

# 基于地表岩移监测数据的岩体力学参数标定方法研究

李冲<sup>1</sup>, 骆贞江<sup>2</sup>, 纪海玉<sup>1</sup>, 杨新锋<sup>3</sup>, 宋震<sup>3,4\*</sup>

1 刚波夫矿业股份有限公司, 利卡西 加丹加省 999059

2 中国瑞林工程技术股份有限公司, 江西 南昌 330000

3 长沙迪迈科技股份有限公司, 湖南 长沙 410000

4 西南石油大学, 四川 成都 610000

**摘要：** 本文提出了一种基于地表岩移监测数据的岩体力学参数标定方法，并通过数值模拟进行验证。通过对井下矿石开采过程中不同时期的地表岩移监测数据进行分析，利用有限元分析模型对岩体力学参数进行了标定。研究表明，该方法能够有效提高岩体力学参数的准确性，并对矿山稳定性评估提供可靠支持。

**关键词：** 岩体力学参数；地表岩移监测；数值模拟

## Research on calibration method of rock mass mechanical parameters based on surface rock movement monitoring data

Li Chong<sup>1</sup>, Luo Zhenjiang<sup>2</sup>, Ji Haiyu<sup>1</sup>, Yang Xinfeng<sup>3</sup>, Song Zhen<sup>3,4\*</sup>

1. Gambov Mining Co., LTD., Likasigatanga Province 999059

2. China Rulin Engineering Technology Co., LTD. Nanchang, Jiangxi 330000

3. Changsha Dimai Technology Co., LTD. Changsha, Hunan 410000

4. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610000

**Abstract：** In this paper, a rock mass mechanical parameter calibration method based on surface rock movement monitoring data is proposed and verified by numerical simulation. Through analyzing the monitoring data of surface rock movement in different periods of underground ore mining, the finite element analysis model is used to calibrate the mechanical parameters of rock mass. The results show that this method can effectively improve the accuracy of rock mass mechanical parameters and provide reliable support for mine stability assessment.

**Keywords：** rock mass mechanical parameters; surface rock movement monitoring; numerical simulation

## 引言

随着全球矿产资源的不断开发，井下采矿作业引发的地表岩移问题逐渐受到重视。岩移监测数据在矿山工程中不仅用于预测地表沉降，还可以用于反演岩体的力学参数。这些参数在矿山设计、稳定性分析及风险评估中起着关键作用。然而，由于地下岩体的非均质性 & 复杂的应力环境，如何通过有效的方法精确标定岩体的力学参数一直是一个挑战。

近年来，数值模拟方法，特别是有限元分析，在岩土工程中得到了广泛应用。通过将实测数据与数值模型相结合，研究者们能够更加精确地反演出岩体的力学参数。因此，本文基于有限元数值模拟方法，提出了一种结合地表岩移监测数据的岩体力学参数标定方法，并通过实际案例验证了其有效性。

## 一、准则综述

莫尔-库仑准则是岩土力学中最流行的标准，制定于 Tresca 和 von Mises 准则之前。该标准指出，当作用在材料中任何元素上的剪切应力和法向应力满足以下方程时，就会发生失效。

$$|\tau| + \sigma \tan \phi - c = 0$$

其中， $\tau$  为剪应力， $c$  为内聚力， $\phi$  为内摩擦角。

借助莫尔圆，该标准可以写成

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - c \cos \phi = 0$$

当主应力按  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  排序时，莫尔-库仑标准可以用不变量  $I_1$  和  $J_2$  以及洛德角  $0 \leq \theta \leq \pi/3$  [1][2] 来表示。屈服函数则为

$$F_y = \frac{1}{3} I_1 \sin \phi + \sqrt{\frac{J_2}{3}} \left( (1 + \sin \phi) \cos \theta - (1 - \sin \phi) \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) - c \cos \phi = 0$$

项目信息：面向无人装载机的自主引导及铲装控制技术研究，四川省国际科技创新合作项目，四川省科学技术厅，项目编号：2025YFHZ0104。

作者简介：李冲（1983—），男，汉族，黑龙江省青冈人，硕士研究生，高级工程师，采矿工程专业，主要从事矿山生产、矿山技术、工程管理及安全管理。通讯邮箱：zhen.song@rwth-aachen.de。

当  $\theta=0$  时定义为拉伸子午线，当  $\theta=\pi/3$  时定义为压缩子午线。

重新排列各项，莫尔 - 库仑标准如下

$$F_y = \sqrt{J_2} m(\theta) + \alpha I_1 - k = 0$$

其中，

$$m(\theta) = \sqrt{\frac{1}{3}} \left( (1 + \sin \phi) \cos \theta - (1 - \sin \phi) \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right)$$

$$\alpha = \sin \phi / 3$$

$$k = c \cos \phi$$

在无摩擦材料的特殊情况下 ( $\phi=0$ ,  $\alpha=0$ ,  $k=c$ )，莫尔 - 库仑标准简化为特雷斯卡最大剪应力标准，( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) = 2k 或等效于

$$F_y = \sqrt{J_2} \cos \left( \theta - \frac{\pi}{6} \right) - k = 0$$

莫尔 - 库仑标准在主应力空间中定义了一个不规则六角锥体，这会在屈服函数的导数中产生奇异性，处理屈服面角部的塑性流动时会造成数值困难。德鲁克 - 普拉格模型<sup>[1][3]</sup>忽略了应力洛德角引入的应力张量第三不变量  $J_3$  对屈服面横截面形状的影响，通过基于应力张量第一不变量  $I_1$  和应力张量第二不变量  $J_2$  以及两个材料常数（可与莫尔 - 库仑系数相关）的平滑函数来近似莫尔 - 库仑准则。该标准有时也称为 von Mises 扩展准则，因为当设置  $\alpha=0$  时，它等同于 von Mises 准则。

Drucker-Prager 模型中的系数与 Mohr-Coulomb 标准中的内聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$  的关系为

$$\frac{\alpha}{k} = \frac{\tan \phi}{3c}$$

Drucker-Prager 模型中的系数可以通过以下公式与 Mohr-Coulomb 标准中的系数匹配<sup>[1]</sup>

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sin \phi}{(3 \pm \sin \phi)}$$

$$k = \frac{2\sqrt{3}c \cos \phi}{(3 \pm \sin \phi)}$$

在无摩擦材料的特殊情况下 ( $\phi=0$ ,  $\alpha=0$ ,  $k=2c/\sqrt{3}$ )，Drucker-Prager 准则简化为 von Mises 准则

$$\sqrt{J_2} = 2c/\sqrt{3}$$

## 二、行业方法

数值模拟方法在岩土工程中的应用已有数十年的历史，其中有限元分析 (FEM) 是应用最为广泛的一种方法。Potts 和 Zdravkovic(2001) 在《Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering》中详细阐述了有限元分析在地基承载力、隧道开挖和边坡稳定性等领域的应用。他们指出，有限元分析能够有效模拟复杂的地质条件和边界条件，是研究岩土工程问题的强有力工具<sup>[4]</sup>。

基准测试在岩土工程中用于验证和比较不同数值模型的性能，以确保模拟结果的准确性和可靠性。H.F.Schweiger(2002) 在其技术报告《Benchmarking in Geotechnics 1》中介绍了基准测

试的原理和应用，特别是在数值模拟中的作用<sup>[5]</sup>。Schweiger 在随后的研究中 (Schweiger, 2002) 展示了多个数值基准测试案例，为岩土工程数值模拟提供了有力的验证工具<sup>[6]</sup>。

国内也有学者聚焦于地下开采诱发的地表岩移问题，从演化规律、稳定性分析、监测技术、数值模拟等多个角度进行了深入研究，旨在为矿山开采过程中地表岩移的预测、控制提供理论依据和技术支持<sup>[7-10]</sup>。

岩体力学参数的标定是地下工程设计中至关重要的步骤。传统的方法包括实验室试验和现场测试，但这些方法通常成本高且耗时。近年来，数值模拟结合反演分析成为了一种有效的替代方法，通过优化算法结合监测数据，可以在较短时间内获得较为准确的岩体参数。

## 三、案例研究

### (一) 研究区域概述

本文以刚果某矿山为研究对象。该矿山位于刚果 (金) 南东部的加丹加高原，多为低山丘陵地貌，海拔标高在 1340m-1465m 之间，地表切割强烈。该矿山分为三个矿体。1963 年该矿山进入地下开采，地下开采期间起始中段标高 1320 米，主井深度 -617 米 (标高 777)，最大采深 -505 米 (标高 889)，主要的矿体于 2021 年投产，其它 2 个矿体尚未投产。

该矿山自开采以来一直面临地表沉降问题。矿山位于一个地质构造复杂的地区，岩体具有明显的非均质性。为了确保矿山的安全开采，自矿山投入运营以来，部署了多个地表监测点，以获取岩移数据。

### (二) 地表岩移监测数据的获取与处理

地表岩移监测数据是岩体力学参数标定的基础。本研究利用了从矿山不同采矿时期获取的地表沉降数据，这些数据包括监测点的水平位移和垂直位移。数据处理步骤包括：剔除异常数据、噪声过滤、以及基于时间序列的分析，以确保数据的可靠性。

### (三) 数值模拟模型构建

基于研究区域的地质勘查数据，构建二维有限元模型。边界条件设置为上边界基于实际地形和采矿范围的自由边界条件，两侧边界为水平方向固定边界，下边界为全向固定边界。初始力学参数根据已有文献和矿山勘探报告给出，包括岩体的弹性模量、泊松比、内摩擦角和黏聚力等。

| 名称   | 数值      | 单位                |
|------|---------|-------------------|
| 密度   | 2820    | kg/m <sup>3</sup> |
| 杨氏模量 | 6.99E9  | Pa                |
| 泊松比  | 0.31    | 1                 |
| 黏聚力  | 5.61E6  | Pa                |
| 内摩擦角 | 0.41574 | rad               |

进一步设定岩土材料为弹塑性材料，其具有独特的弹性状态，其中变形可恢复且与路径无关。当应力超过一定水平时，将出现屈服极限，即永久塑性应变。屈服准则用于定义塑性变形发生的应力条件。屈服面内的应力路径导致纯可恢复变形，即弹性应变，而与

屈服面相交的路径则产生可恢复和永久变形，即塑性应变。

一般的，屈服面可以描述为  $\mathbf{F} = f(\boldsymbol{\sigma}) - f_c = 0$

其中  $f_c$  为常数（对于完全塑性材料），也可以是应变硬化材料的变量。屈服面  $F$  是主应力空间中的一个表面，其中封闭了弹性区域（ $F \leq 0$ ）。对于脆性材料，屈服面代表破坏面，即材料崩溃而不是塑性变形的应力水平。

对于岩土材料中各向同性部分，塑性势  $Q_p$  可用柯西应力张量的三个不变量来表示

$$Q_p(\boldsymbol{\sigma}) = Q_p(I_1(\boldsymbol{\sigma}), J_2(\boldsymbol{\sigma}), J_3(\boldsymbol{\sigma}))$$

从而塑性应变张量的增量  $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_p$  可以分解为

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_p = \lambda \frac{\partial Q_p}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \lambda \left( \frac{\partial Q_p}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \boldsymbol{\sigma}} + \frac{\partial Q_p}{\partial J_2} \frac{\partial J_2}{\partial \boldsymbol{\sigma}} + \frac{\partial Q_p}{\partial J_3} \frac{\partial J_3}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)$$

塑性应变张量的增量  $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_p$  一般包括偏量和体积部分，呈现对称。增量塑性应变张量的迹线，为体积塑性应变率。Tresca 准则中金属体积塑性应变率始终为零。实验中观察到金属中存在不可压缩塑性变形，但大多数岩土工程应用中弹塑性岩土模型中常使用非零体积塑性应变。

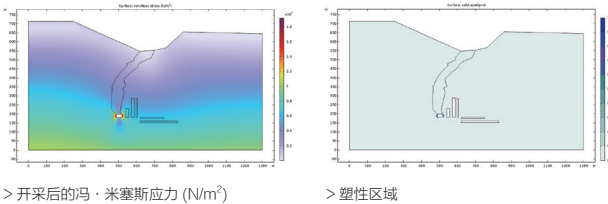
对全域进行完整网格精细划分，网格顶点6610个，三角形（即元素数量）12844个，边缘元素399个，顶点元素25个，元素面积比0.22362，网格面积0.8062km<sup>2</sup>，最大元素尺寸13m，最小元素尺寸0.026m，曲率因子0.2，联合使用直接法和常数牛顿法分别进行线性求解和非线性求解，容差系数0.001时迭代终止。

## 四、结果与讨论

### （一）数值模拟结果

通过有限元分析，获得了不同开采阶段下的地表位移场。与实际监测数据相比，初始模拟结果显示出一一定的偏差，这主要是

由于初始参数设置中的不确定性。经过多次迭代优化后，模拟结果与实测数据之间的差异逐渐缩小，最终标定出的参数包括岩体的弹性模量和黏聚力等。



### （二）模型标定与反演分析

通过有限元模拟得到的地表位移与实测数据进行对比，并利用优化算法逐步调整模型参数，直至模拟结果与监测数据吻合。在优化过程中，采用了基准测试技术，确保每次调整后模型的稳定性和准确性。最终标定出的岩体力学参数将用于矿山稳定性评估和进一步的设计优化。

### （三）模型验证与应用

为了验证标定参数的准确性，将其应用于其他时期的矿山开采模拟中。结果表明，使用标定参数进行的模拟能够准确预测地表位移，这表明标定方法的有效性。此外，通过基准测试方法验证了数值模型在不同条件下的适用性，进一步证明了模型的可靠性。

## 五、结论

本文提出了一种基于地表岩移监测数据的岩体力学参数标定方法，并通过数值模拟验证了其有效性。研究表明，利用有限元分析结合监测数据，可以有效地标定岩体力学参数，为矿山设计和稳定性评估提供可靠的参考。未来的研究应继续探索更为复杂的岩体模型和更高效的优化算法，以进一步提高标定精度。

## 参考文献:

- [1] W.F. Chen and E. Mizuno, Nonlinear Analysis in Soil Mechanics: Theory and Implementation (Developments in Geotechnical Engineering), 3rd ed., Elsevier Science, 1990.
- [2] A.J. Abbo and S.W. Sloan, "A Smooth Hyperbolic Approximation to the Mohr-Coulomb Yield Criterion," Computers and Structures, vol. 54, no. 3, pp. 427 - 441, 1995.
- [3] D. Drucker and W. Prager, "Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design," Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, no. 2, pp. 157 - 165. 1952.
- [4] D. Potts and L. Zdravkovic, Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering, Thomas Telford Publishing, 2001.
- [5] H.F. Schweiger, Benchmarking in Geotechnics 1. Technical Report CGG IR006 2002, Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graz University of Technology, Austria.
- [6] H. Schweiger, Results from Numerical Benchmark Exercises in Geotechnics, Proc. 5th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, pp. 305 - 314, 2002.
- [7] 崔轩, 杨胜利. 地下开采诱发的地表岩移演化规律及稳定性分析 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(08):78-83.DOI:10.13827/j.cnki.kyyk.2023.08.027.
- [8] 王荣军. 北洛河铁矿地表岩移特性与控制技术 [J]. 黄金, 2022, 43(12):39-43.
- [9] 赵淑霞. 段村-雷沟矿区地表岩移监测技术研究 [J]. 中国矿业, 2015, 24(S1):403-405.
- [10] 陈小康, 王雷鸣. 基于数值模拟的深井开采地表岩移范围圈定 [J]. 有色冶金设计与研究, 2023, 44(06):1-4.