

基于非连续裂隙介质网络流的线素法模型研究

李树文,高轲,王若男

(河北工程大学 城市建设学院,河北 邯郸 056038)

摘要:为了准确描述出基岩裂隙网络流的流场状态,基于非连续裂隙介质渗流理论,以流体力学为基础,把裂隙的交叉点作为节点,节点之间的裂隙作为线元,各线元流向共同节点的流量等于贮存的变化量。依次建立各节点的渗流方程式,构建地下水裂隙介质网络流的渗流模型。利用该方法对模拟区域进行计算并与经典数值解法的计算结果进行对比,结果表明线素法模型能够准确的表征出裂隙含水介质的构造特征,并能够准确反映出地下水的实际流动方向。

关键词:裂隙介质;网络流;渗流;非连续性;流场分析;数值模拟

中图分类号:P641.135

文献标识码:A

Research of the line element method model based on discontinuous fracture media network flow

LI Shu-wen, GAO Ke, WANG Ruo-nan

(College of Urban Constrecton, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: In order to accurately describe the rock fracture network flow field condition, the fracture of the intersection was taken as a node and the node between the fracture line was taken as line element by basing on the discontinuous fracture media seepage theory and fluid mechanics; the line element flow to the common node of each wire flow amount was equal to the change in storage. And then the seepage equations were established and the groundwater seepage flow model of fracture network flow media was built. And the simulation domain was calculated by using this method, and then the results with the classical numerical method were compared. The results show that the line element method model can accurately characterize the structural characteristics of fractured aqueous medium, and which is able to accurately reflect the actual groundwater flow direction.

Key words: fractured medium; network flow; seepage flow; discontinuity; flow field analysis; numerical simulation

在自然界中,坚硬的基岩由于各种应力的作用从而产生了各种裂隙结构^[1]。贮存并运移于基岩裂隙结构中的裂隙水,与空隙水相比往往表现出更强烈的非均质性和各向异性^[2]。连续裂隙介质模型分为等效空隙介质模型和双重空隙介质模型,该类模型是将裂隙岩体看作一个连续的渗流空间,忽略了岩体的非连续性,均是基于多孔介质渗流理论来进行模型求解,并在实际工程中得到了应用^[3-7]。线素法模型是一种基于非连续裂隙介质理论的模拟计算方法,具有拟真性好的优点。本文采用该模拟计算方法对模拟区域进行地下水

流场计算,并与经典计算方法的结果进行对比分析,从而得出线素法模型具有更好的适用性,并且其计算模拟的流场状态更加接近于真实的地下水流场状态。

1 非连续裂隙介质网络流理论

基岩岩体中含有大量的裂隙导水构造,这些裂隙构造纵横交错构成了一个导水的裂隙网络。但是,裂隙网络中所含的裂隙构造只是稀疏程度有所不同,只占据着基岩岩体的一部分空间,并非完全充满该基岩岩体,含水空间具有非均质的特

征。另外,基岩中的水流只在裂隙网络中沿着流场水头降落的方向迂回流动。因此裂隙网络系统渗流在本征上是一种非连续性状态。非连续裂隙介质渗流理论就是以各个裂隙交叉点的水流质量均衡理论作为基础,从而建立起控制方程式,并代入单裂隙立方定律从而得出关于一系列相关量的矩阵方程,再结合一点的定解条件从而组成裂隙网络流的渗流模型。该理论是一种力求从细节上表征出基岩岩体非均质性的模拟方法,能够较为客观细致的描述出水在裂隙网络中的渗流规律。

2 线素法模型

线素法模型的是为了计算基岩中的裂隙水流的流速和水量,以及裂隙网络流的水头压力所提出的。线素法可以应用于各种非断续的裂隙网络流。该计算方法是按图1中所给出的区域模型来进行的。所研究的对象是基岩岩体的水平断面,其中各个相互交叉的线称之为裂隙线素段,所有这些裂隙线素段组合到一起就构成了裂隙网络。网络的每一线素都各有其特点。应确定每一线素的长度和平均宽度。沿岩体边界给定稳定水头条件。问题是在于测得在给定水头条件下通过岩体的流量,以及计算水流在网络线素的速度和测压水位^[8]。

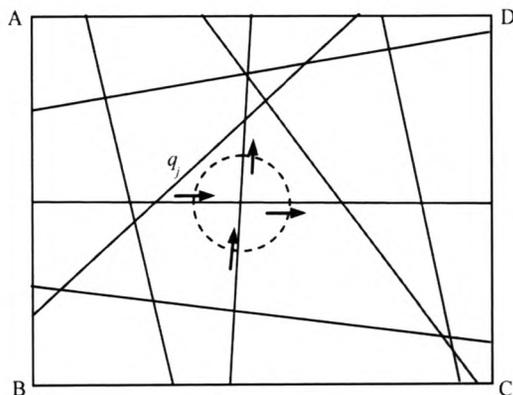


图1 裂隙均衡域示意图

Fig.1 Fracture balanced field sketch

2.1 数学模型

2.1.1 基本假设

线素法模型满足的假设如下:(1)把裂隙面中的水流当做层流状态,并且该层流状态符合达西定律;(2)基岩岩体由裂隙(断层、节理等)和其切割的岩体块所组成,并把这些岩块看作是不透水的介质;(3)该裂隙网络作为地下水的储集与运移

的场所,并且地下水符合质量守恒定律;(4)裂隙网络中的任何一点的流量均衡;(5)裂隙在基岩岩体中相互切割呈不规则几何形状,并且沟通到了边界。

2.1.2 模型建立

把裂隙网络中各裂隙的交叉点作为节点,两个节点之间的裂隙断称之为线单元,各个线元流向其共同节点的流量等于零或等于该节点的流量变化量,即水在每一裂隙网络节点上流入和流出的水流的算术和。依次建立各个节点的流量方程,然后结合边界与初始条件,就形成了基岩裂隙介质网络流的数学模型。

图1是岩体裂隙的网络示意图,该图反映了水流在每一个裂隙节点上的连续性条件。水在每一裂隙网络均衡域(虚线部分)上流入和流出的水流的算术和是零(或储存量的变化量)。

假定进入裂隙节点的水流流量为正,则从裂隙节点流出的水流流量为负。所有裂隙节点都可以写出这一条件,从而可以得到由几个方程所组成的系统:

$$\sum_{j=1}^{N'} q_{ij} = 0 \quad j=1,2,\dots,N' \quad (1)$$

式中 $\sum_{j=1}^{N'} q_{ij}$ - 以节点 i 为中心的各个线元的流量的和。

另外,若考虑到均衡域上各个线元的垂向补给量与各个节点的源(汇项)分别为 $\omega_j (j=1,2,\dots,N')$ 和 $Q_i (i=1,2,\dots,N')$,则单位时间内,在均衡域内所表征的地下水流方程式为:

$$\sum_{j=1}^{N'} q_{ij} - \sum_{j=1}^{N'} \omega_j + Q_i = -d_i \frac{dH_i}{dt} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (2)$$

$$d_i = \frac{S_i}{2} \sum_{j=1}^{N'} e_j l_j \quad (3)$$

式中 H_i - 节点的水头值; N' - 线单元的个数; S_i - 以点为中心的所表征的单元域内的弹性贮水(释水)系数值; e_j - 隙宽值; l_j - 线元长。

若裂隙网络流中有 N 个节点,组成 N 个式(2)形式的方程。因此,可以写为如下形式:

$$Aq - A^* + Q = -D \frac{dH}{dt} \quad (4)$$

式中 ω - 裂隙单元上垂向补给的向量; D - 裂隙各个均衡域的贮水矩阵; A^* - 矩阵 A 的关联矩阵。

假设渗流区域为图1时,其中 AB 和 CD 为零流量边界,该渗流区域的渗流模型式可表述为

$$\begin{cases} Aq = A^* + Q = -D \frac{dH}{dt} & \text{在流区域 } ABCD \text{ 中, } t \geq t_0 \\ H|_{t=t_0} = H_0 \\ H|_i = H_{bi} & t \geq t_0, i \in \overline{AB}, \overline{CD} \\ \left. \frac{\partial H}{\partial n} \right|_{AD, BC} = 0 & t \geq t_0 \end{cases} \quad (5)$$

该式中需要求解的量为内节点和外节点的水头值。

2.2 模型的数值解法

在裂隙介质渗流网络中,通过每个节点的线元数最多不超过6个,因此,取每个节点*i*的线元总数*N'*为6个。根据单裂隙立方定律可得:

$$q_{ij} = T_{ij} \frac{dp_{ij}}{dl_{ij}} = \frac{1}{6\mu} \left[\frac{1}{e_i^2} + \frac{1}{e_j^2} \right]^{-1} e_i e_j \frac{dp_{ij}}{dl_{ij}}$$

$$\sum_{k=1}^6 q_{ik} = q_i, i+1 + q_{i,i+2} + q_{i,i+3} + q_{i,i+4} + q_{i,i+5} + q_{i,i+6} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

将 $q_{i,i+1} = \frac{\rho g}{6\mu} \left[\frac{1}{e^2} + \frac{1}{e_{i+1}^2} \right]^{-1} e_i e_{i+1} \frac{H_{fi+1} - H_{fi}}{l_{i,i+1}}, \dots$

$q_{i,i+6} = \frac{\rho g}{6\mu} \left[\frac{1}{e^2} + \frac{1}{e_{i+6}^2} \right]^{-1} e_i e_{i+6} \frac{H_{fi+6} - H_{fi}}{l_{i,i+6}}, \dots q_{i,i+6}$ 代入式(6)并整理得:

$$\sum_{k=1}^6 q_{ik} = c_{i,i} H_{fi} + C_{i,i+1} H_{fi+1} + c_{i,i+2} H_{fi+2} + c_{i,i+3} H_{fi+3} + c_{i,i+4} H_{fi+4} + c_{i,i+5} H_{fi+5} + c_{i,i+6} H_{fi+6} \quad (7)$$

同理对于相邻节点*j*有:

$$q_j = c_{j,j} H_{fj} + c_{j,j+1} H_{fj+1} + c_{j,j+2} H_{fj+2} + c_{j,j+3} H_{fj+3} \quad (8)$$

由式(7)和式(8),得到如下方程组

$$[A_q] = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,N} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & c_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m,1} & c_{m,2} & \dots & c_{m,N} \\ c_{m+1,1} & c_{m+2,2} & \dots & c_{m+1,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{N,1} & c_{N,2} & \dots & c_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{f1} \\ H_{f2} \\ \vdots \\ H_{fm} \\ H_{fm+1} \\ \vdots \\ H_{fN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

即: $[C] \{H_f\} = A_q$, 这里 $[C]$ 为裂隙网络的导

水矩阵。

若渗流区域内有*N*个节点,则相互结合成了有*N*个(7)式所组成的方程组。可简写为如下形式:

$$[C] \{H_f\} - [A] \{W\} + \{Q\} + [D] \frac{dH_f}{dt} = 0 \quad (10)$$

式中 $\{W\}$ - 裂隙线元上垂向补给量的向量; $[D]$ - 裂隙内贮水矩阵; $A = [a_{ij}]$ - 裂隙网络的衔接矩阵。

$A = [a_{ij}]$ 描述了裂隙网络系统中线元与节点的衔接关系, A 矩阵中的元素 a_{ij} 的取值如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & j \text{ 线元不衔接于点 } i \\ -1 & j \text{ 线元衔接于 } i \text{ 节点且拽向离开点的方向时} \\ 1 & j \text{ 线元衔接于节点, 且指向点的方向时} \end{cases}$$

将 $\frac{dH_f}{dt}$ 用差分表示

$$\frac{dH_f}{dt} \approx \frac{H_f^{t+\Delta t} - H_f^t}{\Delta t} \quad (11)$$

整理后,有

$$\left([C] + \frac{1}{\Delta t} [D] \right) \{H_f^{t+\Delta t}\} = [A] \{W\} + \frac{1}{\Delta t} [D] \{H_f^t\} - \{Q\} \quad (12)$$

若源(汇)项 $\{W\}$ 为0,且不考虑各线元的垂向补给量 $\{Q\}$ 则以上公式可写为:

$$\left([C] + \frac{1}{\Delta t} [D] \right) \{H_f^{t+\Delta t}\} = \frac{1}{\Delta t} [D] \{H_f^t\} \quad (13)$$

根据上式,利用*t*时刻的已知水头,可计算出时刻的水头,再利用计算出的水头可求解边界流量。

3 算例分析

在 32 m × 32 m 的区域范围内,假设有三组裂隙 I、II 和 III,其裂隙参数如表 1 所示,由这三组裂隙所组成的裂隙网络图如下图 2 所示,其中 AD 和 BC 为零流量(隔水)边界,CD 边界水头为 100 m,AB 边界水头为 20 m。

表 1 各裂隙组参数

Tab. 1 The dates of every fracture

裂隙组	倾角 / °		迹长 / m		段距 / m		间距 / m		开度 / m	
	平均值	标准差	平均值	平均值	标准差	平均值	平均值	标准差	平均值	标准差
裂隙组 I	90	6.8	5.7	2.4	0.2	2.96	0.000 28	0.000 02		
裂隙组 II	180	7.7	5.7	2.3	0.3	2.57	0.000 34	0.000 01		
裂隙组 III	45	8.3	5.4	2.2	0.3	2.84	0.000 39	0.000 03		

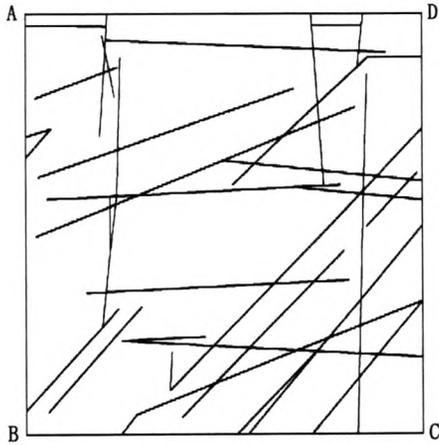
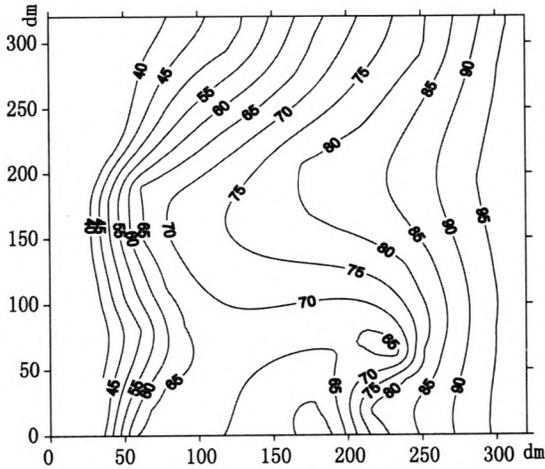


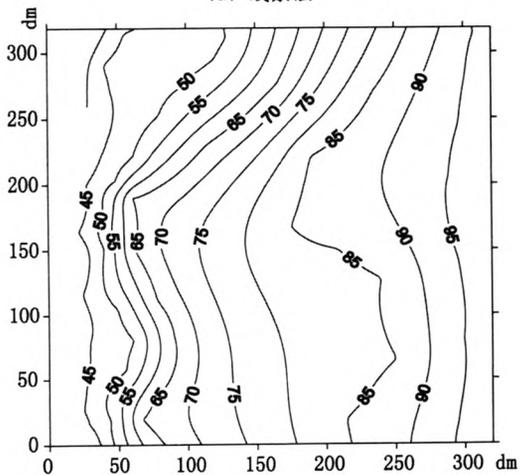
图2 裂隙网络图

Fig. 2 Fractured network diagram

本算例根据边界条件分别采用线素法和经典有限元方法^[9]两种方法进行计算,得出计算结果,并根据计算结果运用 Sufer8.0 分别绘制出来两种不同解法所对应的区域水头等值线图,如图 3 所示。



(a) 线素法



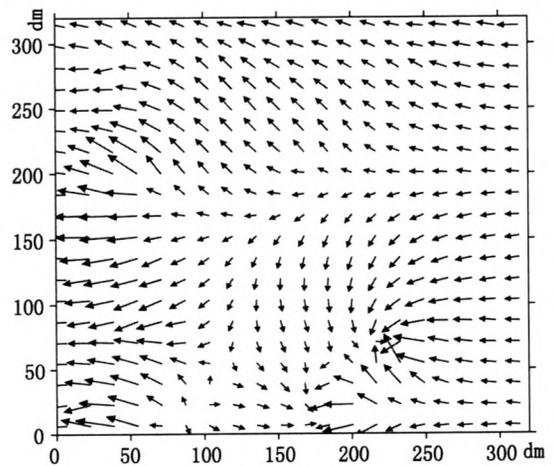
(b) 有限元法

图3 地下水位等值线图

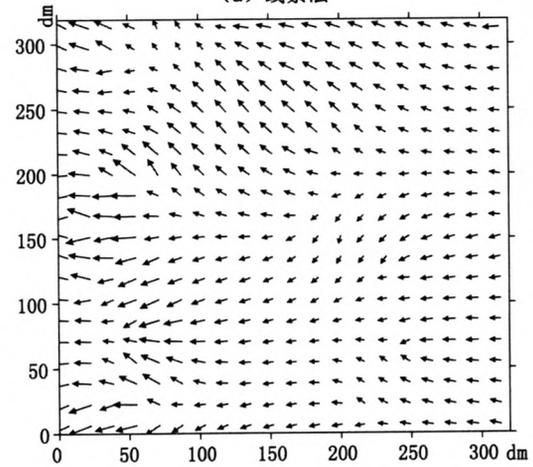
Fig. 3 The isoline map of underground water level

从图 3 - a 中可以看出,该模拟区域的流场梯度从右向左依次递减,符合的地下水的整体流向,并且在局部区域出现水流状态回流现象,呈现出与整体水流不一致的现象。该现象反映出了裂隙网络路径走向对水流方向的影响,即能够反映出含水构造的空间特征。而从图 3 - b 中可以看出,该模拟区域只能反映出地下水流场的大致流向遵循从水头高的地方依次向水头较低的方向递减,并不能反映出局部的流场细节。从而不能很好的反映出含水介质的非均质各向异性。

为了多角度的对比这两种计算结果,下面绘制出这两种模拟计算结果所对应的地下水流速矢量图,如图 4 所示。



(a) 线素法



(b) 有限元法

图4 地下水流速矢量图

Fig. 4 Groundwater velocity vector diagram

通过图 4 - a 可以看出线素法在模拟裂隙介质网络流的计算中可以更好的贴近实际的流场状态,能够表现出含水介质的非均质性与各向异性;而从图 4 - b 可以看出有限单元的计算方法则对流场的描述上有着一定的与实际不符的地方,从

其计算结果可以看出,这种计算方法忽略了含水介质的非均质性,因为实际的地下水并非是完全充满于含水介质之中。因此,线素法模型更加适合于对裂隙介质网络流进行计算模拟。

4 结论

分别运用线素法模型和经典数值模型分别对模拟区域进行计算模拟,对其计算结果进行对比分析发现线素法模型能够清晰的表现出地下水流中局部流向与整体不一致的现象,表现出了含水构造的非均质各向异性;经典数值模拟方法则是基于连续介质的渗流理论,只能反映出地下水流场的整体流动状况,并不能具体反映出含水介质的构造对局部水流的影响。因此,为了描述裂隙网络流这种具有复杂的含水构造的流场状态,线素法模型相比较与经典数值模拟模型具很好的适用性。

参考文献:

- [1] 赵蕴林. 地下水位的上升对边坡稳定性的影响探析[J]. 四川理工学院学报:自然科学版, 2008, 21(6):

(上接第72页)

参考文献:

- [1] DNANY H, OSCAR B, GERARD H, et al. PM10 and PM2.5 concentrations in Central and Eastern Europe: results from the Cesar study [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(15): 2757 - 2771.
- [2] 王荟, 王格慧, 黄鹂鸣, 等. 南京市大气中 PM10、PM2.5 日污染特征[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(5): 54 - 57.
- [3] 张洪建, 杜振川, 李增学, 等. 邯郸市尘落尘中部分有害成分分析[J]. 河北建筑科技学院学报, 2002, 19(1): 1 - 4.
- [4] 成玉, 盛国英, 闵育顺, 等. 珠江三角洲气溶胶中正构烷烃分布规律、来源及其时空变化[J]. 环境科学学报, 1999, 19(1): 96 - 100.
- [5] 董恒利. 邯郸市大气可吸入颗粒物及多环芳烃来源解析研究[D]. 天津:天津大学化工学院, 2008.
- [6] 中国科学院地球化学研究所有机地球化学与沉积研究室. 有机地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [7] 夏训诚, 杨根生. 中国西北地区沙尘暴灾害及防治[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1996, .
- [8] 张云, 张成君. 兰州市大气降尘中正构烷烃的分布特征及源解析[J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(4): 23 - 26.

362 - 365.

- [2] 周志芳, 王锦国. 裂隙介质水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [3] 武强, 赵颖旺, 徐华, 等. 地下水流场三维流线可视化模拟与实现[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(1): 56 - 59.
- [4] 张子祥. 安源水源地地下水三维数值模拟[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(1): 40 - 41.
- [5] 沈丽娟. 山西庞庞塔矿地下水化学特征及含水层间水力联系分析[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(2): 154 - 157.
- [6] 沈金松, 詹林森, 马超. 裂缝等效介质模型对裂缝结构和充填介质参数的适应性[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(3): 993 - 1003.
- [7] 李树文, 王义闹, 赵秀娟, 等. 渗流问题灰色数值模型的解法研究[J]. 数学实践与认识, 2004, (03): 58 - 62.
- [8] 切尔内绍夫. 水在裂隙网络中的运动[M]. 盛志浩, 田开铭, 译. 北京: 地质出版社, 1987.
- [9] 顾慰慈. 渗流计算原理及其应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.

(责任编辑 马立)

- [9] BRAY E E, EVANS D E. Distributions of n - paraffins as a clue to recognition of source beds [J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 1961, 22(1): 2 - 15.
- [10] SIMONEIT B R T, MAZUREK M. Organic matter of the troposphere - II. Nature background of biogenic lipid matter in aerosols over the rural western United States [J]. Atmospheric Environment, 1982, 16: 2139 - 2159.
- [11] SHENG G, FU J, ZHANG J, et al. Preliminary study of extractable organic matter in aerosols from Beijing and Guiyang, China [J]. Diversity of Environmental Biogeochemistry, Amsterdam: Elsevier Science, 1991, 6: 77 - 85.
- [12] SIMONEIT B R T, COX R E, STANDLEY L J. Organic matter of the troposphere - IV. Lipids in Hamaltan Aerosols of Nigeria [J]. Atmospheric Environment, 1988, 22: 938 - 1004.
- [13] HALKIEWICZ J. On the aliphatic, and polycyclic aromatic hydrocarbon levels in the southern baltic sea atmosphere [J]. Atmospheric Environment, 1987, 21(9): 2057 - 2063.
- [14] SLINN W G N, HASSE L, et al. Some aspects of the transfer of a - tmosphere trace constituents past the air sea interface [J]. Atmospheric Environment, 1987, 12: 2055 - 2087.

(责任编辑 马立)