道路空洞，疏松病害体检测技术研究

殷焕东
北京京能地质工程有限公司，北京 102399
DOI:10.61369/ETQM.2026090025

摘　　要： 针对道路地下空洞与疏松病害体，分析其成因类型及物性特征，物理模拟揭示电磁波和弹性波场响应规律，明确检测分辨能力与有效探测深度的理论约束及参数优选。探地雷达法优化频率选择与抗干扰布设，辅以高密度电法、面波法进行适用性比测，形成多方法协同检测流程并现场验证。数据经背景压制、异常增强与偏移归位处理，实现病害体形态重构与空间定位，进行尺度定量估算，进而融合多维信息划分疏松程度等级，最终完成道路风险定性评价。

关 键 词： 道路空洞；疏松病害；多法协同；风险分级

Research on Detection Technology for Underground Caverns and Loose Deterioration Bodies in Roads

Yin Huandong
Beijing Jingneng Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 102399

Abstract: This paper analyzes the causes and physical characteristics of underground caverns and loose deterioration bodies in roads. Through physical simulation, the response laws of electromagnetic waves and elastic waves are revealed. The theoretical constraints on detection resolution and effective detection depth, as well as parameter optimization, are clarified. The ground-penetrating radar method optimizes frequency selection and anti-interference layout. It is supplemented by high-density electrical methods and surface wave methods for applicability comparison tests, forming a multi-method collaborative detection process and field verification. The data undergo background suppression, anomaly enhancement, and offset repositioning processing to achieve the reconstruction of the disease body morphology and spatial positioning. Quantitative estimation of scale is conducted, and then multi-dimensional information is integrated to classify the degree of looseness. Finally, a qualitative evaluation of road risk is completed.

Keywords: road caverns; loose deterioration; multi-method collaboration; risk classification

引言

城市道路地下空洞与疏松病害体是引发路面塌陷的主要隐患，其隐蔽性强、成因复杂，传统调查手段难以有效识别。针对病害体的物性特征及电磁波、弹性波响应机理，需明确检测分辨能力与有效探测深度的理论约束。本文从成因类型与结构演化入手，通过物理模拟揭示波场响应规律，优化探地雷达参数，并辅以高密度电法、面波法开展协同检测。在此基础上，进行信号处理与多维信息融合，实现病害体形态重构、空间定位及疏松程度分级，最终完成道路风险定性评价。

一、道路空洞与疏松病害体的物性特征及检测机理

（一）城市道路地下空洞与疏松体的主要成因类型及结构演化特征

城市道路地下空洞与疏松体的成因主要为渗漏潜蚀、施工缺陷和振动失稳。渗漏潜蚀由管线渗漏或降水入渗反复冲蚀细粒土形成空洞；施工缺陷因回填压实不足产生不均匀沉降，形成疏松带；振动失稳发生于饱和粉细砂路基，交通振动导致土体疏松。结构演化上，病害体从局部密实度减弱开始，孔隙率增大，弹性波速下降，呈现疏松特征；潜蚀加剧使细粒流失、空穴扩展贯通，形成顶板悬空的空洞，产生显著波阻抗差异面[1]。空洞顶板在荷载和水位波动下渐薄并塌陷，规模随时间扩大。上述成因及演化阶段决定了病害体物性差异，是检测参数选择与数据解译的基础。

（二）病害体在电磁波场与弹性波场中的响应规律及物理模拟

病害体在电磁波与弹性波场中的响应差异源于介质物性改变。电磁波探测时，空洞内空气或积水与周围土体介电常数突

作者简介：殷焕东（1990-），男，汉族，辽宁省大连市庄河市人，本科，道路桥梁高级工程师，主要从事岩土工程勘察工作。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

变，产生强振幅反射及弧形绕射；疏松体因孔隙增大、含水饱和度变化，介电常数降低，表现为同相轴杂乱、振幅衰减加快及主频下移。弹性波场中，疏松区域模量减小、密度降低，纵波、横波出现低速异常，面波频散曲线向低频偏移；空洞则阻断波传播，产生绕射、散射，走时图像呈低速包络。借助物理模拟，通过控制含水率、孔隙度及空洞规模，标定波形特征与病害参数对应规律，为解译提供依据[2]。

（三）检测分辨能力与有效探测深度的理论约束及参数优选原则

检测分辨能力和有效探测深度主要受波动频率、介质衰减以及环境噪声等因素制约。对于探地雷达这种设备而言，中心频率的提高是有利于去缩小垂向分辨的尺度并且增强对小尺寸异常的识别情况的，但是高频电磁波在含水、含黏粒的地层当中衰减会急剧加快，穿透深度也会随之锐减，所以必须要在分辨能力和探测深度之间去做出一个折中处理。通常是把目标体深度的三分之一到二分之一波长当作频率初选的参考依据。弹性波方法是遵循类似的波长和分辨率的关系的，浅层疏松检测是要求震源主频比较高的，而深层空洞搜索需要兼顾低频穿透的优势。参数优选还需要考虑道间距、采样率以及叠加次数这些内容，空间采样不足会造成高频信号假频混叠的情况，从而致使横向分辨出现恶化现象；采样率过低的话波形细节就会丢失，不利于薄层或者微小空穴的识别[3]。总之，现场参数的确定应该依据预估病害深度、围土电性以及弹性属性，遵循由粗到精、深浅兼顾的原则，先进行快速普查然后再进行局部加密复测，目的是在给定的探测深度范围之内最大限度地提高分辨能力。

二、面向空洞疏松体的综合检测方法与现场试验

（一）探地雷达法的工作频率选择、抗干扰布设与数据采集优化

探地雷达法在道路空洞和疏松体检测方面的效果，首先是取决于天线中心频率的合理选择情况。兼顾探测深度和分辨能力的要求，浅层高分辨探测适宜选取400兆赫至900兆赫的频率，而埋深大于2至3米的空洞搜索则应该降低到100兆赫至200兆赫的范围，以免高频信号快速衰减导致深部信息丢失。城市道路环境当中的抗干扰布设同样是非常重要的，测线适宜避开路面金属构筑物、密集钢筋网以及架空高压线缆等强反射源，天线必须和路面紧密贴合并保持匀速行进，必要的时候采用屏蔽天线和硬件滤波来压制环境电磁噪声。在数据采集优化方面，道间距应该满足空间采样定理以防止假频，时间窗宽需要按照最大探测深度和介质电磁波速预估设定，叠加拿道数根据信噪比需求适当增加，并且对重点可疑区段加密双向复测，这样就可以获取信噪比高、连续性好并且波形保真的原始雷达剖面，为后续精细处理和病害判识提供可靠的基础数据[4]。

（二）高密度电法、面波法等辅助手段的适用性分析与效果比测

高密度电法和面波法作为探地雷达的重要辅助手段，其适用性各有特点且需要通过比测验证。高密度电法依靠地下介质电阻率的差异来识别异常情况，对于含水疏松区域或者充水空腔反应比较灵敏，不过由于电极接地困难以及城市路面高阻屏蔽，其分辨率和信噪比常受限制，更加适合用于绿化带或者裸露土质区域的详细调查。面波法利用瑞雷波的频散特性来对浅层横波速度结构进行反演，对于疏松所引起的刚度衰减比较敏感，能够弥补雷达在含水地层穿透不足的缺点，但是它的横向分辨能力比较低，很难识别小规模的空洞。在同一个已知病害路段开展雷达、高密度电法以及面波的综合比测，结果显示雷达对空洞几何形态的刻画最为清晰，高密度电法则对富水疏松带的低阻异常反应非常显著，面波的剪切波速剖面能够有效地界定疏松范围，这三种方法联合起来有助于降低单一方法的多解性[5]。

（三）多方法协同检测流程制定及不同工况下的对比验证

多种方法协同检测流程的制定，以分级筛查、优势互补为基本思路。 第一阶段采用探地雷达沿着车道进行快速扫描，凭借它的高横向分辨率来发现疑似疏松与空洞的异常区段；第二阶段针对雷达所圈定的异常，根据实际情况引入高密度电法或者面波法来开展补充探测工作，前者重点在于判别含水疏松带的低阻分布情况，后者通过横波速度剖面来确认介质强度衰减范围；第三阶段针对存在争议的区段实施加密复测以及钻探验证工作，并且结合钻孔取芯或者动力触探的结果，对物探异常的真伪以及地质属性进行最终标定[6]。为了检验该流程的适用性，选取沥青路面、水泥路面以及绿化带等不同工况来开展对比验证工作，结果表明，在沥青路面条件下雷达的效率和精度都比较好，水泥路面因为钢筋网屏蔽需要降低频率并且加大叠加次数，绿化带可以充分发挥电法与面波的优势，协同流程明显提高了病害检出率并且降低了虚警概率，为后续的精细解译奠定了可靠的基础。

三、检测数据精细解译与病害体综合判识

（一）检测信号的背景压制、异常增强与偏移归位处理技术

检测信号的精细处理是提高病害体辨识度的关键所在，主要围绕背景压制、异常增强以及偏移归位这三个环节来展开。背景压制的目的是剔除直达波、天线耦合波以及路面层间多次反射等水平相干噪声，通常采用均值对消、时空域带通滤波或者小波分解重构的方法，让深部弱异常从强背景干扰中分离出来。异常增强则针对疏松体所引起的振幅弱变化以及频谱下移特征，通过增益恢复、反褶积压缩子波以及瞬时振幅、瞬时相位等属性提取的方式，凸显波形的细微畸变以及低频阴影。偏移归位处理基于电磁波传播速度模型，将绕射波能量收敛到真实位置，消除空洞顶底板弧形绕射所造成的虚假界面，让空洞边界清晰地归位。这三者依次递进，背景压制之后有效信号凸显出来，异常增强使微弱病灶能够被看见，偏移归位则重构真实空间分布，为后续的形态反演以及尺度估算提供条件[7]。

（二）空洞与疏松体的形态重构、空间定位及尺度定量估算

在背景压制处理和偏移成像处理之后，对空洞及疏松体开展形态重构、空间定位和尺度估算。 形态重构依托三维偏移数据体

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

进行，使绕射波收敛、反射界面归位，能够相对准确地刻画空洞的顶底轮廓及横向展布，疏松体异常边界也随之得到增强。 空间定位通过多测线交点和测网平差进行，从而确定病害体的平面坐标及顶面埋深。 尺度定量估算依据双程走时及精细提取的波速参数求取垂向厚度，横向范围则利用振幅横向衰减到半幅点或偏移剖面上异常形态的梯度突变进行圈定。对于疏松体而言，它的疏松程度能够通过弹性波速比、电磁波吸收系数等参数的相对变化来进行半定量评估，并且借助电阻率层析成像或者面波速度剖面来加以约束，这样就可以提高估算结果的确定性[8]。

（三）多维信息融合的疏松程度分级与道路风险定性评价方法

在完成形态重构操作以及尺度估算操作的基础之上，多维信息融合操作综合探地雷达电磁波吸收系数、高密度电阻率异常幅度和面波相速度降低率等参数，开展归一化处理操作。在融合过程当中，依据各个参数对介质疏松程度的敏感差异来赋予权重，其中雷达吸收系数对充水疏松体反映比较灵敏，面波速度对整体骨架软化指示性比较强，电阻率变化则和孔隙比增加密切相关。在分级的时候，轻微疏松仅仅是个别参数小幅度偏离背景，中等疏松各项参数同步弱化，严重疏松则呈现出波速急剧下降、吸收急剧增加以及电阻率大幅度下降的组合特征，依据这些情况将疏松程度划分为三级[9]。道路风险定性评价操作以疏松等级为基础，进一步纳入病害体平面展布范围、顶面埋深、是否位于行车轮迹带以及附近管线渗漏隐患等因素，采用风险矩阵法将路面沉陷塌陷风险定性区分为低风险、中等风险和高风险三级。这种多信息融合判识操作降低了单参数多解性带来的误判风险，让评价结论更加贴近工程实际紧迫程度，为处置优先级的确定提供依据，为城市道路地下隐患的精细化风险评估提供了技术支撑[10]。

结论：综上所述，本研究围绕城市道路地下空洞以及疏松病害体的检测问题，系统地分析了它们的主要成因类型以及物性特征，明确了电磁波和弹性波在病害体中的响应规律，并且提出了检测分辨能力以及有效探测深度的理论约束和参数优选原则。现场试验表明，以探地雷达为主、高密度电法与面波法为辅的多方法协同检测流程，能够适应不同工况并且提高探测可靠性。在数据精细解译方面，通过背景压制、偏移归位以及多维信息融合，实现了病害体的形态重构、空间定位以及疏松程度分级，并且在这个基础之上构建了综合考虑多因素的道路风险定性评价方法，能够为城市道路地下隐患的排查以及处置提供技术依据。

参考文献

[1] 黄方水 . 双频探地雷达道路病害检测模拟与应用研究 [J]. 地质与勘探 ,2022,58(3):45-50.

[2] 刘晨阳 . 路基浅层病害雷达正演及智能识别研究 [J]. 铁道工程学报 ,2023,40(2):52-58.

[3] 段彬 , 贺文文 , 郑兴 , 刘志永 . 探地雷达在城市道路空洞检测中的应用 [J]. 市政技术 ,2022,42(5):67-72.

[4] 张浩浩 . 路基病害探地雷达信号识别技术研究 [J]. 中国矿业大学学报 ,2023,52(4):89-94.

[5] 陈昌彦 , 肖敏 , 贾辉 , 苏兆峰 , 张辉 . 城市道路地下病害成因及基于综合探测的工程分类探讨 [J]. 测绘通报 ,2022,69(7):101-106.

[6] 高西洋 . 城市道路路基病害分类与形成机理及影响分析 [J]. 山西建筑 ,2023,49(11):55-60.

[7] 彭湘桂 . 探地雷达在北京市道路下方病害检测中的研究 [J]. 现代地质 ,2024,38(1):112-118.

[8] 张子伦 . 城市道路路基病害地质雷达三维图像特征分析与智能判识方法研究 [J]. 公路交通科技 ,2022,39(2):45-52.

[9] 熊思宇 . 面向道路病害检测的探地雷达信号处理方法研究 [J]. 桂林电子科技大学学报 ,2023,42(4):67-74.

[10] 杨天春 , 王齐仁 , 张升 . 探地雷达探测道路空洞的数值模拟与现场试验研究 [J]. 地球物理学进展 ,2023,38(4):120-132.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.