

基于数字图像处理与概率统计方法的 VCA_{mix} 研究

吴文亮, 王端宜, 张肖宁, 李 智

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 粗集料骨架间隙率 VCA_{mix} 是沥青混合料试件的重要体积参数之一. 应用数字图像处理技术, 采用红色石料作为粗集料, 普通石料作为细集料, 利用颜色的对比精确区分粗、细集料; 进一步对试件做薄片切割, 采用概率统计理论, 推导了由多幅二维截面图像上的粗集料面积比计算三维空间中粗集料体积比的方法; 并对如何确定薄片数量, 及其与保证率之间的关系做出了说明和验证. 结果显示, 40 片薄片能够满足工程精度要求.

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 粗集料骨架间隙率; 数字图像处理; 概率统计

中图分类号: U 414.1

文献标识码: A

Research on Voids in Coarse Aggregate of Asphalt Mixtures with Digital Image Processing and Probability Statistics

WU Wenliang, WANG Duanyi, ZHANG Xiaoning, LI Zhi

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Voids in coarse aggregate of asphalt mixtures (VCA_{mix}) is one of the most important volumetric properties of asphalt mixtures. Digital image processing technique is adopted to distinguish the coarse and fine aggregate with red stones as coarse aggregates and common stones as fine aggregates. Further more, the specimen is cut into slices and probability statistics theory is used to put forward a method that calculating the coarse aggregate's volume distribution in 3D space from its area distribution in 2D section. At last, how to determine the number of slices and the relation between slices and the guarantee rate is introduced. Results show 40 slices can satisfy the requirement of engineering accuracy.

Key words: road engineering; asphalt mixtures; voids in coarse aggregate of asphalt mixtures; digital image processing; probability statistics

粗集料骨架间隙率 (VCA_{mix}) 作为沥青混合料中粗集料紧密堆积的判断依据有必要对其展开深入研究. 该指标形象直观, 可操作性强, 直接反映了粗集料的嵌挤状态, 又避免了直接使用颗粒堆积理论判断方法时各项参数的复杂运算. 在美国及我国的沥青玛蹄脂碎石混合料 (stone mastic asphalt, SMA) 设计规范中, 均将 VCA_{mix} 指标定为骨架形成的唯一判据, 反映了该指标的可行性^[1-3]. VCA_{mix} 示意图如图 1 所示.

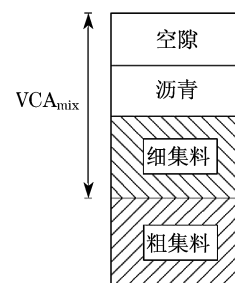


图 1 VCA_{mix} 示意图

Fig.1 Sketch map of VCA_{mix}

显然, VCA_{mix} 的直观定义为

$$VCA_{mix} = \left(1 - \frac{V_{粗}}{V_{总}}\right) \times 100 \quad (1)$$

式中: $V_{粗}$ 为沥青混合料中粗集料的体积; $V_{总}$ 为沥青混合料总体积.

实际计算时, 根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 的规定, VCA_{mix} 算式中的有关体积是通过毛体积密度间接得到的, 其中未能准确计算沥青对 VCA_{mix} 的影响, 会使计算结果产生较大偏差^[4]. 借助数字图像处理技术, 可以直接针对混合料内部的体积组成 (粗集料的体积), 且不涉及中间变量, 将是一种比较理想的方法.

徐科等^[4] 提出基于数字图像处理技术的 VCA_{mix} 量测法, 该方法能区分粗、细集料, 但其仅对二维截

收稿日期: 2009-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51008131, 51038004); 交通部西部交通建设科技资助项目 (2009318000078); 华南理工大学中央高校基本科研业务费专项资金 (2009ZM0206)

作者简介: 吴文亮 (1981—), 男, 工学博士, 博士后, 主要研究方向为道路工程与材料. E-mail: wenliang_wu81@163.com

面进行分析,无法建立粗集料的三维体积特性;Wang 等^[5],Masad 等^[6]采用计算机断层扫描装置(computerized tomography,CT)研究了沥青混合料中空隙的特性,但在区分粗、细集料时遇到了困难.

本文应用数字图像处理技术,采用红色石料作为粗集料,普通石料为细集料,利用颜色的鲜明对比区分粗、细集料;进一步对试件做薄片切割,采用概率统计理论,推导由多幅二维截面图像上的粗集料面积比计算三维空间中粗集料体积比的方法;对如何确定薄片数量做

出说明和验证.

1 试验设计

在本研究中,粗集料(粒径 ≥ 2.36 mm)采用天然红色石料,细集料采用花岗岩,矿粉采用石灰岩矿粉,沥青为中油 70 号沥青.使用 Superpave 旋转压实仪成型直径为 150 mm 的 SMA-13 沥青混合料试件,级配见表 1.

表 1 SMA-13 沥青混合料级配
Tab.1 Gradation of SMA-13

级配类型	通过以下筛孔(mm)的集料百分率/%										油石比/%
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
SMA-13	100.0	95.0	63.0	25.0	18.5	17.0	16.0	13.0	11.5	10.0	6.0

用数字图像处理方法计算 VCA_{mix} 时,需要准确获取粗集料颗粒的截面信息,采用薄片切割的方法,选用 CD-606 型大理石薄板切割机切割试件,切割机锯口厚度 1.5 mm,层厚 1.5 mm,高度为 120 mm 的试件切割后可获得薄片约 40 片,切割方法见图 2.

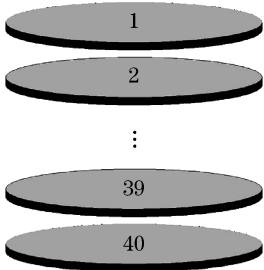


图 2 试件切割方法
Fig.2 Method of cutting specimen

利用数码相机拍摄截面图像,1 号薄片的截面如图 3a 所示,由于本文采用红色石料作为粗集料,导致红色灰度直方图呈明显的双峰,可直接根据红色灰度直方图选定合适的阈值^[4],对图 3a 进行图像增强、噪声消除等操作以完成二值化处理^[7],利用双峰法提取集料颗粒信息,二值化处理后的结果如图 3b 所示.

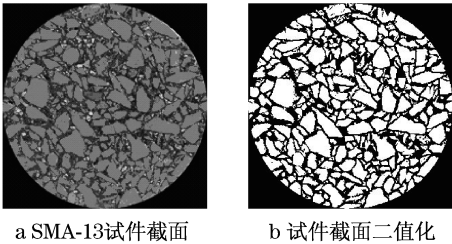


图 3 SMA-13 图像
Fig.3 Image of SMA-13

2 VCA_{mix} 计算方法

本文采用概率统计方法由二维截面上的粗集料面积推测三维空间中的粗集料体积.理想情况下,当薄片数量 $n \rightarrow \infty$ 时,薄片厚度 $d \rightarrow 0$,此时颗粒沿薄片厚度方向形状不变,即粗集料在所属薄片的上表面、下表面及内部各水平面上形状保持一致,不发生变化,如图 4 所示.

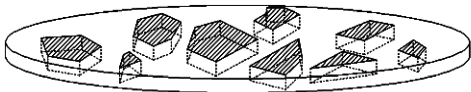


图 4 薄片内集料形状
Fig.4 Shape of aggregates in slice

因此,当薄片数量 $n \rightarrow \infty$ 时,得到以下各式:

$$V_{i粗} = S_i d \tag{2}$$

$$V_{粗} = \sum_{i=1}^n V_{i粗} = d \sum_{i=1}^n S_i \tag{3}$$

$$VCA_{mix} = \left(1 - \frac{V_{粗}}{V_{总}}\right) \times 100 = \left[1 - \frac{d \sum_{i=1}^n S_i}{n S d}\right] \times 100 =$$

$$\left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i\right) \times 100 = (1 - \bar{A}_{n=\infty}) \times 100 \tag{4}$$

式(2)~(4)中: $V_{i粗}$ 为第 i 片薄片粗集料的体积; S_i 为第 i 片薄片截面上粗集料的总面积,通过数字图像方法获得; d 为薄片的厚度; $V_{粗}$ 为试件中粗集料的体积; n 为薄片数量, $n = \infty$; $V_{总}$ 为试件的体积; A_i 为颗粒面积比,即截面内粗集料

的面积与试件截面面积之比; $\bar{A}_{n=\infty}$ 为颗粒面积比平均值.

从式(4)可以看出, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 对粗集料骨架间隙率 VCA_{mix} 体积的计算转换为对颗粒面积比平均值 $\bar{A}_{n=\infty}$ 的计算.

实际操作时, 薄片数量 n 不可能趋于无穷大, 导致 \bar{A} 随着 n 的变化而不断变化, \bar{A} 成为变量 n 的一个离散函数:

$$\bar{A}f(n), \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty; \quad \bar{A} \in [A_{i\min}, A_{i\max}] \quad (5)$$

式中: $A_{i\min}, A_{i\max}$ 为颗粒面积比的最小值, 最大值.

此时, 可以采用统计的方法来计算 $\bar{A}_{n=\infty}$.

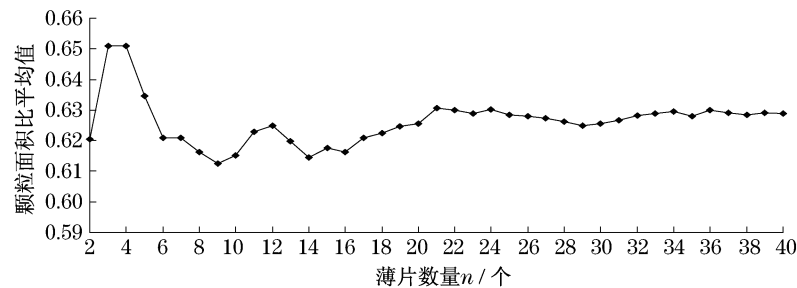


图5 \bar{A} 与 n 的关系图

Fig.5 Relationship between \bar{A} and n

据概率论中的切比雪夫大数定律^[8], 设 $\{\xi_n\}$ 是相互独立同分布的随机变量序列, 且有有限数学期望 $E(\xi_n) = \mu$, $n = 1, 2, \dots, \infty$, 对任意 $\varepsilon > 0$, 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{\left|\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_k - \mu\right| < \varepsilon\right\} = 1 \quad (6)$$

即

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_k \xrightarrow{P} \mu \quad (7)$$

用这个定律可以证明: 从概率上来说, 图5中的稳定值就是 $\bar{A}_{n=\infty}$. 这样, 对 VCA_{mix} 的计算转换为对稳定值 $\bar{A}_{n=\infty}$ 的计算. 下面用统计方法计算 $\bar{A}_{n=\infty}$.

3.1 颗粒面积比正态分布判定

随机抽取颗粒面积比 A_i 的过程可看作是一个简单随机抽样过程: 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $A(A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n=\infty})$ 即为总体, $\bar{A}_{n=\infty}$ 为总体均值; 从中抽取40片薄片时, 则样本容量 $n = 40$, $(A_1, A_2, A_3, \dots, A_{40})$ 即为样本, \bar{A}_{40} 为样本均值. 根据40个颗粒面积比的取值范围, 确定组限、频数, 绘制的直方图如图6所示.

应用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 统计软件中非参数检验的 Kolmogorov-

3 数据处理与分析

由于在试验设计时, 粗集料已经全部用红色石料代替, 因此用数字图像处理方法计算 VCA_{mix} 时由红色灰度直方图分割出的部分就是粗集料.

对40片薄片的截面图像均分割出粗集料, 再分别求出颗粒面积比 A_i , 从中随机抽取2, 3, 4, 5, ..., 40个数据, 分别计算 \bar{A} , 将 \bar{A} 与 n 的关系绘于图5上. 从图5中可以看出: 当 $n \in [2, 22]$ 范围时, 曲线上下震荡, 无任何规律; 当 n 继续增大时, 曲线逐渐趋于平缓; 当 $n \in [30, 40]$ 范围时, 曲线已变得很稳定, 趋近于某个稳定值.

Smirnov 单样本检验法^[9], 检验假设 H_0 : 服从正态分布. 结果如图7所示.

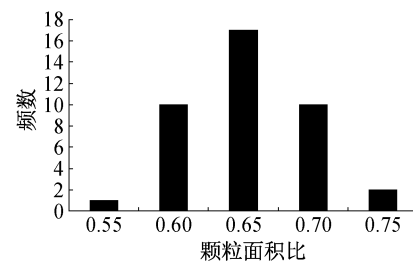


图6 颗粒面积比分布直方图

Fig.6 Histogram of particle area ratio

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test		
		VAR00003
N		40
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	.6283
	Std. Deviation	.04841
Most Extreme Differences	Absolute	.074
	Positive	.065
	Negative	-.074
Kolmogorov-Smirnov Z		.468
Asymp. Sig. (2-tailed)		.981

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

图7 颗粒面积比检验结果

Fig.7 Hypothesis result of particle area ratio

从图 7 中看出, Kolmogorov-Smirnov 单样本检验的 P 值等于 0.981, 大于 0.05, 即不能否定假设. 因此, 可认为颗粒面积比服从正态分布.

既然在 $\alpha = 0.05$ 条件下, $A(A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n=\infty})$ 服从正态分布 $N(0.628\ 3, 0.048\ 41^2)$, 则总体均值 $\bar{A}_{n=\infty} = 0.628\ 3$. 把 $\bar{A}_{n=\infty}$ 代入式(4)中, 得 $VCA_{mix} = (1 - \bar{A}_{n=\infty}) \times 100 = 37.17$. 这样, 就很方便的用数字图像处理方法得出了 VCA_{mix} 的值.

3.2 薄片数量 n 的确定

确定薄片数量 n 的过程实际上是个对于给定了总体 $A \sim N(0.628\ 3, 0.048\ 41^2)$, 从中抽取多大的样本能使样本均值 \bar{A} 在要求的保证率条件下趋近总体均值 μ 的过程, 是个求样本容量的问题.

对于本文中的 VCA_{mix} , 若要求其误差为 $\pm 5\%$, 保证率不小于 95%, 则样本均值 \bar{A} 的允许范围变为 $[0.628\ 3 \times (1 - 5\%), 0.628\ 3 \times (1 + 5\%)]$, 即 $[0.596\ 9, 0.659\ 7]$. 故问题描述为: 当 n 为多少时, 可满足:

$$P(0.596\ 9 < \bar{A} < 0.659\ 7) > 0.95 \quad (8)$$

由于 $A \sim N(0.628\ 3, 0.048\ 41^2)$, 则:

$$\bar{A} \sim N\left(0.628\ 3, \frac{0.048\ 41^2}{n}\right) \quad (9)$$

故

$$P(0.596\ 9 < \bar{A} < 0.659\ 7) = \Phi\left[\frac{0.659\ 7 - 0.628\ 3}{\frac{0.048\ 41}{\sqrt{n}}}\right] - \Phi\left[\frac{0.596\ 9 - 0.628\ 3}{\frac{0.048\ 41}{\sqrt{n}}}\right] = 2\Phi(0.648\ 6\sqrt{n}) - 1 \quad (10)$$

式(8)变换为

$$2\Phi(0.648\ 6\sqrt{n}) - 1 > 0.95 \quad (11)$$

计算得: $n > 9.13$, 取 $n = 10$.

由式(11), 即 $n = 10$ 时能满足保证率为 95%, 误差为 $\pm 5\%$ 的条件; 若要求误差为 $\pm 2.5\%$, 保证率仍为 95%, 按上述各式计算得出 $n = 37$, 所以本节中的 40 片薄片数量是能够满足工程精度要求的.

4 结论

(1) 采用数字图像处理技术, 结合概率统计方法, 提出一种计算粗集料骨架间隙率 VCA_{mix} 的新方

法, 该方法简单、直观、准确性好.

(2) 对于本试验中的试件, 当薄片数量为 37 片时, 能够由二维截面图像中的颗粒面积比计算出三维体积中的 VCA_{mix} , 此时该方法的误差为 $\pm 2.5\%$, 保证率为 95%, 能够满足工程精度要求.

(3) 本文中采用红色石料作为粗集料方便了粗集料的提取, 真正实现沥青混合料中粗、细集料的自动分离还需做大量研究工作.

参考文献:

- [1] 沈金安. 改性沥青与 SMA 路面 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
SHEN Jin'an. Polymer modified asphalt and SMA pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [2] 卢永贵, 张登良. 粗集料间隙率试验研究 [J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 1(1): 33.
LU Yonggui, ZHANG Dengliang. Test study for the voids in the coarse aggregate [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 1(1): 33.
- [3] Watson D E, Masad E, Moore K A, et al. Verification of voids in coarse aggregate testing-Determining stone-on-stone contact of hot-mix asphalt mixtures [C] // 83rd Annual Meeting of the Transportation-Research-Board. Washington D C: TRB, 2004: 182-190.
- [4] 徐科, 张肖宁, 王端宜. 基于数字图像处理技术的 VCA_{mix} 量测方法 [J]. 公路, 2005(11): 151.
XU Ke, ZHANG Xiaoning, WANG Duanyi. A measurement method of percent voids in coarse mineral aggregates in asphalt mixtures based on digital image processing technique [J]. Highway, 2005(11): 151.
- [5] Wang L B, Wang X, Mohammad L, et al. Application of mixture theory in the evaluation of mechanical properties of asphalt concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(2): 167.
- [6] Masad E, Muhunthan B, Shashidhar N, et al. Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(2): 88.
- [7] 张连卫, 张建民, 张嘎. 基于数字图像的粒状材料细观结构特征分析技术 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1555.
ZHANG Lianwei, ZHANG Jianmin, ZHANG Ga. Microfabric analysis technique for granular materials based on digital images [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1555.
- [8] 胡发胜, 宿洁. 数理统计 [M]. 济南: 山东大学出版社, 2004.
HU Fasheng, SU Jie. Mathematics statistics [M]. Ji'nan: Shandong University Press, 2004.
- [9] 黄海, 罗友丰, 陈志英, 等. SPSS 10.0 for Windows 统计分析 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
HUANG Hai, LUO Youfeng, CHEN Zhiying, et al. SPSS 10.0 for Windows statistics analysis [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2001.