

Stability Analysis of Wendeng Underground Plant According to Excavation Schemes

Chaoyue Wu¹, Shaojun Fu², Hailong Shang¹, Shufa Wang³, Xiang Xi³, Changhai He³

¹China Electric Construction Group Beijing Survey and Design Institute, Beijing

²School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

³School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: shaojunfu69@vip.sina.com

Received: Mar. 5th, 2018; accepted: Mar. 20th, 2018; published: Mar. 27th, 2018

Abstract

Excavation procedure and selection of excavation method for the realization of rapid, economic and safety construction of underground plant are very important. This paper will take the underground plant of Wendeng pumped storage power station as an example, three excavation schemes are mapped out with the idea of "many processes in plane and 3-D multi-level". The corresponding finite element model is established, the initial stress is inverted by GA, and the nonlinear finite element simulation is adopted to analyze the deformation, stress state and yield zone distribution of surrounding rock under different excavation schemes. The results showed that the overall stability of surrounding rock for the three excavation schemes is good, the local deformation and stability was mainly affected by the two major faults. The excavation implementation plan should be made and optimized according to the schedule requirements and construction conditions. The achievement of the study provides a basis for the construction scheme optimization of underground plant in Wendeng project, which also can be a reference for similar projects.

Keywords

Underground Plant, Excavation Scheme, Stability, Finite Element Analysis

文登地下厂房开挖方案围岩稳定性分析

吴超月¹, 傅少君², 尚海龙¹, 王书法³, 席翔³, 贺昌海³

¹中国电建集团北京勘测设计研究院, 北京

²西京学院, 土木工程学院, 陕西 西安

³武汉大学, 水利水电学院, 湖北 武汉

Email: shaojunfu69@vip.sina.com

收稿日期: 2018年3月5日; 录用日期: 2018年3月20日; 发布日期: 2018年3月27日

摘要

开挖程序和开挖方法的选择对于实现地下厂房快速、经济、安全的施工具有重要影响。论文以文登抽水蓄能电站地下厂房为例,以“平面多工序,立体多层次”的思想拟定了三个开挖方案,建立相应的有限元分析模型,反演了初始地应力,并应用非线性有限元方法仿真分析了不同开挖方案下洞室围岩的变形、应力状态和屈服区分布。结果表明,三个开挖方案围岩整体稳定,局部变形和稳定主要受穿越厂房的2条主要断层影响,在制定开挖实施方案时可根据进度要求和施工条件等优化开挖步序。研究结果为文登地下厂房的施工方案优化提供了依据,也可供类似工程参考。

关键词

地下厂房, 开挖方案, 稳定性, 有限元分析

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国地域辽阔、地形和地质条件复杂,对于峡谷地带水利枢纽,采用地下厂房有利于枢纽建筑物的合理布置和拦河大坝的快速施工,并且在施工导流布置方面具有优势,能缩短建设周期、节省工程总投资。90年代后的峡谷高坝大都采用地下厂房方案[1]-[8],如二滩、大朝山、江娅、棉花滩、小浪底、小湾、龙滩、溪洛渡、瀑布沟、水布娅等。近年来,地下厂房洞室群的规模也愈来愈大,我国已建成投产与正在建设中的大型水电站地下厂房中,地下厂房跨度已达25~35 m,高度已达70~90 m [2] [3] [4]。对于大型地下洞室,钻孔爆破法是最常采用的施工手段,在钻爆法开挖大型地下洞室的过程中,开挖程序和开挖方法的选择对于实现快速、经济、安全的施工具有重要影响[1] [2] [6]。

论文将以文登抽水蓄能电站为例,通过对地下厂房系统地质条件、布置特点及施工特性的深入分析研究,充分利用进厂交通洞、通风洞、母线洞、引水岔管、尾水隧洞及施工支洞等通道,在保证工程施工安全的前提下,以“平面多工序,立体多层次”的思想合理安排开挖方案[1] [2];应用非线性有限元方法仿真分析不同开挖方案,对地下厂房洞室进行稳定性分析,为制定安全、经济、快速的施工程序、开挖方案提供依据,以达到施工顺序与施工进度合理,经济安全的目的。

2. 工程概况及基本技术资料

2.1. 工程概况

文登抽水蓄能电站位于山东省威海市文登区界石镇境内,工程区距文登区公路里程约35 km。装机容量1800 MW,安装6台单机容量为300 MW的可逆式水泵水轮机组。电站主要由上水库、下水库、水道系统、地下厂房系统及开关站等建筑物组成,其中地下厂房包括主机间、主副厂房及安装场,安装场和主副厂房分别布置在主机间的左、右两端。地下厂房开挖总尺寸为214.5×25.0×53.5 m(长×宽×高),其中主机间开挖尺寸为149.5 m×25.0 m×53.5 m(长×宽×高,下同),安装场开挖尺寸为45.0 m×25.0 m×26.0 m,主副厂房开挖尺寸为20.0 m×25.0 m×53.5 m;主变洞平行布置在主厂房下游侧,与主厂房净距离为40 m,开挖尺寸为226.5 m×21.0 m×22.0 m;母线洞与主厂房、主变洞正交

连通，一机一洞，断面为圆拱直墙型，净尺寸为 40.0 m × 8.5 m × 9.5 m；交通电缆洞位于主副厂房与变副厂房之间，净尺寸为 40.0 m × 2.5 m × 6.0 m，为两层布置，上层为交通廊道，下层为电缆廊道；主变运输洞位于安装场和主变洞之间，净尺寸为 40.0 m × 6.0 m × 7.0 m；尾闸室为城门洞型结构，闸室闸门井段净尺寸为 146.10 × 9.9 × 19.8 m (长 × 宽 × 高)；尾闸副厂房布置于尾水闸门室的右侧，平行布置于右变副厂房下游 50.35 m 处，开挖尺寸为 35 m × 10.1 m × 19.8 m (59.1 m) (长 × 宽 × 高)。洞室群主要洞室情况如图 1 所示。

2.2. 地质条件及参数

地下厂房区岩性以晚元古代晋宁期黑云角闪二长花岗岩和中生代印支期黑云角闪石英二长岩(I、II 类)为主，二者呈混熔状态，岩性界线不是很明显，以二长岩占多数。地下厂房区揭露大小断层 53 条，以近 E-W 走向倾向南的陡倾角断层为主，优势产状为 NW275° SW 48°~55°，多数为 III~IV 级结构面，宽度一般小于 1 m，延伸短。F5、F12 及 f11-23 是切过厂房区的三条 II 级结构面，断层及其影响带宽度均在 10 m 以上，为厂房区最大的断层，三条断层中间发育着 29 条 III、IV 级结构面，其中 III 级结构面宽度一般在 1 m 以上。厂房区裂隙以近 EW 走向倾向 S/N，陡倾角裂隙为主，优势产状为 NW275° SW 46°~90°，裂隙约占总统计条数的 50%；还发育一组近东西向缓倾角结构面，优势产状 NW275° SW 0°~30°，该组裂隙约占 7%。

厂区围岩的物理力学性质测试分别进行了野外变形试验、地应力测试、岩体纵波测试及室内常规试验。根据对试验成果的整理分析及类比其它工程，结构面力学参数建议值见表 1，各类围岩的物理力学性质指标建议值见表 2。

2.3. 开挖方案

根据工程经验[1] [6]和进度计划要求，初步拟定了三个开挖方案，即常规开挖方案，分七层开挖完成

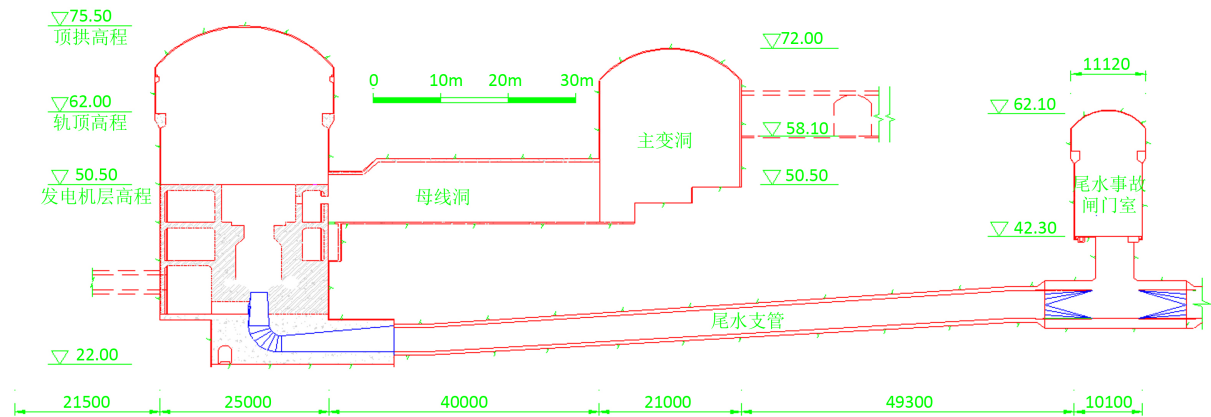


Figure 1. Transverse section of underground plant

图 1. 地下厂房横剖面图

Table 1. The recommended value of mechanic parameter of joints and faults

表 1. 岩体结构面力学参数建议值

级别	代表性结构面	结构面类型	抗剪断强度		抗剪强度	
			f'	c' (MPa)	f	c (MPa)
II	f11-23	岩块岩屑型	0.45~0.55	0.10~0.20	0.40~0.50	0
	F5, F12	岩屑夹泥型	0.35~0.45	0.05~0.10	0.30~0.40	0

整个洞室，开挖时按分层从上往下逐层开挖，分层情况和步序如图 2 所示；立体开挖方案 1，在常规开挖方案的基础上，先开挖第一层，再同时开挖第二层和第五层，然后其他层从上往下顺序依次开挖，分层情况和步序如图 3 所示；立体开挖方案 2，在常规开挖方案的基础上，先开挖第一层，再开挖第二层，为了便于施工中出渣等，同时开挖掉引水洞并延伸到下游边墙部分岩体和尾水洞，其他层从上往下顺序依次开挖，分层情况和步序如图 4 所示。

3. 初始地应力反演

3.1. 实测地应力

厂房区域的地应力测试点(ZK524)在厂房西端墙部位，采用应力解除法地应力测试，测试结果见表 3。

3.2. 反演方法

形成初始应力场的因素有：岩体自重、地质构造运动、温度等。暂不考虑温度因素，岩体自重、地

Table 2. The recommended value of mechanic parameter of surrounding rock

表 2. 围岩的力学性质指标建议值

围岩分类	弹性模量 GPa	变形模量 GPa	剪切模量	泊松比	抗剪断强度		抗剪强度	
					凝聚力 MPa	内摩擦角 °	凝聚力 MPa	内摩擦角 °
I	40	25	10	0.2	2.50	60	1.2	48
II	30	20	8	0.23	2.0	52	1.0	45

Table 3. The measured data of crustal stress at EL. 151.65 m in ZK524 hole (unit: MPa)

表 3. ZK524 孔(EL151.65 m)地应力测试结果(单位: MPa)

σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
13.626	7.056	9.846	-1.535	1.414	-0.208

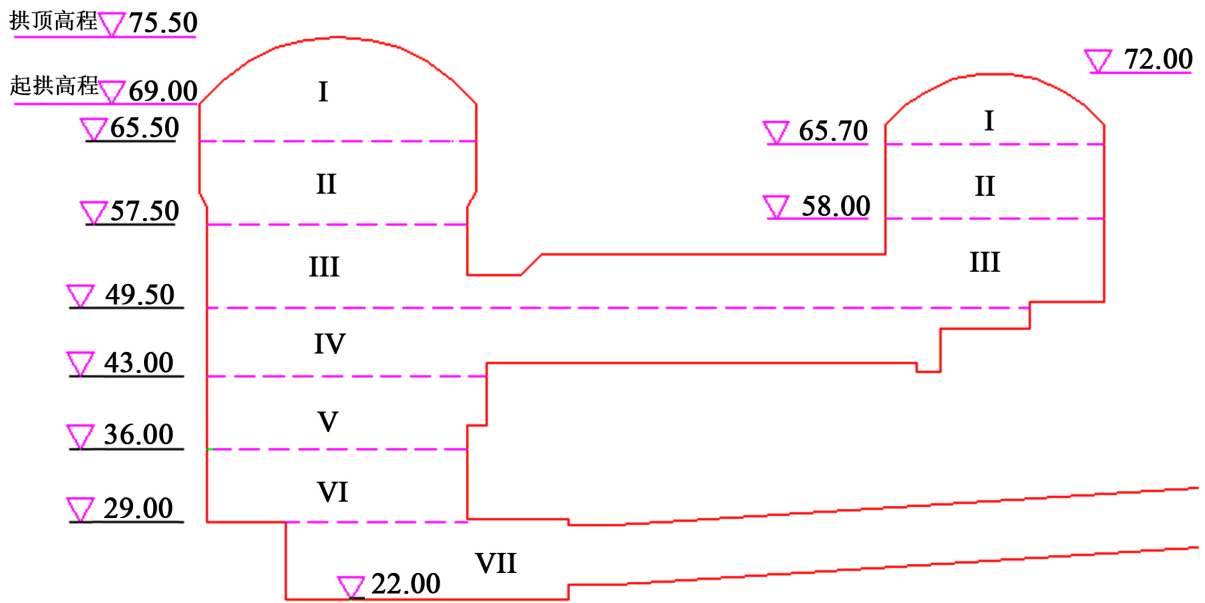


Figure 2. The conventional excavation plan

图 2. 常规开挖方案

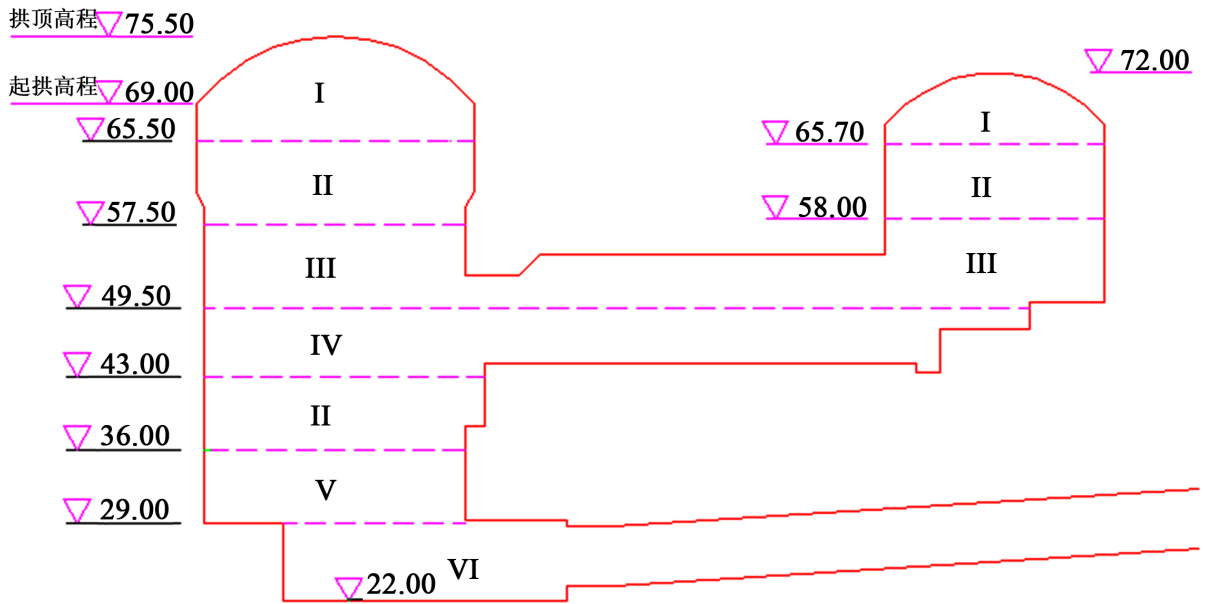


Figure 3. The Three-dimensional excavation plan 1
图 3. 立体开挖方案 1

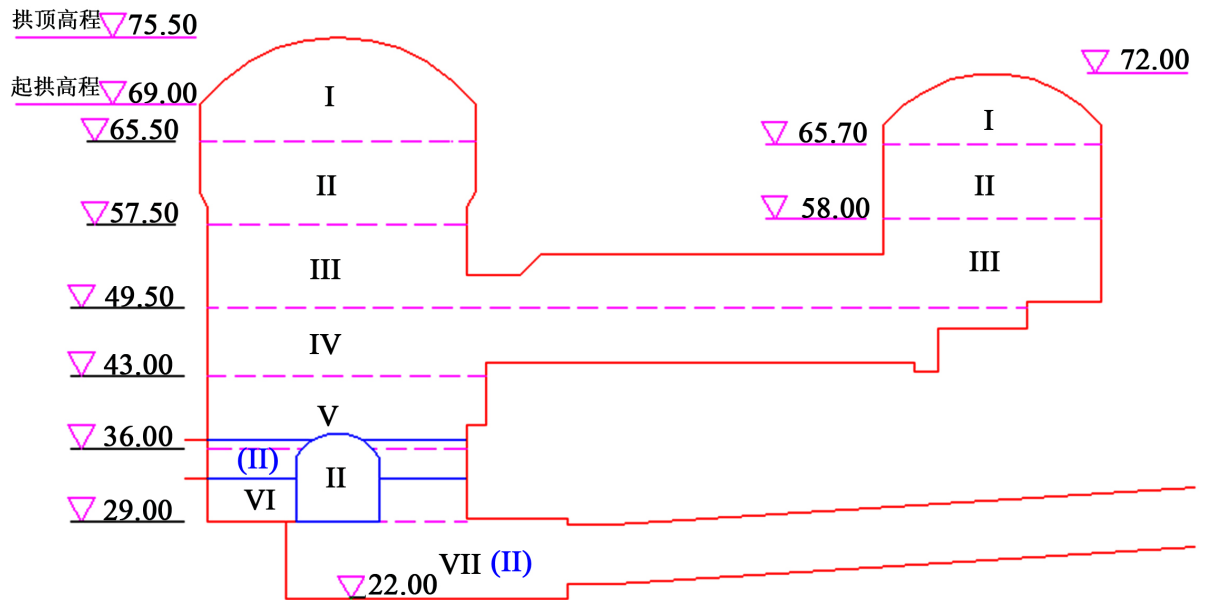


Figure 4. The Three-dimensional excavation plan 2
图 4. 立体开挖方案 2

质构造运动因素通过施加不同的边界条件来实现。自重的构成以图 5(a)表示，计算中采用岩体实测容重。构造运动作用力的构成如图 5(b)~图 5(d)所示，通过在边界上施加单位力 p 或位移 u 来体现，但反映构造运动作用力的最终值决定于 p 或 u 与相应的回归系数的乘积。 p 和 u 的分布可以是均布的、线性的、二次的等等。

以认为，实测的初始应力场及其所反映的初始应力场是下列变量的函数：

$$\sigma = f(x, y, z, E, \mu, \gamma, \Delta, U, V, W, T \dots) \quad (1)$$

式中： σ 为初始应力值； x, y, z 为地形和地质体空间位置的坐标系；可由勘测资料获得 E, μ, γ （岩体的弹

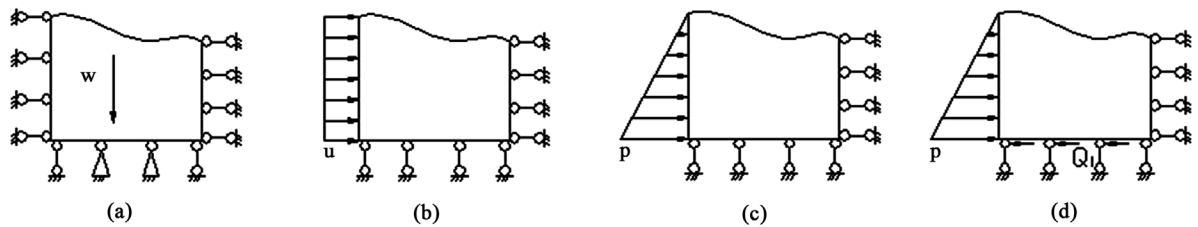


Figure 5. The boundary modes
图 5. 边界模式

性模量、泊松比和容重); Δ 为自重因素; U , V , W 为地质构造作用的因素; T 为温度因素。这些特定因素是由图 5 给定的边界条件构成的。将基本初始应力乘以系数即为实际初始应力。

记现场量测点的应力值为 $\sigma'_i (i=1,2,3,\dots,n)$, 有限元计算所得测点的应力值为 $\sigma_i (i=1,2,3,\dots,n)$ 。于是, 岩体初始应力场的反演问题可转化为式(2)所示数学模型的优化问题。

$$\varphi = \sum_{i=1}^n |\sigma_i - \sigma'_i| \quad (2)$$

由于岩体自重、地质构造运动、温度等对初始应力场的影响可通过在有限元计算模型上施加荷载及边界条件等效模拟, 因此 σ_i 也可看作有限元计算模型上所施加荷载及边界条件的函数。显然, 当 $\varphi \rightarrow 0$ 时, 可以将模拟应力场视为初始应力场, 反演完成。遗传算法是求解这一优化问题提供了很好的途径[3]。

3.3. 反演结果

根据表 2 中地应力实测结果, 采用有限元方法与基于式(1)~式(2)的遗传算法, 反演得到垂直于厂房轴线的侧压系数约 0.95, 而在平行于厂房轴向方向的侧压力系数为 1.15。

4. 围岩稳定数值分析

4.1. 有限元模型

1) 有限元网格模型

计算模型范围边界为: 从主厂房洞上游边墙向上游延伸 75 m (X 轴负向), 从尾闸洞下游边墙向下游延伸 70 m (X 轴正向); 从安装场的左端墙向左延伸 80 m (Y 轴正向), 从主厂房端部的 1#通风机室右端墙向右延伸 80 m (Y 轴负向); 上至地表、下至 $\nabla -130.0$ m 高程 (Z 轴向上为正)。

根据工程经验, 模型仅考虑主厂房洞(含主副厂房、安装场)、主变洞(含主变副厂房)、6 条母线洞、6 条尾水洞(与主厂房的交叉段); 初步分析断层的分布区域和影响程度, 仅考虑了 2 条断层, 分别是 f_{202} 和 f_{203} 。用 8 节点六面体单元和 4 节点四面体单元进行离散, 如图 6 所示; 共计剖分了 40 万个单元, 35 万个节点, 模型底面和侧面均施加法向约束。

2) 力学模型

围岩本构模型采用立加锚节理岩体的隐式弹粘塑性本构关系。根据弹粘塑性势理论(Owen, 1980), 隐式弹粘塑性本构关系均可写成:

$$\{\Delta\sigma\}^n = [\hat{D}]^n \left(\{\Delta\varepsilon\}^n - \{\varepsilon^{vp}\}^n \Delta t_n \right) \quad (3)$$

式中: Δt_n 是在时间 t_n 的时步长; $[D]$ 和 $\{\varepsilon^{vp}\}^n$ 分别是弹性矩阵、粘塑性应变率。岩块采用 D-P 屈服准则, 断层、节理采用 M-C 屈服准则, 锚杆采用 Von Mises 屈服准则。

4.2. 计算结果分析

4.2.1. 位移结果分析

常规顺层开挖方案、立体开挖方案 1 和立体开挖方案 2 三者的变形规律均一致，如图 7~图 8 所示。由图 7~图 8 可以看出，总体上围岩位移均指向洞内临空面方向，即上游边墙变形指向下游，下游边

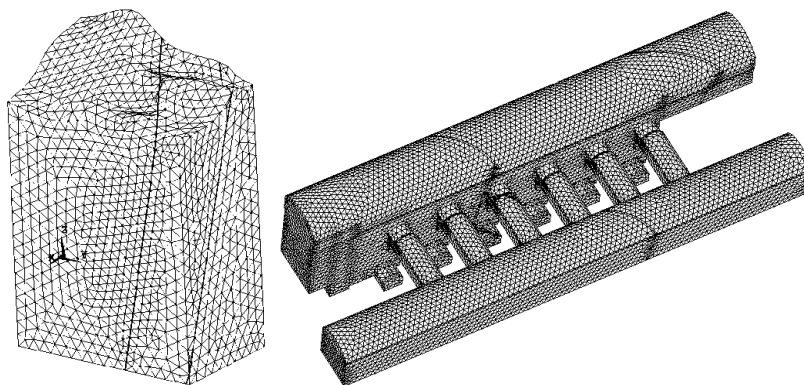


Figure 6. The finite element mesh
图 6. 有限元网格

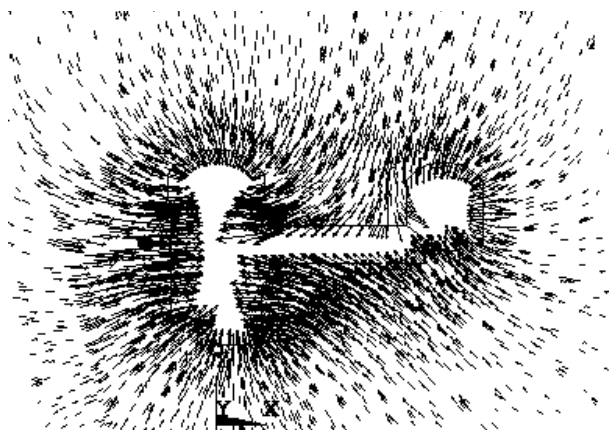


Figure 7. The displacement vector induced by excavation on 1# electrical wire hall section

图 7. 1#母线洞轴线剖面开挖位移矢量

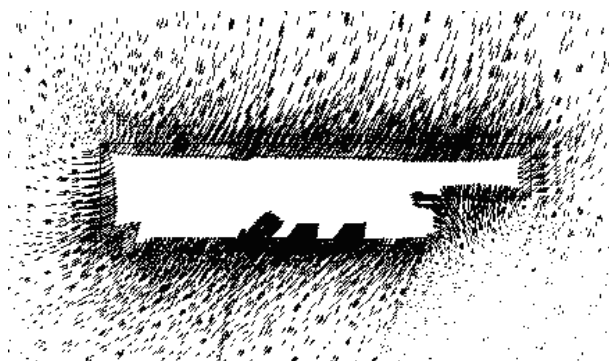


Figure 8. The displacement vector induced by excavation on longitudinal section of main power house

图 8. 主厂房纵剖面开挖位移矢量

墙变形指向上游，洞顶变形铅直向下，洞底板变形向上回弹；断层部位存在明显的错动变形。常规顺层开挖方案、立体开挖方案 1 和立体开挖方案 2 三个开挖方案围岩特征部位的变形统计如表 4，由表 4 可知三者的位移差别非常小，在 1 mm 以内，除断层、边角等局部外总体均为弹性变形。

4.2.2. 应力结果

常规顺层开挖方案、立体开挖方案 1 和立体开挖方案 2 三者的应力分布规律均一致，如图 9~图 10 所示。

由图 9~图 10 可以看出，洞周围岩总体处于受压状态；在洞周部分断层出露处和洞室底板局部出现受拉区域，除了个别应力集中点外，拉应力水平一般不高于 2.0 MPa；洞周围岩的主压应力总体小于 20 MPa，但在洞室边角处或洞室间交叉处应力集中，导致局部应力水平较高。

Table 4. Deformation of specific points (unit: mm)

表 4. 特征点位移(单位: mm)

位移最大值	主厂房			主变室		
	常规开挖方案	立体开挖方案 1	立体开挖方案 2	常规开挖方案	立体开挖方案 1	立体开挖方案 2
顶拱下沉	-7.45	-7.46	-7.46	-6.78	-6.79	-6.78
底板隆起	11.54	11.55	13.42	8.93	8.92	8.92
上游边墙 X 向	14.08	13.70	14.02	21.53	21.52	21.51
下游边墙 X 向	-34.55	-34.53	-35.38	-8.80	-8.79	-8.78
右端墙 Y 向	5.80	5.80	5.80	3.94	3.94	3.94
左端墙 Y 向	-11.62	-11.38	-11.58	-3.85	-3.85	-3.85

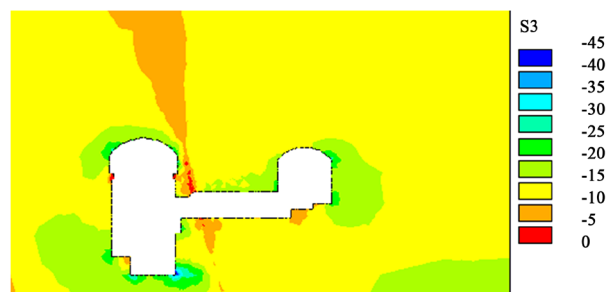


Figure 9. Contour of σ_3 on 3# electrical wire hall section

图 9. 3#母线洞轴线剖面 σ_3 云图(MPa)

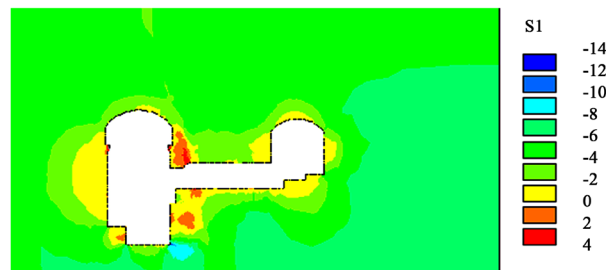


Figure 10. Contour of σ_1 on 3# electrical wire hall section

图 10. 3#母线洞轴线剖面 σ_1 云图(MPa)

4.2.3. 屈服区

常规顺层开挖方案、立体开挖方案 1 和立体开挖方案 2 三者的屈服区分布规律均一致，如图 11~图 13 所示。

由图 11~图 13 可以看出，洞周围岩整体稳定；洞周围岩的屈服区主要分布在主厂房和母线洞以及主变室与母线洞交叉处，但屈服区最大深度不超过 4 m，小于拟采取锚固措施深度；受洞室群开挖影响的断层处也有部分屈服区，建议加强对主要洞室与母线洞交叉口的支护。

4.3. 关键开挖步分析

对于在立体开挖方案 2，主厂房下部进行立体开挖的洞室规模均较小，而岩体本身质量较好，除了在断层处局部出现屈服区外，其他部位岩体均为出现屈服区，洞周围岩整体稳定；对于立体开挖方案 1，与常规开挖方案的差别主要是开挖第三层岩体和开挖第四层岩体时形成临空(如图 4)，对围岩稳定和施工安全存在隐患，因此重点对比开挖第三层岩体和开挖第四层岩体时洞周围岩的稳定状况。

1) 开挖第三层岩体

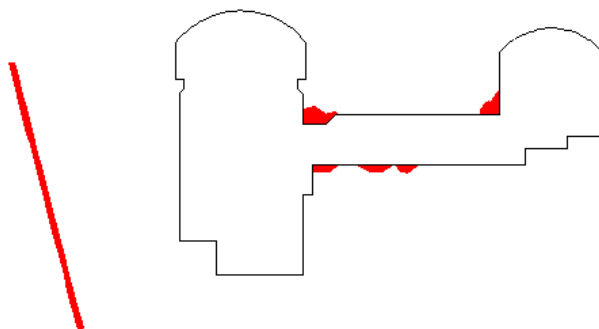


Figure 11. Yield zone on 1# electrical wire hall section
图 11. 1#母线洞轴线剖面屈服区分布示意图

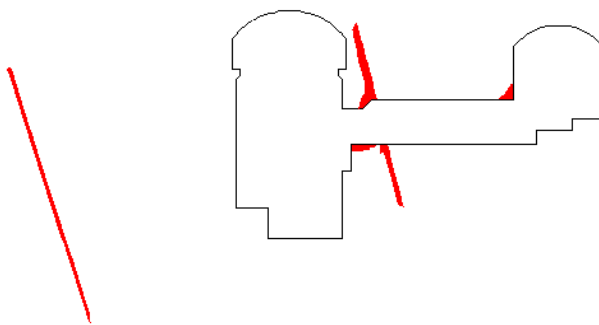


Figure 12. Yield zone on 3# electrical wire hall section
图 12. 3#机组中心线剖面屈服示意图

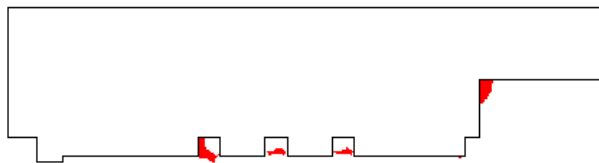


Figure 13. Yield zone on longitudinal section of main power house
图 13. 主厂房轴线剖面屈服区分布示意图

第三层岩体开挖时引起的洞周围岩的变形和该步开挖完成时的屈服区分布分别如图 14~图 15 所示。由图 14 可知,开挖第三层岩体时洞周围岩的变形仍指向洞内临空面方向,围岩最大位移约为 5 mm;由图 15 看出,开挖第三层岩体时洞周围岩的屈服区主要分布在厂房母线洞顶拱在主变洞和厂房洞室出露处附近以及断层内部,洞周围岩的屈服区深度小于 4 m,且开挖第三层岩体时洞周围岩整体稳定。

2) 开挖第四层岩体

第三层岩体开挖时引起的洞周围岩的变形和该步开挖完成时的屈服区分布分别如图 16~图 17 所示。

由图 16 可知,在主厂房上游侧第四开挖层岩体上部的岩体往下游斜向上变形,下部的岩体往下游斜向下变形,这是由于第四层岩体开挖前上下层岩体已经挖空,开挖第四层时,第四开挖层岩体附近的围岩向外凸起变形所致;围岩最大位移约为 7.5 mm;由图 17 看出,开挖第四层岩体时洞周围岩的屈服区主要分布在母线洞在主变洞和厂房洞室出露处附近以及断层内部,洞周围岩的屈服区深度小于 3 m,且

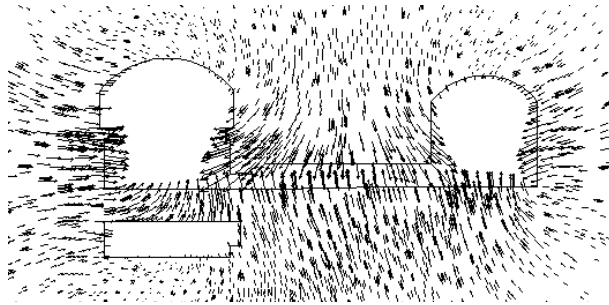


Figure 14. The displacement vector induced by excavation on 3# electrical wire hall section

图 14. 3#母线洞剖面位移矢量图

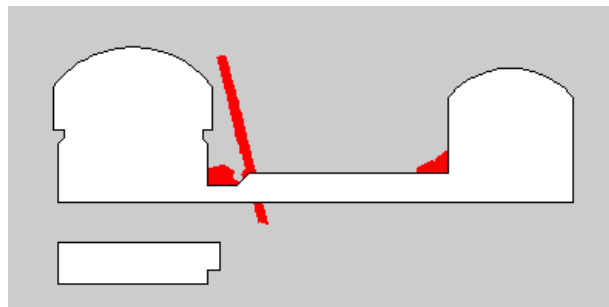


Figure 15. Yield zone on 3# electrical wire hall section

图 15. 3#母线洞剖面屈服区分布

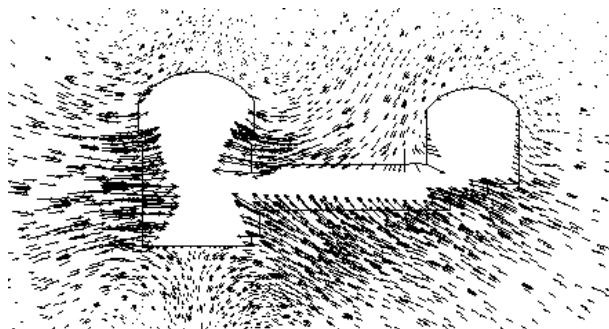


Figure 16. The displacement vector induced by excavation on 3# electrical wire hall section

图 16. 3#母线洞剖面位移矢量图

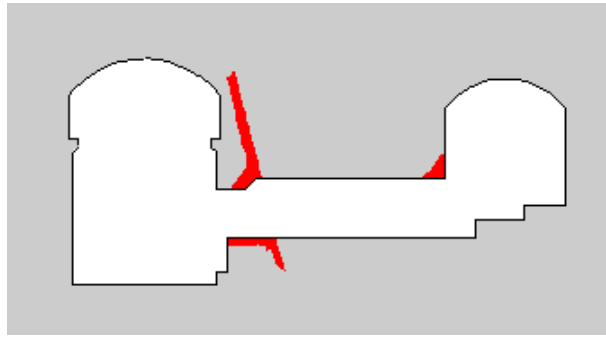


Figure 17. Yield zone on 3[#] electrical wire hall section
图 17. 3[#]母线洞剖面屈服区分布

开挖第四层岩体时洞周围岩整体稳定。

5. 结论

针对文登抽水蓄能电站地下厂房的地质条件、可能的开挖方案，建立精细的有限元模型，进行了非线性有限元仿真分析，取得如下主要成果和认识：

- 1) 根据实测应力值，反演了厂区的初始地应力场，该区属于中等地应力水平，反演结果合理。
- 2) 根据拟定的洞室群开挖施工方案，从变形、应力分布及屈服区情况对比了三个开挖方案。结果表明：
 - a) 由于地下厂房布置在 I 类围岩内，且岩体条件总体较好，因此三个开挖方案在变形、应力分布及屈服区等指标方面差异不大，以弹性变形为主，整体围岩稳定，局部的变形和应力主要受 f_{202} 和 f_{203} 断层的影响。
 - b) 立体开挖方案 1、立体开挖方案 2 的洞周变形与常规开挖方案的洞周变形相差小于 1 mm。
 - c) 洞周围岩总体处于受压状态，在洞周部分断层出露处和洞室底板局部出现受拉区域，最大拉应力小于 2.0 MPa，主压应力小于 20 MPa。
 - d) 屈服区主要分布在主洞室与母线洞交叉部分及受开挖影响的断层区域内，洞周围岩局部最大屈服区深度均小于 4 m。
 - e) 应在主洞室与母线洞交叉等部位围岩加强支护。
- 3) 常规开挖方案与拟订的两个立体开挖方案在施工过程中围岩整体均稳定，仅从围岩稳定的角度来看是可行的。因此，在制定开挖实施方案时可根据进度要求、施工条件等优化开挖步序。

参考文献

- [1] 文俊杰, 俞猛, 等. 大朝山水电站地下厂房洞室群立体开挖施工[J]. 水力发电, 2001(12): 41-44.
- [2] 杨典森, 李术才, 陈卫忠, 等. 龙滩水电站地下洞室群施工顺序及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2003, 22(S1): 2254-2258.
- [3] 傅少君, 张丙文, 邱焕峰. 瀑布沟地下厂房施工期变形与稳定的跟踪预报[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(4): 24-47.
- [4] 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.
- [5] 王毅. 向家坝电站右岸地下主厂房开挖质量与进度控制[J]. 人民长江, 2015, 46(2): 19-22.
- [6] 胡晓林. 大朝山水电站地下厂房开挖与支护施工[J]. 人民长江, 2001, 32(2): 15-17.
- [7] 方丹, 陈建林, 张帅. 杨房沟水电站地下厂房围岩稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2094-2099.
- [8] 王瑞华, 温家华, 李云龙, 等. 河北丰宁抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定计算分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(3): 182-186.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org