

# 三维探地雷达技术在沉陷成因探测及处治效果评价中的应用

潘 贵<sup>1</sup>, 侯忠非<sup>2</sup>

(1. 河南越秀兰尉高速公路有限公司, 河南 开封 475000; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710000)

**摘要:** 介绍采用三维探地雷达探测沉陷脱空的技术特征、设备和工作原理, 详细描述某路段沥青道路存在沉陷脱空的基本情况以及利用三维探地雷达进行无损检测的过程。通过处治前的检测结果, 确定脱空程度、位置, 并计算沉陷的位置、面积和高程差。通过对比两个具有不同沉陷脱空形成原因的路段, 分析沉陷、脱空的形成原因, 提出针对性的处治措施。根据处治后的检测结果, 对注浆、加铺等病害处治措施的处治效果进行评价。研究表明, 三维探地雷达系统能够准确地探测沥青路面内部的沉陷脱空病害程度、位置和形成原因。基于探测结果, 提出具有针对性的处治措施, 并评价处治效果的可行性和有效性。

**关键词:** 三维探地雷达; 沥青道路; 无损检测; 沉陷; 脱空

**中图分类号:** U416.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0180-07

道路施工完成后, 由于路基填料松散、路基富水、边坡滑动等原因, 均可造成道路表面发生下沉, 提前探明路基下沉的原因, 对症下药, 对确定科学、合理的路基处治方案具有重大意义<sup>[1-4]</sup>。路基处治施工完成后, 探明路基内部状况, 可确保路基处治质量。

探地雷达检测技术是道路无损检测具有代表性的主要技术之一, 可快速检验道路结构内部状况, 相比传统的钻芯检测工作, 具有无损、检测效率高、技术优势<sup>[5-8]</sup>。在不同机制的雷达中, 二维探地雷达一次检测采集一个纵断面的数据, 只能对内部状况作出定性分析且容易误判。三维探地雷达具有全覆盖、判断准确率高、可定量分析的优势<sup>[9-11]</sup>。

李军<sup>[12]</sup>在高速公路改扩建中使用三维探地雷达进行道路病害扫描, 结果证实三维探地雷达可很好地对道路内部不同深度的裂缝病害进行检测。王钊栋等<sup>[13]</sup>使用三维探地雷达对道路内部病害进行扫描, 结果表明三维探地雷达能够及时发现路面内部隐蔽病害, 为道路养护提供依据。众多研究已表明, 三维探地雷达能很好地对道路内部病害进行探测, 对道路养护时机及道路灾害预警提供有利的支撑<sup>[14-15]</sup>。

目前, 尚缺乏基于三维探地雷达探测沉陷成因

及沉陷处治效果评价方面的研究。本文通过选取两段路表下沉的检测路段, 采用三维探地雷达全断面覆盖检测其下沉区域, 获取下沉区域内部结构状况, 分析下沉形成原因, 提出针对性处治措施, 在处治施工完成后, 采用三维探地雷达进行复检。

## 1 三维探地雷达沉陷成因探测

道路沉陷往往由于路基填料松散、路基富水、边坡滑动等。三维探地雷达能很好地对道路结构内部路基填料松散及路基富水等病害进行探查。处治前后对道路内部病害及目标物的检测结果见表1。

对于路面下沉严重路段, 平整度差, 需加铺结构层调平路面, 以改善平整度。在施工完成后, 可采用三维探地雷达检测评价加铺结构层厚度。在三维探地雷达检测中可通过式(1)得出检测的道路结构厚度。

表1 道路内部目标物检测结果

沉陷成因	检测手段	处治手段	处治前检测目标物	处治后检测目标物
路基填料松散, 存在脱空	三维探地雷达	注浆	松散、脱空	浆液
路基内部富水	三维探地雷达	排水固结沉降	富水区域	富水区域

**收稿日期:** 2023-11-09

**作者简介:** 潘贵(1971—), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为道路与桥梁; 侯忠非(1981—), 男, 工程师, 研究方向为道路与桥梁。

$$H = \frac{tc}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中: $t$ 为传播时间; $c$ 为真空中光速; $\epsilon_r$ 为道路内部不同结构层的介电常数。

### 1.1 三维探地雷达检测基本原理

三维探地雷达的基本探测原理是向地下发送脉冲形式的高频电磁波,电磁波在地下介质传播过程中,遇到存在电性差异的地下目标体,如空洞、路面结构层层间界面等时,电磁波便发生反射。反射系数和反射信号电平计算公式为

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

$$E_{r1} = E_i \Gamma_{1,2} \quad (3)$$

式中: $\Gamma_{1,2}$ 为界面反射系数; $\epsilon_{r1}$ 为电磁波入射侧相对介电常数; $\epsilon_{r2}$ 为电磁波出射侧相对介电常数; $E_{r1}$ 为反射信号电平; $E_i$ 为入射信号电平。由式(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。界面两边相对介电常数差异越大,反射系数越大,反射信号越强。

三维探地雷达天线接收到反射的电磁波后,将采集到的频域数据输入雷达主机中,并通过逆离散傅里叶变换对信号进行转换,公式为

$$d(t) = \text{IDFT}\{D(f)\} = \Gamma B \text{sinc}[B(t - \tau)] e^{[j2\pi f_c(t - \tau)]} \quad (4)$$

式中: $\Gamma$ 为反射系数; $B$ 为天线带宽; $f_c$ 为信号频率; $\tau$ 为在介质中传播产生的延时; $d(t)$ 为时域信号; $D(f)$ 为频域信号; $t$ 为时间; $f$ 为时间域。

对数据进行处理、分析后,将电信号转换为三维数据矩阵,并进行绘制,使路面结构内部情况通过雷达图像进行可视化展示,以获得道路内部结构相关状况。

### 1.2 脱空及浆液分布检测原理

脱空及浆液均与道路建筑材料相对介电常数存在明显差异。脱空内部一般为空气,相对介电常数为1,浆液刚施工完时含水量较高,相对介电常数较大( $>30$ ),电磁波较难穿透,道路材料相对介电常数一般介于3~10。三维探地雷达发射的电磁波在脱空-道路材料,浆液-道路材料界面处会发生反射,雷达波传播模型如图1所示。

脱空及注浆区域雷达图像均表现为强烈的反射信号。然而,刚施工完的浆液相对介电常数较大( $>30$ ),电磁波较难穿透,浆液信号下方存在较多的多次反射波;脱空区域由于介电常数较小,电磁波易穿透,信号下方无多次反射波,如图2、图3所示。

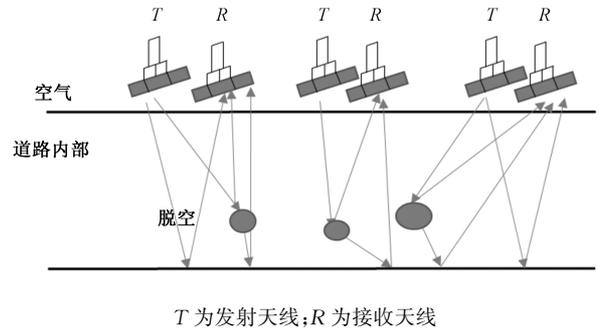


图1 脱空及注浆填充物检测雷达波传播示意图

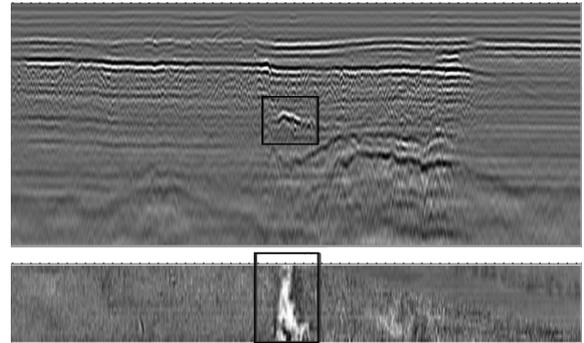


图2 脱空区域雷达图

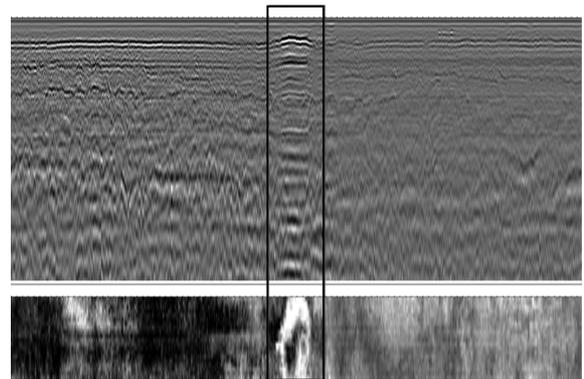


图3 注浆区域雷达图像

### 1.3 富水区域检测原理

低含水量土壤在不同频率电磁波下,相对导电率基本表现为常数;高含水量土壤相对导电率随电磁波频率增加而增加,如图4所示。

因此,携带信号的电磁波在高含水量土壤中传播时,受导电率变化影响,各个频率分量的电磁波以不同速度传播,经过一段距离后,它们相互之间的相位发生变化,从而导致信号失真,出现色散效应。

## 2 检测方案

本次检测采用由 Geoscope™ MKIV 雷达主机、DXG 系列多通道地面耦合天线阵组成的三维探地雷达系统。采样间距为 2.5 cm,时窗设置为 50 ns,驻波时间设置为 3  $\mu$ s。在此设置参数下,探地雷达

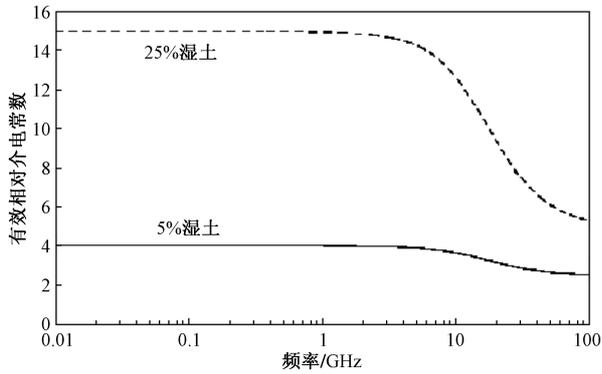


图 4 相对导电率

允许最大移动速度为 8 km/h,探测深度约 2.5 m (与介质电介质特性有关),采样横向间距为 0.071 m,行车方向间距 0.025 m,竖向间距约为 0.004 m(与介质电介质特性相关),这些密集的点构成三维点阵,形成较为清晰的三维雷达图像(图 5、图 6)。

三维探地雷达系统每次检测单道检测宽度为 1.5 m,三维探地雷达现场检测方式为将现场路面划分为若干 1.5 m 宽的检测车道,依次检测,并记录好检测顺序。检测完成后,对各道雷达图像按检测顺序进行拼接,形成整幅路面完整的雷达平面图。

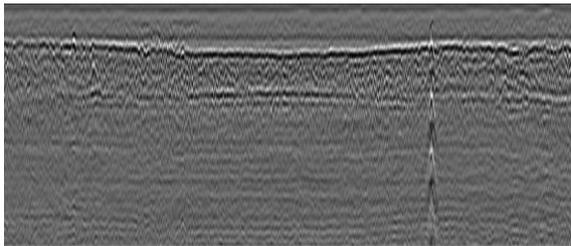


图 5 高含水量土壤雷达图像

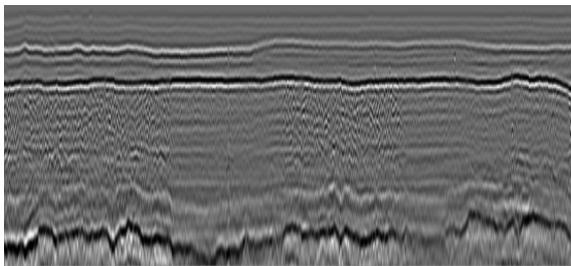


图 6 低含水量土壤雷达内部图像

### 3 现场检测及数据分析

#### 3.1 各路段情况简介

对港珠澳口岸互通匝道处进行现场检测时发现存在两个区域路表下沉较严重,区域桩号分别为 FK0+275 和 FK0+297。区域纵断面实测与设计高程差见表 2。

两个桩号道路纵断面高程均低于设计高程 3~18 cm,其中 FK0+275 桩号处沉陷面积约为 15 m<sup>2</sup>,FK0+297 桩号处沉陷面积约为 36 m<sup>2</sup>。道路结构组成见表 3。

表 2 路表纵断面实测与设计高程差

测点序号	实测与设计高程差/m					
	FK0+275			FK0+297		
	左	中	右	左	中	右
1	-0.116	-0.080	-0.034	-0.036	-0.079	-0.115
2	-0.124	-0.111	-0.070	-0.055	-0.098	-0.143
3	-0.179	-0.144	-0.120	-0.101	-0.132	-0.167
4	-0.164	-0.142	-0.110	-0.110	-0.134	-0.179
5	-0.144	-0.111	-0.067	-0.074	-0.093	-0.125
6	-0.056	-0.053	-0.031	-0.045	-0.087	-0.115

表 3 道路结构组成

组成	厚度/cm
沥青混凝土路面	18
水泥稳定碎石	36
水泥稳定土	18
级配碎石	12
人工填筑轻质土	路基

为探明沉陷的原因,采取针对性处治措施,采用三维探地雷达对 FK0+275 和 FK0+297 区域进行全断面覆盖扫描,以获取内部结构状况。

#### 3.2 FK0+275 路段检测及数据分析

##### 3.2.1 处治前检测分析及处治建议

FK0+275 路段路幅总宽度为 24.5 m,共检测了 18 道数据。FK0+275 路段沉陷区域现场图及雷达水平剖面图像如图 7~图 9 所示。

由 FK0+275 路段处治前雷达水平向剖面图像(深度 0.202 m)(图 8)可知;该区域距右边缘 12 m 范围内处存在面积约为 15 m<sup>2</sup> 的沉陷区域,沉陷高程差为 3~18 cm;沉陷区域存在横向贯穿的裂缝。由处治前雷达纵剖面图(图 9)可知;面层底部存在沉陷,最大高差为 4 cm 并且面层底部和基层底部均



图 7 FK0+275 路段路表沉陷区域现场

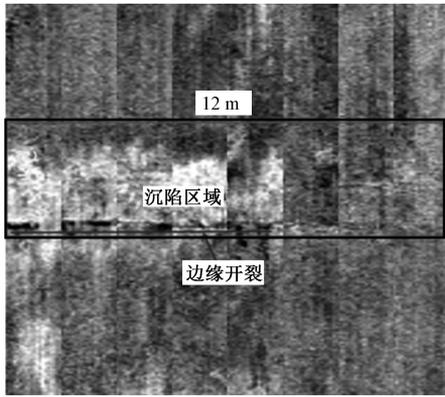


图 8 FK0+275 路段处治前沉陷区域雷达水平向剖面图(深度 0.202 m)

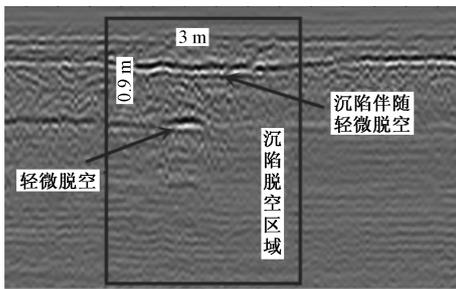


图 9 FK0+275 路段处治前沉陷区域雷达纵向剖面图

存在轻微脱空;基层以下部分无较强雷达反射信号,表明该段路基整体较均匀,不存在空洞且无积水。

综上所述,初步推断该处沉陷脱空病害的成因是道路施工时该路段路基尚未完全稳定,加铺路面后,路基发生固结沉降,道路内部出现了脱空现象,随着车辆荷载的作用,路面出现下沉。为此,建议对该路段路基及路面进行局部注浆治理,填充路面内部空洞,加强路基的稳定性,防止路基进一步固结沉降,从而避免路面整体的破坏。

### 3.2.2 处治后检测分析及处治评价

在 FK0+275 沉陷区域范围内,在长、宽上均以 0.5 m 为间隔,注浆深度为 1.5 m,布设注浆孔,进行注浆施工后,对处治后的 FK0+275 路段进行全断面覆盖的三维探地雷达检测。检测结果如图 10~图 12 示。

注浆处治后 FK0+275 区域雷达水平向剖面图表明面层底部的沉陷边缘的裂缝进一步发展扩展到右边缘。

由雷达纵向剖面图可以看出,FK0+275 区域沥青层底面反射信号强烈,电磁波难以穿透,信号层厚度约为 3 cm,表明该处层间空隙已被浆液填满,形成厚度约为 3 cm 的浆液填充层;基层及土基

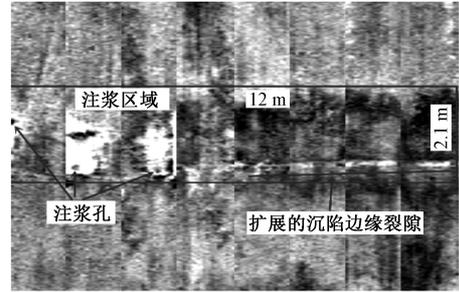


图 10 FK0+275 路段处治后注浆区域雷达水平向剖面图(深度 0.202 m)

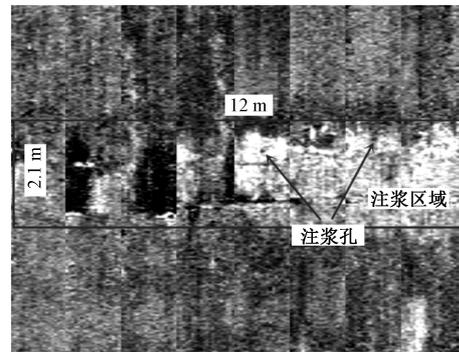


图 11 FK0+275 路段处治后注浆区域雷达水平向剖面图(深度 0.196 m)

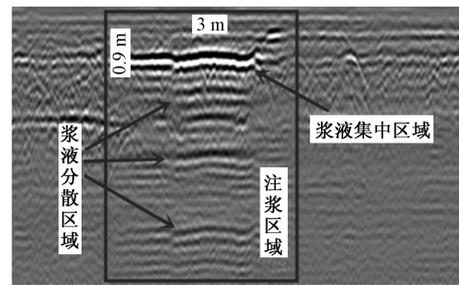


图 12 FK0+275 路段处治后注浆区域雷达纵向剖面图

反射信号表明浆液在此区域分散分布,与原道路材料混合形成新的浆土混合物,增强原道路稳定性和承受荷载的能力,支撑顶部浆液填充层形成平整支撑面,防止面层继续下沉。

## 3.3 FK0+297 区域检测及数据分析

### 3.3.1 处治前检测分析及处治建议

FK0+297 区域与海相邻,路基为海堤,路幅总宽度约 7 m,共检测 4 道数据。处治前沉陷现场情况、雷达图像如图 13~图 15 所示。

FK0+297 路段处治前雷达纵向剖面图(图 14)表明,面层下方区域雷达反射信号杂乱,呈现明显的色散效应特征,判定为路基内部含水量过高所致。雷达水平向剖面图像(图 13)表明:FK0+297 路段积水区域面积约为 36 m<sup>2</sup>;区域边缘未发现开

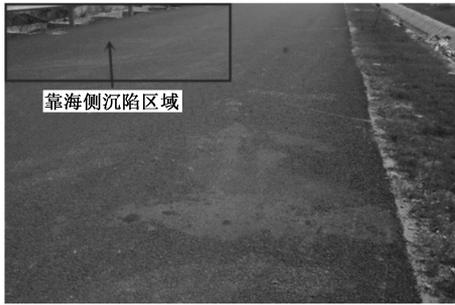


图 13 FK0+297 路段路表沉陷现场

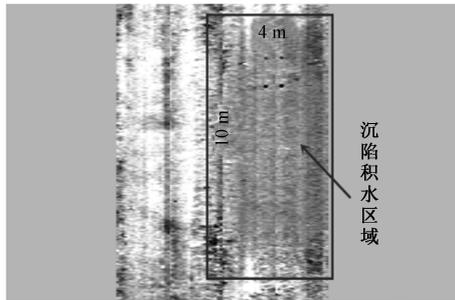


图 14 FK0+297 路段处治前沉陷区域  
雷达水平向剖面图(0.212 m)

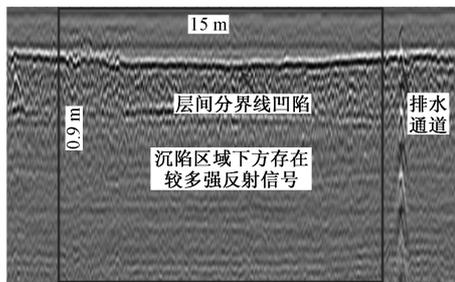


图 15 FK0+297 路段处治前沉陷区域雷达纵向剖面图

裂,路面内部损伤较少。

根据雷达图像分析结果和现场情况,初步推测沉陷原因为该邻海路段路基靠海侧封水措施不完善,导致海水逐步渗透进入路基内部,路堤填土含水量过高,施工完结后固结度较低,产生较大工后沉降。建议重新检修路堤封水设施,解决海水渗透问题;再加强路基排水,以及采取堆载预压法等加速路基固结沉降措施,待路基固结充分,经沉降观测,路基沉降稳定后,对原路面病害进行处治。由于工后沉降稳定后,路面下沉区域沉降高程及面积均过大,需在原路面上重新加铺沥青层调整平整度。

### 3.3.2 处治后检测分析及处治评价

根据处置前的检测结果,在 FK0+297 区域提出了一些建议,以重新检查、维修排水封水设施。当路基固结充分且沉降稳定后,可以对原路面病害进行治理,并重新加铺沥青层以调整平整度,覆盖

范围为附近 130 m 的沉陷区域。在 FK0+297 路段的治理完成后,对沉陷区域前后 150 m 进行了三维探地雷达检测。由于沉陷区域主要分布在靠海一侧宽度为 3 m 的区域内,因此本次检测仅对靠海侧 3 m 宽区域进行检测,总共获得了 2 组数据。检测结果如图 16~图 19 所示。

根据雷达水平剖面图(图 16、图 18、图 19)显示,经过路基固结沉降后,原沉陷区域面积、程度和长度进一步扩大,同时在原沉陷区域附近出现多处新的沉陷区域。经统计,固结沉降后,沉陷区域路段总长度为 110 m,总面积为 276 m<sup>2</sup>,沉陷区域主要分布在靠海侧。而雷达纵向剖面图(图 17)则表明,沉降区域最高点和最低点之间的高程差达到 7 cm,路基和路面内部状况整体良好,没有出现脱空或裂缝等病害。此外,沉陷区域下方的强反射信号较少,表明含水率已大幅度下降。

为评价沉陷区域加铺层厚度分布情况,在处治后加铺段雷达纵向剖面图上绘出原路面地面线和加铺层地面线(图 17),根据加铺前后地面线高程差,绘出加铺层厚度分布图,如图 20 所示,并将加铺层厚度分布关键指标统计于表 4。

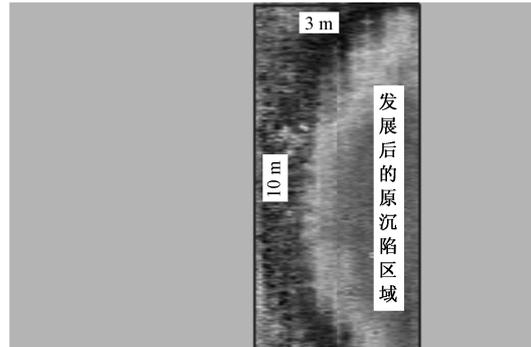


图 16 FK0+297 路段处治后原沉陷区域  
雷达水平向剖面图(0.212 m)

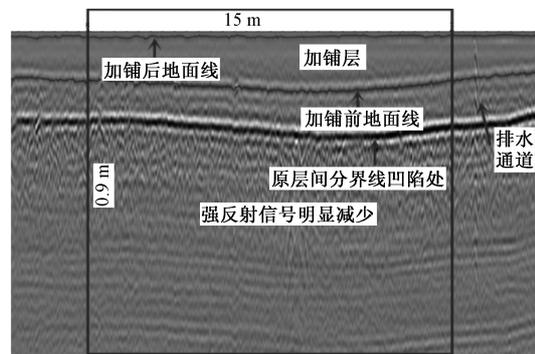


图 17 FK0+297 路段处治后原沉陷区域雷达纵向剖面图

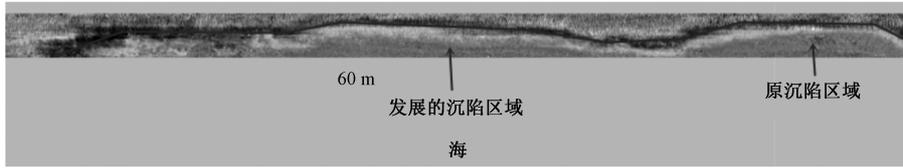


图 18 FK0+297 路段处治后加铺段沉陷区域雷达水平向剖面图(前 60 m)

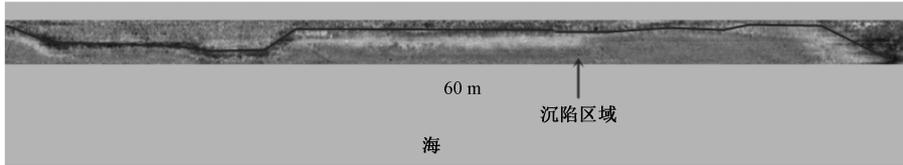


图 19 FK0+297 路段处治后加铺段沉陷区域雷达水平向剖面图(后 60 m)

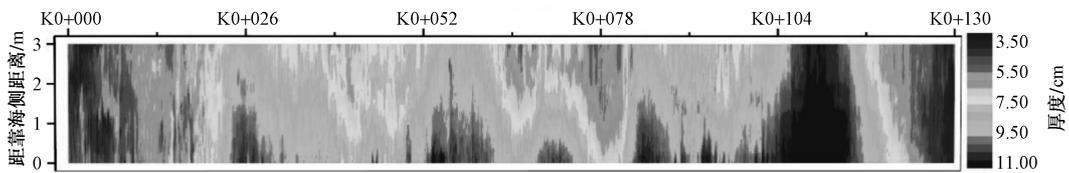


图 20 FK0+297 路段加铺区域加铺层厚度分布

表 4 FK0+297 路段加铺层厚度分布关键指标统计

厚度/ cm	<3.5	3.5≤, <5.5	5.5≤, <7.5	7.5≤, <9.5	9.5≤, <11	≥11
占比/%	0.25	12.46	28.42	40.42	13.67	4.78
厚度均值/cm	7.82					

对比加铺区域加铺层厚度分布图(图 20)与加铺段沉陷区域雷达水平向剖面图表明,加铺区域较厚(>7.5 cm)区域分布范围与沉陷区域分布范围基本一致。

#### 4 结论

对实际工程案例进行检测,通过对雷达图像解读,对比处置前后雷达图像,给出具体病害产生原因,能对道路内部病害进行转向处治,随着三维探地雷达的不断发展,道路内部病害将不再隐蔽。三维探地雷达系统作为一种新兴的无损检测手段,能实现对脱空沉陷病害位置、损伤程度、成因等病害关键信息的探测,根据探测结果提出针对性的处治方案,处治完成后,能对完成注浆位置、浆液分布区域、加铺厚度、加铺后路面内部健康状况等处治后路面内部关键信息的探测,在路面内部脱空沉陷探测、处治方案设计、处治效果评价等方面具有广阔且有价值的 ứng dụng 前景。

#### 参考文献

[1] 吴凯彬, 吴杰. 二、三维探地雷达在地面坍塌隐患检测中的综合应用[J]. 中国新技术新产品, 2022(11):

140-142.

[2] 郑灿伟, 杨树人, 王文宾. 沥青路面唧浆病害诊断与分析[J]. 公路与汽运, 2022(5): 62-66.

[3] 吴学礼, 王壮壮, 习炳权, 等. 基于小波自适应阈值方法的探地雷达去噪[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4686-4692.

[4] 魏克森, 陈凯, 韩文扬, 等. 基于三维探地雷达技术的路面病害分析和控制对策[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(4): 1-3.

[5] 曾昭发, 田钢, 丁凯. 宽带探地雷达系统研究及在工程检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2003(3): 455-459.

[6] 马一飞. 三维探地雷达的典型病害识别检测与应用[J]. 中国公路, 2022(21): 90-91.

[7] 杨洁, 王云龙, 张雪, 等. 基于正演模拟的地下典型目标体探地雷达图像特征分析与评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8540-8551.

[8] 黄建国. 探地雷达法检测路面板脱空病害的研究[J]. 科技和产业, 2022, 22(7): 370-374.

[9] YE Z J, ZHANG C P, YE Y, et al. Application of transient electromagnetic radar in quality evaluation of tunnel composite lining[J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117958.

[10] 卢彭真, 黄擎洲. 探地雷达在公路横断面勘测设计中的应用[J]. 科学技术与工程, 2005, 5(2): 116-119.

[11] 张亚彬, 孙富学, 龚敦红, 等. 探地雷达在检测地面沉降的应用分析[J]. 科技和产业, 2020, 20(12): 252-256.

[12] 李军. 探地雷达在公路改扩建工程检测中的应用[J]. 科技和产业, 2021, 21(8): 295-300.

[13] 王钊栋, 彭勇均, 熊春龙. 三维探地雷达在路面内部病害检测中的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(12): 3-5.

[14] YUAN C X, CAI H B. Spatial reasoning mechanism to enable automated adaptive trajectory planning in ground penetrating radar survey[J]. Automation in Construc-

tion, 2020, 114: 103157.

[15] 于明明, 张杨, 陈涛, 等. 基于三维探地雷达路面隐性病害识别与评价[J]. 公路, 2023, 68(3): 383-388.

## The Application of Three-dimensional Ground Penetrating Radar Technology in the Detection of Subsidence Causes and Evaluation of Remediation Effects

PAN Gui<sup>1</sup>, HOU Zhongfei<sup>2</sup>

(1. Henan Yuexiu Lanwei Expressway Co. LTD. , Kaifeng 475000, Henan, China;

2. CCCC First Highway Consultants Co. , Ltd. , Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The technical characteristics, equipment, and working principle of using 3D ground penetrating radar to detect subsidence and clearance are introduced. A detailed description of the subsidence and clearance situation in a specific section of an asphalt road, as well as the process of conducting non-destructive detection using 3D ground penetrating radar are conducted. The detection results before treatment are utilized to determine the degree and position of the void, and to calculate the position, area, and elevation difference of the subsidence. By comparing two sections with different causes of subsidence and clearance, the causes of subsidence and clearance are analyzed, and corresponding treatment measures are proposed. The test results after treatment are used to evaluate the effectiveness of treatment measures such as grouting and paving. The findings demonstrate that the 3D ground-penetrating radar system can accurately detect the extent, location, and causes of subsidence and clearance in asphalt pavement. Based on the detection results, targeted treatment measures are put forward, and their feasibility and effectiveness in achieving the desired treatment outcomes are evaluated.

**Keywords:** three-dimensional ground penetrating radar; asphalt road; non-destructive testing; sink down; come to nothing