

裂隙岩体表征方法及岩体水力学特性研究

刘晓丽^{1, 2}, 王恩志¹, 王思敬^{1, 3}, 樊赞赞¹

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 瑞士洛桑联邦高工 岩石力学实验室, 瑞士 洛桑 CH - 1015;
3. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 岩体中裂隙展布的多样性和随机性是裂隙岩体工程特性研究的关键问题。考虑岩体裂隙几何形态(走向、倾角、迹长、间距、隙宽等)的随机性, 利用 Monte Carlo 模拟技术, 编制裂隙网络生成程序 RFNM^{2D} 和 RFNM^{3D}。利用 RFNM, 不但能够生成可以描述和表征岩体及其裂隙结构信息的虚拟裂隙网络岩体, 还能够将生成的裂隙网络岩体进行数值离散化, 从而可以直接和多种数值计算方法(有限元法、离散元法等)相结合来解决实际工程问题。因此, RFNM 生成的裂隙网络岩体实际上是一种数字随机裂隙岩体模型。基于渗流力学理论, 应用有限元方法编制软件 GeoCAAS, 研究裂隙岩体的水力学特性, 探讨裂隙几何形态对渗流性状的影响。

关键词: 岩石力学; Monte Carlo 模拟技术; 随机裂隙岩体; 数字裂隙岩体模型; 岩体水力学

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)09 - 1814 - 08

REPRESENTATION METHOD OF FRACTURED ROCK MASS AND ITS HYDRAULIC PROPERTIES STUDY

LIU Xiaoli^{1, 2}, WANG Enzhi¹, WANG Sijing^{1, 3}, FAN Yunyun¹

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Rock Mechanics Laboratory in Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne(LMR-EPFL), Lausanne CH - 1015, Switzerland;
3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The multiplicity and randomness of fractures distribution in rock mass are key issues in research on engineering properties of fractured rock mass. The randomness of fractures geometrical shapes(orientation, dip, trace length, spacing, and width) of fractures is considered; and Monte Carlo simulation technique is adopted to develop a new code RFNM(including RFNM^{2D} and RFNM^{3D}). By RFNM, not only the virtual fractured rock mass, in which the structure information of fractures is described and the real engineering rock mass is represented, can be generated; but also the digital fractured rock mass can be discretized and then be combined with numerical methods(such as FEM, DEM, and so on) to solve practical engineering problems. Therefore, the virtual fractured rock mass with random fracture networks is a digital fractured rock mass model actually. In addition, based on seepage theory of porous media, FEM is adopted to develop the software GeoCAAS (geo-engineering computer aided analysis system). The hydraulic properties of fractured rock mass are studied; and the effects of fracture geometrical shapes on the seepage properties are discussed.

Key words: rock mechanics; Monte Carlo simulation technique; random fractured rock mass; digital fractured rock mass model; rock hydraulics

收稿日期: 2008 - 05 - 18; **修回日期:** 2008 - 07 - 02

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAK30B02)

作者简介: 刘晓丽(1978 -), 男, 2001 年毕业于辽宁工程技术大学力学与工程科学学院工程力学专业, 现为博士研究生, 主要从事水岩耦合理论与应用及隧道风险评估方面的研究工作。E-mail: liuxl04@mails.tsinghua.edu.cn

1 引言

自 20 世纪 70 年代以来, 裂隙岩体的渗流特性及其数值模拟一直是国内外学者研究的热点问题, 并已取得了丰富的成果^[1~10]。随着计算机技术和数值计算方法的发展, 数值计算越来越多地用于岩石力学与岩石工程问题^[11, 12]。省时、省力、灵活、经济是数值计算相比于理论分析和试验手段所具有的优势。而有效模拟岩体的工程特性, 却是岩石工程数值计算的前提和挑战。

在长期的地质历史过程中, 岩体中孕育了大量的断层、裂隙、节理, 这些结构面使得岩体的力学特性和水力学特性异常复杂, 不但具有非连续性、非均质性、各向异性和非弹性(DIANE)^[13], 还具有多尺度效应。岩体中结构面对岩体工程特性的控制作用要求用任何一种方法分析岩体工程问题时, 必须体现岩体的这些结构, 只有这样才有可能比较准确地描述岩体的工程特性。因此, 数值计算必须和岩体的结构特性相结合, 才能有效地解决岩石力学和岩石工程问题。

近年来, 从岩体结构和形态出发, 基于大量的野外岩体结构面实测资料统计, 应用概率与统计理论研究岩体中大量随机结构面的方法在众多工程中得到应用与验证^[14~16]。然而, 迄今为止, 能正确地描述岩体中各种结构的分布, 并将其与岩石力学数值计算方法相结合的应用实例还很鲜见^[12]。本文针对裂隙岩体, 考虑岩体裂隙几何形态(走向、倾角、迹长、间距、隙宽等)的随机性, 利用 Monte Carlo 模拟技术, 编制了二维和三维裂隙网络生成程序 RFNM(rock fracture network modelling)。利用 RFNM 不但能够生成可以描述和表征岩体及其裂隙结构信息的裂隙网络岩体, 还能够将生成的裂隙网络岩体进行数值离散化, 从而可以直接和多种数值计算方法(有限元法、离散元法等)相结合来解决实际工程问题。由于 RFNM 生成的裂隙网络模型实现了对每条裂隙的精确定位, 能够结合实际工程现场调查研究每条裂隙的工程特性演化规律, 因此, 本文称其为数字裂隙岩体模型。基于多孔介质渗流力学理论, 应用有限元法编制了软件 GeoCAAS(geo-engineering computer aided analysis system)^[17], 通过将数字岩体模型和有限元法相结合, 研究了裂隙岩体的水力学

特性, 探讨了裂隙几何形态对渗流性状的影响。

2 数字裂隙岩体模型

地质体是一个复杂的未知系统, 如何尽可能多地获得地质体内的信息并有效利用是对地质体工程特性进行评价的关键。工程岩体中一般含有数量众多、几何结构难以一一确定的节理和裂隙。基于有限的地质测量数据, 利用统计方法分析, 获得这些结构体的几何特征(走向、倾角、迹长、间距、隙宽等)分布规律, 进而运用 Monte Carlo 模拟技术, 得到与现场勘察的结构体具有相同统计规律的随机裂隙网络结构来描述真实的工程岩体。尽管从原理上说, 因为某些尺度上的裂隙可能不存在统计分布规律或者模拟的随机裂隙网络 and 实际测量裂隙只是统计意义上的一致, 这种研究的结构体系并不严密, 但在当前研究水平上, 这是一条合理、可行、有效的研究途径。近 20 a 来, 裂隙网络随机模拟技术得到了很快发展, 并日趋成熟^[14~16]。本文先采用 Monte Carlo 模拟技术根据工程岩体裂隙测量和统计数据生成随机裂隙网络。随机裂隙网络由一系列裂隙组合而成, 每条裂隙的几何结构信息都保存在裂隙结构数据文件中, 计算过程中, 裂隙结构数据可以不断更新, 进而可以获得每条裂隙的变形演化过程。将裂隙网络结构和研究区域的边界联合起来, 在空间上统一进行离散, 得到基于某种数值计算方法的网格信息(块体结构或节点信息)。通过以上分析可以看出, 利用本文方法得到的岩体模型实际上是对工程岩体的数字化, 因此作者称其为数字裂隙岩体模型。本文主要利用有限元法进行数值分析, 文中将包含裂隙网络结构的研究域进行有限元网格离散。

数字裂隙岩体模型的生成主要包括两部分: 岩体裂隙网络随机模拟过程和含裂隙网络岩体的统一离散化过程。

2.1 岩体裂隙网络随机模拟

岩体裂隙网络随机模拟的步骤^[14~16, 18]一般为:

- (1) 选取工程岩体的特征尺度为研究域, 通过测线法或统计窗方法对研究域裂隙几何结构信息进行测量和调查;
- (2) 对裂隙测量数据进行统计分析, 建立各组裂隙几何结构要素的概率模型, 并通过数据拟合的方式确定概率模型中的特征参数;
- (3) 采

用 Monte Carlo 技术进行随机模拟, 确定各组裂隙的条数、中心位置、迹长(半径)、产状和隙宽等几何要素; (4) 结合现场测量数据, 对各组裂隙的模拟结果进行有效性检验, 组合各组裂隙生成裂隙网络。

根据已有的岩体裂隙研究成果以及地质工程实践可知, 岩体裂隙的几何要素一般都具有统计规律, 服从某一种或几种类型的概率分布。一般来说, 裂隙的条数依据其密度服从 Poisson 随机过程; 裂隙中心点位置服从研究域内的均匀分布; 产状(走向和倾角)通常服从 Bingham 分布、单变量或双变量 Fisher 分布、双变量正态分布或对数正态分布、均匀分布等; 迹长(半径)和隙宽服从负指数分布或对数正态分布。表 1 所示为几种典型的概率分布函数及随机变量的取值^[7]。在实际工程应用中, 必须根据现场测量数据, 通过数据拟合来确定裂隙几何要素分布形式。

基于以上分析, 本文编制了裂隙网络生成程序 RFNM^{2D} 和 RFNM^{3D}, 实现了岩体裂隙网络的自动生成。利用 RFNM, 可以根据工程地质水文地质勘察资料, 生成含单组或多组、充填或非充填、断续

或连通的随机裂隙岩体, 如图 1, 2 所示。

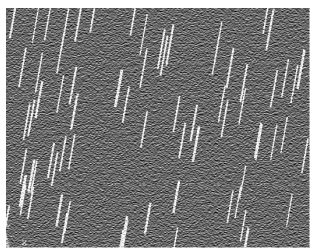
2.2 岩体裂隙网络离散化

裂隙网络模拟提供了具有较为完备的几何信息 和非几何信息的裂隙岩体特征模型, 而将其自动转换成有限元模型, 是目前有限元建模技术的一个难点。有限元网格生成是有限元计算手段走向工程应用的桥梁, 研究有限元网格生成算法对于计算几何和计算数学具有重要的理论价值^[19]。

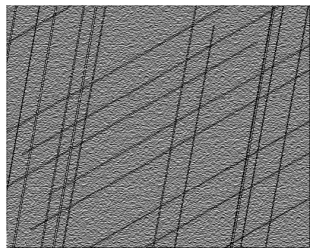
基于裂隙岩体结构的复杂性, 其有限元网格的实现包括了模型区域分解和子域网格划分两个过程。上述所建立的裂隙岩体特征模型, 已经完成了区域分解过程(分解成岩体基材料域和岩体裂隙域)。对于每个区域, 本文利用波前法实现有限元网格的自动划分, 其基本流程是: (1) 离散待剖分域的边界, 二维待剖分域的边界离散后是首尾相连的线段的集合, 三维待剖分域的边界离散后是拓扑相容的三角形面的集合, 离散后的域边界称为前沿; (2) 从前沿开始, 一次插入一个节点, 连接生成一个新的单元; (3) 前沿继续向域内推进, 此过程(插入节点、生成新单元、更新前沿)不断循环, 直到两个相向的前沿相遇, 表明整个域剖分结束。

表 1 几种典型的概率分布函数及随机变量取值^[7]
Table 1 Several typical probability distribution functions and values of random variables^[7]

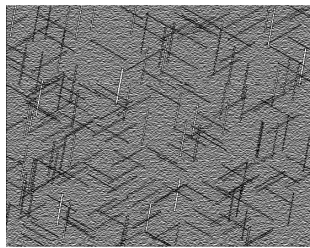
分布形式	概率密度函数	随机变量	注释
均匀分布 (连续分布)	$f(x)=\frac{1}{b-a} \quad (a\leq x\leq b)$	$x_r=(b-a)R+a$	R 为服从 $[0, 1]$ 分布的随机变量, 可用同余法等生成伪随机数来表示
负指数分布 (连续分布)	$f(x)=\frac{1}{\mu_e}e^{-(x/\mu_e)} \quad (x>0)$	$x_r=-\mu_e\ln(1-R)$	μ_e 为负指数分布的数学期望
Possion 分布 (离散分布)	$P(X_n=k)=\frac{e^{-\lambda_i\nu}(\lambda_i\nu)^k}{k!}$	$X_n=k_m$ $(P(k_m)\leq R<P(k_m+1))$	ν 为研究区域的体积, λ_i 为第 i 组裂隙的体积密度, k 为裂隙的条数
Fisher 分布 (连续分布)	$f(\varphi', \theta')=\frac{\varphi'\eta\sin\theta'e^{\eta\cos\theta'}}{4\pi\sinh\eta}$ $(0<\varphi'<2\pi, 0<\theta'<2\pi)$	$\varphi'_r=2\pi R$ $\theta'_r=\arccos\left[\frac{\ln(1-R)}{\eta}+1\right]$	φ' 和 θ' 均为相互独立的随机变量, η 为裂隙组极点集的集中程度参数
正态分布 (连续分布)	$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$x_r=\sqrt{\frac{12}{n}}\left(\sum_{i=1}^nR_i-\frac{n}{2}\right)\sigma+\mu$	μ 为数学期望, σ 为均方差, R_i 为服从 $[0, 1]$ 分布的随机变量
对数正态分布 (连续分布)	$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2x}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x-\mu'}{\sigma}\right)^2}$ $(x>0)$	$x_r=e^{\sqrt{\frac{12}{n}}\left(\sum_{i=1}^nR_i-\frac{n}{2}\right)\sigma+\mu'}$	μ' 为数学期望, σ' 为均方差, R_i 为服从 $[0, 1]$ 分布的随机变量



(a) 单组断续、非填充裂隙

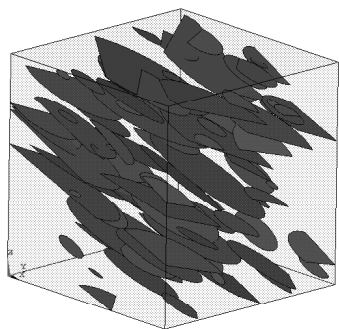


(b) 两组贯通、填充裂隙

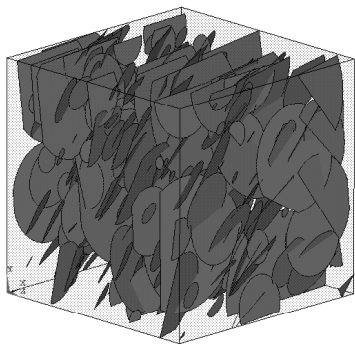


(c) 多组断续、非填充和填充混合裂隙

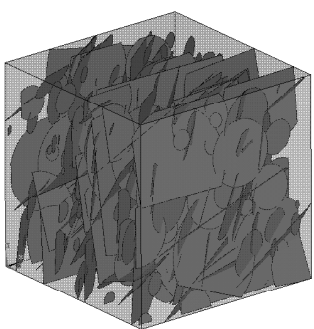
图 1 二维裂隙网络模型(岩体尺度 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$)
Fig.1 2D fracture network models(scale of rock mass is $10\text{ m}\times 10\text{ m}$)



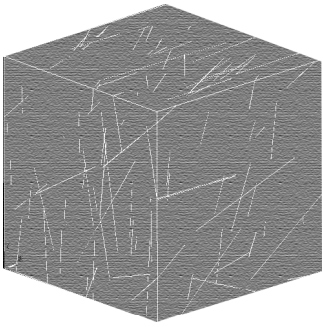
(a) 单组圆盘裂隙



(b) 两组圆盘裂隙



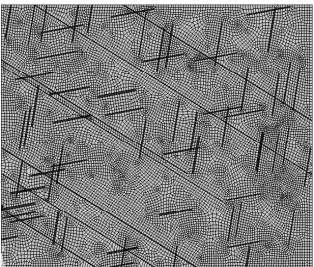
(c) 多组圆盘裂隙



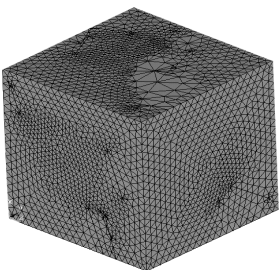
(d) 多组圆盘裂隙交线

图 2 三维裂隙网络模型(岩体尺度 $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 10\text{ m}$)
Fig.2 3D fracture network models(scale of rock mass is $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 10\text{ m}$)

图 3 所示为利用本文方法生成的裂隙岩体有限元模型。



(a) 二维有限元网格(岩体尺度 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$, 15 854 个节点, 15 637 个单元)



(b) 三维有限元网格(岩体尺度 $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 10\text{ m}$, 58 736 个节点, 330 421 个单元)

图 3 二维和三维裂隙网络模型有限元离散网格
Fig.3 2D and 3D discrete meshes of fractured network models with finite element method

3 基于离散裂隙网络模拟的渗流模型

裂隙渗流模型主要有等效连续介质模型、双重介质模型、多重介质模型、离散裂隙网络模型以及连续-非连续介质模型, 这些模型各有自身的适用条件和优缺点。等效连续体模型假定裂隙岩体内含有足够数量、不同产状的裂隙, 宏观上可以应用平均意义上的等效连续介质渗流基本方程来描述岩体中的渗流行为, 不考虑单个裂隙的几何结构; 双重介质模型将某一尺度以上的部分裂隙视为一种介质, 而此尺度以下的裂隙由于数量多而视为另一种等效连续介质; 多重介质模型一般用于岩溶地区, 将各种不同级次的地质结构分别用不同的等效连续介质模型表示; 而在离散裂隙网络模型中, 首先在对研究域岩体裂隙的现场测量和统计的基础上生成随机裂隙网络, 然后运用裂隙网络水力学方法对裂隙岩体渗流进行求解; 连续-非连续介质模型一般将岩体视为等效连续介质(不考虑含裂隙网络)和裂隙网络的叠加, 分别对岩体渗流进行求解, 然后再进行叠加, 求解过程中裂隙和等效介质之间会发生水流交换。等效连续介质模型的优点是模型简单、理论成熟、容易求解, 适合于研究大范围、裂隙分布密集的岩体渗流, 而对于岩体代表性单元体积很大甚至不存在的研究域或者需要研究某一特定小范围、某个特定路径的渗流行为时, 该模型则无能为力, 此时需要采用离散裂隙网络模型。但从目前的研究情况来看, 离散裂隙网络模型也面临一些难以解决的问题, 主要有: (1) 裂隙网络的连通率不易确定; (2) 一些重要的参数如裂隙隙宽(或水力开度)、形状等难以确定, 所做假定比较粗略; (3) 对于不连通的裂隙不予考虑, 从而在一定程度上导致结果失真; (4) 问题规模很大, 往往导致求解困难, 特别是对于三维裂隙网络, 计算数量众多的裂隙相互交切并离散成单元的前处理工作十分庞大。连续-非连续介质模型从原理上能够比较真实地刻画真实的渗流形态, 但裂隙网络和等效介质之间的水量交换还需要进一步的研究才能确定。双重介质模型和多重介质模型仍然可以视为在等效连续介质模型的构架内, 但它们相比于整个研究区域上的等效连续模型而言, 更能描述渗流问题的复杂性(局部渗流的非均匀性等), 更加符合工程实际的渗流形态。然而, 双重介质模型存在与连续-非连续介质模型相同的缺点, 即岩块介质和裂隙网络介质之间

的水量交换难以确定。本文利用上述数字岩体模型, 主要采用等效连续介质模型来描述裂隙岩体中的渗流形态。地下水非稳定渗流的三维控制方程为

$$\nabla(K\nabla H) = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ∇ 为 Hamilton 算子, $\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\}$; K

为渗透系数张量, $K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$; H 为渗

流空间内任一点的水头; μ_s 为贮水率; t 为水渗流时间。 $\nabla(K\nabla H) = 0$ 时, 表示地下水稳定渗流控制方程。

用 Galerkin 有限元方法对式(1)进行空间离散, 并利用有限差分法对时间域离散, 可以得到如下地下水渗流问题的数值计算格式:

$$\left(G + \frac{1}{\Delta t} P \right) H_{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} P H_t + F \quad (2)$$

式中: G 为总体渗透矩阵; H_t , $H_{t+\Delta t}$ 分别为 t , $t+\Delta t$ 时刻的节点水头列阵; P , F 均为有限元离散过程中生成的已知项。

总体渗透矩阵 G 由单元渗透矩阵 G^e 组成, 单元渗透矩阵如下式所示:

$$G_{ij}^e = \iiint_e \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial x}, \frac{\partial N_i}{\partial y}, \frac{\partial N_i}{\partial z} \right\} K \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_j}{\partial x} \\ \frac{\partial N_j}{\partial y} \\ \frac{\partial N_j}{\partial z} \end{Bmatrix} dx dy dz \quad (i=1, 2, \dots, 8; j=1, 2, \dots, 8) \quad (3)$$

式中: N_i , N_j 均为形函数。单元渗透矩阵在整体渗透矩阵中的表现形式可写为 G_{pq}^e ($p=1, 2, \dots, n_{no}$; $q=1, 2, \dots, n_{no}$), n_{no} 为节点个数。总体渗透矩阵可以写为

$$G = \sum_{e=1}^{n_{el}} G_{pq}^e \quad (4)$$

式中: n_{el} 为单元个数。

裂隙岩体渗流问题的复杂性是由于其赋存和运移的岩体介质的复杂性引起的, 由于数字岩体模型是基于裂隙网络模拟技术构建而成的, 在模型中已经包含了复杂裂隙信息, 所以, 虽然利用了概念最明确、研究最成熟的等效连续介质模型, 但是却能够描述真实的渗流形态, 刻画出优先流的现象。与双重介质模型相比, 本文提出的基于离散裂隙网络

模拟的等效连续介质模型在数字岩体模型构建方面过程比较复杂,但它不需要确定岩块介质和裂隙介质之间的物质交换(计算过程中要不断迭代),并且能实现双重介质模拟的目标。

4 裂隙岩体水力学特性

根据式(2)可以求出求解域上各节点的水头值,进而可以求得水力梯度 J 和流量 Q 。利用求出的 Q ,可以反过来评价工程岩体的宏观水力学特性。

本文利用建立的数字岩体模型,通过上述过程进行了裂隙水力学特性数值试验,研究了具有单组裂隙的岩体的水力学特性,探讨了裂隙各要素(倾角、迹长、间距和隙宽等)对岩体水力学特性的影响。数值试验模型及边界条件如图 4 所示。

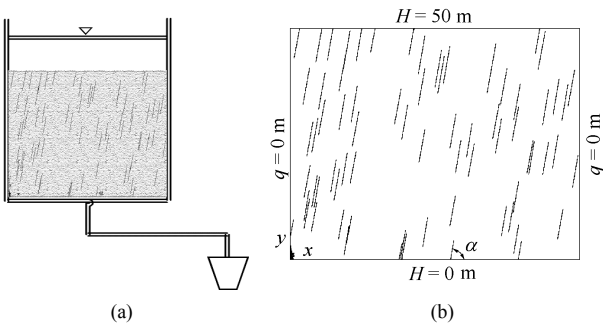


图 4 裂隙岩体数值试验模型及边界条件
Fig.4 Numerical test model of fractured rock mass and boundary conditions

岩体中裂隙几何参数取值见表 2,走向为 NE,计算得到的岩体水头分布如图 5 所示。由图 5 可以看出,本文方法能够模拟裂隙岩体中的优势流现象,而全域上的等效连续介质模型无法描述这一现象。

表 2 裂隙几何参数

Table 2 Values of fracture geometrical parameters

倾角			迹长		
均值/(°)	标准差/(°)	分布形式	均值/m	标准差/m	分布形式
90.10	2.00	正态	2.50	0.15	正态
间距			隙宽		
均值/m/(°)	标准差/(°)	分布形式	均值/mm	标准差/mm	分布形式
2.00	0.1	负指数	2.00	0.050	负指数

裂隙几何参数与岩体竖直方向渗透系数的关系曲线如图 6~10 所示,不同隙宽的贯通裂隙数字岩体模型及岩体内水头分布见图 11。

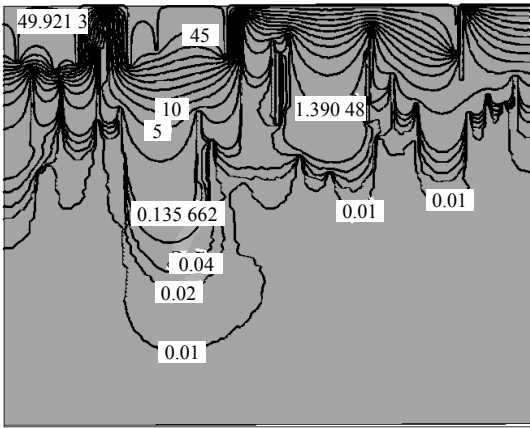


图 5 裂隙岩体水头分布(单位: m)
Fig.5 Water head distribution in fractured rock mass(unit: m)

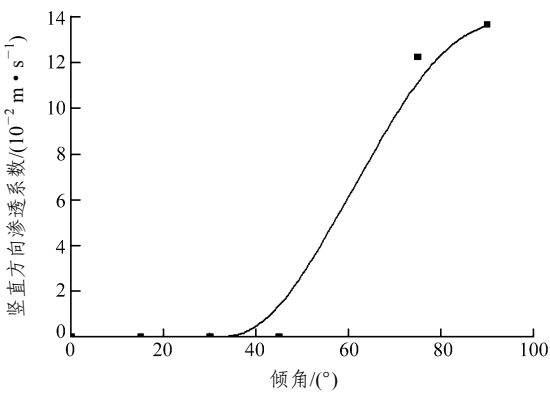


图 6 裂隙岩体竖直方向渗透系数与倾角关系曲线
Fig.6 Relation curve between permeability of fractured rock mass in vertical direction and fracture dip

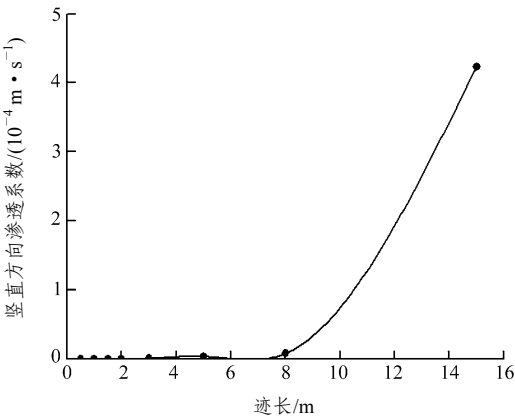


图 7 裂隙岩体竖直方向渗透系数与迹长关系曲线
Fig.7 Relation curve between permeability of fractured rock mass in vertical direction and fracture trace length

图 6~10 中曲线均可以通过 Boltzmann 函数拟合。Boltzmann 函数可表示为

$$f(x)=a_1+\frac{a_2-a_1}{1+e^{\frac{x-x_0}{a_3}}}$$

(5)

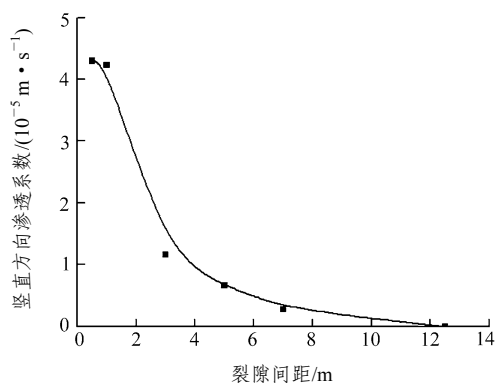


图 8 裂隙岩体垂直方向渗透系数与裂隙间距关系曲线

Fig.8 Relation curve between permeability of fractured rock mass in vertical direction and fracture spacing

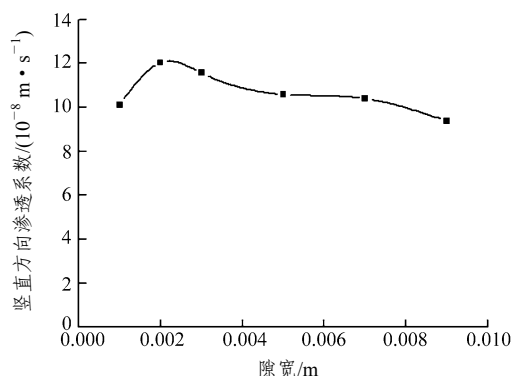


图 9 裂隙岩体垂直方向渗透系数与非贯通裂隙隙宽的关系曲线

Fig.9 Relation curve between permeability of fractured rock mass in vertical direction and intermittent fracture width

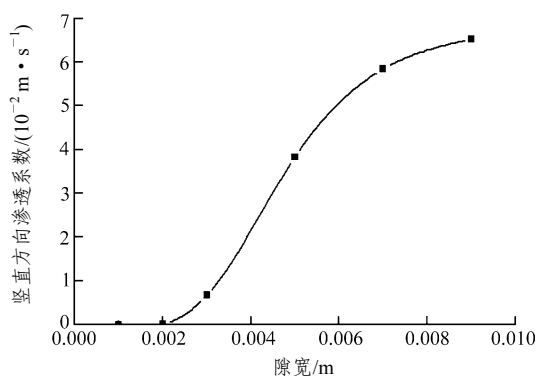


图 10 裂隙岩体垂直方向渗透系数与贯通裂隙隙宽的关系曲线

Fig.10 Relation curve between permeability of fractured rock mass in vertical direction and through fracture width

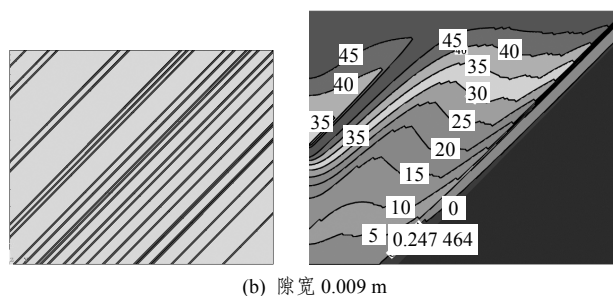
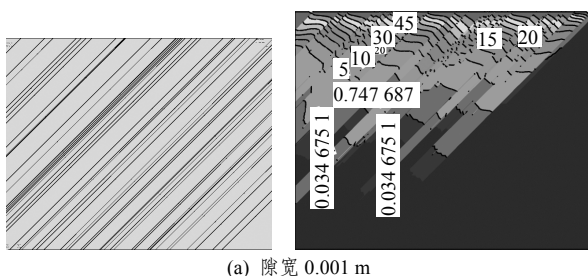


图 11 不同裂隙隙宽的贯通裂隙数字岩体模型及岩体内水头分布(单位: m)

Fig.11 Digital rock mass models of through fractures with different widths and water head distribution(unit: m)

式中: a_1 , a_2 , a_3 和 x_0 均为待定常数。

5 结 论

本文通过将随机裂隙网络模拟和有限元网格离散化技术相结合,建立了数字岩体模型。通过编制 RFNM 程序,实现了数字岩体模型的自动生成。利用数字岩体模型,结合数值计算方法,可以对每一条裂隙的多个状态(初始状态、过程中间状态和最终状态)进行精确定位。

本文主要利用有限元方法,对 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 尺度的裂隙岩体进行数值试验,研究了含裂隙岩体的水力学特性,主要得到了以下几个方面的认识:

(1) 岩体垂直方向的渗透系数与裂隙倾角(渗透方向与裂隙的夹角)、迹长、间距以及隙宽有关,随着倾角、迹长的增大,渗透系数增大;随着裂隙间距的增大,渗透系数减小;对于隙宽,当裂隙非贯通时,隙宽对渗透系数的影响很小,当裂隙贯通时,随着隙宽的增加,渗透系数明显增大(图 9 和 10)。

(2) 数值试验结果表明,裂隙岩体某方向上的渗透系数随裂隙的几何参数的变化而变化,且变化规律服从 Boltzmann 函数。

另外,还需要就以下几个问题进行讨论和进一步研究:

(1) 数值试验结果表明,贯通裂隙的隙宽对渗透系数比较敏感(如图 11 所示),而在工程中裂隙隙宽一般在毫米量级以下,很难确定,所以本文方法要想应用于实际工程,还必须结合地质信息,发展有效的方法来测定隙宽。

(2) 裂隙渗流与裂隙的表面形态有关,而本文没有考虑裂隙表面形态的影响。

(3) 由于隙宽很小,本文裂隙岩体的离散网格化方法会形成大量网格数据(单元和节点),发展高

效的数值计算技术, 如并行技术等, 有利于本文方法的广泛应用。

(4) 数字岩体模型还可以与其他数值计算方法, 如边界元法、离散元法等结合来求解问题, 过程与本文相似。

致谢 感谢“国家建设高水平大学公派研究生项目”对作者在瑞士留学期间的资助。在瑞士洛桑联邦高工岩石力学实验室留学期间, 得到实验室主任赵坚教授的指导, 在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] ZHAO J. Experimental studies of the hydro-thermo-mechanical behaviour of joints in granite[Ph. D. Thesis][D]. London: Imperial College, University of London, 1987
- [2] RUSHTON K R, REDSHAW S C. Seepage and groundwater flow: numerical analysis by analog and digital methods[M]. New York: John Wiley and Sons, 1979.
- [3] BLOOMFIELD J P, BARKER J A, ROBINSON N. Modeling fracture porosity development using simple growth laws[J]. Ground Water, 2005, 43(3): 314 - 326.
- [4] LANGEVIN C D. Stochastic ground water flow simulation with a fracture zone continuum model[J]. Ground Water, 2003, 41(5): 587 - 601.
- [5] CACAS M C, LEDOUX B, DE MARSILY G, et al. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation, 1. the flow model[J]. Water Resources Research, 1990, 26(3): 479 - 489.
- [6] ZIMMERMAN R W, BODVARSSON G S. Hydraulic conductivity of rock fractures[J]. Transport in Porous Media, 1996, 23(1): 1 - 30.
- [7] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.(ZHANG Youtian. Rock hydraulics and engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.(in Chinese))
- [8] 柴军瑞, 仵彦卿. 岩体渗流场与应力场耦合分析的多重裂隙网络模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 712 - 717.(CHAI Junrui, WU Yanqing. Research on multiple-level fracture network model for coupled seepage and stress fields in rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 712 - 717.(in Chinese))
- [9] 张发明, 汪小刚, 贾志欣, 等. 三维结构面连通率的随机模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1 486 - 1 490.(ZHANG Faming, WANG Xiaogang, JIA Zhixin, et al. 3D joint persistence calculation through random simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1 486 - 1 490.(in Chinese))
- [10] 田开铭, 万力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价[M]. 北京: 学苑出版社, 1989.(TIAN Kaiming, WAN Li. Research and evaluation of the permeability of anisotropic fractured media[M]. Beijing: Academy Press, 1989.(in Chinese))
- [11] JING L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(3): 283 - 353.
- [12] 朱焕春, BRUMMER Richard, ANDRIEUX Patrick. 节理岩体数值计算方法及其应用(一): 方法与讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 444 - 3 449.(ZHU Huanchun, BRUMMER Richard, ANDRIEUX Patrick. Numerical methods and application for jointed rock mass, part 1: approaches and discussions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 444 - 3 449.(in Chinese))
- [13] HUDSON J A, HARRISON J P. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles[M]. Oxford: Elsevier Science, 1997.
- [14] 陈剑平. 岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 397 - 402.(CHEN Jianping. 3D net work numerical modeling technique for random discontinuities of rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 397 - 402.(in Chinese))
- [15] 荣冠, 周创兵, 朱焕春, 等. 三峡水库某库段岩体裂隙网络模拟研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1 122 - 1 126.(RONG Guan, ZHOU Chuangbing, ZHU Huanchun, et al. Research on fissures network of jointed rock masses in one section of the Three Gorges Reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1 122 - 1 126.(in Chinese))
- [16] 宋晓晨, 徐卫亚. 裂隙岩体渗流模拟的三维离散裂隙网络数值模型(I): 裂隙网络的随机生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2 015 - 2 020.(SONG Xiaochen, XU Weiya. Numerical model of three-dimensional discrete fracture network for seepage in fractured rocks(I): generation of fracture network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2 015 - 2 020.(in Chinese))
- [17] 刘晓丽, 王思敬, 王恩志, 等. 单轴压缩岩石中缺陷的演化规律及岩石强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1 195 - 1 201.(LIU Xiaoli, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Evolutionary rules of flaws in rock subjected to uniaxial compression and rock strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1 195 - 1 201.(in Chinese))
- [18] 冯学敏, 陈胜宏. 含复杂裂隙网络岩体渗流特性研究的复合单元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 918 - 924.(FENG Xuemin, CHEN Shenghong. Composite element method for seepage characteristics study on rock masses with complicated fracture network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 918 - 924.(in Chinese))
- [19] 关振群, 宋超, 顾元宪, 等. 有限元网格生成方法研究的新进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(1): 1 - 14.(GUAN Zhenqun, SONG Chao, GU Yuanxian, et al. Recent advances of research on finite element mesh generation methods[J]. Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics, 2003, 15(1): 1 - 14.(in Chinese))