

山区农村公路边坡稳定性分析与防护技术探讨

蒋德龙

建水县综合交通发展中心，云南省红河州，654399；

摘要：本文分析了山区农村公路边坡稳定性的影响因素，包括地质与地形条件、水与气象作用、人类工程活动。同时，介绍了三类防护技术：工程结构防护通过现场试验、模型建立等确定防护结构并规范施工；生态防护依据勘察选本土物种构建群落；排水系统优化构建一体化结构并进行动态管控。研究为山区农村公路边坡防护提供了多方面参考。

关键词：山区农村公路；边坡稳定性分析；防护技术

DOI：10.64216/3080-1508.25.07.019

引言

在云南省内，山区农村公路是区域交通的重要组成部分，其边坡稳定性关乎交通顺畅与周边安全。然而，受地质地形、水与气象及人类活动影响，边坡失稳坍塌频发，严重威胁道路运营与群众出行安全。因此，探究影响因素并提出防护技术，对保障公路安全、减少灾害损失、促进山区发展具有重要意义。

1 山区农村公路边坡稳定性影响因素分析

1.1 地质与地形条件

山区农村公路边坡的稳定性会受多种因素影响，其中最主要的是地质与地形条件对其结构稳定性产生的直接作用。具体而言，岩土体性质、地形地貌特征以及地质构造背景都会对山区公路边坡的结构稳定性造成影响。例如，软岩易分化剥落，硬岩抗剪强度高却存在节理缝隙发育的问题；同时，坡度越大、越高，下滑力就越明显，稳定性也就越低，而且沟谷切割深度越大，山坡陡峭的区域就越易形成临空面，这会加剧失稳风险。

1.2 水与气象作用

水与气象作用同样会对农村公路边坡稳定性产生影响，地下水带来的动水压力、静水压力以及软化效应会降低粘体的有效应力，进而引发滑动。地表水的冲刷、侵蚀、入渗以及冻融循环也会增加结构失稳的风险，此外，极端降雨、温度波动和气候突变等情况也会间接影响边坡稳定性。

1.3 人类工程活动

人类工程活动对公路边坡稳定性的影响较为直接，公路建设过程中的开挖坡脚、填方加载以及爆破震动等

一系列作业活动都会导致原有结构主体的稳定性下降。农业活动中的耕作破坏、灌溉渗漏、植被清除等行为也会在一定程度上加剧区域水土流失，从而使公路边坡稳定性降低。

2 山区农村公路边坡防护技术

2.1 工程结构防护：强化边坡力学稳定性

2.1.1 前期调研分析

现阶段，在山区农村公路边坡防护技术领域，需做好工程结构防护以强化边坡力学稳定性，实施环节要以精准严谨的力学参数测定为基准进行精细化把关，可通过现场原位试验和室内试验获取边坡岩土体的抗剪强度指标、弹性模量及泊松比，同时结合地质勘探确定软弱结构面的产状和历史特性，并以此为基础建立边坡三维地质模型。之后采用极限平衡法或有限元法进行稳定性计算，分析在自重、降雨、地震等不同工况下的安全系数及潜在滑动面位置，再根据计算结果选取适配的防护结构类型。

建水县岔盘公路K12+300段边坡出现明显失稳迹象，坡顶出现多条纵向裂缝，最长延伸达15m，缝宽最大处约8cm，坡脚则有土体鼓胀现象。通过开展现场原位直剪试验，测得该路段边坡表层碎石土的内摩擦角为 28° 、黏聚力12kPa，同时通过室内三轴压缩试验获取其弹性模量3.2GPa、泊松比0.25，地质勘探发现坡体中存在倾向与路线平行的泥质夹层，且该夹层在历史上曾发生过小规模滑动，以此建立边坡三维地质模型，采用极限平衡法计算得出在自重工况下安全系数为1.15，降雨工况下因孔隙水压力增大安全系数降至0.92，地震工况下安全系数为0.88，潜在滑动面均位于泥质夹层顶部，于是决定采用抗滑桩加挡土板组合结构，其中抗滑桩设计

直径 1.2m, 桩长 15m, 嵌入稳定基岩 4m, 挡土板厚度 30cm, 高度 2m, 以此应对以土体为主的浅层滑动问题。

2.1.2 力学稳定性强化

在防护结构力学稳定性强化层面, 需奉行分层分段动态调整的施工原则, 抗滑桩施工中可采用全液压精准放样, 将桩位偏差控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内, 随后采用人工挖孔或机械成孔, 孔径需比设计桩径大 $10\sim 20\text{cm}$ 以预留操作空间, 成孔后需立即进行孔隙支护防止塌孔, 桩身混凝土浇筑则需采用导管法分层浇筑, 每层厚度不超过 50cm 以防混凝土离析, 同时要在桩顶设置钢筋网片以增强桩头抗剪能力。

对于预应力锚索框架施工, 规范要求边坡表面清理浮石并整平, 随后按设计间距钻孔, 孔径须比锚索直径大 $2\sim 4\text{cm}$, 钻孔完成后用高压水清孔确保孔内无残渣, 锚索安装前需进行防腐处理, 张拉时需分级加载, 每级持荷 5 分钟后记录位移数据, 当总位移量超过设计允许值时需停止张拉并补孔。最后, 框架梁钢筋绑扎需与锚索端部焊接牢固, 混凝土浇筑后覆盖保护膜保湿养护 14 天以避免干燥裂缝影响结构稳定性。

例如, 在通建高速公路通海建水交界上边坡滑坡路段就采用预应力锚索框架处治, 先对边坡表面清理浮石并整平, 随后按 $2\text{m}\times 2\text{m}$ 的设计间距钻孔, 孔径比锚索直径大 3cm , 钻孔完成后用高压水清孔确保孔内无残渣, 锚索安装前进行三层防腐处理, 张拉时分 5 级加载, 每级持荷 5 分钟后记录位移数据, 总位移量未超过设计允许值, 最后, 框架梁钢筋绑扎与锚索端部焊接牢固, 混凝土浇筑后覆盖保护膜保湿养护 14 天以避免干燥裂缝影响结构稳定性。

2.2 生态防护: 利用自然力量增强边坡固稳能力

2.2.1 物种选用与设计

在山区农村公路边坡防护中, 也可引进生态防护策略, 利用自然力量增强边坡固稳能力, 但要基于上述地质勘察结果确定治理管控方案。通过地质勘探与生态调查明确边坡岩土体类型、坡度、水文条件及原生植被类型, 再结合区域气候特征筛选适合的植物种类, 优先选择根系发达、耐贫瘠且生长快速的本土物种, 避免引进外来物种。随后根据边坡稳定性计算结果确定生态防护的辅助措施类型, 对于浅层稳定性不足的边坡, 需在坡面铺设三维植被网作为植物生长基质与土体连接的骨架, 网片通过 U 型钉固定, 间距为 $50\text{cm}\times 50\text{cm}$, 确保网

片与坡面贴合度大于 90%; 对于坡度较陡或土体松散的边坡, 则需喷播客土基质, 如按 3:2:1 的比例混合粘土、有机肥、保水剂, 厚度约 $8\sim 10\text{cm}$, 覆盖无纺布防止基质流失, 为植物早期生长提供稳定环境。

例如, 建水县建万公路 K15+700 段边坡为砂质土坡, 坡度 35° , 表层土体松散且夹杂风化岩块, 水文调查显示该区域年均降水量 1100mm , 集中在夏季且多暴雨, 原生植被以耐旱性草本为主, 通过生态调查确定该边坡岩土体渗透系数为 $1.5\times 10^{-4}\text{cm/s}$, 土体黏聚力因长期冲刷降至 8kPa , 遂筛选出 3 种本土物种, 深根型乔木选用马尾松, 其主根可深达 2m 以上; 中根型灌木选用紫穗槐, 侧根扩展范围可达 1.5m ; 浅根型草本选用狗牙根, 须根密度达 15 条/ cm^2 以上, 同时决定采用三维植被网辅助防护, 网片选用 120g/m^2 的聚丙烯材料, 通过长度 30cm 的 U 型钉固定, 钉距严格按 $50\text{cm}\times 50\text{cm}$ 布置, 施工时先将网片沿坡面自上而下铺设, 确保与坡面贴合度达 95% 以上, 再在网片表层喷播客土基质, 基质按 3:2:1 的比例混合当地粘土、腐熟羊粪、聚丙烯酰胺保水剂, 喷播厚度控制在 9cm , 随后覆盖 20g/m^2 的无纺布, 边缘用土袋压实以防被风雨掀开。

2.2.2 植物群落的构建与更新

在已实施生态处治的失稳边坡公路管护过程中, 要做好植物群落的构建与更新, 强化其固土功能, 需建立从上至下的分层管理体系。上层种植深根型乔木, 其主根可穿透软弱结构面进入稳定基岩, 通过根系与岩土体的机械咬合作用提供抗滑力; 中层种植中根型灌木, 其侧根呈网状分布可有效填充土体空隙、增加土体抗剪强度; 下层种植浅根型草本, 其密集的须根可在表层 50cm 范围内形成根垫, 减少雨雪冲刷导致的水土流失。种植方式需结合坡面形态调整, 对凸形坡需加密中层灌木种植间距以增强局部抗冲刷能力。

例如, 为构建稳定的植物群落, 可规划出三层种植体系, 上层在坡顶平台按 $2\text{m}\times 2\text{m}$ 间距种植马尾松, 种植穴挖成直径 60cm 、深 80cm 的圆柱形, 底部铺设 10cm 厚的碎石层以利排水, 每穴施入 5kg 腐熟有机肥与底土拌匀; 中层在坡面 $2/3$ 高度处种植紫穗槐, 采用 $1\text{m}\times 1.2\text{m}$ 的间距, 种植时将根部修剪成 45° 斜角以促进侧根萌发; 下层满铺狗牙根草籽, 每平方米播撒量控制在 25g , 播后覆盖 1cm 厚的细土镇压。针对存在的凸形坡段, 将中层紫穗槐的间距缩减至 $0.8\text{m}\times 1\text{m}$, 并在相邻植株间铺设椰丝毯增强地表覆盖; 对于凹形坡段, 在上层马尾

松种植穴底部增设 20cm 厚的级配碎石层, 碎石粒径控制在 5~10cm, 同时在穴壁四周预留 4 个直径 5cm 的排水孔, 防止雨水积聚导致根系腐烂, 后期每月监测植物存活率, 当草本覆盖率低于 80% 时及时补播, 灌木存活率低于 90% 时进行补植, 确保群落结构持续发挥固土作用。

2.3 排水系统优化: 减少水对边坡的破坏

2.3.1 施工建设

排水系统优化是山区农村公路边坡防护中至关重要的一环, 工作人员需构建地表与地下相结合的一体化排水结构, 可通过地形测绘与地质勘探技术明确边坡汇水面积、坡面径流路径及地下水位, 据此确定排水系统的空间布局。地表排水系统需沿坡面纵向每 10~15m 设置一道截水沟, 其位置应高于潜在滑动面至少 1m 以避免水流渗入软弱夹层, 地下排水系统则需在坡脚外侧 5m 处设置盲沟, 断面尺寸为 80cm×80cm, 底部铺设土工布防止细颗粒流失, 盲沟间距根据土体渗透性确定; 同时需要校核排水系统的水力参数, 包括截水沟的过流能力和盲沟的排水速率, 避免因排泄不畅导致孔隙水压力累积。

例如, 建水县官厅镇乌梅公路 K15+500 段边坡因雨季频繁出现局部滑塌, 通过地形测绘确定该边坡汇水面积达 0.8 公顷, 坡面径流主要沿 3 条自然冲沟下泄, 地下水位在雨季可上升至坡体中部, 遂决定构建一体化排水系统, 地表沿坡面纵向每 12m 设置一道截水沟, 位置选在潜在滑动面以上 1.2m 处, 截水沟采用 M7.5 浆砌片石砌筑, 沟宽 40cm、深 50cm, 内侧抹 2cm 厚水泥砂浆防渗, 沟底每隔 10m 设置一道宽 20cm 的沉沙池以拦截泥沙, 沟身坡度按 1.5% 设置以保证排水通畅; 地下在坡脚外侧 5m 处开挖盲沟, 断面尺寸为 80cm×80cm, 底部铺设 300g/m² 的无纺土工布, 中间填充粒径 20~40cm 的块石作为排水通道, 顶部覆盖 50cm 厚的粘土封闭层并压实, 盲沟沿路线方向每 30m 设置一道, 施工人员需按 1.5% 的坡度修整沟底, 务必确保沟壁压实度达到 93% 以上; 同时采用曼宁公式计算截水沟过流能力, 当糙率取 0.025 时, 单沟设计过流能力为 0.3m³/s, 盲沟通过注水试验测得排水速率为 0.15m³/h·m, 各项参数均满足设计要求。

2.3.2 动态管控机制

为确保排水系统长期稳定有效运行, 工程实施后需

建立动态管控机制, 在截水沟关键节点安装水位计与流量计, 在盲沟内埋设渗压计与孔隙压力计, 实时监测水位变化、流量波动及孔隙水压力; 当监测数据显示截水沟水位超过设计水位 50% 或流量持续两小时大于设计流量时, 需立即检查沟内是否有堵塞并采用高压水枪疏通。若盲沟渗压计读数显示地下水位上升至设计洪水位以上, 需分析原因并通过注水试验定位故障点, 对堵塞段采用管道疏通机清理, 对失效反滤层则需开挖更换。

为维持排水系统效能, 管理单位可在截水沟起点、中点及终点分别安装超声波水位计与电磁流量计, 在盲沟内每 50m 埋设一组渗压计与孔隙压力计, 监测数据实时传输至中控系统; 当截水沟水位超过设计水位 50% 即达到 37.5cm 时, 或流量计显示流量持续两小时大于 0.3m³/s 时, 巡查人员需立即沿沟体检查是否有枯枝、石块堵塞, 发现堵塞物后采用压力 15MPa 的高压水枪沿水流方向疏通; 若盲沟渗压计读数显示地下水位上升至设计洪水位 1.8m 以上, 技术人员需通过双环注水试验定位故障段, 对堵塞部位采用直径 15cm 的管道疏通机进行旋转清理, 对反滤层失效段则开挖更换新的 300g/m² 无纺土工布并重新填充块石; 日常维护中每季度组织人员清理截水沟内的落叶与泥沙, 每半年检查盲沟封闭层, 若发现裂缝需填补 5cm 厚的塑性粘土并分层压实至干密度 ≥ 1.6g/cm³, 确保排水系统始终保持高效排水状态。

3 结束语

总体来说, 山区农村公路边坡稳定性需从多维度防护。地质、水与人类活动的影响相互关联, 单一防护技术难以根治问题。工程结构、生态防护与排水优化的协同应用, 是提升稳定性的关键。这一综合防护思路为山区公路建设维护提供了系统性指导, 助力降低边坡失稳风险, 保障交通长效安全。

参考文献

- [1] 陶虹宇. 有限差分软件在山区农村公路边坡治理中的应用[J]. 交通世界, 2024, (13): 34-36.
- [2] 田恒. 边坡变形监测技术在山区农村公路工程中的应用[J]. 交通世界, 2024, (13): 37-39.
- [3] 吴亚伟, 魏来, 张帅. 浅谈农村公路路基病害的危害及其防治[J]. 科技信息, 2010, (29): 354.
- [4] 熊涛. 山区农村公路的勘察设计[J]. 科技咨询导报, 2006, (14): 65-66.