

山区公路地质灾害防治技术分析

苏海城

建水县综合交通建设中心，云南省红河，654300；

摘要：本文聚焦山区公路地质灾害防治，先系统梳理灾害类型，包括斜坡失稳类（受降雨、人为开挖等诱发，破坏公路结构）、碎屑流类（含泥石流与坡面型碎屑流，冲击力强）及地基变形与侵蚀类（致路面破损、结构倒塌）。再针对性研究防治技术，通过工程案例结合理论分析，阐述边坡生态固坡（勘察评估+分层设计）、抗滑桩+锚杆（索）联合支护（地质验算+分层施工）及智能预警平台（多传感器数据融合+机器学习预警）的应用方法，为山区公路灾害防治提供实践参考。

关键词：山区公路；地质灾害；防治技术

DOI：10.64216/3080-1508.26.01.025

引言

山区公路是区域交通网络的重要组成，但其沿线地形险峻、地质条件复杂，地质灾害频发已成为制约公路安全运营的关键问题。当前，斜坡失稳、碎屑流、地基变形等灾害常导致交通中断甚至结构损毁，现有防治措施存在针对性不足或预警滞后等局限。基于此，本文以“类型梳理-技术研发-案例验证”为思路，结合西南山区工程实例，研究高效防治技术与智能预警手段，旨在提升山区公路灾害抵御能力，保障通行安全。

1 山区公路地质灾害类型

1.1 斜坡失稳类灾害

山区公路地质灾害类型较多，其中斜坡失稳类灾害较为常见，斜坡上的岩土体在重力作用下沿一定软弱面或软弱带整体下滑，该现象主要由降雨作用、人为开挖坡脚以及坡体上部堆载等因素共同诱发。其中，降雨会软化岩土体降低其抗剪强度，人为开挖则直接破坏坡体原有平衡，坡体上部堆载又进一步增加下滑力，而且滑坡不仅会直接掩埋公路造成交通中断，同时滑坡产生的巨大冲击力还可能破坏公路的主体结构。

1.2 碎屑流类灾害

碎屑流类灾害也较为常见，包括泥石流与坡面型碎屑流，在山区或其他沟谷深厚、地形险峻之处，因暴雨、暴雪及其他自然灾害引发的山体滑坡会携带有大量泥沙、石块等特殊物质，其成分复杂且极具强大的冲击力和破坏力，能够冲毁公路、桥梁、涵洞与路基导致交通中断。

1.3 地基变形与侵蚀类灾害

地基土质不良、填筑材料质量差、施工压实度不足、地下水变化等因素都可能导致地基沉降，而地基沉降会使公路路面出现不平整、裂缝等现象，既影响行车舒适性又威胁行车安全性，严重的地基沉降还可能导致桥梁、涵洞等结构物下沉、开裂甚至倒塌，对公路工程的正常使用造成极大危害。

2 山区公路地质灾害防治技术

2.1 边坡生态固坡技术

边坡生态固坡技术是一项兼顾生态效益与工程稳定性的重要举措，工程师可通过植被配置与工程结构设计相结合产生的协同作用，增强边坡的抗侵蚀能力与自我修复能力。

2.1.1 边坡状况评估

在实践应用中，工程师需从前期边坡状况评估入手，对目标边坡的岩土体性质、坡度、水文地质条件以及已有破坏迹象进行详细勘察，可采用地质钻探、原位测试以及三维激光扫描等技术手段，获取边坡物理力学参数与空间形态数据，为后续设计提供精准依据。同时，还需结合当地的气候特征与植被适应性分析，筛选根系发达、固土能力强且耐旱耐贫瘠的本土植物种类，确保植被群落与生态环境相兼容，避免引入外来物种可能引发的生态风险。

西南某山区盘山公路穿越构造侵蚀地貌区，沿线边坡多为碎石土与风化页岩互层结构，雨季频繁发生坡面溜塌与小型滑坡，对公路通行安全造成严重威胁。工程师联合地质勘察单位对该段边坡开展全面勘察，采用

XY-1型地质钻探机沿边坡走向每20m布设一个钻孔，共钻孔8个，钻孔深度均穿透碎石土层至稳定页岩层，获取的岩土芯样显示碎石土内摩擦角为28°~32°、黏聚力为15~20kPa；同时使用RIEGLVZ-400三维激光扫描仪对边坡进行扫描，生成的点云模型精确呈现边坡最大高度18m、平均坡度37°的空间形态数据；水文地质调查中，通过渗水试验测得边坡表层土体渗透系数为 $1.2 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ，且发现坡脚存在季节性积水。结合当地年均降水量1200mm、年均气温16℃的气候特征，工程师筛选出云南松（乔木）、车桑子（灌木）、紫花苜蓿（草本）三种本土植物，其中云南松主根深度可达2~3m，车桑子侧根发达且耐旱性强，紫花苜蓿发芽快可快速覆盖坡面，三者搭配可形成立体根系固土网络，避免引入外来物种导致的生态失衡风险。

2.1.2 生态固坡设计

基于评估结果，生态固坡设计要统筹考虑工程加固与生态修复的双重目标，可采取柔性防护与生物固土相结合的复合结构体系。

（1）工程层面

在工程层面，工程师可针对不同坡度的边坡分层布置三维植被网、土工格室以及生态袋等柔性材料，通过其网状结构与土体间的摩擦作用分散坡面应力，以此抑制坡面土体活动。还可在关键部位设置微型桩、锚杆等分布加固构件，形成表层柔性防护加深层刚性加固的网络，提升边坡整体稳定性。

（2）生态层面

在生态层面，要根据植物生长特性设计分层播种方案，表层采用草本植物实现快速覆盖以减少雨水冲刷，中层搭配灌木增强根系固土能力，深层引入乔木形成长期稳定的地被层，播种时要控制种子密度与覆盖厚度，结合导水剂与缓释肥料的应用，为植被长期生长发育提供有利条件。

2.2 抗滑桩+锚杆（索）联合支护技术

2.2.1 设计分析

抗滑桩与锚杆（索）联合支护技术的应用也具有良好功效，在山区公路地质灾害防治中，该技术通过分层抗滑、浅层加固的系统设计形成立体防护体系。在实践环节，工程师需要以地质勘查与结构验算为前提，通过地质状态原位测试以及数值模拟明确滑坡体的厚度、滑面位置、岩土体物理力学参数以及地下水分布特征，结

合极限平衡法或有限元法计算滑体坡推力与剩余下滑力，确定抗滑桩的桩径、桩间距以及锚杆的锚固力、长度等关键参数，确保抗滑桩能够提供足够的抗滑力矩。

例如，公路K18+500段右侧边坡为顺层岩质边坡，受断层活动影响，边坡上部出现长度约50m、宽度2~3m的拉裂缝，勘察确认该区域存在浅层滑坡体（体积约8000m³），滑面深度3~5m，滑体物质为风化砂泥岩。工程师首先通过地质雷达探测与钻孔揭露，明确滑坡体的滑面形态为折线型，上段滑面倾角25°、下段滑面倾角18°，滑体岩土体天然重度19kN/m³、饱和重度21kN/m³、黏聚力12kPa、内摩擦角25°；同时采用渗压计测得滑坡体内孔隙水压力最大为80kPa，主要集中在滑面附近。基于上述数据，工程师采用极限平衡法（传递系数法）计算滑坡体的总坡推力，结果显示在暴雨工况下（地下水位上升1.5m），滑坡体剩余下滑力达1200kN/m。结合公路路基安全要求，工程师确定抗滑桩采用矩形截面（2m×3m），桩长15m，其中锚固段长度8m（嵌入稳定岩层），桩间距5m，共布设抗滑桩10根；锚杆（索）选用1×7股钢绞线（直径15.2mm，抗拉强度1860MPa），每根抗滑桩顶部布设2排锚杆（索），上排锚杆长度12m（锚固段8m）、下排锚杆长度10m（锚固段6m），锚杆（索）设计锚固力为300kN，通过数值模拟（FLAC3D软件）验证，该设计可使边坡稳定性系数从0.95提升至1.25，满足安全要求。

2.2.2 施工

在施工阶段，相关单位需采取分层实施、动态监测的策略：抗滑桩采用人工挖孔与旋挖钻机成孔，孔口设置钢护筒防止坍塌，护壁混凝土随挖随筑，每次开挖深度不超过一米。钢筋笼分节制作，混凝土浇筑采用导管法连续浇筑至桩顶设计标高，坍落度控制在180mm，养护期需大于14天。

在锚索锚杆施工中，需在抗滑桩混凝土强度达到设计值的75%后进行，可采用地质钻机造孔，清孔后安装钢绞线，注浆环节采用M35水泥砂浆，注浆压力控制在0.35MPa，张拉采用YCW250型千斤顶分级张拉至设计值的110%。

例如，施工单位严格按照“分层实施、动态监测”原则开展作业。抗滑桩施工阶段，采用人工挖孔与旋挖钻机结合的方式成孔，对于表层3m碎石土层采用旋挖钻机（徐工XR220D）成孔，下部风化岩层采用人工挖孔；所有孔口均设置高度1.2m、厚度8mm的钢护筒，护筒底

部嵌入稳定土层 0.5m，防止孔口坍塌；人工挖孔时每次开挖深度控制在 0.8m，开挖完成后立即浇筑 C25 护壁混凝土（厚度 20cm），确保孔壁稳定。钢筋笼采用工厂分节制作（每节长度 6m），主筋选用 HRB400E 直径 25mm 钢筋，箍筋选用 HPB300 直径 10mm 钢筋，钢筋笼安装时通过定位器固定，确保保护层厚度不小于 70mm；混凝土浇筑采用直径 250mm 的导管法连续浇筑，混凝土强度等级为 C35，坍落度控制在 180mm（每车检测 1 次），浇筑过程中采用振捣棒（插入深度 30–50cm）分层振捣，直至桩顶设计标高（高于原地面 0.5m），浇筑完成后覆盖土工布洒水养护，养护期持续 20 天（大于设计要求的 14 天）。

2.3 智能预警平台技术

2.3.1 数据整合

智能预警平台的建构强调构建多元数据融合、实施动态分析的灾害预警体系，相关单位需要在山区公路沿线布置多类型传感器，包括位移传感器、倾斜仪、孔隙水压力计以及雨量计，传感器布局要结合地质灾害易发区分布，重点覆盖断裂带、软弱夹层以及历史滑坡区域，间距根据滑坡坡度调整；同时要搭建无线传输网络，采用 LoRa 或 NB-IoT 低功耗广域网技术，将传感器数据实时上传至云端服务器，传输延迟控制在两秒内，丢包率控制在 1% 以内，为后续分析提供可靠基础。

2.3.2 数据处理与分析

在数据处理与分析阶段，则需要建立起实时监测、特征提取、风险评估的闭环机制：云端服务器接收传感器数据后先进行清洗，剔除异常值并补全缺失数据，随后采用相关技术提取关键特征参数，包括位移速率、倾斜角加速度、孔隙水压系数以及降雨强度历时曲线斜率，通过小波变换或经验模态分解方法分离噪声与有效信号。

2.3.3 风险评估

最终结合机器学习模型进行风险评估，可采用支持向量机或长短期记忆网络构建灾害预测模型，输入特征参数后输出风险等级，模型训练需结合历史灾害数据进行参数优化，确保预测准确率大于 85%，而风险阈值的设定需根据边坡稳定性系数进行动态调整，当边坡稳定性系数小于 1.05 时触发黄色预警，小于 1.0 时触发红色预警。

例如，工程团队基于该区域近 10 年的 32 次小型滑坡历史数据，采用支持向量机（SVM）算法构建灾害预测模型，将提取的 4 项特征参数作为输入变量，边坡稳定性系数作为输出变量，通过网格搜索法优化模型参数（惩罚因子 $C=10$ ，核函数 $\gamma=0.1$ ），模型预测准确率经测试达 88%。根据公路工程安全规范，平台设定三级风险阈值：当边坡稳定性系数大于 1.15 时，判定为无风险（绿色状态）；当稳定性系数在 1.05–1.15 之间时，触发黄色预警，系统自动向公路养护部门发送短信通知（包含预警位置、位移速率等信息），养护人员需在 24 小时内现场核查；当稳定性系数小于 1.05 时，触发橙色预警，公路管理部门需封闭边坡下方半幅车道，设置警示标志；当稳定性系数小于 1.0 时，触发红色预警，系统立即联动公路监控中心，通过可变情报板发布封路信息，并调度应急队伍赶赴现场。在某次暴雨过程中，K18+500 段边坡孔隙水压力计数据显示水压系数从 0.6 升至 0.9，位移速率从 0.5mm/d 增至 2.3mm/d，平台计算出稳定性系数降至 1.03，随即触发橙色预警，养护人员现场核查发现边坡拉裂缝扩大，及时采取临时堆载措施，避免了滑坡事故发生。

3 结束语

总体来说，本文通过对山区公路地质灾害的系统研究发现，不同灾害类型需采用差异化防治策略：生态固坡实现工程与生态协同，联合支护强化深层稳定，智能预警则提前规避风险。这些技术并非孤立存在，而是可形成“防治–加固–预警”的一体化体系。未来，可进一步优化传感器布局与机器学习模型，结合无人机巡检等新技术，实现灾害防治的精准化与智能化，为山区公路工程的可持续发展提供更全面的技术支撑。

参考文献

- [1]任侃. 解析山区公路工程地质灾害与防治措施[J]. 黑龙江交通科技, 2018, 41(08): 82–83.
- [2]马林. 浅议山区公路常见地质灾害及防治措施[J]. 科学中国人, 2016, (23): 47.
- [3]杨刚, 何平. 分析山区高速公路路线设计与地质灾害关系[J]. 低碳世界, 2016, (10): 186–187.
- [4]青光坤. 山区公路地质灾害的联合监测和科学防治[J]. 江西建材, 2015, (16): 152+154.