

市政道路路基常见隐患地质雷达图像特征分析

翁启泰¹, 王艺桦¹, 刘惠阳², 宿文姬^{1*}, 陈博¹, 徐铭泽¹

¹华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州

²广东省地质灾害应急抢险技术中心, 广东 广州

收稿日期: 2023年4月30日; 录用日期: 2023年5月20日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

道路路基隐患对道路性能和行车安全影响重大, 对于道路隐患的检测和预警至关重要。三维地质雷达因其无损、高效的优点而受到广泛应用。但现行规范中关于三维地质雷达图像特点的描述存在空白, 导致图像判断准确率、隐患验证时间增加。本研究结合项目实例, 对路基的疏松体和脱空的图像进行分析对比、误差分析, 明确了其图像特征, 从而提高图像判别的准确率, 对规范中的隐患图像特征描述具有指导和借鉴意义。

关键词

路基病害, 三维地质雷达, 图像特征

Image Characteristic Analysis of Geological Radar for Common Hidden Dangers of Municipal Road Subgrade

Qitai Weng¹, Yihua Wang¹, Huiyang Lui², Wenji Su^{1*}, Bo Chen¹, Mingze Xu¹

¹School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong

²Guangdong Provincial Geological Disaster Emergency and Rescue Technology Center, Guangzhou Guangdong

Received: Apr. 30th, 2023; accepted: May 20th, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

The hidden danger of the road subgrade has a great impact on road performance and driving safety, and it is very important for the detection and early warning of the road hidden danger. 3D geological radar is widely used because of its non-destructive and high efficiency. However, there

*通讯作者。

文章引用: 翁启泰, 王艺桦, 刘惠阳, 宿文姬, 陈博, 徐铭泽. 市政道路路基常见隐患地质雷达图像特征分析[J]. 土木工程, 2023, 12(3): 676-683. DOI: 10.12677/hjce.2023.125076

is a gap in the description of the characteristics of 3D geological radar images in the current specification, which leads to an increase in the accuracy of image judgment and the hidden danger verification time. Combined with the project examples, we analyzed the comparison and error analysis of subgrade loose body and cavity, and clarified the image characteristics, so as to improve the accuracy of image discrimination, which has guidance and reference significance for the hidden danger image feature description in the specification.

Keywords

Subgrade Disease, 3D GPR, Image Features

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来随着对道路病害和隐患排查技术研究的不断深入，三维探地雷达因其无损高效检测的优势而备受关注，其在实际项目中的应用范围也不断扩大。目前地质雷达技术多广泛应用于二维层面，三维地质雷达虽然在本世纪初就得到了关注和重视，但由于数字和计算机技术的限制发展较为缓慢，三维地质雷达的病害检测还在探索阶段，主要根据更加直观的水平切片来进行半定量识别研究，且仍旧以人工判别为主，识别病害的准确率主要依赖于技术人员的经验，现行规范中，三维地质雷达图像特征的规定存在不足，导致图像判别的准确率低，使得验证时间增加、效率降低。

本文通过对深圳市某市政道路使用三维地质雷达探测，并现场验证，针对土质疏松区和脱空区，发现实际病害类型和对比规范中病害图像特征得到的结果存在差异，分析三维地质雷达图像特征，对提升图像特征分析准确率提出建议，对于规范中的隐患图像特征描述以及珠江三角洲地质雷达道路病害检测图像分析具有指导和借鉴意义。

2. 地质雷达工作原理

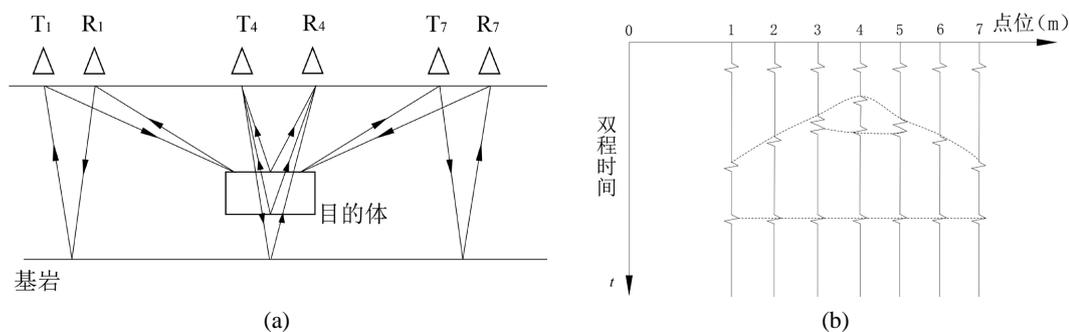


Figure 1. Diagram of the radar record

图 1. 雷达原理图

地质雷达向目标体发射高频脉冲电磁波，由接收天线接收目标体的反射电磁波，探测目标体空间位置及分布，如图 1(a)所示[1]。电磁波的传播取决于介质的电性，介质的电性主要有电导率 μ 和介电常数

ε ，前者主要影响电磁波的穿透(探测)深度，在电导率适中的情况下，后者决定电磁波在该物体中的传播速度，在不同电性的地质体的分界面上，会产生回波，反射回的电磁波被与发射天线同步移动接收天线接收后，由雷达主机精确记录下反射回的电磁波的运动特征，再通过信号技术处理，形成全断面的扫描图。

雷达图形用脉冲反射波的形式记录的示意图如图 1(b)所示，图上一个简单的地质模型画出了波形的记录[2]。

地质雷达主要技术参数有天线中心频率、采样时窗长度和分辨率等。

天线中心频率与电磁波在道路介质中传播的波长有关，波长 λ_m 的公式为：

$$\lambda_m = \frac{c}{f_c \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \quad (1)$$

式中： f_c 为脉冲信号的中心频率； c 为光速； ε_r 为介电常数； μ_r 为磁导率[3]。

探测深度与天线频率有着密不可分的关系，其他条件一定时，天线中心频率越高，探测深度越浅，反之则探测深度越深。

采样时窗长度是指从地质雷达开始采取数据到完成数据采集中间的这一时间段，时窗对数据完整度和垂向分辨率有很大的影响，一般探测深度 H 选取为目标深度的 1.5 倍，可以尽可能地保证数据完整并提高垂向分辨率[4]。

分辨率是指探地雷达能够区分两个在空间上相距很近的目标的能力，分为垂直分辨率和水平分辨率，在路面检测中更重要的是垂直分辨率。假设在同一竖直线上有两个目标存在，二者间距为 Δd ，若地质雷达能够分辨上述二者目标的回波信号，则必须满足[5]：

$$\Delta d \geq \frac{v}{4f_c} = \frac{\lambda_m}{4} \quad (2)$$

在实际应用中，所选定的天线中心频率越高分辨率越高，但中心频率高也会导致其探测深度小，所以要多方面综合考虑，合理选定兼顾探测深度和分辨率的天线中心频率。

本文采用真三维地质雷达，有横向极化频率 600 MHz 和纵向极化 200 MHz 两种，通道个数分别为 10 道和 19 道。真三维雷达应用阵列式天线，由多个发射天线和多个接收天线同时工作，实现实时三维数据采集[6]，如图 2。

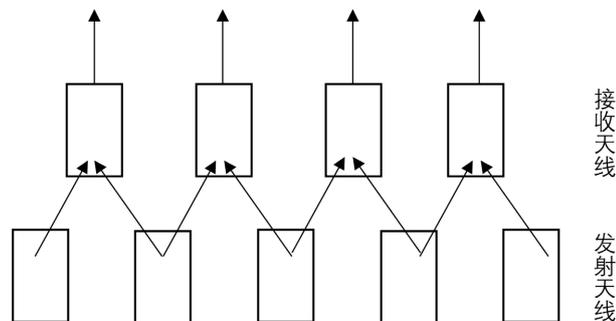


Figure 2. 3D radar antenna array
图 2. 三维雷达天线阵列

地质雷达技术目前的应用已非常普遍，但仍然存在尚待解决的问题，比如其中三个规范的缺失，首先是野外勘探采集参数选取缺少成熟的规范约束，第二是资料处理难度大，缺少相应的规范和方法去除

干扰，最后是图像分析方法不成熟，缺少三维地质雷达图像病害特征的规范对照[7]。

3. 规范中的图像特征

根据《道路塌陷隐患雷达检测技术导则》(RISN-TG024-2016) [8] 7.4，列出不同类型异常的雷达图像一般特征如表 1。

Table 1. Standard images and characteristics of road hidden danger

表 1. 道路隐患点规范图像及特征

雷达图像	雷达图像特征
	土体疏松区：在雷达图像上一般表现为同相轴横向不连续，波形结构较为杂乱、不规则。
	脱空：在雷达图像上一般表现为浅层地层弱反射，同相轴发生错断存在上、下两个明显的反射界面。

4. 工程案例分析

4.1. 工程概况

本项目应用车载三维地质雷达对深圳市南山区某条长约 13 km 的道次进行检测，检测轨迹共计 11.12 km。

采用三维地质雷达检测并解译得到了 3 处疑似疏松体、20 处疑似脱空，共 23 处疑似隐患点，并对所有疑似隐患点采用了下文所提及的方法进行图像识别和验证，同时，对 23 处疑似隐患点钻孔验证。

4.2. 疑似疏松体图像分析

图 3 和图 4 为疑似疏松体点 NHDD-06 的三维探地雷达天线中心频率为 200 MHz 与 600 MHz 的图像。

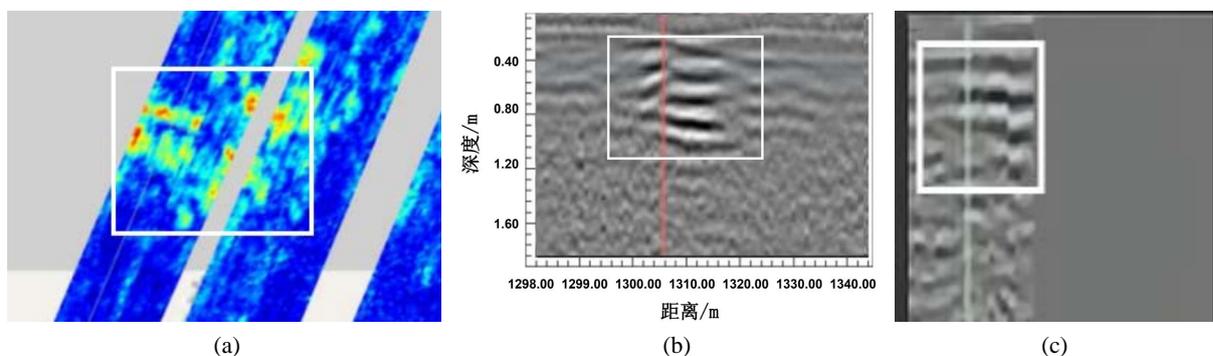


Figure 3. 3D GPR 200 MHz image of NHDD-06. (a) Horizontal slice; (b) Longitudinal sections; (c) Cross section

图 3. 疑似疏松体点 NHDD-06 的三维探地雷达 200 MHz 图像。(a) 水平切片；(b) 纵向剖面；(c) 横断面

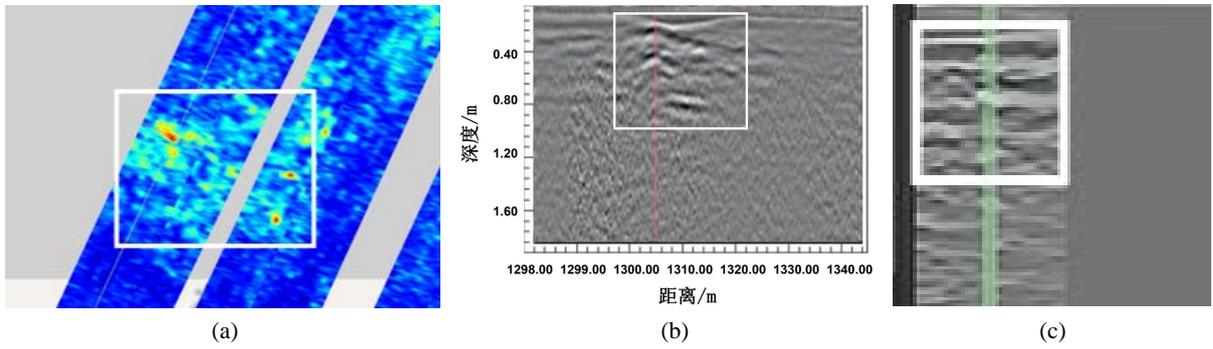


Figure 4. 3D GPR 600 MHz image of NHDD-06. (a) Horizontal slice; (b) Longitudinal sections; (c) Cross section
图 4. 疑似疏松体点 NHDD-06 的三维探地雷达 600 MHz 图像。(a) 水平切片；(b) 纵向剖面；(c) 横断面

图 3(a)和图 4(a)中异常体水平切片形态破碎、分散，呈现不规则的形状；与其对应的图 3(b)纵向剖面中异常形态不规则，图像在同相轴处发生错断。考虑到图像部分呈现出水平反射截面，可能为局部脱空，在图 4(b)中图形态异常不规则，同相轴横向不连续，波形结构较为杂乱、不规则，与《导则》中疏松体图像特征大致相符；横断面图像与纵断面特征相似。可以初步判定该疑似隐患为疑似疏松体，并可以从图像中得到疏松体的尺寸约为： $1.4 \times 1.5 \times 0.35$ m，图 3(b)中存在的水平反射截面为分辨率较低导致的。

4.3. 疑似脱空点图像分析

图 5 和图 6 为疑似脱空点 NHDD-01 的三维探地雷达天线中心频率为 200 MHz 与 600 MHz 的图像。

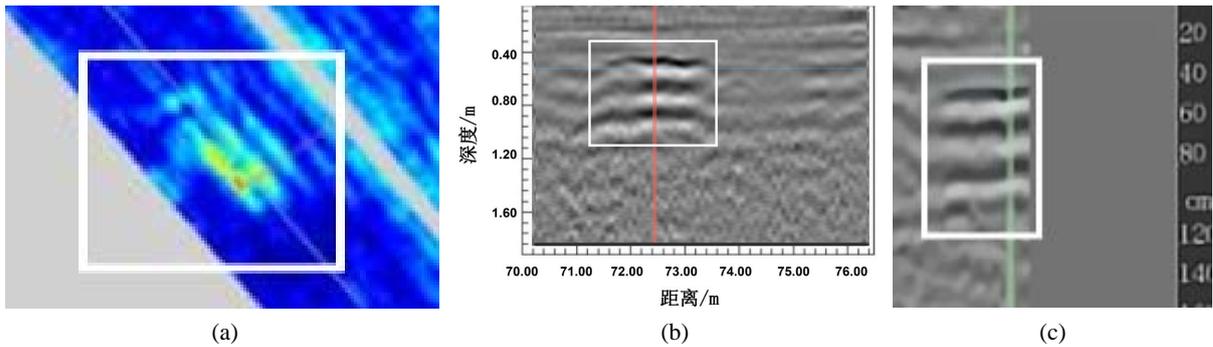


Figure 5. 3D GPR 200 MHz image of NHDD-01. (a) Horizontal slice; (b) Longitudinal sections; (c) Cross section
图 5. 疑似隐患点 NHDD-01 的三维探地雷达 200 MHz 图像。(a) 水平切片；(b) 纵向剖面；(c) 横断面

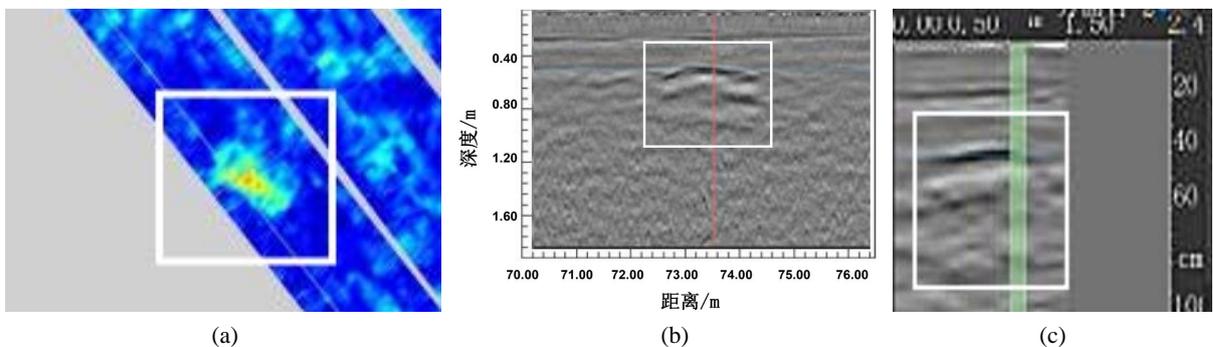


Figure 6. 3D GPR 600 MHz image of NHDD-01. (a) Horizontal slice; (b) Longitudinal sections; (c) Cross section
图 6. 疑似隐患点 NHDD-01 的三维探地雷达 600 MHz 图像。(a) 水平切片；(b) 纵向剖面；(c) 横断面

图 5(a)和图 6(a)中反应强烈处为异常区域, 异常体近似椭圆形, 有明显的边界; 与其对应的图 5(b)和图 6(b)纵向剖面图中异常区域反射波振幅明显增强, 异常形态存在上下两个分界面。与《导则》中脱空图像特征一致。天线中心频率为 600 MHz 的图像相较于 200 MHz 的图像, 分辨率更高, 脱空顶板的形态更加清晰, 但是探测的深度较 200 MHz 浅, 于图像中只能观察到上顶板。初步判定该案例为脱空异常, 并可从图像中得到该脱空顶部埋深约为 0.4 m, 尺寸约为: $1.8 \times 0.8 \times 0.8$ m。

4.4. 钻孔验证结果及原因分析

对地质雷达检测得到的疑似隐患进行钻孔验证, 得到的结果如表 2 所示。在排除设备使用问题后, 从表中可以发现, 对于隐患点的判读存在将无异常判断为疏松体和脱空、疏松体误判为脱空的情况, 因此, 仅依据《导则》的图像判读其准确率较低, 下文将根据检测结果对市政道路中疏松体和脱空隐患图像特征进行辨析。

Table 2. Comparison of the results before and after validation
表 2. 验证前后结果对比

图像结果(个)	验证结果(个)	
	疑似疏松体	疑似脱空
疏松体	2	7
脱空	0	7
无异常	1	6

脱空是指路面结构层的不连续接触现象, 通常指面层与路基之间存在空隙[9]。如图 7 所示, 雷达图像中的脱空应出现在道路面层以下, 通常为 0.25~0.45 m。并且, 脱空实际上就是面层与路基间的空腔, 因此, 在水平切片中能观察到完整的边界, 且反应最强烈的区域应集中。圆球状的脱空呈倒悬的双曲线, 较大的脱空的雷达图像纵向切片中有明显的顶板, 呈现出“黑白黑”或“白黑白”变化, 伴随有多次波和绕射波。

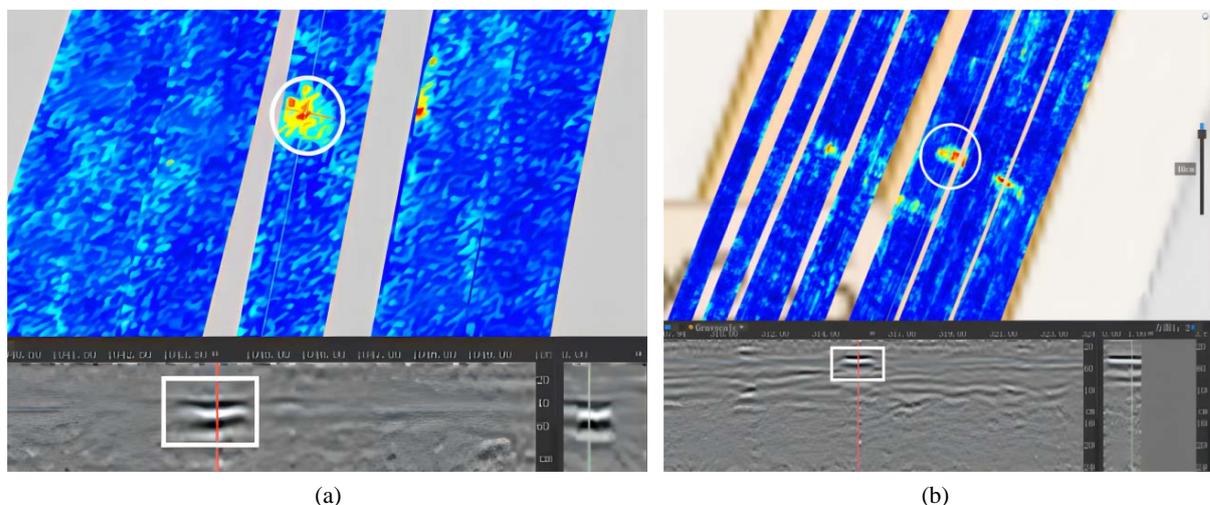


Figure 7. Typical void image. (a) NSDD-06 image; (b) NHDD-10 image

图 7. 典型脱空图像。(a) 疑似隐患点 NSDD-06 图像; (b) 疑似隐患点 NHDD-10 图像

疏松体是指路基土体颗粒松散，土体孔隙率高，充满空隙。对于疏松体可以分为：多孔型、平行层状疏松、倾斜层状疏松、V型疏松[10]。水平切面图像破碎，反应最强烈的区域分散，或总体面积较大、反应中等强烈。较为常见的多孔型疏松如图8(a)所示，图像纵向截面反射波较多且杂乱无章，同相轴不连续、错位、畸形等特征。

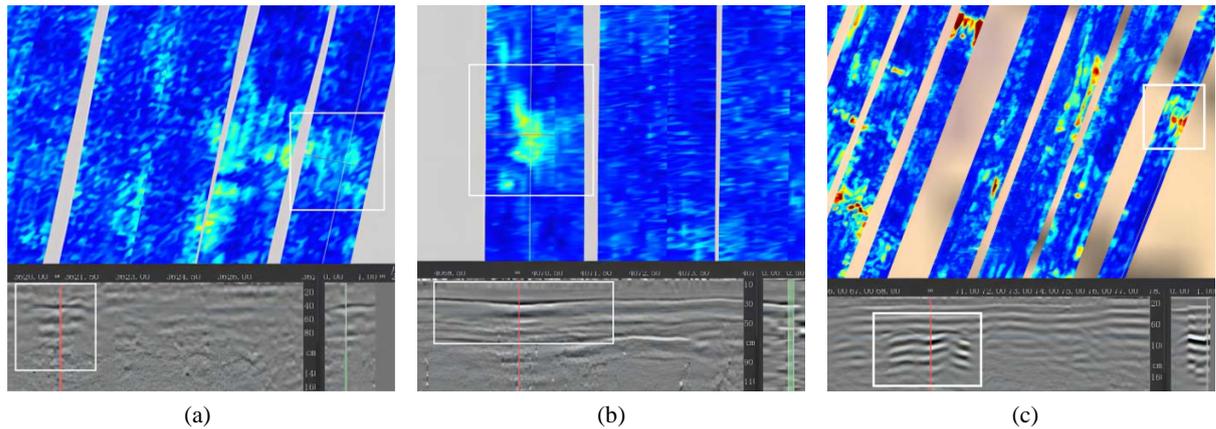


Figure 8. Loose body radar image. (a) NHDD-02 image; (b) NSDD-08 image; (c) NHDD-12 image

图 8. 疏松体雷达图像。(a) 疑似隐患点 NHDD-02 图像；(b) 疑似隐患点 NSDD-08 图像；(c) 疑似隐患点 NHDD-12 图像

如图8(b)和图8(c)为误判为脱空的疏松体图像，分别为V型疏松、平行层状疏松，由于其含水较多，呈现出与脱空相类似的形态特征，但是与脱空不同的是，疏松体的雷达图像反应较弱，在图像中体现出来为颜色较浅，且在水平切片中疏松体反应区域较为分散、破碎。

地下的管道、空间附属物、地下工程加固体等会在雷达图像形成与空洞、脱空、疏松体等道路病害的类似的特征，会对图像的判别造成影响，从而降低准确率。如图9所示，为一处误判为脱空的疑似隐患点，其图像特征与脱空的图像特征相吻合，经进一步现场调查和验证，判断为一处地下井室。来自地下的干扰而出现的错误在进行雷达图像判读时不容易被察觉，因此需结合现场勘探资料、地下管线资料等排除干扰。

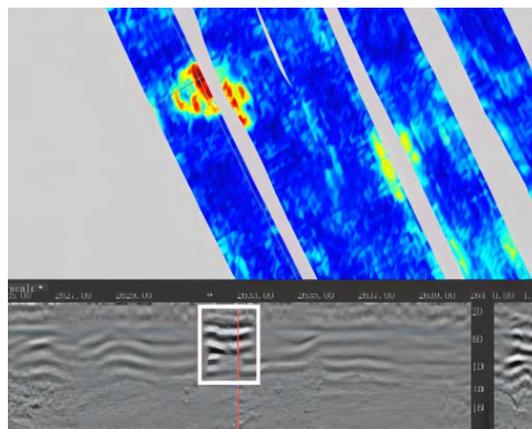


Figure 9. Interference radar image of the underground well chamber

图 9. 地下井室干扰雷达图像

5. 结论与建议

更准确的雷达图像判读能够减少验证的时间,提高工作效率。但雷达图像存在多解性,同一个图像,不同的技术人员进行解读可能会得到不同的结果。所以,技术人员应当明确不同隐患类型的雷达图像特征,积累图像判读的经验。三维雷达可以得到隐患水平剖面、纵向剖面和横断面的图像,可以获得更多的信息,使得结果更加可靠。因此需要对于三维地质雷达图像特征的有关规范和更为详细的说明辅助判断。

1) 疏松体: 图像水平切片形态破碎, 雷达反应异常区域分散, 反应程度较弱。纵向切片与横向切片中形态较为杂乱, 同相轴横向不连续。

2) 脱空: 一般发生在面层与路基分界 0.25~0.45 m 处。图像水平切片有着明显的边界线, 反应异常区域集中。对于圆球状的脱空, 纵向切片呈现倒悬双曲线的形态。对于体积较大的脱空, 可以观察到明显的顶板, 呈现出“黑白黑”或“白黑白”变化, 伴随有多次波和绕射波。

3) 部分疏松体的雷达图像与脱空相似, 其与脱空的主要区别在于雷达反应较弱, 水平切片的形态也更分散。

4) 对于与脱空、疏松等隐患图像特征相类似的地下结构物的干扰, 无法简单地通过图像进行排除, 因此需借助野外勘察资料、地下管线资料等进行辅助判断。

基金项目

广东省大学生创新创业训练计划项目资助(编号: S202110561263)。

参考文献

- [1] 钟世航, 孙宏志, 杨峰, 等. 探地雷达地质探查及检测技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2016: 3-6.
- [2] 翠玉萍, 董雨明, 王世成, 等. 道路深层病害雷达无损检测技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021: 8-9.
- [3] 刘志声, 王乾, 万捷. 路用探地雷达脱空检测参数研究[J]. 现代电子技术, 2009, 32(20): 163-166.
- [4] 赵华, 李才明, 杜斌, 等. 探地雷达不同参数对数据采集和处理的影响[J]. 四川地震, 2008(3): 31-35.
- [5] 汪勃. 探地雷达检测公路隧道参数研究[J]. 中国高新技术企业, 2013(30): 42-44.
- [6] 赵镡. 三维探地雷达在城市地下管线及周边土体病害探测中的应用[J]. 测绘通报, 2016(S1): 73-76.
- [7] 杨晓华, 温世儒, 郭元术, 等. 岩溶区公路隧道地质雷达超前探测技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020: 10-11.
- [8] 住房和城乡建设部标准定额研究所. RISN-TG024-2016, 道路塌陷隐患雷达检测技术导则[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [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(3): 383-388.
- [10] 刘晨阳. 路基浅层病害雷达正演及智能识别研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.