

水利工程施工中边坡开挖支护技术的应用研究

赵立志

河北京文水利工程有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8780

[摘要] 水利水电工程建设中,提升边坡开挖支护技术,有助于提升工程整体质量,确保工程施工安全。为不断提升水利工程项目整体施工效果,本文结合具体工程案例,针对水利水电工程施工中的边坡开挖与支护技术进行了研究。本文首先分析了影响边坡稳定性的主要因素,然后介绍了水利水电工程中的边坡开挖支护技术,最后结合具体工程案例,对边坡开挖与支护技术的具体应用进行了阐述。

[关键词] 水利水电工程;边坡开挖;边坡支护

Research on Slope Excavation and Support Technology in Water Conservancy Engineering Construction

Zhao Lizhi

Hebei Jingwen Water Conservancy Engineering Co., Ltd.

[Abstract] In water conservancy and hydropower engineering projects, advancing slope excavation and support technologies contributes to enhancing overall project quality and ensuring construction safety. To continuously improve the overall construction effectiveness of water conservancy projects, this study conducts research on slope excavation and support techniques through specific engineering case studies. The paper first analyzes key factors affecting slope stability, then introduces slope excavation and support technologies used in water conservancy projects, and finally demonstrates practical applications through concrete case examples.

[Key words] Water conservancy and hydropower engineering; Slope excavation; Slope support

随着社会经济的不断发展,大型水利工程兴建对水资源调控、防洪减灾、清洁能源至关重要。工程建设中普遍形成高陡边坡,开挖扰动破坏了岩土体原有应力平衡,易导致滑塌等地质灾害,严重威胁工程安全、进度。因此,科学选择和应用边坡开挖支护技术,且实施全过程及多维度的稳定性控制,是保证水利工程安全建设和运行的核心议题。

一、水利水电工程施工中的边坡开挖支护技术

(一) 明挖技术

在水利水电工程边坡开挖施工中,应用明挖技术可以做到在不采用支护技术的情况下,使用设备独立完成地面挖掘作业。通常来讲,明挖技术主要有石方明挖和土方明挖两种,因明挖技术具有挖掘流程较为简单等优点,因此较为适用于土质边坡施工作业。具体来看,在采用石方明挖技术时,由于边坡岩石稳定性会对工程施工的安全性造成严重影响,因此需要施工人员在开挖作业之前应对区域内的岩石分布状况进行自行勘察,并结合勘察结果来确定最终的施工流程和所采取的施工

技术,同时针对施工过程中可能出现的施工问题进行分析,并制定出相应的应急预案。对于较为陡峭的边坡,则可以采取分梯度式的明挖作业;而对于较深的边坡则可以采取分层开挖的方式完成。在水利水电工程施工中应用土方明挖技术时,需要施工人员应严格按照施工当地的地质条件来设计施工图纸,并遵循施工方案来进行开挖作业。需要注意的是,应用明挖技术还应结合边坡的实际预留空间来对边坡的平整度进行相应调整,此时采用土方明挖技术相较于石方明挖会更加灵活。

(二) 钻爆开挖技术

在水利水电工程涉及的边坡开挖过程中,钻爆工艺主要面向岩体条件坚固的施工区段。此类地带若沿用常规挖掘手段,难以实现对高硬度岩层的有效破碎与清除,而钻爆法则可胜任此类坚硬地层的作业要求。当前,我国开展水利水电项目建设时,爆破掘进技术应用范围颇为广泛。伴随科技的持续进步,该技术领域亦随之演进,其操作方法和应用模式均经历了显著的革新与完善,工艺效能较先前显著提升。在部分水电站边坡

的开挖与支护施工中，某些承建方会将钻爆工艺的力学机理与岩体力学理论进行整合应用，并协同施喷混凝土支护工艺及锚杆支护手段进行综合施工，此举在强化作业安全系数的基础上，更能从整体上提升水利水电工程的工程质量及其运行年限。除此之外，应用钻爆开挖技术还可以有效缩短工程施工周期，降低工程的成本投入，提升水利水电工程的整体经济效益，避免出现工程预算超支的情况。具体来看，先进的钻爆开挖技术具备较强的实用性和安全性，采用该技术在对隧道进行开挖时，其本身会具有一定的承重作用，如果在搭配锚杆支护技术一起应用，则可以进一步提升开挖区域的稳定性。尤其是在一些地质条件较为复杂的区域，采用钻爆开挖技术，还可以结合具体施工方案来对施工作业流程进行优化调整，降低因外在环境因素对于施工作业的影响，确保水利水电工程边坡开挖支护作业的顺利开展。

(三) 边坡锚杆支护技术

当前，在我国水利水电工程建设领域，锚杆支护工艺的采用已相当普及。依据功能差异，边坡锚杆技术可划分为三类：首先，为板肋式混凝土锚杆挡墙，该体系结构完整性与抗地震扰动性能突出，整体刚度和稳固度优异，能够满足对支护性能要求苛刻的边坡工程；其次，系混凝土结合锚杆的挡墙结构，其环境适应能力较强，适用于多种工程支护场景，故在水电项目中普及度较高；最后，则是临时性锚杆挡墙，因应特定工程阶段需求，水电边坡开挖时常需架设此类临时支护。此类挡墙主要包含钢筋混凝土框架式与排桩式两种构造形式。二者不仅施工工艺相对简便，且经济性较好，故在水电工程的临时支护环节应用广泛。完成阶段性加固任务后，须及时拆除该临时结构，以免干扰后续施工环节，且严禁将其作为永久支护体系使用。在实施边坡锚杆技术时，需注重优化人力资源配置与工序衔接，严格依据工程需求控制支护结构的几何尺寸与作用范围，从而有效提升水电工程的整体施工品质。

二、工程概况

以某大型水库枢纽工程项目为例，位于山地，海拔差异达800m。该项目以地区供水和防洪为中心，是一座大(2)型水库，总库容2.8亿 m^3 ，由拦河坝、溢洪道、导流洞和电站等组成。其中，主坝右岸斜坡为典型的高陡岩体边坡，最大开挖高程为120m，坡面的总体坡度是1:0.3，局部受地形限制，已达到1:0.5，斜坡的地质情况较为复杂，岩性主要为中、厚层灰岩，局部夹有薄层泥岩，岩体完整性指数平均为45%，属于“破碎—较破碎”型。在科学的挖掘和支撑下，保证边坡的长期稳定系数 ≥ 1.35 ，50年一遇设计洪水标准，并在施工期内将边坡最大位移控制在30mm以内，使支护结构耐久性达到50年以上，图1为施工工艺流程。项目地处亚热带湿润季风气候区，

平均年降水量1600-1800mm，5-9月是雨季，日降水量的75%，单天最高降水量220mm，夏季暴雨强度大，持续时间短，容易引起地表径流的冲刷和地下水的变化。在地质条件上，由于岩石破碎，边坡自身稳定性较差，且节理、断裂共同作用，可能产生滑移，其中，由断层和顺层岩体组成的楔体体积1200 m^3 ，天然状态下安全系数只有1.02，强降雨时则降到0.85，具有顺层滑动的危险性。不同类型岩石的渗透性也存在明显的差异，其中，灰岩段的渗透率分别为 $1.2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 、泥质夹层 $3.5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 、断裂带 $8.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，且由于降雨的影响，容易产生较弱的滑面。在建设过程中，必须严格控制爆破振动速率在2.0cm/s以内，《爆破安全规程》GB6722-2014，并要求扬尘，PM10达到《环境空气质量标准》二级，日均 $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。另外，该项目位于河谷地区，场地较窄，从坡顶至库底的竖向落差达180m，横向间距只有220m，因此需要修建3条临时施工道路，路面宽度4.5m，最大纵坡8%；并设置2个转料平台，尺寸为15m \times 20m，承载力 $\geq 200\text{kPa}$ 。

三、水利水电工程中边坡开挖支护技术的具体应用

(一) 开挖准备

工程正式开挖前，需完成两项核心准备工作。首先，实施高精度测量作业。开挖前除完成技术交底与施工组织管理外，必须进行细致的测量工作。由于开挖作业依赖测量数据，其精确度直接影响施工效果。测量人员需保证数据准确，以最大限度减少施工偏差，确保工程质量达标。测量过程中须严格依据设计图纸，采用先进仪器进行科学检测。在划定开挖边界时，既要参照设计图纸，也要结合现场实际，通常预留10-15cm的操作余量，保障各工序协调推进。其次，完成爆破作业准备。本项目采用爆破钻孔工艺，需精确掌握炸药性能参数，落实安全防护措施。爆破前需精准标定坡面爆破点位，确保爆破方案与现场地质条件匹配，方能选择适宜的支护方案。同时需检测现场水文地质条件，包括地下水状况与岩体构造特征，对不符合要求部位及时修正，保证开挖支护顺利实施。

(二) 钻孔施工

本工程采用液压钻孔设备作业。施工启动前，技术人员须对钻具性能进行检测，清除附着杂质，保持钻头工作面洁净。成孔后立即注入护壁泥浆，确保浆液高度超出地下水位线至少1m，此举既为后续工序创造条件，也能降低钻进过程中的地层阻力。孔洞形成后需实施清孔作业，使钻具可在孔内空转而不进尺。此时向孔内注入清水，当孔底出现杂质时，土壤碎屑将被冲刷成泥浆排出，保障钻孔工序顺利完成。锚杆钻孔施工中，孔位偏移量应 $\leq 10\text{cm}$ ，孔轴线方向须符合设计要求。遇局部滑动区域时，可调整钻孔入岩角度，使其与滑动面夹角 $> 45^\circ$ ，待注浆完成后再进行锚杆安装。钻头直径宜比锚杆直径

大 15 cm 左右，采用预应力锚索对不稳定区段实施加固。为确保定位精度，钻孔时可适度敲击孔周岩体进行定位修正，确认无误后方可继续钻进。钻孔深度达标并经检验合格后，方可实施锚杆安装。

(三) 锚杆支护

本工程采用锚杆支护技术，对基坑开挖后的直立壁面土层实施钻孔作业。锚杆安装前，需用杆件标定孔深并标记，随后借助杆体将树脂胶卷输送至孔底进行搅拌。此过程使用锚杆安装设备逐步置入杆体，并严格按产品说明完成搅拌操作。搅拌结束后立即固定杆体，同步插入两根塑料导管至孔内，为后续张拉注浆与排气提供通道。导管置入时需防范管道堵塞或弯折，并精确控制插入深度，防止过深导致通道受阻。树脂胶卷搅拌完成后，安装紧固螺母与承压垫板。监理人员需对锚杆质量进行验收，待杆体抗拔承载力达到设计要求后，依据施工方案实施张拉作业。张拉操作采用扭矩扳手执行，须始终保持杆体轴向受力，待荷载稳定并符合技术规范后锁定锚杆系统，确保支护效能充分发挥。

(四) 拱形支护

拱形支护技术主要用于提高土体稳定性和承载能力。其设计与施工过程涉及多个关键步骤。一开始设计阶段需要进行详细地质勘察，获取土壤物理性质和力学参数，包括土壤密度、摩擦角和内聚力等。这些参数为后续支护结构设计提供基础数据。接下来，依据勘察结果，确定拱形支护的尺寸和形状。支护结构半径、厚度以及支撑点的布局均需经过计算，以确保其能有效分散土体的压力。

四、边坡稳定性综合控制策略

(一) 动态设计和信息化施工

传统的静态设计模式无法适应复杂多变的地质条件。动态设计理念强调“设计—施工—监测—反馈”的闭环管理。在施工过程中，通过现场地质编录与超前地质预报等手段，及时获取实际的地质信息，和原设计进行比对，如发现重大地质偏差，则迅速调整支护参数、开挖方案、施工工艺。信息化施工则是实现动态设计的关键，采用现代传感技术、数据传输技术、计算机分析技术，把施工现场的各类数据实时汇集、分析，为设计优化与施工决策提供科学依据。

(二) 全过程、多维度监控和智能预警体系

构建立体化及全覆盖的边坡监测网络，是实施有效稳定性控制的“千里眼”和“顺风耳”。此体系必须是多维度、全过程的，监测内容不但要涵盖地表宏观位移（如 GPS、全站仪监测），也要深入岩体内部，捕捉深部变形的“蛛丝马迹”（如钻孔测斜仪、多点位移计）。同时，诱发失稳的重要因素，如

地下水位、孔隙水压力（渗压计）、支护结构的受力状态（锚索测力计、钢筋计），也必须纳入监控范畴。这些监测数据汇入统一的数据中心后，通过时间序列分析、灰色系统预测和数值模拟反演等很多方法，对边坡的稳定性状态进行实时评估和趋势预测。在此基础上，构建分级预警机制非常重要，依据变形速率、累计位移量及应力变化等重要指标设定多级预警阈值（如蓝、黄、橙、红），若数据突破阈值，系统能自动触发声光报警，且通过短信、APP 推送等方式把预警信息精准发送给有关管理人员，为启动应急预案及组织人员设备撤离赢得宝贵的“黄金时间”，从而把风险管控从“事后处置”转变为“事前预防”。

(三) 精细化施工管理和工艺质量控制

在边坡工程中，任何宏大的设计蓝图最终都必须通过精细化的施工来兑现。施工质量的优劣，会直接影响支护体系能否发挥其预定效能，是确保边坡稳定性的“最后一道防线”。首先，开挖过程要严格控制，运用预裂爆破、光面爆破技术，显著地减小对保留岩体的扰动和损伤，保证开挖轮廓面的平整和完整；其次，对于关键支护工序，质量控制要达到“苛刻”的程度。例如，锚杆/锚索的钻孔深度、方位角必须逐根验收，保证其锚固于稳定岩层；注浆工艺是锚固力的生命线，必须运用压力注浆，且通过无损检测、拉拔试验保证注浆饱满度和粘结强度；喷射混凝土的配合比、喷射厚度、岩面的粘结力、后期养护，各个环节都必须严格把控。

结语

坡开挖及支护技术起着关键作用，与工程安全性和稳定性直接相关联，凭借科学合理开挖手段与行之有效的支护方式，可有效降低边坡失稳潜在风险，助力工程顺利实施，伴着新材料与新技术的不断拓展，未来边坡支护技术会愈发智能化且高效化，为水利工程可持续推进给予坚实有力支撑，为此应当持续聚焦该领域研究与实践，以便应对日益繁杂工程环境及挑战，实现水利工程安全且效益达至最大化。

[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]梁玉冰.边坡开挖支护技术在水利工程施工中的应用[J].工程建设与设计,2025(05):193-195.
- [3]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.
- [4]赵建梅.边坡开挖支护技术在水利工程施工中的应用[J].水上安全,2024(13):179-181.