

# 金川二矿某巷道围岩力学参数对变形的敏感性分析

侯哲生<sup>1,2</sup>, 李 晓<sup>1</sup>, 王思敬<sup>1</sup>, 路世豹<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 烟台大学 土木工程学院, 山东 烟台 264005;  
3. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 为了给金川镍矿采场及巷道稳定性分析的参数选取提供可借鉴的依据, 利用非线性弹塑性有限元法, 对位于金川二矿区底盘某采准巷道围岩力学参数(变形模量、泊松比、粘聚力和内摩擦角)对变形的敏感性进行分析。分析结果表明, 这4个参数对变形的敏感度不尽相同, 从大到小依次为: 变形模量、内摩擦角、泊松比、粘聚力, 且其变形模量与内摩擦角的敏感度远大于泊松比和粘聚力的敏感度。这一分析结果对今后金川镍矿的稳定性分析具有一定的参考价值, 尤其要求对变形模量与内摩擦角的选取一定要谨慎。

**关键词:** 岩石力学; 金川二矿; 力学参数; 变形; 敏感性分析

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)03-0406-05

## SENSITIVITY ANALYSIS OF MECHANICAL PARAMETERS TO DEFORMATION OF SURROUNDING ROCKS FOR A TUNNEL IN JINCHUAN DEPOSIT

HOU Zhe-sheng<sup>1,2</sup>, LI Xiao<sup>1</sup>, WANG Si-jing<sup>1</sup>, LU Shi-bao<sup>3</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;  
2. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China;  
3. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

**Abstract:** In order to provide bases for parameters selection of stability analysis in Jinchuan nickel mine, which is one of the largest bases of metal resources, nonlinear elastoplastic finite element method is used for the sensitivity analysis of four mechanical parameters to the deformation of surrounding rocks of a tunnel in Jinchuan deposit. The analytical results show that the sensitivities of these parameters to deformation are different and the sequences of sensitivity, in a decreasing order, are the deformation modulus, the friction angle, the Poisson's ratio, and the cohesion force. Especially, the sensitivities of deformation modulus and friction angle are comparatively higher than those of the two other parameters. Based on this result, more attentions should be paid to the deformation modulus and the friction angle in similar studies and analysis in Jinchuan deposit.

**Key words:** rock mechanics; Jinchuan deposit; mechanical parameters; deformation; sensitivity analysis

## 1 引言

金川镍矿是我国三大资源综合利用基地之一。金川镍矿矿体长约 6.5 km, 宽几十到 500 多米, 深

达千米以上。由于经历了地质构造运动长期的继承性活动, 又遭受了岩浆岩频繁的侵入与穿插作用, 矿区岩层破碎, 完整性差, 工程地质条件恶劣。矿区含矿母岩为超基性岩体, 其被 NEE 向斜切断层

**收稿日期:** 2003-10-13; **修回日期:** 2003-12-04

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412702); 烟台大学博士基金资助项目(TM04B34)

**作者简介:** 侯哲生(1974-), 男, 博士, 1998年毕业于西安建筑科技大学采矿工程专业, 现主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: hzscy@263.net.

分割为 4 个相对独立的矿区, 自西向东依次为三、一、二、四矿区。二矿区占金川矿床矿产储量的 75%, 其中品位在 2% 以上的富矿又占全矿金属镍储量的 76%, 因此, 二矿区的生产和建设是金川镍钴基地建设的关键。

二矿区由于特殊的工程地质条件, 自建矿以来就引发了许多工程地质问题, 再加上其重要的地位, 吸引了许多工程地质工作者前去进行研究。在二矿区的众多工程地质问题中, 巷道变形是一个很突出的问题。对于这一问题, 已有很多学者做过大量研究工作<sup>[1, 2]</sup>, 其中数值方法是一种很重要的研究手段。

众所周知, 数值计算结果的好坏与岩土体力学参数的取值有密切的关系。目前对于岩土体力学参数的取值方法, 主要有现场试验法、室内试验法、经验类比法和反分析法等。现场试验法由于其费时费力等缺点不能被广泛使用; 室内试验法由于试件一般为岩块, 其试验结果不能很好地代表岩体的力学参数; 经验类比法由于岩体的千差万别也具有一定的局限性; 而反分析法, 尤其是位移反分析法, 由于其简便易行而受到许多岩土工程研究人员的青睐<sup>[3]</sup>。对于金川二矿区, 很显然前 3 种方法的使用都受到了一定的限制, 而巷道变形的易于测量性为位移反分析法的应用提供较好的条件。本文借助于位移反分析法, 分析金川二矿区某巷道围岩的力学参数对变形的敏感性, 以期为后续科研当中金川岩矿体力学参数的正确取值提供一些有益的依据。

敏感性分析是系统分析中分析系统稳定性的一种方法, 在岩土工程领域之中已经有了一定的应用<sup>[4-7]</sup>。设有一系统, 其系统特性  $P$  主要由  $n$  个因素  $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  所决定,  $P = f(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。在某一基准状态  $a^* = (a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*)$  下, 系统特性为  $P^*$ 。分别令各因素在其各自的可能范围内变动, 分析由于这些因素的变动, 系统特性  $P$  偏离基准状态  $P^*$  的趋势和程度, 这种分析方法称为敏感性分析。

敏感性分析的第 1 步是建立系统模型, 即系统特性与因素之间的函数关系  $P = f(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。这种函数关系, 如果可能的话, 尽量用解析式表示。对于较复杂的系统, 也可以用数值方法(如有限元模型等)或图表法表示。建立与实际系统尽量

相符的系统模型是有效地进行参数敏感性分析的一项至关重要的工作。

建立系统模型后, 需给出基准参数集。基准参数集是根据所要讨论的具体问题给出的。如欲分析某地下工程的稳定性对其岩石力学参数变化的敏感性, 则该工程场地的岩石力学参数的推荐值可取为基准参数集。基准参数集确定后, 就可对各参数进行敏感性分析。分析参数  $a_k$  对特性  $P$  的影响时, 可令其余各参数取基准值且固定不变, 而令  $a_k$  在其可能的范围内变动, 则系统特性  $P$  表现为

$$P = f(a_1^*, \dots, a_{k-1}^*, a_k, a_{k+1}^*, \dots, a_n^*) \quad (1)$$

若  $a_k$  的微小变化, 引起  $P$  的较大变化, 则  $P$  对  $a_k$  很敏感, 此时,  $a_k$  为高敏感参数; 若  $a_k$  在较大范围内变化, 而  $P$  变化甚微, 则  $P$  对  $a_k$  不敏感,  $a_k$  为低敏感参数。

为对不同的参数进行敏感性比较, 仿照文[7]定义敏感度因子为

$$S(a_k) = \max \left\{ \left( \frac{U a_k \max - U^*}{U^*} \right), \left( \frac{U^* - U a_k \min}{U^*} \right) \right\} \quad (2)$$

式中:  $S(a_k)$  为参数  $a_k$  的敏感度;  $U^*$  为基准参数集对应的收敛位移值(mm);  $U a_k \max$ ,  $U a_k \min$  分别为计算收敛值在因素  $a_k$  的变化范围之内的最大值和最小值(mm)。

## 2 巷道地质概况

本文所选巷道为中国科学院武汉岩土力学研究所和金川公司 1991 年“金川镍矿二矿区不良岩层巷道稳定性研究”课题的试验巷道。该试验巷道位于二矿区中段 12 行底盘穿脉, 含矿超基性岩体临近其底盘的二辉橄榄岩相中。巷道埋深为 530 m, 轴向为 SE51°22', 全长为 37 m。

试验巷道所揭露的岩体, 除有 1 条水平厚度为 1.5 m 的辉绿岩脉外, 其余均为二辉橄榄岩, 其结构面主要为构造结构面。其中 I 级结构面 11 条, II 级结构面 35 条。坑道揭露的各类结构面的密度, 由 NW 向 SE, 有递增的趋势。如线密度由 4.88 条/m 增至 7.15 条/m; 面密度由 8.32 条/m<sup>2</sup> 增至 12.62 条/m<sup>2</sup>; RQD 值相应地由 46% 降至 14.98%。试验巷道地质状况见图 1。

根据试验巷道揭露岩体的岩性、地质构造与岩体结构等工程地质特征的差异, 将其划分为 3 个工

程地质段：第 1 段(0~10.8 m)；第 2 段(10.8~20.6 m)；第 3 段(20.6~37 m)。本文分析背景为该巷道 25 m 处的 4# 收敛断面。该断面属于第 3 段中，此段二辉橄榄岩中以 III 级张性裂隙占优势，按产状划分多于 5 组，结构体形态复杂，长轴一般为 0.2~0.3 m；岩体结构呈镶嵌碎裂结构，属碎裂介质。此类结构的岩体在巷道开挖条件下，其变形破坏受结构面控制，岩体变形以结构面滑动、闭合、镶嵌交合等形式为主。从宏观上看，岩体变形大、扩容现象明显。

### 3 数值模型

敏感性分析的具体手段为弹塑性平面应变有限元分析，屈服准则采用 Drucker-Prager 准则，即

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} + k \quad (3)$$

式中： $I_1$  与  $J_2$  分别为应力张量第 1 不变量与应力偏量第 2 不变量。

分析范围以该巷道的 4# 收敛断面为背景来确定。通过对该断面的地质分析，选取如图 2 所示的分析范围。该范围是以试验巷道轴线为中心，宽为 30 m，高为 30 m(1 220~1 190 m)的正方形。在此范围内，只涉及到 2 种岩性的岩体，即巷道所在的二辉橄榄岩和与其接触的大理岩。边界条件为：(1) 位移边界条件。模型下边界施加 Y 方向的位移约束；(2) 应力边界条件。根据 1981 年冶金部金川资源综合利用科研项目评议交流鉴定会议的《金川矿区原岩应力测量及构造应力场的研究(总结报告)》，以及其他一些应力测量资料，上边界施加

16.5 MPa 的垂直压力载荷，左右两边界均施加由上向下递增的垂直于边界的梯形压力载荷，上、下两端点的载荷值分别为 32，35.5 MPa。

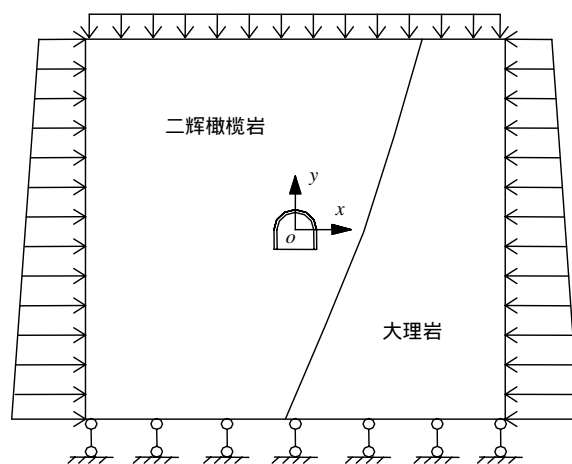


图 2 计算模型

Fig.2 Calculation model

### 4 参数敏感性分析

#### 4.1 基准参数集

基准参数集的确定是以已有资料<sup>[1]</sup>为参考，以 4# 断面为分析背景，以其实测收敛值为反演目标，通过反分析法得到的。4# 断面的测线布置方式为地下工程位移量测中常见的 5 个测点 6 条测线的形式<sup>[8]</sup>。在量测期间，由于多种因素的影响，只完整地得到了 2 条水平测线的收敛位移<sup>[1]</sup>，本文的反演目标就取为由这 2 条测线所得的收敛值的平均值(表 1，图 3)。

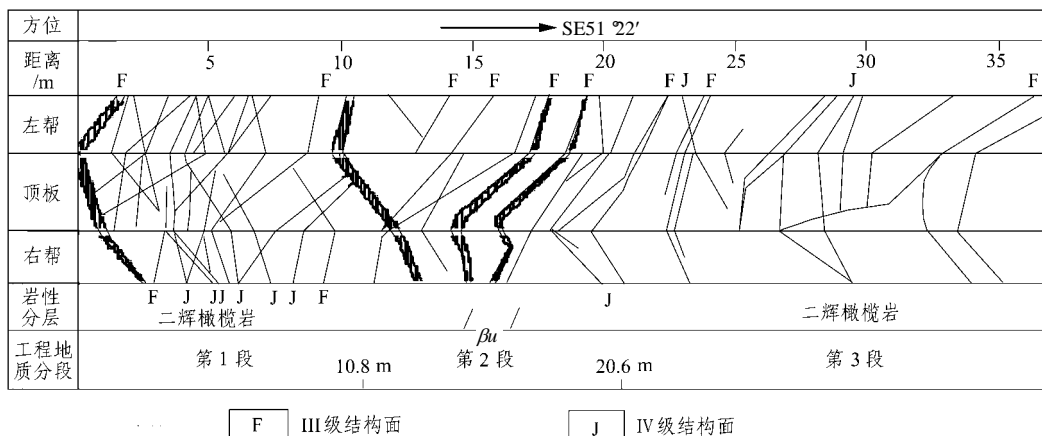


图 1 试验巷道地质展开图

Fig.1 Geology and fracture mapping of the experimental tunnel

表 1 4#断面实测收敛值

Table 1 Measured convergence of cross section No.4

收敛值 $U$ /mm	观测时间 $T$ /d	$(U/T)$ /mm · d <sup>-1</sup>
8.38	16	0.52
10.05	24	0.21
11.73	35	0.15
13.40	53	0.09
14.23	70	0.07
15.08	130	0.01
16.75	272	0.01

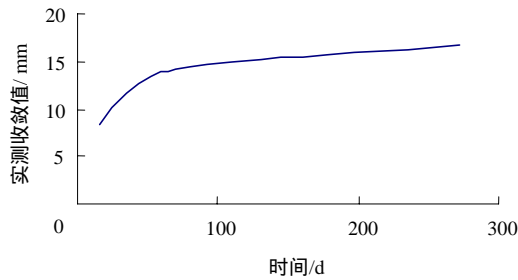


图 3 实测收敛值与时间关系

Fig.3 Convergence variation with time

从表 1 和图 3 可以看出, 收敛位移随着时间在变化, 基本上以 70 d 为界分为 2 个阶段: 70 d 以前变形急剧; 70 d 以后变形微弱, 变形日增量仅为 0.01 mm/d, 可以认为变形已经稳定, 因此, 在这里把 70 d 所对应的收敛位移值 14.23 mm 作为待反演基准参数集的目标函数。通过反分析, 得到如表 2 所示的基准参数集, 对应的收敛值为 14.23 mm。

表 2 基准参数集

Table 2 Basic set of parameters

材料名称	变形模量/MPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
二辉橄榄岩	8 700	0.25	0.5	38
大理岩	8 000	0.28	0.2	43
支护材料	8 000	0.24	5.0	50

由于该试验巷道处于二辉橄榄岩中, 大理岩离巷道较远, 其力学参数对巷道变形影响不明显<sup>[9, 10]</sup>, 故本文只对巷道所在的二辉橄榄岩的 4 个力学参数进行敏感性分析, 这 4 个参数的可能变化范围见表 3。

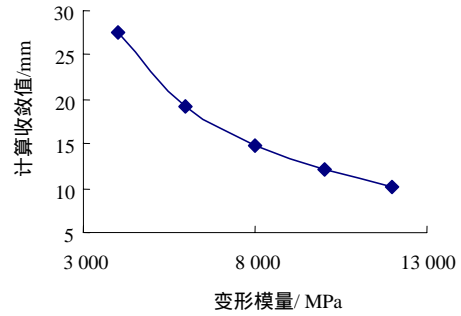
4.2 各参数对变形的影响

将其他参数不变, 分别对二辉橄榄岩的变形模量、泊松比、粘聚力和内摩擦角对巷道变形的影响进行分析, 如图 4 所示。

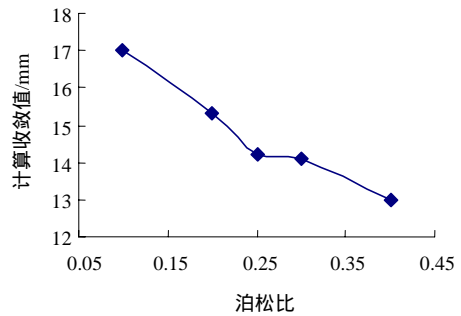
表 3 二辉橄榄岩各个参数基准值与变化范围

Table 3 Basic values and variations of parameters of Iherzolite

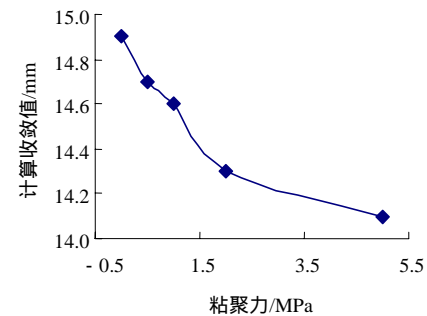
材料名称	变形模量/MPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
二辉橄榄岩	8 700	0.25	0.5	38
变化范围	4 000 ~ 12 000	0.1 ~ 0.4	0 ~ 5	23 ~ 47



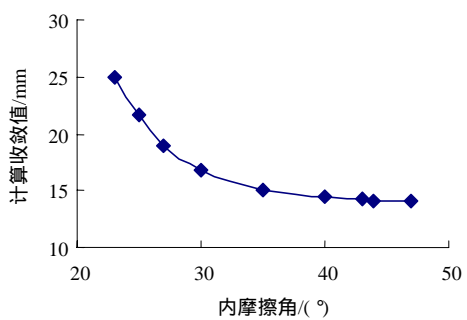
(a) 变形模量



(b) 泊松比



(c) 粘聚力



(d) 内摩擦角

图 4 各参数与计算收敛值关系

Fig. 4 Relations between parameters and tunnel convergence

从图 4 的分析结果不难看出,当所有 4 个参数分别从小向大取值时,对应的巷道计算收敛值都从大向小变化,其中变形模量、粘聚力和内摩擦角的计算收敛值表现为向某一定值收敛的趋势,而泊松比的计算收敛值表现为线性减小的趋势。

### 4.3 各参数敏感性比较

按照式(2)给出的敏感度定义,在表 3 所示的各个参数的变化范围内分别求出了其敏感度,见表 4。

**表 4 二辉橄榄岩各个参数对变形的敏感度**  
**Table 4 Sensitivity parameters of Iherzolite to deformation**

敏感度			
变形模量	泊松比	粘聚力	内摩擦角
0.933	0.195	0.047	0.750

从上表可看出,在二辉橄榄岩的 4 个力学参数中,变形模量对变形最敏感,内摩擦角次之,然后是泊松比,最不敏感的是粘聚力,且变形模量和内摩擦角相对泊松比和粘聚力来讲要敏感得多。

## 5 结 论

本文通过对金川二矿某巷道围岩(二辉橄榄岩)的力学参数对巷道变形的敏感性进行分析,认识到 4 个力学参数对变形都有一定的影响,但对变形的敏感性有强有弱,其强弱排序为:变形模量 > 内摩擦角 > 泊松比 > 粘聚力,其中变形模量和内摩擦角的敏感性比起泊松比和粘聚力的强得多。建议今后在金川二矿类似的研究工作中,在力学参数取值方面要加强对变形模量和内摩擦角准确性的重视程度。

需要指出的是,由于金川二矿岩体破碎,结构面对岩体变形存在着较大的影响,而本文所得结论是在把围岩看作连续的弹塑性介质的基础上得到的,因此,这些结论是考虑了结构面对变形的影响等多种因素的综合反映。另外,金川岩体变形具有明显的流变特性,本文采用的是较简单的弹塑性模型,没有考虑流变特性,今后有待在这方面做进一步的研究工作。

### 参考文献(References) :

[1] 金川有色金属公司,中国岩石力学与工程学会金川分会. 金川镍矿开采的工程地质与岩石力学问题(上、下)[R]. 金昌:金川有色金属公司,中国岩石力学与工程学会金川分会,1996.(Jinchuan

Non-Ferrous Metals Corp. Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Problems of engineering geology and rock mechanics in mining of Jinchuan nickel mine[R]. Jinchang: Jinchuan Non-Ferrous Metals Corp., Jinchuan Branch of Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, 1996.(in Chinese))

[2] 高 谦,王少泉,赵千里等. 金川二矿区不良岩层采场巷道片帮冒顶事故的分析[J]. 工业安全与防尘,2001,27(1):35-38.(Gao Qian, Wang Shaoquan, Zhao Qianli, et al. Fault tree analysis for collapse of roadways with fractured surrounding rock and high tectonic stress in Jinchuan mine No.2[J]. Industrial Safty and Dust Control, 2001, 27(1): 35-38.(in Chinese))

[3] 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.(Yang Zhifa, Wang Sijing, Feng Ziliang, et al. Principle and Its Application of Back-analysis in Geomechanics[M]. Beijing: Earthquake Press, 2002.(in Chinese))

[4] 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 Weishen. Susceptibility analyses of parameters and optimization of test program[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(1): 51-58. (in Chinese))

[5] 雷兴刚,周小平. 岩土介质强度参数相关性的敏感度分析[J]. 云南农业大学学报,1999,14(2):171-175.(Lei Xinggang, Zhou Xiaoping. Analyses of susceptibility in the strength of parameters interrelationship of rock and soil media[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 1999, 14(2): 171-175.(in Chinese))

[6] 严春风,刘东燕,张建辉等. 岩土工程可靠度关于强度参数分布函数模型的敏感度分析[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(1):36-39.(Yan Chunfeng, Liu Dongyan, Zhang Jianhui, et al. The susceptibility analysis of reliability for the probability distribution types of parameters in strength criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 36-39.(in Chinese))

[7] 朱维申,章 光. 节理岩体参数对围岩破损区影响的敏感性分析[J]. 地下空间,1994,14(1):10-15.(Zhu Weishen, 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))

[8] 朱国祥. 土层地震反应分析中不同参数的敏感性分析[J]. 工程抗震,2004,100(3):27-32.(Zhu Guoxiang. Sensitivity of different parameters applied in seismic analysis of multi-layer soil models[J]. Earthquake Resistant Engineering, 2004, 100(3): 27-32.(in Chinese))

[9] 杨林德,冯紫良,朱合华等. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京:科学出版社,1996.(Yang Linde, Feng Ziliang, Zhu Hehua, et al. Inversion Theory and Its Engineering Practice in Geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))

[10] 侯哲生. 金川二矿区巷道围岩岩体力学参数分析[硕士学位论文][D]. 兰州:兰州大学,2001.(Hou Zhesheng. Analysis on rockmass mechanical parameters of surrounding rocks of tunnels in Jinchuan Deposit [M. S. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2001.(in Chinese))