

多技术融合的碾压坝裂缝精细检测研究

王攀, 郭泽, 卢佳星

贵州乌江水电开发有限责任公司沙沱发电厂, 贵州 铜仁 565300

DOI:10.61369/WCEST.2026030035

摘 要 : 碾压混凝土重力坝裂缝检测是水工建筑物安全评估的重要环节, 传统检测方法存在效率低、覆盖不全、数据难以回溯等问题。本文以某水电站大坝裂缝普查工程为依托, 提出一种融合无人机三维实景建模、显微图像量测、面波 CT 法与声波对穿法的多技术裂缝精细化检测方法。该方法以大疆 M350RTK 无人机搭载禅思 P1 相机进行影像采集, 构建坝体高精度实景三维模型, 实现裂缝空间定位与长度量测; 采用多功能混凝土质量检测仪进行显微成像, 获取裂缝宽度参数; 针对深层裂缝, 采用面波 CT 法与声波对穿法联合探测裂缝深度。工程应用表明: 该方法在坝后、坝前、溢洪道复杂作业环境下, 检测效率和准确性得到提高, 且成果具备完整的可视化与可回溯特性。该方法为水工混凝土建筑物裂缝普查提供了新的技术路径。

关 键 词 : 多技术融合; 三维实景建模; 显微图像量测; 面波 CT 法; 裂缝检测

Research on Fine Crack Detection of Roller-Compacted Dams Based on Multi-Technology Integration

Wang Pan, Guo Ze, Lu Jiaxing

Shatuo Power Plant of Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Tongren, Guizhou 565300

Abstract : Crack detection in roller-compacted concrete gravity dams is a crucial part of safety assessment for hydraulic structures. Traditional methods suffer from low efficiency, incomplete coverage, and difficulty in data traceability. Based on a crack survey project of a hydropower station dam, this paper proposes a multi-technique refined crack detection method integrating UAV 3D reality modeling, microscopic image measurement, surface wave CT, and cross-hole sonic testing. This method uses a DJI M350RTK UAV with a Zenmuse P1 camera for image acquisition to build a high-precision 3D model of the dam, enabling spatial positioning and length measurement of cracks. A multifunctional concrete quality detector is employed for microscopic imaging to obtain crack width parameters. For deep cracks, surface wave CT and cross-hole sonic testing are combined to detect crack depth. Engineering applications demonstrate that this method improves detection efficiency and accuracy in complex operational environments such as the dam's rear, front, and spillway, with complete visualization and traceability of results. It provides a new technical approach for crack surveys of hydraulic concrete structures.

Keywords : multi-technology integration; 3D real-scene modeling; microscopic image measurement; surface wave CT method; crack detection

引言

碾压混凝土重力坝结构安全受裂缝影响重大, 但传统单一检测方法存在明显局限。表观调查虽直观, 却难获裂缝内部信息; 超声波等检测易受干扰, 无法直观呈现三维空间展布。这些方法各自独立, 检测结果碎片化, 难以支撑成因分析与危害评估。为此, 我们构建多技术融合检测体系, 利用无人机三维实景建模精准定位裂缝, 显微图像量测法获取宽度变化, 面波 CT 法和声波对穿法探测延深, 钻孔全景数字成像揭示孔内展布。此策略实现精细化、立体化检测, 提升成果可靠性, 为裂缝处理提供科学依据。

一、多技术融合检测方法

(一) 总体技术路线

为精细化检测碾压混凝土重力坝裂缝, 本研究打造“宏观把

控、微观量化、内外结合、相互验证”的多技术融合路线。先以无人机三维实景建模全覆盖拍摄大坝外露区域, 精准定位表观裂缝并初步量测走向与长度, 圈定详查范围。接着, 针对关键裂缝, 用显微图像量测法测宽度, 面波 CT 法探延深趋势, 声波对

作者简介: 王攀 (1986-), 男, 陕西礼泉人, 工程师, 工学学士, 主要从事运行安全管理。

穿法结合钻孔定深度，钻孔全景成像揭示内部情况。最终整合数据分类定级，形成完整裂缝档案，支撑大坝安全评估与决策。

（二）基于无人机倾斜摄影的三维实景建模

三维实景建模技术堪称大坝裂缝普查的“利器”，能快速、精准且全覆盖地调查宏观表现缺陷，有力规避了传统人工登高检测安全风险大、效率低、有视觉盲区等不足。

在设备选型上，选用大疆 M350 RTK 经纬测绘无人机作搭载平台，其飞行稳、抗干扰强，适配多种负载。搭配的大疆禅思 P1 全画幅航拍相机，4500 万像素加上机械全局快门，可消除影像果冻效应，确保图像清晰。该相机系统支持微秒级时间同步，结合 RTK 定位模块，无需地面像控点就能实现高精度定位，满足建模需求。

航线规划与影像采集时，针对不同区域特点制定策略。坝后及坝前垂直立面用贴近摄影测量模式，无人机仿地飞行、网格化巡航拍摄；溢洪道等复杂区域则手动与自动飞行结合，多角度环绕拍摄。严格控制飞行参数，对影像缺失部位用手持相机补充拍摄。

三维重建处理中，将影像数据导入系统，经空中三角测量、多视影像密集匹配等步骤生成三维实景模型，还进行了优化和轻量化处理。最后，将模型导入专业平台，检测人员可漫游观察，精准定位、编录与量测裂缝等缺陷^[1]。

（三）基于显微图像量测的裂缝宽度检测

裂缝宽度是判断裂缝类型与危害程度的关键量化指标，传统塞尺检测存在读数误差大、难追溯、效率低等弊端。本研究运用基于显微图像处理的检测技术，达成高精度、数字化、可追溯的量测。检测借助多功能混凝土质量检测仪，其高分辨率显微摄像头紧贴裂缝采集图像并无线传至主机平板，内置算法智能识别拟合裂缝边缘，实时计算显示宽度值。测点布置上，依裂缝发育长度与宽度变异，每条裂缝设 2-3 个代表断面，优先选最大开口、突变及特征交汇处，长裂缝均匀加密^[2-3]。

（四）基于面波 CT 与声波对穿的裂缝深度探测

1. 面波 CT 探测原理与现场测试方法

弹性波面波具备频散特性，不同波长的面波影响深度各异。利用四通道传感器设备采集面波信号，提取频散曲线并分析，能够得出混凝土结构中各深度介质的瑞利波波速及相关物理参数。面波在混凝土结构中的穿透深度大致等于其一倍波长，且波长随面波频率改变。分析不同频率面波，可获取混凝土结构不同深度的信号特征，进而检测不同深度混凝土质量。高频瑞利面波可检测数厘米深度内的混凝土质量，低频（长波长）瑞利面波能检测大型混凝土结构较深处的裂缝缺陷。

现场检测采用四通道低频面波检测系统，传感器间距固定为 20cm，排列长度 0.6m。测试时，将传感器阵列沿裂缝走向布置于一侧，首个传感器距裂缝边缘约 0.5m，保证测试区域总长度大于 1.1m 以满足深度探测需求。采用多种直径激振锤组合敲击激发不同频率面波信号，浅层裂缝探测用直径 17mm-50mm 的金属锤高频激振，深层裂缝探测用直径 50mm-150mm 的尼龙锤低频激振。每条裂缝布置 2-3 条检测断面，重点测试裂缝中部及端部区

域。通过频谱分析和频散曲线提取，可识别裂缝发育深度，浅层裂缝频散曲线呈“浅层异常、深层正常”形态^[4]。

2. 声波对穿法精准探测裂缝深部发育特征

对于难以确定深部发育情况的表层或浅层裂缝，尤其是可能贯穿的裂缝，声波对穿法可精准探测。该方法在裂缝两侧钻孔，跨孔布置声波发射与接收换能器，利用超声波在混凝土中的传播特性判定裂缝延深深度与空间展布。超声波传播遵循弹性波理论，遇裂缝等缺陷，传播特征改变。因空气与混凝土声阻抗差异大，裂缝界面成强反射界面，超声波无法直接穿越，实际传播路径增长，视波速降低；绕过裂缝尖端时发生绕射，声波能量衰减，接收波形振幅降低、主频漂移。

为精准确定深层裂缝特征，采用骑缝钻孔精细化探测。针对前期判定的深层或疑似贯穿裂缝，在典型部位布置检测剖面，每组剖面垂直裂缝走向钻 2-3 个钻孔，孔径依换能器而定，孔深暂定 2m 可调整。钻孔中，以 10cm 为基本间距全孔段扫描测试，初步获取波速变化曲线，在裂缝发育及波速异常区，加密至 5cm 测点间距，精确捕捉裂缝底界拐点位置，确定裂缝发育底界。

（五）多源数据融合与成果建档

在完成三维实景建模、显微图像量测、面波 CT、声波对穿等多技术现场检测与数据分析后，如何有效整合、统一管理这些来源多样、尺度不同、表征维度各异的数据，成为裂缝精细化检测成果能否切实服务工程实践的关键所在。

本研究构建了裂缝检测多源数据融合与“一缝一档”数字化成果管理体系，实现对每条裂缝从外观到内部、从定性到定量的全方位归档与可视化关联。

为建立多源数据间的有机联系，先对坝后、坝前、溢洪道及 layers 廊道等部位发现的裂缝和渗水点系统梳理分类，按发育部位和发现顺序统一编码，形成贯穿检测全程的唯一标识，作为后续数据关联的核心索引，确保同一裂缝不同检测数据准确归集匹配。

以无人机倾斜摄影生成的三维实景模型为数据集成与可视化基础，在其中精确定位已编码裂缝，建立热点链接或属性字段，关联显微图像量测、面波 CT、声波对穿等检测数据。检测人员或管理人员点击模型中的裂缝标识，即可一键调阅全部检测档案，实现多维度溯源与可视化呈现。

二、工程应用成果

为检验多技术融合检测方法的工程适用性与技术优势，以沙沱发电厂碾压混凝土重力坝为对象开展全面裂缝普查，覆盖坝后、坝前、溢洪道及 layers 廊道等重点区域。

经系统应用多技术融合体系，获取了全面精准的检测成果，优势显著。检测效率上，无人机三维实景建模 3 个架次、不到 2 小时就完成 3.5 万平方米表观数据采集，避免传统人工检测耗时长、风险高的问题。量测精度上，显微图像量测达 0.01mm 级，面波 CT 与声波对穿法分级探测裂缝深度，误差控制在 $\pm 0.1\text{m}$ 内。

此次应用验证了多源数据融合技术的综合优势，多维度信息

互补形成完整链条，检测结果相互验证提升可靠性，数字化成果便于动态管理，实现从一次性检测到全生命周期管理的跨越^[5]。如图1、图2所示。



图1 背水面部分坝段模型及裂缝信息成果



图2 迎水面部分坝段模型及裂缝信息成果

三、结论

本研究创新性地提出多技术融合检测方法，达成碾压混凝土重力坝裂缝空间定位、宽度识别与深度探测的一体化。无人机三维实景建模攻克高陡作业面人员抵近难题，实现表面裂缝全覆盖、无接触精准定位编录；显微图像量测技术让裂缝宽度识别精度达 0.01mm 量级，助力分类定级；面波 CT 法与声波对穿法联合，精准探测裂缝发育深度，与钻孔验证结果相符。工程实践显示，该体系在沙沱发电厂大坝裂缝普查中高效建档，优势显著，值得推广。

参考文献

- [1] 李明, 张华, 王强. 基于无人机倾斜摄影的水工建筑物三维实景建模技术研究 [J]. 水力发电, 2022, 48(6) : 75-79.
- [2] 陈志明, 刘伟, 赵立. 混凝土裂缝显微图像测量系统的研制与应用 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(3) : 124-129.
- [3] 张伟, 刘洋. 超声波对穿法检测混凝土裂缝深度的试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5) : 112-117.
- [4] 王建国, 李强. 面波 CT 法在混凝土结构无损检测中的应用研究 [J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(4) : 456-462.
- [5] 盛金保, 向衍, 杨德玮等. 水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7) : 1351-1366.