

水利水电岩质边坡加固技术及工程应用分析

江 涛

江西汇水质量检测有限公司 江西南昌 330000

【摘要】针对某水电站岩质边坡存在的稳定性问题,采用锚索加固、预应力锚杆、混凝土支挡及排水等综合治理措施进行加固处理。通过现场试验和数值模拟分析,研究不同加固方案对边坡稳定性的影响。结果表明:采用系统锚杆结合预应力锚索能显著提高边坡稳定性,其中锚索布置倾角 60° 、预应力值 600kN 时效果最佳,边坡整体安全系数由 1.15 提升至 1.42 ;配合合理的截排水系统,可有效降低地下水对边坡稳定性的不利影响,确保边坡长期稳定。

【关键词】水电工程;岩质边坡;加固技术;锚索;预应力锚杆;稳定性分析

引言:

水利水电工程建设过程中常遇到复杂的岩质边坡工程问题,边坡失稳可能导致工程事故和重大损失。近年来,随着大型水电工程的开发建设,边坡加固技术不断创新发展,形成了以主动加固为主、被动防护为辅的综合治理体系。然而,由于岩体结构复杂、地质条件多变,如何选择合适的加固方案并确保其长期可靠性,仍是工程建设中面临的重要课题。基于此,结合某水电站边坡加固工程实例,深入研究各类加固技术的适用条件和工程效果,对指导类似工程具有重要的实践意义。

1 工程地质本底特征

某水电站位于构造活动频繁的山区,场区地层主要由寒武系灰岩、白云岩组成,岩层倾角 $25^\circ \sim 35^\circ$ 。区域断裂发育,主要为NE向压扭性断裂和NW向张扭性断裂。岩体风化程度差异显著,强风化带厚度 $3 \sim 8\text{m}$,中等风化带厚度 $8 \sim 15\text{m}$ 。电站厂房边坡高度达到 138m ,坡度 $55^\circ \sim 70^\circ$,呈现明显的台阶式开挖形态。边坡岩体以灰岩为主,节理裂隙发育,存在多组结构面。岩体基本质量等级为III~IV级,局部坡段出现软弱夹层^[1]。

边坡监测数据显示,开挖后出现持续性变形,最大水平位移达到 68mm ,垂直位移达到 45mm 。变形区域主要集中在坡高 $90 \sim 120\text{m}$ 段,呈现渐进性蠕变特征。局部岩体出现张拉裂缝,最大张开宽度达到 25mm 。雨季期间,变形速率明显加快,部分监测点位移速率超过 2mm/d ,显示出明显的滑移迹象。

2 边坡变形破坏机理

通过地质雷达和钻孔探测发现边坡内部存在三组主控结构面:倾向 $275^\circ \angle 52^\circ$ 、倾向 $305^\circ \angle 48^\circ$ 和倾向

$195^\circ \angle 62^\circ$ 。结构面呈带状分布,连续性较好,部分结构面充填黏土矿物。结合岩芯数据分析,结构面抗剪强度参数:内摩擦角 $\phi = 28^\circ \sim 32^\circ$,粘聚力 $c = 32 \sim 45\text{kPa}$ 。岩体整体呈现块状化特征,易形成楔形体滑动。

影响边坡稳定性的关键因素包括结构面特征、地下水作用和开挖扰动。结构面产状和力学特性控制着边坡破坏模式,特别是软弱结构面的存在显著降低了边坡稳定性。地下水作用导致结构面强度软化,同时产生的水压力降低了抗滑力。开挖过程引起的应力释放和卸荷裂隙发展加剧了岩体破碎化,降低了边坡整体稳定性。

3 复合锚固体系构建

3.1 加固目标确定

边坡加固目标依据《水利水电工程边坡设计规范》(SL386-2007)确定:边坡整体安全系数不小于 1.30 ,最大允许变形量控制在 100mm 以内,锚固系统设计使用年限 50 年。根据边坡变形特征和破坏模式,采用预应力锚索与系统锚杆组合的加固方案,同时辅以必要的排水措施,实现对边坡的主动约束和加固。

3.2 锚索参数设计

锚索参数设计基于极限平衡理论和有限元分析,锚索采用 $\phi 15.2\text{mm}$ 高强度低松弛钢绞线,每束由4根钢绞线组成。通过理论计算和数值模拟优化确定锚索布置参数:锚索倾角 60° ,垂直间距 4m ,水平间距 3m ,自由段长度 $15 \sim 20\text{m}$,锚固段长度 $8 \sim 12\text{m}$ 。锚索设计预应力值 600kN ,施工张拉控制应力不超过钢绞线抗拉强度标准值的 70% 。锚索孔径 $\phi 130\text{mm}$,采用水泥基浆液进行锚固。

3.3 预应力锚杆布置

预应力锚杆布置采用梅花形布置方式,主要用于加固

浅层岩体。锚杆选用 $\phi 32$ mm精轧螺纹钢，长度6~8m，倾角 15° ，垂直间距2m，水平间距1.8m。锚杆预应力值200kN，采用环氧树脂型锚固剂进行锚固。锚杆与锚索共同作用，形成多层次、立体化的加固体系^[2]。锚头采用球面支座结构，确保预应力均匀传递。支护面采用双层钢筋网喷射混凝土，厚度12cm。

3.4 截排水系统设计

截排水系统设计包括坡面截水、平台排水和深层排水三个层次。在坡顶设置截水沟，断面尺寸60cm \times 80cm；每级平台设置排水沟，坡度3%，与竖向急流槽连接。布设 $\phi 108$ mm横向排水管，间距6m，倾角 10° ，长度15~20m。在主要软弱结构面发育部位，设置 $\phi 89$ mm纵向降压排水管，形成系统的排水网络，有效降低孔隙水压力。

4 原位试验成效评估

4.1 试验方案设计

试验方案设计分为地质勘查、锚固试验和施工工艺试验三个阶段。地质勘查阶段通过钻探、物探和原位测试获取岩体工程特性；锚固试验包括不同类型锚索、锚杆的抗拔试验和持久试验，共设置15组试验点；施工工艺试验重点研究钻孔、注浆和张拉等关键工序的施工参数。试验数据采用多元统计分析方法进行处理，建立锚固体系受力-变形响应模型。

4.2 监测系统布置

监测系统采用多源信息融合技术，包括深层位移、锚固力、应力应变和地下水位等监测内容。布设20个测斜管，进行深层水平位移监测；安装45个轴力计，监测锚索预应力；埋设35对应变计，监测岩体应力变化；设置15个渗压计和5个自动雨量计，监测水文效应。所有监测元件均采用数字采集系统，实现自动化、网络化和智能化监测。

4.3 数据采集分析

数据采集分析采用多参量协同分析方法，建立监测数据与边坡稳定性的相关模型。位移数据采用灰色预测模型进行趋势分析；锚固力数据通过傅立叶变换研究其周期性变化规律；应力应变数据结合有限元反分析确定岩体参数^[3]。通过建立神经网络模型，实现对边坡稳定状态的实时评估和预警。

5 工程动态响应特征

5.1 位移监测结果

边坡加固工程完成后，变形速率显著降低，监测数据表明边坡进入稳定状态。深层水平位移监测显示，最大变形区域由原来的坡面中部转移至坡脚部位，且变形量

大幅减小。关键监测点ZX-12处，最大累计位移由原来的68mm降至32mm，日变形速率降至0.08mm/d。垂直位移呈现收敛趋势，ZS-05监测点的隆起变形量从25mm减至8mm。降雨期间位移响应特征发生明显改变，最大日变形量不超过0.15mm，表明加固体系对水文效应具有良好的抑制作用。边坡整体变形模式由持续蠕变转变为衰减蠕变，显示加固措施有效控制了边坡变形发展（如表1所示）。

表1 关键监测点位移监测数据统计表

监测点编号	处理前累计位移 (mm)	处理后累计位移 (mm)	处理前日变形速率 (mm/d)	处理后日变形速率 (mm/d)	降雨期最大位移响应 (mm/d)
ZX-12	68.2	32.1	2.15	0.08	0.12
ZX-15	52.3	28.6	1.85	0.06	0.15
ZS-05	25.4	8.2	0.95	0.04	0.09
ZS-08	42.1	15.3			

5.2 应力应变分析

锚固系统施工完成后，边坡内部应力场趋于均衡。锚索预应力损失率在设计容许范围内，平均损失率为12.3%。监测数据表明，岩体应力重分布过程平稳，主应力方向基本保持稳定。关键监测断面D2应变数据显示，表层岩体压应变值由 $185 \mu \epsilon$ 降至 $125 \mu \epsilon$ ，拉应变由 $156 \mu \epsilon$ 降至 $92 \mu \epsilon$ ，应变水平显著降低。声发射监测记录到的岩体微裂隙活动频次由每日85次降至12次，能量级别普遍降低，表明岩体内部结构趋于稳定。锚固系统的应力水平处于弹性工作状态，未出现超载或失效现象（如表2所示）。

表2 岩体应力应变监测数据分析表

监测断面	监测项目	处理前数值	处理后数值	变化幅度 (%)	稳定性评价
D1	压应变	$165 \mu \epsilon$	$118 \mu \epsilon$	-28.5	良好
D1	拉应变	$142 \mu \epsilon$	$88 \mu \epsilon$	-38.0	良好
D2	压应变	$185 \mu \epsilon$	$125 \mu \epsilon$	-32.4	良好
D2	拉应变	$156 \mu \epsilon$	$92 \mu \epsilon$	-41.0	

5.3 稳定性提升效果

边坡整体稳定性得到显著提升，通过多种分析方法进行了系统评价。采用极限平衡法计算的安全系数由原来的1.15提升至1.42，超过规范要求值1.30。有限元强度折减分析显示，临界滑动面深度由原来的28m减小到15m，潜在滑动体体积减少42.5%。基于监测数据的可靠度分析表明，

边坡失稳概率降低两个数量级,达到高可靠度水平。分区稳定性评价结果显示,原来的不稳定区域面积减少68%,边坡整体稳定状态由欠稳定转为稳定^[4]。反演分析确定的岩体强度参数有明显提高,粘聚力平均提升35.2%,内摩擦角增加4.8°。

6 智能化施工管控

6.1 施工工艺要点

施工工艺要点涵盖钻孔、锚固和预应力施加三个关键环节。钻孔采用YT-90型潜孔锤回转冲击钻机,钻进速度控制在1.2~1.5m/h,配备泥浆循环系统保持孔壁稳定。采用实时监测钻进参数和孔底返浆情况方式,控制钻孔偏差在3%以内,确保锚索锚杆按设计轨迹精确施工。锚固段采用二次高压注浆工艺,一次注浆压力0.5~1.0MPa,待浆液初凝后进行二次补充注浆,压力控制在1.5~2.0MPa,确保锚固体与岩体紧密结合。浆液配比采用水灰比0.4~0.45,添加0.8%减水剂提高流动性。

预应力施加采用分级加载方式,每级加载不超过设计预应力值的25%,保持载荷10min观察锚索伸长值和回缩值。张拉设备选用YDC-300型智能张拉系统,具备自动补偿功能,保证预应力施加精度。支护面采用湿喷工艺,C25喷射混凝土厚度控制在12±1cm,配备固定式喷射机组,喷射压力维持在0.6~0.8MPa。施工过程中对锚索自由段采用防腐油脂充填,锚固段采用环氧树脂防腐涂层,延长使用寿命。重点控制钢绞线防腐、张拉压力和锁定工艺,确保锚固体系长期稳定性。

6.2 质量控制措施

质量控制措施采用全过程动态管理模式,建立了完整的质量保证体系。原材料方面,锚索钢绞线抗拉强度不低于1860MPa,伸长率≥3.5%,松弛率≤2.5%;水泥采用P.042.5级普通硅酸盐水泥,28天抗压强度≥42.5MPa;外加剂选用脂肪族减水剂,减水率≥25%。锚固体系成型质量采用声波检测技术评价,检测频率每50m设1个检测断面,波幅衰减率≤6dB/m为合格标准。

施工过程控制围绕“四控制、两管理、一协调”展开,即质量控制、进度控制、投资控制、安全控制、合同管理、信息管理和组织协调。施工单位建立质量管理体系,设置专职质量检验人员,每道工序设置质量控制点,建立质量控制数据库。采用标准化施工作业指导书,明确各工序质量控制要点和验收标准。质量检验采用“三检制”,即班组自检、工序互检和专职质检。对关键部位增加旁站监理,

确保施工质量。针对质量通病,制定了专项防治措施,有效降低了施工质量隐患。

6.3 施工监测反馈

施工监测反馈系统建立在物联网技术基础上,实现了施工过程的实时监控和智能预警。监测系统包括深层位移、锚固力、应力应变、地下水位等要素,采用GPRS无线传输技术,数据采集频率为4次/天。开发专门的监测数据分析软件,具备数据自动处理、异常识别和预警功能。监测成果以周报形式反馈至施工单位和业主,为工程决策提供依据^[5]。

建立了三级预警机制:当监测值达到预警值的80%时发出黄色预警,要求加密监测;达到90%时发出橙色预警,采取局部加固措施;达到预警值时发出红色预警,立即停工处理。根据监测数据动态调整施工参数,优化施工工艺。施工过程中累计发出黄色预警8次,橙色预警3次,通过及时采取补救措施,避免了质量事故发生。形成了“监测-分析-反馈-处理-验证”的闭环管理体系,保证了工程质量的持续改进。特别是在降雨期间,监测系统对边坡稳定状态进行全天候监控,为施工安全提供了有力保障。

结语

通过对某水电站岩质边坡加固工程的系统研究,证实采用系统锚杆、预应力锚索等主动加固措施,结合合理的截排水设计,能有效提升边坡稳定性。研究表明,锚索倾角与预应力值的优化设计对加固效果具有重要影响,适当提高预应力值可显著改善岩体内部应力状态。同时,施工过程中的质量控制和监测反馈机制是确保加固效果的关键。该研究可为同类工程提供参考,对推进水电工程边坡加固技术发展具有积极意义。

参考文献:

- [1] 王建锋,张小玲. 水利水电工程边坡加固处理技术[J]. 城市建筑空间, 2023, 30(S1): 445-446.
- [2] 李磊. 浅析水利水电工程中的边坡加固处理技术[J]. 四川建材, 2023, 49(01): 99-101.
- [3] 杨琛. 水利水电工程施工中高边坡加固技术的应用探讨[J]. 建材与装饰, 2020, (01): 289-290.
- [4] 崔永梅. 水利水电工程施工中高边坡加固技术的应用策略[J]. 工程技术研究, 2018, (06): 89-90.
- [5] 冉发龙. 水利水电岩质边坡的加固技术分析[J]. 科技与创新, 2016, (08): 128+130.