

公路工程边坡灾害防护技术

林文敏

宁德市古田公路事业发展中心 福建 宁德 352100

摘要: 公路工程边坡灾害的防护对于确保公路安全运营至关重要, 本文聚焦公路工程边坡灾害防护技术, 阐述主动、被动及综合防护技术分类, 剖析边坡加固、排水、抗滑等关键技术要点, 介绍刚性、柔性、生态防护材料选择要点, 探讨不同地形、气候、边坡岩性条件下的技术适配, 为公路边坡灾害防护提供全面技术参考, 提升公路边坡稳定性与安全性, 保障公路交通顺畅运行。

关键词: 公路工程; 边坡灾害; 防护技术; 材料选择; 技术适配

引言: 随着公路建设规模不断扩大, 边坡灾害问题日益凸显。边坡失稳易引发滑坡、落石等灾害, 严重威胁行车安全, 造成巨大经济损失。合理选择防护技术、精准挑选防护材料, 并根据不同地形、气候、边坡岩性条件适配应用, 是有效预防和治理边坡灾害、确保公路长期稳定运行的关键所在。

1 公路边坡灾害防护技术分类

1.1 主动防护技术

主动防护技术通过增强边坡自身稳定性, 从根源上降低灾害发生概率。依据材料特性与作用机制差异, 可细分为柔性、刚性及半刚性三类^[1]。柔性主动防护技术以高强度柔性网为核心, 通过锚杆固定于坡面, 形成整体防护面层。该技术通过分散落石冲击能量, 抑制坡面岩土体剥落, 尤其适用于风化破碎岩质边坡及土石混合边坡。刚性主动防护技术采用钢筋混凝土或圬工结构, 通过增加边坡抗滑力实现稳定。常见形式包括挡土墙、抗滑桩及格构梁等, 通过结构自重及嵌固作用抵抗滑动力, 多用于地质条件复杂、滑移趋势明显的高陡边坡。半刚性主动防护技术结合柔性材料与刚性构件优势, 通过预应力锚索或土钉将不稳定岩土体与稳定地层连接, 形成复合加固体系。该技术既能限制坡体变形, 又允许一定范围位移释放应力, 适用于节理裂隙发育的岩质边坡及软弱土层边坡。

1.2 被动防护技术

被动防护技术通过设置防护设施拦截或消减灾害能量, 降低对公路设施的破坏程度。拦截型被动防护技术以刚性拦石墙或柔性防护网为主体, 通过物理阻隔阻止落石进入行车道。该技术适用于坡面危石分布密集或落石运动轨迹明确的区域。缓冲型被动防护技术通过多层结构吸收冲击能量, 常见形式包括落石平台、缓冲垫层及耗能构件组合系统。该技术通过材料变形耗散能量, 减少对被保护对象的直接冲击, 多用于高落差、大动能落石防护。导流型被

动防护技术通过修筑排水沟、截水沟等设施, 引导地表水及地下水有序排泄, 避免水流冲刷或渗透导致边坡失稳。

1.3 综合防护技术

以省道306线(旧省道304线)蕉城至古田段灾害防治工程古田段为例, 该项目全长62.902公里, 地处山岭重丘区, 沿线地形陡峻、高差较大, 公路营运后受雨水冲蚀与自然风化影响, 39处路段出现边坡表层剥落、滑塌等灾害。针对该项目地质条件与灾害特征, 设计采用主动防护与被动防护结合的综合技术方案, 对岩质边坡布设垫墩锚杆+GPS2型高强钢丝主动防护网共7处、总长760.01米, 利用钢丝绳网与锚杆的协同作用抑制崩塌落石; 对土质边坡设置路堑挡土墙22处、总长1507.41米, 通过刚性结构提供抗滑支撑力; 对易冲刷的土夹石边坡采用液压客土CF网防护6处、总长721.78米, 结合椰纤维网的抗冲刷性能与植被根系的固土作用, 实现工程防护与生态修复的统一。该工程于2018年8月5日开工, 2019年9月9日完工, 截至2025年已投入使用6年。正是这套“主动加固+被动拦截+生态修复”的综合防护技术体系, 在长期运营中经受住了考验: 经福建省高速公路达通检测有限公司第三方检测及2020年6月10日宁德市公路事业发展中心组织的交工验收, 工程质量合格; 多年运营期间, 边坡未发生重大灾害, 表层剥落、滑塌等问题得到有效遏制, 植被覆盖率稳定提升, 综合防护效果良好, 充分验证了综合防护技术在复杂山岭重丘区的适用性与可靠性, 如图1所示。



图1

2 公路边坡灾害防护关键技术要点

2.1 边坡加固技术要点

浅层加固关键在于保障坡面表层岩土体稳定^[2]。可借助喷锚支护、三维植被网等手段,增强表层抗冲刷能力。实施时,锚杆要穿透风化层嵌入稳定基岩,混凝土喷射厚度须满足抗剪强度,植被根系与网片形成复合加固层抑制剥落。深层加固主要针对潜在滑动面。若用预应力锚索,需穿过滑动带锚入稳定地层,依岩土性质定锚固段长度,把控好注浆压力与材料配比,确保粘结牢固;采用抗滑桩时,其嵌入深度应超滑面一定范围(软质岩不小于5米),以提供足够抗滑力。复合加固注重多手段协同。要依边坡地质选刚性结构与柔性材料组合,像格构梁与锚杆联用,格构梁分散应力、约束变形,锚杆提供深层锚固力,二者协同增效。同时,要留意施工顺序对加固效果的影响。

2.2 排水防护技术要点

坡面排水技术关键参数包括截水沟断面尺寸、坡度及布置间距。截水沟应设置于边坡顶部外缘,断面尺寸依据汇水面积计算确定,坡度需保证水流不产生淤积,间距根据坡面岩土体渗透性调整,确保地表水快速引离坡面。地下排水技术关键参数涉及盲沟孔隙率、渗沟反滤层厚度及排水孔布置密度。盲沟填充材料孔隙率需满足排水需求,渗沟反滤层应分层铺设不同粒径碎石,排水孔间距根据地下水位动态变化设定,避免地下水积聚导致边坡失稳。综合排水系统构建要点强调地表与地下排水设施的衔接,需通过横向排水管连接坡面排水沟与地下盲沟,形成立体排水网络,同时设置检查井便于维护,确保排水系统长期有效运行。

2.3 抗滑防护技术要点

抗滑结构布设要点需根据滑坡类型确定位置与方向,推移式滑坡抗滑桩宜布置于滑体前缘,牵引式滑坡则需在滑体中部设置预应力锚索,结构轴线方向应与滑坡主滑方向一致以最大化抗滑效果。抗滑力提升技术要点包括优化结构形式与材料性能,抗滑桩可采用变截面设计增强嵌固段抗力,锚索通过增加预应力值或采用高强度钢绞线提高锚固力,同时需验证结构与岩土体界面强度是否满足设计要求。动态抗滑调整技术要点针对滑坡变形监测数据实施参数修正,通过埋设测斜管、位移计等设备实时获取坡体位移信息,当变形速率超过阈值时,及时调整锚索预应力或增设抗滑结构,形成自适应抗滑体系以应对边坡动态变化。

3 公路边坡灾害防护材料选择技术

3.1 刚性防护材料选择

混凝土类材料适配特性需结合边坡地质条件与防护需求确定^[3]。普通混凝土适用于稳定基岩边坡的挡土墙或护坡结构,需控制水灰比以保证抗渗性与耐久性;高强混凝土多用于抗滑桩或锚固结构,通过添加减水剂提升抗压强度;纤维混凝土掺入钢纤维或聚丙烯纤维增强抗裂性能,适用于受拉区或冲击荷载作用区域。石材类材料适配特性需考虑岩体完整性与风化程度。块石适用于干砌或浆砌护坡,需选质地坚硬、未风化的片岩或花岗岩,单块重量应满足抗冲刷要求;条石多用于重力式挡土墙,需加工成规则几何形状以确保结构稳定性;毛石适用于填筑路堤或反滤层,需控制粒径级配避免空隙率过大。金属刚性材料适配特性需依据结构受力特点选择。热轧型钢适用于格构梁或桁架结构,需验证截面模量是否满足抗弯需求;钢管桩通过高压注入水泥浆形成复合地基,适用于软弱土层边坡加固;铝合金材料耐腐蚀性强,多用于沿海或潮湿环境防护构件,但需考虑弹性模量较低对变形控制的影响。热轧型钢截面模量应不小于500立方厘米,钢管桩直径宜为200-600毫米,铝合金材料弹性模量约为钢的1/3。

3.2 柔性防护材料选择

土工合成材料适配特性需结合功能分层配置。土工格栅提供侧向约束,适用于加筋土挡墙;土工布作反滤层,控制孔径尺寸;土工膜用于防渗,选高密度聚乙烯材料,确保焊接缝强度。土工格栅纵横向抗拉强度应不低于50千牛/米,土工布等效孔径宜为0.07-0.2毫米,土工膜焊接缝抗拉强度应不小于母材强度的70%。纤维增强材料适配特性需考虑纤维类型与基体相容性。聚酯纤维增强浅层稳定性,适用于风化岩质边坡;玻璃纤维格栅抗拉强度高,用于坡面防护;碳纤维板可主动约束结构变形,用于既有边坡加固。聚酯纤维长度宜为6-12毫米,玻璃纤维格栅抗拉强度可达100-500千牛/米,碳纤维板预应力张拉值宜为500-1000兆帕。柔性金属材料适配特性需平衡强度与延性。钢丝绳网形成柔性屏障,适用于落石防护;环形网能量耗散强,用于高能落石冲击区域;铝镁合金网重量轻、耐腐蚀,适用于对荷载敏感的边坡防护系统。

3.3 生态防护材料选择

植被基材适配特性需满足植物生长与边坡稳定需求。客土基材需添加有机质等,pH值控制在6.0-7.5;液压喷播基材添加粘合剂,适用于陡坡绿化;三维植被网固定种子与基材。客土基材中有机质含量宜为3%-8%,保水剂吸水倍数不低于200倍,缓释肥养分释放周期为3-6个月;液压喷播基材粘合剂用量为基材重量的0.5%-1.5%;

三维植被网网孔尺寸宜为1-3厘米。生态固坡材料适配特性需结合工程功能与生态效益。椰纤维毯适用于缓坡生态修复；植物纤维束增强浅层抗剪强度；生态袋适用于立地条件差的边坡绿化。椰纤维毯厚度宜为10-20毫米，降解周期为1-3年；植物纤维束直径宜为20-50毫米，长度为0.5-1.5米；生态袋尺寸宜为长0.6-1.2米、宽0.3-0.6米。环保型复合材料适配特性需兼顾性能与环境友好性。聚丙烯纤维与木质素复合降低碳足迹，玄武岩纤维与生物炭复合改善土壤质量，纳米二氧化硅改性混凝土减少水泥用量。

4 公路边坡灾害防护技术应用适配

4.1 不同地形条件下技术适配

山地边坡防护技术适配需结合高差大、坡面陡峭的特点。对于坡度超过45°的岩质边坡，柔性主动防护网与预应力锚索组合可有效拦截落石并抑制深层滑动；土质边坡则需采用抗滑桩与格构梁联合加固，通过结构嵌固增强整体稳定性^[4]。丘陵边坡防护技术适配需兼顾地形起伏与植被覆盖条件，浅层风化岩质边坡宜采用三维植被网结合喷播技术，利用植物根系固土与网片防护的协同作用；深挖方土质边坡需设置截水沟与盲沟，通过地表与地下排水系统降低孔隙水压力。平原区边坡防护技术适配需重点控制填挖交界处的不均匀沉降，填方边坡采用分层压实与土工格栅加筋技术，挖方边坡则通过放缓坡率与设置挡土墙实现稳定，同时需考虑地下水位对坡体稳定性的影响。

4.2 不同气候条件下技术适配

多雨地区防护技术适配需强化排水与抗冲刷能力，坡面设置纵横交错的排水沟，地下采用渗沟与盲沟组合排水，材料选择需具备高抗渗性，如混凝土添加防水剂或采用土工膜防渗层；柔性防护网需增加钢丝绳直径以提升抗冲击性能。严寒地区防护技术适配需解决冻胀循环导致的材料劣化问题，混凝土结构添加引气剂提高抗冻性，金属构件采用镀锌或环氧涂层防腐，排水设施需设置保温层防止冻裂；植被防护需选择耐寒草种与灌木，避

免冬季枯死导致防护失效。干旱地区防护技术适配需注重材料的耐久性与节水性，混凝土结构通过降低水灰比减少收缩裂缝，柔性防护网采用耐紫外线老化材料；生态防护优先选择耐旱植物，配合保水剂与覆盖物减少水分蒸发，同时利用地形设置集雨槽补充植被需水。

4.3 不同边坡岩性条件下技术适配

土质边坡防护技术适配需根据土体性质选择加固方式，砂性土边坡采用土工格栅加筋提高抗剪强度，黏性土边坡通过放缓坡率与设置排水降低孔隙水压力，膨胀土边坡需进行换填或化学改良以消除胀缩性。岩质边坡防护技术适配需针对岩体完整性与风化程度，完整硬质岩边坡采用喷锚支护或光面爆破减少扰动，破碎软质岩边坡需设置预应力锚索框架梁或注浆加固，风化层较厚时需清除表层松散体后实施防护。混合岩土质边坡防护技术适配需兼顾不同介质的特性，上层土体与下层岩体交界处设置反滤层防止土颗粒流失，采用复合加固结构如上部喷播植被与下部格构梁锚杆组合，通过分层处理实现整体稳定。

结束语

公路工程边坡灾害防护是一项复杂且系统的工程，涉及技术分类、关键点把控、材料选择以及技术适配等多个层面。只有全面掌握这些内容，依据实际情况科学运用，才能切实提升边坡稳定性，有效抵御灾害侵袭。这不仅关乎公路的安全运营，更对推动公路工程高质量发展具有重要意义，需持续深入研究与实践。

参考文献

- [1]王增录,袁翔.高速公路路基边坡稳定性分析与安全防护技术[J].中国住宅设施,2025(6):187-189.
- [2]胡锦涛.高边坡喷射混凝土防护技术在公路工程中的实践与优化[J].建筑工人,2025,46(7):39-42.
- [3]马玉玺.喷播新技术在高速公路边坡生态防护中的应用[J].运输经理世界,2024(10):148-150.
- [4]徐旭波.公路工程中的预防性养护技术研究[J].运输经理世界,2025(20):102-104.