

含排水孔裂隙岩体渗流与法向应力耦合的复合单元算法

薛恋恋^{1, 2}

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要: 提出了含排水孔裂隙岩体的渗流与法向应力耦合的复合单元算法。基于“空气单元”和“充填模型”，提出的复合单元耦合模型视排水孔和裂隙为虚拟的具有高空隙率的“充填介质”，采用复合单元前处理程序，排水孔和裂隙依据其具体位置和方位可自动离散模拟在复合单元内部，计算网格生成时无需考虑排水孔和裂隙的存在，网格划分不受限制。基于复合单元法，采用两场交叉迭代算法，建立了含排水孔裂隙岩体的渗流与法向应力耦合算法。此耦合算法不仅考虑了排水孔和裂隙中的渗流，而且考虑了排水孔和裂隙与相邻岩块之间的流量交换。通过复合单元和传统有限元两种数值模型进行简单算例分析，可知两种算法结果基本一致，进一步验证了提出的含排水孔裂隙岩体的渗流与法向应力耦合算法的有效性，同时可看出复合单元耦合模型的前处理简便快捷。

关键词: 排水孔；裂隙；复合单元法；渗流；应力；耦合

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)08-1429-06

作者简介: 薛恋恋(1982-), 女, 湖北随州人, 博士, 讲师, 主要从事裂隙岩体多场耦合的数值仿真等方面的研究与教学工作。E-mail: xueluanluan@scut.edu.cn。

Composite element algorithm of seepage-normal stress coupling for fractured rock masses with drainage holes

XUE Luan-luan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. State Key Lab of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: A composite element algorithm of seepage-normal stress coupling for fractured rock masses with drainage holes is proposed. The coupling relation between fracture seepage and normal stress makes use of “air element” and “filled model”, which regards the drainage holes and fractures as “filled media” with high porosity. The existence of the drainage holes and fractures is not considered in the mesh generation, but it will be considered explicitly in the mapping composite element by means of the composite element pre-processing work program. The computational mesh generation is simple without restriction. Based on the composite element method, the seepage-normal stress coupling is achieved by applying the cross iterative algorithm. The proposed algorithm considers the flows in the drainage holes and fractures and the flow exchange between the drainage holes and fractures and the adjacent rock masses. The verification of the proposed algorithm is conducted through a simple numerical example, from which the advantages and the reliability of the proposed algorithm are illustrated.

Key words: drainage hole; fracture; composite element method; seepage; stress; coupling

0 引言

岩石裂隙(节理、断层等)决定了岩体的渗透特性和稳定性。为了提高裂隙岩体的渗透稳定性, 有效降低坝基扬压力, 通常会采用排水孔系统进行减压排水。岩体的应力场既受渗透荷载的影响, 又反过来影响岩体的渗透特性。因此, 针对含排水孔裂隙岩体的渗流与法向应力耦合分析研究至关重要, 尤其是对渗控排水系统的设计可以起到很好的指导作用。

目前针对岩体中具有不同特性的子域(裂隙、排水孔等)的数值模拟方法主要归纳为两大类: ①隐式

方法, 即等效连续介质方法^[1-6], 主旨思想是把岩体中具有不同特性的子域进行等效处理, 其变形和渗透特性都均化在岩体中, 整个岩体被视为一种均匀介质, 不考虑裂隙和排水孔的具体位置和方位; ②显式方法, 即离散模拟方法^[7-11], 其主题思想是利用一种特殊单元来离散模拟岩石裂隙和排水孔, 同时会考虑到裂隙

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209097); 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金项目(2011B086); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究项目(2013KB27)

收稿日期: 2012-10-08

和排水孔的具体方位和倾向倾角。隐式模型可以应用于解决含有大量裂隙和排水孔的裂隙岩体问题, 即相对比较复杂的工程问题, 但细节模拟过于简化; 而显式模型注重相应的细部结构, 可真实反映裂隙和排水孔的变形和渗透特性, 得到详细精确的真实解, 但细部结构的前处理工作繁琐复杂, 网格易畸形, 导致计算误差大或结果不收敛。

复合单元法兼具上述两种方法的优点^[12-16]。此方法最显著的特点是把裂隙、锚杆、排水孔等细部结构置于特殊单元内部, 这样针对复杂结构的网格剖分时就无需考虑裂隙、锚杆、排水孔的具体位置、方位以及数量, 网格划分不受限制。

本文基于复合单元法, 提出了同时含排水孔和裂隙的岩体渗流与法向应力的耦合算法。采用特殊单元离散模拟排水孔和裂隙, 两者均可自动嵌入复合单元内部, 前处理简便快捷。法向应力的作用可引起裂隙的张开或闭合, 从而会改变含排水孔裂隙岩体的传导矩阵, 以致整个渗流场的变化; 另一方面改变的渗透荷载会反过来影响应力场的改变。采用渗流场与应力场两场交叉迭代算法, 可实现含排水孔裂隙岩体渗流与法向应力的耦合。通过简单的算例分析对提出的耦合算法进行了验证, 所得的计算结果与传统有限元算法相比较结果基本一致, 且具有离散模拟算法的优点, 可得到排水孔和裂隙等细部结构的详细解。

1 含排水孔裂隙岩体的复合单元模型

1.1 复合单元法原理

首先离散研究域生成有限元网格, 然后依据裂隙和排水孔的具体位置和方位, 嵌入相应的单元内部, 相应的有限单元自动转换成复合单元, 其中所有细部构造计算所需的信息均可由前处理程序自动生成。图 1 所示为一个复合单元包含 3 条裂隙和 2 个排水孔, 共包含 7 个岩块子单元和 6 个排水孔子单元。

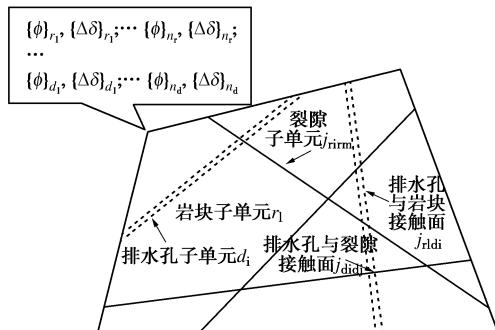


图 1 含裂隙面和排水孔的复合单元

Fig. 1 Composite element containing fractures and drainage holes

复合单元中每个子单元(岩块、排水孔等)的未

知变量($\phi, \{\Delta u\}$)可通过映射的复合单元的相应变量($\{\phi\}, \{\Delta \delta\}$)插值得到, 即 $\phi = [N]\{\phi\}, \{\Delta u\} = [N]\{\Delta \delta\}$, 且每个插值表达式仅在相应的子单元内有效。子单元上的已知变量通过等效原则转换到相应的映射复合单元节点上, 然后根据虚功原理或变分原理建立复合单元的平衡方程。求得复合单元节点的未知变量后, 再通过插值函数即可得到每个子单元的未知变量。

文中 j_{1frm} 用来代表岩块子单元 r_1 和 r_m 之间的裂隙子单元, j_{1d1} 用来表示在裂隙子单元 j_{1frm} 处相互交叉的排水孔接触面子单元。

1.2 含排水孔裂隙岩体的应力应变控制方程

设复合单元中含有 n_r 个岩块子单元, n_d 个排水孔子单元, 利用虚功原理可得复合单元应力应变的控制方程为

$$\left[\begin{array}{cccc} [K]_{r_1, r_1} & [K]_{r_1, r_2} & \cdots & [K]_{r_1, n_r} \\ [K]_{r_2, r_1} & [K]_{r_2, r_2} & \cdots & [K]_{r_2, n_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ [K]_{n_r, r_1} & [K]_{n_r, r_2} & \cdots & [K]_{n_r, n_r} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{\Delta \delta\}_{r_1} \\ \{\Delta \delta\}_{r_2} \\ \cdots \\ \{\Delta \delta\}_{n_r} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \{\Delta F\}_{r_1} \\ \{\Delta F\}_{r_2} \\ \cdots \\ \{\Delta F\}_{n_r} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} [K]_{r_1, r_m} = - \iint_{\Gamma_{r_1, r_m}} [N]^T [L]_{r_1, r_m}^T [D]_{r_1, r_m} [L]_{r_1, r_m} [N] d\Gamma, \\ [K]_{r_1, r_1} = \iiint_{\Omega_{r_1}} [B]_{r_1}^T [D]_{r_1} [B]_{r_1} d\Omega - \sum_{r_m=1, r_m \neq r_1}^{n_r} H_1(r_1, r_m) [K]_{r_1, r_m}, \\ H_1(r_1, r_m) = \begin{cases} 1 & (\text{若 } r_1 \text{ 和 } r_m \text{ 是相邻子单元}) \\ 0 & (\text{若 } r_1 \text{ 和 } r_m \text{ 不是相邻子单元}) \end{cases} \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中 $[B]_{r_1}$ 为微分算子; $[L]_{r_1, r_m}$ 为整体坐标向局部坐标的转换矩阵; $[\Delta F]_{r_1}$ 为复合单元等效荷载增量; $[D]_{r_1}$ 为岩块的弹性矩阵; $[D]_{r_1, r_m}$ 为裂隙面在局部坐标系下的弹性矩阵:

$$[D]_{r_1, r_m} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, k_n , k_s 分别为裂隙的法向刚度和切向刚度。

1.3 含排水孔裂隙岩体的渗流控制方程

设复合单元中含有 n_r 个岩块子单元, n_d 个排水孔子单元, 基于“空气单元”^[17], 同属一个排水孔的排水孔子单元 d_i 和 d_j 在裂隙面子单元 j_{1frm} 处相互交叉, 在局部坐标系统下, 利用变分原理可得排水孔子单元 d_i 和 d_j 之间接触面子单元 j_{1d1} 的传导矩阵为

$$\left. \begin{array}{l} [h]_{d_i, d_i} \{\phi\}_{d_i} + [h]_{d_i, d_j} \{\phi\}_{d_j} = 0, \\ [h]_{d_j, d_i} \{\phi\}_{d_i} + [h]_{d_j, d_j} \{\phi\}_{d_j} = 0, \end{array} \right\} \quad (4)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} [h]_{d_i, d_i} &= \frac{e}{2} \iint_{\Gamma_{d_i, d_i}} \left(\frac{k_d}{2} \left[\frac{\partial N}{\partial x_{j_d, d_i}} \right]^T \left[\frac{\partial N}{\partial x_{j_d, d_i}} \right] + \frac{k_d}{2} \left[\frac{\partial N}{\partial y_{j_d, d_i}} \right]^T \left[\frac{\partial N}{\partial y_{j_d, d_i}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{2k_d}{e^2} [N]^T [N] \right) dx_j y_j, \\ [h]_{d_i, d_j} &= \frac{e}{2} \iint_{\Gamma_{d_i, d_j}} \left(\frac{k_d}{2} \left[\frac{\partial N}{\partial x_{j_d, d_j}} \right]^T \left[\frac{\partial N}{\partial x_{j_d, d_j}} \right] + \frac{k_d}{2} \left[\frac{\partial N}{\partial y_{j_d, d_j}} \right]^T \left[\frac{\partial N}{\partial y_{j_d, d_j}} \right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{2k_d}{e^2} [N]^T [N] \right) dx_j y_j, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, e 为裂隙面的开度, k_d 为排水孔的渗透系数。

“空气单元法”视排水孔为一种高渗透性的充填介质, 故可以固体单元加入到复合单元的单刚中, 可省略指定排水孔表面定水头边界条件的繁杂工作。排水孔的“渗透系数” k_d 只是种概念, 经过分析可知, 相对渗透系数 $P = k_d / k_r$ 介于 $10^3 \sim 10^4$ 时可满足工程计算精度要求, k_r 为相邻岩块的渗透系数^[17]。岩块子单元 $[h]_{r_i}$ 排水孔子单元 $[h]_{d_i}$ 、裂隙面子单元 $[h]_{r_i, r_j}$ 和 $[h]_{r_i, r_m}$ 以及排水孔与岩块接触面子单元 $[h]_{r_i, d_i}$ 的传导矩阵详见 Chen 等^[16]的研究成果, 其中裂隙面子单元和排水孔与岩块接触面子单元的传导矩阵中可体现裂隙、排水孔与相邻岩块之间的流量交换规律。综合上述推导, 整合所有子单元的传导矩阵, 基于差分原理, 在整个研究区域内, 可以得到同时包含排水孔和裂隙的一个复合单元用于求解渗流问题的基本控制方程,

$$\left. \begin{bmatrix} [H]_{1,1} & \cdots & [H]_{1,n_r} & \cdots & [H]_{1,n_r+n_d} \\ [H]_{2,1} & \cdots & [H]_{2,n_r} & \cdots & [H]_{2,n_r+n_d} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ [H]_{n_r,1} & \cdots & [H]_{n_r,n_r} & \cdots & [H]_{n_r,n_r+n_d} \\ [H]_{n_r+1,1} & \cdots & [H]_{n_r+1,n_r} & \cdots & [H]_{n_r+1,n_r+n_d} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ [H]_{n_r+n_d,1} & \cdots & [H]_{n_r+n_d,n_r} & \cdots & [H]_{n_r+n_d,n_r+n_d} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\phi\}_1 \\ \{\phi\}_2 \\ \cdots \\ \{\phi\}_{n_r} \\ \{\phi\}_{n_r+1} \\ \cdots \\ \{\phi\}_{n_r+n_d} \end{Bmatrix} \right\} = \left\{ \begin{Bmatrix} \{f\}_1 \\ \{f\}_2 \\ \cdots \\ \{f\}_{n_r} \\ \{f\}_{n_r+1} \\ \cdots \\ \{f\}_{n_r+n_d} \end{Bmatrix} \right\}, \quad (6)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} [H]_{r_i, r_i} &= [h]_{r_i} + \sum_{r_m=1, r_m \neq r_i}^{n_r} A(r_i, r_m) [h]_{r_i, r_m} + \sum_{d_i=1}^{n_d} B(r_i, d_i) [h]_{d_i, r_i}, \\ [H]_{r_i, r_m} &= A(r_i, r_m) [h]_{r_i, r_m}, \quad (r_i \neq r_m; r_i, r_m = 1, \dots, n_r), \\ [H]_{r_i, r_i+d_i} &= B(r_i, d_i) [h]_{r_i, d_i}, \quad (d_i = 1, n_d; r_i = 1, \dots, n_r), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} A(r_i, r_m) &= \begin{cases} 1 & (\text{若 } r_i \text{ 和 } r_m \text{ 是相邻子单元}) \\ 0 & (\text{若 } r_i \text{ 和 } r_m \text{ 不是相邻子单元}) \end{cases}, \\ B(r_i, d_i) &= \begin{cases} 1 & (\text{若子单元 } d_i \text{ 在岩块子单元 } r_i \text{ 内}) \\ 0 & (\text{若子单元 } d_i \text{ 不在岩块子单元 } r_i \text{ 内}) \end{cases}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} [H]_{n_r+d_i, n_r+d_i} &= [h]_{d_i} + \sum_{d_j=1, d_j \neq d_i}^{n_d} C(d_i, d_j) [h]_{d_i, d_j} + \sum_{r_l=1}^{n_r} B(d_i, r_l) [h]_{d_i, r_l}, \\ [H]_{n_r+d_i, n_r+d_j} &= C(d_i, d_j) [h]_{d_i, d_j} \quad (d_i \neq d_j; d_i, d_j = 1, \dots, n_d), \\ [H]_{n_r+d_i, r_l} &= B(d_i, r_l) [h]_{d_i, r_l} \quad (d_i = 1, n_d; r_l = 1, \dots, n_r), \\ C(d_i, d_j) &= \begin{cases} 1 & (\text{若 } d_i \text{ 和 } d_j \text{ 是相邻的排水孔子单元}) \\ 0 & (\text{若 } d_i \text{ 和 } d_j \text{ 不是相邻的排水孔子单元}) \end{cases}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

2 渗流与法向应力耦合机制

裂隙岩体的变形主要由裂隙产生, 而通过裂隙的流量与裂隙开度的 3 次方成正比。对于工程问题, 岩石在破坏前裂隙产生的剪切变形通常很小^[5], 即裂隙面上的法向应力引起裂隙闭合或张开相对显著, 裂隙的法向应力对岩体的渗流场有重大影响^[18], 故本文首先仅研究考虑法向应力与渗流耦合的含排水孔裂隙岩体的复合单元算法。

真实的裂隙可视为表面大量的相互接触的突起物, 这些突起物可看作是具有高空隙率的、夹在两平行岩壁之间的物质颗粒。据此, 陈胜宏等^[19]提出“充填模型”, 将裂隙视为一种具有变形和渗透特性的均匀的“充填介质”。

基于“充填模型”, 定义 $\xi = 1/(\lambda + 2G)$, 裂隙开度可写为

$$e = e_0 \exp[\xi(\sigma_{z_j} + \gamma_w \phi)], \quad (9)$$

式中, e_0 为裂隙初始开度, σ_{z_j} 为裂隙面上的法向应力 (压为正), ϕ 为裂隙面上的水头, ξ 为耦合系数, 可由试验获得。

把式 (9) 代入排水孔接触面子单元的传导矩阵 $[h]_{d_i, d_i}$ 和 $[h]_{d_i, d_j}$ (式 (5)) 以及裂隙面子单元的传导矩阵 $[h]_{r_i, r_j}$ 和 $[h]_{r_i, r_m}$ 中, 可看出裂隙面上法向应力的改变, 会引起裂隙开度的改变, 以致含排水孔裂隙岩体所在复合单元的传导矩阵的变化, 从而影响整个渗流场的变化; 而改变后的渗流场引起渗透荷载的改变, 导致整个应力场的改变, 此为含排水孔裂隙岩体的渗流与法向应力场之间的耦合机制。本文依据此耦合机制, 基于复合单元法, 采用两场交叉迭代算法, 建立了含排水孔裂隙岩体渗流与法向应力耦合的复合单元模型。具体的耦合步骤: ①由初始条件和边界条件分别计算初始渗流场与初始应力场; ②求出裂隙面上的法向应力和水头, 依据式 (9) 求出裂隙开度 e ; ③根据新的裂隙开度 e 计算新的含排水孔裂隙岩体的传导矩阵, 重新求解渗流场; ④计算改变后的渗透荷载重新求解应力场; ⑤重复步骤②~④直至得到满足精度要求的渗流场与应力场。具体耦合流程图如图 2 所示。

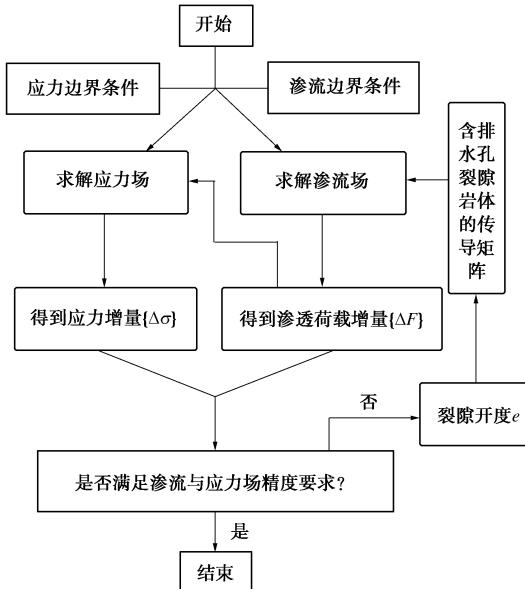


图 2 含排水孔裂隙岩体渗流与应力耦合流程图

Fig. 2 Flow chart of seepage-normal stress coupling for fractured rock masses with drainage holes

3 算例分析

含排水孔裂隙岩体的渗流与法向应力耦合的复合单元算法通过对一个简单的岩石试件(长 0.76 m×宽 0.10 m×高 0.20 m)进行算例分析得到验证。图 3 (a) 所示为复合单元模型, 含有 2592 个节点, 1950 个单元, 包含 130 个复合单元。模型中含有一条水平贯穿裂隙, 初始开度 $e_0 = 0.001$ m, 同时也含有一个铅直排水孔, 孔径约为 0.02 m。岩石试件的有限元数值模型具有同样大小, 含有 5148 个节点, 3990 个单元, 其中裂隙是通过节理单元 (Goodman 等) [20] 进行离散模拟, 而排水孔是采用等效介质进行模拟, 如图 3 (b) 所示。

复合元和有限元两种数值模型具有相同的边界条件和荷载条件。在上游面 ($X=0.00$ m) 的水头定义为 10.0 m, 铅直排水孔的顶部水位为 5.0 m, 下游面 ($X=0.76$ m) 的水头定义为 7.5 m, 而且岩石试件的其他边界与外界没有流量交换。荷载仅考虑水压力、以及岩石试件顶部的集中节点力 F (如图 3 所示), 为便于分析忽略岩体重量。对底面进行 Z 向位移约束, 左侧下面两节点进行 X 向位移约束, Y 负面左右两侧下端点进行 Y 向位移约束。

两种数值模型中岩块、排水孔和裂隙面的计算参数完全相同, 岩块计算参数: 弹模 $E=5000$ MPa, 泊松比 $\nu=0.32$, 重度 $\gamma=24$ kN/m³, 渗透系数 $k_n=1.0 \times 10^{-4}$ m/s; 排水孔计算参数: $\varphi_j=0^\circ$, $\theta_j=90^\circ$, 直径 = 0.02 m, 渗透系数 $k_d=10$ m/s; 裂隙面的计算参数: $\varphi_j=0^\circ$, $\theta_j=0^\circ$, $e_0=0.001$ m, $b=0.001$ m, 法向刚度 $k_n=5000$ MPa/m, 切向刚度 $k_s=3000$ MPa/m, $k_{\eta, \eta_m}=0.5382$ m/s。考虑两种工况进行计算: ①不考虑渗流与法向应力的耦合影响, 即 $\xi=0$; ②考虑渗流与

法向应力耦合的影响, 同时集中力 $F=-0.04$ MN。为简化计算, 岩块、排水孔与裂隙均近似按弹性介质考虑, 渗流分析中水头的迭代精度为 0.01 m, 岩块、排水孔和裂隙中的“充填介质”的力学参数均保持不变。

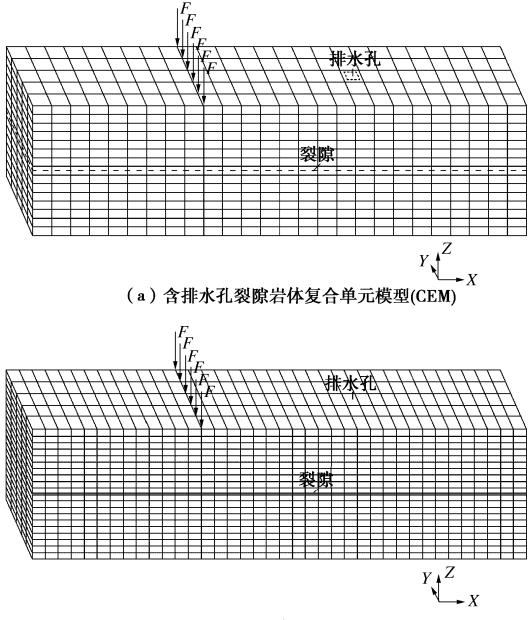


图 3 数值模型网格

Fig. 3 Mesh of numerical models

图 4 所示为铅直面 $X-O-Z$ 的水头势等势线图。含排水孔裂隙岩体渗流与法向应力耦合的复合元算法得到的计算结果与传统有限元算法的结果基本一致。考虑渗流与法向应力耦合作用时, 由于裂隙面上集中力的作用, 水头等势线逐渐向集中力作用的区域集中。同时上游区域的水头逐渐趋近于上游水位, 而排水孔附近区域的水头逐渐接近于排水孔处的水位。由图 4 可以看出, 法向应力的作用给含排水孔裂隙岩体带来的渗透不均匀性较为明显。

图 5 为沿着裂隙面上的水头与集中力 F 的关系曲线图。在集中力作用区域, 裂隙面上的渗透坡降由于考虑渗流与法向应力的耦合作用而逐渐增加, 而其他区域的渗透坡降反而因考虑耦合效应而逐渐减小。

图 6 为铅直面 $X-O-Z$ 的渗透流速矢量图, 图 7 为沿着裂隙面的渗透流速与集中力的关系曲线图。从图 6, 7 中可看出, 两种算法的结果基本相同。在集中力作用区域, 当考虑渗流与法向应力的耦合作用时, 沿着裂隙面的渗透流速逐渐增加, 主要是因为裂隙中“充填介质”的渗透系数保持不变, 而在集中力作用区域沿着裂隙面的渗透坡降由于考虑渗流与法向应力的耦合作用而逐渐增加 (图 5), 故在集中力作用区域裂隙面上的流速也有增加, 以致排水孔中的流速开始减小。

通过排水孔的单宽流量与集中力的关系曲线图见图 8 所示。再次, 从图中可知, 复合元和有限元两种算法的计算结果基本一致。考虑渗流与法向应力耦合

作用时, 通过排水孔的单宽流量成指数形式递减。

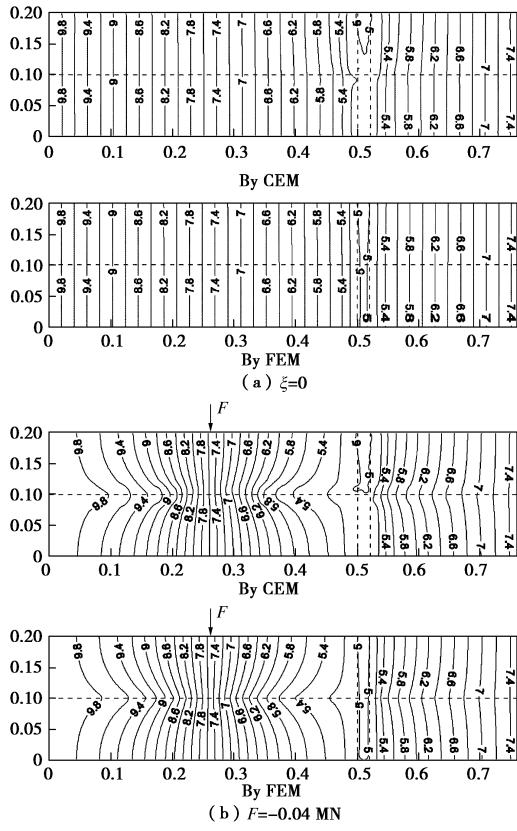


图4 水头势等势线图

Fig. 4 Contours of hydraulic potential

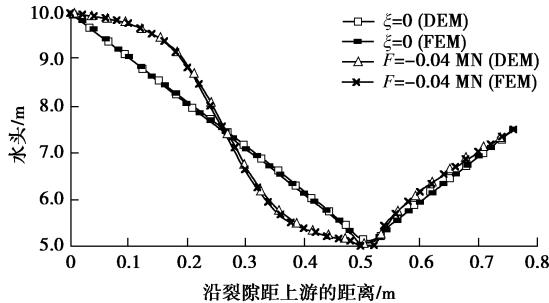


图5 沿着裂隙面的水头势与集中力的关系曲线图

Fig. 5 Hydraulic potential along fracture as a function of concentrated force

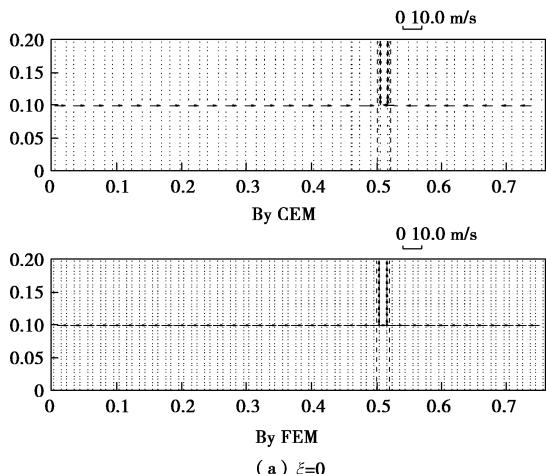


图6 渗透流速矢量图

Fig. 6 Vectors of seepage velocity

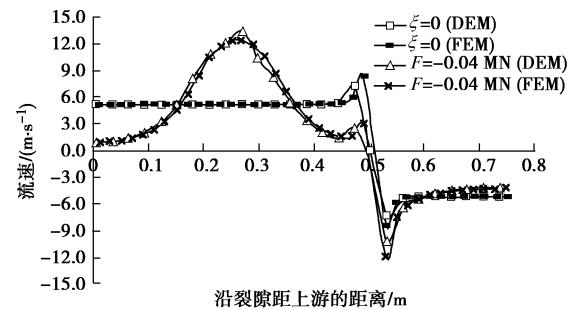


图7 沿着裂隙面的渗透流速与集中力关系曲线图

Fig. 7 Seepage velocity along fracture as a function of concentrated force

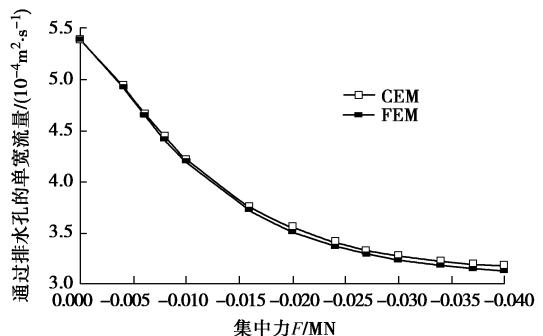


图8 通过排水孔的单宽流量与集中力的关系曲线图

Fig. 8 Flow rate per unit width as a function of concentrated force

4 结语

基于复合单元法理论, 本文提出了含排水孔裂隙岩体的渗流与法向应力耦合的复合单元算法, 是复合单元法针对排水孔的又一重要拓展。如果一个复合单元同时含有裂隙和排水孔, 则定义岩块、裂隙、排水孔、接触面等子单元, 各子单元的水头和位移变量均可在相应映射的复合单元内通过型函数插值求得。分别采用虚功原理和变分原理建立应力和渗流控制方程, 采用交叉迭代算法, 实现含排水孔裂隙岩体的渗流与法向应力耦合的复合单元算法。

理论上, 如采用大小相同, 计算条件相同的岩体试件, 基于有限单元算法离散模拟排水孔和裂隙, 同时保证合理的网格密度, 则得到的计算结果应该和复合单元耦合算法结果一致。通过算例分析比较, 验证了提出的复合单元耦合算法的有效性, 同时显示出复合单元算法的优势。含排水孔裂隙岩体的渗流与法向应力耦合的复合单元算法在计算网格的划分时可不考虑排水孔和裂隙的存在, 网格划分不受限制, 从而可得到规整的计算网格, 随后通过复合单元前处理程序在相应的单元内部自动离散模拟排水孔和裂隙, 前处理简便快捷。复合单元耦合算法具有离散模拟算法的优点, 注重相应的细部结构, 可真实反映排水孔和裂隙的变形和渗透特性, 如可获得裂隙和排水孔的水头、流速等细节信息(图 5~8)。当然, 本文提出的算法程序的编写相对较复杂, 耦合计算时间相对传统有限元略有增加, 但可把人工从离散模拟带来的繁杂前处理工作中解放出来, 且可获取细部构造的详细真实解。

参考文献:

- [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] HSIEH P A, NEUMAN S P. Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media - 1[J]. *Theory Water Resources Research*, 1985, **21**(11): 1655 – 1665.
- [3] ODA M. Permeability tensor for discontinuous rock masses[J]. *Géotechnique*, 1985, **35**(4): 483 – 495.
- [4] ODA M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid analysis in jointed rock masses[J]. *Water Resources Research*, 1986, **22**(13): 1845 – 1856.
- [5] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (ZHANG You-tian. Rock hydraulics and engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [6] 盛金昌, 速宝玉, 赵 坚, 等. 溪洛渡拱坝坝基渗流-应力耦合分析研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 104 – 108. (SHENG Jin-chang, SU Bao-yu, ZHAO Jian, et al. Coupled stress and fluid flow analysis of the arch dam foundation of Xiluodu Hydropower Station[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(1): 104 – 108. (in Chinese))
- [7] SCHWARTZ F W, SMITH W L, CROWE A S. A stochastic analysis of microscopic dispersion in fractured media[J]. *Water Resources Research*, 1983, **19**(5): 1253 – 1265.
- [8] DERSHOWITZ W S, EINSTEIN H H. Three-dimensional flow modeling in jointed rock masses[C]// Proc 6th Int Congr ISRM. Montreal, 1987: 87 – 92.
- [9] CACAS M C, LEDOUX B, MARSITY G De, et al. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation, 1. The flow model[J]. *Water Resources Research*, 1990, **26**(3): 479 – 489.
- [10] ANDERSSON J, DVERSTORP B. Conditional simulation of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures[J]. *Water Resources Research*, 1987, **23**(10): 1876 – 1886.
- [11] 朱伯芳. 渗流场中考虑排水孔作用的杂交元[J]. 水力学报, 1982(9): 32 – 41. (ZHU Bo-fang. The analysis of the effect of drainage holes in the seepage field by means of hybrid elements[J]. *J Hydraul Eng*, 1982(9): 32 – 41. (in Chinese))
- [12] CHEN S H, QIANG S. Composite element model for discontinuous rock masses[J]. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 2004, **41**(7): 865 – 870.
- [13] CHEN S H, QIANG S, SHAHROUR I, et al. Composite element analysis of gravity dam on a complicated rock foundation[J]. *ASCE International Journal of Geomechanics*, 2008.
- [14] CHEN S H, SHAHROUR I. Composite element method for the bolted discontinuous rock masses and its application[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2008, **45**(3): 384 – 396.
- [15] CHEN S H, FENG X M, SHAHROUR I. Numerical estimation of REV and permeability tensor for fractured rock masses by composite element method[J]. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 2008, **32**(12): 1459 – 1477.
- [16] CHEN S H, XUE L L, XU G S, et al. Composite element method for the seepage analysis of rock masses containing fractures and drainage holes[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2010, **47**(5): 762 – 770.
- [17] 胡 静, 陈胜宏. 渗流分析中排水孔模拟的空气单元法[J]. 岩土力学, 2003, **24**(2): 281 – 287. (HU Jing, CHEN Sheng-hong. Air element method for modeling drainage holes in seepage analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(2): 281 – 287. (in Chinese))
- [18] 薛奕鸾, 陈胜宏. 岩石裂隙渗流与法向应力耦合的复合单元模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 1): 2613 – 2619. (XUE Luan-luan, CHEN Sheng-hong. Composite element model of seepage-normal stress coupling for rock fractures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(S1): 2613 – 2619. (in Chinese))
- [19] 陈胜宏, 王鸿儒, 熊文林. 节理面渗流性质的探讨[J]. 武汉水利电力学院学报, 1989, **22**(1): 53 – 60. (CHEN Sheng-hong, WANG Hong-ru, XIONG Wen-lin. Study of the seepage characteristics of joint surface[J]. *Journal of Wuhan Univ of Hydr and Elec Eng*, 1989, **22**(1): 53 – 60. (in Chinese))
- [20] GOODMAN R E, TAYLOR R, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. *J Soil Mech Found Div ASCE*, 1968, **14**(6): 37 – 59.