

三维探地雷达在大坝面板脱空检测中的应用

刘东洋*, 边祥会

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司工程勘测科研院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年6月19日; 录用日期: 2025年9月17日; 发布日期: 2025年9月25日

摘 要

混凝土面板堆石坝是水电建设中应用较为广泛的一种坝型, 面板脱空已经成为混凝土堆石坝最常见的病害, 而抽水蓄能电站混凝土堆石坝面板脱空更容易发展和扩大, 定期检测和治理对混凝土面板堆石坝的安全性具有重要意义。本文作者对三维探地雷达检测系统进行改造, 使其能适用于大坝面板脱空检测。经实地应用和验证, 三维探地雷达法在混凝土堆石坝面板脱空检测中效果良好, 能够客观反映异常体的宏观特征, 成像形象直观, 探测可靠度高, 能有效避免误判、漏判, 该技术可广泛应用于大坝面板病害的检测中。

关键词

三维探地雷达, 面板脱空, 堆石坝

The Application of 3D Ground Penetrating Radar in Detection of Panel Debonding of Dams

Dongyang Liu*, Xianghui Bian

Engineering Survey and Research Institute, PowerChina Zhongnan Engineer Corporation Limited, Changsha Hunan

Received: Jun. 19th, 2025; accepted: Sep. 17th, 2025; published: Sep. 25th, 2025

Abstract

The concrete-faced rockfill dam (CFRD) is a widely used dam type in hydropower construction. Panel debonding has become the most common problem for CFRDs. For pumped-storage power stations, panel debonding of CFRDs is more likely to develop and expand. Regular detection and treatment are of great significance to the safety of CFRDs. The author of this paper has modified the 3D ground-

*通讯作者。

文章引用: 刘东洋, 边祥会. 三维探地雷达在大坝面板脱空检测中的应用[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(9): 1350-1359.
DOI: 10.12677/ag.2025.159125

penetrating radar (GPR) detection system to make it suitable for dam panel debonding detection. Applications and verification have shown that the 3D GPR method works well in detecting panel debonding of CFRDs. It can objectively reflect the macroscopic characteristics of the abnormal body, with vivid imaging and high reliability in detection. It can effectively avoid misjudgment and omission. This technology can be widely used in the detection of dam panel diseases.

Keywords

3D Ground Penetrating Radar, Panel Debonding, Rockfill Dam

Copyright © 2025 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. 概述

混凝土面板堆石坝是水电建设中应用较为广泛的一种坝型,坝体由堆石体、防渗体和过渡层组成。坝体以堆石体作为支撑结构,堆石料为人工填筑散粒体,其颗粒级配不连续。混凝土面板堆石坝施工完成后,大坝填筑体在自重应力等的作用下会发生坝体沉降。当混凝土面板下方填筑料继续变形超出刚性面板的适应能力时,面板下方会出现局部脱空。混凝土面板堆石坝面板脱空一般发生于面板与垫层之间,面板脱空后容易造成面板裂缝,出现渗水现象,造成垫层较细粒料流失,脱空现象和面板开裂加重。面板渗水后,面板后垫层、过渡层、堆石等的粒料被浸湿,力学性质指标发生改变,内摩擦角减小,抗剪能力变差,产生恶性循环。伴随于发电与蓄能,抽水蓄能电站水库水位较传统水库水位变化更为频繁,面板前方应力加载与释放的频次更高,抽水蓄能电站大坝面板的脱空更容易发展和扩大,给大坝造成重大安全隐患。定期检测和治理对混凝土面板堆石坝的安全性具有重要意义。

2. 检测方法技术

探地雷达法,即常规二维探地雷达法,作为大坝检测的重要手段,已在大坝面板脱空、空洞检测中得到成功的应用,并取得了良好效果。相较于常规二维雷达检测技术,近年来三维探地雷达法得到了长足发展,其与车辆、定位系统结合形成了高效的车载检测系统,具有定位精度高、工作效率高、探测效果好的优点,在城市道路地下病害检测中得到广泛应用。鉴于较为复杂的工况条件,三维探地雷达法在大坝面板脱空检测中鲜有应用。鉴于三维探地雷达检测技术的诸多优点,我们对检测系统进行改造,将三维探地雷达检测技术成功应用于大坝面板脱空检测中,并取得了良好效果。

2.1. 检测原理

探地雷达法以高频电磁波传播为基础,由发射天线向地下发射电磁脉冲信号,由接收天线获取地下不同介质界面的反射信号,电磁波在介质中传播时,其传播时间、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性差异及目标体的几何形态的差异而产生变化,根据接收回波旅行时间、幅值和波形等信息,探测地下目标体的结构和位置信息[1]。其工作原理见图1。

当大坝混凝土面板与填筑垫层料之间结合紧密时,混凝土与垫层料介电常数相近,此时电磁波反射微弱;当大坝混凝土面板与填筑垫层料之间脱空时,混凝土与空气介电常数差异大,空气与垫层料间介电常数差异大,此时将在空腔的上下界面形成强电磁反射,这为采用探地雷达法提供了良好的地球物理条件。

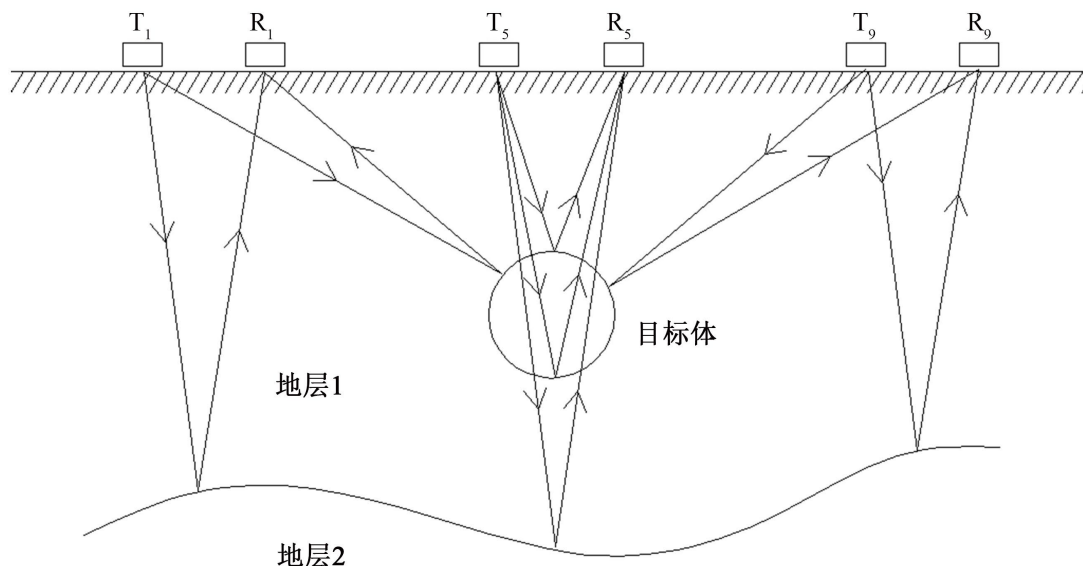


Figure 1. Schematic diagram of the working principle of ground penetrating radar

图 1. 探地雷达工作原理示意图

2.2. 适用范围

目前常用的大坝检测技术有超声波、红外热成像、探地雷达技术。各种方法技术特点不同:

- 1) 超声波检测能够精确测量缺陷的尺寸、位置和深度, 适合对局部区域进行详细检测; 通常采用点测的形式, 难以覆盖大面积区域, 工作效率低[2]-[4];
- 2) 红外热成像技术为非接触检测, 可做到全覆盖扫描, 对温度异常反应灵敏, 工作效率较高; 但其仅能检测大坝表面或浅层的温度变化, 查明异常区域, 无法确定缺陷的具体深度[5]-[7];
- 3) 探地雷达技术(二维雷达)采用高频天线可以达到较高的分辨率, 能够确定缺陷的深度, 但其采用线测时难以对大坝进行全覆盖扫描[8] [9];
- 4) 相比于二维雷达, 三维探地雷达数据处理后形成三维数据体, 可进行任意深度水平切片, 可通过水平切片展示异常体的宏观特征, 排除由二维剖面判读出的假异常, 如线状物体与测线小角度相交, 可通过深度切片确定缺陷的深度。需注意三维探地雷达应用时易受到金属结构(如钢筋)的干扰, 影响对其他目标的识别[10] [11]。

2.3. 方法技术

2.3.1. 建造适应大坝环境的检测系统

虽然三维探地雷达检测系统在市政、机场等场地环境检测中应用广泛, 且取得了良好的效果, 但大坝面板脱空检测中鲜有应用, 因为以车辆为载体的牵引系统不适于大坝面板检测环境, 而采用人力牵引又难以胜任; 三维探地雷达通道数量多, 设备沉重, 在大坝面板上搬运困难; 大坝面板为斜面, 通过基站动态 GPS 定位模式不再适用; 上述因素阻碍了三维探地雷达在大坝面板病害检测中的应用。为适应大坝检测环境, 对三维探地雷达检测系统进行了改造, 形成三维探地雷达大坝面板检测系统, 其组成见图 2, 工作照片见图 3。作业时, ① 以卷扬机作为牵引系统, 并将其固定在大坝顶部; ② 以台车作为三维探地雷达的载体, 台车应足够坚固, 且对数据采集无干扰和影响; ③ 采用钢缆将卷扬机与台车连接起来; ④ 钢缆翻越防浪墙应安置滑轮, 防止防浪墙受损或钢缆磨损断裂; ⑤ 三维探地雷达与台车重量大, 卷扬机两端应配重, 防止作业时失稳; ⑥ 定位采用测距轮模式, 作业时应尽量保持台车走直线。

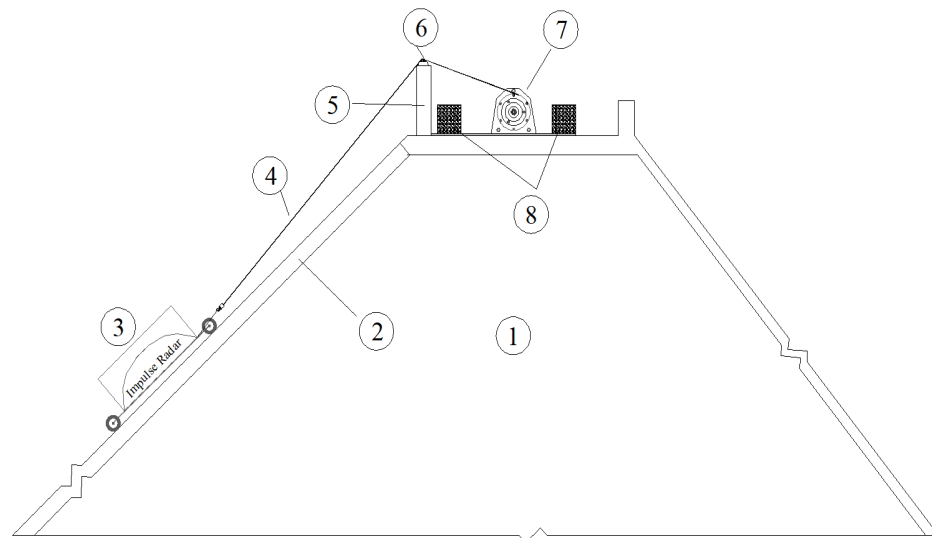


Figure 2. Schematic diagram of 3D ground penetrating radar inspection of dam panel: ① Dam body; ② Dam panel; ③ 3D ground penetrating radar cart; ④ Towing steel cable; ⑤ Wave-breaking wall; ⑥ Pulley; ⑦ Winch; ⑧ Counterweight of winch
图 2. 大坝面板三维探地雷达检测示意图: ① 坝体; ② 大坝面板; ③ 三维探地雷达台车; ④ 牵引钢缆; ⑤ 防浪墙; ⑥ 滑轮; ⑦ 卷扬机; ⑧ 卷扬机配重



Figure 3. Photo of 3D ground penetrating radar inspection of dams
图 3. 三维探地雷达大坝检测照片

2.3.2. 数据采集过程

现场作业时, 连接好图 2 的检测系统, 启动卷扬机缓慢、匀速地牵引三维探地雷达台车, 自面板顶部下方或自面板底部上拉雷达台车进行连续时间模式测量, 作业时应尽量保持台车走直线。

主要采集参数如下:

- 1) 主机采集时窗的选择: 根据介质条件及目的探测深度(2 m 以内)确定本次时窗为 50 ns;
- 2) 增益设置: 采用手动或自动方式, 采集中以单道电磁波波形占视窗 2/3 大小为宜;
- 3) 滤波: 以带通滤波为主, 低通滤波上限设置为相应天线中心频率的 3 倍, 高通滤波下限为相应天线中心频率的 1/2 倍;
- 4) 其他参数: 每道 512 扫描样点数、100 扫描线/s 进行连续测量。

2.3.3. 数据处理与异常识别

三维雷达数据处理包含预处理和后处理，其处理流程见图 4。

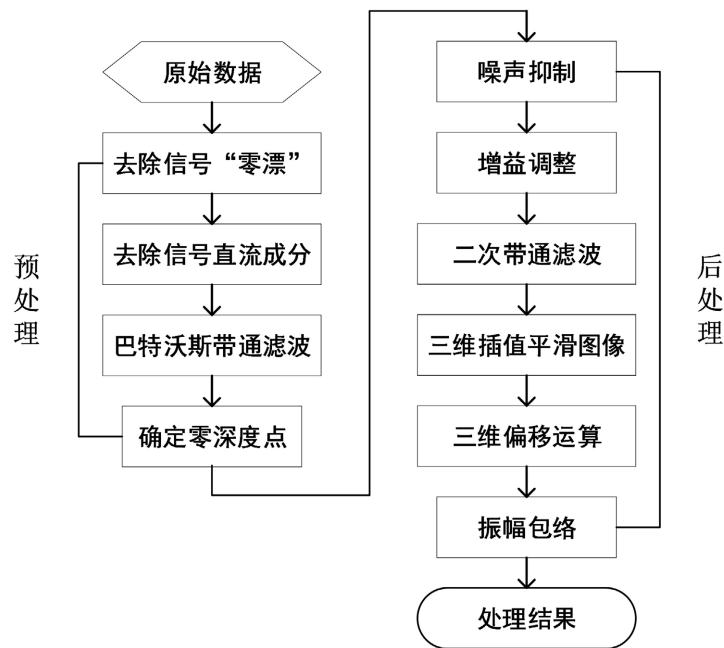


Figure 4. Flowchart of 3D ground penetrating radar data processing
图 4. 三维雷达数据处理流程图

剖面图中脱空异常的识别特征为，反射信号强，反射界面明显，下部有多次反射信号，两组信号时程差较大。然而，仅通过剖面识别，可能造成异常体的遗漏与误判。如：当下方埋设与剖面小角度相交的线状物体时，则易被误判为大规模病害；当剖面未通过病害体上方时，则剖面无法反映病害体的异常特征，造成遗漏。三维探地雷达等深度切片能直观反映地下异常体的宏观特征，能有效避免漏判、误判。

3. 工程应用实例

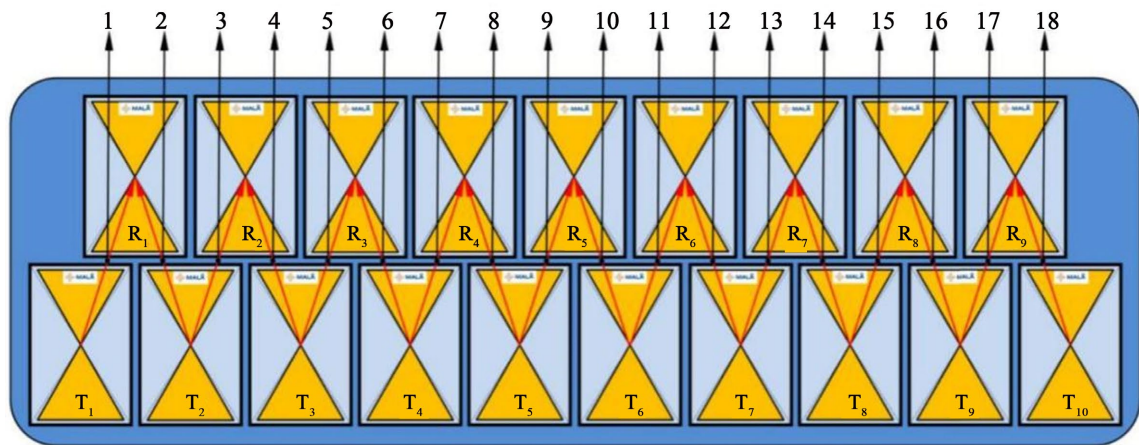


Figure 5. Schematic diagram of the 18-channel 3D ground penetrating radar antenna array structure (T: Transmitting antenna; R: Receiving antenna)
图 5. 18 通道三维探地雷达阵列天线结构示意图(T: 发射天线; R: 接收天线)

新建河北丰宁抽水蓄能电站上水库采用混凝土面板堆石坝, 大坝面板出现横向裂缝, 需开展大坝面板脱空检测, 面板厚 45 cm~75 cm, 面板下部为垫层。根据项目特点, 本次检测采用三维探地雷达法, 设备为瑞典 Impulse Radar Raptor 脉冲式阵列雷达, 天线结构见图 5, 中心频率 450 MHz, 18 通道, 满足检测需要。

3.1. 大坝面板脱空检测流程

三维雷达大坝病害检测流程见图 6, 现场踏勘、做好准备工作并经现场试验确定三维探地雷达检测方法可行后, 在每条面板中部位位置纵向布置一条工作测线, 采用设备可有效覆盖 1.5 m 宽的范围, 工作完成后经预处理, 对重点异常部位测线加密。

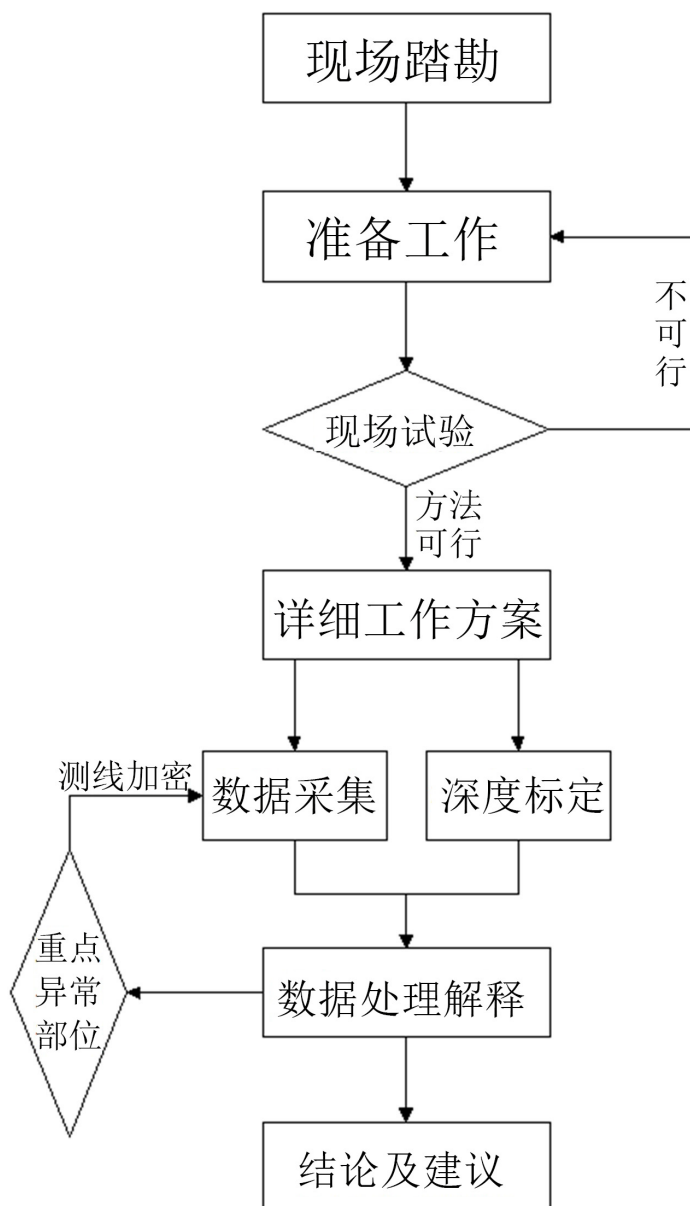


Figure 6. Flowchart of 3D ground penetrating radar inspection process for dam defects
图 6. 大坝病害三维探地雷达检测流程图

3.2. 大坝检测成果及验证

分析解释时, 首先对采集数据进行预处理、后处理等步骤形成三维数据体, 然后切取剖面图和等深度切片图, 最后根据剖面图雷达谱反射特征及等深度切片宏观特征对异常体进行解译和识别。图 7 和图 8 为 C 号面板 6 号脱空异常区雷达反射谱剖面图和等深度切片图, 由剖面图可知, 在距面板顶部 130.5 m~139.8 m 段深度约 47 cm~59 cm 处有连续强反射, 多次波明显, 等深度切片图显示该处异常呈孤立的不规则状, 推测该范围存在脱空。

为保证检测工作科学、准确, 抽取 6 号脱空异常区进行开孔验证, 钻孔 ZK1、ZK2 分别布置在异常区域范围内、外。钻孔录像显示, ZK1 钻孔探头下放至 47.5 cm 处, 面板与下方碎石分离, 间隙约 1.0 cm~2.0 cm, 面板脱空(见图 9)。ZK2 钻孔探头下放方至 72.4 cm 处, 钻孔已穿越面板, 面板与垫层紧密结合, 未见脱空(见图 10)。上述验证结果表明, 本次采用三维探地雷达法展开对大坝面板脱空的检测效果良好。推测整个大坝的脱空异常区分布(见图 11)。根据等深度切片图中异常边界距大坝面板顶部的距离及剖面图中异常深度范围对脱空异常进行定量统计分析(见表 1), 为大坝治理措施提供依据。

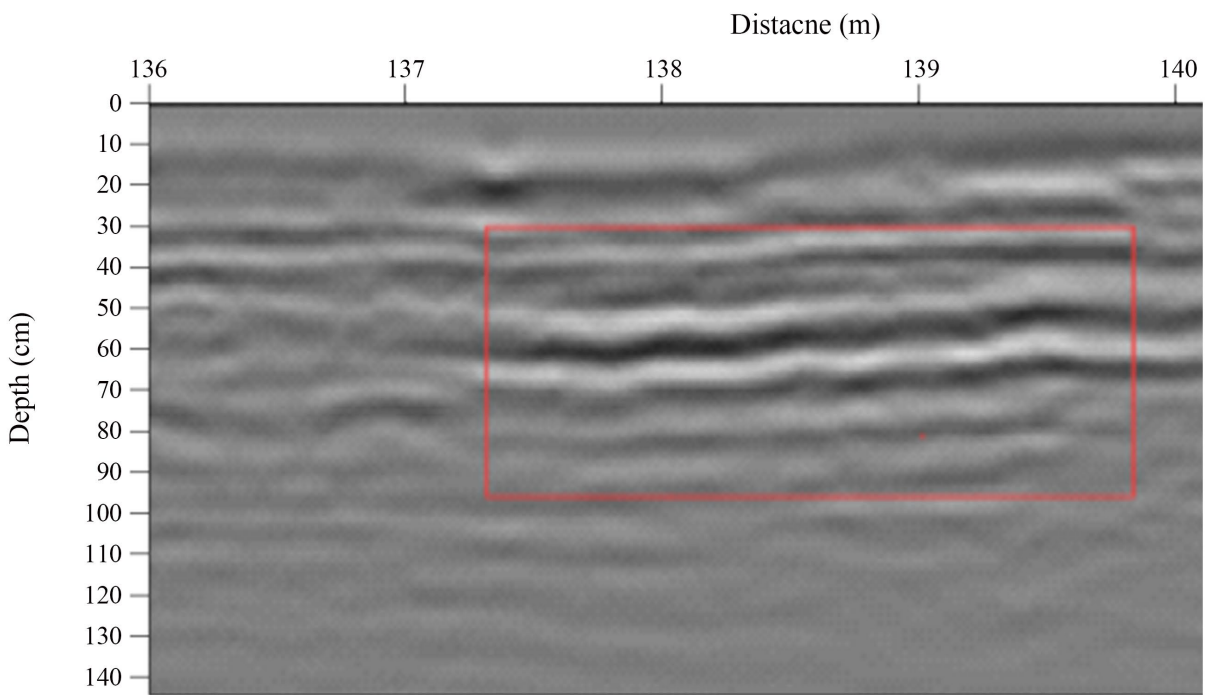


Figure 7. Radar profile of panel C with air-gap anomalies

图 7. C 号面板脱空异常雷达剖面图



Figure 8. Radar Equi-depth cross-sections of panel C with air-gap anomalies

图 8. C 号面板脱空异常雷达等深度切片图



Figure 9. Screenshot from borehole video of ZK1 (within the air-gap anomaly zone)

图 9. ZK1 钻孔孔内录像截图(脱空异常区内)



Figure 10. Screenshot from borehole video of ZK2 (outside the air-gap anomaly zone)

图 10. ZK2 钻孔孔内录像截图(脱空异常区外)

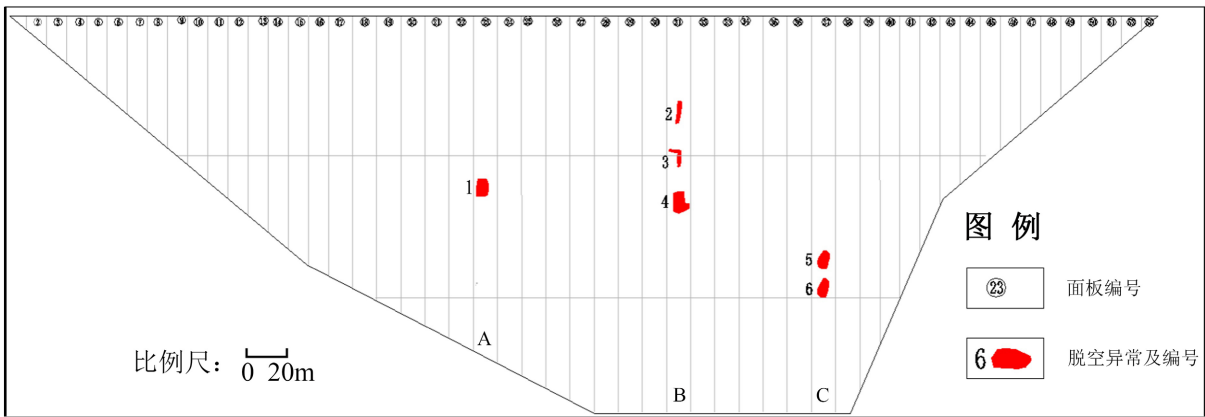


Figure 11. Schematic diagram of air-gap anomaly distribution from 3D ground penetrating radar inspection of dam panel
图 11. 大坝面板三维探地雷达检测脱空异常分布示意图

Table 1. Statistics table of air-gap anomalies
表 1. 脱空异常统计表

面板编号	脱空异常区编号	距面板顶部距离(m)	深度范围(cm)	面积(m ²)
A	1	80.7~89.3	54~58	47.5
B	2	43.2~53.1	47~57	19.5
B	3	67.7~76.6	52~66	18.9
B	4	89.8~98.8	56~66	60.7
C	5	116.6~125.8	61~73	39.0
C	6	130.5~139.8	47~59	38.3

4. 结论

三维探地雷达应用于大坝面板脱空检测时, 可通过等深度切片图查明脱空异常位置, 通过雷达剖面图获取脱空异常深度信息, 两者结合可实现对脱空异常的有效定位, 避免误判或遗漏。结合建造的适应大坝环境的检测系统, 三维探地雷达法在混凝土面板堆石坝面板脱空检测中可取得较好的应用效果。

参考文献

- [1] 曾昭发, 刘四新, 冯珏. 探地雷达原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [2] 谢琪, 张伟, 周波帆. 地质雷达及超声横波在大坝混凝土面板脱空检测中的对比分析应用[J]. 水利科技与经济, 2020(10): 94-95.
- [3] 彭旭东. 基于超声波技术的水利大坝裂缝检测方法研究[J]. 中国高新科技, 2025(1): 143-145.
- [4] 焦永春, 赵正海, 赵朋斌. 无损检测技术在大坝防渗墙施工质量检查中的应用[J]. 四川水力发电, 2020, 39(z1): 20-23+27.
- [5] 张伯韬, 雷英成, 戴绘. 大坝混凝土面板脱空检测方法与技术[J]. 四川水力发电, 2018, 37(6): 160-162.
- [6] 徐涛, 丁亮清, 严俊. 红外热成像与探地雷达在大坝混凝土面板脱空检测中的应用[J]. 水利技术监督, 2019(5): 34-36+66.
- [7] 乔雨, 杨宁, 谭鹏, 等. 大体积混凝土红外测温影响因素研究与工程应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2021, 61(7): 730-737.
- [8] 邹小建. 探地雷达在大坝沥青混凝土心墙厚度检测中的应用研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(25): 726.

- [9] 姚纪华, 伍佑伦, 宋子龙, 等. 探地雷达和高密度电法识别大坝塑性混凝土防渗墙渗漏缺陷研究[J]. 工程地球物理学报, 2023, 20(5): 599-604.
- [10] 钱海明, 张靖雨. 基于三维地质雷达系统的水库堤防病害检测[J]. 山西建筑, 2023, 49(8): 186-189.
- [11] 王光涛, 郑文青, 陈自谦, 刘冬. 浅析三维探地雷达水平切片在道路地下病害体识别中的作用[J]. 城市勘测, 2021(10): 103-104.