

# 裂隙岩体稳定/非稳定渗流数值模拟

张丽, 刘晓宇, 李世海

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 发展裂隙岩体稳定/非稳定的渗流数值模型, 一方面, 依照裂隙面的密度、产状、位置、大小和开度的统计分布规律, 使用蒙特卡罗模拟技术将完整岩石切割为三维不规则块体集合。根据相邻块体单元间产生的裂隙单元, 构建三维裂隙网络系统, 并附加各裂隙单元的水力特性; 另一方面, 对裂隙单元进行三角形单元的有限元网格划分, 运用变分原理导出裂隙单元的渗流有限元求解方程。采用离散元方法中的动态松弛技术, 在无须组装整体渗透矩阵的情况下求解裂隙网络各结点的水头值。最后, 通过典型算例验证程序的可靠性及适用性。

**关键词:** 岩石力学; 三维离散裂隙网络; 稳定/非稳定渗流模型; 有限元; 动态松弛技术

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)增2 - 3409 - 08

## NUMERICAL SIMULATION OF STEADY/UNSTEADY FLOW IN FRACTURED ROCK MASSES

ZHANG Li, LIU Xiaoyu, LI Shihai

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** A numerical model of steady/unsteady flow in fractured rock mass is developed. On the one hand, by using Monte Carlo technique, an intact rock is cut into 3D irregular block elements in term of the statistical distribution of density, orientation, position, size and aperture of fractures. A 3D fracture network is then constructed, which is composed of fracture elements between adjacent rock elements. The hydraulic properties are attached to the fracture elements. On the other hand, the fracture elements are discretized into triangular mesh, and the flow finite element equations are derived based on the variational principle. The dynamic relaxation technique in discrete element method is introduced to solve the permeability field without assembling the global matrix. Finally, the reliability and applicability of the program are validated by typical examples.

**Key words:** rock mechanics; 3D discrete fracture network; steady/unsteady flow model; finite element; dynamic relaxation technique

### 1 引言

裂隙岩体是由随机分布的裂隙和被裂隙切割的岩块所组成的不连续介质, 水主要在裂隙网络内流动。大量的工程实践证明, 虽然一般岩体结构中裂

隙度远比孔隙度小, 但裂隙面的渗透性却远大于孔隙的渗透性, 裂隙岩体渗流实际上是裂隙网络的渗流问题。在忽略岩块渗透性的前提下, 裂隙渗流数学模型主要分为3种: 等效连续介质渗流模型<sup>[1, 2]</sup>、裂隙网络渗流模型<sup>[3, 4]</sup>和双重介质渗流模型<sup>[5, 6]</sup>。随着勘测技术及计算机模拟技术的发展, 裂隙网络渗

**收稿日期:** 2008 - 05 - 11; **修回日期:** 2008 - 07 - 20

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2002CB412700); 国家自然科学基金资助项目(10602057)

**作者简介:** 张丽(1982 -), 女, 2008年于中国科学院力学研究所工程力学专业获硕士学位, 主要从事渗流应力耦合作用的数值计算方面的工作。  
E-mail: zhangli\_859@sina.com

流模型得到了广泛的应用。

目前,大多数裂隙网络渗流模型或者侧重于裂隙网络生成及裂隙渗流模拟,无法对裂隙面切割产生的复杂岩块系统进行几何描述及力学行为模拟<sup>[4, 7, 8]</sup>,或者侧重于岩体的力学分析,但岩块之间裂隙网络的拟真性不好,无法真实地描述实际裂隙网络复杂、随机的几何分布特征<sup>[9, 10]</sup>。针对上述情况,本文依照裂隙面的密度、产状、位置、大小和开度的统计分布规律,提出了一种能够实现裂隙面切割岩体时块体单元和裂隙单元同时生成的三维裂隙岩体模拟技术。对于生成的三维裂隙网络,在融合传统渗流有限元法<sup>[11, 12]</sup>建模思想和离散元法<sup>[13, 14]</sup>计算方法的基础上,发展了模拟稳定/非稳定渗流过程的三维裂隙网络渗流模型。为验证模型的可靠性及适用性,文末将进行2个典型算例的计算及讨论。

## 2 三维离散裂隙网络的建立

### 2.1 裂隙的几何描述

岩体裂隙面的空间展布是由裂隙面的密度、产状、位置、大小和开度等几何参数来描述。裂隙面的这些几何参数,直接影响裂隙介质渗透性的大小、方向和规律。

裂隙面的密度是指裂隙面发育的密集程度,通常由裂隙的条数来体现。由于野外条件下三维密度不能直接观测统计,在圆盘形假设的基础上,每组优势裂隙面的三维密度常由裂隙面的线密度来导出<sup>[15]</sup>。M. Oda<sup>[16]</sup>推导出如下的公式:

$$d_3 = \frac{4d_1}{\pi E(D^2) |ni|} \quad (1)$$

式中:  $d_1$  为一维密度,即沿裂隙平均单位矢量方向的钻孔上单位长度内所遇到的裂隙的数量;  $d_3$  为裂隙三维密度,即单位体积岩体内裂隙的个数;  $E(D^2)$  为裂隙直径平方的平均值;  $n$  为1组裂隙中裂隙个体的单位矢量;  $i$  为裂隙组的平均单位矢量。

裂隙面的产状是指裂隙面在空间的分布状态,使用倾向和倾角表示。通常,岩体的结构是复杂而有序的,裂隙产状可在一个或多个统计上占优方向周围分组,形成一组或几组优势面<sup>[13]</sup>。每组优势裂隙面的倾向和倾角常服从正态分布<sup>[17]</sup>。

裂隙面的位置通常用裂隙面中心点的位置来等效。在模拟计算时,常假定每个裂隙独立产生,不

考虑其前已发生裂隙的影响,因此裂隙的中心点位置用均匀分布函数产生。

裂隙面的大小反映裂隙的空间延展性。由于野外条件下裂隙三维大小的分布不能直接观测统计,在圆盘形假设的基础上,裂隙直径的分布可由露头上迹线长度的分布来导出。本研究假设裂隙直径具有与迹线相同的分布形式,而裂隙面的迹长常服从负指数分布或对数正态分布<sup>[18, 19]</sup>,通常迹长和直径的关系<sup>[20]</sup>如下:

$$A = \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 A' \quad (2)$$

式中:  $A$  为根据迹长计算的裂隙面积,  $A'$  为裂隙的平均面积。

裂隙面的开度是指裂隙结构面相邻岩壁间的垂直距离,通常服从负指数或对数正态分布<sup>[21]</sup>。在本研究中,裂隙面的开度对渗流规律的影响由裂隙的渗透系数来体现。

### 2.2 不规则块体单元及块体切割技术

由于岩体内各种裂隙纵横交错、互相切割,使得岩体内岩块的几何形状极不规则。为此,本研究将岩块看作一个不规则凸多面体,并借助几何学中顶点、棱边和表面3类几何元素来描述它的形状。其中,顶点为块体角点,表示空间中的单个位置,有  $X, Y, Z$  坐标值;棱边为连接两角点之间的线段;表面为由封闭棱边围成的外边界和0个内边界定义的二维多边形。于是,每个块体单元将被看作由若干多边形平面拼接成的一个凸多面体,如图1所示。

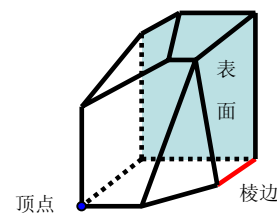
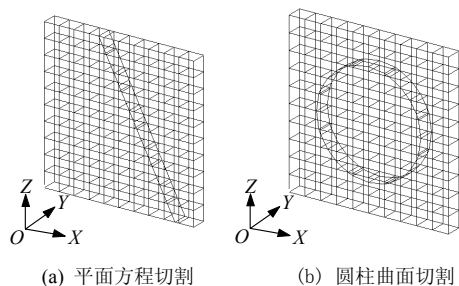


图1 不规则块体单元  
Fig.1 Irregular block element

为模拟裂隙面对完整岩体的切割过程,本研究发展了块体切割技术,可根据光滑曲面方程将任意凸多面体切割为2部分。例如,分别使用平面和圆柱曲面切割初始规则排列的10×10个正方体块体后生成的不规则块体,如图2所示。



(a) 平面方程切割 (b) 圆柱曲面切割

图 2 块体切割

Fig.2 Blocks cutting

在三维空间内, 每个圆盘裂隙面由 6 个参数定义: 中心位置坐标  $x_c, y_c, z_c$ , 圆盘直径  $R$  及产状 (倾向  $\varphi$ 、倾角  $\theta$ )。本研究中, 每个圆盘裂隙面的空间形态由以下平面和柱面 2 个控制方程确定:

$$A(X - x_c) + B(Y - y_c) + C(Z - z_c) = 0 \quad (3)$$

$$[A(X - x_c) + B(Y - y_c) + C(Z - z_c)]^2 = (X - x_c)^2 + (Y - y_c)^2 + (Z - z_c)^2 - R^2 \quad (4)$$

其中,

$$A = \cos \varphi \sin \theta, \quad B = \sin \varphi \sin \theta, \quad C = \cos \theta$$

当已知一个圆盘裂隙面的平面和柱面控制方程时, 即可利用块体切割技术, 实现该裂隙面对块体单元的切割。例如,  $Y = 0.5, (X - 5)^2 + (Z - 5)^2 = 3.3^2$  的圆盘裂隙面将与之相交的块体割成及切割后裂隙面两侧新生成的块体单元, 如图 3 所示。

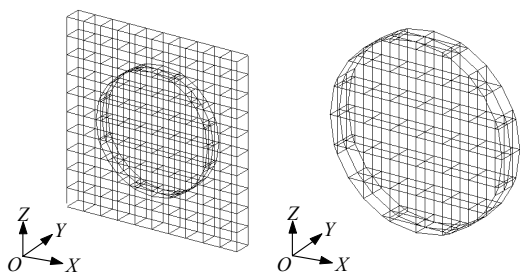


图 3 圆盘裂隙面切割块体

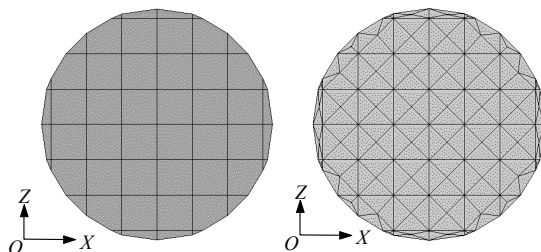
Fig.3 One disc fracture cuts blocks

### 2.3 裂隙单元及其网格划分

当一个块体单元被裂隙面切割后, 在切割产生的 2 新块体相邻面(接触面)之间, 可以产生一个裂隙单元。由于该裂隙单元与接触面形状完全相似, 可根据接触面上顶点和棱边的几何关系来描述裂隙单元的几何形状。由于每个裂隙单元为不规则的多边形, 通过借助裂隙单元的面中心点, 可对裂隙单元进行三角形平面单元的有限元网格划分。即, 每

个三角形有限元单元包括 2 个顶点和 1 个面中心。因此, 对于裂隙单元, 其有限元网格单元数目与裂隙单元的顶点数目相同。

例如,  $Y = 0.5, (X - 5)^2 + (Z - 5)^2 = 3.3^2$  的圆盘裂隙面切割正方体块体后, 在新块体之间产生的裂隙单元及其三角形单元的网格划分, 如图 4 所示。



(a) 圆盘裂隙面裂隙单元网格 (b) 三角形有限元网格

图 4 圆盘裂隙面网格划分

Fig.4 Mesh generation of the disc fracture

### 2.4 裂隙网络的计算机生成

为实现上述建模思想, 编写了三维离散裂隙网络的程序, 实现裂隙网络生成。

(1) 根据野外测量结果, 确定岩体的研究区域, 生成一个完整的岩体模型, 并根据岩体本身的几何特性进行初始网格划分。根据勘测所得数据, 运用统计学方法建立包括裂隙面的密度、迹长、产状和开度在内的各组裂隙几何参数的概率模型。

(2) 假定裂隙面在空间上为圆盘状, 首先利用式(1)获得每组优势裂隙面的数目, 然后利用Monte Carlo模拟原理生成该组裂隙中各裂隙面的几何参数。其中, 利用均匀分布随机数生成器, 随机生成服从均匀分布的圆盘中心点坐标; 利用迹长(或半迹长)的概率分布类型和分布参数, 根据式(2)随机生成圆盘的直径; 利用裂隙产状的分布特征和规律随机生成圆盘的倾向和倾角; 利用裂隙开度的统计规律随机生成圆盘的开度。

(3) 利用随机生成的各个裂隙圆盘的中心点坐标、倾向、倾角和圆盘直径或半径, 利用式(3), (4)生成一系列的平面方程和柱面方程, 逐个切割完整的岩体模型。

(4) 利用编写的程序, 根据块体单元的切割面自动生成三维裂隙网络系统, 并进行三角形单元的网格划分。最后将利用 Monte Carlo 方法生成的具有统计分布的开度赋予各个裂隙单元, 产生服从开度统计分布规律的裂隙面渗透系数。

例如，根据上述方法生成的由 2 组不同分布的 20 个圆盘裂隙面构成的三维裂隙网络系统，如图 5 所示。

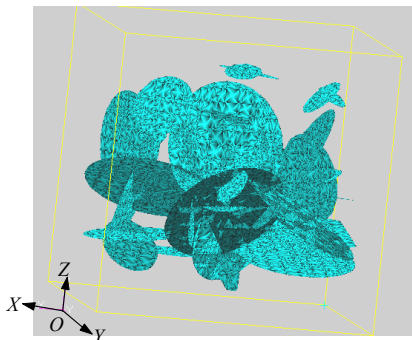


图 5 由 20 个圆盘裂隙面构成的三维裂隙网络系统

Fig.5 3D fracture network system composed of twenty disc fracture faces

### 3 裂隙网络渗流模型

本模型沿用了离散裂隙网络模型建模所依据的基本假定：(1) 裂隙岩体的渗流行为可以用裂隙几何形状的知识 and 单裂隙的导水率数据来进行预测；(2) 每一个单个的裂隙都具有规则的几何形状，其在渗流意义上被模拟为一对平行板；(3) 不考虑 2 条裂隙交线上的水头损失以及由于隙宽差异所引起的偏流现象。

在融合有限元和离散元方法特点基础上，发展了新型三维裂隙网络渗流模型来模拟稳定/非稳定渗流过程。

#### 3.1 裂隙中水流的运动规律

对于裂隙流而言，可认为渗流只在沿平行于裂隙面的方向发生，满足单裂隙水流的立方定律：

$$q = \frac{ge^3}{12\nu} J \tag{5}$$

式中：g为重力加速度，ν为水的运动黏滞系数，ē为裂隙的开度，J为水力梯度。

裂隙断面的平均流速  $V = \frac{q}{\dot{e}} = \frac{ge^2}{12\nu} J$ ，由  $u =$

$K_x \frac{\partial H}{\partial x}$ ， $v = K_y \frac{\partial H}{\partial y}$ ，可得裂隙的渗透系数  $K_x =$

$$K_y = \frac{ge^2}{12\nu}。$$

#### 3.2 渗流的基本微分方程

根据质量守恒和达西定律推出非稳定渗流的基本微分方程(不考虑垂直补给和汇源，渗流区域为D)

为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial K_x}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial K_y}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} &= S \frac{\partial H}{\partial t} \quad ((x, y) \in D) \\ H|_{t=0} &= H_0(x, y) \quad ((x, y) \in D) \\ H|_{\Gamma_1} &= \varphi(x, y) \quad ((x, y) \in \Gamma_1, t > 0) \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式中：H为水头函数； $K_x, K_y$ 分别为含水层在x, y方向的渗透系数； $H_0$ 为初始水头值； $\varphi(x, y)$ 为第一类边界条件 $\Gamma_1$ 上的已知水头函数；S为贮存系数，即含水层在水头(例如 1 m)改变下从单位截面积的含水层垂直柱体(高度为含水层厚度)中释放出来或进去的水量，各个被裂隙切割的岩体的贮存系数是各不相同的。

#### 3.3 有限元数值方法

由岩块与岩块之间切割面生成的裂隙面由若干三角形构成，因此采用三角形单元进行有限元数值计算。

令

$$h(x, y, t) = N_i(x, y)H_i + N_j(x, y)H_j + N_k(x, y)H_k \tag{7}$$

式中：i, j, k为三角形单元的3个节点； $N_i(x, y), N_j(x, y), N_k(x, y)$ 为单元e上的形函数。

将式(7)代入式(6)中，采用变分法并写成每个单元表示的离散形式，则有

$$\sum_{e=1}^M \left[ \iint \left( k_x \frac{\partial h^e}{\partial x} \frac{\partial N_i^e}{\partial x} + k_y \frac{\partial h^e}{\partial y} \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \right) dx dy + \iint S^e \frac{\partial h^e}{\partial t} N_i^e dx dy \right] = \sum_{e=0}^M \int q N_i ds \tag{8}$$

对每个单元e有

$$\iint_{\Delta e} \left( k_x \frac{\partial h^e}{\partial x} \frac{\partial N_i^e}{\partial x} + k_y \frac{\partial h^e}{\partial y} \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \right) dx dy + \iint_{\Delta e} S \frac{\partial h^e}{\partial t} N_i^e dx dy = \int_r q N_i^e ds \quad (l = i, j, k) \tag{9}$$

因此可以导出裂隙单元的渗流矩阵方程为

$$[S^e] \left\{ \frac{\partial H^e}{\partial t} \right\} + [K^e] \{H^e\} = \{Q^e\} \tag{10}$$

式中：[ $S^e$ ]为单元的贮存系数矩阵，[ $K^e$ ]为单元渗透矩阵。

对每一个裂隙三角形单元，建立一个局部坐标系，将空间裂隙面转化为二维面流。以三角形单元

的面心为坐标原点建立局部坐标系, 以面心到三角形单元某一节点的方向为  $\mathbf{x}'$ , 以垂直于三角形单元的方向为  $\mathbf{z}'$ , 通过右手螺旋法则生成  $\mathbf{y}'$  轴, 因此局部坐标系下节点  $\mathbf{z}'$  方向的坐标全为 0。

从全局坐标到局部坐标的转化公式为

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}' \\ \mathbf{y}' \\ \mathbf{z}' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \\ z-z_0 \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中:  $(x_0, y_0, z_0)$  为三角形单元的面心在全局坐标系下的坐标;  $l_i, m_i, n_i (i = 1, 2, 3)$  为局部坐标系;  $\mathbf{x}', \mathbf{y}', \mathbf{z}'$  为全局坐标系下的单位矢量。从而可以求得局部坐标系下的

$[S_1^e] =$

$$S \begin{bmatrix} \iint_{\Delta e} N_i N_i dx dy & \iint_{\Delta e} N_i N_j dx dy & \iint_{\Delta e} N_i N_k dx dy \\ & \iint_{\Delta e} N_j N_j dx dy & \iint_{\Delta e} N_j N_k dx dy \\ & & \iint_{\Delta e} N_k N_k dx dy \end{bmatrix}$$

对称

(12)

$$[K^e] = \frac{k}{4\Delta e} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ & & b_k b_k + c_k c_k \end{bmatrix}$$

对称

(13)

式中:  $[S_1^e]$  为局部坐标系下单元的饱和度矩阵;  $b_i, b_j, b_k, c_i, c_j, c_k$  均为与单元局部坐标系下节点坐标相关的常量;  $k$  为渗透系数。

### 3.4 动态松弛技术

程序计算时, 不组成总体的渗透矩阵, 而是采用传统离散元方法的计算思想, 以裂隙单元为单位, 采用动态松弛技术<sup>[13, 14]</sup>来求解每个裂隙单元的节点水头。

计算流程如图 6 所示。首先给定各个节点的初始  $H^e$  和  $Q^e$ , 应用式(10), 求出  $\frac{\partial H^e}{\partial t}$  的值, 对水头

$H^e$  进行欧拉积分, 当计算时间  $t$  小于所给定的总时间  $T$  时, 再对计算区域内各个节点循环计算, 便可得到一定时间  $T$  后各个节点水头分布。

采用这种动态松弛技术将稳态问题转化为非稳态问题进行数值计算, 对各个节点的水头  $H^e$  进行欧拉积分, 采用贮存系数  $[S]$  来吸收系统的能量, 系统由非稳态状态转变为稳态, 因此此种有限元解法也可以用于求解稳态问题。

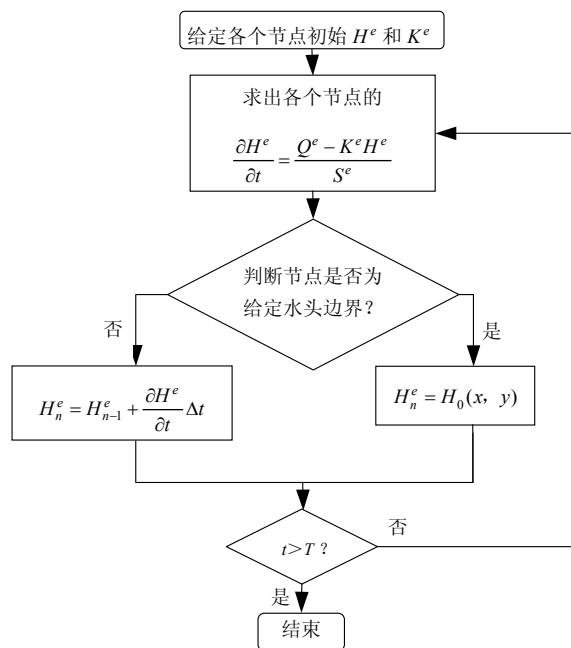


图 6 有限元数值计算流程图  
Fig.6 Flowchart of finite element computation

采用动态松弛技术, 不组成渗流区域的总体渗透矩阵  $[K]$ , 有以下特点:

(1) 避免了由于孤立裂隙存在所导致的解的收敛性问题。由于是对每个裂隙面分别进行迭代计算, 无需形成总刚度矩阵, 孤立裂隙在整个计算过程中将不起作用, 因此不影响解的收敛性。而且根据计算结果, 还可以准确分析出计算模型中孤立裂隙的数目及位置。

(2) 减少所需的计算机内存。由于不需要组成总体渗透矩阵, 因不受单元数目的限制, 避免产生因单元节点数目过多, 组成的总体渗透矩阵过大, 而计算机内存不能支持的现象。

(3) 有利于进行并行计算。由于该种计算方法是对每个节点分别进行迭代计算, 因此有利于进行并行计算, 减少计算时间, 提高效率。

## 4 算 例

### 4.1 算例一

为了验证程序的正确性, 首先计算 3 组相互正交的裂隙组成的正交裂隙网络<sup>[22]</sup>。计算模型的参数如表 1 所示。每个裂隙面单元都是边长为 100 m 的正方形, 且裂隙隙宽都为 0.001 mm, 没有被填充。每个裂隙面剖分为  $10 \times 10 \times 4$  个三角形单元, 共 1 200 个三角形单元, 631 个节点。11~19 为  $z = 50$  m 平面四周和中心的 9 个节点(见图 7)。边界条件为: 上



表1 计算模型水力参数

Table 1 Hydraulic parameters of calculation model

黏性系数 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	重力加速度 $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	缝宽 $b$ /m	密度 $\rho$ $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	贮存系数 $S$
$1.0 \times 10^6$	9.8	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^3$	$6.9 \times 10^{-5}$

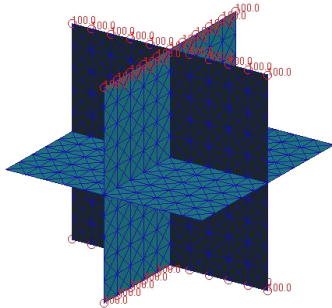


图7 裂隙网络图

Fig.7 Fracture network chart

端和底端边界的水头为已知  $H_1 = 200 \text{ m}$ ,  $H_0 = 100 \text{ m}$ ; 根据式(6)所编制的程序对以下工况进行计算, 上端边界水头下降速度为  $1 \text{ m/d}$ , 底端边界水头均不变。从而应用上述有限元方法可求得上述图例的结果和节点初始时刻及非稳定渗流各个时刻的水头值(见表2), 其80 d时水头分布图如图8所示。

表2 数值解计算结果

Table 2 Numerical solution of calculation results

组号	初始时刻/(10 <sup>2</sup> m)		20 d时/(10 <sup>2</sup> m)		40 d时/(10 <sup>2</sup> m)	
	数值解	文献解	数值解	文献解	数值解	文献解
11	1.495	1.486	1.400	1.390	1.300	1.292
12	1.495	1.442	1.400	1.353	1.300	1.265
13	1.495	1.488	1.400	1.390	1.300	1.293
14	1.495	1.442	1.400	1.354	1.300	1.265
15	1.495	1.466	1.400	1.373	1.300	1.280
16	1.495	1.465	1.400	1.372	1.300	1.280
17	1.495	1.465	1.400	1.372	1.300	1.280
18	1.495	1.465	1.400	1.372	1.300	1.280
19	1.495	1.465	1.400	1.372	1.300	1.280

组号	60 d时/(10 <sup>2</sup> m)		80 d时/(10 <sup>2</sup> m)	
	数值解	文献解	数值解	文献解
11	1.200	1.195	1.100	1.097
12	1.200	1.177	1.100	1.088
13	1.200	1.195	1.100	1.098
14	1.200	1.177	1.100	1.088
15	1.200	1.186	1.100	1.093
16	1.200	1.186	1.100	1.093
17	1.200	1.186	1.100	1.093
18	1.200	1.186	1.100	1.093
19	1.200	1.186	1.100	1.093

注: 文献解为何杨等<sup>[22]</sup>的计算结果。

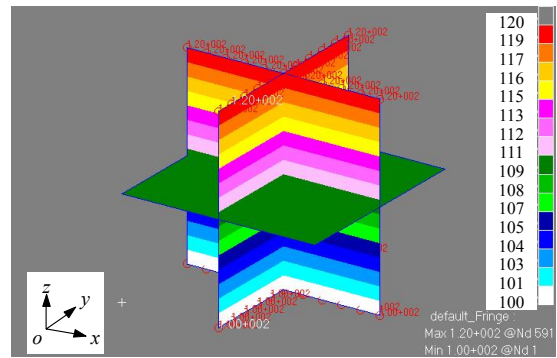


图8 80 d时水头分布图(单位: m)

Fig.8 Distribution of water head at 80 d(unit: m)

从图8和表2的计算结果可以看出, 采用上述有限元方法编写的程序计算的数值解与何杨等<sup>[22]</sup>所得的数值解误差小于3.685%, 由于采用数目较多的三角形单元, 数值解的精度也相对较高。

#### 4.2 算例二

为了验证程序的适用性, 进行了随机裂隙网络的稳定渗流数值模拟。在  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  区域随机分布2组裂隙, 裂隙的倾向角服从正态分布, 迹长服从负指数分布, 开度服从正态分布, 其各个参数的概率分布函数如表3所示。

表3 裂隙面参数分布函数的概率参数

Table 3 Probability parameters of fracture distribution functions

组号	条数	倾向角		开度		平均迹长/m
		均值/(°)	方差	均值/(°)	方差	
1	10	136.2	18.6	0.005	0.001	3.42
2	10	56.6	11.5	0.005	0.001	3.44

将表3的数据, 输入编写的程序即可模拟生成该区域内分布的裂隙网络, 如图9所示。为了便于计算, 取裂隙的  $y$  方向宽度为  $1 \text{ m}$ , 该裂隙网络共划分为  $1040$  个三角形单元,  $722$  个节点。

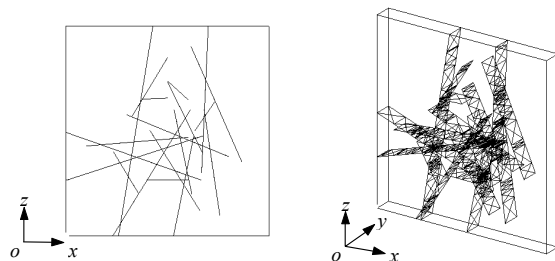
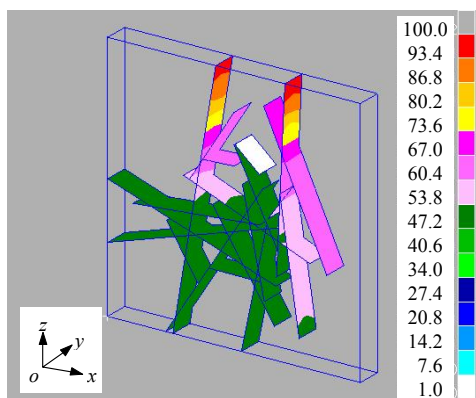


图9 含有2组裂隙的裂隙网络

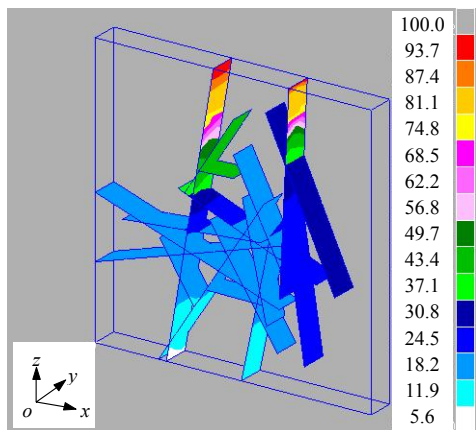
Fig.9 Fracture network with two sets of fractures

给定裂隙网络的边界条件为: 上部  $z = 10 \text{ m}$  处水头边界  $H_0 = 100 \text{ m}$ , 底部  $z = 0 \text{ m}$  处流量为  $Q = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ , 贮存系数  $S = 5.0 \times 10^{-3}$ , 利用编写的程序进行计算。

利用动态松弛技术进行数值计算, 裂隙网络的水头分布云图如图 10(a)所示, 可以看出该裂隙网络中有一条裂隙的水头值为 0, 因此可判定该裂隙为孤立裂隙。删除该条裂隙, 重新进行计算, 得到如图 10(b)所示的水头分布云图。



(a) 含孤立裂隙



(b) 不含孤立裂隙

图 10 裂隙网络的水头分布云图(单位: m)

Fig.10 Nephograms of water head distribution of fracture network(unit: m)

## 5 结 论

本文提出了一种三维裂隙岩体模拟技术。首先, 根据有效裂隙面的密度、产状、位置、大小和开度的统计分布规律, 使用蒙特卡罗模拟技术将完整岩石切割为三维不规则块体单元。然后, 根据相邻块体单元间产生的单裂隙面, 构建三维裂隙网络系统, 并附加各裂隙单元的水力特性。这种模拟技术可同时实现裂隙面切割岩体时块体单元和裂隙单

元的生成, 并确保裂隙面分布模拟的拟真性和自动性。

本文发展了新型三维裂隙网络渗流模型来模拟稳定/非稳定渗流过程。一方面, 本文采用传统三维裂隙网络渗流有限元方法的建模思想, 以单个裂隙面内水流基本公式为基础, 运用变分原理导出裂隙单元的渗流矩阵方程; 另一方面, 与传统有限元通过组装总体渗透矩阵, 求解代数方程组来求出渗流场水头分布的方法不同, 本文采用传统离散元方法的计算思想, 以裂隙单元为单位, 采用动态松弛技术来求解每个裂隙单元的节点水头。由于动态松弛技术可将静态问题转化为动态问题处理, 并采用显式算法求解, 这种渗流模型可以同时计算静态和动态问题, 无需求解总体渗透矩阵。这不仅避免了由于不连通裂隙(孤立裂隙)存在所导致的求解收敛性问题, 而且还可以根据计算结果准确分析孤立裂隙的数目及位置。

由于该种模型是基于岩块网格划分以及岩体内部力学行为分析建立的三维裂隙网络系统, 同时采用动态松弛技术进行渗流计算, 因此为下一步渗流应力耦合作用的研究奠定了基础。

## 参考文献(References):

- [1] LONG J C S, REMER J S, WILSON C R, et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(3): 645 - 658.
- [2] 肖裕行, 王泳嘉, 卢世宗, 等. 裂隙岩体水力等效连续介质存在性的评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(1): 75 - 80.(XIAO Yuxing, WANG Yongjia, LU Shizong, et al. Fractured rock hydraulic equivalent continuous evaluation of the existence of media[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(1): 75 - 80.(in Chinese))
- [3] TSANG Y W, TSANG C F. Channel model of flow through fractured media[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(3): 467 - 479.
- [4] 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[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(12): 2 015 - 2 026.(SONG Xiaochen, XU Weiya. Numerical model of three-dimensional discrete fracture network for seepage in fractured rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(12): 2 015 - 2 026.(in Chinese))
- [5] 毛昶熙, 陈 平, 李祖贻, 等. 裂隙岩体渗流计算方法研究[J]. *岩土工程学报*, 1991, 13(6): 1 - 10.(MAO Changxi, CHEN Ping, LI Zhuyi, et al. Research on fractured rock mass seepage calculation method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 13(6): 1 - 10.(in Chinese))

- [6] 王恩志, 王洪涛. 双重裂隙系统渗流模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 400 - 406.(WANG Enzhi, WANG Hongtao. On seepage model for rock mass of double fracture system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(4): 400 - 406.(in Chinese))
- [7] 赵红亮, 陈剑平. 裂隙岩体三维网络流的渗透路径搜索[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 622 - 627.(ZHAO Hongliang, CHEN Jianping. Searching for seepage path of 3D network in fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 622 - 627.(in Chinese))
- [8] JING L. A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. International Journal of Rock Mechancis and Mining Sciences, 2003, 40(3): 283 - 353.
- [9] 曹阿静, 许梦国. 裂隙岩体渗流与应力耦合有限元分析[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(3): 5 - 8.(CAO Ajing, XU Mengguo. The coupling analysis of perm eating flow and stress in fissured rock mass by finite element[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(3): 5 - 8.(in Chinese))
- [10] IVARS D M. Water inflow into excavations in fractured rock—a three-dimensional hydro-mechanical numerical study[J]. International Journal of Rock Mechancis and Mining Sciences, 2006, 43(5): 705 - 725.
- [11] 杜延龄, 许国安. 渗流分析的有限元法和电网络法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.(DU Yanling, XU Guoan. Flow analysis of the finite element method and electricity network[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1992.(in Chinese))
- [12] 王 媛, 速宝玉. 裂隙岩体渗流模型综述[J]. 水科学进展, 1996, 7(3): 276 - 282.(WANG Yuan, SU Baoyu. Comment on the models of seepage flow in fractured rock masses[J]. Advances in Water Science, 1996, 7(3): 276 - 282.(in Chinese))
- [13] 李世海, 汪远年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 642 - 3 651.(LI Shihai, WANG Yuannian. Selection study of computational parameters for DEM in geomechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 642 - 3 651.(in Chinese))
- [14] DAY A S. An introduction to dynamic relaxation[J]. The Engineering, 1965, 219(29): 218 - 221.
- [15] 于青春, 刘丰收, OHNISHI Y. 三岩体非连续裂隙网络三维面状渗流模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 662 - 668.(YU Qingchun, LIU Fengshou, OHNISHI Y. Three-dimensional planar model for fluid flow in discrete fracture network of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 662 - 668.(in Chinese))
- [16] ODA M. Fabric tensor for discontinuous geological materials[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(4): 96 - 108.
- [17] FISHER R A. Dispersion on a sphere[C]// Proceedings of the Royal Society. London: [s. n.], 1953: 295 - 305.
- [18] 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 Yaoru, YANG Qiang, QIN Zhenchao. Parallel numerical simulation of in fractured rock mass based on statistic model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 736 - 742.(in Chinese))
- [19] 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): 2 564 - 2 569.(LI Xinqiang, YANG Songqing, WANG Xiaogang. 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): 2 564 - 2 569.(in Chinese))
- [20] ROBERTSON A. The interpretation of geological factors for use in slope stability[C]// Proceedings of the Symposium on the Theoretical Background to the Planning of Open Pit Mines with Special Reference to Slope Stability. Johannesburg: South African Institute for Mining and Metallurgy, 1970: 55 - 77.
- [21] SNOW D T. The frequency and apertures of fractures in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1970, 21(7): 23 - 40.
- [22] 何 杨, 柴军瑞, 唐志立, 等. 三维裂隙网络非稳定渗流数值分析[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2007, 22(3): 338 - 344.(HE Yang, CHAI Junrui, TANG Zhili, et al. Numerical analysis of 3D unsteady seepage through fracture network in rock mass[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 2007, 22(3): 338 - 344.(in Chinese))