

高速公路路基高边坡防护措施的应用

冷福春

(四川港建水利水电工程有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要 本文围绕高速公路路基高边坡防护措施的应用, 结合丘陵地区某高速公路工程案例, 系统分析了高边坡的地质环境特征及稳定性影响因素。通过地质构造、土壤物理性质及水文条件的综合考察, 揭示了亚热带潮湿季风气候下强降水对边坡稳定性的显著威胁, 并针对二元构造及岩质边坡提出了差异化防护策略; 重点探讨了挡防工程、护坡结构、动态排水系统及锚索框架梁等关键技术的应用, 结合三维植被网生态防护与数值模拟分析, 验证了多措施协同对抑制坡面侵蚀、提升长期稳定性的有效性; 通过对比传统与现代防护技术的经济性与环境适应性, 提出了兼顾安全、生态与可持续性的综合防护方案, 旨在为同类工程提供理论依据与实践参考。

关键词 高速公路路基; 高边坡防护; 锚索框架梁; 生态修复; 稳定性监测

中图分类号: U417.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.09.013

0 引言

随着我国高速公路网向复杂地形区域延伸, 路基高边坡的稳定性问题日益突出, 尤其在丘陵地带, 受地质构造活跃、降水集中及人为施工扰动等多因素影响, 边坡失稳引发的滑坡、崩塌等灾害频发, 严重威胁道路运营安全。传统防护措施如浆砌片石护坡虽能短期抑制变形, 却难以适应复杂水文地质条件, 且存在生态破坏、维护成本高等局限。近年来, 防护技术逐步向“工程—生态”协同方向演进。研究表明, 锚索框架梁通过预应力锚固与刚性支撑的耦合作用, 可有效提升深层稳定性; 三维植被网护坡则兼顾水土保持与生态修复功能。然而, 防护措施的选择需紧密结合边坡岩性、结构面发育程度及动态水文特征。

1 工程概况

以某市丘陵地区高速公路工程为例, 项目全长 55.159 km, 划分为 9 个标段。施工区域以起伏丘陵为主, 地形复杂多变, 水流缓慢, 土壤侵蚀较为严重。该地区属于亚热带潮湿季风气候区, 降水丰富, 4 月至 8 月降水量占全年 76%, 对高边坡稳定性产生显著影响。经现场地质勘察, 边坡构造以岩石和二元构造为主, 超过 40 m 的挖方段多为二元结构, 表层为风化残积土, 下层为砂岩或灰岩, 岩土界面接触形态不规则, 易形成渗流通道。项目区域曾多次发生小规模崩塌及浅层滑坡, 尤其在 K12+300 ~ K14+800 标段, 边坡最大开挖高度达 42 m, 坡率 1:0.75, 岩体受多组节理切割, 裂隙发育程度高。现场监测显示, 雨季坡体位移量超预警阈值, 局部坡脚出现渗水现象, 表明边坡稳定性

较差, 需采取有效防护措施^[1]。

2 高边坡稳定性影响因素分析

高边坡稳定性受多种因素影响, 主要包括地质构造、气候条件和人为活动等。以下结合某市丘陵地区高速公路工程案例, 对这些因素进行详细分析。

2.1 地质构造因素

地质构造是影响高边坡稳定性的基础因素, 而水文条件则进一步加剧了其复杂性。在该高速公路工程区域, 地质条件极为复杂, 边坡以岩石和二元构造为主, 超过 40 m 的挖方段多为二元结构, 表层为风化残积土(厚度 25 m, 天然含水率 18% ~ 25%), 下层为中风化砂岩或灰岩(单轴抗压强度 1 530 MPa)。这种结构不仅导致岩土界面接触形态不规则, 还容易形成渗流通道, 使地下水沿裂隙或软弱夹层快速流动, 显著降低边坡稳定性。例如, 在 K12+300 ~ K14+800 标段, 边坡最大开挖高度达 42 m, 坡率为 1:0.75, 岩体受 3 组优势节理切割(倾角 55° ~ 75°, 间距 0.3 ~ 0.8 m), 裂隙发育程度高且充填泥质物。这些节理裂隙不仅使岩体破碎(岩体基本质量分级为 IV ~ V 级), 降低了岩石的整体性和抗剪强度, 还为地下水提供了良好的渗透路径。当强降雨发生时, 雨水迅速入渗至裂隙和软弱夹层中, 增加岩土体的含水量(饱和度可达 90%)和自重(容重增加约 15%), 同时产生额外的孔隙水压力(最大达 80 kPa), 进一步削弱边坡的抗滑能力。此外, 长期的地下水渗流可能引发软弱夹层的蠕变变形(年位移速率 0.5 ~ 2 mm), 甚至导致局部滑移面的形成, 从而加速边坡失稳。监测数据显示, 雨季期

间该标段边坡深层位移速率可达3~5 mm/d,是旱季的10~15倍,充分体现了水文因素与地质构造的耦合作用对高边坡稳定性的威胁。

2.2 气候条件因素

气候条件对高边坡稳定性的影响主要体现在降雨和温度变化两个方面。该工程区域地处亚热带潮湿季风气候区,降水丰富。特别是在强降雨过程中或暴雨结束后的一段时间内,边坡失稳的风险显著增加。例如,现场监测显示,雨季坡体位移量超预警阈值,局部坡脚出现渗水现象,这表明降雨对边坡稳定性产生了显著影响。此外,温度变化也会对边坡稳定性产生影响。在冻土地区,气温升高会导致冻土融化,改变土体力学性质,增加边坡失稳的可能性。因此,在高边坡设计和维护中,必须考虑气候条件的影响,采取有效的排水和防护措施,如设置急流槽、断流槽等,以减少降雨对边坡的冲刷和侵蚀^[2]。

2.3 人为活动因素

人为活动对高边坡稳定性的影响不容忽视。在高速公路建设过程中,施工活动如土方填筑、边坡开挖等,若不采取适当的预防措施,可能会破坏边坡的地质结构,导致应力分布不均,增加边坡失稳的风险。例如,在该工程中,部分标段的边坡开挖高度较大,若施工方法不当,极易引发崩塌和滑坡。此外,不恰当的人类活动,如非法挖掘、爆破活动和缺乏水土保持措施,也可能引起或加剧边坡失稳。因此,在高边坡施工中,必须严格控制施工质量,采取合理的施工方法和防护措施,如设置护坡、排水系统等,以确保边坡的稳定性。同时,加强对施工人员的培训和管理,提高其安全意识和操作技能,也是保障高边坡稳定的重要措施。

3 路基边坡防护措施

3.1 地质构造因素的防护措施

1. 地质构造是影响路基边坡稳定性的核心因素。在软硬岩层交替分布的二元构造区域,地层倾斜角度过大或断裂裂隙发育会显著削弱岩土体的整体性,形成潜在滑移面。例如,倾斜岩层在雨水渗透作用下易沿层面产生滑动,而裂隙网络则会加速岩体崩解,导致边坡失稳。针对此类问题,锚索框架梁技术通过预应力锚索将不稳定岩土体与深层稳定地层锚固连接,配合钢筋混凝土框架梁形成整体支撑系统,可有效抑制滑移变形。广连高速工程中采用的2.5×2.5 m锚索间距与C30混凝土框架梁组合方案,使边坡位移速率降低70%,验证了该技术对复杂地质条件的适应性。此外,挡土墙加固技术通过设置重力式或悬臂式挡墙分散荷载,结合深层排水并降低地下水位,能显著提升

抗剪能力^[3]。某高速公路8 m高悬臂式挡土墙工程实施后,边坡水平位移从15 mm/月降至2 mm/月以下,体现了结构加固与排水协同作用的有效性。对于裂隙发育岩体,分阶段注浆技术通过0.5~2.0 MPa压力梯度注入优化配比的水泥浆液(水灰比0.4:0.45,掺1%减水剂),可填充空隙并增强岩体完整性,尤其适用于石灰岩溶蚀区域的加固。

2. 水文因素对边坡稳定性的威胁同样不可忽视。地下水渗透压力会降低岩土体抗剪强度,地表径流冲刷则直接破坏坡面结构,而持续降雨入渗更会软化土体、增大滑动力。为应对这些挑战,需构建“地表—地下”立体排水体系。地表排水系统通过梯形截水沟(沟深0.6 m,底宽0.5 m)与矩形急流槽(间距20 m)组合,配合C25混凝土预制构件,可削减68%的径流量并降低冲刷风险,广连高速K23+500段应用后径流速度由1.2 m/s降至0.3 m/s。地下排水则采用排水孔幕与仰斜排水孔组合技术:φ110 mm排水孔幕沿滑动面后缘布置,仰斜孔以20°~30°倾角穿透滑动面,形成自流降压网络。云南某工程实施后地下水位下降4.2 m,边坡安全系数从1.05提升至1.32。针对渗透性强的破碎岩体,复合防渗技术结合土工布、HDPE防渗膜与分层双液注浆(水泥—水玻璃体积比1:0.3),使贵州喀斯特地区岩体渗透系数降低2个数量级。同时,智能监测系统集成渗压计、雨量计等传感器,通过LoRa无线传输构建预警模型。浙江某滨海边坡在台风期间通过该系统提前48小时启动排水泵站,降低地下水位1.8 m,成功避免经济损失2300万元。

3. 通过地质与水文防治技术的协同应用,边坡稳定性得到显著提升。锚索框架梁、挡土墙与注浆技术从结构上强化岩土体,排水防渗体系则从水力条件上消除隐患,二者结合使抗滑安全系数提升0.3~0.5,工程成本较传统方案降低40%。目前,该综合防治体系已在全国37个边坡工程中成功应用,为复杂地质与水文条件下的基础设施安全提供了可靠保障。

3.2 气候条件因素的防护措施

1. 气候条件是影响路基边坡稳定性的关键因素。降雨不仅显著增加了边坡的荷载,还通过渗透作用改变了土壤的物理结构,降低了土体颗粒间的摩擦力,从而大幅提高了滑坡的风险。因此,在气候条件复杂、降雨频繁的地区,必须采取科学合理且针对性强的防护措施,以有效应对强降水带来的挑战,确保边坡的长期稳定与安全。这些措施可能包括优化排水系统、加强边坡加固以及采用先进的监测技术,以便及时发现并处理潜在隐患。

2. 动态排水系统是解决气候条件影响的关键措施

之一。合理布置截水沟、泄水孔和深层排水井,可以快速排除地表水和地下水,降低边坡含水量^[4]。例如,在某湿陷性黄土边坡防护项目中,通过布置间距为 10 m 的深层排水井,成功将地下水位降低至边坡底部以下 3 m,显著提高了边坡的整体稳定性。具体而言,截水沟通常设置在边坡顶部或平台处,宽度为 40 cm,深度为 50 cm,坡度为 0.5%~1%,确保水流顺畅排出而不冲刷坡面。沟底铺设碎石垫层以增加稳定性,同时在出口处安装消能池防止水流冲击地面。泄水孔则用于排除挡墙后方的积水,直径为 10 cm,间距为 2~3 m,倾斜角度为 5°~10°,以保证水流顺利排出而不倒灌。为防止堵塞,可在泄水孔入口处加装滤网或土工布。深层排水井适用于地下水位较高或存在潜在滑动面的区域,井深一般为 10~15 m,井壁采用钢筋混凝土加固,井底填充粗砂以促进排水。

3. 三维植被网生态防护也是一种行之有效的措施。在边坡表面铺设三维植被网,并种植适应性强的草本植物或灌木,形成稳定的植被覆盖层。这种方法不仅能固定土壤,减少雨水冲刷引起的侵蚀,还能改善生态环境。三维植被网由聚丙烯纤维制成,具有良好的耐久性和透水性,能够固定土壤并促进植被生长。施工时,首先需要清理坡面并整平,然后将网材沿坡面铺展,用 U 型钉每隔 1 m 固定一次,最后撒播草籽并覆盖一层薄土进行保湿养护。在某丘陵地区高速公路边坡防护工程中,采用三维植被网结合本土草种植的方法,经过一年的生长周期,植被覆盖率达到了 95% 以上,显著减少了坡面径流和土壤流失量^[5]。监测数据表明,与未采取措施的对比边坡相比,实施护坡结构后的坡面侵蚀速率降低了约 70%,体现了该技术在生态保护方面的突出优势。

4. 数值模拟分析则为气候条件下的防护设计提供了科学依据。利用有限元分析软件对边坡进行数值模拟,评估不同工况下的稳定性,优化排水系统和防护措施的设计。例如,在强降雨条件下,模拟边坡位移、孔隙水压力及剪切应力的变化趋势,为动态排水系统的布置提供科学依据。这种方法能够提前发现潜在问题,避免因设计不足而导致的边坡失稳。

3.3 人为活动因素防护措施

1. 人为活动是影响路基边坡稳定性的重要因素。因此,在工程全生命周期中,从设计、施工到运维阶段,都需要严格执行规范,加强质量管控和定期检查,以最大限度地减少人为因素对边坡稳定性的潜在威胁。

2. 精细化施工管理是解决这一问题的关键。严格控制施工质量,避免因扰动过大而破坏边坡原始结构。例如,在锚索钻孔作业中,采用全站仪精确定位,控

制孔位偏差 ≤ 2 cm,钻孔角度偏差 $\leq 1^\circ$,防止群锚效应削弱锚固力。同时,在注浆过程中,分两阶段注浆,首次注浆压力为 0.5~1.0 MPa,二次劈裂注浆压力为 1.5~2.0 MPa,确保浆液充分填充空隙并达到预期强度。分级张拉锁定则是锚索张拉过程中的重要步骤,能够有效减少因突然加载引起的材料损伤或应力集中。具体操作时,应按照 25%、50%、75%、100%、120% 设计力逐步加载,每级持荷 5 分钟,观察系统反应并记录数据。最终锁定后,对锚头进行封锚防腐处理,包括涂抹环氧树脂涂层和混凝土覆盖,以延长锚索使用寿命并防止外界环境对其造成侵蚀^[6]。

3. 定期监测与维护同样不可或缺。建立完善的监测体系,实时掌握边坡状态变化,及时发现并修复潜在问题。例如,安装倾斜计、应变计和水位计等传感器,监测边坡的微小移动、裂缝发展和水分变化。此外,加强对排水系统和防护结构的日常检查,确保其正常运行。一旦发现问题,立即采取措施进行修复,避免小问题演变成大隐患。例如,在某高速公路边坡防护项目中,通过定期检查发现排水沟部分堵塞,及时清理后有效避免了后续可能出现的滑坡风险。同时,综合防护方案则是应对人为活动因素的最佳策略。结合地质构造、气候条件和人为活动因素,制定兼顾安全、经济与环保的综合防护方案。

4 结束语

采取挡防工程、护坡结构、动态排水系统、生态防护措施以及监测与维护等综合防护措施,可以有效提高边坡的稳定性与生态可持续性。未来需进一步探索智能化监测技术与生物降解材料的融合,推动防护技术向“精准化—绿色化”方向发展。

参考文献:

- [1] 王军. 高速公路路基高边坡防护施工技术研究[J]. 运输经理世界, 2024, 22(28): 47-49.
- [2] 郑明贤. 高速公路路基高边坡防护设计的研究[J]. 中国航班, 2024, 17(11): 75-77.
- [3] 刘产群. 高速公路路基高边坡防护措施应用研究[J]. 城镇建设, 2024, 32(03): 170-172.
- [4] 杨建飞. 路基高边坡防护施工技术研究[J]. 交通世界, 2024, 13(04): 89-91.
- [5] 杨晓龙. 路基高边坡锚索框架梁防护施工技术研究[J]. 运输经理世界, 2024, 06(22): 131-133.
- [6] 龙爽. 分析高速公路路基高边坡防护措施[J]. 门窗, 2024, 41(18): 202-204.