

山区公路边坡稳定性分析及加固技术研究

王 恒

陇南公路事业发展中心文县公路段 甘肃 陇南 746400

摘要: 山区公路建设中, 边坡失稳易破坏公路设施、阻断交通, 严重影响工程安全与运营效益。本文阐述了边坡分类、特征及失稳影响因素与机理, 介绍定性与定量相结合的稳定性分析方法, 总结现场踏勘、钻探等勘察技术及数据整理要点, 重点研究支挡、锚固、改良三类关键加固技术的施工要点, 提出不同类型边坡的加固方案及优化思路。研究表明, 针对性的勘察分析与合理的加固优化措施, 可有效提升边坡稳定性。

关键词: 山区公路; 边坡稳定性; 分析方法; 加固技术; 设计优化

引言: 随着山区公路建设规模不断扩大, 边坡工程作为核心组成部分, 其稳定性问题日益突出。山区地形复杂、降水集中, 加之施工扰动等因素, 边坡滑坡、崩塌等失稳灾害频发, 不仅增加工程造价, 还威胁交通通行安全。目前, 现有加固技术在适配性、经济性上仍存在优化空间, 部分工程因勘察不全面、加固方案不合理, 导致边坡失稳隐患难以根治。基于此, 本文聚焦山区公路边坡稳定性分析及加固技术, 系统研究勘察、分析、加固及优化全过程, 解决工程实际痛点, 为山区公路边坡工程安全建设提供技术保障, 具有重要的工程实践意义。

1 山区公路边坡相关基础理论

1.1 山区公路边坡的分类与特征

山区公路边坡是公路建设中开挖山体形成的人工边坡, 其分类与特征与工程地质条件、施工方式密切相关。按岩土体类型可分为岩质边坡、土质边坡及岩土混合边坡, 其中岩质边坡稳定性受岩层产状、节理裂隙控制, 土质边坡易受水蚀影响失稳。按坡度与高度可分为缓坡、中坡、陡坡及高陡边坡, 陡坡和高陡边坡是工程防控重点。山区公路边坡核心特征表现为地形复杂、坡度较陡, 受自然环境影响显著, 且多位于公路沿线, 失稳后易直接破坏公路设施、阻断交通。

1.2 边坡稳定性的核心影响因素

边坡稳定性主要受自然因素和人为工程因素双重影响。自然因素中, 降水是首要诱因, 雨水渗透会降低岩土体强度、增加孔隙水压力; 地形地貌决定边坡形态, 高差越大、坡度越陡, 稳定性越差; 岩土体性质是内在基础, 软土、风化岩层等抗剪强度低, 易引发失稳。人为因素主要包括公路开挖过程中边坡形态改变、坡体应力重分布, 以及施工扰动破坏岩土体结构, 此外, 排水系统不完善、加固措施不到位也会加剧边坡失稳风险。

1.3 边坡失稳的类型与破坏机理

山区公路边坡失稳常见类型有滑坡、崩塌、溜坍三种。滑坡表现为坡体沿滑动面整体下滑, 多发生在土质或破碎岩质边坡; 崩塌是坡体上部岩土体突然脱离母体崩落, 常见于高陡岩质边坡; 溜坍为坡面松散岩土体沿坡面滑落, 多由降水或坡面冲刷诱发。其破坏机理核心是坡体所受下滑力大于抗滑力, 自然或人为因素导致岩土体抗剪强度降低、下滑力增加, 打破坡体力学平衡, 最终引发失稳破坏, 且不同失稳类型的力学演化过程存在明显差异^[1]。

2 山区公路边坡稳定性分析与勘察

2.1 山区公路边坡稳定性分析方法

2.1.1 定性分析方法

定性分析方法主要基于工程地质勘察资料、现场踏勘情况及工程经验, 对边坡稳定性进行初步判断, 具有操作简便、耗时短、成本低的特点, 适用于边坡初步勘察、中小型边坡稳定性筛查或复杂边坡的辅助分析。工程地质类比法是最常用的定性分析方法, 通过对比已建成山区公路同类边坡的工程地质条件、失稳情况及处理效果, 结合本次研究边坡的具体特征, 判断其稳定性及可能发生的失稳类型, 该方法的关键的是确保类比边坡的相似性, 包括岩土体类型、坡度高度、水文条件等核心指标一致。经验判断法则依托工程技术人员的实践经验, 结合边坡坡面形态、岩土体风化程度、节理裂隙发育情况、地下水出露状态等现场直观特征, 直接判断边坡稳定性等级, 常用于现场快速排查, 为后续定量分析奠定基础。

2.1.2 定量分析方法

定量分析方法通过建立力学模型、计算相关参数, 量化评价边坡稳定性, 精度更高、针对性更强, 适用于高陡边坡、重要路段边坡及稳定性较差边坡的详细分

析。极限平衡法是工程中应用最广泛的定量分析方法，其核心思路是假设边坡沿某一潜在滑动面发生滑动，通过计算滑动面上的下滑力与抗滑力，得出安全系数，判断边坡是否稳定，常用的具体方法包括条分法、圆弧滑动法、传递系数法等，其中条分法可适用于各种复杂边坡形态，圆弧滑动法多用于土质边坡及破碎岩质边坡的稳定性计算。数值模拟法是近年来快速发展的定量分析方法，借助FLAC3D、ANSYS等专业软件，构建边坡三维地质模型，模拟边坡在自然状态、降雨条件、施工扰动下的应力应变分布、位移变化规律，精准识别潜在滑动面，计算安全系数，其优势是能够还原边坡复杂地质条件，模拟不同工况下的稳定性变化，为边坡失稳预测及加固设计提供更精准的技术依据^[2]。

2.2 山区公路边坡工程地质勘察与数据采集

2.2.1 主要勘察方法

山区公路边坡工程地质勘察以现场踏勘与测绘为基础，结合钻探、取样试验、原位测试形成全方位勘察体系。现场踏勘与测绘作为首要环节，通过实地走访、地形测量和地质测绘，明确边坡地形地貌、岩土体分布、节理裂隙及地下水情况，划分边坡类型、标注隐患点，绘制工程地质图，为后续勘察确定重点。钻探是获取深部地质资料的核心，根据边坡条件选用冲击或回转钻探，钻取试样以了解地下岩土体分层、风化程度及潜在滑动面情况。原位测试直接对现场岩土体测试，采用静力触探、动力触探等方法，获取抗剪强度等核心参数，避免试样失真，提升数据可靠性。

2.2.2 勘察数据整理与分析

勘察数据整理与分析的核心是梳理校验原始数据，形成合格成果，为稳定性分析提供精准参数。首先校验原始数据，剔除异常、错误数据，核查钻探、试验、原位测试数据的一致性，矛盾数据需重新核查补充。其次分类归档数据，将岩土体、地形地貌、水文地质等数据整理归档，绘制参数统计表、水位变化曲线等图表。最后综合分析数据，结合工程地质条件，明确岩土体参数分布规律、地下水影响及失稳主要因素，确定潜在滑动面力学参数，为后续稳定性定量分析和加固设计提供可靠基础^[3]。

3 山区公路边坡关键加固技术

3.1 支挡类关键加固技术

支挡类加固技术是山区公路边坡最基础、最常用的加固形式，核心是通过设置支挡结构承受坡体下滑力，适用于各类土质、岩质边坡，尤其适合坡度较陡、下滑力较大的边坡，施工工艺成熟、适应性强，关键技术主

要包括抗滑桩和挡土墙两种。(1)抗滑桩加固技术。施工前需结合工程地质勘察资料，确定抗滑桩布置位置、桩长、桩径及间距，优先选用坡体滑动面以下的稳定岩层作为桩底持力层。施工流程遵循“测量放线→桩孔开挖→孔壁支护→钢筋笼制作与安装→混凝土浇筑→桩头处理”，山区地形复杂，桩孔优先采用人工开挖，每开挖1-2米及时进行孔壁支护，土质或破碎岩质边坡需采用钢模板或混凝土护壁保障安全。钢筋笼按设计参数加工，钢筋规格、间距符合规范，安装时对准桩孔中心；混凝土连续浇筑、振捣密实，浇筑后养护不少于14天确保强度达标。抗滑桩间距控制在5-10米，桩长根据边坡高度及滑动面深度确定为10-25米，适用于高陡边坡、大型滑坡体加固。(2)挡土墙加固技术。常用重力式和悬臂式挡土墙，其中重力式因结构简单、施工便捷、造价低廉，在山区应用最广。施工前平整基底，清除软弱土层并换填压实，确保基底承载力达标；采用片石、块石或混凝土砌筑，保证灰缝饱满、错缝搭接，避免通缝，墙体坡度符合规范。悬臂式适用于土质边坡或承载力较低的基底，由立壁、趾板、踵板组成，施工重点控制趾板、踵板浇筑质量及与立壁的连接牢固性，同时设置排水孔排出墙后积水，防止墙体开裂失稳。

3.2 锚固类关键加固技术

锚固类加固技术核心是通过锚杆、锚索将坡体与深部稳定岩层连接，传递下滑力、约束坡体变形，适用于岩质、破碎岩土体及高陡边坡，具有施工速度快、占地面积小、对坡体扰动小的优势，关键技术包括锚杆和锚索加固。(1)锚杆加固技术。施工前现场踏勘确定锚杆布置点位、长度、直径及倾角，结合岩土体性质选用水泥砂浆或树脂锚杆。施工流程为“钻孔→清孔→锚杆安装→注浆→张拉锁定”，钻孔采用钻机作业，角度根据边坡倾角及潜在滑动面确定为15°-30°，深度需穿透滑动面并进入稳定岩层不少于1.5米。高压风或高压水清孔后，将锚杆对准中心缓慢放入，采用0.3-0.5MPa压力注浆确保浆液饱满，养护至浆液强度达设计70%以上后张拉锁定。锚杆间距1.5-3米、排距1.2-2.5米，适用于中高陡岩质、破碎岩质边坡加固。(2)锚索加固技术。承载力高于锚杆，适用于下滑力大、稳定性要求高的高陡边坡、大型滑坡体，是重要路段核心加固技术。施工流程与锚杆类似，重点区别在锚索制作与张拉。锚索由多根高强度钢绞线组成，按设计承载力确定钢绞线规格数量，制作时除锈防腐并安装导向帽、隔离架确保分布均匀；缓慢放入孔内后，采用0.5-1.0MPa高压注浆，张拉锁定采用分级加载，每级稳压观察变形，确保受力均匀无异常，

张拉后混凝土封锚做好锚头防腐,延长使用寿命。

3.3 改良类关键加固技术

改良类加固技术核心是改良边坡岩土体物理力学性质,提高抗剪强度和整体性,适用于土质、软弱岩土体及岩土混合边坡,施工便捷、造价较低,可与支挡、锚固技术结合使用,关键技术包括注浆和换填加固。(1) 注浆加固技术。用于处理软弱岩土体、破碎岩质边坡,通过向岩土体孔隙、裂隙注入浆液形成整体,封堵地下水通道。施工前根据岩土体孔隙裂隙分布,确定注浆孔布置、压力、用量及浆液类型,水泥砂浆适用于土质边坡,化学浆液适用于破碎岩质边坡。施工流程为“钻孔→清孔→注浆管安装→注浆→封孔”,钻机钻孔间距根据破碎程度确定为1-2.5米,注浆管插入孔底,高压注浆压力按需调整避免扰动坡体,当压力达设计值且注浆量不再增加时停止注浆并封孔。(2) 换填加固技术。适用于边坡表层为软弱土、淤泥质土的情况,通过挖除不稳定土层、换填优质填料并夯实,提高表层承载力。施工前确定换填范围和深度,深度一般1-3米,范围超出不稳定区域不少于0.5米;分层开挖清运软弱土层,避免扰动下层稳定岩土体;选用级配砂石、碎石土等填料,分层铺设夯实,夯实度不低于95%,检测合格后进行下一层施工,换填后修整坡面并做好排水,防止雨水冲刷^[4]。

4 山区公路边坡加固技术设计与优化

4.1 不同类型边坡的加固方案设计

结合山区公路边坡常见类型,针对性设计加固方案,确保方案贴合实际、适配性强。(1) 岩质边坡:针对完整岩质边坡,优先采用锚杆加固,布置合理间距与倾角,约束坡体变形;针对破碎岩质边坡,采用锚杆+注浆联合加固,注浆填充裂隙形成整体,提升岩土体强度,高陡破碎岩质边坡搭配锚索加固,增强承载力。(2) 土质边坡:浅层失稳土质边坡采用换填+挡土墙联合加固,换填优质填料夯实表层,挡土墙抵御下滑力;深层失稳土质边坡采用抗滑桩+排水系统结合,抗滑桩阻挡整体下滑,排水系统降低孔隙水压力,避免土质软化。(3) 岩土混合边坡:分层设计方案,表层土质部分

采用换填或注浆加固,深层岩质部分采用锚杆或锚索加固,兼顾各层岩土体特性,确保整体加固效果。

4.2 加固方案的优化思路与方法

优化核心是在保证加固效果的前提下,兼顾经济性与施工便捷性,贴合山区施工条件。(1) 优化思路:结合工程地质勘察数据,规避冗余加固措施,优先选用施工简便、耐久性好的技术;结合边坡失稳核心诱因,针对性优化,如降水主导失稳边坡,重点优化排水配套设计。(2) 优化方法:采用数值模拟法,模拟不同加固方案的受力及变形情况,对比筛选最优方案;结合工程实例类比,借鉴同类边坡优化经验,调整加固参数;注重多技术协同优化,将支挡、锚固、改良技术合理搭配,提升稳定性的同时降低施工成本与难度^[5]。

结束语:本文围绕山区公路边坡稳定性分析及加固技术展开全面研究,梳理了边坡基础理论、勘察方法、稳定性分析手段及关键加固技术,结合不同边坡类型提出针对性加固方案与优化方法,完成了研究预设目标。通过研究明确,科学的工程地质勘察是稳定性分析的基础,合理选用加固技术并进行优化,可有效防控边坡失稳风险。未来可结合更多工程实例,深化数值模拟技术应用,研发更适配山区复杂地形的高效、经济加固技术,推动山区公路边坡工程技术的进一步发展。

参考文献

- [1]范鑫.降雨条件下山区公路边坡稳定性分析与加固措施研究[J].工程技术研究,2025,10(15):28-30.
- [2]胡嘉豪.基于Geo5的山区高速公路边坡稳定性分析及加固处治研究[J].交通工程,2025,25(10):73-76+80.
- [3]王博云.山区路桥工程高边坡稳定性分析及防护加固技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(4):026-029.
- [4]文良,兰宝存,何伟,许坤,杨耀兴.山区公路边坡稳定性分析及施工工艺研究[J].工程技术研究,2025,10(12):28-30.
- [5]单志强.山区公路滑坡边坡稳定性分析及治理对策研究[J].门窗,2025(5):205-207.