

水利工程质量检测中的探地雷达技术应用分析

杨 畅, 郑 成*

(四川南充水利电力建筑勘察设计院, 四川 南充 637000)

摘 要 探地雷达技术通过发射和接收电磁波, 生成地下结构的可视化图像, 适合对坝体、闸基等关键部位开展无损检测工作。本研究主要围绕填筑密实度评估、变形趋势监测及加固效果验证等核心方向展开, 着重探讨了探地雷达技术在水利工程质量检测中的具体应用方法, 并结合典型工程案例分析, 以期为进一步提高水利工程隐蔽结构的检测精度提供借鉴。研究表明, 探地雷达具备检测快速、结果直观的特点, 可提升结构隐患的识别效率, 为水利工程的安全稳定运行提供技术保障。

关键词 探地雷达; 水利工程; 质量检测

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.019

0 引言

目前, 水利工程正进入集中养护期。部分设施服役年限较长, 在环境变化与长期运行负荷的双重作用下, 内部结构逐渐暴露出各类安全隐患。传统检测方法在检测效率方面已无法满足当下的实际工作需求。为进一步提升检测质量, 工作人员需选择适配典型水利场景的技术, 精准识别常见病害的同时连续监测结构运行过程, 以此增强隐蔽部位检测的科学性, 为水利工程安全运行筑牢技术根基。

1 探地雷达工作原理

探地雷达是靠电磁波来摸清地下结构的情况, 在工作的时候, 设备上的发射天线会向地下发送高频电磁脉冲, 这些脉冲在地下传播时, 只要碰到不同材料的交界处, 就会产生反射, 而接收天线会把这些反射信号收集起来, 再经过数据处理, 就能形成对应的探测图像。不同材料对电磁波的反应不一样, 如土壤、水、混凝土和空洞, 各自的电磁特性都有差别, 电磁波在其中传播, 速度和信号的强弱都会发生变化。进一步分析这些变化, 就能确定地下物体的位置和形状。这种技术不用开挖, 很适合给坝体、隧洞、渠道类结构做质量检查, 能快速找出裂缝、空洞之类的问题。

2 水利工程质量检测中应用探地雷达技术的作用

2.1 评估工程填筑质量

探地雷达是非开挖检测技术, 在土石坝、堤防类结构的质量检查中, 能发挥很好的作用。实际使用时,

探地雷达会发射高频电磁波, 之后接收反射回来的信号, 凭借这些信号, 不同填筑材料之间的界限能清晰地呈现出来^[1]。检测人员对这些信号做进一步分析, 就能判断材料层次是不是分明, 以及不同区域的结构有没有差异。除此之外, 此技术还能反映填筑区域的密实情况, 找出松散或未压实的区域。

2.2 查找隐蔽工程缺陷

在水利工程质量检测工作中, 探地雷达技术能发现不少传统检测手段难以察觉的问题, 通过发射并接收电磁波信号, 准确呈现地下不同材料间的界面变化, 据此就能找出异常区域。在实际检测时, 探地雷达可以有效识别地下管道的位置偏移、局部破损引发的漏水情况, 还有渗流可能形成的通道。另外, 填筑过程中若不小心混入异物, 或出现材料分布不均匀等问题, 也能借助雷达图像里的异常反射特征来判断。这种不用开挖、能直观呈现检测结果的方式, 有助于检测人员全面掌握地下结构状况, 为后续维护或安全评估提供科学依据。

3 探地雷达技术在水利工程质量检测中的应用策略

3.1 精准探测坝体结构, 识别内部空洞隐患

在水利工程中, 坝体结构的安全状况直接关系到整个工程的运行安全, 检测人员使用探地雷达技术能够捕捉地下不同材料间的界面信息, 进而判断结构内部是否存在空洞或分层等异常。

探地雷达技术能生成高精度的地下图像, 把隐蔽

作者简介: 杨畅(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程检测。

*通信作者: 郑成(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利工程检测。E-mail: 1138806062@qq.com

缺陷的位置和形态清晰地呈现出来,方便检测人员判断坝体是否存在潜在安全隐患。与传统检测方法相比,其效率高、覆盖范围广、成像清晰,很适合大体积坝体的整体排查和重点区域的细致检测^[2]。检测人员在应用时要结合坝体结构特征和建设材料,合理设置探测参数,让采集的信号准确反映实际情况。同时,检测人员还要考虑坝体地质条件和周边水文环境对电磁波传播的影响,保证反射信号清晰。发现异常区域后,要结合历史施工记录和监测数据,区分是质量缺陷还是后期损伤,并分析发展趋势,经过多次检测对比,能提高识别精度,为后续处理工作指明方向。例如:某大型水工隧洞已运行多年,为全面掌握衬砌结构的稳定状况,检测人员应组织一次结构质量检测,排查衬砌内部是否存在脱空、分层等安全隐患。该隧洞围岩为软质黏性岩土,长期受地下水渗流和隧洞内水力冲刷交互作用影响,结构稳定性相对复杂。为保证检测工作覆盖到隧洞部位,检测人员要把探测路径设置在拱顶中线、底板边缘等典型结构区段,同时把断层构造带纳入重点检测范围。考虑到隧洞结构材质密实度高且反射界面又较为复杂,应选用低频地质雷达设备来增加探测穿透深度,把天线间距设定为0.5米,沿着预设路径连续采集纵向剖面数据,在图像分辨率和深度信息之间做好平衡。检测作业需统一在温湿度相对恒定的条件下开展,减少环境波动干扰。图像数据处理完毕后结果会显示隧洞左侧拱肩附近有一段明显的反射异常区域,宽度大约10米深度集中在衬砌2米至4米处,雷达图像表现出持续低反射的特征。对比历年结构巡检记录和渗流监测数据发现,该段隧洞在汛期多次出现衬砌湿斑现象,结合设计图纸和施工资料综合研判,初步认为该区域存在混凝土衬砌压实不足或衬砌背后填充不密实的问题。检测人员可在该区域两侧加密布设雷达扫描路径,同时适当调整天线频率,补充采集多角度高分辨率图像数据。经过多组图像比对分析,最终确认该段隧洞结构存在不均匀性及局部空洞问题,建议后续结合钻探验证工作开展针对性治理。

3.2 立体监测闸基变形,掌握埋设构件状况

探地雷达技术可扫描地下结构的空間并捕捉不同深度的图像信息,检测人员借助这些信息能判断闸基是否存在沉降类变形问题^[3]。除此之外,该技术还能排查闸基内部埋设构件的运行状态如钢筋、锚固件等,

明确其安装位置是否精准、连接部位是否牢固。生成的图像清晰度高、信号反应灵敏,能让检测人员在变形现象显现之前就发现潜在隐患,为提前开展评估处置、保障工程长期安全运行提供有力支撑。检测过程中,工作人员需结合闸基的结构特性科学设定雷达参数,保证信号可覆盖所有区域,同时结合当地地质条件和荷载传递规律,综合解读图像信号,精准锁定问题所在区域。例如:以某水工隧洞运行安全评估工作为例,检测人员需运用探地雷达技术检测隧洞衬砌结构及基础连接部位,判断是否存在沉降及其他各类结构异常情况。

该隧洞基础采用钢筋混凝土结构长期承受地下水压力、地质应力的共同作用,结构稳定性面临一定隐患。为保障检测精度,工作人员需围绕隧洞底板、两侧墙脚等关键受力部位,划分多个纵横剖面并布设密集检测网格,保证结构内外边界过渡带及连接节点区域都能被检测图像完整覆盖。本次检测要把探测深度控制在6米以内,同步采集多方向、不同深度层次的图像数据,以此提升对微小结构异常的识别精准度。检测时可选用多频率组合雷达设备,依据隧洞结构均匀设置采集点,同时实时记录洞内湿度、衬砌表面状况等环境参数,为后续数据反演和异常识别提供参考。图像分析阶段工作人员需重点关注反射波的强度分布和能量衰减特征,结果显示隧洞中部底板出现反射异常图像,信号呈低强度且连续性差。结合图像特征研判该区域存在密实度不足、局部钢筋排列不均问题,推测伴随底板轻微沉降或钢筋锚固松动等结构隐患。为进一步核实状态,需在异常区域周边加密布设雷达测线,调整频率并采集多角度剖面图像,解析异常信号,明确结构变化趋势及受力路径干扰范围,为隧洞后续加固设计提供可靠技术支撑。

3.3 快速扫描渠道衬砌,评估衬层结合状态

探地雷达可以清晰地呈现材料层之间的界面情况,检测人员能够从图像中看出结合是否紧密、结构是否连续完整。与传统检测手段相比,探地雷达不用破坏结构表面,就能完成大范围且高效率的检测,对于长度较长、结构复杂的渠道工程格外适用,能及时发现潜在风险,对保障水利设施安全运行很关键。在实际应用时,检测人员要结合渠道的结构类型和所在区域的地质条件,合理规划检测路线,确保重点部位和薄弱区域都能被有效覆盖。在此过程中,检测人员还需

结合衬砌材料特性以及已有运行信息,综合分析雷达数据反映的界面变化,判断是否存在异常趋势。把检测结果同以往资料对比,能进一步明确当前衬砌性能状态,为后续养护提供有力依据,使质量检测更全面^[4]。例如:以某混凝土衬砌水工隧洞的日常检测工作为例,该隧洞线路跨度大沿线地质条件复杂,部分段落此前还出现过衬砌裂缝问题。为保证检测结果的准确性,探测路径必须覆盖隧洞底板及两侧边墙,检测点按固定间距均匀布置,同时对以往出现过异常的段落适当加密测点,精准把控结构的变化规律。结合隧洞浅层结构的实际特性,本次检测选用适配高分辨率浅层成像的高频探地雷达设备,把探测深度控制在 1.5 米以内,重点捕捉混凝土衬砌层和基层接触界面的反射图像信息。为确保图像数据一致性,检测工作应选在天气干燥的时段开展,同时实时记录隧洞内电磁环境变化及结构表面状况,为后续图像数据的解析提供有效依据。图像分析结果显示,隧洞中段有一段长约 20 米的区间,底板区域反射信号存在不连续情况,图像层间边界模糊,反射强度明显低于周边区域以形成鲜明对比。结合原始设计图纸和运行维护记录分析得知,该段隧洞所在位置地基土层偏软且排水效果欠佳,长期运行易引发结构基础局部沉降,进而导致衬砌和基础层结合松弛甚至出现局部脱空。为进一步核实异常情况,检测团队应在该区域两侧增设检测剖面,开展多角度补测。基于此次检测结果,工作人员可编制详细技术报告,明确标注结构异常的位置与范围,结合受力分析提出针对性修复建议,为后续养护决策提供支撑。

3.4 反演分析雷达数据,辅助评估加固成效

探地雷达技术可采集加固区域内部的结构信息,检测人员经过分析雷达图像中反射信号的变化,就能判断加固处理是否达到预期效果。此项技术能清晰地呈现结构内部加固前后的差异,如材料分布是否变得均匀、结合是否紧密、原有缺陷有没有修复。对于衬砌层、基础、边坡这些重点结构部位,探地雷达生成的图像信息能提供具体的变化依据,为后续技术判断提供支持^[5]。在开展检测时,检测人员要结合加固区域的结构特点,合理确定探测范围。检测中需考虑现场材料的电磁特性及环境干扰,确保获取的数据清晰稳定,还要对比施工前后的雷达图像,分析结构连续性和密实程度等内容,增强判断的科学性,让检测结果更具实用价值。例如:隧洞原本为浆砌石结构,因

地基承载力不足且已服役多年,部分段落出现结构裂缝等典型病害。本次加固采用混凝土衬砌搭配注浆加固的复合技术对结构薄弱区段开展修复,以此提升衬砌整体稳定性和抗渗能力。为保证检测覆盖无死角,探测范围要涵盖隧洞底板和拱肩区域,同时结合原始设计图纸,把整个加固区段划分成若干检测单元,针对性对各关键结构节点采集数据。考虑到加固材料需一定时间才能进入性能稳定期,本次检测安排在加固施工结束一个月后。检测设备选用适配隧洞结构检测的双频探地雷达系统,设定的探测深度需覆盖加固层及下方的地基土体,保证采集到的图像清晰且各层分界明确。采集数据时检测人员要同步记录隧洞内湿度、电磁背景等可能干扰雷达信号的因素,为后续图像解析提供必要参考。图像分析阶段需重点选取加固前后对应位置的剖面图像做对比,聚焦反射波形强度类指标。分析结果显示加固注浆区域的雷达反射信号有所增强,原本模糊的结构界面变得规整清晰,说明内部空隙已被有效填充。

4 结束语

探地雷达技术是一种高效直观的非开挖检测技术,已在水利工程各类结构质量评估工作中推广应用。此项技术能精准识别地下结构异常情况,清晰反映关键构件运行状态并准确评估衬层结合质量,为加固处理效果的判断提供辅助作用。当前工程规模不断扩大,运维标准也在持续提高,检测人员合理运用探地雷达技术可为工程精细化管理提供技术支撑。未来,工作人员还需进一步优化图像识别方法,强化和结构安全评估的深度融合,构建覆盖设计、施工及运维全周期的监测体系。

参考文献:

- [1] 刘拓,云天禹.探地雷达检测方法在抽水蓄能电站工程中的应用研究[J].东北水利水电,2024,42(08):46-48.
- [2] 陈攻明.韩江鹿湖隧洞引水工程二衬回填灌浆质量检测分析[J].河南水利与南水北调,2024,53(02):57-58.
- [3] 闫永峰.探地雷达在水利工程隧道衬砌脱空质量检测中的应用[J].广东水利水电,2023(02):15-19.
- [4] 赵辰乔.探地雷达法在水电工程输水隧洞衬砌混凝土检测中的应用分析[J].黑龙江水利科技,2022,50(09):151-153.
- [5] 唐嘉洪.探地雷达在引水工程隧洞二衬回填灌浆质量检测中的应用[J].河南水利与南水北调,2022,51(04):88-90.