

# 山区公路工程边坡稳定性防护技术应用研究

熊能

中南勘察设计院集团有限公司 湖北武汉 430070

DOI: 10.32629/ems.v8i5.20367

**[摘要]** 本文围绕山区公路边坡稳定性核心问题, 系统分析地质、水文、人为三类影响因素, 构建工程支护、生态防护、协同防护三位一体的技术体系, 结合技术应用要求阐述施工管控、选型适配与长效运维要点。研究表明, 工程与生态协同的防护模式可有效提升边坡抗滑、抗冲刷能力, 兼顾结构安全与生态修复, 规范化施工与常态化运维是保障防护效果的关键, 可为山区公路边坡防护工程提供技术参考。

**[关键词]** 山区公路; 边坡稳定性; 防护技术; 生态防护; 工程支护

## 引言

我国山区地域广阔, 公路工程是山区经济发展的核心基础设施, 而边坡稳定性是山区公路建设与运营的关键控制要素。山区地质构造复杂、岩性差异显著, 加之强降雨、冻融等气象作用与工程开挖、植被破坏等人为干扰, 边坡失稳问题频发, 不仅造成交通中断、财产损失, 还会引发水土流失、生态破坏等次生问题。基于此, 本文深入剖析边坡稳定性影响机理, 整合工程与生态防护技术, 明确技术应用与管控规范, 为山区公路边坡安全防护提供理论与实践支撑。

## 1 山区公路边坡稳定性影响因素分析

### 1.1 地质内在因素

地质条件是控制边坡稳定性的核心内在因子, 其通过岩土体力学性能、地质构造完整性与边坡形态特征, 从根源上决定边坡的抗变形与抗滑移能力。岩性差异是最关键的影响要素, 不同类型岩土体的抗压强度、抗软化能力、渗透性存

在显著差异, 灰岩饱和单轴抗压强度最高且排水性能最优, 白云岩次之, 砂岩强度较低且重量较大, 泥岩强度最低, 易引发变形滑移[1]。强风化泥岩、泥质砂岩等软弱岩土体, 遇水后黏聚力与内摩擦角大幅下降, 极易产生浅层滑塌; 而灰岩、白云岩等硬质岩体, 结构致密、强度较高, 边坡整体稳定性更优。

地质构造如断层、节理、褶曲会破坏岩土体的完整性, 形成潜在滑动面, 降低边坡整体承载力; 边坡的坡度、高度、坡率直接影响岩土体的应力分布, 坡度过陡、边坡过高会增大下滑力, 打破岩土体原始应力平衡, 大幅提升失稳风险。此外, 岩土体的风化程度、裂隙发育情况也会加剧坡面侵蚀, 为雨水入渗提供通道, 进一步弱化边坡稳定性。如表1所示, 不同岩体的物理力学参数差异显著, 是边坡稳定性分区设计的核心依据。

表1 山区公路边坡典型岩体物理力学性能参数

岩体类型	单轴抗压均值/MPa	重度/ $kN/m^3$	稳定性特征
灰岩	41.97	25.26	强度高、排水优, 稳定性最佳
白云岩	33.5	23.07	强度较高、重量轻, 稳定性良好
砂岩	19.15	24.66	强度偏低、易变形, 稳定性一般
泥岩	—	—	强度极低、遇水软化, 易失稳

### 1.2 水文气象外部因素

水文与气象条件是诱发边坡失稳的最主要外部触发因子, 其中降雨与地下水的动态变化对边坡稳定性的影响最为显著。山区多短时强降雨与持续性集中降雨, 雨水沿岩土体裂隙、孔隙入渗后, 会快速软化岩土体, 降低其抗剪强度, 同时增大坡体自重与孔隙水压力, 形成向上的扬压力, 大幅削弱岩土体的抗滑移能力。地下水是长期影响边坡稳定性的

隐性因素, 山区松散岩类孔隙水、碳酸盐类岩溶水分布广泛, 地下水的持续浸润会使软弱岩土体长期处于饱和状态, 引发顺层滑动、塑性变形等病害。此外, 季节性冻融循环、风力侵蚀等气象作用, 会反复胀缩岩土体、剥离坡面表层土体, 逐步破坏边坡结构完整性。雨季与冻融交替期是边坡失稳的高发时段, 水文气象的动态变化, 使得边坡稳定性呈现明显的季节性波动特征。

### 1.3 工程建设人为因素

人为工程活动是加剧边坡失稳的重要诱因，主要体现在开挖施工、植被破坏与荷载扰动三个方面。公路建设中的高填深挖施工会直接改变边坡原始受力状态，打破岩土体应力平衡；沿线城镇建设、农业开发会破坏边坡原生植被，削弱植物固土保水能力，同时干扰自然排水系统，加剧地表径流冲刷。坡体周边的建筑荷载、施工机械荷载会额外增加边坡受力，进一步提升失稳概率，人为因素已成为山区公路边坡病害的主要可控诱因。

## 2 山区公路边坡稳定性防护技术体系构建

### 2.1 工程支护防护技术

工程支护技术以提升边坡结构强度、约束岩土体深层变形为核心，适用于高陡边坡、软弱岩质边坡、滑移风险较高的边坡工程，是山区公路边坡防护的基础技术手段，主要包含锚固支护、支挡结构、排水系统三大核心技术。

锚固支护是深层边坡加固的核心技术，采用锚杆、高强

锚索与钢筋混凝土框架梁组合形式，通过钻机成孔、注浆锚固、预应力张拉，将边坡不稳定岩土体与深部稳定岩体连为一体，提升岩土体整体抗滑力，有效约束深层变形，适用于坡高大于15m的高陡岩质边坡。支挡结构以抗滑桩、重力式挡墙、坡脚抗滑挡墙为主，依托结构自身强度与地基锚固力抵抗滑坡推力，施工便捷、见效快，常用于坡脚加固、浅层滑移防控与边坡脚应力约束。

排水系统是工程支护的关键配套技术，采用明排+暗排双重立体排水模式，阻断雨水入渗、快速疏导地下水，从源头消除水害诱因。明排系统由坡顶截水沟、马道横向排水沟、坡面急流槽组成，拦截疏导地表径流，防止雨水冲刷坡面；暗排系统由坡面盲沟、坡体穿孔排水管、坡脚排水沟组成，快速排出坡体内部地下水，降低孔隙水压力。如图1所示，明排系统由山坡截水沟、马道排水沟、急流槽组成，拦截疏导地表径流；暗排系统由土工格栅盲沟、穿孔管组成，快速排出坡体地下水，降低孔隙水压力。

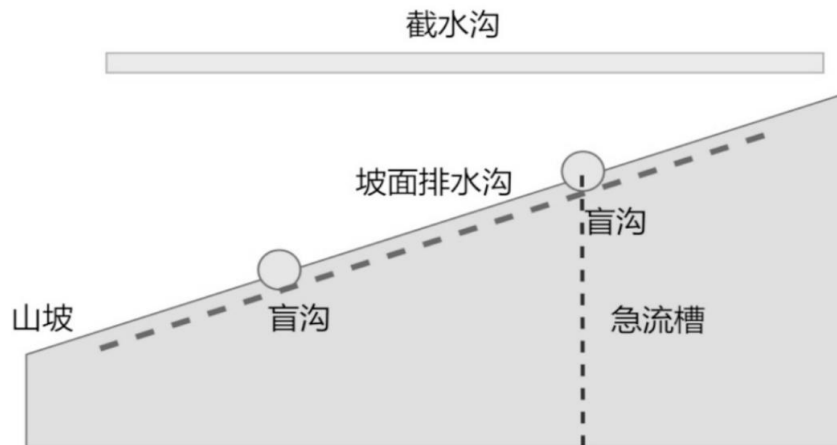


图1 “明排+暗排”双重立体排水系统示意图

### 2.2 生态防护技术

生态防护技术以植物固土为核心，兼顾边坡表层加固、水土保持与生态修复，是土质边坡、缓坡及生态敏感区的首选防护措施，符合绿色公路建设的核心要求。山区公路边坡防护中生态防护技术不仅能够提升边坡稳定性，也能有效改善地质条件，降低气候变化对公路使用性能的影响[2]。

生态防护技术主要包括种草防护、植树防护、铺草皮防护、喷混植生技术与自然植被修复五类。种草防护适用于湿润平整的土质边坡，选用根系发达、茎秆低矮的乡土草种，成本低、施工简单，可快速覆盖坡面、降低雨水冲刷；植树防护适用于坡度缓于1:1.5的边坡，选用根深枝密的低矮灌木，兼顾固土与绿化效果；铺草皮防护适用于需快速绿化的缓坡与风化软质岩边坡，绿化效果佳、成坪速度快；喷混植生技术是岩质边坡生态防护的核心技术，通过将客土、粘

剂、肥料、植物种子混合喷射至坡面，为植被生长提供基质，解决岩质边坡无法种植的难题；自然植被修复以保护原生植被为主，减少人工干预，降低防护成本，适用于植被覆盖率较高的边坡。

生态防护需严格遵循因地制宜原则，优先选用乡土耐旱、耐寒植物，保证边坡植被覆盖率不低于60%，充分发挥植物根系锚固、截留雨水、改良土壤的生态功能，实现边坡长期稳定与生态修复的双重目标。

### 2.3 工程与生态协同防护技术

工程与生态协同防护技术融合工程支护的结构性与生态防护的长效性，解决单一工程措施生态破坏严重、单一生态措施强度不足的问题，是山区公路高边坡、复杂地质边坡的最优防护方案，核心为分级防护技术与骨架植草复合技术。

分级防护按照边坡高度、开挖深度与地质条件，将边坡

划分为三级差异化防护体系, 适配不同坡段的稳定性需求。一级边坡为坡体上部高风险区段, 采用钢筋混凝土框架梁+高强锚索+主动排水孔的深层工程加固措施, 约束坡体深层变形、快速疏导地下水; 二级边坡为坡体中部区段, 采用锚杆+喷射混凝土+格栅护面的组合防护, 提升坡体整体刚度、分散雨水冲刷; 三级边坡为坡体下部区段, 采用生物基护坡+浅层盲沟+生态植草的防护方式, 兼顾抗侵蚀性与生态修复。

骨架植草复合技术以混凝土、浆砌片石为框格骨架, 框格内实施种草、铺草皮等生态防护, 骨架可抵御雨水侵蚀、保护植物幼苗, 植物根系可固土护坡、修复生态, 锚杆框架梁+排水盲沟+坡脚抗滑挡墙施工体系有效增大了安全系数, 增强了抗滑能力[3]。该技术广泛适用于土质、风化岩质边坡, 是工程与生态协同防护的典型应用。

### 3 山区公路边坡防护技术应用管控与优化策略

#### 3.1 防护工程施工关键管控要点

施工管控是保障防护技术发挥效能的基础环节, 需围绕开挖、支护、绿化、排水四大核心工序制定管控标准。土方开挖需遵循自上而下、分层分段的原则, 高陡边坡采用台阶式开挖工艺, 避免一次性大开挖破坏坡体应力平衡, 开挖过程中及时做好临时支护, 防止坡面坍塌。工程支护施工需精准把控参数质量, 锚杆钻孔倾角、注浆压力、框架梁混凝土强度等指标需符合设计要求, 锚固节点连接牢固, 确保结构受力均匀。

生态防护施工需做好坡面预处理, 清除杂物、平整坡面后再开展种植作业, 草种、灌木选择需适当地气候与土壤条件, 种植后做好保湿养护, 提升植被成活率。排水系统施工需保证沟槽顺直、纵坡达标, 盲沟回填材料级配合理、压实度达标, 确保地表水与地下水疏导通畅, 从源头消除水害隐患。

#### 3.2 防护技术选型适配原则

技术选型需立足边坡实际条件, 坚持安全优先、生态适配、经济合理的核心原则, 避免盲目选用高成本、不适配的技术方案。土质缓坡优先选用生态防护技术, 依托植物固土实现防护与绿化双重目标, 降低工程成本; 岩质高陡边坡、软弱岩土边坡需以工程支护为核心, 搭配生态防护形成协同体系, 锚杆格梁植草防护可解决山区高边坡土质及地质不稳定问题, 提升边坡稳定性[4]。

水文条件复杂的边坡需优先强化排水系统, 结合坡体岩性优化排水孔间距与防渗措施, 降低孔隙水压力对边坡的影

响。同时需结合区域生态保护要求, 在自然植被完好区域采用自然修复为主的防护方式, 减少人工干预对原生环境的破坏。

#### 3.3 边坡长效运维与风险防控

长效运维是维持边坡防护效果、延长工程使用寿命的核心举措, 需建立全周期运维与风险防控机制。日常运维需定期检查工程结构完整性, 及时修复破损的框架梁、挡墙与排水设施, 清理排水沟杂物, 保证排水系统畅通; 生态防护区域需做好植被养护, 补植枯死植株, 维持坡面植被覆盖率, 持续发挥固土抗冲刷作用。

风险防控需聚焦边坡薄弱环节, 针对泥岩、白云岩等易软化岩质区段, 定期监测坡体变形与渗水情况, 结合岩土工程具体情况, 选用合适的稳定性分析方法和合理的防护加固措施[5]。雨季、冻融期需加大巡查频次, 提前做好坡面防渗透与排水疏导, 建立应急处置预案, 及时处置边坡裂缝、渗水等早期病害, 防范失稳灾害发生。

### 4 结语

山区公路边坡稳定性防护是集工程力学、生态学、地质工程于一体的系统工程, 地质、水文、人为因素的耦合作用决定了防护技术需兼顾结构性与生态性。工程支护技术可快速提升边坡结构强度, 生态防护技术能实现长期固土与环境修复, 二者协同的防护模式是适配山区环境的最优方案。施工环节的标准化管控、技术选型的精准化适配、运营阶段的常态化运维, 可持续保障边坡防护效果, 降低失稳风险。未来需进一步优化防护工艺与生态适配性, 推动山区公路边坡防护向安全、绿色、长效方向发展。

#### 参考文献:

- [1]杨婷.山区公路路基边坡稳定性分析及防护体系设计[J].交通世界,2026,(Z1):97-99.
- [2]李永立.山区公路边坡防护中生态防护技术的应用研究[J].科学技术创新,2020,(16):106-107.
- [3]文良,兰宝存,何伟,等.山区公路边坡稳定性分析及施工工艺研究[J].工程技术研究,2025,10(12):28-30.
- [4]王武平.山区高速公路高边坡稳定性及防护技术[J].建筑安全,2018,33(06):17-19.
- [5]陈昌盛.山区边坡稳定性分析及防护治理技术研究[J].工程技术研究,2021,6(13):133-134.

作者简介:熊能(1997.10—),男,汉族,江西南昌,硕士研究生,主要研究方向:工程地质、公路岩土工程、边坡稳定性与地质灾害研究。