

文章编号:1672-3961(2008)02-0077-06

泰安抽水蓄能水电站地下厂房围岩稳定性 数值模拟及监测分析

李景龙, 李术才, 李树忱, 王刚, 孙克国

(山东大学土建与水利学院岩土与结构工程中心, 山东 济南 250061)

摘要:应用快速三维拉格朗日差分法对泰安抽水蓄能水电站地下厂房进行了弹塑性数值模拟,准确的模拟了围岩的动态变化过程,对开挖前后围岩的位移场和应力场以及塑性区进行了比较分析.另外,还对该厂房围岩的变形监测资料进行了研究,得出在开挖和支护过程中围岩的变形特征和支护结构的受力特点;并将现场监测结果和位移计算结果进行比较,结果表明:模拟计算结果和监测结果规律基本一致,采用本计算方法模拟开挖大型地下洞室群具有较强的可行性,对今后的地下大型洞室群的稳定性分析具有参考意义.

关键词:地下工程;围岩变形;监测;数值模拟

中图分类号:TV698 **文献标志码:**A

Numerical simulation and monitoring analysis of the stability of the underground power house of the Tai'an Pumped-Storage Power Station

LI Jing-long, LI Shu-cai, LI Shu-chen, WANG Gang, SUN Ke-guo

(School of Civil & Hydraulic Engineering Geotechnical and Structure Engineering Technique Research Center,
Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The under-ground power house of Tai'an Pumped-Storage Power Station was elastic-plastic numerically simulated using the three-dimensional fast Lagrangian analysis of the Continua method. Then the dynamic process in the wall rock was simulated. The changing law of displacements and stresses of the rock-mass was studied. Many monitoring instruments were installed during construction, and much information was received. Based on the complete observation information of the Tai'an Pumped-Storage Power Station, the deformation data of the wall rock were studied. The conclusion shows that the underground power house is steady in principle. In addition, the displacement between computation and observation of certain points in the rock were compared with each other. The results show that the rules of computation and observation results are approximately consistent with each other. It is feasible that underground power houses can be simulated by this method. It will be a significant reference to other stability analyses of large underground powerhouses.

Key words: underground engineering; wall-rock deformation; observation; numerical simulation

0 引言

随着我国经济的快速发展,若干座大型地下水

电站正在开发和兴建中,地下厂房大多边墙高、跨度大,且在施工中遇到的地质条件较为复杂,因此,这类围岩的稳定性和支护结构的合理性问题是地下工程研究的重点课题.

收稿日期:2007-09-07

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(No.50574053)

作者简介:李景龙(1980-),女,山东德州人,博士研究生,主要从事岩石数值模拟及力学试验研究方面的工作.

E-mail: lijil1980@163.com

泰安抽水蓄能电站的地下洞室空间断面较大,围岩的力学特性、地应力状态复杂;地形地貌、围岩岩性、地质构造、初始地应力、开挖工艺、洞室形态等因素对地下结构本身的稳定性产生明显影响^[1].因此,研究泰安抽水蓄能水电站地下洞室群分步开挖时的围岩变形特征及塑性区、应力分布特征,对该电站安全经济的施工和运行有重要意义.

目前,经常采用的数值模拟分析方法主要基于两种模型:一类是连续介质模型,如 FLAC^{3D}等^[2];另一类是非连续介质模型. FLAC^{3D}是一种基于三维显式有限差分法的数值分析方法,这种算法可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动以及大变形,尤其在材料的弹塑性分析方面,大变形分析以及模拟施工过程等领域有独到的优点^[3].国内外许多学者对地下洞室的开挖进行过数值模拟,并研究了锚杆(索)的锚固作用^[4-5],FLAC 在岩土工程中得到了广泛应用^[6].

本文在充分掌握地质资料的基础上建立起可靠的数值分析模型,结合地下厂房围岩的动态观测数据,把三维快速拉格朗日差分法应用于地下电站主厂房开挖施工的稳定性分析中;同时,为了掌握地下工程施工期和运行期围岩的工作状态,确保工程安全施工和正常运行,在地下洞室围岩中埋设应力和变形监测仪器,对开挖引起的围岩变形和应力状态的变化进行了监测;并将计算结果和动态监测数据相对比,一方面为地下大型空间的施工和运行提供科学依据,另一方面为类似地下工程围岩稳定性分析提供借鉴.许多大型水利枢纽都在地下工程开挖过程中设置了围岩稳定的监测系统,且都在地下工程围岩监测方面做了类似的研究工作^[7-9],如二滩、江垭、天荒坪、小浪底等水利枢纽工程.

1 工程概述

泰安抽水蓄能电站位于山东省泰安市西郊的泰山西南麓,总装机容量为 1000 MW,枢纽由上水库、下水库、输水系统和地下厂房洞室群、地面开关站等建筑物组成.电站该电站的厂房系统由地下主、副厂房及安装场、主变洞、母线洞、电缆出线竖井及地面开关站等组成.地下厂房洞室群所处地带围岩为新鲜的混合花岗岩及少量后期侵入的岩脉,岩石坚硬,较完整,地震波纵波速 V_p 值为 5000 ~ 6000 m/s.厂房区围岩以Ⅲ类为主.厂房区内断层及裂隙较发育,以 NNE ~ NEE 向陡倾角为主,通过厂房区的断层及裂隙密集带中规模较大的为 F₂₅,这条裂隙密集带的

产状为 N65 ~ 70°E SE87°宽度为 0.5 ~ 6.0 m,主要由压碎岩、角砾岩组成.其他的断层规模都较小,且这些陡倾角断层和裂隙大都以较大角度与厂房轴线相交,对厂房围岩的稳定性影响较小.主厂房埋深大约 300 m,开挖尺寸为 141.1 m × 52 m × 25.2 m.厂房平面布置图见图 1.

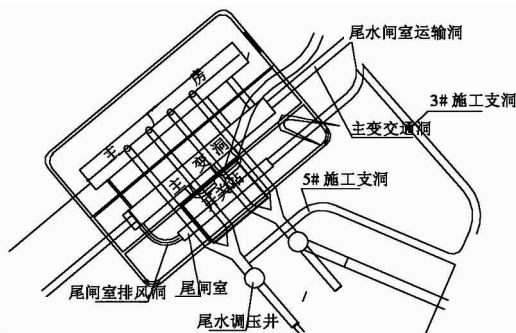


图1 施工现场平面布置图
Fig.1 Plan of in situ construction

2 厂房围岩数值模拟

本文采用现已被应用到岩土工程各个领域的三维快速拉格朗日 (FLAC^{3D}) 软件进行数值模拟^[10-11].

2.1 计算模型

计算模型采用 Mohr-Coulomb 强度准则.选取有地质条件有代表性的 1# 机组剖面进行准三维计算,选取了主厂房、主变室和尾水调压井组成的洞室群,以主厂房为主要研究对象.计算坐标系 X 轴取垂直于厂房边墙方向,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.模型的计算范围分别为: X 轴方向取洞室群的左、右侧均取 3 倍洞径宽度,Y 轴方向底板往下取 3 倍洞高,上至地表,Z 轴向厚度为 10 m.模型内考虑了对主厂房影响较大的 F₂₅ 断层.边界条件为 4 个侧面及底面加法向约束,顶面为自由面.计算模型共有 5842 个单元,10325 个节点.

根据实测的地应力场,埋深小于 50 m 时取自重力场;埋深大于 50 m 时,考虑构造应力,X 向侧压系数取 1.2,Z 向侧压系数取 0.9.本文按实际工程中采用的开挖顺序进行模拟^[12],共分 6 层开挖,每步开挖完后,在顶拱及边墙按施工设计进行锚杆、锚索、喷射混凝土等支护.根据洞室的实际支护系统,计算中采用程序中自带的结构单元模拟锚杆和预应力锚索以及衬砌.

在本模拟过程中未考虑吊车梁及其影响.在计算过程中,弹塑性结构计算稳定后,把前一步计算的节点位移置零,再进行开挖.开挖时,每一步达到稳

定状态后,再进行下一步的计算,各层围岩岩体的物理参数见表1,开挖示意图见图2.

表1 厂房围岩物理参数表
Table 1 The physical parameters of wall rock

位置	岩体类型	饱和容重 /(kN/m ³)	抗压强度 /MPa	弹性模量 /(10 ¹⁰ Pa)	泊松比	凝聚力 /MPa	摩擦系数	渗透系数 /(m/d)
地下厂房	混合花岗岩	26.4	200	1.50	0.23	1.0	1.00	0.04
	裂隙密集带	25.0		0.40	0.30	0.34	0.63	0.4
	闪长岩脉	28.0	130	0.90	0.30	0.80	0.90	
	辉绿岩脉	28.0	110	0.70	0.30	0.68	0.75	

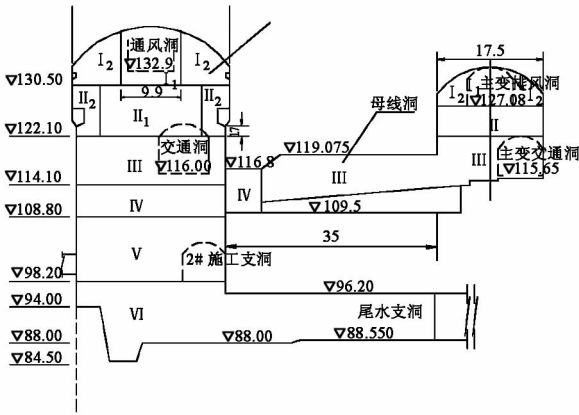


图2 厂房横剖面图

Fig.2 The cutaway view of the power house

2.2 位移场计算结果

洞室开挖之初,洞室周边点将发生偏向洞内的位移.由于洞室高边墙尚未形成,主厂房和主变室的主要变形发生在顶拱及底板处,位移方向指向洞内,顶拱及底板中部的位移较大.随着开挖的进行,各个监测点的位移都呈现增大的趋势.当边墙逐渐形成以后,主要变形由顶拱及底板向边墙转移,顶拱与底板变形逐渐趋于稳定,如图3所示.

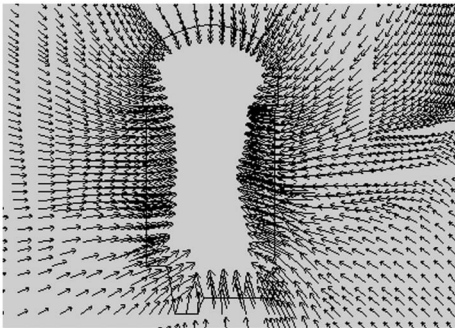


图3 开挖后洞室围岩位移矢量图

Fig.3 Displacement vector after excavation

第五层开挖时,由于洞室交岔口处临空面较多,所以在引水管与边墙交岔口处临空面较大,发生较大变形 16.2 mm;第六层开挖完毕后,下游边墙受尾水管开挖影响,在尾水管与下游边墙交叉处以及母线洞附近也发生较大变形;其中,下游岩壁母线洞上方受断层和高边墙的影响,最大位移达到了

17.5 mm,顶拱累计下沉 6.1 mm.全部开挖结束后,整体来看,围岩发生以回弹变形为主的位移,围岩的变形量比较小,洞室整体上处于稳定状态^[12].开挖初期主要变形发生在顶拱及底板处,随高边墙逐渐形成,主要变形向边墙转移,上游边墙与引水管交岔口、尾水管与下游边墙交岔口处及断层影响带都是发生变形较大的部位.

2.3 塑性区特征

由于开挖造成的洞室高边墙的形成,围岩的塑性区在逐渐扩展.图4为主厂房某剖面开挖支护后洞周围岩塑性区示意图,图中深色的为进入塑性状态的单元.可以发现,洞室的塑性区主要集中在洞周,即顶拱、底板和两侧边墙附近,由于下游边墙受断层的影响,塑性区宽度比上游侧偏大,顶拱和底板处的塑性区较小.上游侧和下游侧的围岩塑性区的最大宽度分别为 14.5 m 和 16.8 m.

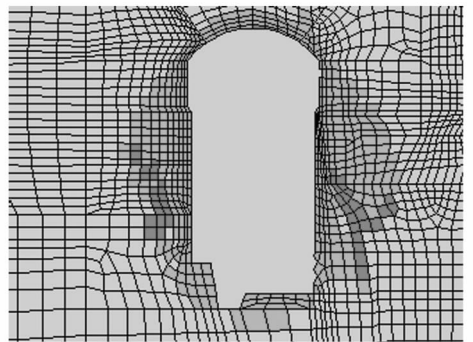


图4 开挖后洞室围岩塑性区分布图

Fig.4 Plastic zone of rock mass after excavation

2.4 应力场特征

由于开挖对围岩产生扰动,使得应力发生二次重分布,洞室周围环向应力增加,径向应力释放.所以在厂房许多部位出现了不同程度的应力集中.图5和图6分别为厂房剖面加锚开挖后围岩最大和最小主应力等值线图.

从图5中可以看出,主厂房剖面的上游边墙中部、下游边墙断层处及机蜗台阶处出现了拉应力集中.全部六层开挖完毕后,围岩的最大拉应力值为 0.75 MPa,出现在机蜗台阶处,另外,下游侧岩壁上

断层处的拉应力也超出了岩体的抗拉强度,造成一定破坏,应当在施工过程中予以重视。

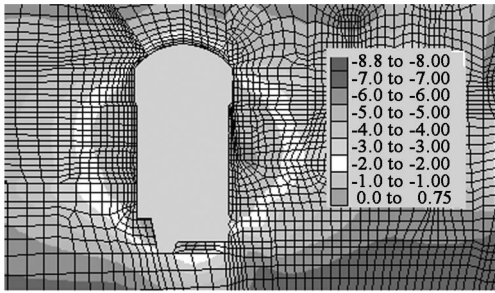


图5 开挖后大主应力等值线图(单位:MPa)

Fig.5 Contour map of maximum principle stresses (unit:MPa)

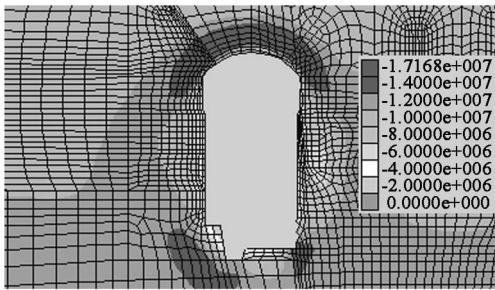


图6 开挖后小主应力等值线图(单位:MPa)

Fig.6 Contour map of Minimum principle stresses after excavation(unit:MPa)

从小主应力等值线图上可以看出,主厂房剖面的顶拱、底板等部位均出现压应力集中,量值在10~12 MPa之间。

3 厂房位移的监测情况

隧道围岩变形量测是判断围岩动态的最主要的量测项目,特别是在垂直岩层内,内空收敛位移量测具有非常重要的意义,其量测设备简单、操作方便,对围岩动态监测的效果也很好。在泰安抽水蓄能水电站地下主厂房的施工过程中,进行了新奥法监控量测指导施工,并及时将量测散点的数据进行处理,将得出的信息反馈于施工,以了解隧道开挖后围岩的稳定情况以便采取相应的支护措施。为测得地下厂房的变形全过程,各层岩体开挖后立即在设计位置埋设多点位移计。多点位移计用于观测岩体内两点之间沿孔轴方向的相对位移,通过计算可以得出各测点的近似绝对变形量。

在主厂房和主变室分别布置了3个系统观测断面,1#母线洞和3#母线洞上方还分别安装了多点位移计。每套多点位移计安装4个测点,埋深分别为:1.5 m、3.5 m、8.5 m和23.5 m。

开挖过程中,厂房顶拱,包括2个拱角,其变形量很小,一般在0.1~0.4 mm左右,因下游侧拱角处

的岩体条件相对较差而变形最大,最大变形为1.5 mm。可见厂房顶拱受开挖影响很小,在掌子面经过时,部分多点位移计读数有明显变化,但变化量值不大,变化过程迅速,时间过程曲线呈阶梯状。受岩体结构面的影响,即断层带或裂隙密集带的影响,某些部位的岩体位移比较大,多点位移计如1#、3#母线洞附近高程为122.8 m的多点位移计M7、M19所测岩体变形较大,最大变形值达到11 mm,这是因为该部位岩体近似于3面临空,且处于 F_{25} 断层破碎带中。由于岩体条件不好,为防止岩体产生破坏,建议采用对穿锚索加固。位于I断面下游洞壁上高程为126.7 m处的多点位移计M7的变形过程曲线见图7。由于吊车梁(126 m高程)以下高边墙的形成,对岩体的位移产生了较大影响。开挖结束后,各多点位移计读数的变化明显减小,岩体内部各点变化都趋于平缓,大多数多点位移计的增加值都在0.3 mm以下,洞室壁下半部位岩体将随时间的推移还会产生一定量的蠕变。通过以后3年的监测数据可以看出,在施工期和运行期,厂房的岩体基本稳定。

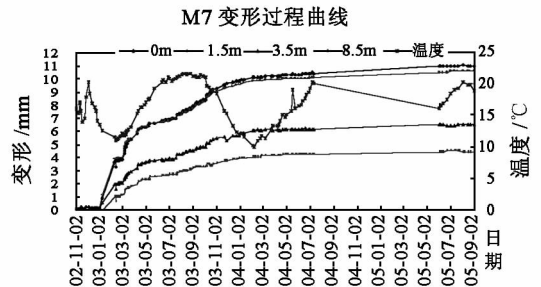


图7 多点位移计M7变形过程曲线

Fig.7 Deformation variation with time in M7

4 部分监测点计算值和监测值的比较分析

采用提供的岩体力学参数,利用FLAC^{3D}进行数值模拟计算,预测下一层开挖的围岩变形,并与下一层开挖的监测结果进行对比,以检验数值模拟过程的准确性。

图8和表2是根据位于厂左7.45 m下游侧高程为122.8 m处多点位移计M30的的监测值和计算值绘出的时间过程曲线。分析时所用变形值为从开始到某一层开挖所发生的累计变形差值。

从图8中可以看出,对于多点位移计M30,从距边墙0,1.5,3.5,8.5 m等处的位移量同步增大的情况分析来看,可能是距边墙23.5 m处的锚固点有相对位移,该点可能位于母线洞顶拱的岩石松动圈内。从图8和表2的对比中可知,利用FLAC^{3D}进行数值

模拟所得的各点的累计变形值的变化趋势与监测值基本吻合,各测点变形的计算值和监测值的差值在1.5 mm以内.这说明应用FLAC对厂房围岩进行的模拟计算过程是正确的,对围岩变形进行数值模拟分析计算是十分必要的.

表2 多点位移计M30的监测值与计算值对比表(mm)

Table 2 The comparison of observation and computation data of M30(mm)

测点埋深	1.5 m	3.5 m	8.5 m
监测值			
第四步开挖后	3.1	3.18	2.73
第五步开挖后	4.09	4.17	3.72
第六步开挖后	5.26	5.09	4.8
计算值			
第四步开挖后	2.31	2.01	1.24
第五步开挖后	3.70	3.16	2.51
第六步开挖后	5.18	5.06	4.29

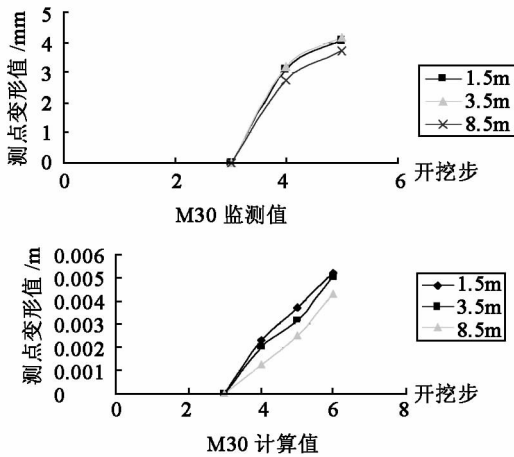


图8 多点位移计M30的监测和计算得到的过程曲线
Fig.8 The deformation curve of observing and computing

5 结论

(1) 泰安抽水蓄能水电站地下厂房处于新鲜坚硬岩体中,围岩完整性好,结构面多与厂房洞室轴线交角较大,对厂房稳定性影响较小.

(2) 洞室开挖后,围岩产生指向临空面的回弹变形.开始时主要变形发生在顶拱与底板,以后随着开挖的进行,最大位移向边墙转移,且位移值逐渐增大,最终形成以高边墙变形为主的位移场.顶拱与底板的变形以竖向位移为主,边墙变形以水平位移为主,洞室基本处于稳定状态.

(3) 围岩的大小主应力和塑性区分布合理,洞室开挖未对围岩稳定造成太大影响.所埋设锚杆应力计受力合理,读数最初变化很大,逐渐趋于稳定.在局部地质条件差的部位随岩体的开挖增长比较显著,建议岩体开挖后,及时进行喷锚支护,从而控制

岩体的变形发展和裂隙的发展.

(4) 计算结果和实际监测结果基本吻合,说明数值模拟计算的正确性.对于泰安抽水蓄能水电站大型地下洞室群的围岩变形情况进行数值模拟计算是十分必要的.

参考文献:

[1] 王阳雪,吴奎,郝容国,琅琊山抽水蓄能电站地下厂房洞室支护研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(增2):5042-5045.
WANG Xue-yang, WU Kui, HAO Rong-guo. Reserch on rock support for underground power-house cavern of Langyashan pumped-storage power station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(supp2):5042-5045.

[2] 张玉军,朱维申.三峡工程船闸高边坡锚固方案的平面有限元计算[J].岩土力学,1997,19(1):70-74.
ZHANG Yu-jun, ZHU Wei-shen. Plane finite computation about the high slope cable in Sanxia construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1):70-74.

[3] 王克忠,张文雷,蔡美峰等,地下电站厂房层状围岩位移的动态效应研究[J].水力发电学报,2002,24(4):99-103.
WANG Ke-zhong, ZHANG Wen-lei, CAI Mei-feng. Research on dynamic displacement of layer composite rock-mass [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002, 24(4):99-103.

[4] 顾金才,沈俊,陈安敏,等.锚索预应力在岩体内引起的应变状态模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,19(增):917-921.
GU Jin-cai, SHEN Jun, CHEN An-min, et al. Model testing study of strain distribution regularity in rock mass caused by prestressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 19(supp):917-921.

[5] 陈卫忠,李术才,朱维申.急倾斜层状岩体中巨型地下洞室群开挖施工理论与优化研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3281-3287.
CHEN Wei-zhong, LI Shu-cai, ZHU Wei-shen. Excation and optimization theory for giant underground caverns constructed in high dipping laminar strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19):3281-3287.

[6] 谢和平,周宏伟,王金安.FLAC在煤矿开采沉陷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.
XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, WANG Jin-an. Application of FLAC to predict ground surface displacements due to coal extraction and its comparative analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4):397-401.

[7] 王朝晴,杨定华.安全监测在江垭地下厂房施工中的作用[J].人民长江,2000,31(4):397-401.
WANG Chao-qing, YANG Ding-hua, The use of safe monitor

- in the construction of underground power-house[J]. Yangtze River, 2000, 31(4):397-401.
- [8] 张兴武,徐小武. 地下洞室安全监控分析模型探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(增2):2370-2374.
ZHANG Xing-wu, XU Xiao-wu. Study on analytic models of safety monitoring in underground caves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(supp 2):2370-2374.
- [9] 史红光. 二滩水电站地下厂房围岩稳定性因素评价[J]. 水电站设计,1999,15(2):75-78.
SHI Hong-guang. Access on the wall rock stability of the Er-tan under-ground power house[J]. Storage design, 1999, 15(2):75-78.
- [10] 李中奎,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,2006,21(增2):2387-2392.
- LI Zhong-kui, DAI Rong, JIANG Yi-ming. Improvement of the generation of the initial stress field by using FLAC3D and application in a huge underground cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 21(supp 2):2387-2392.
- [11] QUINTEIRO C R. Numerical modeling of time-dependent ground behavior around a deep mine in preparation for layout design[J]. DAFB53/07, 1993: 3740-3743.
- [12] 朱维申,李晓静,郭彦双. 地下大型洞室群稳定性的系统性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,23(10)1689-1693.
ZHU Wei-shen, LI Xiao-jing, GUO Yan-shuang. Systematical study on stability of large underground houses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 23(10): 1689-1693.

(编辑:孙广增)