

文章编号:1005-0523(2015)05-0010-06

基于数字图像处理的沥青混合料粗集料筛分方法

叶 奋^{1,2}, 林增龙¹, 宋卿卿¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 新疆大学建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 由于粗集料形状的复杂性, 采用机械筛分时常出现颗粒级配组成变异性大、混合料体积参数不易控制的问题, 为此提出基于数字图像处理的粗集料筛分方法。将粗集料经机械筛分后随机取样, 借助图像处理技术获取轮廓面积数据, 通过单样本的 Kolmogorov-Smirnov 检验得到面积的分布规律; 给出单档集料面积在一定概率水平下的分布区间, 得到基于二维集料面积的粗集料筛分方法。试验表明: 数字图像处理筛分有效剔除了变异性较大的集料颗粒, 粗集料分布均匀性提高, 可以提高级配设计的稳定性和准确性。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 数字图像处理; 集料面积; 级配设计

中图分类号: U414

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.05.003

现行规范沥青混合料级配设计中集料筛分以粒径为划分标准, 但是由于集料形状的复杂性, 实际筛分出的单档集料大小和形状波动性较大^[1]。细集料数量众多、面积小差异不明显, 而粗集料分布和形态对沥青混合料的均匀性影响较大, 所以选择粗集料为研究对象^[2-3]。粗集料中一些颗粒单一方向上的直径很小, 筛分时通过了筛孔, 但是集料本身的面积却很大, 其在马歇尔试件中所起到的作用并不同于本档内的其他集料, 此外还有试验过程中筛分是否充分及集料取样均匀性等问题, 都会导致试验中同一档集料变异性较大, 进而对沥青混合料级配设计产生影响, 造成体积参数浮动。数字图像处理(Digital Image Processing)手段具有方便、经济、形象化存储和易于分析等优点, 近年来它常被用来研究沥青混凝土级配设计问题^[4-5]。但是目前大多是对沥青混凝土试件切割断面拍照或 CT 扫描得到的图像进行分析, 获取二维轮廓面积、周长及颗粒个数等信息^[6-8], 还没有研究是从集料图像着手来研究其与级配的关系。研究借助 Matlab 和 Image Pro Plus(IPP)对粗集料进行图像处理分析, 从数理统计的角度分析出单档集料面积的分布规律, 提出与机械筛分的筛余质量相对应的筛分面积区间来进行级配设计, 可以有效降低单档集料变异性, 提高级配设计的稳定性。

1 集料试验

1.1 材料选择

选择上海某厂的石灰岩和玄武岩石料, 用四分法取集料试样^[9]。分别对两种集料进行机械筛分, 石灰岩得到粒径为 4.75, 9.5, 13.2 mm 和 16 mm, 玄武岩粒径为 4.75, 9.5 mm 和 13.2 mm。

1.2 图像处理与数据采集

1) 图像采集。采用数字图像处理技术, 量测的精度取决于拍摄范围大小与数码相机的分辨率。随机选取筛分后各档石灰岩和玄武岩集料组成样本, 将集料平铺于白色纸面上增加集料与背景的对比度, 调整光源高度和角度照射消除阴影^[10], 使用 1 200 万像素的佳能 G15 数码相机进行拍摄获得格式为 JPG 的图像文件(见图 1)。为了降低集料摆放位置及拍摄角度的影响, 增加了样本容量, 3 档集料共统计了近 3 000 个面积

收稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168044)

作者简介: 叶奋(1970—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为道路工程材料。

数据,样本容量充足,具有一定的代表性。

2) 转成灰度图像、去噪并获得二值图像。为便于处理图像文件,减少图像数据量,用 Matlab 中 `rgb2gray` 函数将 JPG 格式的图像转化为灰度图像;为避免噪声干扰造成图像质量的降低,对图像进行去噪处理。通过 Matlab 图像处理中的 `medfilt2` 函数实现中值滤波法中对于噪声干扰的消除;使用 `imhist` 函数显示出图像数据直方图(见图 2),通过分析直方图特征波峰波谷值确定分割图像时所需的最佳阈值,利用该阈值作为分界进行二值化处理,使用 `if` 语句完成转化。

3) 计算并导出面积数据。IPP 中打开待处理的二值图(见图 3),使用 Count/Size 工具,得出白色区域(集料区域)的数量和面积(见图 4),并将数据导出。



图 1 集料 JPG 格式图像
Fig. 1 Aggregate image of JPG format

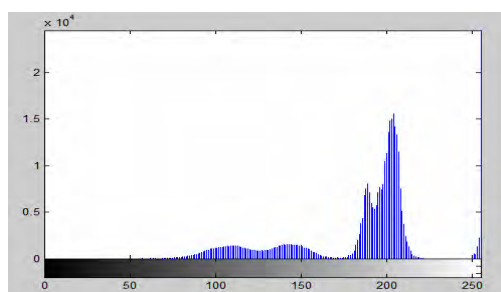


图 2 Matlab 阈值处理图
Fig. 2 Threshold processing figure by Matlab

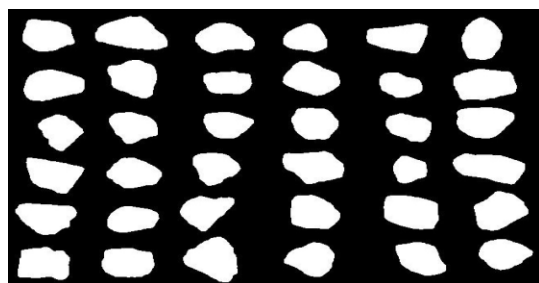


图 3 处理后的二值图像
Fig. 3 The processed binary image



图 4 IPP 对集料面积标号并采集
Fig. 4 Labeling and collecting of the aggregate area by IPP

2 集料试验数据处理分析

2.1 集料面积分布的非参数检验

非参数检验方法不依赖于总体分布,在总体分布不明的情况下,可以检验出样本数据是否来自于同一总体。对比几种拟合优度检验的特点,使用单样本的 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验面积服从的分布类型。K-S 检验是将一组样本值的分布与某一指定的已知理论分布进行对比,检验两者之间的符合程度。检验的基本思路是:先将理论累积频率分布和观测的经验累积频率分布进行比较,求出它们最大的偏离值,然后在给定的显著性水平上检验这种偏离值是否是偶然出现的。

以玄武岩 9.5 mm 为例,检验样本的面积(像素面积)数据是否服从正态分布。设 $S_n(x)$ 是面积观察值的累积概率分布函数(经验分布函数), $F_0(x)$ 是一个正态分布的累计概率分布函数(理论分布函数),检验的具体步骤如下。

1) 提出假设

$$H_0: S_n(x) = F_0(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1)$$

$$H_1: F_0(x) \neq F_0(x) \quad (2)$$

式中: H_0 为原假设; H_1 为备择假设; σ 为标准偏差; μ 为样本均值; x 为样本参数值; e 为自然常数。

2) 计算相伴概率 P 值。SPSS(Statistical Product and Service Solutions)是一款统计分析软件,可以方便快捷地处理数据,输出统计结果,对于本试验的单样本 K-S 检验,使用 SPSS 计算可以得出样本均值、标准差、临界值 Z 以及 P 值,结果如表 1 所示。

相伴概率是当 H_0 为真时拒绝 H_0 的概率,其值越大则拒绝 H_0 的理由越不充分,在置信水平 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下, $P>0.05$ 则不能拒绝 H_0 。在 0.05 的显著性水平下, $0.964>0.05$,所以不能拒绝 H_0 ,即原数据样本服从正态分布,参数为 $\mu=652.58, \sigma=150.58$ 。绘制正态分布频数分布直方图和正态分布 Q-Q 图(见图 5),可得数据正态性拟合良好,Q-Q 曲线显示数据集中分布在曲线对角线两侧附近,除了面积区间两端部分数据之外数据正态性良好。

表 1 9.5 mm 玄武岩样本非参数检验结果
Tab. 1 Nonparametric test results of 9.5 mm basalt sample

参数	结果值
样本容量 N	57
均值	652.58
标准差	150.58
临界值 Z	0.500
渐近显著性(双侧) P 值	0.964

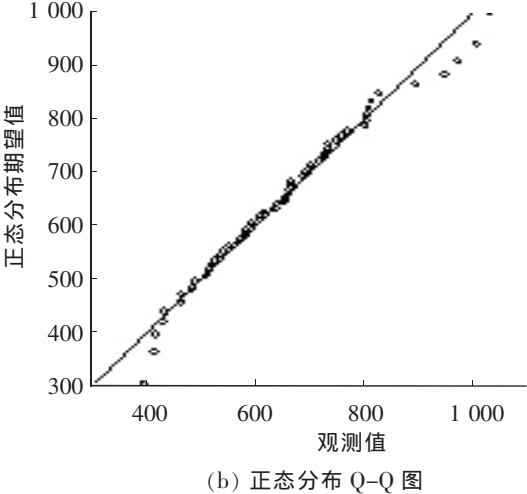
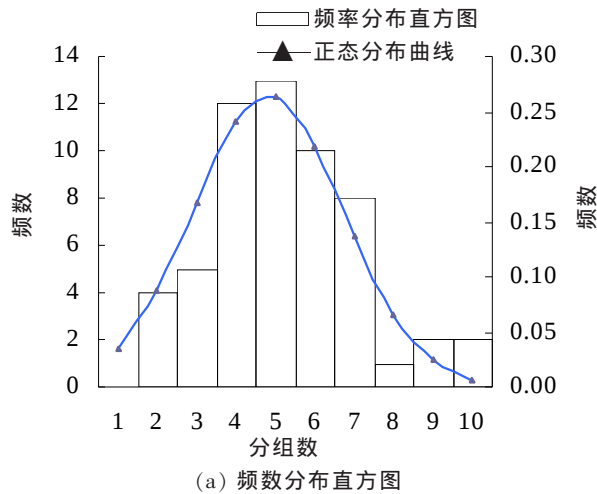


图 5 机械筛分面积区间频率分布直方图和正态分布 Q-Q 图
Fig. 5 Mechanical sieving area range frequency distribution histogram and normal Q-Q diagram

对玄武岩 13.2,4.75 mm,石灰岩 16,13.2,9.5,4.75 mm 的单档粒径使用 SPSS 分析结果如表 2 所示。石灰岩和玄武岩各档粗集料面积在 0.05 的显著性水平下相伴概率 $P>0.05$,即样本面积数据均服从正态分布。

表 2 玄武岩和石灰岩粗集料面积非参数检验结果
Tab. 2 Non-parametric test results of basalt and limestone coarse aggregate area

参 数	粒径/mm						
	玄武岩			石灰岩			
	13.2	9.5	4.75	16	13.2	9.5	4.75
样本容量 N	47	64	71	108	107	126	120
均 值	1 482.43	909.91	393.03	2 528.23	1 535.91	897.57	386.24
标准差	223.01	225.06	153.17	564.84	313.29	228.80	126.97
临界值 Z	0.700	0.655	0.919	0.719	0.708	0.722	0.713
渐近显著性(双侧) P 值	0.710	0.785	0.367	0.679	0.698	0.674	0.690

2.2 集料面积分布的参数检验

通过统计手段确定每档集料面积的分布之后,再对面积分布进行参数检验,得到一定概率水平下面积的分布区间,在数理统计的前提下实现面积区间与传统筛分粒径的对应,为从二维面积角度筛分提供了可能,以玄武岩为例分析如下。

由 K-S 检验知各档集料面积服从正态分布,求出每档集料面积分布的均值和标准差。根据图 6 散点的分布情况,正态分布面积区间的两端偏离对角线明显,结合正态分布的性质: $X \sim N(\mu, \sigma^2)$,则 $P(|X-\mu| \leq \sigma)=0.682\ 6$,选取区间 $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$,对于每档集料该面积区间包含了 68.26%的面积范围,剔除位于两端的面积区间,以减小单档集料的变异性。绘制玄武岩 9.5 mm 位于 $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$ 区间范围内集料 Q-Q 图(见图 6),与原 Q-Q 图对比可以看到集料正态性更为明显,面积分布更为稳定,变异性减小。

在上述概率统计分析的基础上,级配设计时对粗集料部分取样采用机械筛分,获取单档集料的图像文件,提取面积数据,根据正态分布的性质获得使用的面积区间,将面积与粒径相对应。可以转化为在各档面积区间内筛分集料,计算粗集料面积区间通过率,从而替代传统机械筛分进行级配设计。

2.3 基于图像处理筛分前后的粗集料离散性分析

离散性分析可以评价数据的变动情况和离散程度^[11],对玄武岩 4.75、9.5 和 13.2 三档粗集料使用图像处理筛分方法。试验将粗集料分成 3 个部分:一是未经处理的常规机械筛分集料;二是经图像处理面积区间范围内的集料;三是图像处理面积区间外剔除的集料。对此三部分粗集料进行分析,得到其面积(实际面积)参数,对筛分后三部分集料面积的极差、方差、变异系数计算并分析集料离散性情况,数据如表 3 所示。未经图像处理的机械筛分集料、图像处理筛分得到的集料及图像处理筛分剔除部分集料分别记为 A、B 和 C。

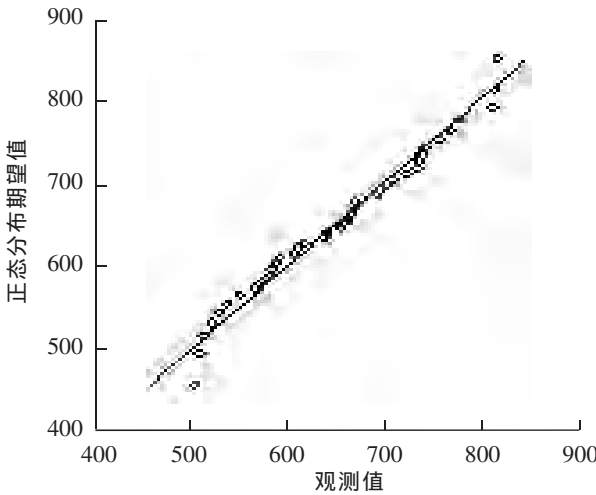


图 6 图像处理筛分后正态分布 Q-Q 图
Fig. 6 Normal Q-Q diagram after digital image processing sieving

表 3 玄武岩粗集料离散性对比
Tab. 3 Discreteness contrast of basalt aggregate

粒径/mm	集料	最大值 $x_{\max}/\text{cm}^2$	最小值 $x_{\min}/\text{cm}^2$	极差 R_i/cm^2	均值 μ/cm^2	标准差 σ	变异系数 C_v
13.2	A	3.893	1.793	2.100	2.618	0.462 3	0.176 1
	B	3.071	2.164	0.908	2.585	0.271 2	0.104 5
	C	3.893	1.793	2.100	2.765	0.689 8	0.257 0
9.5	A	2.703	0.897	1.807	1.594	0.408 0	0.256 2
	B	1.964	1.205	0.759	1.550	0.224 1	0.144 7
	C	2.703	0.897	1.807	1.690	0.637 2	0.377 4
4.75	A	1.336	0.195	1.140	0.511	0.217 3	0.424 7
	B	0.721	0.296	0.425	0.467	0.116 3	0.248 5
	C	1.336	0.195	1.140	0.650	0.344 1	0.527 8

$$R_i=\max_{i,j} |x_i-x_j| \tag{3}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i-\mu)^2} \tag{4}$$

$$C_v=\sigma/\mu \tag{5}$$

式中: R_n 为极差; C_v 为变异系数; n 为样本容量; x_i 是第 i 个样本参数; x_j 是第 j 个样本参数。

分析表中数据可得,13.2,9.5,4.75 mm 粒径集料经图像处理筛分得到的部分(B)相比于普通机械筛分部分(A)极差分别下降了 56.8%,58.0%,62.7%,标准差分别下降了 41.3%,45.1%,46.5%,变异系数下降了 40.7%,43.5%,41.5%。说明了图像处理筛分后的粗集料相比于机械筛分得到的集料面积分布更加集中,颗粒间的差异性和波动性降低,均匀性提高。三档集料经图像处理筛分部分(B)的变异系数相比于图像处理筛除部分(C)下降幅度更为显著,分别是 59.3%,61.7%,52.9%。这说明图像处理筛分方法有效剔除了变异性较大的集料颗粒,可以降低变异因素,提高集料的均匀性和一致性。

3 级配试验

为了验证集料变异性对于沥青混合料体积参数稳定性的影响程度,使用集料试验中筛分得到的 A,B和 C 三部分集料,选择密级配热拌沥青混合料 AC-13 进行试验,按现行规范^[12]在同一选定的级配曲线下成型马歇尔试件,所选择级配的分计筛余及级配曲线如表 4、图 7 所示。测定 A,B 和 C 三组试件的毛体积密度、空隙率等体积参数,对比三组试件的试验结果如图 8 所示。

表 4 各档集料通过率
Tab. 4 Aggregate passing percentage

参数	d/mm									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
WB/%	100	91	70	52	35	24	15	10	8	6

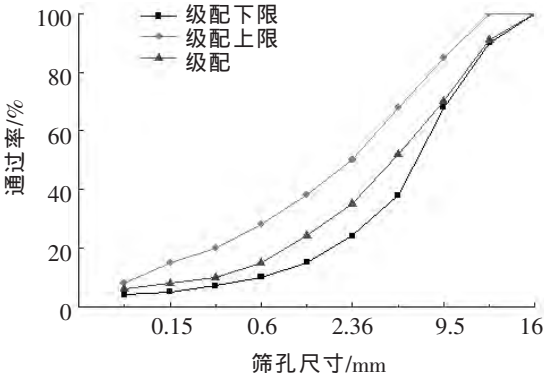


图 7 级配曲线
Fig. 7 Grading curve

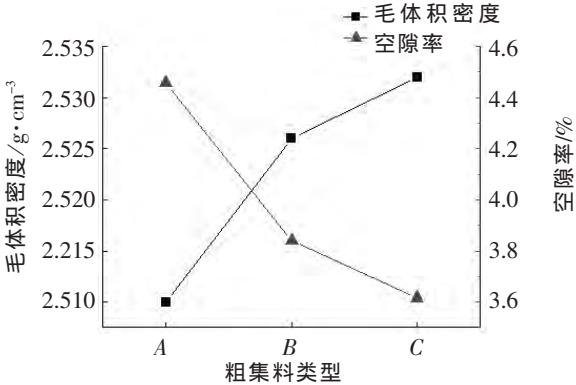


图 8 3 组试件参数对比
Fig. 8 Parameter comparison of specimens

A,B,C 三部分集料在完全相同的级配曲线下,相同的成型条件下,严格控制试件高度,三组试件空隙率却有较大的差别,B 和 C 相比于 A 分别有 13.8%,18.9%的偏差,这说明单档粗集料变异性会对级配设计中空隙率的控制造成影响。采用图像处理筛分方法取各面积区间内的集料进行试验,各试件体积参数稳定,结合面积数据离散性分析结论可知,图像处理筛分方法可以避免集料变异性对于沥青混合料体积参数控制的影响,可以保证级配设计的稳定性并提高准确性。

4 结论

- 1) 通过单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验得到样本的面积服从正态分布,根据正态分布的参数可以得到满足一定概率水平下面积分布的区间,可应用于级配设计。
- 2) 对图像处理获取的面积数据分析可得:在统计学基础上,图像处理筛分技术可以降低集料离散性,增加每档集料的均匀性,避免由于集料差异而引起级配的波动性和变异性。

3) 采用相同的级配,成型的三组试件空隙率差别较大,说明集料变异性会影响沥青混合料的级配设计,而结合图像处理技术的筛分方法可以有效剔除变异性较大的集料颗粒,保证级配设计的稳定性。希望通过后续试验验证图像处理筛分方法成型的试件是否具有更优的高低温及疲劳性能。

参考文献:

- [1] 孙超. 粗集料变异性对沥青混合料级配的影响[J]. 中国科技信息, 2013(4): 67-67.
- [2] 吴文亮,李智,张肖宁. 用数字图像处理技术评价沥青混合料均匀性[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(4): 921-925.
- [3] MORA C F, KWAN A K H. Sphericity, Shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(3): 351-358.
- [4] 彭勇,孙立军,杨宇亮,等. 一种基于数字图像处理技术的沥青混合料均匀性研究新方法[J]. 公路交通科技, 2004, 21(11): 10-12.
- [5] 石立万,王端宜,蔡旭,等. 基于数字图像处理的粗集料接触分布特性[J]. 中国公路学报, 2014, 27(8): 23-31.
- [6] 李智,徐伟,王绍怀,等. 不同压实成型沥青混合料的数字图像分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12): 68-73.
- [7] 彭勇,杨宇亮,董瑞琨,等. 沥青混合料的细观结构分析软件 MASAC 指标体系[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(3): 115-119.
- [8] 沙爱民,王超凡,孙朝云. 一种基于图像的沥青混合料矿料级配检测方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2010, 30(5): 1-5.
- [9] 中华人民共和国交通部. JTG E42-2005 公路工程集料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2005.
- [10] MORA C, KWAN A, CHAN H. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(6): 921-932.
- [11] 王新飞,黄志义,刘卓,等. Delaunay 三角网格的沥青混合料粗集料分布特性[J]. 浙江大学学报:工学版, 2012, 46(2): 263-268.
- [12] 中华人民共和国交通部. JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.

Coarse Aggregate Sieving Method of Asphalt Mixture Based on Digital Image Processing

Ye Fen^{1,2}, Lin Zenglong¹, Song Qingqing¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Due to the complexity of the coarse aggregate shape, the use of mechanical sieving often results in such problems as the variability of coarse aggregate particle gradation composition, difficulty in controlling mixture volume parameters. This study puts forward the coarse aggregate sieving method based on digital image processing to obtain area data of the outline. After random sampling of the coarse aggregate sieved mechanically, it obtains distribution law of aggregate area with one sample Kolmogorov-Smirnov test. By illustrating the distribution range at a certain probability level, it develops the coarse aggregate sieving method based on two-dimensional area. Experiments show that coarse aggregate of larger variability is removed effectively and discrete is reduced after the digital image sieving. The proposed method can improve the stability and accuracy of grading design.

Key words: road engineering; asphalt mixture; digital image processing; aggregate area; gradation design

(责任编辑 姜红贵)