

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.01.025

岩体结构面产状随机分布空间表征

王述红, 张紫杉, 王存根, 张峰春

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 基于不同的结构面产状概率分布函数对工程岩体的结构面进行模拟. 通过运用内聚理论对结构面进行组别划分, 并分别采用双平均密度分布、双正态密度分布、Fisher 分布三种不同的分布形式, 结合分布参数的反演, 进行随机性结构面模拟. 引入辽宁省某边坡工程的计算, 运用自主研发的 GeoSMA-3D (geotechnical structure and model analysis-3D) 系统进行关键块体搜索, 提出离散性评价参数, 分析基于不同结构面产状概率分布计算得到关键块体体积的差异. 研究发现当离散性评价参数大于临界值时, 生成的关键块体体积随离散性评价参数的减小而增大.

关 键 词: 随机性结构面; 双正态分布; Fisher 分布; 赤平投影; 离散性

中图分类号: TU 45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)01-0121-05

Stochastic Spatial Characterization of Structural Plane Occurrence in Rockmass

WANG Shu-hong, ZHANG Zi-shan, WANG Cun-gen, ZHANG Feng-chun

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: shwang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Based on different probability distribution functions, a stochastic planes simulation is applied in engineering rockmass. Three different probability distribution density functions: dual average density distribution, dual normal distribution and Fisher distribution are used to generate the stochastic structural planes. Meanwhile, a back analysis method is applied to acquire the distribution parameters based on spatial attitude. By inputting the data of deterministic structural planes and stochastic structural plane of a rock slope project in Liaoning Province, the slope modeling can be built and the key blocks can be identified by GeoSMA-3D (geotechnical structure and model analysis-3D). Then a discreteness index is put forward to evaluate the effectiveness and difference of different stochastic structural plane simulations. The results show that key blocks' volume will increase when the discreteness index becomes smaller within a certain range.

Key words: stochastic structural plane; dual normal distribution; Fisher distribution; stereographic projection; discreteness

岩质边坡经常出现于各种道路、桥梁、矿山的建设之中,其拥有独特的非连续、各项异性、非均匀性等特性. 岩质边坡的破坏不同于一般土质边坡,以基于结构面间的剪切破坏为主,即破坏主要由于渗流、堆载等情况发生在软弱节理之间. 因此判断并且发现这些有可能发生滑落的关键块体显得尤为重要.

块体理论是由 Shi 与 Goodman 提出的一种专门解决岩体工程稳定性的理论^[1-2],在块体理论的建模分析过程中,假定岩体主要由块体(即岩体)和结构面(即岩体节理面)组成. 在实际的工程中,除了在表面露头的部分结构面外,绝大多数岩体内部的结构面是无法进行测量的,因此一种基于表面迹线统计的随机结构面的模拟方法通

收稿日期: 2015-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050, 51179031); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目(SKLG2014K011); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LN2014006); 沈阳市科技计划项目(F13-179-9-00).

作者简介: 王述红(1969-),男,江苏泰州人,东北大学教授.

常被用于实际的工程之中。

对于一般的裂隙岩体,无法对每一个结构面的大小方向位置进行精确统计,因此需要对其进行归纳,得出总体性的方向和平均大小。一般情况下,引入三维裂隙网络模型来模拟实际的结构面。到目前为止,已经有许多学者相继提出了多种针对三维裂隙网络模型的随机性概率密度分布理论^[3],但很少应用于实际工程及比对分析。针对以上问题,本文在采集大量确定性结构面相关参数的同时,对已有的概率密度分布函数进行参数修正和简化,并且对实际工程中通过不同参数及不同分布方法搜索出的关键块体情况进行比对并进行合理评价。

1 基本思路

在随机结构面生成的过程中,了解结构面分布规律及相关参数是首要条件。首先,运用先进的三维地形非接触测量技术来获取地层表面的确定性结构面及相关参数。本文使用了一种通过摄影和后期计算机识别技术的结构面识别系统 ShapeMatrix 3D^[4]来对确定性结构面进行识别。然后通过赤平投影法及内聚理论进行结构面优势方向分组,通过数值反分析得出基于不同概率密度分布函数的相关参数,并用这些参数进行随机结构面的生成,将这些生成的结构面与确定性结构面一起加入到块体切割合并过程,找出关键块体,确定随机方法的可行性,并且对其生成关键块体的体积与结构面离散程度的关系进行研究。

2 结构面产状的概率分布模拟

2.1 Beacher 圆盘模型

在岩体结构面的模拟中,Beacher 圆盘结构面使用最为广泛。该模型中节理的形态被描述成圆形,通过圆盘中心的空间坐标 (x_0, y_0, z_0) 来确定结构面的位置,通过圆盘相对于直角坐标系的夹角 α, β 来确定结构面的倾向倾角,圆盘的半径 r 用来确定结构面的大小。该模型的表达式为

$$A(x-x_0)+B(y-y_0)+C(z-z_0)=0, \quad (1)$$

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2<r. \quad (2)$$

式中: $A=\sin\alpha\sin\beta$; $B=\sin\alpha\cos\beta$; $C=\cos\alpha$ 。

2.2 生成随机结构面的一般过程

对随机结构面的模拟包括以下步骤:

1) 获得确定性结构面的信息,包括倾向倾角

及结构面的大小。2) 对所得的确定性结构面进行空间分布定位,运用内聚理论确定主要分组^[5]。3) 确定各分组的倾向倾角的统计参数,代入反分析计算公式,反算出概率密度分布函数统计参数的值。4) 再根据结构面分布统计体密度,模拟出统计结构面数量 N ,运用概率密度分布函数模拟出随机性结构面的统计参数 θ, φ 。5) 最后把模拟出的随机性结构面的信息加入到裂隙岩体 3D 空间建模技术中,并且比对最终生成的关键块体情况。具体过程如图 1 所示。

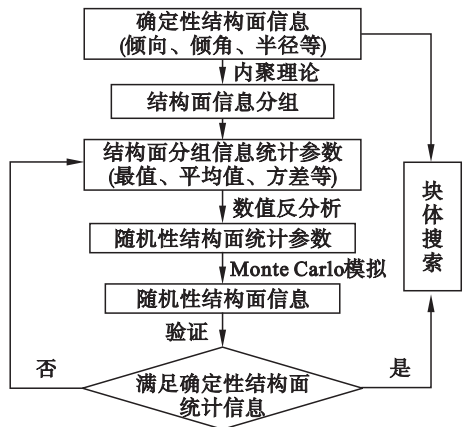


图 1 随机结构面模拟过程
Fig. 1 Simulation of the stochastic structural plane

上述的计算方法关键的问题是寻找出适合于随机性结构面空间产状合理的概率密度分布函数。基于以往的文献资料以及相关专家的经验,主要考虑以下三种概率密度分布函数进行模拟。

2.3 双平均密度分布

在进行随机结构面模拟的过程中,最简单的概率密度分布方法是采用平均密度分布的方法。首先,选取确定性结构面统计参数中的最大和最小值,生成平均密度分布函数,如式(3)所示。最后加入 Monte Carlo 随机数,进行随机结构面空间产状分布的生成。

$$\left. \begin{aligned} F(\theta) &= \frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}}, 0 \leq \theta \leq \pi; \\ F(\varphi) &= \frac{\varphi - \varphi_{\min}}{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

令 $F(\theta)=u, F(\varphi)=v$,取反函数,解方程得到

$$\left. \begin{aligned} \theta^* &= (\theta_{\max} - \theta_{\min})u + \theta_{\min}, 0 \leq \theta \leq \pi; \\ \varphi^* &= (\varphi_{\max} - \varphi_{\min})v + \varphi_{\min}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中: θ^*, φ^* 为所求的随机性结构面的空间产状指标; u, v 为 $(0, 1)$ 范围内的 Monte Carlo 随机数。

2.4 双正态密度分布

标准的双正态分布如式(5)所示,其中 μ_θ , μ_φ , σ_θ , σ_φ 分别为 θ , φ 的均值和标准差, ρ 为相关系数.

$$f(\theta,\varphi)=\frac{1}{2\pi\sigma_\theta\sigma_\varphi\sqrt{1-\rho^2}}\exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\left(\frac{\varphi-\mu_\theta}{\sigma_\theta}\right)^2-2\rho\frac{(\varphi-\mu_\varphi)(\varphi-\mu_\theta)}{\sigma_\varphi\sigma_\theta}+\left(\frac{\varphi-\mu_\varphi}{\sigma_\varphi}\right)^2\right]\right\},$$
$$0\leq\theta\leq\pi,0\leq\varphi\leq2\pi.$$

在本研究中,倾向和倾角 θ,φ 为两个相互独立的变量,因此取 $\rho=0$,双正态分布可以分解成为两个独立的正态函数,再对密度函数进行积分得式(6):

$$\left. \begin{aligned} F(\theta) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\theta} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu_\theta}{\sigma_\theta}\right)^2} dt; \\ F(\varphi) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\varphi} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu_\varphi}{\sigma_\varphi}\right)^2} dt. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据所求的密度分布函数,如式(6),代入通过确定性结构面分组得到的相关均值和标准差,可以建立双正态密度分布函数.再进行随机数模拟,可得到服从双正态密度分布的随机结构面.

2.5 Fisher 密度分布

Fisher 分布是一种非对称的分布形式,常用来模拟随机结构面函数的极点坐标. Fisher 分布可表达为两个相对独立的概率密度分布函数,见公式(7):

$$\left. \begin{aligned} F(\theta) &= \frac{e^\kappa - e^{-\kappa\cos\theta}}{e^\kappa - e^{-\kappa}}, 0\leq\theta\leq\pi; \\ F(\varphi) &= \frac{1}{2\pi}\varphi, 0\leq\varphi\leq2\pi. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

概率函数 $F(\varphi)$ 为标准的平均密度分布函数,另 $F(\theta)=u,F(\varphi)=v$,取反函数,解方程得

$$\left. \begin{aligned} \theta^* &= \arccos((\ln(e^\kappa - \mu(e^\kappa - e^{-\kappa}))/\kappa); \\ \varphi^* &= 2\pi v. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

公式(8)为基于 Fisher 密度分布的随机数反演方程^[3],就可以得到基于 Fisher 密度分布的随机数.

2.6 GeoSMA-3D 软件及相关模块开发

GeoSMA-3D 拥有 3D 边坡建模功能,并可以通过块体的可动性及力学特性,有效地找出岩质边坡临空面中包含的关键块体^[6-9].

本文在已有软件的基础上继续进行了相关开发,通过上述提到的三种不同的概率密度分布理论,添加了空间产状随机分布模块,用于对后续不同分布概率的随机结构面的计算.

3 工程应用

3.1 工程概况

小盘岭边坡在辽宁省建兴高速公路 K48 + 690 ~ K48 + 850 段,全长 160 m. 边坡开挖顶面到开挖路面的高度大概为 30.1 m,由于岩体强风化、较破碎,节理裂隙发育. 采用 ShapeMatrix 3D 系统^[5]对表面结构面进行搜索,图 2 显示为搜索出的不同组别 的结构面. 运用赤平投影的方法对这些结构面的极点空间产状进行投影后如图 3 所示,并计算出各组的主要参数(见表 1).

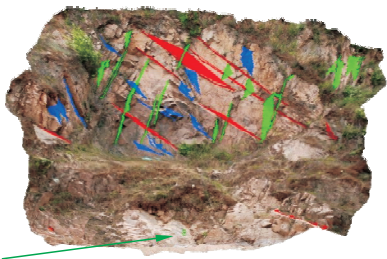


图 2 小盘岭边坡确定性结构面的搜索
Fig. 2 Search of the deterministic structural plane of the rock slope in Xiaopanling

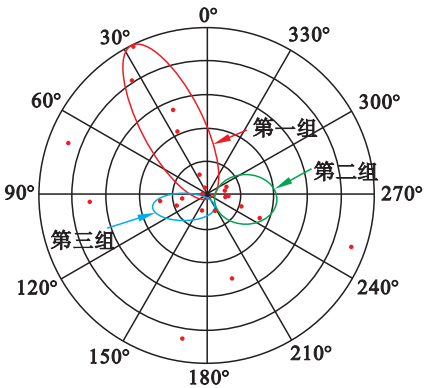


图 3 确定性结构面极点的赤平投影及结构面分组
Fig. 3 Stereographic projection of the deterministic structural planes and its distribution

3.2 基于不同概率密度分布的随机结构面模拟

在生成随机性结构面的过程当中,根据三种不同的随机概率密度分布函数,模拟出了三种不同的随机性结构面,见图 4.

如图 4a 中所示,由双平均密度模拟的结构面极点有明显的分布界限,且分布相对平均,适用于裂隙分布相对均匀 的分布情况. 图 4b 反映了双正态分布时,结构面极点的分布情况,该方法生成的结构面越靠近均值点,密度越大,离散性较好,可以模拟出有跳跃性的随机性结构面分布点. 图 4c 表现了在倾角 θ 为 Fisher 分布下的随机性结构面

极点分布,随着不同分组的随机参数 κ 的取值不同,生成的随机结构面极点的聚散程度也不相同,离散程度随着 κ 的变大而变小. 本文根据确定性结构面分组的聚散程度得到的 κ 值模拟出的基于 Fisher 密度分布的随机性结构面,适用于裂隙分布离散度相对较小的情况.

表 1 确定性结构面分组及相关参数
Table 1 Classification of the deterministic structural plane

组别	最大值		最小值		平均值		半径 r 半经 r m	方差		随机 参数 κ	结构面 数量
	倾向	倾角	倾向	倾角	倾向	倾角		倾向	倾角		
	$\varphi/(^{\circ})$	$\theta/(^{\circ})$	$\varphi/(^{\circ})$	$\theta/(^{\circ})$	$\varphi/(^{\circ})$	$\theta/(^{\circ})$		$\varphi/(^{\circ})$	$\theta/(^{\circ})$		
第一组	33.7	89.6	22.3	8.7	26.0	61.0	11.9	3.84	30.1	6	6
第二组	291.8	84.0	246.1	77.9	267.0	80.2	14.7	18.2	5.52	450	6
第三组	196.7	88.2	94.1	58.6	126.7	77.4	11.0	42.6	10.5	250	7

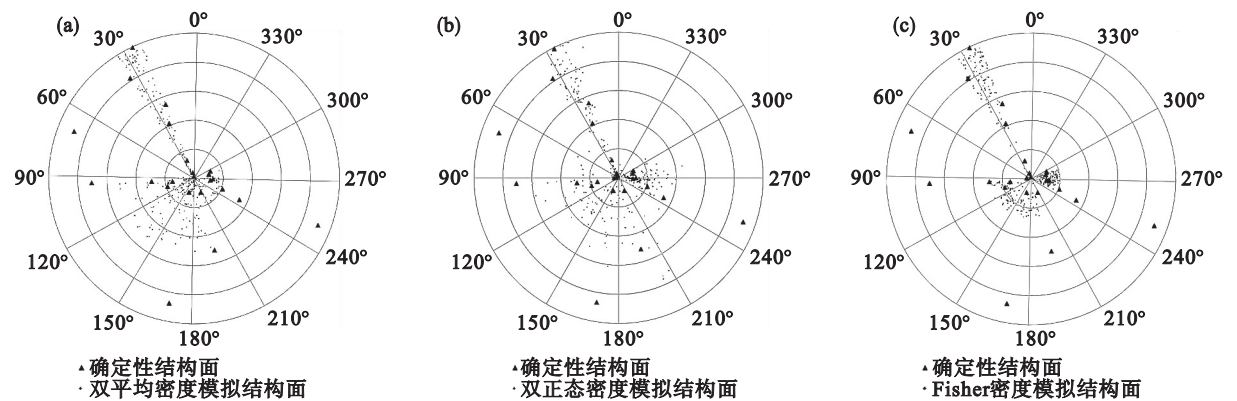


图 4 当模拟数量 $n=100$ 时的模拟结构面极点分布
Fig. 4 Pole distribution of the simulation structural planes when $n=100$
(a)—双平均密度模拟; (b)—双正态密度模拟; (c)—Fisher 密度模拟.

3.3 空间关键块体的搜索

根据上述三种不同的随机结构面生成方法,通过计算各结构面分组在整个研究范围内的迹线密度及结构面中心点的体密度,确定各分组结构面模拟的数量,生成相应数量且满足相应分组的随机性结构面,并且与确定性结构面数据一起导入到三维块体搜索系统 GeoSMA - 3D 中,可得到搜索的关键块体形态及相关信息,如图 5 所示.

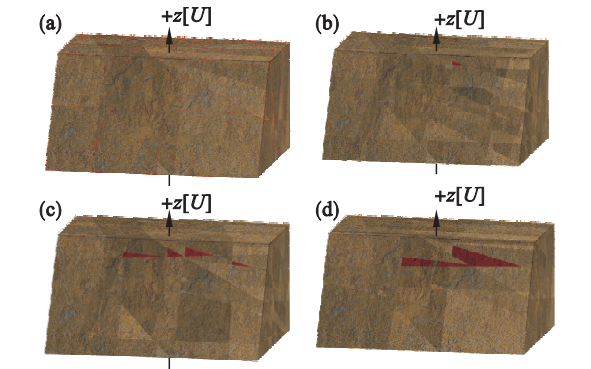


图 5 不同概率密度分布模拟下关键块体的搜索
Fig. 5 Identification of the key block under different density distribution simulation
(a)—仅确定性结构面结果; (b)—双正态随机模拟结果;
(c)—双平均随机模拟结果; (d)—Fisher 随机模拟结果.

从搜索的块体情况可以看出,随机性结构面的存在可以有效地搜索相应的关键块体. 在本工程中,虽然生成的关键块体体积不相同,但是关键块体出现的位置却是相同的,说明了随机性结构面在搜索关键块体时的有效性和实用性.

3.4 结构面的离散性评价

在关键块体的搜索中引入随机性结构面常常会导致在实际块体搜索时,由于使用了不同的随机分布准则,即使基于同样的确定性结构面参数,也会使搜索块体体积有所不同. 因此为了寻找不同准则之间的内在联系,本文运用统计学相关原理,提出了结构面离散性评价指标参数 E , 见式(9).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}, E = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_{ij}^2} \right)^2}.$$

(9)

其中: X 为第 j 种参数的第 i 组的随机性结构面样本值; N 为第 j 种随机参数的第 i 组中的随机性结构面的样本个数; m 为总组数; n 为随机参数个数.

由于节理的倾向和倾角是相互独立的两个参数,所以运用独立的结构面离散性评价指标的绝

对距离来评价总体离散程度,见图 6. 从图 6 可以看出,数据的离散程度对于生成块体的体积有显著的影响. 在临界范围内,随机性结构面样本的离散程度越小,相应生成的块体体积越大.

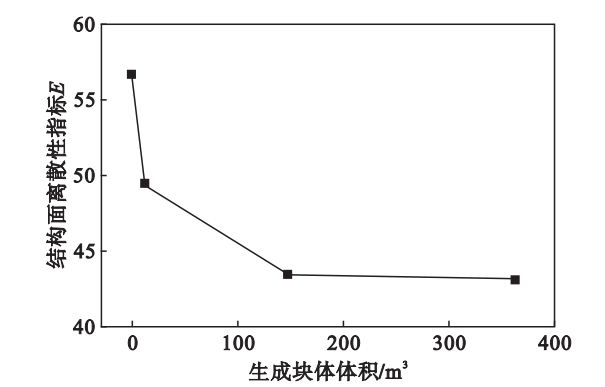


图 6 结构面离散性指标 E 与生成块体体积的关系曲线

Fig. 6 Curve of the discreteness index and block volume

4 结 论

- 1) 本文改进了随机性结构面的生成方法,采用了基于不同分组及数值反演的方法,并通过对三种不同的随机性结构面生成方法的比对研究,实现了在不同分组情况下不同离散程度、不同密度分布函数的随机性结构面的模拟. 通过实例证明了随机性结构面的存在对于关键块体的搜索有重要作用.
- 2) 提出了结构面离散性指标的概念,显示出随机结构面分布的离散度对于搜索出的关键块体的体积有显著影响,并且在一定范围内,随着离散度的减小,生成关键块体的体积会增大.

参考文献:

[1] Shi G H, Goodman R E. Two dimensional discontinuous deformation analysis[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1985, 9(1): 541 – 556.

[2] Goodman R E, Shi G H. Block theory and its application to rock engineering [M]. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1985.

[3] 于青春, 薛果夫, 陈德基. 裂隙岩体一般块体理论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 66 – 80.
(Yu Qing-chun, Xue Guo-fu, Chen De-ji. General block theory for fractured rock mass [M]. Beijing: China Water Power Press, 2007: 66 – 80.)

[4] 王述红, 杨勇, 王洋, 等. 基于数字摄影测量的开挖空间模型及不稳块体的快速识别[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29 (sup1): 3432 – 3438.
(Wang Shu-hong, Yang Yong, Wang Yang, et al. Spatial modeling and quick identification of unstable rock blocks based on digital photogrammetry[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29 (sup 1): 3432 – 3438.)

[5] 郭牡丹, 朱浮声, 王述红, 等. 基于结构面特征的优势划分方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(2): 295 – 298.
(Guo Mu-dan, Zhu Fu-sheng, Wang Shu-hong, et al. Partitioning method of dominant group based on characteristic of structural plane [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(3): 295 – 298.)

[6] Wang S H, Huang R Q, Ni P P, et al. Fracture behavior of intact rock using acoustic emission: experimental observation and realistic modeling [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2013, 36(6): 903 – 914.

[7] Wang S H, Ni P P, Guo M D. Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38(1): 357 – 367.

[8] Wang S H, Ni P P. Application of block theory modeling on spatial block topological identification to rock slope stability analysis[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2014, 11(1): 1 – 24.

[9] Wang S H, Liu J X, Tang C A, et al. Stability analysis of a large span and deep tunnel[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2004, 41(sup1): 870 – 875.