

基于二维图像处理方法的沥青混合料 砂浆厚度谱研究

倪富健,姚琳怡,蒋继望

(东南大学 交通学院,江苏 南京 210096)

摘 要:为研究沥青混合料的砂浆厚度组成规律,考虑集料间接触的最薄弱方向,提出了一种基于最短接触距离原则的沥青混合料砂浆厚度计算方法。采用高精度二维扫描仪获取混合料二维切片图像,定义沥青砂浆由沥青以及粒径小于等于 1.18 mm 的细集料组成,并利用 MATLAB 相关图像处理方法进行混合料砂浆空间结构分析。提出平均砂浆厚度、砂浆厚度谱的众数及集中度指标,并对其进行统计分析。针对 6 种不同类型的混合料,研究不同压实次数、沥青种类、最大公称粒径以及级配类型等因素对其砂浆厚度的影响。结果表明:提出的方法适用于分析沥青混合料的砂浆厚度组成规律;砂浆厚度谱用对数正态分布模型进行拟合的效果较好;随着压实次数的增加,平均砂浆厚度及厚度谱众数均存在最小值,而砂浆集中度则存在峰值,说明过压会破坏砂浆的稳定状态,合理选择压实次数十分重要;较小的集料最大公称粒径、悬浮密实型结构以及改性沥青混合料对应的平均砂浆厚度更小,砂浆也向更小的厚度上集中,其集中度更高;级配类型和最大公称粒径的影响最为显著,沥青种类对厚度谱的集中度也有较为显著的影响,压实次数的影响虽然不大但也呈现出明显的规律性。

关键词:道路工程;砂浆厚度谱;数字图像处理;沥青混合料;细观结构

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Study on mortar thickness spectrum of asphalt mixture based on two-dimensional image processing method

NI Fu-jian, YAO Lin-yi, JIANG Ji-wang

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the constitution law of mortar thickness of asphalt mixture, a method of calculating mortar thickness of asphalt mixture based on the principle of the shortest contact distance was put forward, considering the weakest direction of contact between aggregates. High precision two-dimensional scanner was used to obtain the two-dimensional slice images of asphalt mixture. Asphalt mortar was defined as a composition of asphalt and fine aggregates less than or equal to 1.18 mm. MATLAB image processing method was used to analyze the spatial structure of mixture mortar. Several indexes including average mortar thickness, the mode and concentration ratio of mortar thickness spectrum were proposed and statistically analyzed. The

收稿日期:2017-12-09

基金项目:江苏交通控股集团科研项目(7621000133,7621000132);江苏高速公路工程养护技术有限公司科研项目(8521002483);

浙江交工集团股份有限公司科研项目(8521002166)

作者简介:倪富健(1968-),男,江苏海安人,教授,博士研究生导师,E-mail:nifujian@gmail.com。

influences of different compaction times, asphalt type, the maximum nominal particle size and gradation type on the mortar thickness of asphalt mixture were researched for six different types of mixtures. The results show that the proposed calculation method of mortar thickness is suitable for the analysis of constitution law of asphalt mixture mortar thickness. Mortar thickness spectrum can be fitted well by lognormal distribution model. With the increase of compaction times, there are minimum values in average mortar thickness and the mode of mortar thickness spectrum, while mortar concentration has a peak value which indicates that overpressure will destroy the stability of mortar, and it is important to choose a reasonable compaction times, the maximum nominal particle size of smaller aggregates, suspended dense structure and modified asphalt mixture tend to be lower. Meanwhile, they would concentrate on smaller mortar thickness with higher concentration ratio, the maximum nominal particle and gradation type had the most significant influences, and asphalt type has a significant influence on the concentration ratio of mortar thickness spectrum. The impact of compaction times is not significant but still shows some obvious rules. 4 tabs, 4 figs, 26 refs.

Key words: road engineering; mortar thickness spectrum; digital image processing; asphalt mixture; microstructure

0 引言

沥青混合料是由粗集料、砂浆和空隙组成的一种多相非均质材料,其内部结构对宏观性能具有重要影响^[1-3]。沥青砂浆是由沥青、细集料及矿粉组成的混合物,它作为介于沥青混合料和沥青胶浆之间的一种分散系,不仅能够反映沥青胶浆的特性,也与沥青混合料有着较好的相关性^[4]。因此,有必要对沥青砂浆的分布规律进行研究。

通过采用 CT 无损扫描技术或者高精度扫描仪获取沥青混合料的切片图像,并进行数字图像处理(DIP)是研究沥青混合料内部结构最有效的手段^[5-7]。随着图形图像处理技术的发展,获取高精度的切片图像以及对沥青混合料多相成分的精确分割已经不是难点^[8-10]。Masad 等提出了评价沥青混合料集料方向、级配以及空隙分布的细观指标^[11-13]。粗集料的嵌锁性、连通性以及集中性对沥青路面的应力分布起到重要作用^[14-15]。沥青混合料的应力应变传递模式主要是由其内部的粗集料以及粗集料间分布的沥青砂浆的性质决定^[16]。众多研究者研究了沥青混合料在高温变形试验过程中内部结构的变化规律^[17-18],并采用有限元方法建立考虑沥青混合料细观结构的虚拟模型,定义沥青砂浆的黏弹性特征,模拟混合料在不同受力模式下的应力应变规律^[19-20]。由于砂浆材料相比粗集料具有更小的刚度^[21],其高温条件下沥青混合料的永久变形主要集中在砂浆分布的区

域,说明沥青砂浆对沥青混合料在外力作用下的变形协调机理起到关键作用。

一些评价集料骨架结构的指标,如接触线长度、数量等与沥青混合料高温性能之间存在重要关系^[22],然而沥青砂浆作为沥青混合料中刚度较小,变形较大的主要成分,其空间结构并没有得到深入分析,沥青砂浆的厚度、均匀性等细观结构指标并没有得到统一的定义和结论^[23]。因此,本文从沥青砂浆厚度着手,对沥青混合料的砂浆分布规律进行分析,从微观角度揭示沥青混合料中砂浆的空间分布特征,以期对沥青混合料的宏观力学特性分析提供微观机理方面的依据和参考。

1 试验材料与配合比设计

本文采用 6 种典型的沥青混合料级配类型如表 1 所示,分别考虑不同的级配类型,最大公称粒径,沥青种类以及压实度等因素影响。试件采用旋转压实仪成型,选取适合的压实次数控制空隙率为 3%~4%,采用 SBS 改性沥青。其中级配类型包括骨架密实型级配(SMA-13,ECA-10)和悬浮密实型(AC-13,SUP-13)2 种;最大公称粒径采用 13、20、25 mm (SUP-13,SUP-20,SUP-25);AC-13 级配类型采用 4 种压实次数,分别为 25、50、75、100 次(AC-13-25,AC-13-50,AC-13-75,AC-13-100),其试件空隙率分别为 7.5%、5.4%、4%、2.1%;SUP-13 级配采用 2 种沥青,分别为 PG76-22 的 SBS 改性沥青(SUP-13-M)和 70# 普通沥青(SUP-13-P)。

表 1 6 种混合料的配合比设计
Tab. 1 Mix designs of six asphalt mixtures

混合料类型		AC-13	ECA-10	SMA-13	SUP-13	SUP-20	SUP-25
不同筛孔尺寸 (mm) 下的通 过率/%	31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	26.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	97.0
	19.0	100.0	100.0	100.0	100.0	97.6	85.5
	16.0	100.0	100.0	100.0	99.9	84.1	80.0
	13.2	96.2	99.7	94.2	95.6	71.4	68.9
	9.5	76.1	97.3	62.9	80.1	64.6	53.1
	4.75	52.7	31.5	27.2	48.4	44.9	37.4
	2.36	37.2	28.0	21.9	32.8	28.7	24.0
	1.18	25.1	19.1	17.4	23.7	17.8	16.8
	0.60	18.1	12.9	15.3	15.8	11.3	12.5
	0.30	13.3	9.6	13.8	9.8	7.8	8.7
	0.15	10.6	8.1	12.5	7.2	6.7	7.2
	0.075	6.7	6.5	9.7	4.6	4.6	5.6
最佳油石比/%		4.9	5.8	5.4	5	4.5	4.2
理论最大密度/(kg·m ⁻³)		2 648	2 618	2 600	2 639	2 528	2 518

2 图像获取及处理

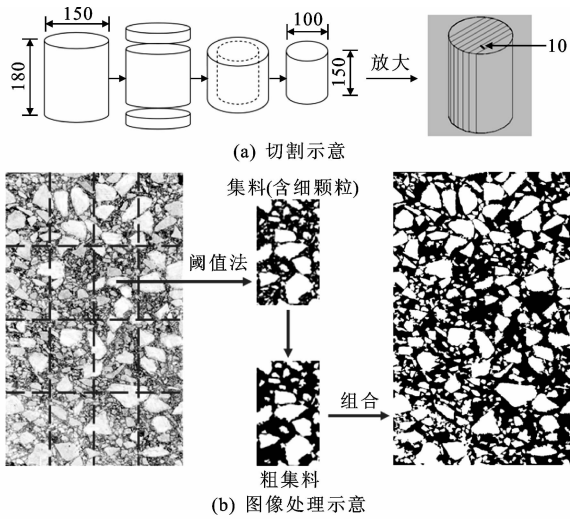
2.1 图像获取

本文所制作的沥青混合料试件均采用旋转压实成型,旋转角为 1.25°,压力为 600 kPa,旋转速度为 60 r/min。如图 1(a)所示,成型的原始试件尺寸为直径 150 mm,高度(180±1)mm。已有研究表明,旋转压实成型所得试件两端空隙率较高,集料分布不均匀^[24-26],因此试件成型完毕后,在常温下养生 24 h 后通过转芯、切割等操作制作成直径为 100 mm,高度为 150 mm 的标准试件。为保证切割过程的可操作性和切片的完整性,并减小机械切割对沥青混合料内部细观结构分布特征的影响,实际操作中采取由中心向外每隔 10 mm 对试件进行自上而下的切片处理,并采用较低的切割速率。对试件表面采用较为精细的表面处理(如采用毛刷、清水进行灰尘处理),以保证切片表面的光滑平整及集料边界的清晰。最终选取了中间 6 个切片,利用高分辨率的扫描仪对每个切片的正反面进行扫描,每个试件可获取 12 张高精度图像,图像的分辨率为 0.033 4 mm/像素。

2.2 图像处理

为了增强沥青与集料的对比度,图 1(b)采用绿色滤镜稀释弱化集料部分存在的较多蓝色通道像素点。图像分割前,利用 MATLAB 相关算法将红绿蓝(RGB)图像转换成灰度图的形式,应用顶帽变换和中值滤波算法分别消除亮度不均匀和图像噪声,

应用阈值法从沥青砂浆和空隙中区分出粗集料。为提升阈值分割效果,将扫描图像分割为 16 个等大的矩形区分别进行阈值选取,每个区域的最优阈值计算采用 OTSU 自适应算法。最后对整体二进制图像应用分水岭变换和腐蚀膨胀算法,对颗粒轮廓进行检查和修正,得到二值图像,其中白色代表粗集料颗粒,黑色代表砂浆。



单位: mm

图 1 切割及图像处理示意

Fig. 1 Sketch of cutting and image processing

3 砂浆厚度计算方法

本文研究的沥青砂浆由粒径小于等于 1.18 mm 的细集料、沥青及空隙组成,定义集料某一边界像素点与相邻集料边界上距其最近的像素点间的距离为

该点处的砂浆厚度,并采用 MATLAB 程序对砂浆厚度进行了计算。具体方法为:首先将断面上的每个集料进行编号,同一个集料的边界像素点定义为同一个数字,然后选取集料的某一边界像素点 A,以该点为中心向外进行环形外扩扫描,直至检测到一个异号的边界像素点 B,则 A 和 B 之间的距离即为该集料边界点 A 处的砂浆厚度。以往研究定义的砂浆厚度,往往是以某一单一方向(如横向、竖向、45°方向等)进行采样,并将采样方向上连续的砂浆长度称为砂浆厚度,这种方法虽能在一定程度上反映砂浆分布的某种规律,但不具有代表性,采样方向的确定也缺乏依据。本文方法更具代表意义,因其考虑了集料之间接触的最薄弱方向。

3.1 平均砂浆厚度指标

粗集料提供了混合料的骨架结构,并承担了大部分的荷载,而砂浆则起到了协调变形的作用,并裹覆在粗集料外侧分担部分荷载。过大的砂浆厚度会引起较大的永久变形,产生车辙;而过小的砂浆厚度又会影响混合料的协调变形能力,使路面开裂。为了定量分析混合料的砂浆厚度值,定义了平均砂浆厚度指标 T_{ave} 的计算如下所示

$$T_{ave} = \sum_{j=1}^{12} \frac{A_j}{\sum_{j=1}^{12} A_j} \frac{\sum_{i=1}^{n_j} T_{ji}}{n_j} \tag{1}$$

式中: T_{ji} 为第 j 个截面上的第 i 个像素点处的砂浆厚度; n_j 为第 j 个截面上砂浆厚度的总样本量; A_j 为第 j 个截面的面积。

图 2 为不同影响因素下的平均砂浆厚度。由图 2(a)可看出,平均砂浆厚度随压实次数的增加先减小,当压实次数达到 100 时,平均砂浆厚度反而增大。由图 2(b)可看出,比较 SUP-13-M、SUP-20、SUP-25 发现,随着集料最大公称粒径的增大,平均砂浆厚度也相应增大。AC-13-75、ECA-10、SUP-13-M 及 SMA-13 的计算结果表明,级配类型会对平均砂浆厚度产生较大影响,其中 ECA-10、SMA-13 这 2 种间断级配的平均砂浆厚度相对较大,见图 2(c)。沥青种类对平均砂浆厚度的影响可用 SUP-13-M 与 SUP-13-P 结果的差异性来说明,即使用改性沥青能减小混合料的砂浆厚度。

3.2 影响因素敏感性分析

为了分析不同因素对平均砂浆厚度的影响,本文中将考虑以下 4 种因素下平均砂浆厚度值的差

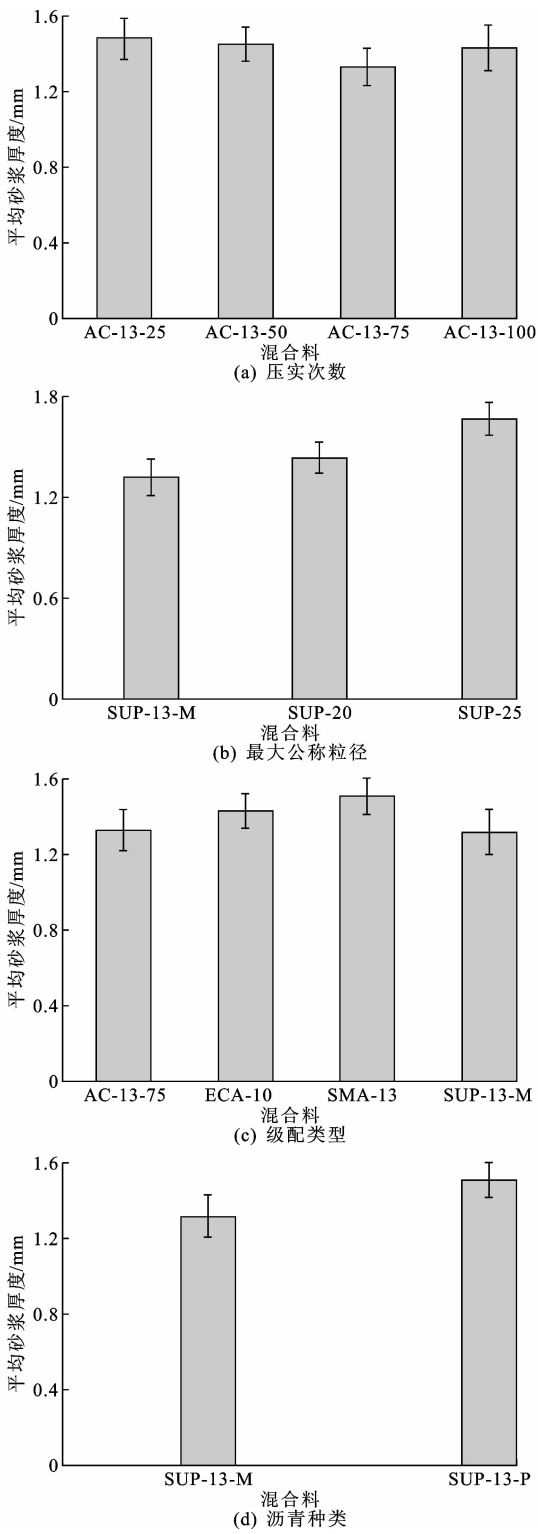


图 2 不同影响因素下的平均砂浆厚度

Fig. 2 Average mortar thicknesses of different influence factors
异:压实次数(4 个水平);集料最大公称粒径(3 个水平);级配类型不同(4 个水平);沥青种类(2 个水平)。以平均砂浆厚度为因变量,通过单因素方差分析方法,单独分析不同因素对平均砂浆厚度的影响,单因素方差分析结果如表 2 所示。

表 2 平均砂浆厚度的单因素方差分析结果
Tab. 2 Results of one-way AVOVA of average mortar thickness

影响因素	平方和	自由度	均方	F 值	显著性水平
压实次数	0.021	3	0.007	2.610	0.188
最大公称粒径	0.084	2	0.042	24.106	0.014
级配类型	0.045	3	0.015	23.142	0.005
沥青种类	0.032	1	0.032	16.121	0.057

由表 2 可以看出,级配类型对平均砂浆厚度影响极显著,最大公称粒径也对平均砂浆厚度影响显著,而压实次数和沥青种类对其影响不显著。

4 沥青混合料砂浆厚度谱分析

通过积分的方式能够把长度与面积联系在一起,因此,一定范围的砂浆累计厚度比能够反映出该范围在整体中所占的面积比重。本文采用砂浆分段累计厚度比来描述沥青砂浆的厚度组成,并将其定义为砂浆厚度谱。

4.1 砂浆厚度谱的对数正态分布拟合

砂浆厚度谱能够直观地描述沥青混合料砂浆厚度的组成规律。采用适当的数学模型进行拟合后,可以通过模型具体参数的比较来分析不同厚度谱之间的区别,从而探究不同条件下沥青混合料砂浆厚度组成的差异性。

本文采用对数正态分布模型对砂浆厚度谱进行

表 3 拟合度检验结果及统计参数计算
Tab. 3 Results of fitting tests and calculation of statistical parameters

混合料类型	拟合参数		拟合度检验			期望值/mm	众数值/mm	最大比重/%
	σ	μ	方差	R^2	标准差			
AC-13-25	0.558 0	0.421 7	0.062 5	0.964 2	0.036 1	1.958 0	1.231 7	4.993 7
AC-13-50	0.549 1	0.506 4	0.052 6	0.964 9	0.033 1	1.929 3	1.227 4	5.092 3
AC-13-75	0.570 2	0.397 5	0.060 7	0.965 7	0.035 6	1.750 8	1.075 1	5.533 0
AC-13-100	0.562 2	0.463 2	0.055 4	0.965 0	0.034 0	1.861 2	1.158 5	5.231 6
ECA-10	0.574 4	0.484 0	0.056 3	0.961 8	0.034 3	1.913 6	1.166 6	5.049 5
SMA-13	0.617 7	0.538 0	0.037 6	0.967 6	0.028 0	2.072 5	1.169 3	4.565 0
SUP-13-M	0.551 9	0.456 9	0.056 8	0.965 6	0.034 4	1.839 0	1.164 5	5.331 8
SUP-13-P	0.566 3	0.428 1	0.051 5	0.969 3	0.032 8	1.801 2	1.113 4	5.391 3
SUP-20	0.585 5	0.522 2	0.048 3	0.963 2	0.031 7	2.000 9	1.196 5	4.798 9
SUP-25	0.568 5	0.632 5	0.032 0	0.970 1	0.025 8	2.212 4	1.362 5	4.383 1

砂浆厚度谱的期望值反映了砂浆厚度的平均水平;众数即为沥青砂浆中比重最大的厚度,其可以反映出厚度谱峰值在整个砂浆厚度区间上所处的位置;最大比重是指众数所对应的比重,它可以表示砂浆厚度的集中度,集中度越高说明砂浆的厚度组成更为均匀,砂浆形态更为稳定。为了深入研究砂浆厚度谱的组成规律,后文仍从以下 4 个方面讨论不

拟合。对数正态分布的概率密度函数如下

$$f(x)=\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}}\quad x>0\tag{2}$$

式中: x 为砂浆厚度(mm); μ 、 σ 均为拟合参数; $f(x)$ 为每 0.1 mm 范围内的砂浆累计厚度比。

利用 MATLAB 非线性拟合工具对砂浆厚度谱进行拟合,拟合效果见图 3。可以看出,砂浆厚度谱呈现出一种向左边集中的分布形态,对数正态分布模型能很好地拟合砂浆厚度谱。表 3 为对数正态分布模型拟合结果。由表 3 可知,方差和标准差都接近于 0,判定系数 R^2 达到 0.96 以上,拟合参数 σ 为 0.54~0.62, μ 为 0.39~0.64。

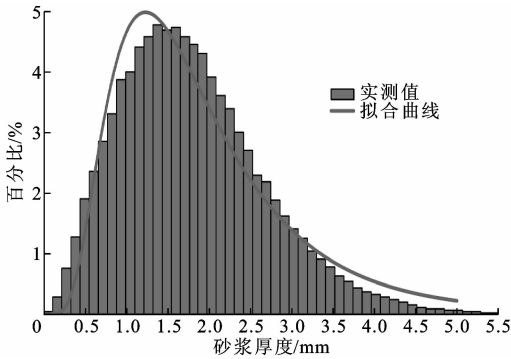


图 3 对数正态分布模型拟合结果(AC-13-25)
Fig. 3 Fitting results of lognormal distributions model (AC-13-25)

同因素对厚度谱的影响。

4.1.1 压实次数

图 4 为不同影响因素下的砂浆厚度谱曲线。对比图 4(a)中的 4 条曲线可以发现,压实次数对砂浆厚度谱的影响不大。随着压实次数的增加,厚度谱逐渐向较小厚度上集中,峰值增大,但当压实次数达到 100 时,厚度谱反而右移,峰值降低。这是由于当

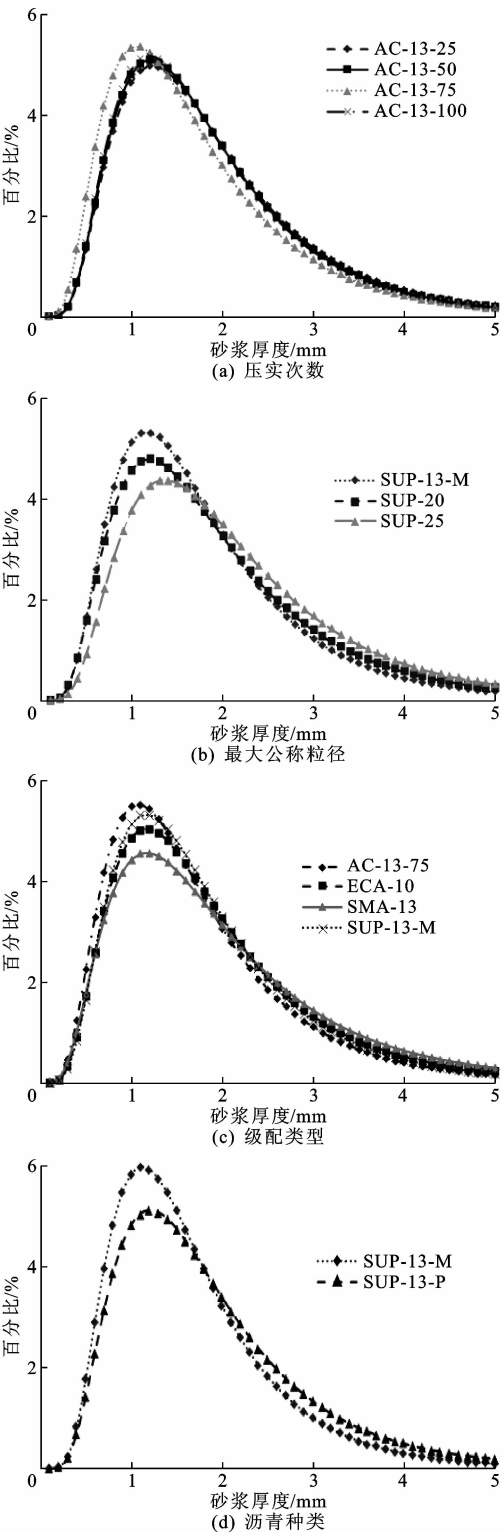


图 4 不同影响因素下的砂浆厚度谱

Fig. 4 Mortar thickness spectrums influenced by different factors
压实次数在合理范围内增加时,混合料被不断压密,空隙减少,刚度较低的砂浆受到挤压,较小厚度上的砂浆比例增大,砂浆整体变薄,厚度更加集中。但当压实次数超过一定的限值,混合料将出现过压现象,集料颗粒旋转、甚至破碎,砂浆受到的约束减小,形

态也发生变化,呈现出汇合趋势,砂浆厚度的集中状态被打破。

4. 1. 2 集料最大公称粒径

图 4(b)为 SUP-13、SUP-20 及 SUP-25 的砂浆厚度谱,由这 3 个砂浆厚度谱的变化规律可以看出,集料最大公称粒径越小,砂浆越向较小厚度上集中,且集中度较高。这是因为较细的集料能将砂浆分割成更多更小的区域,而大粒径集料的掺入会在砂浆内部形成局部厚度较大的区域,因此砂浆厚度整体更大,集中度更低。

4. 1. 3 级配类型

级配类型不同会对混合料的细观结构形态产生很大影响。由图 4(c)可以看出,不同级配类型混合料的砂浆厚度谱差异较为明显。ECA-10 及 SMA-13 作为 2 种间断级配,其砂浆厚度谱的众数较大,集中度则明显小于另外 2 种连续级配,说明间断级配混合料的砂浆厚度整体偏大,集中度也相对较低。4 种混合料的油石比从大到小依次为 ECA-10、SMA-13、SUP-13-M、AC-13-75,这也与 4 个砂浆厚度谱的众数排列顺序一致。说明油石比的增大会使厚度较小的砂浆比例减小,厚度较大的砂浆比例增大。

4. 1. 4 沥青种类

图 4(d)为 SUP-13-M 和 SUP-13-P 两种混合料的砂浆厚度谱。从图 4(d)可以看出,改性沥青混合料厚度谱的峰值显著高于非改性沥青混合料,而众数的差异不大。在砂浆厚度较小的区间(0~1.8 mm)改性沥青混合料所占的比例较高;而在砂浆厚度较大的区间(1.8~5 mm)非改性沥青混合料所占的比例较高。这说明沥青性质对混合料的细观结构有较大影响,改性沥青的使用能使砂浆厚度整体变小,并显著提高其集中度,使砂浆的厚度组成更为均匀。产生这一现象的原因是:本文改性沥青成型过程中,采用的压实温度较普通沥青高,因此在相同的压实功及空隙率下,其表现出更加均匀的接触及分布结构,这也是改性沥青混合料的高低温性能较普通沥青优异的一个原因。

4. 2 影响因素敏感性分析

为分析压实次数、最大公称粒径、级配类型及沥青种类对砂浆厚度谱众数及集中度的影响,本文对以上统计结果进行单因素方差分析,如表 4 所示。

由表 4 可以看出:压实次数对众数及集中度的影响并不显著;级配类型对集中度的影响极显著,对众数影响显著;最大公称粒径对众数及集中度的影

表 4 众数及集中度的单因素方差分析结果
Tab. 4 Results of one-way AVOVA of mode and concentration ratios

因变量	影响因素	平方和	自由度	均方	F 值	显著性水平
众数	压实次数	0.025	3	0.008	4.425	0.092
	最大公称粒径	0.048	2	0.024	16.766	0.024
	级配类型	0.014	3	0.005	6.916	0.046
	沥青种类	0.008	1	0.008	17.209	0.053
集中度	压实次数	0.131	3	0.044	1.320	0.385
	最大公称粒径	0.939	2	0.469	24.149	0.014
	级配类型	0.923	3	0.308	26.847	0.004
	沥青种类	0.561	1	0.561	55.500	0.018

响均显著;沥青种类对众数无显著影响,而对集中度的影响显著。

5 结 语

(1)最大公称粒径及级配类型对平均砂浆厚度有显著影响,而压实次数和沥青种类的影响不显著。

(2)砂浆厚度谱能较好地反映沥青砂浆的厚度组成状况,对数正态分布模型对其具有较好的拟合效果。模型参数中:期望值可以代表砂浆厚度的平均值;众数体现了厚度谱在整个砂浆厚度区间上所处的位置;最大比重则可以反映出砂浆厚度的集中度。

(3)砂浆厚度谱众数及集中度随压实次数的变化规律表明:在一定范围内增加压实次数有利于预先压密混合料内的砂浆,使其厚度组成更加均匀,在荷载作用下不致产生较大变形;而过压则会破坏混合料的稳定状态,令其往相反的方向发展。但敏感性分析的结果也表明压实次数的影响不显著。

(4)集料最大公称粒径对砂浆厚度谱的众数及集中度均有显著影响。随着集料最大公称粒径的减小,砂浆逐渐向更小的厚度上集中,集中度更高;级配类型对集中度的影响极显著,对众数影响也显著。相比而言,骨架密实型结构混合料的砂浆厚度更大,集中度更低。油石比的增加也会使厚度较大的砂浆范围增大;沥青种类对砂浆厚度的集中度也有显著的影响,改性沥青混合料的砂浆厚度明显比普通沥青混合料更为集中,且较小厚度上的砂浆比例更高。

(5)利用最小接触距离定义沥青混合料的砂浆厚度,并分析了不同材料类型的沥青混合料砂浆厚度分布规律。但由于样本数量有限,本文选取的沥青混合料类型有限,下一步将考虑更多的材料设计及试件成型条件,研究沥青砂浆厚度谱与沥青混合

料的宏观力学特性间的联系。

参考文献:
References:

[1] BESSA I S,BRANCO V T F C,SOARES J B,et al. Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2014,27(7):04014212.

[2] 汪海年,郝培文. 沥青混合料微细观结构的研究进展[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(3):11-15. WANG Hai-nian,HAO Pei-wen. Advances in micro-structure study on asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(3):11-15.

[3] LING C, ARSHADI A, BAHIA H. Importance of binder modification type and aggregate structure on rutting resistance of asphalt mixtures using image-based multi-scale modelling[J]. Road Materials and Pavement Design,2017,18(4):785-799.

[4] 黄宝涛,田伟平. 具有长期使用性能的沥青砂浆配合比设计方法[J]. 公路,2009(4):148-151. HUANG Bao-tao, TIAN Wei-ping. Asphalt mortar mix ratio design method with long-term performance[J]. Highway,2009(4):148-151.

[5] GAO L,NI F,LUO H,et al. Evaluation of coarse aggregate in cold recycling mixes using X-ray CT scanner and image analysis[J]. Journal of Testing and Evaluation,2014,44(3):1239-1249.

[6] 石立万,王端宜. 基于数字图像处理的沥青混合料主骨架评价标准[J]. 中国公路学报,2017,30(5):52-58. SHI Li-wan,WANG Duan-yi. Evaluation indexes of asphalt mixture main skeleton based on digital image processing[J]. China Journal of Highway and Transport,2017,30(5):52-58.

[7] BIRGISSON B, SORANAKOM C, NAPIER J A L, et al. Microstructure and fracture in asphalt mixtures using a boundary element approach[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2004,16(2):116-121.

[8] COENEN A R, KUTAY M E, SEFIDMAZGI N R, et al. Aggregate structure characterization of asphalt mixtures using two-dimensional image analysis[J]. Road Materials and Pavement Design,2012,13(3):433-454.

[9] 郭乃胜,YOU Z P,谭忆秋,等. 基于 CT 技术的沥青混合料空隙率预测方法[J]. 中国公路学报,2016,29(8):12-21,42. GUO Nai-sheng,YOU Z P,TAN Yi-qiu,et al. Predic-

- tion method on volume of air voids of asphalt mixtures based on CT technique[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(8): 12-21, 42.
- [10] GEORGIU P, SIDERIS L, LOIZOS A. Evaluation of the effects of gyratory and field compaction on asphalt mix internal structure[J]. Materials and Structures, 2016, 49(1/2): 665-676.
- [11] 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): 88-95.
- [12] JIANG J, NI F, GAO L, et al. Effect of the contact structure characteristics on rutting performance in asphalt mixtures using 2D imaging analysis[J]. Construction and Building Materials, 2017, 136: 426-435.
- [13] 王彦喆. 粗集料细观结构特征对沥青混合料性能的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
WANG Yan-zhe. The study of the effect of coarse aggregate of microstructure characteristic on the performance of asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [14] KOSE S, GULER M, BAHIA H, et al. Distribution of strains within hot-mix asphalt binders: Applying imaging and finite-element techniques[J]. Transportation Research Record, 2000(1728): 21-27.
- [15] 李平, 王秉纲, 张争奇. 基于高温性能的沥青混合料级配设计方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(6): 9-14.
LI Ping, WANG Bing-gang, ZHANG Zheng-qi. Design method of asphalt mixture aggregate gradation based on high-temperature performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6): 9-14.
- [16] 贾传峰. 基于工业 CT 的不同受力模式下沥青混合料破坏特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
JIA Chuan-feng. Research on failure characterization of asphalt mixture under different test methods based on CT[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [17] HU J, QIAN Z. High-temperature numerical simulation of asphalt mixture based on microscopic structure characteristics of aggregates[C]//TRB. Transportation Research Board 94th Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2015: 1-15.
- [18] PAPAGIANNAKIS A, ABBAS A, MASAD E. Micromechanical analysis of viscoelastic properties of asphalt concretes[J]. Transportation Research Record, 2002(1789): 113-120.
- [19] MASAD E, SOMADEVAN N, BAHIA H U, et al. Modeling and experimental measurements of strain distribution in asphalt mixes[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(6): 477-485.
- [20] DAI Q L, YOU Z P. Prediction of creep stiffness of asphalt mixture with micromechanical finite-element and discrete-element models[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(2): 163-173.
- [21] MAHMOUD E, MASAD E, NAZARIAN S. Discrete element analysis of the influences of aggregate properties and internal structure on fracture in asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 22(1): 10-20.
- [22] SEFIDMAZGI N R, TASHMAN L, BAHIA H. Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis[J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(S): 21-37.
- [23] YOU Z, ADHIKARI S, KUTAY M E. Dynamic modulus simulation of the asphalt concrete using the X-ray computed tomography images[J]. Materials and Structures, 2009, 42(5): 617-630.
- [24] 汪海年, 郝培文, 吕光印. 沥青混合料内部空隙分布特征[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(1): 6-11.
WANG Hai-nian, HAO Pei-wen, LU Guang-yin. Distribution properties of internal air voids in asphalt mixtures[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(1): 6-11.
- [25] 汪海年, 李磊, 尤占平. 基于细观结构特征的沥青混合料空隙三维分布特征研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(8): 61-67.
WANG Hai-nian, LI Lei, YOU Zhan-ping. Characterization on the 3D air void spatial distribution based on the microstructure of asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(8): 61-67.
- [26] 郭乃胜, 尤占平, 谭忆秋, 等. 基于 CT 技术的沥青混合料均匀性评价方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(1): 1-9, 55.
GUO Nai-sheng, YOU Zhan-ping, TAN Yi-qiu, et al. Evaluation method for homogeneity of asphalt mixtures based on CT technique[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(1): 1-9, 55.