

水利工程施工中边坡稳定性控制技术

吴刚 孙世坤

济南市槐荫区工程质量与安全中心 山东 济南 250000

【摘要】：边坡稳定性控制作为水利工程施工的关键技术环节，直接关联工程安全与施工效率，水利工程常坐落于复杂地质环境当中，边坡失稳容易诱发滑坡、塌方之类地质灾害，给施工带来不小风险，本文聚焦“边坡稳定性控制技术”展开研究，着重剖析影响边坡稳定性的主要因素，像地质构造、水文条件及施工扰动等，系统探究常用的边坡支护形式与加固办法，涵盖锚固支护、喷射混凝土、排水降压等关键技术手段，结合实际工程应用，给出不同工况下的合理控制策略，目标是为增强水利工程施工中边坡稳定性提供科学依据与技术支撑。

【关键词】：边坡稳定性；支护技术；水利工程；地质灾害；施工安全

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.055

引言

我国水利工程建设规模持续拓展，施工区域地形地质条件渐趋复杂，边坡稳定性问题已成为制约工程进度与安全的关键环节，水库、大坝及输水渠道这类典型工程里，高陡边坡并不少见，处理失当不仅可能引发严重安全事故，还会对生态环境与周边居民生活造成影响，复杂环境下实现边坡稳定性的有效控制，正是当前水利工程施工技术研究的核心方向，岩土工程理论的发展与支护材料的进步，让近年来多种新型边坡治理技术得以涌现，为工程实践提供了更丰富的选择，在这样的背景下，深入探究契合水利工程特点的边坡稳定性控制技术，具备重要的现实意义与应用价值。

1 水利工程中边坡失稳的主要成因分析

1.1 地质构造对边坡稳定性的影响

地质构造作为影响边坡稳定性的基础要素，自身复杂程度直接左右着边坡岩土体的力学性能以及变形破坏特点。边坡稳定性分析是确保边坡开挖作业安全的关键步骤，其原理涉及对边坡的自然状态和外部影响进行综合分析。首先，边坡的稳定性与土质或岩石的类型、密实度、剪切强度等因素密切相关。土质边坡往往受水文条件的影响较大，降雨、地下水流等因素可能引起滑坡或崩塌。其次，边坡的几何形状与坡度越大，稳定性越差。坡度较陡的边坡更容易发生坍塌，因此在设计和施工时要特别注意坡度的选择和调整。水利工程范畴内，褶皱、断层、节理这类地质构造会弱化岩体整体强度，形成潜在滑动面，降低边坡抗剪性能^[1]。断层带内部往往充填破碎岩屑或泥质物，遭水侵蚀容易软化，造成结构面摩擦力下滑，引发滑坡，岩层产状对于稳定性作用突出，顺向坡容易沿层

面滑动，反向坡则趋于稳定，施工开挖改变原有地应力场，岩体内部若存在复杂裂隙网络，会加剧卸荷回弹与松弛变形，加大失稳可能。

1.2 水文条件变化引发的边坡变形机制

水文工程里，水文条件对边坡变形的作用关键，过程复杂且带有累积效应，降雨、地下水位变动及水库蓄水、泄洪这类情况会改变坡体孔隙水压力布局，降低有效应力，弱化边坡稳定状态，雨水渗入让土体饱和容重加大、抗剪强度下滑，黏性土或风化岩层中表现得更为突出，地下水抬升还会形成上浮力，增加滑动可能，库区边坡在水位急剧下降时，容易因内外压力失衡引发滑坡，施工过程需统筹水文动态影响，结合降水特点与工程时长，对边坡反应做出科学评判，辅以有效防护手段，保障工程安全及长期稳固。

1.3 施工扰动对边坡结构的破坏作用

施工扰动作为导致水利工程边坡结构破坏的重要外部因素，作用机制复杂且影响深远，施工过程中的开挖、爆破、机械碾压及支护不及时这类操作，会剧烈改变岩土体应力状态，引发结构失稳，高陡边坡区域尤其容易产生应力集中和卸荷回弹，加剧变形趋势，地下水系统受到扰动（像基坑降水不当）会改变孔隙水压力，降低抗剪强度，弱化边坡稳定性，施工周期长、工序衔接不合理会让边坡长期暴露，加速风化与侵蚀，造成地质体劣化，施工中需高度重视扰动风险，科学安排工序、控制开挖强度，结合监测手段，减缓对边坡结构的破坏，保障工程安全。

2 常见边坡稳定性控制技术及其适用性

2.1 锚固支护技术在高陡边坡中的应用

锚固支护技术把高强度钢绞线或钢筋嵌入稳定基岩或深部土层，构成拉力支撑体系，可有效阻止高陡

边坡岩土体滑移和崩塌,设计时依据地质条件明确锚固件长度与直径,保证能深入稳定地层,提供充足抗拔力,再参照边坡形态与滑动面位置恰当布置锚固点^[2]。面对复杂多层结构边坡,运用多层、多向锚固强化整体稳定状态,注浆工艺既能增进粘结强度,又能提升耐久性,避免锈蚀,施工期间必须严格把控钻孔、注浆及张拉等步骤,保障支护成效。

2.2 喷射混凝土与格构梁联合支护的作用机理

喷射混凝土与格构梁联合支护技术在边坡稳定性控制中优势突出,二者协同足以提升边坡整体稳定性和耐久性,喷射混凝土作为快速高效的表面防护手段,短时间就能形成坚固保护层,覆盖边坡表面,阻止岩石风化、土体侵蚀,封闭细小裂缝防止水分渗入加剧破坏,粘结性佳,可紧密贴合不规则岩土表面,增强表层整体性,格构梁进一步强化边坡内部结构稳定性,由纵横交错的钢筋混凝土梁构成,深入边坡体与岩土体紧密结合,形成立体支撑网络,既能分散压力,又能将局部不稳定区域荷载传递至稳定基岩或深层土壤,避免局部失稳引发整体滑动,格构梁设计兼顾排水,预留孔道有助于降低孔隙水压力,提高抗剪强度,这种联合支护方式适用于地质复杂、高陡边坡等需高度稳定的场合,为水利工程边坡治理提供坚实技术保障。

2.3 排水降压措施在水文影响控制中的实践效果

排水降压措施在边坡稳定性控制中地位关键,对水文影响显著的地质环境而言,足以降低岩土体孔隙水压力,增强抗剪强度,减少滑坡隐患,实施时分表面与地下排水系统,表面排水借助截水沟、排水沟引导地表径流远离边坡,避免水分渗入以减轻饱和度及孔隙水压力,地下排水系统相对复杂,包含盲沟、排水井、水平排水孔等,可直接降低边坡深部水位,缓解地下水引发的不稳定因素,大型水利工程里,深层水平排水孔结合竖向排水井能有效排出内部积水,改善岩土体力学性质,这类措施可与锚杆支护、喷射混凝土等加固技术配合,既解决水文问题,又提升整体稳定性,为复杂地质下的水利工程提供安全保障,实际操作需依据地质条件和施工要求灵活选择布置排水设施,实现最佳效果。

3 边坡监测与预警体系的构建与实施

3.1 位移监测技术在边坡动态评估中的应用

位移监测技术作为边坡动态评估的核心手段,在水利工程中常用于实时追踪与分析边坡变形,关键区域布置的高精度传感器或观测点,能获取施工扰动或

自然因素影响下的边坡表面及深部岩土体位移数据,以此揭示变形特征和发展趋势,GNSS、全站仪、测斜仪及分布式光纤传感技术等常用方法,可按工程需求和地质条件组合应用,实现从宏观到微观的多层次监测^[3]。大型水库建设里,GNSS能连续观测整体位移,测斜仪可探测深层滑动面位置与趋势,这些数据为判断边坡稳定性提供定量依据,助力识别潜在滑动区域及评估风险,信息技术发展让位移监测向自动化、远程化演进,提升了数据采集的时效性和准确性,为预警机制建立及工程干预措施制定提供坚实支撑。

3.2 自动化监测系统提升风险识别能力

自动化监测系统在边坡稳定性控制中地位关键,对提升风险识别与动态预警优势突出,系统集成位移计、倾角仪、应力传感器及地下水位监测装置等,全天候实时监测边坡岩土体的变形、应力变化及水文响应等关键参数,相较传统人工巡检,数据获取频率和精度更高,能在边坡微小变形阶段捕捉异常,实现早期预警,借助无线通信和云计算,数据远程传至控制中心,经专业软件自动处理与预测,提升决策科学性和响应速度,复杂地质或高风险区,系统可设阈值触发报警,指导及时加固或疏散。

3.3 基于监测数据的边坡稳定性动态评价方法

基于监测数据的边坡稳定性动态评价,作为水利工程边坡安全管理的重要手段,依托多种传感器与自动化监测系统持续采集位移、应力、孔隙水压力、地表沉降等关键参数,借由数据分析模型实时评估变形趋势,不同于传统静态评价,更注重时间序列变化特征,可捕捉失稳前的微小异常实现早期预警,实施中运用多元回归、灰色关联度、神经网络等模型处理数据,识别主导因素及演化规律,位移速率突变点可判断是否进入加速变形阶段,结合孔隙水压变化剖析降雨或地下水的触发机制,建立分级预警阈值体系,按变形等级启动应急措施,为现场提供科学决策支持。

4 典型水利工程施工案例分析

4.1 某水库工程边坡加固设计与实施过程

某大型水库坝肩40米以上岩质高边坡,因断层发育叠加强降雨影响,已出现裂隙扩展与表层剥落现象,潜藏滑动隐患。设计阶段运用地质雷达配合钻孔勘探手段,细致勘察岩体结构、节理分布及地下水情况,借助极限平衡法完成稳定性定量评估,最终确定综合加固方案^[4]。施工环节先构建深层锚固体系(含预应力锚索与系统锚杆)强化整体结构,再以喷射混凝土结合钢筋格构梁实施表面支护,防范风化剥落与雨水

冲刷。边坡顶部及平台同步设置截排水沟削减下渗水量，开挖作业采用分段跳槽方式减少大规模扰动，结合位移动态监测及时调整参数，确保加固工程安全推进，为后续施工创造稳定环境。

4.2 施工过程中突发滑坡的应急处置措施

水利工程施工环节，突发滑坡带有偶然性与突发性，需快速有效处置以控制险情，发生后先封锁危险区域，防止次生灾害伤及人员设备，再组织地质技术人员勘查滑坡范围、规模及影响深度，结合位移监测数据判断发展趋势，之后采用钢花管注浆、微型桩、锚杆网喷等临时支护手段加固，外围设置排水设施降低地下水位，削减孔隙水压力影响，必要时削坡减载降低下滑力，全过程依托动态监测与实时评估，保障措施科学安全，为后续治理创造条件。

4.3 成功控制边坡失稳的关键技术路径

水利工程施工阶段，边坡失稳控制离不开多种技术协同运用，系统性支护设计构成核心环节，“锚杆+喷射混凝土+格构梁”的组合体系能增强岩土体整体性，防范局部破坏引发连锁反应。排水降压同样关键，深层排水孔、盲沟、截水沟等设施可降低地下水位及孔隙水压力，提升岩土体抗剪强度，减缓滑动趋势。施工过程引入动态监测系统，GNSS、多点位移计和自动化传感器实时追踪变形，为决策提供数据支撑，以此调整支护参数和工艺，实现动态优化。复杂地质条件下的高风险边坡可采用预加固技术，高压注浆能改善力学性能，抗滑桩、预应力锚索则可增强抗滑能力。

5 边坡稳定性控制技术的优化方向与工程建议

5.1 多因素耦合作用下的支护方案优化策略

水利工程边坡支护得综合考量地质状况、水文特征及施工扰动等多方面因素，搭建起多层次且动态化的防护体系。传统单一措施很难满足长期稳定需求，采用“排水孔+抗滑桩+预应力锚索”这类组合支护形式，搭配数值模拟技术来优化设计方案，能精准预估

边坡变形与应力分布^[5]。施工过程要强化工序协调，做到开挖与支护同步进行、分层分级推进，降低附加应力影响。材料选择上优先取用高强度、耐久性佳的复合材料，增强支护结构的适应性并延长使用寿命。

5.2 绿色生态防护技术在边坡治理中的融合应用

生态文明建设持续推进，绿色生态防护技术在水利工程边坡稳定控制中分量渐增，这项技术保障边坡安全，将植被恢复与工程措施相融合，达成生态保护与地质灾害防治的双重目标。应用时采用植生袋、三维植被网、喷播植草等，于边坡表面构建植物根系网络，强化表层抗冲刷能力，减轻雨水侵蚀。配合格构梁或锚杆框架梁等提供力学支撑且预留绿化空间，让植被依附生长，形成生态复合稳定体系。

5.3 提升施工人员安全意识与技术水平的管理措施

现场需建立常态化岗前培训，围绕边坡失稳预警识别、支护规范标准、应急处置流程等开展理论与实操教学，让作业人员切实掌握关键操作要点与风险防控技巧。信息化平台的引入，借助虚拟仿真模拟滑坡等突发场景，能有效增强应急响应与判断能力。施工单位定期组织技能考核和安全测评，将结果纳入绩效管理，以此形成有效的激励约束模式，专职安全员全程监督施工过程，及时纠正违规操作，严格管控各类风险源。

6 结语

边坡稳定性控制作为水利工程施工的关键环节，直接关联工程安全与进度推进，分析失稳主要成因，结合支护技术实践应用，能够明确排水降压、结构加固及动态监测等措施的作用机制，典型案例足以验证应急处置与综合治理的实际成效，据此提出的优化支护方案、融合生态防护理念及加强施工管理等改进方向，可提供多维度技术支持，在工程建设向复杂地质区域延伸的过程中，未来有必要推动智能化监测的实际应用，完善风险预警机制，促进技术朝着精细化、绿色化方向发展，为工程安全提供更为坚实的保障。

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] 周珣.水利工程施工中边坡开挖支护技术研究[J].工程建设与设计,2024,(12):150-152.
- [3] 吴雷.岩土工程中边坡加固工程施工关键技术的应用[J].四川建材,2025,51(03):159-161+169.
- [4] 杨明.岩土工程中边坡加固工程施工技术要点及价值探讨[J].中国住宅设施,2024,(05):68-70.
- [5] 张银忠.矿山工程施工中边坡稳定问题及地质灾害治理方法[J].世界有色金属,2024,(11):139-141.