

文章编号: 1000-7709(2010)02-0044-03

# 基于 Nelder-Mead 算法与有限单元法的岩土力学参数反演

贾善坡<sup>1</sup> 伍国军<sup>2</sup>

(1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 提出了基于 Nelder-Mead 优化算法与有限单元法反演岩土力学参数的方法,以测点的实测值与计算值建立精确罚函数误差模型,并将有限元程序 ABAQUS 作为模块嵌入 Nelder-Mead 优化算法中编制了优化反分析程序。算例结果表明,该法局部搜索能力较强,反演精度高,可应用于岩土工程中的反演分析。

**关键词:** 岩土力学; 优化反演; Nelder-Mead 法; 有限元; ABAQUS

**中图分类号:** TU454

**文献标志码:** A

近年来,随着对岩土介质本构模型研究的深入,各种数值计算方法发展较快,并成为研究岩土力学和地下工程的重要手段之一。运用数值方法解决岩土工程实际问题时,计算参数的选取很大程度上决定了计算结果的准确性、客观性和实用性。由于岩土介质的非均质性和赋存环境的复杂性,其力学特性参数及赋存环境总处于动态的演化过程中,因此参数的取值是数值计算中的一个难点。确定岩土体力学参数主要有试验法和反演分析法。普遍认为利用监测的位移信息,通过反演分析法反求解岩土体的力学参数,再应用于后续施工过程的途径更合理、更科学。位移反分析可分为逆反分析法和正反分析法。逆反分析法仅适用于位移和待求参数为线性函数;正反分析法则适用于位移是参数的线性函数或非线性函数。由于岩土体介质的非线性,不可能依据弹性理论借助求逆过程获得合理结果,因此有必要在非弹性问题的位移反演分析计算中引入优化过程<sup>[1~4]</sup>。鉴此,本文介绍了基于 Nelder-Mead 优化算法与有限单元法反演岩土力学参数的方法,将商业软件 ABAQUS 嵌入优化算法中编制了优化反分析程序。实例结果表明,该法有效可行,值得推广。

## 有限元优化反演理论

### 优化反分析模型

岩土力学参数主要包括弹性力学、塑性、损伤

或流变等参数,待求参数为:

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_m]^T \quad (1)$$

式中, $m$  为待求参数的总个数。

岩土介质是一种复杂的材料模型,弹塑性本构关系中的位移与力学参数间并非线性关系,位移反演需通过优化解法实现。优化反演分析法致力于寻求计算结果与观测结果误差最小,通过建立目标函数实现,其模型构建详见文献[1]。

### 优化算法

Nelder-Mead 优化算法是求多维函数极值的一种算法,不需计算目标的函数导数,易编程实现,算法简单,适合变元数不是很多的优化问题<sup>[5]</sup>。方法基本原理详见文献[1]。

## 程序实现

基于岩土力学参数反演方法,在大型商业软件 ABAQUS 的基础上,以 Matlab 语言为平台编制了优化反分析程序 Geo-Inverse.m。程序框图如图 1 所示。优化反分析程序实施步骤如下。

**步骤 1** 在 Matlab 程序中编写主程序,定义测点的实测值及待反演参数的初始值;通过 fopen 调用 ABAQUS 命令流文件(\*.inp 文件),并通过 system 命令调用 ABAQUS 进行计算。

**步骤 2** 编写目标函数子程序,调用 ABAQUS 结果文件(\*.dat 文件),获取测点的有限元计算值,并计算目标函数。

收稿日期: 2009-08-26,修回日期: 2009-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助重大国际合作项目(50720135906);国家自然科学基金资助项目(40772184)

作者简介: 贾善坡(1980-),男,讲师,研究方向为岩石力学与地下工程,E-mail: jiashanporsm@163.com

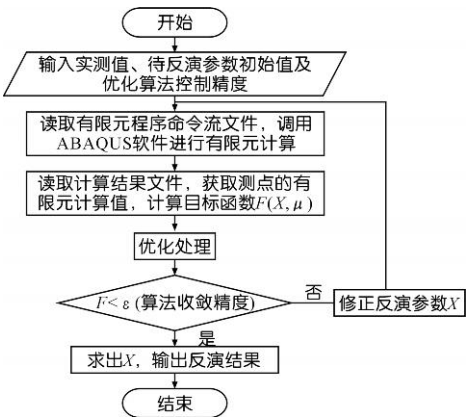


图 1 岩土力学参数优化反演程序框图

Fig.1 Flow chart of inversion analysis for mechanical parameters of geotechnical materials

步骤 3 编写 Nelder-Mead 算法子程序,根据主程序定义的初始值进行优化计算。

步骤 4 Nelder-Mead 算法优化迭代形成新的单纯形后,利用 strrep 命令修正 ABAQUS 命令流中的待反演参数,直至  $| (F_H - F_L) / F_L |$  为止。其中,  $E_H$ 、 $F_L$  分别为单纯形中目标函数最大、最小值;为迭代收敛精度。

算例

以泥岩隧道开挖为例,隧道截面为圆形,直径 4.84 m,隧道埋深 223.00 m。泥岩采用 Mohr-Coulomb 模型,隧道轴线处的初始地应力为 2.25 MPa,孔隙水压力为 2.25 MPa,水平侧压力系数为 0.8。泥岩的力学参数见表 1。用单元生死模拟开挖,由于泥岩的渗透性较小,可假定为不排水条件<sup>[6]</sup>。计算模型及测点分布如图 2 所示。

对模型进行弹塑性流固耦合分析,将计算的围岩位移场视为真实位移场。取围岩周边几个节

表 1 泥岩的力学参数

Tab.1 Mechanics parameters of mudstone					
参数	单位	数值	参数	单位	数值
重度	kN/ m <sup>3</sup>	21	粘聚力	MPa	1.5
弹性模量	MPa	800	渗透系数	m/ s	1.1 ×10 <sup>-12</sup>
泊松比		0.125	孔隙度		0.39
内摩擦角	(°)	18	孔隙水体积模量	GPa	2

表 4 测点位移实测值与反演值

Tab.4 Measured and numerical displacements of selected points									
测点		实测		反演值		测点		实测	
		$u_x$	$u_y$	$u_x$	$u_y$			$u_x$	$u_y$
# 6	0	- 2.356 3	0	- 2.356 5		# 16	- 1.923 6	0.719 2	- 1.921 1
# 63	- 0.649 7	- 2.257 9	- 0.649 8	- 2.257 6		# 2	- 1.331 1	1.412 7	- 1.330 2
# 5	- 1.314 2	- 1.907 9	- 1.313 5	- 1.906 7		# 45	- 0.660 6	1.771 8	- 0.661 0
# 54	- 1.912 2	- 1.219 8	- 1.909 9	- 1.218 8		# 4	0	1.872 8	0
# 1	- 2.159 2	- 0.255 3	- 2.155 9	- 0.255 3					

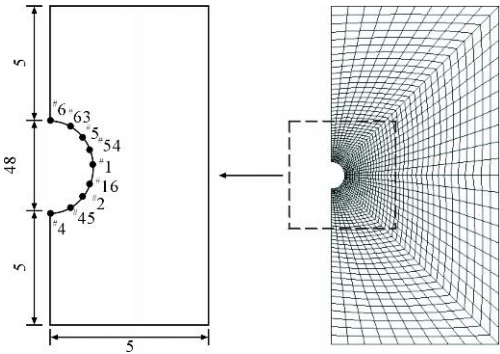


图 2 泥岩隧道开挖测点分布示意图(单位:m)

Fig.2 Numerical model of tunnel excavation and measurement points

点作为实际测点,依据其位移值由优化反演法获得力学参数。参数设置见表 2,通过比较表 3、表 4 可判断本文方法的合理性和精度。优化程序迭代了 129 次,调用 ABAQUS 计算 319 次。由表可知,反演结果与真实值非常接近,反演所得的测点位移也与实测值非常接近,相对误差均控制在 5 %以内。由此可知,Nelder-Mead 法局部搜索能力较强,反演参数的精度较高,该方法为地下工程围岩弹塑性力学参数的确定提供了有效途径,对解决实际工程具有重要意义。

对岩土介质的强度特征和变形参数,通过室内试验和现场测试可为待求参数初值的设定提供可靠依据;对优化反分析方法,若初值的偏差太大,

表 2 待反演参数设置

Tab.2 Initial setting of undetermined parameters for inversion model			
待反演参数	弹性模量/ 10 <sup>2</sup> MPa	内摩擦角/(°)	粘聚力/ MPa
反演区间	3 ~ 20	10 ~ 30	1.0 ~ 3.5
初始值	5	25	2.0

表 3 反演结果与真实值的比较

Tab.3 Comparison of real and numerical results for mechanical parameters				
反演参数	单位	真实值	反演结果	相对误差/ %
弹性模量	10 <sup>2</sup> MPa	8	7.978 8	0.26
内摩擦角	(°)	18	18.246 0	1.37
粘聚力	MPa	1.5	1.498 5	0.10

将耗费大量时间,甚至不收敛。因此,对参数初值的设定进行了数值试验,结果发现待反演参数初值影响计算效率。若初值靠近参数范围的极值,将需更多的迭代次数,一般将初值取为参数取值范围的平均值。此外,若待反演参数过多,将造成反分析的难度甚至产生较大误差,每增加一个反演参数,计算时间将大幅增加。对待求参数进行敏感性分析可提高反分析的效率,并减少反分析的工作量,因此显得十分必要。文献[6,7]指出,对塑性区变形,参数敏感性的排序为:粘聚力最为明显,弹性模量次之,内摩擦角较差。由表3的反演效果误差分析亦可看出,粘聚力对塑性变形最敏感,误差最小。

## 结语

a. 提出了基于 Nelder-Mead 优化算法与有限单元法识别岩土力学参数的方法,将商业软件 ABAQUS 作为模块嵌入 Nelder-Mead 优化算法中,并通过算例求解。结果表明,该法有效、实用性强,值得推广。

b. 优化反演方法可推广应用于岩土体初始地应力场、渗流场及位移场等反演分析中。

## 参考文献:

- [1] 贾善坡,陈卫忠,谭贤君,等. 大岗山水电站地下厂房区初始地应力场 Nelder-Mead 优化反演研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2 341-2 348.
- [2] 贾善坡,闫相祯,杨丽. 油田构造应力场数值模拟边界载荷判别的反演方法[A]. 中国力学学会学术大会 2005 论文摘要集[C]. 北京:中国学术期刊电子杂志社, 2005.
- [3] 向衍,郑东健,何旭升,等. 基于 MSC. Marc 的物理力学参数反演[J]. 水电能源科学, 2003, 21(4): 7-10.
- [4] 杨志法,王思敬,冯紫良,等. 岩土工程反分析原理及应用[M]. 北京:地震出版社, 2002.
- [5] 吕爱钟,蒋斌松. 岩石力学反问题[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1998.
- [6] 贾善坡,陈卫忠,于洪丹,等. 泥岩隧道施工过程中渗流场与应力场全耦合损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 19-26.
- [7] 贾善坡,陈卫忠,李香玲. 基于非参数统计的泥岩水-力耦合参数敏感性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(5): 830-834.

## Identification of Parameters of Geotechnical Model Using Nelder Mead Algorithm and Finite Element Method

JIA Shanpo<sup>1</sup> WU Guojun<sup>2</sup>

(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Identification of parameters of geotechnical model is put forward by using Nelder Mead algorithm and finite element method. The error model of exact penalty function is established through the measured value and the corresponding calculation result. Optimal inversion program is compiled by embedding the ABAQUS into the finite element program. The results show that the proposed method has strong local search property and high precision. Thus, it can be applied to inversion analysis of geotechnical engineering.

**Key words:** rock and soil mechanics; optimal inversion; Nelder Mead algorithm; finite element; ABAQUS

(上接第 9 页)

## Extreme Hydrologic Event Response to Climate Change Scenario in Heihe Basin

WU Zhiyong<sup>1</sup> GUO Hongli<sup>2</sup> JIN Junliang<sup>1</sup> YAN Guixia<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Based on the data of the climate change scenario and the Variable Infiltration Capacity model, Yingluoxia which is the main control section of the Heihe Basin is chosen and the frequency analysis method is used to study the change trends of the extreme hydrologic in Heihe Basin under the climate change scenario. The results show that the precipitation, the highest and the lowest temperature and the evaporation in the future would be increased under the SRES A2 and SRES B2 scenarios while the average annual runoff would be decreased; the hydrologic cycle and the time-histories non-uniform properties of water resource distribution would be exacerbated by the climate change; the flood and low water events in Yingluoxia section would be more severe; the risk for the shortage of the irrigation water would be further expanded in the future.

**Key words:** climate change; extreme hydrologic event; Heihe River; VIC model; response