

水利水电工程施工过程中高边坡治理技术研究

叶旭明

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要 水利水电工程多位于地形起伏较大的区域,大规模的土石方开挖会形成高边坡,而这类边坡的岩土体通常存在显著的结构差异,极易引发滑动、变形等地质问题,对施工安全构成严重威胁。鉴于此,本文首先明确高边坡的定义与判定标准,系统梳理其在水利水电工程中的典型特征;其次深入剖析当前工程施工中常用的高边坡治理技术;最后从施工准备、分级开挖等方面提出针对性的技术应用措施,以期为全面保障高边坡的稳定性提供借鉴,进而为水利水电工程的高质量建设与安全运行提供坚实的支撑。

关键词 水利水电工程;高边坡治理技术;施工准备;分级开挖

中图分类号:TV551.2

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.042

0 引言

高边坡稳定性管控是水利水电工程施工管理的核心内容之一。随着工程建设规模持续扩大,土石方开挖深度与范围不断增加,岩体卸荷效应与地下水渗流作用的耦合影响日益显著,导致边坡稳定条件始终处于动态变化之中。传统依赖经验的粗放式处置方法已难以适应当前精细化、智能化的建设要求。在此背景下,施工单位要聚焦高边坡治理技术,完善施工控制路径,为工程长期稳定运行提供可靠技术支持。

1 高边坡概述

在水利水电工程施工过程中,高边坡是因地形条件或开挖活动形成的高差较大的岩土体结构,多分布在峡谷地带或河谷两侧,坡体高度较高,空间范围较大,且岩体内部结构较为复杂。自然状态下,岩体内部保持相对稳定的受力平衡,一旦施工开挖改变原有的应力条件,坡体内部就会出现应力重新分布现象,致使局部区域产生松动或变形趋势。从结构特征来看,岩体完整程度、结构面方向以及组合形式直接影响边坡稳定状况,若结构面与坡面方向形成不利关系,就会增加沿结构面滑动的风险,而且地下水渗入岩体后会改变孔隙水压力,降低抗剪强度,进一步加大边坡失稳可能^[1]。在施工过程中,边坡表面呈现分级开挖形态,各级平台与坡面组合形成较为复杂的空间结构,需严格要求支护方式。从工程角度分析,高边坡内部一般可划分为表层松动区、中部影响区以及深部稳定区,不同区域的力学性质存在差异,需结合实际地质条件与施工阶段综合判断稳定性。

2 水利水电工程施工过程中高边坡治理技术

2.1 锚固技术

锚固技术基于岩体结构特征,结合节理裂隙发育情况,确定锚固深度、倾角及间距,在坡体内部布置锚杆与预应力锚索,连接表层松动岩体与深部稳定岩体,形成整体受力结构,可以有效提高边坡稳定性^[2]。在施工过程中,施工单位需要结合稳定性分析结果布设孔位,保持孔壁稳定,避免干扰周围岩体。锚索安装阶段强调张拉控制,可以施加预应力,让锚固结构提前参与受力,从而抑制位移发展。注浆环节,施工单位应采用水泥基浆液,保证浆体在孔内形成良好包裹,提高锚固体与岩体之间的结合程度,以此增强整体稳定性。从作用机理来看,锚固技术可以改变岩体内部受力状态,分散潜在滑动面上的应力,提高抗滑能力,又加上锚索拉力与岩体自重形成共同作用,能够增强边坡整体刚度,控制变形,减弱局部失稳风险。在实际应用中,施工单位需要结合现场情况调整锚固参数,布设应力监测装置,持续记录锚索受力变化及边坡变形,按照监测结果优化张拉力,以促使加固效果更加稳定可靠。

2.2 抗滑结构技术

抗滑结构技术借助抗滑桩、挡土结构及重力式支挡体系,建立具有较高刚度的工程结构,可以有效阻挡潜在滑动体,让边坡滑动力成为结构内力,以此提高坡体抗滑能力。在设计层面,施工单位应结合边坡几何形态、滑动面位置及岩土力学参数布置抗滑结构,明确桩体埋置深度,保证结构进入稳定岩层区域,形

作者简介:叶旭明(1988-),男,本科,研究方向:水利水电工程。

成可靠的支承条件,并依据内力计算结果确定结构截面尺寸^[3]。在施工过程中,由于抗滑桩成孔质量影响整体稳定效果,施工单位需要保持孔壁稳定,防止出现塌孔或偏位现象,保持连续的桩身混凝土浇筑过程,维持结构的整体性。与此同时,桩体与周围岩土体之间需要形成紧密接触,如此荷载传递路径便可清晰可靠。从力学作用角度分析,抗滑结构可以提供反力抵抗滑动体下滑趋势,稳定分布边坡内部应力,并把滑动力传递到稳定地基,形成完整的受力体系,以有效约束坡体变形,维持边坡整体稳定状态。

2.3 坡面防护技术

高边坡表层岩体开挖后容易出现结构松动现象,若缺乏有效防护,会逐渐剥落表层物质,进而影响深部结构稳定,而坡面防护技术建立覆盖层与支护结构相结合的防护体系,可以减缓风化作用持续侵蚀坡体表面的影响^[4]。在技术实现过程中,坡面处理以挂网喷射混凝土为主要形式,在坡面布设钢筋网片,配合高强度喷射混凝土形成连续覆盖层,可以有效约束表层岩体。为了让防护层与基岩形成稳定结合,施工单位应依据岩体风化程度调整喷射混凝土厚度,保证覆盖层具备良好黏结性能,并在裂隙较为发育区域,提前清理裂隙。在坡面防护体系中,施工单位要设置钢丝绳网或高强度防护网,拦截潜在松动块体,降低落石风险,以持续维持坡面稳定状态,避免刚性结构产生应力集中现象。从整体效果来看,坡面防护技术可以保持稳定的边坡表面状态,并为深层结构稳定提供良好外部条件,有利于高边坡安全稳定。

2.4 排水技术

受降雨入渗与地下水活动共同影响,高边坡区域水分沿裂隙与结构面渗流,可以改变有效应力分布,降低抗剪强度,持续干扰边坡稳定性,而排水技术有序疏导地表水以及地下水,可以降低孔隙水压力,稳定岩土体力学状态。在工程实施过程中,施工单位在坡顶区域设置截水沟,把上部汇水引导到安全区域,可以避免雨水直接冲刷坡面,同时在坡面布设排水沟以及导流槽,能沿既定路径排出径流,减轻表层冲刷作用^[5]。坡体内部需要布设水平排水孔,将导出滞留于岩体中的渗水,保持孔隙水压力在较低水平,从而改善整体稳定条件。同时,施工单位需要结合岩体结构特征合理布设排水孔,并保持孔道通畅,依据渗透特性控制孔径与间距,以持续稳定排水效果。从作用机理角度分析,排水技术可以降低孔隙水压力,提高有效应力水平,恢复岩体抗剪强度,并减轻水力侵蚀作用,避免坡面防护结构受冲刷影响,进而维持长期稳定状态。在实际应用过程中,施工单位要借助监测

手段动态评估排水效果,连续观测渗流变化,及时调整排水孔布置,保持良好的排水体系,为高边坡提供持续可靠的安全保障。

2.5 减载与反压技术

在边坡加固的过程中,减载的首要目的是减小下滑的力度。通常采取切割滑坡体后缘部分岩体的方法来实现,但单独减载的效果不明显,所以最优方案是将减载后的土石堆至边坡(坡体)前缘,以实现减载,并增强抗滑性能。在实施过程中,施工单位要结合边坡几何形态与岩体结构特征优化设计减载作业,控制削坡坡率,促使坡体整体轮廓更加平顺,避免局部陡坎形成新的应力集中区。反压技术则在坡脚或滑动体前缘设置反压体,增加抗滑阻力,让边坡形成稳定支撑条件,采用块石填筑或混凝土结构形式,基于其自重形成抵抗滑动力,待反压体基础进入稳定地基层,受力路径便可清晰可靠,长期保持支撑作用。从力学机制来看,减载措施可以降低驱动力来源,加上反压结构提供抵抗力,两者共同作用,便可提高边坡安全系数,推动整体结构表现出更高的抗扰动能力,最终在复杂地质环境下保持持续稳定状态。

3 水利水电工程施工过程中高边坡治理技术应用措施

3.1 施工准备

施工准备阶段,施工单位需要聚焦边坡稳定控制目标,依据工程设计文件,核对边坡几何参数等数据,明确重点加固区域与控制断面,以保证治理措施与实际条件相一致。施工单位应建立完整的技术交底体系,细化说明锚固布置方案、抗滑结构位置及排水系统走向,顺畅衔接各工序,并同步展开测量控制工作,利用全站仪布设坡面控制点,形成精确坐标体系,为钻孔定位提供可靠基准。为了避免扰动坡体结构,施工单位应同步推进场地整平与施工通道布置,让机械设备稳定进入作业区域。与此同时,施工单位需要检验锚索钢绞线、注浆材料及喷射混凝土原材料质量,保证力学性能符合规范要求,并调试校验钻机设备,提前准备排水设施所需管材。另外,施工单位要结合边坡稳定分析结果,划定危险区域,布设警示标识,保持有序的施工过程状态,提前布设监测系统,连续记录边坡变形,为施工过程提供数据支持。

3.2 分级开挖

高边坡若一次性形成大面积裸露面,将会迅速改变岩体内部原有应力平衡,引发局部失稳现象,施工单位需要采用分级开挖方式合理划分开挖范围,让坡体形成新的稳定结构。为保证开挖后坡体稳定,施工

单位应依据边坡高度及岩体条件划分层级,设置分级平台,促使每一级坡体都处于可控范围内,并结合岩体完整性指标设计平台宽度,沿自上而下方向推进开挖顺序,逐渐释放上部荷载,避免集中扰动下部坡体。在开挖过程中,施工单位应精细控制钻爆参数,合理选择孔距,在限定范围内释放爆破能量,防止扰动周围岩体,让机械开挖与爆破作业相互配合,保持坡面较为整齐的形态,防止形成过度破碎区域。分级开挖过程中,各级坡体开挖完成后需检查稳定性,按照监测数据判断是否进入下一阶段施工,实时分析位移变化情况,及时调整开挖深度,让施工过程始终处于可控状态。从整体效果来看,分级开挖可以控制开挖过程,持续保障边坡稳定性,可有效降低施工风险,为高边坡治理提供实施基础。

3.3 坡面控制

开挖后的高边坡容易形成不规则破碎带,局部区域出现凸出体,若未及时整治,将影响整体稳定,施工单位需要精细化处理开挖界面,保持边坡表层连续性。在具体实施中,为了让表层结构紧密贴合基岩主体,施工单位要严格按照设计坡率修整坡面轮廓,控制坡角以及平台边界,保持边坡外形规整,并清理坡面,去除松散岩块。就裂隙较为发育区域而言,施工单位要结合岩体结构特征局部修整,保持坡面形态与内部结构相协调。在施工过程中,施工单位要合理控制爆破作业参数,优化装药结构,保持爆破作用范围在设计控制区域内,防止破坏坡面完整性,同时展开机械修坡作业,保持连续施工节奏,促使坡面形成稳定几何形态,避免因停工间隔加剧岩体风化程度,从而影响表层稳定性。

3.4 支护结构施工

支护结构施工要建立可靠受力体系,有效连接坡体松动区域与稳定岩层,让整体结构形成连续受力状态,并要求施工阶段紧密衔接开挖进度,及时介入支护措施,促使边坡始终处于受控状态。施工单位要采用测量控制系统精确定位钻孔,依据设计要求,保持孔壁完整,避免扰动周边岩体结构,从而保证后续注浆。锚杆或锚索安装过程中,施工单位需要严格控制插入深度以及角度,使其能够进入稳定岩层区域,形成有效锚固段,并施加设计预应力,让支护结构提前参与受力,以此抑制坡体变形发展。为紧密结合锚固体与岩体,选用需具备良好流动性的浆液,在孔内形成均匀包裹结构,其中喷射混凝土施工则与钢筋网片结合,可以提高表层抗剪能力,保持稳定的边坡表层状态。

3.5 布置排水设施

施工阶段需依据边坡地形特征以及水文条件,整体规划排水体系,形成连续通道,避免水流聚集在局

部区域。坡顶区域设置截水沟,控制汇水路径,把上部来水引到安全排放区域,避免雨水直接进入坡面范围。而且,施工单位要按照降雨强度确定截水沟断面尺寸,保证排水能力满足施工需求,设置导流槽,沿既定路径快速排出地表水,减少水流冲刷坡面的影响,同时保持坡面结构完整。此外,施工单位应设置水平排水孔,结合岩体裂隙发育方向来调整,并依据渗透系数控制孔径以及间距,持续稳定排水效果。施工单位要稳定开挖沟槽,避免干扰坡体,选择满足耐久性要求的排水管材选择。

3.6 运行监测体系

运行监测体系基于自动化监测设备,可实时记录坡体位移、锚索应力及孔隙水压力等关键指标,动态反映边坡内部变化过程。施工单位需要结合边坡结构布设监测系统,在坡面、坡体内部及关键控制部位设置多类型的监测点,采用GNSS定位技术,高精度测定表层位移变化,同时借助深部位移计获取坡体内部变形信息,让浅层与深层响应形成对比关系。数据处理环节,施工单位要采用数值模拟方法,综合研判监测结果,量化表达边坡稳定趋势,并建立阈值控制标准,识别异常变化,若位移速率或应力变化超出控制范围,系统及时发出预警信号,为施工调整提供决策支持。此外,为保证高边坡稳定控制更加精细,施工单位需定期校验设备精度,保证监测结果具备较高可信度,推动监测体系逐步向智能化方向发展。

4 结束语

构建跨部门、全流程的协同控制机制,能够系统性优化边坡受力状态,有效提升水利水电工程的整体耐久性能。未来,施工单位需要进一步融入智能分析手段,准确识别风险,同时施工组织方式向精细控制转变,强化全过程技术联动,从而增强治理措施的针对性,推动水利水电工程可持续发展。

参考文献:

- [1] 王剑书.水利水电工程中的高边坡加固与治理技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025(35):187-189.
- [2] 张文涛.水利水电工程中高边坡的加固和治理研究[J].工程建设与设计,2025(18):20-22.
- [3] 熊长军.水利水电工程中高边坡的加固和治理研究[J].水上安全,2024(22):133-135.
- [4] 卢绍文.水利水电工程中高边坡的加固和治理研究[J].冶金管理,2022(23):65-67.
- [5] 林君.水利水电工程高边坡的加固与治理[J].科技創新与生产力,2022(11):55-57.