

# 嘎隆拉隧道围岩力学参数对变形的敏感性分析

王 辉<sup>1,2</sup>, 陈卫忠<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 山东科技大学资源与土木工程系, 山东 泰安 271019)

**摘要:** 以嘎隆拉隧道为研究背景, 根据现场地质状况建立可变参数的有限元模型, 以现场监测变形数据为基础, 对力学参数(弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角)和侧压力系数进行反分析, 获取现场围岩参数的真实值。在此基础上, 基于敏感性分析方法, 研究围岩力学参数对变形的敏感性。研究结果表明: 拱顶沉降对弹性模量比较敏感, 对其它参数的敏感性相对较小; 而周边收敛则相反, 泊松比、内摩擦角、黏聚力要比弹性模量更为敏感。研究结果对嘎隆拉隧道的稳定性分析具有一定的参考价值。

**关键词:** 嘎隆拉隧道; 稳定性; 反分析; 敏感性分析

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)08-1548-06

作者简介: 王 辉(1982-), 男, 山东滨州人, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程研究方面的工作。E-mail: wanghui2004315@163.com。

## Sensitivity analysis of mechanical parameters to deformation of surrounding rock in Galongla tunnel

WANG Hui<sup>1,2</sup>, CHEN Wei-zhong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Department of Resources and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China)

**Abstract:** Taking Galongla tunnel as an example, a finite element model of variable parameters is established according to the geological conditions. On the basis of deformation monitoring data, back analysis is performed for the mechanical parameters including elastic modulus, Poisson's ratio, cohesion, internal friction angle and lateral pressure coefficient in order to get the real values of surrounding rock. Then the proposed sensitivity analysis method is employed to study the sensitivity of the mechanical parameters of surrounding rock to deformation. The results show that, for vault settlement, the elastic modulus is more sensitive than the other parameters. For the surrounding convergence which is opposite to the vault settlement, the Poisson's ratio, cohesion and internal friction angle are more sensitive than the elastic modulus. The results of this study have a certain reference value for the stability analysis of Galongla tunnel.

**Key words:** Galongla tunnel; stability; back analysis; sensitivity analysis

## 0 引言

地下工程研究中, 敏感性分析作为系统分析中研究系统稳定性的重要方法引入到岩土工程领域并得到了广泛应用。朱维申等<sup>[1]</sup>针对黄河拉西瓦地下水电站工程, 采用敏感性分析法, 分别设定各因素在其本身可能变化的范围内变动, 分析围岩破損区范围相应产生的变化程度和趋势。侯哲生等<sup>[2]</sup>利用非线性弹塑性有限元法, 研究了金川二矿区底盘某采准巷道围岩力学参数对变形的敏感性, 得到不同参数对变形的敏感性。李晓静等<sup>[3]</sup>以琅琊山实际工程地下厂房的结构型式为背景, 选取对地下洞室稳定性影响较为重要的四

参数(变形模量、洞室埋深、主厂房高度、侧压力系数), 进行大量塑性数值模拟分析并对位移进行参数敏感性分析。聂卫平等<sup>[4]</sup>采用基于弹塑性有限元的洞室稳定性参数敏感性灰关联分析法对地下洞室稳定影响参数进行敏感性分析。黄书岭等<sup>[5]</sup>提出基于敏感度熵权的属性识别综合评价模型, 为参数敏感性分析提供了一种新的思路。关于参数的敏感性研究方面, 其他学者<sup>[6-8]</sup>也做过大量研究。分析发现, 前人的研究工作主要集中在围岩力学参数在其可能出现的较大的范围

内变化时对围岩变形的敏感性。然而实践表明, 在实际工程中尤其是对于隧道深埋地段, 局部区域内围岩性质基本稳定或变化很小, 因此开展力学参数的微弱变化对变形的敏感性研究具有更重要的现实意义。

嘎隆拉隧道是西藏扎木—墨脱(扎墨)公路的控制性工程, 最大埋深段拱顶至地表距离达到 830 m, 位于桩号 K49+300 附近, 地质勘查结果表明该段隧道围岩主要为弱—微风化花岗岩, 稳定性较好, 属于三级围岩, 见图 1。本文以嘎隆拉隧道深埋地段围岩力学参数对变形的敏感性分析作为选题依据, 结合现场位移监测数据进行围岩力学参数反分析, 在此基础上进行参数对围岩变形的敏感性分析, 明确不同参数对变形的影响程度, 为嘎隆拉隧道的稳定性分析提供参考。

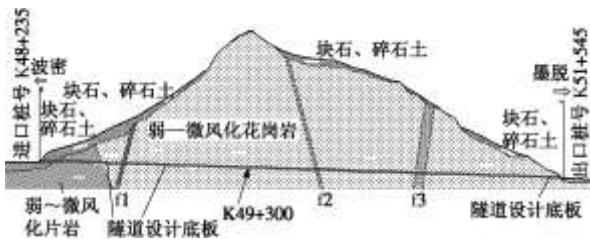


图 1 嘎隆拉隧道工程地质剖面图

Fig. 1 Geological section of Galongla tunnel

## 1 参数位移反分析模型及实现

### 1.1 数值模型

数值计算模型以嘎隆拉隧道 III 级围岩为研究对象, 采用有限元弹塑性平面应变单元进行分析。围岩的屈服破坏服从 Drucker-Prager 屈服准则, 即

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} + k \quad , \quad (1)$$

式中,  $I_1$  和  $J_2$  分别为应力张量的第一不变量与应力偏量第二不变量,  $\alpha$  和  $k$  分别为与岩石的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  有关的常数。

有限元模型选取隧道桩号 K49+300 处断面, 见图 2。模型选取范围: 上部取至隧道顶部以上 100 m, 下部取至隧道底部以下 100 m, 左右边界距离为 200 m, 以隧道中轴线左右对称。两侧边界为  $X$  方向水平约束, 底部边界为  $Y$  方向垂直约束。根据现场地应力测量资料, 在模型上表面施加 17.15 MPa 的压应力, 对整个模型施加岩土体自重压力。数值模拟过程隧道开挖后直接施加锚杆和衬砌支护。衬砌的厚度为 0.30 m, 锚杆的力学性质采用梁单元模拟。

### 1.2 反演方法

采用位移反分析方法, 以现场监测围岩变形为依据, 反演分析围岩力学参数和侧压力系数。本文待反演参数表示为

$$X = [E, \nu, c, \varphi, P] \quad , \quad (2)$$

式中,  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $c$  为黏聚力,  $\varphi$  为内摩擦角,  $P$  为侧压力系数。

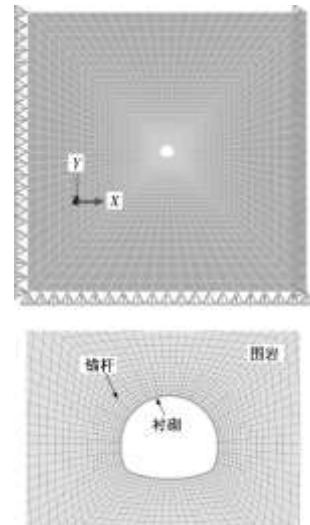


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element models

通过现场监测得到测点处的位移表示为

$$U^* = \{u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*\} \quad , \quad (3)$$

式中,  $u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*$  为测点的位移现场实测值,  $n$  为测点的个数。

在数值计算中, 隧道围岩变形  $U$  是各力学参数和侧压力系数的函数, 表示为

$$U = f(E, \nu, c, \varphi, P) \quad . \quad (4)$$

给定待求参数  $X$  初值, 即可通过数值计算得到各测点处的变形值, 即

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad , \quad (5)$$

式中,  $u_1, u_2, \dots, u_n$  为测点的计算位移值。

根据现场试验和相关规范确定待反演参数的取值范围, 计算各项参数不同组合情况下测点的位移, 使其与现场监测位移的差的绝对值最小。其表达式为

$$\Psi(X) = \sum_{i=1}^n |u_i - u_i^*| \quad . \quad (6)$$

通过计算得到的一组参数使  $\Psi$  取得极小值时, 认为得到的参数即为现场围岩的力学参数。

基于以上思路, 将 ABAQUS 有限元算法嵌入到 MATLAB 计算程序中, 结合精确罚函数法以及 Nelder-Mead 优化算法, 编制相应的位移反演程序, 并应用于嘎隆拉隧道变形反分析研究中。位移反分析计算程序的实现方法详见贾善坡等<sup>[9-10]</sup>的研究。

### 1.3 计算结果分析

根据现场工程勘察资料和公路隧道设计规范<sup>[11]</sup>确定围岩力学参数取值范围见表 1。由测试结果确定侧压力系数取范围为 0.4~1.0。现场监测隧道桩号 K49+300 处断面位移见图 3。从结果分析, 围岩变形

随时间的变化基本上以 20 d 为界分为 2 个阶段: 20 d 前变形剧烈; 20 d 后变形趋于平稳, 拱顶下沉及周边收敛的日变化量基本小于 0.6 mm/d, 可以为变形已经稳定, 因此在这里把 20 d~72 d 的平均变形量作为待反演基准参数集的目标函数。通过计算得到现场监测平均变形值为拱顶沉降 0.0165 m, 周边收敛 0.0045 m。

表 1 围岩和支护结构力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock and supporting structure of tunnel

材料	密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$c/\text{MPa}$	$\phi/(\text{°})$
弱一微风化花岗岩	2350	6~15	0.25~0.30	1.50~2.50	45~50
初次衬砌	2800	42	0.18	36	58
锚 杆	7800	105	0.20	—	—

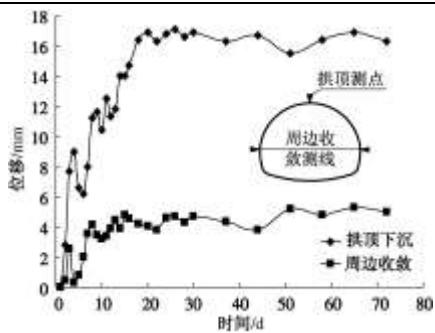


图 3 现场监测位移值与时间关系

Fig. 3 Relationship between in-situ measured displacement and

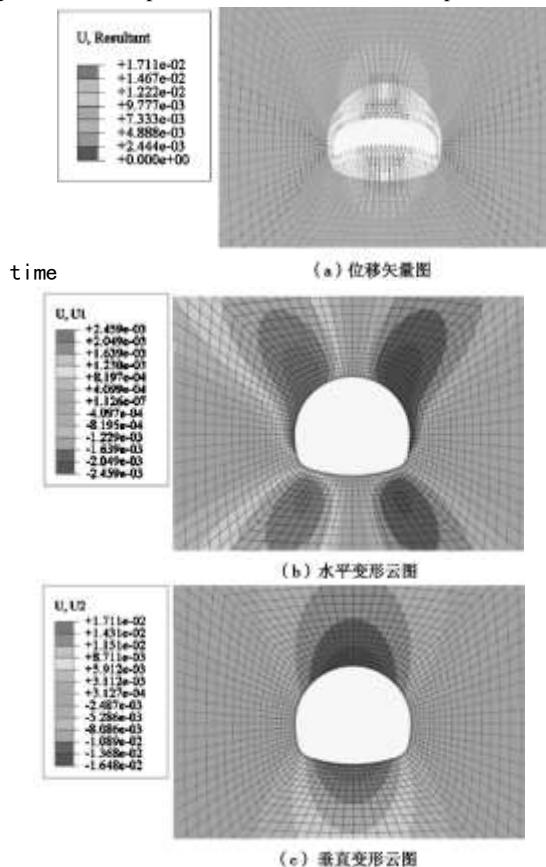


图 4 反分析计算结束时围岩变形图

Fig. 4 Deformation nephograms of surrounding rock after back analysis

按照本文提出的反演方法, 根据现场监测位移对隧道围岩力学参数和侧压力系数进行反演。当总目标函数和反演参数的变化小于 0.00001 时, 优化程序迭代终止。通过计算, 反演算法迭代 48 次, 调用 ABAQUS 进行有限元程序计算 160 次。有限元计算变形结果为拱顶沉降 0.0165 m, 周边收敛 0.0044 m。通过与现场监测数据对比, 变形基本吻合。说明有限元计算参数与现场围岩参数较为一致。见表 2, 图 4, 5。

表 2 待反演参数初始值及反演结果

Table 2 Parameters for back analysis and optimal results

围岩参数	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$c/\text{MPa}$	$\phi/(\text{°})$	侧压力系数
初始值	8.00	0.27	2.00	47	0.60
反演结果	9.188	0.257	1.528	47.380	0.510

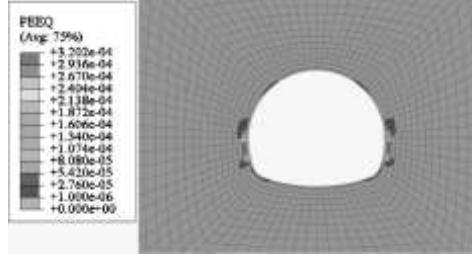


图 5 反分析计算结束时围岩塑性区分布云图

Fig. 5 Distribution of plastic zone of surrounding rock after back-analysis

## 2 基于有限元法的敏感度求解

### 2.1 围岩力学参数对变形的敏感性分析方法

设一系统, 其特征为  $F = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 给定其一基准状态  $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  ( $x_i$  为决定系统特性参数), 系统特性为  $F^* = f(X^*)$ , 令各参数在其各自的可能范围内变动, 分析由于这些参数的变动致使系统特性  $F$  偏离基准状态  $F^*$  的趋势和程度, 这种分析方法即为参数敏感性分析<sup>[12]</sup>。为了便于对不同性质和单位的各个因素的敏感性进行比较, 定义无量纲形式的参数敏感度函数<sup>[5]</sup>为

$$a_i = \left| \frac{\Delta F}{\Delta x_i} \cdot \frac{x_i^*}{F^*} \right| \quad (i = 1, 2, n) \quad (7)$$

由式 (7) 可知: 对于不同的  $\Delta x_i$  值, 将会得到不同的  $a_i$  值, 即  $a_i$  是  $\Delta x_i$  的函数。通过参数敏感度函数, 即可分析系统特性对各参数的敏感程度。敏感度函数值越大, 则系统特性对该参数越敏感。

根据以上对参数敏感性分析的定义, 确定某参数对围岩变形的敏感性是指该参数的变化对围岩变形的影响程度。本文的系统特征表现为

$$\left. \begin{array}{l} F = U, \\ X = (E, v, c, \varphi), \end{array} \right\} \quad (8)$$

$$U = f(E, v, c, \varphi). \quad (9)$$

根据式(7), 本文研究的围岩参数对变形敏感度函数可表示为

$$a_i = \left| \frac{\Delta U}{\Delta x_i} \cdot \frac{x_i^*}{U^*} \right|. \quad (10)$$

对于隧道工程而言, 局部区域内围岩性质变化不大, 尤其是深埋地段。因此研究真实围岩力学参数的微小变化对深埋隧道围岩变形的敏感度具有更现实的意义。通过式(10)可知, 敏感度函数的计算涉及到分析围岩力学参数与变形的关系问题, 然而对于工程问题来说, 无法写出其解析表达式, 对于研究参数变化对变形的影响程度则更加困难。因此, 运用一种只须计算围岩变形的直接方法, 并建立围岩变形与力学参数之间的关系处理该类问题, 则显得简便易行。以1.3节反演得到的围岩力学参数 $x_i^*$ 为依据, 利用式(11)选取围岩力学参数计算值:

$$x_{mi}^c = [x_i^* + (m-n/2)p x_i^*] \quad m = (0, 1, n), \quad (11)$$

式中,  $x_{mi}^c$  为第  $m$  个围岩力学参数计算值,  $x_i^*$  为第  $i$  个力学参数的基准值,  $n$  为基准值附近计算值的个数,  $p$  表示计算值偏离基准值的程度。 $n$  越大, 计算次数越多,  $p$  越小, 计算值距离基准值越近, 越能表现基准值位置计算参数变化对变形的影响。这里, 考虑到有限元计算效率, 取  $n=20$ ,  $p=0.001$ 。

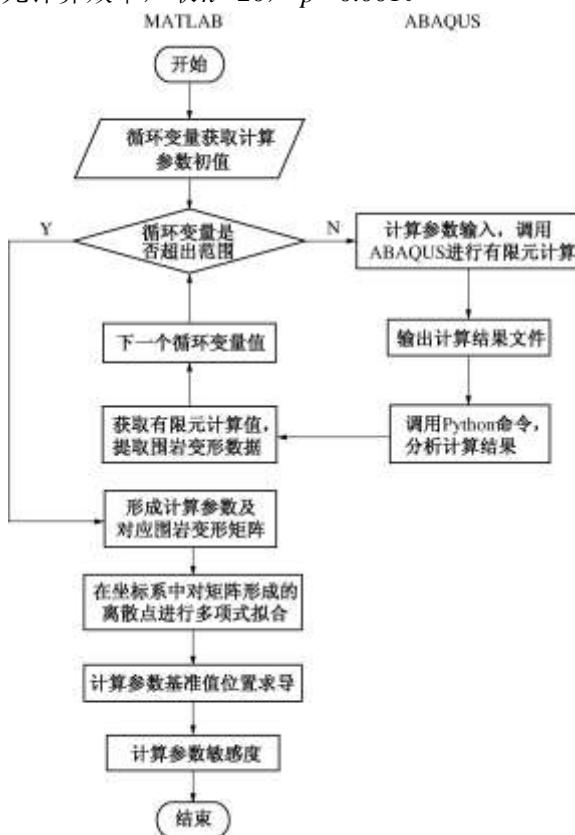


图 6 敏感度计算流程图

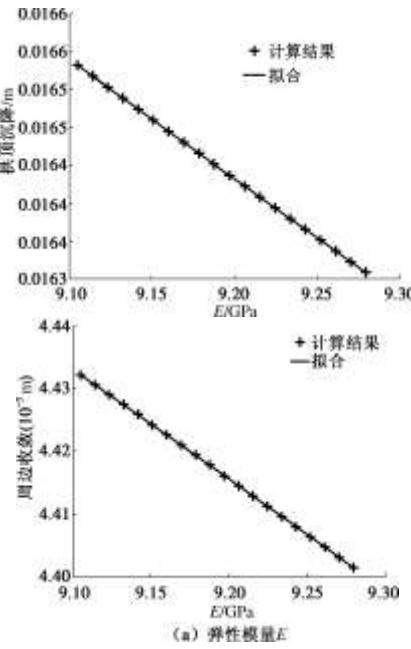
Fig. 6 Flow chart of sensitivity calculation

## 2.2 基于有限元法的敏感度程序实现

基于本文提出的敏感度计算的理论与方法, 以大型有限元程序 ABAQUS 及其标准设计语言 Python 为基础, 编写可变参数的计算程序及读取隧道围岩变形的程序, 以 Matlab 语言为平台, 编制了基于有限元方法的围岩力学参数对隧道变形的敏感度分析程序。该程序实现了有限元可变参数的循环计算, 自动提取计算参数及其对应的围岩变形数据, 并最终通过计算得出围岩参数对隧道变形的敏感度。具体步骤: ①在程序中调用计算文件, 输入计算参数, 并通过 system 命令调用 ABAQUS 进行计算; ②输出结果文件, 在 ABAQUS 中运行 Python 命令流分析结果文件, 并输出围岩变形数据; ③当满足终止条件时, 输出计算参数值及其对应的围岩变形数据; ④将计算参数值及其对应的围岩变形数据进行多项式拟合, 并在计算参数基准值位置求导; ⑤利用敏感度计算公式计算围岩参数对隧道变形的敏感度。程序框图见图 6。

## 2.3 计算结果分析

将其它参数保持不变, 分别对隧道围岩弹性模量  $E$ , 泊松比  $v$ , 黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  对变形的影响进行分析, 见图 7。从分析结果可知, 除了周边收敛值随着泊松比  $v$  的增大而增大外, 其它变形收敛值随着参数计算值的增大而减小, 且基本上均呈现出线性关系。通过计算得围岩各参数对变形的敏感度见表 3。



(a) 弹性模量  $E$

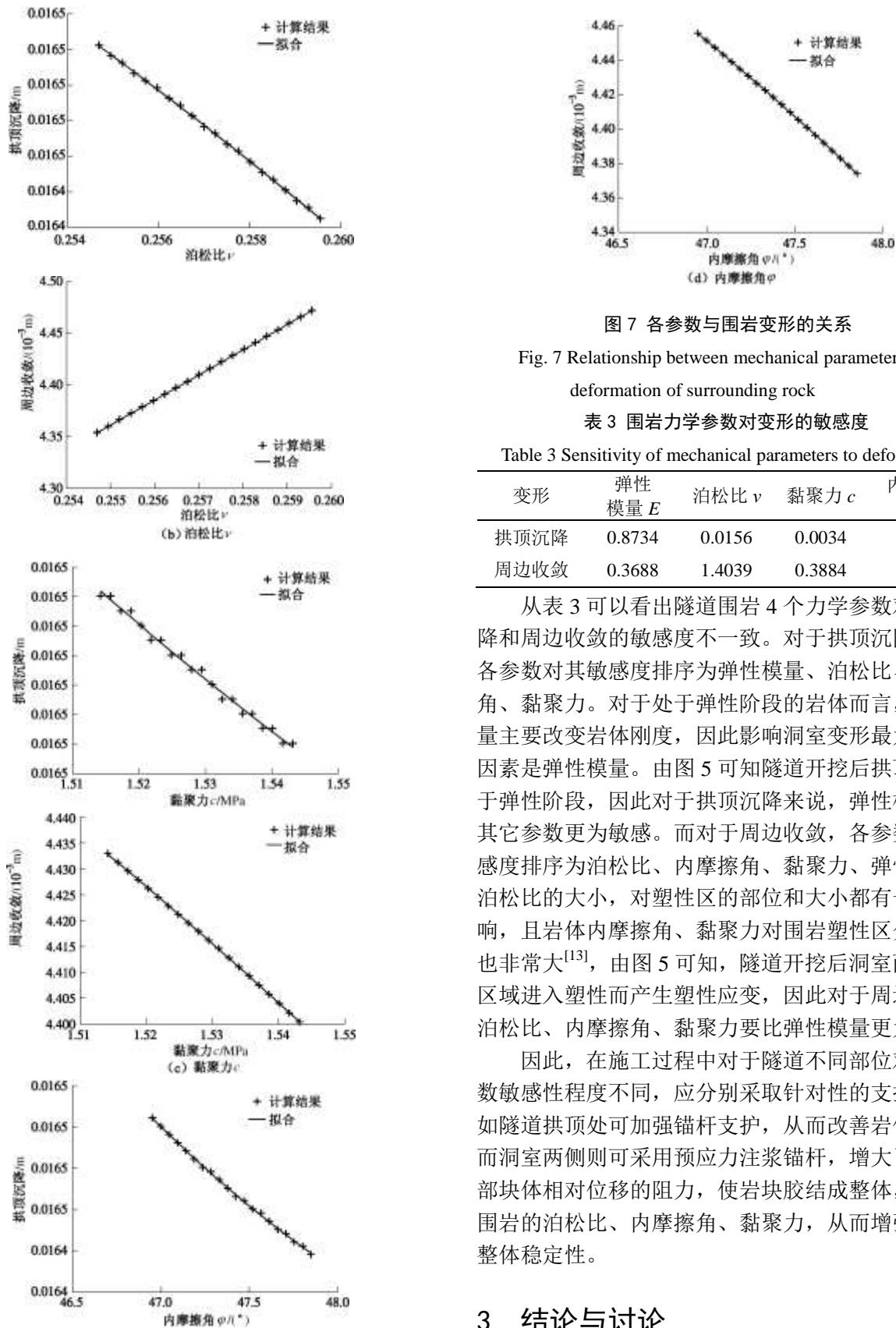


图 7 各参数与围岩变形的关系

Fig. 7 Relationship between mechanical parameters and deformation of surrounding rock

表 3 围岩力学参数对变形的敏感度

Table 3 Sensitivity of mechanical parameters to deformation

变形	弹性模量 $E$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c$	内摩擦角 $\varphi$
拱顶沉降	0.8734	0.0156	0.0034	0.0105
周边收敛	0.3688	1.4039	0.3884	0.9700

从表 3 可以看出隧道围岩 4 个力学参数对拱顶沉降和周边收敛的敏感度不一致。对于拱顶沉降而言, 各参数对其敏感度排序为弹性模量、泊松比、内摩擦角、黏聚力。对于处于弹性阶段的岩体而言, 弹性模量主要改变岩体刚度, 因此影响洞室变形最为敏感的因素是弹性模量。由图 5 可知隧道开挖后拱顶部位处于弹性阶段, 因此对于拱顶沉降来说, 弹性模量要比其它参数更为敏感。而对于周边收敛, 各参数对其敏感度排序为泊松比、内摩擦角、黏聚力、弹性模量。泊松比的大小, 对塑性区的部位和大小都有一定的影响, 且岩体内摩擦角、黏聚力对围岩塑性区分布影响也非常大<sup>[13]</sup>, 由图 5 可知, 隧道开挖后洞室两侧部分区域进入塑性而产生塑性应变, 因此对于周边收敛, 泊松比、内摩擦角、黏聚力要比弹性模量更为敏感。

因此, 在施工过程中对于隧道不同部位对围岩参数敏感性程度不同, 应分别采取针对性的支护措施。如隧道拱顶处可加强锚杆支护, 从而改善岩体刚度。而洞室两侧则可采用预应力注浆锚杆, 增大了岩体内部块体相对位移的阻力, 使岩块胶结成整体, 提高了围岩的泊松比、内摩擦角、黏聚力, 从而增强围岩的整体稳定性。

### 3 结论与讨论

(1) 在嘎隆拉隧道现场监测围岩变形的基础上, 利用本文提出的位移反分析方法得到了现场围岩力学参数值。

(2) 以大型有限元软件 ABAQUS 及其标准设计语言 Python 为基础, 以 Matlab 语言为平台, 编制了

基于有限元方法的围岩力学参数对隧道变形的敏感度分析程序, 实现了本文提出的敏感度计算方法。

(3) 分析了各力学参数对拱顶沉降和周边收敛的敏感性。研究发现: 围岩力学参数对隧道变形都有一定影响, 但对拱顶沉降和周边收敛的敏感度却不一致。对于拱顶沉降, 弹性模量要比其它参数更为敏感。而对于周边收敛而言, 泊松比、内摩擦角、黏聚力要比弹性模量更为敏感。同时提出了在施工过程中隧道不同部位应分别采取的针对性支护措施。

需要指出的是, 本文的分析是以围岩连续性为基础的, 然而嘎隆拉隧道围岩破碎, 影响变形的因素较多, 因此本文所得到的结论综合考虑了多种因素对变形的影响。另外, 现场监测数据表明围岩变形具有一定的流变特性, 本文分析采用的是较简单的弹塑性本构模型, 未考虑围岩的流变特性, 今后将在这方面做进一步的研究工作。

## 参考文献:

- [1] 朱维申, 章光. 节理岩体参数对围岩破损能区影响的敏感性分析[J]. 地下空间, 1994, 14(1): 10-15. (ZHU Wei-shen, ZHANG Guang. Susceptibility analyses of parameters of jointed rock to breaking area in surrounding rock[J]. Underground Space, 1994, 14(1): 10-15. (in Chinese))
- [2] 侯哲生, 李晓, 王思敬, 等. 金川二矿某巷道围岩力学参数对变形的敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 406-410. (HOU Zhe-sheng, LI Xiao, WANG Si-jing, et al. Sensitivity analysis of mechanical parameters to deformation of surrounding rocks for a tunnel in Jinchuan deposit II[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 406-410. (in Chinese))
- [3] 李晓静, 朱维申, 向建, 等. 考虑参数影响的系统分析方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1207-1210. (LI Xiao-jing, ZHU Wei-shen, XIANG Jian, et al. Systematic analysis method based on some parameters in underground chambers and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1207-1210. (in Chinese))
- [4] 聂卫平, 徐卫亚, 周先齐. 基于三维弹塑性有限元的洞室稳定性参数敏感性灰关联分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3885-3893. (NIE Wei-ping, XU Wei-ya, ZHOU Xian-qi. Grey relation analysis of parameter sensitivity of cavern stability based on 3d elastoplastic finite elements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3885-3893. (in Chinese))
- [5] 黄书岭, 冯夏庭, 张传庆. 岩体力学参数的敏感性综合评价分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊1): 2624-2630. (HUANG Shu-ling, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing. Study of method of comprehensive evaluation for parameters of constitutive model of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2624-2630. (in Chinese))
- [6] 刘宁, 吴海斌, 方军. 地下洞室围岩可靠度的敏感性计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 946-951. (LIU Ning, WU Hai-bin, FANG Jun. Sensitivity analysis of underground structural reliability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 946-951. (in Chinese))
- [7] 曹军义, 展辰辉, 王改山. 土质高边坡稳定因素的敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5350-5354. (CAO Jun-yi, ZHAN Chen-hui, WANG Gai-shan. Sensitivity analysis of high soil slope stabilizing factors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5350-5354. (in Chinese))
- [8] 张继勋, 姜弘道, 任旭华. 岩体参数对隧洞围岩稳定性影响的敏感性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 169-172. (ZHANG Ji-xun, JIANG Hong-dao, REN Xu-hua. Sensitivity analysis of mechanical parameters influencing stabilization of surrounding rocks of tunnel[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(2): 169-172. (in Chinese))
- [9] 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): 2341-2349. (JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, et al. Nelder-mead algorithm for inversion analysis of in-situ stress field of underground powerhouse area of Dagangshan hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2341-2349. (in Chinese))
- [10] 贾善坡. Boom clay 泥岩渗流应力损伤耦合流变模型、参数反演与工程应用[D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所. 2009. (JIA Shan-po. Hydro-mechanical coupled creep damage constitutive model of Boom clay, back analysis of model parameters and its engineering application[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese))
- [11] JTGD70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (JTGD70—2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [12] 章光, 朱维申. 参数敏感性分析与试验方案优化[J]. 岩土力学, 1993, 14(1): 51-58. (ZHANG Guang, ZHU

- Wei-shen. Susceptibility analyses of parameters and optimization of test program[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, **14**(1): 51 - 58. (in Chinese))
- [13] 杨明举, 关宝树, 王民寿. 岩体参数影响大型地下洞室群围岩稳定的灵敏度分析[J]. 西南交通大学学报, 2000, **35**(5): 488 - 491. (YANG Ming-ju, GUAN Bao-shu, WANG Min-shou. Sensitivity analysis of the influences of rock parameters on the stability of large-scale underground chambers[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, **35**(5): 488 - 491.(in Chinese))