

水库工程高边坡支护安全技术及防范措施剖析

霍小婷

中国水利水电第十二工程局有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8611

[摘要] 水库工程高边坡作为水利基础设施的关键组成部分，其稳定性直接关系到工程整体安全与周边生态环境可持续性。受地形地质条件、水文气象因素及施工扰动影响，高边坡易发生滑坡、崩塌等地质灾害，对工程运行与人员安全构成严重威胁。本文基于水库工程高边坡的结构特征与失稳机理，系统梳理高边坡支护安全技术类型与防范体系，为水库工程高边坡支护安全管控提供理论支撑与技术参考，助力水利工程高质量建设与安全运维。

[关键词] 水库工程；高边坡；支护安全技术；失稳机理；防范措施

[中图分类号] TV56 **[文献标识码]** A

Analysis of Safety Technology and Preventive Measures for High Slope Support in Reservoir Engineering

Huo Xiaoting

China Water Resources and Hydropower Twelfth Engineering Bureau Co., Ltd

[Abstract] As a key component of water conservancy infrastructure, the stability of high slopes in reservoir engineering is directly related to the overall safety of the project and the sustainability of the surrounding ecological environment. Due to the influence of terrain and geological conditions, hydrological and meteorological factors, and construction disturbances, high slopes are prone to geological disasters such as landslides and collapses, which pose a serious threat to the operation of the project and the safety of personnel. This article is based on the structural characteristics and instability mechanism of high slopes in reservoir engineering, systematically sorting out the core technology types and prevention system of high slope support safety, providing theoretical support and technical reference for the safety control of high slope support in reservoir engineering, and assisting in the high-quality construction and safe operation and maintenance of water conservancy engineering.

[Key words] reservoir engineering; High slope; Support safety technology; Instability mechanism; preventive measures

引言

水库工程在水资源调控、防洪减灾、灌溉发电等领域发挥着不可替代的作用，而高边坡作为水库枢纽、溢洪道、引水隧洞进出口等关键部位的重要构筑物，其稳定性是保障工程长期安全运行的核心前提。近年来，随着水利工程建设向复杂地质区域拓展，高边坡支护难度不断加大，因支护技术选择不当、施工质量管控不严或防范措施不到位引发的安全事故时有发生，造成巨大的经济损失与社会影响。因此，深入剖析水库工程高边坡的失稳机理，系统研究适配的支护安全技术，构建全周期、多层次的防范措施体系，对于提升水库工程高边坡支护质量、防范地质灾害风险、保障工程安全稳定运行具有重要的现实意义与工程价值。

1 水库工程高边坡失稳的影响因素

1.1 地质因素

地质条件是决定高边坡稳定性的内在核心因素。岩土体性质直接影响边坡的抗剪强度与承载能力，坚硬完整的岩体稳定性较好，而松散土体、风化岩体的抗剪强度较低，易发生失稳。地质构造如断层、节理、裂隙等的发育情况，破坏了岩土体的完整性，形成潜在滑动面，降低边坡稳定性。地层岩性的组合特征也会影响边坡稳定性，如软硬岩层交互分布易导致差异风化，引发边坡变形破坏。

1.2 水文因素

水是诱发高边坡失稳的关键外部因素。降雨或水库蓄水会使岩土体含水率增加，一方面降低岩土体的抗剪强度，尤其是软弱夹层和粘性土的强度衰减更为显著；另一方面增加岩土体自重，产生动水压力与静水压力，破坏边坡内部应力平衡。地下水位上升会使边坡有效应力减小，孔隙水压力增大，进一步削弱边坡稳定性，长期浸泡还可能导致岩土体软化、崩解，诱

发失稳破坏。

1.3 施工因素

施工活动对高边坡稳定性的扰动不可忽视。边坡开挖过程中, 会改变原有岩土体的应力状态, 导致应力重分布, 若开挖方式不当、坡率过陡或开挖顺序不合理, 会加剧边坡变形。施工过程中对地质环境的破坏, 如破坏地表植被、扰动软弱夹层等, 也会降低边坡稳定性。此外, 支护结构施工质量不合格, 如锚杆锚固力不足、喷射混凝土强度不够、钢筋网布设不规范等, 无法有效发挥支护作用, 易引发安全隐患。

1.4 气象与地震因素

气象条件的变化对高边坡稳定性产生间接影响。暴雨、暴雨集中时段, 雨水快速渗入边坡内部, 短时间内改变岩土体含水量与应力状态, 易诱发突发性失稳。高温、严寒等极端气候会导致岩土体发生热胀冷缩、冻融循环, 加速岩体风化与裂隙发育, 长期作用下降低边坡稳定性。地震作为强烈的外部扰动因素, 会产生地震惯性力, 破坏岩土体结构, 引发边坡崩塌、滑坡等灾害, 尤其在断层发育区域, 地震对边坡稳定性的影响更为显著。

2 水库工程高边坡支护安全核心技术

2.1 锚杆支护技术

锚杆支护的核心作用机制包括悬吊作用、组合梁作用与加固拱作用。悬吊作用通过锚杆将边坡表层松动岩土体悬吊于深部稳定岩体上, 避免其因自重脱落; 组合梁作用使原本分离的岩层或土体通过锚杆连接形成整体, 提高结构抗弯刚度与承载能力; 加固拱作用通过密集布置的锚杆形成加固拱带, 增强拱内岩土体的整体性与抗剪强度, 抵御外部荷载作用。根据锚固方式的不同, 锚杆可分为全长粘结型、端头锚固型、摩擦型等类型。全长粘结型锚杆通过锚杆全长与注浆体的粘结作用传递应力, 适用于岩土体完整性较好的边坡; 端头锚固型锚杆仅在锚杆端部通过注浆或机械方式固定, 适用于深部岩体稳定的边坡; 摩擦型锚杆通过锚杆与孔壁之间的摩擦力提供锚固力, 适用于破碎岩体或土体边坡。

2.2 喷射混凝土支护技术

喷射混凝土的支护作用主要体现在三个方面: 一是加固作用, 混凝土支护层能有效约束岩土体的变形, 提高表层岩土体的抗压、抗剪强度, 防止岩土体松散脱落; 二是防护作用, 封闭边坡表面, 避免岩土体直接暴露于大气环境中, 减少风化、降雨侵蚀与水的渗入, 延缓岩土体劣化; 三是承载作用, 喷射混凝土层与岩土体共同受力, 形成组合结构, 分担边坡荷载, 提升整体承载能力。根据施工工艺的不同, 喷射混凝土可分为干喷、湿喷与潮喷三种方式。湿喷技术因混凝土混合料含水率控制精准、喷射质量高、粉尘污染小等优势, 在水库工程高边坡支护中应用更为广泛。

2.3 锚索支护技术

锚索支护技术具有锚固力大、支护效果显著、适用范围广等优势, 常用于高陡边坡、大跨度边坡及稳定性要求高的关键部位支护。锚索支护的作用机制主要包括预应力约束作用与加固作用。预应力约束作用通过对锚索施加预拉力, 在边坡岩土

体内部形成压应力区, 提高岩土体的抗剪强度, 抑制边坡变形; 加固作用通过锚索将边坡表层岩土体与深部稳定岩体牢固连接, 形成整体受力结构, 抵御边坡自重、水压力等荷载作用。锚索支护能有效控制边坡的蠕变变形与滑动趋势, 尤其适用于地质条件复杂、稳定性极差的高边坡。施工过程中需严格控制锚索钻孔精度、钢绞线张拉应力、注浆质量等关键环节, 确保锚索锚固力满足设计要求。同时, 需对锚索施加预应力后的应力损失进行监测, 及时进行补张拉, 保证支护效果的长期稳定性。

2.4 排水孔施工安全技术

施工前需精准勘测边坡岩体裂隙分布与水文地质条件, 确定排水孔布设参数, 避免盲目钻孔破坏岩体结构。钻孔作业时, 应设置稳固的钻孔平台, 作业人员需佩戴防坠落、防飞溅防护用品; 钻孔过程中实时监测孔内涌水、岩体变形情况, 若出现涌水量突增、孔壁坍塌等异常, 立即停止作业并采取封堵、加固措施。成孔后及时安装排水滤管与反滤层, 防止孔道堵塞, 确保排水系统高效运行。

2.5 截排水沟施工安全技术

截排水沟应沿边坡坡顶外合理距离布设, 施工时遵循“自上而下、分段开挖”原则, 严禁大面积开挖扰动坡顶土体。开挖过程中做好临时支护, 避免沟槽边坡坍塌; 沟体砌筑采用强度达标材料, 确保勾缝密实、排水坡度符合设计要求。施工完成后需及时清理沟内杂物, 并设置警示标识, 防止人员、车辆坠入, 同时定期巡检维护, 保障雨水、地下水能够快速排离边坡区域。

2.6 锚筋桩施工安全技术

锚筋桩施工前需核验岩体强度, 确定桩体深度、间距等参数。钻孔阶段采用湿式钻孔工艺, 减少粉尘危害; 锚筋安装时确保钢筋顺直, 注浆作业需严格控制浆液配比与注浆压力, 保证浆液饱满密实。桩体养护期间, 严禁在桩体周边进行重型机械作业或土方开挖; 养护完成后, 需进行抗拔力检测, 检测合格后方可投入使用。施工全程设置安全警戒区, 防止无关人员进入作业范围。

2.7 厚层基材安全防护技术

针对高边坡下方为现场道路的特殊工况, 采用厚层基材防护技术时, 需先对边坡坡面进行清理、平整, 清除松动危石。基材拌合需严格按照配比执行, 确保有机质、粘结剂、保水剂等成分混合均匀; 喷射作业时控制喷射压力与角度, 保证基材与坡面紧密贴合, 厚度达到设计标准。施工完成后及时覆盖无纺布保湿养护, 促进基材内植物种子萌发, 形成“基材+植物”复合防护体系。同时, 在道路侧设置防撞护栏与落石拦截网, 建立24小时监测机制, 实时监控边坡位移与基材完整性, 保障下方道路通行安全。

3 水库工程高边坡支护施工全过程防范措施

3.1 施工准备阶段防范措施

编制施工组织设计, 明确施工流程、方法、质量控制标准与安全保障措施, 优化施工顺序与区段划分, 制定针对突发事件的应急预案。平整施工场地, 合理布设临时设施与安全防护

设施, 确保施工机械性能良好、支护材料质量达标并经严格检验。对施工人员开展专业培训与安全交底, 明确技术规范、操作流程与应急处置要求, 实行关键岗位持证上岗制度。

3.2 施工实施阶段防范措施

一是边坡开挖需遵循自上而下、分层开挖、及时支护的原则, 避免一次性开挖深度过大、坡率过陡, 减少对边坡岩土体的扰动。开挖过程中需对边坡岩土体进行实时监测, 若发现边坡出现裂缝、位移等异常情况, 需立即停止开挖, 采取应急支护措施, 待边坡稳定后再继续施工。二是支护结构施工需严格按照设计方案与施工规范进行, 确保施工质量符合要求。锚杆、锚索施工需控制钻孔精度、深度、孔径等参数, 确保钻孔质量满足锚固要求。钢绞线、锚杆的安装需规范操作, 确保连接牢固。注浆施工需控制注浆压力、注浆量与浆液配合比, 确保注浆密实度, 提升锚固力。喷射混凝土施工需控制喷射厚度、喷射压力、混凝土配合比等参数, 确保支护层强度与平整度。三是施工过程监测需贯穿施工全过程, 建立完善的监测体系, 对边坡位移、沉降、裂缝发展、支护结构应力等关键指标进行实时监测。监测频率需根据施工进度与边坡稳定性状况合理确定, 施工期间需加密监测频次, 若发现监测数据异常, 需及时分析原因, 采取针对性处置措施。四是施工安全防护需加强施工现场安全管理, 落实各项安全防护措施。施工人员需佩戴安全帽、安全带等个人防护用品, 严禁在边坡下方、危险区域停留。施工机械需规范操作, 避免碰撞支护结构或边坡岩土体。同时, 需做好施工现场的排水工作, 避免雨水积聚引发边坡失稳。五是环境保护要贯穿整个施工过程, 减少对环境的破坏。结合厚层基材防护技术, 在边坡坡面完成基材喷射后, 选择耐贫瘠、根系发达的本土灌木与草本植物种子混合播种, 播种前清理坡面碎石、尖锐杂物, 播种后覆盖保湿无纺布防止种子流失, 养护期间严禁在边坡下方及坡面开展重型机械作业, 定期巡查并补植枯死区域, 依托植物根系固土作用提升边坡长期稳定性; 对开挖后暂未施工的裸露坡面、施工弃土堆, 及时用阻燃型防尘绿网全覆盖, 绿网铺设需平整紧绷, 边缘用沙袋压实或钢钎固定, 安排专人定期检查修补破损、松动部位, 待坡面施工完成且绿植形成防护体系后再拆除绿网, 同时在覆盖区域设置警示标识; 针对钻孔、开挖、基材喷射等易扬尘作业环节, 制定定时洒水降尘制度, 在作业面周边布设移动洒水车或固定喷淋装置, 根据施工进度与扬尘浓度每2-4小时洒水一次, 干旱大风天气适当增加频次, 洒水时控制水压与水量避免积水渗入边坡土体引发滑塌, 作业人员需佩戴防尘口罩等防护用品, 且在施工区域出入口设置车辆冲洗平台, 防止车辆带泥上路造成场外扬尘污染。

3.3 运营监测阶段防范措施

一是监测设备布设安全防护, 布设测斜仪、位移计、渗压计等监测设备时, 应搭建稳固的作业平台, 作业人员需系挂安全带、佩戴安全帽, 高空作业时严禁抛物; 设备安装完成后, 需对传感器、线缆进行防护处理, 设置醒目的警示标识, 防止机械碾压、人为损坏。二是常态化监测作业安全管控, 监测人员需经专业培训后方可上岗, 严格按照监测方案开展数据采集

工作; 在高边坡下方道路等人员车辆通行区域进行监测时, 需临时封闭部分路段或设置安全警戒区, 避免落石、边坡局部坍塌等风险。三是监测数据异常应急防范, 建立监测数据实时分析预警机制, 当位移、沉降、渗流量等指标超出预警阈值时, 立即启动应急预案, 封闭边坡下方道路等危险区域, 组织专业人员排查边坡隐患。

3.4 高边坡应急处置

水利工程高边坡易受地质、水文、施工等因素影响引发滑坡、崩塌甚至泥石流灾害, 其应急处置需构建全流程管控体系。在应急响应阶段, 需依托全站仪、GNSS 位移监测仪等设备建立监测预警体系, 设置多级预警阈值, 险情发生后迅速成立应急指挥部, 明确抢险救援、技术研判等工作组职责, 及时组织危险区域人员疏散并管控现场, 保护重要设施避免次生灾害。现场处置需根据灾害类型采取针对性措施, 对滑坡、崩塌险情, 遵循自上而下原则削坡减载, 疏通并增设截排水沟、封堵裂缝、钻孔排水以降低坡体含水率, 同时用沙袋、块石或木桩、钢钎设置临时支挡; 若引发泥石流, 则堆砌临时拦挡坝拦截大块石、疏通排泄通道。汛期需加密监测巡查, 提前储备应急物资, 强降雨时及时撤离人员设备。灾后需先组织专家通过地质钻探、物探等手段评估边坡稳定性, 再采取永久性加固措施, 如深层用预应力锚索、抗滑桩支护, 浅层采用喷锚支护或混凝土格构护坡, 同步完善截排水系统。

4 结束语

水库工程高边坡支护安全是保障工程整体安全运行的核心环节, 其稳定性受地质、水文、施工、气象等多重因素综合影响, 失稳机理复杂多样。高边坡支护安全的保障需构建全周期防范体系, 勘察设计阶段需全面掌握地质条件, 进行科学合理的支护设计; 施工准备阶段需做好各项前期工作, 为施工安全奠定基础; 施工实施阶段需严格控制施工质量与安全, 避免施工扰动引发失稳; 运营监测阶段需建立长效监测机制, 及时发现并处置安全隐患。通过全周期、多层次的防范措施, 可有效提升高边坡支护安全水平, 保障水库工程长期稳定运行。

【参考文献】

- [1]吴莞如. 高边坡开挖与支护技术在水库工程施工中的运用研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(08): 113-116.
- [2]杨元冬, 吴刚. 水库坝基开挖与边坡支护技术探讨[J]. 水上安全, 2025, (02): 46-48.
- [3]裴正鹤. 某水库高边坡开挖施工中边坡支护技术分析[J]. 水上安全, 2024, (09): 133-135.
- [4]SL 551 - 2012 水利工程施工安全防护设施技术规范: 针对水利工程施工全过程的安全防护制定, 其中对高边坡作业的防护栏杆设置、人员安全装备、临时防护网铺设等作出细化要求, 是水利高边坡支护施工过程中的安全防护专项依据。
- [5]SL 260 - 2019 水利工程建设项目的施工监理规范: 虽侧重监理, 但包含水利高边坡支护工程的监理要点, 如锚杆抗拔试验监督、注浆质量检验、边坡变形监测复核等内容, 可保障支护施工质量与安全符合规范要求。