

王家臣,陈冲. 露天矿节理岩质边坡稳定性分析[J]. 煤炭学报,2017,42(7):1643-1649. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1243

Wang Jiachen, Chen Chong. Stability analysis for jointed rock slope in an open iron ore mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7):1643-1649. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1243

## 露天矿节理岩质边坡稳定性分析

王家臣<sup>1,2</sup>, 陈冲<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083; 2. 放顶煤开采煤炭行业工程研究中心,北京 100083)

**摘要:**针对弓长岭露天铁矿东帮节理岩体边坡的结构特征,使用3GSM三维岩体不接触测量系统,进行了结构面调查及统计分析,获取了结构面倾向、结构面倾角以及节理迹长、节理间距的详细统计数据。基于Monte-Carlo随机模拟方法,使用结构面网络模拟的软件FracSim3D,得到节理岩体的三维网络模型。在建立的三维网络模型基础上,采用钻孔取样方法获取节理岩体的岩体质量指标RQD,结合现场点荷载强度试验,进而获取RMR指标,基于Hoek-Brown经验方法得到节理岩体的抗剪强度参数。通过FISH语言编程实现了对复杂节理岩体的精细建模,采用离散元软件UDEC对边坡进行稳定性分析。结果表明:边坡整体处于稳定状态,局部发生岩体变形,受顺倾结构面控制,边坡顶部岩体沿结构面产生楔体破坏,局部散体区域出现掉块现象。

**关键词:**节理岩体;边坡;三维网络模拟;稳定性分析

**中图分类号:**TD854.6 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2017)07-1643-07

### Stability analysis for jointed rock slope in an open iron ore mine

WANG Jia-chen<sup>1,2</sup>, CHEN Chong<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Coal Industry Engineering Research Center of Top-coal Caving Mining, Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to the structure characteristics of the joint rock mass of the east slope of Gongchangling open iron ore mine, using the 3 dimensional rock non-contact measurement system (3GSM), the investigation and statistical analysis of surface structure are performed. Detailed statistics data including surface structure tendency, inclination, joint trace length, and joints pitch are obtained. Based on Monte-Carlo stochastic simulation method, the three-dimensional network model of jointed rock mass is obtained by the structural network simulation software FracSim3D. The rock quality index RQD is obtained by drilling samples on the three-dimensional network model. Then the RMR index is evaluated combined with on-site point load test. The shear strength parameters of jointed rock mass are obtained by Hoek-Brown method. Jointed rock slope is modeled through the FISH language programming, and the stability of the slope using the discrete element software UDEC is performed. The results show that the slope is in a stable state, but the local wedge failure of rock mass occur in the upper areas of slope, which is controlled by the joints along slope direction. The phenomenon of block out also appears in dispersion zone.

**Key words:** jointed rock mass; slope; 3D discontinuity network simulation; stability analysis

露天矿采场边坡由于开挖以及爆破震动等的影响导致边坡岩体节理裂隙发育,而节理会导致岩体强

度降低,进而影响边坡的稳定性。然而,由于岩体结构的复杂性,如何准确的获取结构面信息,模拟岩体

内部结构面,确定岩体强度参数并分析其稳定性一直以来都是露天矿边坡工程的难题<sup>[1-6]</sup>。

目前的测量技术还不能将岩体内部的所有节理测出,只能通过钻孔、开挖面和岩体出露面进行测量。常用方法有两种:接触测量(钻孔法、测线法、统计窗法)和非接触测量(钻孔摄像法、激光扫描法、摄影测量法)。其中数字摄影测量方法避免了大量的接触测量工作,测量过程省时省力,拍摄的图片可反复使用,成本较钻孔摄像和激光扫描低,是一种很有前景的测量方法<sup>[7-10]</sup>。

结构面网络模拟克服了岩体内部结构面无法直接测量的问题。在现场大量结构面测量数据统计分析基础上,得到结构面几何参数概率统计模型,依据 Monte-Carlo 方法生成结构面网络模型。目前结构面网络模拟技术已经从早期的二维模型发展到三维模型。三维结构面网络模型不仅可以展现岩体内部结构面的特征,还可以获取岩体质量指标 RQD,通过经验公式便能得到岩体强度参数,结合现场岩体强度实验结果,可以为露天矿边坡稳定性分析提供准确的依据<sup>[11-15]</sup>。

用数值模拟方法对岩体边坡进行稳定性分析时,分析结果的可靠性取决于岩体结构模型的正确与否。迄今为止,以离散单元法 UDEC 为代表的岩体边坡稳定性分析软件,仍难以建立与复杂岩体结构面分布规律相符的块体分析模型<sup>[16-18]</sup>。

笔者采用数字摄影测量系统 ShapeMetriX3D 获取露天矿采场边坡结构面信息,利用三维网络模拟软件 FracSim3D 建立边坡三维节理网络模型,通过 Hoek-Brown 经验方法获取岩体强度参数,通过 FISH 语言编程实现了对复杂节理岩体的精细建模,在此基础上,利用离散元软件 UDEC 分析了露天矿采场边坡的稳定性。

## 1 节理调查与统计分析

### 1.1 工程背景

弓长岭露天铁矿位于辽宁省中部,西南距鞍山市 70 km,西北距辽阳市 40 km。弓长岭露天铁矿年生产铁矿石 720 万 t,占地面积 4.359 1 km<sup>2</sup>,开采标高 +530 ~ +68 m。采场开挖形成高陡岩石边坡,为了系统分析采场边坡的稳定性,对采场边坡节理的分布情况进行调查分析。

笔者选取该矿独木采区节理发育的东端帮 13 号测点,进行结构面参数的调查和统计分析,测点位置如图 1 所示。测点边坡台阶坡面角 65°,区域岩体为混合岩,由于长期风化边坡呈现碎裂岩体结构。

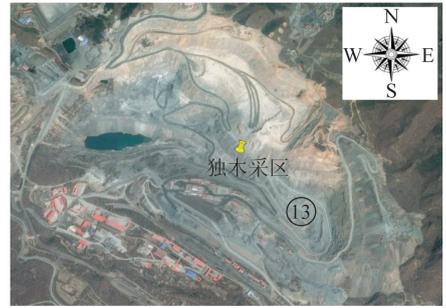


图 1 13 号测点位置

Fig. 1 Location of measuring point 13

### 1.2 测量系统

本次测量采用的是由奥地利 3GSM 公司生产的 ShapeMetriX3D 三维岩体不接触测量系统。该系统由一个校准的单反相机(尼康 D80, 3 872 像素×2 592 像素)、标杆以及相应的软件组成,如图 2 所示。该系统利用相机对边坡面的左右两个角度拍摄照片,标杆作为距离测量的参照,软件系统对不同角度的图像进行一系列的技术处理(基准标定、像素点匹配、图像变形偏差纠正),实现实体表面真三维模型重构,在三维实体图像的基础上实现每个结构面个体的识别、定位、拟合、追踪以及几何形态信息参数(产状、迹长、间距等)的获取,并进行结构面的分组、几何参数统计。



(a) 相机

(b) 软件



(c) 标杆

图 2 ShapeMetriX3D 三维岩体不接触测量系统

Fig. 2 ShapeMetriX3D measuring system

该系统主要优点可归纳为:① 解决了传统现场节理地质测量低效、费力、耗时,不安全、甚至难以接近实体和不能满足现代快速施工的要求的弊端,真正做到现场岩体开挖揭露面的即时定格和精确定位;② 传统方法现场真正需要测量的具有一定分

布规律和统计意义的 IV 级和 V 级结构面几何形态数据无法做到精细、完备、定量的获取,该系统完全可以胜任,使得现场的数据可靠性和精度满足进一步分析的要求。

### 1.3 结果分析

在需要调查的边坡区域拍摄两个不同角度的照片,两张照片通过软件合成如图 3 所示三维立体边坡模型。对所生成的三维边坡模型进行结构面标定,标出主要节理面的范围、迹线,系统会自动分析并对节理面的倾向、倾角、间距和迹长等数据分析并记录。

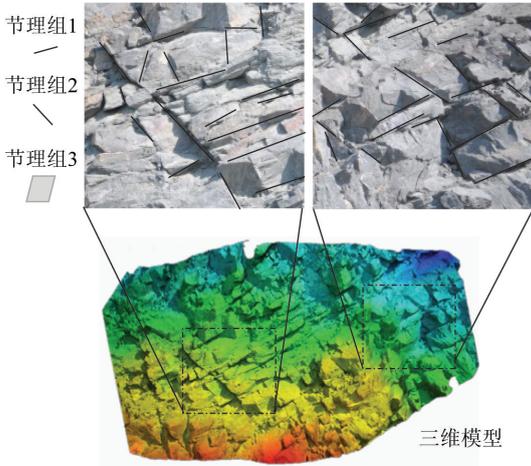


图 3 基于三维边坡模型的结构面分组

Fig. 3 Joint sets based on 3D slope model

在 ShapeMetix3D 软件中,可以直接生成如图 4 所示的节理赤平极射投影图,通过对结构面产状的赤平投影分析和聚类分析,得出了测点 13 边坡的优势产状为  $135.42^\circ \angle 74.69^\circ, 184.43^\circ \angle 46.48^\circ, 34.31^\circ \angle 50.76^\circ$ 。

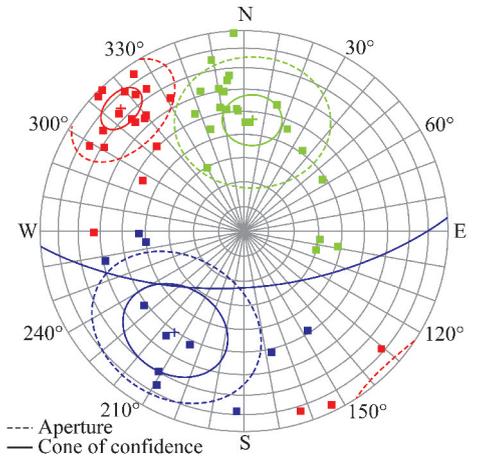


图 4 测点赤平极射投影

Fig. 4 Stereographic projection of measuring point

通过对图 3,4 的统计分析,可以得到测点 13 的节理倾向、倾角、迹长和间距统计结果,见表 1。

## 2 三维节理网络模拟

三维网络模型的目的是应用计算机技术构建与

表 1 节理面特征参数统计结果

Table 1 Statistics data of the joint occurrence of measuring point

节理组号	倾向/(°)			倾角/(°)			间距/m	迹长/m
	均值	标准差	分布	均值	标准差	分布		
1	159.46	70.27	正态	72.68	10.97	正态	0.14	0.82
2	192.77	39.03	正态	51.17	14.87	正态	0.39	1.22
3	100.97	120.29	正态	56.45	12.54	正态	0.81	0.75

实际分布规律类似的三维节理岩体模型。把现场测量结果进行统计和分析后,利用 Monte-Carlo 方法在计算机上模拟生成节理面的三维网络图。本次节理网络模拟采用的是 FracSim3D 软件<sup>[19-21]</sup>。

模拟参数根据调查统计的节理信息确定,节理迹长转化为圆盘模型的形状、大小;节理数量转化为节理密度;节理的产状、间距信息则使用相同概率分布特征函数模拟。将表 1 所示的节理特征参数输入到软件中,得到结构面网络图(图 5)。

岩石质量指标 (RQD) 由美国伊利诺斯大学 Deere 在 1964 年提出,其原始定义为钻孔进尺  $L$  内长度大于 10 cm 的岩芯累积长度与  $L$  的百分比。当通过网络模拟建立起岩体结构面三维网络模型后,就可

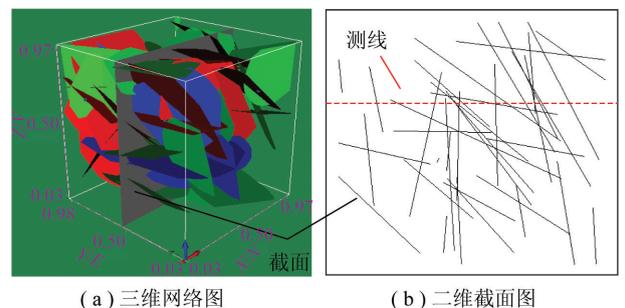


图 5 结构面三维网络模拟

Fig. 5 Simulation of joint sets

以根据实际要求,通过在结构面网络图中的不同方向布置测线,视该测线为“钻孔”,它被各条结构面所截成的线段视作“岩芯柱”,便可以用来计算 RQD 值。

在建好的三维网络模型中布置一组3个随机的“钻孔”,如图6所示,并获取到“钻孔”与结构面交点的坐标。然后计算出相邻两个交点之间的间距,即每段“岩芯柱”的长度,并统计出长度大于10 cm的“岩芯柱”的长度,再除以钻孔总长度,即可得到RQD指标。经过计算得出现场岩体的RQD指标为67.7%。

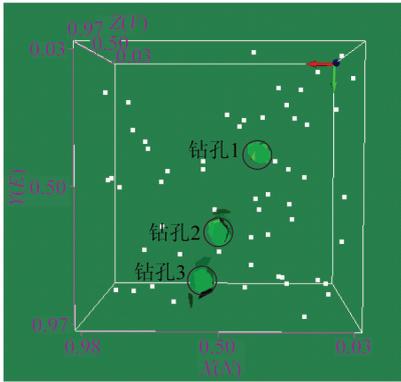


图6 钻孔采样

Fig. 6 Joints intersected by boreholes

### 3 节理岩体强度特征

#### 3.1 点荷载测试

点荷载试验机小巧轻便,便于携带,可在现场进行试验;另外,点荷载试验可以利用不规则形体的试样,试样无需进行机械加工,用地质锤稍加修整后,都可以直接用于试验,大大降低了试验成本,缩短了试验时间,最后,点荷载试验操作简便,对试样要求低,可以进行大量试验,能够获得较全面的岩石强度指标。因此,笔者采用SD-1型便携式数码点荷载仪和相配套的AKS-GI2010型数据采样器(图7)对东端帮不同的高程区域(+166, +178, +233, +269, +387 m)的边坡岩体进行了现场测试。获取数据后,根据《工程岩体试验方法标准》计算出点荷载强度指数,并求出岩石的抗压强度和抗拉强度值。



图7 点荷载试验仪器

Fig. 7 Point load test instrument

未修正的岩石点荷载强度 $I_s$ 按式(1)计算,即

$$I_s = P/D_e^2 \quad (1)$$

式中, $P$ 为破坏载荷,N; $D_e$ 为等价岩芯直径,mm。

$I_s$ 值不仅与试样的形状有关,也和试件尺寸 $D$ 有关,为了便于比较,获得一致性点荷载强度指数,必须进行尺寸修正。不规则块体试验的等价岩芯直径为

$$D_e^2 = 4WD/\pi \quad (2)$$

式中, $W$ 为试件破坏面上垂直于加荷点连续的平均宽度,mm; $D$ 为试件破坏面上测量的两加荷点之间的距离,mm。

根据试验结果分别绘制 $D_e^2$ 与破坏荷载 $P$ 的关系曲线。并在曲线上查找 $D_e^2 = 2\,500\text{ mm}^2$ 时所对应的 $P_{50}$ 值,且岩石点荷载强度指数按式(3)计算:

$$I_{s(50)} = P_{50}/2\,500 \quad (3)$$

式中, $I_{s(50)}$ 为等价岩芯直径为50 mm的岩石点荷载强度指数,MPa; $P_{50}$ 为根据 $D_e^2$ 与 $P$ 关系曲线求得的 $D_e^2 = 2\,500\text{ mm}^2$ 时的 $P$ 值,N。

对东端帮测的标准点荷载强度指数进行整理,得到岩石的 $I_{s(50)}$ ,见表2。

表2 点荷载强度统计结果

Table 2 Statistical results of point load strength

高程/m	+166	+178	+233	+387
$I_{s(50)}$	4.087	4.192	3.094	3.792

岩石的抗压和抗拉强度为

$$\sigma_c = 23I_{s(50)} \quad (4)$$

$$\sigma_t = 0.9I_{s(50)} \quad (5)$$

混合岩的单轴抗压强度为87.20 MPa,单轴抗拉强度为3.41 MPa。

#### 3.2 RMR分类

Bieniawski在1976年提出了RMR岩体分类系统,并广泛应用于边坡工程中。边坡岩体分类的目的是为边坡岩体质量及其稳定性的初步评价提供1种客观的比较手段和衡量标准,同时也为模型建立、参数选择以及进一步的边坡稳定性分析以及设计加固提供依据。其评价指标主要有:

(1)单轴抗压强度。该边坡混合岩的单轴抗压强度为87.20 MPa。

(2)RQD指标。在建立的三维网络模型的基础上获取到RQD指标为67.7%。

(3)间距。在建立的三维网络模型中做1个截面,在截面上设置1条测线(图5),在测线上统计节理的间距,得出节理的平均间距为7.2 cm。

(4)节理条件。现场观测发现,摩擦光面或断层泥在1~5 mm,结构面张开度也在1~5 mm。

(5)地下水条件。现场观测的结果表明,该边坡的地下水条件为潮湿。

(6)不连续面方向条件。现场结构面调查分析的结果表明,有 1 组不连续面由于倾向与边坡倾向基本一致,为顺倾结构面,所以确定不连续面方向条件为一般。

依据 RMR 岩体分类方法得到东端帮岩体分类评分值见表 3。

表 3 东端帮岩体分类评分值

Table 3 Classification score of slope rock mass

参数	单轴抗压 强度/MPa	RQD/ %	间距/ cm	节理 条件	地下水	节理方向 修正分	总分 (RMR)
数值	70.92	67.7	7.2		潮湿	一般	
得分	12	10	8	10	10	-5	45

据表 3 可知,该边坡岩体的 RMR 总分为 45,依据岩体质量评价表可知,东端帮的岩体为 III 级岩体,岩体质量描述为一般岩体。

### 3.3 强度参数

Hoek-Brown (1980,1988) 分析了大量岩柱的单轴和三轴试验,应用修正的 Griffith 理论,在充分吸取实际应用经验的基础上,提出了基于 RMR 岩体质量分类体系之上的用于节理岩体抗剪强度确定的经验公式,其基本思想是根据岩体地质特征和岩体结构参数以及影响岩体性质的其他主要因素,进行岩体质量分类,然后利用岩体质量指标值与岩体强度之参数之间的经验关系进行估算。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s\sigma_c^2 \right)^a \quad (6)$$

式中,  $\sigma_1, \sigma_3$  分别为大、小主应力;  $m_b, a, s$  为根据岩体分类所确定的材料常数,可根据式(7)确定。

对于受扰动的岩体:

$$\begin{cases} m_b = m_i \exp\left(\frac{RMR - 100}{14}\right) \\ s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{6}\right), a = 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $m_i$  为完整岩石的  $m$  值。

根据已知岩体参数  $m, a, s$ , 可方便确定摩尔库伦准则中的岩体强度参数  $c, \varphi$ 。基于 RMR 获得的岩体的主要参数见表 4 ( $E_m$  为岩体变形模量)。

表 4 基于 RMR 各岩体的主要参数值

Table 4 Parameters of the rock mass based on RMR

参数	$m_i$	$\sigma_c$ /MPa	$m_b$	$s/10^{-5}$	$c$ /MPa	$\varphi/(^\circ)$	$E_m$ /MPa
混合岩	20	82.7	0.3	5	2.5	19.6	2 625.6

## 4 边坡稳定性分析

### 4.1 计算模型

UDEC 为一个二维离散元程序,可以模拟研究非连续结构体在静力荷载或动荷载作用下的受力变形。有了边坡的地质结构面网络图后,应将节理数据输入到 UDEC 中进行边坡的稳定性计算。人为的输入节理信息不仅速度慢,而且出错可能性较大。笔者基于 FISH 语言编写了相应程序代码能够将节理信息快速导入 UDEC 软件中。导入节理信息后的东端帮边坡的计算模型断面如图 8 所示。

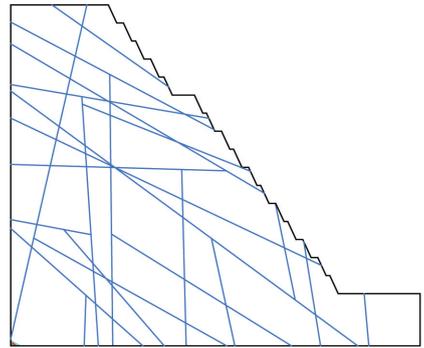


图 8 计算模型

Fig. 8 Model of slope

根据现场的工程地质条件和地质勘察资料,结合相关文献综合考虑<sup>[5-6]</sup>,得出结构面的力学参数,见表 5。

表 5 结构面参数

Table 5 Parameters of Joints

参数	法向刚度/ (GPa · m <sup>-1</sup> )	切向刚度/ (GPa · m <sup>-1</sup> )	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(^\circ)$
结构面	20	2	50	30

### 4.2 分析方法

计算中选用 Mohr-Coulomb 本构模型模拟边坡岩土体,选用理想弹塑性的库伦滑动模型模拟结构面。模型底部完全约束,前后面边界仅水平向约束。

Mohr-Coulomb 本构模型为张拉剪切屈服破坏,如图 9 所示,该准则定义一个抗拉强度和满足拉伸破坏的流动法则。工程实践和研究成果表明 Mohr-Coulomb 模型能较好模拟岩土体的力学行为,因此适合边坡模拟分析。

Mohr-Coulomb 剪切函数 AB 段  $f^s = 0$ :

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \quad (8)$$

式中,  $N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ 。

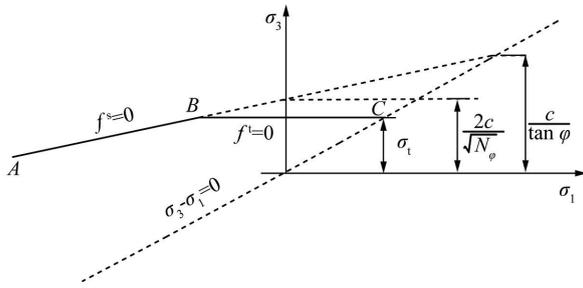


图9 Mohr-Coulomb 破坏准则

Fig. 9 Failure criteria of Mohr-Coulomb constitutive model

拉应力破坏函数 BC 段  $f^t=0$ :

$$f^t = \sigma_3 - \sigma_1 \quad (9)$$

岩土强度不超过式(10)给定  $\sigma_{t,max}$ :

$$\sigma_{t,max} = \frac{c}{\tan \varphi} \quad (10)$$

岩土体的破坏模式为剪切破坏,可通过  $g^s$  确定破坏准则,表达式为

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (11)$$

式中,  $N_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$ ,  $\psi$  为岩土材料的剪胀角。

岩土材料破坏形式为拉破坏时,根据流动法则由势函数  $g^l$  确定,此函数表达式为

$$g^l = \sigma_3 \quad (12)$$

该模型剪应力假定仅考虑岩土体最大、最小主应力,忽略第二主应力的影响。因其可较准确地反映土体的物理力学行为且具有计算效率较高的特点,被大量应用于边坡加固工程。

节理面采用接触库仑滑移模型模拟,该模型是一般工程研究最常用的模型。库仑摩擦和黏聚性质比其他节理性质常常更容易获得。通过设置节理参数模拟块体之间的滑移、分离和变形等力学特性,节理单元的法向刚度  $k_n$  和剪切刚度  $k_s$  为邻近实体单元等效刚度的 10 倍,如式(13)所示:

$$k_n = k_s = 10 \max \left( \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}} \right) \quad (13)$$

式中,  $K$  为邻近实体单元的体积模量;  $G$  为邻近实体单元的剪切模量。

### 4.3 结果分析

东端帮边坡的位移矢量分布如图 10 所示。边坡整体处于稳定状态,局部发生岩体变形。岩体变形主要分布在边坡的中上部。受顺倾结构面控制,边坡顶部岩体产生剪切变形,随岩体变形的不断增加,岩体沿节理面产生楔体破坏,局部散体区域出现掉块现象。中部岩体的也受顺倾结构面的控制发生剪切变形,随着岩体内的结构面逐渐扩展,会产生沿结构面

的剪切破坏。

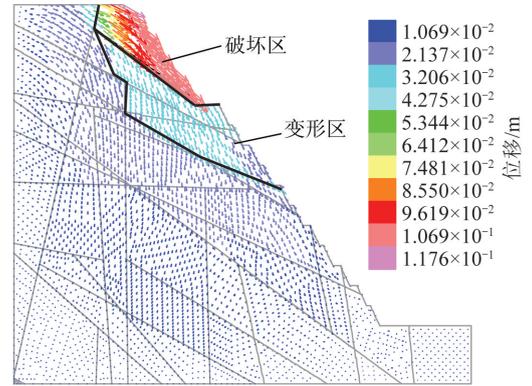


图10 位移矢量云图

Fig. 10 Displacement vector of slope

## 5 结 论

(1) 采用三维岩体不接触测量系统对现场节理进行调查及统计分析,得出了边坡的优势产状为  $135.42^\circ \angle 74.69^\circ$ ,  $184.43^\circ \angle 46.48^\circ$ ,  $34.31^\circ \angle 50.76^\circ$ 。该系统可以精确和快速地测量边坡的节理裂隙分布。

(2) 基于 Monte-Carlo 随机模拟原理,采用 Frac-Sim3D 结构面二维及三维网络模拟的软件,得到节理边坡岩体的网络模型。在三维网络模型布置随机钻孔,得到了岩体的 RQD 指标为 67.7%。

(3) 通过现场点荷载强度试验得到了岩石的抗压强度参数,结合岩体的 RQD 指标及现场勘察结果,获取岩体的 RMR 得分为 35,基于 Hoek-Brown 经验方法获取节理岩体的黏聚力  $c=2.5$  MPa,内摩擦角为  $\varphi=19.6^\circ$ 。

(4) 基于 FISH 语言编写了相应程序代码将节理信息快速导入 UDEC 软件,对节理边坡进行了稳定性分析,分析结果表明:边坡整体处于稳定状态,局部发生岩体变形,受顺倾结构面控制,边坡顶部岩体沿结构面产生楔体破坏,局部散体区域出现掉块现象。

### 参考文献 (References):

- [1] 王家臣,孙书伟. 露天矿边坡工程[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [2] 王家臣. 边坡工程随机分析原理[M]. 北京:煤炭工业出版社,1996.
- [3] Hoek E, Bray J W. 岩石边坡工程[M]. 卢世宗,译. 北京:冶金工业出版社,1983.
- [4] 王家臣,谭文辉. 边坡渐进破坏三维随机分析[J]. 煤炭学报,1997,22(1):29-33.  
Wang Jiachen, Tan Wenhui. Three dimensional stochastic analysis of slope progressive failure[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(1):29-33.
- [5] 王家臣,常来山,夏成华,等. 露天矿节理岩体边坡稳定性研究

- [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3350-3354.
- Wang Jiachen, Chang Laishan, Xia Chenghua, et al. Study on stability of jointed rock slope of an open iron mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3350-3354.
- [6] 王家臣, 常来山, 陈亚军. 节理岩体边坡概率损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1396-1401.
- Wang Jiachen, Chang Laishan, Chen Yajun. Study on probability damage evolutionary rule of jointed rock mass slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1396-1401.
- [7] Robertson A, Mac G, Piteau D R. Determination of Joint populations and their significance for tunnel stability[J]. Transactions of the Society of Mining Engineers of AIME, 1973, 254(2): 135-139.
- [8] Priest S D, Hudson J A. Discontinuity spacings in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1976, 13(5): 135-148.
- [9] Larocque G E, Kapeller F, Coates D F. Seismic measurements and bore hole photographic observation[J]. Canadian Mining Journal, 1973, 94(3): 44-45.
- [10] Lautsch, Hermann. Stereo recording camera and exploratory boreholes in coal seams[J]. Glueckauf-Forschungshefte, 1973, 34(6): 253-258.
- [11] Long J C S, Remer J S, Wilson C R. Porous media equivalent for networks of discontinuous fractures[J]. Water Resources Research, 1982, 18(3): 645-658.
- [12] Priest S D, Samaniego A. Model for the analysis of discontinuity characteristics in two dimensions [J]. Proceedings-Congress of the International Society for Rock Mechanics, 1983; F199 - F207.
- [13] Samaniego J A, Priest S D. Prediction of water flows through discontinuity networks into underground excavations [J]. British Geotechnical Soc. , 1984; 157-164.
- [14] Andersson Johan, Shapiro Allen M, Bear Jacob. Stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information [J]. Water Resources Research, 1984, 20(1): 79-88.
- [15] Kulatilake P H S W, Wathugala D N, Stephansson O. Joint network modelling with a validation exercise in Stripa mine, Sweden [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(5): 503-526.
- [16] 杜朋召, 刘建, 韩志强, 等. 基于复杂结构精细描述的岩质高边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 393-398.
- Du Pengzhao, Liu Jian, Han Zhiqiang, et al. Stability analysis of high rock slope based on meticulous description of complex structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 393-398.
- [17] 王宇, 李晓, 刘帅, 等. 岩体离散裂隙网络稳定性计算的节理有限元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3337-3345.
- Wang Yu, Li Xiao, Liu Shuai, et al. Stability calculation for discrete fracture network of rock masses based on joint finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3337-3345.
- [18] 陈力. 复杂节理岩体离散块体建模及其工程应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- Chen Li. Generation of block analysis model of complex jointed rock mass and its engineering application[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [19] Xu Chaoshui, Dowd Peter. A new computer code for discrete fracture network modeling[J]. Computers & Geosciences, 2010, 36: 292-301.
- [20] Xu C, Dowd P A, Wyborn D. Optimisation of a stochastic rock fracture model using Markov Chain Monte Carlo simulation[A]. 35th APCOM Symposium-Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry[C]. 2011: 635-642.
- [21] Xu C, Dowd P A, Wyborn D. Optimisation of a stochastic rock fracture model using Markov Chain Monte Carlo simulation[J]. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 2013, 122(3): 153-158.