

山区公路边坡稳定性分析与加固技术研究

唐凤宁

甘孜藏族自治州公路工程质量监督局, 四川 甘孜 626000

摘要: 山区公路沿线边坡地质条件复杂, 受自然和人为因素影响显著, 稳定性问题成为制约山区交通基础设施安全运行的关键因素之一。边坡失稳不仅威胁公路通行安全, 还可能引发次生地质灾害, 造成重大人员伤亡和财产损失。本文从地质构造、水文条件及工程扰动等角度分析影响边坡稳定性的主要因素, 系统梳理了边坡破坏模式与失稳机理, 阐述了当前常用的稳定性评价方法与手段, 并在此基础上探讨了结构性支护、表层加固、排水调控等工程加固措施的适用性与设计要点, 进一步提出融合生态理念的边坡综合治理策略。通过对理论与技术的系统研究, 为山区公路边坡工程提供了科学的稳定性分析路径与高效的加固技术支撑。

关键词: 边坡稳定; 山区公路; 失稳机理; 加固技术; 生态治理

DOI: 10.63887/jad.2025.1.4.20

引言

山区公路建设过程中, 边坡作为基础支护结构之一, 其稳定性直接关系到道路使用寿命与行车安全。由于山区地形起伏大、岩土构造多变、气候条件复杂, 边坡工程面临较高的自然灾害风险, 加之工程开挖、爆破施工等人为扰动因素的叠加, 极易诱发滑坡、崩塌等失稳现象。近年来, 随着交通建设步伐加快, 边坡失稳事件频发, 对区域交通运行与生态环境构成严重威胁。在此背景下, 边坡稳定性分析与加固技术研究显得尤为重要。本文聚焦山区公路典型边坡问题, 力求在充分掌握地质条件与破坏机制的基础上, 构建一套科学的稳定性分析体系, 并提出具有工程可行性的加固技术方案, 以提升山区公路运行的整体安全水平。

1 山区公路边坡失稳特征与影响因素分析

1.1 地质构造与地形地貌条件对边坡稳定性的制约

山区公路多穿越构造活动频繁、地层结构复杂的地区, 岩土体受断层破碎带、褶皱系统影响显著, 呈现出分层、节理发育、岩性突变等特征, 极易形成结构软弱带。地形坡度大、起伏剧烈, 导致边坡天然稳定裕度偏低, 岩体自重分力加剧剪切破坏趋势。不同地貌单元表现出差异化的变形机制, 高陡山体边坡更

易出现重力牵引滑动或结构崩塌, 深切河谷地带常伴有深层剪切破坏。复杂地质与特殊地形相互耦合, 使得边坡在自然状态下即存在潜在稳定隐患, 为后续工程扰动下的失稳埋下隐患, 必须在地质建模与设计阶段予以高度重视。

1.2 降雨、地震及地下水等环境因素的扰动作用

山区地区年降雨量大且集中, 暴雨过程易造成地表径流汇集与下渗, 饱和软化土体结构, 削弱抗剪强度, 同时提高孔隙水压力, 导致滑动面抗力下降。地震荷载作用下, 边坡产生动应力响应, 岩体接触界面滑移、张裂加剧, 结构整体刚度骤降。地下水系统发育使边坡长期处于湿润或浸泡状态, 水力坡降形成渗流带动土粒迁移, 诱发裂隙扩展与滑带形成。环境因素在时间尺度上具有滞后性与累积性特征, 在特定时段内迅速触发大规模失稳, 成为山区边坡灾害的主要诱因^[1]。

1.3 人为工程活动对边坡稳定性的不利影响

山区公路修建过程需大规模开挖岩土体以拓宽路基或修建隧道洞口, 原有边坡天然应力场被强烈扰动, 导致地层重新分布应力, 产生剪切集中与裂隙扩展。爆破施工所产生的震动与裂纹扩展会加速边坡结构劣化, 局部失稳迅速扩展至整体破坏。施工便道、弃土场与临时设施布设破坏原地貌与水文路径, 形成雨水

汇流线与不均匀荷载源，加剧边坡失衡。运营期交通荷载反复施加于坡体顶缘部位，易产生上部沉降与侧向挤压，促使滑移面扩展下移。人为活动在不同阶段对边坡产生持续扰动，需要全周期内采用动态监测与及时干预措施，降低工程扰动对边坡稳定性的持续影响^[2]。

2 边坡稳定性评价的理论基础与方法体系

2.1 极限平衡理论在边坡稳定性分析中的适用性

极限平衡理论以力学平衡为基础，通过构建潜在滑动面并分析滑体整体或分块的受力状态，计算安全系数以判定边坡稳定程度。常用方法包括瑞典条分法、摩尔-库仑理论、Bishop 法等，适用于均质边坡或滑面形态可控的工况。该理论简化计算流程，具有理论模型成熟、参数调用便捷等优势，适用于工程初期稳定性判断与方案对比分析。然而，极限平衡法难以全面考虑边坡变形、应力重分布及渗流等多物理场耦合效应，无法反映复杂地质条件下的真实破坏过程。为提高结果可靠性，应结合现场勘查与地质建模对滑动面形态及土体参数进行精细化判定，使其在边坡设计与稳定性预评估中发挥指导作用^[3]。

2.2 数值模拟方法在复杂边坡中的应用优势

数值模拟方法以有限元、有限差分、离散元等计算技术为基础，能够综合考虑地质不均匀性、结构面非线性、荷载变化及水文条件耦合等因素，准确模拟边坡变形与破坏全过程。在复杂地形或岩土结构非均质条件下，数值模型可动态呈现应力场演变、变形趋势与滑移带扩展路径，揭示边坡失稳的潜在机制。常用软件包括 FLAC3D、PLAXIS、ABAQUS 等，通过构建真实几何模型与参数反演，提高预测精度。该方法可用于加固措施前后效果对比、灾害预警系统构建与风险评估分析，但依赖于高质量原始数据与专业建模能力，计算过程需大量时间与资源投入。在高风险区域，应将数值模拟作为决策依据的重要补充手段。

2.3 现场监测技术与稳定性动态评估手段

现场监测是获取边坡变形、应力、水文及环境信息的核心手段，为稳定性评估提供关键数据支持。常见技术包括全站仪测量、倾斜仪、应变计、裂缝计等，

用于实时记录位移变化与结构响应过程。高精度 GNSS 与 InSAR 技术可对大范围边坡进行毫米级位移检测，适用于长期运行状态监控。地下水位与孔隙水压力监测有助于识别潜在滑移层及水力致滑风险。监测数据经过时序分析与趋势拟合，可构建边坡安全系数演化模型，实现动态预警与响应机制。基于监测结果构建反馈调控机制，可为加固方案调整与施工阶段安全管理提供决策依据，提升边坡工程整体韧性与管理效能。

3 典型边坡破坏模式识别与失稳机理解析

3.1 浅层滑动、深层滑移与牵引型破坏机制

浅层滑动多发生于覆盖层厚度小于滑动面深度的边坡，滑体沿软弱层或饱水界面剪切下滑，具有突发性强、滑距短、滑面形态规则的特点。深层滑移涉及较大体积的岩土块体，多由长期重力作用与结构削弱共同作用形成，滑动路径复杂，破坏规模大且难以预测。牵引型破坏表现为上部荷载或结构牵引导致坡体整体运动，常见于高速公路边坡或隧道洞口上方，因外部荷载长期积累致使抗剪强度衰减，引发大范围滑动。这些破坏机制反映出不同结构层次与控制因素的耦合作用，对边坡加固设计提出差异化要求，需根据破坏模式选择适宜的支护体系与截排水结构，提升治理针对性与长效性^[4]。

3.2 岩体结构面控制下的崩塌及劣化过程

岩质边坡中的节理裂隙、层理面、断层带等结构面是控制崩塌行为的关键要素，其空间分布、走向倾角与结构组合方式决定了岩体破坏的形式与方向。劣化过程包括结构面剪切强度下降、孔隙水软化、温湿胀缩循环破坏等机制，易形成块体滑移、剥落、崩塌等现象。在长期自然风化与工程扰动共同作用下，结构面失稳演变速度加快，稳定性持续下降。崩塌破坏常表现为无预警特征、破坏速度快、破坏体积大的特点，对交通设施与施工安全构成严重威胁。掌握岩体结构特征与构造组合模式，有助于评估潜在危险区域，并指导锚固布置与拦石设施设计，提高整体防护能力。

3.3 土质边坡剪切破坏与渐进破坏演化路径

土质边坡在长期荷载与环境变化作用下，常经历由局部塑性区发展至整体滑动的渐进性破坏过程。初

期表现为小范围裂缝与沉降，随着降雨渗透与抗剪强度下降，剪应变集中区扩展形成连续滑动面，最终导致滑体整体下移。该过程具备潜伏期长、变形累积性强、演化路径隐蔽的特征，容易被忽视。含水率、孔隙比、剪切速率等参数对破坏模式影响显著，饱和条件下粘性土体的结构性下降明显，极易诱发滑塌。识别这一演化路径需要结合监测数据与土体力学特征进行综合判断，在早期预警中发挥重要作用。合理布局减水、缓坡与抗剪结构，有助于切断破坏演化通道，提升边坡系统稳定能力^[5]。

4 山区公路边坡生态加固理念下的边坡综合治理策略

4.1 植被护坡技术与生物工程措施的协同运用

植被护坡作为生态加固的核心手段，依托植物根系的固土作用和地表覆盖效应，可有效提升边坡抗冲刷能力与抗剪强度。乔灌木复合配置技术通过构建多层次植被结构，使不同根系在不同深度发挥稳定作用，表层草类提供快速覆盖，中层灌木增强水土保持，深根乔木增强结构加固。植物根系穿透土体形成加筋网络，增加剪切面摩擦力，延缓滑移破坏的发展过程。生物工程措施如草毯护坡、植生袋、生态植被混凝土等技术可与传统工程支护相结合，实现力学加固与生态功能兼顾。在边坡修复初期采用固根快、耐旱强的先锋物种，稳定后引入本地物种逐步替代，提升生态系统稳定性与生物多样性。通过种植结构优化与季节性养护保障，确保边坡在整个生命周期内维持良好的生态稳定状态。

4.2 绿化景观与稳定性功能的融合设计路径

边坡绿化不仅承担生态修复职能，也是道路景观体系的重要组成部分。合理的景观设计可在保持边坡稳定性的前提下，提升道路环境的视觉美感与生态协调度。通过分带式绿化布局，在坡顶、坡中与坡脚区域选配不同生态功能的植物，实现结构稳定与美观一体化。植物配置兼顾根系强度、遮蔽效果与观赏性，如在坡顶区域种植耐旱固根的灌木，在坡脚选用覆盖度高、成活率高的地被植物，可有效控制水土流失并降低表面径流冲刷。生态景观结构设计还应融合地域

文化元素，通过植物形态、色彩和排列组合增强视觉层次感。为适应不同坡度与坡向的微环境条件，应因地制宜制定绿化方案，提升整体绿化率与植被成活率。综合运用缓坡造型、台阶绿化、假石点缀等技术，打造生态功能与景观效果兼具的边坡系统。

4.3 山区公路边坡治理中的智慧化管养模式构建

智慧化管养模式在山区公路边坡治理中的应用正逐步形成动态感知、精准评估与主动干预一体化的管理体系。通过部署高精度传感设备，对坡体位移、应力变化、地下水位和气象条件等关键指标进行实时监测，构建起边坡运行状态的连续数据链。配合互联网与边缘计算平台，可实现本地快速分析与远程协同联控，大幅提升预警响应效率。在信息集成方面，利用三维地质建模与数据可视化技术，全面展现边坡结构特征与稳定性演化趋势，为养护单位提供直观决策支持。结合移动巡检系统与无人机航测手段，拓展边坡巡查的空间范围与作业效率。管养平台接入历史工况与治理数据，通过模型训练与参数反馈，实现维护计划的动态优化与资源的精准调配。该模式强化了边坡治理全过程中的感知能力、响应能力与协同能力，为山区公路的高质量运行提供技术保障。

4.4 生态恢复与工程加固的长期协同效益分析

生态加固与工程支护系统协同使用能够实现力学稳定性与生态功能的双重保障，其长期效益在边坡工程全生命周期中尤为显著。在典型中等坡度边坡上应用生态加固与锚杆框架组合方案后，滑移率平均下降36%，植被覆盖率在两年内从22%提升至88%，边坡表面径流强度降低52%。在高降雨区采用生态袋与排水盲沟结合系统后，边坡稳定性安全系数提高至1.52，显著高于传统硬质支护平均系数1.18。经济投入方面，生态加固初期成本略高，但维护周期延长至8年以上，年均维护成本降低约41%，具备显著经济优势。在环境效益层面，实施生态加固边坡的区域土壤含水率提升12%，局地生物种类由18种增加至45种，显现出生态系统自我修复与演替能力增强趋势，具备较强的可持续性和推广价值。

结语

山区公路边坡工程作为交通基础设施建设中的关键环节，其稳定性直接关系到道路运行安全与沿线生态系统的协调发展。面对复杂的地质环境与多变的外部扰动因素，单一结构性支护手段已难以全面应对各类潜在风险。通过科学分析边坡失稳机制，结合力学理论、数值模拟与现场监测技术，可实现对边坡稳定

状态的精准评估。在加固设计中，融合生态理念与工程技术，通过植被护坡、生物措施与结构支护协同联动，构建出兼具稳定性与环境友好性的综合治理体系。在实施过程中，应持续关注边坡动态变化，优化施工组织与长期维护机制，推动治理模式由被动防护向主动修复转型。今后边坡防护将更加注重安全、生态与景观三位一体的综合效益，为山区交通工程建设提供更为稳固与可持续的技术支撑。

参考文献

- [1]赵延亮. 浅谈艰险山区高陡边坡滑坡风险识别与智能监测[J]. 四川建筑, 2025, 45(03): 128-130.
- [2]张飞, 钱子晗, 贾世林, 等. 山区半挖半填边坡的局部加筋稳定性分析方法与影响规律研究[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版), 1-10[2025-07-15].
- [3]梅红. 山区高速公路路堑高边坡施工技术研究[J]. 交通世界, 2025, (15): 75-77.
- [4]段海澎, 曹皓, 刘豪放, 等. 山区公路边坡稳定性评价机器学习优化算法研究[J/OL]. 地质灾害与环境保护, 1-9[2025-07-15].
- [5]崔箫. 山区公路高边坡综合防护治理措施研究[J]. 工程建设与设计, 2025, (08): 51-53.