

公路路基边坡生态防护技术应用与效果分析

吴明毅

西藏天路股份有限公司 西藏 拉萨 850000

【摘要】：公路路基边坡在降雨冲刷、风化作用及车辆荷载影响下，易出现结构松动、坡面侵蚀及植被退化等问题，传统防护方式偏重结构稳定，对生态恢复支撑不足。针对边坡安全性下降及生态功能弱化现象，引入生态防护技术体系，融合植被护坡、土工加筋材料应用及坡面排水优化等综合措施，实现结构加固与生态修复同步推进。工程实践表明，坡面冲刷程度明显降低，植被覆盖水平显著提升，整体稳定性增强，道路运行安全性得到改善。

【关键词】：公路路基；边坡生态防护；生态修复技术；水土保持；工程应用效果

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.080

引言

公路路基边坡长期暴露于复杂自然环境，雨水冲刷、气候变化及行车振动叠加作用下，坡体结构容易出现松散、剥落及局部失稳等现象，同时植被层逐渐退化，导致生态屏障功能减弱。传统以混凝土护坡、浆砌片石为主的防护方式虽能提升短期稳定性，但对生态环境恢复支持有限，景观协调性也受到一定影响。面对工程安全需求与生态修复要求并存的局面，生态防护技术逐步引入工程实践，通过植被固坡、材料加固及排水调控协同作用，使边坡在结构稳定与生态恢复之间实现更合理的平衡，为后续工程应用提供了更具适应性的技术路径。

1 边坡稳定影响要素解析体系

1.1 降雨径流侵蚀作用路径识别

降雨作用下边坡表层土体孔隙结构受冲击水动力作用影响，雨滴溅蚀与片流侵蚀逐级叠加，形成由坡顶向坡脚递进的径流通道系统。地表微地形在反复冲刷中逐渐沟槽化，径流汇集能力增强，导致局部剪切应力集中于结构薄弱带。入渗水流沿土体裂隙与层理界面下渗，形成潜在滑移面扩展路径。水土相互作用引发颗粒迁移与结构重排，使表层抗剪强度持续衰减，侵蚀路径呈现多尺度耦合扩展特征，坡面水力梯度分布不均成为侵蚀加速的重要驱动因素。

1.2 地层结构松散演化特征分析

边坡地层在长期风化与应力释放作用下逐步出现颗粒间胶结弱化现象，内部孔隙比逐渐增大，结构由密实向松散转化。层理面与节理面在水分渗透影响下发生软化扩展，局部形成低强度带并诱发微裂隙网络贯通。细颗粒在渗流驱动下发生迁移，粗颗粒骨架支撑作用被削弱，导致应力重新分布并向局部集中^[1]。结构退化过程中表现出由表及里的渐进性特征，多尺度孔隙连通性增强使渗流路径复杂化，整体抗剪性能呈阶段性衰减趋势。

1.3 交通荷载扰动影响规律梳理

车辆荷载作用下边坡近路基区域产生周期性动应力响应，振动波在土体中传播引发颗粒重排与孔隙压缩变化。高频低幅

扰动使浅层结构逐步疲劳累积，导致结构刚度下降与局部剪裂现象交替出现。荷载传递路径受路基刚度与边坡倾角影响呈不均匀分布特征，应力集中区易形成潜在滑移界面扩展条件。动静荷载叠加作用改变原有稳定应力场，使土体内部结构逐渐由均匀受力转向局部主控受力模式，长期作用下稳定性参数呈波动性弱化趋势。

2 生态防护材料植被协同配置体系

2.1 土工合成材料加固布设方式

土工合成材料在边坡加固体系中以分层复合结构形式布设，采用自上而下梯度增强模式形成连续受力界面。高强土工格栅与土工布组合构建双向约束体系，在坡体浅层与深层之间形成应力传递缓冲带，降低剪切滑移集中风险。铺设过程中依据坡面坡率与潜在滑移面分布，进行网格化分区控制，使材料受力方向与主应力方向匹配，提高整体协同受力效率。多层复合结构通过界面摩擦力与嵌锁作用增强土体稳定性，同时抑制颗粒迁移与水流冲刷通道扩展。渗排结构与加筋体系耦合布设，使排水路径与加固骨架同步优化，减少孔隙水压力累积。新型高分子复合材料的耐候性能与抗老化能力提升，使长期服役条件下结构完整性保持稳定，形成适应复杂气候环境的连续加固体系。

2.2 耐候性植被群落筛选配置方法

耐候性植被配置基于多生态因子耦合筛选机制，结合边坡光照强度、土壤含水率与营养梯度差异构建分区适生模型。植被选择强调根系发育能力与抗逆性能协同匹配，通过深根型与浅根型植物分层配置形成多级固土结构。群落结构设计采用乔灌草复合层次体系，增强地表覆盖密度与生态冗余度，提高系统稳定性。植物配置密度依据坡面侵蚀敏感区进行梯度调整，使高风险区域形成高覆盖封闭结构。植被演替路径通过初期快速覆盖物种与中后期稳定物种的序列衔接实现动态过渡^[2]。微生境调控通过保水基质与改良土层构建改善根系生长环境，提升植物抗旱与抗冲刷能力。群落间竞争关系被优化为互补结构，提高生态系统整体适应能力与长期稳定性。



图1 耐候性植被群落筛选与配置结构示意图

2.3 根系固土作用增强结构设计

根系固土增强结构以三维加筋网络为基础构建土体—根系复合承载体系，通过人工导根通道与改良土体界面提升根系扩展效率。坡体内部设置多层导向孔隙结构，使根系沿预设路径纵横发展，形成空间交织的加固骨架。根系与土体之间通过生物胶结作用与物理嵌锁作用共同提升抗剪强度，减少结构面滑移风险。改良基质中引入保水与透气双功能材料，优化根系生长微环境，提高根系密度与分布均匀性。地下加筋层与根系系统形成耦合增强结构，使荷载在生物结构与工程材料之间均匀分配。不同深度根系网络通过分层递进方式增强整体稳定性，使浅层抗冲刷与深层抗滑移能力同步提升。结构设计强调长期演化适应性，使生物固土能力在时间尺度上逐步强化，形成可持续稳定的边坡加固体系。

3 坡面排水调控抗冲刷技术路径

3.1 分级截排水结构布设方式

坡面截排水系统采用多层级分区控制结构，上部拦截、中部疏导、下部汇排的空间组织模式构建连续排水网络。顶部截水沟沿坡顶等高线布设，削减地表径流初始能量输入，降低入坡水量集中冲击效应。中部排水体系依据坡面坡度变化与汇流路径分布进行分段布置，通过横向排水沟与纵向导流槽交错连接，形成分散式水流输送通道。坡脚汇水系统强化集水能力与排放能力匹配，通过扩大断面与优化坡降比控制流速梯度。节点连接处采用渐变过渡结构，减少水流突变产生的冲蚀集中现象。整体结构通过分级消能与路径分流实现水量时空再分配，使径流运动保持低能态稳定传输状态。

3.2 坡体渗流控制层构建策略

坡体内部渗流控制层以多介质复合结构形式嵌入土体系统，通过低渗透材料与高透水排导层交替布设形成分层阻渗体系。核心控制层采用细粒级防渗材料抑制垂向渗流扩展，降低孔隙水压力快速累积风险。辅助排水层通过级配碎石或透水复合材料构建高渗流通道，实现内部水分快速疏导与再分配^[3]。结构布设依据渗流等势线分布特征进行定向优化，使水流路径

由垂直渗透转向横向导排。界面过渡区设置过滤反滤结构，防止细颗粒迁移堵塞排水通道。多层控制体系在坡体内部形成压力梯度缓冲区，使水力梯度分散降低，减少软化带形成概率。整体结构强化渗流路径可控性，实现水—土作用界面稳定化调节。

3.3 径流分散削能导流技术措施

坡面径流控制采用能量分级削减与多路径分流协同机制，通过坡面结构微改造实现水流动能递进式衰减。导流构件采用曲线化与分叉式布局，使集中水流在传播过程中不断分散为多股细流，降低一流束冲击强度。坡面设置阶梯式消能结构，通过高差分级转换削弱流速峰值，使动能在多级跌落过程中逐级释放。表层粗糙化处理增强水流阻力，延长径流路径并增加摩擦耗能。导流通道采用渐变坡降设计，避免流速突变引发局部冲刷集中。水流汇合区域配置缓冲扩散结构，使汇流能量在空间上均匀扩散。多尺度分散机制使径流由集中冲击模式转化为低能稳定扩散状态，从源头降低坡面冲蚀强度。

4 生态防护工程实施控制机制

4.1 分层分段施工组织模式

生态防护工程施工组织采用垂向分层与横向分段协同推进方式，将坡面按高程梯度与结构功能差异划分为若干施工单元，实现空间与工序的精细化控制。上层施工优先完成截排水与初级加固结构，下层同步推进基础稳定与排水通道构建，形成上下联动施工节奏。分段管理依据坡体稳定敏感区划分作业边界，控制单元之间的扰动传递范围，降低局部施工对整体结构的影响。工序衔接采用模块化嵌套方式，使土工加固、排水系统与生态修复结构形成顺序递进关系。施工资源配置依据分区负荷动态调整，实现机械与人工作业的协同优化，使结构形成过程保持连续性与均衡性。

4.2 植被恢复同步施工工艺

植被恢复与工程结构施工采用同步嵌入式工艺体系，在边坡加固与排水结构构建过程中同步完成种植基质铺设与植被载体构建。基质层通过营养配比调控与结构改良实现土壤理化性质重塑，提高根系初期定植条件。植被模块采用分层嵌入方式嵌入加固结构间隙，使生物结构与工程结构形成复合界面。种植单元根据坡面水分梯度与光照分布进行差异化布设，提高生态适应匹配度。施工过程中控制基质压实度与孔隙结构稳定性，使水分渗透与根系扩展路径保持协调关系^[4]。生态单元与排水结构之间设置过渡缓冲带，避免水流冲刷对植被初期生长造成干扰，实现工程结构与生态系统同步形成。

4.3 质量检测反馈动态调整机制

质量检测体系构建多维度指标监测网络，涵盖结构稳定性、水力状态及植被恢复三类核心参数，通过分层监测点实现全过程数据采集。结构稳定检测重点关注位移变化、应力分布

及界面滑移趋势,排水系统监测聚焦渗流速度与孔隙水压力变化特征,生态指标则以覆盖度与生长密度变化为核心。反馈机制采用分级响应模式,将检测数据实时映射至施工调整模块,实现参数偏差快速修正。动态调整策略依据风险等级划分调整强度,对局部弱化区域进行加固补强或排水优化处理。数据驱动决策机制使施工状态与设计目标保持持续校正关系,通过闭环控制提升整体工程稳定性与生态适配性,实现多系统协同优化运行。

5 生态防护应用表现评价体系

5.1 坡面侵蚀强度变化评估方法

坡面侵蚀强度评估基于多源数据融合与空间演化分析方法构建,通过高精度地形变化监测与表层物质损失量化实现动态识别。侵蚀深度与面积变化采用网格化分区测算方式,对坡面微地形起伏差进行连续比对,获取侵蚀发展梯度特征。水流冲刷路径与能量分布结合数值模拟进行耦合分析,用于识别高风险侵蚀集中区域。土体颗粒迁移特征通过粒径分布变化与表层结构完整性指标进行综合表征。侵蚀演化过程引入时间序列分析模型,捕捉短期冲刷与长期退化的叠加效应。多维指标之间建立关联映射关系,使侵蚀强度评价由单一指标转向结构性综合判定体系,提高识别精度与适应性。

5.2 植被覆盖恢复水平检测指标

植被覆盖恢复水平评价体系采用结构性与功能性双维度指标体系构建,通过空间覆盖率与生长质量协同表征生态恢复状态。覆盖率指标基于遥感反演与地面网格抽样数据融合计算,实现坡面植被分布均匀性量化表达。生长质量指标涵盖叶面积指数、根系密度及生物量增长速率等参数,用于刻画植被群落结构稳定程度。植被连通性分析用于评估群落空间连续性与破碎化程度,反映生态结构完整性。物种多样性指数用于衡量群落演替稳定性与生态适应能力^[5]。恢复水平评估引入时间维度变化分析,使不同生长阶段的动态演化特征得以对比呈现。多指标融合模型强化生态恢复过程的结构化表达能力,使评价结果具备连续性与可追溯性。

参考文献:

- [1] 罗帅.山区公路边坡防护技术及其生态修复策略[J].汽车周刊,2025,(12):11-12.
- [2] 王翠艳.新型生态固土材料在公路路基边坡防护中的应用[J].黑龙江交通科技,2025,48(9):33-36.
- [3] 王能聪.公路路基挖方高边坡防护工程施工技术研究[C]//江西省汽车工程学会,江西省工程师联合会.工程技术与新能源经济技术研讨会论文集(三).[出版者不详],2025:614-617.
- [4] 庄严.基于生态修复技术的河道治理与边坡防护措施研究[J].珠江水运,2025,(3):154-156.
- [5] 张锐,李旺军,高乾丰,等.公路路基边坡生态防护技术研究综述[J].中外公路,2026,46(1):1-20.

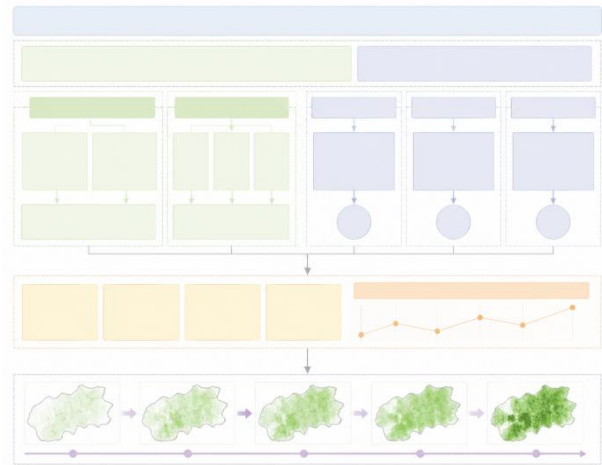


图2 植被覆盖恢复水平多指标综合评价框架图

5.3 长期稳定运行状态对比分析

长期稳定性评价基于工程结构与生态系统协同演化机制建立,通过多周期运行数据对比揭示性能衰减规律。结构稳定性参数涵盖坡体位移变化、应力重分布及界面滑移趋势,通过时间序列监测实现演化路径识别。排水系统运行状态通过流量稳定性与渗透能力变化进行动态评估,反映内部水力条件演变特征。生态系统稳定性通过植被覆盖波动幅度与群落结构保持度进行衡量,体现生物固坡能力持续性。对比分析引入多阶段基准状态构建方法,实现不同运行周期之间的性能差异量化。耦合分析模型用于揭示结构退化与生态增强之间的相互作用关系,使长期运行状态呈现多因素驱动特征。整体评价体系强化时间尺度下的稳定性识别能力,为持续运行性能判定提供结构化依据。

6 结语

生态防护技术在公路路基边坡中的集成应用,实现结构加固与生态恢复协同推进,排水调控、植被配置及材料优化形成系统化防护体系。多维评价结果表明坡面侵蚀明显减弱,植被覆盖逐步提升,长期稳定性增强。工程控制机制与动态反馈机制提升整体适应能力,生态与安全目标实现协调统一。