

# 龙滩水电站左岸地下厂房区 三维地应力场反演分析\*

梅松华<sup>1,2</sup> 盛 谦<sup>1</sup> 冯夏庭<sup>1</sup> 刘路平<sup>3</sup> 赵海斌<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071) (<sup>2</sup>河北大学机械与建筑工程学院 保定 071002)

(<sup>3</sup>中南勘测设计研究院 长沙 410014)

**摘要** 在龙滩地下厂房区工程地质和试验洞变形监测结果综合分析的基础上,建立地质概化和试验洞施工开挖模型;采用地应力场随埋深变化呈线性分布的假设,并根据地应力测试成果,确定地应力场的分布区间。在此基础上,采用均匀设计方法和三维显式有限差分法,通过模拟试验洞的开挖变形,对龙滩水电站厂房区岩体地应力场进行了三维变形反演分析。对比计算位移和监测位移,计算各方案的位移目标函数,获得了岩体地应力场沿深度的分布规律。比较监测与计算位移,两者在量值上相当,在变形趋势上也基本相同,而且实测与计算所得的地应力值较吻合,表明所获得的岩体地应力场是基本合理的,同时说明此反演方法简便、有效。

**关键词** 水电工程, 龙滩水电站, 地应力场模拟, 均匀设计, 反演, FLAC<sup>3D</sup>

**分类号** TD 311, O 241.82

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2004)23-4006-06

## BACK ANALYSIS OF 3D IN-SITU STRESS FIELD OF UNDERGROUND POWERHOUSE AREA OF LONGTAN HYDROPOWER STATION

Mei Songhua<sup>1,2</sup>, Sheng Qian<sup>1</sup>, Feng Xiating<sup>1</sup>, Liu Luping<sup>3</sup>, Zhao Haibin<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

(<sup>2</sup>College of Mechanical and Civil Engineering, Hebei University, Baoding 071002 China)

(<sup>3</sup>Central South Design and Research Institute for Hydroelectric Projects, Changsha 410014 China)

**Abstract** Based on the comprehensive analysis of geological conditions and deformation monitoring, the simplified geological model and excavation model of the experimental cavity are set up. The assumption of linear distribution of in-situ stresses of rock masses along depth is adopted, and based on the in-situ stress measurement, the interval of in-situ stresses is decided for back analysis. Then, the uniform design method and FLAC<sup>3D</sup> are used to make back-analysis on in-situ stress field of the underground powerhouse area of Longtan Hydropower Station through simulating the excavation of the experimental cavity by steps. 12 excavation cases are selected for simulation. The displacement object function values are calculated for each case by steps. The minimization of object function is made, and the distribution regularity of in-situ stresses of rock masses along depth is obtained. By comparison of measured and calculated displacements and in-situ stresses of rock masses, it is shown that the obtained results are satisfactory and the presented back analysis is reasonable and effective.

**Key words** hydropower engineering, Longtan Hydropower Station, simulation of in-situ stresses, uniform design, back analysis, FLAC<sup>3D</sup>

2004年3月29日收到初稿, 2004年5月26日收到修改稿。

\* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708)及中国科学院武汉岩土力学研究所前沿领域基金(Q000216)资助课题。

作者 梅松华 简介: 男, 29岁, 2001年于长沙矿冶研究院获采矿工程专业硕士学位, 现为河北大学讲师、中国科学院武汉岩土力学研究所在职博士研究生, 主要从事岩石力学数值计算方面的研究工作。E-mail: msh\_mail@sina.com。

1 引言

蓄存在岩体内部未受扰动的应力,称之为原岩应力。开挖引起的应力是二次应力,其大小受初始应力场和开挖方式的影响很大;不受开挖影响部分的应力,相对开挖而言,也称为岩体初始应力。在工程实践中,初始地应力场的确定历来是岩石力学的一个重要研究内容,不仅因为地应力是地下洞室设计的主要荷载,正确选取地应力的量值和方向是设计工作的关键;而且,地应力也是工程计算的重要初始条件之一。随着测试技术的发展以及先进测量仪器的推广应用,人们已能获得较为可靠的实测地应力值。由于客观条件的限制,工程中不可能获得很多的实测应力结果,随之出现了许多以实测应力为基础,然后,依据某种数学模式来推求初始应力场的方法。比如,人们提出用有限元模型回归分析或反分析初始应力场的方法<sup>[1~3]</sup>。

对初始地应力场主要有 2 种模拟方法:

(1) 假定一种初始地应力场分布模式,用拟合或回归的方法使计算得到的地应力值逼近实测值。近年来,该方法得到广泛应用,如通过将位移函数和应力函数与有限元法相结合的途径来分析初始地应力场,采用灰色建模理论、利用多元线性回归原理得到计算区域的初始地应力场等等。当计算域内已有初始地应力实测资料时,使用这种方法较为直接、简单<sup>[4~8]</sup>。

(2) 利用开挖扰动实测位移值反演小范围的岩体初始地应力——位移反分析方法。位移反分析方法是一种间接的方法,当计算域内缺乏地应力实测资料或实测地应力值是扰动地应力时,该方法是一种较为可行的方法,该方法目前主要用于地下工程。然而,在位移反分析方法中,如何检验反分析的质量是人们不得不面对的一个问题。众所周知,“数据有限”是岩石力学研究中的瓶颈之一,因此,充分利用现有的测试数据,进行工程反分析研究,才能得到更符合工程实际的结果<sup>[9~11]</sup>。

本文结合龙滩工程实例,提出了一种用实测应力值确定反分析范围,并利用实测应力值和模型试验洞实测位移检验反分析结果的岩体地应力场反演方法。

2 概述

龙滩水电站是红水河上的“龙头”电站,是以

发电为主、兼顾防洪和航运的关键工程。地下厂房区地层为三叠系中统板纳组(T<sub>2b</sub>),由厚层钙质砂岩、粉砂岩和泥板岩互层夹少量薄层凝灰岩、硅泥质灰岩组成。厂房区位于近 SN 向的八奈背斜东翼和龙滩向斜西翼,为一单斜构造,正常岩层产状为 345°~355°/NE/57°~62°。在工程可行性研究阶段,中南勘测设计研究院科研所、长沙矿冶研究院等单位通过应力解除法和水压致裂法对龙滩进行了地应力测量,对地下厂房区的地应力有了基本认识。结果表明:该地区地应力场主要为 NNW~NW 向,以水平应力为主。地下厂房最大主应力方向为 280°~330°,平均量值为 13 MPa( $\sigma_1$  为 6.0~19.88 MPa)(表 1)。同时在厂房区进行了原位模型围岩变形量测试验。试验洞轴线方向为 S30°W。模型洞位于设计地下厂房顶拱部,开挖尺寸为:3 m×5 m×25.18 m。在洞深 7.7 和 16.2 m 处分别布置了多点位移计测量断面,每个断面有 7 个观测孔,其中有 2 个预埋孔,每个观测孔布置有 5~6 个测点(表 2)。

表 1 实测地应力分量值

Table 1 Measured in-situ stress components MPa

测点号	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{zx}$
13-4	-5.792	-4.000	-8.756	-0.128	-0.590	-4.108
14-1	-10.51	-6.273	-12.160	-1.913	-1.084	-5.489
2-1	-9.105	-5.262	-9.473	-0.820	1.458	0.124
2-3	-6.246	-3.398	-9.683	-1.922	2.366	0.938

表 2 监测点位移及增量位移表

Table 2 The total and incremental displacement of monitoring points mm

监测点号	监测位移		
	开挖步 1	开挖步 2	开挖步 3
II-1(第 1 点)	0.19	0.61	1.06
II-2(第 1 点)	0.28	0.33	1.51
I-1(第 1 点)	0.29	0.91	0.96
I-2(第 1 点)	0.48	1.29	1.33
I-5(孔口点)	1.16	1.27	1.15
I-6(孔口点)	0.97	2.16	2.04

3 地应力场分布规律基本假设

在岩体工程中,无论是浅埋还是深埋状态,由于地壳构造运动的影响,初始地应力场的分布规律极其复杂,影响因素也很多,它的分布一方面取决于地区的地质、地貌发展史,另一方面又同时反映

在各种地质、地貌现象中。依据对初始地应力实测资料所作的统计分析,可以认为在工程范围内初始地应力场随埋深呈线性分布,且随深度变化的速率与上覆岩体自重引起的垂直地应力的变化率十分接近<sup>[12]</sup>。因此,在工程岩体范围内,近地表的全强风化带应力场可取为自重应力场;微新岩体初始地应力场可假设为按线性规律分布;弱风化带岩体初始地应力场由以上两者插值得到。

对于强风化岩体,地应力采用自重应力场,即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= -\gamma h \\ \sigma_x = \sigma_z &= -\frac{\mu}{1-\mu} \gamma h \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\gamma$  为岩体容重,  $\mu$  为泊松比,  $h$  为地表至计算点的高程差。

对微新岩体,在线性规律分布的假定下,初始地应力分量为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -A_1 - B_1 h \\ \sigma_y &= -A_2 - B_2 h \\ \sigma_z &= -A_3 - B_3 h \\ \tau_{xy} &= A_4, \tau_{yz} = A_5, \tau_{zx} = A_6 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $A_i$ ,  $B_i$  ( $i=1\sim6$ ) 为常数。

对于弱风化岩体,其应力场由式(1)与(2)插值计算得到。

## 4 反演分析方法

如前所述,对初始地应力场主要有 2 种模拟方法,本文采用的是反演分析方法,具体介绍如下。

用优化方法进行位移反分析的实质就是寻找一组待反演的参数使其与相应的位移值与实测位移值逼近的方法。对于实际工程的设计和施工来说,这种逼近追求的是总体上的最优效果。目标函数通常取为以下形式:

$$F(X) = \min \sum_{i=1}^n (f_i(X) - u_i)^2 \quad (3)$$

或类似的形式。式中:  $(X) = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\}$ ,  $x_m$  为待反演的岩体地应力参数;  $f_i(X)$  为岩体在第  $i$  个量测点上发生的位移量的计算值;  $u_i$  为相应的位移量的实测值;  $n$  为位移量测点的总数。

测点布置和样本选取采用近年来发展的一种新的试验设计方法——均匀设计法,该方法是王元、方开泰于 1978 年提出的,它的数学原理是数论中的一致分布理论,只考虑试验点在试验范围内的均匀分布<sup>[13]</sup>。对于有  $x$  个因素,每个因素有  $n$  个水平的试验,其选取的试验点仅有  $n$  个。因此可以大幅度降低试验工作量,又能全面控制所有可能出现的试验组合。

具体反演分析的技术路线见图 1。

## 5 分析条件与概化模型

### 5.1 计算范围与地质概化模型

针对龙滩水电站地下洞室群工程地质特征和试验洞的位置,取  $x$ ,  $y$  和  $z$  轴的计算范围为  $500 \text{ m} \times 640 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ ,其中  $x$  轴与厂房轴线垂直,向下游为正;  $y$  轴铅直向上为正;  $z$  轴与机组中心线一致。计算区域见图 2,计算网格见图 3。

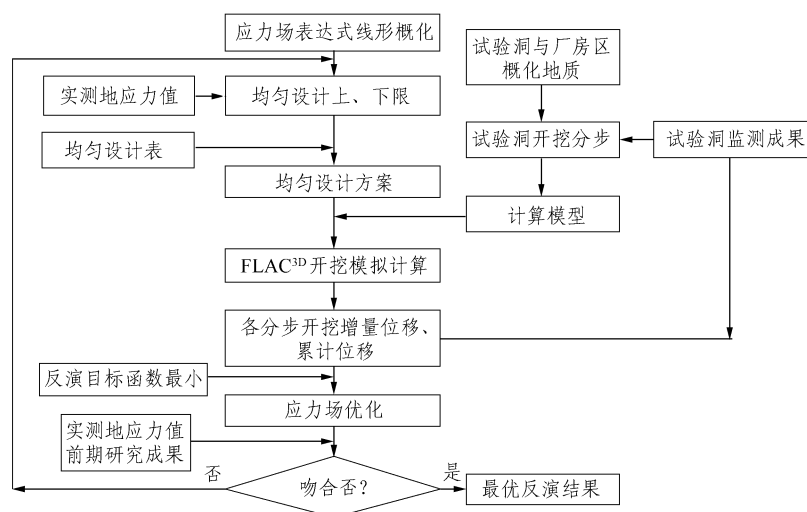


图 1 反分析技术路线图

Fig.1 Flow chart of back analysis

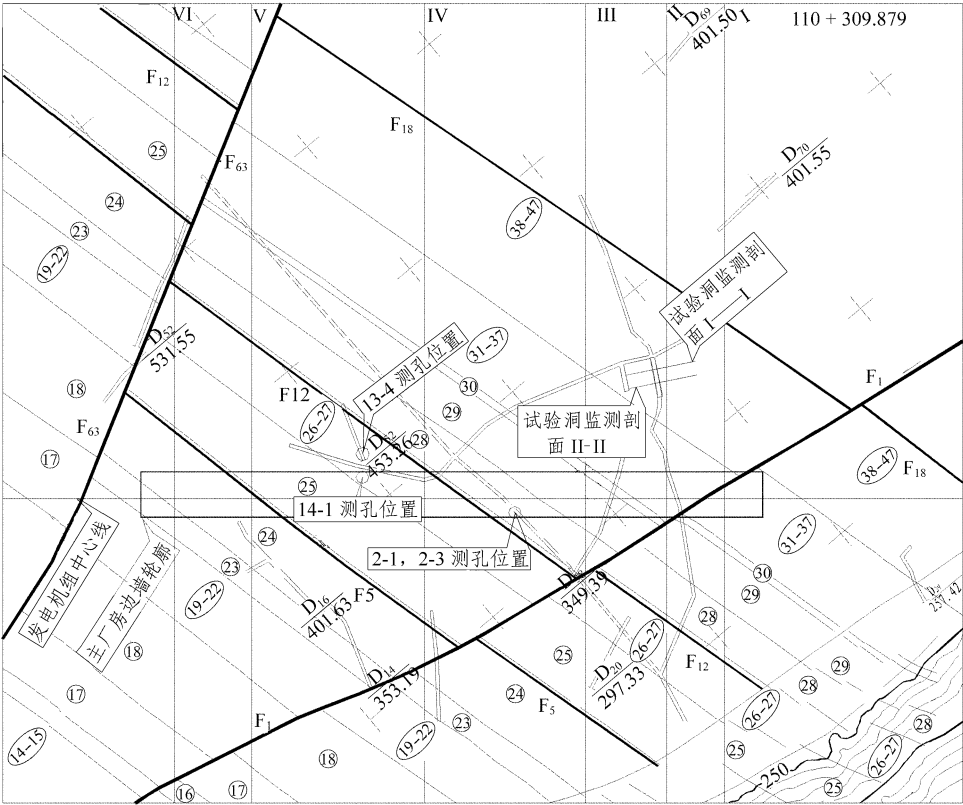


图 2 计算范围  
Fig.2 Calculation range

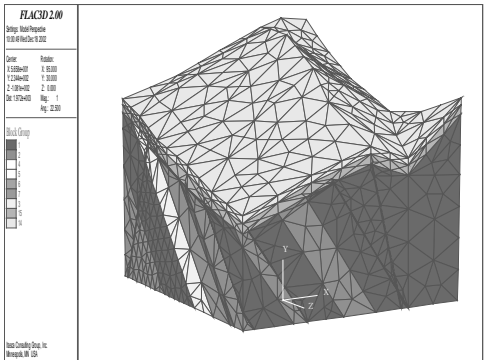


图 3 计算网格图  
Fig.3 Diagram of model meshes

计算区域内包含了以下地层：砂岩组： $T_{2b}^{14-17}$ ， $T_{2b}^{25}$ ， $T_{2b}^{28-30}$ ， $T_{2b}^{38-47}$ ；砂岩、泥板岩互层组： $T_{2b}^{7-13}$ ， $T_{2b}^{19-24}$ ， $T_{2b}^{26-27}$ ， $T_{2b}^{31-37}$ ， $T_{2b}^{48}$ ， $T_{2b}^{50}$ ；泥板岩： $T_{2b}^{18}$ 。同时考虑了 5 条对洞室群结构和厂房区地应力影响较大的断层： $F_1$ ， $F_5$ ， $F_{12}$ ， $F_{18}$ ， $F_{63}$ ，具体见图 2。

根据工程地质条件和岩石力学试验结果，确定各岩组岩石力学参数如表 3。

5.2 基本假定

(1) 用于反演的初始数据为 3 个阶段开挖引起的位移增量，考虑到监测结果的完整性，本文仅使

表 3 地下厂房区各岩层岩石力学参数  
Table 3 Parameters of rocks masses in underground powerhouse area

编号	风化状况	岩性	层位	容重 /kN·m <sup>-3</sup>	抗拉强度 /MPa	抗剪强度参数		变形模量 /GPa	泊松比
						$f$	$c'$ /MPa		
1	强风化			25.5	0.0	0.75/36.9	0.49	1.75	0.34
2	弱风化			26.5	0.0	1.2/50.2	1.18	7.0	0.28
3	微风化~新鲜	砂岩	1, 5-6, 14-15, 17, 23, 25, 28, 38~47	26.8	1.5	1.5/56.3	2.45	17.5	0.24
		泥板岩	2-4, 18		0.8	1.1/47.7	1.48	12.5	0.26
		砂岩与泥板岩互层	7-13, 16, 19-22, 24, 26-27, 29-37		1.3	1.3/52.4	1.96	15.5	0.25
		断层			0	0.32/18	0.04	0.5	0.34

用 4 个预埋孔及 2 个非预埋孔的监测数据, 从而便于计算结果的分析;

(2) 材料模型采用弹塑性 Mohr-Coulomb 模型;

(3) 5 条断层:  $F_1, F_5, F_{12}, F_{18}, F_{63}$ , 均采用实体单元进行模拟。

5.3 样本构造

根据地应力测试 results 和工程地质分析, 确定 2 个模型中的参数  $A_i, B_i (i = 1 \sim 3)$  的上下限, 并取 12 个均匀的水平, 见表 4; 按照均匀设计表进行设计<sup>[13]</sup>, 其中  $A_i (i = 4 \sim 6)$  取为常数, 共得到 12 组样本, 见表 5。

表 4 样本水平  
Table 4 Sample levels

水平	$B_1$	$A_1$	$B_2$	$A_2$	$B_3$	$A_3$
1	0.039	0.65	0.019	0.15	0.044	1.05
2	0.040	0.70	0.02	0.20	0.045	1.10
3	0.041	0.75	0.021	0.25	0.046	1.15
4	0.042	0.80	0.022	0.30	0.047	1.20
5	0.043	0.85	0.023	0.35	0.048	1.25
6	0.044	0.90	0.024	0.40	0.049	1.30
7	0.045	0.95	0.025	0.45	0.050	1.35
8	0.046	1.00	0.026	0.50	0.051	1.40
9	0.047	1.05	0.027	0.55	0.052	1.45
10	0.048	1.10	0.028	0.60	0.053	1.50
11	0.049	1.15	0.029	0.65	0.054	1.55
12	0.050	1.20	0.030	0.70	0.055	1.60

注:  $A_4 = 0.9, A_5 = -1.2, A_6 = -0.3$ , 这 3 个参数不参加反演。

表 5 均匀设计方案表

Table 5 The schemes of uniform design

方案	$B_1$	$A_1$	$B_2$	$A_2$	$B_3$	$A_3$
1	0.039	0.70	0.024	0.50	0.052	1.50
2	0.040	0.80	0.030	0.25	0.048	1.35
3	0.041	0.90	0.023	0.65	0.044	1.20
4	0.042	1.00	0.029	0.40	0.053	1.05
5	0.043	1.10	0.022	0.15	0.049	1.55
6	0.044	1.20	0.028	0.55	0.045	1.40
7	0.045	0.65	0.021	0.30	0.054	1.25
8	0.046	0.75	0.027	0.70	0.050	1.10
9	0.047	0.85	0.020	0.45	0.046	1.60
10	0.048	0.95	0.026	0.20	0.055	1.45
11	0.049	1.05	0.019	0.60	0.051	1.30
12	0.050	1.15	0.025	0.35	0.047	1.15

6 反演分析结果

对表 5 的 12 个样本, 分别作为初始应力场, 采用三维显式有限差分法进行开挖模拟计算。在此基础上, 根据计算位移和监测位移, 进行趋势判断和目标函数比较, 最终确定最优的地应力场分布。

从严格的力学原理上讲, 应力场的判据应从决定物体内部点应力状态的独立参数出发。然而, 计算模型是从非常复杂的地质现象中抽象出来的, 和实际情况存在很大差异, 要想使这些参数之间严格地对应起来几乎是不可能的。在实际中, 常常可以通过分析地应力场的整体变化规律来检验模拟结果的真实性<sup>[14]</sup>。

6.1 位移目标函数

根据计算位移和监测位移, 对 12 种方案的各步开挖完成时的累计位移及增量位移进行比较, 并计算位移反分析目标函数, 结果如图 4~6。

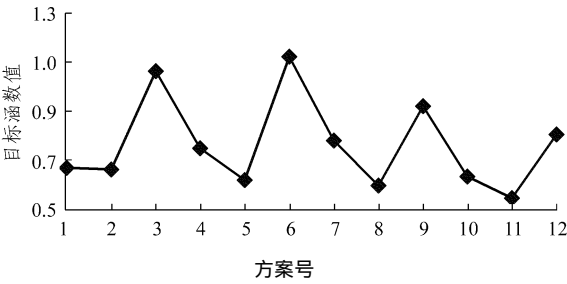


图 4 第 2 步开挖完成后累计位移目标函数值

Fig.4 Object function value of total displacement after the second step of excavation

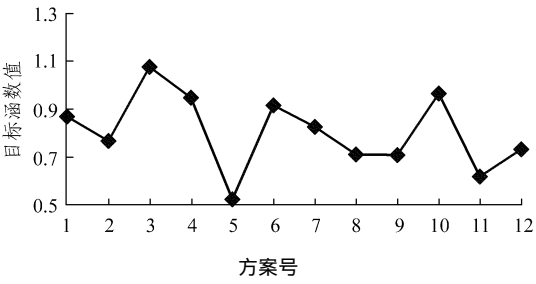


图 5 第 3 步开挖完成后累计位移目标函数值

Fig.5 Object function value of total displacement after the third step of excavation

图 4~6 表明, 按方案 8 确定地应力场进行开挖模拟计算, 所获得的位移目标函数最小, 计算与监测位移在量值上相当, 在变化趋势上也基本相同, 表明按方案 8 确定的地应力场是基本合理的。

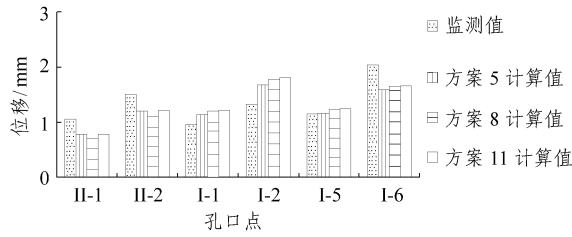


图 6 开挖完成后方案 5, 8, 11 计算位移与监测位移对比  
Fig.6 Comparison of the calculated displacements of scheme 5, 8, 11 and monitored displacements after the third step of excavation

6.2 对比分析

将实测点应力值与计算所得应力值对比分析, 结果见表 6, 从表中可以看出, 反演所得应力场与实测应力基本相符合。

表 6 实测与计算应力值对比

Table 6 Comparison of measured and calculated stress values MPa

测点号	$\sigma_x$		$\sigma_y$		$\sigma_z$	
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
13-4	-5.792	-9.91	-4.00	-5.45	-8.756	-6.52
14-1	-10.51	-10.3	-6.273	-5.27	-12.16	-6.81
2-1	-9.105	-7.81	-5.252	-3.27	-9.473	-6.03
2-3	-6.246	-8.34	-3.398	-3.27	-9.683	-5.94

7 结 语

本文采用均匀设计方法和三维显式有限差分法对龙滩水电站厂房区岩体地应力场进行了三维反演分析, 获得了岩体地应力场沿深度的分布规律, 其具体表达如下:

- (1) 对风化岩体, 其地应力场按公式(1)计算。
- (2) 对微新岩体, 有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -0.75 - 0.046h \\ \sigma_y &= -0.70 - 0.027h \\ \sigma_z &= -1.1 - 0.050h \\ \tau_{xy} &= 0.9 \\ \tau_{yz} &= -1.2 \\ \tau_{zx} &= -0.3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $h$  为地表至计算点的高程差(m), 应力单位为 MPa。

(3) 对弱风化岩体, 其应力场由式(1)与(4)插值计算得到。

上述分析与所得公式是初步的, 具有一定探索性, 更加深入的研究应结合地下厂房区的施工监测开展大范围的反演分析。本文提出的地应力场的反演方法简便、有效, 特介绍于此, 与业内同行交流切磋。

参 考 文 献

- 1 丰定祥, 谷光荣, 杨家岭等. 关于地下工程有限元分析中初始地应力场的假定[J]. 地下工程, 1982, (2): 20~27
- 2 郭怀志, 马启超, 薛空成等. 岩体初始应力场的分析方法[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 64~75
- 3 朱伯芳. 岩体初始地应力反分析[J]. 水利学报, 1994, (10): 30~35
- 4 余成学, 熊文林, 陈胜宏. 边坡初始地应力场的应力函数与有限元联合反演法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(4): 366~371
- 5 方祖烈, 路长全. 西石门铁矿地应力量测与应力场的反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(1): 96~105
- 6 于波, 蔡美峰, 乔兰. 灰色建模理论在峨口铁矿地应力分布规律研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(2): 122~127
- 7 喻军华, 金伟良, 邹道勤. 分析初始地应力场的位移函数法[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 417~419
- 8 邱祥波, 李术才, 李树忱. 三维地应力回归分析方法与工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1613~1617
- 9 庞作会, 陈文胜, 邓建辉等. 复杂初始地应力场的反分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 44~47
- 10 杨志法, 熊顺成, 王存玉等. 关于位移反分析的某些考虑[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(1): 11~16
- 11 王晓春, 聂德新, 冯庆祖. V型河谷地应力研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 146~151
- 12 朱焕春, 陶振宇. 不同岩石中地应力分布[J]. 地震学报, 1994, 16(1): 49~63
- 13 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994
- 14 刘允芳. 岩地应力与工程建设[M]. 湖北: 湖北科学技术出版社, 2000