

水利水电工程施工过程中边坡稳定性控制技术及其案例研究

刘茂魁¹ 李 鹏²

1. 河南黄河河务局开封黄河河务局 河南 开封 475000

2. 开封黄河工程开发有限公司 河南 开封 475000

摘要: 本文系统阐述了水利水电工程边坡失稳的主要机理与影响因素, 全面梳理并评述了当前主流的边坡稳定性分析理论与评价方法。在此基础上, 重点论述了施工过程中涵盖勘察、设计、施工及监测全生命周期的边坡稳定性综合控制技术体系, 包括精细化地质勘察、动态设计优化、先进支护加固技术(如预应力锚索、抗滑桩、格构梁等)以及智能监测预警系统。最后, 通过溪洛渡水电站右岸高边坡的国内重大工程案例, 深入剖析了其面临的挑战、采取的关键控制技术及取得的成效, 总结了成功经验。研究表明, 构建“地质先行、动态设计、精细施工、全程监控”的一体化管控模式, 是保障大型水利水电工程高陡边坡施工期安全稳定的有效途径。

关键词: 水利水电工程; 施工期; 边坡稳定性; 控制技术; 智能监测; 案例研究

引言

水利水电工程是国家能源与水资源调控的关键基础设施, 多选址于高山峡谷, 建设时会形成大量人工高陡边坡。这些边坡本就处于临界或亚稳定状态, 工程施工如坝基等部位开挖, 会改变地应力场和地下水渗流场, 打破力学平衡, 易引发滑坡等地质灾害。历史上, 边坡失稳造成诸多重大事故, 带来经济损失、工期延误, 威胁人员安全, 破坏生态环境。当下, 随着国家战略推进, 巨型水电站项目在地质复杂区域上马, 边坡高度大、岩体破碎, 且受高地应力等不利因素影响, 稳定性问题成工程推进的“卡脖子”难题。传统分析方法难反映复杂地质体真实力学行为, 现代工程需构建综合性控制技术体系。本文将梳理施工期边坡稳定性核心理论与关键技术, 剖析典型案例, 总结经验路径, 为类似工程安全建设提供指导。

1 水利水电工程边坡失稳机理与影响因素

1.1 主要失稳破坏模式

水利水电工程高边坡失稳破坏模式多样, 受岩土体组成、结构面组合及外部荷载影响。圆弧形滑动常见于均质土质或全风化岩体边坡, 在重力作用下, 边坡沿潜在圆弧面整体下滑。平面滑动多出现在有优势结构面(如层面、断层)的边坡, 当结构面倾向与坡面一致且倾角小于坡面角时, 岩体易沿软弱面滑移。楔形体滑动由多组结构面切割岩体形成楔形块体, 在重力等外力驱动下沿结构面交线推出坡外^[1]。倾倒破坏发生在反向坡, 陡倾板状或柱状岩体在自重弯矩作用下弯曲、折断并向坡外倾倒。在高地应力区, 深部坚硬岩体开挖卸荷后, 内部弹性应变能释放, 可能导致溃屈破坏, 岩体瞬间碎裂弹射。

1.2 关键影响因素

边坡稳定性由内在地质与外部环境共同作用。内在因素中, 岩土体物理力学性质是基础, 其强度、变形模量等参数决定抗破坏能力, 软弱夹层或断层破碎带是薄弱环节。区域地质构造及结构面特征塑造潜在破坏路径与模式, 深埋或构造活动强区域, 初始地应力高, 开挖引发应力重分布, 带来岩爆等难题。外部因素起触发和加剧作用, 水通过多种途径削弱岩体抗剪强度; 工程施工改变地应力状态, 降低边坡稳定性; 地震荷载增大下滑力, 是抗震设计核心要素; 施工期间坡顶附加荷载也可能诱发失稳。

2 边坡稳定性分析理论与评价方法

准确评价边坡稳定性是制定有效控制措施的前提。目前, 主要采用以下几类方法:

2.1 极限平衡法(Limit Equilibrium Method, LEM)

这是工程界应用最为广泛的传统方法。其基本思想是假定滑动面形状(如圆弧、平面、折线等), 将滑动体划分为若干条块, 根据静力平衡条件建立力或力矩平衡方程, 求解安全系数(Fs)。常用的方法有Bishop法、Janbu法、Morgenstern-Price法等。LEM计算简便、概念清晰, 但其无法考虑岩土体的应力-应变关系, 且滑动面需人为假定, 对于复杂地质条件下的非连续介质, 其结果可能存在较大偏差。

2.2 数值分析法

随着计算机技术的发展, 以有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)、离散元法(DEM)为代表的数值模拟方法已成为边坡稳定性分析的主流工具。(1)连续介质模型(FEM/FDM): 适用于相对完整的岩体或土体。通

过建立边坡的几何、材料属性及边界条件模型,可以模拟开挖、降雨、蓄水等全过程的应力、应变及位移场演化,并可通过强度折减法(SSR)自动搜索最危险滑动面和安全系数,克服了LEM的局限性。(2)非连续介质模型(DEM/UDEC/3DEC):特别适用于节理裂隙发育、块体结构明显的岩质边坡。它将岩体视为由离散块体通过接触面连接而成,能够真实模拟块体的平动、转动及接触面的开闭、滑移等非连续变形行为,对于分析倾倒、楔形体滑动等破坏模式具有独特优势。

2.3 概率分析与风险评价

考虑到地质参数固有的空间变异性与不确定性,确定性分析方法存在局限。概率分析方法(如蒙特卡洛模拟、一次二阶矩法)通过将关键参数(如 c 、 ϕ 值)视为随机变量,计算边坡失效概率,为风险决策提供量化依据^[2]。在此基础上,结合后果评估,可开展全面的风险评价,实现从“安全系数”到“风险可控”的理念转变。

3 施工过程中边坡稳定性综合控制技术体系

3.1 精细化地质勘察与超前预报

在施工前及施工过程中,必须进行多层次、多手段的精细化地质工作。前期的综合勘察阶段,需通过地质测绘、钻探、地球物理勘探(如地震波CT、地质雷达)以及室内和原位试验等多种技术手段,系统查明边坡的宏观地质结构框架、进行岩体质量分级(如采用RMR或Q系统),并精确获取关键结构面的空间展布规律及其力学参数。进入施工期后,地质工作并未结束,反而变得更加动态和关键。在每一层开挖面揭露后,都必须进行详尽的地质素描和编录,将实际揭露的地质信息与前期模型进行比对和修正,实现地质模型的动态更新。尤其对于地下洞室进出口等高风险部位,还应积极采用TSP、TGP等超前地质预报技术,如同给岩体做“CT扫描”,提前探明掌子面前方可能存在的断层破碎带、富水区等不良地质体,为后续的动态设计和施工方案调整提供至关重要的前瞻性信息。

3.2 动态反馈设计

摒弃“一成不变”的静态设计理念,推行“动态设计、信息化施工”是应对复杂地质不确定性的核心策略。在开挖方案的制定上,必须充分尊重地质条件,合理规划开挖的分区、分层高度以及开挖顺序,例如采用岛式开挖或预留马道等方式,严格遵循“自上而下、分层开挖、及时支护”的基本原则,以最大限度地减少开挖作业对边坡整体稳定性的扰动。更重要的是,支护设计不应是一纸定终身的蓝图。在施工过程中,应充分利用来自现场监测系统的海量数据以及不断更新的地质揭示信

息,利用成熟的数值分析软件进行反演计算,对当前支护体系的实际效果进行客观评估^[3]。一旦发现监测数据出现异常趋势或地质条件发生重大变化,便应及时启动设计复核程序,对后续尚未实施的支护参数(如锚索的设计长度、布置间距、施加的预应力大小等)进行科学、合理的优化调整,确保支护措施始终与边坡的实际状态相匹配。

3.3 先进支护与加固技术

根据边坡的具体地质条件和稳定性要求,选择并组合运用合适的支护形式,是确保边坡安全的直接手段。对于风化严重、易发生剥落的表层岩土体,通常采用挂网喷射混凝土或SNS主动防护网等措施进行封闭和防护,既能防止小规模掉块,又能抑制风化进程。对于开挖后形成的浅层松弛圈,则普遍采用系统锚杆或锚筋桩进行加固,以提高表层岩体的整体性和自稳能力。而对于控制深层稳定性的关键问题,则需要依赖更为强大的加固技术。预应力锚索(束)无疑是高边坡深层加固的核心利器,它通过在孔内施加主动的预应力,直接对潜在的滑动体提供强大的抗滑阻力,效果立竿见影。近年来,无粘结、可回收等新型锚索技术也日益成熟,为特殊工况提供了更多选择。在面对推力巨大的大型滑坡体时,抗滑桩,特别是与预应力锚索结合形成的大直径、大吨位锚索抗滑桩,能够提供无与伦比的抗滑阻滑能力。格构梁与锚索的联合使用则是一种兼顾功能与美观的柔性支挡结构,格构梁将分散的锚索力均匀地传递至坡面,形成一个协同工作的整体。无论采用何种加固措施,“治坡先治水”的理念都必须贯穿始终。一套完善的地表截排水沟系统配合地下仰斜排水孔、排水廊道等设施,能够有效疏排地下水,降低孔隙水压力,是一项经济且高效的辅助性但不可或缺的控制措施。

3.4 智能化监测与预警系统

监测系统是整个边坡安全控制体系的眼睛和神经中枢。其监测内容涵盖了地表及深部的位移(通过GPS、全站仪、测斜仪等设备获取)、锚索内部的预应力状态(通过锚索测力计实时读取)、地下水位变化(利用渗压计监测)以及裂缝的发展情况(通过裂缝计跟踪)等多个维度。近年来,监测技术正经历一场深刻的变革,从传统依赖人工定期观测的方式,迅速向自动化、智能化、全天候的方向升级。集成全球导航卫星系统(GNSS)、合成孔径雷达干涉测量(InSAR)以及布里渊光时域分析(BOTDA)分布式光纤传感等前沿技术,使得对大范围边坡进行高精度、高频次的形变监测成为可能^[4]。在此基础上,构建基于大数据平台和人工智能算法(如LSTM神

经网络)的智能预警系统,成为行业发展的新趋势。该系统能够对来自不同传感器的多源异构监测数据进行深度融合与智能分析,建立能够反映边坡真实状态的预测模型,对稳定性进行实时、动态的评估。一旦监测数据或预测趋势达到预设的预警阈值,系统便会自动触发警报,并通过多种渠道通知相关人员,为组织应急处置、疏散人员赢得宝贵的“黄金时间”。

4 典型工程案例研究:溪洛渡水电站右岸高边坡

溪洛渡水电站坐落于金沙江下游的深切峡谷之中,其右岸坝肩及地下厂房区域因大规模开挖而形成了高达六百余米的人工高边坡。该区域的地质条件堪称世界级的复杂,不仅分布有F2、F5、F24等多条规模宏大的区域性断层,而且构成边坡主体的玄武岩柱状节理异常发育,在高地应力环境下,工程稳定性面临严峻考验。面对如此高陡且地质脆弱的边坡,如何确保其在长达数年的施工期内万无一失,是摆在所有建设者面前的一道世界级难题。为攻克此难关,工程团队首先投入巨资开展了前所未有的精细化地质勘察工作,通过海量的钻孔、平硐勘探以及当时先进的三维激光扫描技术,构建了一个厘米级精度的三维地质模型,精准刻画了断层和柱状节理的空间几何形态,为后续所有工作奠定了坚实的认知基础。在此基础上,项目坚决推行动态设计理念,依据详尽的岩体结构分析和块体稳定性计算结果,将整个庞然大物般的边坡科学地划分为不同风险等级的区域,并实施差异化的支护策略。对于识别出的关键不稳定块体,果断采用了“长锚索+短锚杆+格构梁”的立体化、多层次支护体系。在整个工程中,累计安装了数千束承载力高达3000kN以上的预应力锚索,总长度超过二十万米,编织成了一张覆盖整个高边坡的、强大的主动支护网络。与此同时,一个由数千个各类传感器组成的自动化监测网络被同步建立起来,并在国内首次大规模应用地面三维激

光扫描(TLS)技术进行高频率、高精度的形变监测。所有监测数据实时汇聚至中央指挥中心,实现了对边坡健康状况的精准、透明化掌控。正是得益于这套“地质-设计-施工-监测”一体化的综合控制体系,溪洛渡右岸高边坡在整个施工期间的变形始终被牢牢控制在安全阈值之内,未发生任何重大安全事故,不仅保障了工程的顺利推进,更成为了世界高边坡治理领域公认的典范之作。

5 结语

水利水电工程施工期的边坡稳定性控制是复杂系统工程,经对理论、技术和典型案例分析得出重要结论:地质认知是根本,精准动态的地质模型是稳定性分析与控制措施的基础,需坚持地质先行并贯穿工程始终;动态设计理念是核心,面对复杂地质条件,要建立“监测-分析-反馈-优化”的闭环动态设计机制;综合防治是关键,应根据具体地质问题灵活组合多种措施形成多层次防御体系;智能监测是保障,现代化智能监测技术是实现风险早发现、早预警、早处置的关键支撑。展望未来,该技术将朝精细化、智能化和绿色化发展,数字孪生技术有望实现物理与虚拟模型实时交互,人工智能与大数据融合将提升风险预测准确性和预警时效性,生态友好型技术也将受关注,通过持续创新与实践,我们有信心应对更高更复杂工程的边坡稳定挑战。

参考文献

- [1]彭家有.水利水电工程边坡稳定性分析与治理技术[N].山西科技报,2024-06-13(B07).
- [2]程雪.水利水电工程岩质边坡稳定性的评价方法探析[J].水利技术监督,2020,(02):118-121+179.
- [3]李亚斐.水利工程施工高边坡稳定性控制技术[J].中国科技信息,2025,(16):59-61.
- [4]洪祥,宋亚红.水利枢纽高边坡稳定性及加固措施分析[J].水利科技与经济,2024,30(01):58-61+66.