

探地雷达技术在城市道路空洞探测中的应用

刘永伟

(青岛中电众益智能科技发展有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 道路塌陷隐患排查治理专项行动,多使用三维探地雷达设备探测道路空洞,但其在行业中的应用水平存在较大差异,缺乏有效的自检和监管评判方法。基于道路塌陷事故调查,分析空洞的发育状态,对道路空洞类型进行分类,结合探地雷达原理,提出探地雷达技术在道路空洞探测中的基本性能要求。经过工程实践对比与验证,明确了探地雷达技术满足基本性能要求的必要性,为道路空洞探测、塌陷预防提供理论和实践支持,并提高探地雷达技术在城市道路空洞探测中的应用水平。

关键词: 道路空洞;空洞类型;空洞发育状态;探地雷达基本性能要求

中图分类号: U418;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)02-0163-05

Application of Ground-penetrating Radar Technology in Detection of Urban Road Voids

LIU Yongwei

(Qingdao Zhongdian Zhongyi Intelligent Technology Development Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: In the special action for the investigation and treatment of road collapse hazards, three-dimensional ground-penetrating radar (GPR) equipment is frequently used to detect the road voids. However, there are significant differences in the application levels within the industry, and there is a lack of effective self-inspection and supervision evaluation methods. Based on the investigation of road collapse accidents, the development status of voids is analyzed, and the types of road voids are classified. Combined with the GPR principle, the basic performance requirements of GPR technology in the detection of road voids are proposed. Through the comparison and verification of engineering practices, the necessity for ground-penetrating radar technology to meet the basic performance requirements has been clarified, which provides the theoretical and practical supports for the detection of road voids and the prevention of collapses. And the application level of ground-penetrating radar technology in detection of urban road voids is improved.

Keywords: road voids; void types; void development status; basic performance requirements for ground-penetrating radar

0 引言

自2020年起,各省、直辖市、自治区开展道路塌陷隐患排查治理专项行动^[1]。行业内广泛采用探地雷达方法对道路下方的空洞和异常进行探测^[2]。采用探地雷达进行道路空洞检测,在行业中的应用时间尚短,积累的经验较少,但检测任务重。在没有明确的设备性能、人员技术水平要求,以及缺乏有效的监管流程的情况下,不同单位完成工作的效果差异较大。

本文在系统梳理现有研究成果的基础上,结合已经发生的道路塌陷事故,参考行业规程,总结出简

易、有效的探地雷达探测道路空洞的应用方法。

1 道路空洞分类

道路空洞大小是影响道路塌陷发生时间的重要因素^[3]。参考已经发生的道路塌陷事故,将道路空洞划分为即塌型、速塌型、缓塌型和复合型空洞4种类型。

1.1 即塌型空洞

由于防空洞洞室破损,地铁涌水、涌砂等地下工程影响形成的大型空洞,其塌陷发生迅速,被归类为即塌型空洞。

例如,2019年12月1日上午9点28分,广州市某在建地铁发生塌陷。事故过程:9点15分,拱顶透水坍塌,9点28分,地面塌陷。从空洞发育到地面塌

收稿日期: 2025-06-20

作者简介: 刘永伟(1986—),男,学士,工程师,从事探地雷达技术及应用工作。

陷,时长仅为13 min。

又如,2024年7月1日上午8点,西安市某在建地铁发生塌陷。事故过程:6月30日23点,联络通道内出现涌水、涌砂,7月1日上午8点,地面塌陷。从空洞发育到地面塌陷,时长约为9 h。

1.2 速塌型空洞

由于雨、污水等水务管道破损,在地下冲刷形成中等尺寸的空洞,塌陷发生快速,被归类为速塌型空洞。

例如,2024年6月21日,上海市张扬北路发生塌陷。事故过程:6月12日,该处污水管道出现脱节,冲刷周围土体形成地下空洞,6月21日,路面发生塌陷。从空洞发育到地面塌陷,时长约为9 d。

1.3 缓塌型空洞

由于雨、污水管道滴漏,土层疏松、沉降等形成的小型空洞,其塌陷发生缓慢,空洞长期存在,被归类为缓塌型空洞。

例如,2020年1月13日,青海省西宁市道路发生塌陷。事故过程:湿陷性黄土路基因多年渗水,逐步形成地下陷穴,在经常性荷载反复作用下,路基原设计能力失效,承载力下降,引发公交车压塌路面后坠落。从空洞发育到地面塌陷,多年渗水逐步导致塌陷发生。

1.4 复合型空洞

2020年1月13日,青海省西宁市道路发生塌陷。事故过程:因地下陷穴存在,公交车压塌路面后坠落,砸断供水管道和市政电缆,大量的自来水快速泄出,年久失修的防空洞外壁空腔成为水土流失的通道,再次冲刷形成大面积的塌陷和大量的泥浆,造成次生灾害,最终导致坠落人员的伤亡。

在本次塌陷事故中,有浅层的缓塌型空洞、中层的速塌型空洞和深层的即塌型空洞。

2 不同类型空洞的防治方式

2.1 即塌型空洞的防治方式

以地铁施工为例。建立施工、勘察、监测、检测、交通管制等多部门联动机制。在“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”的原则上,增加“先封路”的应急处置措施。

隧道施工前,使用探地雷达低频天线进行地质勘察,探测已存在的疏松区(见图1)。对工程影响范围内的周边道路制定应急处置措施。

掘进过程中,如果发生涌水、涌砂塌陷等事故,

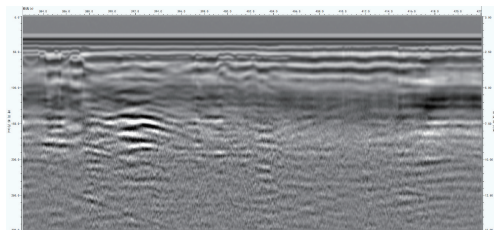


图1 使用低频天线探测工程影响范围内疏松区域

道路塌陷可能在极短的时间内发生,需及时对周边道路进行围蔽。

掘进完成后,加强沉降监测,使用探地雷达低频天线进行地质勘察,探测新发育的疏松区,并周期性地使用中频天线进行浅层道路空洞探测。

2.2 速塌型空洞的防治方式

道路养护巡查到路面沉降时,使用探地雷达中频天线探测道路空洞(见图2),并使用内窥影像方式观察管道内部的缺陷。

管道养护时,对缺陷管道周边进行道路空洞检测。

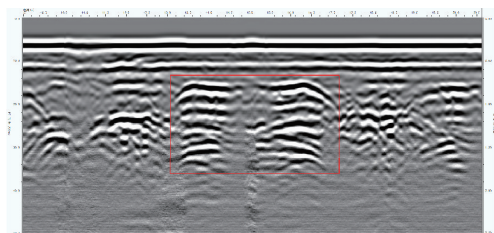


图2 使用中频天线探测空洞

2.3 缓塌型空洞的防治方式

使用车载三维探地雷达进行道路地下病害体大范围普查,消除已有空洞。

3 探地雷达用于缓塌型空洞探测

3.1 缓塌型空洞的发育过程

参考自然平衡拱、空洞顶部塌落、道路结构设计、水稳层性能、临界塌陷值、循环动荷载对塌陷的影响等,结合工程实践进行验证,发现多数缓塌型空洞会发育到道路水稳层底部。

空洞未发育到水稳层底部前,空洞缓慢发育,多为拱形形态。

空洞发育到水稳层底部后,因水稳层具有较高的强度、刚度和稳定性,空洞顶部塌落状态暂停,空洞顶部向四周发育,空洞形态转变为沿水稳层底部扩散的梯形。

空洞发育为梯形状后,在循环动荷载的影响下^[4],水稳层底部产生疲劳裂缝并逐步塌落,最终断裂,导致道路发生塌陷生。

3.2 缓塌型空洞的探地雷达典型数据特征

探地雷达的探测目标,主要分为层面体与孤立体。层面体的典型特征为连续的厚度层位线,孤立体的典型特征为左右有拖尾的弧形。

参照行业经验,多数品牌的探地雷达在探测水稳层时,表现形式为“黑—白—黑”的连续层面;探测空洞时的表现形式为相位特征翻转成“白—黑—白”、有左右拖尾、水稳层层位线中断、顶部连续的孤立体。

根据《深圳市地面坍塌隐患探地雷达检测技术规范》中引用的 SIR-3000 型探地雷达的空洞探测数据(见图 3),能清晰分辨水稳层和空洞特征,表现特征与行业经验一致,可作为探地雷达探测空洞的典型数据特征。

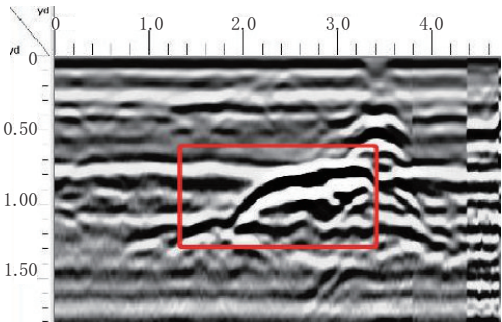


图 3 典型空洞数据图

3.3 探地雷达的基本性能要求

基于道路空洞的发育状态、探地雷达的信号传播原理和典型空洞数据特征,总结出探地雷达用于道路空洞检测的基本要求:探地雷达能清晰地探测到水稳层层位,能清晰分辨空洞造成的水稳层层位错断;在常规情况下,水稳层与空洞的相位特征相反,如果水稳层相位特征为“黑—白—黑”,则空洞相位特征应为“白—黑—白”。

此要求可作为对探地雷达设备性能自检、监管评审的基本要求。

3.4 各品牌探地雷达的性能分析

参考不同规程,以及各厂家公众号中引用的典型数据图,分析各型号探地雷达的设备性能。

3.4.1 意大利 Stream X 三维探地雷达

《深圳市地面坍塌隐患探地雷达检测技术规范》引用的 Stream X 三维探地雷达空洞探测数据如图 4 所示。

通过数据分析,能看到连续的水稳层层位,能看到空洞造成的水稳层层位错断;空洞特征明显,相位为“白—黑—白”;水稳层特征模糊,相位特征肉眼观测为“白—黑—白”。

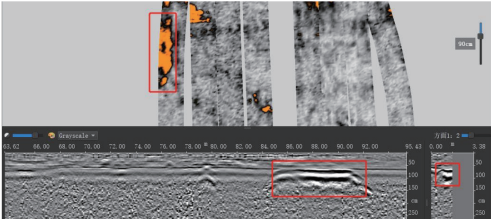


图 4 Stream X 三维探地雷达探测空洞数据

判断此型号设备对小目标、结构变化的探测能力偏弱,能探测中等尺寸速塌型空洞,不能探测小尺寸缓塌型空洞、浅层大尺寸即塌型空洞。

3.4.2 瑞典 MALA MIRA200 三维探地雷达

中国标准化技术协会发布的《三维地质雷达探测技术规程》引用的 MALA MIRA200 三维探地雷达空洞探测数据如图 5 所示。

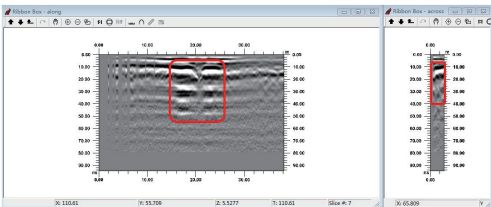


图 5 MALA MIRA200 三维探地雷达探测空洞数据

通过数据分析,不能分辨水稳层层位,不能分辨空洞造成的水稳层层位错断;空洞特征明显,相位为“白—黑—白”。

判断此型号设备对小目标、结构变化的探测能力偏弱,能探测中等尺寸速塌型空洞,不能探测小尺寸缓塌型空洞和浅层大尺寸即塌型空洞。

3.4.3 GER-MIMO200A8RS 三维探地雷达

设备厂家公开发行的宣传资料中引用了三维探地雷达的空洞探测数据(见图 6 和图 7)。

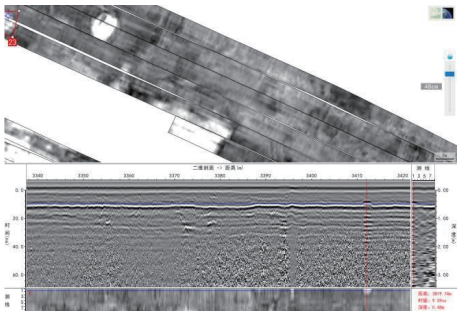


图 6 GER-MIMO200A8RS 三维探地雷达探测脱空数据

通过数据分析,能看到连续的水稳层层位,能看到空洞造成的水稳层层位错断;水稳层特征明显,相位特征肉眼观测为“黑—白—黑”;空洞特征明显,相位为“白—黑—白”。

判断此型号设备能探测小尺寸缓塌型空洞、中等尺寸速塌型空洞和浅层大尺寸即塌型空洞。

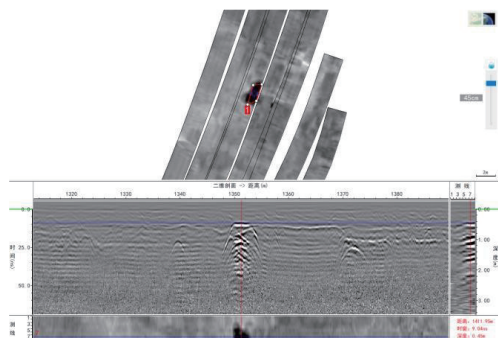


图7 GER-MIMO200A8RS 三维探地雷达探测空洞数据

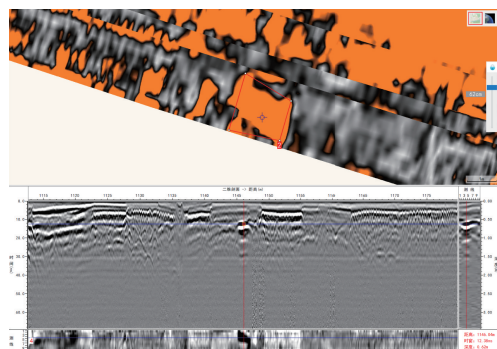


图9 GER-MIMO200A8RS 三维探地雷达探测空洞数据

3.5 工程应用对比

基于对多种品牌三维探地雷达性能的分析,为验证判断结果,本研究于2025年3月在杭州市某道路进行了工程应用对比,对比设备为Stream X和GER-MIMO200A8RS三维探地雷达。

该道路长度为2 km,为双向6车道。因污水管破损冲刷,前期已发生过道路塌陷事故,道路多处进行修补。

3.5.1 探测空洞对比

Stream X 三维探地雷达探测到空洞1处,GER-MIMO200A8RS 三维探地雷达探测到空洞1处。

通过对Stream X 三维探地雷达的探测数据分析(见图8),空洞特征明显,相位特征为“白—黑—白”;周边结构变化难以分辨,不能识别密集钢筋修补段、稀疏钢筋修补段和道路结构变化。

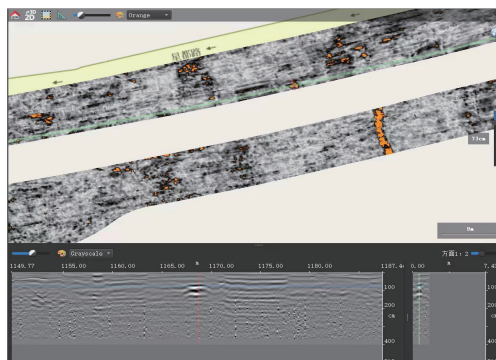


图8 Stream X 三维探地雷达探测空洞数据

通过对GER-MIMO200A8RS 三维探地雷达的探测数据分析(见图9),空洞特征明显,相位特征为“白—黑—白”;周边结构变化清晰可分辨,能清晰分辨密集钢筋修补段、稀疏钢筋修补段和道路结构层沉降。

空洞与周边结构的探测结果与理论分析结论相吻合,Stream X 三维探地雷达能探测中等尺寸即塌型空洞,探测小目标、结构变化的能力偏弱。

3.5.2 探测脱空对比

Stream X 三维探地雷达探测到脱空0处,GER-

MIMO200A8RS 三维探地雷达探测到脱空20处。选取一段数据进行对比。

通过对Stream X 三维探地雷达探测数据的分析(见图10),脱空特征模糊,结构层层位模糊,难以分辨是否脱空,此段道路未判断存在脱空。

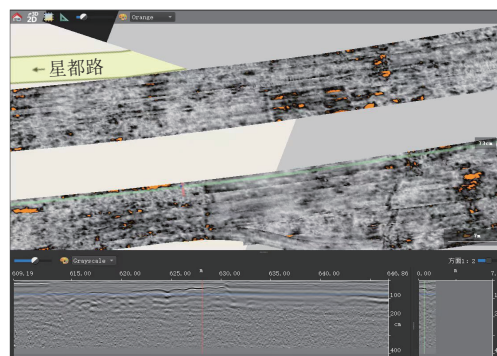


图10 Stream X 三维探地雷达探测脱空数据

通过对GER-MIMO200A8RS 三维探地雷达的探测数据分析(见图11),脱空特征明显,相位特征为“白—黑—白”;结构层特征明显,相位特征为“黑—白—黑”,已钻孔验证。

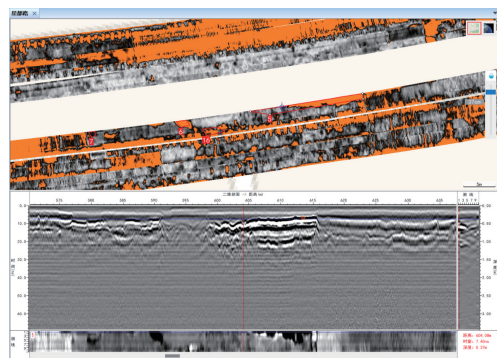


图11 GER-MIMO200A8RS 三维探地雷达探测脱空数据

脱空与周边结构的探测结果与理论分析结论相吻合,Stream X 三维探地雷达不能探测小尺寸缓塌型空洞或脱空,探测小目标、结构变化的能力偏弱。

3.6 大型空洞探测案例分析

多数大型空洞是在短时间内发生塌陷,行业内的探测经验较少。

2024 年,某地铁项目进行沉降监测时发现沉降约 20 cm。邀请某单位使用 Stream X 三维探地雷达进行空洞探测,探测完成后,推断此处道路下方原先存在严重的疏松区域,沉降后存在轻微的疏松区域。

施工单位组织道路养护,开挖后发现大型空洞 1 处,长度约为 30 m,宽度约为 5 m,发育深度约为 2 m,采取注浆修复措施。

修复完成后,管理单位出具《关于进一步加强某地铁在建线路周边空洞隐患排查的通知》,明确要求对排查出的不明结构做好记录,并要求各建设分公司及时组织相关单位会商处理方案。

大型空洞探测结果与理论分析结论相吻合,Stream X 三维探地雷达探测结构变化的能力偏弱,不能分辨浅层大尺寸即塌型空洞与结构的差异。

4 结 语

(1)通过分析多起塌陷事故的发展过程,明确定义道路空洞的类型,并提出不同类型空洞的防治措施。

即塌型空洞防治需与施工控制联动,使用探地雷达的低频天线探测疏松区域。

速塌型空洞防治需与道路养护、管道养护相结合,使用探地雷达的中频天线探测空洞。

缓塌型空洞防治,使用三维探地雷达完成快速普查。

(2)基于探地雷达原理、道路空洞发育过程,明

确探地雷达探测空洞的基本要求。

要求探地雷达能清晰地探测到水稳层层位,能清晰分辨空洞造成的水稳层层位错断;水稳层与空洞相位特征相反,当水稳层的相位特征为“黑—白—黑”时,空洞的相位特征为“白—黑—白”。

行业在进行道路空洞探测工作时,可按此基本要求开展设备性能自检和检测结果监管。

(3)基于不同品牌三维探地雷达的典型数据和工程实践对比,分析了不同品牌三维探地雷达在道路空洞探测作业中的性能状态。

建议行业在后续开展道路空洞探测作业时,培养专业团队,充分理解不同类型的道路空洞发育过程,明确现有设备性能的状态,明确探地雷达在探测空洞、脱空、结构变化方面的典型数据,从而有效完成道路空洞的探测任务。

参考文献:

[1] 上海市道路运输管理局,上海市水务局和上海市住房和城乡建设管理委员会.关于完善道路塌陷隐患防治联合工作机制的通知(沪道运设养〔2023〕156号)[EB/OL].(2023-08-25)[2023-10-12].
<https://www.shanghai.gov.cn/gwkw/search/content/09640bd942d84e249b32e69407b437d6>.

[2] 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.

[3] 陶连金,袁松,安军海.城市道路地下空洞病害发展机理及对路面塌陷的影响[J].黑龙江科技大学学报,2015,25(3):289-293.

[4] 高程鹏.循环动荷载下下伏空洞路面塌陷的模型试验研究[J].水文地质工程地质,2021,48(1):70-77.