

# 探地雷达技术在堤防隐蔽隐患检测中的试验与实践

邢煜东 吴立亚

江苏禹衡工程质量检测有限公司 江苏 盐城 224000

**摘要：**探地雷达凭借无损、连续探测的技术优势，已成为堤防隐蔽隐患检测的重要手段。本文围绕堤防常见隐蔽隐患类型及其赋存特征展开分析，梳理堤防土体介质的电磁响应属性与雷达探测基本原理，设计涵盖场地选取、天线频率适配、检测参数配置及多形态隐患探测试验方案。在此基础上，阐述堤防全域检测布线工艺与复杂堤段精细化作业方式，探讨原始数据预处理、雷达图像解析、隐患特征信号识别等数据处理方法，并提出复杂工况下的技术优化路径，为堤防隐蔽隐患的雷达探测实践提供系统性技术参考。

**关键词：**探地雷达；堤防隐蔽隐患；无损检测；数据处理；现场探测

引言：堤防作为防洪工程体系的关键构筑物，内部隐患多潜藏于土体结构深层，常规目视巡检难以有效识别。管涌通道、松散土层、渗流通道等隐患在堤身内部持续演变，对堤防安全构成威胁。探地雷达依托高频电磁信号的反射与折射特性，可在不破坏堤身结构的前提下实现连续性探测，适配堤防长条状、大面积的检测需求。然而，堤防介质工况复杂、隐患形态多样，雷达探测参数的合理选取与数据的精准判读仍是制约检测质量的关键问题。开展系统性试验与现场实践，对提升堤防隐患探测能力具有迫切的现实意义。

## 1 堤防隐蔽隐患检测与探地雷达技术基础特性

### 1.1 堤防隐蔽隐患基本类型与赋存特征

堤防结构内部产生的隐蔽隐患多发育于土体结构薄弱区域，整体潜藏于堤防表层以下的结构内部，无法通过常规目视巡检方式察觉。土体内部形成的空洞、松散土层、渗流通道均属于堤防高频隐蔽隐患，各类隐患依托堤防土体的堆积结构成型，空间分布状态随堤防土体固结程度产生对应变化<sup>[1]</sup>。堤防长期处于水陆交替的环境当中，土体结构会持续产生细微形变，隐患形态会随外部环境作用持续发生演变。浅层隐患多分布于堤防堤身表层土体当中，深层隐患贯穿堤身多层土体结构，空间形态具备不规则性与隐蔽性。土体密实度的不均匀分布会持续改变堤防内部结构状态，为各类隐蔽隐患的发育和扩张提供基础空间条件。

### 1.2 堤防介质电磁响应基本属性

堤防土体作为天然复合介质，内部组分包含土壤颗粒、水体与空气介质，不同组分的电磁属性存在明显差异。电磁属性的差异化表现成为雷达探测技术的核心依托，电磁波穿透堤防土体介质的传播速度会受介质含水率、土体密度的直接影响。土体内部介质均匀状态

保持稳定时，电磁波传播轨迹与信号强度可以维持平稳状态。土体内部出现结构缺损或介质更替的区域，电磁参数会出现明显波动，电磁波会产生反射、折射等传播形态变化。不同质地的堤防土体具备专属的电磁响应规律，介质电性参数的差异程度直接决定电磁信号的变化幅度。

### 1.3 探地雷达设备体系与工作原理

探地雷达设备由信号发射模块、信号接收模块、数据传输模块与数据存储模块构成完整作业体系，各结构单元协同支撑地下介质探测作业开展。设备运行过程中会向地下介质发射高频电磁波，电磁波穿透不同土层结构后会接触介质分界面。介质电磁属性的差异会让部分电磁波发生折返，接收模块持续捕捉折返的电磁信号并完成信号转化处理。设备系统可将捕捉的电磁信号转化为可视化图像数据，实现地下土体结构与异常区域的直观呈现。高频电磁信号的持续发射与动态采集，可实现堤防土体内部结构的连续性探测。

### 1.4 探地雷达检测适用条件与技术特质

探地雷达检测技术适配堤防大面积、连续性的结构探测作业场景，可适配露天野外的复杂作业环境。技术作业模式无需破坏堤防原有土体结构，属于无损检测技术范畴，能够完整保留堤防结构的原始状态。探测作业覆盖范围广，数据采集密度高，可精准捕捉土体内部细微的结构异常变化。技术运行依托高频电磁信号实现探测作业，整体作业耗时较短，野外作业适配性较强。探测过程可实现动态连续的数据采集，能够贴合堤防长条状、跨区域的结构形态特征，适配堤防工程的专项检测作业需求。

## 2 堤防隐蔽隐患探地雷达检测试验设计

### 2.1 试验场地介质工况选取

堤防探测试验开展需要匹配贴合实际工程环境的场地条件,场地介质构成需要涵盖堤防工程常见的土体类型。土体颗粒组成、密实程度与含水状态都会改变电磁传播特性,场地选取过程需要覆盖多种土体工况状态<sup>[2]</sup>。不同土质结构能够完善试验数据的覆盖维度,让探测研究贴合堤防真实的地层分布状态。场地土体保持天然堆积的结构形态,保留自然环境作用形成的土层分布特征,规避人工改造带来的结构干扰。场地选取兼顾不同深度的土层变化规律,匹配堤防隐患多发的地层深度区间,保障试验开展的科学有效性。

## 2.2 雷达天线频率适配试验设计

雷达天线频率直接决定电磁信号的穿透深度与分辨精度,不同频率参数适配的堤防探测场景存在明显区别。低频天线可以实现更深层土体结构的信号穿透,高频天线对浅层土体的细微结构变化具备更高的识别精度。试验过程针对不同厚度的堤身土层设置多组天线频率档位,完成土层探测适配性的专项探究。通过差异化频率设置区分浅层土体结构的信号反馈差异,筛选适配堤防多层土体探测的天线工作频段。频率梯度化设置可以细化不同地层条件下的天线工作状态,完善堤防全域探测的频率适配体系。

## 2.3 检测参数配置试验设计

探地雷达检测作业的运行参数直接影响原始数据的采集质量,参数调试是试验设计的核心环节。采样间隔、扫描速度与信号增益均属于重点调试参数,不同参数组合会改变土体结构信号的采集完整度。试验针对堤防野外探测的作业特点,设置多组梯度化参数组合开展对比试验。逐步调整各类运行参数的数值档位,捕捉参数变化对土体异常信号采集质量的影响规律。通过系统性参数调试确定适配堤防长距离探测的参数组合方式,提升土体内部结构信号采集的精细程度。

## 2.4 不同隐患形态探测试验方案设计

堤防内部隐患存在多样的空间形态与结构特征,不同形态隐患的电磁信号反馈状态存在明显区别。试验针对空洞、松散土体、渗流通道等不同结构形态的隐患布设标准化探测流程。依托统一的探测作业标准开展各类隐患的信号采集工作,保障不同类型隐患探测数据的可对比性。结合隐患在堤身内部的发育深度与延展形态,调整探测作业的布设方式与采集范围。针对性的方案设计可以细化不同结构隐患的探测采集模式,完善堤防多类型隐蔽隐患的探测试验体系。

## 3 堤防隐蔽隐患探地雷达现场检测工艺实践

### 3.1 检测前期场地预处理与设备调试

现场检测作业开展前需要对堤防作业区域开展系统化场地处理工作,清除堤面分布的杂草、碎石与凸起杂物,维持检测作业面的平整状态。规整堤面起伏结构,弱化地表杂物对电磁信号传播的干扰作用,保障探测设备平稳行进作业<sup>[3]</sup>。设备调试工作围绕野外探测作业需求展开,校准信号发射与接收模块的运行状态,排查线路连接的稳定程度。调试过程核对设备基础运行状态,调整信号初始输出强度,保证设备可以适配堤防野外复杂的作业环境。

### 3.2 堤防全域检测布线与作业流程

堤防长条状的结构特征需要匹配规整的布线方式,依托堤身整体走向布设连续的探测测线。测线布设贴合堤身轴线分布规律,覆盖堤顶、堤坡等关键结构区域,实现堤身主体结构的全面覆盖。按照固定间距排布多条平行测线,缩小探测盲区的覆盖范围,提升全域检测的完整程度。作业推进遵循连续采集的作业模式,顺着测线走向匀速推进设备移动,维持数据采集的稳定节奏。

### 3.3 复杂堤段精细化探测作业方式

堤防部分区段存在地形起伏大、结构分层复杂的特征,常规探测模式无法捕捉细微结构变化。针对地形特殊的堤段调整测线布设密度,加密局部探测路径,提升复杂区域的数据采集密度。放缓设备移动速度,延长电磁信号的采集时长,强化浅层与深层土体异常结构的信号捕捉能力。结合堤段结构变化特征调整探测角度,适配坡面、转折等特殊位置的作业条件。

### 3.4 现场检测数据采集规范与操作要点

现场数据采集需要遵循统一的作业规范,维持设备运行参数的稳定状态,杜绝作业过程中参数随意变动的情况。保持设备与作业面的贴合程度,减少悬空偏移带来的信号失真问题,保证采集信号贴合土体真实结构特征。实时关注设备数据传输状态,及时处理数据中断、信号紊乱等现场问题,保障采集数据的有效度。规范野外环境下的数据存储方式,分类留存不同区段的探测数据,保障采集数据具备可追溯性与完整性,满足后续数据分析处理的基础要求。

## 4 探地雷达检测数据处理与技术优化

### 4.1 原始探测数据预处理方法

野外堤防探测获取的原始数据包含大量环境干扰带来的无效信息,数据采集过程会因地形起伏、设备小幅偏移产生波形偏差。预处理工作针对原始探测数据开展标准化规整操作,修正采集过程中产生的波形偏移与数据错位问题<sup>[4]</sup>。清理数据波段内分布的杂乱杂讯,剔除各类无效数据信息,提纯对应堤防土体结构的有效信号内

容。统一多组探测数据的排列格式与采集基准,规整测线数据的排布逻辑。规范原始数据的存储结构,改善原始数据杂乱无序的状态,为后续图像解析与信号分析提供规整有效的基础数据。

#### 4.2 雷达图像信号解析与干扰剔除

自然野外环境会对电磁信号传播造成多样干扰,地表杂物、土层不均匀分布、外界电磁辐射都会造成成像质量下降。雷达图像信号解析依托电磁传播的介质响应规律开展,区分土体原生结构信号与异常波动信号。针对各类环境干扰引发的杂波进行精准剔除,减少外部因素对成像效果的负面作用。矫正图像成型过程中出现的波形畸变、图像失真问题,还原堤身土层的真实结构形态。逐层筛选图像内部的信号组分,保留地层结构与隐患结构对应的有效信号,提升雷达图像的清晰度与真实度。

#### 4.3 堤防隐患特征信号识别方法

堤防内部不同类型的隐蔽隐患会改变地层介质的电磁属性,形成具备差异化特征的电磁信号反馈,各类缺陷结构的雷达成像波形具备专属的形态特点。结合堤防土体介质的电性差异规律,系统梳理隐患信号的波形轮廓、幅值波动幅度与空间延展特征。精准分辨密实原状土体、松散破损土体与中空空洞结构对应的图像特征,细化土体渗流通道在雷达图像中的信号变化规律。深入挖掘不同埋深土层中隐患信号的成像差异,总结深度变化对信号强弱、波形形态的影响规律,搭建适配堤防工程复杂地层的专属信号识别逻辑。依托精细化的信号分辨与特征区分方式,剥离正常土层自然波动带来的干扰,精准识别堤身内部的异常结构信号,稳步提升隐患识别的精准度与可靠性。

#### 4.4 复杂工况下探地雷达检测技术优化路径

堤防野外作业工况具备较强的复杂性与不确定性,常规探测技术模式难以适配特殊堤段的检测需求,复杂地形与特殊土层结构会大幅削弱电磁信号的采集精度。

结合堤防野外作业的环境特征与地层变化规律,针对性调整电磁信号采集、数据校正与图像优化的核心流程。优化设备信号增益参数与采样频率的匹配模式,适配高含水地层、多层交错土体等特殊探测场景的作业需求。细化复杂堤段的精细化探测作业标准,调整野外作业过程中的设备运行参数与数据采集处理逻辑。结合现场探测工作暴露的技术短板,优化全域普查探测与局部精细探测的协同作业体系,完善复杂工况下的数据校正与信号提纯流程,全面提升探地雷达技术对堤防各类复杂作业场景的适配能力与检测精度。

#### 结束语

探地雷达技术在堤防隐蔽隐患检测中的应用,贯穿了从试验设计、现场采集到数据处理与技术优化的完整技术链条。多频率天线适配试验与梯度化参数配置为不同工况下的探测作业提供了参数依据,全域布线与精细化探测工艺则保障了堤身结构的全面覆盖。数据处理环节通过预处理、干扰剔除与特征信号识别,有效提升了隐患判读的准确性。复杂工况下的技术优化路径进一步拓展了雷达检测的场景适配能力。该技术体系的持续完善,有助于推动堤防隐患检测从经验判断向数据驱动方向转变。

#### 参考文献

- [1]黄棚兰,庞晶津,谢飞,等.基于三维探地雷达的城市道路地下隐患智能检测技术与应用[J].科技创新与应用,2026,16(11):193-196.
- [2]高攀,陈晨,苏哲,等.探索激光雷达测量(LiDAR)技术识别地质灾害隐患[J].安徽地质,2025,35(2):168-171.
- [3]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.
- [4]刘永盛.基于探地雷达的水利工程无损检测技术研究[J].科学技术创新,2026(6):185-188.