

山区公路高边坡支护结构稳定性及加固方案优化

郝镇难

山东农业大学勘察设计研究院, 山东泰安, 271018;

摘要: 随着我国交通基础设施建设向山区延伸, 山区公路高边坡工程日益增多, 其支护结构稳定性直接关系到公路运营安全、施工进度及工程造价。山区地形复杂、地质条件多变, 受降雨、地震、岩土体性质等多种因素影响, 高边坡支护结构易出现变形、开裂甚至失稳破坏, 引发地质灾害。本文结合山区公路高边坡工程特点, 系统分析了高边坡支护结构稳定性的影响因素, 总结了当前常用支护结构类型及存在的问题, 重点探讨了加固方案的优化原则、技术路径及具体措施, 并结合工程实例验证优化方案的可行性与有效性, 为山区公路高边坡支护工程的设计、施工及维护提供理论支撑与工程参考。

关键词: 山区公路; 高边坡; 支护结构; 稳定性分析; 加固方案; 优化设计

DOI: 10.69979/3029-2727.26.04.012

1 引言

1.1 研究背景

我国山区面积占国土总面积的69%以上, 随着“交通强国”战略推进, 山区公路建设进入快速发展阶段。公路建设中大量挖填作业形成的高边坡, 其稳定性直接决定公路通行安全与使用寿命。山区地质复杂、岩土体风化不均, 加之降雨集中、人类工程活动扰动及潜在地震作用, 高边坡失稳事故频发, 占山区公路边坡灾害的60%以上, 主要表现为滑坡、崩塌等, 不仅造成公路中断, 还可能引发人员伤亡与巨大经济损失。当前, 部分工程存在支护选型与地质不匹配、加固方案不合理等问题, 因此开展高边坡支护稳定性分析及加固优化研究, 具有重要现实意义。

1.2 研究意义

1.2.1 理论意义

本文系统梳理高边坡支护稳定性影响因素, 深入分析支护结构受力特性与失稳机理, 探讨加固方案优化原则与技术路径, 丰富山区高边坡支护理论体系; 结合数值模拟与工程实例验证优化方案有效性, 推动支护技术创新, 提升相关研究水平。

1.2.2 工程意义

通过稳定性分析可精准识别安全隐患, 减少失稳事故发生, 保障施工与运营安全; 优化加固方案能实现支护选型合理、参数优化, 在确保稳定的前提下降低造价、缩短工期; 同时提升支护耐久性, 减少后期维护成本,

延长公路使用寿命, 推动山区交通基础设施可持续发展。

1.3 国内外研究现状

国外山区公路建设起步早, 形成了完善的理论与实践体系, 采用极限平衡法、有限元法等进行稳定性分析, 广泛应用预应力锚杆(索)等支护技术, 并注重生态支护与工程支护结合。国内研究始于20世纪80年代, 借鉴国外经验结合我国山区特点, 提出多种复合支护结构, 应用GeoStudio、FLAC3D等软件开展数值模拟, 但仍存在忽视复杂地质影响、新型技术应用不成熟、生态支护耐久性不足等问题, 需进一步深入研究。

1.4 研究内容与技术路线

本文围绕山区公路高边坡支护稳定性及加固优化展开, 具体研究内容包括: 梳理高边坡工程特点与支护类型, 分析稳定性影响因素, 总结现有支护与加固技术不足, 提出加固优化原则、路径及措施, 结合实例验证方案有效性, 给出针对性建议。技术路线采用“理论分析—现状总结—问题剖析—优化设计—实例验证”, 确保研究逻辑连贯、成果可靠。

2 山区公路高边坡支护结构概述及失稳特性

2.1 山区公路高边坡工程特点

山区高边坡与平原边坡相比, 具有显著特点: 一是地形复杂、坡度陡峭, 部分坡度超60°, 岩土体自重大会增加支护受力; 二是地质多变, 岩土体类型繁杂、风化不均, 存在软弱结构面, 增加失稳风险; 三是气象水文复杂, 降雨集中且强度大, 地下水分布不均, 易软化

岩土体；四是人类工程活动影响显著，开挖、爆破等易破坏岩土体完整性；五是潜在灾害风险高，受极端天气影响易引发滑坡、崩塌。

2.2 山区公路高边坡支护结构常见类型及受力特性

2.2.1 土钉墙支护结构

由土钉、喷混凝土面层及排水系统组成，适用于坡度 $\leq 70^\circ$ 的粘性土、砂土及风化岩层边坡。通过土钉与岩土体的摩擦力、粘结力约束变形，喷混凝土保护坡面，具有施工简便、造价低等优点，但对岩土体强度要求较高，地下水丰富区域适用性差。

2.2.2 锚杆（索）支护结构

由锚杆（索）、锚具及喷混凝土面层组成，适用于陡坡、岩质高边坡。通过预应力挤压岩土体、承受侧向拉力约束变形，支护效果好、适应性强，但施工复杂、造价高。研究表明，锚杆间距2.0~2.5m、锚固角度 15° 时，支护效果最佳。

2.2.3 抗滑桩支护结构

刚性支护结构，由抗滑桩、冠梁及排水系统组成，适用于高边坡、有明显滑动面的边坡。通过桩体嵌固力阻挡岩土体滑移，支护强度高、稳定性好，但施工难度大、工期长、造价高，适用于重大安全隐患边坡。

2.2.4 格构式与挡土墙支护结构

格构式支护兼顾工程与生态，由格构梁、锚杆及植被组成，适用于岩质边坡与生态防护，美观环保但施工精度要求高；挡土墙适用于坡度较缓的填方边坡，施工简便、造价低，但支护高度有限，一般不超过10m。

2.3 山区公路高边坡支护结构失稳常见形式及危害

高边坡失稳常见形式有四种：滑移失稳（最常见，分浅层与深层，受岩土体强度与支护受力影响）、崩塌失稳（岩质边坡多见，突发性强）、沉降失稳（填方或松散岩土体边坡，表现为支护下沉、开裂）、倾覆失稳（刚性支护常见，因受力不均、嵌固不足引发）。失稳危害主要体现在威胁交通安全、损毁工程设施、破坏生态环境及造成重大经济损失。

3 山区公路高边坡支护结构稳定性影响因素分析

高边坡支护稳定性受自然与人为因素共同影响，且各因素相互耦合、相互加剧，以下详细分析各主要因素。

3.1 自然因素

3.1.1 岩土体性质

岩土体是承载主体，其重度、抗压与抗剪强度、含水量、孔隙比及风化程度直接影响稳定性。重度越大，支护侧向压力越大；强度越高，抵抗变形能力越强；含水量过高会降低粘结力与抗剪强度，增加自重；风化程度越高，岩土体越松散，稳定性越差。

3.1.2 地质构造

断层、节理裂隙等地质构造严重影响稳定性。断层破碎带岩土体松散、透水性强，易滑移；节理裂隙破坏岩土体完整性，可作为地下水渗透通道，倾角接近边坡坡度时，易引发岩土体滑移。

3.1.3 气象水文因素

降雨是最主要影响因素，雨水入渗软化岩土体、冲刷坡面、积聚地下水，显著增加失稳风险，雨季边坡位移速率是旱季的10~15倍。地下水会软化岩土体、产生孔隙水压力、侵蚀支护构件，进一步降低稳定性。温度变化引发热胀冷缩，产生温度应力，加速岩土体风化与支护开裂。

3.1.4 地震作用

地震产生的地震波使岩土体与支护结构振动，产生惯性力，超过承载能力会导致支护破坏；同时加剧岩土体破碎，激活潜在滑动面，结合地下水变化，进一步提升失稳风险。

3.2 人为因素

3.2.1 边坡开挖作业

不合理开挖会破坏岩土体应力平衡，开挖坡度过大、顺序混乱、爆破强度过高，均会增加失稳风险，如部分工程开挖坡率达1:0.75，远超合理范围，导致边坡稳定性极差。

3.2.2 支护结构设计不合理

支护选型未结合实际工程条件、参数设计不合理（过度或不足）、忽视排水系统设计，均会直接导致支护失稳，如锚杆间距、锚固角度不合理会显著降低支护效果。

3.2.3 施工质量控制不严

材料质量不达标、施工工艺不规范（喷混凝土厚度不足、注浆不饱满等）、施工监测不到位，会导致支护强度不足、整体性差，无法及时发现异常变形，加剧失

稳风险。

3.2.4 运营期间维护不当

不定期检查维修、管控周边人类活动不当、灾害后未及时修复,会导致支护老化破损,丧失支护功能,增加失稳风险。

3.3 影响因素耦合作用分析

各影响因素并非单独作用,而是相互耦合加剧失稳风险。如降雨与岩土体性质耦合,会进一步软化岩土体;开挖与降雨耦合,会加剧岩土体松动滑移。四川乐西高速某顺层边坡,在开挖、降雨、重力及软弱面耦合作用下,发生滑移-拉裂失稳,印证了耦合作用的危害。

4 山区公路高边坡常用支护结构及加固技术现状

4.1 常用支护结构应用现状

常用支护结构各有适用场景:土钉墙在土质、缓坡岩质边坡应用广泛,施工简便但地下水丰富区域适用性差;锚杆(索)在岩质、陡坡高边坡应用广泛,支护效果好但造价高;抗滑桩用于重大安全隐患边坡,稳定性好但施工难度大;格构式支护兼顾生态与工程,在岩质、风景旅游区边坡应用增多,但植被养护成本高;挡土墙适用于填方、缓坡土质边坡,造价低但支护高度有限。

4.2 常用加固技术应用现状

常用加固技术包括:补充支护加固(增加土钉、锚杆等,针对性强)、破损构件修复(修补面层、除锈注浆等,延长使用寿命)、排水系统优化(增设截排水构件,降低地下水影响)、岩土体改良(注浆、换填等,提升岩土体强度),各类技术需结合边坡实际选用。

4.3 现有支护结构及加固技术存在的问题

当前主要存在五大问题:一是支护选型与地质条件不匹配,源于地质勘察不深入;二是支护参数设计不合理,缺乏对复杂条件的考虑;三是加固技术针对性不强,盲目采用传统方法;四是生态支护耐久性不足,难以适应山区恶劣环境;五是施工质量与监测水平有待提升,影响支护效果与隐患防控。

5 山区公路高边坡加固方案优化设计

5.1 加固方案优化原则

加固优化需遵循五大原则:针对性原则(对症下药,

结合失稳原因与地质条件)、安全性原则(确保支护稳定,抵御各类不利因素)、经济性原则(避免过度设计,降低造价与维护成本)、生态环保原则(减少环境破坏,优先生态支护)、可操作性原则(结合施工条件,选用简便成熟技术)。

5.2 加固方案优化技术路径

优化技术路径为“现状调查—稳定性分析—问题诊断—方案优化—验证评估”:现状调查复核地质、检测支护现状、排查失稳隐患;稳定性分析采用“理论计算+数值模拟+现场监测”结合的方法,明确稳定状态与失稳机理;问题诊断聚焦选型、参数等核心问题;方案优化针对性采取措施;验证评估通过计算、模拟等验证方案可行性。

5.3 加固方案优化具体措施

5.3.1 支护结构选型优化

结合岩土体性质、边坡高度等优化选型:土质边坡($\leq 15\text{m}$)采用“土钉墙+喷混凝土+排水盲沟”,地下水丰富时改用锚杆土钉复合支护;岩质边坡($\leq 20\text{m}$)采用“锚杆+喷混凝土+格构梁”,破碎岩质采用“锚索框架梁+抗滑桩”;高陡边坡($> 20\text{m}$)采用“抗滑桩+预应力锚索+排水系统”综合支护;填方边坡($\leq 10\text{m}$)采用“扶壁式挡土墙+加筋土”支护。

5.3.2 支护参数优化

优化核心构件参数:土钉长度 $6\sim 15\text{m}$,间距 $1.5\sim 2.5\text{m}$,注浆强度 $\geq \text{M}30$;锚杆长度 $8\sim 20\text{m}$,间距 $2.0\sim 3.0\text{m}$,预应力为极限抗拉强度的 $50\%\sim 70\%$;抗滑桩截面 $1.5\text{m}\times 2.0\text{m}\sim 2.5\text{m}\times 3.0\text{m}$,桩长嵌入滑动面以下 $\geq 5\text{m}$;格构间距 $2.0\sim 3.0\text{m}$,梁截面 $0.3\text{m}\times 0.4\text{m}\sim 0.5\text{m}\times 0.6\text{m}$,确保参数与受力匹配。

5.3.3 加固技术优化

针对性优化加固技术:地下水引发失稳,采用“截、排、堵”综合排水,增设截水沟、排水盲沟及降水井;岩土体强度不足,采用注浆、换填等改良技术;支护破损,采用“修复+加固”结合的方法;生态支护优化植被选型,采用“客土喷播+三维植被网”工艺,提升耐久性。

5.3.4 施工与监测优化

施工工艺优化遵循“自上而下、分层开挖、及时支护”,规范开挖、支护施工,严格管控材料质量;监测

系统优化合理布设位移计、渗压计等设备,优化监测频率,建立信息化管理系统,及时预警异常变形。

6 工程实例分析

6.1 工程概况

选取粤北山区某高速公路 K28+350~K28+500 标段高边坡为实例,该边坡为挖方高边坡,最大高度 32m,坡度 75°,岩土体表层为风化残积土,下层为中风化砂岩,节理裂隙发育,地下水丰富,雨季边坡位移超预警阈值,现有土钉墙支护效果不佳,需进行加固优化。

6.2 稳定性分析与问题诊断

采用毕肖普法计算安全系数,暴雨工况下仅为 1.15,低于规范要求(≥ 1.3);FLAC3D 模拟显示坡体中部位移最大,存在深层滑移风险。问题诊断为:支护选型不当(土钉墙不适用于地下水丰富、岩土体松散边坡);排水系统不完善;土钉参数不合理,注浆不饱满。

6.3 加固方案优化设计

优化方案:选型改为“锚杆土钉复合支护+排水系统+喷混凝土”;参数优化土钉长度 8~10m,锚杆间距 2.0m,锚固角度 15°;技术优化增设截水沟、排水盲沟,采用注浆加固松散岩土体;规范施工工艺,加强质量管控;完善监测系统,加密监测频率。

6.4 优化效果验证

优化后暴雨工况下安全系数提升至 1.38,满足规范要求;现场监测显示边坡位移速率降至 0.8mm/d 以下,趋于稳定;工程造价较原方案降低 12%,施工工期缩短 10 天,验证了优化方案的安全性、经济性与可行性。

7 结论与建议

7.1 结论

本文研究表明,山区公路高边坡支护稳定性受自然与人为多因素耦合影响,岩土体性质、降雨、开挖作业、支护设计是核心影响因素;现有支护与加固技术存在选

型不匹配、参数不合理等问题;遵循针对性等五大原则,按照既定技术路径,从选型、参数、技术等方面优化加固方案,能有效提升支护稳定性,兼顾经济性与生态性;工程实例验证了优化方案的可行性与有效性。

7.2 建议

建议加强地质勘察工作,确保勘察数据精准;推广数值模拟技术应用,提升设计科学性;加强施工质量控制与施工监测,及时排查隐患;建立长效维护机制,定期检查维修支护结构;加大新型生态支护技术研发,提升耐久性,推动山区高边坡支护工程高质量发展。

参考文献

- [1] 裴向军. 高烈度深切峡谷山区公路边坡地质灾害分析与防治[M]. 北京:人民交通出版社,2021.
- [2] Demir AS, Dağdeviren U, Kurnaz TF, et al. An integrated SHAP-MCDM approach for slope stability prediction based on machine learning algorithms[J]. Natural Hazards, 2025, 121(18): 21811-21836.
- [3] 张俤元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,2018.
- [4] 李海枫, 刘金龙, 栾茂田. 山区公路高边坡支护结构优化设计及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1789-1798.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. JTG/TD31-02-2013 公路边坡防护与支挡工程设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2013.
- [6] 陈明, 赵洪波. 山区高边坡生态支护技术耐久性优化研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(7): 38-45.
- [7] Duncan JM. Soil Strength and Slope Stability[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [8] 王鹏, 李建林. 基于 FLAC3D 的山区公路高边坡稳定性数值模拟及加固方案优化[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(2): 78-83.