

龙泊含,雍睿,钟振,等. 基于改进Morgenstern-Price法的露天矿山边坡稳定性分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(5): 053039.

LONG Bohan, YONG Rui, ZHONG Zhen, et al. Slope stability analysis of open pit mine based on the improved Morgenstern-Price method[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(5): 053039.

基于改进Morgenstern-Price法的露天矿山 边坡稳定性分析

龙泊含¹, 雍睿¹, 钟振², 谭少楠²

(1. 宁波大学 岩石力学研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要:为解决传统Morgenstern-Price法未考虑岩体抗剪强度参数离散性的问题,引入Barton-Bandis准则对Morgenstern-Price法进行改进,考虑了岩体结构面抗剪强度参数JRC, JCS, φ_r 的离散性,充分呈现了岩体结构面特征参数的真实统计分布特征,并利用此方法对边坡稳定性进行了分析;而后结合改进的Rosenblueth法对边坡的破坏概率进行了计算。以凤田矿山为背景,利用改进的Morgenstern-Price法计算得到稳定性系数为1.013,说明凤田矿山处于欠稳定状态;其结合改进的Rosenblueth法得到边坡破坏概率为38.759%,说明凤田矿山处于中等危险状态。通过与其他方法的评价结果对比发现,改进的Morgenstern-Price法既能用于计算边坡稳定性系数,又能与改进的Rosenblueth法相结合计算边坡破坏概率,是一种方便、有效的边坡稳定性分析方法,可满足矿山边坡现场施工的要求。

关键词: Morgenstern-Price法; 露天矿山; 稳定性评价; 可靠度分析

中图分类号: TD854.6

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2023)05-3039-09

Slope stability analysis of open pit mine based on the improved Morgenstern-Price method

LONG Bohan¹, YONG Rui¹, ZHONG Zhen², TAN Shaonan²

(1. Ningbo University, Institute of Rock Mechanics, Ningbo 315211, China; 2. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: The internal rock mass is widely distributed with structural planes, and its shear strength exhibits nonlinear characteristics under different normal stresses, influenced by joint roughness coefficient (JRC), rock strength (JCS), and residual friction angle (φ_r). Based on the Mohr-Coulomb criterion, the traditional Morgenstern-Price method calculates normal stresses but fails to fully consider the variability of shear strength parameters of rock mass. This study introduces the Barton-Bandis criterion into the Morgenstern-Price method, proposing an improved Morgenstern-Price method (referred to as MP-BB method hereafter). The MP-BB method is then used to analyze the slope stability and calculate the failure probability of the slope in conjunction with the improved Rosenblueth method. The research shows that the MP-BB method takes into account of the variability of shear strength parameters of rock mass (JRC, JCS, φ_r) associated with structural planes, fully reflecting the true statistical distribution characteristics

收稿日期: 2023-03-09

修回日期: 2023-08-16

责任编辑: 许书阁

作者简介: 龙泊含(1999—),男,湖南湘西人,硕士研究生。E-mail: 763234186@qq.com

通信作者: 雍睿(1987—),男,江苏常州人,研究员,主要从事岩体结构面力学性质与边坡工程稳定性评价等方面的研究工作。

of these parameters. The stability coefficient calculated based on the MP-BB method is more accurate than that of the M-C criterion. The correctness of the failure probability calculation results using the MP-BB method is verified using the Monte Carlo method. Therefore, the MP-BB method can be considered an effective slope stability analysis method.

Key words: Morgenstern-Price method; open-pit mining; stability evaluation; reliability analysis

露天矿山边坡稳定性评价直接影响矿山的安全生产,据不完全统计,金属、非金属露天矿山边坡事故已发生近千起,约占全国滑坡事故总次数的15%^[1]。因此使用合理、高效的方法准确评价边坡稳定性对于确保矿山安全生产具有重大意义。

目前,通常从定量和定性的角度对边坡稳定性进行评价。在定量分析中,从1965年就开始使用的Morgenstern-Price法(以下简称M-P法),是一种极限平衡法,属于非常严谨的条分法^[2]。这种方法求解安全系数的过程较为复杂,一般的工程技术人员难以掌握,在我国没有得到普及和应用^[3]。我国常用的为Mohr-Coulomb准则(以下简称M-C准则),但在实际工程中,边坡的岩体中广泛存在着结构面,其抗剪强度表现出非线性特征,故使用M-C准则对岩体抗剪强度进行描述存在一定的局限性^[4]。因此,非线性破坏准则逐渐被用来分析岩质边坡的稳定性^[5-7],其中Barton-Bandis节理抗剪强度准则(以下简称B-B准则)被广泛使用。陈记^[8]等采用室内直剪试验,总结了粗糙度系数、法向应力对结面抗剪强度的影响,从而提出适用于特定岩石的JRC-JCS模型,并给出了适用范围和尺寸效应;陈欢欢^[9]等将可靠度理论和B-B准则相结合,根据岩质边坡破坏极限状态函数计算了边坡的稳定性系数和破坏概率,发现基于B-B准则的破坏概率分析能体现岩体结构面抗剪强度参数的离散性;张庆^[10]等采用携剪试验和JRC-JCS模型得到两种参数,通过对比分析发现JRC-JCS模型实地测量的参数更接近实际值。

由于传统极限平衡法不能解释“稳定性系数大于1边坡破坏”、“稳定性系数小于1边坡稳定”这两类问题^[11],因此可靠度方法被引入到边坡稳定性分析中,并在完善可靠度理论、计算破坏概率、开发软件、设定程序等方面进行了深入研究,部分研究成果已应用到实际工程中。目前工程中常用的可靠性分析法有:一次二阶矩法^[12]、响应面法^[13]、蒙特卡洛法^[14]、Rosenblueth法(以下简称R法)^[15]。其中计算精度较为精确的是蒙特卡洛法,但其耗时较

长,计算量极大;R法拥有较高的计算效率且能很好地与传统边坡稳定性评价方法相结合,计算精度也能满足大部分工程的需求^[16]。ROSENBLUETH^[17]对1975年提出的点估计法在基础理论方面进行了完善,清晰明了地阐述了可靠度分析中参数的随机性所带来的影响,完善后的点估计法在视觉上更为直观;范文亮^[18-19]等采用R法解决了单变量函数、多变量函数的统计矩估计法,而后又将离散变量的函数与常规点估计法相结合,解决了常规点估计法只能计算连续变量函数的不足;朱万成^[20]等对进行稳定性评价的各种方法做出了综合分析对比。

为此,笔者基于非线性B-B准则提出一种改进的M-P法,并利用其推导出边坡稳定性系数的表达式。而后建立极限状态函数,再利用改进的R法构造极限状态函数的四阶中心矩计算边坡破坏概率,最后将其结果应用于露天矿山边坡的稳定性分析计算中,可满足一般边坡稳定性分析的精度要求。其可对矿山边坡现场施工提供参考。

1 基于B-B准则的改进M-P法

1.1 B-B准则基本原理

BARTON^[21]利用多组天然结构面进行剪切试验,以此为基础提出了B-B模型。工程上通常认为B-B模型能够较好地描述结构面的特征^[22-24]。该准则在岩土工程中已经被广泛应用于岩体的抗剪强度分析中。其表达式为

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_r + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) \right] \quad (1)$$

式中, τ 为岩石结构面的抗剪强度; σ_n 为结构面的法向应力,MPa;JRC为结构面的粗糙度系数;JCS为结构面壁岩的有效抗压强度,MPa; φ_r 为结构面的残余摩擦角。

需要强调的是,B-B模型是通过总结直剪试验结果得到的经验公式,而模型材料是在极低应力下进行的试验,在边坡工程中 σ_n/JCS 的最佳范围为 $0.01 < \sigma_n/\text{JCS} < 0.30$ ^[25]。

首先利用式(1)和线性M-C准则计算不同法向应力下的剪应力,然后对数据进行拟合,得到M-C准则和B-B准则的拟合曲线,如图1所示。由图1可知,当法向应力 σ_n 较小时M-C准则对应的抗剪强度明显偏大^[26],且在大部分岩质边坡稳定性问题中法向应力 σ_n 都相对偏小,因此使用B-B准则对岩质边坡工程中结构面抗剪强度进行估计更接近工程实际。

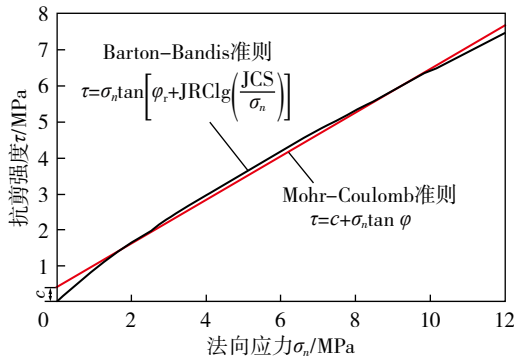


图1 B-B准则和M-C准则拟合曲线^[27]

Fig. 1 B-B criterion and M-C criterion fitting curves^[27]

线性M-C准则方程为

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2)$$

式中, c 为岩体结构面的黏聚力; φ 为岩体结构面的内摩擦角。

基于式(2)对 σ_n 求导并转化,得到 c 和 φ 的计算式,即

$$\varphi = \arctan(\partial \tau / \partial \sigma_n) \quad (3)$$

$$c = \tau - \sigma_n \tan \varphi \quad (4)$$

基于式(1)对 σ_n 求导并转化,得

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan \left[\text{JRC} \lg \left(\text{JCS} / \sigma_n \right) \right] - \frac{\pi \text{JRC}}{180 \ln 10} \times \left\{ \tan^2 \left[\text{JRC} \lg \left(\text{JCS} / \sigma_n \right) + \varphi_r \right] + 1 \right\} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),计算得到结构面的内摩擦角 φ ,由式(4)计算得到黏聚力 c 。

1.2 改进M-P法的稳定性系数确定

利用改进M-P法(以下简称MP-BB法)对边坡稳定性进行分析时,滑动面的形状不做特殊假定,可选任意曲线,并使用条分法对滑动面进行受力分析,如图2所示,推导出满足静力平衡和力矩平衡的方程式,然后用比例系数和条间力函数的乘积来表示两相邻条块间的剪切力与法向应力之比,根据整个滑体的边界条件来求解方程式。笔者为简化工程计算,推导过程未考虑坡面外力、孔隙水压力等

因素。

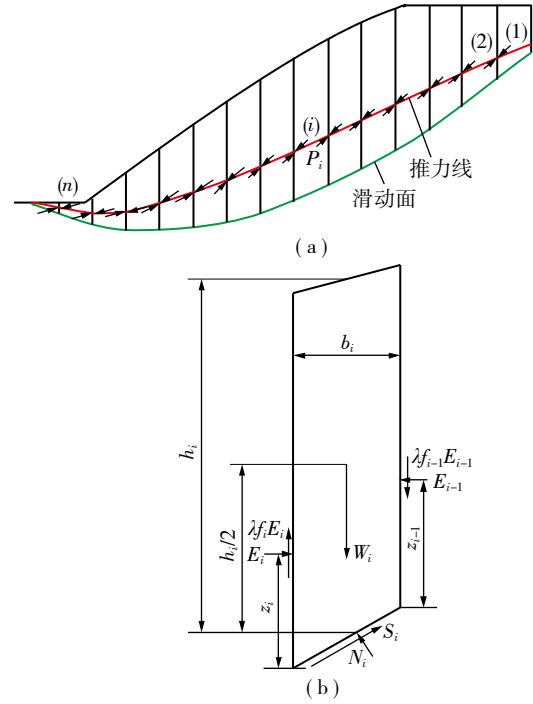


图2 Morgenstern-Price 法受力分析

Fig. 2 Sketch of the Morgenstern-Price method calculation

图2(b)为滑动面第 i 个条块的受力分析,其中, W_i 为作用有重力; N_i 为条底法向力; S_i 为条底剪切力; E_i, E_{i-1} 为条块两侧的有效法向条间力; z_i, z_{i-1} 分别为 E_i, E_{i-1} 与底面的垂直距离; λ 为比例系数; f_i, f_{i-1} 为条间力函数; $\lambda f_i E_i, \lambda f_{i-1} E_{i-1}$ 为切向条间力; b_i 为条块宽度; h_i 为条块高度; α_i 为条块倾角。

取第 i 个条块,沿滑面的垂直方向进行受力分析,得

$$N_i = (W_i + \lambda f_{i-1} E_{i-1} - \lambda f_i E_i) \cos \alpha_i + (E_i - E_{i-1}) \sin \alpha_i \quad (6)$$

式中, λ 为比例系数。

沿滑面的平行方向将力进行分解,得

$$S_i = (W_i + \lambda f_{i-1} E_{i-1} - \lambda f_i E_i) \sin \alpha_i - (E_i - E_{i-1}) \cos \alpha_i \quad (7)$$

在MP-BB法下,第 i 条块的剪切力 S_i 表达式为

$$S_i = \frac{\tau \sec \alpha_i b_i}{F_s} \quad (8)$$

式中, F_s 为边坡稳定性系数。

把式(1)代入式(8)可得到 S_i 。

$$S_i = \sigma_n \tan \left[\varphi_r + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) \right] \sec \alpha_i b_i / F_s \quad (9)$$

联立式(6)~(8),可得:

$$E_i (\lambda f_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) F_s = E_{i-1} (\lambda f_{i-1} \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) F_s +$$

$$F_s W_i \sin \alpha_i - \sigma_n \tan \left[\varphi_r + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) \right] b_i \sec \alpha_i \quad (10)$$

定义 $\phi_i, \phi_{i-1}, \psi_{i-1}$ 为传递系数,其表达式分别为

$$\phi_i = (\lambda f_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) F_s \quad (11)$$

$$\phi_{i-1} = (\lambda f_{i-1} \sin \alpha_{i-1} + \cos \alpha_{i-1}) F_s \quad (12)$$

$$\psi_{i-1} = \frac{(\lambda f_{i-1} \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) F_s}{\phi_{i-1}} \quad (13)$$

将式(11)~(13)代入式(10),可得:

$$E_i \phi_i = \psi_{i-1} E_{i-1} \phi_{i-1} + F_s W_i \sin \alpha_i - \sigma_n \tan \left[\varphi_r + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) \right] b_i \sec \alpha_i \quad (14)$$

由于第1条块和第 n 条块的法向力为0,则

$$E_0 = 0; E_n = 0 \quad (15)$$

由此推导出稳定性系数 F_s 的表达式为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \sigma_n \tan \left[\varphi_r + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) \right] b_i \sec \alpha_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j \right\}}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(W_i \sin \alpha_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j \right) + W_n \sin \alpha_n} + \frac{\sigma_n \tan \left[\varphi_r + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) \right] b_n \sec \alpha_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(W_i \sin \alpha_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j \right) + W_n \sin \alpha_n} \quad (16)$$

式(16)属于隐式方程,在等式两边同时存在稳定性系数。

第 i 个条块基底中心的力矩平衡方程为

$$E_i \left(z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) = E_{i-1} \left(z_{i-1} + \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - \lambda \frac{b_i}{2} (f_i E_i + f_{i-1} E_{i-1}) \quad (17)$$

条块间法向力产生的力矩 M_i, M_{i-1} 表达式分别为

$$M_i = E_i z_i \quad (18)$$

$$M_{i-1} = E_{i-1} z_{i-1} \quad (19)$$

同理,由于第1条块和第 n 条块的力矩为0,则

$$M_0 = 0; M_n = 0 \quad (20)$$

根据力矩平衡方程推导出比例系数 λ 为

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n [b_i (E_i + E_{i-1}) \tan \alpha_i]}{\sum_{i=1}^n [b_i (f_i E_i + f_{i-1} E_{i-1})]} \quad (21)$$

2 基于MP-BB法的破坏概率确定

对于 n 个随机变量 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$,利用MP-BB

法建立极限状态函数,即

$$Z = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (22)$$

式中, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 为影响露天矿山岩质边坡岩体的抗剪强度参数,这里假定各随机变量服从正态分布。

利用文献[28]中改进的R法得到式(22)的前四阶原点矩,即

(1) 极限状态函数 Z 的一阶原点矩为

$$m_1 = E[Z^1] \quad (23)$$

(2) 极限状态函数 Z 的二阶原点矩为

$$m_2 = E[Z^2] + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 g}{\partial X_i^2} \right)^2 (E_{KX_i} + 2) \sigma_{X_i}^4 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial X_i} \frac{\partial^2 g}{\partial X_i^2} C_{SX_i} \sigma_{X_i}^3 \quad (24)$$

(3) 极限状态函数 Z 的三阶原点矩为

$$m_3 = E[Z^3] + \frac{3}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 \frac{\partial^2 g}{\partial X_i^2} (E_{KX_i} + 2) \sigma_{X_i}^4 \quad (25)$$

(4) 极限状态函数 Z 的四阶原点矩为

$$m_4 = E[Z^4] + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^4 (E_{KX_i} + 3 - C_{4i}) \sigma_{X_i}^4 \quad (26)$$

式中, E_{KX_i} 为峰度系数; C_{SX_i} 为偏度系数; $E[Z]$ 为 Z 的均值。

使用式(23)~(26)得到前四阶原点矩,利用最大熵法对 Z 的概率密度分布进行拟合,推导出随机变量 Z 的前四阶中心矩,即

$$\mu_k = \sum_{i=1}^k C_i^k (-m_1)^{k-i} m_i \quad (27)$$

式中, k 为随机变量 Z 的阶数; m_1 为标准差; m_2 为平均值; m_3 为峰度系数; m_4 为偏度系数。

根据最大熵基础理论确定随机变量 Z 的最大熵概率密度解析式,并将 Z 标准化,得到随机变量 Y ,即

$$Y = \frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} \quad (28)$$

式中, μ_Z 为各随机变量的均值; σ_Z 为各随机变量的标准差。

此时,随机变量 Y 的前四阶矩即标准差、平均值、偏度系数和峰度系数,表示为 $(0, 1, C_{SZ}, E_{KZ})$,利用最大熵原理得到概率密度解析式^[29]为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left(\lambda_0 + \sum_{j=1}^4 \lambda_j Y^j \right) dY = 1 \quad (29)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Y \exp \left(\lambda_0 + \sum_{j=1}^4 \lambda_j Y^j \right) dY = 0 \quad (30)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Y^2 \exp\left(\lambda_0 + \sum_{j=1}^4 \lambda_j Y^j\right) dY = 1 \quad (31)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Y^3 \exp\left(\lambda_0 + \sum_{j=1}^4 \lambda_j Y^j\right) dY = C_{SZ} \quad (32)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Y^4 \exp\left(\lambda_0 + \sum_{j=1}^4 \lambda_j Y^j\right) dY = E_{SZ} + 3 \quad (33)$$

式中, $\lambda_j(j=0,1,2,3,4)$ 为待定系数; C_{SZ} 为极限函数 Y 的偏度系数; E_{SZ} 为极限函数 Y 的峰度系数。

最大熵密度函数一般取四阶矩就能获得良好效果,满足工程需要^[30]。

把求解式(29)~(33)得到的 λ_j ,代入式(34)得到边坡的破坏概率。

$$P_i = P(Y < 0) = P\left(Y < -\frac{\mu_Y}{\sigma_Y}\right) = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_Y}{\sigma_Y}} \frac{1}{\sigma_Y} \exp\left(\lambda_0 + \sum_{j=1}^4 \lambda_j Y^j\right) dY \quad (34)$$

式中, μ_Y 为 Y 的均值; σ_Y 为 Y 的标准差。

3 工程应用

3.1 工程概况

凤田矿山位于广西新坪镇凤岗村,中心点地理

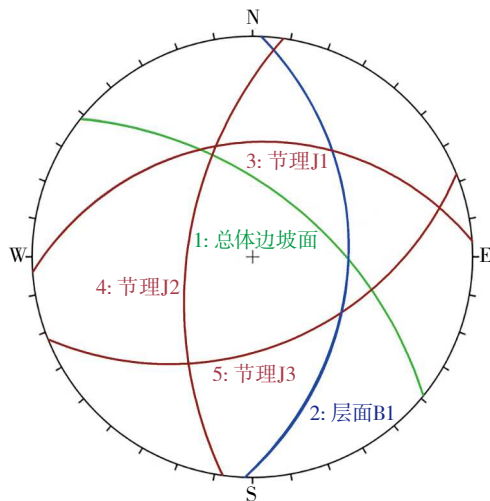


图4 凤田矿山边坡局部赤平投影结果

Fig. 4 Overall stereographic projection of Fengtian Mine slope

3.2 抗剪强度参数分布统计

笔者通过现场勘察获取轮廓曲线,并利用杜时贵提出的Barton直边法简明公式^[9]计算每条结构面试样的JRC;再依据回弹值与壁岩强度和壁岩状态(含水、风化情况)的关系,采用回弹法确定结构面壁岩强度大小(JCS);最后将回弹值代入结构面回弹值与基本摩擦角的线性关系式(理查兹1975年提

坐标为:东经110°26′57.56″,北纬24°29′42.21″。凤田矿山出露以石灰岩为主,边坡近东西走向,倾向南西,未设置台阶坡,总坡高102 m,坡宽96 m,坡向219°,坡角57°。

凤田矿山全貌如图3所示。



图3 凤田矿山全貌

Fig. 3 Overall view of the slope at Fengtian Mine

该矿山边坡潜在滑移面采用露天矿山边坡稳定性分析方法^[9]进行确定。经过总体和局部边坡整体稳定性分析,判断边坡整体可能沿层面B1发生滑移。结合赤平投影分析的结果(图4),在层面B1的作用下,该边坡局部很可能沿着该结构面发生单平面型滑移而产生破坏。

颜色	密集程度			
等高线数据	极向量			
分布情况	Fisher法			
计算面的尺寸	0.1%			
	颜色	倾角	极角方向	名称
用户界面				
1	■	57	219	总体边坡面
2	■	43	272	层面B1
3	■	35	176	节理J1
4	■	57	98	节理J2
5	■	45	338	节理J3
绘图模式		Pole向量		
向量数		0(0条目)		
半球		北半球		
投影		等角法		

出)^[31],得到 φ_r 。

对抗剪强度参数JRC,JCS, φ_r 进行分布检验,分别绘制不同参数的频数分布直方图,如图5所示。

由图5可知,抗剪强度参数的概率密度函数拟合度大多与正态分布相近,个别与其他类型相近。笔者进一步采用单样本S-W检验法分析了抗剪强度参数样本服从正态分布的显著性,分析结果见表1。

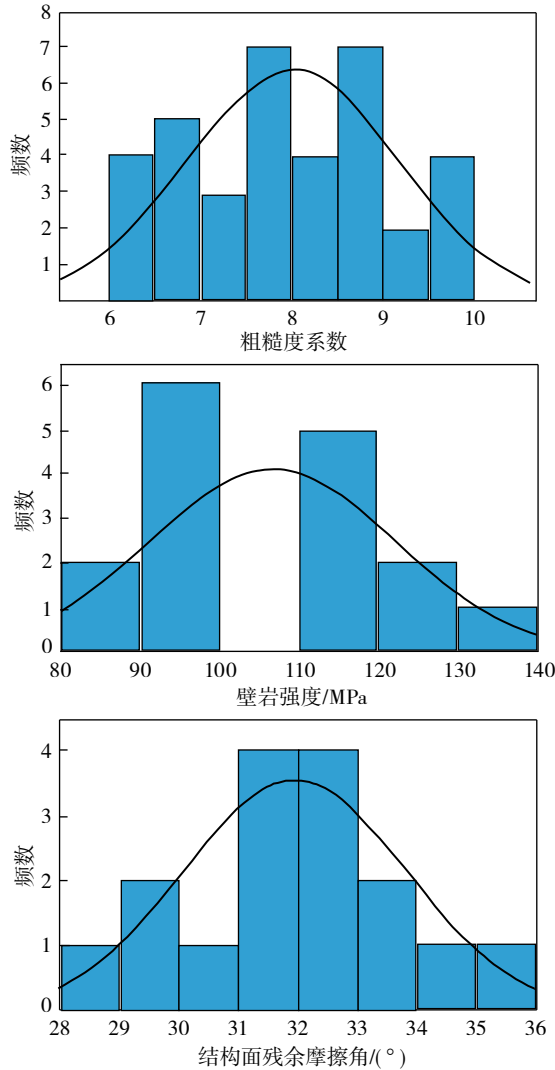


图5 凤田矿山结构面不同参数的频数分布

Fig. 5 Frequency distribution of joints parameters at Fengtian Mine

表1 凤田矿山结构面参数S-W检验

Table 1 S-W inspection of structural plane parameters of Fengtian Mine

名称	JRC	JCS	φ_r
自由度	36	16	16
平均值	7.96	106.49	31.89
标准差	1.11	15.34	1.83
最大值	9.98	137.63	35.36
最小值	6.02	82.23	28.73
95%置信区	下限	7.571	98.324
	上限	8.326	114.675
偏度	0.155	0.278	-0.001
峰度	-0.830	-0.429	-0.473
显著性	0.371	0.841	0.934

由表1可知,JRC的显著性概率为0.371,大于0.05;JCS的显著性概率为0.841,大于0.05; φ_r 的显著

性概率为0.934,大于0.05,即各参数求解结果显示其均与正态分布相吻合。

3.3 基于MP-BB法的稳定性分析

笔者采用SLIDE软件,建立凤田矿山边坡计算模型。首先将矿山边坡模型导入SLIDE软件中,然后再输入矿山边坡稳定性计算所需参数:天然重度 γ 、结构面残余摩擦角 φ_r 、粗糙度系数JRC、壁岩强度JCS(γ 取28 kN/m³,JRC,JCS, φ_r 取自表1),最后得到边坡的计算模型,如图6所示。

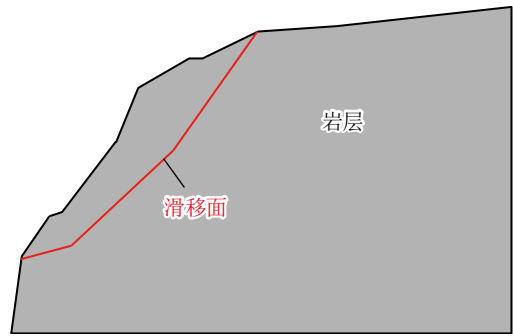


图6 凤田矿山边坡计算模型

Fig. 6 Section of Fengtian Mine slope

在建立的边坡计算模型中,滑移面的形状采用非圆弧形,滑坡体共划分为25个条块。MP-BB法划分的滑坡体条块计算参数包括:条块重力、滑面倾角、左侧法向力、右侧法向力、左侧剪切力、右侧剪切力、滑面上剪力和法向力等。其所需的基础数据见表2。使用MP-BB法对凤田矿山边坡进行稳定性计算,得到 $F_s=1.013$ 。为对比不同方法的差异,在相同条件下,使用M-C准则进行计算,得到 $F_s=1.026$ 。使用SLIDE软件计算得到的模型如图7所示。通过两种方法计算结果的对比,发现传统M-C准则计算得到的稳定性系数偏大,应是分析时未考虑结构面抗剪强度参数的非线性。而基于非线性B-B准则的MP-BB法考虑了结构面抗剪强度参数的非线性特征,计算结果更为可靠。依据规范^[33],凤田矿山的 $F_s=1.013$,在 $1.00 \leq F_s < 1.05$ 范围内,属于欠稳定状态。

3.4 基于MP-BB法的破坏概率

笔者采用MP-BB法作为极限状态函数,利用式(34)得到边坡的破坏概率。通过Matlab软件建立MP-BB计算模型,选取粗糙度JRC、壁岩强度JCS和结构面残余摩擦角 φ_r 作为随机变量,将表1中三者的平均值、标准差、相对最小值以及相对最大值分别导入MP-BB计算模型,计算得到其破坏概率为38.759%,计算参数见表3。

表2 滑坡各条块体计算参数
Table 2 Calculation parameters of each block of landslide

条块	条块重力/kN	滑面倾角/(°)	滑面剪力/kN	滑面法向力/kN	左侧法向力/kN	右侧法向力/kN	左侧剪切力/kN	右侧剪切力/kN
1	217.17	57.39	186.29	111.80	0	6.21	0	-0.001 1
2	488.69	57.39	404.88	273.96	6.21	-6.40	-0.001 1	0.002 3
3	482.30	57.39	399.82	270.03	-6.40	-18.43	0.002 3	0.009 9
4	471.23	57.39	391.04	263.22	-18.43	-29.44	0.009 9	0.020 7
5	460.17	57.39	382.25	256.42	-29.44	-39.47	0.020 7	0.033 9
6	449.10	57.39	373.45	249.64	-39.47	-48.53	0.033 9	0.048 6
7	437.90	57.39	364.54	242.79	-48.53	-56.62	0.048 6	0.064 0
8	383.81	57.39	321.33	209.95	-56.62	-60.33	0.064 0	0.074 9
9	295.61	57.39	250.27	157.34	-60.33	-58.01	0.074 9	0.077 5
10	247.43	57.39	211.07	129.20	-58.01	-53.11	0.077 5	0.074 8
11	228.09	57.39	195.24	118.05	-53.11	-47.35	0.074 8	0.069 2
12	208.74	57.39	179.35	106.98	-47.35	-40.83	0.069 2	0.061 0
13	189.40	57.39	163.40	96.02	-40.83	-33.66	0.061 0	0.050 6
14	170.05	57.39	147.38	85.16	-33.66	-25.99	0.050 6	0.038 7
15	150.71	57.39	131.28	74.44	-25.99	-17.95	0.038 7	0.026 1
16	141.05	52.89	123.48	70.52	-17.95	0.31	0.026 1	-0.000 4
17	138.83	52.89	121.63	69.29	0.31	18.43	-0.000 4	-0.024 3
18	136.61	52.89	119.78	68.07	18.43	36.41	-0.024 3	-0.044 5
19	134.40	52.89	117.93	66.85	36.41	54.26	-0.044 5	-0.060 0
20	137.93	52.89	120.89	68.80	54.26	72.33	-0.060 0	-0.070 4
21	188.48	52.89	162.78	97.22	72.33	93.00	-0.070 4	-0.076 9
22	282.60	61.72	243.22	144.44	93.00	81.02	-0.076 9	-0.051 1
23	315.31	61.72	270.27	163.22	81.02	65.29	-0.051 1	-0.027 5
24	279.59	71.02	247.61	139.77	65.29	13.68	-0.027 5	-0.002 9
25	113.52	71.02	102.90	49.86	13.68	0	-0.002 9	0

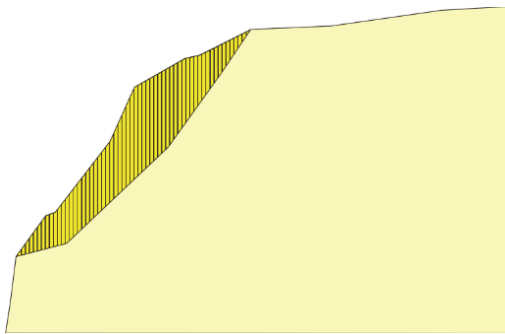


图7 SLIDE 软件计算所得模型
Fig. 7 Model calculated by SLIDE software

表3 MP-BB法破坏概率计算结果
Table 3 MP-BB method damage probability calculation results statistics

λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	$P_f/\%$
-12.99	7.86×10^{-2}	-9.62×10^{-5}	2.15×10^{-7}	5.47×10^{-7}	38.759

使用蒙特卡洛法(2 000组^[33]),对3.3节SLIDE软

件建立的凤田边坡计算模型进行可靠性分析,得到的边坡破坏概率 $P_f=38.626\%$ 。两种方法的计算结果非常接近,前者的计算结果略大,但可满足一般边坡稳定性分析的精度要求。

依据边坡稳定性等级分类表^[32],边坡破坏概率 $P_f=38.759\%$,稳定性等级判定为3级,属于中等危险状态,说明凤田露天矿山边坡发生破坏的概率较大。

4 结 论

(1) MP-BB法与传统M-P法相比,增加了对岩体非线性特征的考量,结果更为可靠,得到稳定性系数为1.013,凤田矿山处于欠稳定状态。

(2) MP-BB法与改进的R法相结合,得到边坡破坏概率为38.759%,与蒙特卡洛法计算得到的结果38.626%,大致吻合。两者的计算结果均说明凤田

矿山处于中等危险状态。

(3) MP-BB法既能用于计算边坡稳定性系数,又能与改进的R法相结合计算边坡破坏概率,是一种方便、有效的边坡稳定性分析方法,可对矿山边坡现场施工提供参考。

参考文献(References):

- [1] 秦宏楠. 紫金山金铜矿排土场滑坡诱发机理及监测预警技术研究[D]. 北京:北京科技大学, 2016.
QIN Hongnan. Study on Waste Dump landslide inducement mechanism and monitoring and early warning technology of Zijinshan Gold and Copper Mine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [2] 乔兰, 丁新启, 屈春来, 等. 基于Hoek-Brown准则的Morgenstern-Price法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(4): 409-412, 437.
QIAO Lan, DING Xinqi, QU Chunlai, et al. Application of Morgenstern-Price scheme based on Hoek-Brown criterion to slope stability analysis[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(4): 409-412, 437.
- [3] 康红普. 煤炭开采与岩层控制的时间尺度分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(1): 013538.
KANG Hongpu. Temporal scale analysis on coal mining and strata control technologies[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1): 013538.
- [4] 杨小礼, 李亮, 刘宝琛. 非线性破坏准则对竖直边坡稳定性分析的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 592-596.
YANG Xiaoli, LI Liang, LIU Baochen. Influence of nonlinear failure criterion on stability analysis of vertical cut using nonlinear SQP algorithm[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 592-596.
- [5] BARTON N R. Review of a new shear strength criterion for rock joints[J]. Engineering Geology, 1973, 76: 287-332.
- [6] 吴家红, 刘杰, 宋彦彬. 恒定法向刚度边界条件下岩石节理剪胀特性数值模拟[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(2): 023023.
WU Jiahong, LIU Jie, SONG Yanbin. Numerical simulation of shear dilation characteristics of rock joints under constant normal stiffness boundary conditions[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(2): 023023.
- [7] 陶志刚, 罗森林, 明伟, 等. 露天矿边坡评价分级与爆破振动条件下MSARMA法边坡角优化[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(3): 67-75, 83.
TAO Zhigang, LUO Senlin, MING Wei, et al. Evaluation and classification of open pit slope and slope angle optimization by MSARMA method under blasting vibration condition[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(3): 67-75, 83.
- [8] 陈记, 徐卫亚, 朱珍德, 等. 基岩-混凝土胶结面剪切强度JRC-JCS模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(4): 407-410.
CHEN Ji, XU Weiya, ZHU Zhende, et al. Study on JRC-JCS model for shear strength of bedrock-concrete cement planes[J]. Journal of Riverhead University(Natural Science Edition), 2003, 31(4): 407-410.
- [9] 陈欢欢, 雍睿, 刘子航. 基于Barton-Bandis非线性破坏准则的边坡破坏概率分析[J]. 金属矿山, 2020, 49(11): 44-52.
CHEN Huanhuan, YONG Rui, LIU Zihang. Analysis of slope failure probability based on Barton-bandis nonlinear failure criterion[J]. Metal Mining, 2020, 49(11): 44-52.
- [10] 张庆, 郑光, 许强, 等. 携剪实验和JRC-JCS模型在结构面抗剪强度取值中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2011, 22(1): 103-107.
ZHANG Qing, ZHENG Guang, XU Qiang, et al. Applying JRC-JCS model and portable shear test to acquire shear strength of rock joint[J]. Journal of Geological Hazards and Environment, 2011, 22(1): 103-107.
- [11] 张凌晨, 白建强, 侯瑞凯, 等. 可靠度理论在边坡工程中的应用研究[J]. 湖北工业大学学报, 2021, 36(1): 94-99.
ZHANG Lingchen, BAI Jianqiang, HOU Ruikai, et al. Application research of reliability theory in slope engineering[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2021, 36(1): 94-99.
- [12] 高谦, 吴顺川, 万林海. 土木工程可靠性理论及其应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007: 115-117.
- [13] 谭晓慧, 王建国, 刘新荣. 改进的响应面法及其在可靠度分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5874-5879.
TAN Xiaohui, WANG Jianguo, LIU Xinrong. Improved response surface method and its application to reliability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5874-5879.
- [14] 陈才贤. 基于蒙特卡洛法的高寒高海拔采场边坡稳定性评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(S1): 67-72.
CHEN Caixian. Research on the stability evaluation of openpit slope in alpine and high altitude area based on Monte Carlo method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(S1): 67-72.
- [15] ROSENBLUETH E. Point estimates for probability moment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1975, 72(10): 3812-3814.
- [16] 戚国庆, 耿亚欣. 不同可靠度方法在边坡稳定性分析中的对比研究[J]. 绍兴文理学院学报, 2022, 42(4): 1-8.
QI Guoqing, GENG Yaxin. A comparative study of different reliability methods in slope stability analysis[J]. Journal of Shaoxing University, 2022, 42(4): 1-8.
- [17] ROSENBLUETH E. Two-point estimates in probabilities[J]. Applied Mathematical Modelling, 1981, 5: 329-335.
- [18] 范文亮, 李正良, 韩枫. 多变量函数统计矩点估计法的性能比较[J]. 工程力学, 2012, 29(9): 1-11.
FAN Wenliang, LI Zhengliang, HAN Feng. Comparison of point estimate methods for probability moments of multivariate function[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 1-11.
- [19] 范文亮, 杨朋超, 李正良. 涉及离散变量的函数统计矩点估计法[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 8-13.
FAN Wenliang, YANG Pengchao, LI Zhengliang. Statistical moment

- estimation method for functions involving discrete variables[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 8–13.
- [20] 朱万成,董航宇,刘溪鸽,等. 金属矿山多矿柱承载与失稳破坏研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 043037.
ZHU Wancheng, DONG Hangyu, LIU Xige, et al. Review of bearing and instability of multi-pillar in metal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4): 043037.
- [21] BARTON N. A relationship between joint roughness and joint shear strength[A]. Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics[C]. 1971: 1–8.
- [22] BARTON N, PANDEY S K. Numerical modelling of two stoping methods in two Indian mines using degradation of c and mobilization of φ based on Q -parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(7): 1095–1112.
- [23] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977(10): 1–54.
- [24] CHOI S O, CHUNG S K. Stability analysis of jointed rock slopes with the Barton constitutive model in UDEC[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(S1): 581–586.
- [25] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等. 岩质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [26] 罗强,赵炼恒,李亮,等. 基于Barton-Bandis准则的锚固边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1351–1359.
LUO Qiang, ZHAO Lianheng, LI Liang, et al. Stability analysis of anchored slope based on Barton-Bandis failure criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1351–1359.
- [27] 李永红,彭振斌,钟正强,等. 基于Barton-Bandis非线性破坏准则的岩体强度预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(5): 1388–1391.
LI Yonghong, PENG Zhenbin, ZHONG Zhengqiang, et al. Strength prediction of rock mass based on Barton-Bandis nonlinear failure criterion[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2009, 40(5): 1388–1391.
- [28] 王刘洋. Rosenblueth法在土坡稳定可靠度分析中的应用[J]. 岩土工程技术, 2005, 9(2): 72–74.
WANG Liuyang. Application of Rosenblueth method in the reliability analysis of soil slope's stability[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2005, 9(2): 72–74.
- [29] 佟晓利,赵国藩. 改进的Rosenblueth方法及其在结构可靠度分析中应用[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(3): 74–79.
TONG Xiaoli, ZHAO Guofan. Improved Rosenblueth method and its application to structural reliability analysis[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1997, 37(3): 74–79.
- [30] 张明. 结构可靠度分析—方法与程序[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [31] 中华人民共和国国土资源部. GBT32864–2016滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.
- [32] 徐卫亚,张志腾. 滑坡失稳破坏概率及可靠度研究[J]. 灾害学, 1995, 10(4): 33–37.
XU Weiya, ZHANG Zhiteng. Study on landslide failure probability and reliability[J]. Journal of Catastrophology, 1995, 10(4): 33–37.
- [33] 段楠,薛会民,潘越. 用蒙特卡洛法计算可靠度时模拟次数的选择[J]. 煤矿机械, 2002, 23(3): 13–14.
DUAN Nan, XUE Huimin, PAN Yue. A method for determining the number realizations in the calculation of reliability by Monte Carlo simulation method[J]. Coal Mine Machinery, 2002, 23(3): 13–14.