 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i3.9837

Research on Construction Protection Technology and Practice of High Slope in Mountainous Water Conservancy Projects

Hongcheng Li

Comprehensive Guarantee and Technical Service Center of Lijiao Town, Binchuan County, Dali, Yunnan, 681600, China

Abstract

The construction of high slopes in mountainous water conservancy projects is confronted with multiple technical challenges such as complex and variable geological conditions, significant excavation disturbance effects, and the coupling of water environment and mechanical loads. Safety risk control during the construction period has become a key issue restricting the project's progress. Based on rock mass mechanics theory, this paper systematically reveals the evolution mechanism of instability risks during the construction period of high slopes, and focuses on analyzing the influence laws of structural plane control effects, mechanical responses to excavation unloading, and hydraulic coupling on slope stability. The research results show that the construction protection of high slopes needs to achieve dynamic adaptation of rock mass mechanical properties, on-site construction techniques, and monitoring feedback information, and establish a full closed-loop control mode of real-time perception, intelligent analysis, scientific decision-making, and precise control. The research findings can provide theoretical basis and technical reference for the safety guarantee of high slope construction in mountainous water conservancy projects.

Keywords

mountainous area water conservancy project; high slope; construction protection

山区水利工程高边坡施工防护技术与实践研究

李洪程

宾川县力角镇综合保障和技术服务中心，中国 · 云南 大理 681600

摘　要

山区水利工程高边坡施工作业面临地质条件复杂多变、开挖扰动效应显著、水环境与力学荷载耦合作用等多重技术挑战，施工期安全风险防控已成为制约工程建设的关键问题。本文以岩体力学理论为基础，系统揭示了高边坡施工期失稳风险的演化机制，重点分析结构面控制效应、开挖卸荷力学响应及水力耦合作用对边坡稳定性的影响规律。研究结果表明，高边坡施工防护需实现岩体力学特性、现场施工工艺与监测反馈信息的动态适配，建立实时感知、智能分析、科学决策、精准控制的全闭环管控模式。研究成果可为山区水利工程高边坡施工安全保障提供理论依据与技术借鉴。

关键词

山区水利工程；高边坡；施工防护

1 引言

山区水利工程多坐落于地形陡峻、地质条件复杂的特殊地理单元，高边坡的开挖与支护作业已成为制约此类工程建设进程的核心技术瓶颈。在高边坡施工阶段，岩体内部将依次经历开挖卸荷、初始应力场重分布、结构面力学性质劣化与张开等一系列典型力学响应过程。若支护体系实施不及时、参数配置不足或施工时序存在滞后，极易诱发滑坡、崩塌等突发性地质灾害，进而导致重大人员伤亡与巨额经济损失。传统高边坡施工防护体系高度依赖工程经验法则，核心强调“开挖一级、防护一级、验收一级”的线性施工原则[1]。然而，随着山区水利工程建设向高陡化、深开挖方向演进，边坡地质条件的复杂性与不确定性呈现指数级增长，传统经验性的单一技术模式已难以满足现代高风险边坡的安全管控需求。本文立足于高边坡施工的岩体力学理论基础，系统剖析并构建了覆盖全周期的施工防护关键技术体系，旨在为国内同类山区水利工程高边坡项目的安全建设提供坚实的理论支撑与可借鉴的工程实践路径。

【作者简介】李洪程（1980–），男，彝族，中国云南大理人，工程师，从事水利工程，水土保持研究。

2 高边坡施工风险的形成机理

2.1 岩体结构对边坡稳定性的控制效应

岩体作为由完整岩块与各类结构面共同构成的非连续

介质，其力学特性与变形破坏规律在很大程度上受结构面的控制。结构面涵盖层面、节理、裂隙、断层及破碎带等地质界面，其产状、发育密度、延展尺度、充填特征及贯通性等指标，共同决定了岩体的各向异性与非连续性特征。

从力学机理层面分析，结构面对边坡稳定的控制作用主要体现在三个维度：第一，结构面本身构成岩体内部的薄弱带，其抗剪强度显著低于完整岩体。第二，多组结构面相互切割形成空间块体，在开挖卸荷、振动或降雨等外部作用下，这类结构体易产生失稳塌落，其稳定状态主要受结构面组合交线的产状控制。第三，结构面的开度与贯通性为地下水渗流提供优势通道，孔隙水压力的升高会降低岩体有效应力。

2.2 开挖卸荷的力学响应机制

高边坡开挖本质上是一个复杂的应力卸荷与力学响应过程。原始地应力场在开挖临空面被释放，驱使岩体向自由面产生回弹变形，并伴随全域应力场的动态重构，其内在力学机制可从卸荷扰动与强度劣化效应、流变时效特性、开挖工序的力学路径效应三方面系统阐释 [2]。

2.3 水 – 力耦合与环境荷载作用

地下水是控制边坡稳定性的关键敏感要素，其作用机制涵盖物理软化、力学效应与化学侵蚀三大维度。首先，在物理作用层面，水体对岩体具有显著软化效应，可直接降低岩体强度指标。其次，降雨是触发边坡失稳的最主要环境诱因，降雨入渗过程中，坡表岩体饱和度升高、基质吸力衰减、暂态饱和区持续扩展。再者，地震荷载对边坡的作用机制更为复杂，地震波在岩体内传播产生往复剪切作用，一方面基于循环荷载疲劳理论，周期性剪切作用导致岩体强度指标持续劣化，另一方面易引发潜在滑移面发生不可逆位移累积。如表 1 所示，为高边坡主要失稳模式与成因机理。

表 1 高边坡主要失稳模式与成因机理

失稳模式	地质条件	主导机理
平面滑动	单组软弱结构面倾向坡外	结构面抗剪强度不足
楔形体滑动	两组结构面交线倾向坡外	组合结构面切割
圆弧滑动	均质土坡或破碎岩体	岩土体抗剪强度不足
倾倒破坏	陡倾层状岩体反向坡	层间抗拉强度不足
坠落破坏	陡坡危岩体	结构面切割、重力作用

3 高边坡施工防护技术体系

3.1 预加固与动态支护技术

预加固的核心机理，是在开挖卸荷扰动产生前或初始阶段，通过人工加固手段提升岩体自身承载性能，从而有效控制卸荷松弛区的扩展范围。预应力锚索是超前预加固技术的典型代表，锚索通过张拉对岩体施加主动压应力，锚固段依靠砂浆与岩体的黏结强度提供抗拔力，自由段将预应力传递至深部岩体，形成压缩应力区，锚墩对坡面施加的压应力可改善表层岩体应力状态。系统锚杆的加固机理与锚索存在明显差异 [3]。全长黏结型锚杆通过与围岩形成共同受力的复合体，发挥“销钉”作用，限制结构面间的相对错动与滑移。

3.2 数智化监测与预警技术

边坡监测的核心目标，是通过采集岩体变形与力学响应的时空演化数据，反演其受力状态并预判失稳趋势。现代边坡监测技术已由单一物理量观测，升级为多维度、多源信息融合的智能化感知系统。监测数据的核心应用价值在于实现科学预警，其理论基础是建立变形量、变形速率与边坡稳定性之间的定量关联。传统预警方法以阈值判定为核心，将实测数据与工程经验或数值模拟确定的临界值对比，超出阈值即触发预警。数字孪生是物理实体在虚拟空间的高精度数字化镜像，其核心是构建与现场实体实时同步、双向映射的动态虚拟模型。

3.3 立体防护与生态修复技术

防护网系统是控制边坡浅表失稳与落石灾害的关键技术措施，按作用机理可分为主动防护与被动防护两大类型。主动防护网直接敷设于边坡表层，通过钢丝绳网对岩体形成整体约束，抑制裂隙扩张与危岩松动。被动防护网布置于坡脚及危险区段下方，主要用于拦截失稳滚落岩体。其工作原理为利用柔性结构的大变形实现冲击能量耗散，落石撞击网面后，通过支撑绳拉动减压环发生设定滑移，以摩擦做功方式将动能转化为热能，从而实现缓冲减振。

生态护坡是以边坡结构稳定为前提，通过植被重建实现生态修复的综合技术。植被对边坡稳定的力学贡献主要体现在根系加筋效应与蒸腾排水效应两方面。生态护坡常用技术包括客土喷播、植生袋、生态混凝土等。客土喷播将种子、基质、胶结材料混合喷射于坡面，适用于岩质边坡快速绿化；生态混凝土采用 15% ~ 30% 大孔隙结构，内部填充营养基质，兼具结构防护与生态绿化功能。

全生命周期绿色施工强调将生态环保贯穿工程规划、设计、施工与运营全过程，融入工程决策全链条。对高边坡工程，核心体现为“开挖一级、防护一级、复绿一级”的一体化施工模式，将生态修复嵌入施工工序，而非施工后的末端治理。

4 技术讨论与适用性分析

预加固技术的应用成效，核心取决于对控制边坡稳定性的关键结构面的精准识别，以及基于该识别结果开展的针对性设计与施工。凝灰岩软弱夹层作为影响边坡稳定性的核心薄弱环节，其力学强度低、抗变形能力弱，是决定边坡整体稳定性的关键控制因素。

若缺乏实时、精准的监测预警体系，当边坡出现肉眼可见的明显变形时，岩体往往已进入加速变形阶段，此时滑动面已初步形成，变形速率大幅提升，不仅加固处置的难度会显著增加，还可能导致加固成本翻倍，甚至引发边坡失稳坍塌。监测预警体系能够有效发挥作用，关键在于三个核心

环节。一是监测点布设需精准覆盖潜在滑动区域及关键薄弱部位，确保监测数据能够真实反映边坡内部变形特征。二是预警阈值的设定需结合岩体力学特性，采用“变形速率 + 阶段特征”的双重判据，避免单一阈值带来的误判风险。三是建立快速响应机制，在预警触发后，能够在短时间内启动停工、补强、复核等处置流程。

生态护坡技术在岩质边坡中的应用存在明显的局限性。一方面，施工初期植被处于萌发阶段，生长速度缓慢，根系尚未深入岩体内部形成有效锚固，对边坡的防护作用有限，无法替代结构性支护的承载功能。另一方面，植被生长对水分条件要求较高，在干旱季节若缺乏持续的养护措施，植被成活率会显著下降，进而影响生态防护效果。基于此，生态护坡技术更适合作为工程结构性防护的补充手段，用于提升边坡生态效益，而非替代锚杆、锚索等结构性支护措施。对于坡度大于 45° 的岩质边坡，由于其整体稳定性较差、下滑力较大，需以工程结构性防护为主，重点通过锚杆、锚索等手段提升抗滑能力，生态护坡仅作为辅助措施，用于减少水土流失、改善生态环境，实现工程安全与生态保护的协同发展。

5 结语

山区水利工程高边坡施工防护的核心要义，在于以岩体力学特性的深度认知为基础，实现“开挖作业—支护施工—监测预警”三者的动态协同与闭环管控。本文围绕高边坡施工防护的核心科学问题与技术实施路径，从风险成因解析、技术体系构建及工程实践验证三个维度，系统阐释了高边坡施工防护的核心逻辑与技术要点。研究结果表明，高边坡施工风险的形成，主要受控于岩体结构特征、开挖卸荷效应及环境荷载耦合作用三大关键因素——结构面的产状分布与力学特性，直接决定了边坡潜在破坏模式的类型，其稳定状态可通过极限平衡理论进行定量化评估。开挖卸荷作用会引发岩体内部应力场的重新分布及变形累积，该过程的时间效应可借助流变力学模型进行精准描述。降雨入渗、地震作用等外部荷载，会通过改变岩体有效应力、加速岩体损伤等方式，进一步放大边坡失稳风险。

超前预加固技术的核心作用，在于主动约束开挖过程中岩体的卸荷松弛范围，其应用效果的关键的在于精准识别控制边坡稳定的核心结构面，并据此设计针对性的锚固方案。锚固参数的确定需基于极限平衡理论进行反演计算，确保锚固体系能够提供足够的抗滑约束力，有效抑制边坡的有害变形。数智化监测体系的核心价值，在于通过捕捉岩体变形的时间序列特征，实现边坡失稳风险的提前预判与精准管控，推动防护模式从“事后处置”向“事前预警”转型；预警阈值的设定需结合岩体变形阶段特征动态调整，确保预警信号的科学性与时效性，为及时采取补强加固措施提供支撑。

在立体防护体系构建中，主动与被动防护网通过能量耗散与柔性约束机制，实现对边坡浅层失稳的有效控制；生态护坡技术则通过根系加筋作用发挥辅助防护效能，二者协同配合，共同提升边坡整体稳定性能。随着岩体力学理论的不断完善及智能建造技术的快速发展，高边坡施工防护正逐步迈向“感知精准化、分析智能化、决策科学化、控制精细化”的闭环管理模式。未来，高边坡施工防护技术的突破方向主要集中在多源监测数据融合下的岩体参数实时反演、考虑流变特性的变形预测模型构建、自适应调控的智能支护系统研发三个方面，通过技术创新推动高边坡防护从传统经验驱动模式向数据驱动模式转型，实现工程安全与生态保护的协同发展。

参考文献

[1] 陆佳,徐镇扬,花叶琦,等.高边坡开挖支护技术在水利水电工程中的应用研究[J].水上安全,2026,(01):43-45.

[2] 王剑书.水利水电工程中的高边坡加固与治理技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(35):187-189.

[3] 邱文丰.高边坡加固技术在水利水电工程施工中的应用探讨[J].新发现,2025,(16):97-99.