分级筛余百分比/% | | | | | | | |
|------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 筛孔 13.20 mm | 筛孔 9.50 mm | 筛孔 4.75 mm | 筛孔 2.36 mm | 筛孔 1.18 mm | 筛孔 0.60 mm | 筛孔 0.30 mm | 筛孔 0.15 mm |
| 1 | 0 | 8.16 | 90.43 | 0.62 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.05 |
| 2 | 1.12 | 11.05 | 86.47 | 0.60 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.04 |
| 3 | 3.75 | 17.87 | 77.14 | 0.55 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.04 |
| 4 | 4.49 | 19.77 | 74.53 | 0.54 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.04 |
| 5 | 7.90 | 28.61 | 62.43 | 0.48 | 0.01 | 0 | 0.03 | 0.03 |
| 6 | 10.07 | 34.23 | 54.74 | 0.44 | 0 | 0.01 | 0.02 | 0.03 |
| 7 | 10.26 | 34.72 | 54.07 | 0.43 | 0.01 | 0 | 0.02 | 0.03 |
| 8 | 12.20 | 39.74 | 47.19 | 0.40 | 0.01 | 0 | 0.02 | 0.02 |
| 9 | 14.73 | 46.28 | 38.24 | 0.35 | 0 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 10 | 14.79 | 46.45 | 38.01 | 0.35 | 0.01 | 0 | 0.01 | 0.02 |
| 11 | 16.41 | 50.65 | 32.26 | 0.33 | 0 | 0 | 0.01 | 0.01 |
| 12 | 19.45 | 58.50 | 21.51 | 0.27 | 0 | 0 | 0 | 0.01 |
| 13 | 21.07 | 62.70 | 15.76 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 |

由表1可以看出,从级配1到级配13,粒径大于13.20 mm与9.50~13.20 mm的碎石集料所占的比例越来越高,级配1集料粒径主要是4.75~9.50 mm,级配13的集料粒径主要是大于9.50 mm,从级配1到级配13碎石集料的级配是从小粒径为主的不均匀级配到均匀级配再到大粒径为主的不均匀级配的逐渐变化过程。

文献[36]研究表明,与捣实工艺相比,采用振动压实方法对碎石集料进行压实,可以获得更小的碎石集料空隙率。因此,本项目使用振实工艺进行碎石集料空隙率的测定。在振实前,需要完成工艺的准备工作的直尺在振实筒内等距离的4个位置、分别靠近内壁测量振实筒的内高,并取平均值。然后用卡尺沿垂直方向测量2次振实筒的内壁直径,取平均值,得出的结果就是振实筒的内径和內高,并按照振实筒体积的计算公式计算出振实筒的体积。具体的计算公式为:

$$\{V\} = \pi \{r\}^2 \{h\} / 1\,000,$$

式中: $\{V\}$ 为单位为 cm^3 的振实筒的体积 V 的数值, $\{r\}$ 为单位为 cm 的振实筒内壁的半径 r 的数值, $\{h\}$ 为单位为 cm 的振实筒内壁的高度 h 的数值。

根据集料的级配对不同规格的碎石集料进行称量,并将其混合在编织袋中,上下、左右摇晃翻

滚,将碎石集料混合均匀,将充分混合的集料放入振实筒中,将振实筒置于振实台上,设定振动频率为50 Hz,振实180 s。振实完成后,用游标卡尺沿内壁选定等距离的4个位置测量骨料到振实筒边缘的高度并取平均值。用照相设备拍摄振实后的振实筒内碎石集料的表面状况,在拍摄过程中用闪光设备进行补光,保持摄像设备与碎石集料表面垂直,以确保采集到的图片没有阴影且图片中每一像素都对应相同的实际尺寸,而不受近大远小的影响。试验中所有的图像均由智能手机相机(相机参数为5 000万像素,等效24 mm f/2.0镜头,全像素双核相位检测自动对焦)拍摄,尺寸为4 080像素×3 060像素,预处理后图像的分辨率为2 750像素×2 750像素。

碎石集料的体积密度计算公式为:

$$\rho = m / \left(V - \frac{\pi r^2 h_1}{1\,000} \right),$$

式中: ρ 为按振实法测定的碎石集料的自然堆积密度, g/cm^3 ; m 为试样的总质量, kg ; h_1 为压实后集料顶部与振实筒边缘之间的高度, cm 。

碎石集料的空隙率

$$n = (1 - \rho / \rho_b),$$

式中: ρ_b 为碎石集料的合成毛体积密度, g/cm^3 。

2 数据分析

2.1 试验数据分析

表2给出了65组不同级配碎石集料在不同用量下通过振实试验测定的空隙率。图7为不同级配的碎石集料在不同集料用量下的空隙率变化折线图。

表2 玄武岩碎石集料在不同用量下的空隙率

Table 2 Void ratio of basalt gravel aggregate at different quantities

| 级配 | 空隙率/% | | | | |
|----|---------|---------|---------|---------|----------|
| | 用量 2 kg | 用量 4 kg | 用量 6 kg | 用量 8 kg | 用量 10 kg |
| 1 | 28.8 | 39.3 | 40.5 | 44.2 | 42.9 |
| 2 | 28.8 | 38.0 | 42.6 | 41.6 | 43.5 |
| 3 | 33.6 | 36.5 | 40.5 | 39.3 | 44.6 |
| 4 | 28.2 | 36.7 | 40.2 | 40.5 | 44.2 |
| 5 | 32.1 | 37.2 | 40.8 | 41.2 | 43.5 |
| 6 | 32.1 | 40.4 | 40.2 | 41.1 | 41.8 |
| 7 | 29.9 | 38.5 | 38.1 | 39.7 | 42.1 |
| 8 | 34.1 | 38.5 | 41.0 | 42.3 | 41.8 |
| 9 | 29.4 | 40.4 | 38.6 | 42.1 | 41.4 |
| 10 | 32.1 | 34.1 | 39.8 | 38.7 | 42.8 |
| 11 | 28.8 | 39.3 | 40.1 | 43.7 | 42.5 |
| 12 | 36.9 | 41.1 | 41.1 | 41.4 | 43.5 |
| 13 | 29.4 | 40.8 | 42.3 | 44.7 | 45.6 |

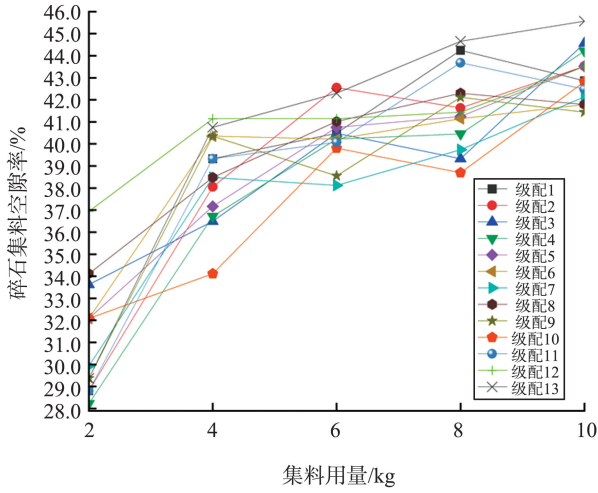


图7 碎石集料空隙率随用量变化折线图

Fig.7 Line graph showing the void ratio of gravel aggregate changing with amount

从图7可以明显看出,碎石集料的空隙率随着集料用量的增加而逐渐增大。造成这一现象的原因可能是不同用量的碎石集料在振动压实后形成了不同的骨架结构。当集料用量为2 kg时,用于振动压实的集料的用量偏小,碎石集料堆积形成的骨架结构不足以抵抗振动带来的扰动,在重力的影响下,其骨架结构会向着更为密实的方向重分布;随着集料用量的增加,碎石集料自然堆积形成的骨架结构具有更强的抵抗力,振动带来的扰动难以完全重塑其骨架结构,仅仅能够在局部对其骨架结构造成改变。通常来说,自然堆积形成的骨架结构往往不是理论状态中最密实的骨架结构,当振动带来的扰动能够在很大程度上重塑其骨架结构时,碎石集料的空隙率较低;而当自然堆积形成的骨架结构具有一定的抵抗力之后,由于其骨架结构的难以改变,空隙率较高。因此,碎石集料的空隙率会随着集料用量的增加而逐渐增大。这具有现实的借鉴意义,在施工现场的压实过程中,振动压路机的振实功率一定,当碎石集料的用量较少时,压路机可以完全重塑碎石集料的骨架结构,使其达到一种较为密实的状态;而当碎石集料用量较多时,压路机带来的扰动很难完全重塑碎石集料的骨架结构,最终压实后碎石集料的空隙率可能会较高。因此在使用摄像设备对碎石集料的空隙率进行评估时,使用碎石集料的单位面积用量作为辅助可以提高预测精确度。将不同用量下的碎石集料在不同级配下的空隙率变化绘制成折线图,如图8

所示。

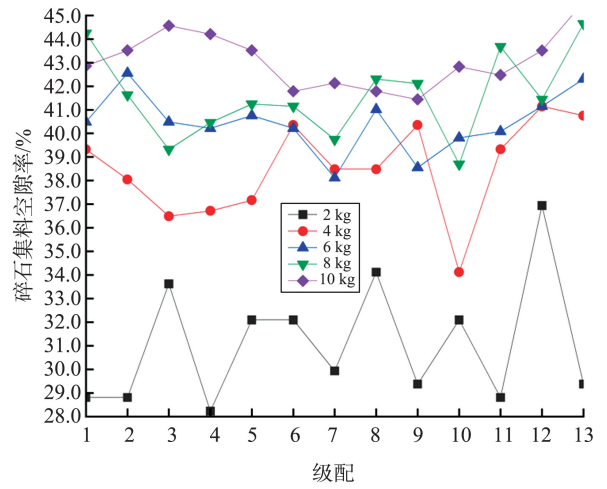


图8 碎石集料随级配变化折线图

Fig.8 Line graph of gravel aggregate variation with gradation

集料的空隙率随着级配的不同而发生变化,说明级配对于集料的空隙率具有一定的影响。碎石集料用量为6、8和10 kg时,在不同级配下的空隙率变化呈现出较为明显的“V”型曲线,这说明当碎石集料的级配较为均匀时,不同粒径的碎石集料之间相互填充,碎石集料在整体上会达到一种较为密实的状态;当碎石集料级配较为单一时,集料和集料之间无法进行良好的相互填充,导致振实后的碎石集料空隙率仍然较高。同时,可以看出,当试验中碎石集料的用量为2和4 kg时,碎石集料的空隙率曲线并没有表现出明显的“V”字型规律,这表明当碎石集料用量较少时,自然堆积形成的骨架结构对于振动干扰不具备抵抗力,自然堆积结构在振动过程中会完全破坏,进而出现巴西果效应,碎石集料中大粒径的集料上升至集料的表层,小粒径的集料下沉至集料的底层,不同粒径集料之间的相互填充效应在用量较小时失效。

2.2 图像数据分析

对13组不同级配的碎石集料在不同用量下的表面图像进行分析,将不同级配的碎石集料在不同用量下的表面空隙率的变化情况绘制成折线图,如图9所示。

由图9可知,通过图像得到的碎石集料的表面空隙率随用量增加而增大,这与试验测定的空隙率与用量的变化关系基本一致。将不同用量的碎石集料在不同级配下的表面空隙率变化情况绘制成折线图,如图10所示。

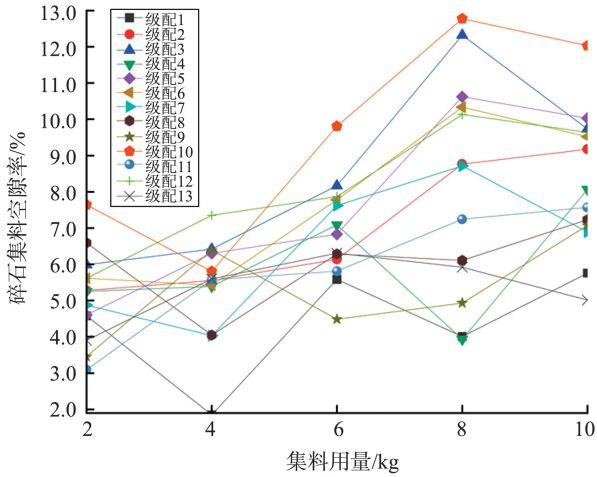


图9 不同级配碎石集料在不同用量下的表面空隙率折线图
Fig.9 Line graph of surface void fraction of different graded aggregates at different dosages

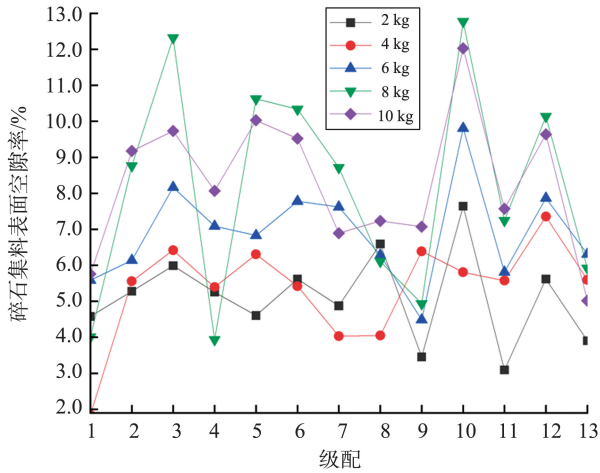


图10 不同用量碎石集料在不同级配下的表面空隙率折线图

Fig.10 Line graph of surface void fraction for different amounts of crushed aggregates at different gradations

由图10可知,集料的表面空隙率随着集料级配的变化而变化,这表明集料的级配信息与集料的表面空隙率之间具有相关性。通过图像分析得到的集料的表面空隙率随集料用量和级配的变化模式与通过试验测得集料的空隙率随集料用量和级配的变化模式之间具有一致性,这表明集料的空隙率与表面空隙率之间具有较强的相关性。但是对比试验数据发现,图像分析得出的表面空隙率的变异系数相对于试验测定的空隙率较大,这表明通过图像分析得到的表面空隙率随用量变化的趋势并没有通过试验得到确认,造成这一现象的可能原因有3点:(1)从图像中获取的碎石集料表面空隙率是碎石集料表面一层的空隙率,具有很强的偶然性,可能振实完成之后,空隙率较大的碎石集料的表面恰好处于一种相对较为密实的状态,这时计算出的碎

石集料的表面空隙率偏小,也可能出现空隙率较小的碎石集料的表面恰好处于一种相对较为松散的状态,这时计算出的碎石集料的表面空隙率相对较大;(2)通过图像仅仅能够采集到关于碎石集料表面特征的二维信息,缺少一个维度的信息会导致一些必要特征缺失;(3)图像的表面空隙率在计算时是对空隙面积的简单加和,仅仅通过这一指标无法充分表征图像中的关键信息。因此,仅仅通过碎石集料的表面空隙率对碎石集料的空隙率进行预测可能难以获得足够高的精确度,需要使用碎石集料的用量和级配信息对空隙率的预测进行辅助,使用机器学习方法综合考虑碎石集料级配、碎石集料用量以及碎石集料表面空隙率和碎石集料空隙率之间的潜在关系是提高预测精度的有力手段。

2.3 随机森林算法预测性能分析

通过试验数据分析可以发现碎石集料的用量与级配和碎石集料的空隙率密切相关,同时,经过图像处理之后,可以得到与碎石集料空隙率密切相关的碎石集料表面空隙率。将碎石集料的用量、级配以及表面空隙率转化为数字化的指标,用于随机森林算法所需的特征输入。使用试验得到的65组数据进行模型训练,将数据按照8:2的比例分别构建训练集和验证集。使用均方根误差、平均绝对值误差、平均绝对百分比误差以及相关系数4个指标对模型的性能进行评价。指标的具体定义如下。

假设 $y = (y_1, \dots, y_n)$ 表示真实世界上实际结果, $\hat{y} = (\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_n)$ 表示模型给出的预测值, Ω 表示观测样本的数量,均方根误差 (root mean square error, RMSE)

$$E_{RMS}(y, \hat{y}) = \sqrt{\frac{1}{|\Omega|} \sum_{i \in \Omega} (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

平均绝对值误差 (mean absolute error, MAE)

$$E_{MA}(y, \hat{y}) = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{i \in \Omega} |y_i - \hat{y}_i|$$

平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE)

$$E_{MAP}(y, \hat{y}) = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{i \in \Omega} \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

相关指数

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

模型的预测结果如图11所示。由图11可以看

出,除了试样3之外,模型进行碎石集料空隙率预测的误差均保持在2%左右,对空隙率进行预测的平均绝对百分比误差为1.69%,平均绝对值误差为0.589,均方根误差为0.914,相关指数为0.974,预测精确度为98.31%。算法进行图像处理的时间是1.87 s,进行压实度检测的时间是0.004 s。

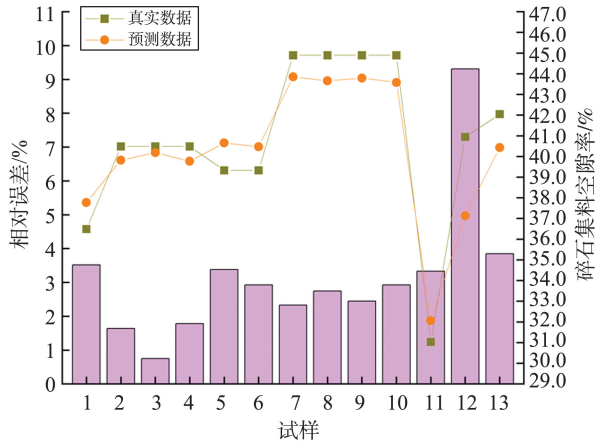


图 11 模型在验证集上进行空隙率预测结果

Fig.11 Accuracy of the model for void ratio prediction on the validation set

预测结果表明,模型能够在输入指标和空隙率之间建立起良好的相关性,对大部分样点的空隙率能够进行准确检测,可以实现较大范围内碎石集料快速准确评价的目标。

为了进一步评估模型的性能,本研究将模型的性能和多元线性回归方法、贝叶斯方法、K最邻近方法和支持向量回归方法进行对比。各模型的算法和精度如表3所示。

表3 不同模型预测性能对比

Table 3 Comparison of predictive performance of different models

| 模型 | E_{RMS} | E_{MA} | $E_{MAP}/\%$ |
|----------|-----------|----------|--------------|
| 多元线性回归方法 | 6.039 | 4.096 | 12.42 |
| 贝叶斯方法 | 4.980 | 3.980 | 11.41 |
| K最邻近方法 | 4.990 | 3.760 | 10.73 |
| 支持向量回归方法 | 4.020 | 3.120 | 8.66 |
| 本研究方法 | 0.914 | 0.589 | 1.69 |

由表3可知,在使用相同数据和数据集划分方法的前提下,随机森林方法进行压实度检测的精确度远高于其余方法,在碎石集料检测任务上具有显著的优越性。

多元线性回归方法是一种用于建立和分析多个自变量和一个连续目标之间关系的统计方法。它假设自变量和目标变量之间的关系是线性的,考虑多个自变量,认为每个自变量都会对目标变量产生影响,使用最小二乘法调整回归系数,得到最终

的结果。多元线性回归模型的一般形式为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon, \quad (1)$$

式中: Y 是目标变量,代表压实度信息; $\{X_1, X_2, \dots, X_p\}$ 是自变量,代表级配、用量和表面空隙率; $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p\}$ 是回归系数; β_0 是截距项; ε 是误差项,表示模型无法解释的随机误差。

朴素贝叶斯算法是一种基于贝叶斯定理的机器学习算法,其核心假定是特征之间具有相互独立性。通过计算训练数据集在每个类别的先验概率,以及每个特征在每个类别下的条件概率,对每个新给定的数据点,计算它属于每个类别的后验概率,然后选择具有最高后验概率的类别作为预测结果。贝叶斯算法对公式(1)中的回归系数的计算方法进行了改进,不仅估计系数的点估计,还要估计其概率分布,通常假定这些系数服从某个先验分布。本研究假定其服从高斯分布,如:

$$\beta_0 \sim N(\mu_0, \sigma_0^2), \beta_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2), \dots, \beta_p \sim N(\mu_p, \sigma_p^2).$$

这表明截距和系数都是从正态分布里面随机挑取的,具有相对应的方差。在训练过程中,使用贝叶斯规则更新先验分布,从而得到后验分布,进一步计算出后验分布中的回归系数。在预测时,可以获得目标变量的后验分布,包括均值和方差,从而提供了预测的不确定性。

K最邻近算法通过计算待预测样本与训练集中所有样本之间的距离,依据K个最邻近目标的平均值作为待预测样本的预测目标值。本研究设置K为3,计算的距离为欧式距离。

支持向量回归方法是基于支持向量机的思想,通过找到一个“最优边界”,该边界容纳训练数据,并且在边界内尽量减少预测误差。其目标在于找到一个能够最大程度上拟合训练数据的函数,并同时尽量减少预测误差。其函数通常表示为:

$$Y = f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x, x_i) + b,$$

式中: $f(x)$ 为预测的目标值,代表模型的预测结果; α_i 为通过训练得到的模型的拉格朗日乘子; $K(x, x_i)$ 为核函数,用于度量样本 x 和训练集中 x_i 的相似性; b 为模型的偏置项。

3 结论

本研究提出一种基于图像处理和随机森林的碎石集料空隙率快速无损检测方法,通过开展室内试验,分析影响碎石集料空隙率的相关因素,提出了适用于碎石集料的图像处理方法。使用随机森

林模型深入挖掘碎石表面图像信息和空隙率之间的潜在关系,并基于碎石表面图像信息对碎石集料空隙率进行预测,预测精度达到97.78%。想要进一步提高预测精度,需要在进行图像数字处理的时候进行更为细致的分析,分析出更多与碎石集料空隙率相关的图像指标,同时,使用能够对更为复杂的信息进行建模的方法深入挖掘图像指标和空隙率之间的潜在关系。

参考文献:

- [1] 陈云, 胡志刚, 徐晗. 灌水法检测堆石体密度影响因素分析与控制措施[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 177-181.
CHEN Yun, HU Zhigang, XU Han. Influence factors and control measures for the density of rockfill by using irrigation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 177-181.
- [2] 马林, 陈佩林, 徐科, 等. 粗集料颗粒几何形状对 VCA₋(DRC) 的影响研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(12): 5-9.
MA Lin, CHEN Peilin, XU Ke, et al. Effect of coarse aggregate shape on VCA₋(DRC)[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(12): 5-9.
- [3] 张小伟, 肖瑞敏, 张雄. 混凝土粗骨料堆积的定量体视学研究[J]. 混凝土, 2011(4): 64-68.
ZHANG Xiaowei, XIAO Ruimin, ZHANG Xiong. Image analysis for package of coarse aggregates used in concrete[J]. Concrete, 2011(4): 64-68.
- [4] KOOHMISHI M, PALASSI M. Evaluation of morphological properties of railway ballast particles by image processing method[J]. Transportation Geotechnics, 2017, 12: 15-25.
- [5] ZHAO L, ZHANG S, HUANG D, et al. 3D shape quantification and random packing simulation of rock aggregates using photogrammetry-based reconstruction and discrete element method[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 119986.
- [6] HU J, LIU P, WANG D, et al. Influence of aggregates' spatial characteristics on air-voids in asphalt mixture[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19(4): 837-855.
- [7] KIM K, KANG M. Linking the effect of aggregate interaction to the compaction theory for asphalt mixtures using image processing[J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2045-2062.
- [8] 李守艳, 刘洪亮, 史鉴. 无养生条件石灰粉煤灰稳定碎石施工技术研究[J]. 市政技术, 2022, 40(7): 96-100.
LI Shouyan, LIU Hongliang, SHI Jian. Research on lime fly ash stabilized crushed-stones without[J]. Municipal Technology, 2022, 40(7): 96-100.
- [9] 谢远新. 基于均匀试验的振动成型方式下粗集料间隙率研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(4): 615-618.
XIE Yuanxin. Study on the voids in coarse aggregate by means of vibration molding based on the uniform experiment[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2016, 40(4): 615-618.
- [10] 吴文亮, 王端宜, 张肖宁, 等. 基于数字图像处理与概率统计方法的 VCA₋(mix) 研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(12): 1792-1795.
WU Wenliang, WANG Duanyi, ZHANG Xiaoning, et al. Research on voids in coarse aggregate of asphalt mixtures with digital image processing and probability statistics[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2010, 38(12): 1792-1795.
- [11] BOZORGZAD A. Consistent distribution of air voids and asphalt and random orientation of aggregates by flipping specimens during gyratory compaction process[J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 376-382.
- [12] LIN H M, WILLSON A N. Median filters with adaptive length[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1988, 35(6): 675-690.
- [13] BELAID L J, MOUROU W. Image segmentation: a watershed transformation algorithm[J]. Image Analysis & Stereology, 2009, 28(2): 93-102.
- [14] XU X, XU S, JIN L, et al. Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(7): 956-961.
- [15] COENEN A R, KUTAY M E, SEFIDMAZGI N R, et al. Aggregate structure characterisation of asphalt mixtures using two-dimensional image analysis[J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(3): 433-454.
- [16] SHI L, WANG D, JIN C, et al. Measurement of coarse aggregates movement characteristics within asphalt mixture using digital image processing methods[J]. Measurement, 2020, 163: 107948-107961.
- [17] ROTHER C, KOLMOGOROV V, BLAKE A. "Grab-Cut" interactive foreground extraction using iterated graph cuts[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2004, 23(3): 309-314.
- [18] KRISHNA K, MURTY M N. GeneticK-means algorithm[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part B (Cybernetics), 1999, 29(3): 433-439.
- [19] HU X, FANG H, YANG J, et al. Online measurement and segmentation algorithm of coarse aggregate based on deep learning and experimental comparison[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327: 127033.

- [20] 胡祥. 基于空隙率预测的粗骨料形态测量及表征方法 [D]. 厦门: 华侨大学, 2022.
- HU Xiang. Measurement and characterization of coarse aggregate morphology based on predicted void content [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2022.
- [21] HARTIGAN J A. Bayes theory [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [22] KELLER J M, GRAY M R, GIVENS J A. A fuzzy k -nearest neighbor algorithm [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985(4): 580-585.
- [23] NOBLE W S. What is a support vector machine? [J]. Nature Biotechnology, 2006, 24(12): 1565-1567.
- [24] BIAU G, SCORNET E. A random forest guided tour [J]. Test, 2016, 25: 197-227.
- [25] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [26] GERAETS W G, VAN DAATSELAAR A, VERHEIJ J. An efficient filling algorithm for counting regions [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2004, 76(1): 1-11.
- [27] WANG F, XIAO Y, CUI P, et al. Effect of aggregate morphologies and compaction methods on the skeleton structures in asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120220.
- [28] ANDERSON R M, BUKOWSKI J R, TURNER P A. Using superpave performance tests to evaluate asphalt mixtures [J]. Transportation Research Record, 1999, 1681(1): 106-112.
- [29] WIDYATMOKO I. Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling [J]. Construction and Building materials, 2008, 22(2): 77-87.
- [30] COREE B, HISLOP W P. A laboratory investigation into the effects of aggregate-related factors of critical VMA in asphalt paving mixtures [R]. Ames: Iowa State University, Center for Transportation Research and Education, 2000.
- [31] PROWELL B D, ZHANG J, BROWN E R. Aggregate properties and the performance of superpave-designed hotmix asphalt [M]. Washington: Transportation Research Board, US, 2005.
- [32] 董继红, 谢宇欣, 薛永超, 等. 芜湖长江公铁大桥 ER 铺装体系 EBCL 层碎石方案优化研究 [J]. 市政技术, 2022, 40(8): 12-15.
- DONG Jihong, XIE Yuxin, XUE Yongchao, et al. Research on crushed stone optimization in EBCL layer of ER pavement system of the Third Yangtze River Bridge in Wuhu [J]. Municipal Technology, 2022, 40(8): 12-15.
- [33] JIANG Y, TIAN T, DENG C, et al. Effects of cement content, curing period, gradation, and compaction degree on mechanical behavior of cement-stabilized crushed gravel produced via vertical vibration test method [J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1-13.
- [34] 李鹏飞, 尹国宏. 沥青稳定碎石过渡层对沥青路面结构力学响应的影响 [J]. 市政技术, 2022, 40(2): 8-13.
- LI Pengfei, YIN Guohong. Influence of asphalt stabilized macadam transition layer on mechanical response of asphalt pavement structure [J]. Municipal Technology, 2022, 40(2): 8-13.
- [35] MYLES A J, FEUDALE R N, LIU Y, et al. An introduction to decision tree modeling [J]. Journal of Chemometrics: a Journal of the Chemometrics Society, 2004, 18(6): 275-85.
- [36] LIU S, CAO W, QI X, et al. Research and application of statistical law of VCA formed from the packing of basalt coarse aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 484-491.

(编辑:郭少华)

(上接第 88 页)

- [22] 王天亮, 王林, 刘松松, 等. 黄原胶和瓜尔胶改良膨胀土力学特性试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2023, 44(2): 1-10.
- WANG Tianliang, WANG Lin, LIU Songsong, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil improved by xanthan gum and guar gum [J]. China Railway Science, 2023, 44(2): 1-10.
- [23] BENSLIMANE A, BAHLOULI I M, BEKKOUR K, et al. Thermal gelation properties of carboxymethyl cellulose and bentonite-carboxymethyl cellulose dispersions; Rheological considerations [J]. Applied Clay Science, 2016, 132/133: 702-710.
- [24] WANG Z R, DING W T, ZHU Z J, et al. Experimental study on rheological behaviors of Na-bentonite slurries under seawater intrusion [J]. Construction and Building Materials, 2022, 357: 129369.

(编辑:郭少华)