

基于介电常数-空隙率模型的排水路面面域水膜厚度模型构建与验证

孙军¹, 王钊栋², 李伟雄²

(1. 广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510100; 2. 广州肖宁道路工程技术研究事务有限公司, 广东 广州 510641)

摘要: 为精确获取超宽断面排水沥青路面水膜厚度的面域分布, 指导降雨天气路面抗滑评价和风险预警, 降低道路事故发生率。基于渗流理论及水膜厚度模型、空隙率与介电常数关系模型的基础理论, 依托深汕西改扩建高速公路工程, 借助三维探地雷达采集面域介电常数, 转换得到面域的空隙率分布图, 进而构建面域的水膜厚度计算模型。最后通过不同降雨强度下的实测数据对模型的准确性进行验证。结果表明, 该模型具有较好的精确性, 通过提前检测获取面域空隙率分布, 并采集排水路径长度、路面合成坡度、厚度等指标, 只需监测降雨量即可预测得到路面面域水膜厚度分布情况, 为道路雨天行车安全管理提供了准确、具有时效性的基础数据。

关键词: 排水沥青路面; 介电常数; 面域水膜厚度模型

中图分类号: U416.217; U417.3

文献标识码: A

Model Construction and Verification of Water Film Thickness in the Surface Domain of Drainage Asphalt Pavement Based on Model of Dielectric Constant-porosity

SUN Jun¹, WANG Zhaodong², LI Weixiong²

(1. Guangdong Expressway Co., Ltd., Guangzhou 510100, Guangdong, China;

2. Guangzhou Xiaoning Institute of Roadway Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510641, Guangdong, China)

Abstract: The purpose of this paper is to accurately obtain the surface distribution of the water film thickness of the ultra wide cross-section drainage asphalt pavement, guide the anti-slippery evaluation and risk warning of the pavement in rainy weather, and reduce the incidence of road accidents. Based on the basic theories of seepage theory and water film thickness model, as well as the relationship model between porosity and dielectric constant, and relying on practical engineering, three-dimensional ground penetrating radar is used to collect the dielectric constant of the surface area, convert it into a distribution map of porosity in the surface area, and then construct a calculation model for water film thickness in the surface area. Finally, the accuracy of the model was verified through measured data under different rainfall intensities. The results show that the model has good accuracy. By detecting the distribution of surface void fraction in advance and collecting indicators such as drainage path length, road surface composite slope, and thickness, real-time distribution of surface water film thickness can be predicted by monitoring rainfall. This provides accurate and timely basic data for road safety management in rainy days.

Key words: drainage asphalt pavement; dielectric constant; surface water film thickness model

1 引言

水膜是沥青路面在雨天时, 路面表面形成一

定厚度的径流^[1]。传统的密级配与间断级配沥青路面上易形成水膜, 轮胎与路面的附着力降低而导致路面湿滑, 给交通安全带来严重威胁^[2-3]。

收稿日期: 2024-03-07

作者简介: 孙军, 工程师, 本科, 研究方向为高速公路建设与养护管理

目前公路行业尚未制定统一的水膜厚度标准,因此,对沥青路面的水膜厚度进行准确评估具有重要意义。国内外学者针对路面水膜厚度计算建立了各种模型,其中回归模型占绝大多数。目前使用较多的主要有 Ross 等为英国道路研究实验室建立的模型, Gallaway 等为美国交通部提出的模型, Wambold 等、Anderson 在欧盟车辆-轮胎相互作用研究项目 (VERT) 中给出的模型, 季天剑等、Chesterton 等提出的模型^[4-5]。以上模型主要通过水膜深度试验获取数据, 回归得到水膜厚度计算公式, 受试验结果影响较大。此外, 水膜厚度模型研究对象基本为密级配沥青路面, 对于排水沥青路面的水膜厚度模型研究较少^[6]。在超宽断面排水路面上, 水膜厚度在不同位置上的水膜厚度各不相同, 易造成车辆滑移现象。因此, 对排水沥青路面面域水膜厚度预估模型开展研究具有重要意义。

介电常数是表征材料在电场作用下电学性能的物理量, 与材料的极化性质有关^[7]。沥青面层的介电常数通常由三维探地雷达工作时通过脉冲波形特征及传播时间计算得出^[8]。同时利用相应的数学物理模型计算面层的体积参数, 可以获得沥青混合料中的空隙率^[9]。因此, 在沥青路面中, 路面的介电常数获得后, 通过数学物理模型计算得到空隙率, 进而间接得到水膜厚度信息^[10], 这为研究介电常数用于水膜厚度模型预估提供了理论基础。

目前, 对于水膜厚度检测设备的研究比较成熟, 主要分为嵌入式、固定式和移动式。嵌入式为嵌入路面, 定点采集数据便捷性不高; 固定式类似道路监控摄像头, 固定在某一处, 可采集数据范围有限; 移动式可安装在车辆上, 可以开展不同位置的检测, 但当采用移动式水膜厚度检测设备开展较长路段的检测时, 可能存在检测起点下着大雨, 终点雨已经停的情况, 或出现只检测一半路程雨就停了的情况, 无法获取长路段的水膜厚度面域分布。因此, 亟须建立一个准确的面域水膜厚度模型, 实时预测道路水膜面域分布情况。

本研究基于渗流理论、水膜厚度理论模型和空隙率与介电常数的关系模型, 依托实际工程, 借助三维探地雷达采集面域的介电常数, 通过数学物理模型计算转换得到面域的空隙率分布图, 进而构建面域的水膜厚度计算模型。最后通过实测数据对模型的准确性进行验证。

2 基础理论

2.1 渗流理论及水膜厚度模型

2.1.1 渗流理论

自然降雨在排水沥青路面内部多孔结构的渗流过程包括三个阶段: 表面浸润、空隙填充、渗流。在降雨初期, 路面从干燥状态逐渐湿润, 随着降雨量的增加, 表面剩余的水分会沿着空隙渗入排水路面体内, 填充空隙率。在填充空隙的过程中, 由于连通空隙率的存在, 会产生各个方向的渗流。当排水沥青路面结构的空隙已被雨水填满, 路表排水层达到饱和时, 雨水在路表形成径流。将排水路面简化成图 1 所示的结构形式, 即排水路面在边缘存在排水结构, 排水路面中间为不透水边界^[11]。

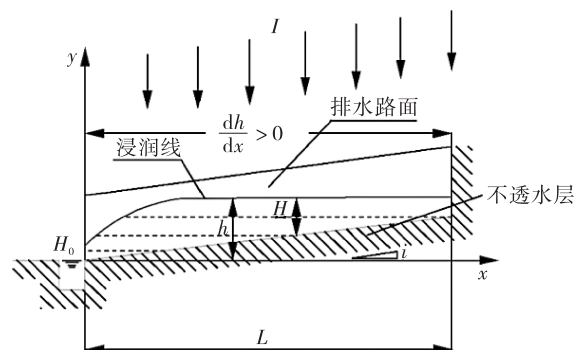


图1 排水路面结构模型图

注: I 为降雨强度 (m/s); H 为雨水面与不透水倾斜面之间的距离 (m); h 为雨水面与水平面 x 轴的距离 (m); H_0 为排水沟边界处的潜水流厚度 (m); L 为排水路径长度 (m); i 为路面横坡度 ($\%$)。

在降雨强度恒定的条件下, 雨水在透水层中的流动过程可以视为一个均匀稳定补充的蓄水层, 以稳定状态流入无侧限系统。雨水在排水沥青路面内部结构的渗流采用 Boussinesq 方程的一般形式来描述, 公式如下^[12]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(H \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{I}{K} \right] = \frac{V}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: K 为排水面层渗透系数, V 为空隙率。

根据给定的假设和边界条件, 当 $x = L$ 时,

$\frac{dh}{dx} = 0$; 当 $x = 0$ 时, $H = H_0$ 可得到:

$$\frac{d}{dx} \left(HK \frac{dh}{dx} \right) = -I \quad (2)$$

当排水沥青路面面层处于饱和状态时, 由 Darcy 定律可得^[13]:

$$q_x = -HK \frac{dh}{dx} \quad (3)$$

式中, $-\frac{dh}{dx}$ 为路面坡度 i , 将其代入式 (3)

得到 $q_x = -KHi$, 因此表面径流的流量为^[14]:

$$q_j = IL - KHi \quad (4)$$

由式 (4) 计算出路面在各个位置的漫流流量, 进而计算出不同路面位置的水膜厚度。

2.1.2 水膜厚度模型建立

建立模型的相关参数包括排水路径长度、降雨量、排水合成坡度、空隙率。在四个因素中, 长度、坡度为道路建设后固定的参数, 降雨量在同一断面上也是一个固定值, 可通过简单的设备监测得到, 但由于空隙率受材料、摊铺、碾压等影响, 具有较大的变异性, 不同位置的空隙率变化无明显规律性, 因此空隙率对于水膜厚度分布具有较大的影响。

根据马翔对排水性沥青混合料渗透性的分析^[15], 得到空隙率 V 与横向渗透系数 K 之间存在如下线性关系式:

$$K = 0.0791V - 0.4979 \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (4) 得到:

$$q_j = IL - (0.0791V - 0.4979)Hi \quad (6)$$

当降雨强度达到一定程度, 排水沥青路面将出现表面径流。根据季天剑研究可知^[16]:

$$h = 1.3589 \left(\frac{qLn}{i^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (7)$$

式中: h 为坡面上的水膜厚度; q 为降雨强度; L 为坡面长度; n 为粗糙系数, 经验常数, 可在 0.02 ~ 0.04 之间取值, 排水沥青路面一般取 0.03; i 为坡面坡度。

由于式 (7) 的假设条件为路面无渗水, 即排水沥青路面面层处于水饱和状态, 因此式 (7) 中的降雨强度等同于排水沥青路面的表面径流。由式 (6) 可以计算出路面在各个位置的漫流流量, 把漫流流量代入式 (7) 就可以算出排水沥青路面各个位置的水膜厚度。

2.2 空隙率与介电常数关系模型

熊学堂等基于电磁混合理论, 对 4 种路面密度预估模型 (CRIM 模型、Rayleigh 模型、B6ttcher 模型和 ALL 模型) 进行实测验证, 发现 ALL 模型预估精度最高^[17]。ALL 模型中介电常数和密度的关系见式 (8)。

$$\gamma_f = \frac{\frac{\varepsilon - \varepsilon_b}{3\varepsilon - 2.3\varepsilon_b} - \frac{1 - \varepsilon_b}{1 + 2\varepsilon - 2.3\varepsilon_b}}{\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_b}{\varepsilon_s + \varepsilon - 2.3\varepsilon_b} \times \frac{1 - P_b}{\gamma_s e} - \frac{1 - \varepsilon_b}{1 + 2\varepsilon - 2.3\varepsilon_b} \times \frac{1}{\gamma_t}} \quad (8)$$

式中: ε 、 ε_b 、 ε_s 分别为沥青混合料、沥青和矿料的相对介电常数; γ_f 、 γ_t 分别为沥青混合料的毛体积相对密度和理论最大相对密度; γ_b 、 γ_{se} 分别为沥青相对密度和矿料有效相对密度; P_b 为沥青的质量分数。

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》可知空隙率和密度的计算公式见式 (9)。

$$V = (1 - \gamma_f/\gamma_t) \times 100 \quad (9)$$

在已知介电常数的前提下, 通过式 (8) 计算得到沥青混合料的毛体积相对密度, 代入式 (9) 可求得空隙率。

3 面域水膜厚度模型研究

3.1 依托工程

深汕西改扩建高速公路位于广东省中部偏南, 属于亚热带季风性气候, 年平均降雨量为 1689.4 ~ 1933.3 mm, 常年主导风向为东南偏东风, 平均每年受热带气旋 (台风) 影响 4 ~ 5 次, 为典型高温多雨气候。改扩建后单幅宽度可达 18.75 m, 解决超宽断面下的路面排水问题, 是确保行车安全的关键。为减少路面积水问题, 深汕西项目对合成纵坡小于 0.5% 路段、-1.5% 横坡 ~ 1.5% 横坡渐变路段、凹曲线底部路段以及互通主线加宽段设置 OGFC-13 排水路面, OGFC-13 沥青混合料马歇尔试验及相关路用性能检测结果见表 1。

表 1 马歇尔试验和路用性能检测结果

检测指标	检测结果	技术要求
空隙率/%	21.8	18 ~ 22
矿料间隙率/%	30.8	—
饱和度/%	29.4	—
稳定度/kN	6.88	≥3.5
流值/mm	3.8	—
车辙动稳定度/(次/mm)	9650	≥7000
渗水系数/(mL/min)	5500	≥4800

本次研究对 K0 + 000 ~ K1 + 000 范围的排水沥青路面开展研究, 路面坡度情况见图 2。横坡和纵坡与横坐标桩号 x 有关, 假设函数为 $i_h(x)$ 和 $i_z(x)$ 。该路段 OGFC-13 沥青面层混合料实测参数值见表 2。

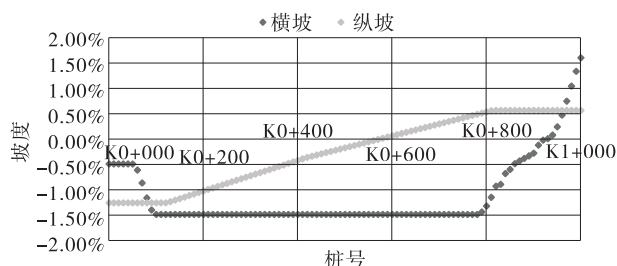


图2 排水路面坡度分布

表2 混合料实测参数值

混合料	ε_b	ε_s	P_b	γ_b	γ_{se}	γ_t
OGFC-13	2.7	7.4	4.63	1.034	2.911	2.667

3.2 介电常数数据采集

三维探地雷达的工作原理是将高频脉冲电磁波发送至地下以侦测道路结构的相关情况。借助实时动态定位系统能精确确定数据的坐标，并随后利用三维大数据处理软件来自动计算路面结构的层厚、空隙率等参数。其原理为：介电常数是物质的固有特性，它还可用于反映沥青路面空隙的均匀性。介质的介电常数大小影响电磁波的传播速度，通常情况下，介电常数越大，电磁波传播速度越慢。改变接收天线的距离，比较不同距离下沥青面层层底反射波传播总时间的变化，即可反算出沥青面层的介电常数。三维探地雷达的采样间距 Trigger Spacing 为 6.8 cm，检测时窗 Time Window 设置为 40 ns，驻波时间 Dwell Time 设置为 35 ns。现场检测情况见图3，通过检测获取面域介电常数 $\varepsilon(x, y)$ 。对 K0+000 ~ K1+000

路段的介电常数数据进行统计，结果见表3。

表3 不同桩号内介电常数平均值分布情况

桩号	不同距中距离下的介电常数平均值					
	3 m	6 m	9 m	12 m	15 m	18 m
K0+000 ~ K0+200	2.2	2.4	2.5	2.3	2.6	2.4
K0+200 ~ K0+400	2.5	2.6	2.8	2.6	2.7	2.5
K0+400 ~ K0+600	2.3	2.7	2.9	2.5	2.9	2.6
K0+600 ~ K0+800	2.8	2.9	3.2	2.9	3.1	2.8
K0+800 ~ K1+000	2.6	3.0	3.1	2.8	3.3	2.7



图3 介电常数现场检测图

3.3 面域水膜厚度模型构建

水膜厚度的预测涉及到多个领域的理论，如渗流理论、恒定总流、动水压力等，且影响因素较多，为了简化模型，传统研究通常关注单一点的水膜厚度，而对整个面域水膜厚度的模型研究则相对较少。

为了掌握超宽断面排水沥青路面水膜厚度分布情况，分车道实现降雨天气速度预警，降低车辆打滑导致交通事故的几率。借助三维探地雷达获取面域介电常数 $\varepsilon(x, y)$ ，基于空隙率与介电常数的关系，转换得到不同位置的空隙率 $V(x, y)$ ，如式(10)所示。

$$V(x, y) = \left(1 - \frac{\left(\frac{\varepsilon(x, y) - \varepsilon_b}{3\varepsilon(x, y) - 2.3\varepsilon_b} - \left(\frac{1 - \varepsilon_b}{1 + 2\varepsilon(x, y) - 2.3\varepsilon_b} \right) \times \gamma_t \right)}{\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_b}{\varepsilon_s + 2\varepsilon(x, y) - 2.3\varepsilon_b} \times \frac{1 - P_b}{\gamma_{se}} - \frac{1 - \varepsilon_b}{1 + 2\varepsilon(x, y) - 2.3\varepsilon_b} \times \frac{1}{\gamma_t}} \right) \times 100 \quad (10)$$

式中： $V(x, y)$ 为面域空隙率，单位%； $\varepsilon(x, y)$ 为面域介电常数。

根据式(10)和表1中的实测参数，通过计算得到 K0+000 ~ K1+000 的面域空隙率，依据空隙率越大，灰度越小为原则绘制空隙率分布图，如图4所示。

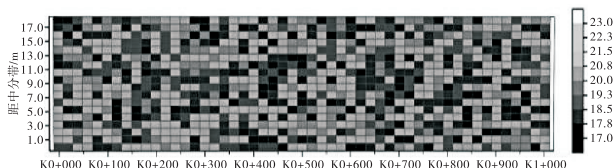


图4 空隙率分布图

由图4可知，K0+000 ~ K1+000 范围内排

水沥青路面空隙率在 17% ~ 23% 之间，不同桩号和距中距离下对应不同的空隙率。

将式(6)和(10)代入式(7)，可得到面域的水膜厚度计算公式：

$$h(x, y) = 1.3589 \times \left(\frac{(IL - (0.0791V(x, y) - 0.4979)Hi(x))Ln}{i(x)^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (11)$$

式中： $h(x, y)$ 为面域水膜厚度 (mm)； I 为降雨强度 (mm/min)； L 为排水路径长度 (m)； $i(x) = \sqrt{i_h(x)^2 + i_z(x)^2}$ ，为不同横断面上的路面合成坡度 (%)； H 为排水沥青路面厚度，深汕西项目厚度为 0.04 m； n 为粗糙系数，排水沥

青路面一般取 0.03。

假设降雨量为暴雨,12 小时内降雨量为 36 mm。由式 (11) 计算得到 K0+000~K1+000 的面域水膜厚度,依据水膜厚度越小,灰度越小为原则绘制水膜厚度分布图,如图 5 所示。

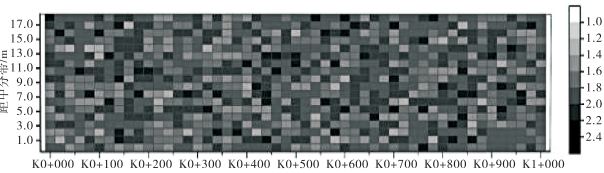


图5 水膜厚度分布图

由图 4 和图 5 对比可知,空隙率和水膜厚度灰度深浅分布基本一致,表明空隙率越大,水膜厚度越小。排水沥青路面处于水饱和状态时,水膜厚度随着路面空隙率的增大而减小。

4 水膜厚度模型验证

4.1 实测水膜厚度

芬兰 Teconer 生产的 RCM511 是一种新型道路和跑道状况监测器,使用光学测量方法获取测量表面的光信号,然后对光信号进行数字处理,以消除由表面结构和其他随机噪声引起的信号变化,最终实现对 0~5 mm 水膜厚度精确检测,精度级别为 0.01 mm。虽然检测精度较高,但检测通常需要封闭交通,检测时间长,效率偏低。

检测方案如下:对 K0+000~K1+000 的距边 10 m 位置以 15 km/h 的速度进行扫描检测,RCM511 传感器发射机需与镜头与路面(红线)和较大的部分平行,首选的测量角度为 60°~80°,传感器窗口到测量点的最佳距离为 0.6~1.0 m。

检测分三次进行,均在降雨 1 h 后开始检测,三次检测时降雨量分别为 12 h 内雨量为 12 mm、4 mm、36 mm。根据中国气象局颁布的降雨强度等级划分标准(见表 4),三次检测时降雨强度分别为中雨、大雨和暴雨。

表4 降雨强度等级划分标准

降雨强度	12 h 内雨量/mm	24 h 内雨量/mm
小雨	<5	<10
中雨	5~14.9	10~24.9
大雨	15~29.9	25~49.9
暴雨	>30	>50
大暴雨	>70	>100
特大暴雨	>140	>250

为了确保检测的精度,检测前需对设备进行标定,具体要求如下:在距离传感器窗口 50~55 cm(约合 20~22 in)的干燥路面进行校准。

当校准正确且传感器窗口干净时,表面状态应报告干燥,干燥表面上的摩擦应接近 0.81。标定后开展检测,检测结果统计见表 5。

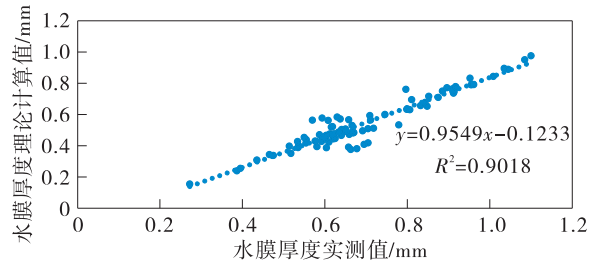
表5 实测水膜厚度统计结果

降雨强度	平均值/mm	标准差	变异系数/%
中雨	0.589	0.290	49.2
大雨	1.014	0.353	34.9
暴雨	1.516	0.355	23.4

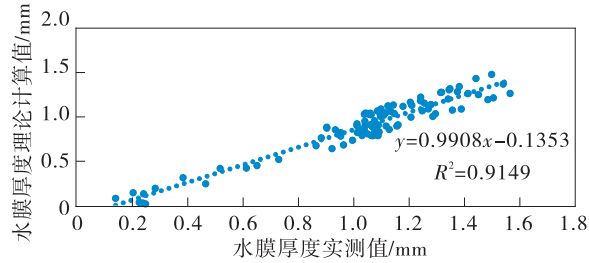
4.2 面域水膜厚度模型的验证

理论水膜厚度计算参数:距边 10 m 位置,即 $y=10$,坡度根据横纵坡合成得到,降雨强度分别为 12 h 内雨量 12 mm、24 mm 和 36 mm,排水路径长度 $L=10$ m,粗糙系数 $n=0.03$,空隙率 V 通过介电常数检测计算得到。将上述参数代入式 (11) 可计算得到水膜厚度理论值。

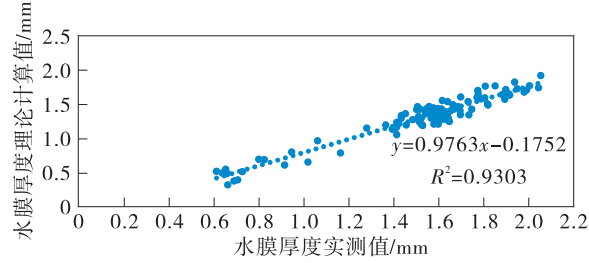
在不同降雨强度下,K0+000~K1+000 距边 10 m 位置水膜厚度理论计算值和实测值之间的关系如图 6 所示。



(a) 中雨: 12 h 内雨量 12 mm



(b) 大雨: 12 h 内雨量 24 mm



(c) 暴雨: 12 h 内雨量 36 mm

图6 不同降雨强度下的水膜厚度理论计算值和实测值之间的关系

由图6可以看出,水膜厚度理论计算值和实测值之间具有良好的线性相关关系,相关系数均超过0.9,说明了面域水膜厚度模型可以较好计算出不同位置上的水膜实际情况,验证了水膜厚度计算模型的精确性。

5 结论

基于渗流理论开展水膜厚度理论计算模型研究,通过三维探地雷达采集面域介电常数,转换得到面域的空隙率分布图,进而构建面域的水膜厚度计算模型,然后依托深汕西改扩建 OGFC 排水路面开展水膜厚度检测,通过实测数据对模型的准确性进行验证。主要结论如下:

(1) 将排水路面边界条件代入 Boussinesq 方程,然后由 Darcy 定律可推导得到排水路面表面径流的计算公式。

(2) 排水沥青路面面层处于水饱和状态时,路表水膜厚度随着路面空隙率的增大而减小,大空隙率的排水路面有助于降低雨天的水膜厚度。

(3) 提出了基于介电常数及空隙率的排水沥青路面面域水膜厚度模型,理论计算值和工程实测值直接存在较好的线性关系,验证了该模型的可靠性。

(4) 基于面域水膜厚度模型,收集道路排水路径长度、路面合成坡度、厚度等指标,利用三维探地雷达可采集道路某一时期的面域介电常数,然后只需监测降雨量,即可预测得到道路面域水膜厚度分布情况。

参考文献:

- [1] 黄兰可. 沥青路面水膜效应及临界滑水速度研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 118-124.
- [2] 马涛, 汤钧尧, 郑彬双, 等. 雨天条件下车辆轮胎与沥青路面间附着特性[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(6): 635-643.
- [3] 杨军, 王昊鹏, 吴琦. 潮湿沥青路面抗滑性能数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(3): 25-32.
- [4] 汪敏, 何兆益, 刘奕, 等. 水膜厚度对多孔沥青路面摩擦摆值的影响[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2023, 48(6): 143-151.
- [5] 蔡爵威, 赵鸿铎, 钱鑫, 等. 采用实测数据实时修正的机场跑道水膜厚度面域分布预估方法[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 105-114.
- [6] 周琼. 路表水膜厚度计算及其对路面抗滑性能影响研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
- [7] 王祚祚, 李光元, 张泽垚, 等. 雨天公路水膜厚度模型验证及行车安全性[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(29): 128-132.
- [8] 熊学堂, 谭忆秋, 肖神清, 等. 基于介电特性的沥青混合料密度预估优化模型[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 180-188.
- [9] 崔立龙, 凌天清, 曾凡贵, 等. 基于探地雷达的密级配覆水沥青层的空隙率检测[J]. 材料导报, 2021, 35(4): 4092-4098.
- [10] 李晖. 基于三维探地雷达的沥青路面面层厚度与密度无损检测技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [11] 马翔, 倪富健, 李强. 排水面层渗流模型及参数[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 381-385.
- [12] 汪敏, 何兆益, 郝增恒, 等. 极限降雨强度排水沥青路面水膜厚度预估模型[J/OL]. 西南交通大学学报, 1-8[2024-03-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230921.2253.002.html>.
- [13] 肖鑫, 张肖宁. 排水沥青混合料各向异性空隙结构对渗水特性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(01): 91-96.
- [14] 王旭波. 透水沥青路面透水性能及结构分析和应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [15] 马翔, 倪富健, 王艳, 等. 排水性沥青混合料渗透性测试与分析[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(2): 168-172.
- [16] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉, 等. 道路表面水膜厚度预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2004(3): 1-3.
- [17] 熊学堂, 谭忆秋, 张德津, 等. 基于电磁混合理论的沥青路面密度预估方法[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(6): 650-656.