

文章编号:0253-9993(2011)03-0383-05

# 大孤山铁矿边坡岩体结构数字识别及力学参数研究

郑 超,杨天鸿,刘洪磊,于庆磊,于天亮

(东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:**针对目前岩体结构面信息获取主要以人工现场接触测量为主,劳动强度大、效率低下的现状,借助于先进的 ShapeMetrix 3D 三维数字摄影测量系统,对大孤山铁矿边坡岩体结构面进行摄影测量,对获取到的结构面进行分组、分析,得到结构面各种几何信息的详细数据,并对其进行数理统计计算、分析,拟合出结构面各种几何信息的概率分布模型。采用蒙特卡洛方法编制的程序和根据数字摄影测量系统得到的统计数据,模拟岩体内部结构面三维分布情况。在此基础上,采用修正广义 Hoek-Brown 准则,估计节理化岩体强度,得到岩体强度指标。根据已获得的结构面三维分布情况和岩体强度指标综合评价了大孤山铁矿边坡岩体稳定性。

**关键词:**结构面;数字摄影测量;蒙特卡洛法;岩体参数表征

**中图分类号:**TD861.1 **文献标志码:**A

## Slope rock mass structure digital photogrammetry and research on mechanical parameter in Dagushan Iron Mine

ZHENG Chao, YANG Tian-hong, LIU Hong-lei, YU Qing-lei, YU Tian-liang

(College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** A 3D contact-free measuring system (3GSM) was employed to acquire the geometrical information of rock mass structures of sandstone in the slope rock mass of Dagushan Iron Mine based on the present status which the discontinuities were mainly captured by human measurement contacting the rock at present with large amount of labors and low efficiency. Three-dimensional solid model of the slope surface was created, and then the geometric information of discontinuities was gotten from three-dimensional solid model by 3GSM. The probability distribution model of the traces, dip angle and dip orientation were build according to mathematical calculation of statistics for all kinds of geometric information of these discontinuities. By using the Monte-Carlo method, the three-dimensional model of the discontinuities in rock mass was established. On the basis, the strength of jointed rock mass was estimated with modified generalized Hoek-Brown strength criterion.

**Key words:** discontinuity; digital photogrammetry measurement; Monte-Carlo method; parameters characterization of rock mass

岩体力学、水力学等的理论体系相对比较成熟,但由于裂隙岩体的复杂性,在这些理论基础上建立的模型均没有达到真正解决工程实际问题的地步<sup>[1]</sup>,一是计算模型中没能较真实反映裂隙岩体内部结构的分布;二是输入的计算参数可靠性不够。岩体工程特性参数表征和数值计算的关键在于搞清裂隙岩体的结构,针对岩体工程的尺度,在计算模型中考

虑相应起控制作用的结构面。采矿等大规模的工程开挖为岩石力学工作者揭露了不同尺度的、全断面的岩体结构展布形态,全面、完备、精细测量这些结构面几何信息,是岩体工程特性表征及数值计算的基础资料。对岩体结构面几何特征的研究开始于 20 世纪 70 年代,主要是采用概率统计方法研究节理的产状、间距和迹长等几何参数的统计分布<sup>[2]</sup>以及岩体节理

收稿日期:2010-08-24 责任编辑:常 琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10872046,50904013);教育部博士研究生科研创新项目(NO90601003)

作者简介:郑 超(1984—),男,河南平顶山人,博士研究生。Tel:024-83687705, E-mail:zhengchao020611@163.com

网络计算机模拟<sup>[3]</sup>等。

目前,对于工程岩体参数表征和力学分析计算,主要有精测线法<sup>[4]</sup>,即通过皮尺和罗盘人工现场逐一接触测量结构面信息,该方法低效、费力、耗时,难以满足现代快速施工的要求,而且有些高陡岩体不可能全面接触,使得测量数据的代表性受现场条件的限制。通过钻孔定向取芯技术或孔内照相技术获取结构面方位信息,该方法获取岩体结构面信息规模小、应用效果不佳。这2种方法测得的宏观岩体结构面几何形态数据不完备、不精细、不准确,所以结构面统计方法得到的参数依赖的数据基础不扎实<sup>[5-6]</sup>。S. P. Neuman<sup>[7]</sup>认为:虽然岩体结构面参数的统计方法及网络模拟极具潜力,但依靠传统测量法采集的有限数据来表征现场岩体海量节理分布规律,显然不够全面系统。

摄影测量技术求解结构面方位和规模信息是最先进的方法<sup>[8-9]</sup>。它可以创建一个实时的地质信息交流和反馈环境,提高地质纪录任务的效率,降低不完整信息和信息丢失的可能性,大大地帮助地质工作者区分鉴定地质特征,在已完成工作面节理图像的基础上预测没完成工作面上弱面的位置和方向。本文采用先进的ShapeMetrix 3D<sup>[10]</sup>摄影测量系统,对大孤山铁矿西北帮边坡表面大量结构面进行测量,得到结构面详细信息。建立边坡表面三维实体模型,得到边坡结构面几何分布参数,采用蒙特卡洛法模拟出内部结构面三维分布情况。基于广义Hoek-Brown强度准则,进行节理力学参数表征,得到节理岩体强度指标。为边坡的维护、稳定性分析提供强有力的依据。

## 1 岩体结构面三维网络模拟程序的编制

实现岩体结构面几何参数计算机模拟的方法是蒙特卡洛法。所谓蒙特卡洛法就是由统计过程所确定的物理状况在计算机上用随机数进行模拟,其精髓是用随机的方法去解决确定的或者理论上无法解决的问题。对于岩体结构面三维网络模拟,虽然力求使模拟结果与实际一致,但由于结构面自身发育的差异、采样条件的局限等因素的影响,使得模拟结果有一定的误差。因此,基于上述方法编写了岩体结构面分布的模拟程序,在模拟中做以下假设:①假设结构面形状为薄圆盘状。根据这一假设,结构面的大小和位置,可以用结构面中心点坐标和结构面半径来反映。这既符合大多数结构面接近于圆形的实际,又可以节省计算机内存空间。②假设结构面为平直薄板,也就是说每条结构面只有一个统一的产状。③

假设在整个模拟区域内,每组结构面的分布均遵循相同的概率模型。

在上述假设的前提下,根据ShapeMetrix 3D系统得到结构面的各种几何信息,编制程序来实现岩体结构面三维网络的模拟。①对每组结构面的几何信息分别建立概率模型;②依次读入每组结构面概率模型的基本数据,对每组结构面进行③~⑦;③初步确定正在模拟的当前组结构面的体密度及模拟区内结构面数目,进行④~⑩,生成该数目的结构面;④生成每条结构面中心点坐标;⑤生成每条结构面产状(倾向、倾角);⑥生成每条结构面半径;⑦对结构面规模和数量进行动态校核;⑧对模拟结构进行检验,若不符合给定概率模型,重新模拟;⑨形成结构面三维网络图;⑩输出图形及结果。

节理裂隙显示系统(结构面三维网络图的生成)是在AutoCAD 2008的基础上二次开发来完成的。AutoCAD 2008的三维显示、处理功能非常强大,二次开发也简便易用,基于此,编写出了节理裂隙显示系统首先选择要生成的模型尺寸参数,然后导入蒙特卡洛方法生成的结构面信息文件,即可将结构面的三维网络模拟出来。系统还设计了对模型进行开挖以及剖切的功能对生成的模型进行分析。

## 2 实例分析

### 2.1 矿区地质情况

矿区出露地层主要为太古界鞍山群樱桃园组和元古界辽河群浪子山组的中深变质岩系,其次为震旦系钓鱼台石英岩及第四纪地层。另外矿区还出露有混合花岗岩、混合岩、千山花岗岩及花岗斑岩脉、玢岩脉等岩浆岩。矿体赋存在鞍山群变质岩系中,矿体下盘与片麻状花岗质混合岩以F15断层接触,上盘与绿泥石英片岩整合接触,东端与千山花岗岩以F1断层接触,西端与混合花岗岩以F14断层接触,矿体走向300~320°,倾向NE,倾角60~80°,矿体与围岩产状基本一致。

矿区经历过多次构造运动和岩浆活动等,使矿区构造复杂化。矿区褶皱不甚发育,对边坡的影响不大,节理非常发育,纵横交错,遍布整个采场。

### 2.2 岩体表面三维合成结果

现场所获取的左视图、右视图如图1所示,将左、右视图导入ShapeMetrix 3D软件分析系统,圈定出重点测量区域,系统根据像素点匹配、图像变形偏差纠正等一系列技术,对三维模型进行合成以及方位、距离的真实化,得到岩体表面的三维视图。

在合成的三维图上,根据主要的节理裂隙的分布



(a) 左视图



(b) 右视图

图 1 获取的左、右视图

Fig. 1 Left and right pictures captured

情况,对其进行分组,主要的裂隙分布有两组,即图 2 中的红色组和蓝色组。根据分组的结构面的空间展布,绘制出两组结构面的间距图(图 3)。计算两组结构面的间距,对其进行数理统计计算,并给出两组节理的线密度  $\lambda_d$  (该组结构面法线方向上单位长度内结构面的条数)。系统亦可进行断距的统计计算,但在一个模型内测到的断距数目太少,因此不对断距作数理统计的分析。

通过大量实测资料证明,结构面间距服从负指数分布,故对大孤山实测结构面的间距概率分布亦采用此分布,均值和标准差由系统计算获得。在此三维模

型中,因所获得的断距数量较少,因此不对其进行数理统计分析,本文假设断距服从均匀分布,并在模型中测量两组的断距。将所有数据整理,见表 1。

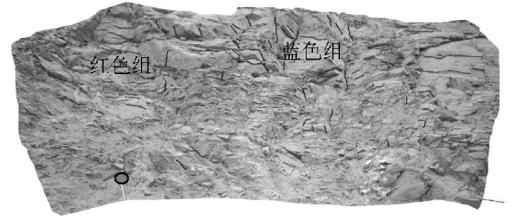


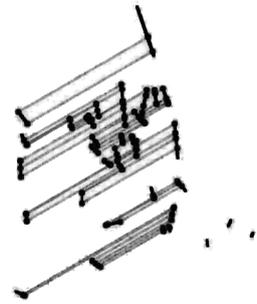
图 2 模型中节理的分布情况

Fig. 2 Distribution of the discontinuities around the 3D image

图中标注为红色组产状相似的为红色组,标注为蓝色组产状相似的为蓝色组



(a) 第 1 组间距



(b) 第 2 组间距

图 3 第 1 组间距和第 2 组间距

Fig. 3 Spacing map of the first and second group

表 1 结构面几何参数特征值及分布

Table 1 Geometrical parameters and distribution of the discontinuities

组别	倾向/(°)			倾角/(°)			迹长/m			间距/m			断距/m		
	分布	均值	标准差	分布	均值	标准差	分布	均值	标准差	分布	均值	标准差	分布	均值	标准差
1	正态	256.3	85.3	对数正态	26.6	15.3	负指数	0.478	0.31	负指数	0.64	0.75	均匀	0.46	
2	正态	197.0	78.1	正态	62.5	17.2	对数正态	0.491	0.36	负指数	1.56	1.50	均匀	0.71	

### 2.3 结构面三维网络生成

将表 1 中的信息以及得到的其他统计信息,输入到节理生成程序当中。程序中将概率分布类型定义为:1—均匀分布,2—负指数分布,3—正态分布,4—对数正态分布。将生成模型的区域、节理的组数以及每组的统计信息列入计算机程序中。在 AutoCAD 2008 中加载节理裂隙显示系统,选择模型尺寸及参数,导入节理网络分布文件,生成结构面三维网络图

(图 4),图中圆盘即为结构面。在 AutoCAD 2008 中,对模型进行处理、分析。图 5(a)为模型的主视图,使用节理显示系统对模型进行剖切,得到模型顶面正方形两条中线对应的剖面图,如图 5(b)所示。

### 3 基于 Hoek-Brown 强度准则的节理岩体力学参数分析

节理岩体力学参数在岩体工程分析和设计中的

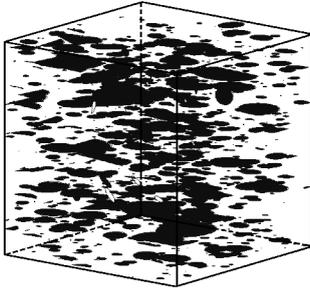
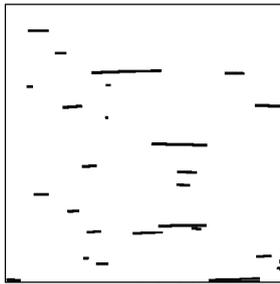
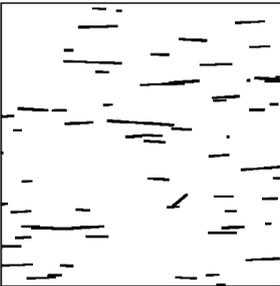


图 4 结构面三维网络

Fig. 4 Example of 3-D network drawing of discontinuities



(a) 主视图



(b) 剖面图

图 5 模型主视图和剖面图

Fig. 5 Principle view and section sketch of the model

地位至关重要,也是解决实际岩石问题的难点。为了评价大孤山铁矿边坡的岩体强度,本文基于以上结构面统计信息,利用 Hoek-Brown 强度准则实现大孤山岩体强度的表征。

### 3.1 岩体强度的估算原理

#### 3.1.1 基本原理

推广后的 Hoek-Brown 准则<sup>[11-12]</sup>为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( \frac{m_b}{\sigma_c} \sigma_3 + s \right)^\alpha \quad (1)$$

$$m_b = m_1 \exp[(GSI - 100)/28] \quad (2)$$

式中,  $\sigma_1$  为岩体破坏时的最大主应力;  $\sigma_3$  为岩体破坏时的最小主应力;  $\sigma_c$  为组成岩体完整岩块的单轴抗压强度;  $m_b$  为岩体的 Hoek-Brown 常量;  $m_1$  为组成岩体完整岩块的 Hoek-Brown 常数(由岩石类型决定);  $s$ 、 $\alpha$  取决于岩体特性的常数(地质强度指标 GSI: geological strength index)。

对于  $GSI > 25$  的岩体<sup>[13]</sup>

$$s = \exp[(GSI - 100)/9], \alpha = 0.5 \quad (3)$$

对于  $GSI < 25$  的岩体

$$s = 0, \alpha = 0.65 - GSI/200 \quad (4)$$

由岩体参数  $J_V$  (节理数/ $m^3$ ) (查表) 可确定节理化岩体的地质强度指标 GSI。

#### 3.1.2 节理化岩体强度与力学参数的估计方法

当用 Hoek-Brown 准则估计节理化岩体强度指标与力学参数时,需用 3 个基本参数:① 组成岩体的完整岩块的单轴抗压强度  $\sigma_c$ ;② 组成岩体的完整岩块的 Hoek-Brown 常数  $m_1$ ;③ 岩体的地质强度指标 GSI。

由摩尔-库仑强度准则,设  $\varphi$  为岩体的内摩擦角,  $c$  为内聚力,则有

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cot \varphi} \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

当  $0 < \sigma_3 < \frac{\sigma_c}{4}$ , 由已确定出的该岩体所遵循的

Hoek-Brown 方程估计节理化岩体强度与力学参数时,用直线近似地拟合该岩体所遵循的 Hoek-Brown 准则,这可用线性回归分析法得到该岩体所遵循的 Hoek-Brown 准则的直线表示形式,即

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + b \quad (7)$$

由式(6)和(7)可得

$$\begin{cases} k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \\ b = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可反求出该岩体的内聚力  $c$ , 内摩擦角  $\varphi$ ; 岩体的抗拉强度由式(1)中令  $\sigma_1 = 0$  解出; 节理化岩体的抗压强度可由式(7)中令  $\sigma_3 = 0$  而得到; 岩体的变形模量可由下式来估算

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \exp\left(\frac{GSI - 10}{40}\right) \quad (9)$$

#### 3.2 岩体强度参数估算

由单轴抗压强度试验获得完整岩块的单轴抗压强度  $\sigma_c = 100$  MPa; 根据结构面调查获得结构面的体积密度为  $J_V = 3$ ; 根据结构面调查获得结构面体积密度及结构面产状统计结果查表得  $GSI = 70$ , 花岗岩  $m_1 = 33$ 。

由式(2)得

$$m_b = 11.319$$

$$s = \exp[(GSI - 100)/9] = 0.035686$$

$$\alpha = 0.5$$

由式(1)得

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 100(0.11319\sigma_3 + 0.035686)^{0.5}$$

$$\sigma_{3\max} = \frac{\sigma_c}{4} = 25 \text{ MPa}$$

$\sigma_3$  取 0~25 MPa 时,有  $\sigma_1 = k\sigma_3 + b$

$$\begin{cases} k = \frac{\sum \sigma_1 \sigma_3 - \frac{1}{n} \sum \sigma_1 \sum \sigma_3}{\sum \sigma_3^2 - \frac{1}{n} (\sum \sigma_3)^2} \\ b = \frac{\sum \sigma_1 - k \sum \sigma_3}{n} \end{cases}$$

由回归分析数据(表2)得到  $k = 6.656$ ,  $b = 59.024$ ,则有

$$\sigma_1 = 6.656\sigma_3 + 59.024$$

表2 Hoek-Brown 准则回归分析数据

Table 2 Regression analysis data of Hoek-Brown criterion

$\sigma_3$	$\sigma_1$	$\sigma_1 \sigma_3$	$\sigma_3^2$
0	18.891	0	0
3	64.258	192.774	9
6	90.547	543.282	36
9	111.684	1 005.156	81
12	130.066	1 560.792	144
15	146.664	2 199.960	225
18	161.983	2 915.694	324
21	176.328	3 702.888	441
24	189.899	4 557.576	576
$\sum =$ 108	$\sum =$ 1 090.32	$\sum =$ 16 678.122	$\sum =$ 1 836

令  $\sigma_1 = 0$ , 解出岩体的单轴抗拉强度  $\sigma_{tm} = -0.315$  MPa; 令  $\sigma_3 = 0$ , 解出该节理化岩体抗压强度  $\sigma_{tm} = 59.024$  MPa。

## 4 结 论

(1) 利用 ShapeMetrix 3D 数字摄影测量系统在大孤山铁矿西北帮边坡进行测量,解决了传统的测线法低效、费力、耗时、不安全、甚至难以接近岩体和不能满足现代快速施工要求的弊端,真正做到现场岩体开挖揭露的节理、裂隙的即时定格、精确定位。

(2) 对获取的结构面进行分组、分析,得到结构面各种几何信息的详细数据,并对其进行数理统计计算、分析,拟合出结构面各种几何信息的概率分布模型。

(3) 采用蒙特卡洛方法编制的程序、根据数字摄影测量系统得到的统计数据,模拟岩体内部结构面三维分布情况,据此可分析岩体结构特征。

(4) 基于广义 Hoek-Brown 强度准则,获得节理岩体强度指标。此方法无需做现场大体积节理化岩体强度试验,只需知道组成岩体的完整岩块的单轴抗压强度和完整岩块的 Hoek-Brown 常数  $m_1$  及岩体的地质强度指标 GSI。

(5) 实现了节理岩体结构几何参数数字信息与力学参数定量计算的有机衔接,为岩体边坡稳定性分析提供更加可靠、真实的手段。

## 参考文献:

- [1] 祝云华,刘新荣,梁宁慧,等. 裂隙岩体渗流模型研究现状与展望[J]. 工程地质学报,2008,16(2):970-975.  
Zhu Yunhua, Liu Xinrong, Liang Ninghui, et al. Current research and prospects in modeling seepage field in fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2008, 16(2): 970-975.
- [2] Pirest S D, Hudson J A. Estimation of discontinuity spacing trace length using scanline[J]. Rock Mech. Min. Sci., 1981, 19: 183-191.
- [3] 方涛,徐文彬,胡海浪,等. Monte Carlo 法在岩体裂隙结构面模拟方面的应用[J]. 灾害与防治工程, 2006(2): 43-47.  
Fang Tao, Xu Wenbin, Hu Hailang, et al. Application of Monte Carlo method to simulating the fracture networks of rock mass[J]. Disaster and Control Engineering, 2006(2): 43-47.
- [4] 杨天鸿,于庆磊,陈仕阔,等. 范各庄煤矿砂岩岩体结构数字识别及参数表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2 482-2 489.  
Yang Tianhong, Yu Qinglei, Chen Shikuo, et al. Rock mass structure digital recognition and hydro-mechanical parameters characterization of sandstone in Fanggezhuang Coal Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2 482-2 489.
- [5] Kulatilake P H S W. Estimating elastic constants and strength of discontinuous rock[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(7): 847-864.
- [6] Hoek E, Brown E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1980, 106(GT9): 1 013-1 035.
- [7] Neuman S P. Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks [J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13(3): 124-147.
- [8] Roberts G, Poropat G V. Highwall joint mapping in 3D at the Moura mine using SIROJOINT [R]. Pullenvale: CSIRO Exploration and Mining Technology Court, 2000.
- [9] Reid T R, Harrison J P. A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(7): 1 073-1 089.
- [10] 奥地利 Startup 公司. ShapeMetriX 3D 系统使用手册[M]. 沈阳: 欧美大地仪器设备中国有限公司, 2008.
- [11] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34(8): 1 165-1 187.
- [12] Carranza-Torres C, Fairhurst C. The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1999, 36(6): 777-809.
- [13] Sonmez H, Ulusay R. Modification to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1999, 36(6): 743-760.