

基于FLAC 3D的大型地下洞室群分步开挖稳定性数值模拟研究

张亚勤¹, 孔维秋^{2,3}, 栗剑⁴, 岳好真^{2,3}, 李勇^{3,5*}

¹济南市公路管理局, 山东 济南

²山东大学土建与水利学院, 山东 济南

³山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南

⁴山东高速集团有限公司, 山东 济南

⁵山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

Email: *yongli@sdu.edu.cn

收稿日期: 2020年8月27日; 录用日期: 2020年9月9日; 发布日期: 2020年9月16日

摘要

中国的水电建设事业正在迎来又一次新的发展时期, 这些水电工程的地下厂房通常采用深埋的大型地下洞室群结构。洞室群大多处于高山峡谷等复杂的地质环境中, 并且岩体介质性质特殊, 使得分步开挖过程围岩稳定性问题突出。围岩稳定性研究有较多方法, 其中数值模拟方法高效、方便、灵活, 而基于快速拉格朗日分析的FLAC 3D数值计算是地下洞室围岩稳定性的有效分析方法。本文将以西部长江某水电站地下厂房为工程背景, 用FLAC 3D数值模拟方法来研究大型地下洞室群分步开挖稳定性, 具体内容及结果如下: 1) 拟定三种不同的开挖顺序, 用FLAC 3D软件模拟、计算分步开挖过程; 2) 分析计算结果, 总结洞室围岩变形、应力分布及塑性区范围变化规律, 给出开挖过程重点监测部位; 3) 对比计算结果, 评价不同开挖步序的合理性, 得出最优开挖顺序方案。

关键词

大型地下洞室, 分步开挖, 围岩稳定性, FLAC 3D

Numerical Simulation on Stability of Large-Scale Underground Caverns during Step-by-Step Excavation Based on FLAC 3D

Yaqin Zhang¹, Weiqiu Kong^{2,3}, Jian Li⁴, Haozhen Yue^{2,3}, Yong Li^{3,5*}

¹Jinan Highway Administration Bureau, Jinan Shandong

*通讯作者。

²School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan Shandong

³Geotechnical & Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan Shandong

⁴Shandong Hi-Speed Group, Jinan Shandong

⁵School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Email: *yongli@sdu.edu.cn

Received: Aug. 27th, 2020; accepted: Sep. 9th, 2020; published: Sep. 16th, 2020

Abstract

Hydropower construction in China is ushering in another new period of development, and large-scale underground cavern groups are mostly adopted in these projects. Moreover, these underground caverns are generally located in the high mountain-canyon areas which have complex geological conditions. And the rock mass is of special nature, which makes the problem of surrounding rock mass stability in stepped excavations prominent. There are a number of methods to study the stability of surrounding rock mass, in which the numerical simulation method is efficient, convenient and flexible. And the numerical calculation method of FLAC 3D based on fast Lagrange analysis is an effective method to analyze the stability of surrounding rock. In this paper, the FLAC 3D numerical simulation method is used to study the stability of large underground cavern groups by stepped excavation in a setting of a hydropower plant in western China. And the main investigation work and results focus on the following: 1) Three different excavation sequences programs were developed, and FLAC 3D software was used to simulate the stepped excavation process. 2) The results were analyzed and the deformation of the surrounding rock mass, the stress distribution and the variation range of the plastic zone are summarized. At the same time, the key monitoring parts in the excavation process are put forward. 3) The calculation results are compared in order to evaluate the rationality of different excavation sequences programs, and the optimal excavation scheme is selected.

Keywords

Large-Scale Underground Cavern, Stepped Excavation, Surrounding Rock Mass Stability, FLAC 3D

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

习近平总书记明确提出“节水优先，空间均衡，系统治理，两手发力”的治水思想，强调要通盘考虑重大水利工程建设，更多运用成熟适用技术等[1]。李克强总理在 2015 年两会期间政府工作报告会上指出“能源生产和消费革命，关乎发展与民生”，并提出“要积极发展水电”的要求。21 世纪以来，我国各种大中型水电站的建设兴起，如西部大开发实施，南水北调工程、长江三峡工程、黄河小浪底工程等。这些水电工程大多修建在我国西部及西南地区，以地下厂房的形式存在于复杂的地质环境中，加之岩体介质的复杂性，使得工程难度增大，灾害频发，水电资源开发面临挑战。

据统计目前在全球的可再生能源发电领域内水电的比重高达 80%，在中国，这一比例更是接近于 85%，所以水电是全球替代化石能源的第一主力[2]。我国水电资源总量位居世界第一，但开发利用水平较低，具

有较大的开发潜力。根据我国“十三五”相关规划信息,中国2020年力争常规水电装机达到3.5亿千瓦左右,2020年前重点开发雅砻江、大渡河、金沙江、澜沧江等河流,2020年后重点开发怒江和雅鲁藏布江,中国的水电建设即将迎来新一次的发展高潮。

我国西南部及沿海地区水资源较为丰富,所以水电工程大多修建在西南及沿海地区。这些水电工程的发电系统通常修建在地下岩体内,采用深埋的大型地下洞室群结构,在水利发电枢纽中具有多个相互平行的地下主厂房、主变室和尾闸室等相邻洞室。而我国这些水电工程大多集中在西南部地区,处于高山峡谷等复杂的地质环境中,埋深较深,规模较大,空间结构复杂。并且岩体介质性质特殊,具有不确定性和多变性,使得开挖过程具有很大的未知性。同时,大型地下洞室群的分步开挖伴随着围岩的应力重分布,是一个动态不可逆的过程,存在着各种未知的风险。

复杂的地质情况导致我国的大型地下洞室的开挖过程事故频发,如福堂、锦屏二级、金平水等水电站发生过多次岩爆事故[3][4][5][6],溪洛渡、锦屏一级、立州等水电站发生过局部塌方、岩体错位、变形较大、混凝土开裂等事故[7][8][9]。

正如世界上没有两片完全一样的树叶,也没有两个完全一样的地下工程,可见地下洞室工程具有复杂性、独特性和未知性。因此,对于大型地下洞室群分步开挖稳定性的研究对工程安全和国家的发展都具有重要意义。

综上所述,进行大型地下洞室群分步开挖稳定性的数值模拟研究具有较大的理论价值与工程意义,助力中国水电建设事业的顺利发展。

2. 国内外研究现状

随着国家经济、科学技术的不断发展,水电工程的规模也越来越大,地下洞室群作为水电站的主体建筑,由许多相互连通的厂房洞室组成,其规模也逐渐扩大,结构日趋复杂,加之所处的地质条件复杂性,使得洞室开挖过程中围岩稳定性问题突出。

2.1. 国内研究现状

国内外学者对于地下洞室围岩稳定性的研究还没有形成系统全面的方法,大多是依托具体工程案例进行综合分析或是依靠经验。

在数值模拟分析方面,国内学者陈浩等[10]通过基于三维弹塑性有限元数值计算理论的ABAQUS软件进行大型地下洞室群分期开挖围岩稳定性的研究。

左双英、李洁等[11]利用FLAC 3D数值分析软件或三维拉格朗日分析方法,对水电站地下厂房复杂洞室群进行开挖支护模拟,分析了在无支护和系统支护工况下,开挖完成后围岩的位移场、应力场、塑性区等的分布特征和演化规律。

朱维申[12]等用数值模拟方法研究了不同岩类、埋深、侧向地应力条件下洞壁位移量的变化规律,并得出预测围岩位移量的拟合多项式,以此为基础提出了作为围岩稳定性判据的相对位移量的具体数值。

郑颖人[13]等提出了一种基于半解析元法的三维弹塑性围岩稳定性分析方法。

杨典森等[14]应用FLAC 3D方法,研究地下洞室群在开挖、支护过程中围岩变形及支护结构的受力特点。

在综合方法方面,邱道宏等[15]采用数值计算和现场监控测量的方法,分析大型地下洞室分步开挖围岩稳定性,并以此来预测岩爆发生情况。

孟国涛等[16]通过室内岩石力学试验与FLAC 3D相结合的方法,分析洞室开挖过程中的围岩应力集中区;通过3DEC与位移监测相结合的方法进行围岩支护措施分析;并通过研发的Comba本构模型与声

波检测结合的方法, 研究柱状节理围岩稳定性。

撒文奇等[17]以数值模拟技术为基础, 建立现场施工的动态仿真, 并提出地下洞室群围岩劣化损伤折减计算方法。

在创新方面, 苏国韶等[18]以三维弹塑性数值计算为基础, 提出智能优化方法研究高地应力条件下的地下洞室群开挖围岩稳定性。李建贺等[19]提出了用特征角和应力扰动指标 SDI 来表征洞室围岩的应力场受到扰动的程度大小。吴杉[20]对地下洞室群的施工方案进行动态规划, 以达到优化围岩稳定效果的作用。高玮等[21]创新提出了蚁群算法来处理地下洞室群开挖顺序的组合优化问题。陈明等[22]从施工全过程的不同方面进行优化来提高洞室开挖围岩稳定性。黄仁东等[23]以熵权法和理想点法为原理进行围岩稳定性研究。

2.2. 国外研究现状

Johansson 等[24]对不同结构类型的岩体行为进行三维的反演计算分析, 着重讨论了节理岩体的反演分析, 并指出合理的岩体参数对于更好地理解开挖过程中的复杂岩体行为的重要性。

Jiao 等[25]运用三维离散元法和三维有限差分法, 对于节理对冲击波在节理岩体中的传播衰减规律的影响进行了数值模拟, 认为三维离散元分析法能够捕捉冲击波的关键特征, 并形象模拟节理, 作为一种非连续变形分析方法, 具有三维有限差分和二维分析方法不可替代的优点。

Ramamurthy 等[26]运用相似材料模型试验, 来模拟顶板的稳定性, 探究变形、屈服强度、应力变化等规律, 并总结出相应函数模型进行顶板变形及压力分布的预测。

N. M. Syrnikov 等[27]考虑人为因素对岩体变形状态变化的影响, 对地下洞室开挖过程中围岩塑性发展和应力状态的流变过程进行数值模拟, 为岩体行为的预测提供了依据。

Sitharam 等[28] [29]提出了一种简单实用的等效力学模型方法来表征岩体的强度和稳定性。这种方法基于大量的统计分析得到岩石强度与稳定性的关系, 将节理岩体表示为等效连续体, 这种开发模型被并入到非线性有限元代码中进行等效分析。基于此模型模拟节理岩体中的开挖过程, 并运用到三个工程实例当中得到了验证。

Lee 等[30]运用现场仪表和三维数值分析联合的方法来进行全过程掌控, 利用现场仪表动态监测大型地下洞室开挖之前, 之中和之后的掌子面三维应力变化和完整的位移历史, 进行后监测分析, 利用三维数值分析法检验岩体力学行为及开挖推进效果。

Stabel 等[31]也进行了工程勘察, 设计和施工全过程监测和测量, 并将第一阶段的大型洞穴建设过程中吸取的经验教训应用于扩建一座额外的洞穴当中。

Hibino 等[32]运用现场试验的方法测量分析了大型地下洞穴开挖过程中节理岩体的各向异性行为, 探究岩体行为与洞穴尺寸规模的关系。

3. 工程概况

该地区工程岩体结构为层状结构, 地下泵站系统以 III 类围岩为主, 局部分布有 IV 类围岩, 以页岩为主。主泵室部位 III 类围岩约占 85%; IV 类围岩约占 15%。下泵站范围内发育的裂隙有两个显著的特点: 首先就是 NE 向陡倾角裂隙发育, 其次为垂直 NE 向一组 NW 向裂隙发育, 缓倾角裂隙主要为层间裂隙。结构面多泥钙质充填或无充填。

本工程由引水干线、灌区工程、工业和城镇供水工程三部分组成。引水干线主要建筑物包括进水塔、隧洞、地下泵站、连通洞及补水泵站、调蓄库及末端出水池。

本工程为 II 等工程, 取水口、引水隧洞为 2 级建筑物, 地下泵站为 1 级建筑物。

工程取水枢纽从取水口至出水池段,沿线长约 6.2 km,设计取水流量 $20 \text{ m}^3/\text{s}$,泵站装机容量 8.4 万 kW。包括取水口、引水隧洞(1#隧洞)、调压井、引水压力管道、地下泵站、出水压力管道、出水池建筑物。

本区地震动反应谱特征周期值为 0.40 s,地震动峰值加速度值山前大断裂以东为 0.10 g ,地震基本烈度为 VII 度。

地下泵站厂区主要建筑物由地下泵站(包括主泵房、副厂房和安装间)、通风机室、出水阀室、电缆竖井及连接洞、交通洞、通风洞、灌浆排水廊道、地面厂区等建筑物组成。安装间布置在主泵房右侧,副厂房布置在左侧,出水阀室布置在地下泵站厂房下游侧,距厂房净距 20 m。为水泵电动机及变频启动装置供电的 10 kV 电缆从地面厂区的综合设备楼通过电缆竖井及连接洞引接。交通洞进口位于厂房右端,进入安装间。通风洞进口位于地面厂区平台西侧,从左端进入与厂房顶拱相连的 2#通风机室。

4. 三维数值模拟

采用 FLAC 3D 对地下厂房洞室群在分步开挖过程中的稳定性进行模拟计算。为了分析洞室群开挖步骤的合理性,对比研究了三种开挖顺序下的地下洞室群围岩在分级开挖过程中位移场、应力场分布规律及围岩塑性区演化规律,揭示可能的围岩失稳方式及失稳部位,并得出最优方案。

4.1. 开挖方案

根据工程实际与工程经验,地下洞室采用分层开挖的方式。地下厂房边墙不同高程分别与交通洞、通风洞、泵站支洞等洞室相通,开挖中按照小洞贯大洞(室)即小洞提前进入大洞的原则进行开挖。小洞洞口先进入厂房,再进行厂房边墙的开挖。

洞室群分步开挖三大开挖顺序方案为:1) 主泵室与出水阀室同步进行;2) 主泵室与出水阀室同高程开挖;3) 主泵室与出水阀室不同步错层施工。三种开挖方案开挖位置如下图 1 所示。

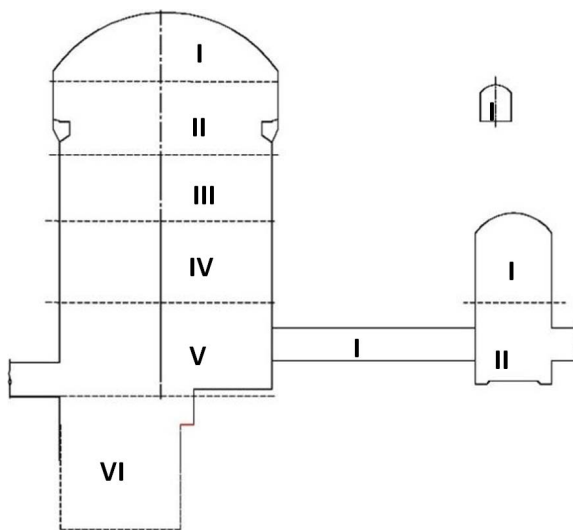


Figure 1. Schematic diagram of the excavation sequence plan for the section of the cavern group
图 1. 洞室群剖面开挖顺序方案示意图

4.2. 相关参数选择

在模型建立过程中,模拟了 4#机组的主泵房、出水阀室、灌浆排水廊道、泵站 1 号、2 号、3 号支洞等,以及考虑对主泵房、出水阀室稳定影响较大的破碎带。相关参数的选择如表 1 所示。

Table 1. Rock mechanical parameters
表 1. 岩体力学参数

类别	密度(kN/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比	抗剪强度		
				凝聚力(MPa)	内摩擦角(°)	
围岩	III	27.80	27	0.26	5.03	45
破碎带等	IV	21.25	0.8	0.23	0.6	42

4.3. 网格与关键点

经过前期三维初始地应力反演拟合计算，在包括厂房及出水阀室的中心区域，在 x 方向的侧压系数 K_x 约 1.003，而 K_y 在 y 方向则为 1.4 左右。

4#机组三维模型共划分 141,246 个单元，27,583 个节点。4#机组厂房网格图如图 2 所示。

为了进一步说明地下厂房各工程部位在分级开挖过程中的应力、变形特征，对各机组段的横剖面，分别在主泵室、出水阀室中选择代表性的特征点，提取特征点的位移、应力量值。各机组段特征点示意图参见图 3。

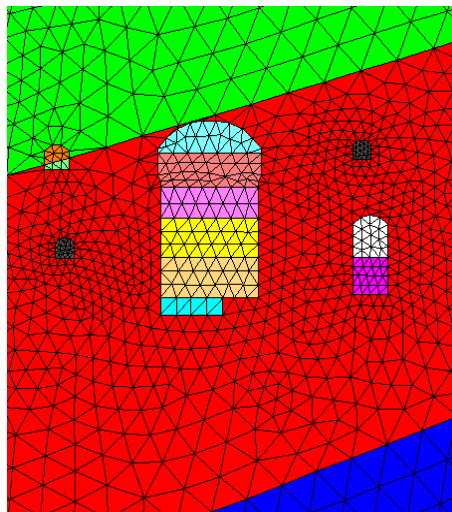


Figure 2. 4# grid division diagram of unit workshop

图 2. 4#机组厂房网格划分图

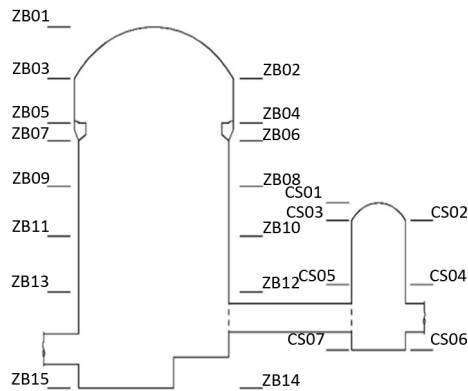


Figure 3. Number and location of key points of excavation

图 3. 开挖关键点编号和位置

5. 模拟结果分析

5.1. 位移变化结果分析

主泵室和出水阀室各个关键点最终位移具体计算位移值如表 2 所示。

Table 2. The final displacement values of key points in the main pump room and outlet valve room (unit: mm)

表 2. 三种开挖方案主泵室、出水阀室关键点最终位移值(单位: mm)

关键点	开挖方案 1		开挖方案 2		开挖方案 3		
	水平位移	竖直位移	水平位移	竖直位移	水平位移	竖直位移	
主泵房	ZB01	-0.589	-1.733	-0.576	-1.694	-0.351	-1.627
	ZB02	-5.360	-1.81	-5.343	-1.730	-5.244	-1.606
	ZB03	4.088	0.127	4.079	0.115	4.437	0.122
	ZB04	-6.506	-1.479	-6.475	-1.414	-6.439	-1.247
	ZB05	5.682	0.926	5.657	0.897	6.066	0.892
	ZB06	-6.973	-1.464	-6.915	-1.420	-6.934	-1.233
	ZB07	6.489	1.109	6.455	1.075	6.895	1.054
	ZB08	-7.457	-1.441	-7.325	-1.422	-7.378	-1.215
	ZB09	7.042	1.280	7.007	1.242	7.457	1.220
	ZB10	-8.267	-1.042	-7.926	-1.178	-8.206	-0.988
	ZB11	8.275	0.918	8.237	0.875	8.727	0.767
	ZB12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	ZB13	7.546	0.948	7.470	0.907	7.947	0.707
	ZB14	-1.533	1.485	-1.581	1.397	-2.140	1.313
	ZB15	5.783	1.334	5.683	1.316	6.042	0.990
出水阀室	CS01	-4.422	-1.325	-4.430	-1.230	-4.450	-1.280
	CS02	-5.098	-1.366	-5.125	-1.275	-5.041	-1.197
	CS03	-3.458	-0.173	-3.499	-0.094	-3.724	-0.231
	CS04	-5.703	-1.101	-5.762	-1.013	-5.689	-0.838
	CS05	-0.671	1.218	-1.047	1.323	-1.644	1.169
	CS06	-2.237	0.446	-2.304	0.520	-2.556	0.716
	CS07	-0.899	1.704	-0.978	1.781	-1.460	1.827

各方案开挖后的总位移云图如图 4~6 所示。

从图 7 各关键位置的最终位移可以看出,三个开挖方案总体规律一致。主泵室水平位移最大值均出现在边墙 ZB10 和 ZB11 处,垂直位移最大处均在拱顶及拱脚部位,但开挖方案二小于开挖方案一、三。

出水阀室水平位移最大值均出现在下游边墙 CS04 处,垂直位移最大值均出现在上游拱脚 CS07 处,总体来说方案二扰动最小。

如上述,方案二优于方案一、三。

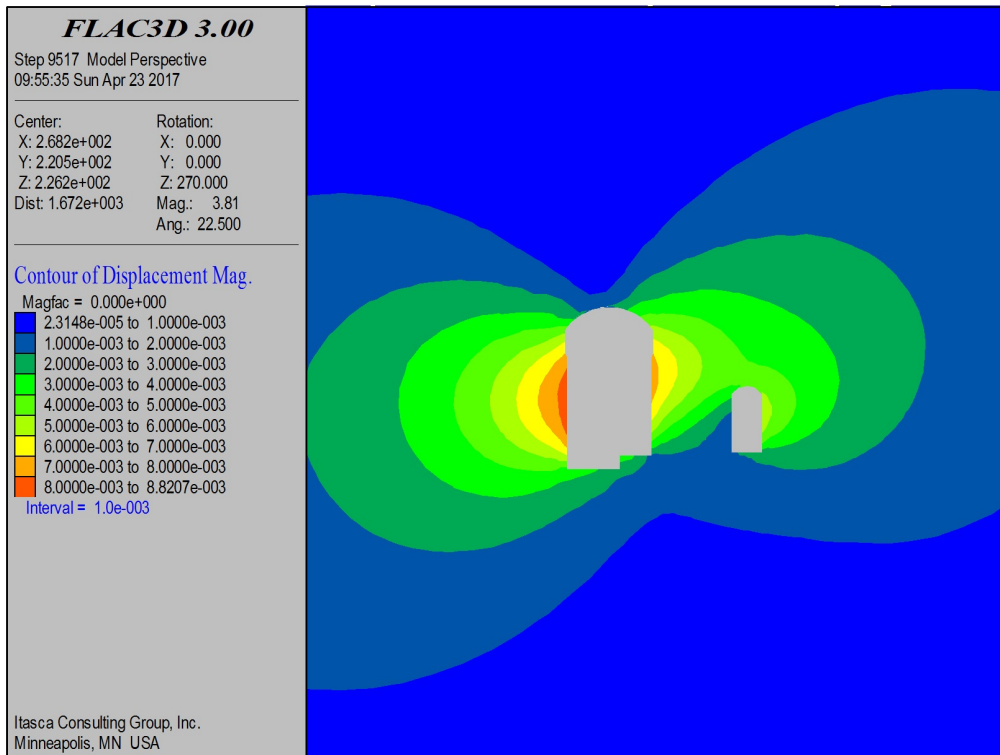


Figure 4. Plan 1 total displacement cloud map
图 4. 开挖方案一总位移云图

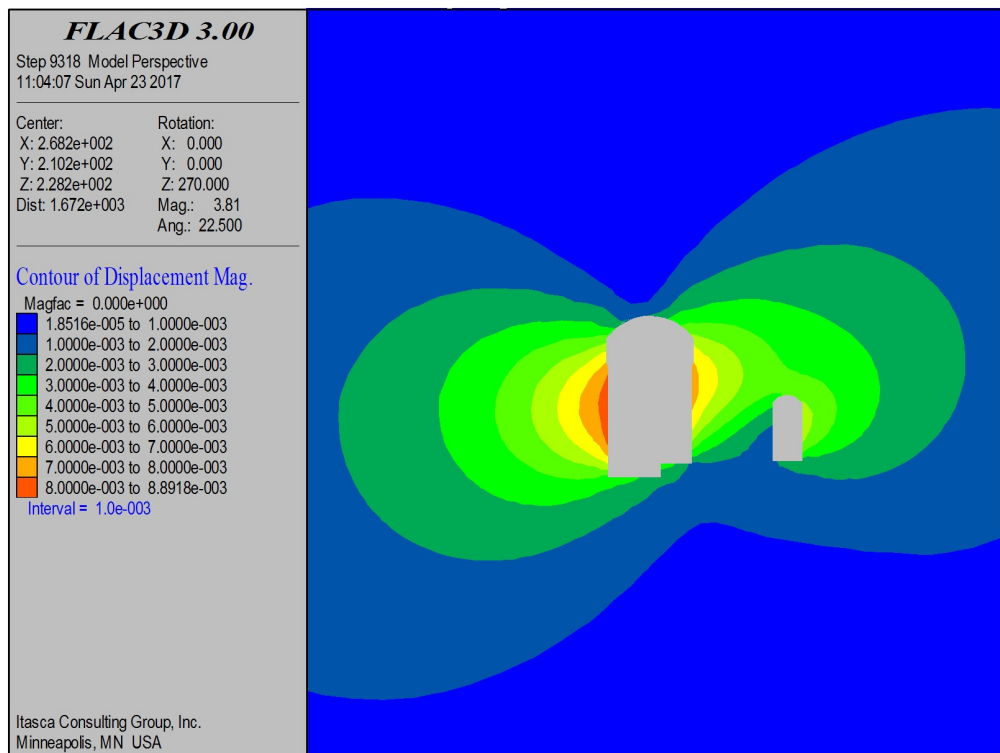


Figure 5. Plan 2 total displacement cloud map
图 5. 开挖方案二总位移云图

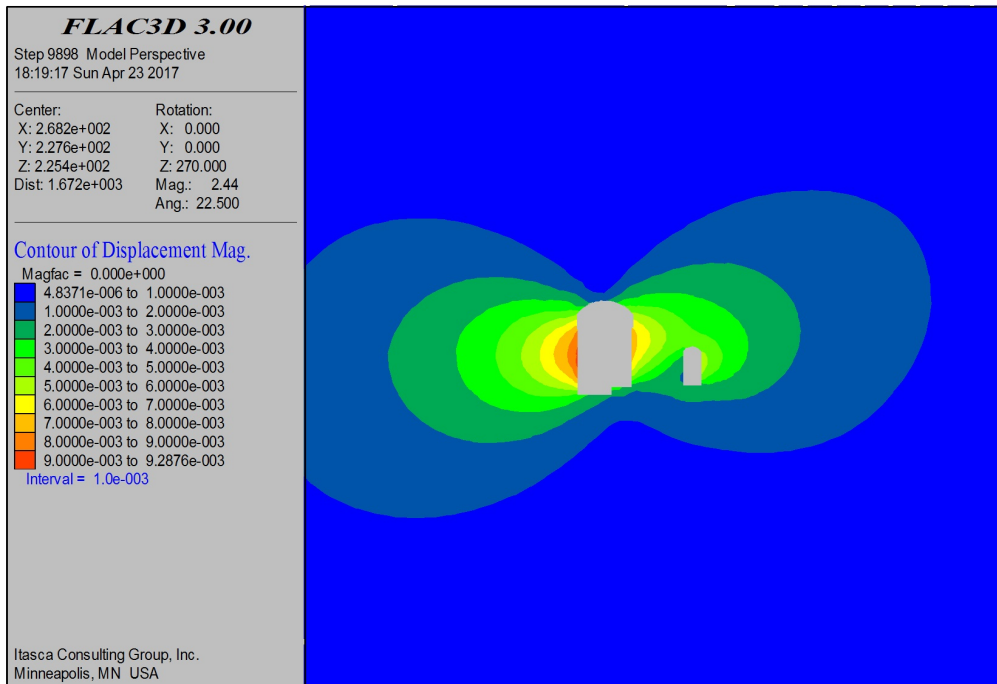
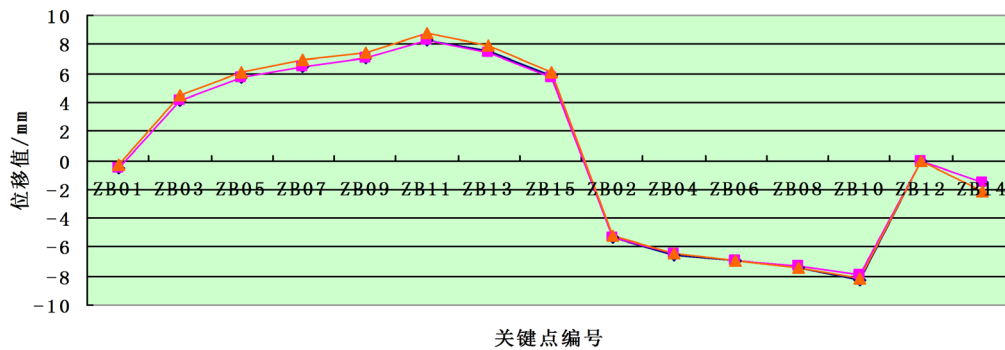


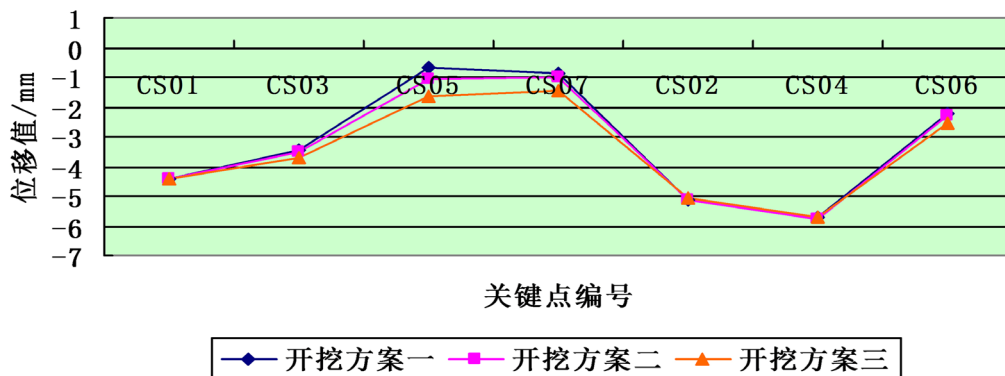
Figure 6. Plan 3 total displacement cloud map

图 6. 开挖方案三总位移云图

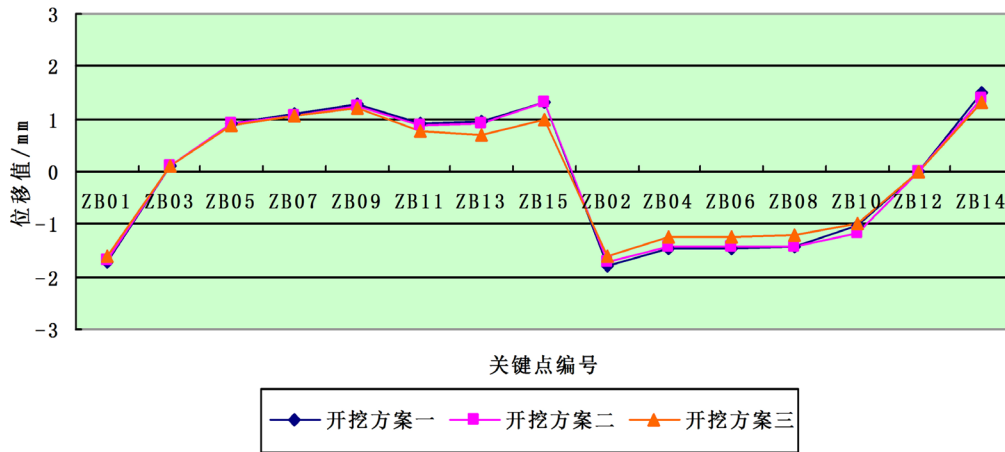
主泵室关键点最终水平位移变化曲线



出水阀室关键点最终水平位移变化曲线



主泵室关键点最终垂直位移变化曲线



出水阀室关键点最终垂直位移变化曲线

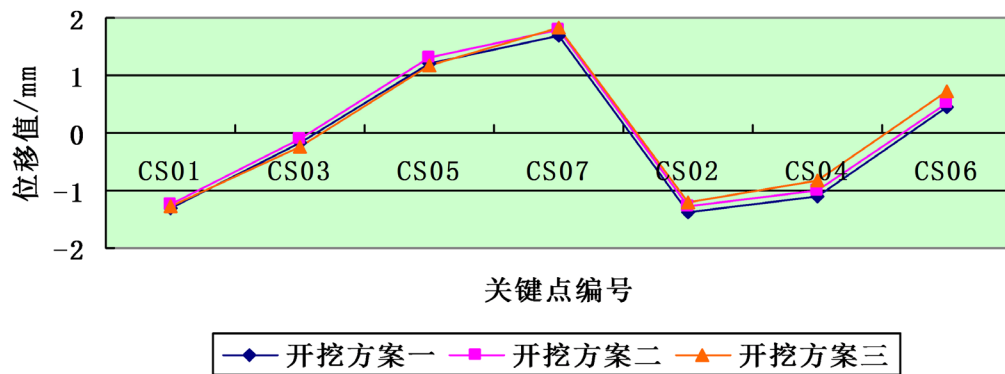


Figure 7. The final displacement curve of key points in the main pump chamber and the outlet valve chamber

图 7. 主泵室和出水阀室关键点最终位移变化曲线

5.2. 应力变化结果分析

主泵室和出水阀室各个关键点具体计算最大、最小主应力值如表 3~4 所示。

Table 3. Stress change table of key points around the main pump room of each staged excavation plan (unit: MPa)

表 3. 各分期开挖方案主泵室周边关键点应力变化表(单位: MPa)

主泵室		第二步			第四步			第六步			第八步	
位置	关键点	方向	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 3
拱项	ZB01	σ_1	-13.69	-13.17	-13.17	-19.31	-19.25	-19.17	-21.95	-21.95	-21.83	-22.31
		σ_3	-0.798	-0.805	-0.805	-1.172	-1.193	-1.208	-1.353	-1.357	-1.374	-1.387
上游边墙	ZB03	σ_1	-18.25	-17.89	-17.89	-20.27	-20.08	-19.85	-21.32	-21.48	-20.91	-21.43
		σ_3	-1.337	-2.834	-2.834	-1.159	-2.604	-2.605	-1.102	-2.577	-2.550	-2.541
	ZB05	σ_1	-12.45	-12.20	-12.20	-12.07	-11.65	-11.50	-12.34	-12.15	-11.76	-12.004
		σ_3	-1.502	-0.948	-0.948	-0.913	-0.428	-0.419	-0.872	-0.426	-0.389	-0.384

Continued

上游 边墙	ZB07	σ_1	-7.235	-7.468	-7.468	-3.120	-3.012	-3.013	-3.022	-2.996	-2.982	-2.950
		σ_3	0.009	-0.092	-0.092	-0.099	0.130	0.112	0.057	0.059	0.019	0.088
	ZB09	σ_1	-7.725	-8.082	-8.082	-3.123	-3.075	-3.042	-3.019	-3.016	-2.968	-2.952
		σ_3	-0.033	-0.122	-0.122	-0.260	-0.319	-0.182	-0.191	-0.245	-0.189	-0.168
	ZB11	σ_1	-8.705	-9.061	-9.061	-4.118	-4.056	-4.036	-3.017	-3.043	-3.007	-2.946
		σ_3	-4.943	-5.001	-5.001	-0.618	-0.662	-0.683	0.008	0.013	0.004	0.045
	ZB13	σ_1	-9.221	-9.433	-9.433	-12.90	-13.47	-13.63	0.244	0.240	0.270	0.234
		σ_3	-5.508	-5.481	-5.481	-5.021	-5.149	-5.149	0.593	0.579	0.564	0.468
	ZB15	σ_1	-12.72	-13.11	-13.11	-14.42	-15.06	-15.20	-5.572	-5.460	-5.180	-4.926
		σ_3	-3.509	-3.531	-3.531	-3.898	-3.985	-3.972	0.170	0.011	0.170	0.005
下游 边墙	ZB02	σ_1	-13.69	-14.95	-14.95	-13.04	-14.04	-14.54	-14.21	-13.61	-14.99	-14.30
		σ_3	-2.163	-0.617	-0.617	-1.557	-0.115	-0.195	-1.660	0.086	-0.189	-0.067
	ZB04	σ_1	-11.23	-12.04	-12.04	-6.833	-7.974	-8.308	-7.174	-7.056	-8.089	-7.555
		σ_3	-1.941	-2.553	-2.553	-1.185	-1.677	-1.693	-1.154	-1.566	-1.631	-1.627
	ZB06	σ_1	-10.25	-9.504	-9.504	-2.845	-2.905	-2.924	-2.820	-2.789	-2.849	-2.823
		σ_3	-0.166	0.010	0.010	0.093	0.119	0.080	0.111	0.146	0.150	0.127
	ZB08	σ_1	-13.02	-11.80	-11.80	-3.016	-2.915	-2.908	-3.054	-2.854	-2.893	-2.828
		σ_3	-0.125	-0.049	-0.049	-0.001	-0.002	-0.002	-0.186	-0.056	-0.106	0.045
	ZB10	σ_1	-10.97	-10.67	-10.67	-0.214	-0.816	-0.825	0.229	0.237	0.183	-0.311
		σ_3	-4.481	-5.042	-5.042	0.494	0.370	0.373	0.419	0.338	0.317	0.274
	ZB12	σ_1	-7.421	-6.223	-6.223	-8.623	-8.378	-8.243	-19.63	-21.09	-18.76	-20.06
		σ_3	-3.033	-3.320	-3.320	-2.537	-2.459	-2.381	-0.788	-0.659	-0.670	-0.890
	ZB14	σ_1	-8.591	-9.503	-9.503	-11.42	-12.36	-12.71	-29.20	-29.59	-31.01	-29.45
		σ_3	-6.486	-5.829	-5.829	-5.476	-5.246	-5.094	-4.430	-4.764	-4.641	-4.482

Table 4. Stress change table of key points around the outlet valve chamber of each staged excavation plan (unit: MPa)

表 4. 各分期开挖方案出水阀室周边关键点应力表变化(单位: MPa)

出水阀室		第二步			第四步			第六步			第八步	
位置	关键点	方向	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 3
拱顶	CS01	σ_1	-22.85	-8.820	-8.820	-17.67	-12.02	-8.146	-13.18	-13.33	-7.517	-12.20
		σ_3	-6.171	-6.038	-6.038	-5.309	-4.125	-5.252	-4.503	-4.589	-4.590	-4.520
上游 边墙	CS03	σ_1	-18.31	-8.932	-8.932	-23.88	-19.14	-8.574	-24.21	-23.14	-7.996	-21.66
		σ_3	-3.397	-6.194	-6.194	-2.682	-3.101	-4.630	-2.580	-3.198	-3.660	-3.452
	CS05	σ_1	-4.074	-9.092	-9.092	-4.490	-8.012	-9.194	-5.979	-6.314	-8.436	-6.678
		σ_3	-0.111	-6.632	-6.632	-0.162	-3.406	-5.747	-0.310	-0.226	-4.557	-0.092
	CS07	σ_1	-17.09	-9.761	-9.761	-13.80	-10.64	-10.66	-10.33	-10.18	-10.75	-9.726
		σ_3	-0.606	-6.436	-6.436	0.057	-5.107	-5.840	-0.266	-0.359	-5.067	-0.610
下游 边墙	CS02	σ_1	-10.97	-8.923	-8.923	-8.631	-9.077	-8.599	-8.603	-8.655	-8.236	-9.389
		σ_3	-2.643	-6.193	-6.193	-2.273	-2.535	-5.348	-2.151	-2.170	-4.827	-2.205
	CS04	σ_1	-3.590	-9.641	-9.641	-3.788	-14.74	-9.939	-4.344	-4.300	-9.788	-4.661
		σ_3	-0.358	-6.261	-6.261	-0.394	-6.427	-5.441	-0.459	-0.489	-4.760	-0.420
	CS06	σ_1	-25.64	-9.175	-9.175	-28.47	-10.54	-9.385	-28.74	-28.57	-9.053	-27.04
		σ_3	-3.383	-6.736	-6.736	-3.905	-5.673	-6.224	-4.185	-4.200	-5.736	-4.175

说明: 表中应力拉为 '+', 压为 '-'。

三种方案开挖后的应力云图如图 8~10 所示。

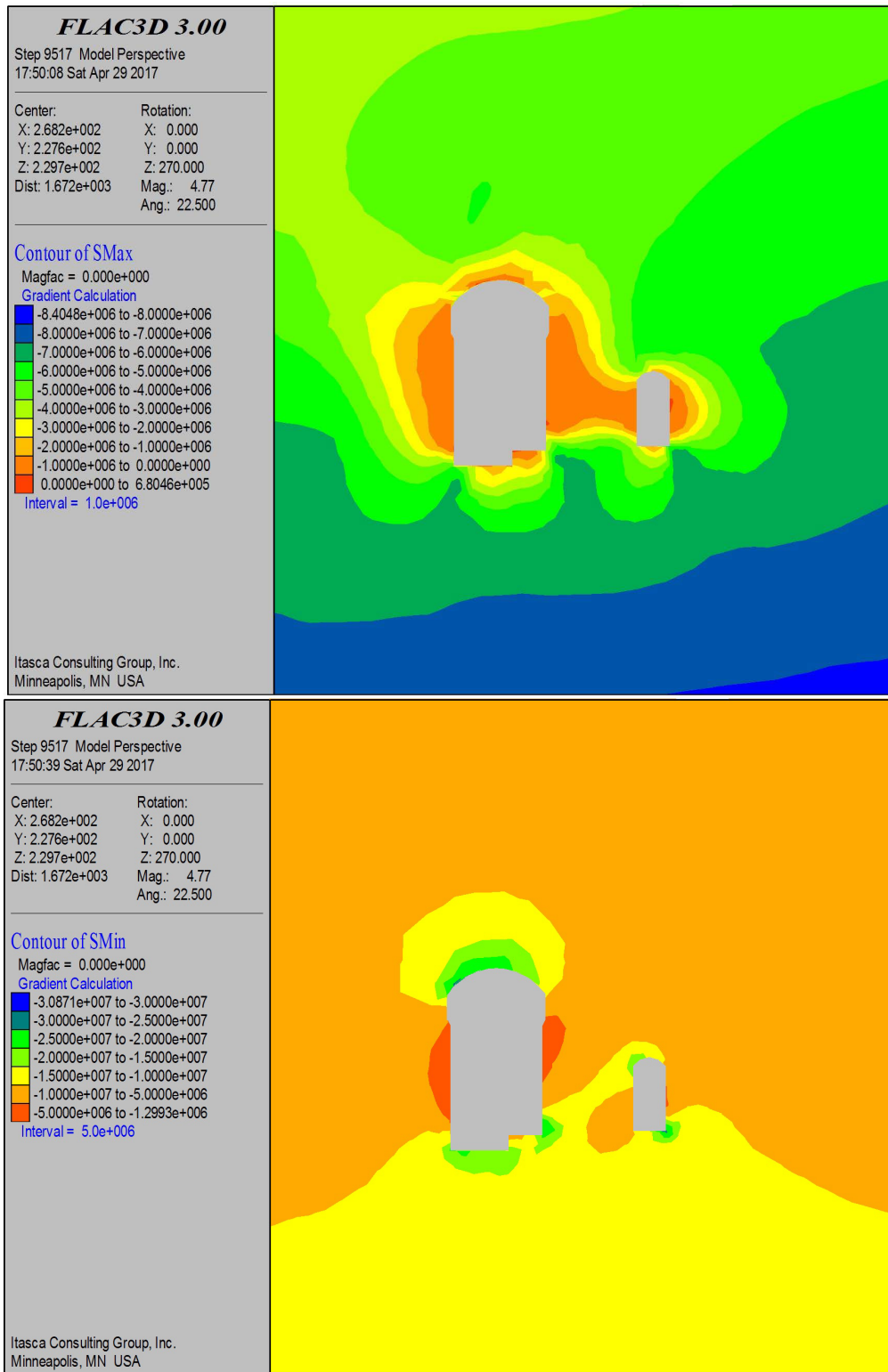


Figure 8. σ_1, σ_3 , cloud map after excavation of the main plan one
 图 8. 主方案一开挖后 σ_1, σ_3 云图

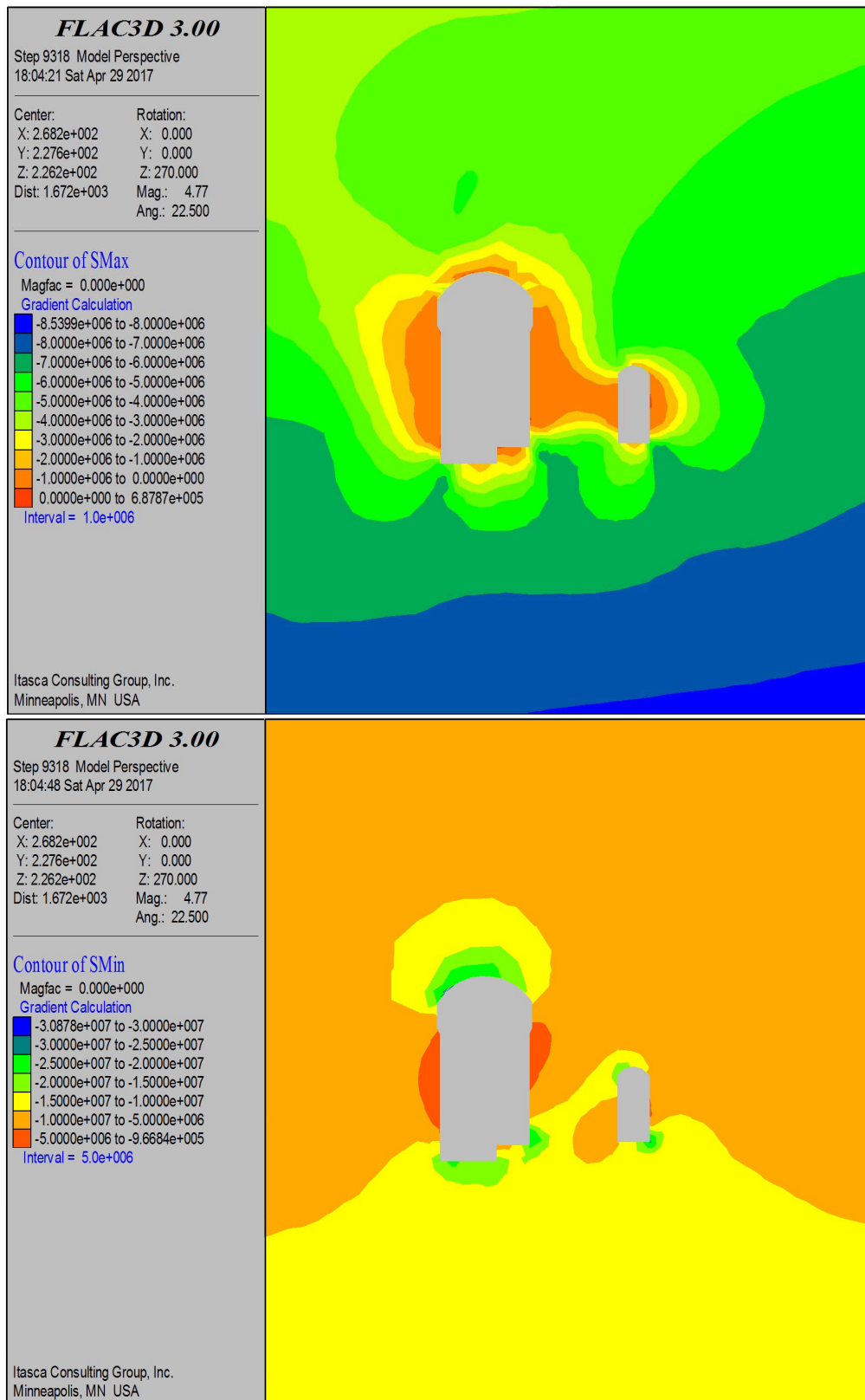


Figure 9. σ_1, σ_3 , cloud map after excavation of the main plan two
图 9. 主方案二开挖后 σ_1, σ_3 云图

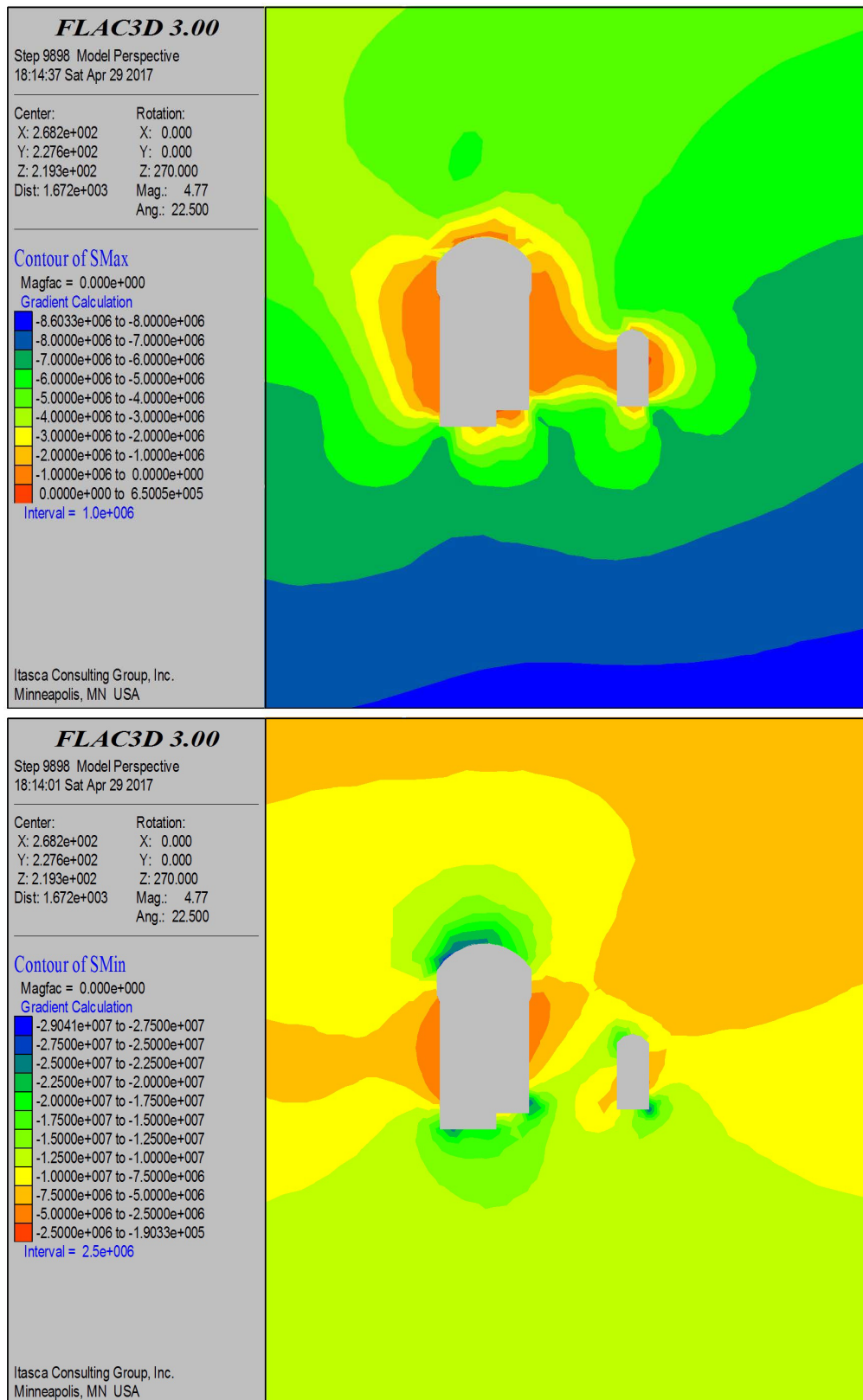
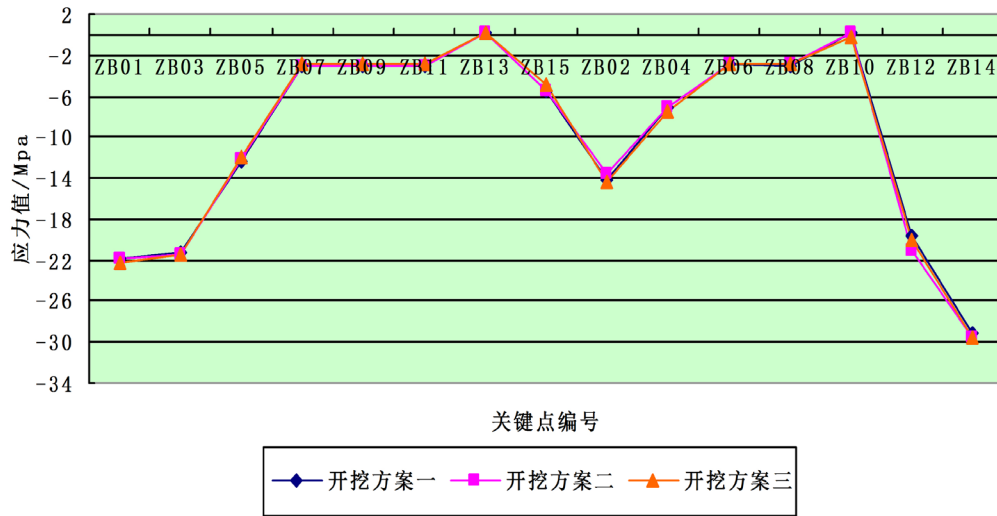
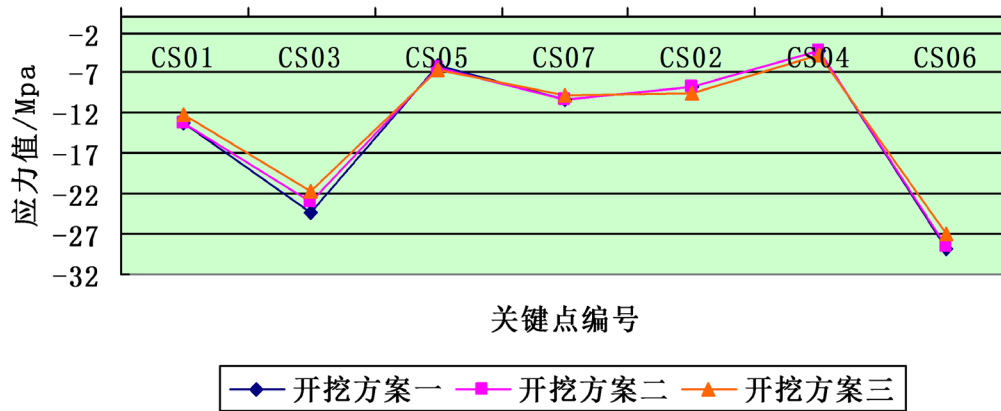


Figure 10. σ_1 , σ_3 , cloud map after excavation of the main plan three
图 10. 主方案三开挖后 σ_1 、 σ_3 云图

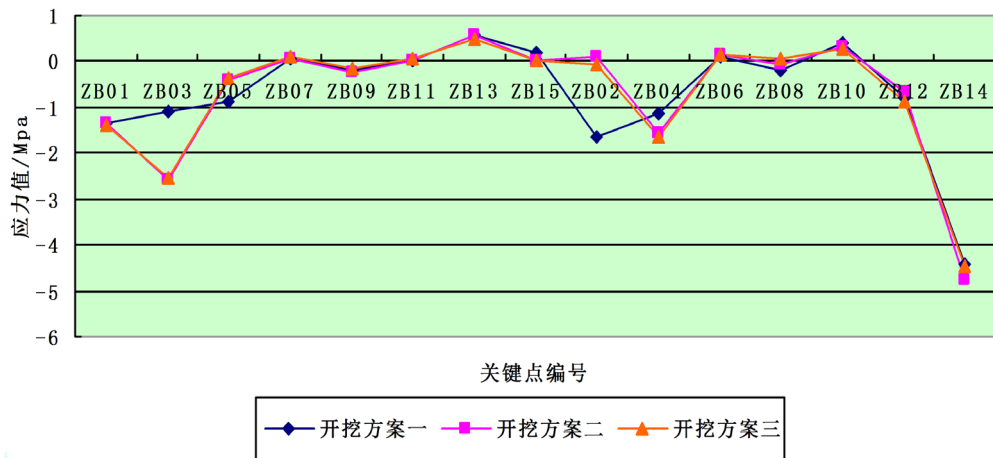
主泵室关键点 σ_1 最终值曲线



出水阀室关键点 σ_1 最终值曲线



主泵室关键点 σ_3 最终值曲线



出水阀室关键点 σ_3 最终值曲线

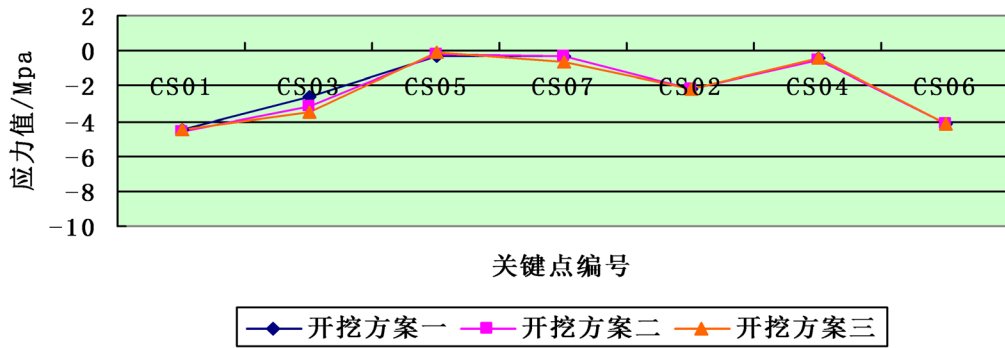


Figure 11. σ_1, σ_3 , final value change curve of main pump chamber and outlet valve chamber
 图 11. 主泵室与出水阀室 σ_1, σ_3 最终值变化曲线

由图 11 可以看出，主应力基本上都为压应力。三种开挖方案，主泵室围岩应力分布规律基本一致，数值接近，下游中部受断层破碎带的影响而出现较大的应力集中；主泵室应力最大点为拱脚 ZB14， σ_1 均在 -29.5 MPa 左右， σ_3 均在 -4.5 MPa 左右；其次 σ_1 较大的是拱顶 ZB01、边墙 ZB03 与 ZB12，均在 -22 MPa 左右；边墙 ZB10 与 ZB13 出现较小的拉应力。

三种开挖方式，出水阀室最终应力分布基本一致，数值相差不大； σ_1 较大的是拱脚 CS06 和上游边墙 CS03，分别达到大约 -28 MPa 和 -23 MPa。

5.3. 塑性区变化结果分析

三种开挖方案洞室围岩塑性区范围如图 12~14。

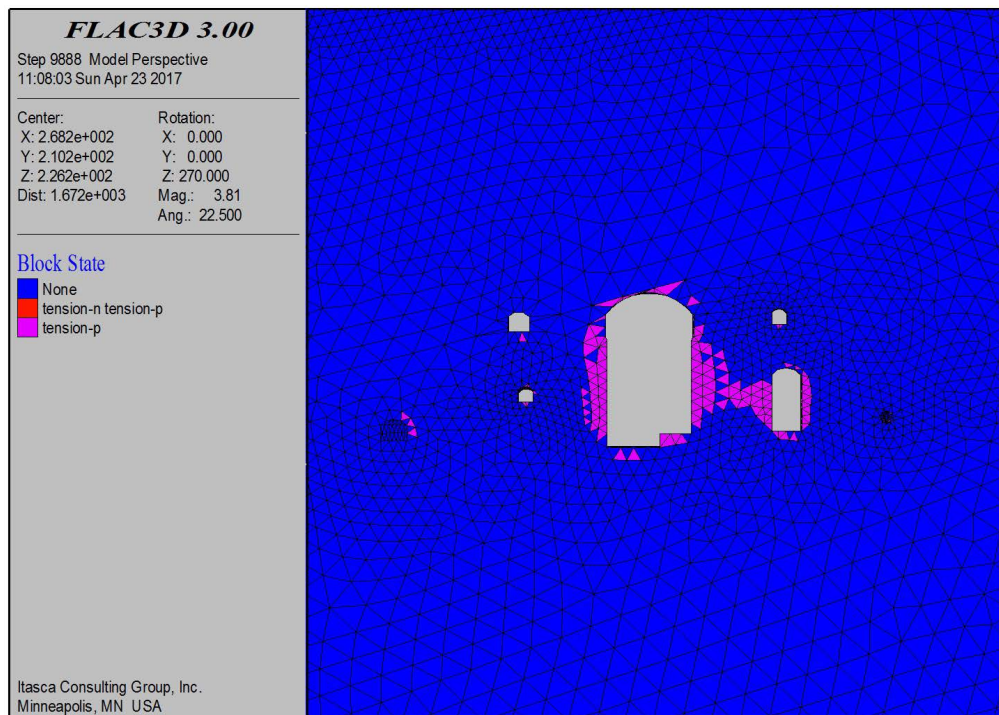


Figure 12. Plan 1 surrounding rock plastic zone range
 图 12. 开挖方案一围岩塑性区范围

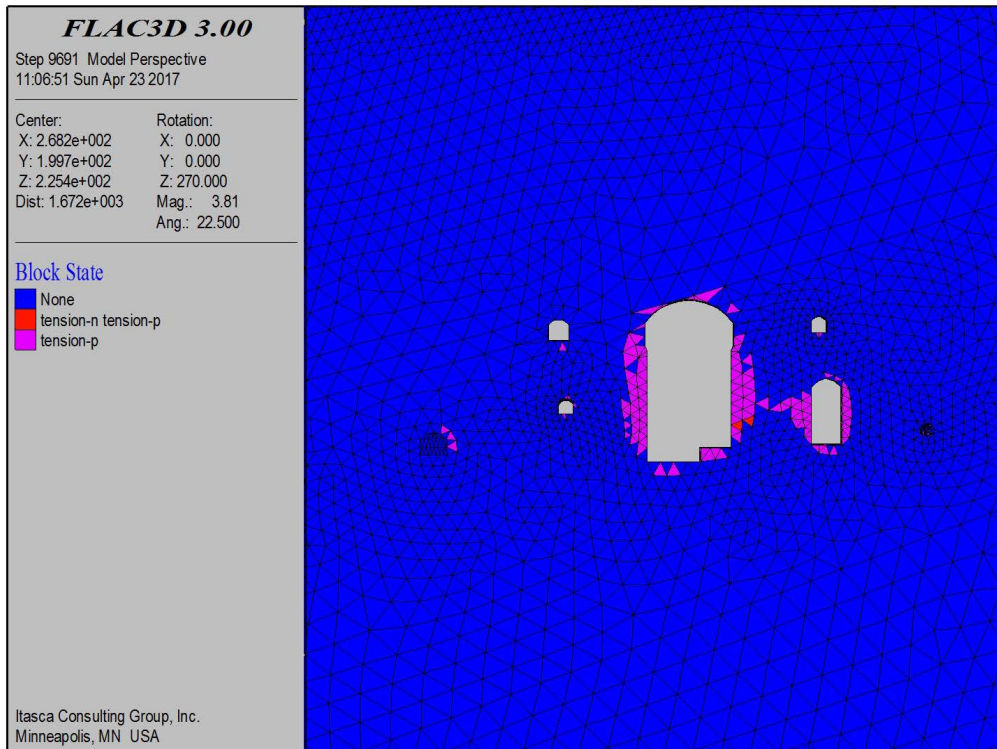


Figure 13. Plan 2 surrounding rock plastic zone range
图 13. 开挖方案二围岩塑性区范围

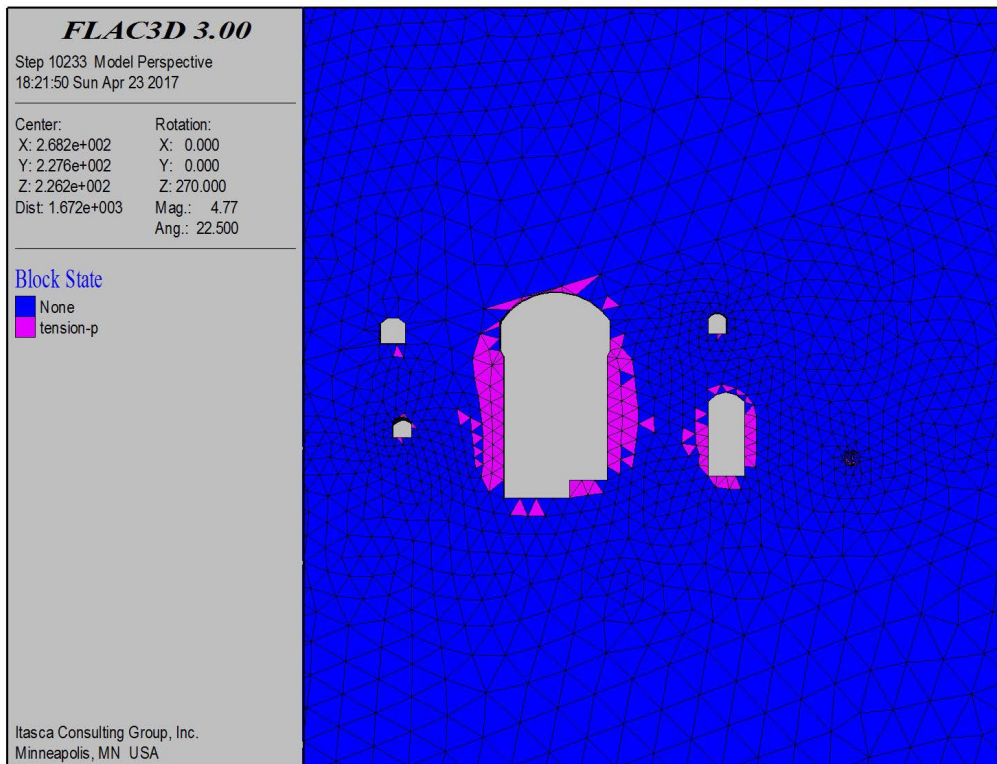


Figure 14. Plan 3 surrounding rock plastic zone range
图 14. 开挖方案三围岩塑性区范围

由图 12~14 可以看出, 洞室周围塑性区主要集中在边墙部位, 主要为拉伸破坏, 开挖方案一主泵室与出水阀室塑性区连通较多, 开挖方案二、三塑性区连通较少。

Table 5. The volume change table of the plastic zone around the cavern of each step-by-step plan (unit: m^3)
表 5. 各分步开挖方案洞室周边塑性区体积变化表(单位: m^3)

分步开挖	方案一			方案二			方案三		
	主泵室	出水阀室	总计	主泵室	出水阀室	总计	主泵室	出水阀室	总计
1	1007.54	374.96		947.02			947.02		
2	665.05	744.13		662.13			662.13		
3	1431.98	762.62		1363.01			1363.01		
4	3141.68	923.34		2743.68	321.61		2674.98		
5	3889.01	1097.60		3766.12	807.56		3358.84		
6	4018.67	1097.61	5116.28	3853.48	809.73	4663.21	3473.48		
7							3684.34	352.09	
8							3949.50	668.64	4618.14

由表 5 中的分步开挖过程中的塑性区变化可以看出, 在无支护条件下三种开挖顺序中, 方案一的主泵室塑性区体积、出水阀室塑性区体积和塑性区总体积都较大, 方案二、方案三的各项塑性区体积较小, 对周围围岩的扰动较小。

Table 6. Comparison of the depth of plastic zone in the main pump room of the three excavation schemes (unit: m)
表 6. 三种开挖方案主泵室塑性区深度比较(单位: m)

主泵室	开挖方案 1		开挖方案 2		开挖方案 3	
	上游边墙	下游边墙	上游边墙	下游边墙	上游边墙	下游边墙
塑性区深度	5.6	11.7	5.2	7.5	5.1	6.6

由表 6 各种支护方式主泵室塑性区深度比较可看出, 开挖方案一塑性区深度最大, 方案二、三较小。综上所述, 开挖方案一塑性区范围较大, 对洞室围岩扰动较大, 方案二、三塑性区范围较小, 扰动较小。

5.4. 小结

三种开挖方案围岩稳定总体规律是一致的, 方案二和方案三差别不大且围岩相对方案一较为稳定, 但开挖方案二较方案三稍好些, 理由如下:

- 1) 方案二、方案三洞周位移相对方案一小;
- 2) 方案一、方案二、方案三洞周应力分布和变化差别不大;
- 3) 方案二、方案三洞周塑性区范围相对方案一小;
- 4) 方案一、方案二分 6 步进行, 方案三分 8 步进行, 方案一、二步数较少, 节省工时。

6. 结论

对于围岩稳定性的研究目前大多是依据具体工程进行分析, 不具有普遍借鉴意义, 对于进行较为系统的研究, 总结出更适合大多数工程的规律, 应是以后有待进一步研究的课题。基于西部某水电站厂区

工程工程, 得出了以下结论:

1) 模拟具有局限性。洞室施工应遵循边开挖边支护的原则, 以保证围岩稳定性, 本文只进行了开挖而没有进行支护, 方便了进行开挖方案的比选, 但是与实际工程不符, 应在进行不同开挖方案的时候加上支护的内容。

2) 围岩稳定性研究有较多方法, 其中数值模拟方法方便、灵活, 基于快速拉格朗日分析的 FLAC 3D 数值计算是地下洞室围岩稳定的有效分析方法。本文即通过 FLAC 3D 数值计算模拟出不同的开挖顺序, 通过对比得出最优的开挖方案。

3) 对计算结果进行分析, 研究无支护条件下洞室群围岩的变形、洞周应力及塑性区范围变化规律; 评价不同开挖步序的合理性, 得出最优开挖顺序方案, 并提出开挖过程中重点监测部位。

基金项目

山东省交通厅科技发展计划(2019B47_1)和国家自然科学基金(51879149)。

参考文献

- [1] 贾科华, 陈雷: 《手册具有里程碑意义》[N]. 中国能源报, 2014-12-08(22).
- [2] 张博庭. 中国水电与水资源开发[J]. 电器工业, 2016(3): 17-25.
- [3] 吴勇. 福堂水电站引水隧洞防治岩爆的施工技术[J]. 水电站设计, 2006, 22(1): 68-71.
- [4] 徐奴文, 唐春安, 周济芳, 等. 锦屏二级水电站施工排水洞岩爆数值模拟[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(4): 134-139.
- [5] 薛志, 郝利军, 谢仲文. 金平水电站地下洞室施工的岩爆预防及处理措施[J]. 四川水利发电, 2011, 30(3): 33-36.
- [6] 常兴兵, 张方安, 唐彦杰. 江边水电站引水隧洞岩爆特征及防治措施[J]. 西北水电, 2010(2): 57-59.
- [7] 李仲奎, 周钟, 汤雪峰, 等. 锦屏一级水电站地下厂房洞室群稳定性分析与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2167-2175.
- [8] 兰艇雁, 唐艳青. 溪洛渡水电站左岸地下厂房岩体错位分析[J]. 中国三峡建设, 2008(1): 73+78.
- [9] 罗远纯, 张高. 四川省木里河立州水电站引水隧洞围岩失稳处理[J]. 贵州水利发电, 2011, 25(6): 8-11.
- [10] 陈浩, 肖明, 衡为方. 基于 ABAQUS 大型地下洞室群分期开挖动态模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(3): 321-327.
- [11] 左双英, 肖明, 来颖. 基于 FLAC 3D 的某水电站大型地下洞室群开挖及锚固效应数值分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(4): 432-436.
- [12] 朱维申, 李晓静, 郭彦双, 等. 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, 2004, 23(10): 1689-1693.
- [13] 郑颖人, 林银飞. 半解析元法在三维弹塑性地下工程围岩稳定性分析中的应用[J]. 西北水电技术, 1988(2): 30-39.
- [14] 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.
- [15] 邱道宏, 张乐文, 薛翊国, 等. 地下洞室分步开挖围岩应力变化特征及岩爆预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 430-436.
- [16] 孟国涛, 樊义林, 江亚丽, 等. 白鹤滩水电站巨型地下洞室群关键岩石力学问题与工程对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2549-2560.
- [17] 撒文奇, 张社荣, 杜成波, 等. 大型地下洞室群施工期结构安全与进度耦合实时仿真[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 98-106.
- [18] 苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下大型地下洞室群开挖顺序与支护参数组合优化的智能方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 2800-2808.
- [19] 李建贺, 盛谦, 朱泽奇, 等. 地下洞室分期开挖应力扰动特征与规律研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 549-556.
- [20] 吴杉. 地下洞室群施工方案优化及围岩稳定性分析[J]. 四川建材, 2016, 42(9): 86-87.

- [21] 高玮, 郑颖人. 蚁群算法及其在硇群施工优化中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 471-474.
- [22] 陈明. 长河坝电站引水发电系统洞室群开挖方案[J]. 东北水利水电, 2014(7): 18-20.
- [23] 黄仁东, 刘抗, 仝慧贤. 基于熵权法和理想点法的围岩稳定性评价[J]. 科技导报, 2014, 32(20): 64-68.
- [24] Johansson, E.J.W. and Kuula, H. (1995) Three-Dimensional Back-Analysis Calculations of Viikinmaki Underground Sewage Treatment Plant in Helsinki. *8th ISRM Congress*, Vol. 2, Tokyo, 597-600.
- [25] Jiao, Y.Y., Fan, S.C. and Zhao, J. (2005) Numerical Investigation of Joint Effete on Shoek Wave Propagation in Jointed Rock Masses. *Journal of Testing and Evaluation*, **33**, 197-203. <https://doi.org/10.1520/JTE12680>
- [26] Ramamurthy, T., GuPta, K.K. and Ghazvinian, A.H. (1995) Stability of Underground Opening from Equivalent Material Modeling. *8th ISRM Congress*, Vol. 3, Tokyo, 1363-1366.
- [27] Syrnikov, N.M., Sisov, I.A. and Osipov, K.G. (1995) Dissipation Processes in a Rock Mass and the Problem of Long-Term Stability of Underground Construction. *8th ISRM Congress*, Vol. 3, Tokyo, 1371-1374.
- [28] Sitharam, T.G., Sridevi, J. and Shimizu, N. (2001) Practical Equivalent Continuum Characterization of Jointed Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **38**, 437-438. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00010-7)
- [29] Sitharam, T.G. and Latha, G.M. (2002) Simulation of Excavations in Jointed Rock Mass Using a Practical Equivalent Continuum Approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39**, 517-525. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00024-2)
- [30] Lee, Y.N., Suh, Y.H., Kim, D.Y., *et al.* (1995) Three-Dimensional Behavior of Large Rock Caverns. *8th International Conference on Rock Mechanics*, Vol. 2, Tokyo, 505-508.
- [31] Stabel, B., Samani, F.B. and Masjed-Soleiman, H.E.P.P. (2003) Iran Rock Engineering Investigations, Analysis, Design and Construction. *10th Congress of the ISRM*, Sandton, 8-12 September 2003, 1147-1154.
- [32] Hibino, S. and Motojma, M. (1999) Anisotropic Behavior of Jointed Rock Mass around Large-Sale Caverns. *9th International Conference on Rock Mechanics*, Vol. 1, Paris, 385-388.