

水利水电工程高边坡支护与稳定性控制研究

罗 燕

湖北澜图工程设计有限公司, 湖北 武汉 430074

[摘要] 水利水电高边坡长期处于多场耦合复杂工况, 时效变形与局部失稳问题频发, 传统静态统一支护模式难以适配边坡长期性能演化规律, 工程治理适配性存在明显短板。本文以水工高边坡稳定管控为研究核心, 依托多类型稳定性分析方法, 系统梳理边坡失稳主控机理。研究结合不同边坡破坏特征, 构建多技术协同的差异化复合支护体系, 同时依据工程全生命周期工况差异, 建立分阶段动态管控与智能预警协同机制。结果表明, 分区支护配合全周期动态调控的治理模式, 可有效改善传统支护同质化缺陷, 能够提升水工高边坡施工及运维阶段的稳定性, 可为同类工程精细化设计与安全管控提供可行的技术参考。

[关键词] 水利水电工程; 高边坡; 支护技术; 稳定性控制; 全生命周期

DOI: 10.64635/ja.2026.1509

中图分类号: TV223

文献标识码: A

Research on High Slope Support and Stability Control in Water Conservancy and Hydropower Projects

Luo Yan

Hubei Lantu Engineering Design Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract: High slopes in water conservancy and hydropower projects are exposed to complex working conditions involving long-term multi-field coupling, with frequent time-dependent deformation and local instability. Traditional static and unified support models are difficult to adapt to the long-term performance evolution of slopes, and there are obvious shortcomings in engineering treatment adaptability. Taking stability management and control of hydraulic high slopes as the research focus, this paper systematically reviews the main control mechanisms of slope instability based on multiple types of stability analysis methods. Combined with different slope failure characteristics, a differentiated composite support system with multi-technology coordination is constructed. Meanwhile, according to the differences in working conditions throughout the whole life cycle of projects, a collaborative mechanism integrating staged dynamic management and intelligent early warning is established. The results show that the treatment model combining zoned support with whole-cycle dynamic regulation can effectively improve the homogenization defects of traditional support, enhance slope stability during the construction and operation and maintenance stages of hydraulic projects, and provide feasible technical reference for refined design and safety management in similar projects.

Keywords: water conservancy and hydropower project; high slope; support technology; stability control; whole life cycle

引言

高山峡谷区水利水电工程建设多伴随大规模高陡边坡开挖, 边坡整体稳定性直接关系枢纽工程施工安全与长期运行效益, 是水电工程运维管控的重点内容。水工高边坡地质构造复杂, 结构面发育离散, 叠加库水干湿循环、渗流软化与施工扰动的耦合作用, 边坡易产生持续性时效变形, 失稳风险贯穿工程全周期, 管控难度显著高于常规岩土边坡。现有研究多聚焦单一支护技术优化或静态稳定性验算, 针对多因素耦合失稳机理、差异化支护布设规则、全周期动态管控体系的系统性整合研究仍较为薄弱, 难以解决工程中长期性能劣化引发的稳定问题^[1]。基于以上研究缺口, 本文系统剖析水工高边坡失稳主控因素, 搭建适配复

杂工况的复合支护体系与全时序动态管控策略, 以期同为类边坡工程的安全治理提供理论与技术支撑。

1 水利水电高边坡失稳机制与主控因素

水工高边坡失稳并非单一力学破坏模式, 而是地质结构、水体作用、施工扰动多场耦合形成的时效破坏, 其破坏特征具备显著的行业专属属性。结合现场工程病害统计, 水工边坡常见破坏形态主要包含顺层平面滑动、楔形体空间滑移、弯曲倾倒破坏、堆积体剪切滑动四类, 其中顺层滑移与楔体滑移两类病害危害程度最高、发生概率最大。具体来看, 顺层滑移主要受控于岩层倾角与临空面的组合关系, 楔体滑移则由多组结构面切割组合形成, 两类破坏的发生均依托特定地质结构基础。岩体内部的软弱夹层与贯通裂隙

会弱化岩体整体完整性,提前锁定边坡潜在滑移通道,为边坡失稳提供内在条件。在此基础上,降雨与库水入渗会降低结构面有效正压力,直接削弱岩体抗剪强度,进一步激活潜在失稳隐患。同时,开挖卸荷与爆破振动会诱发岩体应力重分布,持续扩展原生裂隙、产生新生裂隙,逐步形成贯通破坏带。多重诱因的叠加作用会持续降低边坡整体稳定性,这也意味着现场治理工作需要精准区分主控因素,开展针对性加固设计与施工。

2 边坡稳定性分析方法及支护设计应用

边坡稳定性分析并非单纯的安全系数校核工作,更是支护参数量化、加固区域定位、支护形式选型的核心依据,直接决定整体设计方案的精准度与适配性。由于水工边坡三维结构效应强、渗流边界复杂、地质离散性突出,单一分析方法难以覆盖全部复杂工况,因此工程实践中多采用多方法联合分析模式^[2]。其中,赤平极射投影技术可快速判别岩体结构面组合关系,精准识别潜在滑移块体,主要适用于工程前期风险预判与支护区域划定工作。在此基础上,极限平衡法能够有效量化边坡抗滑储备与下滑荷载,可为锚杆、锚索、抗滑桩的布设间距、锚固深度、结构尺寸设计提供基础参数支撑。针对超高边坡、水位变动区边坡等复杂工况,渗流应力耦合数值模拟可有效弥补传统静态计算的缺陷,完整还原开挖、蓄水全过程的应力调整、渗流迁移、变形累积规律,满足精细化设计需求。总体而言,多方法联合分析模式可有效规避经验化设计弊端,显著提升支护方案的现场适配性。

3 基于稳定控制目标的复合支护技术体系

从工程治理实践来看,单一支护技术仅能针对性解决单一类型边坡病害,无法适配水电工程多诱因耦合的复杂失稳问题,这也是传统同质化支护方案治理效果有限的核心原因。为解决该类工程痛点,本文依托各类支护结构的力学加固机理,结合边坡浅层破损、深层滑移、整体滑动、渗流劣化等差异化病害模式,搭建分层、分级、分区域的复合型支护技术体系。整套体系以排水防渗为基础保障,以预应力锚固与抗滑支挡为核心承载结构,搭配坡面防护作为辅助补充,可根据边坡地质条件、风险等级、失稳深度灵活组合布设,从机理层面精准匹配边坡稳定控制的核心需求。

3.1 渗流控制:排水与防渗基础技术

大量工程实践表明,水体渗流是激活边坡潜在失稳隐患的核心诱因,多数岩质边坡破坏现象均伴随渗流软化、渗透压力抬升等问题,因此排水防渗工序成

为边坡治理的前置基础环节。在整套防渗排水体系中,地表截排水设施可快速疏导坡面径流,有效杜绝积水沿裂隙持续入渗坡体内部。与此同时,深部排水孔幕与地下廊道能够主动疏导坡体内部滞留水体,降低孔隙水压力,大幅减小渗流作用对结构面的软化损伤。除此之外,喷混凝土封闭层可有效封堵表层张开裂隙,弱化干湿循环带来的岩体疲劳损伤。综上,整套排水防渗体系可持续优化坡体水文环境,最大程度保留岩体原生力学强度,为后续锚固、支挡结构充分发挥加固效能提供稳定基础条件^[3]。

3.2 结构面滑移控制:预应力锚固技术

作为典型的主动受力加固技术,预应力锚固可从根源约束岩体结构面错动,尤其适配岩质高边坡深层滑移与楔体失稳的高危治理场景。该技术通过将锚索锚固段嵌入深部完整基岩,依托张拉工艺对浅层滑移体施加反向压力,显著提升结构面法向约束能力。在预应力作用下,岩体裂隙张开、剪切错动的空间被持续压缩,岩体整体抗滑性能得到显著提升。针对顺层边坡、三维楔体边坡等高危工况,工程可通过优化锚索倾角、排距、锚固长度等核心参数,精准覆盖边坡临界滑移区域,有效阻断潜在滑移通道。在此基础上,浅层锚杆、钢筋网与喷混凝土的组合结构可加固表层松弛岩体,抑制坡面剥落、局部崩塌等浅层病害,最终形成深浅协同、层层防护的立体支护结构。

3.3 深层整体滑动控制:抗滑支挡技术

对于深厚堆积体、强风化岩体边坡而言,岩体整体完整性差、抗剪强度偏低,边坡失稳多表现为大范围整体推移式滑动,常规锚固技术难以有效约束这类整体变形问题。对此,工程中多采用抗滑支挡结构管控边坡整体失稳风险,抗滑桩依托深部嵌固段岩体的约束作用,直接抵抗边坡下滑推力,尤其适配滑面清晰、荷载集中的大型滑坡体治理场景。针对超大荷载、复杂地形的边坡工况,单一抗滑结构仍存在局限性,而桩锚复合结构可结合抗滑桩刚性支挡与锚索主动预紧的双重优势,显著提升支护体系整体抗力。除此之外,锚索框架梁可均匀分散预应力荷载,规避局部应力集中问题,规整坡面整体受力状态,有效改善松散岩体受力不均、局部变形超标等病害,是复合支护体系中不可或缺的配套结构。

3.4 差异化复合支护适配原则

不同边坡在地质结构、失稳深度、破坏机理等方面均存在显著差异,若采用统一固化的支护模式,极易出现加固冗余或加固不足的问题,难以兼顾工程安

全与经济效益。针对浅表破碎边坡,病害问题主要集中于表层岩体,结构面深层滑移风险较低,采用喷锚护面搭配基础排水设施,即可满足边坡长期稳定要求。与之不同,顺层岩质边坡与楔体发育边坡存在突出的深层滑移风险,需要依托锚索框架梁提升结构面整体抗剪能力,同时搭配深部排水结构弱化水岩耦合劣化作用。而堆积体边坡整体稳定性极差,具备滑移量大、危害范围广的特点,必须采用抗滑桩、锚索、立体排水多重组合措施,全方位约束边坡整体滑动变形。这种差异化布设模式可精准匹配各类边坡的力学稳定需求,有效提升治理方案的科学性与适配性。

4 全生命周期稳定性动态控制策略

水工高边坡属于典型的时效型工程结构,岩体性能、支护应力、渗流环境均会随服役时长持续变化,因此一次性静态支护设计难以适配边坡长期时效变形规律。但传统边坡管控模式仅针对竣工静态工况校核稳定性,忽略了施工扰动、蓄水突变、长期蠕变等阶段性关键影响因素,整体管控存在明显滞后性。为弥补这一技术短板,本文依据工程全生命周期时序演变特征,将边坡运营过程划分为施工、蓄水、运行三类典型工况,针对性建立分阶段动态管控体系。整套体系结合各阶段边坡的变形响应特征制定专属管控标准,同时配套智能监测闭环机制,实现边坡稳定性的动态精准把控。

4.1 施工期扰动精准管控

在工程施工阶段,边坡失稳的核心诱因主要为开挖卸荷引发的应力释放与爆破振动造成的岩体损伤,对应管控核心重点在于抑制松弛区扩展、减少原生岩体结构损伤。在开挖工序中,分层开挖模式可规避一次性临空面过大引发的应力突变,有效放缓坡体应力调整速率^[4]。在爆破施工环节,预裂爆破、微差爆破工艺能够弱化爆破冲击波对保留岩体的损伤,减少裂隙新生与扩张现象。同时,坡面开挖成型后及时跟进支护与排水作业,可最大程度缩短岩体裸露时间,阻止松弛岩体持续劣化。除此之外,严格落实工序质量核查制度,可有效保障支护结构施工精度,确保锚固力、抗滑刚度、排水通畅度满足设计标准,从施工源头规避边坡失稳风险。

4.2 蓄水期渗流动态调控

水库首次蓄水阶段是边坡稳定管控的关键窗口期,蓄水作业会快速改变坡体原有渗流场边界,造成渗流压力骤然提升、渗透梯度剧烈变化,是边坡最易发生结构性变形的高危阶段。水位骤升骤降产生的动

水压力会持续推动软弱结构面错动,进一步加剧岩体软化劣化。对此,严格控制蓄水速率可有效放缓渗流场变化节奏,为坡体应力调整、渗流平衡预留充足缓冲空间。与此同时,蓄水期间需加密监测频次,及时捕捉边坡位移、孔压、锚索应力的异常响应,提前预判潜在滑移趋势。针对监测发现的隐患区域,现场可通过增设排水通道、补强锚固拉力等方式处置风险,配套完善的应急调控方案,保障边坡平稳度过蓄水敏感阶段。

4.3 运行期长效性能管控

在工程长期服役阶段,边坡稳定隐患主要来源于支护结构性能的时效衰减与岩体蠕变累积变形。随着服役时长增加,锚索预应力会出现自然损耗,导致支护结构约束效果逐步下降。同时,排水系统长期运行易出现淤积堵塞问题,直接弱化渗流疏导能力。除此之外,岩体在长期自重荷载与水压力耦合作用下会产生缓慢蠕变,微小变形持续累积便会引发整体失稳隐患。对此,建立常态化运维管控机制尤为重要,可及时疏通排水结构、补张预应力、修复坡面破损,有效阻断边坡性能持续劣化。同时,定期复核不同水位工况下的边坡稳定安全系数,可精准掌握边坡性能演化规律,针对性能衰减区域及时开展补强加固,保障边坡长期运行状态稳定可控。

4.4 智能监测与闭环预警体系

传统边坡管控多依赖人工定期巡检,整体存在数据采集滞后、隐患识别被动的问题,难以捕捉边坡微小的时效变形,管控时效性与精准度均存在短板。对此,智能自动化监测体系可实现全天候连续作业,实时采集边坡变形、锚索应力、孔隙水压力等核心指标,精准掌握坡体动态响应规律,依托行业工程安全标准设定分级预警阈值,可实现边坡风险的超前识别与分级处置^[5]。同时,监测数据可动态反馈边坡性能演变状态,直接指导现场支护补强、蓄水调度、运维调整等实操工作,形成完整的闭环管控链路。该体系可显著提升边坡全周期管控的主动性与精准度,高度适配水工边坡超长服役的运维需求。

5 结论

本文系统开展水工高边坡失稳机理与稳定管控技术研究,明确岩体地质结构、水岩耦合作用、施工扰动是边坡失稳的三类主控因素,其中水岩劣化对边坡时效失稳具备显著促进作用。研究通过适配不同工况的稳定性分析手段,精准量化边坡滑移风险,据此搭建分层分级的差异化复合支护体系,有效弥补传统统

一支护模式适配性不足的问题,施工、蓄水、运行分阶段动态管控策略结合智能预警闭环体系,可良好适配边坡全周期时效变形特征。

【参考文献】

- [1] 周创兵,姜清辉,姚池,等.水利水电工程高陡边坡变形与稳定性研究进展及挑战[J].水力发电学报,2025,44(1):1-17.
- [2] 薛一峰,毛拥政,王健,等.考虑倾斜侧滑面的高陡岩质边坡块体稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2021,19(4):104-110.
- [3] 张远坤.面向水利水电工程的水库边坡稳定性与失效概率研究[J].水利科技与经济,2025,31(1):22-27.
- [4] 刘东,王庆祥,位伟,等.拉哇水电站右岸泄水建筑物进口边坡体型优化分析[J].中国农村水利水电,2022(4):186-192.
- [5] 刘飞鹏,许婧.水库工程天然高边坡的稳定性分析[J].江西科学,2025,43(5):930-935.

作者简介:罗燕(1997.06—),女,汉族,本科,华北水利水电大学、水利水电工程。