

山区水利工程边坡稳定性防护措施探讨

钟文东 张 雷 李高歌

西安黄河规划设计有限公司 陕西 西安 710000

摘要: 山区水利工程边坡稳定性受地质、工程活动及气候等多因素影响,易引发滑坡等灾害,威胁工程安全与生态环境。防护需综合工程与生态措施:工程上采用挡土墙、抗滑桩、锚索框架梁等支挡结构,结合排水系统降低水压力;生态上利用植被恢复与生态护坡技术,如三维植被网、客土喷播等,增强坡面抗侵蚀能力。同时,动态监测与预警系统可实时捕捉变形数据,为应急响应提供依据,实现“短期稳定”与“长期可持续”的统一。

关键词: 山区水利工程;边坡稳定性;防护措施

引言:山区水利工程对于区域发展意义非凡,在灌溉、发电、供水等方面发挥着关键作用。然而,山区独特的地形地貌、复杂的地质构造,加之工程建设中的开挖、爆破等活动,以及降雨、库水位变化等自然因素影响,让边坡稳定性面临诸多挑战,极易出现滑坡等地质灾害。这不仅威胁工程安全运行,还会破坏生态环境。为此,深入探讨有效的边坡稳定性防护措施具有重要的现实意义。

1 山区水利工程边坡失稳机理分析

1.1 地质环境因素

(1) 地形地貌是边坡失稳的基础条件。坡度越大,边坡岩土体所受重力分力越大,抗滑力相对减弱,易发生滑动;坡高增加会使边坡潜在滑面的下滑力显著提升,且高边坡受外界扰动的影响更明显。岩土体类型直接决定边坡稳定性,坚硬完整的岩体抗剪强度高,边坡稳定性好,而松散土体或风化破碎岩体抗剪性能差,易因外力作用引发失稳。(2) 地质构造对边坡稳定起关键控制作用。断层会破坏岩体完整性,形成软弱结构面,若断层与边坡坡面走向相近,易成为滑动面,导致边坡沿断层滑动;节理发育会使岩体被分割成小块,降低整体强度,雨水等易沿节理渗透,进一步削弱岩体稳定性;软弱夹层强度远低于周围岩体,在边坡受力时易发生剪切变形,成为边坡失稳的薄弱环节^[1]。(3) 水文地质条件是边坡失稳的重要诱发因素。地下水会增大岩土体容重,降低有效应力,同时软化岩土体,尤其是软弱夹层和风化岩层,使其抗剪强度大幅下降;降雨渗透会快速提高边坡内部含水率,一方面增加岩土体重力,另一方面雨水沿裂隙渗透产生动水压力,加速边坡失稳进程。

1.2 工程活动影响

(1) 边坡开挖与爆破振动会直接破坏边坡原有平衡。开挖会改变边坡形态,减小坡体支撑,使边坡应力重新

分布,形成应力集中区,若开挖坡度过陡或开挖深度过大,易引发边坡坍塌;爆破振动会产生瞬时冲击力,破坏岩体结构,加剧节理扩展,降低岩土体强度,为边坡失稳创造条件。(2) 库水位波动与浸润线变化对边坡稳定影响显著。库水位骤降时,边坡内部孔隙水压力不能及时消散,形成渗透力,推动边坡向临空面滑动;浸润线上升会使边坡下部岩土体饱和,抗剪强度降低,同时增加边坡自重,导致边坡稳定性下降,尤其在水位反复波动情况下,边坡失稳风险会持续增加。(3) 植被破坏与生态失衡会加剧边坡失稳。植被根系能固持岩土体,减少水土流失,植被破坏后,岩土体失去保护,易受雨水冲刷侵蚀,导致边坡表层溜塌;同时生态失衡会使边坡区域水文循环紊乱,进一步恶化边坡地质条件,加速边坡失稳进程。

2 山区水利工程边坡稳定性评价方法与技术

2.1 定性分析方法

(1) 工程地质类比法是基础评价手段,通过对比已建类似工程的边坡地质条件、失稳案例与当前工程的相似性,判断边坡稳定性等级。该方法依赖工程师经验,适用于前期勘察阶段,能快速初步评估边坡风险,但精度受类比案例的匹配度影响。(2) 赤平投影法借助几何投影原理,将边坡岩体中的结构面(如断层、节理)与坡面的空间关系投影到赤平极射面上,分析结构面组合对边坡滑动的控制作用。通过判断结构面是否构成滑移体,明确潜在失稳模式,为后续定量分析提供方向,尤其适用于岩质边坡的结构稳定性判断。(3) SMR法(边坡岩体质量分类法)通过对岩体完整性、结构面特性、地下水状态等指标评分,结合边坡坡角与结构面产状的关系修正评分,最终确定边坡稳定性系数范围。该方法兼顾地质因素与边坡几何特征,操作简便,可快速划分边坡稳定等级,为工程设计提供初步依据。

2.2 定量分析方法

(1) 极限平衡法是应用最广泛的稳定性计算方法,核心是假设边坡沿潜在滑面发生剪切破坏,通过建立力或力矩平衡方程求解安全系数。其中Bishop法考虑条间水平力,适用于圆弧滑面,计算精度较高;Janbu法可处理非圆弧滑面,通过迭代计算条间力,能适应复杂边坡几何形态,两者均需准确获取岩土体抗剪强度参数,是工程设计中的核心定量工具。(2) 数值模拟法通过构建边坡力学模型,模拟岩土体在不同工况下的应力、位移分布。有限元法(FEM)将边坡离散为有限单元,基于连续介质力学理论计算应力应变,可分析边坡渐进破坏过程;离散元法(DEM)将岩体视为离散颗粒集合,能模拟节理岩体的非连续变形与失稳破坏,适用于破碎岩质边坡。两种方法可直观呈现边坡内部力学响应,为风险评估提供精细化数据支持^[2]。

2.3 监测与预警技术

(1) 变形监测技术实时捕捉边坡位移变化, GPS技术可实现大范围、高精度的三维位移监测,适用于宏观边坡变形跟踪; InSAR技术通过卫星遥感获取边坡地表形变场,能覆盖难以到达的偏远区域; 测斜仪埋设于边坡内部,可监测不同深度的水平位移,精准定位潜在滑面位置,三者结合形成“地表-深部”立体监测网络。(2) 孔隙水压力监测与渗流分析通过在边坡不同深度布设渗压计,实时监测地下水压力变化,结合渗流数值模拟,分析雨水入渗、库水位波动对边坡渗流场的影响。当孔隙水压力异常升高时,提示边坡抗剪强度下降,为失稳预警提供水文学依据。(3) 智能预警系统集成多源监测数据(变形、渗压、气象等),借助物联网实现数据实时传输,通过大数据分析构建稳定性预测模型。当监测指标超过预设阈值时,系统自动发出预警信号,联动工程应急响应,实现从“被动监测”到“主动预警”的转变,大幅提升边坡安全管控效率。

3 山区水利工程边坡稳定性防护措施

3.1 工程防护措施

(1) 支挡结构是边坡抗滑的核心保障,通过直接承受或传递边坡下滑力维持稳定。挡土墙适用于中小型边坡,重力式挡土墙依靠自身重量抵御滑力,锚杆式挡土墙通过锚杆锚固岩体增强抗滑能力;抗滑桩深入稳定岩层,可单独或成排布置,能有效阻挡边坡沿潜在滑面滑动,尤其适用于深层滑动风险的边坡;锚索框架梁结合锚索的高强度张拉与框架梁的分散受力特性,将边坡表层岩土体与深部稳定岩体连接,既能限制边坡变形,又能保护坡面完整性,适用于高陡岩质边坡。(2) 排水系

统通过控制边坡水文条件降低失稳风险,分为地表与地下排水两类。地表排水沟沿边坡坡顶、坡脚及平台布设,可快速疏导雨水,避免雨水汇集下渗,减少表层溜塌;地下排水孔垂直或倾斜插入边坡内部,能排出岩土体孔隙水,降低孔隙水压力,常用透水花管包裹滤料防止堵塞;截水墙设置于边坡潜在滑面上方,可阻断地下水横向渗流,避免浸润线上升导致岩土体强度下降,是控制深层边坡渗流的关键措施^[3]。(3) 加固技术通过改善边坡岩土体力学性能提升稳定性。注浆加固将水泥浆或化学浆液注入岩体裂隙或松散土体,填充空隙并胶结岩土颗粒,增强岩体完整性与抗剪强度,适用于风化破碎岩质边坡;土钉墙由土钉、喷射混凝土面层组成,土钉深入边坡内部形成复合土体,可提高边坡整体抗滑能力,多用于松散土边坡;微型桩群直径小、施工灵活,可密集布置于边坡表层,既能加固浅层土体,又能作为临时支护配合后续工程,适用于复杂地形或施工空间受限的场景。

3.2 生态防护措施

(1) 植被恢复通过生物作用实现边坡长期稳定,采用草本、灌木、乔木立体配置构建生态群落。草本植物(如狗牙根、紫花苜蓿)生长快,可快速覆盖坡面,减少雨水冲刷;灌木(如紫穗槐、沙棘)根系发达,能深入土层固持土体,增强坡面抗剪能力;乔木(如松树、柏树)适用于边坡上部或平台,可形成高大植被屏障,调节区域微气候,三者结合形成多层次防护体系,兼顾固土与生态修复功能,适用于坡度较缓、气候适宜的边坡^[4]。(2) 生态护坡技术是植被恢复的重要辅助手段,通过人工技术创造适宜植被生长的环境。三维植被网由高分子材料制成,铺设于坡面后可固定土壤,防止水土流失,同时为种子萌发提供支撑;植生袋内装有营养土与植物种子,堆叠于边坡后能快速形成稳定坡面,适用于陡峭或岩质裸露边坡;客土喷播将客土、种子、粘结剂等混合后高压喷播至坡面,可在岩质或贫瘠边坡构建土壤层,为植被生长提供基础,是生态护坡中应用广泛的技术之一。

3.3 综合防护策略

(1) “工程+生态”协同防护模式融合工程措施的快速稳定与生态措施的长期修复优势。工程措施(如抗滑桩、排水孔)先控制边坡重大失稳风险,为生态恢复创造条件;生态措施(如客土喷播、植被配置)后续覆盖坡面,既能巩固工程防护效果,又能减少工程措施对生态环境的破坏,实现“短期稳定”与“长期可持续”的统一,适用于对生态环境要求较高的山区水利工程。(2) 动态监测与动态设计理念打破传统“一次性设计”局限,基于边坡监测数据实时调整防护方案。通过GPS、测斜仪

等设备监测边坡变形与渗压变化,若发现监测数据异常,及时分析原因并优化防护措施,如增设排水孔、补打锚索等;动态设计可适应边坡地质条件的复杂性与不确定性,避免因初始设计偏差导致防护失效,提升防护措施的针对性与有效性^[5]。(3)应急抢险与灾后修复技术是防护体系的重要补充,用于应对突发失稳事件。应急抢险包括快速堆筑反压体、布设临时排水设施、张拉应急锚索等,可在边坡出现滑塌迹象时迅速控制险情,减少灾害损失;灾后修复需结合边坡破坏程度,采用“局部加固+整体修复”策略,如对坍塌区域清理后重建支撑结构,对受损坡面重新实施生态护坡,同时排查隐患并完善监测系统,防止二次灾害发生。

4 山区水利工程边坡稳定性防护的挑战与对策

4.1 当前面临的挑战

(1)复杂地质条件下的技术适应性不足,山区水利工程常穿越断层破碎带、风化岩层等特殊地质区域,现有支挡结构、加固技术难以完全匹配动态变化的地质环境。例如,在岩溶发育区,传统排水系统易因溶洞堵塞失效;在软硬岩互层边坡,常规数值模拟难以精准预测非均质岩体的变形规律,导致防护措施针对性不强。(2)极端气候与长期稳定性问题凸显,近年来暴雨、台风等极端天气频发,短时强降雨易引发边坡表层溜塌,而库水位长期周期性波动会加速岩土体疲劳损伤,降低抗剪强度。同时,边坡防护工程长期暴露于自然环境中,受风化、侵蚀影响,材料性能逐渐衰减,现有设计未充分考虑长期老化效应,难以保障工程全生命周期稳定。(3)生态保护与工程安全的平衡难度大,部分工程为追求短期稳定,过度采用混凝土支挡、爆破开挖等方式,破坏边坡原生植被与土壤结构,加剧水土流失;而单纯依赖生态防护措施时,在高陡边坡或地质条件恶劣区域,植被生长缓慢,初期防护能力不足,难以满足工程安全要求。

4.2 未来发展方向

(1)智能化监测与预警技术将实现升级,通过融合北斗高精度定位、分布式光纤传感等技术,构建“空天

地”一体化监测网络,实时捕捉边坡微小变形与渗流异常;结合AI算法优化预警模型,提高风险识别准确率,实现从“事后处置”到“事前预判”的转变,提升应急响应效率。(2)新型材料与绿色施工技术加速应用,研发高强度、耐腐蚀的生态复合材料(如纤维增强土、生物降解锚杆),在保障防护性能的同时减少环境影响;推广模块化施工、非爆破开挖等绿色工艺,降低对边坡地质环境的扰动,实现工程建设与生态保护协同推进。(3)多学科交叉研究成为核心突破路径,整合岩土工程的力学分析、生态学的植被修复、灾害学的风险评估等理论,建立多维度耦合的边坡稳定性评价体系;通过跨领域技术融合,开发“地质-生态-气候”协同的防护方案,破解复杂条件下边坡稳定与生态保护的双重难题。

结束语

山区水利工程边坡稳定性防护意义重大,关乎工程安全、生态平衡及周边居民生活。本文围绕多种防护措施展开探讨,无论是工程类的挡土墙、锚固技术,还是生态类的植被护坡,亦或是智能监测手段,都为提升边坡稳定性提供了有效路径。未来,应进一步结合山区实际,强化多学科交叉融合,不断优化防护措施,提升其科学性与实用性,为山区水利工程的可持续发展筑牢安全根基。

参考文献

- [1]吴若冰,张腾.水利工程施工中边坡开挖支护技术的应用[J].治淮,2025,(03):47-48.
- [2]辛华伟.影响水利工程边坡稳定的因素及处理措施[J].科技资讯,2022,20(16):65-67.
- [3]苟焕宙,李仕钊.水利工程建设过程中边坡加固的处理措施探讨[J].冶金管理,2021,(13):107-108.
- [4]肖霖.水利水电工程施工中的边坡防护技术及其应用[J].农村科学实验,2025,(12):115-117.
- [5]袁欢.水利工程施工中的边坡开挖及防护技术[J].水上安全,2024,(03):160-162.