

水利工程边坡防护设计、长期维护与实时监测技术整合研究

庄尚乾 方海燕 杨敏
荆州市河道管理技术中心 湖北 荆州 434000

摘要：水利工程边坡作为工程安全的关键环节，其稳定性直接影响工程功能发挥与周边安全。本文研究民防护设计、长期维护与实时监测技术的整合应用。梳理了坡面防护、支挡加固、排水设计等实用防护方法，阐述了智能化监测、加固修复、排水维护及管理机制等长期维护技术，同时分析了多参数采集、数据传输处理、动态预警等实时监测关键技术，最终提出全周期整合实施路径、实操保障要点及效能优化策略。研究旨在构建“设计-维护-监测”协同体系，为提升水利工程边坡稳定性、降低全周期风险提供技术支持，对保障水利工程长期安全运行具有实践意义。

关键词：水利工程边坡防护；设计；长期维护；实时监测技术；整合应用

引言：当前水利工程边坡防护设计、长期维护与实时监测多呈分散状态，设计未充分衔接监测与维护需求，维护缺乏精准监测数据支撑，监测技术未深度服务设计优化，导致边坡安全管控效能不足。鉴于此，本文整合三类技术的核心要点，探索全周期整合应用模式与保障机制，以期解决现有技术应用脱节问题，为水利工程边坡安全管理提供科学可行的方案。

1 水利工程边坡防护实用设计方法

水利工程边坡防护设计方法有（1）坡面防护方法主要包括植被防护与工程护坡两类。植被防护通过在边坡坡面种植适宜的植物，利用植物根系固土、枝叶截留雨水，增强坡面抗冲刷能力，同时改善生态环境，适用于坡度较缓、气候条件适宜且无严重滑坡风险的边坡；工程护坡则采用浆砌石、混凝土板、喷锚等材料与工艺覆盖坡面，形成防护层，抵御雨水冲刷、风化作用，适用于坡度较陡、地质条件较差或对坡面稳定性要求高的区域，能快速提升坡面防护效果，但需考虑与周边生态的协调性。（2）支挡加固方法常见的有挡土墙与抗滑桩。挡土墙依靠自身重量或结构强度阻挡边坡土体滑动，可根据边坡高度、受力情况选择重力式、悬臂式等类型；抗滑桩深入边坡稳定地层，通过桩体与土体的相互作用限制边坡变形，适用于深层滑动风险较高的边坡，能有效控制边坡位移，但需合理确定结构尺寸与布置间距，确保受力均衡。（3）排水设计方法分为地表排水与地下排水。地表排水通过设置截水沟、排水沟等设施，快速排除坡面雨水，减少雨水下渗对边坡土体强度的削弱；地下排水则采用盲沟、渗水管等，降低边坡土体中的孔隙水压力，提高土体抗剪强度，适用于地下水位较高或

降水丰富的区域，需根据边坡水文条件合理规划排水系统布局，确保排水通畅^[1]。

2 水利工程边坡长期维护技术与措施

水利工程边坡长期维护技术与措施如下：（1）完善智能化监测技术体系。优化监测设备布局，根据边坡地质条件、坡度及工程重要性，科学布设位移、渗流、应力应变监测点，实现边坡关键区域全覆盖；引入GNSS实时监测系统、无线渗压计等智能化设备，提升数据采集频率与精度，确保每小时至少完成1次数据采集，且数据误差控制在规范范围内。搭建监测数据管理平台，实现数据自动传输、存储与分析，平台具备异常数据预警功能，当监测指标超出阈值时，自动触发告警，及时推送信息至维护人员。建立监测设备定期校准制度，每季度对设备进行精度校验，每年更换老化或故障设备，保障监测系统稳定运行。（2）强化边坡加固与修复技术应用。针对坡面冲刷、剥落问题，采用喷锚支护技术，通过喷射混凝土与锚杆结合，增强坡面整体性与抗冲刷能力；对存在裂缝的边坡，采用压力注浆技术，向裂缝内注入水泥浆或化学浆液，填充缝隙、提高土体密实度，防止裂缝进一步扩展。对于深层滑动风险较高的边坡，运用抗滑桩或预应力锚索加固技术，通过抗滑桩嵌入稳定地层阻挡土体滑动，或通过锚索施加预应力约束边坡变形，提升边坡整体稳定性。推广生态加固技术，在坡面种植根系发达的固土植物，结合生态袋、植草混凝土等材料，兼顾边坡防护与生态修复，增强坡面抗侵蚀能力。（3）优化排水系统维护技术。加强地表排水系统维护，定期清理截水沟、排水沟内的泥沙、杂草，确保排水通道通畅；对排水沟渠进行定期检查，若发现渠壁破

损、渗漏,及时采用水泥砂浆修补或铺设防渗膜,防止雨水下渗。完善地下排水系统维护,定期检测盲沟、渗水管的排水能力,采用高压水枪冲洗或机械疏通方式,清除管道内淤积物;对地下水位较高的边坡,增设井点降水设备,通过抽排降低地下水位,减少孔隙水压力对边坡稳定性的影响。建立排水系统定期巡检制度,每月开展1次地表排水系统检查,每季度开展1次地下排水系统检测,确保排水系统持续发挥作用。(4)健全维护管理机制。制定标准化维护流程,明确日常巡检、定期检测、病害处置的具体内容与频次,如日常巡检每周1次,重点检查坡面、支挡结构、排水设施状态;每半年开展1次全面检测,对边坡稳定性进行评估。加强维护人员培训,每年组织2-3次专业培训,内容涵盖边坡病害识别、监测设备操作、加固技术应用等,通过理论授课与实操训练结合,提升人员专业能力^[2]。

3 水利工程边坡实时监测关键技术

3.1 多参数实时数据采集技术

水利工程边坡实时监测要精准采集反映边坡稳定性的核心参数,关键技术围绕以下位移、渗流、应力应变三类核心指标展开。(1)位移监测采用GNSS高精度定位技术,通过布设固定监测站与移动监测终端,实现边坡水平与垂直位移的实时捕捉,定位精度可达毫米级,能有效识别边坡微小变形趋势;搭配全站仪辅助监测,在复杂地形区域补充数据,提升位移监测的全面性。

(2)渗流监测依赖无线渗压计与水位传感器,渗压计嵌入边坡不同深度土体,实时采集孔隙水压力数据,分析地下水渗流规律;水位传感器布设于边坡坡脚或排水系统,监测地下水位变化,及时掌握渗流对边坡土体强度的影响。(3)应力应变监测则运用光纤光栅传感器与振弦式应变计,光纤光栅传感器可分布式监测边坡土体及支挡结构的应力变化,振弦式应变计聚焦局部关键部位,如抗滑桩、锚索的应变数据,为判断结构受力状态提供依据。

3.2 数据实时传输与智能处理技术

数据传输环节要保障监测数据的实时性与稳定性,核心技术包括以下方式。(1)无线传输以4G/5G、LoRa物联网技术为主,4G/5G适用于数据量大、传输距离远的场景,确保监测数据快速上传至平台;LoRa技术则针对偏远区域,具备低功耗、广覆盖优势,减少信号盲区。(2)有线传输多用于核心监测点,通过光纤实现大容量、抗干扰的数据传输,避免极端天气对无线信号的影响。

数据处理技术依托边缘计算与云计算协同架构,边

缘计算设备在监测现场对原始数据进行预处理,过滤异常值、补全缺失数据,降低数据传输量;云计算平台则对汇总数据进行深度分析,运用时间序列分析、机器学习算法建立边坡稳定性评估模型,自动识别数据异常趋势,将处理结果转化为直观的图表与报告,为后续预警提供数据支撑。

3.3 动态预警与响应联动技术

动态预警技术的核心是构建分级预警体系,基于历史监测数据与边坡安全阈值,划分蓝、黄、橙、红四级预警标准,不同等级对应不同的预警指标阈值。预警系统实时对比监测数据与阈值,当数据超出设定范围时,自动触发预警机制,通过短信、平台推送、声光告警等方式,将预警信息精准推送至管理人员,明确预警等级、受影响区域及潜在风险。

响应联动技术聚焦预警后的快速处置,通过建立监测系统与维护管理平台的联动机制,预警触发后自动生成处置建议,如启动应急巡检、调整排水系统运行参数等;系统可关联边坡周边的应急资源信息,如抢险设备存放位置、维护人员联系方式,辅助管理人员快速调配资源,缩短应急响应时间,形成“监测-预警-处置”的闭环管理,最大程度降低边坡失稳风险^[3]。

4 水利工程边坡防护设计、长期维护与实时监测技术的整合应用

4.1 全周期整合应用的具体实施路径

(1)在工程前期设计阶段,将监测需求与维护便利性纳入防护设计核心考量。防护设计方案明确监测参数的选取标准,根据边坡地质类型、坡高及受力特点,确定位移、渗流、应力应变等关键监测指标的精度要求与采集频率;设计图纸中要标注监测点的具体布设位置,确保监测点能覆盖边坡潜在风险区域,且避开后续维护作业的干扰区域。防护结构设计要预留维护接口,如在挡土墙顶部设置检修通道、在喷锚防护层预留注浆孔,便于后期维护时开展检测与加固作业。(2)工程建设阶段要同步推进监测系统搭建与维护预案制定。监测设备安装要与防护工程施工进度协同,如在边坡开挖至预设监测断面时,同步完成传感器的埋设与调试,避免后期开挖对设备造成损坏;监测系统搭建完成后,结合防护设计的安全阈值,设定监测数据的预警基准值,形成初步的预警规则。基于防护设计方案的结构特性,制定长期维护预案,明确不同防护结构的常规维护周期、内容及技术要求,确保维护工作与防护设计的适配性。(3)工程运营阶段实现监测、维护与设计的动态联动。实时监测系统需持续采集数据并传输至管理平台,平台通过

算法对数据进行分析,若发现数据超出预警基准值,立即触发维护响应;维护人员根据监测数据反馈的风险位置与类型,调用前期设计资料,确定匹配的维护方案。维护作业完成后,需将处置结果录入平台,一方面用于验证监测数据的变化趋势,判断维护效果;另一方面为防护设计的优化提供依据,若某类防护结构频繁出现同类病害,可结合长期监测数据与维护记录,调整后类似工程的设计参数。

4.2 整合应用的实操保障要点

(1) 数据协同方面,搭建统一的信息交互平台,实现设计、监测、维护数据的实时互通。平台需具备三大核心功能:一是设计数据存储模块,录入防护设计的结构参数、材料性能、安全阈值等基础数据,供监测与维护环节查询调用;二是监测数据处理模块,对实时采集的监测数据进行筛选、校准与分析,自动生成数据趋势图表,并与设计阈值对比,标记异常数据;三是维护数据管理模块,记录每次维护的时间、作业内容、使用材料及效果评估,形成完整的维护档案。通过数据互通,确保监测数据能精准对接设计标准,维护方案能贴合设计要求。(2) 流程管控方面,建立标准化的整合作业流程,明确各环节的职责与衔接节点。设计环节需在方案评审时,邀请监测与维护技术人员参与,确保设计方案兼顾监测与维护需求;监测环节需定期向设计与维护团队提交数据报告,报告中需明确数据异常对应的设计参数偏差情况,为维护决策提供依据;维护环节需在作业前核对设计图纸,作业后向设计团队反馈结构实际状态,若发现设计与现场实际存在偏差,共同制定设计优化方案。设定流程审核节点,如监测数据异常时需经设计人员复核后再启动维护,维护方案需经监测人员确认与监测数据匹配后再实施,避免各环节脱节。(3) 技术适配方面,确保监测技术、维护技术与防护设计的技术体系兼容。监测设备的选型考虑防护结构的特性,如针对高陡岩质边坡,选用抗干扰能力强的GNSS监测设备,避免岩石遮挡影响数据采集;维护技术的选用需符合防护设计的结构要求,如对生态植被防护的边坡,采用生态友好型的补植与灌溉技术,避免破坏原设计的生态防

护体系。

4.3 整合应用的效能评估与持续优化

整合应用要建立动态效能评估机制,定期从以理三方面衡量应用效果。(1) 安全维度重点评估边坡稳定性达标率,对比整合前后边坡隐患发生率、预警响应时效,验证“设计-监测-维护”联动对风险防控的实际作用;(2) 经济维度核算全周期成本,统计因精准维护减少的无效投入、因设计优化降低的返工费用,量化整合应用的成本节约效益;(3) 管理维度考核各环节协同效率,如数据互通耗时、流程衔接顺畅度,判断整合体系的运行流畅性。

基于评估结果开展持续优化,若发现某类监测数据与维护需求匹配度不足,调整监测参数或优化数据解析模型;若某防护结构维护频率过高,结合监测数据与设计参数,改进结构设计或优化维护技术;根据工程周边环境变化,动态更新设计标准、监测阈值与维护方案,确保整合应用始终适配边坡实际状况,实现长期稳定运行^[4]。

结束语:本文围绕水利工程边坡防护设计、长期维护与实时监测技术整合展开研究,明确了各技术模块的核心内容与整合逻辑,提出的全周期实施路径、实操保障及效能优化策略,可有效实现三类技术的协同联动。随着技术的不断迭代,“设计-维护-监测”深度整合体系将进一步完善,为水利工程边坡安全管控提供更全面的技术保障,助力水利工程高质量运行。

参考文献

- [1]欧杰初.水利工程施工中的边坡防护技术[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(5):088-091.
- [2]范权.水土保持中开挖边坡防护及植被修复分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2024(3):0045-0048.
- [3]王盛鑫.水利工程中的边坡加固措施及其效果监测[J].工程技术研究,2025,10(6):157-159.
- [4]雷军荣.河道库坝养护站边坡监测技术与安全措施探讨[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(10):0170-0173.