

生态公路路基防护结构选型技术探讨

吴永刚

云南云岭桥梁智能建造有限公司, 中国·云南 昆明 650000

摘要:生态公路强调“安全、耐久、低扰动、可恢复”的工程目标与“顺应地形、保全水土、增进生境”的生态目标同步达成,路基防护结构选型处于两类目标耦合的关键位置。本文从地形地质约束、降雨—径流—渗流过程、材料与碳足迹、施工可达性与养护可持续性等多维度提出选型方法,概括“稳定控制—排水控蚀—表层保土—植被恢复—景观融合”的分层组合原则,给出土质、土夹石与石质边坡在不同坡度与地下水条件下的结构适配要点,为敏感山区生态公路建设提供可操作的技术参考。

关键词:生态公路;路基防护;边坡稳定;排水控蚀;柔性防护

Discussion on the Selection Technology of Ecological Road Subgrade Protection Structures

Wu Yonggang

Yunnan Yunling Bridge Intelligent Construction Co., Ltd., China Yunnan Kunming 650000

Abstract: Ecological highways emphasize the engineering goals of "safety, durability, low disturbance, and recoverability" while achieving the ecological goals of "conforming to terrain, preserving soil and water, and enhancing habitat" simultaneously. The selection of roadbed protection structures is in a key position where the two goals are coupled. This article proposes selection methods from the dimensions of terrain and geological constraints, rainfall runoff seepage processes, materials and carbon footprints, construction accessibility, and maintenance sustainability. It summarizes the layered combination principle of "stability control drainage erosion control surface soil conservation vegetation restoration landscape integration" and provides key structural adaptation points for soil, soil mixed with stone, and stone slopes under different slopes and groundwater conditions, providing operational technical references for the construction of ecological highways in sensitive mountainous areas.

Keywords: Ecological highway; Roadbed protection; Slope stability; Drainage erosion control; Flexible protection

0 引言

生态公路建设中,边坡数量多、坡度大且含土量少会造成植被稀疏并易诱发滑坡等安全隐患,同时路侧平台窄小、分段不连续等空间条件会限制传统“厚重挡墙+硬质护面”的适用性。防护结构若只追求刚度与外观整齐,往往带来开挖扰动与弃渣压力,并在雨季因渗排不协调出现软化、冲沟与空鼓等病害^[1]。

1 生态公路路基防护的选型原则与目标分解

生态化路基防护的技术内核是“以最小扰动获得足够稳定裕度”,并用可维护的排水体系削弱水致灾变链条。资料显示,通过错台、悬挑、栈桥等方式减少挖填、避让保留大型乔木,可减轻对自然景观的切割并降低工后修复压力;在场地受限区段,装配化钢结构桥梁可跨越掉空或陡峭路段,常见跨径8—60m、宽2.5—4m,特殊点位可采用挡墙上悬挑钢架以减少边坡开挖。据此,选型目标可拆

为安全性、环境性、景观性与可持续性四维:安全以稳定与落石风险为底线,环境以扰动面积与水土流失为约束,景观以结构可见度与色彩肌理协调为导向,可持续以耐久与养护频次为核心,四维共同决定结构谱系与组合方式^[2]。

2 生态公路路基防护结构选型的控制因素与分类

2.1 地形地质条件对防护结构受力体系的约束

地形地质条件对防护结构受力体系的约束,核心在于主控破坏模式与受力路径的差异。土质边坡多表现为浅层滑移与坡面冲刷,受力需求偏向浅层加筋与表层抗剪;土夹石边坡同时存在滚落块体与局部拉裂,结构需要兼顾面状约束与局部加固;石质边坡受节理裂隙与卸荷影响明显,块体崩落与落石冲击常为主导,防护逻辑更接近“锚固约束+柔性耗能拦截”,并需依据落石路径判定是否配置拦石设施。坡度大且含土量少会导致植被难以连续成坪,削

弱根系加筋效应并提高雨季表层失稳概率,陡坡段应提高网系与锚固可靠度;工程上,坡度超过1:0.75的较陡坡面宜配置镀锌铁丝网或同等强度网系并将生态覆绿层拉紧固定,锚杆类构件需保证嵌入基岩深度约0.5m以形成稳定端承。挖方高边坡还会受到爆破扰动、卸荷裂隙扩展与坡脚削弱的叠加影响,需要把护脚与抗滑构造纳入受力闭环。地形上若路侧平台窄小且呈数百米小段分布,挡墙与护脚构造还要兼顾净宽与检修空间,避免因结构过厚造成通行与维护双重受限。

2.2 水文气候与排水体系对病害链条的决定作用

水文气候与排水体系对病害链条具有决定作用,生态防护的失效常不是“强度不够”,而是水的路径被迫集中并在界面滞留。高温多雨区在短历时暴雨下易形成强径流,雨滴打击与坡面剪切会快速剥离细颗粒并诱发冲沟;渗流进入坡体后又可能在软弱夹层或填挖交界处抬升孔隙水压力,促使滑移从浅表向深部扩展。选型阶段应把排水视为结构构件:坡顶截水沟切断外来汇水,坡面分散导排与急流槽实现分级消能,坡脚盲沟与反滤层释放渗水并降低静水压力;当坡面出现地下水出露时,排水孔、导水槽与反滤层需要同步设置,并保证出水口不反冲坡脚。生态表层材料宜兼具透水与抗冲刷性能,避免致密封闭导致孔压在界面累积;对框架梁或网喷体系,排水孔与绿化带应错开布置并预留可巡检的淤积口,防止淤堵削弱通水能力^[3]。排水规模宜与设计暴雨强度与汇水面积匹配,运营期以雨季前后两次巡查清障为基本节律。通过“截、导、排、护”的连续水系组织,侵蚀、软化、空鼓与滑移等链条才能在源头被削弱。

2.3 功能定位、交通荷载与施工可达性对结构形式的反向约束

功能定位、交通荷载与施工可达性会对结构形式形成反向约束,使得同一坡体条件下的优选方案因“使用方式”而变化。以快行交通为主的路段更强调长期稳定与抗撞安全,路基边缘需与护栏、挡墙共同满足防护等级,荷载与振动作用会抬高对墙体整体性、基础承载与变形控制的要求;以慢行游憩为主的生态路段,则对可视界面、肌理色彩与触感更敏感,结构宜弱化工程感并便于植被攀附。空间尺度同样关键:慢行通道净宽常在2.5-4.5m范围,局部隧道约4.0m、棚洞约2.5m,平台受限时厚重重力墙会挤占有效宽度,反而不利于安全通行与运维进入。施工可达性决定工法选择,峡谷或掉空段作业面狭窄且受工期窗口限制时,装配化钢结构桥梁或悬挑构造可用8-60m跨

径的标准化构件减少开挖与弃方,降低裸露水土流失风险;而在常规段,格宾、加筋土、生态砌块等模块化体系便于分段施工与局部替换。功能、荷载与可达性的叠加约束,要求选型以“可施工、可维护、可审美”的综合最优为准则。

3 典型生态路基防护结构的适配逻辑与设计要点

3.1 土质与土夹石边坡的生态化稳定与控蚀组合

土质与土夹石边坡的主要风险呈“浅层滑移—表面冲刷—坡脚淘刷”链式耦合,结构适配应把稳定控制与控蚀保土同步纳入方案。几何层面宜控制坡率与坡长,必要时采用缓坡、错台或小型平台削减汇流路径,避免长坡面形成高能径流;水文层面应坚持“上截—中导—下排”,坡顶设置截水沟与急流槽的组合以切断外来径流,坡面采用分散式导排与反滤层把水从表面流转为浅层渗排,渗水集中区可布置盲沟或渗沟,降低雨季孔压峰值并减少软化带沿界面滑动。护面层更适合采用柔性、透水且可固土的构造,如生态格室、三维植被网、加筋土工格栅与喷播基材复合,通过形成粗糙面、提高抗剪与抗冲刷能力来稳固表土;坡脚可设置格宾、透水消能带或护脚墙,既削弱回水淘刷又便于后期检修^[4]。植被层遵循“草本快速封面+灌木根系加筋+群落渐替稳定”的时间序列,配合客土改良、保水覆盖与养护期补播补植,促使短期控蚀效果平稳过渡到运营期的生态自稳。

3.2 石质边坡的柔性防护、锚固体系与生态表层技术

石质边坡更易出现节理裂隙控制下的块体松动与落石冲击,适配逻辑应以“危岩处置—柔性约束—能量拦截—排水减压”构成多道防线。对潜在崩落体与卸荷裂隙发育区,应以清危、局部削方与锚杆(或锚索)加固为主,锚固长度与布置应与结构面产状相匹配,避免仅做表层封闭而忽略深部稳定;在整体稳定满足但存在小块体松动的区段,主动防护网可对块体位移进行面状约束,坡脚配合被动拦石设施消减动能并预留清理通道,实现“源头控制+末端拦截”的组合。水致病害往往通过裂隙渗流抬升孔压或沿软弱夹层润滑触发失稳,故应在渗水点设置排水孔、导水槽与反滤层,并保证排水通道可巡检、可疏通。生态表层不宜追求满坡覆绿,可采用“点状植生坑+缝隙见绿”的策略,在稳定岩面或框架梁空格内配置营养袋、基材喷覆与小体量客土,种植灌木与攀援植物形成“生态锚点”,既降低视觉硬度又通过根系与基材黏结增强表层抗

冲刷, 最终实现安全耐久与景观融合的平衡^[5]。

3.3 路堤、挡墙与特殊路段的“轻量化+装配化+可绿化”方案

路堤、挡墙及掉空陡峭等特殊路段既承担结构受力又塑造道路界面, 适配方案宜以“轻量化骨架—透水背排—装配化施工—可绿化表层”实现多目标协同。路堤侧坡在满足整体稳定的前提下, 可采用加筋土、格宾石笼或蜂巢格室等透水柔性体系替代大体积硬质护面, 通过孔隙渗排降低静水压力与冻胀风险, 并以模块化构件减少现场湿作业; 挡墙类结构可优先选用加筋土挡墙、生态砌块或石笼重力墙, 背后设置反滤层、盲沟与泄水孔形成连续排水路径, 同时在墙面预留种植槽、花池或攀援支架, 使绿化与结构维护不冲突。对平台狭窄、临崖掉空或交通保通压力大的段落, 可引入装配化梁板、悬挑支承或轻型桁架体系, 以减小开挖、缩短裸露周期并降低弃方量; 外露面宜采用分缝化、纹理化与色调协调处理, 结合立体绿化弱化工程突兀感。运营阶段强调可维护性: 排水构造需可检查可清淤, 装配构件宜可替换, 绿化应配置耐旱耐贫瘠物种并形成可量化的成活率与覆盖度目标, 从而把“可绿化”转化为长期稳定的生态贡献。

4 生态化选型的工程化落地: 从结构设计到运营维护

4.1 材料与构造的生态属性: 耐久、透水与低碳协同

材料选型决定结构寿命、渗排能力与环境负荷, 生态公路宜在满足安全前提下优先采用透水、可循环与低污染材料, 并通过细部构造延长耐久寿命。孔隙型材料(格宾、生态袋、透水砌块)可降低水压并为根系提供空间; 锚固与网片系统需采用耐腐蚀镀锌或包塑体系并在节点实施防锈处理, 避免锈蚀污染与二次开挖。表层材料方面, 资料提到的水性高分子聚合物道面涂层通过以水为分散介质与耐磨粒子复合实现耐磨与抗滑提升, 其低挥发与可着色属性可为生态公路“少污染+可辨识”的表层构造提供参考。材料评价宜从单位防护长度材料量、运输距离、施工能耗与维护频次综合比较, 推动全寿命最优。

4.2 施工组织与扰动控制: 把“少开挖”转化为可验收指标

生态公路路基防护的成败往往取决于施工阶段的扰动强度与裸露时长, 所谓“少开挖”不能停留在原则表述, 而应被量化为可检查、可签证、可追溯的过程指标并嵌入

验收体系。施工组织宜以“分区分段、短链闭合”为基本逻辑, 优先采用错台、悬挑、栈桥等减少挖填的布置思路, 在路侧平台窄小且不连续的条件下控制开挖线外扩, 降低弃方与二次倒运带来的坡面破坏; 对必须开挖的边坡, 实行“当天成型、当天封面”的节奏, 配套坡顶截水沟、临时导排与坡脚沉淀设施, 避免暴雨将裸露面转化为冲沟。可验收指标建议覆盖三类: 扰动类(新增裸露面积、弃渣外运量、边坡开挖超挖率)、时效类(裸露持续天数、封面完成时限、雨季停工与防护到位率)、质量类(临排通水率、反滤与盲沟完好率、喷播或覆绿基层附着率), 并通过测量记录、影像定位与巡检签认形成闭环, 使生态化施工从“尽量”变为“必须达标”。

4.3 植被恢复与结构协同: 从“绿化配置”走向“生态稳定”

植被恢复在生态公路路基防护中不应被理解为结构完成后的附加绿化, 而应作为“长期稳定机制”的组成部分, 与排水、护面与锚固共同构成可持续的坡面韧性系统。结构层面需要为植被提供可生长的介质、水分通道与根系锚固点: 在土质与土夹石边坡, 通过生态格室、三维网或客土喷播形成抗冲刷表层, 使草本在雨季前实现快速封面, 降低径流剪切并减少细颗粒流失; 在石质边坡与框格梁坡面, 可采用点状植生坑、营养袋或“见缝插绿”的配置, 把有限客土集中在稳定位置, 利用灌木与藤本形成“生态锚点”, 以根系与基材黏结增强表层抗剪。水文匹配决定成活与稳定质量, 坡顶截水、坡面导排与坡脚盲沟应与植生带错位布置, 避免水流沿植生界面形成冲刷槽, 同时在渗水点设置反滤与排水孔并预留清淤空间, 保证根区长期不过湿或缺氧。

4.4 监测评价与适应性养护: 以状态变量维持边坡韧性

生态公路防护的长期表现取决于坡体变形、排水通畅与植被稳定三类状态变量, 建议建立分层监测与双阈评价: 结构层关注锚固受力、网片位移与挡墙变形, 水文层关注排水孔出流、地下水出露点与冲沟发展, 生态层关注覆盖度、成活率与群落稳定性; 以位移速率与落石迹象作为安全阈值, 以裸露率与冲沟扩展作为生态阈值, 实现风险预警与退化预警并行。养护策略强调微干预与可替换: 及时疏排、补植补播、局部加固替代大规模返工, 使系统在极端降雨与多灾变耦合条件下仍保持可恢复能力, 并把“少扰动、快恢复、可持续”的目标落实到年度养护计划与成本核算中。

5 结语

生态公路路基防护结构选型需要在复杂地形地质与水文气候约束下实现安全与生态协同。将材料耐久、透水与低碳属性纳入全寿命评价,把施工扰动控制与植被恢复质量转化为可验收指标,再辅以监测驱动适应性养护,可推动路基防护由“工程构造”升级为“生态基础设施”,为敏感山区生态公路的安全运行与景观延续提供稳定支撑。

参考文献:

[1] 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(09):33-36.

[2] 王能聪. 公路路基挖方高边坡防护工程施工技术研究[C]. 杭州交通工程监理咨询有限公司, 2025:614-617.

[3] 邵光涛. 公路工程路基施工中关键部位施工技术[J]. 运输经理世界, 2025,(13):31-33.

[4] 牛华平. 公路路基边坡生态防护技术研究[J]. 汽车周刊, 2025,(03):235-237.

[5] 熊大林. 公路工程路基生态防护技术研究[J]. 产品可靠性报告, 2023,(05):135-136.

作者简介: 吴永刚(1989.08-), 男, 汉族, 云南昆明, 本科, 助理工程师, 研究方向: 公路工程技术。