

地下厂房布置优化及施工过程的显式有限差分法数值模拟

张 明, 孙思奥, 李仲奎

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 在支护条件下模拟岩土工程的施工过程时, 无论在二维还是三维数值计算方面, 显式有限差分法连续介质快速 Lagrange 分析程序 FLAC^{2D} 和 FLAC^{3D} 具有明显优势。以雅砻江官地水电站地下厂房洞室群为研究对象, 结合水电站地下厂房的主厂房、主变室和尾水调压室 3 大洞室平行布置的特点, 并考虑模拟效率和计算成本, 首先采用 FLAC^{2D} 进行地下厂房 3 大洞室各种布局和间距方案的分析比较和优化, 得到安全经济的方案; 再利用 FLAC^{3D} 对确定方案下厂房洞室群在支护条件下的施工过程进行三维模拟分析, 计算得到在开挖过程中洞室围岩的变形、应力、塑性区分布以及支护结构的受力特征。这种综合利用 FLAC^{2D} 和 FLAC^{3D}, 对地下厂房布置优化和施工过程分别进行二维和三维显式有限差分法数值模拟的计算方案合理可行, 所得结果和规律可用于指导地下厂房的设计和施工。

关键词: 水利工程; 地下厂房; 数值模拟; 施工过程; 显式有限差分法; 布置优化

中图分类号: TV 731.6

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3760 - 08

NUMERICAL SIMULATIONS OF LAYOUT OPTIMIZATION AND CONSTRUCTION PROCESS OF UNDERGROUND POWERHOUSE WITH EXPLICIT FINITE DIFFERENCE METHOD

ZHANG Ming, SUN Si'ao, LI Zhongkui

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Numerical simulation is one of the main approaches to deal with such problems as reasonable layout and construction of underground powerhouse. The computer codes for fast Lagrangian analysis of continua, FLAC and FLAC^{3D}, with the explicit finite difference method are regarded to be suitable respectively for both two- and three-dimensional numerical simulations of problems involving supported construction process in geotechnical engineering. As an engineering example, the cavern group of the underground powerhouse of Guandi Hydropower Station on the Yalong River in Southwest China is analyzed. The two-dimensional FLAC analysis is performed firstly for the optimization of location and spacing schemes of the three main chambers, i.e. the generator chamber, the main transformer chamber and the tail water surge chamber, considering their parallel arrangement and the modeling efficiency and computing cost. Then, the entirely-supported construction process of the cavern group of the underground powerhouse under the determined optimal layout scheme is simulated in three dimensions with FLAC^{3D}. The distributions of displacement, stress and plastic deformation in the rock masses surrounding the caverns and the loads carried by the supporting structures are obtained. It is proven by the results that the numerical simulations of the layout and construction process of underground powerhouse with explicit

收稿日期: 2007 - 02 - 26; **修回日期:** 2007 - 06 - 01

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50539090)

作者简介: 张 明(1965 -), 男, 博士, 1988 年毕业于西安交通大学工程力学系, 现任副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。

E-mail: mzhang@tsinghua.edu.cn

finite difference method using respectively FLAC^{2D} and FLAC^{3D} match those of the practical case. The results from nonlinear stress analyses can be used to guide the design of excavations and rock supporting mechanisms.

Key words: hydraulic engineering; underground powerhouse; numerical simulation; construction process; explicit finite difference method; layout optimization

1 引 言

地下厂房往往是高山峡谷地区(如我国水电资源丰富的西南、西北地区)水电站的最佳厂房形式^[1]。实践表明, 尽管地下工程土建费用较高, 但在岩石较好的地区, 建造地下厂房仍然是最经济的。大型地下厂房洞室群的布置格局, 以及开挖、支护施工方案, 关系到洞群围岩的安全稳定和厂房的建设费用, 应尽可能对其进行优化分析比较。鉴于洞室围岩、支护系统的应力和应变受开挖、支护程序的强烈影响, 以及洞室群形状和岩体结构的复杂性, 目前采用较多的是数值模拟方法^[2-3]。与其他分析手段相比, 数值模拟方法具有快速、便捷、费用少等特点, 可以灵活模拟岩体的各种特性以及施工过程, 还易于改变参数、进行重复计算。

在各种数值方法中, 有限元法采用最多^[4-6], 但其他方法如显式有限差分法^[7-9], 在土木工程中具有明显优势。基于该法的连续介质快速 Lagrange 分析程序 FLAC^{2D} 和 FLAC^{3D} 也已广泛应用于地下工程实践^[10-16], 并得到进一步开发^[17]。

官地水电站位于四川省凉山彝族自治州西昌市与盐源县交界的雅砻江上, 是二滩水电站上游的衔接梯级, 下距二滩水电站 145 km。官地水电站是雅砻江下游梯级开发的第三级梯级, 主要任务是发电。官地水电站采用右岸地下厂房的布置形式, 其厂房洞室群规模巨大, 主要由引水洞、主厂房、母线洞、主变室、尾水调压室和尾水洞等组成。厂房内安装 4 台 600 MW 机组, 全长 243.40 m, 其中主机间长 159.50 m, 安装间长 66.90 m, 副厂房长 17.00 m; 厂房开挖高度 77.50 m, 吊车梁以下开挖跨度 29.80 m, 以上开挖跨度 31.90 m。主变室长 178.50 m, 宽 18.80 m, 高 26.20 m。尾水调压室长 235.00 m, 采用“两机一室一洞”布置型式, 设置 2 个条型调压室, 下室宽度 20.00 m, 洞高 73.50 m。主副厂房、主变室、尾水调压室三大洞室平行布置于岩层性质较好的 P₂β₁⁵ 厚层斑状玄武岩中。

本文以官地水电站地下厂房洞室群为背景, 利

用显式有限差分 Lagrange 分析程序, 对大型地下厂房的布置、开挖支护施工过程分别进行二维和三维的数值仿真分析, 提出地下洞室工程从布置到施工利用 FLAC 软件全程进行数值模拟的方法合理可行, 所得结果可以为大型地下厂房的设计提供参考依据。

2 数值模拟方法和程序

地下厂房洞室的一个首要问题就是确定其布置方案, 亦即在考虑总体枢纽布置、给定地质地形条件和地应力条件下确定三大洞室的布置格局及其间距。通常三大洞室平行布置, 有三大洞室基本在一个水平面上的“一”字形布局, 以及抬高主变室位置的“品”字形布局(见图 1)。因此, 在进行厂房布置方案比较时, 要考虑 2 种布局, 而每一种布局又要比较多种洞室间距方案。

地下厂房布置优化问题本质上是三维的, 但主要是一个平行洞室之间相互作用的问题, 能够采用较为简单的二维分析^[2]。对于同样一个问题, 采用显式有限差分法程序, 三维分析的 RAM 和 CPU 容量需求一般均至少 10 倍于二维分析^[3]。为此, 可采用平面应变假设, 选取典型断面作二维数值模拟。

官地地下厂房布置方案优化采用显式有限差分法二维连续介质快速 Lagrange 分析程序 FLAC^[7], 计算断面选取厂房洞室中间断面。首先需将实测点地应力换算为计算断面上相应点的地应力, 再通过计算断面上地应力的反演回归得到初始地应力场。对每种厂房布置方案均需生成计算网格, 用位移、应力及塑性区等特征量来判断方案的相对优劣。计算时不考虑开挖支护的实际施工过程, 由此所得结果不影响布置方案的优选结果。

对于确定布置方案下的地下洞室群, 有必要按施工期全过程进行三维数值分析。洞群施工遵循一定的开挖程序, 并采取衬砌、锚索、锚杆、喷混凝土等支护措施。当考虑有支护开挖或非线性材料行为时, 围岩和支护系统的应力、应变分布都依赖于开挖顺序^[2]。为得到符合实际的计算结果, 有效地

指导设计和施工，这些开挖顺序和支护措施都须予以模拟。对于官地地下厂房洞群施工过程中，利用显式有限差分法三维连续介质快速Lagrange分析程序FLAC^{3D}进行数值模拟^[8]。

计算机程序的选择应当使模拟对象的主要方面得以充分反映，FLAC^{2D}和FLAC^{3D}适于绝大多数的工程力学问题，尤其是材料的弹塑性、大变形分析、流变预测和施工过程的数值模拟。它们可实现对岩石、土体等材料 and 开挖、填筑等多种工况的模拟，允许指定分区中材料参数的统计分布和变化梯度以模拟复杂的地质条件；其梁、锚杆、桩和板壳等结构单元可用于模拟锚杆、锚索、喷射混凝土、衬砌等加固措施，衬砌和锚杆的设置不受网格划分和节点分布的影响，锚杆的锚固方式又可以是端锚、全长锚固、任意长度锚固或预应力锚固；其界面单元考虑2种或多种材料界面的间断性质，可用于模拟节理、断层等地质构造。此外，它们采用显式算法求解方程，每一步计算所需计算机内存很小，在较低配置的计算机上即可进行大规模的计算；其内嵌式编程语言也很强大，能够满足更复杂的需求。

3 计算模型

计算区域主要按照地下厂房布置及厂区的地形，并满足一定的边界效应的要求来确定，根据地质剖面可判定计算区域内的岩性材料分区、节理、断层等。计算区域内洞群为主副厂房、主变室和尾水调压室三大洞室。官地地下厂房洞群分析区域主要涉及P₂β₂和P₂β₅厚层玄武岩，同一岩性又划分为新鲜、微弱风化和强风化三个岩带，其物理力学性质见表1。在官地厂房布置方案比较和施工过程中数值模拟中，分别采用Drucker-Prager准则和最大拉应力准则判断岩体材料的剪切屈服和拉伸屈服。

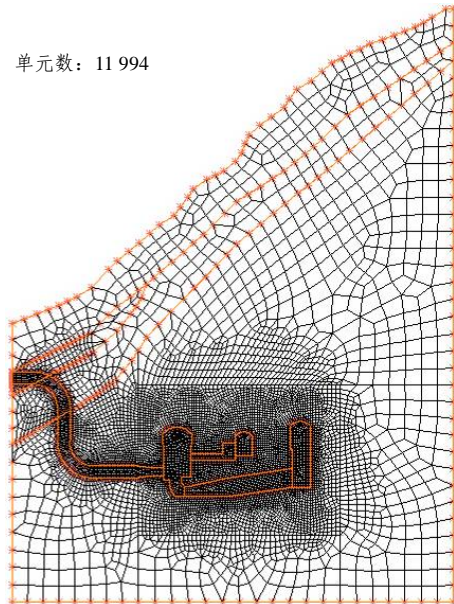
表1 围岩的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rock masses

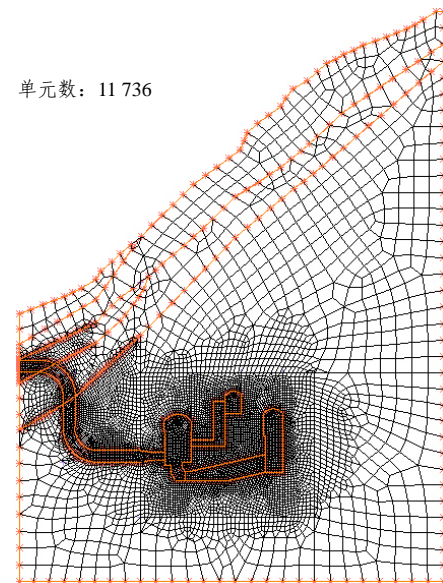
岩层	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	变形模量 E_0/GPa	泊松比 μ	黏聚力 c'/MPa	摩擦 因数 f'	抗拉强度 R_t/MPa
新鲜	2.75	20	0.20	2.000	1.40	2.00
微弱 风化	2.50	10	0.25	1.500	1.20	1.00
强风化	2.25	3	0.35	0.325	0.75	0.03

官地地下厂房布置方案数值模拟只考虑地下洞室毛洞无支护一次成洞工况，仅改变三大洞室的布

局及其间距。图1所示为计算范围及其中两种布局的计算网格，采用四节点四边形单元。平面计算中除三大洞室为全开挖外，其他部分的开挖按部分开挖考虑，其开挖后的材料参数按挖除部分厚度占三大洞室平均长度的比例相应折减。



(a) “一”字形布局



(b) “品”字形布局

图1 地下厂房布置方案比较的平面计算网格

Fig.1 Planar meshes for the layout comparison of underground powerhouse

地下厂房整个施工过程模拟的计算模型还要计及开挖方案。图2为官地水电站厂房分期开挖示意图，可形成多种开挖顺序，其中一种方案分9期开挖，分别是第一期开挖图中A部分，二期开挖B和1部分，三期开挖C，2，a和⑤部分，四期开挖D

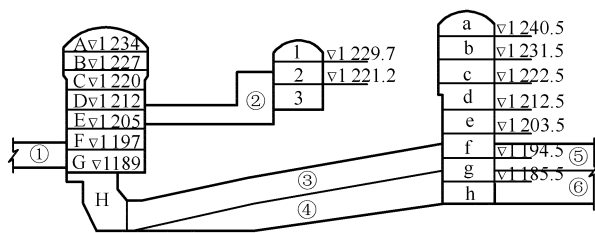


图 2 地下厂房开挖分层示意图(单位: m)

Fig.2 Layerwise excavation of underground powerhouse (unit: m)

和 3 部分, 五期开挖 E, b 和 ①~③, 六期开挖 F, c~e 和 ④部分, 七期开挖 G 和 ⑥部分, 八期开挖 H 和 f 部分, 九期开挖 g, h 部分。

根据平面计算所确定的洞室布置格局和布置间距, 以及上述计算范围和开挖方案, 可进行三维区域的网格离散。前已述及, 采用 FLAC^{3D} 模拟时, 网格离散并不会束缚支护结构网格的自由划分。官地地下厂房计算范围及其开挖部分的网格示于图 3, 采用 4 节点四面体单元, 其离散网格即可用于洞室开挖方案的比较研究。

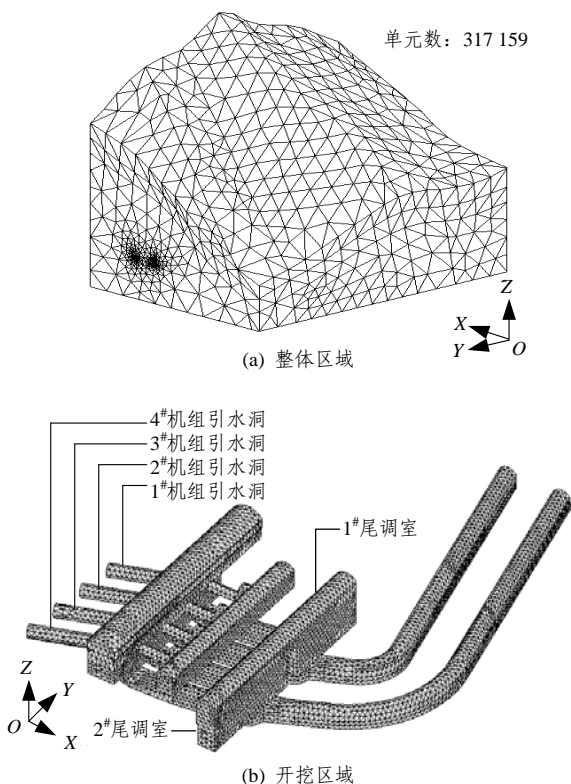


图 3 地下厂房三维计算网格

Fig.3 Three-dimensional meshes of underground powerhouse calculation

若模拟施工期全过程, 还须建立支护措施的数值模型。在官地地下厂房有支护开挖施工过程的计

算模型中, 支护结构比开挖分期延后一期施做, 岩锚吊车梁与支护同期回填建成。支护结构包括预应力锚索、系统锚杆、混凝土衬砌、喷混凝土层。表 2 列出了一种支护方案, 据此建立了混凝土衬砌、喷混凝土层计算模型以及锚杆、锚索计算模型, 并分别示于图 4, 5。建模时锚索和吊车梁锚杆的间距按实际模拟, 而其他锚杆的间距均加大至原间距的 2 倍, 其计算截面采用实际的 4 倍。

表 2 地下厂房支护方案

Table 2 Support schemes of underground powerhouse

部位	支护措施	说明
主厂房	高程 1 189~1 211 m, AR2;	①三大洞室顶拱、洞壁: API, AP2, S15
	边墙 高程 1 214~1 235 m, AR1	
主变室	高程 1 215~1 233 m, AR2	②AP1, AP2: 锚杆, III 级
		边墙 钢筋, $\phi 32$ mm, 间距 1.5 m, 长 6, 8 m, 相间布置
尾水调压室	上游: 高程 1 200.0~1 241.5 m, AR1; 高程 1 223 m 以下, 钢筋	AP3: 锚杆, III 级钢筋, $\phi 28$ mm, 间距 2 m, 长 6 m
	混凝土衬砌, 厚 1.0 m	
	下游: 高程 1 181.0~1 241.5 m, AR1; 高程 1 223 m 以下, 钢筋	
室边墙	混凝土衬砌, 厚 1.0 m	
尾水调压室隔墙	锚索, 吨位 $T = 2\ 000$ kN, 间距 4.5 m; AP1, AP2; S7	AR1: 锚索, $T = 1\ 750$ kN, 长 20 m, 间距 3 m
母线洞	0.8 m	AP3; S7; 钢筋混凝土衬砌, 厚 AR2: 锚索, $T = 1\ 500$ kN,
		长 15 m, 间距 4.5 m
尾水管	1.5 m	S7, S10, S15: 喷钢纤维
		AP3; S7; 钢筋混凝土衬砌, 厚 混凝土, C25, 厚度 7, 10, 15 cm

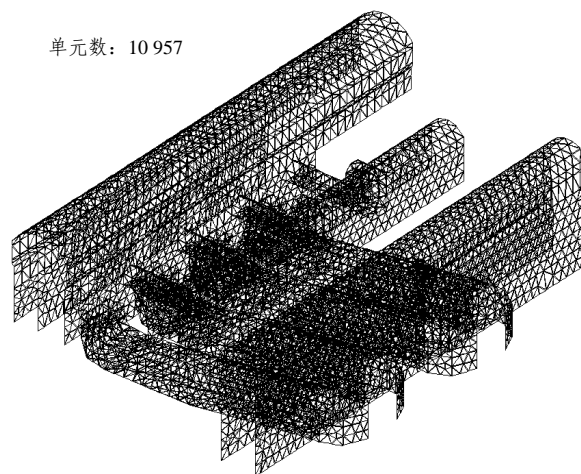
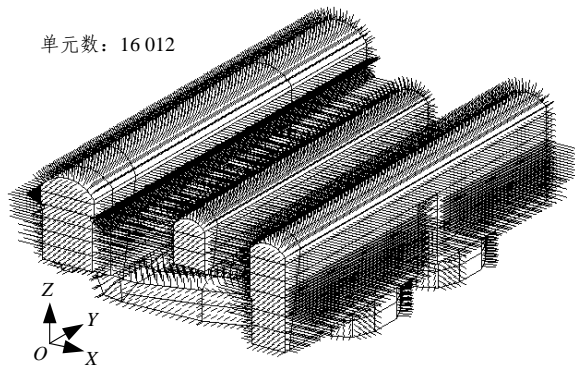


图 4 地下厂房混凝土衬砌、喷混凝土计算网格

Fig.4 Meshes for calculation of concrete lining and shotcrete of underground powerhouse

天然岩体赋存于地应力场中, 初始地应力场是地下厂房施工数值模拟的主要力源。官地水电站厂区初始地应力场实测最大主应力约 30 MPa, 方位 NW70°~80°, 属高地应力场。根据测点处的地应力



单元数: 16 012

图5 地下厂房锚杆、锚索计算网格

Fig.5 Cable elements for bolts and prestressed anchors of underground powerhouse

值,分别利用图 1, 3 所示的离散网格进行地应力反演回归分析(FLAC^{3D} 分析中生成初始地应力场的具体做法参见李仲奎等^[17]研究,对于 FLAC 可仿此进行),可得到二维,三维模拟的初始地应力场。

4 数值结果分析

4.1 地下厂房合理布置方案优化分析

首先,比较“一”字形和“品”字形 2 种布置方案,前者的主厂房与尾水调压室中心线间距为 140m,后者的为 113 m。相比前者,后者在洞周位移、二次应力分布和塑性区分布等反映洞室稳定性特征方面,均未见明显优势,有些方面如顶拱位移和塑性区面积还比前者略差,如两者的塑性区面积分别为 3 104 和 4 343 m²。此外,“品”字形方案使离相母线长度增加,投资加大;还要增加一条向上通往主变室的支洞,运行不够便利。总体考虑,“品”字型布局不如“一”字形布局方案。

其次,对于“一”字形布局,保持主厂房与主变室间距 49m 不变,研究主厂房与尾水调压室中心线间距分别为 130, 140 和 145 m 这 3 种布置方案。随着主变室与尾水调压室中心线间距的增加,两洞室控制点位移以及边墙相对收敛均趋减小,表明两洞室的稳定性趋于增加。140 m 方案的尾水调压室边墙中点水平相对收敛为 24.9 cm,比 130 m 方案小 6.5 cm,只比 145 m 方案大 1.5 cm,说明再增加洞室间距效果已不明显。140 m 方案的三大洞室的顶拱下沉变形量和底板的上抬量均明显小于其他两种方案。140 m 方案三大洞室的塑性区没有贯通,塑性区深度比 130 m 方案明显减少。因此,140 m 方

案是较好的。

最后,考察“一”字形布局在主厂房与尾水调压室中心线间距 140 m 条件下,主厂房与主变室间距分别为 46, 49 和 52 m 的布置方案。3 方案的特征位移和应力值差别不大,不起控制作用,应着重考察屈服区。3 方案的塑性区面积分别为 3 863, 3 104 和 4 733 m²。46 m 方案可减少母线长度,但主厂房和主变室间距减小,造成母线洞部位的屈服区增大;52 m 方案则造成主变室与尾水调压室岩柱的屈服区扩大,甚至发生贯通。故此,应选择 49 m 方案。

综上,可采用“一”字形布局、主厂房与尾水调压室中心线间距 140 m、主厂房与主变室间距 49 m 的布置方式。开挖、支护施工全过程的数值模拟可以此方案为基础进行。

4.2 地下厂房洞群施工过程数值模拟

地下厂房洞群数值模拟结果因开挖和支护方案而异,可以此比较开挖和支护方案的优劣。限于篇幅,本文仅给出官地水电站地下厂房洞群在前述开挖程序和支护措施下施工全过程的模拟结果。

(1) 位移

洞室开挖后,位移均为向临空面的回弹变形,边墙变形量大于顶拱和底板的变形量。图 6 为 2[#]机组中心断面在支护情况下开挖完成后的位移矢量图。从图 6 可以看出,主厂房和尾水调压室的边墙回弹变形是主要的变形,洞室的高边墙变形以水平为主。主变室和母线洞主要向主厂房变形,尾水管底板回弹变形则向尾水调压室偏斜。主厂房的拱顶变形变化很小,底板中点变形的变化也不太大。由此可知,开挖洞室的大小对围岩变形的方向起主要

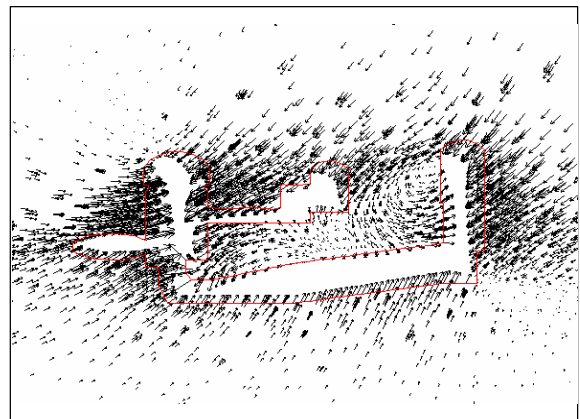


图 6 2[#]机组中心断面位移矢量图

Fig.6 Displacement vectors in the central cross section of unit 2

作用。主厂房在 2#机组中心断面上的特征点随开挖的位移变化如图 7 所示, 图 7 说明各点总的变形量随着开挖的进行而增大, 其他断面洞室特征点位移也有同样的规律。这种变形随开挖增大的规律是显而易见的, 也为杨典森等^[13]所证实。

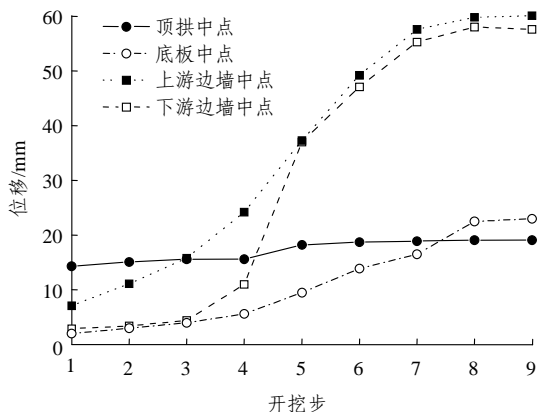


图 7 2#机组中心断面主厂房特征点位移随开挖的变化
Fig.7 Displacements of the selected key points of main powerhouse in the central cross section of unit 2 after each excavation step

(2) 应力

开挖引起洞室临近区域垂直于开挖面的第一主应力释放, 切向第三主应力数值增加。随着离开洞壁距离的增大, 围岩应力逐渐恢复至原岩应力。图 8 为主厂房纵剖面第三主应力 σ_3 等值线图, 从图 8 可知, 厂房拱顶、端墙、底板、机窝等处围岩应力均为压应力, 厂房拱顶、底板、机窝的压应力值很大, 其值在 40.00 MPa 以上。在各步开挖及最终开挖完成后, 各洞室边墙周围的第一主应力 σ_1 为 0~12.50 MPa。最大拉应力出现在主厂房下游边墙的台阶处, 量值为 2.25 MPa。

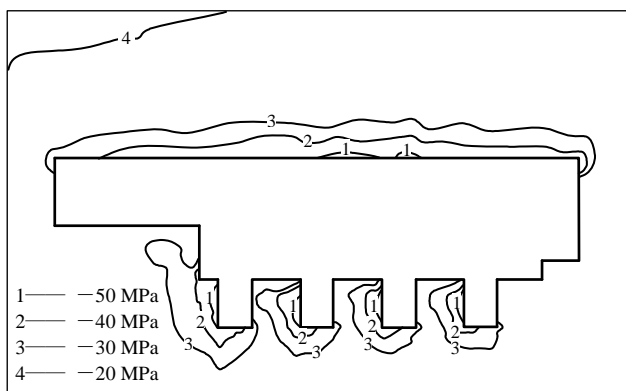


图 8 主厂房纵剖面第三主应力等值线图
Fig.8 The third principal stress contours in the longitudinal section of main powerhouse

(3) 塑性区

统计得到, 发生剪切和拉伸破坏的岩体总体积分别为 4.878×10^5 和 35 m^3 , 塑性区总体积为 $4.878 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。图 9 给出了 2#机组中心断面塑性区分布, 从图 9 可见, 塑性变形主要出现在洞室高边墙等处。

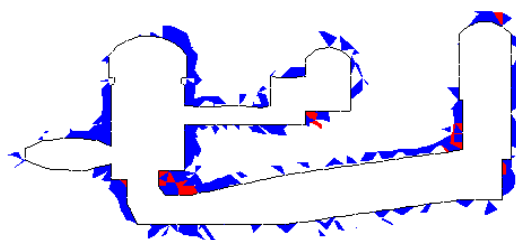


图 9 2#机组中心断面塑性区
Fig.9 Plastic strain distribution in the central cross section of unit 2

(4) 支护结构的受力

在洞室开挖过程中, 支护结构共同参与围岩应力的重分布, 因而承受一定的荷载。在安装间边墙下部、尾水调压室两端墙及下游边墙上部靠隔墙附近, 锚索的轴力有所减小。在安装间下游边墙中部、母线洞与主变室交汇处附近、主变室下游边墙中部、尾水调压室隔墙及下游边墙靠近岔洞部位, 锚索的轴力增加超过预拉力的 50%。受压锚杆主要集中在主厂房两端墙附近和安装间的边墙下部、主变室两端墙附近的拱顶部位、尾水调压室拱顶和下游边墙的中上部、尾水管周围。受拉锚杆主要集中于主厂房、主变室、尾水调压室靠近岔洞等处的下游边墙部位, 拉力都超过 125 kN。图 10, 11 分别为开挖

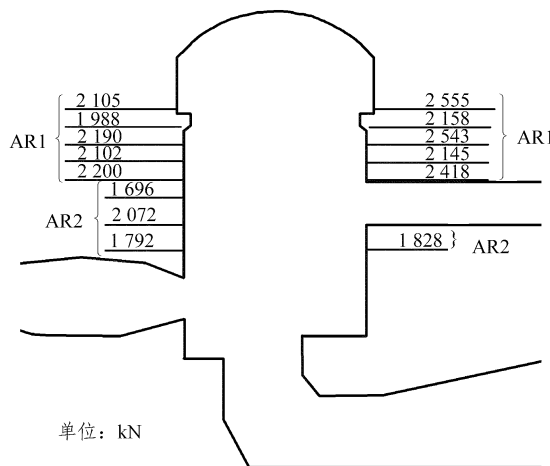


图 10 2#机组中心断面主厂房锚索受力图
Fig.10 Loads carried by anchors of main powerhouse in the central cross section of unit 2

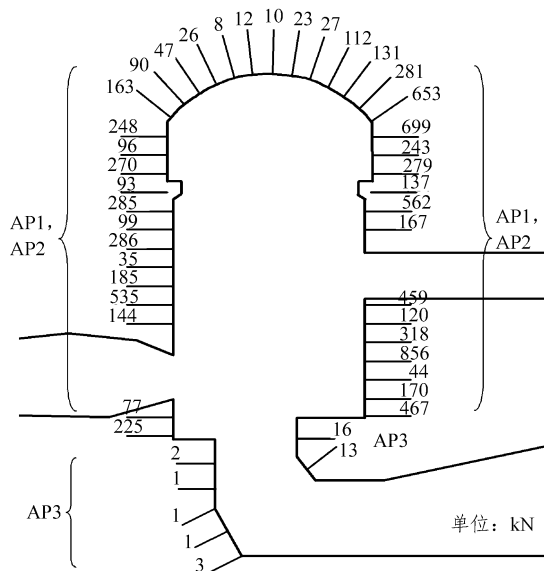


图 11 2#机组中心断面主厂房锚杆受力图

Fig.11 Bolts subjected to loads of main powerhouse in the central cross section of unit 2

完成后 2#机组中心断面主厂房锚索与锚杆的受力情况。

主厂房拱顶喷混凝土沿拱向产生较大的压应力，在 4#机组中心断面上为 -11.73 MPa；下游边墙中部喷混凝土中产生很大的竖直向拉应力，在 3#机组中心断面上为 15.27 MPa。主变室拱顶喷混凝土沿拱向出现了拉应力，在 4#机组中心断面上达 5.38 MPa。尾水调压室拱顶喷混凝土沿拱向的压应力均较大，尤其 4#机组中心断面达到 -21.74 MPa；下游边墙中部喷混凝土中的竖直向拉应力不大，最大为 1.39 MPa。这些应力有的超过了混凝土的抗压和抗拉强度，这是由于喷混凝土层是按弹性板壳计算造成的。

5 结论

本文以官地水电站地下厂房洞室群为研究对象，根据设计资料和地形地质资料，建立显式有限差分法分析数值模型，对地下厂房布置方案优化和施工全过程进行了数值模拟，从中可以明确以下几点：

(1) 以 FLAC^{2D} 进行地下厂房布置优化的二维分析，再以 FLAC^{3D} 对确定布置方案的洞群施工过程进行详细的三维数值仿真模拟，这种策略是可行的。这种做法也是将显式有限差分方法同时用于地下厂房洞群二维和三维分析的一次尝试。

(2) 主副厂房、主变室和尾水调压室三大洞室的布局及其间距，会影响洞周位移、二次应力分布和塑性区分布及施工及运行的便利，据此确定出官地水电站地下厂房最佳布置方案为主厂房与尾水调压室中心线间距 140 m、主厂房与主变室间距 49 m 的“一”字形布局方案。

(3) 官地水电站地下厂房为大跨度、高边墙洞室，且地应力较高，开挖后造成较大的应力释放，使得围岩向洞室临空面回弹变形。边墙位移大于顶拱和底板的位移；总体变形方向趋向较大的洞室；各点的总位移一般会随着开挖而不断增大。

(4) 在开挖过程中洞室围岩应力基本上为压应力，最大拉应力出现在主厂房下游边墙的台阶处，其量值并不大。相应地，洞周塑性区几乎全部为剪切屈服所造成，也没有出现屈服区贯穿。

(5) 在安装间边墙下部、尾水调压室两端墙及靠近隔墙的下游边墙上部，预应力锚索的轴力有所减小，也集中了部分受压锚杆，这些部位可减少支护。在主厂房、主变室等处的下游边墙中部、母线洞与主变室交汇处附近、尾水调压室隔墙及下游边墙靠近岔洞部位，锚索的轴力增加很多，锚杆拉力也较大，应加强支护。

参考文献(References):

- [1] 谷兆祺, 彭守拙, 李仲奎. 地下洞室工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.(GU Zhaoqi, PENG Shouzhuo, LI Zhongkui. Underground chamber engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.(in Chinese))
- [2] GIODA G, SWOBODA G. Developments and applications of the numerical analysis of tunnels in continuous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, 23(13): 1 393 - 1 405.
- [3] COULTHARD M A. Applications of numerical modelling in underground mining and construction[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1999, 17(3/4): 373 - 385.
- [4] 邬爱清, 徐平, 徐春敏, 等. 三峡工程地下厂房围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 690 - 695.(WU Aiqing, XU Ping, XU Chunmin, et al. Researches on stability for surrounding rock masses of underground powerhouse in the Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 690 - 695.(in Chinese))

- [5] 魏进兵, 闵 弘, 邓建辉. 龙滩水电站巨型地下洞室群稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 1): 2 259 - 2 263.(WEI Jinbing, MIN Hong, DENG Jianhui. Stability analysis of large-scale underground houses of Longtan hydroelectric project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.1): 2 259 - 2 263.(in Chinese))
- [6] 茹忠亮, 冯夏庭, 李洪东, 等. 大型地下工程三维弹塑性并行有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 141 - 1 146.(RU Zhongliang, FENG Xiating, LI Hongdong, et al. 3D elastoplastic parallel finite element analysis of large-scale underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 141 - 1 146.(in Chinese))
- [7] ITASCA. FLAC: Fast Lagrangian analysis of continua user manual (version 3.3)[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 1995.
- [8] Itasca Consulting Group, Inc.. FLAC^{3D}: Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions user manual(version 2.1)[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 1997.
- [9] 刘建华, 朱维申, 李术才. 岩土介质三维快速拉格朗日数值分析方法研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 525 - 529.(LIU Jianhua, ZHU Weishen, LI Shucai. Study on fast Lagrangian numerical analysis method for rock and soil medium in 3 dimensions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 525 - 529.(in Chinese))
- [10] 曾 静, 盛 谦, 廖红建, 等. 佛子岭抽水蓄能水电站地下厂房施工开挖过程的 FLAC^{3D} 数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 637 - 642.(ZENG Jing, SHENG Qian, LIAO Hongjian, et al. Numerical simulation with FLAC^{3D} on construction and excavation process of underground powerhouse of Fuziling pumped storage hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 637 - 642.(in Chinese))
- [11] 王克忠, 蔡美峰. 西龙池地下洞室围岩的现场监测及其稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5 956 - 5 960.(WANG Kezhong, CAI Meifeng. In-situ monitoring and stability analysis of surrounding rock mass for Xilongchi underground caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 956 - 5 960.(in Chinese))
- [12] 杨为民, 陈卫忠, 李术才, 等. 快速拉格朗日法分析巨型地下洞室群稳定性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 230 - 234.(YANG Weimin, CHEN Weizhong, LI Shucai, et al. Analysis of stability of surrounding rock mass of Longtan large underground powerhouse with FLAC^{3D}[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 230 - 234.(in Chinese))
- [13] 杨典森, 陈卫忠, 杨为民, 等. 龙滩地下洞室群围岩稳定性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 391 - 395.(YANG Diansen, CHEN Weizhong, YANG Weimin, et al. Stability analysis of surrounding rock mass of Longtan underground caverns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 391 - 395.(in Chinese))
- [14] 刘建华, 朱维申, 李术才, 等. 小浪底水利枢纽地下厂房岩体流变与稳定性 FLAC^{3D} 数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 484 - 2 489.(LIU Jianhua, ZHU Weishen, LI Shucai, et al. Analysis of rheological characteristics and stability of surrounding rock masses of Xiaolangdi hydrojunction underground caverns by using FLAC^{3D}[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2 484 - 2 489.(in Chinese))
- [15] 陈帅宇, 周维垣, 杨 强, 等. 三维快速拉格朗日法进行水布垹地下厂房的稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 047 - 1 053.(CHEN Shuaiyu, ZHOU Weiyuan, YANG Qiang, et al. Analysis of stability of surrounding rocks of Shuibuya underground powerhouse by three-dimensional fast Lagrangian method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 047 - 1 053.(in Chinese))
- [16] 姜谔男, 冯夏庭, 刘 建, 等. 基于三维数值模拟的地下大型洞室锚固参数智能优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 700 - 1 705.(JIANG Annan, FENG Xiating, LIU Jian, et al. Intelligent optimization of anchoring parameters for large underground caverns based on three-dimensional numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1 700 - 1 705.(in Chinese))
- [17] 李仲奎, 戴 荣, 姜逸明. FLAC^{3D} 分析中的初始应力场生成及在大型地下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.(LI Zhongkui, DAI Rong, JIANG Yiming. Improvement of the generation of the initial stress field by using FLAC^{3D} and application in huge underground cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 387 - 2 392.(in Chinese))