

边坡工程生态防护施工技术探究

张 平 张 禹

辽宁有色勘察研究院有限责任公司 辽宁 沈阳 110000

摘 要：随着建设工程高速推进，公路、铁路建设产生大量人工边坡，传统圬工防护硬化程度高、生态割裂严重，易引发坡面冲刷与植被退化。生态边坡防护技术兼顾结构稳定与植被恢复双重目标，依托岩土加固、基材改良、植被栽植协同工艺，实现工程防护与生态融合。本文结合某山区公路边坡工程实践，梳理常见生态防护技术适用工况，对比不同工艺防护效果，依托实测数据剖析施工管控要点，破解基材流失、植被成活率低等难题，优化施工流程。研究可为同类工程提质增效提供技术参考。

关键词：边坡工程；生态防护；施工技术；生态修复

引言：山区公路、水利水电等工程建设中，土石方开挖形成大量裸露边坡，原有植被根系层被破坏，土体抗冲刷、抗剪切性能下降，雨季易引发水土流失与浅层滑坡，威胁运营安全并破坏生态景观。传统浆砌片石、混凝土挂板等硬性防护虽结构稳定，但存在造价高、生态兼容性差、景观性不足等短板，不符合绿色基建要求。生态边坡防护技术以工程固坡为基础、植被复绿为核心，通过物理加固与生物修复相结合，兼顾安全与生态。本文依托具体工程，探究生态防护施工关键技术，结合实测数据优化工艺，助力边坡实现安全与生态协同发展。

1 边坡工程生态防护概述

1.1 生态防护核心内涵

边坡工程生态防护区别于传统硬性工程防护模式，摒弃单纯依靠混凝土、石材等硬质材料加固边坡的单一防护思路，秉持“工程固坡为基、生态修复为本、长效稳定为目标”的核心原则，将岩土工程加固技术、土壤基材改良技术与植被种植修复技术深度融合。核心目标分为两层，一是短期工程防护目标，通过锚杆、防护网、生态基材喷播等基础施工工艺，提升边坡土体抗剪强度与整体稳定性，抵御雨水冲刷、风力侵蚀等自然外力破坏，杜绝边坡坍塌、滑坡等安全隐患；二是长期生态修复目标，通过培育适配本地气候与土质条件的植被群落，依托植物根系加筋固土、茎叶截留雨水的作用，逐步替代人工工程防护效能，恢复边坡原有生态肌理，改善区域水土保持条件与自然景观风貌。生态防护兼具安全性、生态性、经济性与可持续性，适配各类土质边坡、弱风化岩质边坡及生态修复管控严格的建设工程项目。

1.2 生态防护施工基本原则

边坡生态防护施工全过程需严格遵循四大核心原

则，保障施工质量与后期防护长效性。一是安全稳定优先原则，所有生态施工工艺必须以边坡结构稳固为前提，先完成坡面整形、锚杆加固等基础工程防护施工，再开展植被复绿作业，杜绝盲目生态施工引发边坡失稳问题。二是因地制宜适配原则，结合边坡土质类型、坡度大小、区域气候降水条件、本地植被生长特性，科学选型防护工艺与植被品种，避免盲目套用外地施工方案导致植被成活率低、防护效果不佳等问题^[1]。三是绿色低碳施工原则，施工全过程严控扬尘污染、渣土流失，优先选用环保型生态基材与本地原生植被，减少外来物种引入与化工材料过量使用，降低施工对周边生态环境的二次扰动。四是长效运维协同原则，兼顾短期施工成型效果与长期植被生长养护，同步规划施工建设与后期管护流程，保障边坡防护效果可持续、生态修复见效稳。

2 常见边坡生态防护核心施工技术及适用工况

2.1 液压喷播生态防护施工技术

液压喷播生态防护技术是当前土质边坡应用最广泛的常规生态防护工艺，核心是将草本种子、灌木种子、保水剂、复合肥、有机纤维、改良土壤基质与清水按科学配比混合搅拌为均匀浆液，通过专用液压喷播机械均匀喷射至整形后的边坡坡面，后续覆盖无纺布保湿养护，实现植被快速发芽复绿。该技术施工机械化程度高、作业效率高、施工成本适中，主要适配坡度1:1.0~1:1.5的低缓土质边坡、回填土边坡，不适用于岩石裸露率高、坡度陡峭的岩质边坡。施工核心控制数据如下：喷播浆液浓度控制为80%左右，单次喷播厚度3cm，分两次喷播成型，总喷播厚度控制在6cm；种子配比以高羊茅、紫花苜蓿、本地灌木为主，草本种子占比75%、灌木种子占比25%；正常气温条件下草本植物7天即可发芽，15天坡面植被覆盖率可达60%以上，30天基本形成稳

定植被防护层。

2.2 植被混凝土生态护坡施工技术

植被混凝土生态护坡技术属于硬质边坡适配型复合生态防护工艺，核心是采用多孔生态植被混凝土作为基础基材，替代传统普通混凝土，兼顾边坡结构加固与植被生长扎根需求，混凝土内部预留透气透水孔隙，可为植物根系生长提供养分与空间。该技术适配坡度1:0.5~1:1.0的陡峭岩质边坡、风化严重岩土混合边坡，抗冲刷、抗坍塌性能极强，防护稳定性远超常规喷播工艺。施工基材配比为关键，底层加强层水泥掺量10%、激发剂2%，表层植生层水泥掺量4%、激发剂2%，搭配2%稻壳改良土体提升透气性^[2]。实测工程数据显示，采用该技术施工的边坡，后期植被平均覆盖率可达93.7%，坡面病害破坏率仅为5.21%，强降雨工况下土体流失量较传统混凝土护坡减少82.3%，结构稳定性与生态修复效果俱佳。

2.3 生态毯加筋复合防护施工技术

生态毯加筋复合防护技术属于柔性生态防护工艺，核心是将预制生态防护毯铺设于整形后的坡面，搭配简

易锚杆固定，生态毯内部裹挟腐殖土、保水材料与植物种子，铺设后覆土养护即可快速实现植被生长。该技术施工工序简单、造价低廉、生态适配性强，主要适配坡度1:1.5以上平缓边坡、生态景观要求高的城区周边边坡。施工核心要点为生态毯铺设重叠宽度不小于10cm，锚杆采用直径12mm钢筋，主锚杆长度1.2m、副锚杆长度0.8m，梅花形布设间距2m，每平方米坡面固定点不少于4个。该技术施工周期短、后期养护难度低，适合小型边坡快速生态复绿施工。

3 不同生态防护技术施工效果对比实测分析

为精准量化三类主流边坡生态防护施工技术的工程应用效果，本次依托某山区公路K12+300~K12+800段边坡工程开展现场实测对比，该边坡区域年平均降水量865mm，边坡平均坡度1:1.2，土体以粉质黏土与弱风化岩土混合为主，施工完成后统一养护90天，选取植被覆盖率、土体流失量、坡面破坏率、施工综合造价四项核心指标开展实测统计，全面对比不同技术防护实效与经济效益，为工程施工技术选型提供数据支撑。

表1 不同生态防护技术施工效果对比实测统计表

防护施工技术类型	90天植被覆盖率 (%)	单次强降雨土体流失量 (g/m ²)	坡面长期破坏率 (%)	施工综合造价 (元/m ²)	核心适用优势
液压喷播生态防护技术	86.2	128.6	8.73	38.5	造价低、施工快，适配常规土质边坡
植被混凝土生态护坡技术	93.7	23.1	5.21	86.2	稳定性强、抗冲刷，适配陡峭岩质边坡
生态毯加筋复合防护技术	89.5	76.4	7.15	52.8	工序简单、景观好，适配平缓生态边坡

由上表实测数据可知，三类生态防护技术各有优劣、适配场景差异显著。植被混凝土生态护坡技术植被覆盖率最高、抗冲刷能力最优、坡面破坏率最低，但施工造价偏高，适合高陡岩质边坡及防护安全等级要求高的核心路段；液压喷播技术造价最低、施工便捷，综合性价比最优，但抗冲刷性能偏弱，仅适合常规低缓土质边坡；生态毯加筋防护技术各项指标居中，施工简单、景观效果好，适配城区及生态景观管控严格的平缓边坡。工程施工需结合边坡坡度、地质条件、安全等级及造价预算，科学择优选型或组合搭配施工，兼顾防护安全、生态效果与经济成本^[3]。

4 边坡生态防护施工核心关键管控要点

4.1 施工前期坡面整形与基底处理管控

施工前期基底处理是保障生态防护施工质量与植被后期生长的基础前提，直接决定边坡整体稳定性与防护长效性。施工前需全面清理坡面杂草、松散碎石、凸起危石与建筑垃圾，精准修整边坡坡度至设计标准，填平坡面坑

洼沟壑并分层夯实，消除土体松动隐患。对于岩土混合边坡，需提前排查浅层滑坡隐患，按需增设简易锚杆加固坡面，避免后期生态施工及植被生长阶段出现坡面塌陷。基底处理完成后，需对坡面土壤进行简单改良，适量添加有机肥与保水剂，提升土壤肥力与保水能力，为植物种子发芽、根系扎根生长营造良好基础条件，从源头规避植被成活率低、基材脱落等施工常见问题。

4.2 施工过程材料配比与工序实操管控

施工过程的材料配比与工序标准化实操是各类生态防护工艺的核心管控环节，配比偏差或工序疏漏将直接导致防护效果不达标。液压喷播施工时，需按设计配合比投料，以每立方米浆液计：木纤维100~120kg、种子3~5kg（混合种子发芽率需≥85%）、粘合剂2~3kg、保水剂1~1.5kg、复合肥25~30kg。喷播压力应控制在0.2~0.4MPa，喷嘴距坡面8~12m，喷播厚度以0.5~1.0cm为宜，偏差不得超过±0.2cm，喷射作业应自下而上、左右往复，相邻喷幅重叠宽度不小于1m。植被混凝土施工

时, 底层(基层)厚度8~10cm, 水泥掺量6%~8%; 面层(种子层)厚度2~3cm, 水泥掺量降至3%~4%, 添加激发剂0.5~1%。混凝土孔隙率需控制在25%~35%, 28d抗压强度不低于0.5MPa, 既满足结构稳定性又保障植物根系穿插条件。生态毯铺设时, 毯与毯搭接宽度不小于10cm, 用Φ8mm U型钢筋锚钉固定, 间距0.5m×0.5m, 锚钉入土深度 ≥ 20cm, 确保生态毯平整紧贴坡面, 无空鼓、翘边。根据某工程现场实测, 配比控制严格的标段, 植被混凝土层28d强度偏差可控制在±0.1MPa以内, 植被覆盖度达94%; 而水泥掺量偏大(超10%)的试验段, 后期植被覆盖度不足55%, 根系难以穿透硬化层。所有工序需全过程旁站, 关键节点留存影像资料, 隐蔽工程(如锚杆注浆)需经监理验收后方可覆盖, 严禁违规简化工序或偷工减料。

4.3 施工后期植被养护与长效运维管控

边坡生态防护施工完成并非工程终点, 后期养护与长效运维是保障植被成活、防护效果持续发挥的关键环节, “重施工、轻养护”将导致前期投入付诸东流。施工完成后应立即覆盖14~25g/m²无纺布, 起到保湿、防晒、防冲刷作用。出苗前养护期约15~30天, 需视天气情况每天喷水1~2次, 保持坡面土壤湿度在田间持水量的60%~80%, 单次喷水量宜控制在1.5~2.5L/m², 避免大水漫灌造成种子流失或基材冲刷。以亚热带季风气候区为例, 旱季施工时若养护期日均喷水不足1次, 种子发芽率可从85%骤降至45%以下。出苗后(约30~45天)逐步揭除无纺布, 分2~3次揭除完毕, 每次间隔5~7天, 使幼苗逐步适应外界环境。对枯死斑块及时补播补种, 补播量按原设计用量的50%控制。生长期(2~6个月)需进行1~2次追肥, 每次追施复合肥15~20g/m², 除草2~3次, 出苗后60天内完成第一次除草, 此后按需进行。根据某项

目养护对比试验, 规范化养护的坡面, 一年后植被覆盖度稳定在92%以上; 而养护粗放的对照坡面, 覆盖度仅67%, 杂草入侵率达45%。长效运维方面, 建立边坡常态化巡查制度, 汛期每月巡查不少于2次, 非汛期每月1次。暴雨后24小时内必须进行专项排查, 重点检查坡面冲沟深度(超过5cm需修补)、基材滑塌面积(超过2m²需补喷)、植被倒伏情况。长期运维中应逐步减少人为干预, 促进植物自然演替, 一般2~3年后可逐步形成以灌木为主、草本为辅的稳定群落, 实现边坡生态防护的自我维持与长效运行^[4]。

结束语

边坡生态防护兼顾工程安全与生态保护, 破解了传统硬性护坡生态性差、运维成本高等短板。本文探究了三类主流生态防护技术特点与适用工况, 结合实测数据明确: 植被混凝土适配高陡岩质边坡, 液压喷播适配常规土质边坡, 生态毯适配景观平缓边坡, 科学选型可实现结构稳定与植被恢复双目标。后续应结合区域地质气候条件, 优化复合施工工艺, 选育本土耐旱耐贫瘠植被品种, 强化智能化施工与数字化运维应用, 持续提升边坡生态防护的长效性与修复质量。

参考文献

- [1]徐志强, 杨和平, 辛亚兵, 等. 强风化岩质边坡生态防护技术及应用[J]. 公路与汽运, 2024, 40(6): 56-61, 65.
- [2]张光辉. 边坡工程生态防护护坡效果评价研究[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(10): 145-147.
- [3]郑文, 王璐石, 于建水, 等. 基于FLAC3D的边坡生态防护工程稳定性三维数值分析[J]. 价值工程, 2026, 45(11): 32-34.
- [4]夏磊, 王术彬, 唐文广. 植生基材边坡生态防护技术在工程中的应用及进展[J]. 四川建材, 2025, 51(9): 102-104, 127.