

双层排水路面黏结层接触特性研究

吴文亮[†], 梁浚轩, 彭俊霖
(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 双层排水路面在施工中需要铺设黏结层以保证上下两层之间有足够的黏结力抵抗服役过程中可能出现的病害。为了探究双层排水路面黏结层用量范围和黏结层受力特征, 本文用压力胶片和路面纹理测试仪获取了单层排水路面和双层排水路面的层间接触特征, 以此确定双层排水路面黏结层推荐用量; 通过斜剪试验, 获得单、双层排水路面黏结层的破坏特点。结果表明: 双层排水路面的层间接触面积更大, 约为单层排水路面的 1.5 倍; 双层排水路面下面层所用的 OGFC 混合料的微观凹凸结构更加丰富, 表面积更大, 约为 AC 混合料的 1.18~1.20 倍, 据表面积倍数关系与规范推荐值, 建议双层排水路面黏结层用量为 0.8~1.2 L/m²; 双层排水路面黏结层的抗剪能力优于单层排水路面, 单层排水路面的层间抗剪强度仅由黏结层的黏结力提供; 双层排水路面的层间抗剪强度由黏结层的黏结力和层间颗粒互相咬合作用共同提供, 在达到最大剪切力后, 层间颗粒咬合继续发挥抵抗剪切变形的作用, 抗剪能力不会骤然下降。

关键词: 双层排水路面; 路面; 黏结层; 压力胶片; 路面纹理扫描; 抗剪强度
中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A

Research on the contact characteristics of binder layers of double-layer porous asphalt pavement

WU Wenliang[†], LIANG Junxuan, PENG Junlin

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: During the construction of double-layer porous asphalt pavement, a binder layer needs to be laid to ensure that the upper and lower layers are bonded by enough binding force to resist potential pavement diseases during service. To investigate the dosage range and force characteristics of the binder layer of double-layer porous asphalt pavement, this paper utilized the pressure film and pavement texture scanner to obtain the interlayer contact characteristics of both single-layer and double-layer porous asphalt pavement, thereby determining the recommended dosage of the binder layer for the double-layer pavement; and the oblique shear test was conducted to obtain the failure characteristics of the binder layers in both single-layer and double-layer porous asphalt pavement. The results indicate that the interlayer contact area of the double-layer porous asphalt pavement is larger, which is approximately 1.5 times that of the single-layer porous asphalt pavement. The OGFC mix used in the lower layer of

* 收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2024A1515011177), Natural Science Foundation of Guangdong Province(2024A1515011177)

作者简介: 吴文亮(1981—), 男, 黑龙江鸡西人, 华南理工大学副教授, 博士

[†] 通信联系人, E-mail: ctwlwu@scut.edu.cn

the double-layer porous asphalt pavement exhibits more microscopic concave and convex structures and a larger surface area, which is about 1.18~1.20 times that of the AC mix. Based on the surface area multiplier relationship and the standard recommended value, it is recommended that the dosage of the binder layer for double-layer porous asphalt pavement be 0.8~1.2 L/m². The shear resistance of the binder layer in double-layer porous asphalt pavement is superior to that in single-layer porous asphalt pavement. The interlayer shear strength of single-layer porous asphalt pavement is solely provided by the bonding force of the binder layer. The interlayer shear strength of double-layer porous asphalt pavement is provided by the bonding force of the binder layer and the interlocking of interlayer particles. After reaching the maximum shear force, the interlayer particles continue to resist shear deformation, and the shear resistance does not decline abruptly.

Key words: double-layer porous asphalt pavement; pavements; binder layer; pressure film; pavement texture scanning; shear strength

针对单层排水路面易堵塞且排水效率不足的问题,研究者们发现,采用双层排水路面设计能够科学合理地平衡各项功能需求.具体设计中,上层采用较低空隙率构造形成精细过滤层,以有效拦截路面灰尘及杂质颗粒;而下层则设计为较高空隙率的大空隙结构,确保雨水快速渗透并顺利排离.这种精妙的设计使得双层排水性沥青路面能够兼顾良好的抗堵塞性能和排水性能.

双层排水路面作为一种复合结构,上下两层的厚度分别为20~40 mm和35~60 mm^[1],为了满足双层排水路面结构的强度要求,在双层排水沥青路面的上下两层路面结构之间,需要合理设置中间黏结层,以提供足够的黏结强度和抗剪强度.

双层排水路面的施工工艺可分为以下三种:第一种是“热+热”摊铺;第二种是“热+暖”摊铺;第三种是“冷+热”分次摊铺.“热+热”(hot-on-hot)摊铺施工技术,是利用特定机械同时摊铺两种不同类型的沥青混合料,并通过压实设备一次性完成两层混合料的碾压成型.这项技术在日本、荷兰等国家使用较为普遍^[2-3].赵卫国^[4]提出的“热+暖”施工工艺是指两层材料依次摊铺,通过下层材料的余温延缓上层材料的冷却.上述两种方法的层间黏结由混合料热沥青冷却后提供,黏结强度较低,在施工过程中下层易变形,形成潜在的薄弱区域^[5].

我国双层排水沥青路面常规的施工方式是“冷+热”(hot-on-cold)分次摊铺技术,即先施工下层,洒黏层油,再铺设上层沥青路面,此种施工工艺在下层常温时施工上面层导致层间黏结变弱,层间黏结不

良会诱发多种路面病害,例如车辙、上层磨耗层滑移、开裂或路面结构的疲劳寿命降低.双层排水路面的路用性能在很大程度上取决于层间黏结质量以及黏结层材料的渗透性.

为探究不同因素对双层排水路面黏结层性能的影响,艾长发等^[6]、刘凯迪^[7]、李俊等^[8]以及Song等^[9]开展了一系列试验,结果表明,粗糙且密实的表面能显著增大有效接触面积,从而提升层间抗剪性能^[6-9].Jaskula等^[10]的研究指出,层间黏结不良会诱发多种路面病害,其中黏结材料自身质量和矿料级配是影响层间界面黏结程度的关键因素.Santagata等^[11]利用计算机断层扫描技术获取了界面宏观纹理信息,发现界面宏观纹理的粗糙度越大,其层间抗剪应力越强.He等^[12-13]利用三维激光扫描技术分析不同粒度组合的双层路面,发现上下层粒度粗度差值与层间黏结性能呈正相关关系.Tang等^[14]利用图像技术和曲面重建技术,对界面纹理参数与剪切强度之间的关系进行了定量分析,并进一步指出黏层油的最佳用量与界面纹理参数值之间存在正相关关系.Liao等^[15]和张震山等^[16]用虚拟直剪试验分析了不同的施工方式对层间黏结性能的影响,认为摊铺温度是影响层间抗剪强度的重要因素,并提出分形维数与层间黏结性能之间的关系.

尽管已有研究在路面层间黏结层性能方面取得一定成果,但仍存在一些不足.一方面,现有研究多聚焦于黏结层性能的影响因素分析,对于如何准确量化双层排水路面层间接触特征并确定黏结材料用量尚缺乏深入研究,实际施工中黏结材料用量缺乏

可靠参数依据.另一方面,目前针对单层和双层排水路面黏结层黏结性能和剪切破坏特性的研究相对较少.本文通过压力胶片和路面纹理扫描方法分析了单层和双层排水路面的层间接触环境参数,以单层排水路面黏结层用量标准为参考,确定双层排水路面黏结层的用量范围;并通过斜剪试验,评估单层和双层排水沥青路面黏结层的黏结强度和抗剪性能,反映出单、双层排水路面黏结层破坏的特点,能弥补现有研究的不足,为双层排水路面黏结层的合理设计和施工提供科学依据,具有重要的现实意义.

1 层间接触面积实验

相较于级配构造表面平整的其他路面,双层排水路面的层间接触条件和接触面积更为复杂、特殊.由于难以量化位于结构内部的层间接触特征,导致双层排水路面黏结材料用量缺乏参数依据.本文从对接触点以及接触进行面积采样以获取层间接触的具体情况出发,通过压力胶片技术对接触点及接触面积进行采样,以获取单层排水路面和双层排水路面层间接触的具体状况,并使用面积分析软件获取相应的接触数据.

1.1 实验原理

压力胶片可以反映物体作用在胶片上的力的位置和大小,将压力胶片放置在路面结构层间,可以直观反映路面层间接触信息.本文采用FUJI公司的Prescale 胶片作为反映接触面积的媒介,选用的双片

型压力胶片一片涂有微囊剂,另一片涂有显色物质,两者接触后发生化学反应显色,能精确测量接触面积与压力分布.微囊剂尺寸与胞壁强度和接触压力相关,通过组合不同尺寸和胞壁厚度的微囊剂,可实现精准测量.

1.2 实验方法和步骤

为分析OGFC-10上面层与AC-16、OGFC-16下面层的接触面积,采用8~11 mm 粒径范围的清洁碎石(该粒径在OGFC-10中占较大体积分数)代替OGFC-10上面层进行模拟实验,将压力胶片置于上面层和下面层之间,由车辙板成型仪来回碾压24次后,获取压力胶片上的接触点印痕数据,通过配套软件进行接触面积的计算与分析.具体实验步骤如下:1)将压力胶片裁剪为270 mm×270 mm 规格,放置在下层车辙板表面中心位置.2)为防止粉尘对碾压效果的影响,向磨具中倒入8~11 mm 粒径的清洁碎石,利用车辙板成型仪模拟实际成型过程并施加碾压荷载,进行24次来回碾压.3)取出显色后的压力胶片,静置60 min 以待颜色密度稳定.随后,采用Epson公司(日本)生产的Perfection V300Photo 型CCD 专用扫描仪及颜色校正板,获取接触应力分布的特征图像,图像分辨率为0.125 mm/pixel(200 dpi).之后,利用配套的FPD-8010E 压力图像数字测量分析系统V2.0 进行数值解析.4)对不同规格的胶片接触应力数值,利用MATLAB 软件开展数值量化与统计分析,以获取接触点面积数据.本文所用混合料级配组成如表1 所示.

表1 混合料级配组成
Tab.1 Asphalt mixture gradation

级配类型	通过筛孔(mm)的质量百分比/%										油石比/%	空隙率/%
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075		
OGFC-10	100	100	97.8	56.8	21.0	15.2	12.2	8.9	6.8	5.5	5.1	18
OGFC-16	98.4	86.9	55.1	17.9	13.1	10.4	8.2	6.9	5.9	5.1	5.0	20
AC-16	98.6	88.9	69.8	49.7	31.2	23.1	16.5	12.5	9.8	7.6	6.2	4.5

1.3 接触面积分析

双片型压力胶片在受到层间接触挤压时,胶片上的微胶囊破裂并显色,由扫描仪获取胶片显色区信息(图1 和图2).图中红绿显色点即层间的实际接触点,绿色代表低接触压力,红色代表高接触压力.

基于MATLAB 平台对不同胶片的接触荷载区进行数值量化与统计分析,可获取接触点面积数据,量化后信息如表2 所示.

通过对比接触面积数据可以看出,双层排水路

面(OGFC-16+OGFC-10)的层间接触面积约为单层排水路面(AC-16+OGFC-10)的1.5 倍.这一现象主要归因于OGFC-16 表面拥有丰富的结构纹理和较大的构造深度.当随机分布的集料落于OGFC-16 表面时,通常会产生2~3 个接触点,从而显著增加了层间接触面积.而相较之下,AC-16 的表面更为均匀平整,构造深度和纹理密度较小,导致单层排水路面的层间接触点和接触面积相对较少.

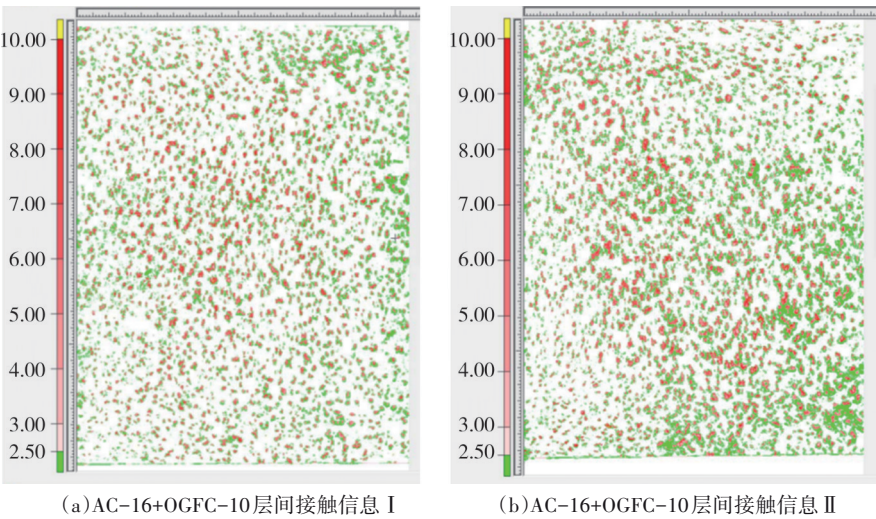


图 1 AC-16+OGFC-10 层间接触面荷载区域信息

Fig.1 AC-16+OGFC-10 interlayer contact surface load area information

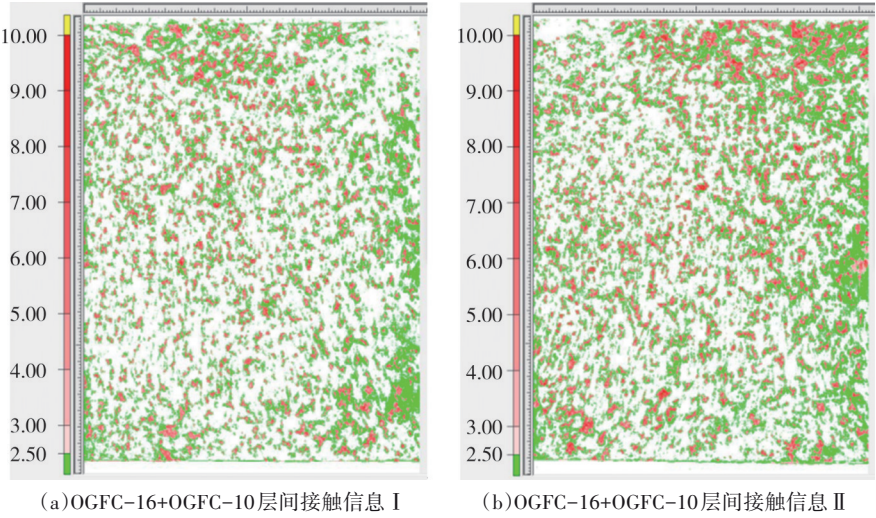


图 2 OGFC-16+OGFC-10 层间接触面荷载区域信息

Fig.2 OGFC-16+OGFC-10 interlayer contact surface load area information

表 2 层间接触量化信息

Tab.2 Quantitative information on interlayer contact					
层间接触类型	扫描面积/mm ²	平均扫描面积/mm ²	接触面积/mm ²	平均接触面积/mm ²	平均接触面积/平均扫描面积
AC-16+OGFC-10	57 283	56 898	16 349	14 650	25.75%
	56 513		12 951		
OGFC-16+OGFC-10	57 206	57 411	19 790	22 031	38.37%
	57 616		24 272		

1.4 接触面积对黏结强度的影响

根据材料黏结强度计算公式(1),可知当材料的黏结强度不变时,层间接触面积与层间黏结力成正比.

$$P = F/S \tag{1}$$

式中: P 为试件的黏结强度; F 为试件破坏时的最大黏结力; S 为层间接触面积.

对比两种路面结构的层间接触面积,双层排水路面的层间接触面积约为单层排水路面的 1.5 倍.在材料力学中,材料的黏结强度是固有性质,材料黏结强度受材料性质决定,通过公式(1)可知当材料的黏结强度不变时,层间接触面积与层间黏结力成正比.即在黏结层材料不变的情况下,双层排水路面层间黏结具有更大的接触面积,其黏结力在理论上较单

层排水路面提升约 50%, 在服役过程中上层松散、剥落的风险相应降低。

2 激光扫描路面纹理实验

双层排水路面大粒径集料占比高、表面纹理丰富且构造深度大, 这些特性使得双层排水路面层间接触的实际表面积更大, 进而要求双层排水路面黏结层用量更大。为确定黏结层用量, 有必要进一步求证其下层表面实际面积, 保证具备有效的黏结层厚度。本文基于 3D 激光测距技术生成路面轮廓形态的测量技术与方法, 配合软件数据处理与分析方法, 以及实际面积评价指标开展相关研究。

2.1 实验原理

激光测距技术对物体表面轮廓的测量主要利用了激光三角测量法, 该测量法也称为光学三角测距法, 是一种常用的非接触式测量技术。具体到路面结构轮廓测绘, 当测距仪与被测沥青路面距离变化时, 由于反射光的入射角改变, 反射光在高分辨率的光电位置敏感探测器上的聚焦位置会发生变化。通过测量位置变化, 结合已知的激光发射器与接收器之间的距离, 以及激光束与接收器之间的夹角, 可以利用三角几何关系计算出目标点与激光点之间的高程差。该方法高精度、非接触、速度快, 适用于沥青道路路面表面纹理精细测绘。

2.2 实验方法和步骤

本次测量采用路面纹理测试仪, 对 AC-16 和 OGFC-16 两种类型的沥青混合料进行宏观构造与微观纹理的扫描采样。扫描区域为 300 mm×300 mm 的车辙板试件, 扫描面积为 90 000 mm², 而激光传感器发射的激光束线宽 34 mm, 需要分别扫描 9 道宽 34 mm 长 300 mm 的区域, 并进行拼接, 鉴于实际路面受行车方向作用的影响, 实验过程中明确要求需沿着压实方向进行相关的测量工作, 激光扫描路径如图 3 所示。

2.3 路面结构三维模型

宏观构造与微观纹理的获取在于扫描精度, 宏观模型主要关注沥青路面较大的纹理构造, 微观模型则聚焦于沥青路面更细微的纹理结构, 能够捕捉到尺寸小于 0.5 mm 的凹凸结构。根据宏、微观尺度的激光扫描分辨率要求, 将试件宏观构造的采样间隔

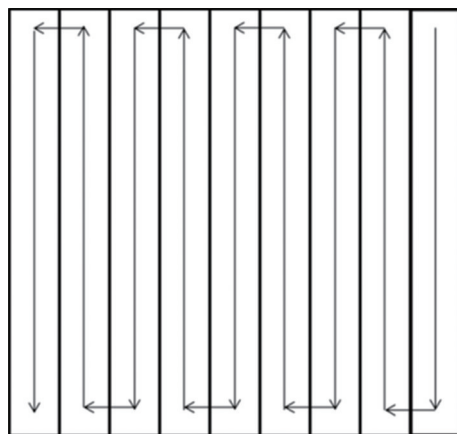
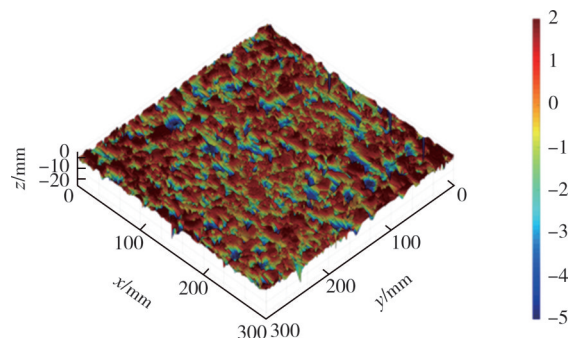


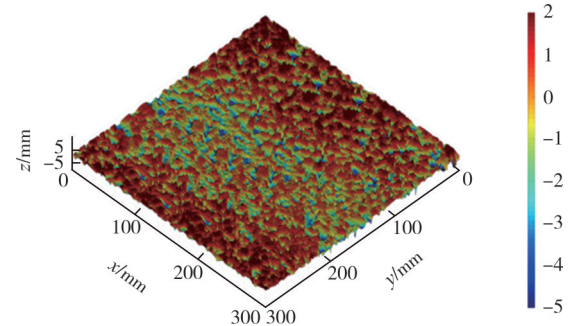
图 3 扫描轨迹示意图

Fig.3 Scanning track

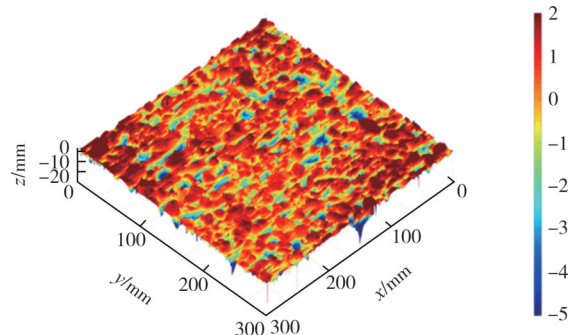
设定为 0.5 mm, 试件微观纹理的采样间隔设定为 0.05 mm。经过 9 道条形路径扫描后, 采集到的高程点云数据使用仪器配套软件进行拼接处理, 生成沥青路面表面构造的三维曲面模型, 如图 4 所示。



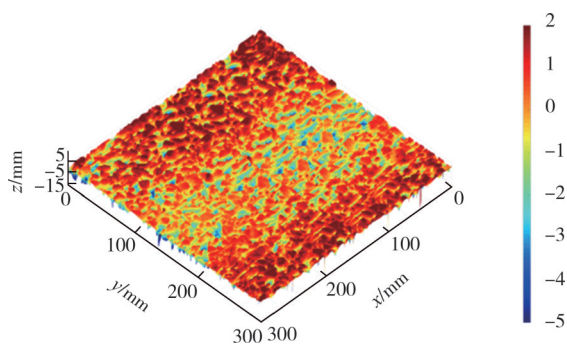
(a) OGFC-16 表面宏观构造模型



(b) AC-16 表面宏观构造模型



(c) OGFC-16 表面构造微观纹理模型



(d) AC-16 表面构造微观纹理模型

图 4 沥青路面表面构造曲面模型

Fig.4 Model of asphalt pavement surface

2.4 扫描数据分析

基于数据模型高程点空间坐标数据,能够逐层计算不同深度下的宏观构造和微观纹理的三维表面积.本文使用投影法计算三维表面积,其方法是:将离散的空间数据点分别向 xoy 、 $yozy$ 、 zox 三个平面进行投影,获得空间数据点在三个平面内所围成的平面多边形面积,计算路面表面积为三个平面内所围成的平面多边形面积平方和的算数平方根.

利用激光扫描所得高程点云数据,可构建试件的宏观、微观表面模型并计算其全区域表面积,结果如表 3 所示.

表 3 AC-16 与 OGFC-16 宏观、微观模型表面积

Tab.3 AC-16 and OGFC-16 macro and micro model surface area

下面层类型	宏观模型	微观模型
	全区域表面积/mm ²	全区域表面积/mm ²
AC-16	169 174	230 440
OGFC-16	199 088	276 442

比较 AC-16 与 OGFC-16 的全区域表面积,宏观模型中,OGFC-16 的全区域表面积是扫描面积的 2.21 倍,AC-16 的全区域表面积是扫描面积的 1.87 倍. OGFC-16 的全区域表面积是 AC-16 的 1.18 倍;微观模型中,OGFC-16 的全区域表面积是扫描面积的 3.07 倍,AC-16 的全区域表面积是扫描面积的 2.56 倍,OGFC-16 的全区域表面积是 AC-16 的 1.20 倍. 分析证明 OGFC-16 下面层由于表面粗糙、构造深度较大,其实际表面积大于 AC-16 的实际表面积. AC-16 与 OGFC-16 的微观模型表面积分别为宏观模型表面积的 1.36 倍和 1.39 倍,倍率相近,说明两者在单位全区域表面积的微观凹凸结构的数量大致相同,但因 OGFC-16 的全区域表面积更大,在单位扫描面积下,其微观凹凸结构更丰富. 所以,OGFC-16 更深的构造

深度和更丰富的微观凹凸结构共同提升了 OGFC-16 的全区域表面积,约为 AC-16 的 1.18~1.20 倍.

3 斜剪试验

45° 沥青层间黏结抗剪性能试验是一种用于评估沥青路面各结构层之间黏结强度和抗剪能力的试验方法,沥青路面结构剪切面与加载轴线呈 45° 角,这种方法不仅考虑了垂直荷载的影响,还兼顾了水平荷载对路面的剪切作用,能够更真实地反映路面在使用过程中的复杂受力状态.

3.1 黏结层推荐用量确定

黏结层材料的洒布量会直接影响沥青层间的黏结厚度. 当洒布量适中时,黏结材料能够在沥青层间形成连续、均匀的黏结层,从而增加层间的有效黏结面积,提高黏结力;洒布量过少时则覆盖不全,易致局部黏结力不足,产生分离或滑移;洒布量过多时则层厚,虽增大黏结力,但影响路面平整度和行车舒适性. 且对排水功能型路面而言,过量的黏结层材料易渗入并封堵排水通道,削弱其排水能力. 因此,在确定黏结层材料洒布量时应综合考虑黏结性能、结构稳定性和排水功能的多重需求.

根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[17],当在一般路面面层上铺筑一层大空隙排水路面时,需要在施工当天喷洒乳化沥青作为黏结层,乳化沥青洒布量一般为 0.6~1.0 L/m². 参考单层排水路面和双层排水路面层间接触面积之比和宏观构造与微观纹理模型中 OGFC-16 与 AC-16 的全区域表面积的倍数关系,并考虑双层排水路面黏结层洒布会出现渗漏现象,适当提升黏结层用量,建议双层排水路面黏结层用量取单层排水路面黏结层用量的相应倍数,即 0.8~1.2 L/m².

3.2 试件制作与试验方法

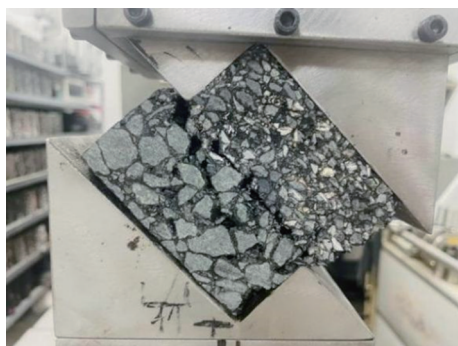
使用车辙板成型仪成型 AC-16 与 OGFC-16 两种下面层,待下面层冷却后,喷洒黏结层材料,单层排水路面黏结层用量为 1.0 L/m²,双层排水路面黏结层用量为 1.2 L/m²,在黏结层达到凝聚状态且未完全固化前,碾压成型 OGFC-10 上面层. 将成型的试件切割成 100 mm×100 mm×80 mm 的双层斜剪试验试件,其中上下面层厚度均为 40 mm. 斜剪试验加载所用仪器采用微机控制电液伺服万能试验机,用专用 45° 斜剪夹具对双层试件进行斜剪试验,加载速率选取 2 mm/min.

3.3 黏结层剪切破坏分析

AC-16+OGFC-10 与 OGFC-16+OGFC-10 两种结构类型在斜剪试验过程中的层间破坏形式,如图 5 所示.

如图 5(a)所示,单层排水路面结构在剪切应力下,其层间黏结处出现明显的裂缝,黏结层之下石料在剪切应力和黏结层的黏结力的共同作用下出现开裂,最终黏结层完全开裂.

如图 5(b)所示,双层排水路面在剪切破坏过程中未出现黏结层完全破坏的现象,黏结层几乎没有开裂,表明黏结层在抵抗剪切变形的过程中除了参与直接抗剪作用,后期还通过黏结力带动层间骨料协同抗剪.



(a)AC-16+OGFC-10 黏结层破坏



(b)OGFC-16+OGFC-10 黏结层破坏

图 5 黏结层剪切破坏现象

Fig.5 Binder layer shear damage

根据斜剪试验的力-位移曲线(图 6),双层排水路面和单层排水路面的层间抗剪强度分别为 2.12 MPa 和 1.29 MPa,两者强度比为 1.6,与层间接触面积比(1.5)接近.

力-位移曲线表明,单层排水路面在抵抗剪切变形的过程中,曲线较为平滑.当试件荷载达到峰值后,直接进入抗剪失效阶段,荷载缓步下降.双层排水路面力-位移曲线在上升段呈细微波动,且当试件在抗剪过程中达到峰值荷载后,黏结层的抗剪功能

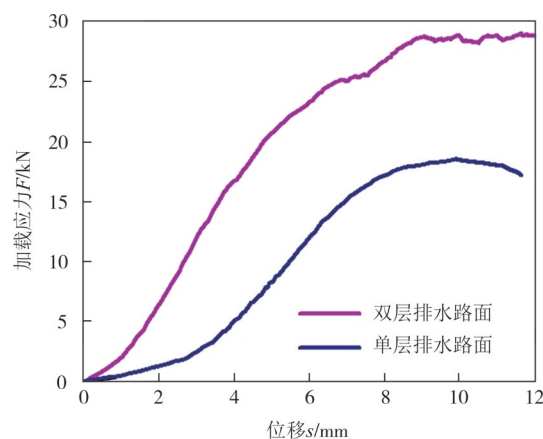


图 6 斜剪试验力-位移图

Fig.6 Diagram of force-displacement for oblique shear test

衰减,层间黏结作用使层间颗粒咬合,继续发挥抵抗剪切变形的作用,这是由于双层排水路面层间具有更大的颗粒接触面积和更好的咬合结构,因而双层排水路面结构可避免抗剪力与抗剪强度骤降.

4 结论

1)通过压力胶片和激光扫描仪分析可知,双层排水路面的层间接触面积更大,约为单层排水路面的 1.5 倍,双层排水路面下面层的 OGFC 混合料的表面积更大,微观凹凸结构更加丰富,黏层作用的面积更大.

2)根据单、双层排水路面扫描面积之比和规范中推荐的单层排水路面的黏结层用量,建议双层排水路面黏结层用量为 $0.8 \sim 1.2 \text{ L/m}^2$.在实际工程应用中确定黏结层材料洒布量时,应综合考虑黏结层层间的黏结性能、结构稳定性和排水性能.在力学敏感区域,如重交通路段、大纵坡路段和加减速频繁路段等,为提高层间力学性能,宜采用上限值 1.2 L/m^2 .在排水敏感区域,如多雨路段、凹形竖曲线路段和小纵坡路段等,为确保足够的排水能力,宜采用下限值 0.8 L/m^2 .

3)双层排水路面抗剪能力优于单层排水路面;单层排水路面的层间抗剪强度由黏结层黏结力提供,在抵抗剪切变形的过程中,试件荷载达到峰值后直接进入抗剪失效阶段.双层排水路面层间抗剪强度由黏结层的黏结力和层间颗粒互相咬合作用提供,当试件在抗剪过程中达到峰值荷载、黏结层的抗剪功能衰减后,层间黏结作用使层间颗粒咬合,继续发挥抵抗剪切变形的作用.

参考文献

- [1] 排水沥青路面设计与施工技术规范: JTG/T 3350-03—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Technical specifications for design and construction of porous asphalt pavement: JTG/T 3350-03—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [2] NIELSEN C B, BENDTSEN H, ANDERSEN B, et al. Noise-reducing pavements in Japan: study tour report [R]. Denmark: Road Directorate, Danish Road Institute, 2005.
- [3] MORGAN P. Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces [R]. Brussels: Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL), 2006.
- [4] 赵卫国. 沥青混凝土路面双层摊铺技术的施工应用[J]. 公路, 2007, 52(6): 88-92.
ZHAO W G. Construction application of double-layer paving technology for asphalt concrete pavement [J]. Highway, 2007, 52(6): 88-92. (in Chinese)
- [5] GHARABAGHY C, ARNOLD P, SCHARNIGG K, et al. State-of-the-art experience in the use of the compact asphalt paver for the construction of thin-bed low noise open-pored 2-course asphalt surfacings: state-of-the-art technology and practice in the Netherlands and Germany [R]. Aachen: Aachen Institute for Highway/RWTH, 2005.
- [6] 艾长发, 宋姣姣, 王福成, 等. 界面性质对沥青路面层间抗剪强度的影响试验[J]. 公路, 2016, 61(2): 1-5.
AI C F, SONG J J, WANG F C, et al. Mechanical testing on interlayer shear strength influenced by interfacial property in asphalt pavement [J]. Highway, 2016, 61(2): 1-5. (in Chinese)
- [7] 刘凯迪. 冷补沥青混合料与旧路面界面粘结特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LIU K D. A study on bonding characteristics of the interface between cold patch asphalt mixture and old pavement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [8] 李俊, 李洪刚, 李明亮, 等. 下承层界面状况对多孔沥青路面层间黏结性能的影响[J]. 公路, 2021, 66(6): 7-10.
LI J, LI H G, LI M L, et al. Effect of interface condition of underlying layer on interlaminar bonding performance of porous asphalt pavement [J]. Highway, 2021, 66(6): 7-10. (in Chinese)
- [9] SONG W M, SHU X, HUANG B S, et al. Factors affecting shear strength between open-graded friction course and underlying layer [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 527-535.
- [10] JASKULA P, RYS D. Effect of interlayer bonding quality of asphalt layers on pavement performance [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 236: 012005.
- [11] SANTAGATA F, PARTL M, FERROTTI G, et al. Layer characteristics affecting interlayer shear resistance in flexible pavements [C]// Technical Session of the Association-of-Asphalt-Paving-Technologists. Philadelphia, PA. APR 27-30, 2008: 221-256.
- [12] HE H Z, WANG G L, RAHMAN A, et al. Interface contact properties in asphalt pavement using 3D laser scanning technology [J]. Road Materials and Pavement Design, 2024, 25(6): 1249-1269.
- [13] HE H Z, RAHMAN A, AI C F. Interlocking characteristic and its correlation with interlayer shear strength in typical double-layered asphalt systems [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2024, 25(1): 2347996.
- [14] TANG Z P, HUANG F L, PENG H. Effect of 3D roughness characteristics on bonding behaviors between concrete substrate and asphalt overlay [J]. Construction and Building Materials, 2021, 270: 121386.
- [15] LIAO G Y, WANG C, WANG H, et al. Characterization of interlayer mechanical performance of double-layer porous asphalt compacted by three methods: simulations and observations [J]. Construction and Building Materials, 2022, 353: 129127.
- [16] 张震山, 廖公云, 汪璨, 等. 3种成型工艺下双层排水路面微观结构[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 47-55.
ZHANG Z S, LIAO G Y, WANG C, et al. Detailed structure of double-layer porous asphalt pavement under three paving technologies [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 47-55. (in Chinese)
- [17] 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese)