

韧性城市视角下三维探地雷达城市道路病害探测实践

屈建民^{1,2}, 谭 玮^{2,3}, 尹志勇⁴, 刘方亮^{2,3}, 曹丽芳^{2,3}, 虞孔安^{2,3}, 邹 颖¹

(1. 常德市政府投资项目建设事务中心, 湖南 常德 415000; 2. 常德市道路及地下管网病害诊治工程技术研究中心, 湖南 常德 415000; 3. 湖南博联检测集团有限责任公司, 湖南 常德 415000; 4. 湖南文理学院 土木建筑工程学院, 湖南 常德 415000)

摘 要: 在城市更新加速推进与韧性城市建设需求迫切的背景下, 精准识别城市道路下方潜在的空洞、脱空等地下病害体, 对保障公共安全和提升基础设施韧性至关重要。针对传统检测方法的局限, 在常德市某市政道路更新项目中, 创新应用三维探地雷达技术进行系统性地下病害探测。通过先进数据处理与分析, 精准识别定位了30处脱空、空洞、疏松体及富水体等典型病害目标, 结果经二维雷达复测及钻芯验证, 证实了该技术的高可靠性与精度。基于探测成果, 提出了针对性处置建议。实践表明, 三维探地雷达技术是城市更新中评估地下空间风险、预防灾害、提升道路韧性的关键支撑。该技术的应用为城市基础设施精细化管理与安全运维提供了科学依据, 能有效助力韧性城市建设与可持续发展。

关键词: 探地雷达; 道路病害; 道路检测; 城市更新; 韧性城市

中图分类号: U418; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0328-05

Detection of Urban Road Diseases by 3D Ground Penetrating Radar from Perspective of Resilient City

QU Jianmin^{1,2}, TAN Wei^{2,3}, YIN Zhiyong⁴, LIU Fangliang^{2,3}, CAO Lifang^{2,3}, YU Kongan^{2,3}, ZOU Ying¹

(1. Changde Municipal Government Investment Project Construction Affairs Center, Changde 415000, China; 2. Changde Road and Underground Pipe Network Disease Diagnosis and Treatment Engineering Technology Research Center, Changde 415000, China; 3. Hunan Bolian Detection Group Co., Ltd., Changde 415000, China; 4. School of Civil and Architecture Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China)

Abstract: Under the background of accelerated urban renewal and the urgent need for resilient urban construction, accurately identifying potential cavities, voids and other underground disease bodies beneath urban roads is of vital importance for ensuring the public safety and enhancing the resilience of infrastructure. In view of the limitations of traditional detection methods, the three-dimensional ground penetrating radar technology is innovatively applied to detect the systemic underground diseases in a municipal road renewal project in Changde. Through the advanced data processing and analysis, 30 typical disease targets such as void, cavity, loose body and rich water body are accurately identified and located. The results of two-dimensional radar retest and core drilling verification confirm the high reliability and accuracy of the technology. Based on the detection results, the targeted disposal suggestions are put forward. The practice shows that the three-dimensional ground penetrating radar technology is the key support for evaluating the risk of underground space, preventing the disasters and improving the road toughness in urban renewal. The application of this technology provides a scientific basis for the refined management and safe operation and maintenance of urban infrastructures, and effectively helps the construction and sustainable development of resilient cities.

Keywords: ground penetrating radar; road diseases; road detection; urban renewal; resilient city

收稿日期: 2025-08-21

基金项目: 湖南省自然科学基金(2024JJ7299); 湖南文理学院芙蓉学院重点项目(FR24ZD02)

作者简介: 屈建民(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程勘察、工程结构鉴定和工程质量检测技术的应用研究。

通信作者: 尹志勇(1993—), 男, 博士, 副教授, 从事工程结构抗震与工程质量检测技术的应用研究工作。电子信箱: iemyzy@163.com

0 引 言

城市更新进程加速与韧性城市建设需求凸显之际, 城市道路安全运维日趋严峻。受地质构造变动、地下管线渗漏、施工缺陷和长期交通载荷等因素影响, 道路下方易形成空洞、脱空、松散、富水等隐蔽病

害体,如同隐匿的“地下杀手”,随时可能引发路面塌陷,严重威胁公众生命财产安全^[1-3]。北京、大连、银川等多地频发的道路塌陷事件,已充分暴露问题的严峻性,引发社会广泛担忧^[4-7]。传统的钻芯取样、挖坑检测等方法效率低下、成本高昂且会破坏道路结构,难以满足大规模、精细化的城市道路维养和安全预警需求。在此形势下,三维探地雷达等高效无损探测技术应运而生,凭借其非侵入性、高分辨率、三维可视化及快速检测优势,可精准识别地下病害体的位置、规模及分布特征,为道路安全评估、病害预警及修复决策提供关键数据支撑,对提升道路安全管养水平、助力韧性城市建设意义重大^[8]。

本文依托常德市某市政道路更新项目,基于三维探地雷达技术对该道路进行地下病害体探测,精确识别病害类型及程度,定位病害位置,并提出针对性处置建议,为及时处置及后期维护提供科学依据。

1 探地雷达技术原理

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR),亦称地质雷达,是一种基于高频电磁波探测的地下无损地球物理方法^[9]。该方法近年发展迅速,尤其适用于城市地质环境探测。其工作原理为:发射天线向地下投射高频电磁波;当电磁波在介质中传播遇到电性差异界面时,部分能量反射回地表;接收天线采集这些反射信号,通过分析反射电磁波的波形、振幅强度及传播时间等特征,即可推断地下目标体的空间位置、结构形态和埋藏深度^[10]。

探地雷达工作原理示意图见图1。

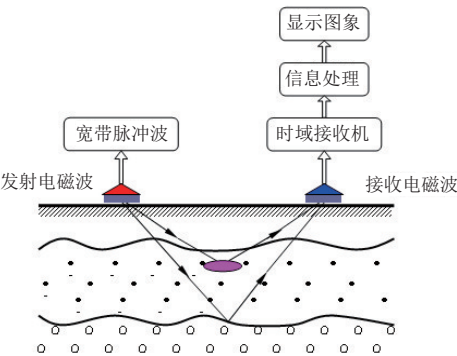


图1 探地雷达工作原理示意图

探地雷达通过解析地下介质反射的电磁信号实现目标体特征识别。当目标体与周边土体存在显著介电特性差异时,界面处会产生反射回波。回波信号的波形特征与目标体几何形态存在直接关联,而反射信号的振幅强度与相位特征由反射系数 R 定量

描述:

$$R = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \tag{1}$$

式中: ε_1 、 ε_2 分别为分界面上方、下方介质的相对介电常数。

以空洞探测为例。由于土体流失导致空洞内部主要填充空气(介电常数约1)或水(介电常数81),而正常土体介电常数通常在9左右。这种显著的介电差异使得电磁波在空洞-土体界面发生强反射^[9]。具体表现为:(1)空气填充空洞产生的反射波振幅显著高于背景信号;(2)水体填充空洞因其介电常数接近土体可能形成弱反射特征;(3)通过反射波的双程走时可换算空洞埋深,水平分布范围则通过扫描剖面的同相轴连续性分析确定。

当雷达波穿越正常土层与缺陷土体界面时,这种电磁响应差异会形成特征明显的反射异常。通过分析回波信号的振幅衰减特性、相位突变位置及波形畸变程度,结合地质雷达图像的同相轴追踪技术,可实现空洞平面位置、埋深及分布范围的精准定位。

在城市地下道路探测中,由于不同地质结构、土壤湿度、路基施工工艺等影响,探测深度略有差异。地下病害体的探测分辨率一般在水平方向不能小于30 cm,洞顶到洞底的高度不能小于10 cm。探地雷达技术可以清晰识别地下管线、地下管线周边塌陷病害体、地下建构筑物及不同介质回填层。

2 常德市某市政道路探测项目实施过程

2.1 工程概况

常德市作为国家海绵城市建设试点城市,某双向4车道市政道路(两侧设非机动车道,沥青路面,总长6.21 km)建于2013年。近年因路面老化沉降、雨水渗漏、管道漏水、局部内涝及车辆超载等因素,路面塌陷频发,导致交通受阻、维护成本攀升。该工程采用三维探地雷达技术探测地下病害体,旨在实现道路风险预判和主动处置,显著增强道路抗灾能力,同时提升日常巡检养护的精准高效性和经济性,保障道路和地下海绵设施作为城市生命线的高效安全运行。

项目道路位置示意图见图2。

2.2 探测方案

根据《城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》(JGJ/T 437—2018),地下病害体可分为脱空、空洞、疏松体、富水体4类,本次工作主要针对常



图2 项目道路位置示意图

德市某市政道路探测这4类病害体。探测采用三维雷达普查的方式,对该道路进行全覆盖探测,探测区域划分为路口间普通路段、重点路段和详查异常区3类。对三维雷达探测出的道路病害,通过二维雷达复测和钻芯检测,以验证探测结果的准确性。探测总里程为27.918 km,选用10通道车载三维雷达、雷达系统进行图测试。经现场试验,设置采集参数如下:采集方式为测距轮触发,触发间距2 cm,扫描速度1 000道/s,采样点500,天线种类为背向屏蔽式地面耦合。

2.3 探测设备

雷达探测工作采用“深度透视”道路探测设备(见图3),包括10通道车载三维探地雷达系统、便携雷达、GPS高精度定位系统和道路高速摄像系统(各设备名称和型号等见表1);探地雷达天线主频为400 MHz,兼顾了探测深度和精度2个重要指标。



图3 三维雷达综合探测车

2.4 数据采集与数据处理

数据处理采用“高速三维阵列雷达后处理软件”。数据处理完成后,依据反射波的波形、振幅及相位特征,在雷达图像上识别出异常区域并初步判断其性质。利用异常点反射波的双程走时 t 和电磁波在土层中的传播速度 V ,通过理论公式 $d=Vi/2$ 计算异常体的初步深度。

表1 探测设备一览表

序号	设备名称	型号/规格	数量
1	承载车(含工作台、机柜、工作椅、储物柜等)	福特全顺	1辆
2	三维雷达	LTDHS400A10	1套
3	自动升降天线安装支架	探测车专用	1套
4	便携计算机	Thinkpad T530	1台
5	综合管理电源		1台
6	高精度GPS移动站	S86+	1套
7	高精度GPS基站	S86+	1套
8	测距编码器	TepS7008C-2048M-5L	1套
9	二维复测探地雷达系统	LTD-2600	1套
10	雷达数据采集软件	高速三维阵列雷达显控软件	1套
11	视频数据采集软件高速	高速三维阵列雷达显控软件	1套
12	雷达数据后处理软件	高速三维阵列雷达后处理软件	1套

实际工程中,不同地下病害体的电磁波反射信号各异,且受路况影响易产生虚假信号。综合反射波的相位、频率和振幅变化,可区分地层自然沉积/填土、地下管线/构筑物或地面干扰引起的异常。因此,探地雷达实测数据需结合地质、道路结构、路况和管网信息综合分析,经数据处理剔除虚假异常,识别真实病害体,使结果符合实际状况。通常,道路塌陷病害体在雷达图像上的表现为:同相轴不连续弯曲,反射波振幅显著增强。

3 探测成果与分析

经三维雷达现场探测,结合资料查阅和实地踏勘,剔除虚假异常数据后,最终确定本次道路探测共发现30处病害体目标,见表2。

查阅道路设计资料,该道路路基结构层依次为厚15 cm沥青混凝土、厚20 cm水泥稳定碎石、厚20 cm级配碎石垫层,其下为夯实土层。

由表2可知,病害体中:脱空1处,埋深0.47 m,可初步推断脱空出现在级配碎石垫层;空洞5处,埋深0.68~0.98 m,可初步推断空洞出现在路基结构层以下的夯实土层;疏松体23处,埋深0.38~1.00 m,可初步推断疏松体在级配碎石垫层、夯实土层均有出现;富水体1处,埋深0.55 m,可初步推断富水体出现在级配碎石垫层和夯实土层的分层附近。

由此可见,道路病害体主要出现在级配碎石垫层及其下夯实土层,由于病害体平面面积不大,级配碎石垫层以上路基结构层尚未破坏,有一定承载能力,因此暂未出现路面塌陷。

表 2 病害体信息表

编号	病害类型	平面面积/m ²	埋深/m	编号	病害类型	平面面积/m ²	埋深/m
1	疏松体	4.19	0.62	16	富水体	1.47	0.55
2	疏松体	5.64	0.55	17	疏松体	32.02	0.76
3	疏松体	4.13	0.65	18	疏松体	33.29	0.83
4	疏松体	2.82	0.67	19	疏松体	3.16	0.69
5	疏松体	2.22	0.44	20	疏松体	8.19	0.75
6	脱空	4.64	0.47	21	疏松体	50.22	0.71
7	疏松体	7.79	1.00	22	疏松体	12.21	0.72
8	疏松体	2.36	0.59	23	疏松体	12.98	0.66
9	疏松体	2.83	0.73	24	疏松体	11.04	0.79
10	疏松体	3.22	0.38	25	疏松体	2.52	0.72
11	疏松体	0.53	0.55	26	疏松体	3.56	0.42
12	空洞	3.63	0.81	27	疏松体	5.45	0.90
13	空洞	0.81	0.98	28	疏松体	2.00	0.82
14	空洞	11.77	0.68	29	空洞	0.87	0.68
15	疏松体	7.88	0.60	30	空洞	0.83	0.98

3.1 脱空

当面层与基层结合密实时,层间反射信号弱,波形平缓规则,无杂乱反射。若路表积水下渗至结构层,将导致层间结合逐渐疏松,局部区域甚至形成脱空或空洞^[11]。在雷达图像中,浅层地层往往呈现出弱反射特征。此时同相轴会出现错断情况,能够观察到上下两个清晰的反射界面。图 4 为本次探测的脱空雷达图谱示例。

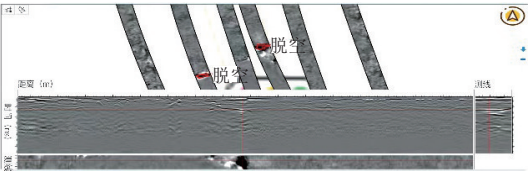


图 4 脱空雷达图谱

3.2 空洞

在雷达图像中,空洞区域呈现出一系列独特特征:空洞部位的反射信号较弱,其两侧存在倾斜的水平反射波,还伴有不规则的散射波。在空洞的垂直界面处,能观察到断面波,空洞下方则有形态不规则且较为显著的散射波。空洞的顶界面显示出强反射特性,至于底界面的底部,则是连续的水平反射波。总体而言,空洞异常区域在雷达图像中通常表现为反射信号能量显著增强,其频率、振幅、相位呈现异常变化特征,底部伴随明显的多次反射波,边界区域常伴随绕射现象^[11-12]。图 5 为本次探测的空洞雷达图谱示例。

3.3 疏松体

在雷达探测图像中,道路内部松散病害通常呈

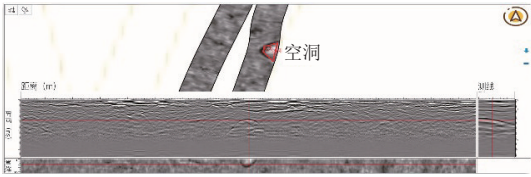


图 5 空洞雷达图谱

现出同相轴横向分布的非连续性特征,其波形构造具有显著的杂乱性和不规则性。这类病害的形成多与施工阶段压实作业不到位、材料性能衰变以及水分渗入等因素密切相关。施工阶段若压实工艺未达标准,会导致基层材料密实度不满足设计要求,难以承受长期交通荷载的反复作用。随着道路使用年限增加,材料颗粒间黏结剂的胶结强度逐步衰减,进而加剧结构层的松散程度^[4]。而水分的侵入会对道路结构完整性产生破坏作用,成为诱发松散病害的重要外在条件。从雷达波形的纵向剖面特征来看,松散病害区域表现为同相轴连续性中断,反射波振幅强度较高,内部波形呈现杂乱无序状态,多次反射波现象较为明显。图 6 为本次探测的疏松体雷达图谱示例。

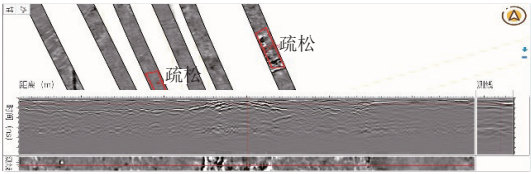


图 6 疏松体雷达图谱

3.4 富水体

富水体因其较高的介电常数导致电磁波传播速度显著降低。当电磁波从高速围岩(如岩土)入射到低速的富水体时,其顶界面会产生负反射系数,使得顶面反射波与入射波反相(或等价于与地表反射波同相)。这一界面通常会形成特征明显的强振幅反射波,表现为清晰的反射同相轴、低频为主、正负相位交替的波组形态,且能量衰减迅速^[11]。由于电磁波在富水介质中衰减剧烈,其内部的反射(如底面反射)通常较弱,主要观测到的是顶面反射波信号。底面反射波的相位则与入射波反向(即与顶面反射波相位相反)。图 7 所示为本次探测的富水体雷达图谱示例。

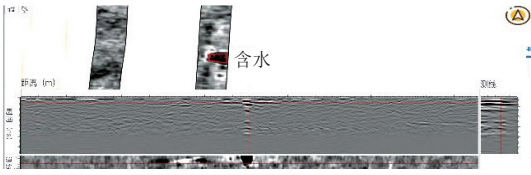


图 7 富水体雷达图谱

3.5 复测及钻芯验证

为验证三维雷达探测结果的准确性,选取编号

12、29这2处空洞病害体进行现场复测。首先根据探测数据和坐标对2处空洞进行现场定位并喷漆标识,然后采用通用型二维探地雷达(型号配置为LTD2600主机和GC400 MHz天线),针对地下3 m深度范围内的异常进行复测;之后,采用钻芯机对异常标识处进行钻孔验证,并采用蛇眼内窥镜对空洞处探测摄像(见图8)。



图8 空洞隐患现场复测及钻芯验证

通过现场实测,2处空洞复测结果见表3。复测结果表明,二维探地雷达出现了明显缺陷信号,钻孔时2处空洞均出现了掉钻情况(钻孔遇到空洞会掉钻),验证了钻孔处下方均为空洞,且空洞出现在结构层以下的夯实土层。

表3 病害体复测结果

编号	病害类型	平面面积/m ²	顶部埋深/m	底部埋深/m
12	空洞	3.75	0.58	0.84
29	空洞	1.10	0.56	1.35

3.6 缺陷处置建议

针对发现的病害体,按其风险等级和环境条件,提出以下处置建议:

(1)脱空:及时排查周边管网运行情况,如病害体目标处于地下构筑物上方,建议开挖修复;如未处于地下构筑物上方,建议钻孔注浆修复,注浆材料宜选用水泥基浆液,水灰比控制在0.8~1.0,注浆压力宜为0.2~0.5 MPa。

(2)空洞:排查周边管网运行情况,查找空洞形成诱因,并及时开挖修复,修复方式可采用挖深回填、碾压密实或注浆处理,回填材料宜选用级配碎石或C20早强混凝土。

(3)土体疏松:定期巡视,频率不低于1次/3月,定期探测,探测频率不低于1次/6月。如发现路面下沉量超过10 mm、裂缝宽度大于5 mm或明显车辙变形,应及时组织修复。

(4)富水体:查找水源,如来源异常应挖掘修复,

必要时设置导排水设施。

4 结 语

(1)在常德市某市政道路更新项目中验证了三维探地雷达技术探测地下病害的有效性和可靠性。结果清晰揭示了道路下方脱空、空洞、疏松体和富水体等病害分布。二维雷达复测及钻芯验证进一步确认了三维探地雷达技术的准确性,表明该技术可为道路病害的精准量化评估提供关键数据支撑。

(2)相比传统手段,该技术实现了非接触、全覆盖检测,避免了交通干扰和结构破坏,提升了检测效率和精度。三维数据可视化功能可直观呈现病害空间形态,为修复方案制定提供多维参考,对推动韧性城市建设具有重要意义。

(3)尽管三维探地雷达技术在道路病害探测中表现出显著优势,但仍存在一定局限性。例如,在地下管网密集、电磁干扰较强的区域,雷达信号易受多重反射和杂波干扰,影响数据解译精度。未来可通过多源数据融合(如结合管线图纸、地质资料)和人工智能算法优化,进一步提升复杂环境下的病害识别能力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王磊,姚光乐,李文宾,等.三维探地雷达道路坍塌隐患智能检测研究与应用[J].公路,2025(5):28-35.
- [3] 周海怡,叶茂,盛碧云,等.探地雷达在城市道路地下空洞检测中的应用分析[J].北方交通,2023(11):43-46.
- [4] 王兆芃.京哈高速沈阳至山海关段改扩建工程三维探地雷达道路内部病害分析[J].北方交通,2025(2):74-79.
- [5] 闫照涛,田进珍,安百州,等.三维探地雷达在银川市道路塌陷隐患探测中的应用[J].世界地质,2022,41(4):882-891.
- [6] 黄哲晓,陶毅荣.基于三维探地雷达的襄荆高速路面病害现状分析[J].交通节能与环保,2024,20(2):151-156.
- [7] 张清彦,马彩云,彭青龙.探地雷达在城市道路地下病害探测中的应用研究——以兰州市为例[J].城市勘测,2023(4):176-179.
- [8] 赵镇,黄勇,冯昆.三维探地雷达在道路检测中的研究与应用[J].测绘通报,2024(2):148-152.
- [9] 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.
- [10] 周南杰,颜俊键,李伟雄,等.基于三维探地雷达和数字图像分析的沥青路面施工质量评价研究[J].公路,2022,67(12):100-106.
- [11] 门光誉,陈维斌,徐腾飞,等.路面结构病害三维探地雷达图谱特征研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(2):129-137.
- [12] 杨添,刘丙宇,林来冠,等.探地雷达检测在市政道路管线施工中的应用[J].建筑技术开发,2021,48(2):103-105.