

基于微震监测的水电站地下厂房安全性评价研究

张伯虎^{1, 2}, 邓建辉¹, 高明忠¹, 周志辉¹, 吴基昌³, 吴思浩³

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 西南石油大学 土木工程与建筑学院, 四川 成都 610500;
3. 国电大渡河大岗山水电开发有限公司, 四川 石棉 625409)

摘要: 将微震监测系统引入水电厂房, 在塌空区域建立精度较高的 ISS 微震系统, 通过互联网实施远程控制。对获得的大量微震监测数据进行数据处理, 采用不同方法对塌空区和整个地下厂房进行稳定性分析。从微震事件的时空和能级分布规律对塌空区进行稳定性判断; 采用能量指数法、能量指数与累积视体积法、施密特数与累积视体积法对地下厂房的整体稳定性进行评价; 针对已有监测数据对厂房进行微震震级预测, 建立基于微震监测的水电工程地下厂房安全评价方法。监测结果表明, 厂房下部区域出现的微震较为活跃, 但微震事件震级较小, 离厂房距离也较远; 塌空区进行喷锚加固后, 微震事件较少, 震级也小, 因此地下厂房和塌空区整体是安全的, 其安全性评价方法能对水电工程地下厂房设计和施工提供一定的指导意义。

关键词: 水电工程; 微震监测; 地下厂房; 塌空区; 评价方法

中图分类号: TV 698.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2012)05-0937-08

SAFETY EVALUATION RESEARCH BASED ON MICROSEISMIC MONITORING IN UNDERGROUND POWERHOUSE OF HYDROPOWER STATION

ZHANG Bohu^{1, 2}, DENG Jianhui¹, GAO Mingzhong¹, ZHOU Zhihui¹, WU Jichang³, WU Sihao³

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Dadu River Dagangshan Hydropower Development Co., Ltd., Shimian, Sichuan 625409, China)

Abstract: The microseismic monitoring system is the first time to be established in underground plants of Dagangshan hydropower station in China, which is composed of detector, data acquisition instruments, control and communication system and can be controlled from internet. A lot of seismic events data are processed and different methods are used to analyze the stability of the collapse area and the whole underground plant. First, the stability of rockmass near collapse area is estimated from the spatiotemporal and energy level distribution of seismic events. Second, three methods are used to estimate the overall stability of the powerhouse, such as energy index(EI) method, cumulated apparent volume(CAV) and EI method, Schmidt number and CAV method. Third, the magnitude of seismic events near the powerhouse can be predicted by analyzing the existing monitored data; and the safety evaluation method for underground hydropower plant is set up. The results show that the seismic events are active at the lower part of the plant, but the magnitudes are small and they are a bit far away from the

收稿日期: 2012-02-05; **修回日期:** 2012-03-06

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB732005)

作者简介: 张伯虎(1978-), 男, 2001年毕业于西南石油大学土木工程专业, 现为博士研究生、副教授, 主要从事深部岩体性能及岩土工程监测方面的教学与研究工作。E-mail: zbh_cd@126.com。通讯作者: 高明忠(1980-), 男, 博士, 现任讲师。E-mail: gmzh@scu.edu.cn。

powerhouse. There are less microseismic events near the collapse area after reinforced by shotcrete and anchor. So the underground powerhouse of Dagangshan hydropower station is overall stable. The establishment of safety evaluation method has a good guidance to the design and construction of underground hydropower plants.

Key words : hydropower engineering ; microseismic monitoring ; underground powerhouse ; collapse area ; evaluation method

1 引言

深部空间所处的“三高一扰动”恶劣环境,使岩体的破坏模式变得十分复杂。常规的监测手段仅能测得围岩表面的应力及变形,无法评价岩体的内部破裂及潜在失稳,而微震监测能够获得岩体内部任意一点的微小破裂,对潜在危险区域进行判断和预测。深部空间的微震监测技术最早始于南非金矿开采诱发的地震监测^[1-3],为解决埋深超过 1 000 m 金矿开采中遇到的岩爆和岩体破坏问题提供了帮助。随后在澳大利亚、美国、加拿大及南美洲的矿山、隧道、地下油气料储存洞室和露天矿山边坡等工程中被推广应用,取得了一系列卓有成效的研究成果^[4-8]。1984 年在门头沟煤矿采用波兰 SYLOK 微震监测系统对采煤区进行微地震监测^[9],对冲击地压进行了监测研究;2003 年凡口铅锌矿引进加拿大 ESG 微震监测系统,对深部矿采区的大爆破余震进行了监测应用研究^[10];2005 年冬瓜山铜矿采用南非 ISS 微震监测系统,用于对该矿深部采区地压进行监测,成功地开展了深井岩爆与地压监测及控制技术研究^[11-16]。而在水电行业,徐奴文等^[17-19]在锦屏一级电站边坡和大岗山水电站右岸边坡布置了微震监测系统,分析了微震事件分布与边坡稳定性之间的关系。C. A. Tang 等^[20-21]在锦屏二级电站的引水隧洞布置微震监测系统,对引水隧洞施工洞段开展微震实时监测,获得了大量数据,分析了岩爆的产生和发展规律,并对岩爆进行预测。

目前还没有人将微震系统引入水电地下厂房,对厂房围岩的深部区域进行微震监测和岩体稳定性评价。而大岗山水电站地下厂房拱顶由于断层控制和开挖扰动,局部区域形成了塌空区,在进行喷锚加固后,变形仍在加大。因此首次在该地下厂房建立了南非 ISS 微震监测系统,获得地下厂房开挖过程中塌空区域微震事件的分布,并提出基于微震监测的地下厂房区域安全性评价方法。

2 大岗山地下厂房微震监测设计

2.1 塌空区的形成及监测必要性

地下主厂房轴线方向 NE55°,垂直埋深 390~520 m,水平埋深 310~530 m,总长 226.58 m,跨度 30.80 m。围岩以 II 级为主,最大主应力为 11.37~22.19 MPa,属于中等应力区。在地下厂房部位发育了 2 条较大的断层 β_{80} 和 β_{81} 。其中, β_{80} 在 980 m 高程出露于副厂房中心线偏下游部位,在厂轴线上, β_{80} 从副厂房始点顶拱部位切入,于副厂房端墙中下部穿出(见图 1)。 β_{80} 辉绿岩脉产状 NW25°SW $\angle$ 55°~65°,宽 4.4 m,延伸长大于 240 m,脉体破碎,与围岩呈断层式接触。受 β_{80} 等辉绿岩脉和其他方向随机分布的裂隙的不利组合,厂房拱顶在第 I 层开挖扰动后发生塌方现象(见图 2)。虽对其加固并实施常规位移和应力监测,但是拱顶位移一直没有收敛,应力计出现松弛,塌方区域尚未稳定。塌方区的变形以深部变形为主,需要补充微震监测措施对塌空区深层岩体的稳定进行监控,弥补常规监测手段的不足。

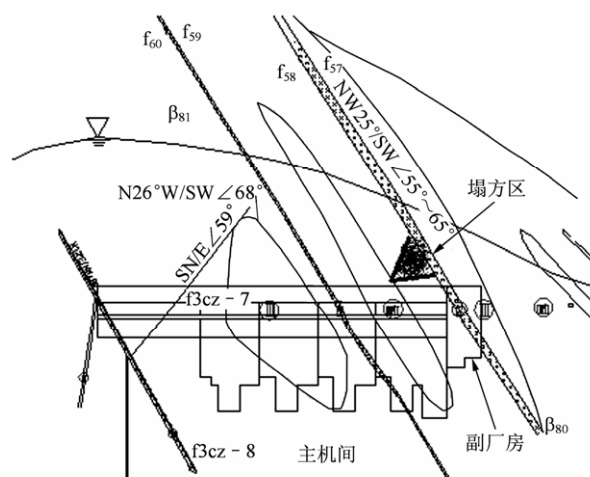


图 1 地下厂房沿轴线剖面断层分布

Fig.1 Faults distribution near underground powerhouse

2.2 微震监测系统设计

采用精度较高的南非 ISS 微震监测系统,该系



图 2 岩脉断层处的拱顶塌方区
Fig.2 Collapse area on the dykes fault

统由检波器、数据采集仪、控制系统及通讯系统组成(见图 3)。采用 8 个 Geophone 检波器分别连接在 2 个数据采集器上, 通过 MR485 通讯控制、Equinox 授时控制和 RS232 与 RJ45 等协议转换, 由四芯 DSL 电缆从排水廊道传输至营地监测办公室, 办公室计算机通过控制软件 RTS 对监测系统进行控制。微震数据存储在服务服务器上, 同时进行远程备份。可以通过 Internet 进行远程控制, 实时获取系统运行状况、系统监测数据等。该系统通过 GPS 授时, 每 5 min 对数采仪器进行时间校正, 保证时间精度在 1 μs 以上。在软件方面, 该系统在 Linux 操作系统之上运行 RTS 软件进行控制、授时、诊断、报警等。采用 JMTS, JDI 和 Ticker 进行震源定位、震源参数评估、震源机制评估、事件参数滤波、三维可视化等。

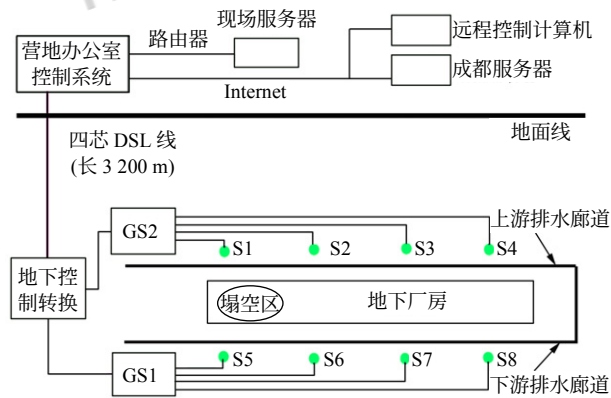


图 3 大岗山地下厂房微震系统布置示意图
Fig.3 Layout diagram of microseismic system in Dagangshan underground powerhouse

2.3 传感器的优化布置

大岗山地下厂房微震系统的监测重点位于厂房顶拱 β₈₀ 岩脉断层的塌空区, 同时兼顾 β₈₁ 岩脉断层, 以及厂房侧墙的稳定评价。在主厂房的 2 条上层排

水廊道中布置 4 个监测断面, 2 支 3G14HB 三轴检波器、2 支 1G14HB 单轴检波器和 4 支 1GS14S 表面安装单轴检波器(S1~S8)。该检波器灵敏度较高, 频带宽度较大(7~2 000 Hz), 可以任意角度安装, 通过仪器安装孔位的倾角以及深度, 有效布置检波器的位置, 使其接近塌方区, 在空间交叉布置检波器可以满足塌空区乃至整个厂房系统的监测。检波器布置参数见表 1。

表 1 检波器布置参数
Table 1 Disposal parameters of detectors

编号	类型	探头深/m	上倾角/(°)	备注
S1	内部监测	27.5	30	三轴
S2	表面监测	—	—	单轴
S3	内部监测	8.5	10	单轴
S4	表面监测	—	—	单轴
S5	表面监测	—	—	单轴
S6	内部监测	30.0	45	三轴
S7	表面监测	—	—	单轴
S8	内部监测	10.0	45	单轴

3 微震监测基本理论

3.1 微震震源参数

微震监测是通过监测与收集伴随岩石破裂和错动时发出的微地震波信息, 分析处理后确定微地震事件发生的位置、数量及能量释放等信息, 用定量微震理论的方法描述岩体的工程力学性状变化, 从而判断岩体的稳定性。通过监测 4 个独立地震活动参数(E , M , X , t)可以对地震其他参数进行定义, 如局部震级 M_L 、能量指数(EI)、视体积(V_A)、Schmidt 数(Sc_s)进行确定, 从而分析地震事件产生的应变率、应力和能量、流变特性等^[14]。其中 E 为地震释放能量, M 为地震矩, X 为空间坐标(x , y , z), t 为事件到达时间。本文中用到的主要参数可表示为

$$V_A = \frac{M^2}{2\mu E} \quad (1)$$

$$Sc_s = \frac{4\mu^2 \Delta V \Delta t(\bar{t}) \sum_{i_1}^{i_2} E}{\rho(\bar{X})^2 \left(\sum_{i_1}^{i_2} M_{ij} \right)^2} \quad (2)$$

$$M_L = \alpha \lg E + \beta \lg M + \gamma \quad (3)$$

$$\lg(EI) = \lg E - \lg(-21.7 + 2.64 \lg M) \quad (4)$$

式中： $\bar{t}$ 为相邻事件间的平均时间； $\bar{x}$ 为相邻事件间的平均距离； μ 为剪切刚度； ρ 为岩体密度； α, β, γ 均为参数，本文分别取 0.272, 0.392, -4.6。

通过微震定位和震级大小，圈出类聚区域，判定危险区域；通过累积视体积(CAV)、能量指数(EI)和 Schmidt 数(Sc_s)等关系来判断岩体的整体稳定性^[12-15]。

3.2 微震震级预测理论

微震事件的预测就是通过已有微震事件的统计分析，预测微震大事件发生概率以及不同震级再次重现的时间，为施工提供超前指导。图 4 给出了事件数目与预测震级 m 、重现时间 t_r 的关系，其中小黑点为实测微震事件统计。

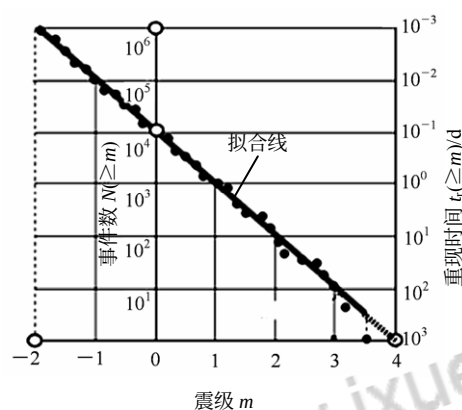


图 4 事件数目与预测震级、重现时间关系

Fig.4 Relationship of expected number of events and estimated magnitude, recurrence times

事件数目 $N(\geq m)$ 与震级 m 的关系为

$$\lg N(\geq m) = a - bm \quad (5)$$

式中： a 为纵轴的截距， $a = \lg N(\geq 0)$ ； b 为事件震级曲线的斜率； $N(\geq m)$ 为震级大于 m 的事件数。

式(5)可以预测出最大震级，其最大震级为

$$m_{\max} = a/b \quad (6)$$

通过微震事件的数目及观察天数，可以预测震级的重现时间 $t_r(\geq m)$ ：

$$t_r(\geq m) = \Delta t / N(\geq m) \quad (7)$$

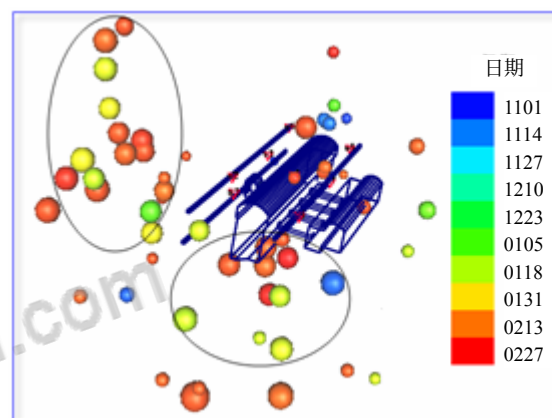
式中： Δt 为观察天数。

4 塌空区域岩体稳定性判别

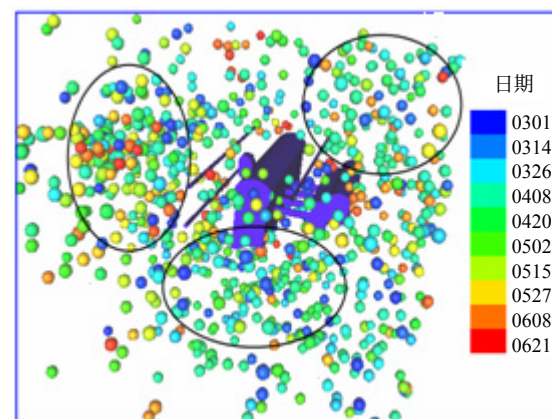
4.1 基于时空分析的塌空区稳定性判别

通过爆破试验确定岩体 P 波和 S 波的传播速

度，然后通过多个已知位置的传感器所获得微震事件时间，采用最小二乘法等获得微震事件产生的时间及其空间坐标^[13]，根据时空的积聚来初步判断监测区岩体的稳定性。图 5 中的球体为微震事件，其直径大小与微震震级有关。从图 5 中反映的 2 个时间段来看，前一时段(2010 年 11 月 1 日~2011 年 2 月 27 日)塌空区附近有一定的事件聚集。而后一时段(2011 年 3 月 1 日~2011 年 6 月 21 日)微震事件在塌空区上部区域有一定的聚集。因此可以看出，塌空区上部区域微震事件有一定的发展，但由于该区域远离塌空区约 100 m，因此，该微震事件分布区域不会对塌空区的岩体造成较大的影响。塌空区域的岩体初步看来是稳定的。



(a) 2010 年 11 月 1 日~2011 年 2 月 27 日



(b) 2011 年 3 月 1 日~2011 年 6 月 21 日

图 5 不同时段塌空区附近微震事件的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of the microseismic events near collapse area in different periods of time

4.2 基于震级分布的塌空区稳定性判别

采用局部震级 M_L 定义任意大小的震级(式(3))，适合任意尺度的体积地震波，微震系统中能够监测到 -4.0~3.0 的震级。一般认为，震级大于 0 为大事

件, 而震级大于 0.8 的大事件必须要分析产生原因, 进行安全防范。图 6 为 2011 年 1~6 月的微震大事件震级分布, 震级为 0.10~0.64, 主要集中在厂房的下部区域, 远离塌空区域。而且根据现场施工记录, 地下厂房在此时段大规模进行分层爆破开挖, 微震事件在开挖之后有一定的活跃是很正常的。但由于震级很大($M_L > 0.8$)的事件没有, 因此总体上来说, 塌空区域岩体还是稳定的。但是, 微震大事件在地下厂房下部区域分布也要引起一定的重视, 可以在爆破药量和爆破时间间隔等方面进行优化。

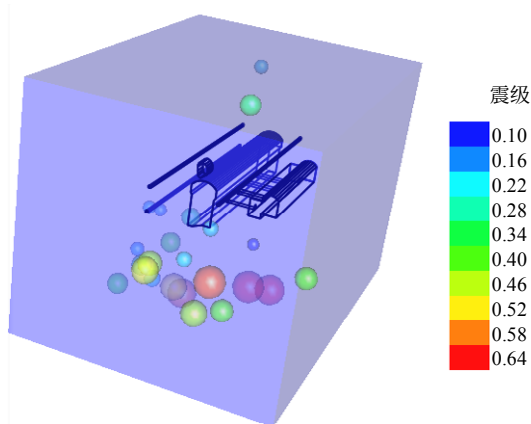


图 6 微震大事件震级分布

Fig.6 Large magnitude distribution of the microseismic events

5 地下厂房整体稳定性评价方法研究

5.1 能量指数(EI)评价法研究

能量指数主要反映微震事件区域的驱动应力的变化情况。能量指数越高, 岩体破坏驱动力越大, 则单位体积塑性变形释放的能量就越高, 破坏可能性也越大。从理论上来说, 某事件的能量指数对数大于 0, 则表明该事件点岩体破坏可能性大。图 7 中 $\lg(EI)$ 大多为 -2~0。数值大于 0 的少部分微震事件, 分别在离地下厂房上部约 30 m 及离下游边墙约 30 m 区域有一定分布和聚集, 故这些区域岩体破坏对地下厂房有一定的影响, 但距离较远, 影响的能力有限。而 $\lg(EI)$ 最大值 6.79 所对应的唯一微震事件处于主变室上方, 可能是由于该处岩体结构面积聚或交汇引起的岩体破坏。由于仅有一个事件, 因此对地下厂房的岩体稳定性无太大的影响。

5.2 施密特数与累积视体积关系法评价

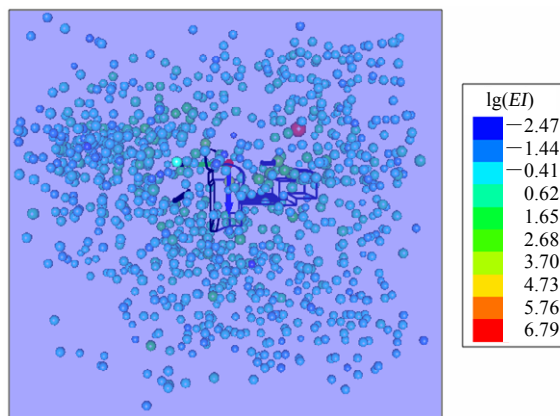
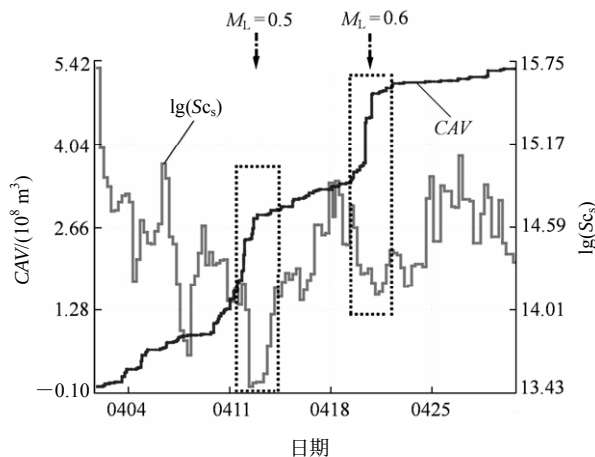


图 7 微震事件能量指数分布

Fig.7 EI distributions of microseismic events

施密特数能测量震动岩石流变的时空复杂程度, 也是唯一反映位势不稳定的参数。施密特数越低, 微震变形越不稳定。在分析中一般取其对数, 与累积视体积结合可以有效判定岩体的稳定性。一般来说, 累积视体积是一个逐步增加的过程, 增加的幅度有快慢。若某时段视体积增幅加快, 而施密特数急剧降低, 而后又逐步上升, 则在此时段附近可能发生大事件。如图 8 所示, 在视体积明显增加的 4 月 13~20 日, 施密特数对数值急剧减小后又增加(图中矩形虚线框内), 因此在此时段岩体发生了位势不稳定变化, 产生了大事件。从监测数据分析来看, 在此时段发生了震级较大的事件, 如 $M_L = 0.5$ 或 $M_L = 0.6$ 的事件。

图 8 累积视体积 CAV 与施密特数对数 $\lg(Sc_s)$ 的关系 (2011 年)Fig.8 Relationship between CAV and $\lg(Sc_s)$ (in 2011)

5.3 能量指数与累积视体积关系法评价研究

能量指数与累积视体积的关系曲线, 能反映大事件的发生。一般来说, 能量指数增加伴随正常的

视体积增加表示岩体应变发生硬化, 岩体趋于稳定; 而能量指数下降伴随加速发展的视体积表示应变软化过程, 预示着岩体进入不稳定状态。如图 9 箭头所指时间, 累积视体积加速增加而能量指数下降(图中矩形虚线框内), 即在 2011 年 4 月 13 和 20 日发生了大事件, 图 9 中所记录的大事件与统计分析中获得的微震大事件一致。因此, 从该法可以评价大事件的发生, 从而对厂房的整体稳定性辅助评价。

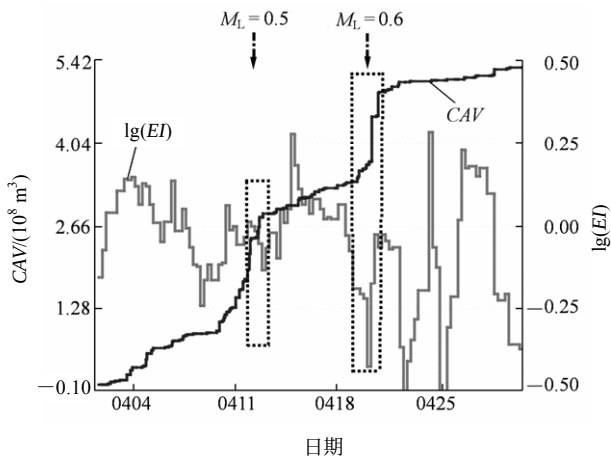


图 9 能量指数对数 $\lg(EI)$ 与累积视体积 CAV 的关系图(2011 年)
Fig.9 Relationship between $\lg(EI)$ and CAV (in 2011)

6 地下厂房安全性评价预测方法研究

6.1 震级预测

微震事件的预测是进行微震监测中一项重要的工作, 需要比较准确的分析出微震大事件的发生时间和出现的概率, 为安全施工提供充分的超前指导。图 10 根据 2011 年 4 月已监测到的微震事件进行震级预测, 其中小圆圈为监测到的微震事件, 可以预

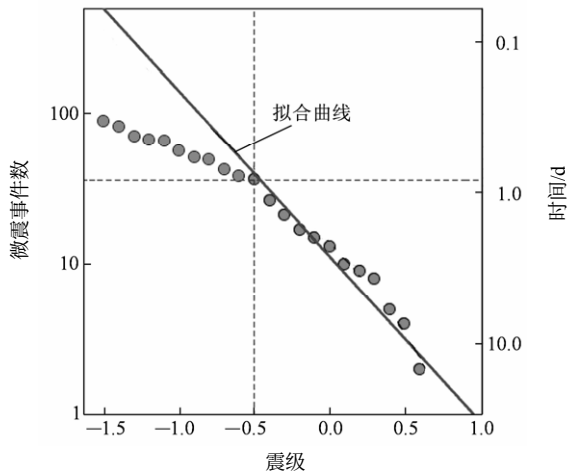


图 10 通过已有的事件分布震级预测
Fig.10 Magnitude prediction through events

测最大震级为 1.0, 而观测到的最大震级为 0.8。每天的事件数为 30 个左右。

表 2 为重现时间与概率情况。对于震级为 0.2 的重现时间为 3 d, 2 周出现的概率为 0.981, 1 个月出现的概率为 1.000, 说明该震级会随时可能出现在监测区域。而对于震级为 1.6 的大事件, 重现时间为 31 d, 而 1, 3, 6 个月出现的概率分别为 0.591, 0.929, 0.995, 说明该震级短时间出现在监测区域的概率较小。通过震级的预测可以对地下厂房最近一段时间的开挖进行安全性预测, 从而对工程施工进行指导。

表 2 重现时间及概率
Table 2 Probability table and recurrence times

震级	重现时间/d	概率				
		2 周	1 个月	3 个月	6 个月	1 年
0.2	3	0.981	1.000	1.000	1.000	1
0.6	6	0.878	0.988	1.000	1.000	1
1.0	12	0.669	0.904	0.999	1.000	1
1.6	31	0.343	0.591	0.929	0.995	1

6.2 安全性总体评价方法研究

大岗山水电站地下厂房的微震监测系统运行以来, 获得了大量有效的监测数据, 同时对厂房的开挖施工开展了卓有成效的指导工作。建立在微震监测系统基础之上的安全评价机制(见图 11), 结合了

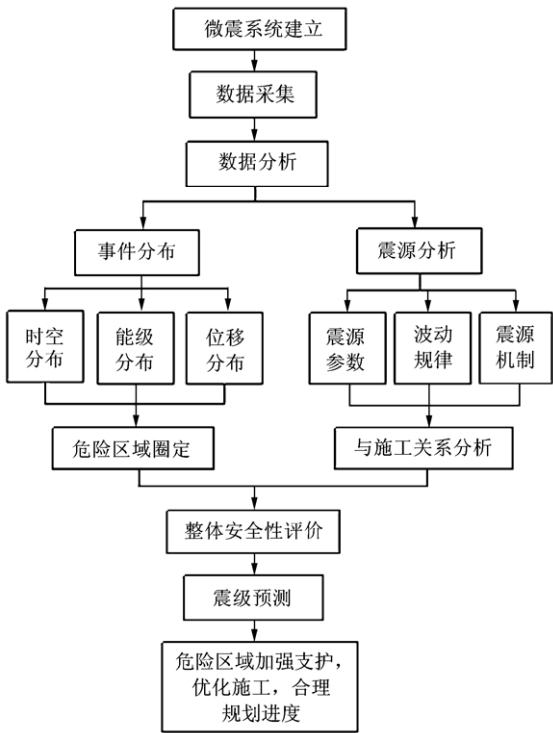


图 11 水电地下厂房安全评价程序

Fig.11 Safety evaluation program for underground powerhouse in hydropower station

国内矿山深部开挖微震监测的研究经验，并针对水电工程开挖施工、岩爆规律等特点，对水电地下工程的施工提供指导依据。

7 结 论

(1) 将微震监测技术运用于水电地下厂房的监测，采用该系统对开挖施工引起的岩体微破裂进行了监测，并对地下厂房围岩的稳定性进行了实时监控、预警和分析。为大岗山水电厂房的开挖提供了实时指导和超前预测，提高了安全性，有一定的经济效益。

(2) 通过微震事件的时空与震级分布，可以有效地判断地下厂房塌空区的岩体稳定性；从数量上来看，随着地下厂房的开挖强度加大，使微震事件在塌空区有显著地增加，但从震级分布来看，震级大于0的微震大事件没有出现在塌空区附近，说明塌空区岩体是稳定的。

(3) 通过EI法、EI与CAV法， Sc_s 与CAV法可以有效地评价地下厂房的整体稳定性，结合现场施工情况可以更加有效和准确地分析微震数据，得出合理的结论。地下厂房较近区域微震大事件($M_L > 0$)较少，而主要分布在厂房下部区域，与厂房下部开挖有一定关系。总体上来看，地下厂房是趋于稳定的。

(4) 建立在微震监测基础之上的水电地下厂房的安全评价方法，能有效地对其设计与施工进行指导。通过微震监测，辅之于常规的应力变形监测，将会给地下厂房的稳定性评价提供一个更加有效的工具。

参考文献(References)：

- [1] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines[M]. London, UK : Chapman and Hall Press, 1997 : 220 – 245.
- [2] ENEVA M, MENDECKI A J, VAN ASWEGEN G. Seismic response of rock mass to blasting and rockburst potential[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(4/5) : 390 – 391.
- [3] MENDECKI A J. Data-driven understanding of seismic rock mass response to mining[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines(RaSiM5). Johannesburg, South Africa : [s. n.], 2001 : 1 – 9.
- [4] BLAKE W. Microseismic applications for mining—a practical guide[R]. [S.l.] : Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior, 1982.
- [5] GIBOWICZ S J, KIJKO A. 矿山地震学引论[M]. 修济刚, 徐平, 杨兴平, 译. 北京 : 地震出版社, 1998 : 1 – 14.(GIBOWICZ S J, KIJKO A. An introduction to mining seismology[M]. Translated by XIU Jigang, XU Ping, YANG Xingping. Beijing : Earthquake Press, 1998 : 1 – 14.(in Chinese))
- [6] GE M C. Efficient mine microseismic monitoring[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(1/2) : 44 – 56.
- [7] HIRATA A, KAMEOKA Y, HIRANO T. Safety management based on detection of possible rock bursts by AE monitoring during tunnel excavation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(6) : 563 – 576.
- [8] TEZUKA K, NIITSUMA H. Stress estimated using microseismic clusters and its relationship to the fracture system of the Hijiori hot dry rock reservoir[J]. Engineering Geology, 2000, 56(1/2) : 47 – 62.
- [9] 鲁振华, 张连成. 门头沟矿微震的近场监测效能评估[J]. 地震, 1989, (5) : 32 – 39.(LU Zhenhua, ZHANG Liancheng. Evaluation of near-field monitoring efficiency of tremors in Mentougou mine[J]. Earthquake, 1989, (5) : 32 – 39.(in Chinese))
- [10] 李庶林, 尹贤刚, 郑文达, 等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12) : 2 048 – 2 053. (LI Shulin, YIN Xiangang, ZHENG Wenda, et al. Research on multichannel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead-zinc mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12) : 2 048 – 2 053.(in Chinese))
- [11] 唐礼忠, XIA K W, 李夕兵. 矿山地震活动多重分形特性与地震活动性预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9) : 1 818 – 1 824. (TANG Lizhong, XIA K W, LI Xibing. Seismic multi-fractal characteristics in mines and seismicity prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9) : 1 818 – 1 824.(in Chinese))
- [12] 杨志国, 于润沧, 郭然, 等. 基于微震监测技术的矿山高应力区采动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2) : 3 632 – 3 638. (YANG Zhiguo, YU Runcang, GUO Ran, et al. Research of mining based on microseismic monitoring technology in high-stress area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.2) : 3 632 – 3 638.(in Chinese))
- [13] 杨承祥, 罗周全, 唐礼忠. 基于微震监测技术的深井开采地压活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4) : 818 – 824.(YANG Chengxiang, LUO Zhouquan, TANG Lizhong. Study on rule of geostatic activity based on microseismic monitoring technique in deep

- mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 818 – 824.(in Chinese))
- [14] 杨志国, 于润沧, 郭 然. 深井矿山微震事件波形研究[J]. 中国工程科学, 2008, 10(8): 69 – 72.(YANG Zhiguo, YU Runcang, GUO Ran. Research of seismic events waveform in deep copper mine[J]. Engineering Sciences, 2008, 10(8): 69 – 72.(in Chinese))
- [15] 唐礼忠, 汪令辉, 张 君, 等. 大规模开采矿山地震视应力和变形与区域性危险地震预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1 168 – 1 178.(TANG Lizhong, WANG Linghui, ZHANG Jun, et al. Seismic apparent stress and deformation in a deep mine under large-scale mining and areal hazardous seismic prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1 168 – 1 178.(in Chinese))
- [16] 董陇军, 李夕兵, 唐礼忠, 等. 无需预先测速的微震震源定位的数学形式及震源参数确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2 058 – 2 067.(DONG Longjun, LI Xibing, TANG Lizhong, et al. Mathematical functions and parameters for microseismic source location without pre-measuring speed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2 058 – 2 067.(in Chinese))
- [17] 徐奴文, 唐春安, 沙 椿, 等. 锦屏 I 级水电站左岸边坡微震监测系统及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 915 – 925.(XU Nuwen, TANG Chun'an, SHA Chun, et al. Microseismic monitoring system establishment and its engineering applications to left bank slope of Jinping I hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 915 – 925.(in Chinese))
- [18] 徐奴文, 唐春安, 周 钟, 等. 岩石边坡潜在失稳区域微震识别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 893 – 900.(XU Nuwen, TANG Chun'an, ZHOU Zhong, et al. Identification method of potential failure regions of rock slope using microseismic monitoring technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 893 – 900.(in Chinese))
- [19] 徐奴文, 唐春安, 吴思浩, 等. 微震监测技术在大岗山水电站右岸边坡中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增 1): 216 – 221.(XU Nuwen, TANG Chun'an, WU Sihao, et al. Application of microseismic monitoring technique to the right bank slope of Dagangshan hydropower station[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(Supp.1): 216 – 221.(in Chinese))
- [20] TANG C A, WANG J M, ZHANG J J. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping II project[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(3): 193 – 208.
- [21] 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 275 – 283.(CHEN Bingrui, FENG Xiating, ZENG Xionghui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 275 – 283.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章：

岩土工程实例

- (1) 超深基坑及超大直径挖孔桩施工对临近地铁变形影响分析及对策；
- (2) 中国四川汶川地震触发高速远程滑坡 – 碎屑流堆积反粒序特征及机制分析。

学术论文

- (3) 新型流 – 固耦合相似材料的研制及应用；
- (4) 岩石静态和准动态加载应变率的界限值研究；
- (5) 二长花岗岩三轴压缩下声发射特征围压效应的试验研究；
- (6) 基于地铁车站开挖引起地表沉降的分析方法对比研究；
- (7) 基于沉降标准的卵砾石层中后注浆桩承载力预测；
- (8) 大断面隧道下穿既有高压输电铁塔施工方案比选及应用研究。

土工基础



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
