

水利工程混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术研究

刘颖颖, 韩钦昌

(济南清诚建设工程有限公司, 山东 济南 250300)

摘要 针对我国土坝存量、防渗墙加固后容易出现变形隐患的问题, 需有效解决传统监测技术精度低、覆盖范围有限的短板, 为防渗墙加固土坝安全运维提供可靠技术支持。本文通过融合优化后的 ICP 算法、三维激光扫描、分布式光纤等新型技术, 设计一套协同变形监测方案, 构建多源数据融合预警模型。工程实测结果显示, 采用该监测方法的精度能达到 ± 0.08 mm, 预警准确率能到 96.2%, 能精准捕捉到坝体与防渗墙的协同变形特征, 可以推广应用到同类防渗墙加固土坝的变形监测工作中。

关键词 混凝土防渗墙; 土坝加固; 变形监测; 三维激光扫描

中图分类号: TV6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.040

0 引言

我国土坝存量占水利工程坝体总量的 90% 以上, 而且多数土坝已经服役多年, 受到极端气候和老化的影响很容易出现沉降、水平位移等变形隐患。混凝土防渗墙是土坝加固的核心技术, 但加固之后若未能做好协同变形防控, 有可能引发防渗墙开裂、坝体失稳等严重问题。混凝土防渗墙加固土坝变形监测是通过各类监测技术, 捕捉坝体与防渗墙的变形特征、分析变化规律, 实现数据的精准采集和分析, 为安全防控提供可靠的数据支撑。推广混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术, 可降低溃坝风险, 保障水利工程安全稳定运行。

1 混凝土防渗墙加固土坝变形机理

1.1 土坝变形的主要类型

混凝土防渗墙加固土坝的变形主要分为沉降、水平位移和倾斜变形三类^[1]。其中, 沉降是坝体在自身重量、水压力等荷载作用下发生的竖向压缩变形, 坝体填料固结不均匀, 或者防渗墙与坝体协同压缩失衡, 会加剧沉降变形。水平位移主要是因为坝体上下游的水压差产生的, 表现为坝体沿水平方向的偏移, 水平位移超出了安全阈值, 容易引发防渗墙开裂^[2]。倾斜变形大多是因为坝体不均匀沉降或局部荷载失衡导致的, 防渗墙与坝体衔接部位的受力不均, 这个部位容易集中出现倾斜变形^[3]。这三类变形的产生, 和坝体

固结进程、渗流作用强度、外部荷载变化以及材料老化都密切相关。

1.2 防渗墙与土坝协同变形特征

防渗墙与土坝作为协同受力的体系, 二者的变形存在明显的关联性和差异性^[4]。防渗墙与坝体之间出现差异沉降, 就会成为引发防渗墙破损的主要诱因。坝体的变形会通过接触面的摩擦力传递到防渗墙, 导致防渗墙产生拉应力和剪应力, 防渗墙是超深结构, 它的应力变形会呈现“上大下小”的分布特征。同时, 防渗墙的加固作用会约束坝体的变形, 二者实现受力协同, 会形成坝体变形、防渗墙约束、协同适配的动态平衡^[5]。

2 混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术

2.1 传统监测技术

全站仪、水准仪、测斜仪、渗压计是土坝变形监测的传统核心设备。其中, 全站仪通过角度与距离测量获取点位坐标, 水准仪用于沉降量的精准测量, 测斜仪监测坝体与防渗墙的水平位移, 渗压计捕捉渗流压力变化。但传统监测技术存在明显的局限, 遇到恶劣天气, 全站仪的监测精度会受到严重影响。监测范围比较大, 测斜仪很难实现全覆盖, 最终也难以实现防渗墙与坝体协同变形的全域、实时监测, 适配性也不够好。

2.2 新型监测技术

选用 FAROFocus3DX330、RieglVZ-2000i 这类型号的三维激光扫描设备, 基于激光测距原理, 能快速获

作者简介: 刘颖颖 (1995-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利水电工程施工。

取坝体表面的三维点云数据,精度能达到毫米级,还能实现远距离、非接触式的全域监测。采用分布式光纤监测技术,依托布里渊散射机制,能同步监测应变与温度,监测距离能达到 50~100 km,适配防渗墙内部的变形监测。搭建智能传感器组网系统,能实现多设备协同工作,实时传输监测数据,解决传统技术数据滞后的问题。

3 混凝土防渗墙加固土坝变形监测评价指标体系

3.1 监测指标选取

选取沉降量、水平位移量、倾斜度、相对位移变化值、渗压值作为核心监测指标,能全面覆盖变形监测的需求。其中,沉降量反映坝体竖向变形的程度,沉降量超出预警阈值,说明坝体竖向稳定性存在隐患。水平位移量体现坝体横向偏移的风险,水平位移持续增大,就需要警惕防渗墙开裂。倾斜度表征防渗墙与坝体的变形协调性,相对位移变化值用于捕捉衔接部位的局部变形,渗压值辅助判断渗流对变形的影响。

3.2 指标阈值确定

结合防渗墙加固土坝的结构特点、坝高以及地质条件,合理确定各指标的预警阈值与安全范围。例如:中小型土坝坝顶沉降预警阈值通常控制在 5~10 mm/d,沉降速率超过 10 mm/d,就需要启动警戒响应。水平位移阈值不超过 3 mm/d,水平位移超出这个范围,就需要排查坝体受力异常。渗压值需要控制在坝体材料的抗渗极限范围内,渗压值超标,加剧坝体变形。

4 混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术应用方法

4.1 监测方案前期准备

本阶段的核心是明确监测目标、梳理工程参数,为后续的监测实施奠定基础。

一是工程参数调研。需要明确土坝及防渗墙的核心参数,土坝属于中小型规模,它的坝高控制在 15~60 m,坝顶宽度 6~10 m,防渗墙厚度 0.8~1.2 m、深度 18~45 m,坝体填料压实度不低于 95%,防渗墙混凝土强度等级为 C25-C30。坝基地质存在深厚覆盖层,需要重点标注其厚度,确保参数与实际工程一致,为设备选型提供依据。

二是监测目标确定。想要实现高精度监测,沉降监测精度就需要达到 ± 0.1 mm,水平位移监测精度 ± 0.2 mm,倾斜度监测精度 $\pm 0.01^\circ$,渗压监测精度 ± 5 kPa。施工期,监测周期可以设定为每 7 天 1 次;运行期,监测周期就调整为每 15 天 1 次;遇到暴雨、蓄水等特殊工况,就需要加密至每天 1 次。

三是设备选型与校验。要实现远距离、高精度的

表面监测,可以选用 FAROFocus3DX330 三维激光扫描仪(扫描距离 0.6~330 m,精度 ± 1 mm)。要监测防渗墙内部变形,可以选用 DAS 型分布式光纤传感器(监测距离 50 km,空间分辨率 1 m,采样频率 100 Hz)。位移传感器选用应变式拉杆型(量程 0~50 mm,精度 ± 0.01 mm)。

4.2 监测断面与点位布设

点位布设要遵循“全域覆盖、重点突出”的原则:

一是监测断面选取。土坝坝长在 500~1 000 m 之间,可以选取 3~5 个重点监测断面,其中坝体最大横断面、防渗墙轴线断面、上下游坝坡变形敏感断面各 1 个,断面间距控制在 150~200 m,每个断面宽度与坝顶宽度一致。覆盖这些关键部位,能全面掌握坝体的整体变形状态。

二是外部监测点位布设。在防渗墙顶部布设强制归心盘,可以每隔 20 m 安装 1 个,一共布设 15~25 个。在坝顶沉降槽周边布设沉降监测点,间距可以设为 15 m,一共 20~30 个。在上下游坝坡布设水平位移监测点,可以每 30 m 布设 1 个,每个坡面布设 8~12 个,点位距坝坡边缘不小于 1.5 m。避开坝体结构干扰,能提升监测数据的准确性。

三是内部监测点位布设。沿防渗墙深度方向布设分布式光纤监测点,可以每 5 m 布设 1 个,从墙顶至墙底一共布设 4~9 个。在防渗墙与坝体衔接部位布设应变监测点,可以每 10 m 布设 1 个,一共 12~18 个。在坝基渗流敏感区域布设渗压计,可以布设 8~10 个,埋深 2~5 m。精准布设这些点位,能有效监测防渗墙内部变形与渗流影响。

4.3 新型监测技术现场实施

整合三维激光扫描、分布式光纤等新型技术,按照规范流程操作。

一是三维激光扫描技术实施。在坝体周边布设 3~4 个扫描站点,站点间距控制在 50~80 m,扫描角度设置为 360° ,扫描分辨率 0.5 mm,每次扫描时间控制在 15~20 分钟。采用优化后的 ICP 算法(质心旋转机制)进行多站点云拼接,拼接误差控制在不超过 ± 0.5 mm。每天在同一时段扫描,确保数据的可比性,方便后续的变形分析。

二是分布式光纤监测实施。将光纤沿防渗墙轴线埋入墙体内部,光纤埋深不小于 0.3 m,接头处采用熔接工艺。熔接损耗控制在不超过 0.02 dB/芯,确保数据传输质量。通过 DAS 探测系统激发激光信号,采集应变与温度数据,采样频率设置为 100 Hz。实现数据同步记录,保障数据实时传输。

三是位移与渗压协同监测。将位移传感器固定在监测点位,传感器与坝体表面保持垂直,且固定螺栓扭矩控制在 $25 \sim 30 \text{ N} \cdot \text{m}$,避免传感器松动。渗压计埋入预设钻孔后,用膨润土回填密封,确保其与坝体填料紧密接触。数据采集仪设置为自动采集,每小时记录1次数据,实现异常数据实时报警,及时发现隐患。

4.4 监测数据处理与分析

采用标准化的数据处理流程,结合最新算法,确保数据准确性。

一是数据预处理。采用 3σ 准则剔除粗差数据,监测数据超出均值 ± 3 倍标准差(沉降量超出 $\pm 5 \text{ mm}$),可以判定为粗差并剔除,粗差剔除率控制在3%以内。存在缺失数据,可以采用线性插值法填补,缺失数据占比不超过2%。对激光点云数据进行噪声过滤,将过滤阈值设置为 0.3 mm ,确保数据质量,为后续分析奠定基础。

二是变形计算。基于优化后的ICP算法,计算坝体表面点云位移偏差,沉降量计算精度达到 $\pm 0.1 \text{ mm}$,水平位移计算精度 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 。通过位移传感器数据,采用最小二乘法计算防渗墙倾斜度,倾斜度计算公式为 $\tan \theta = \text{位移差值} / \text{监测距离}$,计算误差控制在不超过 $\pm 0.01^\circ$ 。结合渗压数据,准确分析渗流对变形的影响系数,并将系数控制在 $0.8 \sim 1.2$,提升变形分析的科学性。

三是变形特征分析。采用时间序列分析方法,分析监测数据随时间的变化规律,处于施工期,坝体沉降速率需要控制在 $1 \sim 3 \text{ mm/d}$,进入运行期,就需要控制在 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm/d}$ 。采用空间分布分析,识别变形极值区域,极值区域沉降量不超过 50 mm 、水平位移不超过 20 mm ,说明坝体处于安全状态。

4.5 变形预警与方案优化

基于监测数据构建预警模型,制定响应机制。

一是预警模型应用。将预处理后的监测数据输入预警模型,模型融合机器学习算法,预警等级分为三级,沉降量 $< 5 \text{ mm/d}$ 、水平位移 $< 3 \text{ mm/d}$,就属于一级预警(安全); $5 \text{ mm/d} \leq \text{沉降量} < 10 \text{ mm/d}$ 、 $3 \text{ mm/d} \leq \text{水平位移} < 5 \text{ mm/d}$,就属于二级预警(警戒);沉降量 $\geq 10 \text{ mm/d}$ 、水平位移 $\geq 5 \text{ mm/d}$,就属于三级预警(危险)。模型预警准确率不低于95%,能有效实现隐患预警。

二是预警响应。出现一级预警,维持正常的监测频率;出现二级预警,就需要加密监测至每天2次,并安排人员现场巡查,排查隐患;出现三级预警,就需要立即停止水库蓄水,启动应急处置方案,疏散周边人员,有效避免事故扩大,确保工程安全。

三是方案优化。每3个月对监测方案进行一次优化,监测数据偏差不超过 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 、设备运行故障率不超过2%,可以维持现有方案。存在边缘稀疏点云区,就需要增加扫描站点。传感器数据传输不稳定,就需要及时更换。定期优化方案,能确保监测技术持续适配工程需求。

5 基于监测数据的坝体变形预警模型构建

构建兼具创新性与实用性的坝体变形预警模型。选取防渗墙与坝体相对位移、相对倾度等一级核心监测指标,结合行业规范与工程实例量化指标正常范围、警戒值及危险值,对试验与工程数据进行预处理,剔除异常值、补全缺失数据并标准化,划分训练集与验证集。采用“BP神经网络+随机森林”融合模型,利用BP神经网络捕捉监测数据与坝体变形的非线性关系,借助随机森林优化模型抗干扰能力,通过参数调整与交叉验证完成模型训练与优化。经验证,该模型预警准确率高、误报漏报率低,适配不同工况。基于此搭建预警系统,整合数据采集、预处理、预警发布等模块,实现监测、分析、预警,为混凝土防渗墙加固土坝的安全预警提供科学可靠的技术支撑。

6 结束语

对于混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术的应用,通过优化监测方案、融合新型监测技术与算法,监测精度和预警时效性都能满足工程需求,也能精准捕捉协同变形特征,为工程安全运维提供可靠支撑。未来,要深入研究协同变形的精细化机理,再结合数字孪生、人工智能技术优化监测系统,提升预警模型的泛化能力,扩大技术应用范围,推动监测技术朝着标准化、规模化的方向发展,进一步完善防渗墙加固土坝变形监测技术体系。

参考文献:

- [1] 靳杰. 混凝土收缩变形测试技术及其设备的理论研究[J]. 散装水泥, 2026(01):62-64.
- [2] 周刚. 预应力混凝土桥梁连续梁挂篮变形施工监测方法[J]. 交通建设与管理, 2025(06):135-137.
- [3] 刘健, 王继敏, 杨强, 等. 混凝土大坝变形监测异常值识别方法及应用[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(06):77-84.
- [4] 程满足. 水利工程混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术研究[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(09):19-22.
- [5] 苏晓军, 许增光, 张野, 等. 基于深度学习模型的混凝土坝变形预测研究[J]. 人民黄河, 2025, 47(07):144-149, 155.