

岩体裂隙网络随机生成及连通性研究

王晋丽^{1,2,3}, 陈 喜^{1,2}, 黄远洋^{1,2}, 张志才^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 江苏师范大学测绘学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 基于裂隙几何参数分布的统计特性, 应用 Monte Carlo 模拟技术生成二维裂隙网络。利用无向图方法实现裂隙网络连通图的绘制, 并比较了走向服从均匀分布和正态分布的裂隙连通概率。在此基础上, 对 Balberg 等人提出的渗流临界裂隙数 (即主干裂隙数) 和临界裂隙长度估算方法进行了验证。结果表明, 无向图方法可以方便、快捷地实现裂隙网络连通图的绘制; 同等条件下走向服从均匀分布比走向服从正态分布的裂隙连通概率大 20% 左右; 当裂隙连通概率大于 90%, Balberg 等人提出的渗流的临界裂隙数和临界裂隙长度估计值与实际参数值吻合较好, 研究成果为裂隙地下水渗流计算提供了分析方法。

关键词: 岩体; Monte Carlo 方法; 裂隙网络; 连通性; 地下水渗流

中图分类号: P641; TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2013)02-0030-06

岩体在其形成后的漫长地质年代里, 由于构造运动、卸荷作用、风化作用等的影响, 孕育了大量的断层、裂隙、节理。裂隙的特征包括裂隙方向、长度、渗透性以及裂隙的密度和连通性, 在这样的地质体里, 裂隙特征决定了气、液的运移特征。

岩体中除了一些位置产状确定的较大规模断层外, 更多的是数量众多、位置产状难以确定的小规模裂隙, 仅靠野外露头调查是不可能一一查明的, 大多数裂隙深埋于岩体内部无法直接测量, 而且裂隙的分布非常复杂, 其几何、物理参数存在空间上的不确定性和随机性, 因此在有限的地质测量基础上, 分析其密度、间距、产状、迹长和隙宽等参数的统计分布规律, 运用 Monte Carlo 模拟技术生成与实际岩体裂隙同分布的随机裂隙网络, 是一种高效可行的方法。

20 世纪 50 年代以来, 国内外许多学者对裂隙分布参数的概率分布作了研究, 如 Fisher^[1], Bingham 和 Shanley^[2]在裂隙产状方面提出 Fisher 分布和 Bingham 分布; Maher、Zanbak^[3]等用双变量正态分布来描述裂隙的产状; Priest 和 Hudson^[4]对裂隙迹长、密度等参数的分布特征方面进行了研究。随后, 一些研究者将

Monte-Carlo 方法应用于地质体裂隙网络模拟, 近 20 年来, 裂隙网络随机模拟技术得到了很快发展, 并日趋成熟^[5~6]。

随机生成的裂隙网络中只有那些相互连通的裂隙对气、液渗流才有意义, 国外专家学者^[7~9]对裂隙连通性研究较多, 国内研究较少。

本文基于裂隙空间形态及分布的统计特性, 采用 Monte Carlo 模拟技术^[10]和 Matlab 程序^[11]生成二维裂隙网络。本文从图论无向图^[12~13]的理论出发, 得到一个对称的 0~1 方阵, 利用该方阵分析裂隙网络的连通性, 本文方法与 Robinson 连通性方法不同之处在于, 不需要对研究区域进行网络剖分, 并且能把所有的连通簇找出, 而不是只找到一个连通簇就停止; 本文最后对不同统计分布和裂隙密度的 Balberg 的渗流临界值进行了验证。

1 裂隙网络随机生成方法

1.1 裂隙参数及统计特征

岩体裂隙的几何参数一般都具有统计规律, 服从某一种或几种类型的概率分布。各类裂隙参数的描述方法^[14]如下:

(1) 位置: 裂隙的位置用裂隙中心点或裂隙迹线中心点的坐标来表示, 服从研究域内的均匀分布, 裂隙条数依据其密度服从 Poisson 随机过程。

(2) 形状: 裂隙的形状一般描述为固定不变。

(3) 尺寸: 裂隙尺寸和迹线长度呈随机分布, 通常

收稿日期: 2012-03-20; 修订日期: 2012-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40930635, 41101018, 41001011) 资助

作者简介: 王晋丽 (1970-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事地下水数值模拟研究。

E-mail: wang_jinli70@163.com

符合负指数分布或对数正态分布。

(4) 产状: 裂隙面的空间产状通常用两个变量——倾向(或走向)和倾角来定义。裂隙的产状可以用概率分布来描述, 常用的概率分布有 Bingham 分布、Fish 分布、均匀分布、双变量正态分布等。

(5) 开度: 通常不直接使用裂隙开度, 而是对每一条裂隙指定一个常数导水系数, 并假定导水系数服从对数正态分布。

对于二维裂隙网络, 裂隙参数通常为迹线中心点坐标、迹线长、走向坐标; 对于三维裂隙网络, 裂隙参数为迹线中心点坐标、迹线长、走向坐标、倾角坐标。

1.2 裂隙网络随机生成的概率函数

按照概率密度函数的可积性, 随机变量的计算机生成方法分为两类: 对于密度函数为可积函数的随机变量可采用反函数法; 对于不可积的则采用近似法。下面将简要介绍本文用到的概率模型随机变量的计算机生成方法, 其中伪随机数的生成方法采用目前最通用的混合线性同余法。

几种典型的概率分布如下:

(1) 均匀分布的随机变量模拟^[15]

对任意的 $a < b$, 已知 $[a, b]$ 区间上均匀分布的随机变量 x_i 有密度函数 $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (1)$$

由

$$r_i = \int_{-\infty}^{x_i} f(t) dt \quad (2)$$

得:

$$r_i = \int_a^{x_i} \frac{1}{b-a} dt = \frac{x_i - a}{b-a} \quad (3)$$

由此得

$$x_i = a + (b-a)r_i \quad (4)$$

式中: r_i ——服从 $[0, 1]$ 分布的随机数。

(2) 负指数分布的随机变量模拟

负指数分布的密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{l}} e^{-\frac{x}{\bar{l}}} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{l}$ ——负指数分布的数学期望, 且有 $\bar{l} > 0$ 。则:

$$r_i = \int_0^{x_i} \frac{1}{\bar{l}} e^{-\frac{t}{\bar{l}}} dt = 1 - e^{-\frac{x_i}{\bar{l}}} \quad (6)$$

由此得:

$$x_i = -\bar{l} \ln(1 - r_i) \quad (7)$$

因 $1 - r_i$ 与 r_i 都是 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数, 故式(7)可化简为:

$$x_i = -\bar{l} \ln r_i \quad (8)$$

得到了迹线长 l 的随机变量取值公式。

(3) 正态分布的随机变量模拟

数学期望为 μ , 方差为 σ^2 的正态分布密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (9)$$

由于正态分布的密度函数为不可积函数, 因此必须采用近似方法, 利用中心极限定理:

设 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 是 n 个相互独立、在 $(0, 1)$ 上均匀分布的随机变量, 则:

$$E(\xi_i) = \frac{1}{2}, D(\xi_i) = \frac{1}{12}$$

式中: $E(\xi_i)$ 、 $D(\xi_i)$ —— ξ_i 的均值和方差。

故由中心极限定理, 随机变量 η 为:

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^n \xi_i - \frac{n}{2} \right) / \sqrt{\frac{n}{12}} \quad (10)$$

渐近地服从正态分布 $N(0, 1)$, 因此可以选择 n 个在 $(0, 1)$ 上均匀分布的随机数 $r_1, r_2, \dots, r_n$, 则:

$$x_{N0} = \left(\sum_{i=1}^n r_i - \frac{n}{2} \right) / \sqrt{\frac{n}{12}} \quad (11)$$

近似地服从正态分布 $N(0, 1)$ 。为了保证一定的精度, 式(11)中的 n 应取得足够大(一般情况下约取 $n = 10$ 即可)。由:

$$x_N = \sigma x_{N0} + \mu \quad (12)$$

求出符合 $N(\mu, \sigma)$ 分布的随机变量值:

$$x_N = \sqrt{\frac{12}{n}} \left(\sum_{i=1}^n r_i - \frac{n}{2} \right) \sigma + \mu \quad (13)$$

2 裂隙网络连通性分析方法

2.1 基于无向图的裂隙网络连通性分析基本原理

裂隙岩体地下水渗流的流量计算中, 只有相互连通、水流能从一个边界到达另一个边界的裂隙网络才有意义, 这样的网络称为主干网。

本文应用图论中无向图理论^[12~13], 建立了裂隙网

络的数学模型——无向图。所谓无向图是指一个数学结构 (V, E, ψ) , 其中 V 为非空的顶点集, E 是定义在 V 上(可以重复)的二元关系集, ψ 是 E 到 $V \times V$ 的函数, 若 $\psi(E)$ 中元素全是无序对, 则 (V, E, ψ) 称为无向图, 记为 $G = (V(G), E(G), \psi_G)$ 。

可以用平面上的图形表示无向图, 图 G 的每个顶点均用一个小圆点(或实点)表示, 每条边 $\psi_G(e) = uv$ 均用以顶点 (u, v) 为端点的线段表示。如图 1(a) 为四个顶点的无向图, 其中:

$$V(G) = \{v_1, v_2, v_3, v_4\},$$

$$E(G) = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}, \text{ 而}$$

$$\psi_G(e_1) = v_1v_2, \psi_G(e_2) = v_1v_3, \psi_G(e_3) = v_1v_4,$$

$$\psi_G(e_4) = v_2v_3, \psi_G(e_5) = v_3v_4。$$

图 $G = (V, E, \psi)$ 可以由它的顶点与边之间的关联关系(关联矩阵)唯一确定, 也可以由它的顶点与顶点之间的邻接关系(邻接矩阵)唯一确定。

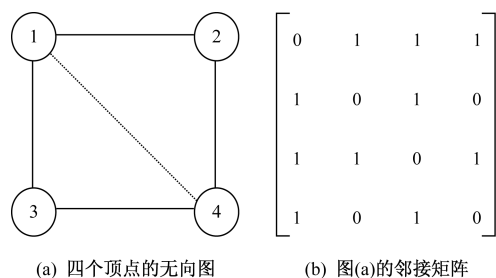


图 1 四个顶点的无向图(a)及邻接矩阵(b)

Fig. 1 undirected graph of four vertices and its adjacency matrix

本文用邻接矩阵表示无向图, 该邻接矩阵完全等价于图本身的顶点与顶点之间的结构关系。有 n 个点的一个无向图 G 的邻接矩阵 $A = A(G) = (a_{ij})_{n \times n}$, 其中, 如果 v_i 邻接 v_j , 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。于是在有 n 个点的无向图与对角线元素为零的 n 阶对称二元矩阵(其中元素取值为 0 和 1)之间是一一对应的关系。图 1(b) 为图 1(a) 中四个顶点的邻接矩阵。

由于二维裂隙的相互关系与无向图的邻接矩阵具有相同的特点, 以顶点表示裂隙, 两个顶点间是否相连表示两条裂隙是否相交, 把二维裂隙网络看作数学上的一个集合, 用无向图表示。对于平面内的裂隙线段, 问题转化为平面内线段的相交问题, 可以用无向图邻接矩阵表示二维裂隙网络图, 建立二维裂隙网络的数学结构。

2.2 基于无向图的裂隙网络连通性计算步骤

本文用 Matlab 实现二维裂隙网络连通图的绘制,

其基本步骤如下:

(1) 对迹线中心点坐标、走向和迹长分别通过计算机产生一组伪随机数, 伪随机数的组合就得到裂隙网络的裂隙坐标, 绘制出二维裂隙网络图。

(2) 进行裂隙相交判断, 得到无向图的邻接矩阵。裂隙相交可以看作判断平面内的线段相交, 并可根据下列赋值得到无向图的邻接矩阵表示其相交关系: 孤立线段赋值为 0, 相交线段赋值为 1, 自身相交赋值为 0, 此方阵为一个对角线元素为 0 的 0~1 对称方阵。

(3) 依据无向图的邻接矩阵, 利用线段相交判断程序去除孤立裂隙, 只显示相交裂隙, 绘制出相交裂隙图。

(4) 依据无向图的邻接矩阵, 从与左边界相交的裂隙出发, 利用邻接矩阵递推导出所有与其连通的裂隙, 若与其连通的裂隙同时与右边界相交, 则形成裂隙网络连通图。去除非连通裂隙并计算出连通图的裂隙数, 最后绘制出二维裂隙网络连通图。

2.3 临界裂隙数和临界裂隙长度的估算方法

Balberg 等人^[8]提出了根据生成的裂隙长度及密度判别发生渗流的临界裂隙数方法, 为此, Balberg 等人引入了排除体积概念, 定义排除体积为某一物体的周边体积或面积, 且当另一个物体的中心位于其上时, 这一物体与周边之间能够交叠。对于体积为 V 的球体或立方体, 排除体积 $V_{ex} = 8V$; 对于面积为 A 的圆盘或正方形, 排除面积 $A_{ex} = 4A$ 。对于两个给定的物体或两个给定的相交体, 其排除体积是不同的, 可使用平均排除体积表述。对于迹长为常数, 走向均匀分布在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 之间的随机裂隙, 其平均排除面积为:

$$\langle A_{ex} \rangle = (2/\pi)L^2 \quad (14)$$

式中: L ——迹长除以面积的标准化长度^[8]。

Balberg 等人^[8]根据排除体积的空间尺度不变性, 给出了迹长为常数的临界裂隙数 N_c 估算公式:

$$N_c = B_c / \langle A_{ex} \rangle \quad (15)$$

式中: B_c ——每一位置上交叉裂隙的平均数, 即配位数;

$\langle A_{ex} \rangle$ ——平均排除面积。

对于二维系统中迹长为常数的随机裂隙, 式(15)中 $B_c \approx 3.57$ ^[8]。

如果迹长不是常数, 而是服从均匀分布、正态分布或对数正态分布时, B_c 不再是一个常数。Balberg 等

人^[8]给出了研究域中能确保发生渗流的裂隙长度:

$$L_c = 4.2 / \sqrt{\pi N_c}$$

(16)

推导得:

$$L_c^2 = \langle L^2 \rangle$$

(17)

其中:

$$\langle L^2 \rangle = \langle L \rangle^2 + \sigma^2$$

(18)

式中: $\langle L \rangle$ 和 σ^2 ——随机生成的裂隙长度的均值和方差。

3 应用实例

3.1 裂隙网络的随机生成及连通图绘制

本文选择两个算例生成二维裂隙网络,算例 1 包含 2 组裂隙,计算区域为 20m×20m,统计参数如表 1 所示,其中中心点服从均匀分布,迹线长采用负指数分布,走向服从正态分布($-\pi/2,\pi/2$);算例 2 走向服从均匀分布,其余参数同表 1。

表 1 裂隙统计参数
Table 1 Statistic parameters of fractures for example 1

裂隙 组号	走向			倾向			倾角			中心点 位置	迹长	
	均值(°)	标准差(°)	分布	均值(°)	标准差(°)	分布	均值(°)	标准差(°)	分布		均值(m)	分布
1	11.00	3.00	正态	101.00	3.00	正态	0.00	0.00	正态	均匀	2.00	负指数
2	71.00	3.00	正态	161.00	3.00	正态	0.00	0.00	正态	均匀	2.00	负指数

两个算例生成的二维裂隙网络(其中某一次裂隙网络实现)如图 2。在图 2 中,存在大量不连通裂隙。利用本文分析裂隙连通性的无向图方法,得到了裂隙网络的连通图,见图 2 中的主干网。研究中发现,用蒙特卡罗方法生成裂隙网络的 50 个样本中(裂隙条数 $N=360$),走向为正态分布和均匀分布的裂隙网络图中,至少有一簇裂隙是连通的概率分别为 52% 和 76%,走向为均匀分布的裂隙连通概率明显大于走向为正态分布的裂隙连通概率。从图 2 也可以看出,虽然两者裂隙密度相等,都绘制出 360 条裂隙,但是在连通图中,图 2(a)由于孤立的裂隙较多,主干网中裂隙(50 次生成样本中主干网的裂隙平均数)仅占全部裂隙的 39.4%;而图 2(b)与图 2(a)相比,主干网更为稠密,主干网中的裂隙占到全部裂隙的 55.3%。

3.2 临界裂隙数和临界裂隙长度定量估算方法的验证

利用本文基于无向图方法得出的裂隙网络连通数,分别对 Balberg 提出的临界裂隙数 N_c 计算式(15)以及式(16)~(18)进行验证。当迹长取常数 2(如走向服从均匀分布的算例 2),进行不同裂隙密度的随机试验。当 $N=650$ 时,试验 50 次,利用无向图方法得出 46 次是连通的,即连通概率达 92%,由此得出 46 次相连通的 N_c 均值为 541。而由式(14)、(15)得 Balberg 提出的 N_c 估计值: $N_c = \frac{3.57}{(2/\pi)(2/20)^2} = 560$, N_c 的估计值与连通图中得出的实际值误差为 3.5%。同样原理可以计算出,当连通概率降低到 78% 和 50%

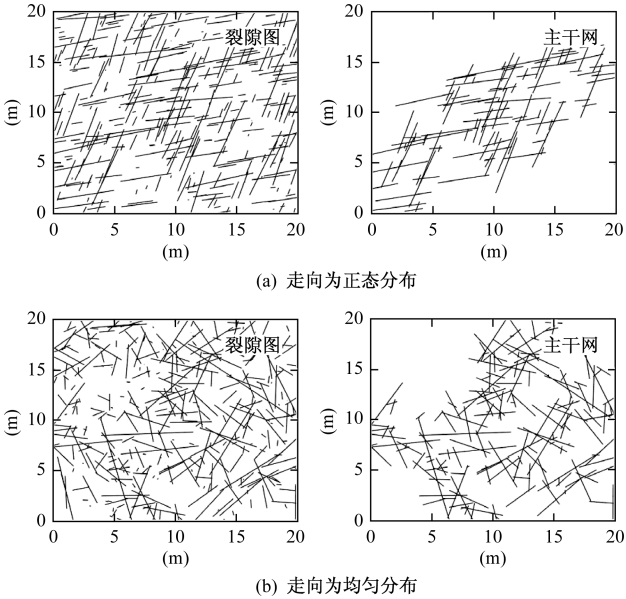


图 2 不同分布走向的裂隙网
Fig. 2 Fractures network with orientations following different distributions

时,Balberg 提出的 N_c 估计值与实际值误差分别达到 15.7% 和 50%。说明在连通概率达到 90% 以上时,Balberg 提出的临界裂隙数估计值与实际值非常接近,但随裂隙连通概率降低,其估计值误差增大。

对迹长不是常数,而是服从负指数分布(表 1 中算例 1、2)分别进行 50 次试验,当 $N=360$ 时,利用无向图方法得出算例 1(走向服从正态分布)有 26 次是连通的,即连通概率达 52%, N_c 的均值为 142,由式(16)得 $L_c^2 = 0.0395$,由式(17)、(18)得出 Balberg 提

出的裂隙长度均值的估值(L) = 0.1406,该估计值与实际值 2/20(标准化后)之间的误差达 40.6%;算例 2(走向服从均匀分布)有 38 次是连通的,即连通概率达 76%, N_c 的均值为 199,(L)的估计值与实际值误差为 18.8%。

如增大裂隙密度,当 $N = 430$ 时,算例 1 走向服从正态分布的 50 次试验中,有 36 次是连通的,即连通概率为 72%, N_c 的均值为 203,(L)的估计值与实际值误差为 17.6%;算例 2 走向服从均匀分布的 50 次试验中,有 46 次是连通的,即连通概率达 92%, N_c 均值为 265,(L)的估计值与实际值误差为 2.93%。可见,迹长均值的估计值与实际值的误差与裂隙网络连通概率有关。

研究说明,通过增大裂隙密度或增加裂隙长度可以提高裂隙网络的连通性,只有裂隙连通率达到 90% 以上时,也就是裂隙网络的模拟实现有 90% 产生了渗流系统,Balberg 提出的临界裂隙数 N_c 以及临界裂隙长度(L_c)估计值与实际值才十分接近。

4 结论

(1)基于 Monte Carlo 方法和 Matlab 程序对岩体裂隙网络进行了二维数值模拟,首次提出无向图邻接矩阵判断裂隙的连通性方法。

(2)对不同裂隙密度下走向为均匀分布和正态分布的裂隙连通概率进行了比较,走向为均匀分布的裂隙连通概率比走向为正态分布的裂隙连通概率大 20% 左右。

(3)对 Balberg 等人提出的临界裂隙数与临界裂隙长度估算方法的有效性进行了验证。本文研究表明,在随机生成的裂隙网络有 90% 产生渗流时,Balberg 等人临界裂隙数与临界裂隙长度的估计值与实际值吻合较好。

参考文献:

- [1] Fisher S R. Dispersion on a sphere[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1953, 217: 295 - 305.
- [2] Shanley R J, Mahtab M A. Delineation and analysis of clusters in orientation data [J]. Mathematical Geology, 1976, 8(1): 9 - 23.
- [3] Zambak C. Statistical interpretation of discontinuity contour diagrams [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1977, 14(3): 111 - 120.
- [4] Priest S D, Hudson J A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(3): 183 - 197.
- [5] 刘耀儒, 杨强, 覃振朝. 基于统计模型的裂隙岩体渗流场的并行数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 736 - 742. [LIU Y R, YANG Q, QIN Z C. Parallel numerical simulation of seepage in fractured rock mass based on statistic model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 736 - 742. (in chinese)]
- [6] 刘晓丽, 王恩志, 王思敬, 等. 裂隙岩体表征方法及岩体水力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1814 - 1821. [LIU X L, WANG E Z, WANG S J, et al. Representation method of fractured rock mass and its hydraulic properties study [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1814 - 1821 (in chinese)]
- [7] Robinson P C. Numerical calculations of critical densities for lines and planes [J]. Journal of Physics A-Mathematical And General, 1984, 17(14): 2823 - 2830.
- [8] Balberg I, Anderson C H, Alexander S, et al. Excluded volume and its relation to the onset of percolation [J]. Physical review B, 1984, 30(7): 3933 - 3943.
- [9] Berkowitz B. Analysis of fracture network connectivity using percolation theory [J]. Mathematical Geology, 1995, 27(4): 467 - 483.
- [10] 徐钟济. 蒙特卡罗方法 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. [XU Z J. Monte carlo method [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing House, 1985. (in chinese)]
- [11] Etter Delores M, Kuncicky David C, Moore Holly. MATLAB 7 及工程问题解决方案 [M]. 邱李华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006. [Etter Delores M, Kuncicky David C, Moore Holly. Introduction to MATLAB 7 [M]. QIU L H, translate. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006. (in chinese)]
- [12] 徐俊明. 图论及其应用 [M]. 3 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. [XU J M. Graph theory and its application [M]. 3th ed. Hefei: China Science

- and Technology University Press, 2010. (in chinese)]
- [13] 王海英, 黄强, 李传涛, 等. 图论算法及其 MATLAB 实现[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010. [WANG H Y, HUANG Q, LI C T, *et al.* Graph algorithms and its matlab reliazation [M]. Beijing: Beijing Aerospace University Press, 2010. (in chinese)]
- [14] 张伟, 宫凤强, 李夕兵, 等. 一种推断岩体裂隙几何参数概率模型的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (S2): 3703 – 3708. [ZHANG W, GONG F Q, LI X B, *et al.* A new method of definition of probabilistic density functions of geometry parameters for rock mass fissure network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (S2): 3703 – 3708. (in chinese)]
- [15] 中山大学数学力学系概率论及数理统计编写小组. 概率论及数理统计[M]. 人民教育出版社, 1980. [Writing team of probability theory and mathematical Statistics of Mathematics force department in Zhongshan University. Probability Theory and Mathematical Statistics [M]. People ' s Education Press, 1980 (in chinese)]

A study of stochastic generation and connectivity of fracture network in rock mass

WANG Jin-li^{1,2,3}, CHEN Xi^{1,2}, HUANG Yuan-yang^{1,2}, ZHANG Zhi-cai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. School of Geodesy and Geomatics, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Based on statistic parameters of random distribution of fractures, a fracture network is generated by application of the Monte Carlo simulation technology. In terms of undirected graph theory, the backbone (conducting part) of fractures is obtained. Probability of fracture connectivity about the orientations of the uniform distribution is compared to that of the normal distribution. The Monte Carlo Experiments based on a two-dimensional fracture network model are used to validate the critical number of fractures, as well as the critical fracture length derived from Balberg and others. The result shows that the backbone of fractures is drawn quickly and easily with the undirected graph method. Under the same conditions of the fracture features, the probability of fracture connectivity for orientation following a uniform distribution is 20% larger than that of a normal distribution. When fracture connectivity probability is greater than 90%, the estimated value from Balberg and others is in gaad agreement with the actual parameter value. The results in this work provide a valuable analysis method for groundwater seepage calculation.

Key words: rock mass; Monte Carlo method; fracture network; connectivity; groundwater seepage

责任编辑: 张若琳