

大断面软岩硐室开挖非线性力学特性数值模拟研究

Research on the non-linear mechanics characters of large section cavern excavating within soft rock by numerical simulation

何满潮^{1,2}, 李春华², 王树仁²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京校区), 北京 100083)

摘要: 运用三维有限差分数值计算软件(FLAC3D), 模拟分析了软岩大断面硐室围岩由于开挖方法、开挖顺序的不同而产生不同时效变形与应力状态的力学响应及变形特性。研究结果表明, 软岩大断面硐室的开挖过程是和应力路径与应力历史密切相关的非线性不可逆过程, 其开挖设计方案应采用软岩非线性大变形力学设计方法, 即首先采用力学对策设计, 然后进行过程优化设计, 最后进行最优参数设计, 才能保证硐室围岩在开挖过程中处于最佳稳定状态。

关键词: 软岩; 大断面硐室; 开挖; 非线性力学特性; 数值模拟

中图分类号: TU454

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0483-04

作者简介: 何满潮(1956-), 男, 河南人, 中国矿业大学(北京校区)教授, 博士生导师, 中国地质大学(北京)特聘教授, 主要从事岩土工程、地质工程方面的研究。

HE Man-chao^{1,2}, LI Chun-hua², WANG Shu-ren²

(1. China University of Geosciences, Beijing, 100083; 2. China University of Mining & Technology, Beijing, 100083;)

Abstract: In this paper, FLAC3D is adopted to simulate the mechanical behavior and deformation characteristics with different excavating method and excavating sequence of large section cavern within soft rock. The research results have showed that the excavating process is a non-linear irreversible process tightly related with stress paths and stress history. The non-linear mechanics design method, which include mechanics countermeasure design, process optimization design, optimized parameter design, should be adopted in excavation plan design of large section cavern within soft rock. So the surrounding rock of cavern should be in stable state.

Key words: soft rock; large section cavern; excavation; non-linear mechanics characters; numerical simulation

1 引言*

软岩是一种特定环境下的具有显著塑性变形的复杂力学介质, 其工程岩体力学性质主要表现为非线性大变形力学特性^[1~7]。特别是对于大断面软岩硐室来讲, 其开挖方式一般采用分层开挖、分块施工的作业方式, 即硐室的开挖是一个随时、空域不断变化的施工过程。从力学观点看, 软岩大断面硐室的分次开挖过程实际上是对硐室围岩的不同部位, 时而做加载、时而做卸载的复杂加载、卸载过程。根据软岩的非线性大变形力学特性, 不同的卸载(开挖)顺序将会产生不同的围岩变形结果。

为研究不同施工方法、不同施工顺序硐室围岩的非线性力学特性, 本文采用三维有限差分数值计算程序(FLAC^{3D}), 对硐室围岩在动态开挖过程中的力学响应行为进行了数值模拟分析。在通过计算机数值模拟进行卸载过程优化设计时, 对比巷道不同卸载顺序所产生的应力分布结果、巷道塑性区范围以及巷道围岩位移变形情况, 选择最佳的卸载顺序, 从而采用优化的施工方法与优化的支护措施, 以保证大断面软岩硐室在施工期和运营期的安全和稳定。

2 计算模型及模拟方案

2.1 研究对象

本次模拟对象为某矿暗立井绞车硐室。该硐室与井底车场、暗立井、绞车绳眼及变电所形成立体交错的空间结构, 绞车硐室通过绞车绳眼与暗立井相通, 其断面设计为直墙半圆拱形, 净规格 13.5 m × 7.5 m × 15 m (宽 × 高 × 长), 硐室底部有 2.9 m 深的提升机基础坑, 挖方 160 m³。

硐室围岩主要为粉砂岩, 裂隙较为发育, 岩层中夹有多层厚度不等的煤线, 岩体的整体性和稳定性较差。粉砂岩富水性较强, 施工中有淋、滴水现象, 正常涌水量 0.05~0.10 m³/min, 最大涌水量 0.30 m³/min。

2.2 计算模型及计算参数

根据圣维南原理, 整个模型计算范围为 50 m × 55 m × 30 m (宽 × 高 × 长), 模拟硐室断面形状为直墙半圆拱形, 断面尺寸为 14 m × 8 m (宽 × 高), 硐室长度为 15 m, 建立数值计算模型如图 1 所示。计算模型共划

* 基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(59825114)

收稿日期: 2001-11-25

分六面体单元 28480 个,节点数为 30198。该模型侧面限制水平移动,底部限制垂直移动,模型上面取为应力边界(压应力为 12.5 MPa)。整个模型处于三向等压(均为 12.5 MPa)静水应力状态。材料破坏准则采用应变软化模型。数值计算参数见表 1。

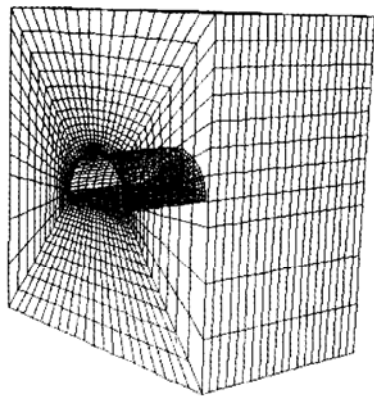


图 1 计算模型及网格划分

Fig. 1 Simulation model and seeting grid

表 1 岩石物理力学参数表

Table 1 The mechanical and physical parameters of rock

体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa	抗拉强度 /MPa	粘聚力系数 /MPa	摩擦角 /(°)
3000	1380	0.5	1.8	30.0

2.3 模拟方案

首先,沿洞室轴向自上而下分成 3 个分层,分层高度分别为 2500, 2500, 3000 mm,然后,沿洞室径向将洞室断面再划分为 7 个区域。分别采用下行法和上行法两种开挖方案,如图 2,3 所示。图中字母 A~ E 代表各个区域,数字 1~ 15 代表开挖顺序号及对应区域的开挖量。

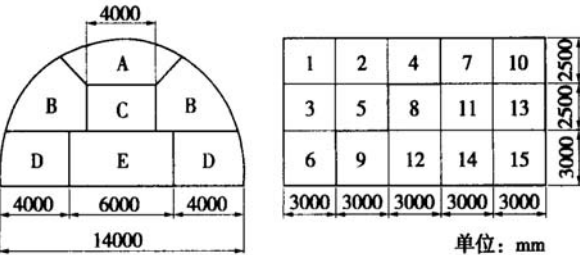


图 2 下行法开挖方案对应的洞室横向和径向剖面图

Fig. 2 Transversal and radial section of the cavern excavated from top to bottom

各方案的具体开挖顺序如下:

(1) 下行法开挖顺序

1(A) → 2(A) → 3(B; C) → 4(A) → 5(B; C) → 6(D; E) → 7(A) → 8(B; C) → 9(D; E) → 10(A) → 11(B; C) → 12(D; E) → 13(B; C) → 14(D; E) → 15(D; E)

(2) 上行法开挖顺序

1(A) → 2(A) → 3(B) → 4(C; D; E) → 5(A) → 6(B) →

7(C; D; E) → 8(A) → 9(B) → 10(C; D; E) → 11(A) → 12(B) → 13(C; D; E) → 14(B) → 15(C; D; E)

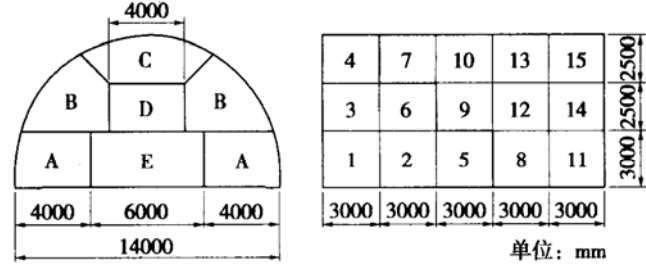


图 3 上行法开挖方案对应的洞室横向和径向剖面图

Fig. 3 Transversal and radial section of the cavern excavated from bottom to top

3 计算结果分析

3.1 塑性区范围

两种开挖方案对应的洞室围岩塑性区的分布状况见图 4 所示。

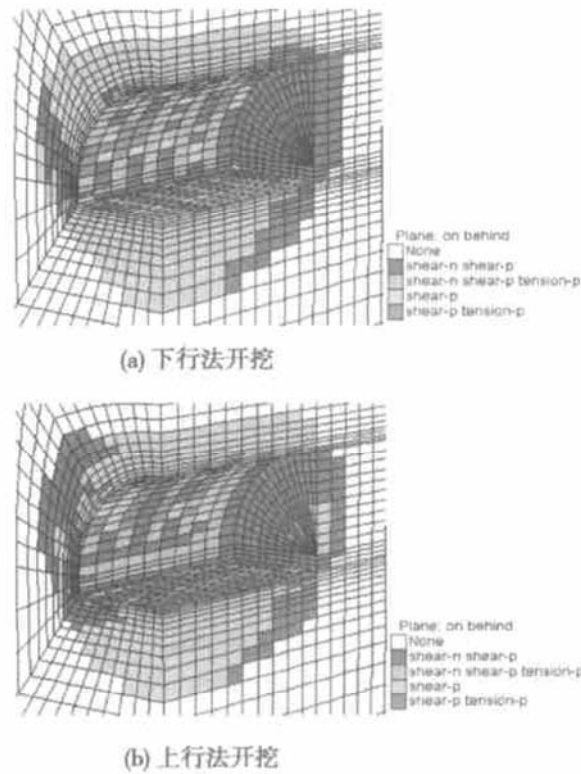


图 4 两种开挖方案对应的洞室围岩塑性区范围

Fig. 4 Plastic region of cavern surrounding rock

一方面,从围岩塑性区范围来看,虽然两种开挖顺序的围岩塑性区深度基本相同,但在洞室的径向与轴向进入塑性状态的单元数目有较大的差异,除在端头超前影响范围内,下行法的塑性区单元数比上行法有少量增加外,其它部位的塑性区单元数上行法比下行法明显增多,变化比较明显。

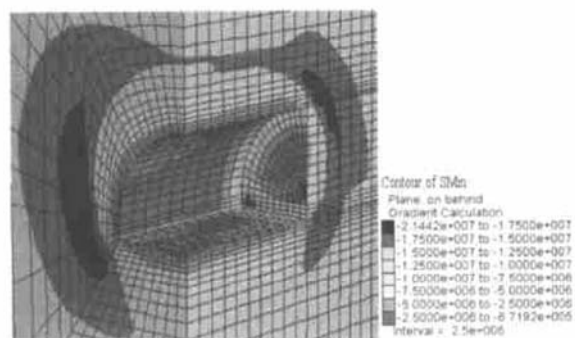
另一方面,从进入塑性状态单元的受力性质看,上

行法拉破坏产生的单元数目比下行法明显增多,尤其是在硐室底板的塑性区范围内表现更为突出。

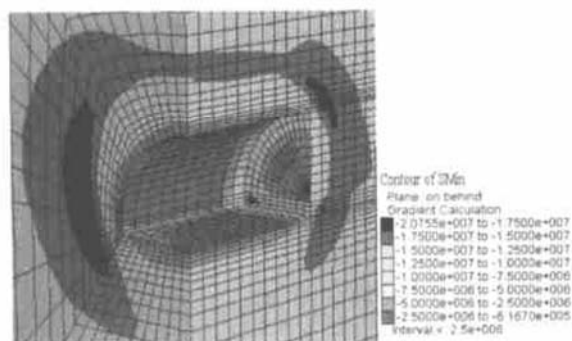
可见,在相同的工程条件下,硐室围岩的塑性区范围与围岩的受力破坏性质,随开挖方案的不同,表现出明显的差异。即硐室围岩的塑性区范围与围岩的受力状况,跟硐室围岩在不同部位的加、卸载历史过程是紧密相关的。

3.2 应力场规律

两种开挖方案对应的硐室围岩应力场分布如图5所示。



(a) 下行法开挖



(b) 上行法开挖

图5 两种开挖方案对应的硐室围岩最大主应力分布

Fig. 5 The $\sigma_{\max}$ distribution of cavern surrounding rock

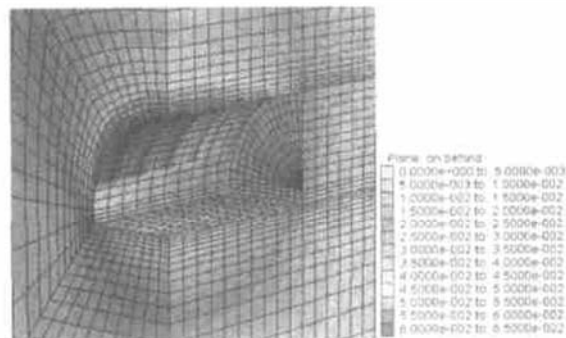
两种开挖方案下,在硐室的帮部围岩内都出现了较大的压应力集中区,但压应力场分布的区域及压应力值的大小差异较大。从压应力值的大小看,下行法比上行法压应力值要大一些,但从压应力场分布的区域来看,上行法硐室顶板中压应力场分布的区域是下行法的两倍多,并且上行法硐室底板中压应力场分布的区域比下行法也要大几倍。

硐室开挖以后,原有的应力平衡状态被打破,引起硐室围岩中的应力重新分布。切向应力在临空的硐壁附近发生高度集中,致使该区域岩体进入塑性状态,随着开挖过程的不断进行,不断转移到临空硐壁上的应力,使围岩塑性区域不断向围岩深部扩展。图5所反映的硐室围岩中应力场分布的差异性,就是随不同的

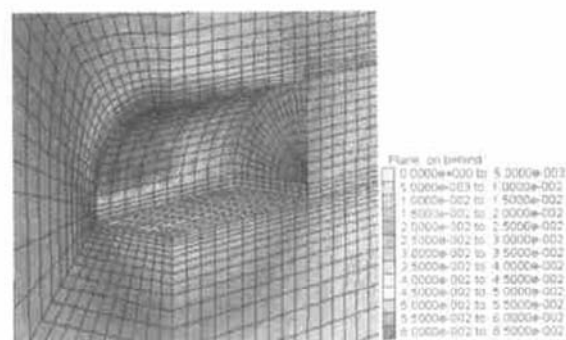
开挖过程,在硐室围岩中记忆了不同的应力场分布内容,即对硐室围岩不同部位加卸、载后,应力场分布历史过程的体现。

3.3 位移场规律

两种开挖方案对应的硐室围岩顶、底板的位移场分布如图6所示。



(a) 下行法开挖



(b) 上行法开挖

图6 两种开挖方案对应的硐室围岩位移场分布

Fig. 6 The displacement distribution of cavern surrounding rock

下行法施工时,由于开挖是自硐室顶部开始,逐层向下施工形成了正台阶工作面,因此在硐室顶板产生较大的位移,而在硐室底板则产生了相对较小的位移,且在硐室顶部产生较大位移的位置不是在正顶点,而是发生在偏顶的拱肩部,硐室两侧拱基线偏上部位处也产生了较大的位移。采用上行法开挖时,由于首先沿硐室的底板从两侧掘进超前导硐,然后再向上沿周边扩刷到硐室的顶部,逐步形成倒台阶工作面,它的位移场分布与下行法相比有明显的不同,即除在两帮产生较大位移外,在拱基线偏上部位处发生更大的位移,但该位置要低于下行法开挖在拱基线偏上部位处发生较大位移的位置,而在硐室的顶板附近不再产生大的位移。

由上面所述的结果可以知道,自硐室开挖的瞬间起,围岩的变形能就开始释放,硐室围岩的位移场自始至终地伴随着不同的开挖过程而变化,即硐室围岩位移场的变化与在硐室围岩不同部位的加卸、载历史过

程也是紧密相关的。

4 结 论

通过对大断面软岩硐室的数值模拟分析结果可以看出,由于开挖方案的不同,即对硐室围岩不同部位加、卸载顺序的不同,硐室围岩中应力集中的产生及其程度、应力集中荷载的性质、产生塑性区的范围及其密度、围岩变形的部位及大小等,都存在着不同程度的差异,说明当硐室围岩进入到塑性、粘塑性和流变性的大变形力学阶段后,在整个力学过程中已不服从叠加原理,而且力学平衡关系与各种荷载特性、加载过程密切相关。

因此,大断面软岩硐室的支护设计不能简单地用参数设计来进行,应采用适合于软岩大变形的非线性力学设计方法,即:

(1) 力学对策设计:分析和确认作用在岩体上的各种荷载特性,提出相应的力学对策;

(2) 过程优化设计:数值模拟分析表明,相同的力学对策,不同的过程,其效果截然不同,通过对比各种力学对策的施加方式、施加过程硐室围岩所产生的应力分布结果、巷道塑性区范围以及巷道围岩位移变形

情况,选择最佳的加、卸载过程;

(3) 最优参数设计:根据上述分析所选择的最佳过程再进行参数设计。

参考文献:

- [1] 何满潮. 软岩巷道工程概论[M]. 北京:中国矿业大学出版社, 1993.
- [2] 何满潮. 软岩工程力学的理论与实践[A]. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践[C]. 北京:中国矿业大学出版社, 1996. 20-34.
- [3] Franciss F O. Weak Rock Tunneling[M]. A A Balkema Press, 1997.
- [4] He Manchao. Constitutive relation of plastic dilatancy due to weak intercalation in rock masses[A]. Proc of 26th Conference of the Eng Geology of Weak Rock[C]. Leeds University Press, 1990.
- [5] Bieniawski A T. Strata Control in Mining Engineering[M]. A A Balkema Press, 1987.
- [6] Farmer I W. Engineering Behaviour of Rocks[M]. London New York Chapman and Hall, 1983.
- [7] He Manchao. New theory on tunnels stability control within weak rock[A]. Proc of the Int IAEG Congress[C]. A A Balkema Press, 1994.

欢迎订阅《水利水电技术》(月刊)

刊号: ISSN 1000-0860
CN11-1757/TV

代号: 国内邮发 2-426
国外 M681

《水利水电技术》杂志由中国水利部主管,水利部发展研究中心主办,是我国水利水电行业的综合性技术期刊,1959年创刊。她以介绍我国水利水电工程的勘测、设计、施工、运行管理和科学研究等方面的技术经验为主,同时也报道国外的先进技术。目前,本刊发行遍及全国城乡,是我国水利水电科技刊物中影响较大、发行量也较大的刊物。刊物主要栏目有:水文水资源、泥沙研究、水利规划、工程地质、水工建筑、工程施工、水力发电、城市水利、农田水利、环境水利、防汛抗旱、水利经济、运行管理、建设管理、小水电站、试验研究、规程规范、水利现代化、国际水利等。

《水利水电技术》是我国水利工程学科的中文核心期刊,1992年获全国优秀科技期刊二等奖,2001年荣获中华人民共和国科学技术部科技期刊方阵“双百期刊”称号。先后被“中国学

术期刊(光盘版)”、“中国期刊网”、“中国科技论文与引文数据库”、“万方数据——数字化期刊群”、美国“ULRICH'S INTERNATIONAL PERIODICALS DIRECTORY”等数家国内外评价与检索系统收录。

《水利水电技术》读者对象为水利水电、土木工程、工程地质等领域的管理、科技、设计、施工、监理人员和大专院校师生。

《水利水电技术》为国内外公开发行人,月刊,大16开本,每月20日出版,每期定价8元,全年12期共计96元。凡需订阅者请到各地邮电局(所)订阅,也可直接与本刊联系。欢迎广大读者踊跃投稿、订阅和广告惠顾,并提出宝贵意见。

地址:北京德外六铺炕;邮编:100011;电话:010-82071270, 82076523;传真:010-82076502;E-mail: water@waterinfo.com.cn;网址: http://www.periodicals.com.cn。