

水利水电工程高边坡喷锚支护与汛期坡面排水协同施工技术研究

张俊杰

河北省水建水电工程有限公司, 河北 保定 071000

[摘要]水利水电工程高边坡因所处区域的地形条件复杂、汛期降雨强度大且集中,容易发生支护体系失稳破坏、坡面冲刷侵蚀等,对工程的施工安全有着直接的影响。喷锚支护能够有效控制岩体变形,汛期坡面排水能够削弱水对边坡的影响,虽然两者的协同作业是保障高边坡稳定的关键环节,但是在具体的施工过程中仍存在一些不足,例如工序衔接不顺畅等、参数匹配不合理等。基于此,文章充分围绕高边坡施工的特性进行深入探究,制定一套科学可行的协同施工技术方案,为水利水电工程高边坡汛期施工安全提供技术支持。

[关键词]水利水电工程;高边坡;喷锚支护;汛期坡面排水;协同施工

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19600

中图分类号: TV554.1

文献标识码: A

Research on Collaborative Construction Technology of High Slope Spray Anchor Support and Flood Season Slope Drainage in Water Conservancy and Hydropower Engineering

ZHANG Junjie

Hebei Shuijian Hydropower Engineering Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract: High slopes in water conservancy and hydropower projects are prone to instability and damage of the support system, erosion of the slope surface, etc. due to the complex terrain conditions in the area, high and concentrated rainfall intensity during the flood season, which directly affects the construction safety of the project. Spray anchor support can effectively control rock deformation, and slope drainage during flood season can weaken the impact of water on slopes. Although the coordinated operation of the two is a key link to ensure the stability of high slopes, there are still some shortcomings in the specific construction process, such as poor process connection and unreasonable parameter matching. Based on this, the article thoroughly explores the characteristics of high slope construction and develops a scientifically feasible collaborative construction technology plan to provide technical support for the safety of high slope construction in water conservancy and hydropower projects during flood season.

Keywords: water conservancy and hydropower engineering; high slope; spray anchor support; slope drainage during flood season; collaborative construction

引言

水利水电工程项目多处于山区峡谷地带,高边坡工程在此类工程建设中普遍存在。然而山区峡谷区域的地质条件复杂,加之长期受到恶劣水文气象条件的影响,提高了高边坡工程的施工难度,其中汛期短时强降雨更是诱发高边坡滑坡、失稳、坍塌等问题的关键诱因,不仅会导致工程工期的延误,而且可能引发重大安全事故,对水利水电工程的顺利推进有着严重影响。喷锚支护因其加固效果显著、施工便捷等相关优势,在水利水电高边坡加固工程中得到了广泛的使用,可有效提高边坡岩体的稳定性与整体性。汛期坡面排水能够有效排出坡面汇,降低地下水对岩体的渗透侵袭,在一定程度上可防范边坡失稳风险。但值

得注意的是,在目前水利水电工程高边坡施工过程中,建设单位在组织施工时,通常将喷锚支护与坡面排水作为两个独立的分项工程,多采用分项施工模式,两者缺乏协同施工容易出现施工节奏脱节、工序衔接不合理等相关问题,未能从根本上解决高边坡汛期安全隐患。基于此,开展喷锚支护与汛期坡面排水协同施工技术研究,对于保障高边坡工程施工安全、推动水利水电工程高质量建设、缩短施工工期具有重要的工程实践意义。

1 喷锚支护与汛期坡面排水协同作用机理

在高边坡工程安全防护体系中,喷锚支护与汛期坡面排水存在密切的协同作用,两者形成相互支撑,本质上是“排水保支护、支护护排水”的良性循环,共同筑牢高边

坡的稳定性防线。坡面排水系统为喷锚支护施工创造了良好的施工条件,可以有效避免因雨水对支护效果造成的影响。因汛期降雨集中且强度比较大,如果高边坡坡面的雨水不能及时排出,会冲刷坡面岩体,甚至会渗透岩体的内部,降低岩体的强度。此外,高边坡坡面的积水也会导致支护结构与填体之间出现缝隙,导致支护结构开裂、脱落。而通过构建完善的坡面排水系统能够有效疏导扑面的雨水排出,为喷锚支护施工提供了稳定的作业环境。而喷锚支护通过向坡面岩体喷射混凝土,植入锚杆,可以对岩体的松动、脱落起到抑制作用,能够确保排水系统长期稳定运行,避免排水设施因岩体变形、坍塌而受损,喷锚支护与汛期坡面排水的协同作用关系如图 1 所示。

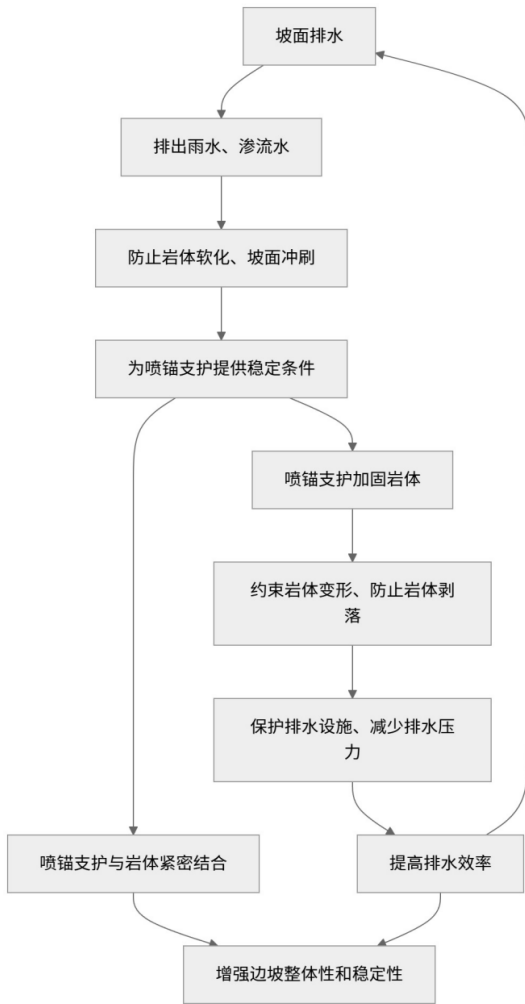


图 1 喷锚支护与坡面排水协同作用关系图

2 喷锚支护与汛期坡面排水协同施工工艺优化

2.1 协同施工总体原则

喷锚支护与汛期坡面排水协同施工应遵循以下原则:

- (1) 排水先行: 在喷锚支护施工前, 优先完成坡面排水

设施的布设, 确保坡面雨水和渗流水能及时排出, 为喷锚支护施工创造良好条件; (2) 支护跟进: 排水设施布设完成后, 及时开展喷锚支护施工, 快速加固坡面岩体, 保护排水设施; (3) 协同控制: 施工过程中, 同步控制排水设施施工质量和喷锚支护施工质量; (4) 动态调整: 根据汛期降雨情况、岩体渗流变化和坡面变形情况, 动态调整施工参数和施工进度。

2.2 协同施工工序优化

结合高边坡施工流程, 优化后的喷锚支护与汛期坡面排水协同施工工序如下:

- (1) 坡面清理: 清除坡面松动岩体、浮土和杂物, 修整坡面, 使坡面坡度符合设计要求, 为排水设施布设和喷锚支护施工奠定基础;

- (2) 排水设施布设: 根据设计要求, 在坡面布设排水设施, 确保排水设施位置、坡度、间距符合设计标准, 排水通畅;

- (3) 锚杆施工: 在排水设施布设完成后, 开展锚杆施工, 钻孔、清孔、插入锚杆、注浆, 确保锚杆锚固牢固, 与岩体紧密结合;

- (4) 钢筋网铺设: 锚杆注浆凝固后, 铺设钢筋网, 钢筋网与锚杆连接牢固, 确保钢筋网平整、贴合坡面;

- (5) 喷射混凝土施工: 钢筋网铺设完成后, 开展喷射混凝土施工, 喷射混凝土覆盖钢筋网和排水设施端部, 确保喷射混凝土密实、平整, 与岩体和排水设施紧密结合;

- (6) 排水设施调试与维护: 喷射混凝土凝固后, 对排水设施进行调试, 检查排水通畅性, 及时清理堵塞物; 同时, 对喷锚支护结构进行检查, 发现裂缝、脱落等问题及时处理;

- (7) 动态监测与调整: 施工过程中, 对坡面变形、岩体渗流量、排水效果进行实时监测, 根据监测数据, 动态调整喷锚参数和排水参数, 确保协同施工效果。

2.3 关键工序控制要点

2.3.1 排水设施布设控制要点

排水设施布设应结合坡面坡度、岩体渗流情况和汛期降雨强度, 重点控制以下要点: (1) 排水管布设: 采用仰角布设, 仰角控制在 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 确保渗流水能顺利排出; 排水管间距根据岩体渗流量确定, 一般为 $1.5 \sim 2.5\text{m}$, 直径为 $50 \sim 100\text{mm}$, 排水管外部包裹土工布, 防止泥沙堵塞; (2) 排水沟布设: 在坡面平台、坡脚布设排水沟, 排水沟坡度不小于 3% , 确保排水通畅, 排水沟断面尺寸根据坡面径流量确定, 一般为 $300\text{mm} \times 300\text{mm} \sim 500\text{mm} \times 500\text{mm}$, 采用现浇混凝土或预制混凝土构件铺设, 接缝

处做好防渗处理；(3) 排水出口布设：排水出口应设置在坡脚安全位置，避免排水冲刷坡脚岩体，出口处设置防护设施，防止泥沙流失。

2.3.2 喷锚支护施工控制要点

喷锚支护施工应与排水设施布设紧密配合，重点控制以下要点：(1) 锚杆施工：锚杆钻孔应避开排水设施，避免破坏排水设施；锚杆长度、间距、直径应符合设计要求，钻孔深度比设计锚固段长 0.5m，清孔应彻底，注浆压力控制在 0.5~1.5MPa，确保注浆密实；(2) 钢筋网铺设：钢筋网应贴合坡面，与锚杆焊接牢固，搭接长度不小于 20d (d 为钢筋直径)，网格尺寸控制在 150~300mm；(3) 喷射混凝土施工：喷射混凝土强度等级不低于 C20，厚度控制在 80~120mm，分 2~3 层喷射，每层厚度 30~60mm，喷射时避开排水设施出口，防止浆液堵塞排水管；喷射混凝土应密实、平整，无裂缝、脱落等缺陷。

2.3.3 工序衔接控制要点

工序衔接是协同施工的关键，重点控制以下要点：(1) 排水设施布设完成后，应及时开展锚杆施工，间隔时间不超过 24h，避免坡面岩体松动；(2) 锚杆注浆凝固时间达到设计要求（一般为 7d）后，再铺设钢筋网，确保锚杆能有效支撑钢筋网；(3) 喷射混凝土施工应在钢筋网铺设完成后 24h 内开展，避免钢筋网锈蚀；(4) 喷射混凝土凝固后，及时对排水设施进行调试，确保排水通畅，同时检查喷锚支护结构，发现问题及时处理。

3 协同施工关键参数匹配研究

喷锚支护参数与汛期坡面排水参数的合理匹配，是发挥二者协同作用的核心，本文通过理论计算和试验分析，确定协同施工中的关键参数及其匹配关系，为协同施工提供科学依据。

3.1 关键参数确定

3.1.1 喷锚支护关键参数

结合水利水电工程高边坡特点，喷锚支护关键参数包

括锚杆参数（长度、间距、直径）、喷射混凝土参数（厚度、强度）和钢筋网参数（规格、网格尺寸），各参数的确定依据如下：

(1) 锚杆长度：根据边坡高度、岩体性质和稳定性要求，通过岩体力学计算确定，一般为 3~8m，对于风化严重、软弱夹层发育的岩体，锚杆长度取较大值；(2) 锚杆间距：根据锚杆长度和岩体抗剪强度确定，一般为 1.5~2.5m，间距过大则支护效果不佳，间距过小则增加施工成本；(3) 锚杆直径：根据锚杆长度和承载要求确定，一般为 16~32mm，直径越大，承载能力越强；(4) 喷射混凝土厚度：根据坡面岩体风化程度和防护要求确定，一般为 80~120mm，风化严重的岩体取较大值；(5) 喷射混凝土强度：一般不低于 C20，确保喷射混凝土具有足够的强度和耐久性；(6) 钢筋网规格：采用 HPB300 级钢筋，直径为 6~12mm，网格尺寸为 150~300mm，根据喷射混凝土厚度和防护要求确定。

3.1.2 坡面排水关键参数

汛期坡面排水关键参数包括排水管参数、排水沟参数，各参数的确定依据如下：

(1) 排水管直径：根据岩体渗流量和坡面径流量确定，一般为 50~100mm，渗流量大的区域取较大值；(2) 排水管间距：根据岩体渗流密度和坡面坡度确定，一般为 1.5~2.5m，渗流密度大的区域间距减小；(3) 排水管仰角：根据岩体渗流方向和排水效率确定，一般为 15°~20°；(4) 排水沟断面尺寸：根据坡面径流量确定，一般为 300mm×300mm~500mm×500mm，径流量大的区域取较大尺寸；(5) 排水沟坡度：确保排水通畅，一般不小于 3‰，但需避免坡度过大导致坡面冲刷。

3.2 参数匹配关系分析

喷锚支护参数与坡面排水参数之间存在密切的匹配关系，合理的参数匹配能充分发挥二者的协同作用，协同施工关键参数匹配表如表 1 所示。

表 1 协同施工关键参数匹配表

边坡类型	锚杆参数（长度×间距×直径）	喷射混凝土参数（厚度×强度）	钢筋网参数（直径×网格尺寸）	排水管参数（直径×间距×仰角）	排水沟参数（断面尺寸×坡度）
弱风化岩体高边坡 (高度 5~10m)	3~5m×2.0~2.5m ×16~22mm	80~100mm×C20	6~8mm×200~ 300mm	50~70mm×2.0~ 2.5m×15°~18°	300mm×300mm~ 400mm×400mm× 3‰~5‰
强风化岩体高边坡 (高度 10~15m)	5~7m×1.5~2.0m ×22~28mm	100~120mm× C20~C25	8~10mm×150~ 200mm	70~90mm×1.5~ 2.0m×17°~20°	400mm×400mm~ 500mm×500mm× 5‰~8‰
软弱夹层发育高边坡 (高度 15~20m)	7~8m×1.5~2.0m ×28~32mm	120mm×C25	10~12mm×150mm	90~100mm×1.5m ×18°~20°	500mm×500mm× 8‰~10‰

4 试验验证

4.1 试验方案设计

4.1.1 试验模型制作

根据相似原理,制作高边坡模型,模型比例为 1:20,模型高度为 1.5m,坡面坡度为 1:0.75,模型材料采用相似材料(水泥、砂、碎石、水按一定比例混合),模拟弱风化岩体高边坡,岩体力学参数如下:密度 2.2g/cm^3 ,抗压强度 15MPa,抗剪强度 1.8MPa,渗透系数 $1.2 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ 。

模型分为两组,一组为协同施工组(采用本文提出的协同施工技术,按表 1 中弱风化岩体高边坡参数布设排水设施和喷锚支护),另一组为分项施工组(先进行喷锚支护施工,再进行排水设施布设,参数与协同施工组一致)。

4.1.2 试验工况模拟

模拟汛期降雨工况,采用人工降雨装置,降雨强度为 50mm/h,降雨持续时间为 2h,监测两组模型的坡面位移、岩体渗流量、喷锚支护结构应力等指标,对比分析两组模型的稳定性和施工效果。

4.2 试验结果与分析

试验结束后,整理监测数据,对比分析协同施工组与分项施工组的试验结果,具体如下:

(1) 坡面位移:协同施工组坡面最大水平位移为 3.2mm,最大竖向位移为 2.8mm;分项施工组坡面最大水平位移为 6.5mm,最大竖向位移为 5.9mm。协同施工组坡面位移明显小于分项施工组,说明协同施工能有效约束坡面变形,提高边坡稳定性。

(2) 岩体渗流量:协同施工组岩体平均渗流量为 0.8L/min,降雨结束后 30min 内渗流量降至 0.1L/min;分项施工组岩体平均渗流量为 1.5L/min,降雨结束后 60min 内渗流量降至 0.1L/min。协同施工组渗流量更小,排水效率更高,能快速排出岩体渗流水,减少水对岩体的软化作用。

(3) 喷锚支护结构应力:协同施工组喷锚支护结构最大应力为 12.5MPa,小于 C20 混凝土的抗压强度(20MPa);分项施工组喷锚支护结构最大应力为 18.6MPa,接近 C20 混凝土的抗压强度。协同施工组喷锚支护结构应力更小,受力更合理,能有效避免支护结构开裂、失效。试验结果对比表如表 2 所示。

表 2 试验结果对比表

试验组别	最大水平位移 (mm)	最大竖向位移 (mm)	平均渗流量 (L/min)	支护结构最大应力 (MPa)
协同施工组	3.2	2.8	0.8	12.5
分项施工组	6.5	5.9	1.5	18.6

试验结果表明,采用本文提出的喷锚支护与汛期坡面排水协同施工技术,能有效减少坡面位移、降低岩体渗流量、减小喷锚支护结构应力,提高边坡的稳定性和施工安全性,协同施工效果明显优于分项施工,验证了协同施工技术的有效性和可行性。

5 结论与建议

5.1 结论

本文围绕水利水电工程高边坡喷锚支护与汛期坡面排水协同施工技术开展研究,喷锚支护与汛期坡面排水协同作用能有效提高高边坡的稳定性和施工安全性。通过优化协同施工工艺,对施工的工序以及关键控制要点进行明确,可以实现二者的高效协同施工,能有效减少坡面位移、降低岩体渗流量、减小喷锚支护结构应力。

5.2 建议

结合本文研究成果,提出以下建议:

1. 施工前,应结合边坡地质条件、汛期降雨情况,合理设计喷锚参数和排水参数。
2. 施工过程中,严格按照优化后的协同施工工艺施工,加强工序衔接控制和质量控制。
3. 建立完善的监测预警体系,加强汛期施工监测,确保施工安全;根据监测数据,动态调整施工参数和施工进度。

[参考文献]

- [1]林惠颜.水利水电工程施工中边坡开挖支护技术运用策略研究[J].工程技术研究,2024,9(21):97-99.
- [2]李艳艳.复杂地质的道路改扩建边坡支护施工技术研究[J].河北水利电力学院学报,2024,34(2):13-18.
- [3]王旭鑫.水利工程施工中的边坡开挖支护技术分析[J].新型工业化,2022,12(5):128-132.
- [4]曹剑进,黄志华.水利水电工程中高边坡开挖支护施工技术[J].珠江水运,2023(7):9-11.
- [5]牟慧琳.水利隧洞施工中围岩稳定性对成本控制的影响及应对策略[J].大众标准化,2026(2):127-129.
- [6]路军富,李旻昊,冉迅,等.隧道支护工字型钢与喷射混凝土粘结滑移性能研究[J].工程力学,2024,41(9):167-178.
- [7]李智,成会军,胡礼文,等.洪水河水库土质砂砾边坡锚杆施工工艺[J].甘肃水利水电技术,2024,60(5):31-34.
- [8]张国栋.边坡开挖支护技术在水利工程施工中的应用要点[J].中国厨卫,2024,23(9):171-173.

作者简介:张俊杰(1998—),毕业于太原理工大学水利水电工程专业,就职于河北省水建水电工程有限公司,助理工程师。