

高陡岩质边坡防护治理研究

管 波

武汉环投环境科技有限公司 湖北 武汉 430000

摘 要：高陡岩质边坡作为地质灾害高发区域，其稳定性直接威胁基础设施安全与生态环境。本文从工程地质特征分析入手，揭示岩体结构、地质构造及水文地质条件对边坡稳定性的影响机制。基于主动防护（锚杆加固、预应力锚索框架梁等）、被动防护（挡土墙、柔性防护系统等）及综合防护技术体系，提出多目标优化设计原则与风险分级选型方法，并引入数值模拟与动态设计技术实现方案优化。通过构建位移、应力、渗流等多维度监测体系，结合层次分析法评估边坡稳定性，建立分级预警机制。研究为高陡岩质边坡灾害防控提供了从理论到实践的全链条解决方案。

关键词：高陡岩质；边坡防护治理技术；设计；监测与评估

引言

随着工程地质学、岩土力学及智能监测技术的融合发展，边坡防护逐渐向“主动加固-被动拦截-生态修复”一体化方向演进。本文聚焦高陡岩质边坡工程地质特征与防护技术体系，通过多目标优化设计、数值模拟验证及动态监测评估，探索兼顾安全性、经济性与生态性的综合治理路径，为同类工程提供科学参考。

1 高陡岩质边坡工程地质特征分析

高陡岩质边坡工程地质特征是影响边坡稳定性及防护治理方案设计的核心要素，主要体现在岩体结构、地质构造及水文地质条件三个维度。（1）岩体结构。其类型对边坡稳定性具有决定性作用。块状结构边坡由完整坚硬岩体构成，受节理裂隙切割程度较低，整体稳定性较好，但在边坡开挖或外部荷载作用下，易沿结构面发生局部崩塌；层状结构边坡的岩体受层理面控制，若层理倾向与边坡倾向一致，在雨水浸润或风化作用下，极易形成顺层滑动，此类边坡在页岩、砂岩等沉积岩分布区较为常见；碎裂状结构边坡因岩体破碎、完整性差，结构面密集交错，其稳定性极低，易发生整体滑动或崩塌灾害，常出现在断层破碎带或强风化区域。（2）地质构造。褶皱和断层是主要的地质构造形式，褶皱区域岩层的弯曲变形会改变岩体应力分布，在褶皱核部及转折端，岩体完整性受损，应力集中现象显著，增加了边坡失稳风险；断层的存在不仅破坏了岩体连续性，还可能形成软弱夹层，降低边坡抗剪强度，同时断层破碎带也是地下水运移的良好通道，进一步弱化岩体力学性能。区域构造应力场决定了边坡初始应力状态，构造应力集中区的边坡更易发生变形破坏。（3）水文地质条件。地下水的存在会显著改变岩体物理力学性质，水的浸润作用使岩体软化，黏聚力和内摩擦角降低；地下水在岩体

内形成的动水压力和扬压力，会降低有效应力，削弱边坡抗滑能力。降雨是最常见的水文诱发因素，暴雨期间大量雨水入渗，会快速增加岩体重力并形成超静孔隙水压力，导致边坡稳定性急剧下降^[1]。地下水的长期侵蚀作用还会加速结构面的扩展，促进边坡失稳。

2 高陡岩质边坡防护治理技术

2.1 主动防护技术

主动防护技术通过增强边坡岩体自身稳定性，从根源上降低失稳风险，核心在于改善岩体力学性能与结构完整性，主要包括以下锚杆（索）加固、预应力锚索框架梁、抗滑桩等主动支护措施。（1）锚杆（索）加固技术，通过向岩体内部植入锚杆（索），利用锚固段与岩体的黏结力，将不稳定岩块与深部稳定岩体相连，从而提高岩体抗滑力与整体稳定性。普通锚杆适用于浅层破碎岩体加固，通过全长黏结或端头锚固的方式，约束岩体变形；预应力锚索则通过施加预紧力，将岩体重力与外荷载转化为压应力，显著增强岩体抗剪强度，常用于深层滑动面的治理。（2）预应力锚索框架梁技术，是指锚杆（索）与混凝土框架的结合体，利用框架梁将多根锚索的拉力均匀传递至岩体表面，形成空间受力体系。该技术适用于高陡、破碎且面积较大的边坡，通过预应力主动约束岩体变形，同时框架梁的刚性结构可防止坡面风化与局部剥落。（3）抗滑桩技术，通过在滑坡体中嵌入钢筋混凝土桩，依靠桩身与稳定岩体的嵌固作用，抵抗滑坡推力。其具有刚度大、承载力高的特点，适用于深层滑坡与大型崩塌治理。

2.2 被动防护技术

被动防护技术侧重于在边坡外部设置拦截、缓冲结构，通过“以柔克刚”或刚性阻挡的方式，降低灾害发生时的冲击力，主要包括以下挡土墙、护坡网、柔性防

护系统等。(1)挡土墙,依靠自身重力或结构强度抵御滑坡推力与落石冲击。重力式挡土墙适用于小型边坡或土质边坡,利用墙体重力维持稳定;悬臂式与扶壁式挡土墙则通过钢筋混凝土结构增强抗倾覆能力,常用于城市边坡或空间受限区域。然而,挡土墙存在自重大、对地基要求高、生态修复困难等局限性,在高陡岩质边坡中需与其他技术配合使用。(2)护坡网技术,通过在坡面铺设金属网或土工格栅,防止坡面风化剥落与小型落石,可分为喷锚挂网与土工格栅护坡。喷锚挂网是在挂网后喷射混凝土,形成“网-混凝土-岩体”的复合结构,增强坡面整体性;土工格栅护坡则利用格栅与土体的摩擦作用,限制坡面土体位移,常用于土质或风化严重的岩质边坡。(3)柔性防护系统,由钢丝绳网、锚杆、支撑绳等组成,通过柔性结构吸收、缓冲落石冲击能量。主动柔性防护网紧贴坡面安装,起到加固与拦截双重作用;被动柔性防护网则设置于坡脚,可拦截速度高达数十米每秒的落石。

2.3 综合防护技术

单一防护技术往往难以满足高陡岩质边坡复杂的治理需求,综合防护技术通过结合主动与被动防护手段,形成多层次、全方位的防护体系,实现“内加固、外拦截、重生态”的综合治理目标。在设计综合防护方案时,需依据边坡地质条件、灾害类型及治理目标进行技术组合。对于深层滑动与浅层剥落并存的边坡,可采用预应力锚索框架梁进行深层加固,搭配喷锚挂网与植被防护处理浅层坡面;对于降雨诱发的滑坡,需在主动支护基础上增设地表排水与地下排水系统,降低水压力对边坡稳定性的影响。综合防护技术强调生态与工程的融合^[2]。在矿山边坡治理中,采用“抗滑桩+锚杆格构+生态袋护坡”的组合方案,抗滑桩与锚杆格构确保边坡稳定,生态袋内填充种植土与植被种子,实现了工程防护与生态修复的协同。

3 高陡岩质边坡防护治理方案优化设计

3.1 多目标优化设计原则

高陡岩质边坡防护治理方案优化需遵循“安全性、经济性、生态性”三位一体的设计原则。(1)安全性是核心目标,需确保防护措施能够有效抵御滑坡、崩塌等地质灾害,维持边坡长期稳定。在强地震烈度区,防护方案需优先考虑抗震性能,采用柔性防护系统或可耗能的锚杆(索)结构,提升边坡动力响应能力。(2)经济性原则要求在满足安全标准的前提下,合理控制工程成本。设计过程中需对比不同防护技术的造价、施工难度及维护成本,避免过度设计或防护不足。以某山区公路边坡治理为例,通过方案比选,采用“主动防护网+局部

抗滑桩”替代全断面挡土墙,在保证安全的同时,降低工程造价约30%。(3)生态性原则强调工程防护与生态修复的协同,在设计中应优先选择对环境扰动小、利于植被恢复的技术,如生态袋护坡、植被混凝土喷播等。减少施工过程中的水土流失与植被破坏,实现边坡治理与生态环境的和谐共生。

3.2 基于风险分级的防护方案选型

边坡风险分级是优化选型的基础。根据边坡稳定性评价结果、地质灾害发生概率及潜在危害程度,可将边坡风险划分为高、中、低三级。高风险边坡(如处于断层破碎带、频繁发生大规模滑坡的区域)需采用高强度主动支护技术,如预应力锚索框架梁结合抗滑桩,快速控制变形;中风险边坡可采用柔性防护网、锚杆加固等措施,兼顾安全与成本;低风险边坡则以生态防护为主,如植被覆盖、坡面排水等,防止风化剥落。风险分级还需结合工程重要性进行动态调整。对于铁路、高速公路等生命线工程周边的边坡,即使风险等级较低,也需适当提高防护标准,采用主动与被动防护相结合的方案,确保交通运营安全。

3.3 数值模拟在方案比选中的应用

数值模拟技术为方案优化提供了量化分析手段。常用软件如FLAC^{3D}、ANSYS等,可通过建立边坡地质模型,模拟不同防护方案下岩体应力、位移及稳定性变化。例如,在某水电站高边坡治理中,利用FLAC^{3D}模拟对比“预应力锚索加固”与“抗滑桩+锚杆格构”两种方案,结果显示后者可使坡体最大位移量降低25%,从而确定了更优方案。数值模拟还可用于动态工况分析,如模拟降雨、地震等极端条件下边坡的响应特征。通过敏感性分析,量化各因素对边坡稳定性的影响权重,辅助设计人员优化防护参数。可视化模拟结果有助于直观展示防护效果,为方案决策提供科学依据。

3.4 动态设计与信息化施工要点

动态设计强调根据现场地质条件变化与施工反馈,实时优化防护方案。施工前需通过地质勘探与监测数据,修正设计模型中的参数;施工过程中若发现实际地质条件与勘察报告不符(如揭露软弱夹层),需立即调整支护结构类型或参数。信息化施工依托物联网、大数据等技术,实现施工过程的实时监测与智能管理^[3]。通过布设位移传感器、应力计等设备,可动态获取边坡变形数据,并与设计阈值对比,一旦触发预警,立即调整施工进度或优化防护措施。

4 高陡岩质边坡防护治理监测与评估

4.1 监测内容与方法

高陡岩质边坡的监测内容围绕边坡稳定性核心要素展开,主要包括以下位移、应力、渗流及环境因素监测。(1)位移监测是判断边坡稳定性的直观指标,分为地表位移与深部位移监测,地表位移常用全站仪、GPS进行周期性测量,可精确获取毫米级位移变化;深部位移则通过测斜仪、多点位移计嵌入钻孔,监测不同深度的岩体滑动情况。(2)应力监测聚焦于岩体内部应力状态及支护结构受力变化,通过在岩体或锚杆(索)上安装应力传感器,实时获取压应力、拉应力数据,评估结构承载能力。(3)渗流监测对降雨诱发的边坡失稳具有关键意义,利用孔隙水压力计、渗压计等设备,监测地下水位变化与渗流速度,分析水压力对边坡稳定性的影响。(4)气象站、地震监测仪等设备还可实时采集降雨、地震等环境数据,为边坡稳定性分析提供外部条件参数。

监测方法呈现传统技术与新兴技术融合的趋势。全站仪、水准仪等传统测量技术具有操作简便、成本较低的优势,适用于常规边坡监测;而光纤传感技术凭借分布式测量、抗电磁干扰等特性,可实现长距离、高精度的位移与温度监测;无人机LiDAR技术则通过定期航测,快速获取边坡地形变化,在大面积边坡监测中展现出高效性。

4.2 评估指标与体系

边坡稳定性评估需建立多维度指标体系,核心指标包括以下安全系数、变形速率、裂缝发展、应力变化及渗流特征。(1)安全系数是定量评估边坡稳定性的关键参数,通过极限平衡法或数值模拟计算得出,当安全系数小于1时,表明边坡处于不稳定状态。变形速率反映边坡位移的动态变化,若日变形量超过阈值(如5mm/d),则需警惕失稳风险。(2)裂缝发展监测关注裂缝长度、宽度及延伸方向的变化,裂缝加速扩展往往是边坡失稳的前兆。(3)支护结构应力变化指标用于评估防护措施的有效性,当锚杆(索)应力持续超限,可能提示结构失效或边坡荷载异常。渗流指标则通过地下水位变化、渗流量大小,分析水作用对边坡稳定性的影响。基于上述指标,可构建层次分明的评估体系。将指标划分为基

础指标(位移、应力)、诱发指标(渗流、环境)和综合指标(安全系数),采用层次分析法(AHP)或模糊综合评价法,对边坡稳定性进行分级评估,将结果划分为稳定、基本稳定、欠稳定和不稳定四个等级,为治理决策提供量化依据。

4.3 监测数据分析与预警

监测数据的深度分析是实现精准预警的前提。通过时间序列分析,建立位移-时间、应力-时间曲线,识别数据趋势与异常波动;结合回归分析,建立位移与降雨、库水位等因素的相关性模型,预测边坡变形趋势。例如,通过分析历史数据发现,某边坡在连续降雨3天后位移增速显著加快,据此可建立降雨-位移预警模型。预警机制需设定多级阈值,根据监测指标的危险程度,分为黄色、橙色和红色预警^[4]。黄色预警提示边坡出现轻微异常,需加强监测频率;橙色预警表示边坡稳定性下降,应启动应急排查;红色预警则意味着边坡处于高危状态,需立即采取人员撤离、紧急支护等措施。

结束语

高陡岩质边坡防护治理需以地质条件分析为基础,通过主动与被动防护技术协同、多目标优化设计及智能监测预警,构建全生命周期防控体系。研究表明,基于风险分级的综合防护方案可显著提升治理效能,数值模拟与动态设计技术为方案优化提供了量化依据,而生态修复与工程防护的融合则是实现可持续发展的关键。

参考文献

- [1]王宏铭.高陡仰坡隧道洞口危岩落石自动监测与防护技术研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(1):159-165.
- [2]王旭,杨志一,马增,徐志强,张忠光.软破岩质高陡边坡治理方案优化研究[J].有色金属(矿山部分),2024,76(2):102-107+119.
- [3]邵普法,李长蔚,郑伟,崔秀敬,叶宇.基于单面边坡结构的高陡边坡防护加固技术[J].中国建筑金属结构,2025,24(3):86-88.
- [4]吴祖成,郭山峰,何伟民.矿山高陡岩质边坡治理应用研究[J].岩土工程技术,2021,35(1):48-51.