

大型地下洞室群参数反演及其工程应用

郭凌云 肖明

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北武汉 430072)

【摘要】 基于三维弹性有限元及遗传算法,结合西龙池抽水蓄能电站工程实际,首先用小模型分段模拟工程中有明显差异的几个不同段位,并反演得到围岩物理力学参数及支护前围岩位移释放系数。在此基础上,对洞室进行了二期开挖计算,成功预测了二期开挖后洞室变形、围岩稳定、锚杆锚索应力等状况,揭示了洞室应力集中和围岩的潜在破坏部位,对工程施工具有重要指导意义。

【关键词】 地下工程;参数反演;遗传算法;围岩稳定

【中图分类号】 U 453; TU 926

Parameter Inversion of Large Underground Cavities and Engineering Application

Guo Lingyun Xiao Ming

(The State's Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072 China)

【Abstract】 Combined with the Xi'longci pumped storage hydroplane project, the several segments having obvious difference in engineering, are simulated by small models based on the three-dimensional FEM and genetic algorithm. The back-analysis parameters are obtained and input the whole FEM model to compute the displacement around caverns, stress of anchor bar, etc. Matched with observing data, in view of the preceding work, the No.2 excavation is calculated. It calculates successfully the displacement of around caverns, the stability of surrounding rock, the stress of anchor bar and cable, etc, reveals the stress concentration and potential failure parts of the surrounding rock. It has important directive function.

【Key word】 underground engineering; parameter inversion; genetic algorithms; surrounding rock stability

0 引言

由于矿产资源勘探开发、能源开发、城市建设和人类向地下空间发展的需要,地下工程的规模越来越大^[1]。如何保证围岩和地下结构的稳定并用物理数学模型来恰当描述和预测岩土介质体在工程施工运行期间的行为^[2],显得极为重要。由于岩体结构及其赋存条件和环境的复杂性、多变性,且受到工程施工因素的影响,很难建立准确无误的物理数学模型。一般说来,地下洞室的形状、断面尺寸、围岩工程地质条件、初始地应力水平、开挖方法、掘进速度、支护方式和支护施作时机以及洞室间相对位置都可对洞周位移收敛值产生影响^[3]。假设在实测地应力基础上反演所得区域内初始地应力是可信的并且达到精度要求,基于三维损伤弹塑性有限元对上述多种因素数值模拟基础上,笔者认为:岩体力学参数以及支护

施作,在起作用前围岩的变形释放系数是围岩变形及稳定的关键因素,对其参数的反演有着重大的意义。上述参数优化反演问题可描述为:求解

$$f_{\min}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \|\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \bar{\mathbf{u}}\| \quad (1)$$

式中: $\bar{\mathbf{u}}$ 为实测位移矢量, \mathbf{u} 为计算多点位移矢量, \mathbf{x} 为岩体力学参数向量, \mathbf{y} 为围岩变形释放系数。

在实际工程中,洞周围岩往往是由多种岩体组成的,式(1)进一步复杂化为

$$f_{\min}(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n, \mathbf{y}) = \|\mathbf{u}(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n, \mathbf{y}) - \mathbf{u}\| \quad (2)$$

根据实验勘测资料及工程经验可以给出反演参数一个可能的取值范围:

$$A \leq x \leq B \quad C \leq Y \leq D \quad (3)$$

在给定上述约束的简化条件下,求解弹塑性问题时,目标函数式(1)、式(2)仍然是一个复杂的多峰

作者简介:郭凌云,1979年生,男,汉族,山西长治人,在读硕士研究生,主要从事地下洞室围岩稳定反演分析等工作。

E-mail: gly99011@tom.com

值函数。如何对其求解成为一个关键问题。

1 多参数反演方法及应用分析

对于复杂多峰函数的优化求解问题,目前已有不少方法,如遗传算法(GA),演化策略(ES),进化程序(EP)等通称为模拟进化算法(SEC)。有不少学者将这些算法应用于地下工程岩体参数的反演分析,但大都应用于平面 FEM,与工程实际有一定差别。在基于有限元(FEM)的参数反演中,计算“适应度值”即是调用 FEM 计算洞周位移并与实测值进行比较处理得出“适应度值”。以遗传算法为例,其计算流程见图 1。

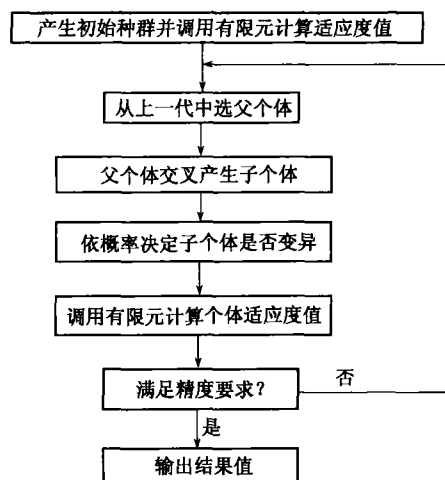


图 1 遗传算法计算流程

鉴于遗传算法的特点,要想得到理想的结果必然大量增加调用 FEM 的次数。三维弹塑性有限元随着自由度数目的增加以及进入塑性变形单元数目的增加,将引起计算机时的急剧增长。对于大型地下工程,建立的有限元模型单元数目一般相当可观,基于遗传算法(或其它进化算法)的参数反演将变得不可行。

为解决上述问题,本文尝试使用结合工程施工情况及监测资料,将整体工程划分为几个区段,建立一个或几个监测断面的小模型进行反演计算,获得相应参数,再综合上述数据输入整体模型中进行正演计算。与实测资料对比,如有必要再做出部分修正,得到可以接受的计算结果。将此方法应用于西龙池抽水蓄能电站地下厂房洞室群的一期开挖反演及二期开挖位移预测、围岩稳定性分析,收到良好效果,证明此方法是可行的。

2 工程应用

2.1 工程概况

西龙池抽水蓄能电站位于五台县境内滹沱河与清水河交汇处,总装机容量为 1 200 MW,枢纽由上

水库、输水系统、地下厂房系统、下水库、地面开关站及副厂房、补水建筑物等组成。地下厂房系统主要建筑物有主副厂房、主变室、通风机室、母线洞、交通洞、进风洞等组成。主厂房开挖尺寸 149.3 m × 21.75 m × 49 m。主变室尺寸为 130.9 m × 16.4 m × 17.5 m。

2.2 工程地质条件及地应力状况

厂区地层为张夏组和崮山组岩层,依次为 ϵ_{3g}^2 , ϵ_{3g}^{1-2} , ϵ_{3g}^{1-1} , ϵ_{2z}^{2-3} , ϵ_{2z}^{2-2} , ϵ_{2z}^{2-1} , ϵ_{2z}^{1-3} , ϵ_{2z}^{1-2} 岩层,其岩性为钙质石英粉砂岩、薄层灰岩、鲕状灰岩和柱状灰岩,呈互层状结构,层理发育,地下厂房围岩结构为近水平、薄层状各向异性灰岩。岩层产状为 NW290°~340°NE/4°~10°,产状平缓,层理发育,层间结合力小,对顶拱的稳定极为不利。

水压致裂法测试结果显示厂房区最大水平主应力为 12.0 MPa,方向为 NE 50°~60°,最小水平主应力为 6.0 MPa,裂隙发育的岩体内应力值降低,最大水平主应力为 6.0~7.0 MPa,最小水平主应力为 3.0~4.0 MPa。计算中采用了基于实测地应力的反演三维初始地应力场。

2.3 构建小模型及其反演计算

2.3.1 小模型的构建

据监测资料综合分析后用 5 个小模型来分段模拟洞室群。各模型位置见图 2。建立的五个小模型形式基本相同。根据提供的地质勘探资料,模型划分为 12 种不同的岩体材料,A 模型剖分了 18 632 个等参单元,其它模型单元数略有不同。

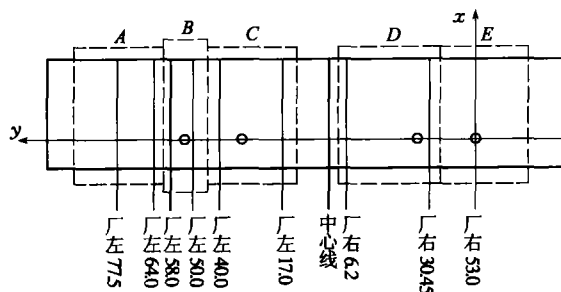


图 2 各模型位置示意图

2.3.2 反演参数的确定

在硬质岩体材料的多种物理力学参数中,粘聚力、内摩擦角等参数变化对位移影响不大,可采用设计值和经验值相结合来设定。建立的有限元模型中第 4、5、6 种岩体材料接近第一、二期开挖位置,其物理力学参数对洞室变位影响比较大。因此,第一期开挖反分析中以 4、5、6 号材料水平和垂直弹性模量为反演分析参数。

2.3.3 反演计算成果及分析

由位移反分析的大量研究结果可以知道,利用洞室表面收敛位移反分析,其结果要好于多点位移量测的深部位移值^[4],本工程也以关键点作为反分析的目标点。

计算精度取 1.5 mm,模型计算终止的控制适应度值为 $f_c = 1/(n \times 1.5^2) = 1/(2.25 \times n)$

A 模型岩体力学参数反演结果见表 1。位移释放系数为 0.58。其它各模型反演结果不再罗列。

表 1 模型 A 反演材料弹模参数

序号	水平弹模量/GPa		垂直弹模量/GPa	
	反演值	勘测值	反演值	勘测值
4	18.1	20	13.3	15
5	17.9	20	12.8	15
6	23.7	20	18.5	15

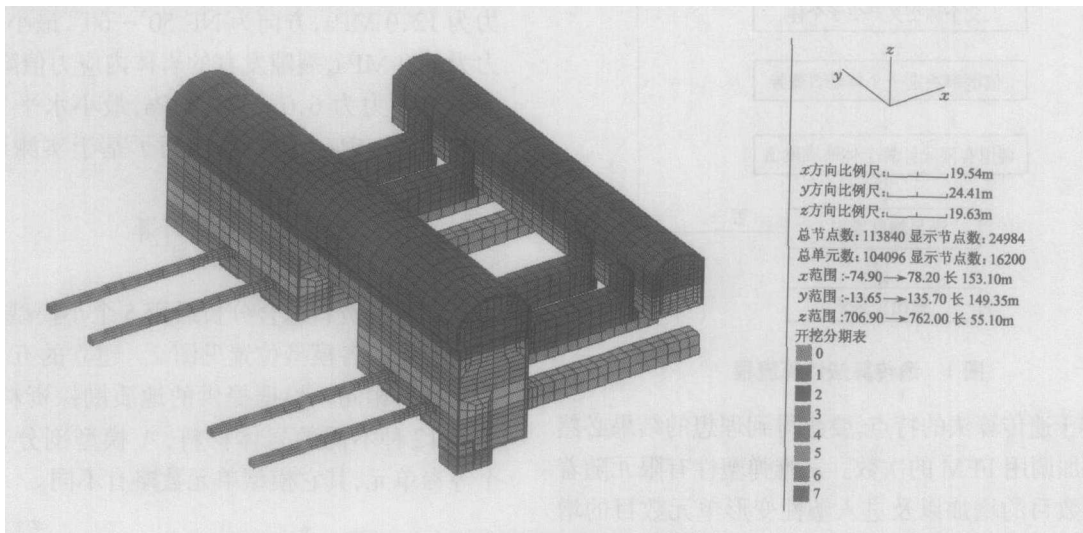


图 3 开挖及锚索支护整体模型

2.4.2 整体模型一期开挖计算及成果分析

在第二部分反分析计算的基础上,计算整体模型第一期开挖。主厂房顶拱监测点实测值、小模型计算位移值及整体模型计算位移值见表 2。其它各处位移值不再罗列。

表 2 厂房顶拱实测、小、大模型计算位移 mm

测点编号	实测值	小模型值	整体模型值
M4-1	11.91	11.5	11.6
M6-1	12.41	11.8	12.8
MA-11	8.38	8.7	8.4
M5-1	8.37	8.7	8.3
M2-1	5.22	6.6	6.2
MA-10	4.71	6.4	5.7
M3-1	7.53	8.0	7.8
MA-9	7.30	7.6	7.7
M1-1	5.54	6.0	6.6

1) A、B、D、E 模型反演所得厂房顶拱位移非常接近,最大误差为 -0.61 mm, C 模型中 M2-1、MA-10 两测点误差稍大,误差值为 1.49 mm。

2) 厂房拱角处计算误差比顶拱处稍大,误差值为 0.77~1.43 mm。

3) 主变室位移在取最可能代表实际洞室变位的 M3-6 测点位移值后,计算误差较小。

2.4 整体模型构建及一期开挖计算

2.4.1 整体模型的构建

整体模型包括整个主厂房洞室、整个主变洞、四条尾水洞、四条母线洞等洞室群,总共剖分了 104 096 个单元。结合前期反演成果整体模型划分为 17 种岩体材料。整体模型开挖分期及锚索支护形式见图 3。

对比可以发现,主厂房顶拱位移值与实测位移值、小模型计算值都比较接近,与实测值最大相差 1.1 mm,与小模型计算值最大相差 1 mm。

一期开挖后厂房、主变室顶拱锚杆应力在 165~257 MPa 之间,分布比较均匀。边墙上锚杆应力较小,只有 5~10 MPa,母线洞处锚杆应力较小,都在 20 MPa 以下。锚索应力为 1 045~1 090 MPa。锚索实测值与计算值比较接近,锚杆应力计算值与实测值分布情况一致。

2.5 整体模型二期开挖计算及预报

2.5.1 二期开挖计算

由前面的反演、正演分析并与工程实测资料比较分析可见反演所得岩体力学参数、不同施工段位移释放系数是可信的,因此,将上述反演值输入整体模型进行二期开挖计算。

2.5.2 二期开挖洞周位移

主厂房顶拱监测点实测值、一期开挖、二期开挖计算值见表3。其它各处位移值不再罗列。

表3 一、二期开挖后厂房顶拱监测点位移值 mm

编号	一期实测值	一期计算值	二期计算值
M4-1	11.91	11.6	12.4
M6-1	12.41	12.8	12.6
MA-11	8.38	8.4	11.1
M5-1	8.37	8.3	9.6
M2-1	5.22	6.2	8.0
MA-10	4.71	5.7	7.8
M3-1	7.53	7.8	9.2
MA-9	7.30	7.7	8.9
M1-1	5.54	6.6	8.6

洞周位移规律如下:

1)二期开挖后厂房顶拱位移值大都有所增加, M4-1、M6-1 位移值增加不大,说明此处洞室顶拱趋于稳定。厂房上下游边墙拱角变位继续增加,位移值在3~5 mm之间。

2)主变室顶拱位移增值不大,由于二期开挖后顶拱状态改善,某些断面出现回弹现象,但回弹量较小。

2.5.3 二期开挖围岩应力分布规律

洞周应力分布有如下规律:

1)二期开挖后主厂房顶拱应力有所变化,如2#

机组的径向第三主应力从-1.43 MPa 释放到-0.87 MPa,切向第一主应力从-10.88 MPa 增至-13.23 MPa。

2)从1#—4#机组四个横剖面的洞周应力分布规律看,都是在主厂房洞室两拱座处和洞室交口处出现了应力集中,四个机组边墙的最大压应力值分别为:-22.86 MPa, -24.95 MPa, -29.65 MPa, -28.75 MPa。

2.5.4 二期开挖锚杆、锚索应力分布规律

对照一期开挖后锚杆、锚索应力分布可以看出二期开挖后锚杆、锚索应力分布有如下规律:

1)洞室顶拱锚杆应力有一定增加,锚杆应力从第一期的165~257 MPa 增加到186~265.5 MPa。

2)洞室顶拱锚索应力值增加不大,从第一期的1 045~1 090 MPa 增加到1 060~1 102 MPa。

3)主变室边墙锚杆应力也有一定增长,从10 MPa 以下增加到42 MPa,其中在吊车梁部位出现应力集中现象,部分锚杆应力值已达101 MPa。

4)母线洞处锚杆应力从10 MPa 增至最大19.28 MPa,但总体来说锚杆应力较小,增幅不大。

5)厂房、主变室端墙锚杆应力在10~85 MPa 之间。

2.5.5 二期开挖围岩塑性开裂区分布规律

2#机组围岩破坏情况见图4。一期和二期开挖后的塑性、开裂破坏指标情况见表4。围岩破坏有如下规律:

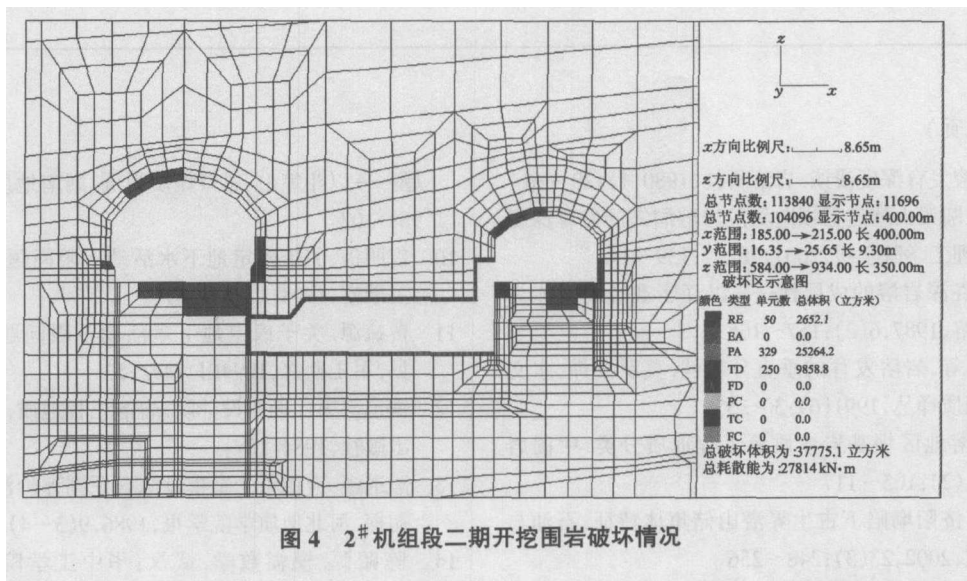


图4 2#机组段二期开挖围岩破坏情况

1)二期开挖后,厂房、主变室顶拱塑性区没有大范围扩大,塑性破坏深度保持在1~4 m 范围内。由于二期开挖完毕后顶拱应力条件的改善,部分顶拱岩体出现回弹现象。说明使用预应力锚杆以及锚索

对顶拱的稳定起到了良好作用。

2)随着开挖的进行,主厂房吊车梁边墙部位出现了拉裂破坏区,靠近下游一侧破坏范围大于上游一侧,范围较大。洞室交口处也都不同程度的

出现了拉裂破坏区。建议加强此处锚杆及时支护。

3)从表4可以看出,第二期开挖后比第一期开裂体积和塑性耗散能都有较大增长,显示随着开挖的进行,洞周围岩破坏量继续增长。

表4 一、二期开挖围岩破坏指标值 万 m³

分期	围岩破坏指标				
	回弹 体积	塑性破 坏体积	开裂 体积	总破 坏量	耗散能量/ (万 kN·m)
1	0	3.476	0.223	3.699	1.303 4
2	0.265	2.526	0.986	3.778	2.724 4

2.5.6 工程结论与建议

1)水平层状各向异性岩体,对地下厂房洞室顶拱的围岩稳定影响较大,所以洞室的开挖和支护应引起高度重视。从计算结果来看,在目前的支护条件下,洞室的整体稳定是有保证的,只是在洞室交口处以及主厂房下游边墙吊车梁部位出现相当的拉裂破坏,应当及时加强支护。

2)二期开挖后,洞室顶拱锚杆应力有一定增长,顶拱层面都处于受力状态,锚杆应力都在允许范围内。锚索应力增长不大。

3)二期开挖后,洞室顶拱位移有所增大,但都趋于稳定,洞室顶拱的稳定是有保证的,所采用的锚固支护参数是合理的。

3 结论

1)地下工程的数值模拟是一个复杂的问题,由于反演目标函数的复杂性,参数优化反演也是一个难度极大的问题。

2)在工程中建立适当简化模型进行反演计算,虽然有一定的边界误差,但误差是可以接受的,并可以有针对性的以较小的计算代价获得反演参数,预测大型地下洞室群的稳定。

3)岩土介质是一种非均匀、随机性、离散性极强的介质体,有着复杂的本构关系。如何寻找能够准确描述岩土体力学行为的本构关系,如何建立恰当的物理数学模型仍将是艰巨的任务。

4)目前的弹塑性反演分析仍然是基于正演基础的分析,如果能找到只进行一次反演计算即可得到反演参数值的方法将具有重大意义。

参 考 文 献

- 1 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程.北京:科学出版社,2002
- 2 孙 钧,蒋树屏,袁 勇,等.岩土学反演问题的随机理论与方法.汕头:汕头大学出版社,1996.3
- 3 李志业,曾艳华.地下结构设计原理与方法.成都:西南交通大学出版社,2003.284
- 4 高 伟,冯夏庭.地下工程围岩参数反演的仿生算法及其工程应用研究.岩石力学与工程学报,2002,21(增2):2521~2526

收稿日期:2005-03-14

(上接第117页)

- 3 李大通.岩溶发育深度浅谈.岩溶科技,1980(1):28~36
- 4 王 科,等.圆梁山隧道毛坝向斜段岩溶洞穴的发育深度探讨.成都理工学院学报,2001,28(2):139~143
- 5 谭周地.河谷深岩溶的成层性——以辽宁观音阁水库为例.中国岩溶,1987,6(2):157~165
- 6 [俄]Ежов,等.岩溶发育的垂直分带性.莫跃支译.水文地质工程地质译丛,1991(6):30~35
- 7 王家骏.岩溶地区坝基岩体质量工程地质分类.中国岩溶,1992,11(2):105~117
- 8 徐国盛,等.济阳坳陷下古生界潜山储集体特征.石油与天然气地质,2002,23(3):248~256
- 9 周春光,等.湘中地区的岩溶发育特征与环境地质问

题——以斗笠山、恩口煤矿为例.湖南地质,1996,15(2):98~102

- 10 雷明信.关于确定地下水活动下限问题的初步探讨.军工勘察,1994(1):38~41
- 11 贾疏源.关于确定地下水活动下限问题讨论的几点意见.军工勘察,1994(4):47~52
- 12 铁道部第二勘测设计院.岩溶工程地质.北京:中国铁道出版社,1984.12
- 13 熊道银.应用第I型模糊综合评判评价污染地下水水质初探.河北地质学院学报,1986,9(3~4):383~388
- 14 陈贻源.模糊数学.武汉:华中工学院出版社,1984.154~160

收稿日期:2005-02-25