

山区公路边坡岩土失稳机理及综合防护加固技术研究

陈列恒

国家林业和草原局重点国有林区森林资源监测中心 黑龙江 大兴安岭 165000

摘 要: 山区公路边坡地质条件复杂, 岩土失稳灾害频发, 严重制约公路运营安全。本文系统分析山区边坡岩土工程特性与失稳类型, 从内外及人为三方面剖析失稳诱因, 结合力学机理与数值模拟揭示降雨、开挖等工况下的失稳演化规律。针对传统防护技术短板, 构建浅、中、深层协同的生态综合防护加固体系, 优化施工工艺与参数。经工程实例验证, 该体系可有效提升边坡稳定性, 兼具生态与经济效益。

关键词: 山区公路; 边坡岩土; 失稳机理; 综合防护; 加固技术

引言: 我国山区公路里程占比高, 沿线边坡高差大、岩土风化严重、结构面发育, 受降雨、施工扰动等因素影响, 滑坡、崩塌等失稳灾害多发, 易造成道路损毁、交通中断及安全事故。传统单一防护技术难以适配山区边坡多层位、复合型失稳问题, 存在稳定性差、生态性不足等缺陷。基于此, 本文深入探究边坡岩土失稳机理, 研发综合防护加固技术体系, 为山区公路边坡灾害防控提供理论与工程参考。

1 山区公路边坡岩土体基本特征与失稳类型划分

1.1 山区公路边坡岩土体基本工程特性

(1) 岩土体物质组成方面, 山区边坡土体以碎石土、砂质黏性土为主, 颗粒级配不良, 棱角分明; 岩体多为层状或块状结构, 矿物成分以石英、长石为主, 局部含黏土矿物, 结构面发育, 岩体完整性差。(2) 岩土物理力学性能方面, 天然密度介于 $1.8 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$, 孔隙率较高, 透水性强, 抗剪强度受含水率影响显著, 内摩擦角多集中在 $25^\circ \sim 38^\circ$, 黏聚力随风化程度加深明显降低, 饱和抗压强度一般低于 30 MPa , 渗透系数呈各向异性特征明显。(3) 山区边坡特殊地质特征主要表现为高差大、坡度陡, 坡度普遍大于 40° , 临空面发育; 岩土体风化层厚度变化大, 由表层全风化向深部微风化过渡; 地质分层复杂, 往往存在土-岩界面、软弱夹层等不利结构面, 形成潜在滑动边界^[1]。

1.2 山区公路边坡岩土失稳主要类型

(1) 滑坡失稳按滑体厚度可分为浅层土质滑坡(厚度 $< 5 \text{ m}$, 滑动面位于土体内部或土岩界面)、中层岩土混合滑坡(厚度 $5 \sim 20 \text{ m}$, 滑体由岩土构成, 沿软弱夹层或结构面滑动)和深层岩质滑坡(厚度 $> 20 \text{ m}$, 沿大型断层或节理密集带滑动), 各类滑坡均呈现后缘

陡坎、前缘鼓胀等形态特征, 发育受降雨和坡脚扰动控制明显。(2) 崩塌失稳主要发育于陡倾边坡(坡度 $> 60^\circ$), 岩体崩塌受结构面组合切割控制, 呈倾倒式或坠落式破坏; 孤石崩塌常见于风化残积层中, 巨石失稳突发性强; 岩土剥落崩塌多发生于表层风化带, 表现为片状剥落或碎屑流, 规模小但频率高。(3) 滑移-坍塌复合失稳为山区常见复杂破坏模式, 其演化过程为: 降雨入渗降低潜在滑动面抗剪强度, 坡体沿软弱层发生缓慢滑移变形, 随着位移增大, 坡脚或前缘土体被剪出, 导致临空面增高, 上部失去支撑后发生突发性坍塌, 两种机制交替作用, 破坏范围大、突发性强。

1.3 边坡岩土失稳影响因素分析

(1) 内在因素: 岩土体力学性质差(尤其是抗剪强度不足)、边坡坡度过陡、岩层产状顺倾、风化程度深、地质构造缺陷(断层、节理密集带等)均对边坡稳定性起控制性作用。(2) 外在因素: 强降雨导致地下水骤升和基质吸力丧失是主要诱发条件; 昼夜温差加剧岩体疲劳开裂; 地震惯性力引起瞬时超载; 公路开挖形成高陡临空面改变应力场; 车辆长周期振动降低滑面抗滑性能。(3) 人为因素: 开挖坡率过陡未按设计放坡, 坡面防护措施(锚杆、挡墙、护面墙)施工质量不合格, 截排水系统缺失或后期养护不到位, 弃渣堆载不当增加坡体荷载等, 均为工程活动中常见的人为诱因。

2 山区公路边坡岩土失稳机理研究

2.1 岩土失稳力学机理分析

(1) 边坡应力重分布规律方面, 公路边坡开挖卸荷后, 坡体原始三向应力平衡状态被打破, 坡面附近产生显著的主应力偏转, 坡脚及坡面转折处出现最大剪应力集中区, 而坡顶及坡肩部位形成拉应力松弛区, 随着开

挖深度增大,应力集中程度加剧,塑性区由坡脚向坡体内部逐级扩展。(2)抗剪强度衰减机理主要表现为,降雨入渗使岩土体含水率升高,颗粒间水膜增厚导致黏聚力降低,同时孔隙水压力升高减小有效正应力,内摩擦角随之下降;长期风化作用使岩体结构面被泥化物充填,粘结强度持续劣化;循环荷载下土体颗粒破碎重排,结构联结逐步弱化,抗剪强度呈不可逆衰减趋势。(3)极限平衡破坏机理基于极限平衡理论,以传递系数法或简化毕肖普法建立边坡稳定性方程,将滑体划分为若干条块,通过条块间力的传递平衡,求解边坡整体安全系数,当安全系数低于1.0时判定边坡处于失稳临界状态,同时以最小安全系数对应的滑面位置作为最危险滑动面^[2]。

2.2 典型工况下边坡失稳演化过程

(1)降雨诱发失稳演化过程为,持续降雨使雨水沿坡面裂隙和孔隙下渗,表层土体逐渐饱和,坡体内地下水水位上升,孔隙水压力急剧升高,有效应力相应降低,同时土体吸水膨胀软化,抗剪强度大幅衰减,坡体由浅表局部蠕动发展为整体滑移,最终沿软弱层发生突发性失稳破坏。(2)施工扰动诱发失稳演化表现为,分层开挖过程中逐级卸荷导致坡体侧向应力释放,坡面产生回弹变形,坡脚因应力集中首先发生屈服;爆破施工产生的冲击波使岩体原有裂隙扩展贯通,结构面连通率增大,岩体完整性持续恶化,坡体刚度逐步降低,变形量累积超过临界值后诱发失稳^[3]。(3)多因素耦合失稳演化过程为,风化作用长期削弱岩土体强度储备,降雨入渗加剧强度劣化并增加下滑力,车辆循环荷载产生的累积塑性变形进一步降低滑面抗剪性能,三种因素以不同速率协同作用,使边坡经历初期缓慢蠕变、中期等速变形、后期加速变形直至失稳破坏的完整过程。

2.3 边坡失稳数值模拟分析

(1)数值模型构建依托FLAC3D有限差分软件,依据工程地质断面图建立三维计算模型,模型尺寸应满足边界效应影响较小的要求,岩土体采用摩尔-库仑本构模型,物理力学参数依据室内试验成果取值,模型底面施加固定约束、四周施加法向约束,计算工况涵盖天然状态、暴雨饱和状态、开挖卸荷状态及车辆荷载组合状态。(2)不同工况模拟结果分析显示,降雨工况下坡体位移量随降雨持时增大呈非线性增长,坡脚水平位移最为显著,塑性区由坡脚向上逐级贯通,连通率超过70%时边坡趋于失稳;开挖卸荷工况下坡体最大主应力集中区位于坡脚附近,卸荷回弹引起坡顶拉裂缝发育;荷载组合工况下坡面位移增量明显放大,塑性区扩展深度较天然工况增加

约1.5倍。(3)失稳主控因素验证通过正交试验设计,以位移响应和塑性区体积为评价指标,量化各因素对边坡稳定性的影响权重,模拟结果表明,降雨入渗为最敏感主控因素,贡献率约为40%~50%,其次为坡体抗剪强度参数和开挖坡率,验证了前文力学机理分析的正确性,为后续失稳识别与防控提供理论依据。

3 山区公路边坡综合防护加固技术体系研究

3.1 传统边坡防护加固技术及局限性

(1)传统刚性防护技术主要包括浆砌片石护坡、混凝土挂板、锚杆框架等,浆砌片石护坡通过砌体自重抵抗坡面土压力,混凝土挂板依靠面板约束浅层岩土变形,锚杆框架利用锚固力将不稳定岩体锁定于稳定地层中。其技术特点为强度高、即时加固效果好,但抗扰动能力差,地震及大变形条件下易开裂失效,且全封闭式护面阻断植被生长,生态性严重不足。(2)传统柔性防护技术以主动网防护和被动网防护为代表,主动网通过钢丝绳网对坡面施加预紧力约束浅层危岩,被动网以拦截方式拦截滚石坠物。其技术优势在于施工快捷、适应性强、通透性好,但加固深度局限于坡表2~3m范围,无法触及深层潜在滑面,钢丝锈蚀、锚固松弛等导致长期稳定性不足,一般使用年限仅10~15年。(3)单一防护技术的共性缺陷表现为,传统技术多针对单一破坏模式设计,刚性技术对抗整体滑动但易脆断,柔性技术适应变形但锚固深度不足,二者均无法同时应对山区边坡“浅层风化剥落+中层滑移变形+深层整体失稳”的多层位、多机制复合病害,且与生态环境协调性差,难以满足绿色公路建设要求^[4]。

3.2 综合防护加固技术体系构建

(1)浅层生态防护技术涵盖植草护坡、喷播植草及土工格室生态护坡,采用三维植被网或土工格室固定客土植草层,根系加筋深度可达0.5~1.0m,有效抑制表土冲刷和浅层剥落,同时实现坡面绿化覆盖,植被覆盖率达85%以上,适配山区边坡浅层风化强烈、剥落频繁病害特征。(2)中层主动加固技术采用锚杆+锚索联合加固与框架梁加固方案,锚杆长度6~12m、锚索长度15~30m,通过预应力张拉将潜在滑体锚固于稳定岩层中,框架梁作为传力结构将锚固力均匀分布于坡面,形成“面-线-点”协同承载体系,有效提升岩土体整体抗剪能力,适用于中层岩土混合滑坡治理。(3)深层被动防护技术采用抗滑桩和微型桩加固,抗滑桩截面尺寸1.0m×1.5m~2.0m×3.0m,桩深穿透滑面进入稳定层不小于3m,微型桩直径150~300mm,成排布设形成桩群阻滑结构,二者不依赖坡体自身强度,通过桩-

土侧向抗力直接抵抗深层滑坡推力,有效治理厚度大于10m的深层滑移病害,构建“浅绿-中锚-深桩”多层防护结构体系^[5]。

3.3 综合防护技术施工工艺与参数优化

(1) 标准化施工工艺流程按“先深层后浅层、先加固后防护”的总体顺序展开,依次为微型桩或抗滑桩成孔浇筑→锚索框架梁施工与预应力张拉→土工格室及植草防护层铺设→坡面截排水系统完善,各工序间预留养护及应力调整期,关键工序执行旁站监理与实时监测。(2) 核心技术参数优化依托 FLAC3D 数值模拟,以边坡安全系数和位移量为目标函数进行参数敏感性分析,优化确定锚杆间距为2.0~2.5m、锚索间距为3.0~4.0m、抗滑桩埋深为滑面以下3~5m、防护网布设范围为坡脚至坡顶以上2m,参数取值随边坡高度和岩性差异动态调整。(3) 施工质量控制要点针对山区运输困难、作业面狭窄、气候多变等特点,制定原材料进场检验与见证取样制度,明确锚固注浆饱满度不低于90%、预应力锁定值偏差不得超过 $\pm 5\%$ 、桩身垂直度偏差小于1%等量化控制标准,并建立雨期施工应急预案,强化高空作业安全防护与临时排水措施。

3.4 工程案例应用与效果验证

(1) 工程概况选取某山区二级公路 K15+200~K15+450 段高边坡,边坡高度42m,坡度 $55^\circ \sim 65^\circ$,岩性为强风化花岗岩夹砂质黏性土,区域年均降雨量达1650mm,前期已发生坡面剥落及局部浅层滑塌,稳定性安全系数仅0.96~1.02,治理迫在眉睫。(2) 综合防护方案实施针对该工程,坡面采用土工格室植草护坡(浅层),中部设三排预应力锚索框架梁(中层,锚索长度22m、间距3.5m),坡脚设置一排抗滑桩(深层,桩径1.8m、桩长18m、桩间距5.0m),配套完善坡顶截水沟

和坡面泄水孔,施工总工期120天。(3) 应用效果监测与评价通过为期8个月的地表位移监测桩和锚索测力计持续观测,治理后坡体累计水平位移小于12mm,锚索预应力损失率控制在8%以内,边坡安全系数提升至1.28~1.35;植被覆盖率由治理前不足15%提高至82%,综合造价较单一锚索方案降低约18%,安全、生态、经济三维度验证了综合防护技术体系针对山区复杂边坡的显著优越性。

结束语

本文完成了山区公路边坡岩土失稳机理分析与综合防护技术体系构建,明确了核心失稳主控因素,优化了分层防护施工参数与质控标准。工程应用表明,该复合型防护体系可有效解决边坡浅层剥落、中层滑移、深层滑坡等病害,显著提升边坡安全系数,兼顾生态效益与工程经济性。后续可进一步优化多因素耦合失稳预判模型,完善智能化监测手段,提升边坡灾害主动防控能力。

参考文献

- [1] 曹周阳. 地下水渗流作用下山区公路高填方边坡失稳机理及防控技术 [J]. 中国公路学报, 2025, 38(05): 112-123.
- [2] 王丰年, 孙铜. 山区公路岩质边坡变形失稳机理及 NPR 锚索加固防护效果研究 [J]. 中国矿业, 2024, 33(S1): 151-163.
- [3] 龙维, 王章琼. 山区顺层公路边坡失稳破坏机理及综合防治技术 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(04): 88-95.
- [4] 陈振山, 彭浩. 山区公路高陡边坡稳定性分析及组合加固技术优化 [J]. 中外公路, 2024, 46(02): 232-238.
- [5] 张大为. 复杂工况下山区公路边坡开挖失稳机理及防护技术改进 [J]. 中外公路, 2025, 45(05): 129-134.