

高边坡水工建筑物支护工程稳定性监测与优化方案研究

潘 珏¹ 何安柱²

1. 江苏省太湖地区水利管理处 江苏 苏州 215128

2. 江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘要: 针对水工高边坡受渗流、水位涨落、施工扰动多因素耦合作用易失稳的问题, 本文梳理边坡失稳机理与核心稳定性理论, 构建多维度全周期监测体系, 规范测点布设、数据处理及分级预警机制。通过数值模拟剖析原有支护结构的缺陷, 结合边坡分区特征开展多目标优化设计, 优化支护参数与组合体系。结果表明, 优化方案可有效缩减塑性区、降低边坡变形、提升安全系数, 可为同类水工高边坡支护工程稳定管控提供参考。

关键词: 高边坡水工建筑物; 支护工程; 稳定性监测; 优化方案

引言: 水工高边坡是水利工程的核心附属结构, 长期服役于水浸、水位波动、暴雨入渗等复杂工况, 叠加施工开挖与爆破扰动, 极易出现支护失效、边坡滑移坍塌等病害, 严重威胁水工建筑物安全与工程运维稳定。当前边坡监测存在体系不完善、预警不精准、支护方案适配性不足等问题。为解决上述工程痛点, 本文结合边坡失稳机理, 搭建标准化监测预警体系, 依托数值模拟开展支护方案优化, 旨在提升边坡整体稳定性与工程服役耐久性。

1 高边坡水工建筑物支护工程稳定性基础理论与失稳机理

1.1 水工高边坡工程基本特征

(1) 水工高边坡分类标准多样, 按岩性可分为岩质与土质边坡; 按坡高大于30米为高边坡, 超过50米为超高边坡; 按支护形式分为主动加固(锚杆、预应力锚索)与被动防护(抗滑桩、挡墙); 按工程功能分为永久通航、泄洪消能及临时施工边坡等。岩质高边坡多采用锚固体系, 土质边坡则侧重排水与支挡联合。(2) 水工高边坡面临特殊复杂工况。长期水浸软化岩体强度; 库水位周期性涨落产生动态渗流, 改变应力场; 暴雨入渗致孔隙水压力骤升, 显著降低有效应力; 施工爆破与开挖卸荷导致应力重分布, 易触发局部塑性区贯通, 上述荷载均加剧失稳风险^[1]。(3) 常用支护结构受力特点各异。锚杆通过悬吊与组合梁作用提高岩层抗剪能力; 预应力锚索主动施加压应力, 增强软弱结构面抗滑力; 喷混封闭岩面防冲刷, 兼受弯剪; 抗滑桩依靠桩土共同作用承担剩余下滑力; 柔性锚固框架通过节点约束实现坡面整体协同变形, 适用于抗震及大变形区域。

1.2 边坡稳定性核心理论基础

(1) 极限平衡法假定滑体为刚塑性体, 基于摩尔-库

仑强度准则确定滑移面, 通过条分法计算下滑力与抗滑力之比(安全系数 F_s), $F_s >$ 规定值(如1.25~1.35)即判定稳定, 是工程设计的核心依据。(2) 强度折减法在数值分析中逐步折减岩土 c 、 ϕ 值直至计算不收敛, 以临界折减系数作为安全系数, 可直观揭示塑性区从坡脚向坡顶贯通的变形破坏演化过程, 弥补了传统方法无法分析应力-变形关系的不足。(3) 渗流-应力耦合理论基于Biot固结方程, 描述渗流场与应力场相互作用。水压力改变有效应力, 岩体变形又影响孔隙率与渗透系数, 该机制直接影响锚固区黏结强度及抗滑桩侧摩阻力, 是水工边坡稳定性分析的关键难点。

1.3 高边坡支护工程失稳影响因素与破坏机理

(1) 内部因素是失稳的根本原因。岩土体原生强度不足、层理/节理等软弱结构面倾角不利、岩体风化导致力学参数劣化, 以及高地应力区卸荷诱发拉裂, 均为内因。(2) 外部因素常为失稳触发条件。持续强降雨入渗软化滑带; 库水位骤降产生动水压力, 降低坡体自重抗滑分量; 施工开挖切脚改变几何边界; 锚固长度或密度不足、预应力损失等支护参数不合理; 长期循环荷载引起锚索松弛与喷层疲劳开裂。(3) 失稳破坏呈渐进演化过程: 坡顶张拉裂缝萌生→雨水沿裂隙下渗加速劣化→中部剪应力集中形成滑面→锚固端拔出力超限致锚固失效→滑体整体加速位移, 最终发生滑移或坍塌。整个演化受内因控制、外因触发, 具有突发性和链式效应, 需通过动态监测与反馈设计实施全过程防控。

2 高边坡水工建筑物支护工程稳定性监测体系构建与数据分析

2.1 监测总体方案设计

(1) 监测设计应遵循针对性、全面性、时效性、经济性四项原则。针对性指依据边坡地质条件与支护类型

确定监测重点；全面性要求变形、应力、渗流多维度协同监测；时效性强调数据采集与反馈的快速响应；经济性则需在满足安全预警前提下优化测点数量与项目，降低长期运维成本。二者统筹适配水工边坡数十年服役周期的特殊需求。（2）监测范围与周期须覆盖施工期与运维期全阶段。施工期重点监测开挖卸荷引起的瞬时变形与锚固应力损失，频率加密至每日或实时；运维期转为长期趋势性监测，按月或季度采集，遇汛期、水位骤变等特殊工况加频。重点监测区域锁定在断层破碎带、结构面交汇处、坡顶张裂带及支护结构锚固段^[2]。（3）监测核心指标包括五大类：坡面三维位移反映宏观稳定性；深层水平位移揭示滑面位置；锚杆锚索应力判断支护体系荷载状态；孔隙水压力评估渗流场变化；裂缝开合度追踪局部破裂演化。五类数据互为印证，构成完整的安全状态信息。

2.2 关键监测技术与测点布置

（1）变形监测技术优选GNSS自动化表面位移监测系统，实现毫米级精度、全天候实时三维定位；深层变形采用阵列式固定测斜仪或滑移式测斜仪，通过逐段测量精准捕捉潜在滑移带变形分布；裂缝监测选用振弦式裂缝计或光纤光栅位移计，自动化记录裂缝宽度变化及扩展速率，实现无人值守连续观测。（2）应力与渗流监测中，锚索轴力采用锚索测力计（环形压力传感器）与振弦式应变计联合监测，确保数据交叉验证；孔隙水压力选用振弦式渗压计，埋设于关键地下水水面及滑带附近；岩土体含水率通过时域反射法（TDR）或电阻率层析成像（ERT）实现原位连续测量，各传感器量程与分辨率须充分适配极端工况下的荷载波动范围^[3]。（3）测点优化布置应依据地质分区与数值模拟受力薄弱区联合确定。在潜在滑面倾向临空面、剪应力集中区、结构面交汇处及锚固端受力最大部位加密布设；在完整稳定岩体区适当稀疏。采用断面控制法（主断面密集、辅助断面验证）与重点加密相结合，构建空间关联监测网络，有效规避监测盲区并确保数据冗余度。

2.3 监测数据处理与稳定性判别

（1）监测数据预处理包含基于小波变换或卡尔曼滤波的降噪处理，滤除温度、电磁等环境随机干扰；采用拉依达准则（ 3σ ）或格拉布斯准则剔除粗大误差；统一时间基准与物理量纲，对缺测数据进行插值补全，形成标准化时序数据集，为后续分析提供可靠基础。（2）数据时序分析聚焦变形速率、应力松弛率、渗压变化率等特征指标演化规律。采用移动平均法提取长期趋势，差分法识别突变点与加速拐点，频谱分析揭示周期性响应

特征，并关联降雨量、库水位、温度等外因构建多元回归模型，系统揭示边坡在多因素耦合作用下的响应机理与演化规律。（3）稳定性分级判别参照《水电工程边坡安全监测技术规范》（NB/T10336）及工程实践经验，结合动态阈值将边坡划分为三级：变形速率持续低于稳定阈值且变化趋势收敛判为稳定；速率在阈值内波动但未明显收敛且无加速迹象判为基本稳定，需加强日常观察与定期巡查；当变形速率连续加速、支护应力骤降或渗压突增超过警戒线时判为失稳预警，须立即启动加密监测与应急处置程序。

2.4 监测预警体系搭建

（1）分级预警阈值设定须区分不同地质单元与支护区域的敏感差异。完整岩体区以表面位移速率 $0.5 \sim 1.0\text{mm/d}$ 、累计位移量 $10 \sim 20\text{mm}$ 为蓝色预警起始线；软弱结构面对变形更为敏感，以速率 0.2mm/d 、累计位移 5mm 为黄色预警起点；渗压阈值依据水位变动带设动态警戒线（如正常蓄水位对应渗压值的 1.2 倍），同时考虑变形速率与渗压变化率的双控指标，避免单一固定值导致的误报或漏报^[4]。（2）预警响应机制按照蓝、黄、红三级匹配标准化处置流程。蓝色预警（关注级）：加密监测频次至每日1次，启动现场人工巡查并提交周报；黄色预警（警示级）：24小时内召集技术会商，评估风险等级并制定补强设计方案，同时增设临时测点跟踪异常区；红色预警（应急级）：立即疏散现场人员、停止一切施工作业、启动抢险加固与应急排水措施，并动态调整后续监测方案，重点跟踪失稳区域演化趋势，直至安全状态恢复。

3 高边坡水工建筑物支护结构稳定性数值模拟与优化方案

3.1 数值模拟模型构建

（1）模型参数选取应以工程地质勘察报告及室内岩石力学试验为根本依据，确定岩土体容重、黏聚力、内摩擦角、弹性模量及泊松比等物理力学参数，同时获取锚杆锚索的弹性模量、屈服强度及抗滑桩的混凝土强度等级与配筋率。对弱风化层与断层破碎带应赋予独立参数分区，确保材料属性反映地质真实。（2）模型边界条件与荷载设定须模拟水工边坡真实服役环境。底面施加固定约束、四周施加法向位移约束；荷载工况涵盖自重应力场、坡面堆载、库水位周期性涨落（渗流场动态边界）、暴雨入渗及施工开挖卸荷等。采用有限元或有限差分软件建立二维或三维计算模型，对关键结构面设置接触单元以模拟滑面力学行为。（3）模型可靠性验证须将数值计算所得位移场、应力分布与现场监测数据（表面位移、锚索轴力、渗压等）进行逐项比对，调整材料

参数或边界条件直至误差控制在工程允许范围内,确保数值模型具备足够的工程仿真精度,为后续分析提供可信基础。

3.2 原有支护结构稳定性数值分析

(1) 原有支护方案参数须系统梳理工程既有设计的锚杆长度与间距、锚索预应力值与布设倾角、抗滑桩截面尺寸与嵌固深度、喷混厚度及配筋等具体指标,同时明确施工工艺顺序(如开挖分段、锚固注浆时机),为数值模型赋予准确支护属性。(2) 多工况稳定性模拟须分别计算天然状态、持续强降雨(饱和渗流)、库水位骤降(动水压力)及地震组合等工况下的边坡位移矢量、塑性区分布、锚固端应力集中程度及整体安全系数,全面揭示各工况下边坡的变形响应特征与潜在失稳模式。(3) 原有支护缺陷分析通过模拟结果识别核心问题:锚固长度或间距不足导致锚固力储备偏低,预应力值不合理使主动加固效果未能充分发挥,支护施工滞后于开挖卸荷导致临空面暴露时间过长引发塑性区扩展,以及分区支护强度不匹配形成的局部薄弱环节。

3.3 多目标支护方案优化设计

(1) 优化目标与原则应以安全稳定为首要目标,同步兼顾施工便捷性(减少工序交叉干扰)、工程造价(材料用量与机械台班最优化)及长期耐久性(抗腐蚀、抗疲劳能力)的多目标协同。采用层次分析法或加权综合评价法确定各目标权重,确保优化方案在安全与经济间取得合理平衡^[5]。(2) 核心参数优化围绕锚杆锚索长度调整(锚固段深入稳定岩体不少于3~5m)、间排距加密(原有加密20%~30%)、预应力值分级张拉优化,同时调整抗滑桩截面加大或桩间距缩减、优化嵌固深度及布置高程,使各支护构件协同受力、均衡承载。(3) 支护体系优化须结合边坡分区地质特征,在岩体完整区采用锚喷柔性防护,在断层破碎带与软弱结构面交汇区增设预应力锚索与抗滑桩刚性支挡,形成刚柔并济的组合支护体系。同时依据坡高分区差异化设计:上部减载与锚固结合,中部强锚固抗剪,下部锁脚加固防滑移。

3.4 优化方案效果验证与对比分析

(1) 优化后数值模拟分析显示:相比原有方案,

优化后边坡最大水平位移降低幅度显著,塑性区范围明显缩减并向坡体深部收敛,锚固端应力分布更趋均匀,整体安全系数由原有偏低水平提升至规范要求的1.25~1.35以上,各工况下均满足稳定性标准。(2) 工程效益分析从四维度评估:安全性方面失稳风险大幅降低;经济性方面虽初期投资增加,但避免了后期抢险加固的高额代价;施工效率方面通过分区同步作业缩短工期;运维稳定性方面支护体系冗余度提升,降低长期监测与维护压力,综合效益显著。(3) 优化方案工程应用建议:施工中严格执行分层开挖、及时支护的工序衔接,避免支护时机滞后;加强锚固注浆质量控制并抽样拉拔验证;运维期持续监测优化区域关键断面,动态反馈数据用于指导后续维护调整,实现“监测—分析—反馈”闭环管控。

结束语

本文系统完成水工高边坡支护工程失稳机理分析、监测体系构建、数值模拟分析及支护方案优化,有效解决了传统支护结构受力不均、抗灾能力薄弱等问题。优化后的刚柔并济分区支护体系,显著提升边坡安全冗余,兼顾工程安全性、经济性与施工效率。后续可结合现场工程工况,持续完善动态监测反馈机制,深化多灾害耦合下的边坡支护优化研究,进一步完善水工高边坡稳定防控技术体系。

参考文献

- [1]姜炳松,谷再兴.两河口水电站库区岩石高边坡开挖卸载支护技术研究[J].土木工程,2025,14(4):597-606.
- [2]李翔宇,王海军,徐玮,等.新型柔性铰接框架锚固体系及边坡支护分析[J].水利水运工程学报,2023,9(5):105-112.
- [3]黄润秋.水利工程高边坡稳定性评价与灾害防控技术[J].岩石力学与工程学报,2023,23(6):112-116.
- [4]齐景瑞,杨光亮.四川巴塘水电站两洞进口高边坡加固措施研究[J].四川省水力发电,2024,43(3):45-49.
- [5]李术才.深部岩质高边坡施工期稳定性监测与支护优化[J].水利学报,2022,28(9):189-198.