

水电站地下厂房洞室群施工期围岩变形特征与稳定性

王辉^{1,2}, 陈卫忠^{2,3}, 郑朋强¹, 文志杰¹, 李楠¹, 王清标¹

- (1. 山东科技大学 资源与土木工程系, 山东 泰安, 271019;
2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南, 250061
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430071)

摘要: 根据施工过程中岩层揭露情况, 结合围岩变形监测数据, 分析围岩变形状况。根据施工期岩层探测结果, 建立地下厂房洞室群大型有限元模型, 利用变形监测数据, 对地下厂房洞室群的围岩力学参数进行反演分析; 结合数值仿真结果, 分析围岩变形规律。研究表明: 主厂房第一层开挖穿越 I₁, I₂ 和 IV 类围岩, 围岩变形受岩层性质影响较明显, 在 IV 类围岩穿越的副厂房位置, 围岩变形较大; 厂横 0+153.81 断面的变形明显比其他断面的大, 在后续开挖过程中应加强对 IV 类围岩变形的监控量测。

关键词: 地下厂房洞室群; 变形特征; 稳定性

中图分类号: TU923

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)04-1096-08

Deformation characteristics and stability of surrounding rock of underground powerhouse group of hydropower station during construction

WANG Hui^{1,2}, CHEN Weizhong^{2,3}, ZHENG Pengqiang¹, WEN Zhijie¹, LI Nan¹, WANG Qingbiao¹

- (1. Department of Resources and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China;
2. Research Center of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: According to the situation of strata exposed during the construction process, combined with the deformation monitoring of surrounding rock, the deformation condition was analysed. According to the detection results of rock mass during construction, the finite element model of large underground powerhouse cavern group was established. Using the deformation monitoring data, the mechanical parameters of surrounding rock of underground powerhouse cavern group was obtained by inversion analysis. Combined with the results of numerical simulation, the deformation law of surrounding rock was analyzed. The results show that the excavation of the first layer in the main powerhouse passes through the surrounding rock whose type is I₁, I₂ and IV. Deformation of surrounding rock is influenced more obviously by rock properties. In the location of auxiliary powerhouse which passes through surrounding rock of type IV, the deformation of surrounding rock is larger. The deformation of the No. 0+153.81 section of the main powerhouse is larger than the others and the monitoring measurement should be strengthened in surrounding rock of type IV in the subsequent excavation process.

Key words: underground caverns; deformation characteristics; stability

收稿日期: 2016-04-07; 修回日期: 2016-06-03

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51409154); 山东科技大学杰出青年科技人才支持计划项目(2015JQJH106, 2014JQJH105); 山东科技大学科研创新团队支持计划(2014TDJH103); 山东省高等学校科技计划项目(J16LG03)(Project (51409154) supported by the National Natural Science Foundation of China; Projects (2015JQJH106, 2014JQJH105) supported by the Research Fund of Shandong University of Science and Technology for the Outstanding Young Scientists; Project (2014TDJH103) supported by the Research Fund of Shandong University of Science and Technology for the Scientific Research Innovation Team; Project (J16LG03) supported by the Higher Educational Science and Technology Program of Shandong Province)

通信作者: 文志杰, 博士, 副教授, 从事矿山动力灾害预控研究; E-mail: sdust0532@gmail.com

水电资源作为清洁、可再生能源,对于改善我国能源结构、促进可持续发展具有重要的社会效益,必将成为我国今后开发的重点^[1]。据统计,我国蕴藏的水电容量居世界首位,开发潜力巨大,其中大多集中在西南地区的高山深谷中^[2]。由于地形地质条件等因素的限制,在这些区域建设水电站往往采用地下厂房的形式。由于高山深谷区域地应力等地质条件复杂,岩体经开挖后在应力重分布过程中容易产生围岩变形,对工程的安全稳定产生重要影响^[3-4]。为分析洞室开挖对围岩稳定性的影响规律,国内外研究者采用现场监测、数值模拟等方法开展了深入细致的研究。李志鹏等^[5]采用现场监测等方法,对施工期水电站地下厂房围岩的变形破坏特征进行描述和分析;彭琦等^[6]以洞室开挖过程变形监测数据为基础,结合地质和施工资料,对地下厂房的围岩变形特征及其机制进行分析,重点研究结构面和临近洞室开挖对围岩稳定性的影响规律;魏进兵等^[7]结合地质、监测、物探及施工资料,对锦屏一级水电站地下厂房施工期围岩的变形与破坏特征进行分析,研究洞室群(主厂房、主变室、母线洞等)开挖过程的相互影响规律;田泽润等^[8]根据白山抽水蓄能泵站地下厂房开挖过程中的变形观测数据,对地下厂房围岩的开挖变形进行了数值模拟;姚强等^[9]结合弹塑性有限元方法和围岩变形监测资料,分析了瀑布沟水电站地下厂房洞室群围岩的变形特征及稳定性,发现围岩变形受施工程序和地质条件的影响较大;高春玉等^[10]对官地水电站地下厂房洞室群施工期围岩位移特征进行了分析,研究结构面对位移的影响规律;聂卫平等^[11]建立向家坝水电站三维有限元模型进行数值计算,以洞室变形和点抗滑安全系数为指标,针对地下厂房围岩的特殊性进行稳定性研究。由于水电站地下厂房工程量大、开挖周期长,因此,开展施工过程中围岩变形分析及控制对于确保工程的顺利施工意义重大。本文作者在以上研究成果的基础上,结合猴子岩水电站地下厂房工程建设,根据施工过程岩层揭露情况,结合围岩变形监测数据,分析围岩变形规律;根据施工期岩层探测结果,建立能反映岩层分布的地下厂房洞室群大型有限元模型,利用变形监测数据,反演围岩力学参数,为下一步施工提供理论参考。

1 工程概况

猴子岩水电站位于四川省甘孜藏族自治州康定县境内,是大渡河干流水电规划调整推荐22级开发方案

的第9个梯级电站。坝址控制流域面积54 036 km²,平均流量774 m³/s。猴子岩水电站坝址区位于色龙沟口至折骆沟口河段,河道略呈“S”型流向,坝址河谷狭窄,河谷形态呈较对称的“V”型谷,引水发电系统位于右岸。根据初步地质勘探结果,得到猴子岩水电站地层及围岩分布如图1所示。

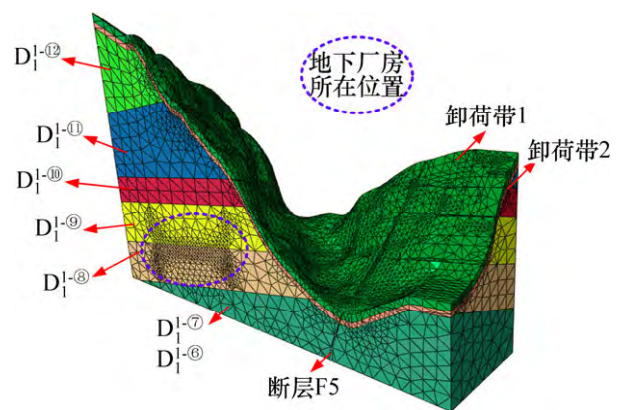


图1 猴子岩水电站围岩分布状况

Fig. 1 Distribution of surrounding rock of Houziyan hydropower station

坝址地层岩性较复杂,岩石种类较多,主要有厚—巨厚层变质灰岩、薄—中厚层白云岩、白云质灰岩、变质灰岩等。根据岩石物理力学性试验成果,地层分类及岩体类型依次如下。

D_1^{12} :灰色中厚—薄层状白云质灰岩、变质灰岩,属于 $I_1—II_2$ 类围岩;

D_1^{11} :灰色巨厚层状白云质灰岩、变质灰岩(局部中薄层),属于 $I_1—II_2$ 类围岩;

D_1^{10} :灰色薄—中厚层状白云质灰岩、变质灰岩,属于 $II_2—III_1$ 类围岩;

D_1^9 :灰色厚—巨厚层状白云质灰岩、变质灰岩(局部中薄层),属于 $I_1—II_2$ 类围岩;

D_1^8 :灰黑色中厚—薄层状白云质灰岩、变质灰岩,属于 $I_1—II_2$ 类围岩;

D_1^7 :灰色厚—巨厚层状白云质灰岩、变质灰岩(局部薄层),属于 $I_1—II_2$ 类围岩;

D_1^6 :灰黑色薄—中厚层状白云质灰岩、变质灰岩,属于 $I_1—II_2$ 类围岩。

地下厂房系统包括主机间、副厂房、安装间、主变室、尾调室等,布置在右岸280~510 m山体内。主机间长×宽×高为142.6 m×29.7 m×74.425 m,安装间长为55.9 m、副厂房长为25.90 m,厂房总长度为

224.4 m, 厂房顶拱高程为 1 732.225 m, 尾水管底板高程为 1 665.80 m。主变室和尾水调压室与厂房平行布置, 厂房轴线为 N61°W, 主厂房与主变室的中心距为 71.5 m, 主变室与尾水调压室的中心距为 65.9 m。主变室全长为 141.10 m 跨度为 18.80 m, 高为 25.2 m, 顶拱高程为 1 729.6 m。尾水调压室长为 60.00 m, 跨度为 23.5 m, 高为 73.975 m, 顶拱高程为 1 742.375 m。地下厂房空间分布如图 2 所示。地下洞室群的开挖方案如图 3 所示, 其开挖顺序见表 1。

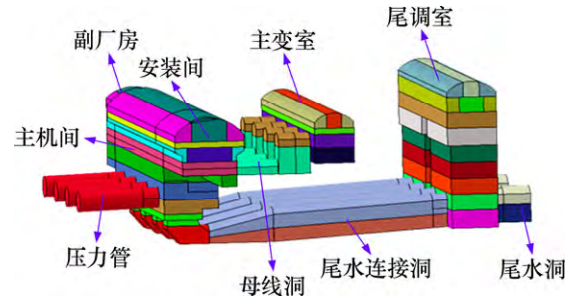


图 2 地下厂房空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of underground powerhouse

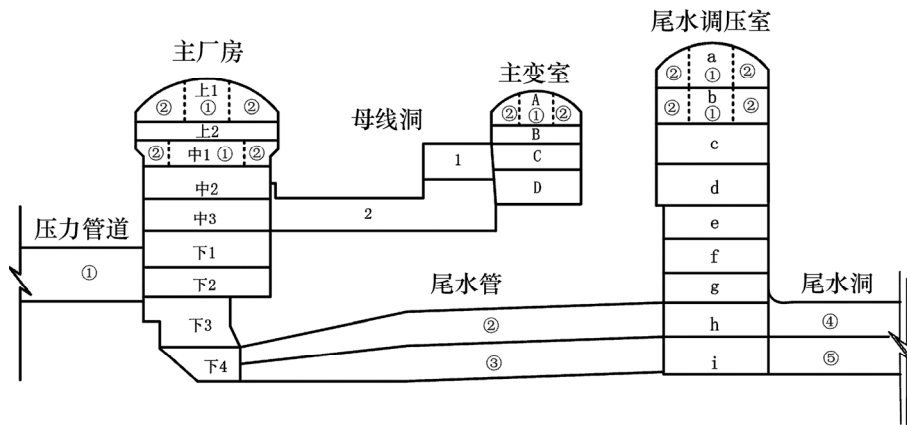


图 3 地下厂房开挖分块示意图

Fig. 3 Schematic diagram of underground powerhouse excavation

表 1 地下厂房开挖顺序

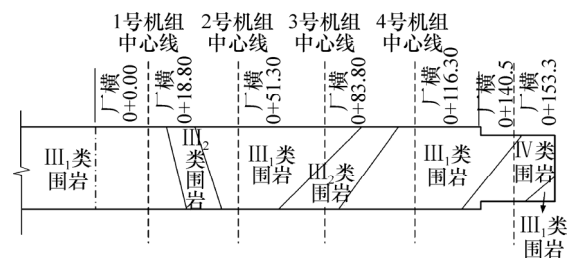
Table 1 Excavation sequence of underground powerhouse

名称	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
主厂房	上 1	上 1	上 2	中 1	中 1		中 2	中 3	下 1	下 2	下 3	下 4
主变室					A	A	B, C	D				
尾调室	a	a	b	b	c, d		e, f	g	h	i		
压力管道												
尾水管												
尾水洞												
母线洞						1	2					

2 地下厂房洞室群围岩变形特征分析

2.1 围岩分布特征分析

根据猴子岩水电站地质勘查报告及施工过程中岩层揭露情况的实时探测结果, 确定主厂房的围岩等级如图 4 所示。从图 4 可以看出: 安装间主要以围岩强度较高的 III 类围岩为主; 主机间 1 号~4 号机组所经围



数据单位: m

图 4 主厂房开挖揭露围岩等级分布

Fig. 4 Grade distribution of surrounding rock exposed by excavation of main powerhouse

岩以 I 类围岩为主,并夹杂有 2 处 II 类破碎围岩带;副厂房围压主要以 IV 类围岩为主。根据岩层产状探测结果及地下厂房开挖揭露岩层分布情况,建立细观分析有限元模型如图 5 所示。

为了反映地下厂房洞室群开挖过程的三维效应,有限元模型的范围为 X 方向从(厂纵)0-350.00 m 至(厂纵)0+450.00 m, Y 方向从(厂横)0-340.00 m 至(厂横)0+460.00 m。地下厂房穿越软弱地层带如图 6 所示。

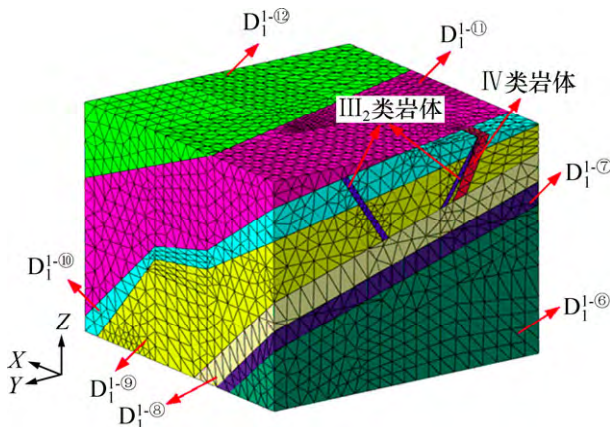


图 5 猴子岩水电站三维有限元模型

Fig. 5 Three-dimensional finite element of Houziyan hydropower station

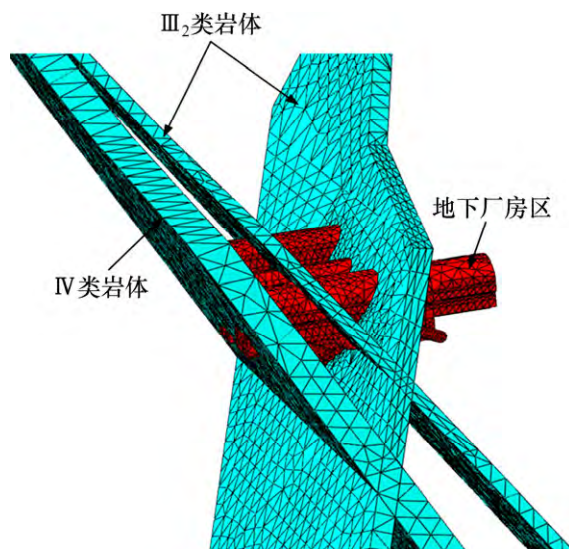


图 6 地下厂房穿越软弱地层带模型

Fig. 6 Model of underground powerhouse passing through weak strata

2.2 围岩变形特点研究

为了监测主厂房拱顶围岩变形随工程施工过程的变化规律,在主厂房顶部布设四点式位移计,监测断面包括厂横 0+51.30、厂横 0+83.80、厂横 0+116.30 和

厂横 0+153.81 的断面位置,拱顶多点位移计的布置位置如图 7 所示。

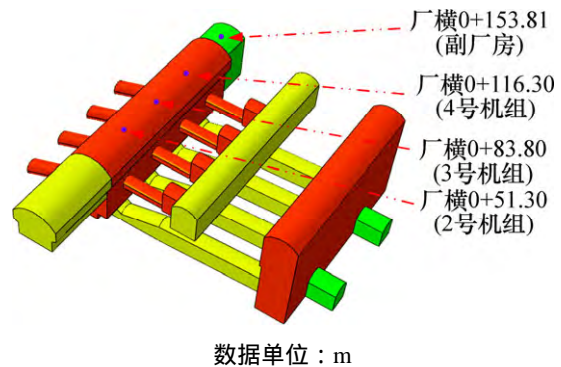


图 7 主厂房拱顶多点位移计布置位置

Fig. 7 Arrangement of measuring points in vault of main powerhouse

截止到 2012-06-18,地下厂房已完成第 1 步和第 2 步的开挖,开挖顺序如表 1 所示。不同监测断面拱顶下沉量随时间的变化规律如图 8 所示。从图 8 可以看出:主厂房 1 号~4 号机组所经围岩以 I 类和 II 类围岩为主,围岩性质较好,厂横 0+51.30、厂横 0+83.80 和厂横 0+116.30 这 3 个断面拱顶累计沉降量分别为 15.60, 15.30 和 10.34 mm,而副厂房围压主要以 IV 类围岩为主,围岩稳定性相对较差,因此,拱顶下沉监测值较大,其中厂横 0+153.81 的拱顶变形累积值达到了 18.46 mm。从监测值的变化规律来看:多点位移计在安装之初变化量较小,后期位移量的增加主要是由于侧墙扩挖导致围岩应力重分布所致。

3 围岩力学参数反演研究

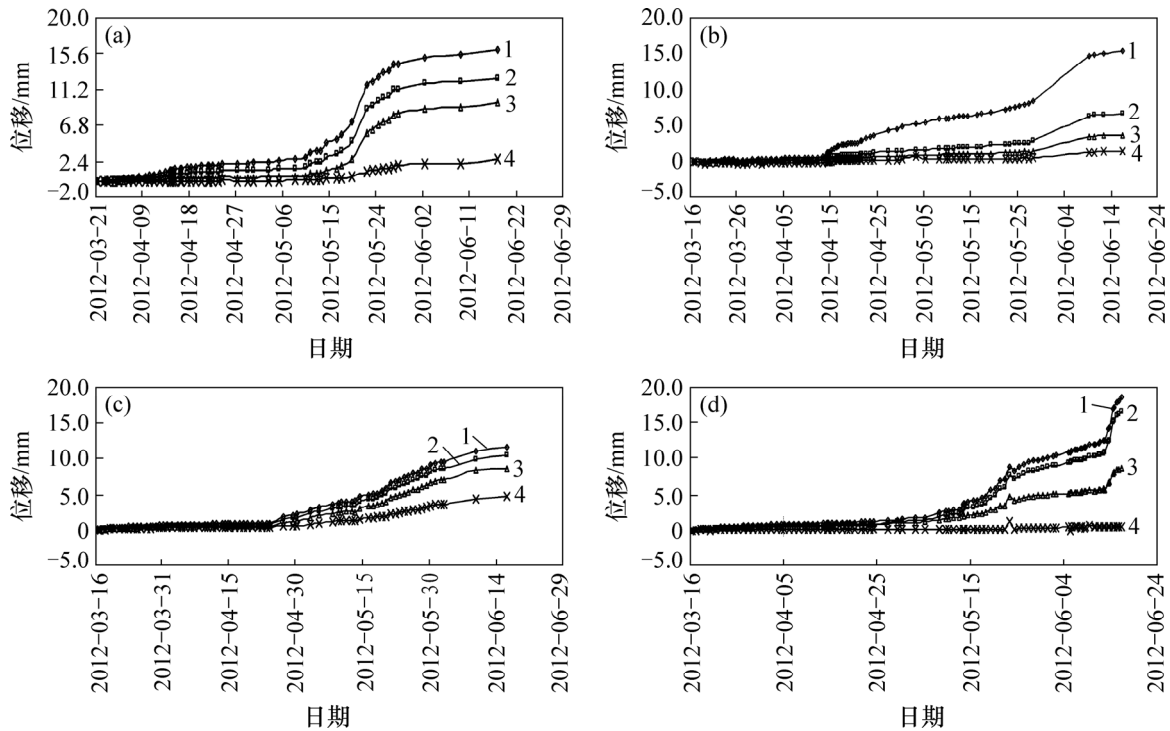
3.1 围岩力学参数反演分析方法

地下厂房洞室群开挖后围岩受到扰动,不同位置由于岩性存在差异表现出变形不一致,因此,掌握洞室随着开挖过程围岩的分布及性质,对于分析其稳定性和提出合理的支护对策具有重要意义。根据现场变形监测数据反演分析是确定岩体力学参数的一种重要手段,待求参数一般包括岩体的弹塑性力学参数、流变参数或损伤参数等,可以表示为

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n 为待求岩体力学参数; n 为待求参数的总个数。

通过现场监测手段,得到不同测点的相对位移或绝对位移:



(a) 厂横 0+051.3 拱顶多点位移计绝对位移时程曲线；(b) 厂横 0+083.80 拱顶多点位移计绝对位移时程曲线；
 (c) 厂横 0+116.30 拱顶多点位移计绝对位移时程曲线；(d) 厂横 0+153.81 拱顶多点位移计绝对位移时程曲线
 1—孔口；2—2 m；3—5 m；4—15 m。

图 8 现场多点位移计测量结果

Fig. 8 Results of different measuring points on site

$$U^0 = (u_1^0, u_2^0, \dots, u_m^0) \quad (2)$$

式中： $u_1^0, u_2^0, \dots, u_m^0$ 分别为不同测点的位移监测值； m 为测点的总个数。

在数值模拟过程中，围岩变形 U 是岩体力学参数 X 的函数，当围岩被赋予不同的力学参数值时，通过数值计算可得到测点处的变形计算值，即

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (3)$$

式中： u_1, u_2, \dots, u_m 分别为各测点处的位移计算值。

围岩力学参数反演的目的是在允许的取值范围内寻找一组合理的岩体力学参数组合 $X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$ ，使得各测点位移的数值模拟计算结果与现场监测结果之间差值的绝对值和最小，即可认为该参数与现场岩体参数相吻合。可表示为

$$\Psi(X^*) = \min \sum_{i=1}^m |u_i^0 - u_i| \quad (4)$$

待求参数的取值范围可用以下约束关系表示：

$$x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}; i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中： $x_{i\min}$ 和 $x_{i\max}$ 分别为待求参数的取值的上限和下限，可通过室内外试验或现场监测报告确定。

为实现以上目标，本文利用 MATLAB 语言编制

基于遗传算法的反演分析程序，结合 ABAQUS 有限元算法^[12-15]，实现对地下厂房洞室围岩力学参数的反演研究。

3.2 猴子围岩力学参数反演分析方案

从多点位移计的监测结果(如图 8 所示)可以看出：多点位移计安装之初，围岩的变形量较小，当厂房侧墙开始扩挖时，围岩的变形明显增大，这主要是扩挖导致厂房周边围岩应力调整所致。本次分析过程中以厂房扩挖过程中产生的变形进行反分析，以监测结果与数值计算结果的相对误差建立目标函数：

$$\Psi = \sum_{i=1}^4 |u_i^c - u_i^m| \quad (6)$$

式中： u_i^c 为计算得到的拱顶下沉； u_i^m 为现场监测的拱顶下沉。反演计算目的就是通过围岩力学参数的不断迭代计算使函数 Ψ 趋向最小值。

根据目前揭露的岩层分布状况，分析影响围岩变形的的主要围岩性质，本次反演过程的围岩分为 3 种，分别为 I 、 II 和 III 类围岩(其分布如图 4 所示)因此，建立的目标函数实际上为围岩弹塑性参数的函数：

$$\Psi = f(E_1, c_1, \phi_1, E_2, c_2, \phi_2, E_3, c_3, \phi_3) \quad (7)$$

其中: E_1, E_2 和 E_3 分别为 σ_1, σ_2 和 σ_3 类围岩的弹性模量; c_1, c_2 和 c_3 为黏聚力; φ_1, φ_2 和 φ_3 为摩擦角。

计算过程中模型的周边采用法向位移约束, 模型中计算单元的自重应力场和构造应力场采用前期研究得到的初始地应力场反分析结果进行施加。根据现场的施工过程, 反演分析计算过程共分为 3 个分析步: 1) 进行初始应力场平衡; 2) 主厂房中部拱顶开挖; 3) 主厂房两侧边扩挖。开挖示意图如图 9 所示。

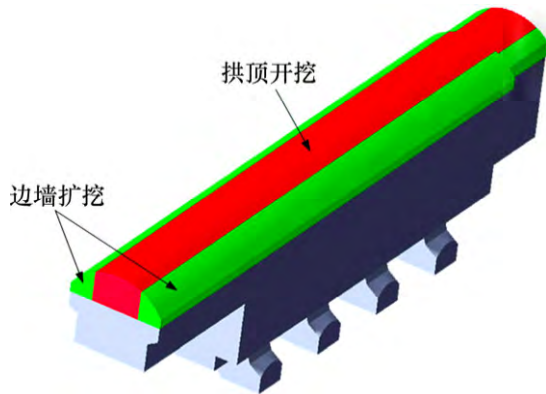


图 9 主厂房开挖过程模拟

Fig. 9 Simulation of excavation process of main powerhouse

3.3 反演结果分析

通过反演分析得到的数值计算结果与多点位移计监测结果的对比如表 2 所示。从表 2 可以看出: 反演分析计算结果与监测结果总体上较接近, 相对误差均

表 2 围岩变形反分析结果与监测值对比

Table 2 Comparison of surrounding rock deformation between inversion and monitoring result

测点位置	监测值/mm	反分析值/mm	相对误差/%
厂横 0+51.30	15.60	16.36	4.87
厂横 0+83.80	15.30	15.42	0.78
厂横 0+116.30	10.34	11.15	7.83
厂横 0+153.81	18.46	17.24	6.61

低于 8%, 说明反演计算结果较理想。

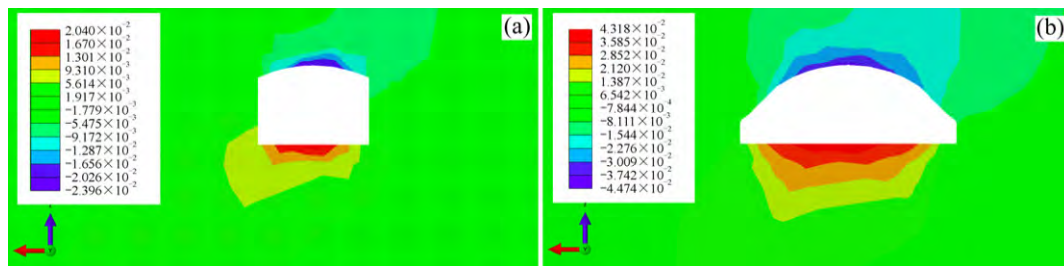
本次反演分析不同围岩类型的力学参数初始值及取值范围如表 3 所示, 其中, 参数取值范围的选取参照 GB50218—94 “工程岩体分级标准”^[16]。反演过程中, 通过近 300 次迭代计算得到了不同等级围岩的力学参数见表 3。由表 3 可以看出: σ_1 类围岩的力学参数相对较高, 因此, 虽然安装间埋深较大, 但在开挖过程中其变形较小, 而副厂房通过的 IV 类围岩的力学参数相对较低, 这也是开挖过程中副厂房变形相对较大的主要原因。

主厂房开挖过程中, 厂横 0+51.30、厂横 0+83.80、厂横 0+116.30 和厂横 0+153.81 这 4 个断面位移场分布如图 10~13 所示。由图 10~13 可以看出: 厂横 0+153.81 的变形明显比其他断面的大, 在后续开挖过程中应加强对 IV 类围岩变形的监控量测, 以防止对地下厂房洞室群的整体稳定性产生影响。

表 3 不同类型围岩力学参数值

Table 3 Mechanics parameter values of different types of surrounding rock

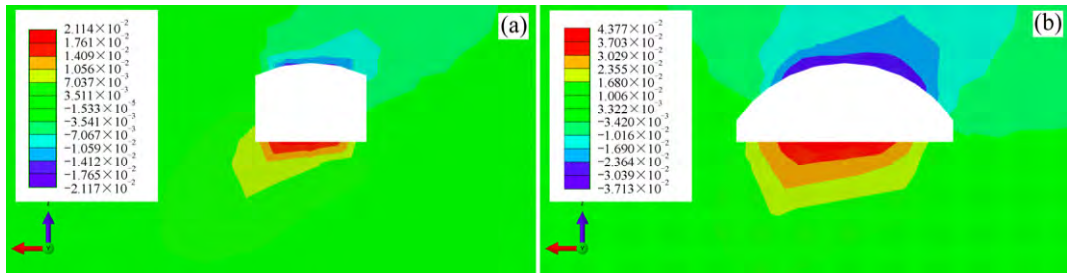
围岩类型	弹性模量 E/GPa			黏聚力 c/MPa			摩擦角 $\varphi/(\text{°})$		
	初始值	取值范围	反演值	初始值	取值范围	反演值	初始值	取值范围	反演值
1	15.0	10.0~25.0	19.41	1.3	0.5~2.0	1.355	45	39~50	44.32
2	10.0	6.0~20.0	8.39	1.0	0.5~2.0	0.708	42	39~50	41.21
	4.0	0.8~6.0	1.23	0.4	0.2~0.7	0.469	38	27~39	35.42



(a) 拱顶开挖后; (b) 边墙扩挖后

图 10 主厂房厂横 0+51.30 断面竖向位移云图(单位: m)

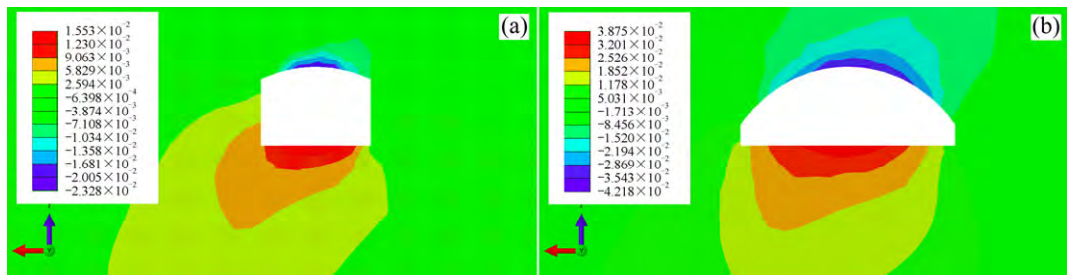
Fig. 10 Vertical displacement nephograms in No. 0+51.30 section of main powerhouse



(a) 拱顶开挖后 ; (b) 边墙扩挖后

图 11 主厂房厂横 0+83.80 断面拱顶竖向位移云图(单位 : m)

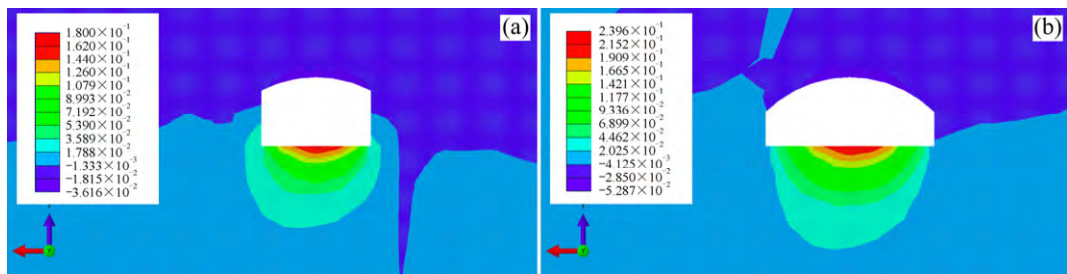
Fig. 11 Vertical displacement nephograms in No. 0+83.80 section of main powerhouse



(a) 拱顶开挖后 ; (b) 边墙扩挖后

图 12 主厂房厂横 0+116.30 断面拱顶竖向位移云图(单位 : m)

Fig. 12 Vertical displacement nephograms in No. 0+116.30 section of main powerhouse



(a) 拱顶开挖后 ; (b) 边墙扩挖后

图 13 主厂房厂横 0+153.80 断面拱顶竖向位移云图(单位 : m)

Fig. 13 Vertical displacement nephograms in No. 0+153.80 section of main powerhouse

4 结论

1) 主厂房第一层开挖穿越 σ_1 、 σ_2 和 IV 类围岩, 围岩变形受岩层性质影响较明显, 由于 σ_1 类围岩的力学参数相对较高, 因此, 虽然安装间埋深较大, 但在开挖过程中其变形较小, 而副厂房通过的 IV 类围岩的力学参数则相对较低, 这也是开挖过程中副厂房变形相对较大的主要原因。

2) 根据施工期岩层探测结果, 建立地下厂房洞室

群大型有限元模型, 利用变形监测数据, 对地下厂房洞室群的围岩力学参数进行反演分析, 反演分析计算结果与监测结果总体上较接近, 相对误差均低于 8%, 说明反演计算结果较理想。

3) 结合数值仿真结果, 分析围岩变形规律, 提出在后续开挖过程中应加强对 IV 类围岩变形的监控量测, 以防止对地下厂房洞室群的整体稳定性产生影响。

参考文献 :

[1] 贾若祥. 西部地区水电资源开发利用的利益分配机制研究[J].

- 中国能源, 2007, 29(6): 5-11.
- JIA Ruixiang. Profit-sharing mechanism in hydro-power development in the western China[J]. Energy of China, 2007, 29(6): 5-11.
- [2] 罗忆, 卢文波, 周创兵, 等. 高地应力条件下地下厂房开挖动态卸荷引起的变形突变机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1553-1560.
- LUO Yi, LU Wenbo, ZHOU Chuangbing, et al. Mechanism study of abrupt deformation of underground powerhouse induced by excavation unloading under high in-situ stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1553-1560.
- [3] 董志宏, 丁秀丽, 卢波, 等. 官地水电站地下厂房施工期围岩安全监测分析[J]. 人民长江, 2009, 40(17): 81-84.
- DONG Zhihong, DING Xiuli, LU Bo, et al. Safety monitoring and analysis on surrounding rock mass for power house of Guandi hydropower station during construction period[J]. Yangtze River, 2009, 40(17): 81-84.
- [4] YAZDANI M, SHARIFZADEH M, KAMRANI K, et al. Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2012, 28(1): 41-48.
- [5] 李志鹏, 徐光黎, 董家兴, 等. 猴子岩水电站地下厂房洞室群施工期围岩变形与破坏特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2291-2300.
- LI Zhipeng, XU Guangli, DONG Jiaying, et al. Deformation and fracture of surrounding rock mass of underground caverns at houziyan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2291-2300.
- [6] 彭琦, 王佛割, 邓建辉, 等. 地下厂房围岩变形特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2583-2587.
- PENG Qi, WANG Dikai, DENG Jianhui, et al. Analysis of surrounding rock deformation characteristics in underground powerhouse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2583-2587.
- [7] 魏进兵, 邓建辉, 王佛割, 等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩变形与破坏特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1198-1205.
- WEI Jinbing, DENG Jianhui, WANG Dikai, et al. Characterization of deformation and fracture for rock mass in underground powerhouse of Jinping I hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1198-1205.
- [8] 田泽润, 李守巨, 于申. 白山抽水蓄能泵站地下厂房的岩体力学参数反演[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 508-513.
- TIAN Zerun, LI Shouju, YU Shen. Inversion of rock mass mechanical parameter in underground powerhouse of Baishan pumped storage station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 508-513.
- [9] 姚强, 杨兴国, 刘勇林, 等. 大型地下厂房洞室群施工期围岩变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1164-1169.
- YAO Qiang, YANG Xingguo, LIU Yonglin, et al. Deformation of surrounding rock mass of large underground powerhouse cavern groups during their construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1164-1169.
- [10] 高春玉, 邓建辉, 魏进兵. 官地地下厂房洞室群施工期围岩位移特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3911-3919.
- GAO Chunyu, DENG Jianhui, WEI Jinbing. Analysis of surrounding rock displacement characteristics during construction in Guandi underground powerhouse chambers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3911-3919.
- [11] 聂卫平, 徐卫亚, 周先齐, 等. 向家坝水电站地下厂房围岩稳定的黏弹塑性有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1276-1282.
- NIE Weiping, XU Weiya, ZHOU Xianqi, et al. Viscoelasto-plastic finite element analysis of stability of surrounding rock for underground powerhouse of Xiangjiaba hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1276-1282.
- [12] 贾善坡, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 大岗山水电站地下厂房区初始地应力场 Nelder-Mead 优化反演研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2341-2349.
- JIA Shanpo, CHEN Weizhong, TAN Xianjun, et al. Nelder-Mead algorithm for inversion analysis of in-situ stress field of underground powerhouse area of Dagangshan hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2341-2349.
- [13] TIAN Hongming, CHEN Weizhong, YANG Diansen, et al. Application of the orthogonal design method in geotechnical parameter back analysis for underground structures[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(1): 239-249.
- [14] 贾善坡. Boom clay 泥岩渗流应力损伤耦合流变模型、参数反演与工程应用[D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2009: 45-48.
- JIA Shanpo. Hydro-mechanical coupled creep damage constitutive model of boom clay, back analysis of model parameters and its engineering application[D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences, Institute of Rock and Soil Mechanics, 2009: 45-48.
- [15] 王辉, 陈卫忠. 嘎隆拉隧道围岩力学参数对变形的敏感性分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1548-1553.
- WANG Hui, CHEN Weizhong. Sensitivity analysis of mechanical parameters to deformation of surrounding rock in Galongla tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1548-1553.
- [16] GB 50218—94, 工程岩体分级标准[S].
- GB 50218—94, Grading standard of engineering rock mass[S].

(编辑 杨幼平)