

公路路面损坏与内部隐伏病害的关联性研究

刘宪明¹, 夏晗¹, 胡冬平², 闫晨³, 杨睿², 钟新然^{2*}

(1. 山东高速工程检测有限公司, 山东 济南 250003; 2. 上海圭目机器人有限公司, 上海市 200433;

3. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:路面结构的内部隐伏病害是影响公路性能及使用寿命的重大隐患。该文结合现行《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)中路面破损率的统计方法,提出了表征道路内部隐伏病害状况的指标——路面结构破损率。依托实际公路检测工程,对某区间长38 km、双向四车道的高速公路进行了路面损坏调查和路面以下1 m深度范围内隐伏病害调查,并按照100 m整桩号分段统计分析了路面损坏与隐伏病害总体情况及二者的空间分布规律,进一步探索了不同路面损坏状况下路面破损率和路面结构破损率的相关关系。研究结果表明:当路面损坏较严重时,路面破损率和路面结构破损率存在较强相关性。即当路面损坏状况指数较低时,内部隐伏病害也会随之增多,此时路面表观病害和隐伏病害可能存在着伴生关系;此外,随着隐伏病害的发生层位逐渐加深,更容易出现伴生的路面损坏。

关键词:路面隐伏病害;路面损坏状况;关联性研究;探地雷达

中图分类号:U416

文献标志码:A

Correlation between Pavement Distress and Structural Hidden Distress

LIU Xianming¹, XIA Han¹, HU Dongping², YAN Chen³, YANG Rui², ZHONG Xinran^{2*}

(1. Shandong High-Speed Engineering Testing Co., Ltd., Jinan, Shandong 250003, China; 2. Shanghai Guimu Robot Co., Ltd.,

Shanghai 200433, China; 3. Shandong High-Speed Company Limited, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: The hidden distress in the pavement structure does great harm to the performance and service life of the road. In this work, based on the statistical idea of pavement distress rate in the *Highway Performance Assessment Standards* (JTG 5210—2018), an index of characterizing hidden distress in the pavement structure, namely pavement structure distress rate, was proposed. Based on the actual highway inspection project, the pavement distress and the hidden distress in the depth of 1 m below the pavement of a two-way four-lane highway with a length of 38 km were studied. The overall situation of pavement distress and hidden distress and their spatial distribution were analyzed statistically by a pile interval of 100 m. The correlation between pavement distress rate and pavement structure distress rate was further explored. The results show that when the pavement distress is severe, there is a strong correlation between the pavement distress rate and the pavement structure distress rate. When the pavement distress index is low, internal hidden distress will also increase accordingly. At this time, there may be an accompanying relationship between the apparent and hidden distress of the pavement. In addition, with the gradual deepening of the occurrence of hidden distress, the associated pavement distress is more likely to occur.

Keywords: hidden distress of pavement; pavement distress; association study; ground penetrating radar

收稿日期:2023-08-12

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2019YFB1310605)

作者简介:刘宪明,男,硕士,高级工程师.E-mail:89387262@qq.com

*通信作者:钟新然,男,博士,工程师.E-mail:zhongxinran@gm-robot.com

0 引言

公路是支持国家经济发展与社会进步的重要基础设施。在经济和基础设施建设高速发展的背景下,中国公路里程快速增长,稳居世界前列。然而,随着已建成的公路服役时间增长和交通量的日益增大,庞大公路网即将面临由“建”转向“养”,因此需要大量的日常养护工作以保证道路结构安全。

在常规的公路检测与评定作业中,现场工人主要依据现行的《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)^[1],对路面破损状况、车辙深度、行驶质量、路面磨耗、路面结构强度等指标进行测量和评估。上述指标中除了路面结构强度,各项指标均反映的是道路表面性能及状况,而路面结构强度通过落锤式弯沉仪(FWD)进行抽样检测,无法准确检测出路面内部结构状况及隐伏病害情况。

基于电磁波原理的探地雷达技术是21世纪初兴起的道路无损检测技术,已在路面层厚、结构完整性及路面隐伏病害检测中得到了广泛应用^[2-6]。近年来研究人员主要围绕探地雷达数据处理、信号分析、病害判读等相关应用技术研究了一系列研究^[7-14],而对路面内部隐伏病害与表观破损状况相结合的研究相对较少。

在实际检测业务中,路面破损状况调查虽然费时费力,且存在随意性大等问题,但是总体上因为路面“所见即所得”,对人员的专业依赖性弱,较易实施和开展,因此路面破损检测结果相对客观、准确。而探地雷达虽然可发现隐伏病害,但其检测效果受设备参数、数据处理方法影响较大,且严重依赖数据分析工程师的判读水平和工程经验,最终导致发现隐伏病害的准确率不高。考虑到实际工程中部分路面表观破损往往是由内部结构损坏导致的,而路面损坏也可能伴随着内部隐伏病害产生,例如基层裂缝反射至面层、基层疏松导致面层开裂等情况。因此,有必要通过工程数据统计分析,并探索路面损坏与内部隐伏病害的伴随情况,进一步掌握路面表观破损与内部结构破损的关联关系。

因此,本文结合规范中路面破损率(R_{DR})的统计方法,提出了表征路面内部隐伏病害状况的指标——路面结构破损率(R_{HDR}),并依托公路工程检测项目,统计并分析路面损坏与隐伏病害情况及二者的相关性,进而探索路面损坏状况和内部结构损坏状况之间的相关关系,以期通过路面损坏情况快速

推断隐伏病害的现状与发展趋势,为相关管理部门设计养护方案提供新的数据支撑和依据。

1 路面损坏及隐伏病害调查方法

1.1 路面损坏调查方法

依据现行的《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018),路面损坏情况采用路面损坏状况指数评价,而路面损坏状况指数(I_{PCI})是通过路面破损率(R_{DR})计算得到^[2]。

$$I_{PCI} = 100 - a_0 R_{DR}^{a_1} \quad (1)$$

$$R_{DR} = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{i_0} w_i A_i}{A} \quad (2)$$

自动化检测时:

$$A_i = 0.01 \times N_{GN,i} \quad (3)$$

式中: R_{DR} 为路面破损率,为各种损坏的折合损坏面积之和与路面调查面积之百分比(%); a_0 、 a_1 均为沥青混凝土路面系数,分别取15.000及0.412; A_i 为第*i*类路面损坏的面积(m^2); A 为调查的路面面积(调查长度与有效路面宽度之积, m^2); w_i 为第*i*类路面损坏的权重;*i*表示考虑损坏程度(轻、中、重)的第*i*类路面损坏类型; i_0 表示包含损坏程度(轻、中、重)的损坏类型总数,沥青混凝土路面取21; $N_{GN,i}$ 为含有第*i*类路面损坏的网格数;0.01为面积换算系数,一个网格标准尺寸为0.1 m×0.1 m。

1.2 隐伏病害调查方法

道路隐伏病害调查通常配置不同中心频率天线(一般常用的天线频率配置为200 MHz~1 GHz)的探地雷达采集路面结构数据,从而获取路面以下0~3 m的内部结构状况数据。

探地雷达工作中会持续向地下发射高频电磁脉冲,电磁脉冲信号穿透路面遇到地下隐伏病害时会产生强反射或散射,探地雷达天线接收并记录这些信号,原始信号通过滤波、增益等一系列预处理操作后,数据分析工程师可依据不同病害特征的电磁波反射信号的振幅、相位与频率变化等正演波形特征,分析和判别路面结构中可能存在的隐伏病害类型和发生层位^[15-16]。几种典型的结构隐伏病害包括脱空、空洞、疏松体^[2]、富水体等,其反射信号的波形特征如表1所示。

为了用一个指标来统一表征路面隐伏病害及内部结构破损状况,基于路面破损率的统计方法,提出

表1 几种典型隐伏病害波形特征

Table 1 Waveform characteristics of typical hidden distress

隐伏病害类型	波组形态	振幅	相位与频率
脱空	顶部同向性反射波组连续;多次波发育,两侧绕射波发育明显	振幅强、衰减很慢	顶部反射波与入射波同向,底部反射波与入射波反向;频率高于背景场
空洞	近似球形空洞反射波组为倒悬双曲线;近似方形空洞反射波为平板状双曲线;多次波发育,两侧存在明显绕射波	与脱空相似	与脱空类似
疏松体	顶部形成连续的同向性反射波组;多次波发育明显,两侧存在绕射波	振幅强、衰减较慢	顶部反射波与入射波同向,底部反射波与入射波反向;频率高于背景场
富水体	顶部形成连续的同向性反射波组,两侧绕射波和底部反射波不明显;多次波不发育	振幅强、衰减很快	顶部反射波与入射波反向,底部反射波与入射波同向;频率低于背景场

新的评价指标——路面结构破损率。路面结构破损率表示检测路段隐伏病害的总影响面积占该路段面积的百分比。在计算时不分隐伏病害类型,统一换算为隐伏病害影响面积,路面结构破损率 R_{HDR} 计算方式如下:

$$R_{\text{HDR}}=A_{\text{HR}}/A \tag{4}$$

式中: A_{HR} 为隐伏病害的影响面积(m^2); A 为调查的路面面积(调查长度与有效路面宽度之积, m^2)。

依据《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018),按长度计算水泥混凝土路面裂缝,检测结果以影响宽度(1 m)换算成面积。无机结合料稳定基层属于半刚性基层,与水泥混凝土路面材料性能相似。为了保证计算尺度统一,隐伏病害中裂缝的影响面积按照其长度乘以影响宽度1 m测算,除裂缝外其他隐伏病害的影响面积均为其水平投影面积。

2 路面损坏及隐伏病害调查结果

研究团队在2021年对中国西南某地级市的高速公路K1+000~K39+000区间长度共38 km的沥青道路进行了路面损坏调查和隐伏病害调查。路面损

坏调查采用高分辨率面阵相机对路面进行拍摄,采集高清路面图像用于路面损坏分析。路面隐伏病害调查采用400 MHz中心频率的三维探地雷达对路面进行全覆盖采集。相机与探地雷达均装配在专用道路检测机器人上,道路检测机器人具有高精度差分卫星定位模块,以保证路面损坏和隐伏病害的位置信息准确,支撑病害信息统计和分析。路面损坏及隐伏病害调查设备如图1所示。

检测完成后,数据分析工程师按整桩号100 m分段分析路面损坏和内部隐伏病害情况,并依此统计每个桩号区间的路面损坏状况指数和路面结构破损率。调查结果如表2所示。

2.1 路面损坏调查结果

路面损坏状况指数平均值为95.1,总体评价为“优”,分段评价见表3。路面损坏状况指数的中位数为96.02,最大值为100.0,最小值为68.3,变异系数为0.05,路面损坏状况指数变化范围较小。

2.2 隐伏病害调查结果

路面结构破损率平均值为0.12%,中位数为0.03%,最大值为4.76%,最小值为0,变异系数为

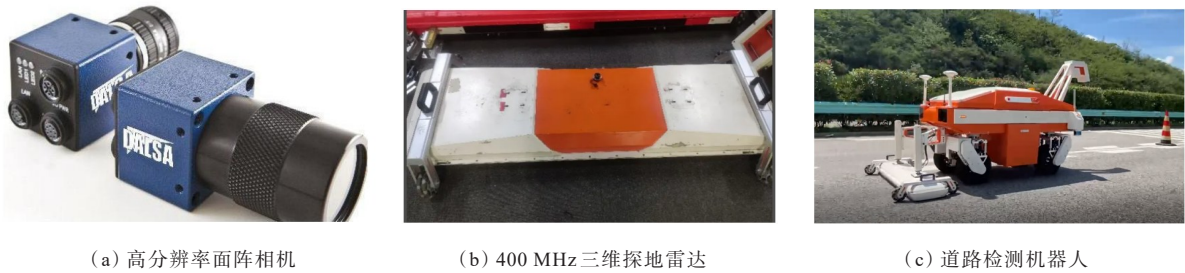


图1 路面损坏及隐伏病害调查设备

Figure 1 Pavement distress and hidden distress investigation equipment

表 2 路面损坏状况指数与路面结构破损率调查结果统计

Table 2 Investigation results of pavement distress index and pavement structure distress rate							
起讫桩号	$R_{HDR}/\%$	$R_{DR}/\%$	I_{PCI}	起讫桩号	$R_{HDR}/\%$	$R_{DR}/\%$	I_{PCI}
K1+000~K1+100	0.09	0.25	91.53	K1+900~K2+000	0.03	0.26	91.39
K1+100~K1+200	0.00	0.00	100.00	K2+000~K2+100	0.00	0.00	100.00
K1+200~K1+300	0.00	0.00	100.00	K2+100~K2+200	0.00	0.00	100.00
K1+300~K1+400	0.00	0.03	96.46	K2+200~K2+300	0.00	0.00	100.00
K1+400~K1+500	0.00	0.21	92.11	K2+300~K2+400	0.00	0.08	94.70
K1+500~K1+600	0.22	0.61	87.76	K2+400~K2+500	0.08	0.14	93.33
K1+600~K1+700	0.04	0.37	90.04	K2+500~K2+600	0.03	0.23	91.81
K1+700~K1+800	0.04	0.05	95.63	K2+600~K2+700	0.00	0.11	93.96
K1+800~K1+900	0.09	0.02	97.01	K2+700~K2+800	0.06	0.27	91.25
⋮				⋮			
K36+900~K37+000	0.00	0.19	92.43	K37+800~K37+900	0.14	0.01	97.75
K37+000~K37+100	0.08	0.06	95.29	K37+900~K38+000	0.39	0.00	101.00
K37+100~K37+200	0.02	0.06	95.29	K38+000~K38+100	0.11	0.06	95.29
K37+200~K37+300	0.00	0.02	97.01	K38+100~K38+200	0.28	0.01	97.75
K37+300~K37+400	0.07	0.01	97.75	K38+200~K38+300	0.20	0.06	95.29
K37+400~K37+500	0.01	0.02	97.01	K38+300~K38+400	0.26	0.05	95.63
K37+500~K37+600	0.11	0.00	100.00	K38+400~K38+500	0.49	0.10	94.19
K37+600~K37+700	0.09	0.03	96.46	K38+500~K38+600	0.01	0.00	101.00
K37+700~K37+800	0.02	0.04	96.02	K38+600~K38+700	0.04	0.07	94.98

表 3 路面损坏状况指数评价

Table 3 Pavement distress index evaluation

评价等级	长度/m	比例/%	评价等级	长度/m	比例/%
优	31 900	84.17	次	100	0.26
良	5 400	14.25	差	0	0.00
中	500	1.32			

4.76。路面结构破损率变化范围大,数据不集中,较离散。总体上,该调查路段隐伏病害占检测面积的比例较低,路面结构完整性较好。

2.3 隐伏病害现场取芯验证结果

路面结构隐伏病害因其隐蔽性,一般以路面钻芯取样的方式进行核查和校验。考虑到钻芯取样属于有损检测,对路面结构会造成一定损害,因此在检测路段内抽样选取4个检出隐伏病害的位置,对其进行现场取芯验证,发现芯样与检测结果基本一致。结果表明:基于三维探地雷达的路面典型隐伏病害的检测结果可信度较高。部分典型隐伏病害的现场取芯验证结果如图2所示。

3 路面损坏与隐伏病害关联性分析

3.1 路面损坏与隐伏病害整体相关性分析

路面结构破损率与路面破损率的相关系数为0.18,表明隐伏病害情况与路面损坏情况总体关联性不大。图3为路面破损率与路面结构破损率的全路段对比图。在部分路段呈现出一定的正相关关系,K6+000~K7+000、K36+000~K37+000路段中,道路隐伏病害较多(路面结构破损率较高)且路面损坏程度也较高(路面破损率较高);在K18+000~K19+000、K27+000~K28+000路段中,道路隐伏病害较少(路面结构破损率较低)且路面损坏程度也较低(路面破损率较低),说明部分路段的隐伏病害伴随着路面损坏产生。

3.2 路面损坏评价“优”路段的隐伏病害状况分析

为了进一步分析路面破损率的变化趋势与路面结构破损率的关系,将该路段按100 m桩号分成379个区段,每个区段独立统计。

根据《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—

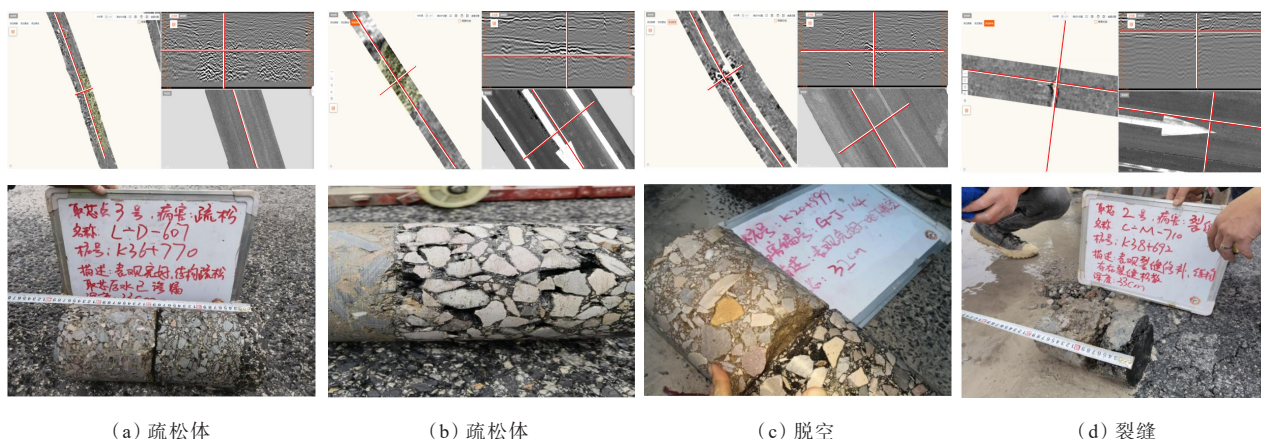


图2 隐伏病害探地雷达图谱及路面芯样验证结果

Figure 2 Ground penetrating radar map of hidden distress and verification results of pavement core samples

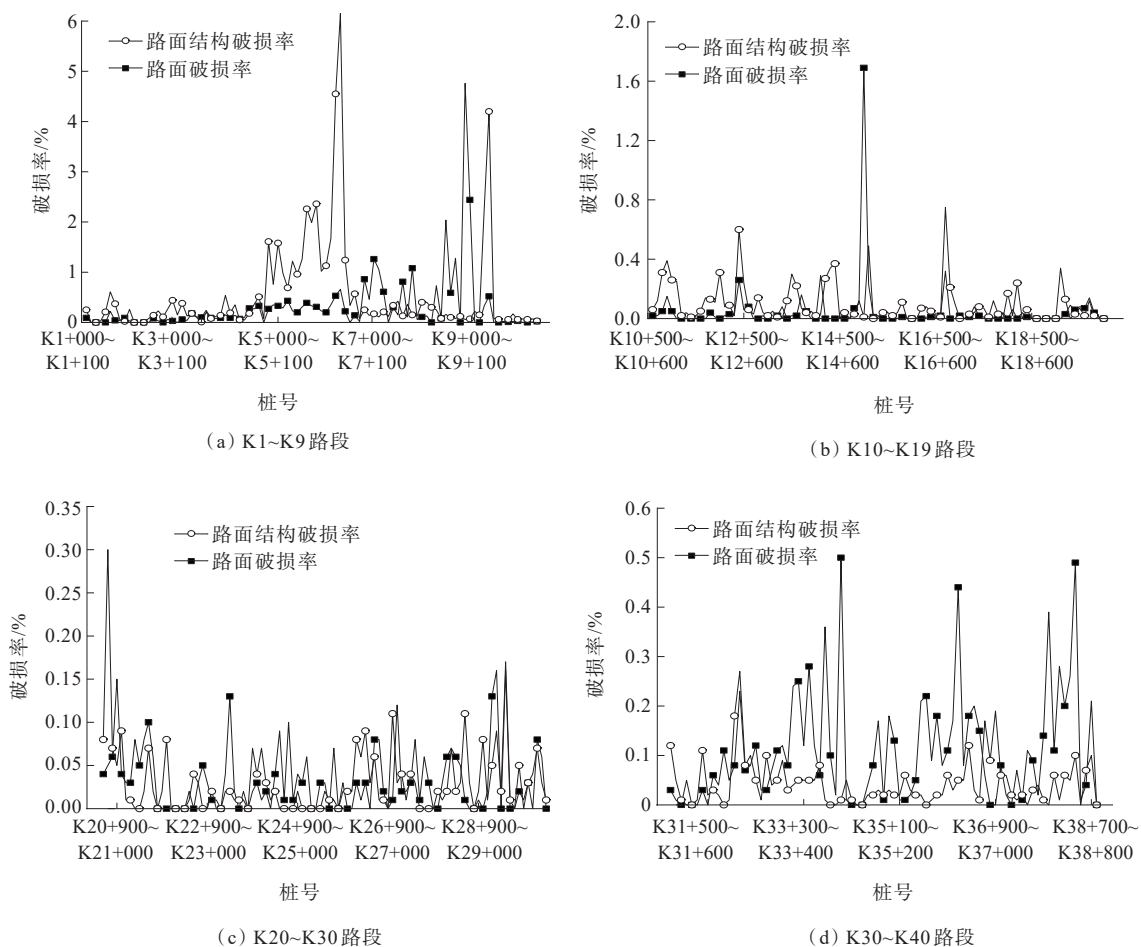


图3 全路段路面结构破损率与路面破损率对比图

Figure 3 Comparison of pavement structure distress rate and pavement distress rate in whole section

2018),高速公路路面损坏状况指数大于等于92时评价为“优”。该检测路段评价为“优”路段共31 900 m,按照100 m整桩号分段共有319个区段。总体上,路面损坏的分布相对均匀。而路面结构破损率较为离

散,突变较多,说明隐伏病害分布相对集中,且存在隐伏病害明显较多的严重区段。

通过相关性分析,路面结构破损率与路面破损率的相关系数为0.12。总体上,路面损坏状况

指数评价为“优”的路段与路面结构破损率关联性较弱。

3.3 路面损坏评价为“良”及以下路段的隐伏病害状况分析

根据《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018): $80 \leq I_{\text{PCI}} < 92$ 时评价为“良”, $70 \leq I_{\text{PCI}} < 80$ 评价为“中”, $60 \leq I_{\text{PCI}} < 70$ 评价为“次”。该检测路段中,评价为“良”路段共 5 400 m,按照 100 m 整桩号分段共有 54 个区段;评价为“中”路段共 500 m,按照 100 m 整桩号分段共有 5 个区段;评价为“次”路段共 100 m,按照 100 m 整桩号分段共有 1 个区段。

先对 100 m 检测区域内的路面破损率从小到大排序,再计算其与对应的路面结构破损率的相关系数,路面破损率和路面结构破损率取值个数相同,个数分别为 3、4、…、379,计算出 376 个相关系数。然后,以对应的路面损坏状况指数为横坐标,路面破损率与路面结构破损率的相关系数为纵坐标,绘制成折线图(图 4)。前 52 个路面破损率和路面结构破损率的相关系数大于 0.79,相关性较强,此时路面破损率为 0.25%~6.15%。此后路面破损率与路面结构破损率的相关性逐渐减弱。

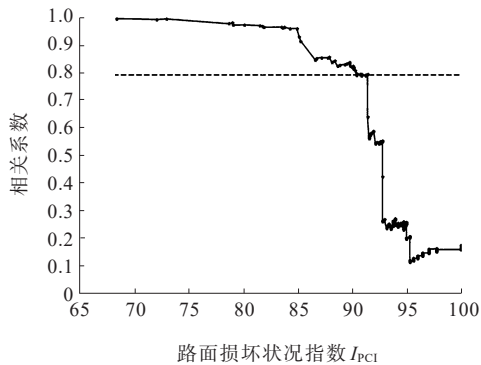


图 4 路面破损率与路面结构破损率相关系数图

Figure 4 Correlation coefficients of pavement distress rate and pavement structure distress rate

路面损坏状况指数的范围为 68.3~91.5 时,路面破损率与路面结构破损率相关性较强,说明当路面损坏状况变差,路面损坏增多时,该路段的内部隐伏病害也开始增多,此时表观和隐伏病害可能存在伴生关系。由此可见,内部隐伏病害较多的路段会在表观病害中得到反映,对于表观病害较多的路段应重点加强内部结构检测。

4 不同层位隐伏病害与路面损坏的关联性分析

与路面损坏不同,道路内部隐伏病害除了需了解其发生的位置,掌握隐伏病害的层位信息也对道路维修和养护工作至关重要。因此,笔者进一步统计和整理了该路段所有隐伏病害的层位,如表 4 所示。

表 4 不同层位隐伏病害统计情况

Table 4 Hidden distress in different pavement layers

病害类型	所在层位	病害数量/处	影响面积/m ²
层离	面层	12	40.302
裂缝	面层	5	34.507
裂缝	基层	426	2 634.945
裂缝	底基层	281	1 711.025
裂缝	土基	51	410.824
沉陷	基层	4	165.139
沉陷	底基层	9	312.959
沉陷	土基	9	1 189.614
疏松	基层	37	424.686
疏松	底基层	36	1 030.831
疏松	土基	24	1 342.005
脱空	基层	244	1 070.029
脱空	底基层	44	169.620
脱空	土基	36	375.566

注:裂缝类隐伏病害的影响面积按照长度 1 m 来测算。

沥青路面的反射裂缝是沥青路面结构的主要裂缝形式。反射裂缝分两类:① 温度型反射裂缝;② 荷载型反射裂缝。温度型反射裂缝是由于温度降低使得旧路面裂缝继续收缩张开,导致沥青面层底面产生附加应力超过沥青混合料抗拉极限,原始裂缝上方的沥青面层底面发生开裂,并继续向上扩展。荷载型反射裂缝是由于行车荷载驶近或驶离原始裂缝时,裂缝两侧存在垂直位置差,致使面层中产生较大剪应力形成剪切型反射裂缝。沥青面层底面开裂后,需要经历竖向扩展和横向扩展直至路面^[17-18]。由此可见,隐伏病害引起的路面损坏,不一定刚好在其正上方的水平投影位置,而是有一定的影响范围。路面基层失水,原材料及颗粒级配不合理,养生不规范,路基不均匀沉降等易产生裂缝。为了进一步分析发生在不同层位的隐伏病害与路面损坏的关联性,基于大量工程验证及数据分析总结,设定若隐伏

病害在路面的投影平面向外延伸 3 m 的范围内有路面损坏(本次探测深度为路面以下 1 m 范围内,隐伏病害影响范围不会太大),则认为该隐伏病害与路面损坏有较大可能存在伴生关系,反之则基本无关联。利用隐伏病害的高精度定位信息,统计出现隐伏病害的区域是否有路面损坏,分析不同层位的隐伏病害与路面损坏的伴生关系,统计结果如表 5 所示。

表 5 不同层位隐伏病害与路面损坏统计分析
Table 5 Statistical analysis of hidden distress and pavement distress in different pavement layers

隐伏病害 所在层位	隐伏病害总 面积/m ²	存在伴生路面损 坏的隐伏病害 面积/m ²	存在伴生路面 损坏的隐伏病 害占比/%
面层	74.809	13.917	18.60
基层	4 294.799	1 404.210	32.70
底基层	3 224.435	1 176.687	36.49
土基	3 318.009	1 392.350	41.96

由表 5 可得:隐伏病害发生的层位与路面损坏有较强的关联性,随着隐伏病害层位埋深的增加,存在伴生路面损坏的隐伏病害占比也逐渐增加。对路面损坏影响由强到弱的隐伏病害所在层位依次为:土基、底基层、基层、面层。

5 结论

本文结合《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)中路面破损率的统计方法,提出了表征路面内部隐伏病害状况的路面结构破损率指标,并依托实际检测工程数据统计,分析路面损坏与隐伏病害情况及二者的相关性,进而探索路面损坏状况和内部结构损坏状况的相关关系,得出主要结论如下:

- (1) 路面损坏状况指数为“优”时,与路面结构破损率的相关性较弱。说明当路面状况好,路面损坏较少时,路面损坏和隐伏病害几乎无伴生关系。
- (2) 路面损坏状况指数较小时,路面破损率与路面结构破损率相关性较强。说明当路面损坏状况较差,路面损坏增多时,该路段的内部隐伏病害也开始增多,此时路面损坏和隐伏病害可能存在着伴生关系。
- (3) 统计路面损坏影响由强到弱的隐伏病害层

位依次为:土基、底基层、基层、面层。说明随着隐伏病害的发生层位逐渐加深,更容易出现伴生的路面损坏。

参考文献:
References:

[1] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
Research Institute of Highway Ministry of Transport.High performance assessment standards: JTG 5210—2018[S]. Beijing:China Communications Press Co., Ltd.,2018.

[2] 北京市勘察设计研究院有限公司.城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准:JGJ/T 437—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
BGI Engineering Consultants Co., Ltd.. Standard for comprehensive detection and risk evaluation of underground disasters in urban area:JGJ/T 437—2018[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2018.

[3] 姜洪,王选仓.探地雷达对路面板脱空现象检测时的信号分析与处理[J].公路交通科技,2010,27(1):22-27.
JIANG Hong, WANG Xuancang. Signal analysis and processing for detecting void phenomenon under concrete pavement by using ground penetrating radar[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010,27(1):22-27.

[4] BENEDETTO A,TOSTI F,BIANCHINI CIAMPOLI L,et al. An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections[J]. Signal Processing,2017,132:201-209.

[5] PARK B, KIM J, LEE J, et al. Underground object classification for urban roads using instantaneous phase analysis of ground-penetrating radar (GPR) data[J]. Remote Sensing,2018,10(9):1417.

[6] TOSTI F,BIANCHINI CIAMPOLI L,D' AMICO F,et al. An experimental-based model for the assessment of the mechanical properties of road pavements using ground-penetrating radar[J].Construction and Building Materials, 2018,165:966-974.

[7] 章洋,何莉,汤青洲,等.基于智能手机的农村公路路面破损检测方法[J].中外公路,2023,43(2):51-57.
ZHANG Yang, HE Li, TANG Qingzhou, et al. Detection method of rural road pavement damage based on smart phone[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43

- (2):51-57.
- [8] LIU H, SATO M. In situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array[J].NDT & E International,2014,64:65-71.
- [9] 杨强,王春晖,陈长,等.探地雷达在道路检测中的应用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2007,3(4):107-111.
YANG Qiang, WANG Chunhui, CHEN Chang, et al. Research on the application of ground penetrating radar in road detection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2007,3(4):107-111.
- [10] 张智成.公路工程质量的探地雷达检测技术[J].城市建设理论研究(电子版),2016(10):5047.
ZHANG Zhicheng. Detection technology of highway engineering quality by ground penetrating radar[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2016(10): 5047.
- [11] 俞先江,马圣昊,王正,等.探地雷达技术在国省干线公路早期病害防治中的应用[J].公路,2015,60(8):255-259.
YU Xianjiang, MA Shenghao, WANG Zheng, et al. Application of ground penetrating radar technology in early disease prevention of national and provincial trunk highways[J].Highway,2015,60(8):255-259.
- [12] 虞将苗,唐嘉明,张肖宁,等.基于三维探地雷达的沥青路面厚度动态调整技术研究[J].中外公路,2020,40(3):70-75.
YU Jiangmiao, TANG Jiaming, ZHANG Xiaoning, et al. Research on dynamic adjustment technology of asphalt pavement thickness based on 3D ground penetrating radar [J]. Journal of China & Foreign Highway,2020, 40(3): 70-75.
- [13] 田增彪,李杰.探地雷达于城市道路塌陷危害检测评估的应用探讨[J].测绘通报,2013(增刊2):116-118,122.
TIAN Zengbiao, LI Jie. Discussion on the application of ground penetrating radar in the detection and evaluation of urban road collapse hazards[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2013(sup 2):116-118,122.
- [14] 金光来,臧国帅,蔡文龙,等.基于探地雷达的路面结构完整性量化评价方法[J].公路,2020,65(5):16-20.
JIN Guanglai, ZANG Guoshuai, CAI Wenlong, et al. Quantitative evaluation method of pavement structural integrity based on ground penetrating radar[J]. Highway, 2020,65(5):16-20.
- [15] KRYNSINSKI L, SUDYKA J. GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks[J]. Journal of Applied Geophysics,2013,97:27-36.
- [16] 郭凯,杨丰硕,周静海,等.市政道路典型病害的地质雷达特征回波[J].无损检测,2020,42(7):51-55.
GUO Kai, YANG Fengshuo, ZHOU Jinghai, et al. Geological radar characteristic echoes of typical diseases on municipal road[J]. Nondestructive Testing, 2020,42(7): 51-55.
- [17] 郭贺贺,沙海洋,仇云强,等.旧水泥路沥青加铺层反射裂缝影响区域分析及加固方法[J].中外公路,2018,38(4):49-53.
GUO Hehe, SHA Haiyang, QIU Yunqiang, et al. Influence areas analysis and strengthening techniques for asphalt overlay reflection crack on old cement concrete pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018,38(4): 49-53.
- [18] 黄立葵,张攀,胡志强,等.半刚性基层沥青路面温缩反射裂缝疲劳扩展分析[J].公路工程,2020,45(5):79-83.
HUANG Likui, ZHANG Pan, HU Zhiqiang, et al. Research on thermal crack fatigue propagation of asphalt pavement with semi-rigid base[J]. Highway Engineering, 2020,45(5): 79-83.