

水利水电工程中高边坡开挖及锚喷支护的应用

徐阳阳

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：水利水电工程具有蓄水、防洪、发电及灌溉等多种功能，而高边坡的稳定性与工程安全与长期运行效率密切相关。基于此，本文结合某水利水电实际工程，针对深切河谷地貌下厚层灰岩夹泥岩互层、F1断层破碎带及强风化层等复杂地质条件，采用“分级开挖+短进尺强支护”工艺控制断层带塌方风险，结合预裂爆破与静态破碎技术降低开挖扰动。锚喷支护体系创新应用双层钢筋网与横向压筋结构，优化锚杆“先注浆后插杆”工艺，开发钢纤维增强湿喷混凝土技术，配合双层排水系统有效降低孔隙水压力。结果表明，科学合理的开挖顺序与支护参数设计可显著降低边坡失稳风险，缩短工期并节约成本。本研究旨在为水利水电工程高边坡施工提供了理论依据与技术参考，对类似工程具有指导意义。

【关键词】：水利水电工程；高边坡；开挖；锚喷支护

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.060

引言

水利水电工程施工作业经常会遇到各种复杂的地形与地质条件，高边坡的开挖与支护是保障工程安全的核心环节。近些年大型水电项目不断向高山峡谷地区拓展，高边坡高度与规模不断增大，其稳定性受岩体结构、水文地质及施工扰动等多因素影响，失稳风险显著增加。传统支护方式难以满足现代化工程建设实际需求，而锚喷支护技术凭借主动受力、施工灵活等优势，逐渐成为高边坡加固的主流方法。本文以实际工程为背景，系统探讨高边坡开挖工艺优化、锚喷支护参数设计及施工监测技术，旨在揭示开挖-支护耦合作用规律，提出适用于复杂地质条件的技术方案，为提升水利水电工程高边坡施工安全性与经济性提供科学依据。

1 工程概况

某大型水电站位于西南高山峡谷地区，坝高220米，库容35亿立方米，主要承担发电、防洪及灌溉任务。工程枢纽区属深切河谷地貌，两岸边坡高度达400米以上，岩体以厚层灰岩为主，夹薄层泥岩，受多组构造裂隙切割，岩体破碎且完整性差。左岸边坡存在F1断层破碎带，宽度约15米，充填断层泥，稳定性极差。工程开挖过程中需揭露最大厚度达80米的强风化层，且雨季降雨集中，地表水入渗加剧岩体软化。为保障大坝及附属设施安全，设计采用“分级开挖+锚喷支护+排水系统”的综合治理方案，其中锚喷支护体系包括系统锚杆（ $\Phi 28$ ， $L=9$ 米，间距2米 \times 2米）、C30喷射混凝土（厚度15厘米）及局部钢纤维增强层，总支护面积超12万平方米。

2 水利水电工程高边坡施工难点

(1)地质条件复杂。该水利工程由于断层破碎带与软硬互层岩体导致开挖面极易发生局部塌方，尤其是F1断层附近岩体自稳时间不足2小时，施工期间最好采用“短进尺、强支护”工艺。

(2)开挖扰动控制难。该项目边坡高度已经超出了400米，所以开挖作业需实施分级开挖模式，但开挖期间，上级边坡卸荷效应显著，导致下级边坡产生附加应力，最大位移达15厘米，所以施工人员需通过预裂爆破减少振动，但爆破参数优化需兼顾效率与安全^[1]。

(3)支护时效性要求高。由于施工区域雨季降雨较为集中，地表水渗入势必会加剧岩体的软化，坡面渗流压力骤增。因此，锚杆注浆体强度应在48小时内达到设计值的70%，否则易引发支护失效。

(4)空间协同施工冲突。锚杆钻孔与喷射混凝土作业面重叠，高空作业平台搭设与爆破飞石防护存在矛盾，施工前应借助BIM技术优化工序衔接处理。

(5)长期耐久性风险。从上述工程概况了解到，该大型水电站处于峡谷地带，高湿度环境会进一步加速锚杆腐蚀，工程设计寿命在50年要求下需采用环氧涂层锚杆与耐候性混凝土，但现场质量控制难度大。

3 水利水电工程中高边坡开挖技术要点

3.1 施工准备

水利水电工程高边坡开挖施工作业的高效开展离不开前期完善的准备工作，就该水电站项目而言，开始施工前首先需完成详细的地质勘察与边坡稳定性分析，重点查明F1断层破碎带及软弱夹层的空间分布，施工人员可借助三维激光扫描建立高精度地形模型，

为分级开挖设计提供依据。同时，布置好各项临时设施，包括宽8米的环形施工道路（坡度 $\leq 8\%$ ）、容量200立方米的泥浆池及分级平台排水沟（断面0.5米 \times 0.6米），确保机械通行与废水处理能力。此外，采用液压破碎锤（适用于断层带岩体破碎）与潜孔钻机（ $\Phi 165\text{mm}$ 孔径，用于锚杆孔施工）组合，并配备边坡稳定性监测系统（含8个测斜孔、4个土压力盒），实现开挖过程动态反馈。人员培训需覆盖爆破安全规程、锚杆注浆工艺及应急逃生路线，同时编制专项施工方案，明确“自上而下、分级开挖、及时支护”的原则，并通过专家论证。材料方面则应准备C30喷射混凝土原料（早强型减水剂掺量1.5%）、 $\Phi 28$ 砂浆锚杆（抗拉强度 $\geq 500\text{MPa}$ ）及钢纤维（长度35mm，掺量 $30\text{kg}/\text{m}^3$ ），所有材料需经现场抽检合格后方可使用。

3.2 清理边坡

该项目边坡清理施工作业采用人工配合反铲挖掘机清除坡面浮石、植被根系及断层带松散堆积物，清理厚度控制在0.3米以内，避免过度扰动基岩。F1断层影响区采用高压水枪（压力15MPa）冲洗坡面，去除断层泥及风化碎屑，同时利用地质雷达扫描隐蔽裂隙，标记需重点加固区域。需要注意，清理过程中应设置临时排水沟（坡度5%），防止地表水冲刷坡面，并在断层带周边铺设土工布（克重 $400\text{g}/\text{m}^2$ ）反滤层，减少渗流对支护结构的侵蚀。一些局部凸起岩体（高度超过1.5米）可以采用静态破碎剂（膨胀压力 $\geq 50\text{MPa}$ ）进行静力拆除，避免爆破振动引发次生灾害^[2]。清理工作完成后，还需组织监理、地质及施工三方进行联合验收，要求坡面平整度偏差 $\leq \pm 10$ 厘米，无反坡现象，以为后续锚喷支护提供良好作业面。

3.3 土方开挖

水利水电工程高边坡土方开挖期间，施工人员需严格控制分层厚度与边坡坡率。该项目采用“分层分段、跳槽开挖”工艺，每层开挖高度不超过3米，分段长度控制在15米以内，以减少单次暴露面积。开挖设备选用1.6立方米反铲挖掘机配20吨自卸汽车，运输道路铺设20厘米厚碎石基层，转弯半径 ≥ 15 米，确保重型设备通行安全。强风化层（厚度达80米）采用“先修坡、后开挖”策略，每层开挖后立即用人工配合修坡机整平坡面，坡率控制在1:0.75（陡于设计坡率时需提前支护）。

除此之外，开挖期间必须实时监测边坡位移（采用全站仪每2小时观测一次），当水平位移速率超过 $2\text{mm}/\text{d}$ 时，暂停开挖并启动应急支护（如增设 $\Phi 32$ 随

机锚杆）。土方开挖与排水系统施工同步进行，每层平台设置横向排水盲沟（碎石反滤层厚30厘米），将坡面渗水引至主排水沟，避免积水软化岩土体。开挖至设计基面时预留30厘米保护层，采用人工精细开挖，防止超挖破坏基底承载力。

3.4 石方开挖

高边坡石方开挖过程中，工作人员一定要做好施工效率与边坡稳定性两者之间的平衡。该项目灰岩与泥岩互层岩体采用“预裂爆破+光面爆破”组合技术：主爆区使用乳化炸药（孔网参数1.2米 \times 1.5米，单耗 $0.45\text{kg}/\text{m}^3$ ），预裂孔间距0.8米，线装药密度控制在 $200\text{g}/\text{m}$ ，确保预留光爆层厚度1.5米；光爆孔采用不耦合装药（空气间隔器长度0.3米），使坡面半孔率达90%以上。对于F1断层破碎带，改用机械破碎（液压劈裂机）或静态爆破，避免爆破振动导致断层活化。开挖过程中实施“一炮一设计”制度，根据岩体节理裂隙发育情况动态调整孔网参数，并通过振动监测仪（测点距爆源50米）控制峰值粒径速度 $\leq 10\text{cm}/\text{s}$ ^[3]。石方运输采用30吨矿用自卸车，装车高度不超过车厢板，防止抛洒污染环境。开挖后及时对坡面进行人工修整，清除松动岩块，并用高压风枪清理粉尘，为锚喷支护创造洁净作业面。每层石方开挖完成后，需经地质雷达检测坡面隐伏裂隙，确认无安全隐患后方可进行下一道工序。

4 水利水电工程中高边坡锚喷支护技术的应用

4.1 钢筋网绑扎敷设技术要点

钢筋网绑扎敷设是水利水电工程高边坡锚喷支护体系的基础环节。该项目钢筋网采用 $\Phi 6$ 冷轧带肋钢筋，网格间距严格按设计要求的 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 控制，并利用火烧丝双向绑扎固定，确保网片平整且搭接处牢固。断层破碎带区域采用双层钢筋网增强抗剪能力，外层网片与锚杆头部焊接，形成整体受力结构。施工过程中，边坡表面需先进行高压水枪冲洗，清除松散岩块及断层泥，确保钢筋网与岩面贴合紧密。部分凸起岩体最好采用人工配合机械切割方法，将大块岩石化整为零，避免钢筋网悬空^[4]。除此之外，该工程F1断层影响区钢筋网铺设后还需增设 $\Phi 12$ 横向压筋，间距1.5米，与锚杆交叉点焊接，形成空间桁架结构，这样能够有效提升整体稳定性。

4.2 锚杆施工关键技术

锚杆施工质量对高边坡稳定性具有极大的影响，所以我们必须引起高度重视。该项目采用 $\Phi 28\text{II}$ 级钢筋锚杆，长度9米，间距2米 \times 2米，梅花形布置。钻孔

使用 YZ-28 型气腿式钻机, 孔径 $\Phi 76\text{mm}$, 钻孔深度比设计值深 0.5 米, 确保锚固段嵌入稳定岩体。注浆材料选用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥, 水灰比 0.45, 注浆压力控制在 0.6~1.0MPa, 采用底部注浆法, 注浆管插入孔底 100mm, 随浆液注入缓慢拔出, 直至孔口泛浆。

断层破碎带采用“先注浆、后插杆”工艺, 注浆体强度达 15MPa 后插入锚杆, 并设置居中支架保证锚杆居中^[5]。锚杆安装后进行拉拔试验, 每 300 根抽检 3 根, 破坏性试验加载至设计值的 1.5 倍, 确保锚固力达标。实际施工中, 通过优化注浆参数, 锚杆抗拔力平均值达 120kN, 超过设计要求的 100kN, 有效抑制了边坡深层滑动。

4.3 喷射混凝土施工工艺

混凝土喷射施工工艺需兼顾其强度与耐久性, 综合考虑该项目现场实际情况, 最终决定采用 C30 细石混凝土, 配合比为水泥:砂:碎石:水=1:2:2:0.45, 同时掺入 3% 钢纤维增强抗裂性能。实际喷射作业分两次进行, 首次喷射厚度 50mm, 封闭坡面并埋设厚度控制标志钢筋; 二次喷射至设计厚度 150mm, 采用“湿喷法”工艺, 喷射机工作压力 0.12MPa, 喷头与坡面距离 0.8~1.0 米, 喷射方向垂直岩面。强风化层首次喷射前预喷 30mm 厚早强混凝土封闭裂隙, 防止渗水软化岩体。喷射过程中, 沿边坡纵向每 20 米设置伸缩缝, 缝宽 20mm, 填充沥青麻丝^[6]。养护采用覆盖土工布并喷水保湿, 养护期不少于 14 天。监测表明, 喷射混

凝土 28 天抗压强度达 35MPa, 与岩体粘结强度达 1.2MPa, 有效防止了坡面风化剥落。

4.4 排水施工系统设计

该项目设置的双层边坡排水体系: 即坡面布置 $\Phi 100\text{PVC}$ 排水管, 间距 2 米, 下倾 10° , 伸入岩体 4 米, 管周包裹土工布反滤层; 坡脚设置 $300\text{mm}\times 300\text{mm}$ 红砖砌筑排水沟, 坡率 0.15%, 内壁采用 1:2 水泥砂浆抹面。并且, F1 断层带增设横向排水盲沟, 断面 $500\text{mm}\times 500\text{mm}$, 填充级配碎石, 将断层渗水引至主排水沟。需要注意的是, 排水管安装前需进行压力试验, 确保无渗漏; 排水沟施工采用分段跳槽法, 每段长度不超过 15 米, 防止不均匀沉降^[7]。

5 结语

综上所述, 本工程通过严格控制高边坡开挖技术要点, 同时结合实际情况优化了锚喷支护工艺, 成功解决了高山峡谷地区高边坡施工中的地质复杂性、时效性控制及耐久性风险等关键难题。实践证明, 分级开挖与动态监测相结合的施工模式, 配合锚喷支护体系的精细化设计, 显著提升了边坡稳定性。BIM 技术的应用有效化解了空间协同施工冲突, 而钢纤维混凝土与环氧涂层锚杆的推广则强化了结构的长期耐久性。当然, 我们未来需进一步深化多场耦合作用下支护体系长期性能研究, 完善极端气候条件下的应急维护机制, 以应对全球气候变化对水利水电工程安全的新挑战。

参考文献:

- [1] 徐文彬. 钢管桩复合锚喷技术在水利工程边坡开挖支护中的应用[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(32): 193-196.
- [2] 王庭作. 公路高边坡危岩稳定性分析及治理方法[J]. 交通世界, 2024, (20): 19-21.
- [3] 沈英, 李雄, 魏明方, 等. 中空自进式锚杆在溢洪道高边坡加固处理中的应用[J]. 云南水力发电, 2022, 38(04): 197-200.
- [4] 冯瑜. 水利工程中高边坡开挖与支护工程的施工要点[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(02): 112-113.
- [5] 马淑芝, 刘小浪, 席人双, 等. 开挖对顺向岩质高边坡稳定性影响及锚索加固效果分析[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(05): 637-644.
- [6] 龚强. 高边坡开挖锚索施工技术[J]. 交通世界, 2018, (Z2): 38-39.
- [7] 王庭作. 公路高边坡危岩稳定性分析及治理方法[J]. 交通世界, 2024, (20): 19-21.