

三维随机裂隙岩体渗流分析的块体单元法

殷德胜, 汪卫明, 陈胜宏

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 岩体中的裂隙分布具有随机性, 且渗流主要通过裂隙面进行。运用蒙特卡罗法模拟生成岩体中的随机裂隙面, 基于矢体的概念, 实现了包括凹块体和多连通体在内的三维随机裂隙岩体的块体单元自动识别。假定岩块不透水、渗流仅通过裂隙面进行, 建立了三维随机裂隙岩体渗流分析的块体单元法。通过算例分析, 验证了所提方法的准确性和有效性。

关键词: 岩体; 随机; 裂隙; 渗流; 块体单元法

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

Block element method for seepage analysis in three dimensional random fracture network

YIN De-sheng, WANG Wei-ming, CHEN Sheng-hong

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Fractures in rock masses are randomly distributed; and the seepage in the rock masses mainly happens in these fractures. The Monte Carlo method is adopted to generate the stochastic fracture network firstly. Then, on the base of the theory of directed body, the automatic identification method for three dimensional network with random fractures is realized, including the concave and multi-connected blocks. Next, based on the assumption that the intact rock is impervious and the water flows only along the fractures, the block element method for seepage analysis of three dimensional network with random fractures is established. Finally, two examples are studied to prove the precision and validity of this method.

Key words: rock mass; random; fractures; seepage; block element method

1 引言

岩体是一种由断层、节理和裂隙等结构面切割完整岩石组成的不连续介质。这些结构面不仅是岩体中的软弱面, 且由于其渗透系数通常远大于完整岩石, 故它们也是主要的渗流通道。在渗流分析中, 这些结构面起控制作用。据此, 文献[1-3]在假定岩块不透水、渗流仅通过结构面进行的基础上, 建立了一种与弹黏塑性块体理论^[4]相配套的渗流分析方法, 配合三维岩石块体系统的自动识别前处理器^[5], 该方法可对含断层、夹层等大型结构面的岩体进行渗流分析。

岩体中还含有不计其数的裂隙等小型结构面。它们的存在, 使岩体渗流往往表现出显著的非连续

性、非均匀性和各向异性。所以, 对岩体进行渗流分析, 就不能忽略裂隙等小型结构面的影响。

经典渗流理论是以连续介质假定为基础, 把实际离散型的多孔介质抽象为由表征单元体组成的连续介质。然而裂隙岩体中的渗流和传统的多孔介质渗流存在本质上的差别, 这种差别主要表现在各种尺度上存在的非均匀性。归纳现有的研究成果, 裂隙岩体渗流分析的数学模型大致可以分为以下3种模型: 等效介质模型、裂隙网络非连续介质渗流模型和双重介质渗流模型^[6-7]。

把裂隙的透水性按流量等效原则均化到岩石中, 得到以渗透张量表示的等效连续介质模型。该模型使用方便, 但在特定的情况下, 采用此模型可能导致错误的分析结果; 双重介质模型中考虑了岩

石裂隙和岩石孔隙间的水交换,是切合实际的模型,但目前实施的难度较大;裂隙网络模型比连续介质模型更接近实际,它忽略岩石的透水性,认为水只在裂隙网络中流动^[6]。本文采用裂隙网络模型。

近年来,采用裂隙网络模型并结合有限元法模拟岩体渗流也得到了广泛的应用,但主要集中于二维情况^[8-10],对三维问题的研究较少。主要原因在于岩体中裂隙面的存在形式多种多样、数目巨大、规模不一,现有的有限元前处理器几乎无法给含有大量裂隙面的岩体试件进行网格剖分。为此,其他数值方法被引入到裂隙岩体的渗流分析中。宋晓晨等^[11]、李新强等^[12]运用边界元法进行裂隙岩体的渗流分析,取得一定的成果,其基本思想都是将三维裂隙渗流问题转换至二维甚至一维问题,降低了复杂性。李树忱等^[13]应用无网格法来求解非均质岩体和节理裂隙岩体的渗流问题,冯学敏等^[14]提出了裂隙网络岩体渗流的复合单元法。这两种方法均将复杂的前处理工作转换为复杂的计算工作,给出了解决裂隙岩体渗流问题的新思路。

本文在三维随机裂隙岩体块体自动识别^[15]的基础上,结合渗流分析的块体单元法,完成了对含有裂隙网络的岩体的渗流分析。算例表明了该方法的准确性和有效性。

2 裂隙岩体块体识别

作为本文研究的准备工作,我们研制了三维随机裂隙岩体的块体自动识别的前处理器。其基本思想为:首先运用蒙特卡罗法^[16]产生随机变量来模拟各组裂隙的条数、位置、大小和产状等要素;然后根据结构面间的几何拓扑关系,利用矢面、矢体的概念,按照点、线、面、体的顺序生成块体系统。

2.1 点的生成

点由3个或3个以上的平面相交而得,所生成的点应满足点在计算域内且点在结构面内部。

2.2 矢边的识别

对所有位于同一条直线(两结构面的交线)上的点进行排序,可生成所有的边,然后通过计算其长度和方向得到矢边信息。

2.3 矢面的识别

对所有位于同一结构面上的有效边,按照逆时针旋转生成内角最小的原则,进行首尾相连排序组合,当矢边组合闭合时,即成一个矢面,并根据矢面的正负、位置找出矢面间的包含关系,形成复合矢面。

2.4 矢体的识别

对所有有效矢面,按照绕公共边逆时针旋转形成内角最小的原则,进行首尾相连排序组合。当某个矢面组合已经闭合,即生成一个矢体。同理,可根据矢体的正负、位置,找出矢体间的包含关系,被完全包含的矢体是无用块体,删除即可。

用一个含三组裂隙的算例说明如何在生成裂隙网络后实现块体识别。取边长为5 m的立方体试件,假设裂隙面为圆盘形,密度服从泊松分布,迹长服从负指数分布,产状服从Fisher分布。按照表1的参数,用蒙特卡罗法可生成裂隙网络如图1所示,搜索出所有的块体分布如图2所示。

表1 裂隙参数
Table 1 Parameters of fractures

裂隙组号	密度 (条/m ³)	迹长 μ /m	产状		
			η	倾向/(°)	倾角/(°)
1	0.5	3.0	6	0	20
2	0.6	3.5	7	60	70
3	0.5	2.0	7	180	70

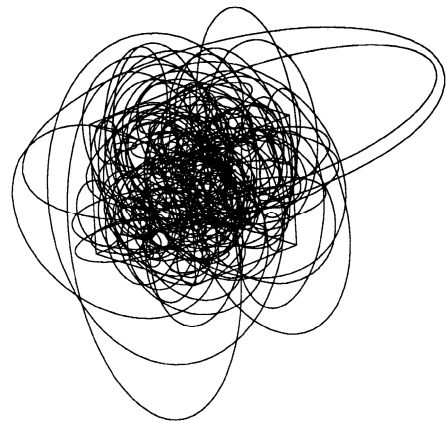


图1 裂隙网络图

Fig.1 Fracture network diagram

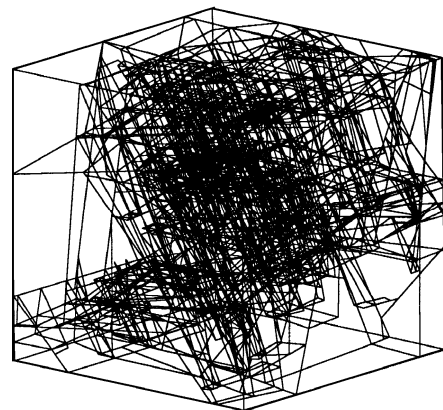


图2 三维块体系统线框图

Fig.2 The wire frame of 3D block system

3 渗流分析的块体单元法

根据达西定律及水流连续性方程, 稳定渗流的基本微分方程表示为

$$\{S\}^T [k] \{S\} \Phi = f \quad (1)$$

式中: $\{S\}$ 为微分算子; $[k]$ 为渗透张量。

$$\{S\} = [\partial/\partial x \quad \partial/\partial y \quad \partial/\partial z] \quad (2)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

常见的边界条件有如下几类:

(1) 第 1 类边界条件 (Dirichlet 条件)

$$\Phi|_{\Gamma_1} = \Phi \quad (4)$$

(2) 第 2 类边界条件 (Neumann 条件)

$$\{n\}^T [k] \{S\} \Phi|_{\Gamma_2} = q \quad (5)$$

(3) 自由面边界条件

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= Z \\ \{n\}^T [k] \{S\} \Phi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(4) 溢出面边界条件

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= Z \\ \{n\}^T [k] \{S\} \Phi &\neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $\{n\}$ 为边界的单位法线向量。

$$\{n\}^T = [L_x \quad L_y \quad L_z] \quad (8)$$

根据变分原理, 上述定解问题等价于求能量泛函的极值问题, 即

$$I(\Phi) = \iiint_R \left(\frac{1}{2} (\{S\} \Phi)^T [k] (\{S\} \Phi) + f \Phi \right) dR - \iint_{\Gamma} q \Phi d\Gamma = \min \quad (9)$$

通常假定 $k_x = k_y = k_z = k$, 同时按基本假定, 岩石不透水, 即在岩块中 $k = 0$ 。另外, 因 Φ 是标量, 故函数 $I(\Phi)$ 可在各结构面的局部坐标系中给出。由于结构面厚度与岩块尺度相比很小, 故可假定:

$$\partial \Phi / \partial z_j = 0 \quad (10)$$

从而得出三维网络无压渗流分析的变分方程:

$$I(\Phi) = \sum_{j=1}^{ns} \iint \left(\frac{1}{2} (\{S\}_j \Phi)^T [k]_j (\{S\}_j \Phi) + f \Phi \right) dx_j dy_j - \int_{\Gamma} q \Phi d\Gamma = \min \quad (11)$$

微分算子 $\{S\}_j$ 和渗透张量 $[k]_j$ 为

$$\left. \begin{aligned} \{S\}_j &= \begin{bmatrix} \partial/\partial x_j & \partial/\partial y_j \end{bmatrix} \\ [k]_j &= t \begin{bmatrix} k_j & 0 \\ 0 & k_j \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

节理裂隙等结构面通常被认为是无填充的、有一定等效开度的高孔隙率的实体介质^[6]。式(12)中 k_j 为结构面的导水系数, t 为水力开度。

将方程(11)按照有限单元方法进行离散。对单元 e 的等参单元插值为

$$\Phi = [N] \{\bar{\Phi}\} \quad (13)$$

各单元的导水矩阵 $[h]$ 和自由项 $\{f\}$ 的表达式为

$$[h] = \iint_e (\{S\}_j [N])^T [k]_j (\{S\}_j [N]) dx_j dy_j \quad (14)$$

$$\{f\} = \iint_e [N] f dx_j dy_j - \int_{\Gamma} [N] q d\Gamma \quad (15)$$

代入式(11), 取其变分等于 0, 可推出:

$$[H] \{\Phi\} = \{F\} \quad (16)$$

整体导水矩阵 $[H]$ 和自由项 $\{F\}$ 可由各单元的导水矩阵 $[h]$ 和自由项 $\{f\}$ 组合而成。

在此基础上, 运用张有天等^[17]提出的初流量法, 即可建立完整的三维网络无压渗流分析体系。

4 算例分析

4.1 算例 1

取一边长为 5 m 的立方形岩体试件, 其中分布有 3 组互相垂直、间距均匀且都为 1 m 的贯穿性裂隙, 坐标系和得到的块体系统如图 3 所示。在 $x = 0$ m 的左边界面上施加定水头 $h_1 = 10$ m, 在 $x = 5$ m 的右边界面上施加定水头 $h_2 = 5$ m, 上下前后四面为不透水边界, 裂隙的渗透系数取 0.01 m/s。由所给计算条件可知, x 向的平均水力梯度为 1.0, 得到渗流场水头分布如图 4 所示, 证明了计算的准确性。

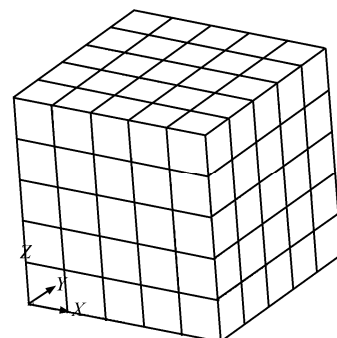


图 3 算例 1 块体系统图

Fig.3 The block system diagram of example 1

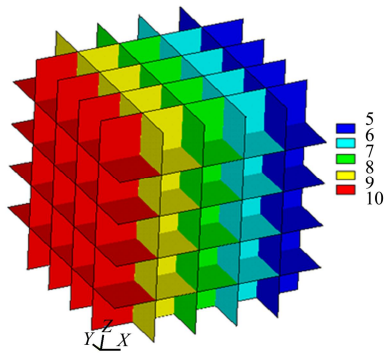


图4 算例1中裂隙面的水头分布图(单位: m)
Fig.4 Hydraulic potential distribution of fracture in example 1 (unit: m)

4.2 算例2

在第2节块体识别的算例模型中施加和算例1等同的边界条件,得到水头分布如图5所示,并给出 $Z=2.5$ m、 $Y=2.5$ m两个剖面的坡降平切图如图6、7所示。可以看出,水力坡降主要指向右方、下方,但某些部位有所偏转,这是用等效连续介质模型所无法表现的结果。

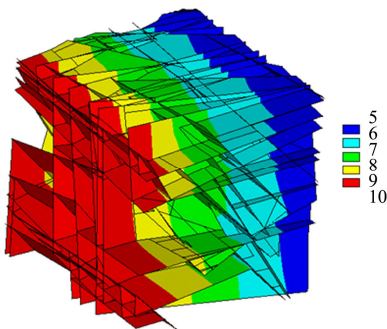


图5 算例2中裂隙面的水头分布图(单位: m)
Fig.5 Hydraulic potential distribution of fracture in example 2 (unit: m)

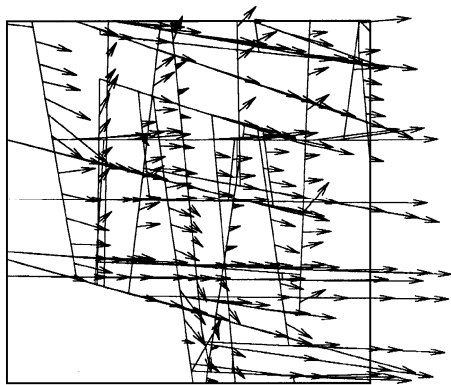


图6 算例2中 $Z=2.5$ m平切面的水力坡降矢量图
Fig.6 Hydraulic gradient vector at $Z=2.5$ m in example 2

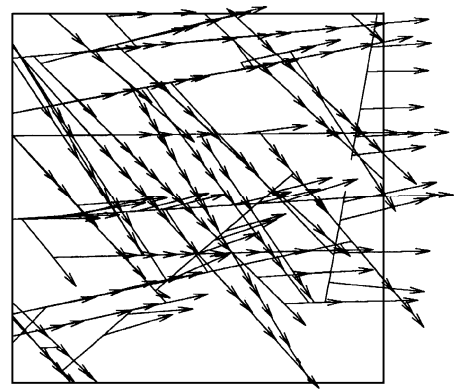


图7 算例2中 $Y=2.5$ m纵剖面的水力坡降矢量图
Fig.7 Hydraulic gradient vector at $Y=2.5$ m in example 2

5 结 语

利用矢体的概念,并考虑了可能存在的多连通面、多连通体的情况,完成了三维岩石随机裂隙网络块体的自动识别,这为后续的裂隙岩体的应力、渗流分析准备了完备的前处理器。假定岩石块体完全不透水,渗流仅通过裂隙面进行,提出了随机裂隙岩体渗流分析的块体单元法。算例分析结果表明了本文方法的正确性。

得到裂隙岩体的渗透特性后,可以方便地进行相应的岩体等效渗透张量、渗流代表性单元体积的存在性问题的研究。另外,实际上裂隙中的水流极不均匀^[6]原因在于,裂隙面的隙宽是随着裂隙面上的应力的变化而变化。因此,有必要对裂隙岩体进行渗流、应力的耦合分析。

参 考 文 献

- [1] 陈胜宏. 块状结构岩体渗流分析方法的探讨[J]. 水利学报, 1991, (10): 27-31.
CHEN Sheng-hong. The seepage analysis method study on block construction for rock mass[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, (10): 27-31.
- [2] 汪卫明, 余成学, 徐明毅, 等. 块状结构岩体的无压渗流分析方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 32(1): 64-67.
WANG Wei-ming, SHE Cheng-xue, XU Ming-yi, et al. Unconfined seepage analysis method for blocky rock mass[J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1998, 32(1): 64-67.
- [3] 汪卫明, 徐明毅, 陈胜宏. 复杂边界条件下的岩体网络渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 473-476.

- WANG Wei-ming, XU Ming-yi, CHEN Sheng-hong. Analysis method of network seepage for block rock mass with complicated boundary condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(4): 473—476.
- [4] 陈胜宏. 岩体的广义弹粘塑性块体理论[J]. 水利学报, 1996, (1): 79—84.
- CHEN Sheng-hong. A general formulation of elastic-viscoplastic block theory of rock mass[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1996, (1): 79—84.
- [5] 汪卫明, 陈胜宏. 三维岩石块体系统的自动识别方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(5): 51—55.
- WANG Wei-ming, CHEN Sheng-hong. Automatic identification method for three-dimensional rock block systems[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering**, 1998, 31(5): 51—55.
- [6] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [7] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [8] 王恩志, 杨成田. 裂隙网络地下水流数值模型及非连通裂隙网络水流的研究[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(1): 12—14.
- WANG En-zhi, YANG Cheng-tian. Numerical model of groundwater flow in fracture networks and water flow in disconnected fracture networks[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 1992, 19(1): 12—14.
- [9] 柴军瑞, 仵彦卿. 岩体多重裂隙网络渗流模型研究[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(2): 33—36.
- CHAI Jun-rui, WU Yan-qing. On seepage model for rock mass of multi-level fracture network[J]. **Coal Geology & Explora Geology**, 2000, 28(2): 33—36.
- [10] 黄勇, 周志芳. 岩体渗流模拟的二维随机裂隙网络模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 92—94.
- HUANG Yong, ZHOU Zhi-fang. 2D stochastic fracture network model for simulation of seepage through fissured rocks[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2004, 32(1): 92—94.
- [11] 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(II): 稳定渗流计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2021—2026.
- SONG Xiao-chen, XU Wei-ya. Numerical model of three-dimensional discrete fracture network for seepage in fractured rocks (II) computation of steady flow[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(12): 2021—2026.
- [12] 李新强, 陈祖煜. 三维裂隙网络渗流计算的边界元法及程序[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(2): 81—87.
- LI Xin-qiang, CHEN Zu-yu. Boundary element method for 32D fracture network seepage flow and its programming[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2006, 4(2): 81—87.
- [13] 李树忱, 李术才, 隋斌, 等. 岩体渗流分析的无网格方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 256—260.
- LI Shu-chen, LI Shu-cai, SUI Bin, et al. The meshless method for analyzing seepage of rockmass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 256—260.
- [14] 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 Xue-ming, CHEN Sheng-hong. Composite element method for seepage characteristics study on rock masses whth complicates fracture[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 918—924.
- [15] 殷德胜, 汪卫明, 陈胜宏. 三维岩石随机裂隙网络的块体自动识别[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(5): 72—74.
- YIN De-sheng, WANG Wei-ming, CHEN Sheng-hong. Block system's automatic identification method for three dimensional network of random discontinuities[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2008, 25(5): 72—74.
- [16] 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 Jian-ping. 3D net work numerical modeling technique for random discontinuities of rock mass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 397—402.
- [17] 张有天, 陈平, 王镭. 有自由面渗流问题分析的初值流量法[J]. 水利学报, 1988, (8): 18—26.
- ZHANG You-tian, CHEN Ping, WANG Lei. Initial flow method for seepage analysis with free surface[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1988, (8): 18—26.