

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.02.010

岩体裂隙介质各向异性耦合模型研究

黄 勇¹ ,陈 静²

(1.河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098 ;2.江苏省水文水资源勘测局 ,江苏 南京 210029)

摘要 :将裂隙岩体看作是由主干裂隙和网络状裂隙共同构成的 ,分别用随机离散裂隙网络模型和等效连续介质模型描述裂隙中的水流运动 ,利用裂隙壁与岩块之间的水位连续和流量均衡将两模型耦合起来 ,建立各向异性离散-连续耦合模型 ,并给出了求解方法 .与其他耦合模型不同的是 ,各向异性离散-连续耦合模型采用了 Monte-Carlo 方法随机生成裂隙网络系统 ,具有随机性 .通过算例比较了等效连续介质模型和离散-连续耦合模型对裂隙岩体渗流场影响模拟的差异 .结果表明 ,裂隙间距和隙宽越大 ,2 种模型模拟的差异越大 .

关键词 :裂隙介质 ;各向异性 ;耦合模型 ;随机 ;Monte-Carlo 法
中图分类号 :P641.2 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)02-0171-04

裂隙岩体渗流模型主要有 4 种 ,即等效连续介质模型、随机离散裂隙网络模型、裂隙-孔隙双重介质模型和等效-离散耦合模型^[1-3] ,这些模型有各自的适用条件和范围 .通常将裂隙岩体按渗流作用不同分为主干裂隙和网络状裂隙 2 部分 ,主干裂隙如断层、剪切破裂带等通常切割深、延伸长、规模大 ,透水性相对较强 ,对岩体整体地下水运动起控制作用 .网络状裂隙主要由相互交叉的裂隙等构成 ,规模小、数量多、分布广 ,结构面孔隙总体较大 ,在空间上相互交织成不规则网络状^[4-7] .主干裂隙和网络状裂隙通常通过 2 种模型的耦合作用来进行渗流分析 .如王媛等^[8]基于水头连续、节点流量平衡的原则将等效连续介质和随机离散裂隙网络模型进行耦合 ;王洪涛等^[9]利用水头和水量的关系将等级连续介质和离散裂隙网络模型耦合 ,给出了渗透系数的计算方法 ;周志芳^[10]提出了裂隙地下水运动的双重介质模型 .本文将等效连续介质模型和随机离散裂隙网络模型进行耦合来模拟岩体渗流场的分布 .

1 裂隙介质各向异性离散-连续耦合模型求解方法

1.1 耦合概念模型和耦合条件

1.1.1 耦合概念模型

裂隙岩体由主干裂隙和网络状裂隙两部分构成 .网络状裂隙主要分布在被主干裂隙切割成的大大小小的岩块里 ,由于其分布广、数目多 ,可以当作连续介质处理 .其概念模型见图 1 .图中岩块中的主干裂隙网络是地下水运动的主要通道 ,流速快 ,水流交换作用强烈 ,岩块中的网络状裂隙网络主要是地下水储存场所 ,流速慢 ,水流交换作用弱 .主干裂隙和网络状裂隙之间的水量交换主要通过主干裂缝-网络状裂隙的交叉处进行 .主干裂隙可以借助 Monte-Carlo 方法随机生成 .

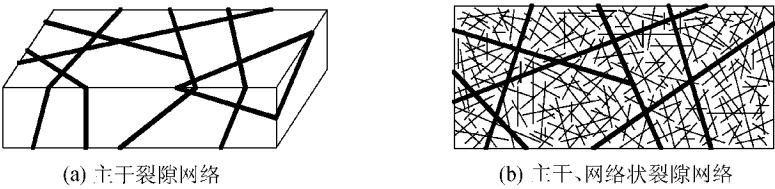


图 1 裂隙岩体离散-连续介质概念模型
Fig. 1 Conceptual model of discrete and continuum medium in fractured rock mass

收稿日期 :2008-04-14
基金项目 :国家自然科学基金(50579012)
作者简介 :黄勇(1974—) ,男 ,重庆人 ,讲师 ,博士 ,主要从事岩土体渗流计算方面的研究 .

1.1.2 耦合条件

等效连续介质模型和随机离散裂隙网络模型耦合的条件是 (a)单位时间内流入和流出裂隙面的水的体积均衡,即裂隙交叉处的流量守恒 (b)裂隙交叉处的水头连续,即 $H_{ei}|_{Fi} = H_{fj}|_{Fj} (i \neq j)$.

1.2 耦合数学模型

本文主要采用等效连续介质模型和随机离散裂隙网络模型.对于均质各向同性承压稳定流问题,其等效连续介质模型可由以下运动方程给出:

$$\begin{cases} K_e \frac{\partial^2 H_e}{\partial x^2} + K_e \frac{\partial^2 H_e}{\partial y^2} + K_e \frac{\partial^2 H_e}{\partial z^2} = \mu_s \frac{\partial H_e}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega_1 \\ H_e|_{\Gamma_1} = f_1 & \Gamma_1 \in \partial\Omega_1 \\ K_e \frac{\partial H_e}{\partial n}|_{\Gamma_2} = g_1 & \Gamma_2 \in \partial\Omega_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_e ——等效连续介质渗透系数; H_e ——等效连续介质域水头; μ_s ——贮水率; f_1, g_1 ——已知节点水头和流量; Ω_1 ——研究区域; $\partial\Omega_1$ ——连续介质区域边界.

对式(1)用有限元法进行离散,得到以下的代数方程组:

$$\left\{ G + \frac{1}{\Delta t} P \right\} H_{e,t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} P H_{e,t} + F \quad (2)$$

式中: G ——总体渗透矩阵(传导矩阵); P ——贮水矩阵; H_e ——未知节点水头列阵; F ——流量列阵; Δt ——时间步长.

对于规模大、数量较小的断层和裂隙区域,采用随机离散裂隙网络模型,其控制方程为^[11]

$$\begin{cases} \left(\sum_{j=1}^N q_j \right)_i + \left(\sum_{j=1}^N w_j \right)_i + Q_i = d_i \frac{\partial H_{fi}}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega_2 \\ H_f|_{\Gamma_1} = f_2 & \Gamma_1 \in \partial\Omega_2 \\ K_f \frac{\partial H_f}{\partial n}|_{\Gamma_2} = g_2 & \Gamma_2 \in \partial\Omega_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_f ——裂隙渗透系数; H_f ——裂隙水头; q_j ——流入、流出裂隙交叉点流量; w_j ——裂隙交叉点垂向补给量; Q_i ——源汇项; f_2, g_2 ——已知节点水头和流量; Ω_2 ——研究区域; $\partial\Omega_2$ ——离散介质区域边界.

对式(3)用有限差分进行离散,得到以下的代数方程:

$$\begin{aligned} \left(C + \frac{1}{\Delta t} D \right) H_{f,t+\Delta t} &= A W + \frac{1}{\Delta t} D H_{f,t} - Q \\ A &= \{ a_{ij} \} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: C ——裂隙网络的导水矩阵; D ——裂隙内贮水矩阵; W ——裂隙线元上垂向补给量的向量; A ——裂隙网络的衔接矩阵.

1.3 各向异性离散-连续耦合模型求解

本文在建立各向异性离散-连续耦合模型时,是将2种模型的矩阵进行叠加,形成新的总矩阵,从而用直接法求解,避免了迭代过程的不收敛及花费大量时间的缺陷.式(2)和式(4)可以分别形成代数方程组,其总矩阵各不相同.结合耦合条件,可以将式(2)和式(4)2个方程组和流量方程组 $\sum R_f + R_e = 0.0$ 组装成新的方程组:

$$Th = R \quad (5)$$

式中: T ——耦合后的总矩阵; R ——耦合后的右端项; h ——研究区域内的水头.

在求解过程中,难点是矩阵 T 的合成.本文举例介绍2种模型的矩阵形成总矩阵 T 的方法,见图2.图2中粗线表示2条相交的裂隙,其余部分为包括许多细小裂隙的岩块.图2中,连续介质由①、②、③、④4个单元和6个节点组成,2条裂隙共形成4个线单元和5个节点,以单元①、②和线单元1→2、5→2和3→2来介绍矩阵的组装过程.其

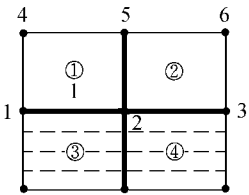


图2 各向异性离散-连续介质模型单元示意图

Fig. 2 Elements of discrete and continuum medium model

中矩阵中的“*”代表数值,表示 2 节点之间有联系;“0”表示 2 节点之间没有联系。

各向异性离散-连续耦合模型的总矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} \textcircled{1} + \textcircled{2} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & * & * & 0 & * & * & 0 \\ 2 & * & * & * & * & * & * \\ 3 & 0 & * & * & 0 & * & * \\ 4 & * & * & 0 & * & * & 0 \\ 5 & * & * & * & * & * & * \\ 6 & 0 & * & * & 0 & * & * \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \rightarrow 1 & 2 \rightarrow 5 & 2 \rightarrow 3 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & * & * & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & * & * & * & 0 & * & 0 \\ 3 & 0 & * & * & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & * & 0 & 0 & * & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * & * & 0 & * & * & 0 \\ * & * & * & * & * & * \\ 0 & * & * & 0 & * & * \\ * & * & 0 & * & * & 0 \\ * & * & * & * & * & * \\ 0 & * & * & 0 & * & * \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 算例及结果分析

假设研究区域的大小为 40 m×20 m×10 m,主干裂隙网络由 2 组裂隙组成,其走向、倾向和倾角分别为 0°,90°,90°,270°,180°,90°,间距分别为 8 m 和 4 m,裂隙隙宽均为 0.2 mm。裂隙网络图见图 3。图 3 中粗线代表裂隙,每个方向随机产生了 5 条裂隙,其中的细线和粗线合起来又构成了等效连续介质模型计算的网格剖分图。取正西方向边界为上游定水头边界,水位为 50 m;正东方向边界为下游定水头边界,水位为 30 m;其余边界为流量(隔水)边界。等效连续介质模型采用 8 节点 6 面体单元,并使用同一套节点编号。

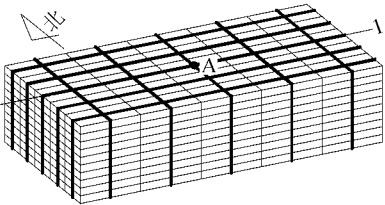


图 3 三维裂隙网络示意图
Fig. 3 3D fractured network

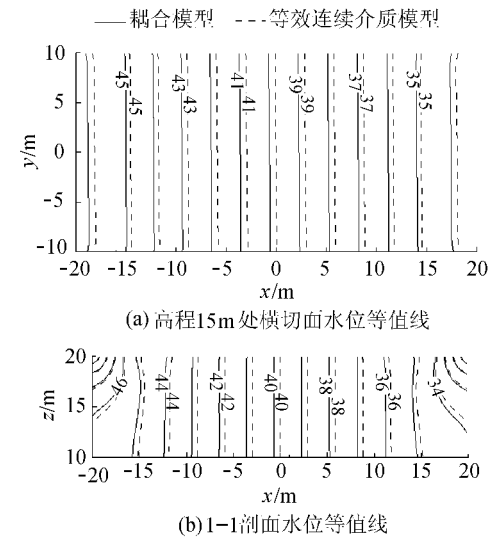


图 4 研究区水位等值线(单位:m)
Fig. 4 Contours of groundwater table in research region

宽的增加,用等效连续介质模型计算的水头会减小,但变幅不大;各向异性离散-连续耦合模型计算的水头也降低,但变幅较大。随着裂隙隙宽的减小,2 种模型计算的水头值越来越接近,说明当裂隙隙宽较小时,可以用等效连续介质模型而不必采用各向异性离散-连续耦合模型或离散网络模型,这时计算结果的误差也较小;当裂隙隙宽较大时,最好不要采用等效连续介质模型求解。

3 结 论

a. 将裂隙岩体看作是由主干裂隙和网络状裂隙共同构成的,分别用随机离散网络模型和等效连续介质模型描述裂隙中的水流运动,并利用裂隙壁与岩块之间的水位连续和流量均衡将两者耦合起来,建立各向异

对应的平、剖面等值线图见图 4(a)和(b),图中实线代表各向异性离散-连续耦合计算的结果,虚线代表都使用等效连续介质模型的计算结果。从平、剖面等值线图中可以看出,就研究区域中的同一点而言,用各向异性离散-连续耦合模型计算出的水头小于用等效连续介质模型计算出的水头,说明水在裂隙中运动时,速度较快,导致该点的水头较低。而等效连续介质模型是将研究区域均一化,即水流在裂隙和岩块组成的系统中流动,这体现不出单裂隙的控水特征,特别是在裂隙隙宽较大时,用本文提出的各向异性离散-连续耦合模型进行计算是很有效的。

为了进一步验证模型的有效性,可在研究区域内取一裂隙交叉点 A,其坐标为(0,0,20),见图 3。通过裂隙隙宽的改变,分别用等效连续介质模型和各向异性离散-连续耦合模型计算该点的水头,见图 5。其中 2 组裂隙的隙宽均值变化范围为 0.1~0.5 mm,保持方差 0.01 mm 不变。

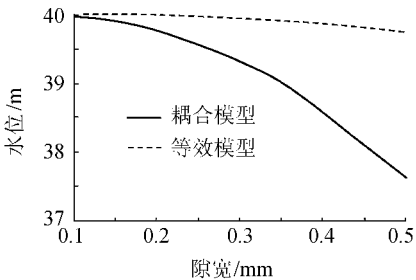


图 5 地下水位随裂隙隙宽的变化曲线
Fig. 5 Relationship between groundwater table and fracture width

性离散-连续耦合模型.这种方法既能反映主干裂隙的特殊导水作用,又避免了逐个计算网络状裂隙渗流带来的困难,可以在较大岩体区域上进行岩体渗流分析.

b. 与其他耦合模型不同的是,本文建立的随机离散网络模型具有随机性,即采用 Monte-Carlo 方法随机生成裂隙网络系统,各向异性离散-连续耦合模型可以比较真实地再现野外复杂的地质条件和现象,特别是对主干裂隙较发育的区域.

c. 通过算例讨论了裂隙间距的密度和隙宽大小对裂隙岩体渗流场的影响.结果表明,裂隙间距和隙宽越大,各向异性离散-连续耦合模型越优越.

参考文献：

[1] 王媛,速宝玉,徐志英.裂隙岩体渗流模型综述[J].水科学进展,1996,7(3):276-281.
[2] 孔亮,王媛.剪切荷载对裂隙渗透性影响研究现状[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):42-46.
[3] 朱珍德,徐卫亚.裂隙岩体渗流场与损伤场耦合模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(2):156-160.
[4] 王洪涛.裂隙网络渗流与离散元耦合分析充水岩质高边坡的稳定性[J].水文地质工程地质,2000(2):30-33.
[5] 罗平平,朱岳明.二维随机裂隙岩体灌浆数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(3):295-298.
[6] 盛金昌,速宝玉,詹美礼.裂隙岩体的弹塑性本构模型暨有限元分析[J].河海大学学报:自然科学版,1999,27(5):27-33.
[7] 赵坚,速宝玉,杨晓文.大区域裂隙岩体渗流水电比拟实验技术的研究[J].水利水电科技进展,1998,18(6):36-40.
[8] 王媛,速宝玉,徐志英.三维裂隙岩体渗流耦合模型及其有限元模拟[J].水文地质工程地质,1995(3):1-5.
[9] 王洪涛,聂永丰,李雨松.耦合岩体主干裂隙和网络状裂隙渗流分析及其应用[J].清华大学学报,1998,38(12):23-26.
[10] 周志芳,滕建仁.三峡工程大坝坝基渗控分析[J].岩石力学与工程学报,2001(9):700-704.
[11] 黄勇,周志芳.岩体渗流模拟的二维随机裂隙网络模型[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(1):91-94.

Anisotropic coupled model for fractured rock medium

HUANG Yong¹, CHEN Jing²

(1. College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Hydrological and Water Resources Bureau of Jiangsu Province , Nanjing 210029 , China)

Abstract : A fractured rock mass was considered to include two compositions of arterial and ramificate fractures . The flow movement in the fractures could be described using the stochastic discrete fractured network model and the equivalent continuum medium model , respectively . The two models were coupled with the continuum groundwater table and the discharge equilibrium between the fractured walls and the block mass . The solution of the discrete and continuum coupled model is given . As opposed to other coupled models , the anisotropic discrete and continuum coupled model employs the Monte-Carlo method to generate a random fractured network system . Through a case , the seepage fields in a fractured rock mass were simulated and analyzed with the equivalent continuum medium model and the discrete and continuum coupled model . The results show that the larger the fractures interval and width , the larger the difference between the two models , which is to say that the present coupled model is more satisfactory .

Key words : fractured medium ; anisotropy ; coupling model ; randomness ; Monte-Carlo method