DOI：10.16285/j.rsm.2017.0293

乌东德水电站地下厂房层状岩体稳定性及变形机制

胡中华[1]，徐奴文[1]，戴 峰[1]，顾功开[2]，李 昂[1]，杨 莹[1]

（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. 中国长江三峡集团公司，北京 100038）

摘 要：乌东德水电站右岸地下厂房洞室群密集、开挖规模大、地质条件复杂，开挖期间变形破坏问题突出。在地应力实测资料、工程地质特性、开挖过程分析的基础上，利用离散元程序对右岸地下厂房开挖过程进行数值模拟，再现不同模型的应力场、位移场演化过程，分析陡倾角层面对于主厂房变形的影响作用。同时，构建高精度微震监测系统，对开挖诱发的微震活动实时在线监测；分析微震事件聚集规律、S 波及 P 波能量比值 E_s/E_p 分布特征，识别和圈定潜在风险区域，揭示围岩变形机制。微震监测与数值模拟结果表明：在开挖卸荷作用下，陡倾角层面附近岩石破裂，微震事件聚集，能量释放，引起围岩变形破坏。围岩以结构面控制的应力驱动型张拉破坏为主，并伴随少量重力驱动型变形。该研究结果为乌东德水电站地下厂房的开挖和支护设计方案提供重要依据。

关 键 词：地下厂房；离散元；层状岩体；微震监测；变形

中图分类号：TV 731 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－7598 (2018) 10－3794－10

Stability and deformation mechanism of bedding rock masses at the underground powerhouse of Wudongde hydropower station

HU Zhong-hua[1], XU Nu-wen[1], DAI Feng[1], GU Gong-kai[2], LI Ang[1], YANG Ying[1]

（1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China）

Abstract: The right bank underground caverns of Wudongde hydropower station are dense and large-scale, and the geological stratification is complex, which results in severe deformation and failure problems during excavation. Based on the analysis of the characteristics of geologic framework, in-situ stress data and excavation consequence of underground caverns, a numerical model was established to investigate the stability of the right bank underground powerhouse during excavation unloading by using the discrete element method (DEM). In the numerical modelling, we studied the principal stress fields and deformation fields, and analysed the deformation mechanism of the structural planes with a steep dip angle. Then, a high-precision microseismic (MS) monitoring system was established to evaluate the stability of the surrounding rock during excavation. Their assembling rules of MS events and energy ratio E_s/E_p were analysed to identify the potential failure regions and deformation mechanism. The combined numerical simulation and MS monitoring indicated that under the excavating unloading, the failure of rock masses was observed near the layered rock with the steep dip angle where MS events assembled and the energy released, which results in surrounding rock failure. The deformation of surrounding rock was largely induced by stress-driven tensile failure which was controlled by structural planes. The results provide important references for excavation and reinforcement of the right bank underground caverns at Wudongde hydropower station.

Keywords: underground powerhouse; distinct element; layered rock mass; microseismic monitoring; deformation

1 引 言

地球表层的大多岩体，由于漫长的地质作用，会形成原生或次生层面。这些含有单组有规律分布的层面的岩体即为层状岩体；由于结构延展性好，变形和强度性质具有明显的各向异性，其产状及岩层组合对岩体的工程特性影响明显[1]。对于地下洞室开挖过程，层状岩体的力学响应是一个动态过程，

收稿日期：2017-03-18
基金项目：国家自然科学基金面上项目(No. 51679158)；国家重点基础研究发展计划（973 计划）(No. 2015CB057903)。
This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51679158) and the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2015CB057903).
第一作者简介：胡中华，男，1990 年生，硕士，主要从事岩土工程动力灾害方面的研究工作。E-mail: hhuzhonghua@163.com
通讯作者：徐奴文，男，1981年生，博士，副研究员，主要从事岩土工程灾害机制与微震监测方面的研究工作。E-mail: xunuwen@scu.edu.cn

机制极其复杂[2−4]。这种响应机制本质上是围岩能量释放，应力调整的过程；将会引起岩体内部结构变化，力学性质损伤劣化，导致大跨度地下洞室围岩变形过大、支护失效等[5−6]。随着我国水电开发的推进，越来越多的大型水电站修建于西南山区。受地形地貌影响，大量水电站厂房布置于层状岩体中，如已建的龙滩、彭水、锦屏 I 级、向家坝水电站，以及在建的乌东德水电站。这些地下厂房往往规模大、边墙高，地应力复杂，洞室群效应、尺寸效应明显，导致施工期围岩变形、开裂等问题突出[7−8]。当前，大型地下洞室层状岩体开挖期间卸荷能量释放过程、力学响应机制及其稳定性动态评价已成为当前水电开发过程中亟需解决的重要课题。

乌东德水电站地下厂房规模大、边墙高，开挖区域穿越地质层多，岩体强度低。存在多种工程问题，其中层状岩体分布极广，围岩变形特征已超出已有工程经验[9]。韩晓玉等[10]以现场实测数据为依据对乌东德水电站应力场分布规律进行了分析。李会中等[11]分析了乌东德坝址岩体地质与变形情况。熊诗湖等[12]针对乌东德地下厂房薄层岩体大理岩化白云岩进行了原位真三维卸荷试验，得出了各类力学参数。周扬一等[13]针对含不同胶结充填物的碳酸盐岩层面进行了剪切力学特性试验研究。周扬一等[14]对乌东德薄层灰岩弯折破坏机制及岩体弯曲变形特征进行了初步探讨。

上述研究成果为深入认识乌东德水电站右岸地下厂房开挖过程中的围岩力学响应机制，评价洞室稳定性提供了一定的基础。但是却没有揭示开挖过程中，围岩内部微破裂及其演化过程[15]。微震监测作为一种有效的监测手段，能够对岩体进行三维体监测，并通过对微震监测仪器采集到的数据进行分析，得出岩石微破裂的时间、位置、规模以及发展趋势，从而揭示围岩应力及变形演化规律。由于该技术可以对围岩稳定性进行实时监测，近年来在水电行业获得了广泛的运用[16−17]。

本文主要目的是评价乌东德地下厂房开挖过程中陡倾角层面围岩稳定性，并分析其变形破坏机制。首先，对乌东德地下厂房上游补气洞破坏特征进行分析。然后利用离散元程序对乌东德地下厂房洞室群进行数值模拟，探讨开挖过程中的应力、位移变化过程。并结合微震监测结果评价乌东德地下厂房内部微震事件分布及其能量释放情况。最终，对比现场监测与数值模拟结果，找出乌东德右岸地下厂房围岩潜在失稳区域并探讨其变形机制。

2　工程背景

2.1　右岸地下厂房概况

乌东德水电站位于金沙江下游河段最上梯级，以发电为主，兼顾航运等综合效益。大坝采用抛物线混凝土双曲拱坝，坝高为 265 m，坝顶高程为 988 m，枢纽工程主体建筑物包括大坝、引水发电、泄洪消能系统等建筑物，为一等大(I)型工程。

电站采用地下厂房布置型式，左右岸各安装 6 台单机容量 850 MW 水轮发电机组，总装机容量 10 200 MW。右岸布置 7#～12#机组，主厂房开挖尺寸为 333 m×30.5 m(32.50 m)×89.8 m；主变洞开挖尺寸为 272 m×18.8 m×35 m，位于主厂房下游侧 45 m 处，并通过 6 条母线洞、3 条尾水管、尾调室等构成一等大型洞室群结构。

2.2　地质条件

右岸主厂房围岩从山外往山内依次为落雪组第三段第一亚段(Pt_2l^{3-1})～落雪组第三段第五亚段(Pt_2l^{3-5})地层。围岩主要为 II 类和 III 类，极少量 IV 类岩体。主要工程地质问题为包括：小夹角层面、块体、层面附碳质薄膜区、较长大缓倾角裂隙、小夹角长大构造结构面、溶洞等，地质图如图 1 所示。其中小夹角陡倾角层面广泛分布于整个地下厂房，其层状岩体如图 2 所示。上游边墙 7#～8#机及副安装场岩层走向与厂房轴线夹角≤20°，9#～11#机夹角 20°～30°，12#机及主安装场夹角＞30°(一般 40°～70°)。右岸厂房开挖部位实测最大值水平主应力为 9.7 MPa，集中值 5～8 MPa，为低应力水平，方向集中在 NEE～EW 向，侧压系数集中在 0.5～0.9[18]。总体而言，右岸地下厂房三大洞室具有大跨度、高边墙、小夹角、陡倾角、中低地应力的工程地质特点。

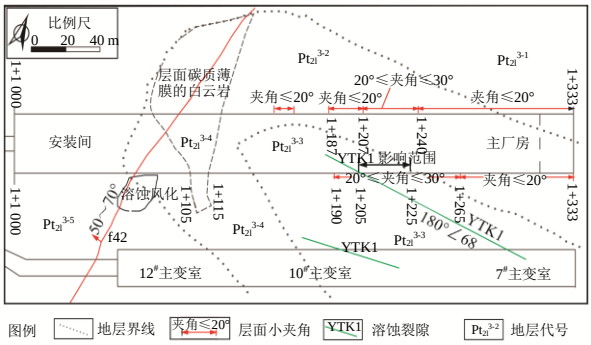


图 1　右岸地下厂房 837 m 高程地质剖面图[10]

Fig.1　Geological section of the right bank powerhouse at 837 m elevation[10]



图 2 乌东德右岸厂房内层状岩体分布

Fig.2 Layered rock mass distribution of the right bank powerhouse in Wudongde hydropower station

2.3 乌东德厂房上游破坏特征

乌东德水电站地下洞室群采用分层分步开挖方案。由于右岸地下厂房洞室群跨度大、边墙高、地质条件复杂，上游岩层层面倾向边墙外侧，为顺层结构，在大规模开挖卸荷作用下，容易出现层面张开、顺层滑移等结构面控制性破坏。

厂房第 V 大层(高程 823.4～815.4 m)，于 2015 年 4 月 23 日完成开挖支护施工，开挖期间各机组变形未出现异常情况。主厂房上游边墙布置 L3 施工支洞，第 VI 大层开挖时，L3 支洞顶拱岩体将被挖除，即所谓“炸顶”。7#～8#机组(桩号 1+255.0～1+290.0 m)于 2015 年 4 月 30 日至 5 月 4 日“炸顶”完成，其长度约 35 m；在 5 月 7 日现场巡视过程中，发现 7#及 8#机组上游补气洞出现大量裂缝。8#～9#机组(桩号 1+220.0～1+255.0 m)于 2015 年 6 月 4 日至 6 月 10 日“炸顶”完成，长度约 35 m，期间 7#、8#机组补气廊道洞壁和底板裂缝明显扩展增大。7#、8#机组补气洞裂缝如图 3 所示，裂缝区域分布如图 4 所示。为检查补气廊道与引水洞下平段间裂缝连通性，6 月 27 日分别在 7#、8#机组补气廊道底板进行注水试验，发现 7#、8#机组引水隧洞下平段有水流渗出，说明裂缝已贯通至引水下平段。

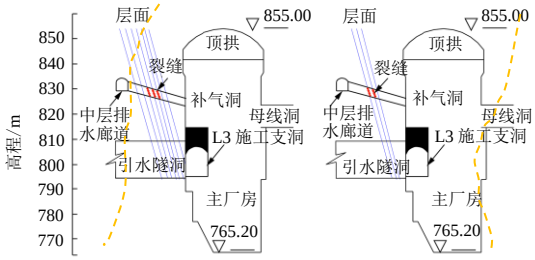


(a) 7#机组 (b) 8#机组

图 3 7#及 8#机组补气洞裂缝

Fig.3 Cracks along the air holes of units No.7 and No.8

从施工节点来看，7#及 8#机组补气洞裂缝变形破坏现象发生于 L3 施工支洞“炸顶”过程，与主厂房边墙高度增大有关。结合图 1 发现，7#及 8#机组上游边墙存在大量陡倾角层面，在 L3 施工支洞进行炸顶过程中，受开挖卸荷作用影响，产生裂缝。



(a) 7#机组 (b) 8#机组

图 4 主厂房上游裂缝分布图

Fig.4 Distribution of cracks at the upside of the underground powerhouse

3 右岸地下厂房数值模拟

3.1 计算模型

离散元方法是从离散单元的块体接触面入手，找出接触的本构关系，然后根据牛顿第二定律对非连续、离散的单元进行模拟仿真。由于模型块与块之间没有变形协调的约束，能够较好地模拟出围岩大变形破坏问题，适用于乌东德地下洞室层状节理围岩的非连续、大变形模拟计算[19]。

岩体变形块体模型使用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型；陡倾角层面采用 Coulomb-slip 模型，接触面由两个面贴合而成。岩体及层面各参数获取方法可参考 UDEC 用户手册[19]，此处不再赘述。根据现场勘探结果，岩体和层面的计算参数分别如表 1、2 所示[20]。

表 1 不同岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of different rock masses

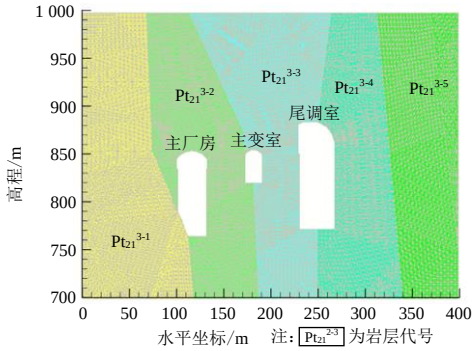
岩组	围岩类别	重度 /(kN/m³)	变形模量 /GPa	泊松比 ν	抗剪断强度	
					摩擦系数 f	凝聚力 c/MPa
Pt_{21}^{3-1}	II_2	26.9	20	0.24	1.6	1.3
Pt_{21}^{3-2}	III_1	27.4	19	0.25	1.3	1.1
Pt_{21}^{3-3}	II_1	26.9	27	0.21	1.9	1.5
Pt_{21}^{3-4}	III_1	27.4	18	0.25	1.3	1.1
Pt_{21}^{3-5}	II_2	26.9	22	0.24	1.6	1.3

表 2 陡倾角层面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rock plane with steep dip angle

法向刚度 /(GPa/m)	切向刚度 /(GPa/m)	凝聚力 /MPa	摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
1×10^9	1×10^9	0.3	20	0

根据右岸地下洞室群地质特点，选择具有代表性的 7#机组中心剖面作为典型计算剖面；其最突出的地质特征是陡倾角层面密集，倾向下游，倾角大于 70°。为研究岩体陡倾角层面对于机组上游边墙开挖过程中的变形及力学响应行为，设计两个模型，模型 1 不考虑陡倾角层面影响，模型 2 考虑陡倾角层面影响，按照实际位置设置节理，节理间距为 3 m；模型大小均为 400 m×300 m(长×高)，分别如图 5 所示。模型坐标取 x 轴为沿水流方向指向下游，y 轴竖直向上。模型底部施加 y 方向约束，上下游分别施加 x 方向约束，顶部高程 1 000 m 为自由面，共划分块体 66 个，网格 33 501 个，节点 17 852 个。



(a) 不考虑陡倾角层面（模型 1）

(b) 考虑陡倾角层面（模型 2）

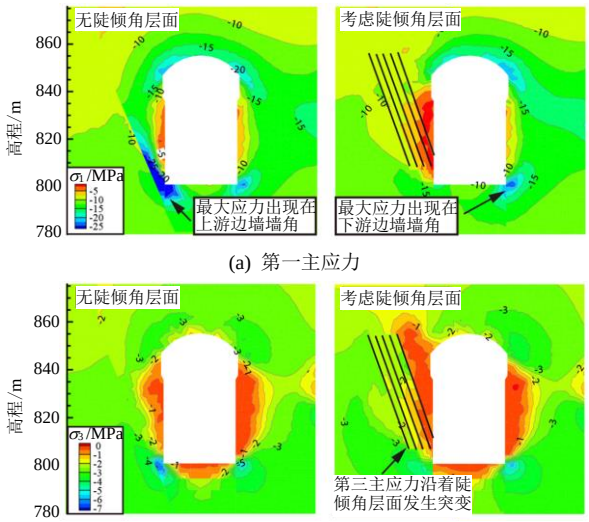
图 5　右岸地下洞室群模型

Fig.5　Models of the right bank underground cavern group

3.2　结果分析

3.2.1 围岩应力分布规律

根据施工设计方案，主厂房共分 XI 层开挖。第 VII 层（高程 809～801 m）开挖完毕时，应力场分布如图 6 所示。由图 6(a)中两种模型第一主应力场分布对比可知，不考虑层面时第一主应力最小值为 2.5～5 MPa；考虑层面情况下，上游边墙第一主应力最小值小于 2.5 MPa，应力卸荷现象比下游厂房更加明显，并且其轮廓线受陡倾角层面影响明显；上游边墙应力集中区转移至下游边墙墙角。图 6(b)所展示两种情况下的第三主应力表现出与图 6(a)类似的规律：说明上游边墙陡倾角层面加剧了开挖过程中围岩卸荷作用，导致应力向下游转移。



(a) 第一主应力

(b) 第三主应力

图 6　主厂房应力场分布

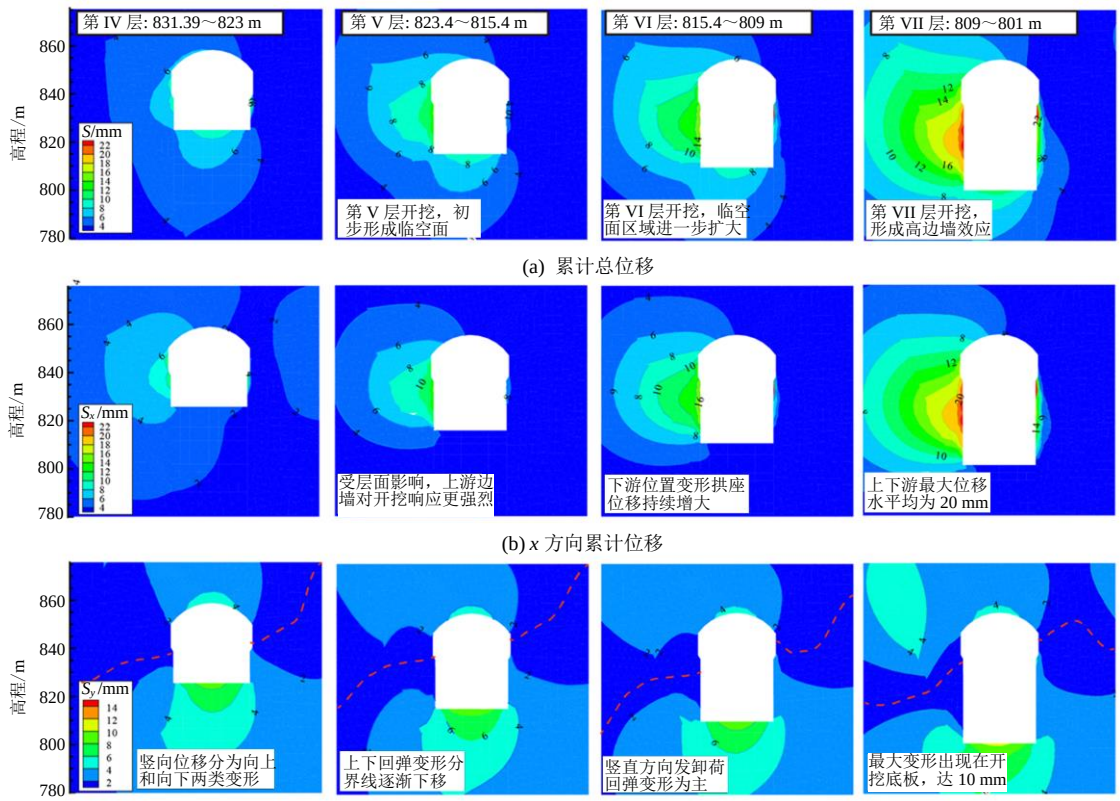
Fig.6　Stress field of the main powerhouse

3.2.2 变形分布规律

图 7(a)～7(c)分别为不考虑陡倾角层面情况下主厂房第 IV～VII 开挖过程的总变形云图、水平方向及竖直方向变形分量云图。图 7 清晰表明，随开挖进行，三者均呈逐步增长的趋势；受马蹄结构及岩层界面的影响，在开挖作用下水平变形比竖向变形位移大。在第 VII 层开挖结束时，水平位移最大值为 22 mm，竖向位移值为 10 mm，水平位移变形与竖向位移变形量比值达到 2.2。

图 8(a)～8(c)分别为考虑陡倾角层面作用时下第 IV～VII 开挖过程的总变形云图、水平方向及竖向变形分量云图，与不考虑陡倾角层面的情况类似，随开挖进行，三者均呈逐步增长的趋势。但是在考虑陡倾角变形作用下，三者均比不考虑陡倾层面情况下的变形大，其中竖直方向的位移差别较小；而总变形及水平方向变形量达到不考虑陡倾角层面情况下的两倍，第 VII 层开挖结束时，总变形量及水平方向变形量最大值达 50 mm，出现于主厂房上游边墙 812 m 高程处，这与现场实测变形值基本一致，说明考虑陡倾角层面影响下的数值模拟更符合实际变形情况。

整体上，无论考虑陡倾角层面作用与否，受地下洞室群结构效应影响，水平方向变形均比竖直方向变形大。考虑陡倾角结构面时水平方向及竖直方向变形大于没考虑陡倾角结构面时的变形。数值模拟结果表明，上游顺层陡倾角层状结构降低了围岩整体的力学及变形参数，是控制上游边墙围岩变形的关键因素。



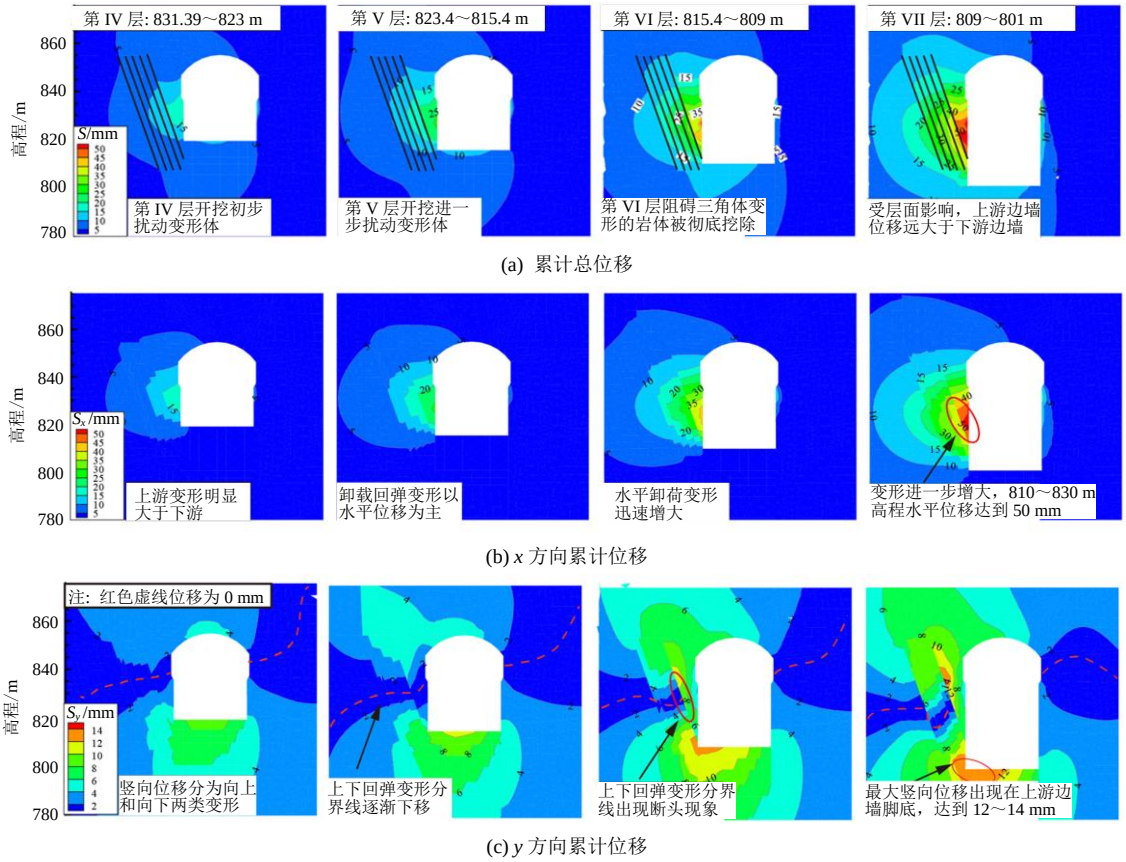
(a) 累计总位移

(b) x 方向累计位移

(c) y 方向累计位移

图 7 不考虑层面情况下开挖变形位移云图

Fig.7 Deformation displacement contours without rock strata



(a) 累计总位移

(b) x 方向累计位移

(c) y 方向累计位移

图 8 考虑节理情况下主厂房开挖变形位移云图

Fig.8 Deformation displacement contours with rock strata

4　右岸地下厂房微震监测

针对 7#及 8#机组补气洞的裂缝问题，2015 年 7 月右岸地下厂房引入加拿大 ESG (Engineering Seismology Group)公司生产的高精度微震监测系统。该系统主要包括加速度型传感器、Paladin 数字信号采集系统和 Hyperion 数字信号处理系统。Paladin 采样频率 10 kHz，系统采用短长时窗之比的阈值触发，门槛值为 2.5；加速度传感器频率响应范围为 50～5 000 Hz。6 通道传感器按照空间阵列分布于主厂房上游排水洞及补气洞不同高程，呈空间分布，如图 9 所示，监测范围覆盖排水洞、补气洞在内的主厂房上游区域。传感器将接收到的微震信号转换成电信号，经由电缆线传输至 Paladin 数字信号采集系统，通过 24 位 A/D 转换成为数字信号，最终被 Hyperion 数字信号处理系统自动记录并保存下来。微震事件包含完整的波形和波谱分析图，可以获取微震事件的能量、震级、应力降等多项震源参数信。

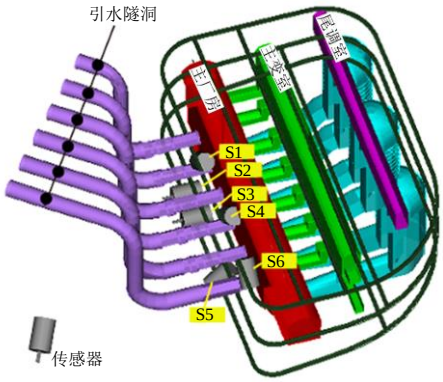


图 9　传感器空间布置
Fig.9　Spatial layout of sensors

4.1　微震活动空间分布规律

2015 年 7 月 7 日至 8 月 31 日微震事件共计 436 个，剔除噪音、爆破等干扰事件，还剩 183 个有效事件，其分布规律俯视图及正视图分别如图 10(a)、10(b)所示。图中颜色越亮，说明震级越高；球体越大，能量越多。从俯视图 10(a)可以看出，微震事件主要分布在 7#～8#机组上游距离边墙 35 m 的范围内。由于 7#、8#机组第 VI 层开挖较快，已完成上游半幅的开挖工作，其他机组开挖过程预留隔墩，未设隔墩的 7#～8#机组上半幅开挖完成后引水隧洞下平段直接出露于 7#、8#机组第 VI 层上游边墙。图 10(b)是微震事件正视图，该图清晰地显示微震事件集中于陡倾角岩层层面与主厂房边墙所切割区域，这是由于第 VI 层开挖过程中，受陡倾角层面切割的主厂房岩体侧向约束被彻底解除，岩体沿着陡倾角层面发生破裂，诱发大量的微震事件。

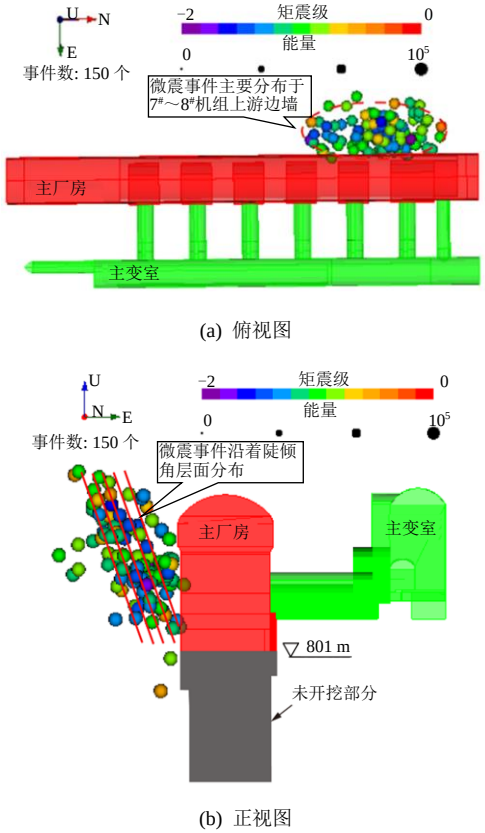


图 10　微震事件空间分布
Fig.10　Spatial distribution of MS events

4.2　围岩变形破坏特征

每个地震事件均会产生对应的 P 波和 S 波，可以通过安装在岩体中的传感器捕捉这些地震信号的初至时间和振幅等参数。这些参数中 E_s/E_p（E_s 代表 S 波能量，E_p 代表 P 波能量）是反映地震震源机制的重要特征，Gibowicz 等[21]通过研究发现，对于剪切型破坏，S 波能量远大于 P 波能量：$E_s/E_p \geq 10$ 时，微震事件由断层-滑移或者剪切破坏诱发；$E_s/E_p \leq 3$ 时，微震事件由拉伸以及岩爆诱发；$3<E_s/E_p<10$ 时，微震事件由复合型破坏诱发。Xu 等[22]通过对锦屏一级水电站微震事件 S 波、P 波能量比值的分析发现，56%的微震事件 $E_s/E_p>10$，而数值模拟结果显示边坡主要发生剪切破坏，二者具有良好的对应关系。Hudyma 等[23]通过对某矿山不同微震事件 E_s/E_p 参数的分析，揭示了不同微震聚集区域围岩的破坏形态。

图 11 为微震事件矩震级与 E_s/E_p(对数)分布特征。由图可以看出，50%微震事件 $E_s/E_p<3$，35%

微震事件 $3 \leqslant E_s/E_p \leqslant 10$；15%微震事件 $E_s/E_p > 10$。E_s/E_p 分布表明，围岩变形以陡倾角层面张开破坏为主，同时有少量剪切类破坏。由此可知，由于爆破开挖作用，形成新的临空面，解除陡倾角切割岩体的侧向约束。在强烈的卸荷作用下，陡倾角层面附近应力释放，围岩应力降低，最终围岩破裂，微震事件聚集，能量释放，导致陡倾角层面张开，补气洞部位出现裂缝。

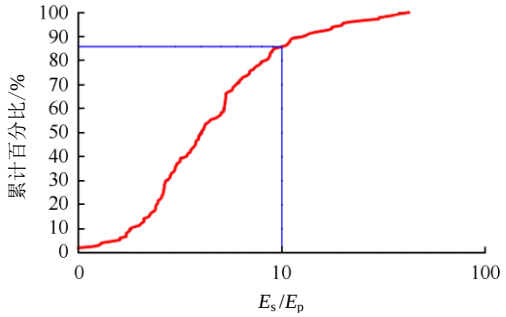


图 11 微震事件 E_s/E_p 分布

Fig.11 E_s/E_p distribution of MS events

4.3 数值模拟与微震监测结果对比分析

离散元模拟与微震监测结果表明，在主厂房开挖作用下，围岩应力重新调整分布，诱发陡倾角层面活动，7#～8#机组上游补气洞附近围岩破裂，释放能量，微震事件萌生、发展并聚集，陡倾角层面张开。围岩的力学行为受开挖强度、洞室群空间结构、开挖位置、初始地应力分布、地质构造等多种因素影响。

微震事件分布图及地震能量分布特征可以揭示监测区域微围岩破裂程度及能量释放情况，以便揭示围岩潜在破坏区域。图 12(a)、12(b)为 2015 年 7 月 7 日至 8 月 31 日（对应主厂房第 VII 层开挖）期间微震密度云图及地震能量云图，图中颜色越亮，微震事件越密集，释放能量越多。图 12(a)表明，受开挖卸荷作用影响，陡倾角层面围岩破裂，微震事件发育并聚集。由地震能量云图 12(b)可知，受层面开挖卸荷影响，能量释放区域主要沿陡倾角层面分布。对比图 6(a)、7(b)给出的应力分布图可知，陡倾角层面附近区域卸荷严重，说明开挖作用导致陡倾角层面附近应力卸荷，围岩破裂，引发微震事件。图 12(c)为当前开挖阶段（第 VII 层，高程为 809～801 m）位移变形，由图可知，随着开挖高程的降低，最大变形出现在上游 820 m 高程靠近临空面的位置，沿水平方向指向临空面，变形方向与陡倾角层面大角度相交。目前陡倾角层面穿过的 7#～8#机组上游边墙补气洞底板及侧墙已经出现多条裂缝，裂缝张开，无明显擦痕，如图 12(d)所示。这与数值计算及微震监测结果揭示的变形特征一致，说明补气洞裂缝变形以结构面张开为主，伴随少量剪切变形。

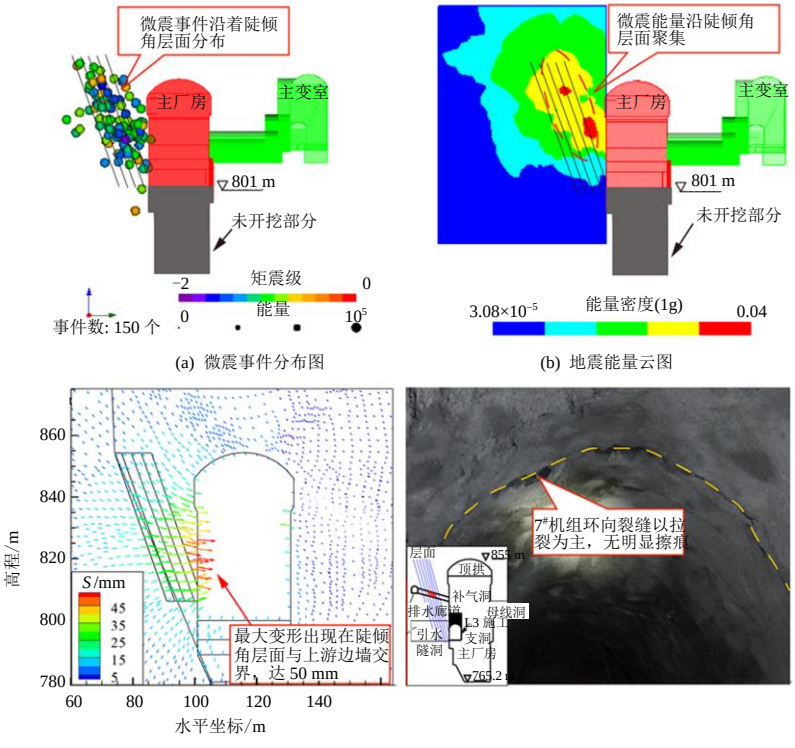
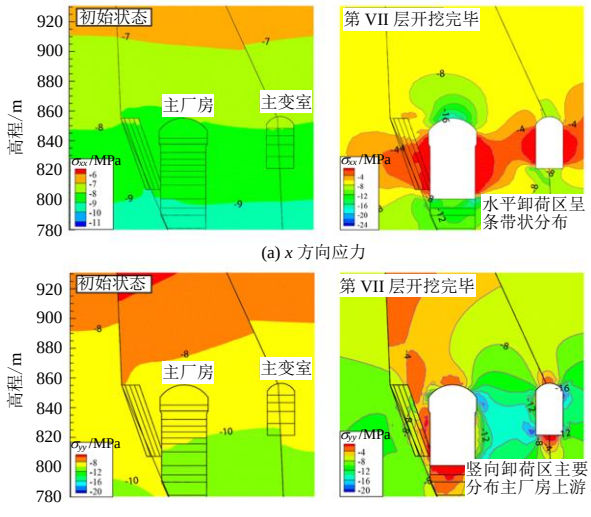


图 12 主厂房微震监测与数值模拟对比分析

Fig.12 Comparison of microseismic monitoring and simulation of the underground powerhouse

图 13(a)、13(b)分别给出了地下厂房初始状态以及第 VII 层开挖完成时水平及竖直方向应力场图。对比分析图 13(a)、13(b)可知，水平应力卸荷区集中于 800～840 m 高程，沿水平方向呈条带状分布。上游卸荷深度达到 50 m，最小水平应力小于 2 MPa，最大卸荷率高达 80%；应力集中区主要分布于顶拱与开挖底板。竖向应力卸荷区集中于顶拱、开挖面底板；此外主厂房上游边墙竖向应力卸荷严重，这是由于陡倾角层面给主厂房上游边墙岩体提供了底滑面，上游边墙承载力降低，竖直方向应力转移至下游边墙，于主厂房与主变室之间岩柱形成应力集中区。对比水平及竖直两个方向应力卸荷情况可知，水平方向卸荷程度远大于竖直方向，这是由于地下厂房埋深大，结构为城门洞形，更有利于水平方向卸荷作用；加之陡倾角层面对岩体的切割作用，最终上游边墙围岩以受应力驱动作用控制的陡倾角层面张开变形为主。陡倾角层面大倾斜角度（高达 75°）加剧了水平变形。

目前 7#、8#主厂房没有大的失稳破坏，基本稳定。但随着开挖高程的降低，形成高边墙效应，围岩应力条件恶化，力学参数降低，围岩可能进一步发生破坏作用。陡倾角层面作为影响主厂房稳定性主要因素，在开挖及支护过程中应当密切关注。



(a) x 方向应力

(b) y 方向应力

图 13　右岸地下厂房应力场分布
Fig.13　Stress field of the right bank underground powerhouse

5　结　论

采用离散元方法，对乌东德水电站右岸地下厂房洞室群开挖卸荷过程模拟分析，再现地下洞室围岩应力、变形演化过程。构建高精度微震监测系统，研究主厂房上游区域微震事件分布规律及 S 波与 P 波能量比值(E_s/E_p)特征，得到如下结论：

（1）主厂房第 VII 层开挖完成时，第一主应力、第三主应力最小值、变形最大值均出现于上游陡倾角层面影响区域。说明对于陡倾角层面发育的地下厂房，层面是控制洞室开挖稳定性的关键因素。

（2）地下厂房微震事件主要分布在上游 820～840 m 高程，沿陡倾角层面聚集，形成主要的围岩损伤区域，与数值模拟结果一致。85%的微震事件 E_s /E_p<10，上游边墙陡倾角层面区域围岩以拉伸破坏为主，伴随少量剪切破坏。综合数值模拟、地质资料及现场勘探成果可知，围岩变形以应力卸荷驱动的层面张开为主。

（3）尽管目前主厂房整体上处于稳定状态，但是陡倾角层面及其切割岩体仍然可能发生潜在破坏。建议在进行支护时，锚索穿过陡倾角层面，以保证厂房稳定性。

参 考 文 献

[1] 董学晟, 田野, 邬爱清. 水工岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 238.
DONG Xue-sheng, TIAN Ye, WU Ai-qing. Rock mechanics in hydraulic structural engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004: 238.

[2] 邬爱清, 杨启贵, 周火明, 等. 清江水布垭枢纽地下厂房岩石力学研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 1－7.
WU Ai-qing, YANG Qi-gui, ZHOU Huo-ming, et al. Rock mechanical study of underground powerhouse in Shuibuya project[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2006, 23(4): 1－7.

[3] 丁秀丽, 盛谦, 邬爱清, 等. 水布垭枢纽地下厂房施工开挖与加固的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增刊 1): 2162－2167.
DING Xiu-li, SHENG Qian, WU Ai-qing, et al. Numerical modeling on the excavation and reinforcement for the underground powerhouse in the Shuibuya project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Supp.1): 2162－2167.

[4] SITHARAM T G, SRIDEVI J, SHIMIZU N. Practical equivalent continuum characterization of jointed rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(3): 437－448.

[5] 苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下大型地下洞室群开挖顺序与支护参数组合优化的智能方法[J]. 岩石

力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2800－2808.
SU Guo-shao, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Intelligent method of combinatorial optimization of excavation sequence and support parameters for large underground caverns under condition of high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 2800－2808.

[6] 黄书岭. 高应力下脆性岩石的力学模型与工程应用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
HUANG Shu-ling. Study of mechanical model of brittle rock under high stress condition and its engineering applications[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2008.

[7] 张建海, 王仁坤, 周钟, 等. 高地应力地下厂房预应力锚索预紧系数[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1002－1008.
ZHANG Jian-hai, WANG Ren-kun, ZHOU Zhong, et al. Analysis of monitoring microseism in areas controlled by faults near powerhouse in Dagangshan hydropower station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(3): 1002－1008.

[8] 黄润秋, 黄达, 段绍辉, 等. 锦屏 I 级水电站地下厂房施工期围岩变形开裂特征及地质力学机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 23－35.
HUANG Run-qiu, HUANG Da, DUAN Shao-hui, et al. Geomechanics mechanism and characteristics of surrounding rock mass deformation failure in construction phase for underground powerhouse of Jinping I hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 23－35.

[9] 张存慧, 刘会波, 张玲丽, 等. 金沙江乌东德水电站地下厂房洞室群围岩稳定评价及支护设计优化专题报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究院, 2015: 57－61.
ZHANG Cun-hui, LIU Hui-bo, ZHANG Ling-li, et al. Stability evaluation and supports design optimization for surrounding rock mass in underground powerhouse caverns at Wudongde hydropower station along Jinsha river[R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, 2015: 57－61.

[10] 韩晓玉, 黄孝泉, 李永松, 等. 乌东德水电工程河谷地应力场分布规律[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(11): 34－39.
HAN Xiao-yu, HUANG Xiao-quan, LI Yong-song, et al. Stress field distribution at the river valley of Wudongde hydropower station[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2015, 32(11): 34－39.

[11] 李会中, 翁金望, 王团乐. 乌东德水电站坝址岩体变形试验与地质分析[J]. 人民长江, 2008, 39(19): 3－6.
LI Hui-zhong, WENG Jin-wang, WANG Tuan-le. Deformation experiments and geologic analysis in dam site area of Wudongde water power station[J]. **Yangtze River**, 2008, 39(19): 3－6.

[12] 熊诗湖, 钟作武, 唐爱松, 等. 乌东德层状岩体卸荷力学特性原位真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 3724－3731.
XIONG Shi-hu, ZHONG Zuo-wu, TANG Ai-song, et al. Study of mechanical properties of wudongde layered rockmass under unloading conditions by in-situ true triaxial tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp. 2): 3724－3731.

[13] 周扬一, 冯夏庭, 徐鼎平, 等. 含不同胶结充填物的碳酸盐岩层面剪切力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1162－1173.
ZHOU Yang-yi, FENG Xia-ting, XU Ding-ping, et al. Experimental study of the shear behavior of carbonate bedding planes cemented by different materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(6): 1162－1173.

[14] 周扬一, 冯夏庭, 徐鼎平, 等. 受弯条件下薄层灰岩的力学响应行为试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1895－1993.
ZHOU Yang-yi, FENG Xia-ting, XU Ding-ping, et al. Experimental study of mechanical response of thin-bedded limestone under bending conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 1895－1993.

[15] XU N W, LI T B, DAI F, et al. Microseismic monitoring and stability evaluation for the large scale underground caverns at the Houziyan hydropower station in Southwest China[J]. **Engineering Geology**, 2015, 188: 48－67.

[16] 李彪, 戴峰, 徐奴文, 等. 深埋地下厂房微震监测系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 3375－3383.
LI Biao, DAI Feng, XU Nu-wen, et al. Microseismic monitoring system and its engineering applications of deep-buried underground powerhouse[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp.1): 3375－3383.

下转第 3811 页