

探地雷达技术在堤防隐蔽隐患检测中的试验与实践

高晔

江苏禹衡工程质量检测有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i12.5138

[摘要] 堤防是水利防洪体系的核心构筑物,但很多堤防建成年限较久,在长期运行过程中受水流冲刷、土体沉降等诸多因素影响,内部极易形成松动、渗漏通道、脱空、空洞等隐蔽隐患。由于此类隐患位于内部,相对隐蔽,人工检查、钻探检测等方法并不适用,探地雷达作为一种新型无损探测技术,凭借其探测速度快、分辨率高等优势,可在堤防隐蔽隐患检测中发挥有效作用。本文先阐述了探地雷达技术的工作原理、设备选型等相关内容,后分析了堤防隐蔽隐患现场试验,结合工程实例验证探地雷达技术的实践应用,并提出了相关优化措施,以期提高探地雷达技术的应水平,为同类堤防检测工程提供有益参考。

[关键词] 探地雷达技术; 堤防工程; 隐蔽隐患; 检测; 试验

中图分类号: TV871 文献标识码: A

Experimental Study and Practical Application of Ground-Penetrating Radar Technology for Detecting Hidden Hazards in Levee Engineering

Ye Gao

Jiangsu Yuheng Engineering Quality Testing Co., Ltd.

[Abstract] Levees are critical structures in water conservancy and flood control systems. However, many levees have been in service for a long time and are susceptible to various factors, such as water erosion and soil settlement, which can lead to hidden hazards including internal loosening, seepage channels, voids, and cavities. Since these hazards are located inside the levee and are relatively concealed, conventional methods such as manual inspection and drilling detection are often unsuitable. As a new non-destructive testing technology, ground-penetrating radar (GPR) offers advantages such as high detection speed and high resolution, making it effective for detecting hidden hazards in levees. This paper first introduces the working principles, equipment selection, and other relevant aspects of GPR technology. It then analyzes field experiments for detecting hidden hazards in levees and verifies the practical application of GPR technology through an engineering case. Relevant optimization measures are also proposed to improve the application effectiveness of GPR technology and provide useful references for similar levee inspection projects.

[Key words] ground-penetrating radar technology; levee engineering; hidden hazards; detection; experimental study

早期修建的堤防受当时施工工艺、材料标准限制,且运行多年会受水位涨落、雨水入渗、土体干湿循环作用,这种情况下像堤身、堤基等位置就容易发生隐蔽隐患,若未及时解决会在汛期高水位压力作用下快速进展为滑坡、溃堤等重大险情,严重危害周边环境及居民生命财产安全^[1]。传统探测技术在探测范围、探测精度等方面存在局限性,且探测时还会对原有堤体结构造成破坏,不满足实际探测需求。探地雷达属于高频电磁无损探测技术,其可连续扫描,且检测速度快、精准度高、安全性强,适用于堤防隐蔽隐患检测。所以现阶段应把握探地雷达技术在堤防隐蔽隐患检测中的应用要点,并结合堤防工程实际,采取相应的优

化措施,不断强化探地雷达技术的应用成效。

1 探地雷达技术概述

1.1 工作基本原理

探地雷达技术是基于不同介质之间的介电性差异,利用介质对电磁波的反射特性,对介质内部的构造和缺陷进行探测的工程物检方法^[2]。具体来说,设备通过发射天线向地下发射高频短脉冲电磁波,像土体、水体等不同介质,电磁波传播时也会产生不同的速度、波阻抗等。当电磁波遇到两种不同介质的分界面,或是空洞、疏松土体等异常区域时,一部分电磁波反射被接收天线实时接收,一部分电磁波则继续向下传播,直至能量完全

衰减。所接收的反射信号经转化为生成可视化雷达剖面图像,探测技术人员可根据图像精准了解反射波的形态、相位、振幅等参数指标,并基于该区域的地质条件、堤防工程结构等信息数据,对地下介质的分布、土体的密实度,以及各类隐蔽隐患的类型、埋深、范围等进行分析判断。如地下土体均匀密实的情况下,所生成的图像中波形规整,信号稳定,若存在空洞、松动等问题,图像反射波形则会发生畸变、杂乱散射等特征^[3]。

1.2 检测设备与参数设置

基于堤防工程特点,可优先选用便携式探地雷达系统,主要由主机、发射接收一体式天线、测距轮、配套分析软件等构成,该设备质量轻,便于携带操作,一人或两人即可完成野外探测作业,对于堤防长距离移动检测较为适用^[4]。堤防结构主要包括堤顶、堤坡与堤基,大多数隐蔽隐患埋深深度在0.2~6m,为保证探地雷达的探测深度与分辨率符合实际探测需求,应基于埋深选择合适的天线频率,对于堤基脱空、大型土体空洞等位于深度2~6m的深层隐蔽隐患,主要配置100MHz低频天线;对于表层土体疏松、局部脱空等位于0.2~2m浅层隐蔽隐患,主要配置400MHz高频天线。在野外检测作业开展前,精准设置各项参数,包括扫描速率60道/s,浅层检测时窗80ns,深层检测时窗220ns等。测距轮需同步记录行走距离,这样才能确保各段雷达图像都能与堤防实际里程相符。

1.3 现场检测方式

对于堤防工程来说,多数堤防地形狭长,堤顶路面宽度在2~4m,堤坡坡度在1:2.0~1:3.0之间,需根据不同位置采取不同的现场检测方式,保证探地雷达技术的应用效果。首先,针对堤防接合部现场检测来说,需提高对堤防与穿堤建筑物、新旧堤体衔接位置的关注度,使用网格状扫描方式,为保证检测结果精准全面,需加密检测点位。其次,针对堤顶平面现场检测来说,在堤顶路面放置地质雷达探测设备,采取匀速推行设备的方式进行沿堤防轴线纵向连续扫描,期间需保证地面与天线紧密贴合,速度控制在每秒1.0~1.5m。最后,针对堤坡坡面现场检测来说,若坡度较缓,可通过人工手持天线贴紧坡面行走扫描,若坡度较陡,可采取分段定点扫描,保证人员及设备安全。为保证探测结果的精准可靠性,在大雨、强雷电等天气条件下应避免开展野外探测作业,防止土体含水率过高导致电磁波能量快速衰减,降低图像质量^[5]。

2 堤防隐蔽隐患现场试验分析

堤防工程隐蔽隐患类型多样,为区分不同隐患对应的雷达图像特征,本文选取一处试验堤防段进行人工模拟隐患试验。该试验段为均质土堤,总长约600m,其中堤顶宽度、堤高分别为3m、5.2m,堤身填筑粉质壤土,天然含水率约18%,平均密实度约92%,该试验段地质条件良好。结合常见的隐蔽隐患,在试验段内人工设置空洞、土体疏松、裂隙及渗漏通道四类,以下对探地雷达技术的现场试验作出分析。

2.1 空洞隐患试验

工作人员在堤身不同深度开挖多个圆形空洞作为试验样本,

空洞直径控制在0.3~0.8m,埋深控制在0.8~4.5m。根据试验结果显示,探地雷达设备搭配400MHz天线检测直径0.3m、深度0.8m的空洞,图像呈现连续弧形强反射波,波形轮廓清晰,误差<0.1m,可帮助工作人员精准判断空洞边界。对于直径0.5m、深度2.5m的空洞来说,探地雷达设备搭配400MHz天线或100MHz天线检测都可精准识别空洞,反射波振幅明显高于周边正常土体。对于直径0.8m、深度4.5m的深层大型空洞来说,400MHz天线不适用,图像信号微弱,需要搭配100MHz天线检测才能获取明显的环状反射异常,精准识别坐标。由此可说明,需根据空洞的埋深与直径选择不同频率的天线,以保证能够精准、清晰识别。

2.2 土体疏松隐患试验

若堤防工程施工阶段压实工艺不到位,或长期运行时受雨水浸泡,都会引发局部土体疏松隐患问题,降低密实度。工作人员在试验段不同区域选择土体进行人为扰动,将土体疏松区域密实度控制在75~88%,埋深控制在0.5~3m。根据试验结果显示,疏松土体区域反射波杂乱无章、波形断续、振幅忽高忽低,而密实度越低的区域,反射波波形越紊乱。实测数据统计,密实度<85%的区域,探地雷达识别精准率可达91%,密实度85~88%的区域,探地雷达识别精准率约68%。由于土体疏松隐患无固定的几何形态,在探测过程中更多只能判断存在异常的范围,难以准确划分边界。

2.3 裂隙与渗漏通道隐患试验

人工模拟堤防由水流冲刷形成的渗漏通道及土体干缩裂缝,裂缝宽度控制在0.5~5cm,包括充水裂隙和干裂隙两种。充分裂隙内部含有水分,水体对电磁波吸收能力强,反射波振幅大幅降低,图像呈现深色弱反射条带。而干裂隙内部为空气,空气与土体波阻抗有较大差异,图像呈现细长条状强反射带。经试验数据发现,裂缝宽度>2cm的情况下,探地雷达技术均可有效识别充水裂隙和干裂隙,而裂缝宽度<1cm的情况下,探地雷达技术检测细微干裂隙时可捕捉到较弱的异常信号,而充水微裂隙基本无法识别。渗漏通道呈条带状延伸,雷达图像会形成连续的线状异常,可追踪通道走向和大致长度。

3 探地雷达技术在堤防工程中的实践应用

本次工程实践选取区域内3段运营多年的土堤,总长15.4km,建成运行时长已超15年,3段土堤常见承担防洪任务。在多年运行过程中曾发生过堤坡小型滑坡、局部渗水等问题,本次使用探地雷达技术进行全线扫描,同时结合人工钻孔等方法完成复核,进一步验证探地雷达技术的工程实用性。

据雷达检测数据统计核对,全线共发现有效隐患53处,其中土体疏松隐患共24处,主要集中在堤顶边缘、堤坡上部,与施工压实度不足、长期雨水浸泡、车辆碾压等因素有关,土体密实度<86%,雷达图像显示波形杂乱无规则。小型空洞隐患共13处,主要集中在穿堤管道周边、新旧堤体衔接位置,汛期下更易诱发管涌,危害性较强,经验证探地雷达检测平均误差<0.15m。裂隙与渗漏通道隐患共11处,主要集中在堤坡临水侧,与水位反复涨落有关,雷达图像呈现连续线状弱反射带,可清晰追踪渗漏延伸

方向。堤基局部脱空隐患共5处,只能依靠100MHz低频天线识别,隐蔽性较强,图像呈现大面积弧形反射异常,需重点关注。

全线采用“探地雷达初筛-异常点位标记-人工复核-隐患定性定位”的探测作业流程。具体来说,首先,使用探地雷达设备进行全线连续扫描,同步记录堤防里程,将图像中显示的异常位置进行明确标记。其次,工作人员根据所标记的异常位置,精准布设勘探钻孔,通过人工钻孔进行复核,查看土体状态,是否存在积水、空洞。同时,对典型隐患区域采取局部开挖的方式,观察验证探地雷达技术的检测结果是否准确。最后,将探地雷达检测数据、人工复核数据进行汇总,进一步划分隐患等级,生成可靠完整的检测报告。

相比传统钻探检测方法来说,探地雷达技术的应用效果更佳,一是检测效率高,传统钻探通常需4名工作人员,且整体探测时间多数大于20天,而使用探地雷达技术只需2名工作人员,4天即可完成全域数据采集,工期大幅度压缩70%以上。二是检测成本低,探地雷达技术检测综合单价低于钻探检测35%左右,同时探地雷达技术属于无损检测方法,不会对堤防工程结构造成二次破坏。二是隐患检出率高,传统钻探以点状检测为主,容易漏掉零散分布的小型空洞、裂隙等隐患,而探地雷达可实现连续剖面扫描,隐患检出率更高。经本次工程实践证明,探地雷达技术在堤防隐蔽隐患检测中有较好的应用效果,可以快速锁定风险区域,同时配合局部人工复核的方式能够进一步提高检测的高效性、精准性、经济性,具备较好的推广应用价值。

4 探地雷达技术应用优化措施

根据试验和工程实践应用可知,探地雷达技术整体实用性较强,但当前技术应用仍存在一定的局限性,如土地杂质干扰易造成误判、微小隐患识别能力不足等。为持续优化升级探地雷达技术,提高检测效率及精准性,还需积极制定实施更多优化措施。一是采用多技术联合探测方法,如配合使用声波探测技术、高密度电法、无人机检测等,通过交叉验证减少干扰因素,提高检测精准性。二是正确选择探测时间,避免雨后含水工况,

以及根据具体的检测工况,对探地雷达等设备参数进行精准设置。三是注重人员培训,通过开展专项知识讲解、实操培训等,不断提高探测人员的综合技能水平,有效保证探测工作开展质量^[6]。四是建立本地堤防隐患雷达图谱数据库,统一判读标准,以及引入AI算法等先进技术优化升级各类设备系统,降低人工依赖,提高图像判读的智能化、标准化水平。

5 结语

综上所述,探地雷达技术具有检测速度快、无结构损伤、检测范围大等优势,在堤防隐蔽隐患检测中能够取得明显的优势作用,结合试验数据、工程实践应用也可表明探地雷达技术的应用效果。但当前探地雷达技术应用仍存在一定的局限性,还需通过采用多技术联合探测方法、注重人员培训、引入AI算法等,持续对探地雷达检测进行优化升级,为水利工程防洪安全提供有力技术支撑。

参考文献

- [1]薛子龙,黄松,朱建高,等.基于探地雷达的长江堤防隐患探查与消除措施[J].地下水,2025,47(1):238-241.
- [2]宋佳,陆俊,明攀,等.基于探地雷达信号参数关联性分析的堤防隐患解译研究[J].水电能源科学,2025,43(1):212-216,78.
- [3]陈伟,程庆松,李益,等.综合地质雷达法与瞬变电磁法的堤防工程隐患探测[J].长江技术经济,2025,9(3):94-99,114.
- [4]杨丽颖,贾永梅,王贺雨,等.地质雷达在北京市凉水河干流堤防隐患探测中的应用[J].中国防汛抗旱,2024,34(12):133-136.
- [5]邹立,闫胜,罗浩轩,等.探地雷达在堤防隐患无损检测中的应用研究[J].四川地质学报,2024,44(z1):137-141.
- [6]张家阳,王宇,吴志琴,等.寒区堤防工程隐患探测中探地雷达技术应用[J].水利科学与寒区工程,2023,6(1):6-9.

作者简介:

高晔(1996--),男,汉族,江苏人,本科,助理工程师,研究方向:水利检测。