

琅琊山抽水蓄能电站地下厂房 洞室开挖与支护数值模拟*

杨为民¹ 李术才^{1,2} 陈卫忠² 朱维申¹

(¹山东大学岩土与结构工程研究中心 济南 250061) (²中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室 武汉 430071)

摘要 采用三维快速拉格朗日差分法(FLAC^{3D}),对琅琊山抽水蓄能电站地下厂房洞室开挖与支护过程进行了数值模拟。研究了地质条件具有代表性的1#机组及较为复杂的2#机组剖面,对开挖后围岩的应力场、位移场及塑性区特征进行了比较分析,得出了一些建设性的结论,对工程的施工具有指导意义。

关键词 地下工程, 围岩, 开挖, 稳定性

分类号 TV 32*1

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)增2-4966-05

NUMERICAL SIMULATION OF EXCAVATION AND SUPPORT FOR UNDERGROUND POWER-HOUSE OF LANGYASHAN PUMPED-STORED POWER STATION

Yang Weimin¹, Li Shucan^{1,2}, Chen Weizhong², Zhu Weishen¹

(¹Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061 China)

(²Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

Abstract Using Three-Dimensional Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC^{3D}) method, the excavation and the effect of support are simulated for underground power-house of langyashan pumped-storage power station. For the 1[#] unit profile with representative geological condition and 2[#] unit profile with comparatively complicated geological condition, the characters of stress, displacement vector and plastic zone of surrounding rock masses after excavation are analyzed. Some useful conclusions are gained. It will be significant for the construction of the project.

Key words underground engineering, surrounding rock masses, excavation, stability

1 引言

琅琊山抽水蓄能电站位于安徽省滁州市西南郊琅琊山北侧,电站利用已建的城西水库作为下水库,上水库修建于琅琊山上。地下厂房布置于蒋家洼与丰乐溪之间的条形山体内,为首部地下式厂房。主厂房、安装间及主变室呈一字形布置,厂房轴线为NW285°,自东向西依次为1#主变室、主机间(1#,2#机组段)、安装场、主机间(3#,4#机组段)和2#主变

室。厂房洞室开挖尺寸(长×宽×高)为156.7 m×21.5 m×46.2 m。电站引水系统采用1洞1机的布置方式,尾水系统采用1洞2机的布置方式。电站总装机容量为600 MW。

厂房区地层岩性主要为琅琊山组 $\epsilon_3\text{Ln}$ 岩层,以薄层夹中厚层灰岩为主,还有少量车水桶组下段 $\epsilon_3\text{C}^1$ 岩层分布,为薄层和中厚层灰岩互层。在厂房顶拱开挖过程中发现一条闪长玢岩岩脉(构造蚀变带),宽约8~13 m,该蚀变带分别在厂房上层排水廊道、2#压力管道下平段均有揭露,岩脉基本顺

2004年1月16日收到初稿,2004年2月17日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(5993190)重点资助项目。

作者 杨为民 简介:男,25岁,现为硕士研究生,主要从事岩土工程数值计算方面的研究工作。

层侵入, 倾角较陡, 其走向与厂房轴线夹角约 60° , 岩脉有不同的破碎蚀变现象。该地质结构对于 2[#]机组剖面的稳定性有很大的影响, 是计算中应重点考虑的因素。

FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)程序是由美国 Itasca 公司开发的大型商业软件, 由于采用了显式有限差分格式来求解场的控制微分方程, 并应用了混合单元离散模型, 因此, 可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动、软化直到大变形, 尤其在弹塑性分析、大变形分析以及模拟施工过程等方面有其独到的优点。现已被广泛应用于岩土工程的各个领域^[1~9]。

2 计算原理与计算模型

2.1 计算原理

在 $FLAC^{3D}$ 中采用了混合离散方法^[1], 区域被划分为常应变六面体单元的集合体, 而在计算过程中, 程序内部又将每个六面体分为以六面体角点为角点的常应变四面体的集合体, 变量均在四面体上进行计算, 六面体单元的应力和应变取其内四面体的体积加权平均。

如一四面体, 节点编号为 1 到 4, 第 l 面表示与节点 l 相对的面。设其内任一点的速度分量为 v_i , 对于常应变单元, v_i 为线性分布, 则由高斯公式可得

$$\int_V v_{i,j} dV = \int_S v_i n_j dS \quad (1)$$

式中: V 为四面体的体积, S 为四面体的外表面面积, n_j 为外表面的单位法向向量分量。

由式(1)可得

$$v_{i,j} = -\frac{1}{3V} \sum_{l=1}^4 v_l^{(i)} S^{(l)} \quad (2)$$

式中: 上标 l 表示节点 m 的变量, (l) 表示面 l 的变量。

$FLAC^{3D}$ 以节点为计算对象, 将力和质量均集中在节点上, 然后, 通过运动方程在时域内进行求解。节点运动方程可表达为

$$v_i' \left(t + \frac{t}{2} \right) = v_i' \left(t - \frac{t}{2} \right) + \frac{F_i'(t)}{m^i} \Delta t \quad (3)$$

某一时步的单元应变增量 Δe_{ij} 为

$$\Delta e_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \Delta t \quad (4)$$

得到了应变增量, 由本构方程可求出应力增量, 叠加后即可得到总应力, 再由虚功原理求出一时步的节点不平衡力, 进入下一时步的计算。

2.2 计算模型

计算时, 选取地质条件具有代表性的 1[#]机组剖面以及上游边墙有岩脉蚀变带侵入的 2[#]机组剖面进行准三维计算。计算坐标系 X 轴取垂直厂房边墙方向, 以指向下游为正, Y 轴以竖直向上为正, Z 轴取沿厂房轴线方向。1[#], 2[#]机组剖面模型的计算范围分别为: $-146.0 \text{ m} \leq X \leq 120.0 \text{ m}$, Y 从 -178.0 m 到地表, Z 向厚度为 10 m ; $-150.7 \text{ m} \leq X \leq 120.0 \text{ m}$, Y 从 -200.0 m 到地表, Z 向厚度为 10 m 。上述 2 种模型分别剖分了 6 023 个单元, 12 308 个结点和 7 460 个单元, 15 128 个结点。模型计算域内考虑了对厂房影响较大的 F15, F207, f 225, F206 和 F209 断层。计算中采用程序提供的结构单元模拟锚杆和预应力锚索以及衬砌。网格剖分情况如图 1 所示。

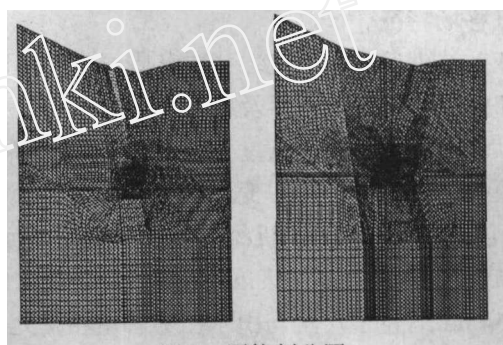


图 1 网格剖分图

Fig.1 Mesh of model

根据实测地应力场, 埋深小于 50 m 时取自重应力场, 大于 50 m 时考虑构造应力, X 向侧压系数取 1.22 , Z 向侧压系数取 2.2 。

边界条件为 4 个侧面及 1 个底面加法向位移约束, 顶面为自由面。

厂房共分 6 层开挖, 采取自上而下的开挖顺序, 分层开挖示意图见图 2。

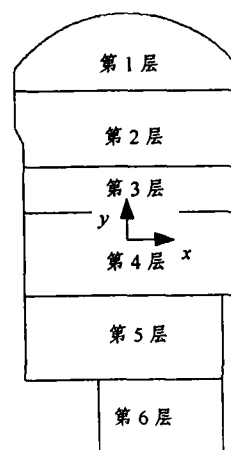


图 2 分层开挖示意图

Fig.2 Excavation blocks

计算中所取岩体力学参数见表 1, 屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则。

表 1 岩体力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of rock masses

岩性	变形模量/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	容重/kN·m ⁻³
车水桶组、琅琊山组灰岩	13.00	0.30	0.90	41	1.0	27.0
断层带	2.00	0.35	0.02	20	0.0	26.5
岩脉蚀变带	1.25	0.30	0.60	22	0.1	27.0

3 围岩稳定性计算成果分析

3.1 位移场特征

开挖结束后, 由于应力释放, 围岩产生指向洞室内部的回弹变形, 顶拱及底板以竖向位移为主, 边墙以水平位移为主。从量值来看, 边墙位移要远大于顶拱下沉及底板回弹变形。

6 层开挖完毕后, 1[#]机组剖面顶拱累计下沉 5.6 mm, 底板回弹变形为 6.2 mm; 上游边墙最大位移为 21.54 mm, 位于厂房与引水压力管道相交处, 因为此处两洞相交, 临空面较大, 所以产生较大位移; 下游边墙最大位移为 17.98 mm, 位于厂房与尾水管相交处。由此可见, 交叉洞口处易产生较大变形, 在施工过程中应注意合理支护。

2[#]机组上游边墙变形受侵入岩脉蚀变带影响非常明显, 在考虑支护情况下, 开挖完毕后最大位移达到 112.5 mm, 如此之大的变形对洞室稳定造成很大威胁; 下游边墙则位移较小, 为 5~25 mm; 顶拱累计下沉量为 6.44 mm, 底板回弹变形为 11.7 mm, 均在允许范围之内。

另外, 观察距离顶拱 3 m 处一点的位移发现, 随着开挖步的进行, 两剖面的厂房顶拱均表现出了先下沉后上抬再下沉的特征, 这符合洞室施工中顶拱位移的规律, 说明数值模拟能较好地反映现场的实际情况。2 个机组剖面开挖完毕后围岩的位移矢量图如图 3 和 4 所示。

3.2 应力场特征

洞室开挖对围岩产生扰动, 使得围岩应力发生二次重分布, 洞室周围径向应力释放, 环向应力增加。因此, 在厂房不同部位出现不同程度的应力集中。图 5 和 6 分别为 2 个机组剖面的主厂房加锚开挖完毕后第 1 和 3 主应力等值线图。

从第 1 主应力等值线图可以看出, 2 个机组剖

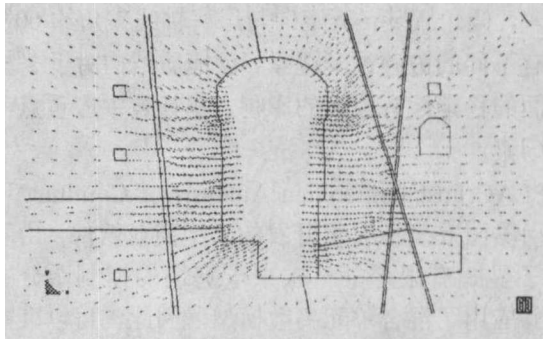


图 3 1[#]机组剖面位移矢量图

Fig.3 Displacement vector of 1[#] unit profile

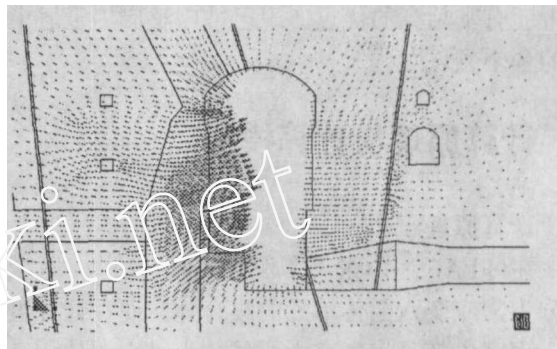
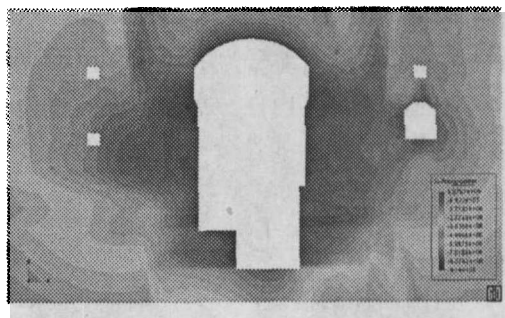
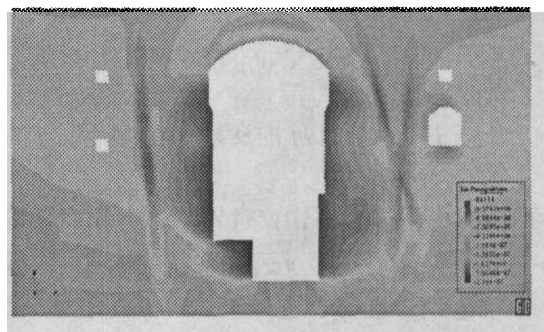


图 4 2[#]机组剖面位移矢量图

Fig.4 Displacement vector of 2[#] unit profile



(a) 第 1 主应力等值线图

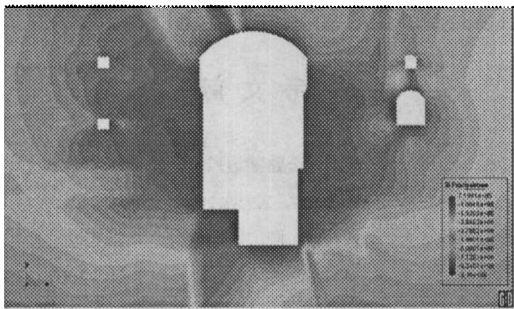


(b) 第 3 主应力等值线图

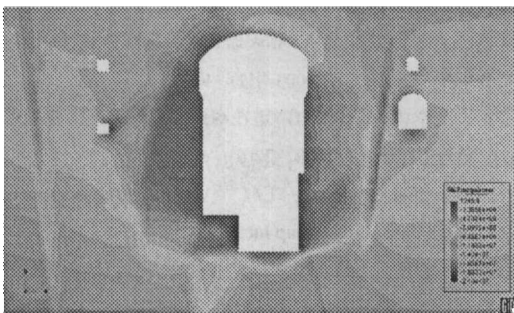
图 5 1[#]机组围岩应力等值线图

Fig.5 Stress contour of surrounding rock masses for 1[#] unit profile

面的厂房上游边墙中部、下游边墙下部、上下游岩锚吊车梁及机蜗台阶处均出现拉应力集中。6 层开挖完毕后, 1[#]机组剖面的最大拉应力值为 0.70 MPa,



(a) 第 1 主应力等值线图



(b) 第 3 主应力等值线图

图 6 2#机组围岩应力等值线图

Fig.6 Stress contour of surrounding rock masses for 2# unit profile

2#机组剖面的最大拉应力值为 0.88 MPa，均位于机蜗台阶段。另外，对于 2#机组剖面，受岩脉蚀变带影响，在分层开挖的过程中，上游边墙中部拉应力值超过岩体的抗拉强度，造成较大范围拉破坏，应引起重视。

从第 3 主应力等值线图可以看出，2 个机组剖面主厂房顶拱、底板等部位均出现压应力集中，量值为 7~10 MPa，1#机组剖面压应力值略大于 2#机组剖面压应力值。

3.3 塑性区特征

随着厂房分层开挖进行，高边墙逐渐形成，边墙附近塑性区迅速扩展。图 7 和 8 分别为 1#和 2#机组剖面加锚开挖完毕后洞周塑性区示意图。可以看出，洞室开挖后，塑性区主要集中在边墙附近，顶拱及底板处塑性区较小。两剖面下游边墙的塑性区宽度相差不大，分别为 18.9 和 17.7 m；2#机组上游边墙受蚀变带影响，塑性区范围很大，至开挖结束时，上游边墙塑性区与上游排水廊道塑性区连通。经计算可得 1#和 2#机组塑性区面积分别为 1 300.3 和 1 846.8 mm²。

4 计算结果与监测结果的对比

由于工程正在进行第 3 层开挖，所以，仅以前

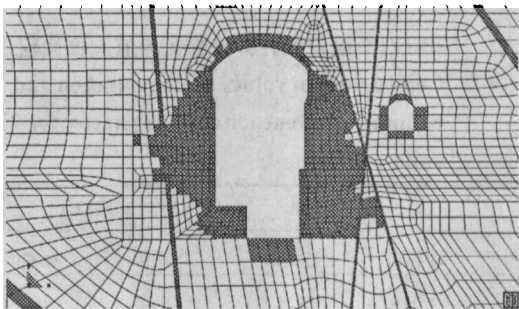


图 7 1#机组剖面塑性区图

Fig.7 Plastic zone for 1# unit profile

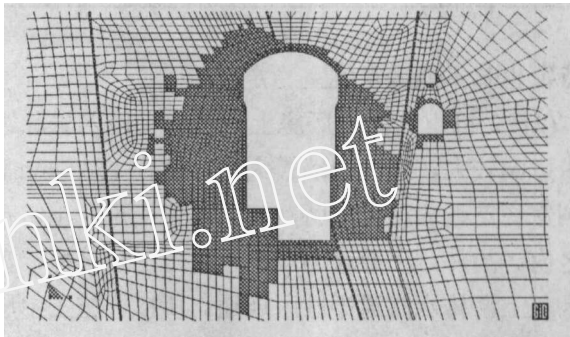


图 8 2#机组剖面塑性区图

Fig.8 Plastic zone for 2# unit profile

2 层开挖结束后的某些监测结果为例进行对比。图 9 为 1#机组剖面编号为 M5-1 的多点位移计的计算值与监测值比较图。从图中可以看出，计算值与监测值在规律上是一致的，量值上也非常接近。表 2 为 2#机组剖面的锚索测力计计算值与监测值比较。同样，两者吻合较好。

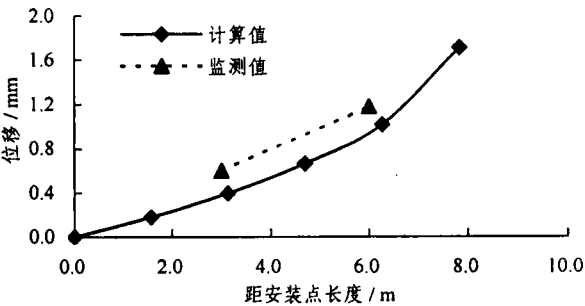


图 9 M5-1 多点位移计计算值与监测值比较

Fig.9 Comparison of values by computation and monitoring of M5-1 multiple-point extensometer

5 结 论

(1) 1#机组剖面开挖完毕后围岩变形不是太大，仅在主厂房与引水管和尾水管的交叉处变形稍大，应注意施工时合理支护。加锚后，其应力场和塑性

表 2 2[#]机组剖面锚索测力计计算值与监测值比较

Table 2 Comparison of values by computation and monitoring of anchor cable ergometer for 2[#] unite profile

锚索测力计编号	开挖层 1		开挖层 2	
	计算值	监测值	计算值	监测值
D [#] 6-1	1 041	921.8	1 044	931.4
D [#] 6-2	1 152	1 143.0	1 188	1 157.3
D [#] 6-3	1 069	1 087.9	1 077	1 014.9
D [#] 6-4	1 269	1 275.1	1 405	1 401.1

kN

区特征也基本能满足洞室稳定性要求。

(2) 2[#]机组剖面主厂房上游边墙受侵入岩脉蚀变带影响较大，上游边墙最大位移达到 112.5 mm，对洞室稳定造成很大威胁，其他部位变形在正常范围之内。另外，上游边墙产生较大范围拉破坏，塑性区与上游排水廊道塑性区连通。所以，施工中应着重监测该部位的变形情况，适时支护。

(3) 计算结果与监测结果吻合较好，说明数值模拟能够比较准确地反映现场情况，对工程实践有

一定的指导意义。

参 考 文 献

1 杨冬梅, 邱祥波, 李术才. 公路隧道风机洞室群三维稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 1): 2 304~2 307

2 寇晓东, 周维垣, 杨若琼等. 应用三维快速拉格朗日法进行三峡船闸高边坡锚固稳定与机理研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(1): 68~73

3 张二海, 陈庆寿, 冉恒谦. 显式拉格朗日差分法在链子崖危岩体锚固工程中的应用[J]. 探矿工程, 1998, (6): 36~38

4 孙豁然, 肖海军, 姜培男等. 露天爆破对主运输平硐的振动影响的模拟分析[J]. 金属矿山, 2003, (2): 9~11

5 张志强, 关宝树. 软弱围岩隧道在高地应力条件下的变形规律研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 696~700

6 Itasca Consulting Group Inc. FLAC^{3D}(Version 2.0) users manual[R]. USA: Itasca Consulting Group Inc., 1997

7 谢和平, 周宏伟, 王金安等. FLAC 在煤矿开采沉降预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 397~401

8 李仲奎, 戴 荣, 姜逸明. FLAC^{3D} 分析中的初始应力场生成及在地下大型洞室群计算中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 387~2 392

9 胡 斌, 张倬元, 黄润秋等. FLAC^{3D} 前处理程序的开发及仿真效果检验[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 387~1 391