

文章编号: 1001-1749(2024)01-0097-06

地质雷达探测道路病害的案例分析与思考

赵亮, 赵增志, 张雷

(中国冶金地质总局地球物理勘查院, 保定 071000)

摘要: 道路是城市发展的动脉, 承载着交通运输、城市服务等重要功能, 道路安全一直是城市安全的重要组成部分。道路病害具有潜伏性、突发性、多因素等特点, 如何快速、有效地找到道路病害就显得尤为重要。通过选取典型案例, 从地质雷达的原理、测区环境、地下构筑物的关系等方面分析总结了三维和二维地质雷达系统探测道路病害的过程。尤其是新建不久的道路存在病害就值得我们仔细分析其中的原因, 探讨雷达检测是否应作为道路检验、验收的一部分。

关键词: 地质雷达; 道路施工; 电磁波; 介电常数; 强度

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.01.11

0 引言

地质雷达 (Ground Penetrating Radar, 简称 GPR), 又称探地雷达, 是一种对地质界面或地下不可见目标体快速探测定位的电磁技术, 并广泛应用于无损探测、城市勘查等领域^[1]。特别是随着近些年高频微电子技术和计算机技术的发展, 地质雷达逐渐由二维探测发展到三维探测, 进一步拓展了地质雷达的应用范围, 探测效果和探测速度也显著提升。本文结合不同的测区环境、地下构筑物的关系, 分析研究地质雷达在道路检测中的应用, 探讨雷达检测作为道路验收手段的补充的必要性。

1 基本原理

地质雷达是利用高频电磁脉冲波的反射来探测地质界面或目标体的, 它是从地面向地下发射电磁波来实现探测的, 故亦称之为探地雷达^[2]。具体为通过发射天线向地下发射一定宽度的高频电磁波 (例如 T_1 、 T_4 等), 接收天线接收来自地下的回波

(例如 R_1 、 R_4 等), 通过计算所接收到的回波的双程走时、振幅变化、频率差和相位差得到地下目标体的位置、形态等相关信息, 从而达到探测目的^[3]。其工作原理见图 1。

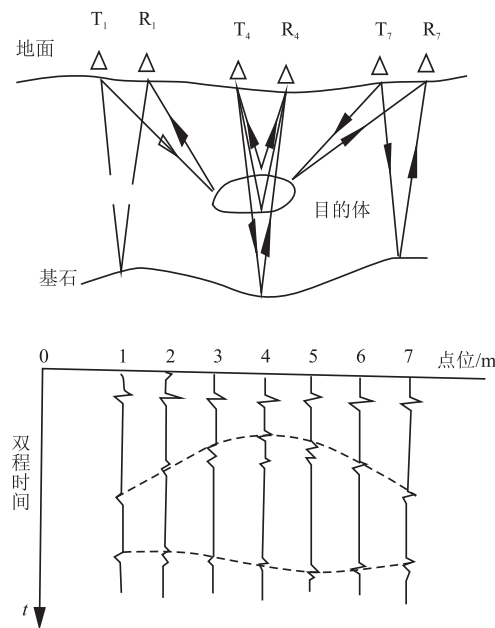


图 1 地质雷达工作原理图

Fig. 1 Working principle of geological radar

收稿日期: 2022-08-03

第一作者: 赵亮(1981—), 男, 本科, 从事雷达探测、地球物理勘探等工作, E-mail: 786431715@qq.com.

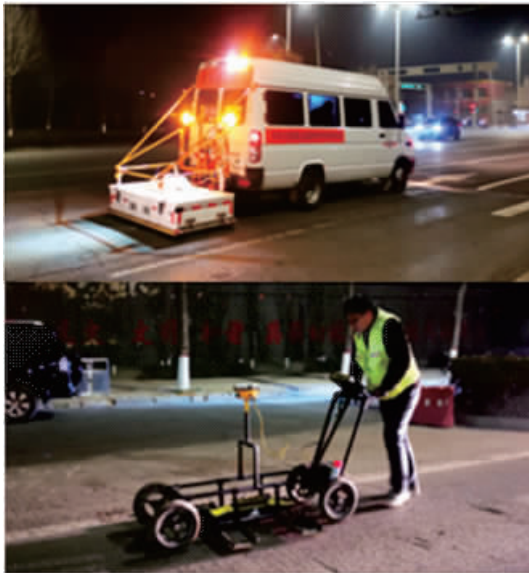


图2 三维雷达和二维雷达工作照

Fig. 2 3D radar and 2D radar working photos

三维地质雷达是在二维地质雷达的基础上发展起来的新设备。与二维雷达相比有比较明显的优势,主要优势有:①雷达数据更“立体”、分辨率更高。三维地质雷达探测好比给目标体做“CT”,不仅能从宏观上反应目标体的形状、大小等信息而且能做到在不同深度上反应出目标体的细节信息。②信息丰富、集成度高。可以根据项目需求进行订制,如拓展到8通道、16通道、24通道等;还可以加装GPS、影像、地图等设备。③施工周期短、速度快。在道路条件允许的情况下,三维地质雷达可以达到10 km/h~20 km/h,更适用于大范围作业^[4-5]。二维雷达对步行道、比较窄的街道进行探测,是三维雷达的有效补充。见图2三维雷达和二维雷达工作照。

2 地质雷达解释基础与过程

2.1 地质雷达解释基础

地质雷达是以高频电磁波传播为基础,通过电磁波在介质中反射和折射等现象来实现对地下介质探测的。影响雷达波在地下介质中传播的参数有很多,主要包括介电常数、磁导率和电导率(电阻率)等,其中决定电磁波场速度的主要因素是介电常数^[6],一般速度与电导率和介电常数呈反比关系。

一般城市道路从上到下可分为面层、基层和路基层。面层一般采用沥青混合料或水泥混凝土混合料,材料内空隙少,湿度较小,介电常数相对较小。基层是道路的主要承重层,多由水泥混合料、石灰、

表1 常见介质电导率、相对介电常数、电磁波传播速度
Tab. 1 Common dielectric conductivity, relative dielectric constant, electromagnetic wave propagation speed

| 介质名称 | 电导率/ $S \cdot m^{-1}$ | 相对介电常数 | 速度/ $m \cdot \mu s^{-1}$ |
|------|-----------------------|--------|--------------------------|
| 空气 | 0 | 1 | 300 |
| 干黏土 | 0.1~1 | 2~6 | 122~212 |
| 湿黏土 | 0.1~1 | 5~40 | 47~134 |
| 干混凝土 | 0.001~0.01 | 10~20 | 67~95 |
| 湿混凝土 | 0.01~1 | 2~6 | 122~212 |
| 干灰岩 | 10.8 | 10.6 | 7 |
| 湿灰岩 | 0.01~0.1 | 8 | 106 |
| 黏性干土 | 0.01~0.1 | 4~10 | 95~150 |
| 黏性湿土 | 0.01~0.1 | 10~30 | 54~95 |
| 干土壤 | 10.4 | 10.3 | 4~10 |
| 湿土壤 | 0.01~0.1 | 10~30 | 54~95 |
| 干沙土 | 10.4 | 0.01 | 4~10 |
| 湿沙土 | 0.01~0.1 | 10~30 | 54~95 |

二灰土等材料铺筑,层内湿度相对较大,介电常数随材料不同而变化。路基层是道路的基础,通常以石灰土、碎砾石、粉煤灰土为主,其空隙更大,含水量更高,介电常数相对较大。道路病害多发育于此层^[7]。常见介质介电常数详见表1。

2.2 地质雷达解释过程

地质雷达探测的解释过程通常包含两部分内容,一是数据处理,二是图像解释。①数据处理主要是对所记录的波形作处理,目的为突出有用的目标信息,抑制随机噪声,改善背景值。常用的方法为:去除零漂、重复测量、带通滤波等。②图像解释主要是结合地质情况判断目标体(异常体)为主^[8]。三维地质雷达的解释相比二维地质雷达来说变的相对容易些。三维数据不仅能从宏观上辨识目标体,而且能从不同深度,不同角度对目标体的细节进行识别。譬如道路中常见的人工构造物:管道、涵洞、地下人防、检修井等等,三维对它们都有很高的辨识度。

3 典型案例分析

3.1 中华道地质雷达探测

3.1.1 测区概况

中华道所处地市处于河北省中部,西临白洋淀,属于河流冲击平原,主要为第三纪沉积层。该市属于暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,年平均降水量为600 mm~900 mm,降水量大部分集中在汛期(7月~8月)。

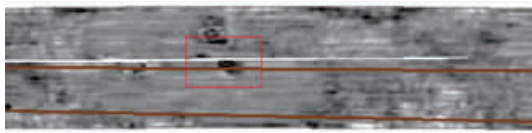


图3 道路局部异常水平切片,深度为 0.5 m
Fig. 3 Local abnormal horizontal slice of road,
with a depth of 0.5 m

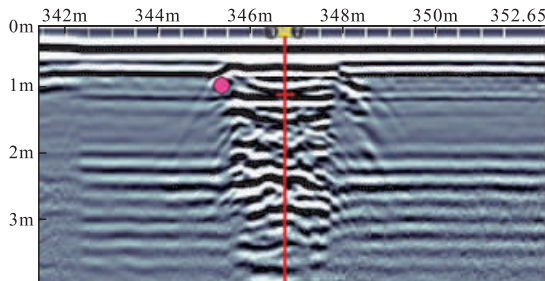


图4 二维雷达剖面图
Fig. 4 Two dimensional radar profile

该道路施工在 7 月~10 月,主要为雨污水管道的更换。管道位于非机动车道下,全长 2.1 km,管道沟槽宽 5.5 m,根据道路情况,结合管道的埋深,大部分采用开挖铺设,局部采用顶管工艺。沟槽深度小于 3 m 时,采用放坡开挖,挖深大于 3 m 时,采用钢板桩支撑开挖。管道铺设后用振动压路机压实,最后施做基层、防水层、面层。

3.1.2 资料解释

在道路施工完毕一个月后进行了地质雷达检测。首先采用三维地质雷达全覆盖检测,雷达参数为:天线中心频率 200 MHz、8 通道、采样时窗 100 ns、采样点数 512、采样间距 2 cm。然后采用二维雷达进行准确定位,二维雷达天线中心频率 200 MHz、采样时窗 60 ns、采样点数 512。最后对异常中心位置进行打孔验证。图 3 为局部异常水平切片,深度为 0.5 m,图 4 为二维雷达剖面图。

在三维地质雷达影像判读过程中选定该异常(图中红框处)。该异常呈扁圆形,平面面积为 $4.2 \text{ m} \times 1.7 \text{ m}$,雷达波强度与其背景形成强烈对比,呈现雷达波强反射。异常从 0.45 m 开始出现,随着深度不断增加,雷达波强度未见显著衰减,依然呈现强反射。

从二维雷达图像上可以看到异常体的雷达反射波振幅明显强于背景值,反射波组形态杂乱,底部反射波与入射波相反(图像呈黑白黑)。雷达波表现为似平板状,底部有多次波发育,靠近深部多次波呈衰

减趋势。推测此异常为空洞异常。

3.1.3 钻孔验证

二维雷达确定好异常范围及中心位置后采用 $\text{C}20$ 的冲击钻进行打孔验证。当钻孔深度到达 0.45 m 左右时突然出现了掉钻现象,随后用工业内窥镜观察钻孔内部情况,发现该异常为空洞病害,通过探杆量测空洞净空为 0.8 m。

道路施工方为了不破坏路面,通过侧面开挖的形式进行灌浆处理。通过侧面的空隙用内窥镜(QV)查看发现:水稳层已经下沉消失,土壤为松散状且没有浸湿痕迹,道路面层底板平整。上述现象说明此处水稳层所用的材料不达标,不是后期雨水冲刷等因素造成。是回填料级配不好,还是施工工艺的问题,亦或是其他原因引起的,有待施工方进一步查明,将近 8 m^3 的土石去向何处施工方也很茫然。图 5 为打孔后的内窥镜图像,图 6 为侧面开挖后的 QV 影像图。

3.2 中河路地质雷达探测

3.2.1 测区概况

中河路所处地市位于浙江省中北部,钱塘江下游,京杭大运河南段,地势低平,河网、湖泊密布。地层主要以粉土、粉砂土为主。该市四季分明,雨量充沛,地下水位偏高。

该道路为全新道路,在 4 月~11 月施工,为双向四车道,中间有绿化隔离,带全长 3.7 km。雨污



图5 内窥镜图像
Fig. 5 Endoscope image



图6 QV 影像图
Fig. 6 QV image

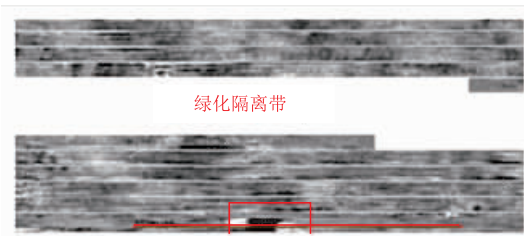


图 7 局部异常水平切片(0.7 m)

Fig. 7 Local abnormal horizontal slice (0.7 m)

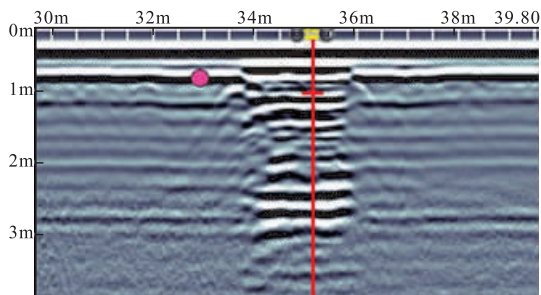


图 8 二维雷达剖面图

Fig. 8 2D radar profile

水管道位于机动车道下路基层,埋深 2.7 m,采用钢板桩支撑开挖铺设。其他管线位于人行道下,埋深 1.5 m 左右。管道铺设后用依次施做道路基层、防水层、面层等,最后振动压路机压实。

3.2.2 资料解释

在次年 1 月份进行了地质雷达检测,距离道路施工完毕近两个月。雷达作业流程与参数设置与中华道检测相同,不再赘述。图 7 为局部异常水平切片,深度为 0.7 m,图 8 为二维雷达剖面图。

在三维地质雷达影像判读过程中选定该异常。该异常呈近似长方形,平面面积为 $3.5\text{ m} \times 3.7\text{ m}$,雷达波强度与其背景形成强烈对比,呈雷达波强反射。异常 0.6 m 开始出现,随着深度不断增加,雷达波强度未见明显衰减,依然呈现强反射,目标体的轮廓也没发生很大变化。根据以往经验可以排除人工构筑物、掩埋物体等。

进一步准确定位采用 200 MHz 二维地质雷达,可以看到该异常与背景值对比强烈,反射波振幅显著加强,明显高于背景值。反射波表现为正向连续平板状形态,多次波明显,相位与入射波反向(图像呈黑白黑)。推测此异常为空洞异常。

3.2.3 钻孔验证

二维雷达确定好异常范围及中心位置后采用 $\text{O}20$ 的冲击钻进行打孔验证。当钻孔深度到达 0.55 m 左右时突然出现了掉钻现象,随后用工业内



图 9 内窥镜图像

Fig. 9 Endoscope image



图 10 平面范围图

Fig. 10 Plan range

窥镜观察钻孔内部情况,发现该异常为空洞异常,由于空洞面积较大,内窥镜亮度不够,所以通过探杆粗略探明内部情况:空洞净空为 0.95 m,路基层上部干燥,底部有水。由于空洞位于排水管道的正上方,结合探杆探明情况,初步分析形成空洞的原因为管道破裂引起水土流失引起。该图 9 为内窥镜图像,图 10 平面范围图。

3.3 其他典型案例

引起道路病害的原因复杂多样,列举一些其他道路检测项目中的典型案例。常见引起道路病害的原因有:回填不合格材料、人防工程破损、管道破损、检修井渗漏等等。检测方法和流程与上述两个案例基本相似,不再赘述。

3.3.1 回填不合格材料引起

该道路病害位于过路排水管道的两侧,为脱空病害。采用了建筑垃圾、石块回填,石块之间留有较大的空隙,这对管道的安全危害极大,在长期重载下石块的棱角可能会挤破管道,引起渗漏,进而发展为空洞病害,影响道路的安全。图 11 为回填石块的图片。

3.3.2 人防工程破损引起

该处道路病害为空洞病害,发生在突降暴雨之后,病害面积较大。通过二维雷达检测发现部分路



图 11 回填材料形成的空隙

Fig. 11 Voids formed by strength backfill material

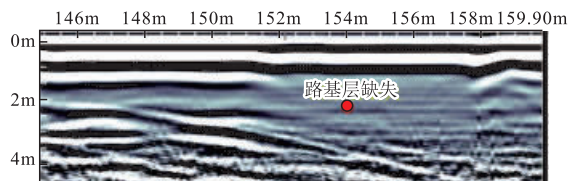


图 12 二维雷达剖面图

Fig. 12 2D radar profile

段水稳层下的路基层(深度大约 1 m)已经缺失。通过后期的管线调查发现该处的土壤被雨水冲入道路旁边废弃的人防工事里(施工前应对人防工程进行妥善处理)。图 12 为二维雷达图,显示连续的路基层已经断裂、缺失。

3.3.3 管道破损引起

该病害位于排水管道的正上方,为脱空病害。从 QV 影像图中可以看出管道两端已经破损断裂,失去了对上方土体的支撑能力,周边部分土体已经流失。管道几乎失去了排水功能。图 13 为管道两端的 QV 影像图。

3.3.4 检查井周边碾压不实引起

这类病害位于检查井周边,尤其是排水检查井更为常见,多为脱空病害。分析形成原因可能有:①回填材料不达标。②压实度不够。检查井周边应逐层回填、逐层夯实。③井内防水层脱落。井内防水



图 13 QV 影像图

Fig. 13 QV image

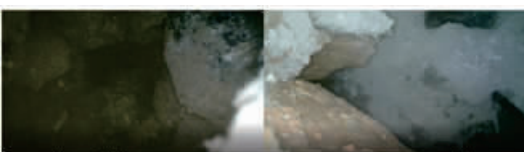


图 14 检查井周边脱空照片

Fig. 14 Photos of void around inspection well

层脱落会造成检修井渗漏,进而造成检修井周边水土流失,从而引起病害。④其他原因。图 14 为检修井周边的脱空病害的照片。此类脱空面积一般不大,但是应该引起足够重视,防止演变为空洞进而造成路面塌陷、下沉影响道路安全。

4 总结

1)通过上述案例的分析可以得出引起道路病害的原因是复杂的、多方面的。工程质量是引起道路病害的部分原因,施工前妥善处理道路基础与其周边设施、构筑物间的关系同样重要。当任一环节出现问题的时候就会引发连锁反应,致使道路病害的发生。例如道路旁人防工程破损、检查井渗漏引起的病害等。

2)三维雷达能快速完成面积性探测,初选出异常位置;结合二维地质雷达进一步准确定位;最后进行钻孔验证的工作模式(流程)对寻找并消除道路病害是行之有效的。探测之前须根据设计方案和探测目标选择合适的频率天线。根据测区试验结果,选择最佳采样时窗、采样间隔、采样点数和叠加次数等基础参数。

3)道路病害的处置不能简单的做回填或灌浆处理,治表更要治里。应该首先查明引发病害的原因,再对症处置,做到有的放矢。

4)针对病害多发的道路应定期做雷达检测,特别是雨季或暴雨过后,及时排除道路病害,确保道路安全畅通。

5)雷达检测能更“立体”的反应道路的状况,是传统的道路验收项目的有效补充。一些道路施工完毕后大多进行了道路验收,且验收都合格。时隔不长就有病害发生是一个值得我们探讨和思考的问题,探讨道路雷达检测的重要性,思考雷达检测加入道路验收项目的必要性。

参考文献:

- [1] 王俊,雷宛,李星,等.综合物探方法在工程基础勘探中的应用[J].物探化探计算技术,2013,35(2):215-220.
WANG J,LEI W,LI X,et al. The application of integrated geophysical prospecting in the engineering foundation exploration[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 35(2): 215-220. (In Chinese)
- [2] 曾昭发.地质雷达方法原理与应用[M].北京:北京科

- 学出版社,2006.
ZENG Z F. Principle and application of GPR method [M]. Beijing: Beijing Science Press,2006. (In Chinese)
- [3] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社, 1994.
LI D X. Method and application of ground penetrating radar[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1994. (In Chinese)
- [4] 蔡勤波,王成亮,张雪. 地质雷达探测城市地下空洞案例分析[J]. 勘察科学技术,2021,4:57-61.
CAI Q B, WANG C L, ZHANG X. Case analysis of urban underground cavity detected by geological radar [J]. Site Investigation Science and Technology, 2021, 4:57-61. (In Chinese)
- [5] 陈义群,肖柏勋. 论探地雷达现状与发展[J]. 工程地球物理学报,2005,2(2):149-155.
CHEN Y Q, XIAO B X. Present situation and development of ground penetrating radar [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics 2005, 2(2):149-155. (In Chinese)
- [6] 于景兰. 国内探地雷达的应用[J]. 地质与勘探,2003, 39(增刊):80.
YU J L. Application of ground penetrating radar in China[J]. Geology and Exploration, 2003, 39: 80. (In Chinese)
- [7] 冯春. 公路工程路基施工[M]. 北京:人民交通出版社, 2013.
FENG C. Subgrade construction of Highway Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2013. (In Chinese)
- [8] 茹瑞典,张金才,戚筱俊. 地质雷达探测技术的应用研究[J]. 工程地质学报,1996,4(2):51-56.
RU R D, ZHANG J C, QI X J. Research on application of GPR detection technology[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(2):51-56. (In Chinese)

Case analysis and thinking of detecting road diseases by ground penetrating radar

ZHAO Liang, ZHAO Zengzhi, ZHANG Lei

(Geophysical Exploration Institute of China Metallurgical Geology administration, Baoding 071000, China)

Abstract: In recent years, road collapse and other diseases have occurred frequently, especially in the rainy season, with a higher frequency. In particular, cavity disease has become one of the crucial disasters in cities. In recent years, finding the diseased body quickly and effectively has become an urgent problem to solve. Road diseases have the characteristics of concealment, outbursts, and multifactorial. Urban roads have high population density, large traffic flow, and complex underground structures. These factors make it challenging to find and lock down underground diseases. Select typical cases, analyze and summarize the process of three-dimensional and two-dimensional geological radar systems detecting underground diseases after the completion of urban road projects from the aspects of the principle of geological radar, the environment of the survey area, and the relationship between underground structures. Especially for newly built roads, the existence of disease bodies is worth careful analysis of the reasons and whether radar detection should be a part of road inspection and acceptance.

Keywords: GPR; road construction; electromagnetic wave; dielectric constant; strength