

地质雷达法在城市排水管网安全隐患探测中的应用

吴传杰,王 腾

(成都兴蓉市政设施管理有限公司,四川 成都 610000)

摘要: 城市排水管网作为基础设施的关键构成,其健康状况与城市安全运行息息相关。近年来,因排水管网老化导致的土体流失、空洞发育以及路面塌陷等安全隐患频发,严重威胁着城市的正常运转。从地质雷达的工作原理入手,深入剖析由城市排水管网病害引发的地下病害体所具备的地球物理特征,以及这些特征在雷达信号中呈现的波组特征。同时,对排水管网探测过程中常见电磁干扰物的信号特征进行总结归纳。在地质雷达探测过程中,准确识别有效信号并排除干扰信号,是提升地质雷达解译准确性的核心关键。结合实际工程实践,地质雷达法在探测排水管网渗漏、破裂等隐患方面成效显著,能够为城市排水管网的安全评估与维护提供有力的技术支撑。

关键词: 排水管网;安全隐患;地质雷达;干扰识别

中图分类号: TU992.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0356-07

Application of Geological Radar Method in Detecting Hidden Safety Hazards of Urban Drainage Network

WU Chuanjie, WANG Teng

(Chengdu Xingrong Municipal Facilities Management Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: As a key component of infrastructure, the health status of urban drainage networks is closely related to the safe operation of cities. In recent years, the safety hazards such as soil loss, cavity development and road collapse caused by aging drainage networks have become frequent, seriously threatening the normal operation of cities. Starting from the working principle of geological radar, the geophysical characteristics of underground disease bodies caused by urban drainage network diseases, as well as the wave group characteristics presented by these characteristics in radar signals are deeply analyzed. At the same time, the signal characteristics of common electromagnetic interference in the detection process of drainage networks are summarized and concluded. Accurately identifying effective signals and eliminating interference signals during geological radar detection is the core key to improve the accuracy of geological radar interpretation. Combined with the practical engineering practice, the significant achievement of geological radar method in detecting the hidden hazards of leakage and rupture in drainage networks can provide the strong technical support for the safety assessment and maintenance of urban drainage networks.

Keywords: drainage network; hidden safety hazards; geological radar; interference identification

0 引言

随着城市化进程加快,城市排水管网规模持续扩大,截至2023年底,全国城市排水管道总长度已有95.25万km^[1]。由于排水管网长期遭受腐蚀、荷载以及地下水侵蚀等因素影响,管道破裂、路面塌陷等事故频发^[2-3]。为应对这一严峻形势,近年来全国范围内全面开展排水管网安全隐患排查工作,诸多城市更是将隐患排查纳入常态化管理机制。与此同

时,一系列探测规范与标准相继出台并实施^[4-7],包括《城市道路与管线地下病害探测及评价技术规范》(DB11/T 1399—2017)《城镇道路地下病害体探测技术标准》(DB37/T 5139—2019)《道路三维探地雷达探测技术规程》(T/CAS516—2021)《城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准》(JGJ437—2020)等,为排水管网隐患排查工作提供了坚实的技术依据与规范指引。

在现行规范及工程实践中,城市排水管网安全隐患探测的常用方法包括地质雷达法、声呐检测法、管道机器人内窥法、高密度电阻率法等^[4-7],其中地质雷达法凭借非接触式高效探测优势,成为管网浅

收稿日期: 2025-05-27

作者简介: 吴传杰(1994—),男,本科,工程师,从事项目管理
工作。

层隐患排查的核心技术手段。从排水管网的探测需求来看,其核心目标是识别管道结构缺陷(如破裂、渗漏、脱节)及周边土体病害(如空洞、疏松、积水),这类隐患通常分布在地表以下 0.5~5 m 的浅部区域,尤其是管道接口处、腐蚀易损段及施工影响区,埋深越浅(3 m 内)对管网运行安全的威胁越直接,如渗漏引发的土体流失可能导致路面塌陷或管道坍塌。

排水管网的探测环境具有显著特殊性:管网多沿城市道路铺设,探测工作面以硬化路面为主,且需在不停运状态下实施检测,要求技术手段具备高效快速、非破坏性、对耦合条件无特殊依赖的特点。与声呐法(仅适用于满水管道)、内窥法(需管道预处理且效率低)等相比,地质雷达法可通过车载或便携式设备实现连续动态扫描,尤其适合大面积管网普查和复杂工况下的隐患初筛。该技术早期在排水领域主要用于管道定位,2010 年后随管网老化问题凸显,逐步拓展至结构性病害探测,近年在城市内涝防治和生命线安全工程中应用更加广泛。探测重点覆盖老旧城区管网密集区、地铁施工影响段、易积水路段及历史渗漏高发区域。

在技术参数配置上,针对排水管网的浅表层精细探测需求,通常采用高频天线:二维地质雷达使用 100~200 MHz 天线,最大探测深度 5~10 m,适用于管径识别与周边土体脱空检测;三维地质雷达采用 260~470 MHz 阵列天线,探测深度 3~5 m。近年来,随着排水管网检测向“全生命周期监测、隐患精准定位”发展,搭载自动驾驶系统的车载三维雷达检测车应运而生,单日可完成数十公里管网扫描,配合后处理软件实现病害体的空间定位与风险分级。部分城市已试点将地质雷达检测与管道 CCTV 内窥数据融合,形成“快速筛查-精准验证”的立体化检测体系。

尽管地质雷达法在排水管网隐患探测中优势显著,但其技术瓶颈仍集中在复杂电磁环境下的信号解译。排水管网周边常存在电力电缆、金属管道等干扰源,且潮湿土体的高导电性会衰减电磁波信号,导致图像判读存在多解性^[8-14]。针对这一问题,行业正探索基于电性参数反演的干扰识别技术通过分析地下介质介电常数、电导率分布特征,区分管道本体结构与水体、空洞等异常体,结合 AI 图像识别算法训练管网病害典型特征库,逐步提升缺陷识别准确率。实际工程中,常采用“雷达初测+钻孔验证+内窥

复核”的多技术协同模式,在提高检测效率的同时降低误判风险。

1 城市排水管网病害引起地下病害体分析及其地球物理特征

城市排水管网病害是诱发地下病害体形成的因素之一,其本质是管网系统异常导致周边土体结构破坏,形成威胁道路安全的隐患体。排水管网病害与地下病害体的关联可归纳为“管网缺陷→土体损伤→病害体发育”的链式机制,如:施工回填不实、接口渗漏、管材老化、管材腐蚀导致持续渗水,形成土体颗粒流失通道;软土地层土地层管网荷载导致固结沉降;干旱期地下水位骤降(降幅大于 2 m)引发土体有效应力增加,暴雨期地表径流渗入形成动水压力冲刷土体;地铁振动(频率 10~50 Hz)导致管网接口松动,重载交通(轴重大于 10 t)引发路基与管网层间剪切脱空。

当排水管网周边或下方出现空洞、疏松土体时,下部土体承载力会显著下降,进而引发上部道路结构塌陷。现行规范中,排水管网相关地下病害主要分为空洞(或脱空)、疏松体、富水体这 3 种类型。这些地下病害呈现出明显的特性:其一,病害埋藏深度较浅,通常在 10 m 以内;其二,其分布大小与形态并无固定规律,随机性较强;其三,病害具有隐蔽性,在路面尚未出现变形、破坏迹象前,很难被及时察觉^[1-2]。

地下病害体如脱空、空洞、疏松体、富水体等,因结构含水量与含空气量和正常土体存在显著差异,其地球物理特征也截然不同。这种差异集中在电阻率和介电性上,成为地质雷达法探测地下病害体的核心依据^[15]。

深入探究不同类型病害体,其特征各有鲜明表现:

(1)空洞:当排水管网周边存在空洞时,与周围完整岩土体相比,空洞因内部空气占比高,呈现出电阻率高、介电常数小的显著特征,这种特性差异使得其在地质雷达探测中具备独特的信号表现。

(2)疏松体:相较于周围密实岩土体,疏松体内部孔隙结构更为发育,导致其介电常数相对较小、电阻率相对较高,这一地球物理特性成为识别疏松体病害的重要依据。

(3)富水体:富水体由于富含水分,与周围正常岩土体相比,具有低电阻率和高介电常数的特点,其

电学性质的变化在地质雷达探测中能够形成明显的信号响应。

目前,排水管网相关地下病害主要分为空洞、疏松体、富水体这3类。借助图1所示的排水管网相关地下病害体物理模型,能够更直观、形象地认识这些病害体的特性与形态,为后续探测和分析工作提供清晰的参考。

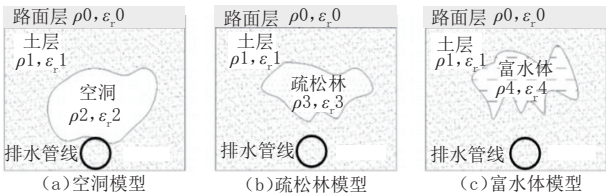


图1 下病害体物理模型

在实际工程探测工作中,空洞、疏松体、富水体等病害体并非孤立存在,它们的分布与发展紧密关联,常呈现相互演化、伴生的现象。这种复杂的关系极大地增加了地下病害体分布的不确定性,也给探测工作带来了更高难度。通过对实际工程数据的研究,表1统计了常见排水管网周边地下介质的电性参数^[16-19]。数据显示,即便为相同介质,随着含水量的变化,其电性特征也会产生显著波动,这进一步凸显了地下病害体探测工作的复杂性与挑战性。

表1 常见道路地下介质电性参数统计表

介质	相对介电常数	电磁波速度/ (m·ns ⁻¹)	衰减/ (dB·m ⁻¹)	电导率/ (ms·m ⁻¹)
沥青混凝土	3~20	—	—	10 ⁻³ ~10 ⁻¹
淡水	80	0.033	2×10 ⁴	0.01
干砂	3~6	0.15	0.01	0.01
饱和砂	23~30	0.06	0.03~0.3	0.1~1.0
土壤	2~32	0.06	1~300	10 ⁻⁴ ~2×10 ⁻²
黏土	2~40	0.06	1~300	2~1 000
空气	1	0.3	0	0

2 探测方法原理

地质雷达法(ground penetrating radar, GPR)作为一项广谱电磁探测技术,主要用于探明地下构造及其空间分布特征。其工作机制如下:借助发射天线向地下介质辐射宽频短脉冲形式的电磁波,当电磁波传播过程中遭遇目标体(如岩土体、地下空洞等)或穿越介电常数不同的介质分界面时,会产生反射与折射效应——反射电磁波携带目标体信息返回地表,由接收天线捕获;而折射电磁波则穿透当前分界面继续向下层介质传播,在更深层的介电差异界面重复发生反射与折射,直至电磁能量被介质完全衰减吸收。电磁波在介质中的传播速度为: $v =$

$$\left[\frac{\mu \varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}};$$
电磁波在介质中的吸收系

数近似为: $\beta \cong \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ 。在描述电磁波传播特性的相关公式中, σ 、 μ 、 ε 分别代表电导率、磁导率与介电常数。通过对公式的分析可知,电磁波在介质中的传播速度与衰减特性,主要取决于电导率、磁导率和介电常数这三个关键参数。

对于常见的非磁性、非导电介质,其传播速度的变化主要由介电常数主导,而衰减特性则主要受控于电导率。正是由于介质的这些物理特性差异,使得不同介质对电磁波的响应不同,这也成为利用探地雷达法分辨地下介质差异的核心理论支撑。在实际探测作业时,接收天线所捕获的反射电磁信号,会由主机系统进行采集与记录。通过深入分析电磁波的双程传播时间、振幅衰减特性,以及同相轴形态变化等数据信息,能够精准呈现测线下方各个反射界面的具体形态。基于此,还可进一步解读目标体的埋藏深度、几何形状以及内部结构参数等关键信息,其具体工作原理可参考图2。

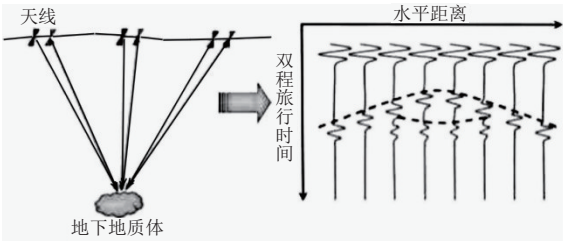


图2 探地雷达基本原理示意图

电磁波在反射界面的响应特征,直接取决于界面两侧介质的波阻抗差异。在平面波入射的情况下,电磁波的反射系数存在特定的计算关系: $R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$,式中: Z_1 、 Z_2 为反射 Z_1 、 Z_2 界面上、下介质的法向波阻抗。与几何光学原理相类似,当雷达波以位移电流效应为主导时,其反射特性主要由介质介电常数的差异所决定。在这种情况下,雷达波反射系数的变化呈现出一定规律,具体可归纳如下:

$$R_{12} \approx \frac{\sqrt{\varepsilon r_1} - \sqrt{\varepsilon r_2}}{\sqrt{\varepsilon r_1} + \sqrt{\varepsilon r_2}}$$

式中: R_{12} 为反射 εr_1 、 εr_2 界面上、下介质的相对介电常数。

与几何光学原理相类似,当雷达波以位移电流效应为主导时,其反射特性主要由介质介电常数的

差异所决定。在此基础上,雷达波反射系数的变化规律可从反射波振幅和极性两方面深入剖析:

(1)反射波振幅特征:反射波振幅的强弱取决于界面两侧介质电磁特性的差异程度,其中介电性质的差异起着关键作用。两侧介质介电参数差异越大,反射信号强度越高。

(2)反射波极性特征:介质介电常数与波速呈负相关关系。当雷达波从低介电常数介质(高速介质)入射至高介电常数介质(低速介质),即由光疏介质进入光密介质时,反射系数为负值,反射波振幅相位发生 180° 反转;反之,当波从低速介质进入高速介质时,反射波振幅相位与入射波保持一致^[17]。

这些反射特征是判别界面两侧介质属性的重要依据(见图3)。在实际应用中,以不同介质界面为例:雷达波从空气介质进入混凝土层,介电常数显著增大,反射波发生相位反转;当波从混凝土层穿透至富水土层,因后者介电常数进一步升高,反射波相位再次反转恢复正向;波从土层进入空洞时,介电常数骤降,反射波相位与入射波方向相同;若土层下方存在充水界面,由于水介质介电常数远高于土层,反射波将再次出现相位反转现象。

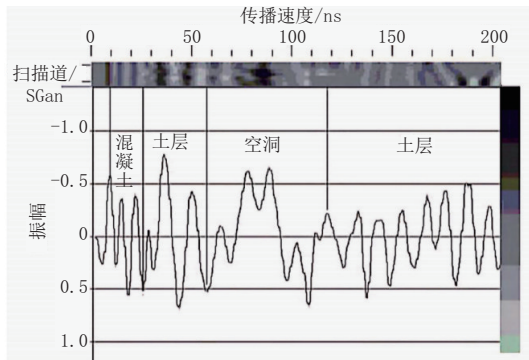


图3 探地雷达反射波振幅与方向示意

从电性参数表现来看,空洞体与疏松体相较于密实土体,均呈现低介电常数与高电阻率的电性特征,而富水区域则表现为高介电常数与低电阻率的相反特性。在反射波振幅特性方面,由于这三类病害体与周边正常土层存在显著的波阻抗差异,其顶部界面均表现出强振幅反射特征—区别在于富水病害体内部信号衰减速率较快,而空洞和疏松体内部的信号衰减相对缓慢;相位特征上,空洞与疏松体的顶部界面反射波相位与入射波一致,底部界面反射波相位则发生 180° 反转,富水区域的相位响应规律恰好相反,呈现顶部反射波反相、底部反射波同相的特征;频率响应特性方面,空洞和疏松体对应的反射

波频率成分较高,富水区域的反射波频率则相对偏低;在雷达波剖面图像中,三类病害体顶部均易形成连续反射波组,其中典型空洞的顶部反射波常呈现双曲线型同相轴,并伴随明显的多次反射波和绕射波现象,而疏松体与富水区域内部的反射波同相轴连续性较差。实际探测中,这些病害类型往往伴随出现并动态演化,例如土体含水率升高可能引发密实度下降形成疏松区,疏松化过程持续发展则可能进一步形成空洞构造。

3 地质雷达在城市排水管网安全隐患探测中的干扰信息分析

地质雷达法面临的地下环境具有显著复杂性和多样性,导致采集的原始数据中混杂着有效信号与各类干扰噪声,极端情况下噪声能量可能完全淹没目标信号^[20]。因此,必须对接收信号实施针对性处理,通过提升资料的信噪比来优化数据质量。信号处理流程涵盖:采用统计滤波方法消除随机噪声成分,运用自适应算法压制规则干扰以净化背景场;通过动态增益补偿技术(包括时变增益控制或分段增益调整)抵消介质对电磁波的衰减效应;结合带通滤波、形态学滤波等手段滤除高频噪声或低频漂移,突出目标体的特征响应;同时通过反褶积处理压制多次反射及余振干扰^[21],最终形成高分辨率的可视化图像,为后续资料解译提供清晰的信号特征依据。

根据干扰信号的传播路径差异,可将其划分为地表干扰源、低空干扰源和地下隐蔽干扰体三类。道路环境中的地表干扰物主要包括金属井盖、钢制铺装等人工构造物,其雷达响应特征表现为强反射振幅、高频信号特征及明显的多次反射现象,且由于埋深较浅,信号到达时间较早;低空干扰源涵盖道路两侧的环卫设施、交通站台、照明灯具、杆状结构物、跨街设施及行驶车辆等,在雷达剖面上常呈现典型的双曲线型同相轴,伴随显著的多次波发育,其影响范围与信号传播路径相关,信号到达时间取决于干扰体与雷达天线的空间距离;地下隐蔽干扰体主要包括路面结构层内的钢筋骨架、埋设管线、地下构筑物等,其雷达信号多表现为强振幅反射及多次反射特征,在雷达图像中形成局部范围的双曲线形态,通常具有较明确的几何识别特征。图4展示了工程应用中归纳的城市排水管网安全隐患探地雷达探测典型干扰物的信号特征图谱。

总体而言,相较于地下病害体,常见干扰源在地

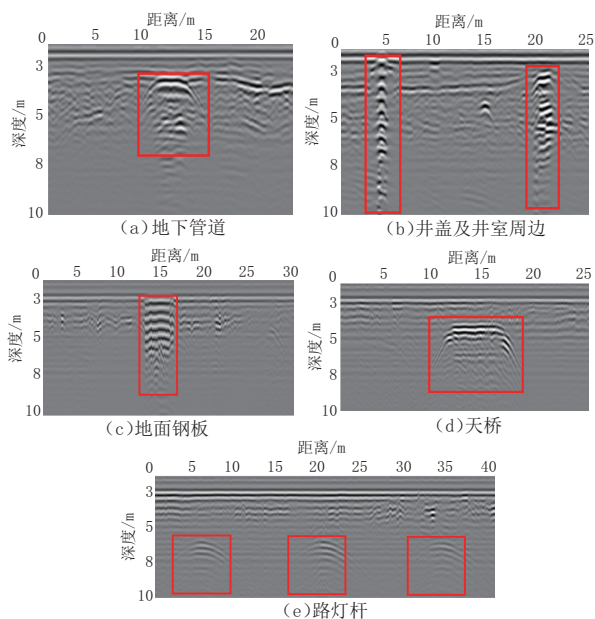


图4 地质雷达典型干扰物特征剖面

质雷达图像上通常呈现出更为规整的形态。像导电性能良好的物质以及具有铁磁性的干扰源,往往会展现出极高的振幅和十分显著的多次反射波特性。在城市环境里,地质雷达波的传播轨迹错综复杂,地质雷达图像的构成成分繁杂。只有依据干扰源与地下异常体在物理属性上的差异,反向推导雷达图像中共反射点的所在位置,才能够识别并剔除干扰源。

4 排水管网渗漏、破裂、塌陷病害的周边空洞探测实例分析

(1) 案例1

在四川省某城区开展的排水管网安全隐患排查工作中,选定的探测区域地面铺设有人行道石材路面。该区域附近地下分布着污水管道,其管底埋深达4.5 m,管径为0.3 m,采用HDPE双壁波纹管作为管道材料。

在本次排水管网探测作业中,首先将测线平行于管道走向进行布置,为后续探测奠定基础。采用地质雷达法实施探测,选用100 MHz天线,以连续测量模式对数据进行采集,探测结果直观呈现于图5。

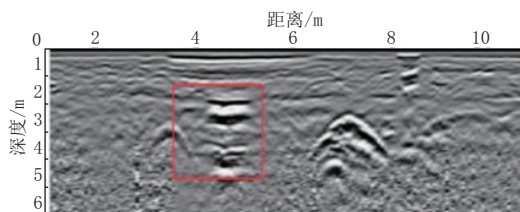


图5 地质雷达波形剖面图

为确保排水管网隐患排查结果的准确性,在相同管道位置同步开展管道CCTV检测,其检测情况见

图6。地质雷达法与管道CCTV检测两种手段相互补充,前者凭借电磁波特性对地下病害体进行宏观探测,后者则能深入管道内部,清晰展现管道结构状况,二者结合为精准判断管网隐患提供了双重保障。



图6 HDPE管道CCTV影像图

对地质雷达波形剖面图进行详细分析后发现,在水平位置5~10 m的区域,雷达波能量分布均匀,同相轴保持连续,呈现出正常的波形特征。然而,在水平位置3~5 m、深度1.5~5 m的区间内,雷达波出现明显异常,能量分布变得杂乱无章,波形紊乱,同相轴出现错断,特别是在水平位置4~5 m、深度2~4 m范围内,波形不仅错断,还发生显著反转。

此外,在雷达波剖面图中,以水平位置7 m为中心,同相轴呈现出独特的双曲线形态。结合现场实际勘察情况判断,该位置存在电缆沟,此波形特征属于典型的空中电磁反射波表现。综合以上异常波形特征,初步推测在水平位置4~5 m、深度1.5~5 m范围内,土体结构疏松,内部存在不规则空洞。

管道CCTV检测结果显示,水平位置4~5 m区域的管道存在多处贯穿性裂痕及不同程度的结构性损坏,具体损坏位置已在CCTV影像中标注。该检测结果与地质雷达探测数据高度契合。为进一步确认,开展钻孔验证(见图7),最终证实物探结果与现场实际状况完全一致,充分体现了地质雷达探测在排水管网隐患排查中的有效性与准确性。



图7 验证钻孔处空洞、裂隙照片

(2) 案例2

在四川省某城区开展的排水管网安全隐患排查工作中,探测区域地面铺设沥青混凝土路面。该区

域附近的地下管道为雨水管道,管底埋深 3.6 m,管径 0.3 m,采用混凝土管作为管道材料。

本次探测采用地质雷达法,选用 200 MHz 天线,以滚轮模式进行数据采集。其中,图 8 展示了地质雷达波形剖面图,直观呈现探测数据;图 9 则为钻孔验证内的实拍照片,用于辅助验证探测结果。

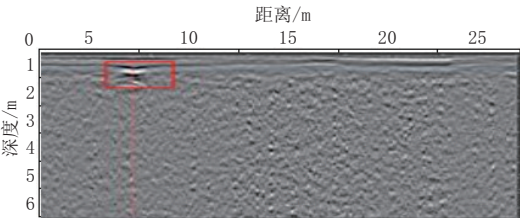


图 8 地质雷达波形剖面图



图 9 验证钻孔处空洞、裂隙照片

对地质雷达波形剖面图的分析显示,在水平位置 5 ~ 10 m、深度 1 ~ 2 m 的区域,雷达波呈现出能量分布不均、波形紊乱的特征,同相轴出现错断,且反射波振幅较强。基于这些异常信号,初步推测该区域存在空洞。

在地质雷达探测过程中,于剖面深度 2 ~ 3 m 范围内,出现了明显且规律的多次波现象。该多次波频率稳定、振幅较高,在剖面深部仍持续存在,严重影响雷达图像的判读。经深入排查,发现沿测线方向分布的路灯电线是引发这一干扰的根源。由于路灯电线与地质雷达接收器保持固定距离,其产生的电磁干扰在雷达图像上呈现为水平多次信号,与地下病害体信号相互叠加,增加了解译难度。为提升探测结果的准确性,技术人员采用滤波、增益调节等针对性数据处理手段。通过上述处理,有效压制了电磁干扰信号,使得地下病害体的特征得以清晰凸显,为后续病害识别与分析提供了可靠的数据基础。

钻探结果进一步验证了上述推测。0 ~ 0.1 m 为沥青层;0.1 ~ 1.8 m 为胶结碎石土,其中在 0.4 ~ 1.8 m 钻探过程中,出现进尺速度加快、局部掉钻及钻孔漏水的情况。借助内窥镜观察发现,该位置存在相互连通的空洞与裂隙。通过管道 CCTV 检测(见图

10),清晰地显示出该区域的管道存在多处贯穿性裂痕,且伴有不同程度的结构性损坏。这一检测结果与地质雷达探测及钻探验证的结论高度吻合,充分证实了物探结果与现场实际状况完全一致,体现了多手段联合检测在排水管网安全隐患排查中的有效性。



图 10 管道 CCTV 影像图

5 结 语

基于地质雷达探测理论,分析了城市排水管网典型地下病害体在雷达剖面上的振幅、相位、频率响应特征,总结了排水管网探测中常见的干扰源类型,从物理属性、信号传播规律等维度探讨了干扰物与管网隐患的识别方法,并结合工程实践形成以下结论:

(1)随着城市化进程加快,排水管网老化引发的渗漏、空洞等安全隐患监测需求日益迫切。随着管网检测技术标准体系的完善,地质雷达法凭借非接触式、高分辨率的优势,成为排水管网隐蔽隐患探测的核心技术手段,且逐步从二维探测向三维成像技术升级,为管网空间结构精细化诊断提供支撑。

(2)排水管网探测环境中,地下金属管线、水体介质及复杂管廊结构易形成多源电磁干扰,导致雷达信号传导特性复杂化。在数据解译中,精准识别干扰信号的差异特征至关重要。当前探测技术正朝着智能化解译方向发展,但仍需以二维雷达理论为基础,同时受限于天线尺寸与探测深度的矛盾,高频三维雷达系统在深层管网检测中存在应用瓶颈。

(3)探地雷达在排水管网隐患探测中具备高效的空

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.2023 年中国城市建设状况公

- 报[Z].2024.
- [2] 胡聿涵,白玉川,徐海珏.近10年中国城市道路塌陷原因及防治对策分析[J].公路,2016,61(9):130-135.
- [3] 陈奇.城市道路塌陷成因与机理分析[J].环球市场,2019(34):346.
- [4] DB11/T 1399—2017,城市道路与管线地下病害探测及评价技术规范[S].
- [5] T/CMEA 2—2018,道路塌陷隐患雷达检测技术规范[S].
- [6] JGJ 437—2020,城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准[S].
- [7] T/CAS 516—2021,道路三维探地雷达探测技术规程[S].
- [8] 肖敏,沈小克,贾辉,等.第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告——城市道路地下病害无损探测技术研究与应用[J].岩土工程技术,2016,30(2):55-62;84.
- [9] 赖刘保,陈昌彦,张辉,等.浅层瞬变电磁法在城市道路地下病害检测中的应用[J].地球物理学进展,2016,31(6):2743-2746.
- [10] 肖敏,陈昌彦,贾辉,等.金属管线对探地雷达探测道路地下病害的干扰[J].物探与化探,2016,40(5):1046-1050.
- [11] 吴冰.道路路基疏松病害及雷达探测典型图像研究[J].市政技术,2012,30(3):31-33;37.
- [12] 郭士礼,段建先,张建锋,等.探地雷达在城市道路塌陷隐患探测中的应用[J].地球物理学进展,2019,34(4):1609-1613.
- [13] 王洪华,龚俊波,王敏玲,等.三维探地雷达技术在道路塌陷空洞探测中的应用[J].CT理论与应用研究,2018,27(5):609-616.
- [14] 许献磊,杨峰,乔旭,等.基于GPR的城市道路地下病害差值检测方法研究[J].科学技术与工程,2016,16(12):83-88.
- [15] 苏鹏.地质雷达法在城市道路塌陷病害探测中的应用[J].华北地震科学,2024,42(1):59-65.
- [16] 郭建.地质灾害勘查地球物理技术手册[M].北京:地质出版社,2003.
- [17] 雷宛,肖宏跃,邓一谦.工程与环境物探教程[M].北京:地质出版社,2006.
- [18] 曾昭发,刘四新,冯晷,等.探地雷达原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2010.
- [19] 苏鹏.综合物探在岩溶区铁路路基与隧道病害探测中的应用研究[D].成都:成都理工大学,2015.
- [20] 张家鸣.提高地质雷达隧道衬砌质量检测效果的几点措施[C]//第十三届海峡两岸隧道与地下工程学术及技术研讨会论文集.北京:中国岩石力学与工程学会地下工程分会,2014.
- [21] 郝建新,魏玉峰,林雄斌.地质雷达探测干扰因素及图像识别研究[J].工程勘察,2008(11):73-75.

(上接第346页)

- [10] 陈杰.倾斜摄影与BIM技术在路基土石方工程中的应用[J].城市道桥与防洪,2024(12):258-261.
- [11] 林婷婷.CAD二次开发技术在建筑制图中的应用[J].建筑与装饰,2023(17):157-159.
- [12] 潘小康,杨苗苗,丁涛声.基于CAD二次开发的公路养护辅助设计系统[J].青海交通科技,2022,34(4):93-97.
- [13] 高会刚.Autolisp语言二次开发AutoCAD与市政道路常用图的快速绘制的研究[J].城市道桥与防洪,2018(8):339-342.
- [14] 黄菊,童思陈,孙开,等.基于CAD二次开发的流场可视化研究[J].水运工程,2024(5):179-184.
- [15] 李洋.CAD二次开发及在矿山测绘工程中的应用探究[J].中国金属通报,2021(12):184-185.