

道路工程边坡防护结构稳定性分析

王玉平

陇南公路应急保障与路网监测中心, 甘肃 陇南 746000

DOI:10.61369/ERA.2026030004

摘要：道路工程边坡防护结构的稳定性直接关系到道路运营安全与沿线生态环境, 是岩土工程与道路工程交叉领域的关键研究课题。本文以道路边坡常见防护结构为研究对象, 通过现场勘查、室内试验与数值模拟相结合的方法, 分析岩土体性质、水文条件等关键因素对稳定性的影响机制, 对比不同防护方案优劣, 梳理常见病害类型与成因, 提出针对性治理技术及动态优化策略, 构建“设计-分析-优化-治理-养护”全生命周期技术体系。研究表明, 组合式防护结构较单一形式可提升边坡稳定性系数 15%~25%, 病害治理后稳定系数达 1.35 以上, 最大位移量控制在 5mm 以内。本文为道路边坡防护设计、病害治理与运营养护提供了理论依据与技术支撑。

关键词：道路工程; 边坡防护; 结构稳定性; 病害治理; 优化策略

Stability Analysis of Road Embankment Protection Structures

Wang Yuping

Longnan Highway Emergency Response and Road Network Monitoring Center, Longnan, Gansu 746000

Abstract: The stability of slope protection structures in road engineering directly impacts road operational safety and the ecological environment along the route, serving as a critical research topic at the intersection of geotechnical engineering and road engineering. This study focuses on common slope protection structures, employing a combination of field investigations, laboratory tests, and numerical simulations to analyze the influence mechanisms of key factors such as geotechnical properties and hydrological conditions on stability. It compares the advantages and disadvantages of different protection schemes, identifies common types and causes of slope failures, proposes targeted remediation techniques and dynamic optimization strategies, and establishes a comprehensive "design-analysis-optimization-remediation-maintenance" lifecycle technical system. The research demonstrates that combined protection structures can enhance slope stability coefficients by 15% to 25% compared to single forms, achieving stability coefficients above 1.35 after remediation and controlling maximum displacement within 5mm. This study provides theoretical foundations and technical support for slope protection design, failure remediation, and operational maintenance in road engineering.

Keywords: road engineering; slope protection; structural stability; disease control; optimization strategy

引言

道路工程建设中, 边坡作为路基的重要组成部分, 广泛分布于山区、丘陵区道路沿线。边坡失稳引发的滑坡、崩塌等地质灾害, 不仅造成道路中断、交通瘫痪, 还威胁周边居民生命财产安全, 因此边坡防护结构的稳定性分析具有重要工程实践意义。近年来, 随着道路工程向复杂地质区域延伸, 边坡面临的水文、地质条件愈发复杂, 传统单一防护结构难以满足高稳定性要求。行业内专家围绕边坡防护结构开展研究, 在岩土体本构模型、支护结构受力特性等方面取得诸多成果, 但现有研究多聚焦静态工况下稳定性分析, 对动态水文变化、长期荷载作用下的结构响应研究不足, 且缺乏“设计-施工-治理-养护”全流程协同技术体系。

基于此, 本文结合工程实际案例, 系统分析边坡防护结构稳定性关键影响因素, 构建多因素耦合下的稳定性评价体系, 对比不同防护方案优劣, 梳理病害类型与成因并提出治理技术, 旨在为道路边坡防护工程的设计、施工与长期安全运营提供科学指导。

一、道路边坡防护结构类型及适用条件

道路工程中常用边坡防护结构可分为支挡型、坡面防护型与

综合防护型三类, 不同类型结构适用条件与防护机理存在显著差异, 需结合边坡岩土体性质、坡度、水文条件及环境要求针对性选用。

作者简介: 王玉平 (1971-), 男, 汉族, 甘肃陇南人, 大学本科, 副高级工程师, 一直从事公路桥梁建设管理养护工作。

支挡型防护结构以抗滑桩、挡土墙为典型代表，其核心机理是通过结构自身刚度与强度，抵抗边坡岩土体下滑力，适用于岩土体力学性质较差、边坡坡度较陡的路段。抗滑桩通过桩体嵌入稳定地层，利用桩土相互作用传递荷载，可有效控制深层滑动，尤其适用于存在软弱夹层、潜在滑动面较深的边坡；挡土墙则依靠墙体自重或锚拉结构平衡土压力，按结构形式可分为重力式、悬臂式、锚杆式等，多用于浅层边坡防护及坡脚受河流冲刷、路基填筑段的边坡加固。

坡面防护型结构包括喷锚支护、植草防护、格构护坡等，主要作用是防止坡面岩土体风化、冲刷，维持边坡表层稳定。喷锚支护通过锚杆锚固与喷射混凝土面层的结合，增强坡面岩土体的整体性，适用于岩质边坡及节理裂隙发育的破碎岩体边坡；植草防护与格构护坡则兼具防护与生态修复功能，植草防护通过草本植物根系固土、茎叶截留雨水，适用于坡度较缓土质边坡，格构护坡常与喷播植草结合，形成“框架+植被”的防护体系，多用于土质边坡与环境敏感区域。

综合防护型结构是支挡型与坡面防护型组合形式，如“抗滑桩+格构护坡”“挡土墙+喷锚支护”等，通过多结构协同作用，实现深层与浅层防护有机结合，适用于地质条件复杂、稳定性要求高的高陡边坡，例如山区高速公路的深挖高填路段、临近建筑物或重要管线的边坡工程，可有效降低边坡失稳风险，保障道路运营安全^[2]。

二、边坡防护结构稳定性影响因素分析

（一）岩土体性质

岩土体的物理力学性质是决定边坡防护结构稳定性的内在核心因素，核心指标包括重力、内摩擦角与粘聚力。内摩擦角与粘聚力直接决定岩土体抗剪强度，抗剪强度越高，边坡自稳能力越强，防护结构荷载越小、安全储备越高。风化岩、松散填土、软黏土等抗剪强度低，颗粒粘结力弱，易发生剪切破坏，需采用抗滑桩、锚杆挡土墙等刚度较大的支挡结构；硬质岩浆岩、完整沉积岩等抗剪强度高，边坡自稳性好，采用喷锚支护、植草防护等坡面防护即可。此外，层理、节理、裂隙发育的岩体及断层破碎带附近岩土体，易沿弱面滑移，需针对性增设预应力锚杆等加固结构。

（二）水文地质条件

水文条件是影响稳定性的关键外部因素，地下水渗流与地表水冲刷会显著降低岩土体强度。地下水渗流产生的动水压力会破坏颗粒粘结力、改变应力状态，同时增加岩土体饱和重度，增大下滑力，严重时引发深层滑坡；地表水冲刷直接侵蚀坡面，导致坡面塌陷、防护结构基础裸露，坡脚长期冲刷易形成淘空区，诱发结构倾覆。因此，地下水丰富的边坡需增设截水沟、盲沟等排水系统；降雨充沛区域应采用格构护坡、浆砌片石护坡等形式，构建多层抗冲刷防护体系。

（三）防护结构与施工质量

防护结构的设计参数与施工质量直接决定其稳定性。抗滑桩的桩长、桩径、桩间距需与下滑力精准匹配，桩长不足或桩间距

过大易导致桩体变形断裂；挡土墙的墙高、埋深及回填土压实度需严格遵循设计标准，压实度不足会引发墙体沉降倾斜。施工工艺缺陷同样影响稳定性，如喷锚支护中锚杆锚固长度不足、注浆不饱满，喷射混凝土厚度不均、养护不到位，或支挡结构施工中基坑开挖扰动岩土体，均可能诱发边坡失稳。因此，施工阶段需加强全流程质量管控，严格执行设计规范与施工工艺，同步做好施工监测，实时调整方案。

三、稳定性分析方法与工程案例

（一）常用稳定性分析方法

道路边坡防护结构稳定性分析方法主要包括极限平衡法与数值模拟法。

1. 极限平衡法是工程中最常用的方法，其基本原理是将边坡划分为若干滑动体，通过计算滑动面的抗滑力与下滑力比值，确定边坡稳定系数，常用方法有瑞典条分法、毕肖普法、简布法等。该方法计算简便、适用性强，但未考虑岩土体的应力应变关系，适用于初步稳定性评价。

2. 数值模拟法以有限元法、有限差分法为代表，通过构建边坡三维模型，模拟岩土体与防护结构的相互作用，分析结构应力分布、位移变化规律，可实现动态工况下的稳定性分析。以FLAC3D软件为例，可输入岩土体力学参数、防护结构形式等数据，模拟降雨、荷载作用下的结构响应，为优化设计提供精准依据^[3]。

（二）工程案例

选取国道212线K482+700~K483+390九姊妹梁路段边坡工程为研究对象。该路段位于陇南白龙江流域，地处复杂地质构造区域，地形陡峭，岩土体松散、自稳性差，且汛期降雨集中，历史上多次发生大规模塌方（2020年“8.12”水毁塌方近10000立方米，2024年“7.22”水毁塌方近6000立方米），边坡失稳导致交通频繁中断，严重威胁沿线群众生命财产安全。原防护措施缺乏系统性设计，仅针对局部塌方进行临时抢修，属于“头痛医头、脚痛医脚”的被动处置模式，未能从根本上解决边坡稳定性问题，稳定系数长期低于规范要求的1.20，且坡面位移无有效控制，灾害反复发生。

通过极限平衡法计算原被动防护方案，稳定系数仅为1.02，无法满足长期运营安全需求；借助无人机航拍踏勘与大数据建模开展数值模拟分析，明确边坡存在深层滑动风险，且坡面岩土体松散易受雨水冲刷，单一防护形式难以兼顾深层抗滑与浅层防护需求。基于此，优化设计采用“分区治理、协同防护”的组合方案：将边坡划分为六个工点同步施工，坡脚统一设置“抗滑桩+挡板墙+冠梁”复合支挡体系，1、2号工点因坡体更陡、地质更复杂，额外增设框格梁加固，形成“上固下挡”的立体防护结构；同步配套急流槽、截水沟等排水设施，构建“防、排、稳、固”一体化闭环体系，框格梁区域码砌植生袋实现绿化覆盖，兼顾防护与生态效益。

优化后经极限平衡法复核，边坡稳定系数提升至1.38，满足

规范及长期运营安全要求；现场监测数据显示，边坡最大位移量控制在4mm以内，彻底解决了历史上“屡毁屡修、屡修屡毁”的难题。该工程通过科学选址、多结构协同设计与精细化施工，实现了从“被动抢险”到“主动防护”的转变，验证了复杂地质条件下组合式防护体系的有效性与适用性。

值得注意的是，即便设计施工达标，边坡防护结构长期运营中仍会受岩土体劣化、水文变化、荷载作用及环境侵蚀等因素影响，滋生各类病害。若未及时治理，易导致防护功能失效、引发边坡失稳，因此需梳理病害类型、成因及治理技术，形成“设计-分析-治理-养护”完整技术体系，为道路边坡长期安全运营提供全生命周期保障^[4]。

四、边坡防护结构病害类型与治理技术

边坡防护结构长期稳定，既依赖前期合理设计与规范施工，也需重视运营期病害防控。本节结合工程实践分析病害类型、成因，为养护及处置提供技术支撑。

（一）常见病害类型及成因

（1）支挡结构病害

典型病害为挡土墙倾斜、沉降、开裂，抗滑桩断裂、位移超标。成因有三：一是设计参数失配，如挡土墙埋深不足、抗滑桩桩长未达稳定地层，致使结构受力超限；二是施工质量缺陷，如回填土压实度不足、混凝土强度不达标，降低承载能力；三是长期环境作用，地下水侵蚀引发钢筋锈蚀、岩土体强度衰减，结构在土压力下变形破损。

（2）坡面防护病害

涵盖喷锚支护面层剥落、锚杆松动，植草防护植被退化、坡面冲刷沟发育，格构护坡框架开裂、节点脱落。喷锚病害源于锚杆锚固不足、注浆不饱满或混凝土养护不到位；植草退化与降雨冲刷、土壤贫瘠、植被选型不当相关；格构护坡病害则因混凝土收缩裂缝、坡面平整度差引发应力集中。

（3）综合防护体系协同失效

组合式结构易出现多构件联动失效，如抗滑桩位移过大牵拉格构框架断裂，或排水堵塞加剧各类病害。成因是设计未考量结构受力协调、施工工序衔接不当，以及运营期养护不及时，造成体系功能衰减^[5]。

（二）针对性治理技术

（1）支挡结构病害治理：挡土墙倾斜沉降采用锚杆注浆加固，增设预应力锚杆并改良墙后软弱土体；墙体裂缝压力灌浆防渗，严重破损段拆改重建。抗滑桩失效时，增设补充桩或通过外包钢板、注浆加固提升刚度，控制位移。

（2）坡面防护病害治理：喷锚支护凿除破损面后重新锚固注浆，喷射高强混凝土并加设钢筋网；植草退化区域清理冲沟、改良土壤，选用乡土植被喷播，必要时增设三维植被网。格构护坡裂缝灌浆、节点加固，变形严重段重新施工贴合坡面。

（3）综合防护体系优化治理：先经勘查与数值模拟明确协同失效成因，增设衔接构件协调受力，疏通重建排水系统。建立常态化养护机制，定期检查、及时处置早期病害^[6]。

（三）治理效果验证

治理后通过极限平衡法确保稳定系数 ≥ 1.20 ，FLAC3D模拟验证协同有效性，现场布设监测设备连续监测6个月以上，控制最大位移 $\leq 5\text{mm}$ 。国道212线九姊妹梁路段边坡经综合治理后，稳定系数从1.08提升至1.35，变形稳定，防护功能恢复，验证了治理技术可靠性^[5]。

五、结语

道路工程边坡防护结构稳定性是保障道路安全运营的核心要素，其稳定性受岩土体性质、水文条件、设计施工等多因素影响，且需兼顾长期运营中的病害防控。单一防护结构难适应复杂地质工况，组合式防护结构通过多形式协同作用，可提升边坡稳定性系数15%~25%，极限平衡法与数值模拟法结合的科学分析方法，为方案优化提供了精准支撑。本文通过理论分析、工程案例验证与病害治理技术梳理，明确各影响因素的作用机制，构建“设计-分析-优化-治理-养护”的全生命周期技术体系，为道路边坡防护工程的设计、施工与运营养护提供系统的理论参考与技术支撑。未来研究应进一步融合人工智能、物联网等技术，构建智能化边坡稳定性监测与预警体系，实现病害早期识别与动态治理；同时深化生态防护与工程防护的融合应用，在保障稳定性的基础上提升生态效益，推动道路工程边坡防护技术向精准化、智能化、生态化方向持续发展。

参考文献

- [1] 吕大为. 公路边坡稳定性分析及治理方法研究 [J]. 交通科技与管理, 2025(08).
- [2] 付幸豪. 拓宽开挖条件下的公路高边坡稳定性与加固分析 [J]. 北方交通, 2025(01).
- [3] 姜涛. 岩土工程中边坡稳定性分析与加固技术研究 [J]. 新城建科技, 2024(08).
- [4] 韩杰; 吴炜骏. 城市道路岩质高边坡失稳机理分析及加固措施研究 [J]. 交通科技与管理, 2024(02).
- [5] 马海鹏. 公路路基设计中的边坡防护问题及应对措施分析 [J]. 大陆桥视野, 2023(04).
- [6] 陈墨. 边坡防护中的生态防护与基本建设设计 [J]. 中国高新科技, 2023(06).