

DOI:10.11918/201810023

桥面铺装防水粘层渗水、积水分析与评价方法

刘梦梅, 韩森, 杨赫, 吴晓明, 牛冬瑜

(特殊地区公路工程教育部重点实验室(长安大学), 西安 710064)

摘要: 针对现行桥面铺装防水粘层渗水、积水检测技术不完善的问题, 首先通过数字图像处理技术, 量化粘层的空隙分布状态, 提出基于空隙率、空隙数量、空隙等效直径的粘层渗水、积水评价方法。然后, 建立粘层空隙三维重构模型, 直观展现粘层空隙立体形态分布特征。最后, 结合粘层横向渗水试验, 测量5种典型桥面防水粘层的渗水量, 验证了数字图像分析技术应用于评价粘层渗水、积水的可靠性。研究结果表明: 同步碎石空隙分布丰富, 空隙尺寸大, 易于渗水, 且为层间积水提供了充足的储水空间; AC-5和稀浆封层空隙分布密且尺寸小, 防水能力优于同步碎石; SBS改性乳化沥青粘层的空隙率较小, 且空隙分布离散, 空隙间几乎不连通, 抗渗水能力最好。

关键词: 桥面铺装; 防水粘层; 数字图像处理; 粘层横向渗水; 粘层积水

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)03-0115-06

Analysis and evaluation method of water seepage and accumulation of bridge deck pavement waterproof interlayer

LIU Mengmei, HAN Sen, YANG He, WU Xiaoming, NIU Dongyu

(Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education (Chang'an University), Xi'an 710064, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing evaluation methods of water seepage and accumulation of bridge deck pavement waterproof interlayer are not perfect, digital image processing technique was used to quantify the pore distribution of interlayer, and the evaluation method of water seepage and accumulation was proposed based on indexes of porosity, pore number, and equivalent pore diameter. Then, a three-dimensional reconstruction model of pores in bridge waterproof interlayers was established and the structure of the pores was visually presented. At last, combining with the transverse permeation tests of 5 typical interlayers, the reliability of the digital image analysis technique in evaluating water seepage and accumulation of interlayers was verified. Test results show that synchronous surface dressing had rich pore distribution and large pore size, which is easy to permeate water and can supply sufficient space for water accumulation. The pores of AC-5 and slurry seals were dense and small, making the seepage resistance of AC-5 better than that of synchronous surface dressing. The porosity of the SBS modified emulsified asphalt as interlayer was small, and there was little connectivity between pores due to the dispersion of pores. Therefore, the waterproof performance of SBS modified emulsified asphalt used as bridge waterproof interlayer was the best.

Keywords: bridge deck pavement; waterproof adhesive interlayer; digital image processing; lateral seepage of interlayer; water accumulation of interlayer

混凝土桥面铺装的许多病害均与防水粘层横向抗渗水性能有关, 诸如裂缝、拥包、推移、车辙和水损害等^[1-4]。当雨水通过路面缺陷或路边缘等通道渗入到防水层, 在层间横向流动、集聚, 加之行车荷载压力, 极易造成桥面局部“冒水”等病害^[5-6]。且水长期集聚在层间, 对粘层的粘结性及耐久性均有不利影响, 进而造成结构性破坏的隐患^[7]。

2000年, 丹麦道路研究所(DRI)意识到水泥混

凝土桥面防水层的重要性, 提出了一系列桥面防水试验规程和指标^[8]。美国、瑞士等国家也相继在实际调查的基础上, 提出了较完善的室内粘层防水性能评价方法^[9-11]。然而, 虽然中国桥面铺装组合结构的发展已相对成熟, 但对桥面防水粘层的研究更多集中在粘层材料的开发, 评价方法仍局限于拉拔、剪切等力学性能试验, 忽视了防水粘层横向抗渗水性能的重要性^[12]。因此, 亟待对桥面铺装防水粘层渗水、积水机理、测试方法及评价指标进行系统研究。本文引入数字图像处理技术, 获取层间空隙分布特征, 用于分析粘层渗水、积水问题, 并通过室内横向渗水试验验证了其合理性, 为混凝土桥面

收稿日期: 2018-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(51608045)

作者简介: 刘梦梅(1993—), 女, 博士研究生;

韩森(1958—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 韩森, hysam_hs@chd.edu.cn

铺装防水粘层提供了一种精度高,信息量大,操作简单的渗水、积水现象分析方法。

1 实验

1.1 原材料与试件制备

本文采用克练 70#沥青、SBS 改性沥青及 SBS 改性乳化沥青为胶结料,其基本技术性质见表 1。试验中,石料采用石灰岩,其表观相对密度为 2.612 g/cm^3 ,压碎值为 50%,洛杉矶磨耗值为 25.2%,吸水率为 0.89%,针片状石料数量占百分比为 11.2%。矿粉采用石灰岩矿粉。

表 1 胶结料的技术性质

Tab.1 Technology indexes of binder

类型	针入度/0.1 mm	软化点/℃	延度/cm
克练 70#沥青	63	50	>100
SBS 改性沥青	88.0	56.5	50.2
SBS 改性乳化沥青	72.0	61.5	45.4

1.2 试件制备及试验方案

如图 1 所示,制备用于模拟桥面铺装的复合板

表 2 AC-5 和稀浆封层级配

Tab.2 Gradation of AC-5 and slurry seal

混合料类型	不同筛孔石料的通过率/%							
	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
AC-5	100	95	65	45	30	20	12.5	7.5
稀浆封层	100	95	77.5	57.5	40	24	15.5	10

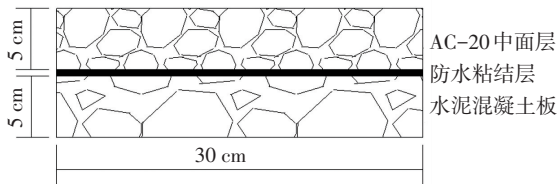


图 1 复合板试件示意图

Fig.1 Diagram of composite slab specimens

如图 2(a) 所示,采用 YXLON Y.CT Modula 扫描仪对试件进行图像采集,自上而下扫描,间距为 0.1 mm,总量程为 60 mm。为研究防水粘层及其与上下层过渡区域的空隙分布状态,选取深度为 40~60 mm 扫描段为本文分析对象,对其进行数字图像分析。扫描仪放大倍数可达 200 倍,精度为 $10 \mu\text{m}$,满足数字图像处理技术要求。

除此之外,利用 HS-ST 型粘层渗水仪^[13],对 5 种典型复合板试件进行粘层横向渗水试验,旨在直观评价不同桥面铺装粘层防水性能,并建立层间渗水与空隙分布特征的相关关系。如图 2(b) 所示,HS-ST 型粘层渗水仪主要由量筒、水压传感器和渗水模拟箱组成,量筒的量程为 500 mL。粘层渗水仪是在常规路面渗水仪的基础上改进而来,将层间渗

水模拟箱与常规路面渗水仪通过胶管连接,且对模拟箱与胶管的连接面四周进行蜡封处理,以保证水是从层间渗出^[14]。试验中,为分析不同水压力对层间渗水的影响,分别设置了 40、70 cm 的水头高度,并记录试验持续 5 min 后各粘层的渗水量。

成型复合板养生 7 d 后,对其进行钻芯。CT 扫描试件为直径 100 mm 的圆柱体,渗水试验试件为横截面 $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ 的长方体。

水模拟箱与常规路面渗水仪通过胶管连接,且对模拟箱与胶管的连接面四周进行蜡封处理,以保证水是从层间渗出^[14]。试验中,为分析不同水压力对层间渗水的影响,分别设置了 40、70 cm 的水头高度,并记录试验持续 5 min 后各粘层的渗水量。



(a) CT 扫描仪

(b) 粘层渗水仪

图 2 试验设备

Fig.2 Testing equipments

2 防水粘层数字图像处理分析

2.1 防水粘层数字图像采集及处理原理

数字图像处理技术具有突出的直观表现能力,能够准确、客观地反映桥面铺装防水粘层的空隙分布特征。数字图像通常指用有限数组来表示的图像。将图像连续空间离散化,产生有限个离散点,每个离

散点代表一个像素,即图像处理的最小单元.通过对图像进行数字化,可将一张图片转化为 $M \times N$ 的数字矩阵,数字图像矩阵为

$$F = \begin{bmatrix} f(0,0) & \cdots & f(0, N-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & \cdots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $f(x,y)$ 为任意坐标 (x,y) 点处的亮度值或灰度值.

本文利用 CT 扫描仪对试件进行图像采集,且为了研究防水粘层及其与上下层过渡区域的空隙分布状态,选取深度为 40~60 mm 扫描段为本文研究对象,对其进行数字图像分析. CT 扫描基本原理: X 射线由射线源发出,经过准直仪准直后穿透物质,由于不同材质对射线的吸收程度有所差异,穿过物体时 X 射线发生不同程度的衰减.故 CT 可通过 X 射线穿过非均质物质的衰减规律,来区分扫描对象内部的不同物质, X 射线衰减公式为

$$I_{out} = I_{in} \times \exp\left(-\int_0^L \mu dl\right). \quad (2)$$

式中: I_{out} 为 X 射线射出强度, I_{in} 为 X 射线射入强度, μ 为物体的 X 射线衰减系数, L 为 X 射线穿过物体距离.

衰减后的 X 射线经由探测系统接收并转化为电子信号,输入计算机中排列成若干个基本单元数字矩阵,称为“体素”.然后通过模拟转换器对体素矩阵进行处理,读取体素中的灰度值,并将灰度值以矩阵形式排列成微小单位,称为“像素”,进而得到 CT 图像.

数字图像处理首先采用中值滤波法对图像进行去噪处理,相对完整保留了图像细节分布特征.基于 X 射线穿透物质强度衰减原理可知, CT 图像颜色越浅代表密度越大,反之颜色越深即密度越小.因此,图像中颜色最深的部分代表空隙,灰度图像如图 3 所示.为后续准确获取粘层空隙分布指标,需识取图像中的空隙.本文采用最大类间方差法 (OTSU) 进行分割处理,提取空隙目标区域,空隙二值图像如图 4 所示.

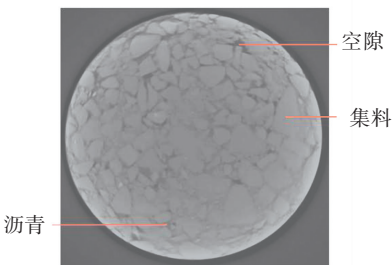


图3 CT扫描灰度图

Fig.3 Greyscale image of CT scanning

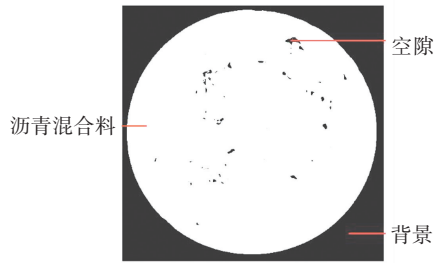


图4 空隙二值图

Fig.4 Pore binary images

本实验借助 MATLAB 软件对图像进行基于体数据的三维重建,即直接将检测物质的体元素,按设定的颜色和透明度,在不同的平面上显示出来.在处理过程中没有对有效数据进行删减,保留了物体更多的细节,能准确、详细地表示物体的结构特征.

2.2 防水粘层数字图像指标获取

桥面铺装粘层的渗水性定义为不同水压荷载作用下水流在介质中的流通能力,其受诸多因素影响,包括沥青含量、集料性质、集料级配及水流路径等.而这些因素主要是通过改变空隙分布特性来影响粘层的渗透性.故本文采用数字图像处理技术获取空隙相关体积指标(空隙率、空隙等效直径、空隙数量),并用于评价桥面铺装防水粘层抗渗水能力.

2.2.1 空隙率

空隙率用于评价粘层层间空隙分布总状态.在数字图像中,分辨率代表垂直或水平方向上每英寸的像素点数量,计算公式为

$$R = \frac{P}{25.4}. \quad (3)$$

式中 R 为分辨率, P 为像素点.

通过 MATLAB 对粘层 CT 图像进行分析,获取每张图像所有空隙对应的总像素点数,计算数字图像的空隙率 n 的公式为

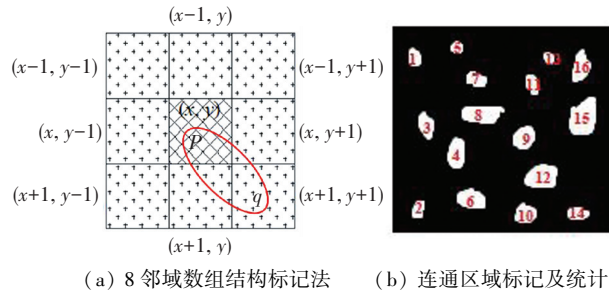
$$n = \frac{25.4^2 P_i}{\pi r^2 \cdot R^2}. \quad (4)$$

式中 P_i 为数字图像中空隙对应的总像素点数, r 为被扫描试件的实际半径,本文为 50 mm.

2.2.2 空隙数量

空隙数量即每张粘层 CT 图像中含有的空隙总数量,能够从数量级角度量化层间空隙分布状况,研究不同粘层材料渗水、积水与粘层空隙数量的关系.利用 MATLAB 软件对防水粘层切面图像进行处理,标记空隙并统计空隙数量.具体过程如图 5 所示,通过上述对图像进行二值化处理后,混合料和空隙的像素值分别为 0 和 1,二者轮廓界线清晰明了.随后,基于数字图像连通分量的概念,采用图 5(a)所示的 8 邻域数组结构标记法,使像素值相同的邻域

形成连通区域. 例如若 (x, y) 与 $(x + 1, y + 1)$ 的像素值 P, q 相等, 则这两个像素连通. 每一个连通区域记为标识块, 即一个空隙. 最后如图 5(b) 所示, 遍历图像中所有标记块, 并对其进行数量统计.



(a) 8 邻域数组结构标记法 (b) 连通区域标记及统计

图 5 空隙数量标记统计

Fig.5 Marking and counting of pore quantity

2.2.3 空隙等效直径

由于层间空隙结构、形状各异, 无规则, 为了直观分析粘层空隙总体分布状况, 将 N 个实际空隙等效成 N 个等直径圆, 且粘层空隙的总面积不变, 其原理如图 6 所示. 空隙等效直径可用于评价粘层空隙的总体分布面积, 即粘层积水的储存空间状况, 且材料的渗水性能受空隙等效直径大小及分布的影响较大. 空隙等效直径的计算公式为

$$D = 2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\pi N}} \quad (5)$$

式中: D 为空隙等效直径, mm; S_i 为 CT 图像中单个空隙的面积, mm^2 ; N 为空隙的总数量.

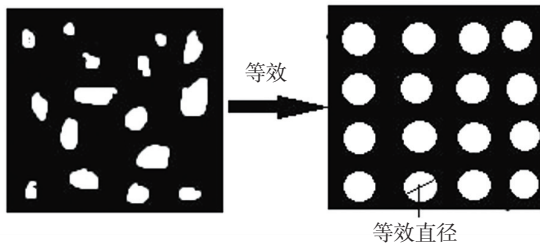


图 6 空隙等效直径原理

Fig.6 Principle of equivalent pore diameter

2.3 防水粘层数字图像分析

2.3.1 二维数字图像分析

图 7 为 5 种典型防水粘结层试件自上而下在 0~60 mm 之间的试件内部空隙率分布状况. 其中, 0~20 mm 为 AC-20 表面区域, 20~40 mm 为 AC-20 中部区域, 40~60 mm 涵盖所有粘层区域及粘层与上下板件的过渡区域.

由图 7 可知, 5 种类型防水层复合板的空隙率变化规律相似, 即 AC-20 表面空隙率沿高度方向迅速降低; AC-20 中部空隙率小且趋于稳定; 而 40~60 mm 区间空隙率突增, 出现小峰值; 空隙率越大,

发生层间渗水的概率越高. 究其原因, 复合板制备过程中, 0~20 mm 混合料表面裸露, 且粗集料较多, 集料间存在大量空隙, 表面纹理丰富; 20~40 mm 细集料与胶结料填充粗集料间的空隙, 混合料内部相互嵌挤密实且分布较均匀, 所以空隙率小、稳定. 在 40~60 mm 之间, 由于粘层上下界面分别与不同材质板件粘结, 为复合试件的薄弱面, 加之粘层自身存在空隙, 所以粘层的空隙率增大.

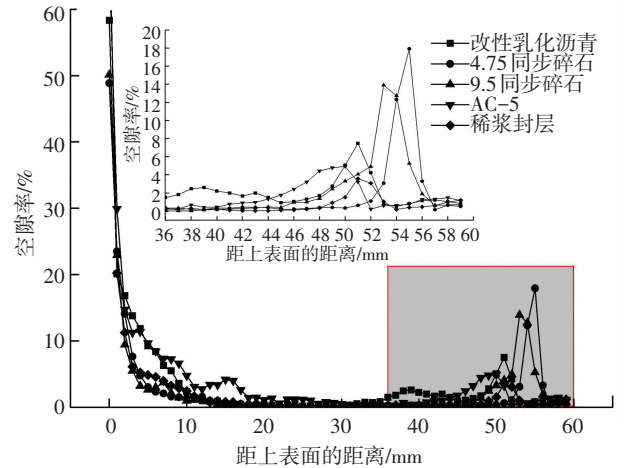


图 7 不同粘层空隙率

Fig.7 Porosity of different interlayers

对图 7 中粘层及其过渡区域进一步分析发现, 相较于其他 3 种粘层, 同步碎石封层的空隙率峰值相对较高, 说明同步碎石粘层空隙分布丰富, 易发生渗水病害. 且 4.75 同步碎石防水层空隙率突增范围约为 4.5 mm, 而 9.5 同步碎石防水层约为 9 mm, 二者变化的高度区间均与其撒布碎石的粒径大小相近. 从而可知, 同步碎石防水层层间空隙率的变化范围与集料粒径选择紧密相关.

图 8 为粘层及其过渡区域空隙数量沿高度变化的分布状况. 可知 AC-5 空隙数量最多, 高达 521 个, 稀浆封层次之 335 个, 而 4.75 同步碎石、9.5 同步碎石和改性乳化沥青空隙数量相对较少且相近. 因为 AC-5 与稀浆封层级配偏细, 相同面积条件下, 集料数量相对较多, 导致集料间微空隙相应增加; 且小粒径集料的比表面积相应增大, 混合料中胶结料不足以填充集料间的微空隙. 而稀浆封层除级配因素外, 其为保证良好的施工性能, 按规范要求, 在拌合过程中添加了少量的水, 并且乳化沥青自身破乳也含有一定比例的水, 养生过程中水分蒸发, 导致稀浆封层内部残留大量微空隙. 因此, AC-5 与稀浆封层粘层空隙数量丰富, 存在层间渗水的隐患.

由图 9 可知, 4.75 同步碎石和 9.5 同步碎石防水层的空隙等效直径沿高度方向先增大后减小, 其中, 4.75 同步碎石空隙等效直径的变化范围为

0.75~2.68 mm,9.5 同步碎石空隙等效直径的变化范围为 1.15~2.63 mm. AC-5、稀浆封层和 SBS 改性乳化沥青的空隙等效直径较小,没有明显的峰值.

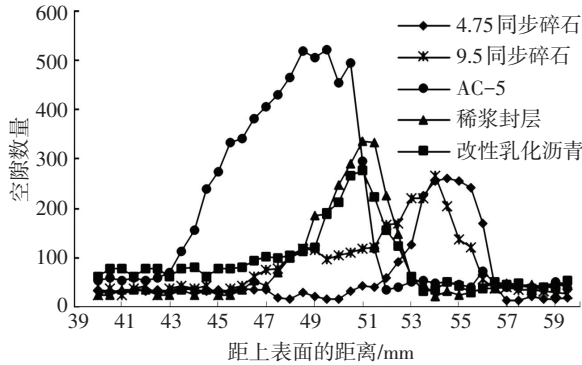


图8 不同粘层空隙数量

Fig.8 Pore quantity of different interlayers

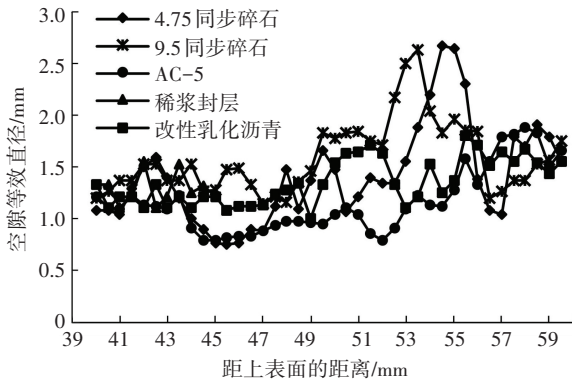


图9 不同粘层空隙等效直径

Fig.9 Equivalent pore diameter of different interlayers

综合图7~9分析发现,同步碎石空隙数量相对较少,而空隙率与空隙等效直径相对较大,说明同步碎石防水层中的空隙尺寸较大.这一现象不利于粘层防水,且为层间水提供了充足的储水空间,易造成层间积水等隐患. AC-5与稀浆封层空隙数量大,但空隙率与空隙等效直径相对较小,说明其内部空隙分布密且小,这不利于粘层防水和力学性能.但微小空隙的毛细作用,能阻碍层间水的渗流,一定程度上延缓了层间渗水现象.

2.3.2 三维数字图像分析

本文建立了粘层的空隙率分布特征三维重构模型,结果如图10所示,蓝色(深色)部分为粘层空隙结构.由图10中可清晰看出,同步碎石封层的空隙相对较大且集中,空隙连通程度较高;AC-5和稀浆封层的空隙小而密,分布均匀,空隙连通相对较少;而乳化沥青封层空隙分布离散不均匀,连通空隙最少.这与二维数字图像分析结果相一致.由此可以预测同步碎石抗渗水能力最弱,且空隙体积较大,易于层间水的集聚流动,造成层间积水;AC-5与稀浆封层的防水能力介于同步碎石与SBS改性乳化沥

青之间,其内部微小空隙可以通过毛细作用延缓层间渗水,但已有研究发现其空隙率越大,混合料对应的力学性能越差^[15-17],故AC-5与稀浆封层的大量微小空隙对层间力学性能有不利影响.而SBS改性乳化沥青大部分空隙不连通,可以有效抑制层间渗水.

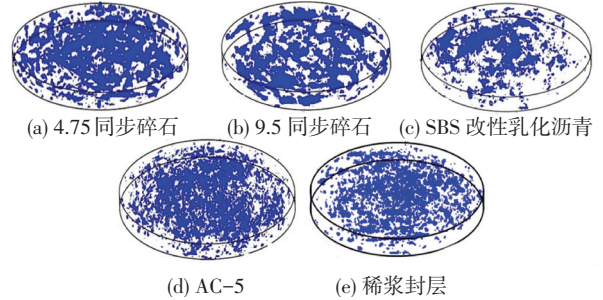


图10 不同粘层空隙三维结构图

Fig.10 Three-dimensional structure diagram of pores in different interlayers

3 室内桥面防水粘层横向渗水试验分析

为验证数字图像粘层空隙分布特征与实际粘层渗水、积水相关关系,本文设置了室内粘层渗水试验.试验中,分别选取40、70 cm两种水头高度,试验结果见表3.其中70 cm水头高度粘层渗水量y与相应的空隙分布特征(孔隙率 x_1 、空隙等效直径 x_2 、空隙数量 x_3)的相关关系见表4.

表3 不同类型粘层的渗水量

Tab.3 Water seepage of different interlayers

水头高度/cm	不同类型粘层的渗水量/mL				
	4.75 同步碎石	9.5 同步碎石	稀浆封层	AC-5	SBS 改性乳化沥青
40	49	68	0	29	0
70	88	127	8	38	0

表4 防水粘层渗水量与空隙分布特征的关系

Tab.4 Relationship between water seepage and pore distribution in waterproof interlayers

空隙特征指标	渗水量函数	R^2
x_1	$y = 19.055x_1 - 49.107$	0.81
x_2	$y = 221.49x_2 - 349.1$	0.83
x_3	$y = -0.2173x_3 + 97.348$	0.32

由表3可知:5种典型混凝土桥面铺装防水粘层的渗水试验结果与数字图像分析结论一致.除改性乳化沥青防水层和40 cm水头高度的稀浆封层外,其余粘层均发生渗水现象.同步碎石渗水量最大,AC-5渗水量次之,而稀浆封层在70 cm水头高度条件下才发生渗水,因为水在稀浆封层的微小空隙中不易流动,需要足够的渗水压力. SBS改性乳化沥青防水层未出现渗水现象,说明SBS改性乳化沥青防水层具有优异的防水性能.

由表4可知:桥面铺装防水粘层的空隙率、空隙

等效直径与粘层渗水量有较好的正相关关系,相关系数 R^2 分别为 0.81、0.83,随着空隙率和空隙等效直径的增大,层间的渗水量增加. 而空隙数量指标与层间渗水的相关关系较差. 由于粘层渗水受层间空隙的大小、形状、分布均匀性、空隙连通度、数量等因素综合的影响,所以不能单独采用空隙数量指标来评价层间的抗渗水能力,但空隙数量可作为层间防水性能的辅助指标,如解释空隙率较大的稀浆封层 40 cm 水头高度条件下不发生渗水现象时,则需要辅加空隙数量指标,论证稀浆封层内部为大量均匀分布的微孔隙,所以水不易渗透.

4 结 论

1) 利用数字图像处理技术量化了桥面铺装防水粘层的空隙分布状态,提出空隙率、空隙数量、空隙等效直径 3 项评价指标,为桥面铺装粘结层的选择与施工质量提供防水性能控制指标.

2) 5 种典型粘层中,同步碎石空隙分布丰富,空隙尺寸大,易于渗水、积水;AC-5 和稀浆封层空隙分布密而小,延缓了渗水现象,抗渗水能力优于同步碎石;SBS 改性乳化沥青粘层的空隙率最小,防水能力好. 同时,通过空隙三维重构模型还发现,同步碎石封层空隙连通程度较高;AC-5 和稀浆封层的微孔隙分布均匀,空隙连通较少;SBS 乳化沥青空隙分散且不均匀,连通最少.

3) 粘层渗水试验结果验证了数字图像分析方法的可靠性;同步碎石的渗水量最大,AC-5 与稀浆封层次之,SBS 改性乳化沥青粘层几乎不渗水. 且随水压力增大,渗水量增加.

参 考 文 献

- [1] 何德云,熊欣,董强. 水泥混凝土桥沥青铺装典型结构研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(1): 27
HE Deyun, XIONG Xin, DONG Qiang. Typical structure of bridge deck asphalt pavement of cement concrete bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(1): 27. DOI: cnki:sun:cqjt.0.2011-01-008
- [2] 吕政彬,申爱琴,覃潇,等. 乳化沥青冷再生混合料性能优化及机理研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4): 614
LÜ Zhengbin, SHEN Aiqin, QIN Xiao, et al. Research on performance optimization and mechanism of emulsified asphalt cold recycled mixture[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4): 614. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629. 2018.04.014
- [3] 徐鸣明,韩森,于静涛. 层间面对混凝土桥面铺装结构性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(5): 17
XU Ouming, HAN Sen, YU Jingtao. Effect of interlayer interface on structural performance of concrete bridge deck pavement[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2009, 29(5): 17. DOI: cnki:sun:xagj.0.2009-05-005
- [4] 郭靖宇. 沥青混凝土桥面铺装常见病害成因分析[J]. 工程与建设, 2009, 29(5): 277
- GUO Jingyu. Analysis of the diseases of cement concrete deck pavement with asphalt pavement [J]. Engineering and Construction, 2009, 29(5): 277. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5781.2009.02.049
- [5] 常艳婷,陈忠达,张震,等. 桥面沥青铺装环氧乳化沥青粘结层性能研究[J]. 材料导报, 2015, 29(18): 103
CHANG Yanting, CHEN Zhongda, ZHANG Zhen, et al. Study of epoxy emulsified asphalt binder layer performance of asphalt bridge deck pavement[J]. Materials Review, 2015, 29(18): 103. DOI: CNKI:SUN:CLDB.0.2015-18-025
- [6] ELSEIFI M, AL-QADI I, LOULIZI A, et al. Performance of geocomposite membrane as pavement moisture barrier[J]. Transportation Research Record, 2001, 1772(1): 168. DOI: 10.3141/1772-20
- [7] 黄晓明. 水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2014(1): 1
HUANG Xiaoming. Research status summary of asphalt pavement technology on concrete bridge decks [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014(1): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2014.01.002
- [8] WEGAN V, NIELSEN B C. Surfacing of concrete bridges[R/OL]. Denmark: Danish Road Institute, 2000. <http://worldcat.org/isbn/87901457>
- [9] PRICE A R. Laboratory tests on waterproofing systems for concrete bridge decks[R/OL]. London: Transport and Road Research Laboratory, 1990. <http://worldcat.org/issn-/02665247>
- [10] 周庆华. 桥面柔性防水材料性能指标与检测技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2003
ZHOU Qinghua. Flexible waterproof material on bridge deck research of measurement technology and performance indicators[D]. Xi'an: Chang'an University, 2003. DOI: 10.7666/d.y558753
- [11] PRICE A R. A field trial of waterproofing systems for concrete bridge decks[R/OL]. London: Transport and Road Research Laboratory, 1989. <https://trid.trb.org/view-/265587>
- [12] GOLLER G. The effect of bond coat on mechanical properties of plasma sprayed bioglass-titanium coatings[J]. Ceramics International, 2004, 30(3): 351
- [13] 韩森,张琛,杨赫,等. 铺装层渗水冒水模拟测试仪: CN207488140U [P]. 2018-06-12
HAN Sen, ZHANG Chen, YANG He, et al. An simulation testing instrument for seepage and water release of bridge deck pavement: CN207488140U [P]. 2018-06-12
- [14] LIU Mengmei, HAN Sen, PAN Jun, et al. Study on cohesion performance of waterborne epoxy resin emulsified asphalt as interlayer materials[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177: 72
- [15] 程火焰,朱荡荡,李伟. 护坡板透水性混凝土力学性能与耐久性的试验研究[J]. 混凝土, 2012(4): 17
CHENG Huoyan, ZHU Dangdang, LI Wei. Experimental study on physical properties and durability of pervious concrete slope protection plate[J]. Concrete, 2012(4): 17. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2012.04.007
- [16] 邓朝莉,李宗利. 孔隙率对混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2016(7): 41
DENG Chaoli, LI Zongli. Experimental study on mechanical properties of concrete with porosity[J]. Concrete, 2016(7): 41. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2016.07.011
- [17] 周羊羊,马国政,王海斗,等. 热喷涂层孔隙及对涂层性能影响的研究现状[J]. 材料导报, 2016, 30(17): 90
ZHOU Yangyang, MA Guozheng, WANG Haidou, et al. Research status of pores in thermally sprayed coating and their effects on coating performance[J]. Materials Review, 2016, 30(17): 90. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2016.017.013