

施工期大型地下洞室群快速反馈分析方法及应用

王 刚^{1,2}, 黄 娜², 吴学震², 刘传正¹, 袁 康²

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘 要:基于工程地质构造特征和监控测量数据,选用弹塑性有限差分计算方法进行正计算,采用区间分析优化和正交试验设计方法,建立了区间正交反馈分析优化模型和技术路线。在工程实践中,通过针对性的实验方案设计和正演计算分析,取得最优模型参数值,应用最优参数通过正演计算对后续工程问题进行预演分析。针对后续施工过程中可能存在的问题,提前采取适当的施工方法和加固措施。通过对某大型地下水电站洞室群施工过程的仿真模拟和反馈分析,验证该方法的可行性和优越性,同时对工程建设过程中的稳定性问题进行了定量和定性分析,以优化设计和施工方案。

关键词:信息化施工;正交试验设计;施工过程;地下洞室

中图分类号:O241

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2013)04-0021-08

Rapid Feedback Analysis Method and Its Application for Underground Caverns During Construction

Wang Gang^{1,2}, Huang Na², Wu Xuezheng², Liu Chuangzheng¹, Yuan Kang²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. State Key Laboratory Breeding Base of Mining Disaster Prevention and Control,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based on the geological structure features and monitoring data in the actual project, elastoplastic finite-difference calculation method was selected for the direct approach. New feedback analysis optimization model and technology roadmap for huge underground caverns were established by using interval analysis optimization and orthogonal design method. In engineering practice, optimal model parameters obtained by pointed design of the program and properly direct approach analysis will be used for predictive analysis in the following projects. Then the problems that may exist in the following construction process will be forecast so that appropriate construction methods and reinforcement measures will be taken in advance. In this paper, simulation and feedback analysis of the construction process in a large underground hydropower caverns were carried out to verify the feasibility and advantages of the method. In addition, the stability problems in the construction process were also discussed quantitatively and qualitatively in order to optimize the design and construction methods.

Key words: informative construction; orthogonal experimental design; construction process; underground caverns

在地下工程安全评价中,岩土工程工作者面临的主要困难就是如何通过可靠的途径估计所采用本构模

收稿日期:2013-04-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51279097,51009086);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2010HZ015);山东省高等学校科技计划项目(J111LE03,J10LE08)

作者简介:王 刚(1976—),男,副教授,博士,主要从事岩石力学与工程方面的科研与教学工作。

E-mail:wanggang1110@gmail.com

型的地质参数^[1-2]。由于岩体工程的复杂性,按理论方法或实测途径均难以确定岩石的基本参数,特别是能反映较大范围工程结构平均效应的岩体变形参数^[3]。为了解决上述问题,在施工期间采用反馈分析方法,即通过现场测量数据反算获得需要输入的材料参数等数据^[4-6]。由于围岩位移是工程易测的一个物理量,在反分析技术中常以围岩位移作为反分析拟合的基准量。地下工程反分析方法的实质就是根据测量得到的位移数据,演绎洞室围岩在工程建设过程中的应力和变形参数。现有的各种反分析方法大致分两类,即逆解法^[7-9]和正解法^[10-12]。在逆解法中,对控制方程求逆,然后将监测到的数据作为输入量,材料性质作为输出量。这种方法尽管比较高效,但对于复杂问题,在推导反演方程时会遇到诸多困难。正解法不需推导反演方程,可以方便地进行各种复杂问题的力学反演,如材料非线性、节理断层岩体等。在过去的研究中,由于其灵活性,正解法应用较多。然而,正解法在迭代过程会耗费大量时间,而且无法保证收敛于全局最小值^[13-14]。因此,如何快速使正分析计算结果与实测值有最大程度的拟合成为一个重要课题。

本文基于大型地下水电洞室群开挖过程的特点,提出适用于地下工程施工的快速反分析方法及技术路线,并以某水电站地下洞室施工为例,进行了地质参数反馈分析的实践研究。

1 施工过程反分析技术路线

基于区间正交试验设计的反分析直接法^[15-16]区别于逆算法,其分析过程分为两大部分:①根据工程地质条件确定力学模型,进行正交试验参数设计,根据设计参数{p},进行正算;②将实测位移值与正算成果中的对应位移值进行比较,选择适当目标函数作为判定最优参数方案的标准。在地下工程直接法反分析中,可采用均方差函数作为目标函数,即

$$\varphi(p) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - u_i^*)^2 \quad (1)$$

其中:N为实测位移值总数; μ_i^* 为第i个实测位移, μ_i 为与之对应的由计算得到的位移。一般说来, μ_i 为待定参数{p}的非常复杂的非线性函数,因此一般采用数值方法来求出 μ_i 。基于目标函数,采用正交试验及优化回归方法寻求 $\varphi(p)$ 的最小值,则所对应的待定参数{p}即为最优参数。具体反馈分析全过程技术路线如图1所示。

2 工程概况

某水电站位于四川西部大渡河流域,是大渡河干流近期开发的大型水电工程之一。地下厂房布置在左岸I-III线,由主厂房、主变室、尾水调压室三大地下洞室及母线洞、尾水连接洞等组成。三大洞室平行布置,垂直埋深390~520 m,水平埋深310~530 m。地下厂房区地层岩性主要为灰白色、微红色中粒黑云二长花岗岩,局部出露辉绿岩脉,主要有 $\beta 80, \beta 81, \beta 163, \beta 164$ 等。现场测试结果表明:坝区应力场是构造应力和自重应力叠加的应力场,而构造应力是坝区特

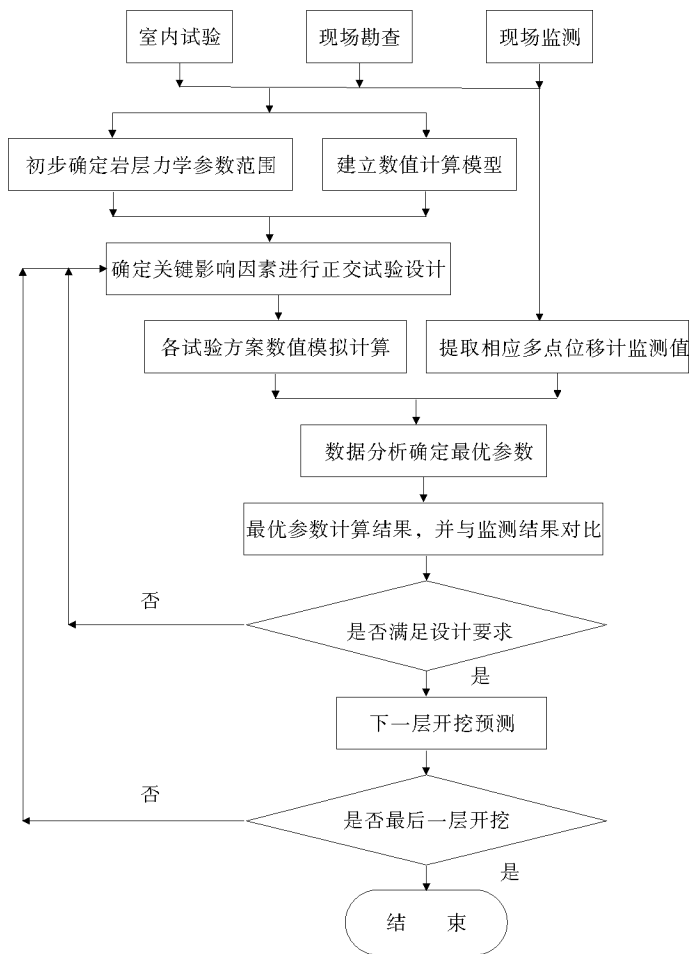


图 1 施工过程反馈分析技术路线图

Fig. 1 Technology roadmap for the feedback analysis in construction process

别是左岸应力场的主要组成部分。地形的强烈切割使最大主应力(σ_1)方向受地形影响明显,发生偏转,大致与左岸 NE 向山脊一致。地下厂房洞室采用钻爆法开挖施工,应用喷锚支护加固洞室围岩。

3 数值计算模型及模拟方法

3.1 数值计算模型

水电站地下厂房是一个非常复杂的地下洞室群结构,根据实际地形特征,地层分布,以及现场施工开挖方案,建立三维数值计算网格模型。计算模型涉及地下厂房主要洞群,并对洞群范围内较大岩脉进行实际模拟。选择厂横方向(即水流方向)为 X 轴,竖直方向为 Y 轴,厂纵方向为 Z 轴。厂横(X 轴)0+0.0 m、高程(Y 轴)0.0 m,厂纵(Z 轴)0+0.0 m 为原点。其计算范围为 $-302.9 \leq X \leq 450.0$; $700.0 \leq Y \leq$ 地表; $-300.0 \leq Z \leq 500.0$,三维模型共有 37 970 节点,201 189 个单元,如图 2 所示。洞室开挖步骤如图 3 所示。

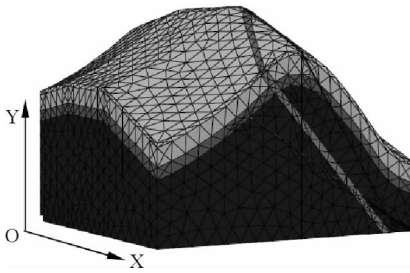


图 2 三维模型剖分图

Fig. 2 Meshed 3D numerical model

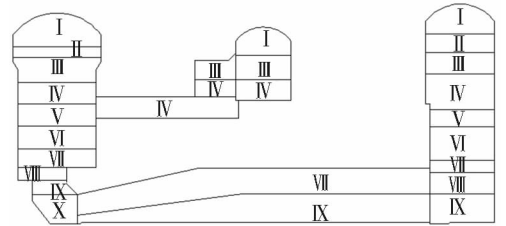


图 3 地下洞室开挖步骤图

Fig. 3 Sketch of underground cavern excavation stages

基于三维计算模型,对地下厂房三大洞室开挖过程进行反馈预测分析,限于篇幅,仅对主厂房第 V 层和尾调室第 VII 层预测分析进行计算,洞室围岩内多点位移计安装分布形式如图 4 所示。

3.2 数值仿真计算模拟方法

基于三维数值仿真模型网格,应用显式有限差分数值程序 FLAC^{3D} 模拟洞室开挖过程,采用弹塑性摩尔-库伦模型定义工程区域岩体材料性质,进行开挖过程的快速反馈分析。洞室周围表面混凝土喷层采用 Shell 单元模拟。锚杆和预应力锚索的模拟通过提高加固区域围岩参数模拟加固效果。

模型实验与理论研究表明,锚杆的支护作用主要有两个方面:一是通过受拉约束围岩变形,提高岩体的变形刚度;二是提高加锚区岩体的抗剪强度。预应力锚索的作用同样是通过锚索与围岩的联合作用来提高加固围岩的变形刚度及加固区域岩体的抗剪强度。根据朱维申等^[17]提出的经验公式,锚杆锚固区岩体的粘聚力及内摩擦角分别为:

$$c_n = c_0 + \eta \frac{\tau S}{ab}; \varphi_n = \varphi_0. \quad (2)$$

其中: $c_0, \varphi_0, c_n, \varphi_n$ 分别为原岩体及锚固岩体的粘聚力和内摩擦角; τ, S 分别为锚杆材料的抗剪强度及横截面积; a, b 为锚杆的纵、横向间距; η 为综合经验系数,一般可取 2~5。

4 正交试验设计及岩体力学参数反分析

在进行正演法反分析之前,对每个待分析参数进行适当的分析取舍。根据前期施工过程分析,结合地质

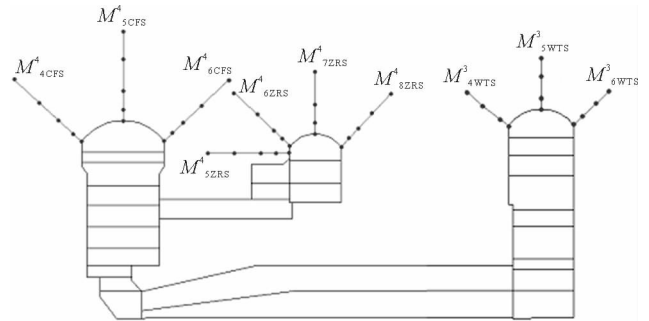


图 4 机组剖面洞室上部多点位移计布置图

Fig. 4 Sketch of multi-point displacement meter at upper side of the caverns

勘察和力学试验等方法确定每个待分析参数的取值范围,以减轻反分析的工作量和降低分析难度。本次反演计算中,反演参数取 II 类岩体变形模量 E_2 , III 类岩体变形模量 E_3 和 II 类岩体粘聚力 c 。应用正交试验设计方法进行 3 因素 3 水平的试验设计(表 1)。根据试验结果,其他力学参数如表 2 所示。

表 1 正交试验设计方案表
Tab. 1 Orthogonal experimental design scheme

序号	II 类岩体变形模量 E_2 /GPa	III 类岩体变形模量 E_3 /GPa	II 类岩体粘聚力 C_2 /MPa
1	20.0(1)	5.0(1)	1.7(1)
2	20.0(1)	7.0(2)	1.9(2)
3	20.0(1)	8.0(3)	2.0(3)
4	22.0(2)	5.0(1)	1.9(2)
5	22.0(2)	7.0(2)	2.0(3)
6	22.0(2)	8.0(3)	1.7(1)
7	23.0(3)	5.0(1)	2.0(3)
8	23.0(3)	7.0(2)	1.7(1)
9	23.0(3)	8.0(3)	1.9(2)

表 2 岩体基本物理力学参数表
Tab. 2 Physical and mechanical parameters of rock mass

	容重/(kN/m ³)	变形模量 E /GPa	粘聚力 c /MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
II 类	26.5	反演参数	反演参数	52.70	0.250
III 类	26.2	反演参数	0.950	45.60	0.285
IV 类	25.8	1.25	0.700	38.66	0.350
V 类	24.5	0.25	0.175	21.80	0.350

4.1 计算值和监测值对比分析

基于地下厂房洞室三维网格模型,分别输入各试验方案的力学参数进行三维弹塑性正计算,并提取数值计算结果,与相应监测值进行对比分析。为提高数据分析的效率,取多点位移计的临近开挖面监测点的监测值作为基本数据,构造目标函数。对于后续埋设的多点位移计,为减小安装误差和过程误差,反演分析中采用开挖位移增量来进行方差计算。各计算方案的计算位移值和监测位移值的对比见表 3(限于篇幅,仅对部分多点位移计的监测数据进行分析)。结合目标函数,根据正交试验数据计算各方案中影响因素的效应值如图 5 所示,经分析可知, E_2 取 20 MPa, E_3 取 7 MPa, c_2 取 1.9 MPa 为最优参数组合。

4.2 反演参数计算分析

基于反演参数进行正计算,取洞室围岩内代表性多点位移计的相对监测值与对应数值结果进行对比(限于篇幅仅给出部分对比图),如图 5—图 7 所示。

由图表数据分析可知:本次反演应用相对位移增量值作为反演基本量,在很大程度上抵消和消除了施工和变形测量过程中的随机误差和系统误差,取得了比较好的反演效果。

4.3 关键部位稳定性预测分析

输入反演参数进行洞室开挖过程的稳定性计算,分析地下洞室后续开挖过程中的围岩稳定性。针对主厂房第 V 层开挖和尾调室第 VI 层开挖进行三维预测,特选地质状况较为复杂的 4[#] 机组部位进行分析,以优化施工和支护。

表 3 主厂房各计算方案位移计算值和监测值比较表

Tab. 3 Comparison between the observed measurements and computed values for different program mm

编号	监测点	监测值	数值模拟计算值								
			方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8	方案 9
M4-4CFS	孔口	0.65	1.281	0.873	0.771	0.985	1.879	1.989	1.487	1.150	1.304
	4.0 m	0.58	0.674	0.498	0.379	0.874	1.004	0.897	0.987	0.879	0.971
M4-5CFS	孔口	1.23	1.874	1.487	1.408	1.687	1.407	1.508	1.592	1.498	1.312
	4.0 m	1.03	1.598	1.101	1.214	1.258	1.223	1.187	1.168	1.206	1.372
M4-5ZBS	孔口	5.07	4.236	4.248	4.232	4.301	4.301	4.302	4.314	4.313	4.318
	4.0 m	6.26	5.504	5.518	5.498	5.549	5.553	5.552	5.548	5.551	5.560
M4-6ZBS	孔口	2.51	1.881	2.054	1.780	2.002	1.762	1.773	1.930	1.837	1.758
	4.0 m	1.95	1.816	1.808	1.732	1.911	1.695	1.717	1.845	1.769	1.704
M3-6WTS	孔口	0.40	0.497	0.376	0.329	0.456	0.317	0.312	0.362	0.351	0.301
	4.0 m	0.15	0.296	0.175	0.152	0.255	0.206	0.108	0.201	0.154	0.140

4.3.1 位移分析

洞室开挖后,洞室较大位移主要集中在主厂房、主变室和尾调室的拱顶部位,软弱岩脉出露部位位移也较大,上游边墙和下游边墙部位位移较小,如图 8 所示。主厂房拱顶位移 1.2~2.2 cm,底板位移 0.8~1.4 cm,上下游边墙位移 0.17~0.48 cm;主变室拱顶位移 0.75~1.12 cm,底板位移 0.7~1 cm,上游边墙位移 0.65~0.92 cm,下游边墙位移 0.3~0.7 cm;尾水调压室拱顶和底板位移底板位移 0.9~1.4 cm,上下游边墙位移 0.35~0.75 cm。V 类岩脉 $\beta 80$ 穿过主厂房上部,因此主厂房拱顶位移较大。

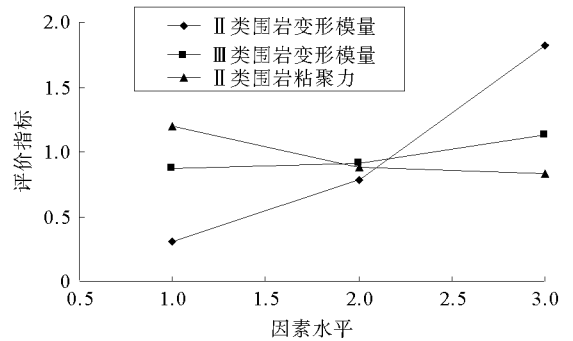


图 5 参数变化对结果的影响图

Fig. 5 Influence of various parameters on the results

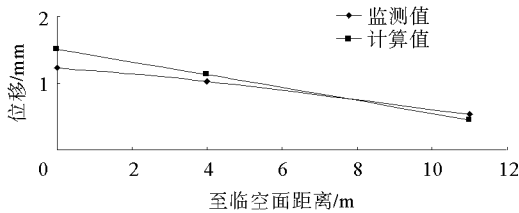


图 6 多点位移计 M4-5CFS 监测值与计算值比较图

Fig. 6 Comparison between the observed measurements by extensometer M4-5CFS and the computed values

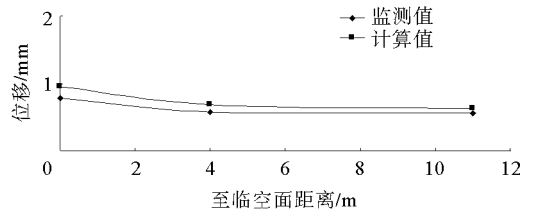


图 7 多点位移计 M4-7ZBS 监测值与计算值比较图

Fig. 7 Comparison between the observed measurements by extensometer M4-7ZBS and the computed values

4.3.2 应力分析

地下洞室开挖后洞周径向应力释放,切向应力增加,围岩内出现一定的应力集中区,如图 9 所示。开挖后,上、下游边墙部位出现一定的应力集中,主厂房上游边墙部位 σ_1 约为 10~13.2 MPa,下游边墙部位 σ_1 约为 13~16 MPa;主变室上下游边墙部位 σ_1 约为 14~16.5 MPa;尾水调压室上下游边墙部位 σ_1 约为 14~16.8 MPa。

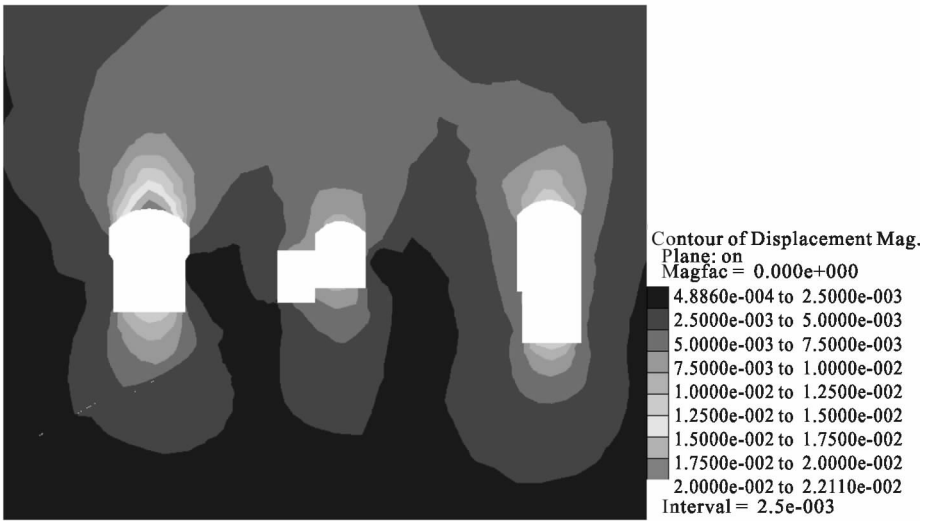


图 8 洞室围岩位移云图

Fig. 8 Displacement distribution of surrounding rock

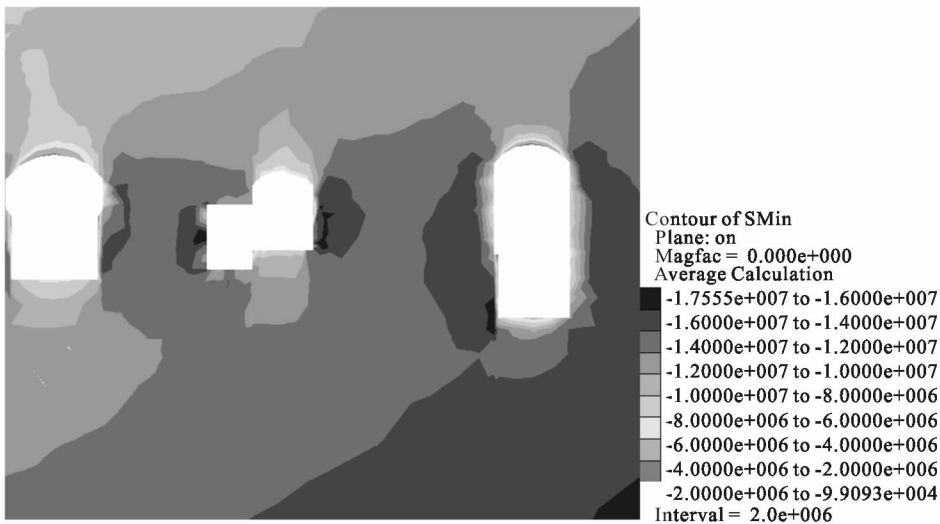


图 9 最小主应力云图

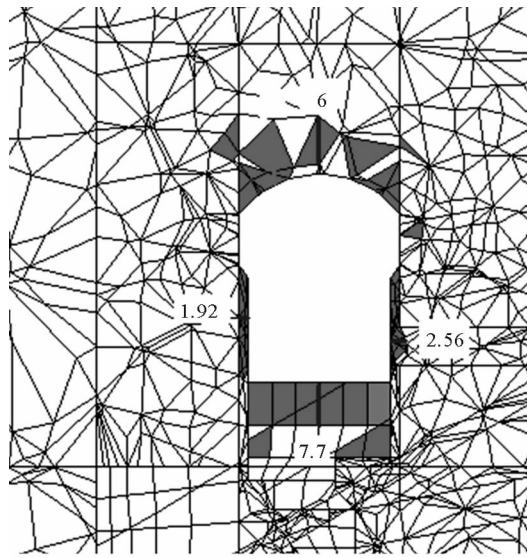
Fig. 9 Minimum principal stress distribution of caverns

4.3.3 破坏分析

地下洞室开挖卸荷使洞室开挖围岩内出现破损,洞周破损区主要为压剪屈服,如图 10 所示。开挖后主厂房洞周塑性区分布厚度:拱顶 6 m,上游边墙 1.92 m,下游边墙 2.56 m,底板部位 7.7 m;主变室洞周塑性区分布厚度:拱顶 3.1 m,上游边墙 5 m,下游边墙 3.27 m,底板部位 5.4 m;尾水调压室洞周塑性区分布厚度:拱顶 4.9 m,上游边墙个别部位最大 8.7 m,下游边墙个别部位最大 10.7 m,底板部位 7.3 m。

5 结论

由于工程监测手段的限制,地下工程施工中工程围岩状态变化不能精确监控。本研究应用三维数值仿真和正交试验方法,结合监控测量手段,综合分析水电站地下洞室施工过程中的结构稳定性问题,反演围岩力学性质参数,进行信息化施工。结论如下:



单位: mm

图 10 主厂房第 V 层开挖塑性区分布图

Fig. 10 Rock plastic distribution zone of five storey of the main plant

1)应用相对位移增量值作为反演基本量,在很大程度上抵消或消除了施工和变形测量过程中的随机误差和系统误差,取得了比较好的反演效果;反演计算位移值和监测位移值变化趋势基本一致,位移反演误差除个别点外,大部分处于工程允许的误差范围之内。

2)采用反演获得的力学参数,对主厂房第 V 层和尾调室第 VII 层开挖的模拟计算结果表明:由于应力释放,开挖后洞周位移朝向开挖临空面,其中拱顶下沉,底板上抬,较大的变形主要集中在主厂房、主变室和尾调室的拱顶部位和软弱岩脉出露部位,上游边墙和下游边墙部位位移较小;主厂房、主变室和尾调室顶拱部位分布有较大范围的 III 类岩体,是形成洞周塑性区的主要原因,开挖后洞周塑性区主要为压剪屈服。

3)大部分测点的反演计算位移值大于实际监测位移值,这主要是因为多点位移计在洞室开挖后埋设,导致洞室开挖后的瞬时弹性变形无法测到,因此实际监测位移值往往小于反演计算值。

参考文献:

[1]孙钧,黄伟. 岩石力学参数弹塑性反演问题的优化方法[J]. 岩石力学与工程学报,1992,11(3):221-229.
Sun Jun, Huang Wei. The optimization method for elastoplastic parameter back analysis in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(3): 221-229.

[2]Swoboda G, Ichikawa Y, Dong Q. Back analysis of large geotechnical models[J]. International Journal for Numerical and Analysis Methods in Geomechanics, 1999, 23(12): 1455-1472.

[3]齐俊修,王连捷,刘凤成,等. 某电站模型洞围岩位移反分析及预测研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(8):1205-1210.
Qi Junxiu, Wang Lianjie, Liu Fengcheng, et al. Back analysis and prediction for displacement of surrounding rock around model tunnel of a power station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1205-1210.

[4]朱合华,刘学增. 软土深基坑黏弹性动态增量反演分析与变形预测[J]. 岩土力学,2000,21(4):381-384.
Zhu Hehua, Liu Xuezeng. Viscoelastic dynamic incremental back analysis in soft soil pit foundation and deformation forecasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 381-384.

[5]邓建辉,葛修润. 三峡工程永久船闸边坡位移反分析回顾[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(17):2902-2906.
Deng Jianhui, Ge Xiurun. Review on displacement back analysis for permanent shiplock slope of Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2902-2906.

[6]刘学增,周敏. 弹塑性动态增量反分析及其在高边坡中的应用[J]. 岩土工程学报,2010,23(6):982-986.
Liu Xuezeng, Zhou Min. Elastoplastic staged incremental back analysis and its application to high slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 23(6): 982-986.

- [7] Sakurai S, Takeuchi K. Back analysis of measured displacements of tunnels[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1983, 16: 173-180.
- [8] 高伟, 郑颖人. 基于遗传算法的岩土本构模型辨识[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(1): 9-12.
Gao Wei, Zheng Yingren. Identification of the geomaterial constitutive model based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(1): 9-12.
- [9] Giorda G, Maier G. Direct search solution of an inverse problem in elastoplasticity; identification of cohesion, friction angle and in situ stress by pressure tunnel tests[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1980, 15: 1823-1848.
- [10] Ledesma A, Gens A, Alonso E. Parameter and variance estimation in geotechnical backanalysis using prior information[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1996, 20(2): 119-141.
- [11] Oreste P. Back-analysis techniques for the improvement of the understanding of rock in underground constructions[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(1): 7-21.
- [12] 姚显春, 李宁, 陈莉静, 等. 拉西瓦水电站地下厂房洞室群分层开挖过程仿真反演分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增 1): 3052-3059.
Yao Xianchun, Li Ning, Chen Lijing, et al. Back analysis of surrounding rock stability based on excavation process of underground powerhouse at Lawaxi hydropower station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S1): 3052-3059.
- [13] Miranda T, Dias D, Eclaircy-Caudron S, et al. Back analysis of geomechanical parameters by optimisation of a 3D model of an underground structure[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(6): 659-673.
- [14] Mattsson H, Klisinski M, Axelsson K. Optimization routine for identification of model parameters in soil plasticity[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2001, 25(5): 435-472.
- [15] 王刚, 蒋宇静, 李术才. 大型地下洞室群施工期快速反馈分析实用方法[J]. *山东大学学报: 工学版*, 2011, 41(8): 133-136.
Wang Gang, Jiang Yujing, Li Shucai. Rapid feedback analysis method for underground caverns during construction[J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science*, 2011, 41(8): 133-136.
- [16] 刘世君, 徐卫亚, 王红春. 不确定性岩石力学参数的区间反分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(6): 885-888.
Liu Shijun, Xu Weiya, Wang Hongchun. Interval back analysis on uncertain parameters in rock mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(6): 885-888.
- [17] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机理和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1-22.

(责任编辑: 吕海亮)