

岩体渗流模拟的二维随机裂隙网络模型

黄 勇,周志芳

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 基于裂隙的走向、迹长、间距和张开度的统计特征,应用 Monte-Carlo 方法随机生成裂隙网络系统.依据裂隙网络交叉点处的流量守恒原理,推导了裂隙岩体网络渗流数学模型,并提出模型的求解方法.通过一个算例验证了模型的合理性.此外,讨论了裂隙岩体渗流场随裂隙张开度均值和方差的变化规律,确定了模型的适用范围,为裂隙岩体渗流场的模拟提供了一种方法.

关键词 随机裂隙网络;数学模型;Monte-Carlo 方法;张开度

中图分类号 :TU45 ;P64 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2004)01-0091-04

经典的渗流理论以连续介质假定为基础,理论较为成熟和完善,但它不能反应岩体中单裂隙的控水特征.事实上,岩体是由裂隙切割的岩块构成的实体,岩块本身的渗透性很微弱,在很多情况下可以忽略其渗透性,因而岩体渗流实质上是裂隙网络渗流问题.裂隙网络渗流的研究始于 20 世纪 50 年代,一般是以单裂隙立方体定律为基础进行研究的,如 Wittke 的线索模型.根据节点流量守恒、回路压力守恒和条形单元水压差守恒建立方程.王恩志^[1]首次应用图论来阐述裂隙网络的基本构成和特点;毛昶熙等^[2]将裂隙系统视为电阻网络或水管网,从而借助水管网原理来求解裂隙岩体渗流问题.C. Cacas 等^[3]应用随机离散网络模型模拟裂隙岩体渗流场及溶质运移规律,得到了较满意的结果.本文基于裂隙几何要素的统计特征,应用 Monte-Carlo 方法^[4]生成裂隙网络,并建立了裂隙网络渗流数学模型.

1 裂隙网络渗流模型的建立

1.1 模型假定

模型假定如下 (a) 水流为层流,符合达西定律 (b) 把岩块看做是不透水的介质,裂隙网络系统作为储集和运移地下水的场所,水流在裂隙网络中流动 (c) 网络中裂隙交叉处的流量均衡 (d) 裂隙在岩体中相互切割成多边形,并沟通到边界.

1.2 模型建立及算法

岩体裂隙网络系统地下水流问题的定量描述不宜采用连续介质方法,而要运用非连续介质的网络系统研究方法.把裂隙交叉处作为节点,节点与节点之间的裂隙称为线单元,每个线单元流向共同节点的流量等于零(稳定流)或等于储存量的变化量(非稳定流),依次建立渗流方程式,结合初始条件和边界条件就构成了裂隙网络地下水流数学模型^[5].图 1 是岩体裂隙网络示意图,图中虚线圈为裂隙表征单元的均衡域.以 i 点为中心形成一表征单元域,为取包含 i 节点,且通过各衔接线元的中点,作一闭合曲线而形成.在表征单元域内,某一时刻流进和流出各衔接线元的流量为 $q_j (j = 1, 2, \dots, N')$,表征单元域中每个线元上的垂向补给量为 $w_j (j = 1, 2, \dots, N')$, i 节点上源(汇项)为 Q_i .则单位时间内,流进和流出表征单元域的流量差值等于表征单元域内储存量的变化量,则表征单元域内的地下水均衡方程式为

$$\left(\sum_{j=1}^{N'} q_j \right)_i - \left(\sum_{j=1}^{N'} w_j \right)_i + Q_i = - d_i \frac{dh_i}{dt} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

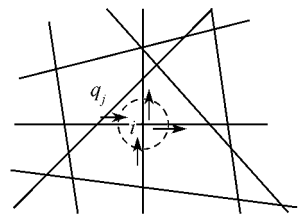


图 1 裂隙单元均衡示意图

Fig.1 Sketch of equilibrium of fracture elements

式中: h_i ——节点上的水头; $d_i = \frac{S_i}{2} \sum_{j=1}^N b_j l_j$, S_i 为裂隙以 i 点为中心的表征单元域内弹性储水(释水)系数。

式(1)中, 如果不考虑垂向补给量 w_j , 并设每个节点有 4 个线元与之连接(见图 2), 即

$$\left(\sum_{j=1}^4 q_j \right)_i + Q_i = -d_i \frac{dh_i}{dt} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

对内节点 i , 式(2)左端第 1 项

$$\sum_{j=1}^4 q_j = q_{i,i+1} + q_{i,i+2} + q_{i,i+3} + q_{i,i+4}$$

由单裂隙立方体定律有

$$q_{i,i+1} = \frac{gb_{i,i+1}^3}{12\nu_w} \cdot \frac{h_{i+1} - h_i}{l_{i,i+1}} \dots q_{i,i+4} = \frac{gb_{i,i+4}^3}{12\nu_w} \cdot \frac{h_{i+4} - h_i}{l_{i,i+4}} \quad (4)$$

式中: g ——重力加速度; b ——裂隙的宽度; l ——线单元的长度; h ——水头, $h = Z + P/\rho$ (P 为渗透水压, Z 为水质点的位置高度); ν_w ——水的运动粘滞系数。由式(3)(4)知

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^4 q_j = & - \left(\frac{gb_{i,i+1}^3}{12\nu_w l_{i,i+1}} + \frac{gb_{i,i+2}^3}{12\nu_w l_{i,i+2}} + \frac{gb_{i,i+3}^3}{12\nu_w l_{i,i+3}} + \frac{gb_{i,i+4}^3}{12\nu_w l_{i,i+4}} \right) h_i + \\ & \frac{gb_{i,i+1}^3}{12\nu_w l_{i,i+1}} h_{i+1} + \frac{gb_{i,i+2}^3}{12\nu_w l_{i,i+2}} h_{i+2} + \frac{gb_{i,i+3}^3}{12\nu_w l_{i,i+3}} h_{i+3} + \frac{gb_{i,i+4}^3}{12\nu_w l_{i,i+4}} h_{i+4} = \\ & c_{i,i} h_i + c_{i,i+1} h_{i+1} + c_{i,i+2} h_{i+2} + c_{i,i+3} h_{i+3} + c_{i,i+4} h_{i+4} \end{aligned} \quad (5)$$

同理, 对边界节点 l 有

$$c_{l,l} h_l + c_{l,l+1} h_{l+1} = \bar{q}_l \quad (l = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

式(2)右端项用差分表示:

$$-d_i \frac{dh_i}{dt} \approx -d_i \frac{h_i^{t+\Delta t} - h_i^t}{\Delta t} \quad (7)$$

合并式(5)~(7), 并考虑到源汇项, 得

$$\left(C + \frac{d}{\Delta t} I \right) h^{t+\Delta t} = \frac{d}{\Delta t} h^t + F \quad (8)$$

其中 I 为单位矩阵, 若为稳定流, 式(8)可写为 $Ch = F$ 。求解方程时, 利用 t 时刻的已知水头, 计算出 $t + \Delta t$ 时刻的未知水头, 再利用计算出的水头求解边界流量。

2 裂隙网络的生成

根据野外裂隙统计资料, 运用 Monte-Carlo 方法可以生成裂隙网络系统。就地下水流场分析而言, 裂隙网络中的每一条裂隙至少与一条其他裂隙或边界交割, 或者与源汇(如钻孔、排水管道等)相沟通, 且裂隙必须通过相互交割并沟通到边界和源汇。在裂隙水流计算中, 要把不满足上述条件的独立裂隙(死端裂隙)删除。

裂隙交叉点及其编号: 将每条裂隙当作一条直线, 利用裂隙的走向和裂隙的中点可以确定出每条裂隙的直线方程。再求直线与直线的交点, 若存在则求出, 并标定这两条直线, 以便对其进行编号。还应除去这一过程中重复的交点, 如果两条以上的直线过同一交点, 编号时按同一节点处理。运用节点标定的信息先对交点编号, 再对其余点(裂隙端点和边界点)编号。

单元编号: 将两个裂隙交叉点之间的裂隙段当作一个单元, 交叉点之间以线单元表示。且每个单元有 4 个节点, 用以下方法进行编号: 对每个单元的 4 个节点而言, 首先找出以该点为公共点的两条直线上的所有节点, 以该点为中心并按横坐标的大小排序, 求出直线 1 上所有节点与该点的距离 d , 取 $X_{\max}^k = \min d_i^1$ ($i = 1, 2, \dots, m$; $k = 1, 2$), $X_{\min}^k = \min d_j^1$ ($j = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2$), 并标识对应的编号。同理, 对与直线 1 相交的直线 2 做同样处理。为了按逆时针方向编号, 须作以下比较: 如图 3 所示, 假设 $x_1 \leq x_2$, 那么如果 $y_1 < y_2$, 则从点 (x_1, y_1) 按如图 3(a) 的 1→2→3→4 的方向进行编号; 若 $y_1 \geq y_2$, 则按如图 3(b) 的 1→4→3→2 方向进行编号。

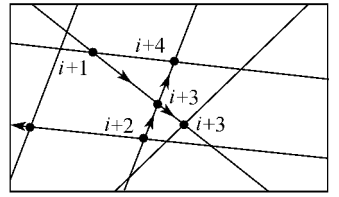


图 2 裂隙网络示意图

Fig.2 Sketch of fracture network

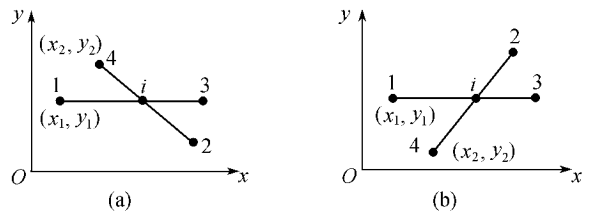


图 3 单元编号示意图

Fig.3 Sketch of element number

3 算 例

3.1 计算结果分析

设有 500 m×500 m 的研究区域 ,分布两组正北和正西方向的裂隙 ,裂隙几何要素的均值、方差和所满足的分布形式见表 1 ,生成的裂隙网络见图 4。

取正北方向边界为上游定水头边界 ,水位 10 m ,与正北方向平行的下游边界也为定水头边界 ,水位为 5 m ,其余边界为流量(隔水)边界 ,据式(8)编程序进行计算。当计算裂隙水流场时 ,裂隙交叉点处张开度的取值可以根据它们的权重来确定。因此 ,所形成的渗透矩阵为实非对称矩阵 ,对其采用 QR 分解 ,利用给定的边界条件就可计算出裂隙水流每一节点(裂隙交叉点)的水头。地下水位等值线见图 5。

裂隙网络的地下水位等值线表现出极其不均匀性。从图 5 中可以看出 ,地下水局部流向与总体流向可能不一致 ,有的地方甚至与总体流向相反 ,而用传统的等效连续介质模型是很难模拟这种裂隙岩体网络渗流的 ,这也说明用本文提出的模型解决网络渗流的合理性。

表 1 裂隙几何参数统计

Table 1 Statistics of fracture geometrical parameters							
概率参数	方向	走向 ($^{\circ}$)	倾向 ($^{\circ}$)	倾角 ($^{\circ}$)	迹长 /m	间距 /m	张开度 /mm
均值	正北	0.08	90.08	56.20	100	5.0	0.5
	正西	270	180	78.00	100	5.0	0.5
方差	正北	0.02	0.02	1.50	0.5	0.2	0.1
	正西	0.05	0.05	2.00	0.5	0.2	0.1

注 :几何参数中 ,走向、倾向、倾角、迹长在正北和正西方向上均呈正态分布 ,间距在正北和正西方向上均呈均匀分布 ,张开度在正北和正西方向上均呈指数分布。

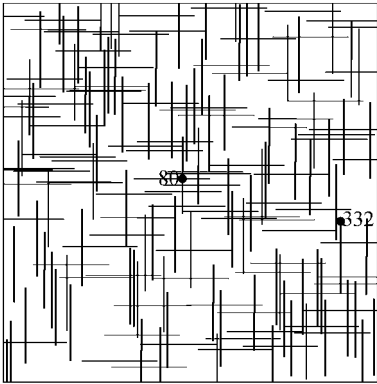


图 4 裂隙网络示意图
Fig.4 Fracture network map

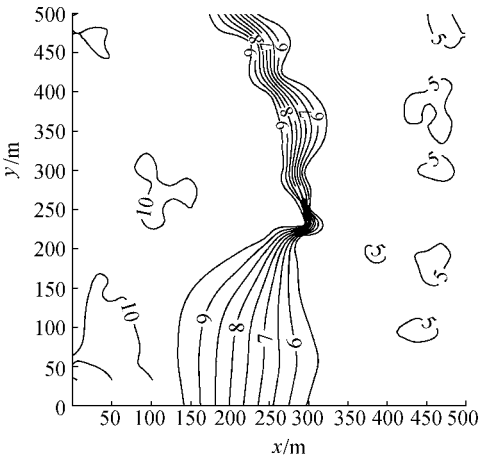


图 5 地下水位等值线
Fig.5 Contour of groundwater level

3.2 参数敏感性分析

从裂隙的单宽流量公式得知 ,当裂隙网络确定后 ,对渗流特性影响较大的是裂隙的张开度 ,它正比于流量的立方。为了掌握张开度的影响规律 ,本文在裂隙网络中选了两个点 ,其节点编号为 80 和 332(见图 4) ,坐标分别为(239.99 267.99)和(450.08 217.03)。主要从以下 3 个方面来讨论张开度对这两个点的水头影响 ,从而了解整个渗流场的变化规律。

a. 张开度均值变化的影响。两组裂隙张开度的均值变化范围为 0.001 ~ 0.75 mm ,保持方差 0.001 mm 不变。计算出各种张开度情况下的水头值见图 6。理论计算和实际分析表明 ,节点 80 的水位应接近或略低于上游水位 10 m ,节点 332 的水位应接近或略高于上游水位 5 m。从图 6 中可以看出 ,当裂隙的张开度较小时 ,对所计算的水位有较大的影响。进一步分析可以发现 ,若裂隙的张开度很小 ,则可以将其当作等效连续介质模型进行模拟。

b. 张开度方差变化的影响。两组裂隙张开度的方差变化范围为 0.07 ~ 0.55 mm ,保持均值 0.5 mm 不变 ,计算出各种张开度情况下的水头值见图 7。从图 7 中可以看出 ,尽管方差变化范围较大 ,但所计算出的水头值无太大变化 ,表明张开度方差的改变对渗流场的影响不

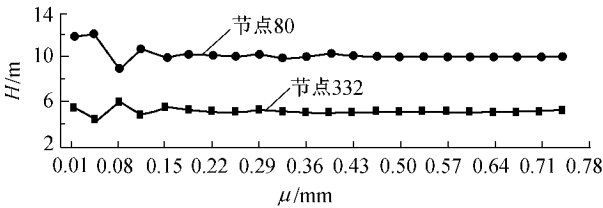


图 6 地下水位随张开度均值的变化
Fig.6 Relation between groundwater level and mean aperture

明显.将计算出的水位进行统计发现满足正态分布,其中节点 80 的水位均值为 9.84 m,方差为 0.12 m;节点 332 的水位均值为 5.07 m,方差为 0.08 m.

c. 其中一组裂隙的张开度均值变化的影响.图 4 中正西方向裂隙张开度的均值变化范围为 0.001 ~ 0.7 mm,方差为 0.001 mm,另一组裂隙张开度的均值和方差保持不变,分别为 0.5 mm 和 0.001 mm.从图 8 中可以看出,裂隙张开度较小时对流场有较大的影响.当各组裂隙的张开度相差较大时,表现出某方向裂隙的导水性较强且极不均匀.这与实际情形是吻合的.

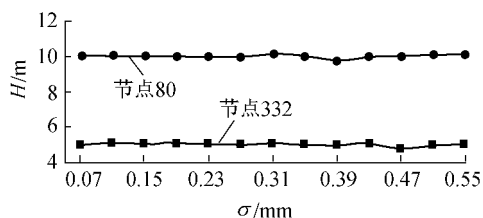


图 7 地下水位随张开度方差的变化

Fig.7 Relation between groundwater level and variance of aperture

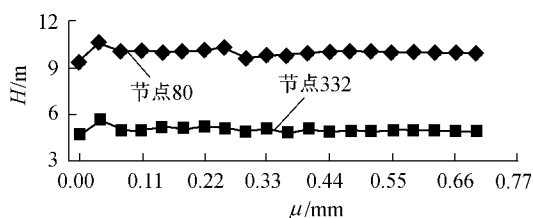


图 8 地下水位随其中一组裂隙张开度均值的变化

Fig.8 Relation between groundwater level and mean value of a group of fracture apertures

4 结 论

a. 以单裂隙立方体定律为基础,依据岩体裂隙网络中节点流量守恒原理,推导了裂隙网络渗流数学模型,并提出了求解该模型的算法.

b. 基于裂隙几何要素的统计特征,运用 Monte-Carlo 方法,随机生成裂隙网络系统,并开发、编制了网络生成和模型计算程序.算例表明,应用本文提出的渗流模型模拟裂隙岩体网络是合理的.

c. 讨论了裂隙张开度的变化对裂隙岩体网络渗流特性的影响.通过算例表明,裂隙张开度均值的改变比方差的改变对渗流场的影响更敏感.

参考文献:

- [1] 王恩志. 岩体裂隙的网络分析及渗流模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3): 214—221.
- [2] 毛昶熙, 段祥宝, 李定方. 网络模型程序化及其应用[J]. 水利水运科学研究, 1994 (3): 197—209.
- [3] CACAS C, LEDOUX E, de MARSILY G, et al. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation[J]. Water Resour Res, 1990, 26(3): 479—489.
- [4] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 1—144.
- [5] 许彦卿. 岩体水力学基础(五)[J]. 水文地质工程地质, 1997 (5): 41—45.

2-D stochastic fracture network model for simulation of seepage through fissured rocks

HUANG Yong, ZHOU Zhi-fang

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the statistic characteristics of orientations, traces, space distances, and apertures of fractures, a stochastic fracture network system is generated by use of the Monte-Carlo method. According to the flux conservation principle for the intersection of fracture networks, a seepage mathematic model for discrete networks is derived, and a calculation method for the model is worked out. The rationality of the model is verified by a case study. Furthermore, the regularity of variation of the seepage field in fissured rocks with the mean value and variance of fracture apertures is discussed, and the scope of application of the model is determined. The present research provides a method for the simulation of seepage field in fissured rocks.

Key words: stochastic fracture network; numerical model; Monte-Carlo method; aperture