

文章编号:0253-9993(2007)09-0921-05

# 裂隙岩体非稳定渗流的离散-连续介质模型

刘先珊, 刘新荣

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 给出了一种非线性耦合分析模型, 即离散-连续介质模型, 该模型克服了求取两类介质之间水量交换的困难, 能更准确地反映裂隙岩体的结构特征和渗透特性. 基于该模型导出了裂隙岩体渗流场的非线性耦合分析有限元格式, 并编制了相应的有限元程序. 最后给出算例分析, 验证了所提出的方法的可行性和实用性.

**关键词:** 裂隙岩体; 渗透特性; 离散-连续介质模型; 水量交换

**中图分类号:** TU458.4      **文献标识码:** A

## Distinct-continuous medium model of unsteady seepage in fractured masses

LIU Xian-shan, LIU Xin-rong

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Equivalent continuous medium model or discontinuous medium model was largely applied in fractured rock fluid flow, nonlinear coupling analysis model called distinct-continuous medium model was put forward, which overcome difficulties of solving exchange of water discharge between two kinds of medium so as to reflect structural characteristic and permeable characteristic of fractured rock masses more exactly. Finite element formula of nonlinear coupling analysis model in fractured rock masses seepage field was deduced and written corresponding FEM code. At last, examples were taken to prove feasibility and practicality of the procedure.

**Key words:** fractured rock masses; permeable characteristic; distinct-continuous medium model; exchange of water discharge

在岩体工程中, 诸如岩体滑坡、矿井突水、地表沉陷、坝体失稳以及地下水资源的开发与利用等都会涉及裂隙岩体渗流的问题<sup>[1,2]</sup>. 但天然岩体在其形成和存在的整个地质历史时期中, 经过复杂而不均衡的地质作用, 岩体被大量的结构面切割形成裂隙岩体, 结构面分布的随机性使得裂隙岩体具有明显的不连续、非均匀、各向异性特征, 其渗流特性也比多孔介质复杂. 通过大量的工程实践证明, 岩体的主要水力特性是裂隙水的流动. 虽然一般岩体结构中裂隙度远比孔隙度小, 但裂隙的渗透性却远大于孔隙的渗透性. 因此, 对于裂隙岩体渗流, 把注意力集中在裂隙网络的渗透特性上是非常重要的.

近年来, 裂隙岩体渗流的等效连续介质模型、裂隙网络模型和双重介质等已有不少研究成果. 等效连续介质模型可以利用现有成熟的连续介质理论, 目前应用较广, 但该模型并非总是有效, 当裂隙稀疏使得

收稿日期: 2006-10-11      责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50539100); 重庆大学“985工程”专项基金资助项目(0903005104973); 国家留学回国人员科研启动基金重点资助项目(教外司留[2002]247号)

作者简介: 刘先珊(1978-), 女, 湖北荆州人, 工学博士, 讲师. E-mail: liuxianshan@163.com

研究区域的表征单元体 (REV) 不存在时, 其计算结果与实际出入较大<sup>[3-5]</sup>; 离散介质模型精度高, 拟真性好, 但要求搞清每条裂隙的空间展布, 而在现有的技术条件下很难办到, 因此, 建立真实的裂隙网络系统十分困难; 双重介质模型难以准确计算水量交换值. 为避免离散介质模型对每条裂隙进行模拟而带来的巨大工作量, 且能满足实际工程精度要求, 本文根据裂隙发育规模与工程尺度的关系, 并考虑不同规模裂隙水力传导特性的差异, 将裂隙分为主干裂隙和网络状裂隙, 建立了基于离散-连续介质的三维非稳定渗流模型. 该模型是用离散裂隙网络模型描述主干裂隙中的水运动, 用等效连续介质模型描述次要裂隙和孔隙中的水运动, 裂隙水头作为连续介质域的水头边界, 离散介质域与连续介质域间的水交换量作为离散介质域的流量边界. 在数值计算中, 将两类介质的控制方程离散耦合成一套有限元格式进行求解, 该方法克服了求取两类介质之间水量交换的困难, 并更准确地反映了裂隙岩体的结构特征和渗透特性.

## 1 裂隙岩体非稳定渗流的离散-连续介质模型

离散-连续介质耦合模型具有两种介质模型描述裂隙岩体中水运动的优点, 不但能反映裂隙特殊的导水作用, 又能体现岩块的贮水作用. 由于众多的次要裂隙能等效为连续介质来处理, 而主干裂隙又较少, 故该耦合模型很好地解决了精度与可操作性之间的矛盾. 而且用离散裂隙网络模型来描述主干裂隙系统, 而主干裂隙是导致裂隙岩体表征体元过大或不存在的重要因素, 故能解决双重介质模型用连续介质概化裂隙系统所存在的问题<sup>[4,5]</sup>.

### 1.1 离散-连续介质渗流的连续性方程

对于含有低序次裂隙的岩体采用等效连续介质模型, 符合达西定律的各向异性渗透张量描述的裂隙岩体三维非稳定渗流问题, 在  $\Omega$  内, 水头函数满足

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = S_r \frac{\partial h}{\partial t} + Q_r, \quad (1)$$

式中,  $S_r$  为单元贮存率;  $Q_r$  为源汇项;  $K_{ij}$  为渗透张量, 根据流体扩散能叠加原理<sup>[4]</sup> 计算得到, 具体表达式为

$$[K_{ij}] = \frac{g\pi}{12\nu V_p} \sum_{i=1}^{m_p} W_i f(\beta_i) r_i^2 b_{i0}^3 \mathbf{M}\mathbf{M}^T,$$

式中,  $g$  为重力加速度;  $\nu$  为水的运动黏滞系数;  $V_p$  为子区域的体积, 可以考虑裂隙岩体的表征单元体;  $m_p$  为裂隙组数;  $W_i$  可用来反映不连续面网络关联性对渗流的制约作用;  $f(\beta_i)$  是说明第  $i$  组第  $j$  条不连续面的渗流与变形耦合作用的函数,  $\beta_i$  为广义立方定律修正系数;  $r_i$ ,  $b_{i0}$  表征不连续面的大小或规模, 从不连续面发育的量级上体现对渗流的影响;  $\mathbf{M}$  描述不连续面产状变量, 可反映渗流的不连续面产状效应, 即

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 - n_1^2 & -n_1 n_2 & -n_1 n_3 \\ -n_2 n_1 & 1 - n_2^2 & -n_2 n_3 \\ -n_3 n_1 & -n_3 n_2 & 1 - n_3^2 \end{bmatrix},$$

其中  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  为不连续面的法向矢量的方向余弦. 根据相应的初始条件和边界条件对式 (1) 进行求解.

对于三维空间的裂隙, 由于薄断层的隙宽较小, 鉴于可以忽略裂隙交叉点的偏流效应, 可以在裂隙数目较多的情况下, 采用三维空间中的无厚度平面单元来处理. 基本思想就是由局部坐标下的二维主干裂隙面组合成研究空间坐标系下的三维渗流. 局部坐标系的每一裂隙单元的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left( K'_x \frac{\partial h}{\partial x'} \right) + \frac{\partial}{\partial y'} \left( K'_y \frac{\partial h}{\partial y'} \right) = S'_f \frac{\partial h}{\partial t} + Q'_f, \quad (2)$$

式中,  $x'$ ,  $y'$  为局部坐标轴;  $K'_x$ ,  $K'_y$  为沿  $x'$ ,  $y'$  轴的主渗透系数;  $S'_f$  为裂隙的单位贮存率;  $Q'_f$  为源汇项.

将上述两种介质的渗流控制方程联合, 并结合边界条件就构成了三维非稳定渗流的离散-连续介质模

型，该模型能反映两类介质不同的水力特性及其二者之间的关系，而且在数值计算中也比较方便.

### 1.2 离散 - 连续介质渗流模型的有限元解法<sup>[6-8]</sup>

对于裂隙渗流而言，可认为渗流只沿着平行于裂隙面的方向发生，且满足立方定律. 根据式 (2)，这些面单元的泛函为

$$I_f^e(h) = \frac{1}{2} \mathbf{h}^{eT} \mathbf{K}_f^e \mathbf{h}^e + \int_V \left( S_f h \frac{\partial h}{\partial t} + Q_f h \right) dV,$$

式中， $\mathbf{h}^e$  为裂隙面单元上的水头向量； $\mathbf{K}_f^e = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{M}^e \mathbf{B} dV$  为裂隙面单元的渗透矩阵，其中  $\mathbf{M}^e$  为裂隙面的渗透系数张量

$$\mathbf{M}^e = K_f \begin{bmatrix} 1 - \sin^2 \alpha_i \cos^2 \beta_i & - \sin^2 \alpha_i \cos \beta_i \sin \beta_i & - \sin \alpha_i \cos \alpha_i \cos \beta_i \\ - \sin^2 \alpha_i \cos \beta_i \sin \beta_i & 1 - \sin^2 \alpha_i \sin^2 \beta_i & - \sin \alpha_i \cos \alpha_i \sin \beta_i \\ - \sin \alpha_i \cos \alpha_i \cos \beta_i & - \sin \alpha_i \cos \alpha_i \sin \beta_i & \sin^2 \alpha_i \end{bmatrix},$$

式中， $\alpha_i, \beta_i$  为裂隙的倾角和倾向，坐标  $x$  轴与地理 N 方向一致，坐标  $y$  轴与地理 E 方向一致； $K_f$  为裂隙的渗透系数， $K_f = \beta g b^2 / (12 \nu C)$ ； $\beta$  为裂隙的连通系数； $b$  为裂隙张开度； $C$  为裂隙粗糙度的修正系数.

单元渗透矩阵的元素可以由下式计算，即

$$K_{ij}^e = \int_V \mathbf{B}_i^T \mathbf{M}^e \mathbf{B}_j dV,$$

式中， $dV = b |G| d\xi d\eta$ ； $|G| = \sqrt{\left( \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \eta} - \frac{\partial z}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} \right)^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right)^2 + \left( \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2}$ ；

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \eta} - \frac{\partial z}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \end{bmatrix}.$$

将各裂隙单元的渗透矩阵组装成整体渗透矩阵，即可得到三维离散介质渗流模型的有限元格式为

$$\mathbf{K}_f \mathbf{h}_f + \mathbf{S}_f \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}_f = \mathbf{F}_f.$$

而对于三维各向异性非稳定渗流的等效连续介质模型的求解，其有限元解法已比较成熟，不再赘述.

由此可见，在三维非稳定渗流计算中，根据裂隙发育规模的不同，分别计算主干裂隙网络和网状裂隙岩体的单元渗透矩阵，然后统一组装到总体渗透矩阵中，即可进行离散 - 连续介质模型的三维有限元分析，其总体渗透矩阵中包含了两类介质的渗流信息，其数值计算中也容易解决.

## 2 两类介质水量交换问题

在两类模型进行耦合分析时，一般采用两类介质单独求解，然后相互迭代的方法，此时必须在离散介质渗流方程中加入水量交换量  $F$ ，以体现等效连续介质对它的水量贡献. 耦合条件包括 2 部分：对于等效连续介质模型，令两类介质接触处水头相等进行耦合；对于离散介质则使用等效连续介质的水量交换量  $F$  进行耦合，然而，计算中的  $F$  一般很难确定. 另外在每一计算时段内，两介质模型都需要迭代求解，因此要达到渗流场的稳定，一般需要进行多次时间段的迭代，将耗费相当的时间. 为了解决上述耦合分析存在的难题，并加快求解速度，本文对原有的迭代模式进行改进，采用以下耦合方法.

(1) 对于厚度较大的断层、剪切破碎带等，有限元计算中可剖分为普通单元；但对于厚度较小且内部含有充填物的大型薄层导水节理、裂隙等结构面，在裂隙岩体渗流中占有重要的位置，计算中将其剖分为面单元. 以三维面单元的剖分为例，如图 1 所示. 共剖分为 3 个单元，其中 2 号单元为三维裂隙面单

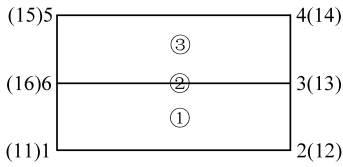


图 1 三维网格剖分

Fig. 1 Partition of 3D grid

元, 1, 3 号单元为等效连续介质单元, 单元定义如下: 1 号单元包含节点 1, 2, 3, 6, 11, 12, 13, 16; 2 号单元包含节点 3, 13, 6, 16, 0, 0, 0, 0; 3 号单元包含节点 3, 4, 5, 6, 13, 14, 15, 16.

(2) 分别计算每个单元的渗透矩阵, 数值计算中赋予裂隙张开度.

(3) 将两类介质模型的单元渗透矩阵共同叠加, 形成整体渗透矩阵, 则在每一时间段内形成渗流控制方程:  $K_g h_g = F_g$ . 在每一时间段内, 该式为一个稳定的渗流方程, 无需迭代求解, 且表达式包含了两类介质模型的信息; 右端项中裂隙单元的节点流量包含了等效连续介质流向离散介质的流量. 以图 1 为例, 计算 2 号单元 6 号节点的水头时, 需要用到 6 号节点的流量  $Q_6$ , 而 6 号节点同时又属于 1, 2, 3 号单元,  $Q_6$  中不仅仅包含了 2 号单元 (裂隙面单元) 在 6 号节点的流量, 也包含了 1, 3 号单元在 6 号节点的流量, 而后者恰好就是等效连续介质流量离散介质的流量  $F$ ; 计算中考考虑接触处的节点同属于两类介质, 故保证了接触点处的水头相等.

因此根据本文提出的方法进行复杂裂隙岩体非稳定渗流分析时, 一方面避免了直接求取两类介质之间的水量交换的问题; 另一方面也加快了程序的运行速度.

### 3 工程应用

**算例 1** 以理想水文地质体为例, 考虑一条平行  $xoy$  平面的主干裂隙 ( $z = 25 \text{ m}$ ), 厚度为  $0.1 \text{ mm}$ , 如图 2 (a) 所示. 研究域左右边界为给定水头, 上下前后边界为不透水边界, 岩体中的地下水为饱和状态. 左右边界的初始水头为  $10 \text{ m}$ , 左边界水头瞬时上升为  $50 \text{ m}$ . 研究此条件下区域的水头分布. 有限元计算模型剖分为节点 462 个, 单元为 350 个, 主干裂隙单元为 50 个.

计算结果如图 3 所示. 其结果表明, 左边界水位上升之后, 水头沿着主干裂隙迅速上升, 而等效连续介质

由于渗透性交主干裂隙较弱, 最初水位上升较慢, 水位变化明显落后于主干裂隙水位, 出现水位滞后的现象, 随着时间的增长, 等效连续介质水头上升速度加快, 两者水头差降低, 最后达到稳定状态.

**算例 2** 以某煤层的钻孔注水为例, 研究区域内有 3 条主要结构面 F1, F2 和 F3, 如图 2 (b) 所示. F1 为平行  $xoy$  平面的裂隙; F2 为倾向  $90^\circ$ 、倾角  $60^\circ$  的倾斜裂隙; F3 为倾向  $270^\circ$ 、倾角  $60^\circ$  的倾斜裂隙, 隙宽均为  $0.1 \text{ mm}$ . 等效连续介质岩体中分布有 3 组裂隙, 平均隙宽为  $0.02 \text{ mm}$ . 前两条裂隙的交汇处有注水点, 给定的水头为  $25 \text{ m}$ . 整个区域剖分为 312 个节点, 290 个实体单元, 90 个裂隙单元, 有限元计算模型如图 2 (b) 所示.

计算结果如图 4 所示. 计算结果表明, 在非稳定渗流过程中, 水流主要集中在断层中流动, 等效连续介质的渗流与离散介质的渗流相比存在明显的滞后效应. 随着时间的增长, 等效连续介质水头上升速度加快, 两者水头差降低, 最后达到稳定状态. 因此本算例得到的渗流场变化规律与理论分析和实际情况是一致的, 最后所有节点的水头为  $25 \text{ m}$ .

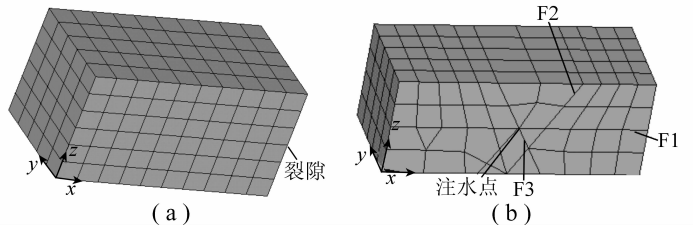


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Calculation model based on FEM

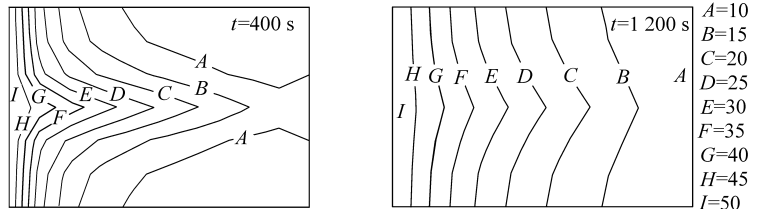


图 3 水头等值线

Fig. 3 Head contours

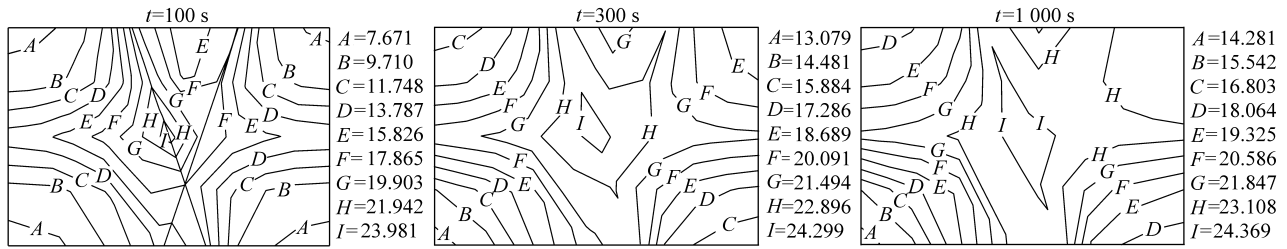


图4 水头等值线

Fig. 4 Head contours

## 4 结 论

(1) 根据裂隙发育规律与工程尺度的关系，将裂隙岩体看作是由离散介质和等效连续介质组成的离散-连续介质岩体，分别建立了各自的非稳定渗流模型，最后基于两类介质接触处水头相等及节点流量平衡建立了离散-连续介质非稳定渗流模型，并对其有限元解法进行了详细的研究。

(2) 在两类模型进行耦合分析时，两类介质接触处的水量交换量很难确定，为了解决直接求取水量交换  $F$  造成计算不准确的问题，设计了一种水量交换计算的方法，并对该方法进行了证明。

(3) 算例说明本文采用的离散-连续介质耦合分析模型计算裂隙岩体的非稳定渗流是有效可行的，能真实地反映裂隙岩体的结构特征和渗透特性。

(4) 基于流体扩散能叠加原理得到了等效连续介质的等效渗透张量。该方法还可以考虑两场耦合时的裂隙岩体渗透特性，因此考虑耦合作用下的非稳定渗流模型还有待于进一步研究。

## 参考文献：

[1] 胡云进. 有地表入渗的裂隙岩体渗流数值分析及工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (S): 1 019 ~ 1 022.

[2] Rutqvist J, Wu Y S. A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2002, 39 (4): 429 ~ 442.

[3] 赵阳升, 段康廉, 胡耀青, 等. 块裂介质岩石流体力学研究新进展 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 1999. 459 ~ 462.

[4] 龚玉峰. 裂隙岩体多场广义耦合分析及工程应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2003.

[5] Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2003, 40 (3): 283 ~ 353.

[6] 郑少河. 裂隙岩体渗流损伤耦合模型研究 [D]. 武汉: 中国科学院, 2000.

[7] 赵 瑜, 赵阳升. 块裂结构岩质边坡渗流模型及数值模拟 [J]. 太原理工大学学报, 2004, 35 (2): 125 ~ 129.

[8] 刘先珊. 基于不连续介质的裂隙岩体水力耦合特性研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2006.