

含复杂裂隙网络岩体渗流特性研究的复合单元法

冯学敏, 陈胜宏

(武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 研究含复杂裂隙网络岩体渗流特性的复合单元法, 该方法首先利用蒙特卡罗方法随机生成符合给定概率分布特征的复杂裂隙网络; 然后通过交切和拓扑运算将各裂隙段置于常规有限单元内部, 形成内含由多个裂隙段分划而成的子单元的复合单元, 根据推导的公式计算渗流场进而分析岩体的渗透特性。该方法具有以下几个主要特点: (1) 可与传统的有限元法融合; (2) 可考虑每条裂隙的具体位置、产状、开度、长度和渗透性质; (3) 可考虑岩石的渗透性及其与裂隙间的流量交换; (4) 可计入不连通裂隙对渗流场的影响; (5) 复合单元的拓扑信息由裂隙网络与常规有限单元边界的交切及其单元内部裂隙段的相互交切而生成, 由于先没有考虑裂隙, 故复合单元前处理简单。用复合单元法分析含复杂裂隙网络岩体的渗流行为及其渗流特性是一种新的数值模拟手段。算例分析表明该方法的可行性和有效性。

关键词: 渗流力学; 裂隙网络; 岩体; 蒙特卡罗方法; 随机模拟; 复合单元法

中图分类号: O 357.3

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)05 - 0918 - 07

COMPOSITE ELEMENT METHOD FOR SEEPAGE CHARACTERISTICS STUDY ON ROCK MASSES WITH COMPLICATED FRACTURE NETWORK

FENG Xuemin, CHEN Shenghong

(School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The composite element method for the seepage problem in the rock masses containing complicated fracture network is studied. Firstly, the Monte Carlo method is adopted to generate the stochastic fracture network according to the given probability distribution features; and then the fracture network is located within the conventional finite element to form composite element, which is composed of several subelements incised by the fracture segments. Based on the deduced algorithm, the nodal hydraulic potential of respective subelements can be calculated; and then the analysis of the seepage characteristic in rock masses is performed. The main features of this method are as follows: (1) it can be integrated into conventional finite element method; (2) the number, position, orientation, trace and aperture of every fracture are taken into consideration in the analysis; (3) the permeability of rock and the flow exchange between rock and fractures are considered; (4) the obturated fractures are not omitted and their effects on the seepage are taken into account; and (5) the topological information of composite elements is obtained by the intersection and incision between the fractures and the finite element boundaries and those among the fractures themselves. In this way, the composite element mesh generation of rock masses is not restricted by fractures and can be considerably simplified. The composite element method provides a new approach of the numerical simulation for the seepage solution in the rock masses containing complicated fracture network. The feasibility and effectiveness of this method are verified by the numerical example.

收稿日期: 2005 - 04 - 25; **修回日期:** 2005 - 06 - 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379039, 50239070)

作者简介: 冯学敏(1977 -), 男, 2000年毕业于武汉水利电力大学水电系, 现为博士研究生, 主要从事水工结构与岩土工程渗流方面的研究工作。E-mail: fxm_11_163@163.com

Key words: seepage mechanics; fracture network; rock masses; Monte Carlo method; stochastic simulation; composite element method

1 引言

岩体含有发育程度不同的断层、节理、裂隙等不连续面, 岩体渗流的复杂性就在于这些不连续面引起的非均匀性、非连续性和各向异性。自 20 世纪中期以来, 裂隙岩体的渗流特性及其数值模拟一直是国内外学者研究的热点课题, 并已取得了丰富的成果^[1~6]。对裂隙渗流的研究所基于的模型大致分为等效连续体模型、离散裂隙网络模型以及两者的混合模型, 这些模型各有自身的适用条件和优缺点^[5, 6]。等效连续体模型假定裂隙岩体内含有足够数量、不同产状的裂隙, 从而可以应用孔隙介质渗流基本方程在平均意义上来描述岩体中的渗流行为, 对于单个裂隙的具体位置、产状、结构则不予考虑^[5~7]; 而在离散裂隙网络模型中, 首先在对研究域岩体裂隙的现场测量和统计的基础上生成随机裂隙网络, 然后运用裂隙网络水力学方法对裂隙岩体渗流进行求解^[5~8]。等效连续模型的优点是模型简单、理论成熟、容易求解, 适合于研究大范围、裂隙分布密集的岩体渗流, 而对于岩体代表性单元体积很大甚至不存在的研究域或者需要研究某一特定小范围、某个特定路径的渗流行为时, 该模型则无能为力, 此时需要采用离散裂隙网络模型。但从目前的研究情况来看, 离散裂隙网络模型也面临一些难以解决的问题^[6, 9], 主要有: (1) 裂隙网络的连通率不易确定; (2) 一些重要参数如裂隙宽(或水力开度)、形状等难以确定, 所作假定比较粗略; (3) 对于不连通的裂隙则不予考虑, 从而在一定程度上导致结果失真; (4) 问题规模很大往往导致求解困难, 特别对于三维裂隙网络, 计算数量众多的裂隙相互交切并离散成单元的前处理工作十分庞大。

为解决岩体应力-应变分析中不连续面和锚杆的数值模拟问题, 笔者建立了复合单元法^[10~15]。最近, 笔者又将复合单元法推广到裂隙岩体渗流分析中, 以解决不连续面和排水孔的模拟问题^[16~18]。在这些工作的基础上, 本文对含复杂裂隙网络岩体的渗流特性问题进行了研究, 其基本思想是先采用蒙特卡罗方法根据岩体裂隙测量和统计数据生成随机裂隙网络, 得到一系列裂隙的位置、产状、长度和隙宽(开度), 再将此裂隙网络与区域的有限元网格

进行交切和拓扑计算, 使得每条裂隙置于若干个单元内部, 而一些单元则内含若干个裂隙段, 称之为复合单元。复合单元中含有由裂隙分割而成的任意形状的子单元, 每个子单元各有一组用于插值的映射节点水头, 子单元内的水头势、流速由其相应映射节点水头计算得到, 而复合单元中裂隙面上的水头势、流速则由其相邻 2 个子单元的映射节点水头计算得到。复合单元法各映射子单元的节点水头求解过程与传统有限元法类似, 不含裂隙的单元自动退化为常规有限单元, 其计算程序可以方便地与传统有限元分析程序融合。复合单元法的特点在于: (1) 可与传统有限元法融合, 在算法上具有继承性; (2) 可考虑每条裂隙的具体位置、产状、开度、长度、渗透性质; (3) 可考虑岩石的渗透性及其与裂隙间的流量交换; (4) 可计入不连通裂隙对渗流场的影响; (5) 复合单元的拓扑信息由裂隙网络与常规有限单元边界的交切及其单元内部裂隙段的相互交切而生成, 由于先不考虑裂隙, 故复合单元前处理简单, 这对于含有大量裂隙的岩体计算域尤为重要, 可大大降低前处理成本。

最后, 笔者给出了一个裂隙岩体试件渗流数值试验的算例, 计算出其渗流场并进行了初步的等效渗透系数的分析, 从而表明了该方法的可行性和有效性。

2 三维随机裂隙网络的生成

岩体中除了一些位置产状确定的较大规模断层外, 更多的是数量众多、位置产状难以一一确定的 IV, V 级小规模裂隙, 为了考虑这些裂隙对岩体的影响, 只能在有限的地质测量基础上, 通过统计分析得到其密度、间距、产状、迹长和隙宽等参数的分布规律, 运用蒙特卡罗方法^[19]按照已知的概率分布类型进行采样, 从而获得与实际岩体裂隙同分布的随机裂隙网络。近年来, 借助计算机对二维、三维岩体裂隙网络的随机模拟已经取得了研究成果^[9, 20~23]。

岩体裂隙网络随机模拟的一般步骤为: (1) 对研究域裂隙的分布情况进行实地调查和测量; (2) 对测量数据进行校正, 对裂隙进行聚类、分组等统计分析, 进而建立各组裂隙的概率模型, 确定概率

模型中的各参数；(3) 采用蒙特卡罗方法进行随机抽样，即通过计算机产生伪随机数，通过适当的数学变换产生符合上述概率模型的随机变量，进而可以模拟各组裂隙的条数、中心位置、迹长(半径)、产状和隙宽等要素；(4) 对各组裂隙的模拟结果进行有效性检验，组合各组裂隙形成岩体裂隙网络。

从已有的研究成果来看，岩体裂隙的几项主要要素通常都符合某一种或几种类型的概率分布。裂隙的条数依据其密度服从 Poisson 随机过程；裂隙中心点位置服从研究域内均匀分布；产状通常符合 Bingham 分布、Fisher 分布、双变量正态分布和半球正态分布等；迹长(半径)符合负指数分布或对数正态分布。由于同一裂隙的隙宽很不均匀，因而对隙宽的模拟研究并不多，但其对岩体渗流的影响是非常显著的，因而笔者认为在研究裂隙岩体渗流时必须依据隙宽分布概率模型模拟各条裂隙的隙宽，并简单假定同一裂隙的隙宽相同，且隙宽符合正态或对数正态分布。

本文将采用上述某一种确定的概率模型来模拟各组裂隙的各主要要素。随机变量的计算机生成方法按照概率密度函数的可积性分为两类：对于密度函数为可积函数的随机变量可采用反函数法；对于不可积的则采用近似法。下面将简要介绍本文用到的概率模型随机变量的计算机生成方法，其中伪随机数的产生方法采用目前最通用的同余法。几种典型的概率分布如下：

(1) 均匀分布

设均匀分布的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & (a \leq x \leq b) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (1)$$

累计概率函数为

$$F(x) = \frac{x-a}{b-a} \quad (2)$$

显然其值域 R 为 $[0, 1]$ ，则均匀分布的随机变量可由 $[0, 1]$ 间的伪随机数得到，即

$$x_u = a + (b-a)R \quad (3)$$

(2) Poisson 分布

Poisson 分布是一种离散型概率分布，其分布函数为

$$P[N = k] = \frac{e^{-\lambda_i v} (\lambda_i v)^k}{k!} \quad (4)$$

式中： v 为研究域的体积， λ_i 为第 i 组裂隙的体积密度， k 为裂隙的条数。

累计概率函数为

$$F(k) = \sum_{j=0}^k \frac{e^{-\lambda_i v} (\lambda_i v)^j}{j!} \quad (5)$$

借助计算机获取随机变量的方法为：若 $F(k_m) \leq R < F(k_m + 1)$ ，则

$$k = k_m \quad (6)$$

(3) 负指数分布

负指数分布的密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} e^{-\frac{x}{\theta}} & (x > 0) \\ 0 & (x \leq 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中： θ 为负指数分布的数学期望，且有 $\theta > 0$ 。

累计概率函数为

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\theta}} \quad (8)$$

负指数分布的随机变量为

$$x_e = -\theta \ln(1 - R) \quad (9)$$

(4) Fisher 分布

Fisher 分布实际上是一种对称半球面分布，其概率密度为

$$f(\varphi', \theta') = \frac{\varphi' \eta \sin \theta' e^{\eta \cos \theta'}}{4\pi \sinh \eta} \quad (10)$$

$$\left(0 < \varphi' < 2\pi, 0 < \theta' < \frac{\pi}{2} \right)$$

式中： φ' 为该裂隙组法线合向量方向 (φ_0, θ_0) 局部坐标系下的倾向； θ' 为局部坐标下的倾角，与整体坐标系存在确定的转换关系； η 为反映该组裂隙绕 (φ_0, θ_0) 集中程度的参数，可由极大似然估计得到。

φ' 、 θ' 相互独立， φ' 服从 $[0, 2\pi]$ 间的均匀分布，可由均匀分布中方法得到其随机值，而 θ' 的累计概率函数为

$$F(\theta') = \frac{e^\eta - e^{\eta \cos \theta'}}{e^\eta - e^{-\eta}} \approx 1 - e^{\eta(\cos \theta' - 1)} \quad (11)$$

由于一般有 $\eta > 5$ ，故认为 $e^{-\eta} \approx 0$ 。于是其随机值为

$$\theta'_i = \arccos \left[\frac{\ln(1-R)}{\eta} + 1 \right] \quad (12)$$

(5) 正态分布和对数正态分布

数学期望为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布的密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (13)$$

由于正态分布的密度函数为不可积函数，因此

必须采用近似方法, 一般先用中心极限定理公式或 Priest 公式得到近似符合 $N(0, 1)$ 分布的随机变量 x_{N_0} , 再由下式:

$$x_N = \mu + \sigma x_{N_0} \quad (14)$$

求得符合 $N(\mu, \sigma)$ 分布的随机变量值。

对数正态分布的密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma'x\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu'}{\sigma'}\right)^2\right] & (x > 0) \\ 0 & (x \leq 0) \end{cases} \quad (15)$$

数学期望和方差分别为

$$\left. \begin{aligned} \mu &= e^{\mu' + \frac{\sigma'^2}{2}} \\ \sigma^2 &= e^{2\mu' + \sigma'^2} (e^{\sigma'^2} - 1) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

若经下列变换:

$$\left. \begin{aligned} y &= \ln x \\ \sigma'^2 &= \ln\left[\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + 1\right] \\ \mu' &= \ln \mu - \frac{1}{2}\sigma'^2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

可将数学期望为 μ 、方差为 σ^2 的对数正态分布的随机变量 x 变换为数学期望为 μ' 、方差为 σ'^2 的正态分布的随机变量 y , 从而由式(14)求得。

3 含多条裂隙的复合单元算法

笔者^[17, 18]已经分别推导了含 1 条和 2 条裂隙段的复合单元法渗流计算公式, 本文将在此基础上推导含多条裂隙的复合单元法渗流计算格式。

子单元 ei 内的变分方程可整理为

$$[h]_{ei} \{\bar{\phi}\}_{ei} = \{f\}_{ei} \quad (18)$$

其中单元传导矩阵和等效节点流量的计算式分别为

$$[h]_{ei} = \iiint_{\Omega_{ei}} (\{S\}[N])^T [k]_{ei} \{S\}[N] d\Omega \quad (19)$$

$$\{f\}_{ei} = -\iiint_{\Omega_{ei}} [N] f d\Omega - \iint_{\Gamma_{ei}} [N] g d\Gamma \quad (20)$$

对于子单元 ei 与子单元 ej 的邻界面——裂隙段 Γ_{ij} , 设该裂隙段属于第 k 条裂隙, 其厚度为 t_k , 假定在其厚度方向上水头呈线性变化, 则 Γ_{ij} 上的变分方程可整理为

$$\left. \begin{aligned} [h]_{\Gamma_{ij}eiei} \{\bar{\phi}\}_{ei} + [h]_{\Gamma_{ij}eiej} \{\bar{\phi}\}_{ej} &= 0 \\ [h]_{\Gamma_{ij}ejei} \{\bar{\phi}\}_{ei} + [h]_{\Gamma_{ij}ejej} \{\bar{\phi}\}_{ej} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

其中,

$$[h]_{\Gamma_{ij}eiei} = [h]_{\Gamma_{ij}eiej} = \frac{t}{2} \iint_{\Gamma_{ij}} \left(\frac{k_{\Gamma_{ij}x}}{2} [N_{x_j}]^T [N_{x_j}] + \frac{k_{\Gamma_{ij}y}}{2} [N_{y_j}]^T [N_{y_j}] + \frac{2k_{\Gamma_{ij}z}}{t^2} [N]^T [N] \right) dx_j dy_j \quad (22)$$

$$[h]_{\Gamma_{ij}ejei} = [h]_{\Gamma_{ij}eiei} = \frac{t}{2} \iint_{\Gamma_{ij}} \left(\frac{k_{\Gamma_{ij}x}}{2} [N_{x_j}]^T [N_{x_j}] + \frac{k_{\Gamma_{ij}y}}{2} [N_{y_j}]^T [N_{y_j}] + \frac{2k_{\Gamma_{ij}z}}{t^2} [N]^T [N] \right) dx_j dy_j \quad (23)$$

一个复合单元内的基本方程组格式为

$$\begin{bmatrix} [H]_1 & [H]_{12} & \cdots & [H]_{1m} \\ [H]_{21} & [H]_2 & \cdots & [H]_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [H]_{m1} & [H]_{m2} & \cdots & [H]_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{\phi}\}_{e1} \\ \{\bar{\phi}\}_{e2} \\ \vdots \\ \{\bar{\phi}\}_{em} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{f\}_{e1} \\ \{f\}_{e2} \\ \vdots \\ \{f\}_{em} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

式中: m 为单元内子单元的个数; $[H]_i, [H]_{ij}$ 可分别表示为

$$[H]_i = [h]_{ei} + \sum_{j=1}^n [h]_{\Gamma_{ij}eiei} \quad (25)$$

$$[H]_{ij} = \begin{cases} [h]_{\Gamma_{ij}eiej} & (j \neq i, \text{子单元 } ej \text{ 与 } ei \text{ 邻界}) \\ 0 & (\text{子单元 } ej \text{ 与 } ei \text{ 不邻界}) \end{cases} \quad (26)$$

式中: n 为子单元 ej 的邻界面个数。

当单元内不含裂隙段时, 基本方程自动退化为常规有限元格式, 在加入边界条件后, 可按与有限元相同的方法求解各子单元的节点水头, 进而求解水头梯度、流速和截面流量。

4 算例

用一个简单的算例来说明复合单元法在含裂隙网络的岩体渗流分析中的应用。选取一个尺寸为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的试件, 考虑到裂隙的长度, 为了保证绝大多数裂隙将位于计算域内部, 取实际裂隙网络生成域大小为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。设地质钻孔、测线法或测窗法已获得了 2 组裂隙的密度、迹长、产状和隙宽等几何量的数据, 并经统计求得了各自的概型和概率密度函数的参数, 各组裂隙的概率分布及其参数列于表 1 中。

表 1 各组裂隙的概率分布及其参数

Table 1 Probability functions and parameters of each set of fractures

裂隙组号	密度		中心点位置	迹长		产状			隙宽			
	概型	密度/(条·m ⁻³)		概型	μ/m	概型	η	φ ₀ /(°)	θ ₀ /(°)	概型	μ/mm	σ/mm
1	Poisson	0.15	均匀	负指数	2.0	Fisher	6	0	30	对数正态	1.0	0.10
2	Poisson	0.10	均匀	负指数	1.5	Fisher	7	60	60	对数正态	0.5	0.05

假定裂隙面为正方形，其边长 l_s 与迹长 l_t 关系^[6] 为

$$l_s = \sqrt{\frac{2}{3}} l_t \quad (27)$$

根据表 1 的统计数据用蒙特卡罗方法生成裂隙网络的 5 个样本，其中一个样本在半个试件域内的裂隙网络立体消隐图如图 1 所示。在该样本中，第 1 组裂隙为 13 条，第 2 组则随机生成了 12 条裂隙。

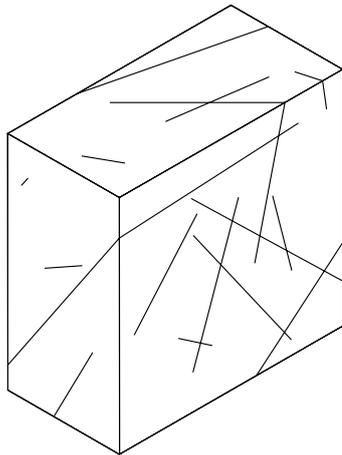


图 1 裂隙网络立体消隐图

Fig.1 Hidden figure of the simulated fracture meshes

图 2 为试件计算域有限元网格，将各样本的裂隙网络与有限元网格进行相交、切割、分块等空间几何运算和拓扑关系整理得到所需的复合单元信息。在 $x = 0 \text{ m}$ 的左边界面上施加定水头 $h_1 = 10.0 \text{ m}$ ， $x = 5 \text{ m}$ 的右边界面上施加定水头 $h_2 = 5.0 \text{ m}$ ， x 方向的平均水力梯度为 1.0；在上下边界面 $z = 0 \text{ m}$ 和 $z = 5 \text{ m}$ 施加定水头 $h_3 = 5.0 \text{ m}$ ， z 方向平均水力梯度为 0； $y = 0 \text{ m}$ 和 $y = 5 \text{ m}$ 为不透水边界。完整岩石的各向渗透系数取为 0.1 m/s。

不连续面也是一种介质，有一定厚度的不连续面(断层、夹层等)，其渗透特性主要由充填物控制；无厚度的不连续面(节理、裂隙等)通常可分为无充填的和有充填的两类，其水力学特性并不相同。早期的研究中将节理裂隙简化为由 2 块光滑

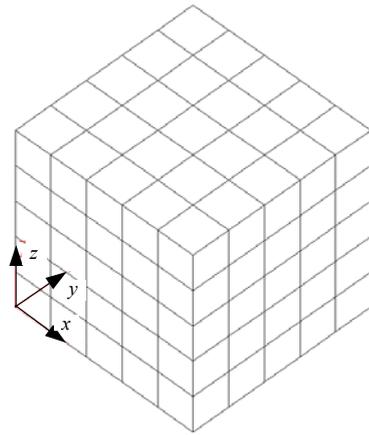


图 2 试件计算域有限元网格

Fig.2 Finite element mesh of the sample for calculation

平行板构成的有一定宽度的缝隙，其代表性的成果是 D. Snow^[24](1969)立方定理。由于实际节理裂隙并非光滑面，N. R. Barton 等^[25~29]又对立方定理根据节理裂隙面的粗糙度进行修正。实际上，节理裂隙的水力传导系数还应该是裂隙法向应力、剪切应力与隙宽的函数^[24, 26, 30~36]。笔者也曾将无厚度的不连续面视为有一定等效开度的高孔隙率的实体介质，利用“充填模型”建立其渗透特性以及与应力 - 应变的耦合^[37]。从计算方法的角度看，若采用“充填模型”，无厚度的不连续面与有一定厚度的不连续面都可以用统一的方法处理。

采用“充填模型”时，需通过试验给出裂隙的“虚拟”渗透系数。在本文的算例研究中，第 1 组裂隙的渗透系数取为 1.0 m/s，第 2 组裂隙的渗透系数则取为 2.0 m/s。通过计算可得各节点的水头和流速。图 3 为试件剖面流速矢量图。

根据截面截得的子单元和裂隙段的流速矢量，通过面积积分可以求得指定截面的流量，而理论上各向异性介质流量计算公式为

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= -k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} S_{yz} - k_{xz} \frac{\partial \phi}{\partial z} S_{yz} \\ Q_z &= -k_{xz} \frac{\partial \phi}{\partial x} S_{xy} - k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} S_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

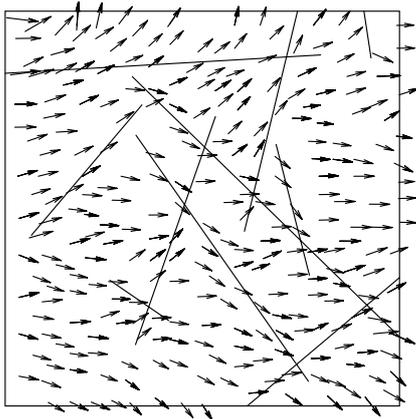


图 3 试件剖面流速矢量图

Fig.3 Flow rate vector in the section of a sample

由于 z 方向平均水力梯度 $\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$ ， x 方向的平均水力梯度 $\frac{\partial \phi}{\partial x} = 1.0$ ，因而根据式(28)可由流量计算 x 向等效渗透系数 k_x ， k_{xz} 。表 2 列出了各样本的计算流量及 x 方向的等效渗透系数。

表 2 各样本的计算流量及 x 方向的等效渗透系数

Table 2 Seepage flux and equivalent calculated penetrative coefficients for each sample

样本组号	x 方向流量 /($10^3 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$)	k_x /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	z 方向净流量 /($10^3 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$)	k_{xz} /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	4.930	0.197 2	0.315	0.012 6
2	3.823	0.152 9	1.040	0.041 6
3	3.579	0.143 2	1.017	0.040 7
4	4.174	0.167 0	-0.403	-0.016 1
5	3.772	0.150 9	1.233	0.049 3

5 结 语

用复合单元法分析含复杂裂隙网络的岩体渗流行为及其渗流特性是一种可行、有效的新方法，该方法考虑了岩体中每条裂隙的结构和渗透性质，以及岩石和不连通裂隙对整个区域渗流场的影响，提出用子单元映射节点水头的概念来描述裂隙引起的渗流场的不连续性，求解过程与传统有限元法类似，但相对于离散裂隙网络水力学方法前处理较为简化，具有较好的工程应用前景。

在本文基础上，笔者下一步将开展裂隙岩体渗透张量、渗流代表性单元体积(REV)存在性及其求解等问题的研究。

参考文献(References):

- [1] Louis C A. Study on groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses[R]. London: Imperial College, 1969.
- [2] Dershowitz W S, Einstein H H. Three-dimensional flow modeling in jointed rock masses[A]. In: Proc. the 6th Int. Cong., ISRM[C]. [s. l.]: [s. n.], 1987. 87 - 92.
- [3] Cacas M C, Ledoux B, Marsity G D, 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.
- [4] Zimmerman R W, Bodvarsson G S. Hydraulic conductivity of rock fractures[J]. Transport in Porous Media, 1996, 23: 1 - 30.
- [5] 田开铭, 万力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价[M]. 北京: 学苑出版社, 1989.(Tian Kaiming, Wan Li. Research and Evaluation of the Permeability of Anisotropic Fractured Media[M]. Beijing: Academy Press, 1989.(in Chinese))
- [6] 张有天. 岩石水力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (Zhang Youtian. Rock Hydraulics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.(in Chinese))
- [7] 宋晓晨, 徐卫亚. 裂隙岩体渗流概念模型研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 226 - 232.(Song Xiaochen, Xu Weiya. A study on conceptual models of fluid flow in fractured rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 226 - 232.(in Chinese))
- [8] 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.(Wang Enzhi. Network analysis and seepage model of fractures in rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(3): 214 - 221.(in Chinese))
- [9] 张发明, 汪小刚, 贾志欣, 等. 三维结构面连通率的随机模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1 486 - 1 490.(Zhang Faming, Wang Xiaogang, Jia Zhixin, et al. 3D joint persistence calculation through random simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1 486 - 1 490.(in Chinese))
- [10] Chen S H, Egger P, Migliazza R, et al. Three-dimensional composite element modeling of hollow bolt in rock masses[A]. In: Proceedings of the ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions—Eurock'2002[C]. Madeira, Portugal: A. A. Balkema, 2002. 25 - 28.
- [11] 陈胜宏, 强 晟, 陈尚法. 加锚岩体的三维复合单元模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 1 - 8.(Chen Shenghong, Qiang Sheng, Chen Shangfa. Study on three-dimensional composite element model of bolted rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 1 - 8.(in Chinese))
- [12] Chen S H, He Z G, Egger P. Study on hollow friction bolts in rock by a three-dimensional composite element method[A]. In: Proceedings of the 10th Congress of the ISRM—Technology Roadmap for Rock Mechanics[C]. [s. l.]: [s. n.], 2003. 203 - 206.

- [13] Chen S H, Qiang S, Chen S F, et al. Composite element model of the fully grouted rock bolt[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2004, 37(3): 193 - 212.
- [14] 强 晟, 陈胜宏. 不连续岩体的三维弹粘塑性复合单元模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(20): 3 390 - 3 396.(Qiang Sheng, Chen Shenghong. Three-dimensional elastoviscoplastic composite element model of discontinuous rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(20): 3 390 - 3 396.(in Chinese))
- [15] Chen S H, Qiang S. Composite element model for discontinuous rock masses[J]. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2004, 41(7): 865 - 870.
- [16] Chen S H, Xu Q, Hu J. Composite element method for seepage analysis of geotechnical structures with drainage hole array[J]. *Journal of Hydrodynamics (Ser. B)*, 2004, 16(3): 260 - 266.
- [17] 冯学敏, 陈胜宏. 不连续岩体渗流的复合单元法初步研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(1): 93 - 99.(Feng Xuemin, Chen Shenghong. Preliminary research on the composite element method for the seepage problem in discontinuous rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 93 - 99.(in Chinese))
- [18] Chen S H, Feng X M. Composite element model for rock mass seepage flow[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006.(to be pressed)
- [19] 裴鹿成, 王仲奇. 蒙特卡罗方法及其应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1998.(Pei Lucheng, Wang Zhongqi. Monte Carlo Method and Its Application[M]. Beijing: China Ocean Press, 1998.(in Chinese))
- [20] 邬爱清, 周火明, 任 放. 岩体三维网络模拟技术及其在三峡工程中的应用[J]. *长江科学院院报*, 1998, 15(1): 15 - 22.(Wu Aiqing, Zhou Huoming, Ren Fang. Research on 3D rock joint network simulation techniques and its application to TGP[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1998, 15(1): 15 - 22.(in Chinese))
- [21] 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(3): 397 - 402.(Chen Jianping. 3D network numerical modeling technique for random discontinuities of rock masses[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(3): 397 - 402.(in Chinese))
- [22] 贾洪彪, 唐辉明, 刘佑荣. 岩体结构面网络模拟技术研究进展[J]. *地质科技情报*, 2001, 20(1): 105 - 108.(Jia Hongbiao, Tang Huiming, Liu Yourong. Advances in the study on rock discontinuity net-work modeling technique[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(1): 105 - 108.(in Chinese))
- [23] 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 I: 裂隙网络的随机生成[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(12): 2 015 - 2 020.(Song Xiaochen, Xu Weiya. Numerical model of three-dimensional discrete fracture network for seepage in fractured rocks(I): generation of fracture network[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(12): 2 015 - 2 020.(in Chinese))
- [24] Snow D. Anisotropic permeability of fractured media[J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(6): 1 273 - 1 289.
- [25] Barton N R, Bandis S, Bakhtar K. Strength deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 1985, 22(3): 121 - 140.
- [26] Louis C, Maini T. Determination of in-situ hydraulic parameters in jointed rock[A]. In: *Proc. the 2nd Cong., ISRM[C]*. [s. l.]: [s. n.], 1970. 235 - 245.
- [27] Louis C. Rock hydraulics[A]. In: *Rock Mechanics[C]*. [s. l.]: [s. n.], 1974. 299 - 387.
- [28] Tsang Y W, Witherspoon P A. Hydromechanical behaviour of a deformable rock fracture subject to normal stress[J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, 86(B10): 9 287 - 9 298.
- [29] Tsang Y W, Witherspoon P A. The dependence of fracture mechanical and fluid flow properties on fracture roughness and sample size[J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88(B3): 2 359 - 2 366.
- [30] Gale J. The effects of fracture type(induced versus natural) on the stress-fracture closure-fracture permeability relationships[A]. In: *Proc. US the 23rd Symp. on Rock Mechanics[C]*. [s. l.]: [s. n.], 1982. 290 - 298.
- [31] Raven T G, Gale J E. Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 1985, 22(4): 251 - 261.
- [32] 陈 平, 张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1994, 13(4): 299 - 307.(Chen Ping, Zhang Youtian. Coupling analysis of seepage/stress for jointed rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1994, 13(4): 299 - 307.(in Chinese))
- [33] 耿克勤, 吴永平. 拱坝和坝肩岩体的力学和渗流耦合分析实例[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(2): 125 - 131.(Geng Keqin, Wu Yongping. Analysis of the mechanic-hydraulic interaction concerning arch dam and its abutments[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(2): 125 - 131.(in Chinese))
- [34] 刘继山. 单裂隙受正应力作用时的渗流公式[J]. *水文地质工程地质*, 1987, 14(2): 32 - 33.(Liu Jishan. The seepage formulations in a single fracture under normal stress[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1987, 14(2): 32 - 33.(in Chinese))
- [35] 速宝玉, 詹美礼, 赵 坚. 光滑裂隙水流模型试验及其机制初探[J]. *水利学报*, 1994, (5): 19 - 24.(Su Baoyu, Zhan Meili, Zhao Jian. The model test of the flow in smooth fracture and the study on its mechanism[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, (5): 19 - 24.(in Chinese))
- [36] 速宝玉, 詹美礼, 王 媛. 裂隙渗流与应力耦合特性的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1997, 19(4): 73 - 77.(Su Baoyu, Zhan Meili, Wang Yuan. Experimental study on the coupling characteristics of seepage and stress in fractures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(4): 73 - 77.(in Chinese))
- [37] 陈胜宏, 王鸿儒, 熊文林. 节理渗透特性的研究[J]. *武汉水利电力学院学报*, 1989, 22(1): 53 - 60.(Chen Shenghong, Wang Hongru, Xiong Wenlin. Study on the seepage characteristics of joint surface[J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1989, 22(1): 53 - 60.(in Chinese))

收稿日期: 2005 - 04 - 25; **修回日期:** 2005 - 06 - 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379039, 50239070)

作者简介: 冯学敏(1977 -), 男, 2000年毕业于武汉水利电力大学水电系, 现为博士研究生, 主要从事水工结构与岩土工程渗流方面的研究工作。E-mail: fxm_11_163@163.com