

水利水电施工中边坡开挖支护技术的应用策略研究

董 莹, 孙莹莹

(黄河河口管理局垦利黄河河务局, 山东 东营 257091)

摘 要 为解决水利水电工程施工过程中因边坡开挖引发的稳定性问题, 本文以典型山区水利工程为背景, 对边坡支护技术的应用策略进行系统研究, 重点分析边坡地质环境特征、支护结构类型、设计优化原则及施工质量控制要点。通过梳理不同岩性条件下的支护方法, 归纳锚杆支护、喷射混凝土、抗滑桩等常用支护结构的适用性与功能机理, 探讨多因素耦合作用下的支护设计思路, 结合数值模拟手段提出合理的参数控制策略, 并从施工流程、质量验收与风险监测等方面提出针对性管理措施, 以期为类似复杂地质条件下的水利水电工程边坡施工提供具有实用价值的技术参考, 进而提升支护系统的整体安全性与耐久性。

关键词 水利水电施工; 边坡开挖支护技术; 数值模拟

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.016

0 引言

水利水电工程常处于高陡山体与深切峡谷地带, 其边坡开挖作业面临地质构造复杂、岩体节理发育及外部扰动强等不利因素, 支护系统在工程安全中发挥着关键作用。边坡一旦发生滑移或失稳, 不仅会威胁施工人员的生命安全, 还将造成重大经济损失及施工进度延误。因此, 合理配置支护结构、优化设计流程并强化动态监测已成为边坡施工的重要技术要求。

1 水利水电工程中边坡工程特点分析

1.1 边坡地质环境与地形特征

水利水电工程普遍布局于河谷、峡谷或山地丘陵地带, 边坡常表现为岩质或复合型地质体, 其结构复杂, 稳定性受控于多种地质构造因素。在天然地形条件下, 边坡坡度多介于 $35^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 之间, 岩体常分布节理裂隙群, 岩性组合呈显著不均质特征。例如: 在西南地区典型岩质边坡中, 岩体坚固性系数 (RQD) 常低于 50%, 属中低完整性范畴, 易受外界扰动影响产生滑移或剥落。地形高差大、地貌破碎度高使边坡在自然状态下已处于临界稳定状态, 稍受干扰即可能出现失稳破坏^[1]。

1.2 边坡开挖对周边地质环境的扰动分析

在边坡开挖过程中, 大规模岩土体剥离及施工扰动将显著改变原有地应力平衡体系, 诱发围岩卸荷、

剪应力集中与裂隙扩展, 严重时形成新滑裂面或激活潜在滑带。卸荷作用常导致边坡表层岩体抗剪强度降低 20% 以上, 尤其在坚硬岩体中, 由于弹性响应, 裂隙发展更为迅速, 构造面失稳风险显著提升。水文地质条件亦受显著扰动, 原始渗流场发生重构, 降雨、地下水补给增强边坡软弱带饱和度, 使孔隙水压力上升, 剪切强度折减达 15% ~ 30%, 大幅削弱整体稳定性。此外, 爆破振动与开挖设备引起的动荷载叠加效应亦加剧地质体应力扰动, 诱发次生裂缝和局部滑塌。

2 水利水电施工中边坡开挖支护技术类型与适用性

2.1 主流支护结构类型

水利水电工程中的边坡支护结构体系需针对地质构造复杂、边坡高陡、施工干扰强等特征, 采用分层、多元化的支护方式。常用结构包括锚杆—喷射混凝土支护体系、钢筋网复合支护、抗滑桩与支挡结构等。锚杆支护常用于岩质边坡, 锚固深度通常取边坡高度的 $1/4 \sim 1/3$, 以提高岩体内部整体性; 喷射混凝土厚度一般控制在 8 ~ 15 cm, 抗压强度达到 20 ~ 30 MPa, 具备初期封闭和表面稳定作用。钢架支护多用于软弱围岩边坡, 可抵抗大变形条件下的结构位移。对于具有滑移趋势的边坡, 抗滑桩直径常取 1.2 ~ 2.0 m, 桩间距控制在 3 ~ 6 m, 有效发挥抗剪与限制位移的功能。重力式挡土墙适用于堆积层或碎石土边坡, 墙高通常小于 10 m, 超过时需配合锚索与土钉加强整体稳定^[2]。

2.2 支护结构功能与作用机理分析

边坡支护结构的作用机理依赖于其与原岩体之间的相互作用及受力特征的协调转化。锚杆通过锚固体与周围岩体之间的黏结力传递轴向拉力，形成“复合结构体”，有效阻止节理滑移与裂缝扩展，其承载力主要受杆体屈服强度（ ≥ 500 MPa）与黏结强度（常见在 1.0 ~ 1.5 MPa）控制。喷射混凝土提供早期封闭，构建连续面以限制岩体剥离，与钢筋网联合形成增强表层刚度的复合承力面。钢支架承受结构变形并限制边坡位移，适用于高应变速率边坡，其竖向承压能力通常达 200 ~ 300 kN/m。抗滑桩则依靠桩—土界面摩擦与侧向抗力抵抗滑移，桩顶与桩底应力传递区承载力分布非均匀，常需配合数值模拟进行精确布设。

2.3 材料性能与支护结构稳定性

支护结构的长期稳定性高度依赖所选材料的力学性能、耐久性及与岩体的界面相容性。锚杆材料一般选用 Q235 或 HRB400 钢筋，其极限拉伸强度可达 420 ~ 600 MPa，具有良好的延性与锚固适应性。喷射混凝土作为常用覆盖材料，其 28 天抗压强度应达到 25 ~ 35 MPa，且要求早期强度增长速率快，以实现初期封闭功能；在高湿、高渗条件下，需采用掺防腐剂或高密实性矿物掺合料以增强耐水性与抗侵蚀性。钢筋网应采用冷拔低碳钢丝，屈服强度不低于 380 MPa，且需具备良好的抗疲劳性能。对于抗滑桩与挡墙等重力结构，其混凝土等级常为 C30 ~ C40，钢筋配筋率控制在 1.0% ~ 1.5%，确保结构刚度及抗剪能力满足剪切应力不超过设计极限的 70%。此外，锚固剂性能对锚杆系统的长期黏结力稳定至关重要，环氧树脂类锚固剂的抗剪强度可达 10 ~ 15 MPa，适用于湿陷性强、开裂风险高的岩层^[3]。不同支护材料的主要性能参数与适用部位见表 1。

3 水利水电施工中边坡开挖支护设计与优化策略

3.1 支护设计与优化策略

支护设计需以边坡稳定性理论为基础，通过力学参数匹配、结构形式组合与响应机制分析，建立与地质环境适配的支护体系。设计的核心在于控制边坡整体与局部的变形及破坏模式，确保稳定系数 K 值在 1.25 以上，对高风险区域建议控制在 1.30 ~ 1.35 范围。设计需明确支护的受力路径与载荷分布，结合岩体抗剪强度（如 $c=3045$ kPa， $\phi=28^\circ \sim 35^\circ$ ）与层间黏结强度进行验算。锚杆布设应考虑节理倾角与岩体结构面间距，长度通常为边坡高的 0.25 ~ 0.4 倍，间距控制在 1.5 ~ 2.0 m，形成力学耦合稳定网。喷射混凝土厚度按边坡风化等级调整，中风化岩体取 12 ~ 15 cm，配筋率 0.8% ~ 1.2%，以提升表面刚度与整体抗滑性。设计过程中应根据现场地质勘察结果，合理选用主动式或被动式支护，并设置冗余安全系数抵御极端荷载，确保结构响应在控制变形阈值内运行。

3.2 多因素耦合作用下的支护设计优化

边坡支护设计面临多重复杂因素叠加作用，包括地质结构、地下水、外部荷载及施工扰动等，其间的非线性耦合作用对支护性能产生深远影响。优化设计需基于多场耦合理论，考虑应力场—渗流场—温度场等耦合机制，构建综合响应模型。岩体在降雨条件下渗透系数常从 10^{-5} m/s 提升至 10^{-3} m/s，孔压显著升高，削弱抗剪强度，需通过增设排水孔、盲沟或抗水材料应对渗流集中。温度波动对浅表层岩体膨胀系数（ $\alpha \approx 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ）引起裂隙开合变化，长周期累积效应将破坏喷混层界面黏结性。在荷载扰动方面，大型机械或爆破施工引起的动载幅值常达 100 ~ 300 kPa，短时作用会诱发临界状态结构面滑移。优化策略应通过权重参数调整设计重点，例如对渗透性强的岩层增

表 1 不同支护材料的主要性能参数与适用部位

材料类型	常用规格或型号	抗压 / 抗拉强度	其他关键性能参数	应用部位
锚杆钢筋	Q235/HRB400	420 ~ 600 MPa（抗拉）	延性好、耐疲劳	深层锚固、边坡加固
喷射混凝土	C25 ~ C35	25 ~ 35 MPa（28 天抗压）	早期强度增长快、耐水性要求高	表层封闭、防护面层
冷拔钢筋网	$\phi 6 \sim \phi 10$ mm 钢丝	≥ 380 MPa（屈服强度）	抗疲劳性能强、良好延展性	与喷射混凝土联合增强支护面
抗滑桩混凝土	C30 ~ C40	30 ~ 40 MPa（抗压）	配筋率 1.0% ~ 1.5%，桩径 1.2 ~ 2.0 m	滑坡体控制、深层支挡
环氧树脂锚固剂	双组分高分子	10 ~ 15 MPa（抗剪强度）	与岩体界面黏结性强、耐水解性好	湿裂岩体中锚固结构填充

强排水系统比重,而对滑动面浅、软弱夹层多的岩体应提高锚杆拉拔承载力至 ≥ 80 kN级别,以实现适应性匹配与设计性能最优解^[4]。

3.3 数值模拟在支护设计中的应用

数值模拟技术已成为边坡支护设计中不可或缺的核心手段,主要用于结构受力分析、失稳预测与参数优化。常用软件如FLAC3D、ABAQUS、MIDAS GTS NX等,可通过有限差分法或有限元法建立真实工况下的计算模型,实现多场耦合分析。建模前需基于钻探与地勘数据选取合适本构模型,如采用Mohr-Coulomb模型模拟岩土体剪切破坏,或使用Drucker-Prager模型处理软弱层滑移机制。网格划分精度直接影响模拟结果准确性,岩体模型建议单元尺寸控制在边坡特征尺寸的 $1/20 \sim 1/30$,边界条件需确保应力扩散范围超出影响区三倍以上。数值结果可提供边坡变形分布、塑性区演化与锚杆内力发展过程,对比不同设计方案下的稳定系数、最大水平位移(如控制在50 mm以内)与结构受力极值,为设计优化提供数据支撑。

4 水利水电施工中边坡开挖支护施工控制与质量管理

4.1 支护施工流程与关键工序控制

水利水电工程边坡支护施工流程需依据地质条件和设计要求,严格按照“开挖—初期支护—排水—监测—验收”的顺序进行。开挖阶段应采用分层分段的方法,控制单层开挖高度不超过2.5 m,以防止边坡失稳。初期支护包括锚杆安装、喷射混凝土施作等,锚杆应采用HRB400钢筋,直径不小于20 mm,长度根据岩体稳定性计算确定,通常为边坡高度的0.3倍。喷射混凝土厚度应控制在10~15 cm,28天抗压强度不低于25 MPa。排水系统应设置盲沟和排水孔,确保边坡渗水及时排出,防止孔隙水压力升高。监测阶段需布设位移计、应力计等仪器,实时监控边坡变形和支护结构受力情况。

4.2 施工质量评估与验收标准

边坡支护施工质量评估应依据国家和行业相关标准,结合实际工程情况,采用多种检测手段进行综合评定。主要参考标准包括《水利水电工程施工质量检验与评定规程》(SL 176-2007)和《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准》(SL/T 631-2012)。质量评估分为主控项目和一般项目,主控项目如锚杆抗拔力、喷射混凝土厚度等,必须全部合格;一般项目如表面平整度、排水设施等,允许一定比例的不合格项,但不应集中出现。锚杆抗拔力应不小于设计值的1.25倍,喷射混凝土厚度允许偏差为 $\pm 10\%$ 。验收

流程包括施工单位自检、监理单位平行检验和建设单位组织的竣工验收。自检阶段,施工单位应对每道工序进行全面检查,填写质量检验记录;平行检验阶段,监理单位应对关键部位进行抽检,抽检比例不低于30%;竣工验收阶段,建设单位应组织设计、监理、施工等单位进行联合验收,形成验收报告^[5]。

4.3 安全监测与风险预警机制

边坡支护施工期间,需建立完善的安全监测与风险预警机制,确保工程安全和施工人员生命财产安全。监测内容包括边坡位移、支护结构受力、地下水位、孔隙水压力等。监测设备应选用高精度仪器,如全站仪、应变计、孔压计等,监测精度应满足设计要求,位移监测精度不低于 ± 1 mm。监测频率根据边坡稳定性和施工进度确定,通常为每日一次,特殊情况下可增加至每小时一次。监测数据应实时传输至监控中心,进行数据分析和趋势预测。风险预警机制应设定预警阈值,如边坡位移速率超过5 mm/d,孔隙水压力超过设计值的80%等,触发预警信号。预警级别分为三级:一级为正常状态,二级为警戒状态,三级为危险状态。达到二级预警时,应加强监测频率和现场巡查;达到三级预警时,应立即停止施工,组织专家进行评估,制定应急处理方案。

5 结束语

水利水电工程边坡开挖与支护技术的有效结合,是保障工程安全性与长期稳定运行的关键。面对复杂多变的地质结构和施工环境,科学选择支护结构类型、合理制定施工流程、精准实施监测与反馈控制,可显著提升边坡整体稳定水平。技术优化不仅要求结构与岩体特性深度融合,还需引入多场耦合分析与数值模拟手段,实现从静态设计向动态响应转变。在高强度开发与生态保护并重的背景下,支护策略的系统化、精细化与智能化发展已成为重要方向。

参考文献:

- [1] 后志坤. 水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的应用研究[J]. 水上安全, 2024(22):193-195.
- [2] 付桂生, 张弦. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用分析[J]. 四川水利, 2023, 44(05):116-118.
- [3] 宋铭明. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用[J]. 江西建材, 2022(07):163-164, 167.
- [4] 陈瑞. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用[J]. 珠江水运, 2021(15):18-19.
- [5] 王亮, 王飞, 吴高琴. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用分析[J]. 四川水泥, 2021(04):188-189.