

水利水电工程高边坡稳定性分析与治理技术研究

肖进萍

江西省荣翔建设有限公司 江西南昌 330000

摘要: 水利水电工程高边坡稳定性是影响工程安全与经济性的核心问题, 其失稳可能导致严重灾害。本文从高边坡失稳机理出发, 系统分析了地质条件、水文作用、施工扰动等主要影响因素, 总结了极限平衡法、数值模拟法等稳定性评价方法的应用特点, 并结合工程案例探讨了锚固、截排水、植被护坡等治理技术的原理与实践效果。研究表明, 综合运用“勘察-分析-治理-监测”一体化技术体系, 是保障高边坡长期稳定的关键。

关键词: 水利水电工程; 高边坡; 稳定性分析; 治理技术

引言

水利水电工程高边坡具有“高陡、复杂地质环境、多因素耦合作用”的显著特征, 其稳定性直接关系到坝体、厂房、引水系统等核心结构的安全。随着我国水电开发向西部高海拔、地质复杂区域推进, 高边坡问题日益突出。例如, 锦屏一级水电站左岸边坡最大坡高约550m, 施工期曾发生多次变形; 澜沧江乌弄龙水电站坝肩高边坡因卸荷裂隙发育, 需进行大规模加固处理。因此, 深入研究高边坡稳定性分析方法与治理技术, 对工程安全建设与运营具有重要意义。

一、高边坡失稳机理与影响因素

(一) 失稳机理

高边坡失稳是坡体内部剪应力超抗剪强度的结果, 主要有滑坡、崩塌、倾倒等模式。滑坡常见, 坡体沿软弱结构面整体剪切滑动, 形成滑带区, 滑带土高含水率、低强度, 坡体位移持续累积, 分蠕动型、突发型等, 如三峡库区某滑坡最终演变为高速远程滑坡。崩塌多在岩质边坡, 岩体受切割形成块体, 受外力触发脱离母岩运动, 突发性强、能量释放剧烈, 如西南山区某公路边坡岩质崩塌造成交通中断。倾倒变形主要在层状反倾边坡, 岩层在自重作用下弯曲变形、折断倾倒, 常伴随拉张裂隙扩展, 如锦屏一级水电站左岸坡体大规模倾倒变形威胁坝肩稳定。此外, 部分边坡还有复合式失稳模式, 如滑塌组合型, 破坏范围广、治理难度大。

(二) 主要影响因素

地质条件决定高边坡固有稳定性。地层岩性影响坡体力学性能, 软弱夹层降低抗剪强度, 软岩水理作用下

软化, 硬质岩节理裂隙影响完整性。地质构造控制作用显著, 断层破碎带强度低、是地下水通道, 褶皱构造使岩层产状变化, 不利边坡稳定。水文作用是诱发失稳的关键外部因素, 雨水入渗降低有效应力、软化岩土体, 库水位升降产生动水压力和浮托力, 易引发顺层滑坡。施工扰动直接且累积影响边坡稳定性, 开挖卸荷导致应力重分布, 爆破振动加剧节理裂隙扩展, 不合理开挖导致坡体滑动。地震作用通过施加水平惯性力增大下滑力, 在地震高发区常与其他因素耦合导致失稳, 如汶川地震引发唐家山滑坡^[1]。

二、稳定性分析方法

(一) 极限平衡法

该方法以刚体滑动为核心假设, 将滑坡体视为刚性块体, 通过建立力系或力矩的平衡方程求解安全系数(F_s), 是工程实践中应用最广泛的稳定性评价手段。其显著优势在于原理直观易懂, 计算过程高效便捷, 尤其适用于工程初步设计阶段的快速评估。核心计算公式为:

$$F_s = \frac{\sum(c_i l_i + N_i \tan \phi_i)}{\sum T_i}$$

式中, c_i 为滑带土黏聚力(kPa), (ϕ_i) 为内摩擦角($^\circ$), l_i 为分条滑面长度(m), N_i 和 (T_i) 分别为作用于滑面上的法向力与切向力(kN)。然而, 该方法存在固有局限性: 完全忽略坡体的变形特性及应力应变关系, 无法反映岩土体的非均质性和各向异性, 对含有软弱夹层、断层等复杂地质条件的边坡适应性较差, 计算结果偏于保守。

(二) 数值模拟法

有限元法(FEM): 基于连续介质力学理论, 将边

坡体离散为有限个单元体,通过求解控制方程获取应力应变全场分布,可精细化模拟坡体从弹性变形到塑性屈服的渐进破坏过程。例如,针对软岩边坡,常采用Drucker-Prager屈服准则描述材料屈服行为,结合弹塑性本构模型分析开挖扰动下的变形演化规律。

离散元法 (DEM):适用于节理发育的碎裂岩体,将边坡视为由离散块体通过接触键连接的集合体,通过模拟块体间的接触碰撞、滑动和分离等运动,揭示节理岩体的剪切变形与块体失稳机制。如在锦屏一级水电站高边坡工程中,采用UDEEC (Universal Distinct Element Code) 软件构建三维块体模型,成功预测了左岸坝肩坡体的倾倒-滑移复合变形趋势,与现场监测数据吻合度达85%以上^[2]。

强度折减法:通过逐步折减岩土体强度参数(c)、 ϕ),按折减系数($F = c/c_r = \tan \phi / \tan \phi_r$)同步降低黏聚力和内摩擦角,直至数值计算出现不收敛(如位移突变),此时的折减系数即为边坡安全系数。该方法无需预设滑面,可自动搜索最危险滑动面,计算精度较传统极限平衡法提高15%~20%,已成为复杂边坡稳定性分析的主流手段。

(三) 现场监测与反分析

现场监测是把握边坡变形、验证设计的重要手段,通过布设GPS、测斜仪等仪器获取坡体物理量变化数据。GPS适用于大范围宏观变形监测,测斜仪可测内部水平位移,渗压计监测孔隙水压力。基于监测数据的反分析方法能反演力学参数、修正模型。反分析用优化算法,使计算位移与监测位移残差平方和最小。如三峡工程左岸坝肩边坡反分析优化了锚固设计。现场监测与反分析结合实现动态设计过程,是高边坡工程安全保障核心技术体系之一^[3]。

三、治理技术与工程实践

(一) 锚固技术

锚固技术通过锚杆、锚索将坡体荷载传递至稳定地层,提高抗滑力,是高边坡深层加固的核心手段。其原理是利用预应力或全长黏结作用,限制坡体变形并增强结构面摩擦力。

预应力锚索:由钢绞线、锚具和自由段组成,适用于深层滑动(滑面埋深 $> 15\text{m}$)加固,单根承载力可达1000~3000kN,通过施加预紧力(设计值的70%~80%)主动控制坡体位移。例如,小湾水电站300m级高边坡采用2000kN级预应力锚索(孔深40~60m),通过群锚效应

将滑体与基岩锁定,治理后安全系数从1.15提升至1.35,满足水电工程安全标准。

系统锚杆:多为全长黏结型钢筋锚杆(直径25~32mm),用于浅层加固(深度 $< 10\text{m}$),通过网格状布置控制表部岩体松动、防止小规模崩塌,常与喷射混凝土(厚度10~15cm)联合形成“锚喷支护体系”,增强坡面整体性。某公路边坡通过 $\phi 28\text{mm}$ 系统锚杆(间距 $2\text{m} \times 2\text{m}$)与C20喷混结合,使坡面岩体完整性系数 K_v 从0.4提升至0.7,有效抑制了表部剥落。

(二) 截排水措施

水是高边坡失稳的主要诱因,截排水措施通过拦截、疏导坡体内外水体,降低孔隙水压力,提高抗滑力。

地表排水:通过截水沟、排水沟、防渗铺盖等拦截地表径流,避免雨水入渗。截水沟多采用梯形断面(底宽0.5~1.0m,边坡1:1.25),布置于坡顶5~10m外,结合防渗膜(HDPE土工膜,厚度 $\geq 1.5\text{mm}$)覆盖坡面,可大幅减少入渗量。某露天矿边坡采用“截水沟+防渗膜+急流槽”组合系统,使雨季坡面渗流量减少60%,地下水位平均降低 2.5m ^[4]。

地下排水:通过排水孔、排水隧洞、仰斜孔等降低坡体内部水位,适用于地下水丰富或存在承压水的边坡。排水孔多为水平或微倾(仰角 $5^\circ \sim 10^\circ$)布置,孔径100~150mm,孔深10~30m,采用PVC花管外包透水土工布防止堵塞;排水隧洞则适用于深层排水,如锦屏水电站在左岸坡体内布置3层平行排水隧洞(断面 $2\text{m} \times 2.5\text{m}$),结合排水孔形成立体排水网络,使地下水位降低15~20m,有效控制了断层带的渗透压力。

(三) 坡体改良与支挡结构

当坡体岩体破碎或强度不足时,需通过坡体改良或支挡结构提高稳定性,常用技术包括注浆加固与抗滑桩。

注浆加固:通过高压注浆(压力2~5MPa)将水泥浆、化学浆液(如环氧树脂)注入裂隙岩体,填充空隙并胶结结构面,提高岩体整体性与抗剪强度。对断层破碎带或岩溶发育区,可采用高压旋喷注浆形成连续防渗帷幕。例如,龙滩水电站对坝肩断层破碎带($K_v=0.3$)采用双重管旋喷注浆(桩径1.2m,孔距0.8m),注浆后岩体完整性系数提升至0.6,单轴抗压强度从15MPa提高至35MPa。

抗滑桩:适用于滑动面较浅(埋深 $< 20\text{m}$)的边坡,通过钢筋混凝土桩体(截面 $1.5\text{m} \times 2.0\text{m} \sim 3\text{m} \times 4\text{m}$)插入稳定地层,利用桩身剪力平衡滑体推力。设计需考虑

桩-土相互作用,采用m法(弹性地基梁法)计算桩身内力与位移,确保桩顶位移 $< 10\text{cm}$ 。某高速公路路堑边坡(滑体厚度 8m)采用排桩式抗滑桩(桩长 18m ,间距 5m),桩顶设置冠梁连接,治理后 F_s 从 0.95 提升至 1.35 ,监测位移 $< 5\text{mm}$ 。

(四)生态护坡技术

生态护坡技术将工程加固与生态修复结合,适用于土质边坡或次要区域(如公路边坡、库区边坡),通过植被根系固坡(根系抗拉强度 $0.5\sim 1.5\text{MPa}$)与坡面绿化实现长期稳定。常用工艺包括锚杆格构喷播、客土喷播、植生袋护坡等。例如,紫坪铺水电站库区边坡(坡比 $1:1.5$)采用“锚杆格构($2\text{m}\times 2\text{m}$)+喷播植草(狗牙根+紫花苜蓿混合草种)”技术,格构梁采用 $\text{C}25$ 混凝土(截面 $30\text{cm}\times 40\text{cm}$),锚杆长 $6\sim 8\text{m}$,既通过格构梁分担坡体荷载,又利用植被根系提高表土抗剪强度(c 值提升 $10\sim 15\text{kPa}$),实现了“稳定加固+生态恢复”双重目标^[5]。

四、工程案例

(一)溪洛渡水电站左岸边坡

问题:该边坡为岩质高边坡,坡高 400m ,坡比 $1:0.7\sim 1:1.0$,坡体中发育多层泥岩软弱夹层(厚度 $0.5\sim 2\text{m}$)与顺层节理(倾角 $15^\circ\sim 25^\circ$),开挖卸荷后引发顺层滑动变形,最大位移速率达 8mm/d ,初始安全系数 $F_s=1.15$,接近失稳临界值。

治理措施:采用“深层加固+立体排水”综合治理方案:

锚固体系:主滑带区域布置 1500kN 级预应力锚索(孔深 $30\sim 45\text{m}$,间距 $3\text{m}\times 4\text{m}$),浅层采用 $\phi 32\text{mm}$ 系统锚杆(长 $8\sim 12\text{m}$,间距 $2\text{m}\times 2\text{m}$)控制表部松动;

排水系统:坡顶设置环形截水沟(底宽 1m ,深 1.2m),坡面按 $5\text{m}\times 5\text{m}$ 网格布置排水孔(孔径 150mm ,孔深 $15\sim 30\text{m}$),坡脚设集水沟汇入排水隧洞;

监测反馈:通过测斜仪、GPS监测显示,治理后3个月内最大位移速率从 8mm/d 降至 0.1mm/d ,6个月后趋于稳定(累计位移 $< 10\text{cm}$),安全系数 F_s 稳定在 1.3 以上,满足水电工程运行要求。

(二)糯扎渡水电站坝肩边坡

问题:边坡为花岗岩体,节理密集(间距 $0.2\sim 0.5\text{m}$),以陡倾节理(倾角 $70^\circ\sim 80^\circ$)为主,雨季雨水入渗导致节理面抗剪强度降低(ϕ 值从 35° 降至

28°),坡面危岩体易发生崩塌,威胁坝肩施工安全。

治理措施:针对危岩体崩塌风险,采用“主动防护+坡脚支挡”方案:

危岩处理:对坡面直径 $> 1\text{m}$ 的孤立危岩体采用“局部清方+主动防护网”(GPS2型,网孔 $5\text{cm}\times 5\text{cm}$)覆盖,防护网通过锚杆(长 $4\sim 6\text{m}$)固定于稳定岩体,拦截坠落块体;

坡脚加固:在坡脚剪出区设置 $\text{C}30$ 混凝土抗滑挡墙(高度 8m ,底宽 5m ,顶宽 2m),挡墙嵌入基岩 2m ,通过墙身自重与地基反力平衡坡体推力;

长期监测:布设雨量计、裂缝计及视频监控,监测数据显示,治理后5年雨季未发生崩塌事件,边坡稳定性满足设计要求($F_s=1.25$),保障了坝肩混凝土浇筑施工的安全。

结语

水利水电工程高边坡的稳定性分析与治理技术研究具有重要的理论价值和实践意义。通过系统梳理失稳机理、影响因素及各类分析方法的特点,结合具体工程案例的治理经验,可以发现不同技术手段各有其适用范围和局限性。在实际工程中,应根据边坡的具体地质条件、环境特点及潜在风险,灵活选择并综合运用多种技术措施。未来,随着监测技术的进步和数值模拟方法的完善,高边坡稳定性评价将更加精确,治理方案也将更具针对性和科学性。同时,生态护坡等绿色技术的应用将进一步推动工程与环境的协调发展,为实现水利水电工程的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 邵治程, 邓廷明, 邵星皓. 水电站高边坡稳定性分析及加固技术研究[J]. 中国高新科技, 2022(12): 2.
- [2] 曹森鑫. 岩土工程中高填方边坡的稳定性分析与治理措施[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2022(26): 3.
- [3] 周斌. 浅谈水利水电工程中高边坡的加固和治理[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2022(26).
- [4] 魏超. 水利水电工程施工中的高边坡加固技术分析[J]. 水电水利, 2020, 4(1): 2.
- [5] 王军. 港口高角度边坡稳定性与生态防护技术研究[J]. 中国水运: 下半月, 2020(3): 3.