

基于无损检测技术的白加黑路面病害探测与评价

吴延凯¹, 卢旭¹, 魏育奇¹, 陈搏², 刘嘉俊²

(1. 保利长大工程有限公司, 广州 510620; 2. 广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司, 广州 510640)

摘要:为更加准确探测白加黑路面的结构层内部隐性病害,依托茂湛高速改扩建项目白加黑路面,采用三维探地雷达技术开展既有路面的病害检测,并结合落锤式弯沉仪进行白加黑路面的结构承载能力测试。结果表明,采用三维探地雷达设备可以清晰识别白加黑路面结构断板、裂缝、脱空、传力杆布设等内部状况信息,能反映出原有路面结构内部各层位病害的总体情况。在多年车辆荷载作用下,白加黑路面的反射裂缝病害比例较高,建议采取注浆、灌缝等养护措施,加强对旧水泥板与沥青层开展稳固与密水处理;水泥路面加铺沥青层后,路顶弯沉值整体变小,有无沥青层的弯沉差值主要与沥青加铺层厚度、模量、老化程度有关。为了更好模拟实际轮载对路面的荷载作用,推荐采用 10 t 荷载进行板间弯沉差测试,并以弯沉差为 0.05 mm 以上为处治阈值,进行针对性地补强处理。

关键词:白加黑路面;三维探地雷达;内部病害;落锤式弯沉仪;弯沉差

中图分类号:U416.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)08-0329-07

截至 2021 年底,中国公路里程达 519.81 万 km,其中高速公路总里程达 16.8 万 km,位居世界第一,高速公路网的建设在促进社会经济发展方面发挥了重要作用。水泥混凝土路面因其优越的服务性能和结构性能,且施工和养护相对简单等优点,而被广泛应用于中国公路系统建设中。为顺应新时代交通强国发展战略及人民群众对出行舒适度的需求,人们开始在水泥混凝土路面上加铺特殊沥青层,俗称“白+黑”路面。以广州、深圳、佛山为代表的广东地区对水泥混凝土路面沥青罩面技术进行了各种不同的尝试和研究,取得了一定的实践经验,有效地解决了水泥路面行车舒适性差的主要问题^[1-2]。经过长期的运营,路面裂缝、大面积麻面、层间黏结失效、脱空、积水唧浆等质量问题突出,养护维修效果较差,尤其在广东持续高温、潮湿多雨气候环境条件下,交通量大、重载车多的路段罩面层病害程度更为严重。

在白加黑改造实施前,需要对旧水泥路面开展状况评估。目前并没有明确的白加黑路面病害检测与评估规范,主要参考了检测旧水泥路面的方法,包括采用人工巡查或多功能车调查路面损坏状况、采用贝克曼梁或落锤式弯沉仪测试路面承载能力、使用声振法勘探水泥混凝土板脱空病害等^[3-5]。这些方法在一定层面上可以较直观反映旧水泥路

面的病害状况,但是对于白加黑路面,由于加铺了沥青混凝土,遮盖了一部分水泥板的破损病害;此外,柔性的沥青混凝土加铺层弱化了水泥板之间的弯沉差异,影响接缝传荷系数的检测准确度。

为更加准确探测白加黑路面的结构层内部隐性病害,依托茂湛高速改扩建项目,采用三维探地雷达技术开展既有路面的病害扫描与分类评价,并结合落锤式弯沉仪进行白加黑路面的结构承载能力测试,为旧路处治与加固提供更全面的基础数据。

1 三维雷达技术路面病害检测方法介绍

三维探地雷达作为较先进的无损、快速、全覆盖的检测评价手段,可实现对路面结构内部信息(厚度、病害等)的快速检测与科学评价,已经取代常规的钻芯、铣刨、开挖等破坏性检测方式^[6-7]。中国探地雷达道路检测技术研究始于 20 世纪 90 年代。戴前伟等采用美国 SIR-10H 型探地雷达对长张高速路面开展检测,分析不同雷达技术参数对现场试验结果的影响^[8]。自 2000 年以来,华南理工大学使用探地雷达检测道路厚度、介电常数、压实度、水损害及病害开展了全面、深入的研究,研究采用的设备包括二维冲激探地雷达及三维步进频率式探地雷达,提出了雷达图像中裂缝、层间黏结失效、脱空、松散与管道等病害与结构物的判读依据^[9-10]。

收稿日期:2022-03-30

作者简介:吴延凯(1992—),男,广东揭阳人,保利长大工程有限公司,工程管理部,路桥工程师,研究方向为公路建设管理。

随着雷达检测技术迅速发展,三维探地雷达相比二维雷达设备,在路面检测方面具有准确度高、可全覆盖检测、可检测路面均匀性的优势。因此,在本项目中,主要采用先进的三维探地雷达技术开展病害探测。

1.1 设备介绍

所采用的设备元件主要包括 Geoscope™ MKIV 雷达主机、DX 系列多通道空气耦合天线阵、动态定位系统(RTK)、光电编码器(DMI)等,如图 1 所示。三维探地雷达主要设备参数汇总于表 1。



图 1 三维雷达主要部件

表 1 三维探地雷达设备参数

参数	数值
探测深度/m	8
探测速度/(km/h)	60
横向采样间距/m	0.071
纵向采样间距/m	0.025~0.1
竖向采样间距/m	0.004
优势	覆盖宽,无破损

1.2 检测原理

三维大数据探测系统将现代电子技术、信息技术和电磁技术融合应用,能够对道路进行快速全断面扫描。三维大数据探测系统的技术机理是通过发射机向路面结构层发出脉冲高频电磁波,获得道路结构相关状况,结合实时动态定位系统,精准确定数据信息的坐标,并采用三维大数据处理软件自动计算路面结构层厚度、空隙率等,识别道路内部状况,如图 2 所示。

探地雷达通过天线朝路面结构层发出电磁波,波段信号在道路结构中传播扩散,接触各类介电物质或者分界面(破裂面、层间分界等),部分信号便反射回来。反射系数和反射信号电平计算公式为

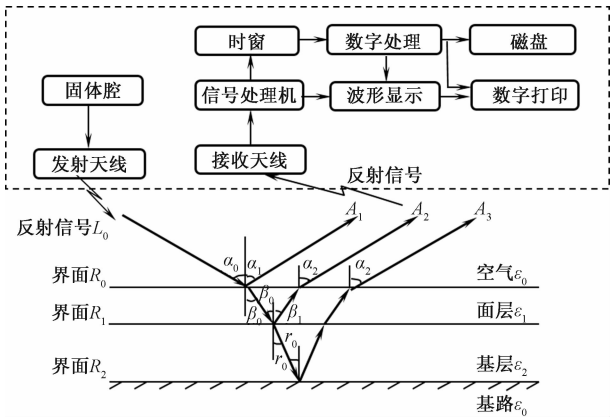


图 2 三维大数据探测系统技术示意图

$$\Gamma_{1,2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \tag{1}$$

式中: $\Gamma_{1,2}$ 为界面反射系数; ϵ_{r1} 为电磁波入射侧相对介电常数; ϵ_{r2} 为电磁波出射侧相对介电常数。

$$E_{r1} = E_i \Gamma_{1,2} \tag{2}$$

式中: E_i 为入射信号电平; E_{r1} 为反射信号电平。由式(1)、式(2)可知,反射系数的正负及大小由脱空

界面两边物质的相对介电常数大小决定。

三维探地雷达主要以接收、处理、分析反射的电磁波,绘制路面结构内部信号图像,以评估路面结构内部状态。当接收天线发生移动时,即可接收到连续的探地雷达反射波,将接收到的信号加以分析处理就可以形成沿天线移动方向切面的雷达纵剖面图像。横坐标为沿路面的距离,纵坐标则为路面结构相对深度位置,还可把扫描的数据处理成水平方向剖面图像。联合纵剖面与水平剖面的雷达电磁信号图谱,可以识别路面结构内部病害及其分布状态。

2 基于 FWD 的路面结构承载力检测技术

三维探地雷达检测技术主要用以发现路面结构内部已经发生和发育到一定程度的宏观尺度病害。然而,对于白加黑路面,水泥板本身存在纵向与横向的施工接缝,施工缝之间受荷而产生的变形差异容易导致加铺层沥青混合料出现“剪切型”与“张拉型”反射裂缝,影响沥青加铺层的承载强度和路面整体结构寿命^[11]。因此,要完整评估“白+黑”路面结构性健康状况,除了采用三维探地雷达对路面结构中宏观病害进行检测来评价路面完整程度外,还必须对水泥板结构接缝传荷性能进行评估,对沥青加铺层的受力稳定性具有重要意义。落锤式弯沉仪(FWD)作为路面无破损弯沉检测的方法,弯沉测试结果与交通轴载作用实际十分符合,已在国内外得到了广泛的应用。

采用 Grontmij Carl Bro (Phonix)公司生产的落锤式弯沉仪(Phonix PRI2100 型),其系统硬件和软件主要包括计算机、基于 Windows 系统开发的 FWD 测试和分析软件、时域记录模块、运输锁定装置、集成化的 DMI 距离测量仪、3 个温度传感器、四分承载板、7~150 kN 的配重锤(可升级至 300 kN)、9~17 个弯沉盆位移传感器(速度传感器)、弯沉盆位移传感器的悬挂长梁,以及警示灯等。其主要技术参数见表 2。

表 2 落锤式弯沉仪设备参数

参数	数值
荷载范围/t	0.7~15
弯沉传感器分辨率/ μm	1
系统误差/%	$\leq \pm 2$
弯沉传感器数量/个	9
荷载盘直径/cm	30

PRI2100 型 FWD 测试速度可以达到 40 s/处,测试结果绝对精度不超过 $2\% \pm 2 \mu\text{m}$,典型的相对

精度为 $1\% \pm 1 \mu\text{m}$ 。设备的分辨率为 $1 \mu\text{m}$ (对弯沉值)。所测荷载精度为小于 $2\% \pm 0.3 \text{ kN}$ 。分辨率为(对荷载) $0.03 \sim 0.2 \text{ kN}$,大小由荷载幅值确定。准确模拟交通轴载作用下的路面状况是当前业内认可度较高的路面无损检测方法。该设备显著的优点是能精确检测路面多个点位的弯沉值,为道路承载力评价提供了分析依据。现场检测工作如图 3 所示。



图 3 落锤式弯沉仪现场检测

3 依托项目概况

茂湛高速公路为沈海高速的一段,起始点为茂名市电白区观珠,终点至湛江市麻章区高阳,起点桩号为 K3362+105,终点桩号为 K3470+698,全长 108.593 km。一期工程 K3382+320~K3464+258 段,里程 81.938 km,于 1999—2001 年建成通车,采用水泥混凝土路面结构。自 2007 年以来,分别进行了微表处罩面、GAC-16C 罩面等。现状交通量已超过 39 761 pcu/d,交通拥堵现象已日趋常态化。现状路面结构见表 3。

表 3 现状路面结构

层位	结构
罩面层	6 cm 改性沥青混凝土(AC-16C)
面层	25 cm C40 水泥混凝土
基层	18 cm 6%水泥稳定碎石
底基层	18 cm 4%水泥稳定粒料
总厚度/cm	67

根据交通量调查与预估,茂湛高速公路全线交通量均较大,2025 年,平均日交通量将达到 41 308 pcu/d。至 2040 年,日均车流量将达到 6 万标准车以上。以 2023 年全线平均交通量进行累计轴载计算,得到本项目交通等级属于特重交通荷载等级。考虑本项目交通量大,交通量逐年增长,交通组成重车比例高,项目所处地理位置湿热高温,故路面结构应具有较好的结构强度以满足

使用性能要求,旧路面的隐性病害检测与处治至关重要。

4 三维探地雷达检测结果分析

4.1 白加黑路面的雷达图像特征

采用三维探地雷达进行车载式扫描,当接收天线发生移动时,即可接收到连续的探地雷达反射

波,将接收到的信号加以分析处理就可以形成沿天线移动方向切面的雷达分析图像,即纵剖面图,如图 4(a)所示。横坐标为沿路面的距离,纵坐标是路面结构位置深度。除此之外,还可将检测数据分析成水平切面。各层病害成像如图 4(a)、(b)、(c)所示。

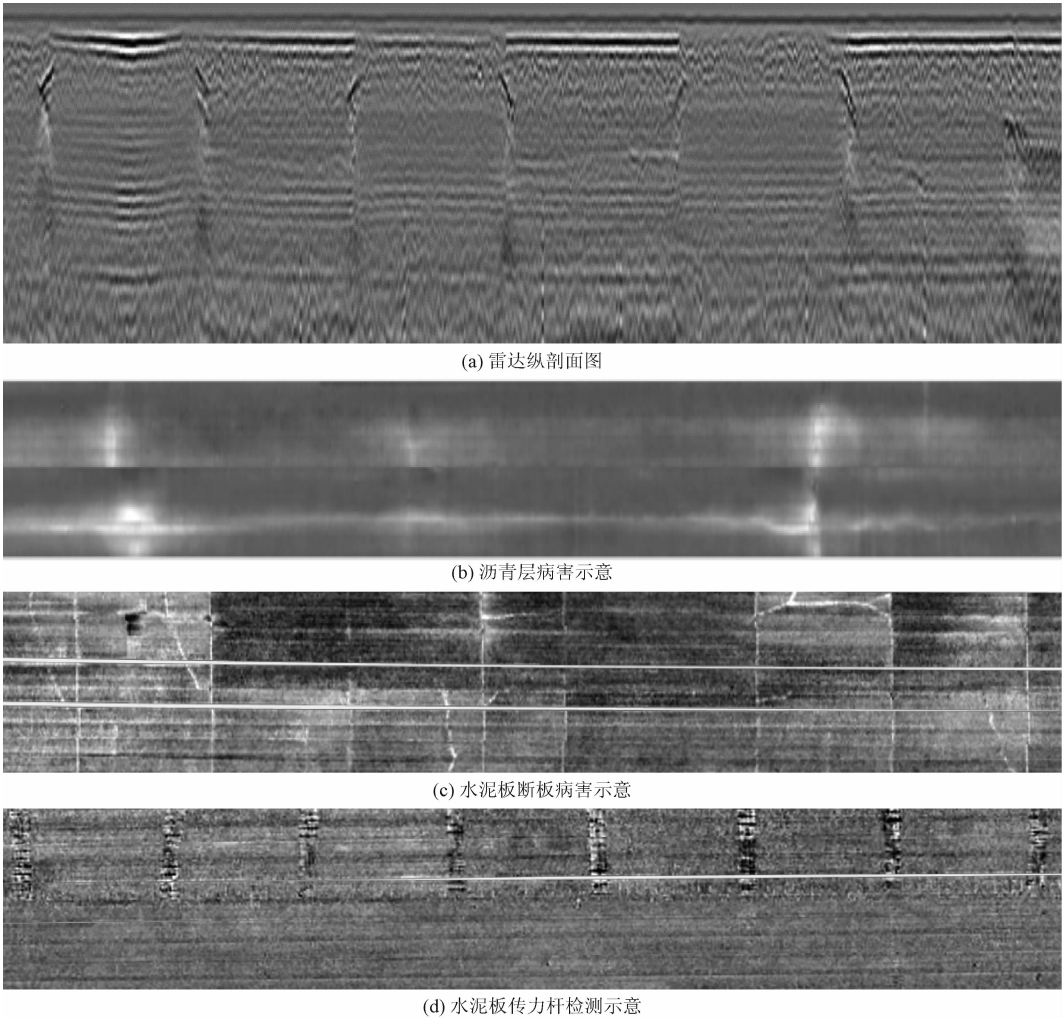


图 4 白加黑路面的雷达信号图谱

根据雷达图像,各结构层分界面大部分较为清晰,能反映出原有路面结构内部各层位病害的总体情况,可为路面结构隐性病害统计与评价提供依据。

4.2 裂缝反射率检测结果分析

水泥路面上增铺沥青层成为复合型结构,典型病害就是横向裂缝。混凝土板接缝处在行车荷载作用下产生较大的应力,如果水泥面板传荷能力不足,应力无法释放,就会造成足够大的应力集中,并朝上方发展,最终在接缝位置发育成为上下贯通的反射裂缝。根据调查,项目路段主要病害也就是这种面板接缝反射裂缝。为了评价接缝反射程度提

出裂缝反射率指标 DL。

$$DL = \frac{n}{N} \times 100 \tag{3}$$

式中: n 为评价单元内横缝的条数; N 为评价单元内水泥面板接缝的数量。裂缝反射率能间接反映原水泥面板的传荷能力,评价下层水泥面板的质量。参考广东省改扩建工程旧路评价方法,评价标准见表 4。

表 4 白加黑路面裂缝反射率评定标准

评价标准	轻	中	重
反射率/%	≤30	30~60	>60

按照 50 m 长度为单元,结合雷达扫描图谱统计各单元路段的裂缝反射率测试结果。超车道和慢车道裂缝反射率汇总于图 5。

由图 5 检测结果分析,超车道裂缝反射率均值为 14.45%,慢车道为 21.76%,慢车道反射裂缝情况明显较超车道严重。其中超车道 K3417+420-K3418+000、K3419+100-K3419+400、K3421+800-K3422+000、整体评级为“中”“重”比例为 29.81%;慢车道 K3417+420-K3418+000、K3419+

100-K3419+400、K3421+700-K3422+200 反射裂缝发育较严重,整体评级为“中”“重”比例为 38.5%。根据茂湛高速历史记录资料,本道路长期处于相当沉重的交通轴载之下,尤其是近年交通量迅速提升,造成道路超载现象严重。慢车道的重载比例大,超车道小客车多,重载长期作用造成了损坏病害,再加之外部雨水渗入,促进了发射裂缝的发育。建议采取注浆、灌缝等养护措施,加强对旧水泥板与沥青层开展稳固与密水处理。

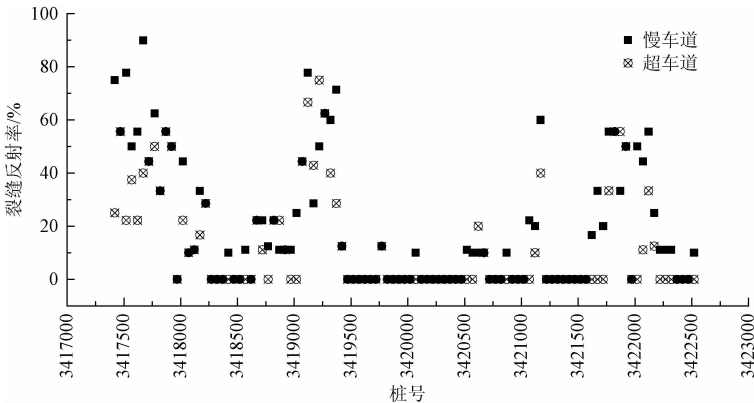


图 5 车道裂缝反射率

4.3 板底脱空检测分析

板底脱空是水泥混凝土面板出现频率较高的病害。水泥混凝土面板底存在脱空情况时,若不使用处治方法修复病害,在反复车辆轴载的状况下,由于水泥混凝土抗弯拉强度较低,使得力学状况与悬臂梁相似,将会造成超负荷的应力、应变,水泥混凝土面迅速断裂、破碎,严重影响水泥混凝土路面的使用性能和使用寿命。板块碎裂后仍不及时修复脱空病害与损伤板块,使得周边其他板体稳定性也受到影响,从而对路面造成更大范围的破坏。试验路段检测范围 K3417+420-K3422+580 共发现 40 处脱空,主要分布在水泥混凝土板底,统计结果见表 5。慢车道板底脱空数量与面积略大于超车道,说明在车辆动荷载与外界水下渗作用下,水泥面板底部容易出现脱空病害,而重载车辆作用会加剧脱空病害的发育规模。

表 5 检测路段脱空病害统计

车道	数量/个	面积/m ²
超车道	19	11.67
慢车道	21	12.5

4.4 断板率检测分析

依据路段破损状况调查得到的断裂类病害的

板块数,根据《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)规定,按断裂裂缝种类和严重程度的不同,采用不同的权系数进行修正后,由式(4)计算该路段的断板率(DBL),以百分数表示。

$$DBL = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m DB_{ij} W'_{ij} \right) / BS \tag{4}$$

式中: DB_{ij} 为 i 种类裂缝病害 j 种轻重程度的板块数; W'_{ij} 为 i 种裂缝病害 j 种轻重程度的修正权系数; BS 为评定路段内的板块总数。

采用三维探地雷达检测白加黑路面水泥板断板率,按照 50 m 长度为单元,根据检测结果,整体上白加黑路面的水泥板断板率较低。超车道存在 100 m (K3421+670~K3421+770) 断板率为 16%~19% 范围,属于“次”等级;慢车道存在 8 个段落(约 400 m)的断板率超过 10%,评估为“次”与“差”的状态。慢车道在重载和超载车加载下,水泥板更易出现断板病害。此外,断板病害还与水泥板底部脱空有关,板底脱空后,水泥面板受力模式由受压转变为受弯拉应力作用,容易压断。

5 白加黑路面结构承载能力测试与分析

由于本项目白加黑路段在水泥混凝土面板上部覆盖 6 cm 沥青层,在沥青层的测试结果是否能真实反映水泥混凝土板上部的情况是需要探究的。

为此,对试验路段进行开挖,按照标准 5 t 荷载在开挖后的水泥混凝土板上直接测试弯沉值,进而进行验证分析。由图 6 可看出,加铺沥青层后,路顶弯沉值整体变小,说明柔性沥青混凝土加铺后,会降低顶部弯沉值。但是减小幅度为 0.002~0.015 mm,幅度较小,主要与沥青加铺层厚度、模量、老化程度有关。

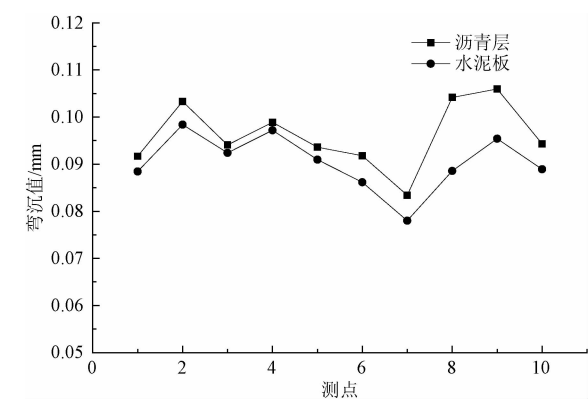


图 6 有无沥青层的弯沉值测试

水泥板之间的承载能力差异是引发白加黑路面反射裂缝病害的一个直接因素。相比接缝传荷能力,白加黑路面的反射裂缝处弯沉差更加可以反映水泥板基层的承载力稳定性。本研究对白加黑路段反射裂缝位置的板间弯沉开展检测,采用接缝两侧弯沉差的绝对值评定传荷能力,差值越大,传荷能力越差^[12]。此外,为了更好地模拟实际轮载对路面的荷载作用,并匹配慢车道的超载与设计的标准轴载,结合前期测试经验,采用 10 t 荷载进行板间弯沉差测试。根据美国 AT 法,对于新建水泥路面的弯沉差应控制在 0.05 mm 以内,以保证水泥路面使用寿命。而对于运营多年的白加黑路段,为了控制后期反射裂缝的进一步加剧,计算弯沉差为 0.05 mm 阈值的比例,检测结果汇总见表 6。

表 6 弯沉差测试结果

车道	总数	>0.05 mm		>0.08 mm	
		数量	占比/%	数量	占比/%
重车道	857	86	10.04	63	7.35
超车道	342	34	9.94	22	6.43

对于白加黑路段的反射裂缝位置,所检测的板间弯沉差可以看出:重车道弯沉差>0.05 mm 的比例约 10.04%,>0.08 mm 的比例约 7.35%。而超车道弯沉差>0.05 mm 的比例约 9.94%,>0.08 mm 的比例约 6.43%。两个车道的反射裂缝位置弯沉差分布接近,弯沉差超过 0.05 mm 的比例均在

10%左右,说明大部分发射裂缝位置的水泥板承载力趋向稳定,但是仍然存在部分反射裂缝处板间弯沉差偏大的问题。

由于反射裂缝的产生,将导致白加黑路面整体性变差,尤其当荷载作用在接缝的周边位置,对板体和道路基层都会造成相当大的应力集中现象,从而使得板体承载性能在一定程度上下降。根据接缝的种类差异,将板间传导荷载方式分为以下两种:

1)集料嵌锁。基于破裂处石料的相互嵌锁效应,于侧间两板体传导剪切力,决定传导性能的影响因素有板和基础之间的相对刚度、缝宽、石料自身的力学性能和粒状大小等。该类型接缝一般是不含传力杆的横缝或者是企口缝。

2)传力杆。基于缝侧板内的钢筋传导各类型受力,传导作用通过传力杆的剪切刚度和周边混凝土的承压刚度来实现,决定传导性能的包括板和基础之间的相对刚度、缝宽、杆体自身的力学性能和分布情况、混凝土自身的力学性能以及杆体跟混凝土的连接状态。该类型接缝包括含有传力杆的胀缝、缩缝以及施工缝。

对于白加黑路面的抗反射裂缝措施,一方面可以设置应力吸收层消除接缝处应力集中,另一方面,提高水泥板接缝传荷能力可以从源头降低反射隐患。结合茂湛高速的养护历史与裂缝反射速度来看,水泥板横向裂缝反射穿透 5~6 cm 沥青面层仅仅需要 2 年时间,而开裂位置不及时封缝处理,外界水浸泡容易引起水泥板的冲刷与唧浆、沥青路面的水损问题。因此,针对茂湛高速的潮湿气候与特重交通荷载环境,建议对于白加黑路段的旧水泥板反射裂缝弯沉差按照 0.05 mm 以上为处治阈值,进行补强处理。

6 结论

1)采用三维探地雷达设备可以清晰识别白加黑路面结构断板、裂缝、脱空、传力杆布设等内部状况信息,能反映出原有路面结构内部个层位病害的总体情况,可为路面结构隐性病害统计与评价提供依据。

2)在多年车辆荷载作用下,白加黑路面的反射裂缝病害比例较高,主要与重载交通、板底脱空、动水压力作用等因素有关;且随着使用时间增加,反射裂缝仍然有持续发展趋势,建议采取注浆、灌缝等养护措施,加强对旧水泥板与沥青层开展稳固与密水处理。

3)水泥路面加铺沥青层后,路顶弯沉值整体变

小,有无沥青层的弯沉差值主要与沥青加铺层厚度、模量、老化程度有关。

4)依托工程大部分发射裂缝位置的水泥板承载力趋向稳定,但是仍然存在部分反射裂缝处板间弯沉差偏大的问题。为了更好模拟实际轮载对路面的荷载作用,推荐采用 10 t 荷载进行板间弯沉差测试,并以弯沉差为 0.05 mm 以上为处治阈值,进行针对性的补强处理。

参考文献

[1] 骆亚军.“白加黑”路面温度场及应力场研究[D].广州:华南理工大学,2016.

[2] 蔡舒岚.旧水泥路面检测评价及加铺沥青面层技术研究[D].西安:长安大学,2007.

[3] 刘海军.基于弯沉法检测白加黑路面板底脱空的评价标准研究[J].交通科技,2021(4):108-111.

[4] 张宝龙.粘层材料在白加黑路面结构中的力学行为研究

[J].公路工程,2015,40(2):332-334.

[5] 肖春发,罗卫,粟宋来,等.水泥路面板加铺沥青面层后板底脱空检测及评价方法[J].中外公路,2020,40(1):52-55.

[6] 李细伟,陈敏.基于无损检测技术的半刚性基层沥青路面损伤状态分析[J].公路,2017,62(8):40-43.

[7] 郭成超,许朋飞,钟燕辉.无损检测技术评估和检测道路性能[J].中国工程科学,2017,19(6):72-79.

[8] 戴前伟,吕绍林,肖彬.地质雷达的应用条件探讨[J].物探与化探,2000(2):157-160.

[9] 刘涛.基于无损检测方法的沥青路面介电特性与施工质量评价研究[D].广州:华南理工大学,2016.

[10] 罗传熙,张肖宁,虞将苗,等.基于三维探地雷达对沥青路面厚度检测影响因素分析[J].公路,2021,66(1):95-99.

[11] 易守春,高彦芝.白加黑改造工程施工关键环节质量控制[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(8):113-115.

[12] 李兆南,吉增晖.基于弯沉和弯沉差的复合式路面病害处指标分析研究[J].公路,2014,59(3):178-181.

Detection and Evaluation of “White and Black” Pavement Diseases Based on Non-destructive Testing Technology

WU Yankai¹, LU Xu¹, WEI Yuqi¹, CHEN Bo², LIU Jiajun²

(1. Baoli Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;
2. Xiaoning Institute of Roadway Engineering, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to more accurately detect the hidden diseases in the structural layer of the white and black pavement, relying on the white and black pavement of Maozhan Expressway reconstruction and expansion project, the three-dimensional ground penetrating radar technology was used to carry out the disease detection of the existing pavement, and the structural bearing capacity of the white and black pavement was tested combined with the falling weight deflectometer. The results show that the three-dimensional ground penetrating radar equipment can clearly identify the internal condition information of white and black pavement structure, such as broken plate, crack, void and force transmission rod layout, which can reflect the overall situation of the internal layer diseases of the original pavement structure. Under the action of vehicle load for many years, the proportion of reflective crack disease of white and black pavement is high. It is proposed to adopt grouting, crack pouring and other maintenance measures to strengthen the stability and watertight treatment of old cement board and asphalt layer. After overlaying the asphalt layer on the cement pavement, the deflection value of the top of the road decreases as a whole. The deflection difference with or without asphalt layer is mainly related to the thickness, modulus and aging degree of asphalt overlay. In order to better simulate the load effect of actual wheel load on pavement, it is recommended to use 10 t load to test the deflection difference between slabs, and take the deflection difference above 0.05 mm as the treatment threshold to carry out targeted reinforcement treatment.

Keywords: white and black pavement; 3D ground penetrating radar; internal disease; falling weight deflectometer; deflection difference