

基于微震监测与数值模拟耦合的边坡施工期安全稳定预警技术

陈庭威

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]某抽水蓄能电站上水库库周边坡普遍高陡、岩体裂隙发育,开挖扰动与地下水渗流会共同弱化岩体强度。爆破作业除表层破坏外,还会在岩体深处产生肉眼看不到的隐性损伤,且损伤会逐步扩展。传统边坡表面单点监测存在数据滞后、监测范围小的问题,很难捕捉边坡内部渐进失稳的早期征兆。针对上述现场痛点,以某抽水蓄能电站上水库周边坡为研究载体,建立微震实时监测与 UDEC 离散元数值模拟双向动态耦合预警体系。选取震级、能量密度、空间聚集度量内部岩体损伤,将实测损伤场动态录入数值模型,同步更新岩体力学参数、应力与变形场;同时优化传感器测点排布算法,划定四级边坡预警阈值。监测结果表明,该耦合体系兼顾岩体损伤演化与力学致灾机理,相较传统监测可提前 12~18 天预判边坡失稳,损伤空间定位误差降低。该方法无需历史失稳样本,适配抽蓄边坡全施工周期,可为同类岩质边坡动态安全预警提供技术支持。

[关键词]抽水蓄能电站;岩质边坡;微震监测;动态数值模拟;岩体渐进损伤

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19882

中图分类号: TV551.4

文献标识码: A

Safety and Stability Warning Technology for Slope Construction Period Based on Microseismic Monitoring and Numerical Simulation Coupling

CHEN Tingwei

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: The slopes around the upper reservoir of a pumped storage power station are generally high and steep, with developed rock fractures. Excavation disturbance and groundwater seepage will jointly weaken the strength of the rock mass. In addition to surface damage, blasting operations can also cause invisible hidden damage deep in the rock mass, and the damage will gradually expand. Traditional single point monitoring of slope surfaces suffers from data lag and limited monitoring range, making it difficult to capture early signs of gradual instability within the slope. In response to the above-mentioned on-site pain points, a bidirectional dynamic coupling warning system for microseismic real-time monitoring and UDEC discrete element numerical simulation is established using the slope around the upper reservoir of a pumped storage power station as the research carrier. Quantify internal rock damage by selecting earthquake magnitude, energy density, and spatial concentration, dynamically input the measured damage field into the numerical model, and synchronously update the rock mechanics parameters, stress, and deformation fields; Simultaneously optimize the algorithm for arranging sensor measurement points and establish a threshold for four level slope warning. The monitoring results indicate that the coupling system takes into account both the evolution of rock damage and the mechanical disaster mechanism. Compared with traditional monitoring, it can predict slope instability 12~18 days in advance and reduce the spatial positioning error of damage. This method does not require historical instability samples and is suitable for the entire construction period of pumped storage slopes, providing technical support for dynamic safety warning of similar rock slopes.

Keywords: pumped storage power station; rock slope; microseismic monitoring; dynamic numerical simulation; progressive damage of rock mass

引言

“双碳”目标驱动下,抽水蓄能电站迈入规模化建设时期。多数电站选址区域山体表层风化土很厚、地下断裂带错综复杂,上水库库周边坡切坡开挖,会直接打乱山体原

本稳定的内部应力,边坡塌方也顺理成章成为抽蓄施工现场最核心的地质安全隐患^[1]。施工过程中,边坡岩体还要同时承受爆破震动、渣土临时堆放、昼夜温差胀缩等多重外力干扰,传统只监测边坡表面数据的手段存在明显滞后

性,往往发现异常时风险已经临近,预警根本赶不上现场进度。目前业内边坡安全预警主要靠现场原位监测、计算机数值模拟两种手段^[2]。表层单点原位监测只能盯着边坡表面几十米范围,摸不清岩体深部裂隙的发展动向;微震监测虽然能找到地下岩体开裂的具体位置,但没法直观算出岩体实时受力大小和边坡安全富余系数。FLAC3D、UDEC 这类主流数值模拟软件有个通病:输入的岩体参数都是固定值,没法跟着现场岩体持续开裂、变软的动态变化实时更新,算出来的结果和现场真实情况差距较大。现阶段两类技术的结合大多只是事后对照核对数据,没法互相实时修正迭代,而且完全没有适配抽蓄边坡表层切坡卸荷、深部隧洞同步开挖的双向扰动特殊工况。除此之外,行业内普遍缺少没发生过滑坡、日常平稳工况下的常态化预警机制,大多只靠滑坡前兆预警。针对以上短板,本文构建微震监测与离散元数值模拟双向动态耦合预警框架。

1 工程地质与边坡扰动特征

某抽水蓄能电站上水库库周边坡,属于坡度陡、顺着岩层走向的高岩质边坡,最大开挖垂直高度达到 112m。边坡山体主要是硬度中等的流纹质凝灰岩,内部有两组主导裂隙:一组顺着坡面延伸,走向东北 35°、倾角 22~28°,边坡挖开露出临空面后极易失稳;另一组横向切断坡面,走向西北 62°、倾角 70~76°。山体岩体分层差异明显:表层往下 0~12m 岩体破碎松散,岩体完整系数仅 0.42~0.55,裂隙缝隙宽 2~8mm;12m 深部岩体结构紧实,完整系数可达 0.72~0.85。边坡破坏分三步受施工和天气扰动:先是挖掘机削坡改变山体受力,撑开原有裂隙,产生轻微低频岩体震动;其次毫秒级爆破让裂隙互相错动,震动频率升高;最后雨水渗入裂隙,弱化岩体夹持力,微小震动会集中在同一区域。边坡垮塌是循序渐进的,内部先零散开裂→裂缝连成贯通面→岩层整体滑动→坡面突然变形^[3]。实测发现山体内部开裂,会比坡面肉眼可见变形早 15~20 天,这也是利用微震数据提前预警滑坡的核心原理。

2 耦合技术理论基础与参数体系

2.1 微震监测核心参数量化理论

微震系统通过检波器捕捉岩体破裂产生的 P 波、S 波,基于 Geiger 定位算法实现微震事件三维定位,定位误差控制在 ±2m。选取四项可用于耦合建模的标准化参数,规避原始波形数据冗余问题:(1)微震事件空间聚集度 CI,表征破裂集中程度,CI=单位立方岩体微震数量/全域平均微震数量;(2)归一化破裂能量 Es,剔除传播距离衰减影响后的破裂释放应变能;(3)破裂矩张量比 RT,

区分张拉破裂与剪切破裂,RT>0.6 为张拉裂隙,RT<0.4 为剪切裂隙;(4)岩体损伤变量 D,基于微震能量密度推导,取值范围 0~1,D=0 为完整岩体,D=1 为完全贯通破坏。岩体损伤变量 D 通过区域微震累积能量与岩体临界破坏能量、破裂影响体积与模型单元体积的比值乘积计算。

2.2 离散元数值模拟损伤劣化准则

采用 UDEC 离散元模型表征节理岩体非连续变形,相较于有限元,离散元可精准模拟节理面滑移、张开、岩块转动。模型遵循摩尔-库伦强度劣化准则,将微震损伤变量 D 与岩体黏聚力 c、内摩擦角 φ、节理法向刚度 kn 建立线性劣化关系,避免传统指数劣化模型参数拟合难度过大的问题。劣化公式:

$$\begin{cases} c_D = c_0(1 - 0.82D) \\ \phi_D = \phi_0(1 - 0.45D) \\ k_{nD} = k_{n0}(1 - 0.91D) \end{cases} \quad \text{式 (1)}$$

式中: c₀、φ₀、k_{n0} 为勘察阶段室内试验初始力学参数; c_D、φ_D、k_{nD} 为微震损伤修正后动态力学参数。结合场区岩体试验数据,整理边坡不同风化带初始力学参数,如表 1 所示。

表 1 边坡岩体及结构面初始力学渗透参数

岩体分区	天然密度/ (g cm ⁻³)	初始黏聚力/MPa	初始内摩擦角/(°)	节理法向刚度/(GPa m ⁻¹)	渗透系数/(cm s ⁻¹)
浅表强卸荷凝灰岩	2.58	0.32	31.2	22.6	2.3×10 ⁻⁴
深部弱卸荷凝灰岩	2.62	0.76	38.5	47.3	5.1×10 ⁻⁶
构造破碎带充填物	2.45	0.18	24.7	9.2	4.8×10 ⁻³

2.3 双向耦合运行逻辑

构建时序闭环双向耦合体系,分为前置模拟指导监测、实时监测修正模拟、模拟结果反馈预警三个闭环环节,耦合逻辑如图 1 所示。

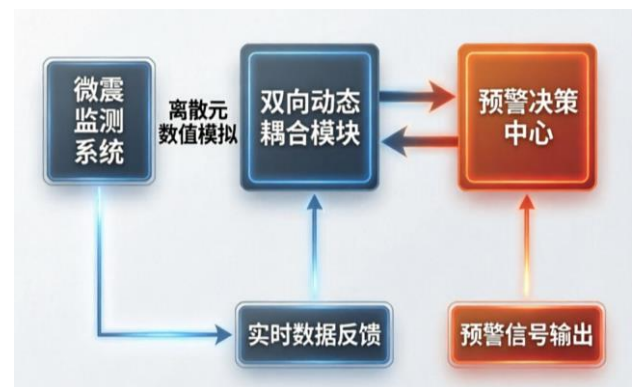


图 1 微震监测与离散元数值模拟双向动态耦合预警体系

搭建 UDEC 完整边坡数值模型, 仿真边坡开挖后卸荷引发的应力集中区域; 只要两处应力差值超过 2.5MPa, 就针对性加密布置检波器, 圈定微震重点监测靶区, 节省布设成本^[4]。微震监测系统每隔 2 小时自动导出监测事件数据, 依靠主频分界标准过滤干扰杂波: 人为扰动信号主频大于 300Hz, 岩体自身破裂信号主频稳定在 20~180Hz, 以此区分有效破裂信号和噪声; 求解模型单元损伤变量之后, 批量更新替换 UDEC 模型里对应的岩体力学参数, 重新迭代运算边坡应力场、渗流场与位移变形场。同时参考边坡安全系数、微震事件聚集程度两项评判标准联合划分预警级别, 顺带给地出地下深部岩体破裂高危区域范围, 还能预判边坡表层后续变形量大小。

3 耦合系统布设与模型构建

3.1 微震监测系统现场布设

选用 IMS 微震监测系统, 整套设备包含 8 台三分量检波器、1 台数据采集主机以及配套降噪组件。结合数值模拟得出的应力集中分布规律, 分别在上水库边坡坡顶、坡腰等位置一共布置 8 个监测点, 其中 6 个布在深部卸荷裂隙发育区域, 剩余 2 个设置在表层风化岩体地带。检波器埋设深度 2.5m, 采用水泥砂浆回填固定, 有效削弱地面人为、环境扰动影响。设备采样频率设为 1000Hz, 触发阈值设定 15mV, 能够捕捉矩震级-2.8~0.5 的岩体细微开裂信号, 监测深度覆盖 0~150m 岩体。实测校准后, 无用噪声剔除准确率达 98.7%, 震源定位平均误差仅 1.8m, 各项指标达标, 完全能够配合数值耦合模型开展精细化分析工作。

3.2 边坡离散元数值模型构建

构建二维 UDEC 数值模型, 模型横向总长 320m、竖向高度 180m, 完整囊括微震监测全部区域。模型底部施加全固定约束, 左右边界限制法向位移, 顶部保持自由状态; 边坡坡面设置降雨入渗渗流边界, 模型深部底端设为隔水边界。模型内设两组贯通节理与三处局部破碎带, 采用渐变网格划分, 应力集中区域网格尺寸 1.5m, 岩体稳定区域网格取 4m。对照开挖第 15 天流固耦合计算前后的

损伤变化结果: 未耦合的静态计算只能发现坡面表层小块损伤, 全都聚集在坡脚卸荷位置; 耦合后的动态计算能找到坡腰深部顺坡节理里隐藏的损伤密集区, 损伤往岩体内部深入拓展了 42m, 清晰追踪到地表看不到的裂隙发展轨迹, 直观说明流固耦合分析能大幅提升岩体损伤探测准确度^[5], 见图 2。

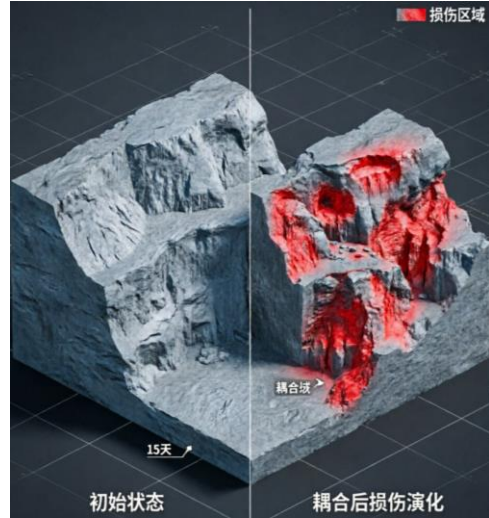


图 2 边坡开挖第 15 天耦合前后损伤演化对比图

3.3 耦合时序同步校准方法

微震监测为实时连续数据, 数值模拟为离散迭代计算, 二者时序不同步是耦合误差的主要来源。本文设置时序同步校准规则: 统一 2h 为一个耦合计算周期, 每个周期内首先完成微震数据降噪、定位、损伤计算, 随后暂停数值模型应力迭代, 导入损伤参数完成单元更新, 参数更新完成后重启迭代。同时建立空间网格映射对照表, 将微震球形监测空间与 UDEC 四边形网格一一映射, 空间映射误差控制在 1.2m 以内, 消除空间尺度偏差。

4 多级安全稳定预警阈值体系构建

采用强度折减法结合微震统计指标, 构建微震聚集度、边坡安全系数、深部最大位移三项耦合预警指标, 划分蓝色、黄色、橙色、红色四级预警, 明确对应处置措施, 具体阈值如表 2 所示。

表 2 边坡施工期四级耦合预警阈值及处置标准

预警等级	微震空间聚集度 CI	边坡强度折减安全系数 F_s	深部 50m 处岩体位移速率/ (mm d ⁻¹)	风险判定	现场处置措施
蓝色 (正常)	$CI \leq 1.2$	$F_s \geq 1.35$	≤ 0.08	岩体零星微破裂, 无贯通趋势	常态化监测, 维持正常施工
黄色 (关注)	$1.2 < CI \leq 2.0$	$1.20 \leq F_s < 1.35$	$0.08 \sim 0.22$	局部破裂簇发育, 结构面未贯通	加密监测频次, 放缓边坡开挖速率
橙色 (预警)	$2.0 < CI \leq 3.5$	$1.05 \leq F_s < 1.20$	$0.22 \sim 0.45$	破裂簇沿节理面贯通, 局部滑移启动	暂停边坡开挖, 开展锚杆补强、坡面排水
红色 (险情)	$CI > 3.5$	$F_s < 1.05$	> 0.45	整体剪切滑移失稳前兆	全域停工, 人员设备撤离, 启动应急支护

5 耦合技术误差分析与优化策略

5.1 主要误差来源量化分析

通过场区耦合监测,明确了三类关键误差来源:降雨裹挟水流冲击检波器,引发设备振动并生成低频虚假信号;数值建模过程中忽略了岩体细微随机节理构造,造成局部应力计算结果出现偏移;岩体受干湿循环作用产生软化效应,但该劣化机制未写入损伤计算公式,导致强降雨时段岩体损伤程度测算值偏低。

5.2 针对性优化改进策略

现有岩体力学计算模型计算精准度达不到预期,现从三个维度开展优化改进:第一,先做主频降噪处理,再搭配波形持续时长判定手段,把流水这类无关杂信号彻底筛掉;第二,依托现场节理实测统计数据,在岩体稳定区域随机布设细小节理,校正局部应力过度集中带来的偏差,减小因模型简化处理产生的误差;第三,增设含水率修正系数,遇上降雨时段同步调低岩体抗剪强度指标,解决干湿交替造成的岩体损伤被算小了的问题。经过整套优化调整后,模型全域耦合整体误差、损伤区域定位空间误差都被压缩在可控低值区间,模型整体可靠程度得到明显增强^[6]。

6 结论

本文针对某抽水蓄能电站水库库周边坡高陡岩石边坡隐蔽塌方隐患,研发了微震监测+UDEC 离散元模拟双向动态闭环预警技术,破解了传统技术只能单向分析、仿真脱离现场爆破开挖扰动的行业难题,降低边坡深部裂隙识别空间误差。通过提前模拟边坡应力优化传感器点位,

同时从时间、空间双向校准数据,降低系统整体数据误差。此外搭建无需过往塌方数据的四级预警标准,依托裂隙聚集程度、边坡安全系数、深部位移三项指标,能提前 12~18 天预判内部破裂,适配抽水蓄能电站边坡全周期管控。该技术短板为特大暴雨会干扰监测信号、大规模模拟存在卡顿,后续融合遥感数据、升级并行算力即可优化,可向全国山区抽蓄边坡推广。

[参考文献]

- [1]朱颖波,胡静云,刘建坡,等.基于多源监测的岩土灾变短临精准预警案例研究[J].有色金属(矿山部分),2026,78(1):210-222.
- [2]吴静,郭德宇,张乐文,等.金沙江溪洛渡水电站拱坝及边坡稳定性分析研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(10):2478-2495.
- [3]方宏进.高陡岩质边坡微震监测与稳定性分析[D].石家庄:石家庄铁道大学,2025.
- [4]周永伟,张鹏海.基于微震监测与数值模拟的露天转地下开采岩体的稳定性[J].黑龙江科技大学学报,2025,35(3):373-379.
- [5]王如林.基于微震监测和数值模拟的蓄水期三河口大坝廊道破坏机制研究[D].大连:大连理工大学,2023.
- [6]徐奴文.高陡岩质边坡微震监测与稳定性分析研究[D].大连:大连理工大学,2011.

作者简介:陈庭威(1994—),男,工程师,工学学士,现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司,任项目安全总监,长期从事水利水电、抽水蓄能项目管理工作。