

基于分形几何理论的 DFN 模型构建方法研究

刘 波^{1,2}, 金爱兵^{1,2}, 高永涛^{1,2}, 肖 术^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 以重庆梁-忠(梁平县-忠县)高速公路路让隧道为工程研究背景,通过测线法调查现场节理,获得了节理产状分布概率密度函数,并从分形几何学的角度分析了节理间距及迹长的分形分布规律,推导出能反映节理间距及迹长分布状态的分形维数 D 及分形分布概率密度函数。在该基础上采用 Matlab 软件以及 Monte-Carlo 随机分析方法,产生节理参数随机数,结合 3DEC 中最新模块离散裂隙网络(DFN)技术,建立了能反映节理裂隙分布特征的离散裂隙网络模型并验证了模型的有效性,结果表明,分形分布比负指数分布包含更多的间距、迹长分布信息,更接近于实际分布;分形维数 D 反映了节理间距、迹长在其变化范围内的分布特征,分形维数的大小取决于小间距、小迹长部分数量在总节理数量中的比例,为节理裂隙岩体网络模型构建提供了一种新方法。

关 键 词: 节理裂隙岩体; 节理间距; 节理迹长; 分形分布概率模型; 离散裂隙网络 (DFN) 模型

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 增 1 - 0625 - 07

Construction method research on DFN model based on fractal geometry theory

LIU Bo^{1,2}, JIN Ai-bing^{1,2}, GAO Yong-tao^{1,2}, XIAO Shu^{1,2}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking Lirang tunnel of Liang-Zhong Expressway in Chongqing city as an engineering background, based on the field joint investigation by scan line, the distribution density function of joint production is obtained; and the fractal distribution law of joint spacing and trace length is analyzed from the viewpoint of fractal geometry. In addition, the fractal dimension D from the distribution of joint spacing and trace length and fractal distribution probability density function can be derived. Based on these work, Monte Carlo stochastic simulation theory and Matlab software are adopted to obtain simulated joints data. Finally, a discrete fracture network (DFN) model which could reflect the distribution characteristics of the joints is established. The results of the study show that: the fractal distribution contain more information about the joint spacing and the trace length distribution than other distributions; and it is more close to the actual distribution. Fractal dimension D reflected the distribution of joint spacing and trace length in its variation range, and the fractal dimension D is determined depending on the ratio of the number of small spacing, the number of small trace length to the total number of joints. This study results provides a new method for the construction of the network model of jointed rock mass.

Keywords: jointed fractured rock mass; joint spacing; joint trace length; fractal distribution probability model; discrete fracture network (DFN) model

1 引 言

岩体是具有一定的结构特征、赋存于一定的地质环境中、由岩石和结构面所组成的地质体,结构面的存在导致了岩体整体力学性质的显著弱化和强

烈的各向异性与非均匀性^[1-2],研究岩体的节理裂隙的特征及分布规律,构建与现场围岩实际节理裂隙分布特征具有统计相似特征的节理网络模型,是进行节理裂隙岩体工程力学行为计算与分析研究的基础。

收稿日期: 2015-08-24

基金项目: 中央直属高校基本科研业务费 (No. FRF-SD-12-002A); 科技北京百名领军人才培养工程 (No. Z151100000315014)

This work was supported by the Basic Scientific Research Service Fee of the Universities Directly under the Central Government (FRF-SD-12-002A) and Beijing Science and Technology Leader Talent Training Project (Z151100000315014).

第一作者简介: 刘波,男,1986年生,博士研究生,主要从事岩石力学及数值计算等方面的工作。E-mail: libotongxue@126.com

通讯作者: 金爱兵,男,1974年生,博士,副教授,主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jinaibing@vip.sina.com

针对节理裂隙三维网络模型的研究已经取得大量的成就^[3-4],实现了用统计学方法对节理裂隙岩体参数进行定量化描述和分析,建立了能反映节理分布状态的分布概率模型,并假定节理面为等概率出现的光滑平直的薄圆盘,运用随机模拟的方法,构建节理裂隙三维网络模型。

岩体的节理裂隙分布具有随机性,其特征参数主要包括倾角、倾向、节理间距、节理迹长等。Priest等^[5]首次提出结构面不连续间距负指数分布概率函数模型,其他学者^[6-8]相继使用负指数分布概率函数对现场结构面进行了描述,同时,一些研究者^[9-10]发现和证实了现场节理间距满足正态分布。Priest等^[5]还研究出节理迹长的分布形式为对数正态分布或负指数分布。吴顺川等^[3]对白云鄂博铁矿东矿进行节理调查分析,得出节理间距、迹长均服从负指数函数分布。Call等^[11]对多地区、不同裂隙岩体进行间距、迹长的分布规律研究,得出间距多服从负指数分布、迹长多服从正态分布的结论。

上述统计方法用节理频数作为负指数分布和正态分布参数描述节理间距、迹长分布特征,能在一定程度上反映节理间距、迹长的分布情况,但忽视了不同间距值、迹长值节理数的关系,不能全面地描述节理间距、迹长分布总体特征。针对此问题,本文采用分形理论在节理裂隙岩体结构面间距、迹长分布规律方面展开研究。分形几何^[12]是由法国著名的数学家 Delbrot 在 1975 年首次提出,描述他所研究的那些不规则、破碎不堪、不光滑、不可微的东西。

本文以重庆梁-忠高速公路礼让隧道为工程背景,运用分形理论对节理间距、迹长进行描述,建立了能反映节理间距、迹长分布状态的分形分布概率模型,在此基础上采用 Matlab 软件以及 Monte-

Carlo 随机分析方法,获得节理参数模拟数据,并结合离散裂隙网络(DFN)技术,建立了能反映节理裂隙分布特征的节理岩体模型,为后续进行节理裂隙岩体力学行为计算与分析奠定基础。

2 节理参数分形概率模型构建

选取隧道节理裂隙发育段为采样区域,针对现场实际情况共布置 3 条测线,获得 220 条节理的测量数据,采用系统聚类法将节理样本划分为 A~C 共 3 个优势组,其中 A 组 79 条, B 组 73 条, C 组 55 条节理,平均优势产状分别为 192.87° 70.99°、82.49° 64.61°、302.53° 56.72°。利用@Risk 软件^[13]对 3 组优势节理组的产状进行概率分布统计,得到其最佳概率分布模型,见表 1。另外,采用分形理论对该 3 组优势节理组的节理间距、迹长进行分析与描述。

表 1 节理产状估计
Table 1 Joint production estimation

产状	组号	概率模型	均值 /(°)	标准差 /(°)	韦伯分布	
					几何参数	形状参数
倾向	A	正态分布	192.87	36.64		
	B	韦伯分布	82.49	24.17	2.95	73.43
	C	正态分布	302.53	27.41		
倾角	A	韦伯分布	70.99	12.67	51.45	521.18
	B	正态分布	64.61	12.19		
	C	正态分布	56.72	9.74		

2.1 节理间距与迹长的分形特征分析

表 2 为节理间距、半迹长数据统计。将表中数据按横坐标为节理间距、半迹长的自然对数,纵坐标分别为相应节理数的自然对数,绘制散点图,并对散点图进行线性拟合,如图 1 所示。

按照分形定义知,拟合直线斜率即为节理间

表 2 节理间距、半迹长统计数据
Table 2 Joint spacing statistics

A 组				B 组				C 组			
间距	节理数	半迹长	节理数	间距	节理数	半迹长	节理数	间距	节理数	半迹长	节理数
(x)/cm	N(x)	(l)/m	N(l)	(x)/cm	N(x)	(l)/m	N(l)	(x)/cm	N(x)	(l)/m	N(l)
20	47	1.0	67	20	58	1.0	63	20	21	1.0	34
30	35	1.5	50	30	51	1.5	55	30	18	1.5	29
40	22	2.0	35	40	32	2.0	40	40	15	2.0	23
50	15	2.5	26	50	26	2.5	19	50	9	2.5	21
60	14	3.0	22	60	22	3.0	15	60	7	3.0	19
70	10	3.5	15	70	17	3.5	10	70	6	3.5	14
80	8	4.0	12	80	13	4.0	7	80	6	4.0	10
90	7	4.5	10	90	7	4.5	5	90	4	4.5	9
100	6	5.0	7	100	6	5.0	4	100	3	5.0	6

距、半迹长分形维数 D ，且有

$$\ln N(\delta) = -D \ln \delta + E \quad (1)$$

式中： $N(\delta)$ 为节理数目； E 为常数项。

可推导出节理数 $N(x)$ 与节理间距 x 、半迹长 l 的关系式分别为

$$N(x) = n_1 x^{-D_1} \quad (2)$$

式中： $n_1 = e^{E_1}$ ； $n_2 = e^{E_2}$ ； E_1 、 E_2 分别为图 1 中节理间距、半迹长拟合公式中的常数项； D_1 、 D_2 分别

为节理间距、半迹长的分形维数。

从图 1 中可以看出，所调查区域的节理数的对数与节理间距、半迹长的对数之间存在较强的线性关系，近似成一条直线，拟合的优度也较高，说明节理间距、半迹长在一定的范围内具有统计自相似性特征，可用分形几何理论对节理间距、半迹长进行描述。结合表 2 及图 1 可以看出，分形维数的大小跟小间距、小迹长数量在总节理数量中的比例有关系，当小间距、小迹长部分数量在总节理数量中比例大时，分形维数高，反之，分形维数低。

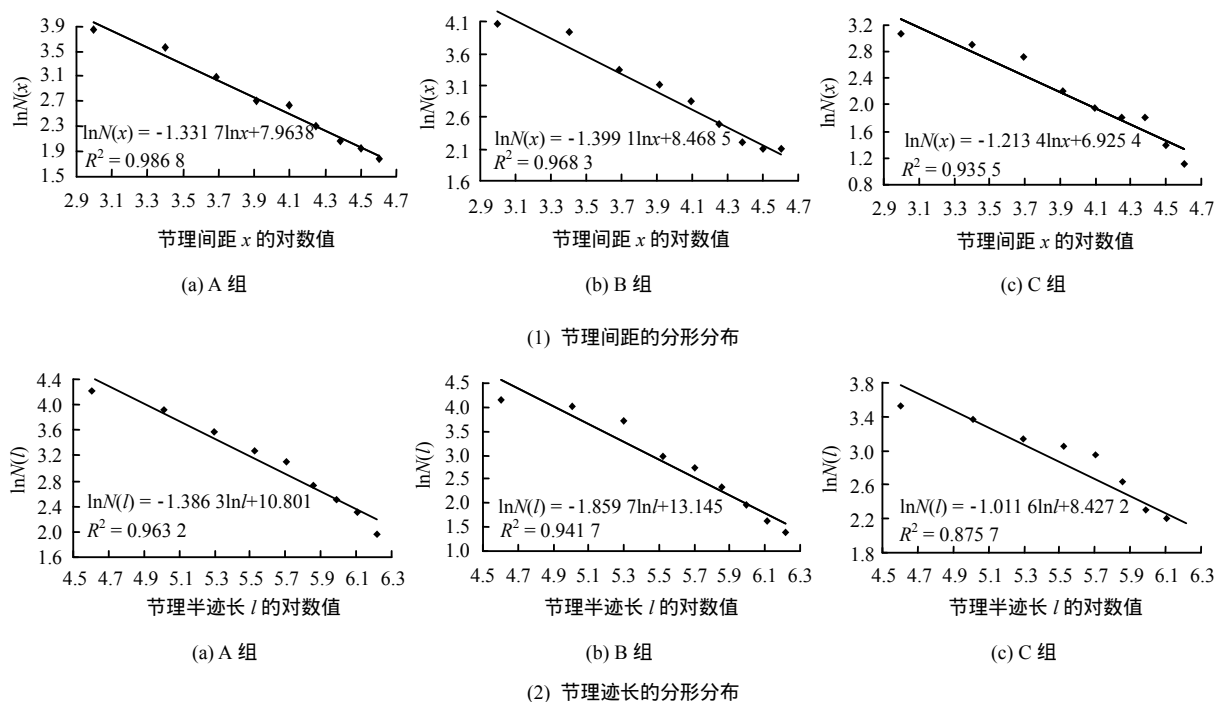


图 1 节理间距和迹长的分形分布

Fig.1 Fractal distribution of joint spacing and joint trace length

2.2 基于分形理论的节理间距与半迹长概率模型

节理间距累计数量与间距大小分布服从如下关系：

$$N(x) = n_1 x^{-D_1} \quad (3)$$

对其取微分可得到 x 到 $x+dx$ 区间里节理数目：

$$-dN = D_1 n_1 x^{-(D_1+1)} dx \quad (4)$$

式中： $dx > 0$ ， $-dN > 0$ ；“-”表示节理间距数目随其大小的增加而减小。

节理间距的总数为

$$N_t = n_1 x_{\min}^{-D_1} \quad (5)$$

式 (4) 除以式 (5) 可得

$$\frac{-dN}{N} = D_1 x^{-(D_1+1)} x_{\min}^{D_1} dx = f(x) dx \quad (6)$$

则分形分布的概率密度函数为

$$f(x) = D_1 x^{-(D_1+1)} x_{\min}^{D_1} \quad (7)$$

根据概率密度理论有

$$\left. \begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx &= 1 - (x_{\min}/x_{\max})^{D_1} = 1 \\ (x_{\min}/x_{\max})^{D_1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式 (8) 可以看成研究对象能否用分形理论方法处理的一个判据。

通过式 (7)，利用分形维数和最小节理间距两个参数能建立起全面描述节理间距分布状态的分形模型。同样，对于节理半迹长可获得一样的概率密度分布函数：

$$f(l) = D_2 l^{-(D_2+1)} l_{\min}^{D_2} \quad (9)$$

利用表 2 中数据进行回归分析可得 x_{\min} 、 l_{\min} ，再利用图 1 中拟合公式，可得到 D_1 、 D_2 值，从而可得到节理间距及半迹长的概率密度函数，见表 3。

表 3 分形分布概率函数

Table 3 Probability distribution function of fractal distribution

节理	组号	概率密度函数
间距	A	$f(x) = 46.31x^{-2.33}$
	B	$f(x) = 93.13x^{-2.41}$
	C	$f(x) = 25.91x^{-2.21}$
半迹长	A	$f(l) = 763.58l^{-2.38}$
	B	$f(l) = 10\,481.36l^{-2.86}$
	C	$f(l) = 78.34l^{-2.01}$

本文假定节理面为等概率出现的光滑平直的薄圆盘，而半迹长平均值即是圆盘平均弦长的 $1/2^{[14]}$ ，即

$$l = \frac{1}{r} \int_0^r \sqrt{r^2 - x^2} dx = \frac{\pi}{4} r \quad (10)$$

式中： r 为节理圆盘的半径。

由式 (10) 可知节理半迹长与半径的关系，同时又知道半迹长的概率密度函数（见式 (9)），则运用随机变量函数的分布定理可知节理圆盘半径 r 服从的概率密度函数 $f_r(r)$ 为

$$f_r(r) = \frac{\pi}{4} f\left(\frac{\pi}{4} r\right) \quad (11)$$

式中： $f(l)$ 为半迹长概率密度分布函数。

本文中 A ~ C 三组节理半径近似服从分形分布，把式 (9) 代入式 (11) 可得节理半径概率密度函数：

$$f_r(r) = \frac{\pi}{4} D_2 \left(\frac{\pi}{4} r\right)^{-(D_2+1)} l_{\min}^{D_2} \quad (12)$$

2.3 分形分布与负指数分布模型的比较

负指数分布、正态分布概率密度函数等均以节理频数作为参数描述节理间距、迹长分布特征，与分形分布以分形维数和最小值来描述节理间距、迹长不一样。现以负指数分布概率密度函数为例与分形分布概率密度函数进行对比分析，在有限长度内节理间距的负指数概率密度函数为

$$y(< x) = \frac{-\lambda e^{-\lambda x}}{1 - e^{-\lambda L}} \quad (13)$$

式中： L 为测线长度； λ 为节理线密度。对式 (13) 进一步变换可得到节理间距大于 x 的比率为

$$y(> x) = \frac{e^{-\lambda x} - \lambda e^{-\lambda L}}{1 - e^{-\lambda L}} \quad (14)$$

同理，可得到半迹长大于 l 的比率公式为

$$y(> l) = \frac{e^{-\lambda l} - \lambda e^{-\lambda L}}{1 - e^{-\lambda L}} \quad (15)$$

为比较分形模型与负指数模型的优越性，现引进均方误差 MSE ：

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (16)$$

式中： n 为样品数量； \hat{y}_i 为真实值； \hat{y}_i 为分形模型或负指数模型预测值，均方误差值大小见表 4。从表中可以看出，节理间距、半迹长负指数分布的均方误差值大于分形分布的均方误差，从定量分析上说明节理间距、半迹长的分形分布更能反映节理的实际分布情况。

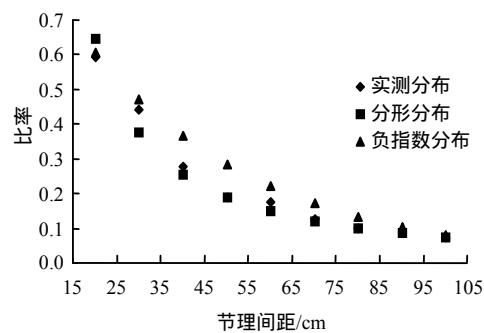
表 4 分形分布与负指数分布均方误差比较

Table 4 Comparison of mean square error between fractal distribution and negative exponential distribution

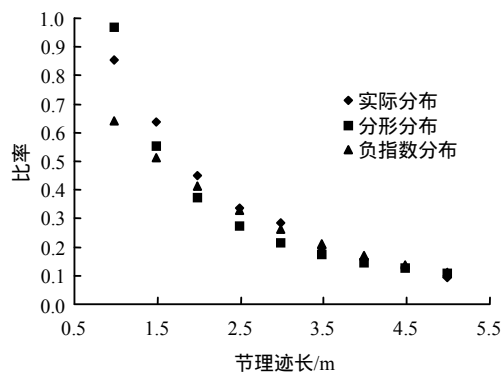
节理	组号	均方误差	
		分形分布	负指数分布
间距	A	0.000 9	0.003 0
	B	0.006 2	0.010 0
	C	0.000 4	0.002 2
半迹长	A	0.002 6	0.0112
	B	0.005 4	0.015 3
	C	0.000 6	0.002 7

为了分析上述两种分布均方误差不一样的原因，现以 A 组优势节理组数据为例，进行节理间距、半迹长分形分布与实测数据分布及负指数分布对比分析，如图 2 所示。由图 2(a)可知，节理间距实测数据曲线与分形分布曲线非常接近，而与负指数分布曲线在节理间距中间值部分相差较大（纵轴的比率为节理间距值大于某一固定值的数量占节理总数的百分比）。由图 2(b)可知，节理半迹长实际分布曲线与分形分布曲线非常接近，而与负指数分布曲线在节理半迹长值较小时相差较大，说明用分形分布概率密度函数能更准确地描述节理间距、节理迹长的分布特征，负指数分布概率密度函数虽能在一定程度上反映节理间距、半迹长的分布情况，但却忽视了不同间距值、半迹长值节理数的关系，不能全面描述节理间距、半迹长分布总体特征（纵轴比率为节理迹长值大于某一固定值的数量占节理总数的百分比）。究其原因，可以从分形分布模型的 2 个参

数分形维数及最小间距或最小半迹长入手进行分析。分形维数反映了节理间距或半迹长在其变化范围内的分布特征,当 2 组节理平均间距或平均半迹长相等时,负指数分布中节理线密度无法反映这两组节理分布的差异,而分形分布模型分形维数能较好地具体比较某一范围内的节理间距或半迹长比率,从而达到说明其分布各自不同的特征,同时,分形分布模型中最小间距或最小半迹长的引入避免了小间距或小迹长部分的比率过小的误差。



(a) 节理间距的分布曲线对比



(b) 节理半迹长的分布曲线

图 2 节理间距和半迹长的分布曲线对比

Fig.2 Distribution curves comparison of joint spacing and joint half trace length

3 离散裂隙网络模型构建及验证

3.1 离散裂隙网络模型的实现

以节理裂隙岩体隧道为研究对象,设定一个空间大小为 $30 \times 30 \times 30$ 三维模型,其中正方体形心处为坐标轴原点,地理东为 X 轴,地理北为 Y 轴,模型高度方向为 Z 轴。节理裂隙岩体三维网络模型只在正方体内生成,位于正方体外的节理被盒子边界截掉删除。

根据伍法权^[14]的研究,可以推求出在该空间内模拟生成的各组节理体密度及其圆盘数量,见表 5。

表 5 节理体密度和圆盘模拟数量
Table 5 Bulk density of joint and simulation quantity of joint disc

组号	体密度/(个/立方米)	节理圆盘数量/个
A	0.007 960 6	215
B	0.011 368 0	306
C	0.019 208 4	519

依据 3DEC 数值模拟软件中的最新模块离散裂隙网络 (DFN) 技术^[15],离散裂隙网络模型中的参数如节理大小、产状分布等将通过 bootstrapped 分布导入数据文件来实现,节理圆盘直径、产状数据根据节理概率分布函数及蒙特卡罗随机机制论并采用 Matlab 软件编程产生,节理圆盘中心位置服从均匀分布概率密度函数,最后可生成基于节理间距、迹长分形分布模型的节理岩体三维离散裂隙网络模型。离散裂隙网络模型构建步骤和所建立的模型如图 3、4 所示。

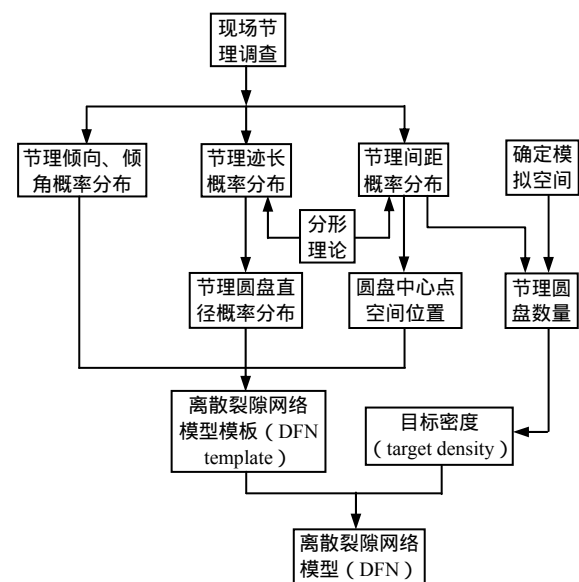


图 3 离散裂隙网络模型构建流程

Fig.3 Discrete fracture network model construction process

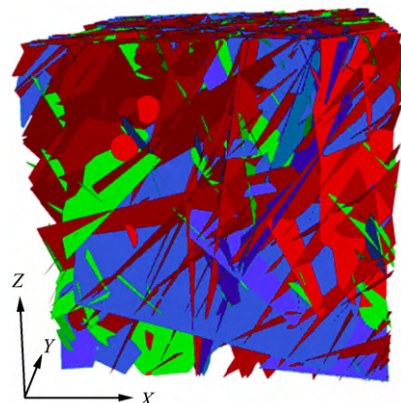


图 4 离散裂隙网络模型

Fig.4 Discrete fracture network model

3.2 离散裂隙网络模型的验证

对所生成的三维节理岩体网络模型(见图4)沿测线截取竖直方向剖面图(见图5),沿Z轴方向均匀布置3条测线,测量节理沿每条测线的线密度与平均迹长值,再对3条测线的数据求平均值后与实测测线的线密度与平均迹长值进行对比,结果见表6。

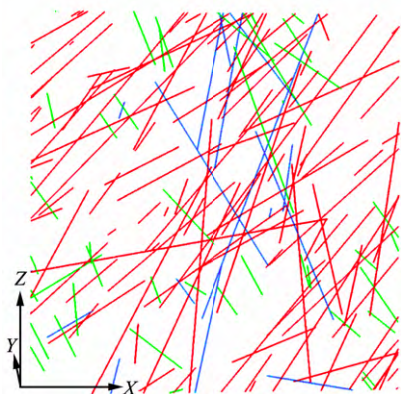


图5 离散裂隙网络模型沿测线方向数值剖面图

Fig.5 Numerical profile diagram of the discrete fracture network model along the direction of the line

表6 基于实测数据的结构面网络模型验证

Table 6 Verification results of structural plane network model based on field data

节理线密度实测值/(条/米)	节理线密度模拟值(条/米)	节理平均迹长实测值/m	节理平均迹长模拟值/m
0.95	0.87	4.80	4.68

通过对沿测线走向的二维剖面上结构面的线密度和平均迹长与现场实测数据进行对比,说明了所建立的三维结构面网络模型与实测数据比较吻合,验证了模型的有效性。

4 结 论

(1) 节理间距、迹长具有较好的自相似特征,可用分形几何理论较好地进行描述,并推导出节理间距、迹长分形分布的概率密度函数,通过比较分形分布概率曲线与负指数分布概率曲线得出,分形分布比负指数分布包含更多的间距、迹长分布信息,更接近于实际分布。

(2) 节理间距、迹长分形维数 D 反映了节理间距、迹长在其变化范围内的分布特征,分形维数的大小跟小间距、小迹长数量在总节理数量中的比例有关系,当小间距、小迹长部分数量在总节理数量中比例大时,分形维数高,反之,分形维数低。

通过现场实测数据与所建节理裂隙模型沿测线走向的二维剖面上结构面的线密度和平均迹长数

据对比,验证了节理裂隙网络模型的有效性,也进一步证明了本文所提出的节理间距、迹长分形分布模型在现场应用的有效性,本研究为节理裂隙岩体网络模型构建提供了一种新方法。

参 考 文 献

- [1] 鲁海峰,姚多喜. 采动底板层状岩体应力分布规律及破坏深度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2030 - 2039.
LU Hai-feng, YAO Duo-xi. Stress distribution and failure depths of layered jointed rock mass of mining floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2030 - 2039.
- [2] 金爱兵,李兵,邓富根. 断续节理对岩体力学性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(12): 1359 - 1363.
JIN Ai-bin, LI Bin, DENG Fu-gen. Effect of intermittent joints on the mechanical properties of rock mass[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(12): 1359 - 1363.
- [3] 吴顺川,周喻,高永涛,等. 等效岩体随机节理三维网络模型构建方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 3082 - 3090.
WU Shun-chuan, ZHOU Yu, GAO Yong-tao, et al. Research on construction method of stochastic joints 3D-network model of equivalent rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.1): 3082 - 3093.
- [4] 李新强,杨松青,汪小刚. 岩体随机结构面三维网络的生成和可视化技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2564 - 2569.
LI Xin-qiang, YANG Song-qing, WANG Xiao-gang. Generation and visualization technologies of three-dimensional network of rock mass stochastic structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2564 - 2569.
- [5] PRIEST S D, HUDSON J A. Discontinuity spacings in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1976, 13(5):135 - 148.
- [6] GILLESPIE P A, WALSH J J, WATTERSON J, et al. Scaling relationships of joint and vein arrays from The Burren, Co. Clare, Ireland[J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23(2): 183 - 201.

- [14] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- FANG Kai-tai. Homogeneous design and homogeneous design tables[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [15] 杨淑莹. 模糊识别与智能计算——Matlab 技术实现(第2版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- YANG Shu-ying. Fuzzy recognition and intelligent computing —— by Matlab(2nd edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [16] 史峰, 王小川, 郁磊, 等. Matlab 神经网络 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- SHI Feng, WANG Xiao-chuan, YU Lei, et al. 30 Case studies of Matlab neural network[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010.
- [17] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- YAND Lin-de. Inverse theory and engineering practice of geotechnical engineering problems[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [18] 黄秋香, 邓建辉, 苏鹏云, 等. 瀑布沟水电站地下厂房洞室群施工期围岩位移特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 3032 - 3042.
- HUANG Qiu-xiang, DENG Jian-hui, SU Peng-yun, et al. Analysis of surrounding rock displacement character during construction in Pubugou hydropower station underground powerhouse chambers[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.1): 3032 - 3042.
- [19] 高春玉, 邓建辉, 魏进兵. 官地地下厂房洞室群施工期围岩位移特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3911 - 3919.
- GAO Chun-yu, DENG Jian-hui, WEI Jin-bing. Analysis of surrounding rock displacement characteristics during construction in Guandi underground powerhouse chambers[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.2): 3911 - 3919.
- [20] 魏进兵, 邓建辉, 王倬凯, 等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩变形与破坏特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1198 - 1205.
- WEI Jin-bing, DENG Jian-hui, WANG Di-kai, et al. Characterization of deformation and fracture for rock mass in underground powerhouse of Jinping I Hydropower Station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(6): 1198 - 1205.
- 上接第 630 页
- [7] YE J, ZHANG Y, SUN J, et al. Correction of the probabilistic density function of discontinuities spacing considering the statistical error based on negative exponential distribution[J]. **Journal of Structural Geology**, 2012, 40: 17 - 28.
- [8] 胡秀宏, 伍法权. 岩体结构面间距的双参数负指数分布研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2353 - 2358.
- HU Xiu-hong, WU Fa-quan. Research on two-parameter negative exponential distribution of discontinuity spacings in rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2353 - 2358.
- [9] RUF J C, RUST K A, ENGELDER T. Investigating the effect of mechanical discontinuities on joint spacing[J]. **Tectonophysics**, 1998, 295(1): 245 - 257.
- [10] ODonne F, LÉZIN C, MASSONNAT G, et al. The relationship between joint aperture, spacing distribution, vertical dimension and carbonate stratification: An example from the Kimmeridgian limestones of Pointe-du-Chay(France)[J]. **Journal of Structural Geology**, 2007, 29(5): 746 - 758.
- [11] SARI M. The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(3): 613 - 626.
- [12] YANG Y, CHENG Y M. A fractal model of contact force distribution and the unified coordination distribution for crushable granular materials under confined compression[J]. **Powder Technology**, 2015, 3(6): 1 - 9.
- [13] 李红英, 谭跃虎, 赵辉. 某滑坡体岩土参数概率分布统计分析方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 659 - 665.
- LI Hong-ying, TAN Yue-hu, ZHAO Hui. The statistical analysis technique research on probability distribution of geotechnical parameters of one landslide[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2012, 8(3): 659 - 665.
- [14] 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
- WU Fa-quan. Principles of statistical mechanics of rock masses[M]. Wuhan: China Geology University Press, 1993.
- [15] Itasca Consulting Group. 3DEC (3 dimensional distinct element code) theory and background[M]. Itasca: Itasca Consulting Group, 2007.