

公路边坡稳定性分析与加固技术研究

张卫东

甘肃省康乐县县乡公路养护管理站 甘肃 临夏 731500

摘要：本文首先阐述了公路边坡失稳的自然与人为因素，介绍了极限平衡法、数值分析法等稳定性分析方法。接着详细论述植被防护、工程防护、复合式加固技术及其他加固技术（注浆加固、加筋土技术），分析各技术的原理、优势、适用场景及设计与施工要点。公路边坡稳定性受多因素影响，不同加固技术各有特点，实际工程需综合考量边坡地质条件、工程要求和经济合理性，合理选择并组合加固技术，以实现最佳加固效果，保障公路边坡长期安全稳定。

关键词：公路边坡；稳定性分析；加固技术

引言

公路建设不断发展，边坡稳定性问题愈发关键。公路边坡失稳会引发滑坡等灾害，威胁交通安全、破坏生态环境并造成经济损失。其稳定性受自然与人为因素共同制约，失稳机制复杂。为保障公路安全运营，需精准分析边坡稳定性并采取有效加固措施。本文将系统介绍公路边坡失稳原因、稳定性分析方法及多种加固技术，为公路边坡的设计、施工与维护提供理论依据与实践指导，助力提升公路边坡的稳定性与安全性。

1 公路边坡失稳的常见原因

公路边坡稳定性受自然与人为因素共同制约，其失稳机制呈现多场耦合特征。自然因素中地质条件起主导作用，当边坡发育软弱夹层、断层破碎带或顺层岩体等结构缺陷时，土体抗剪强度参数显著衰减，导致边坡自稳阈值降低；降雨通过入渗改变边坡水文场，土体含水量增加引发容重增大与孔隙水压力上升的双重效应，有效应力降低导致抗剪强度劣化，当地下水位抬升至临界浸润面时可能诱发流土或管涌破坏；地震作用通过体波与面波传递惯性力，使坡体承受动剪应力与法向应力叠加效应，当瞬时动应力超过土体残余强度时，潜在滑动面将发生动力失稳。人为因素主要源于工程建设活动对原始边坡的扰动，施工中的不当开挖改变坡体几何形态，坡率过陡或坡脚切削导致应力重分布，拉应力区扩展形成张拉裂缝并逐步贯通；坡顶堆载通过增加下滑力改变安全系数，当荷载超过抗滑力时触发失稳；爆破振动波使岩体结构面松弛扩展，降低边坡整体刚度；排水系统缺陷导致地表水入渗，加剧水文地质条件恶化；植被破坏削弱根系固土作用，土体抗侵蚀能力下降，在降雨冲刷下形成冲沟切割坡体。这些因素常呈现非线性耦合特征，如降雨与地震的协同作用可显著降低边坡动力

稳定性，施工扰动与地质缺陷叠加可能使稳定边坡发生突发性滑移，需通过多场耦合分析实现精准评估。

2 公路边坡稳定性分析方法

2.1 极限平衡法

公路边坡稳定性分析中，极限平衡法是应用最广泛的技术方法之一。其核心原理是将边坡土体离散为若干垂直条块，基于力的平衡条件与极限平衡状态建立静力平衡方程，通过计算抗滑力与下滑力的比值确定安全系数，当该值大于1时判定边坡稳定。该方法包含瑞典条分法、毕肖普法和简布法三种典型形式：瑞典条分法假设条块间作用力合力方向与水平方向平行，仅通过整体力矩平衡计算安全系数，因模型简化导致计算效率高但精度相对较低；毕肖普法在瑞典法基础上引入条块间水平作用力平衡条件，采用有效应力法考虑孔隙水压力影响，显著提升了计算精度，但仅适用于圆弧滑动面分析；简布法通过假定条块间作用力方向与滑动面法向夹角为已知参数，构建通用极限平衡方程，可处理任意形状滑裂面，尤其适用于复杂地质条件下的非圆弧滑动分析^[1]。该方法具有理论体系完整、计算流程标准化的优势，其安全系数指标能直观反映边坡稳定程度，但未考虑土体应力-应变关系，无法模拟破坏过程中的变形演化特征，实际应用中需结合工程监测数据验证分析结果。

2.2 数值分析法

(1) 有限元法将边坡离散为有限个单元，通过建立单元刚度矩阵并组装成总体刚度矩阵，求解边坡的应力、应变及位移场分布。该方法可考虑土体非线性、各向异性及弹塑性等复杂力学特性，通过迭代计算捕捉边坡从局部变形到整体破坏的全过程，尤其适用于分析非均质土体或含软弱夹层边坡的应力重分布特征。(2) 有限差分法基于差分原理将控制方程离散化为代数方程

组, 通过时间步进迭代求解边坡动态响应。该方法在处理大变形、非连续介质及动力问题方面具有优势, 可直接显示边坡变形演化过程, 对地震或爆破等动力作用下的边坡失稳模式分析效果显著, 其网格重构技术能有效模拟边坡破坏后的塌落形态。(3) 离散元法将边坡概化为由离散块体组成的系统, 通过定义块体间接接触本构关系, 模拟体间的相互作用及运动传递。该方法特别适用于分析块状岩质边坡或含节理裂隙的边坡破坏过程, 可追踪块体从初始微裂隙扩展到宏观滑动面的渐进破坏路径, 对边坡失稳的链式反应机制具有较强解析能力。

2.3 地质分析法

地质分析法作为评估边坡稳定性的核心方法, 着重对边坡的地质构造、岩土体特性及地下水状况展开全面调查。地质测绘能直观呈现边坡的地形地貌、地层分布和构造特征, 为后续深入分析奠定数据基础。钻探作为获取地下岩土体样本的重要手段, 通过钻取不同深度的岩芯, 可精确测定岩土体的类型、结构、密度及强度等关键参数, 为边坡稳定性评价提供直接且可靠的依据。物探技术则借助物理原理, 通过测量边坡内部物理场的分布特征, 来推断地下岩土体的性质、结构及含水状况, 有效弥补了地质测绘和钻探在调查范围和深度上的局限, 提升了调查的全面性和精准度。地质条件对边坡稳定性起着决定性作用, 地质构造中的断层、褶皱等会破坏岩土体的完整性, 削弱其抗剪强度; 岩土体性质作为内在因素, 不同类型具有不同的物理力学特性, 直接影响边坡的稳固程度; 地下水条件同样关键, 其存在会改变岩土体的物理力学性质, 且渗流作用可能带走土体颗粒, 增大孔隙率、降低强度, 最终导致边坡失稳, 所以在运用地质分析法时, 必须全面考量地质条件对边坡稳定性的多方面影响。

2.4 监测分析法

在监测实施阶段, 合理选用专业仪器设备至关重要, 位移传感器能够精确捕捉边坡各部位位移的细微变化, 应力计可详细记录边坡内部应力的分布格局及其动态变化过程, 水位计则能实时反映地下水位的高低起伏, 这些仪器相互配合, 共同搭建起边坡监测的坚实硬件体系。完成数据采集后, 需开展系统化的处理与分析工作, 通过有序整理数据并绘制位移—时间曲线、应力—时间曲线等图表, 清晰呈现边坡参数随时间的演变趋势。在此基础上, 借助统计分析方法深入挖掘数据内在规律, 准确评估边坡当前的稳定性状况; 同时, 融合模型预测技术, 对边坡未来的变形与受力走向进行科学预判, 为边坡管理决策提供有力支撑^[2]。监测分析法在边坡

稳定性分析中具有不可替代的关键作用, 其具备的实时监测能力, 可敏锐察觉边坡的任何动态变化, 无论是微小的位移变动还是应力的异常起伏, 都能及时捕捉, 使管理人员能够迅速发现边坡异常, 及时采取有效应对措施, 避免潜在安全隐患发展为实际灾害; 而且, 监测数据为边坡稳定性评价提供了客观、精准的信息依据, 有助于制定出更加科学合理的加固方案, 切实保障边坡的长期安全稳定。

3 公路边坡加固技术

3.1 植被防护

植被防护作为公路边坡加固中生态友好的技术手段, 在植物选择上需严格遵循适应性、根系发达程度及生长速度等核心原则, 优先选用本地适生植物, 因其对当地气候、土壤等环境条件具备天然适配性, 可大幅提升成活率并强化防护效能。施工时, 先对边坡进行全面清理与平整, 清除杂物、填平坑洼, 为后续工序奠定基础; 随后铺设客土或基质材料, 优化土壤结构, 为植物生长创造适宜环境; 接着进行播种或种植, 期间需精准控制种植密度, 避免过密导致竞争加剧或过疏影响覆盖效果, 同时结合植物生长需求及当地气候特征, 科学调控灌溉量, 确保水分供应充足且不过量, 以维持植物正常生长。该技术具有显著生态效益, 既能通过植物根系固土作用增强边坡抗冲刷能力, 减少雨水侵蚀导致的土体流失, 又能改善周边生态环境、提升景观质量。然而, 其局限性同样明显: 防护效果显现周期较长, 需待植物生长至一定阶段才能形成稳定防护体系; 对于高陡边坡或地质条件复杂的岩质边坡、土质松散且稳定性差的边坡, 植被防护难以提供足够的力学支撑, 防护效果受限, 需结合其他加固技术综合应用。

3.2 工程防护

工程防护作为公路边坡加固的关键手段, 挡土墙是典型代表, 依据结构和材料不同, 可划分为重力式、悬臂式、扶壁式等类型。重力式挡土墙借助自身重量来抗衡边坡土体的推力; 悬臂式和扶壁式挡土墙则凭借特定结构受力形式, 增强对土体推力的抵御效能, 以此提升边坡稳定性。抗滑桩是另一重要防护方式, 作为插入滑坡体阻止其滑动的桩柱, 有单桩和群桩之分。在滑坡治理时, 桩身与周围土体相互作用, 把滑坡产生的推力传递至稳定地层, 防止滑坡恶化, 保障边坡安全。锚杆(索)也是常用构件, 其功能是将拉力传递到稳定地层, 在边坡体内合理设置后, 能增强边坡土体的抗剪强度, 使土体更稳固, 提升边坡整体稳定性^[3]。不同工程防护措施适用条件各异, 重力式挡土墙适用于一般土质边

坡且地基承载力要求不高的情况；悬臂式和扶壁式挡土墙多用于地基承载力低、填方高的边坡；抗滑桩适用于滑坡推力大、地质条件复杂的边坡；锚杆（索）适用于岩质边坡或有一定强度的土质边坡。施工时，必须严格依照设计要求操作，从材料选用、构件安装到施工工艺控制等各环节，都要保证工程质量，从而充分发挥工程防护在公路边坡加固中的作用。

3.3 复合式加固技术

复合式加固技术应用于公路边坡加固，是通过组合两种或多种加固技术，实现优势互补、提升综合效能。其原理是整合不同加固技术的特性，如植被防护利用植物根系固土、改善生态，工程防护凭借自身结构或力学作用增强边坡稳定性，二者结合可同时发挥植物固土与工程稳定的双重作用。该技术优势突出，加固效果优于单一方式，能更有效应对复杂地质条件下的边坡稳定问题，且生态效益显著，有助于恢复和保护边坡生态环境，因此主要应用于对生态环境要求高且地质条件复杂的边坡，如景区公路边坡、地质灾害频发区域的边坡等。在设计与施工方面有特定要求，设计时需深入分析各加固措施的协同作用机制，合理规划技术组合形式与比例，确保相互配合；施工时要高度重视工序衔接，严格遵循设计要求和施工规范，保证各加固环节紧密有序推进，避免工序脱节影响整体加固效果，从而充分发挥复合式加固技术在公路边坡加固中的作用。

3.4 其他加固技术

在公路边坡加固领域，除普遍应用的常见加固技术外，注浆加固与加筋土技术也是重要的加固方式。注浆加固是利用专业设备，把预先配置好的浆液注入边坡土体内部，在压力驱动下，浆液填充土体孔隙，凝固后改善土体结构，提升土体强度与密实度，进而增强边坡稳定性。注浆材料主要有水泥浆和化学浆等，水泥浆成本低、来源广且强度发展稳定；化学浆可依据不同工程需求，灵活调整凝固时间、渗透性等性能参数，以适应复

杂地质条件。加筋土技术则是将土工格栅、土工布等加筋材料铺设在土体中，筋材与周围土体通过摩擦作用紧密结合成整体^[4]。边坡受力时，筋材承担部分拉应力，限制土体侧向变形，提高土体抗剪强度，增强边坡稳定性，这两种技术特点与适用场景不同，注浆加固适用于土体松散、孔隙较多的边坡，通过填充孔隙改善土体性能；加筋土技术更适用于填方边坡及软弱地基上的边坡，利用筋材与土体相互作用增强整体性和稳定性。实际工程中要综合考虑边坡地质条件、工程要求和经济合理性等因素，合理选择加固技术，以实现最佳边坡加固效果。

结语

综上所述，公路边坡稳定性分析与加固技术研究意义重大。通过深入剖析边坡失稳原因，运用多种分析方法准确评估稳定性，能为加固提供科学依据。不同的加固技术各有优劣与适用场景，植被防护生态友好但效果显现慢，工程防护力学支撑强，复合式加固综合效能高，注浆加固与加筋土技术也各有针对性。在实际工程中，要综合考虑多方面因素，灵活选择并合理组合加固技术，同时注重施工质量控制。未来，还需不断探索创新，提升边坡稳定性分析与加固技术水平，以适应公路建设发展的需求。

参考文献

- [1] 冯星光.高速公路边坡稳定性分析及加固技术研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(3):020-023.
- [2] 李智.公路边坡稳定性评估与加固养护技术优化研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(2):137-140.
- [3] 廖礼.道路高边坡稳定性分析与加固技术研究[J].运输经理世界,2025(11):133-135.
- [4] 梁智慧.公路边坡防护与加固施工技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(8):156-159.