

王晋丽, 陈喜, 张志才, 等. 基于 MODFLOW 的离散裂隙网络渗流分析[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 1-14.

DOI: 10.11932/karst2024y043

基于 MODFLOW 的离散裂隙网络渗流分析

王晋丽¹, 陈喜², 张志才³, 康建荣¹, 胡晋山¹

(1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116; 2. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 岩溶基岩裂隙水文研究考虑裂隙非均质和各向异性建模较难。裂隙-连续介质模型(FC)从原理上能够比较真实地刻画实际的渗流形态, 是岩溶地区较理想的水文模型。基于裂隙空间形态及分布的统计特性, 应用 Monte Carlo 模拟技术和图论, 采用 MATLAB 程序生成二维裂隙网络原图及三级连通图, 将第三级连通图映射到有限差分网格, 建立离散裂隙网络(DFN)与 MODFLOW 相结合的 FC 渗流模型, 编制相应的渗流模拟程序。复现交叉裂隙试验工况, 及通过 2 个多裂隙算例分析有限差分网格分辨率以及裂隙死端对稳定渗流模拟精度的影响, 以 DFN 渗流为准则, 验证 FC 模型代码编写的正确性和有效性。结果表明: FC 模型模拟的节点水头、总网格流、裂隙长度在粗网格的高估或低估, 通过细化网格可大大消除这种影响, 裂隙死端对 FC 模型的 MODFLOW 网格流模拟具有不可忽略的影响。本研究实现了裂隙渗透性非均质和各向异性在数值计算单元的表达, 将促进对基于连通性的裂隙流的 MODFLOW 模拟理解。

关键词: 离散裂隙网络; 连通性; MODFLOW; 渗流; 裂隙-连续介质模型

创新点: 将单条裂隙映射到有限差分网格, 建立裂隙-连续介质模型(FC), 分别将第二级、第三级裂隙连通图用于 DFN 方法与基于 MODFLOW 的 FC 方法的稳定流模拟, 编制模拟程序并利用交叉裂隙物理模型及多裂隙算例验证模型代码编写的正确性和有效性。

中图分类号: P641 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2025)01-0001-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

表层岩溶带是碳酸盐岩溶蚀导致的近地表密集发育裂隙和管道网络系统, 是岩溶关键带网络结构形成的核心区, 水的交换、滞留和释放等过程在该区域极其活跃^[1-2]。受地质构造、岩性、气候、水文和地貌等条件的影响, 裂隙分布具有极强的空间异质性, 是岩溶地区的重要特征之一^[3]。质纯坚硬但裂隙发育的碳酸盐岩、以及快速强烈的岩溶动力过程使得我国南方表层岩溶带发育条件相对于其他地区具有明显优势^[4]。

野外大多数裂隙深埋于岩体内部无法直接测量, 在代表性的地质剖面(露头、开挖剖面等), 测量裂隙的空间形态, 利用统计方法分析裂隙几何特征的分布规律, 运用 Monte Carlo 模拟技术生成与实际岩体裂隙同分布的随机裂隙网络, 是一条可行、有效的研究途径^[5]。裂隙作为流体流动的主要路径, 其连通性对裂隙介质的渗流有很大的影响^[6-7]。然而, 岩溶地区水文过程针对裂隙结构的相关研究大多处于定性划分阶段, 其定量表达仍然是当前的难点, 在水文模型中也越来越需要考虑结构的空

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42030506); 国家自然科学基金面上项目(52074133)

第一作者简介: 王晋丽(1970—), 女, 高级实验师, 博士, 主要从事地下水数值模拟研究。E-mail: wang_jinli70@163.com。

收稿日期: 2024-08-07

的发展具有重要意义^[3,8]。

应用于岩溶区的水文模型结构从简单的等效多孔介质模型,发展到孔隙、裂隙和管道的双重以及三重介质水流模型^[2,9]。结合连续介质模型与离散裂隙网络模型(discrete fracture network, DFN)优点产生的裂隙-连续介质模型(fracture-continuum, FC),可以考虑基质扩散、基质与裂隙之间的水量交换,但存在岩块介质(基质)与裂隙介质之间水量交换难以确定的问题^[5]。地下水主要在岩溶含水系统的裂隙和管道中运动,基岩空隙和微小裂隙主要起储水作用,含水系统内部呈现二元结构特征,因此岩溶区理想的水文模型为裂隙-管道模型^[10],包括连续介质与裂隙的耦合,或与管道的耦合^[11-12],或与二者均耦合。

本研究基于裂隙网络随机生成^[13],遵循 Botros 方法^[14]对裂隙网络进行有限差分数值离散化,利用传统的孔隙介质地下水流模拟软件 MODFLOW 进行渗流计算,编制相应的模拟分析程序^[15]。为了克服 Botros 方法在处理删除裂隙死端时由于计算机取舍可能丢失部分节点的不足,分别将第二级连通图、第三级连通图用于 DFN 渗流模拟与 FC 渗流模拟。利用两个多裂隙算例不仅探讨了网络分辨率(网络单元格大小)对 FC 模型流量模拟的影响,而且还分析了对水头模拟的影响,并利用交叉裂隙物理模型验证了 FC 方法的有效性。本文基于 MODFLOW 建立的 FC 模型克服了岩块介质(基质)与裂隙介质之间水量交换难以确定的问题。

1 裂隙-连续介质渗流模型

1.1 随机裂隙网络生成

离散裂隙网络模型(DFN)是研究裂隙介质渗流最为有效的手段之一。二维裂隙系统中迹线通常表示为一条线段,可用迹线中心点 (x_0, y_0) 、迹线长度 l 、迹线方向 θ 来确定(图1)。

设裂隙为无厚度的线段,则裂隙迹线端点坐标表示为^[16]:

$$\begin{aligned} x &= x_0 \pm \frac{l}{2} \times \cos \theta \\ y &= y_0 \pm \frac{l}{2} \times \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$

在研究域内裂隙中心点通常服从均匀分布,裂隙个数依据其密度服从 Poisson 随机过程。裂隙方

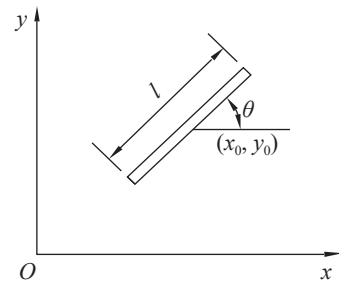


图1 裂隙在岩体位置的控制参数

Fig. 1 Control parameters of fractures in rock mass location

向服从正态分布、均匀分布、Fisher 分布等,裂隙迹线长服从负指数分布、对数正态分布等,裂隙导水系数服从对数正态分布^[17]。在确定裂隙几何、水力参数的概率模型后,利用 Monte Carlo 方法从这些概率分布中进行随机抽样,得到每一个裂隙的具体参数,将超出模型边界的裂隙裁剪掉,生成一个二维裂隙网络(图2)^[15,18](服从一定参数分布的随机裂隙网络的某一次实现)。

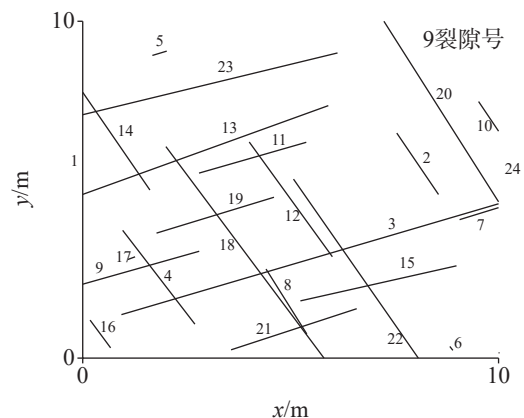


图2 裂隙网络的某一次随机实现

Fig. 2 One stochastic realizations of the fracture network

去除对流体流动无贡献的裂隙,识别出裂隙网络的连通路径。本研究结合逾渗理论^[19]和图论识别出孤立的裂隙簇和裂隙死端。去除孤立裂隙、孤立裂隙簇,得到裂隙网络的一级连通图(图3a);去除只有一个交点的单节点裂隙,得到裂隙网络的二级连通图(图3b);去除裂隙死端,得到裂隙网络的三级连通图(图3c)。

1.2 DFN 模型渗流分析

DFN 渗流模型假定岩石基质不透水,水流运动仅发生在裂隙中。研究裂隙介质渗流的基本理论,即著名的立方定律,其假定裂隙由两个间距为 b 的

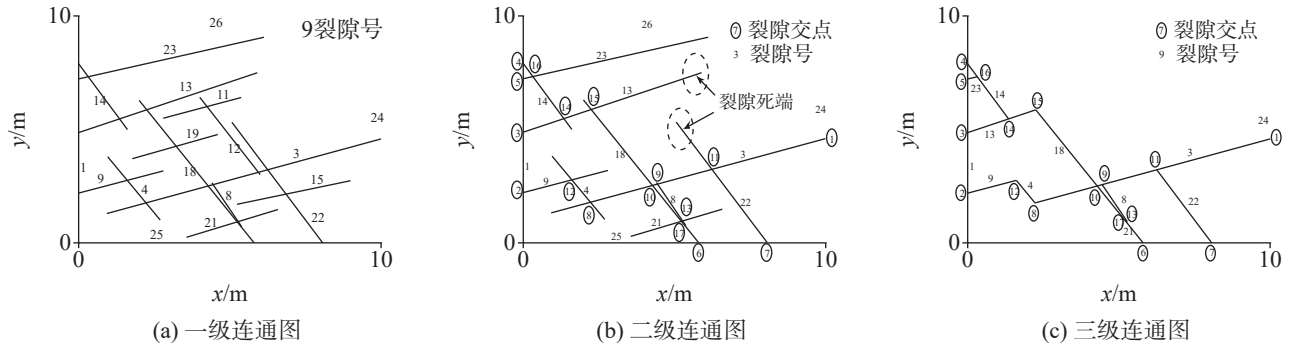


图3 图2的连通图

Fig. 3 Connectivity diagram of Fig. 2. (a) 1st-round cutting, (b) 2nd-round cutting, (c) 3rd-round cutting

光滑平行板组成, 流体在这两个平行板之间流动, 对 $w=1$ 的单宽流量 $Q(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$, 裂隙导水系数 $T_f(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 为^[20]:

$$T_f = \frac{\rho g b^3}{12\mu} \quad (2)$$

于是

$$Q = T_f \frac{\Delta H}{l} = \frac{T_f}{l} \Delta H = C \Delta H \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), g 为重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), μ 为流体动力粘滞系数 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$), b 为裂隙孔径 (mm), C (Conductance) 为水力传导率 ($C = \frac{T_f}{l}$, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ΔH 为水头差 (m), l 为沿水流方向的长度 (m)。

如忽略源汇项^[21-22], 则

$$\sum_j C_{ij} \Delta H_{ij} = 0 \quad (4)$$

式中: C_{ij} 为节点 i 与 j 之间水力传导率, $\Delta H_{ij} = H_i - H_j$, 其中 H_i 、 H_j 分别为节点 i 和节点 j 的水头 (m)。

因此, 对节点 j

$$H_j = \frac{\sum_{i=1}^k C_{ij} H_i}{\sum_{i=1}^k C_{ij}} \quad k = 2, 3 \text{ 或 } 4 \quad (5)$$

或

$$\left(\sum_{i=1}^k d_{ij} H_i \right) - H_j = 0 \quad (6)$$

式中: $d_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{sj}}$, $C_{sj} = \sum_{i=1}^k C_{ij}$

在随机产生二维裂隙网络单相的、饱和的、稳定流系统里, 以交叉裂隙水流为基本计算单元, 每一个内部节点都可写出如公式(5)的一个方程, 采用数值-

解析法, 求解这个方程组, 可得到内部节点水头及节点间的流量。对于基于交叉节点分析的 DFN 模型, 通常采用二级连通图进行渗流模拟。

1.3 基于MODFLOW 的裂隙网络渗流分析

1.3.1 基于 MODFLOW 的裂隙网络渗流路径

在裂隙渗流的有限差分模拟中, 通常把研究区划分为一系列正方形或长方形网格, 由此, 裂隙概化为沿着“阶梯”模式(图4)从一个单元格到另一个单元格的倾斜裂隙, 这种“阶梯”模式(图4虚的折线 L_g)增大了裂隙在 MODFLOW 的水流路径, 从而减小了水力梯度, Reeves 等^[23]提出一种修正方法以确保倾斜裂隙通过相同的流量。

基于 MODFLOW 模拟的粗网格不能准确地解析裂隙长度 L_c 。比如, 如果选择的粗网格尺寸大于两个相邻裂隙之间的距离, 则两个相邻裂隙的一部分将在网格中合并, 从而缩短实际流动路径(图4a)。特别是在粗网格上, 由网格上的倾斜裂隙 L_r 引起的流动路径可能被高估(图4b中的垂直分量)或低估(图4c中的垂直分量), 流动路径的不准确解析将导致流量和水头的估计误差增大。

从图4可以看出, 直线裂隙路径在有限差分单单元格到单元格的“阶梯”模式拉长了流动路径, 虽然可通过增加单元格的渗透系数加以修正, 但这种修正并不能消除粗网格对网格中裂隙长度的高估或低估, 细化网格可大大消除这种影响。

1.3.2 裂隙-连续介质渗流耦合方法

裂隙死端增强了网络连接, 从而增大了总的网格流, 因此, 将第三级连通图刻画到有限差分网格, 裂隙穿过的单元格称为裂隙单元格, 无裂隙穿过的

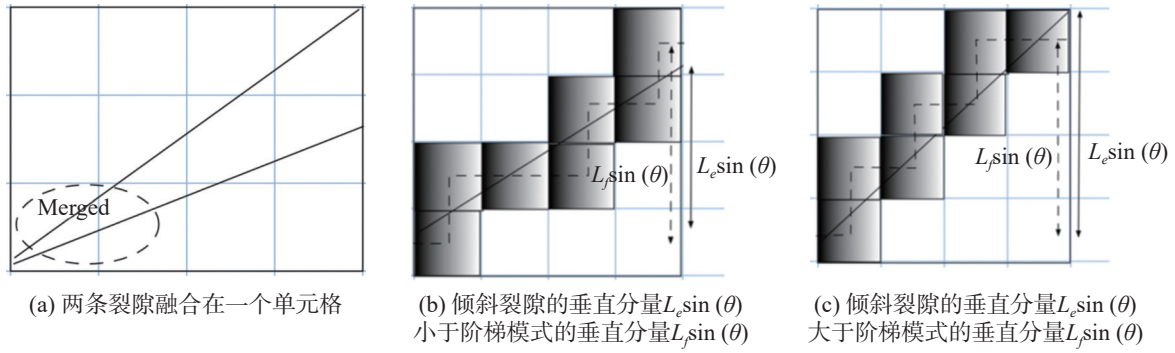


图4 沿网格的流动路径示意图

(a) 两条裂隙融合在一个单元格; (b) 倾斜裂隙的垂直分量 $L_e \sin(\theta)$ 小于阶梯模式的垂直分量 $L_f \sin(\theta)$; (c) 倾斜裂隙的垂直分量 $L_e \sin(\theta)$ 大于阶梯模式的垂直分量 $L_f \sin(\theta)$

Fig. 4 Sketch map of flow path along the grid

(a) merge of two fractures within a grid, (b) actual vertical component of the inclined fracture $L_e \sin(\theta)$ shorter than that of the “stair step” pattern $L_f \sin(\theta)$, and (c) actual vertical component of the inclined fracture $L_e \sin(\theta)$ longer than that of the “stair step” pattern $L_f \sin(\theta)$

单元格称为基质单元格(图5), 裂隙单元格渗透系数的计算方法如下^[14-15]:

$$K_{MODFLOW} = \frac{T_f}{\Delta} C(\theta) \quad (7)$$

$$C(\theta) = |\sin(\theta)| + |\cos(\theta)| \quad (8)$$

其中 Δ 为网格单元格大小, $C(\theta)$ 为修正因子。

如果在某个单元格只有一个 II 型裂隙, 则该单元格 x 和 y 两个方向的渗透系数均为 $K_{MODFLOW}$ 。但当同一单元格存在多个 II 型裂隙时, 任何一个 II 型裂隙的 $K_{MODFLOW}$ 在 x 和 y 两个方向平均分配, 然后单元格每个方向的渗透系数相加。由于单元格在 x 方向和 y 方向的渗透系数是独立计算, 因此可计算出每个单元格不同的各向异性比。

以 DFN 渗流作为度量标准, 解析基于 MODFLOW 的裂隙网络渗流, 建立裂隙-连续介质渗流模型。在上述工作的基础上, 笔者编制了二维离散裂隙网络渗流程序^[18]和裂隙有限差分分割程序^[15], 可用于对人工生成裂隙网络中的稳定流(DFN 流)和有限差分的网格流(MODFLOW 流)进行计算。

1.4 模型验证

1.4.1 交叉裂隙物理模型

利用詹美礼、速宝玉^[24-25]交叉裂隙水流物理实验模型验证 FC 方法。工况 1: 文献^[24]截取裂隙总长为 1.6 m 的模型进行分析, 便于利用本方法, 将交叉裂隙置于边长为 138.6 cm 的方形域, 模型参数如图 6a, 水流的运动粘滞系数 $\nu = 0.00958 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 左右边界为定水头边界, 上下边界为隔水边界。隙宽 $B = 0.5 \text{ cm}$ 的导水系数为 $1066.023 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 设定在左边界的位置为 (0 cm, 109.5 cm), 右边界的位置为

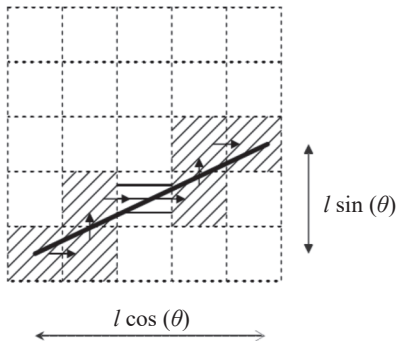


图5 水平线、倾斜线分别表示 I 型、II 型裂隙单元格

Fig. 5 Flow path along the grid, the horizontal line represents fissure cell of Type I, and the inclined line represents fracture cells of Type II

根据裂隙与网格单元格的对齐方式将裂隙分为两种类型, 从单元格两个相对的面进出单元格为类型 I 裂隙, 从单元格相邻的两个面进出单元格为类型 II 裂隙。

对于类型 I 裂隙, 即走向为 x 方向(图5中的水平线)或 y 方向的裂隙, 刻画到单元格大小为 Δ 的有限差分网格, 该裂隙穿过单元格的渗透系数估计为 T_f/Δ , 渗流仅对 x 方向或 y 方向有贡献。

对于类型 II 裂隙, 与 x 方向成一定角度(图5中的倾斜线)包含了水平和垂直分量, 从而导致了较长的流动路径 ($l \sin(\theta) + l \cos(\theta)$), 降低了水力梯度, 为了保存下相同的网格流, Reeves 等提出渗透系数 K 可表示为^[23]

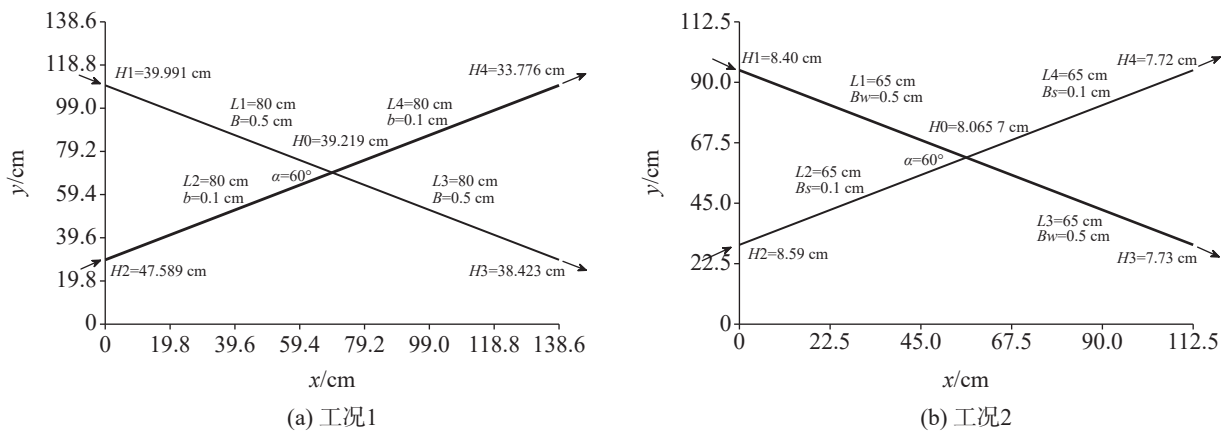


图 6 交叉裂隙水流模型
Fig. 6 Model of cross-fissure flow

(138.6 cm, 29.5 cm); 隙宽 $b=0.1$ cm 的导水系数为 $8.528\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 设定在左边界的位置为 (0 cm, 29.5 cm), 右边界的位置为 (138.6 cm, 109.5 cm)。

工况 2: 文献^[25]截取裂隙总长为 130 cm 的模型使用传统的裂隙网络水流理论公式计算, 得出各分支的流量 Q_{DFN} 。同样, 便于利用本方法, 将交叉裂隙置于边长为 112.5 cm 的方形域, 模型参数如图 6b, 水流的运动粘滞系数 $=0.01007\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 边界条件同工况 1。隙宽 $B_w=0.5$ cm 的导水系数为 $1014.358\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 设定在左边界的位置为 (0.0 cm, 94.5 cm), 右边界的位置为 (112.5 cm, 29.5 cm); 隙宽 $B_s=0.1$ cm 的导水系数为 $8.115\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 设定在左边界的位置为 (0.0 cm, 29.5 cm), 右边界的位置为 (112.5 cm, 94.5 cm)。

1.4.2 结果分析

传统的网络分析方法 (Q_{DFN}) 是假定水流特性与进、出流交叉角无关, 水头通过交叉点的水头损失可忽略不计, 各支流满足立方定律^[25]。上述两种工况下相同隙宽裂隙的导水系数略有差异是由于运动粘滞系数不同造成的。表 1 工况 1 的 Q_{DFN} 为文献^[24]第 3 节算例的网络裂隙渗流分析计算结果, 各支进水流量 $740.686\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $64.219\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 之和为 804.905

$\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$, 换算出单宽流量为 $11.1792\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$; $Q_{\text{实测}}$ 、 $Q_{\text{有限元}}$ 为文献^[24]表 1 分别根据相应断面 1 和 2 的总和换算得出; 工况 2 的 Q_{DFN} 为文献^[25]第 2 节算例的传统裂隙网络水流理论计算结果, 各支进水流量 $5.2135\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.0654\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 之和为 $5.2789\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 。表 2 工况 1 的 $H_{\text{DFN}}=39.219\text{ cm}$ 为文献^[24]第 3 节算例的裂隙网络渗流计算结果, 工况 2 的 $H_{\text{DFN}}=8.066\text{ cm}$ 为文献^[25]第 2 节算例的 H_0 。

对上述两种工况的交叉裂隙均进行了有限差分剖分, 其中网格基质单元格的渗透系数假定为 $10^{-10}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 以确保水流主要通过裂隙单元格, 进行稳定流计算。对两种工况分别进行了两个不同的网格分辨率剖分: 工况 1 (图 6a) 为 $\Delta=6.300\text{ cm}$ 和 $\Delta=3.150\text{ cm}$; 工况 2 (图 6b) 为 $\Delta=5.625\text{ cm}$ 和 $\Delta=4.500\text{ cm}$ 。

有限差分的 Q_{MOD} 与文献^[24-25]的 $Q_{\text{实测}}$ 、 $Q_{\text{有限元}}$ 以及理论值 Q_{DFN} 数据对比见表 1, 其中, Q_{DFN} 为通过裂隙的确切流量, 即精确解, 括号中的值为实测值、有限差分值、有限元值与精确值的相对误差。有限差分的模拟水头 H_{MOD} 与文献^[24, 25]的理论值 H_{DFN} 数据对比见表 2。

结果表明: 在层流范围内, 2 种工况下有限差分剖分时, 细网格的总流量模拟值与传统网络理论

表 1 交叉流总流量的实测值、有限差分值、有限元值与理论值对比

Table 1 Comparison of measured values, finite difference values, finite element values, with theoretical values of cross flow

计算工况	精确解 $Q_{\text{DFN}}/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$Q_{\text{实测}}/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	有限差分网格分辨率/cm	$Q_{\text{MOD}}/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$Q_{\text{有限元}}/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
1	11.1792	11.6667(4.36%)	$\Delta=6.300$	12.1960(9.10%)	11.1111(0.61%)
			$\Delta=3.150$	11.4499(2.42%)	
2	5.2789		$\Delta=5.625$	5.5743(5.60%)	
			$\Delta=4.500$	5.3619(1.57%)	

表 2 交叉节点水头的有限差分值与理论值对比

Table 2 Comparison of finite difference values and theoretical values of intersection heads

计算工况	精确解 H_{DFN}/cm	有限差分网格分辨率/cm	H_{MOD}/cm	绝对误差/cm
1	39.219	$\Delta=6.300$	39.193	-0.026
		$\Delta=3.150$	39.218	-0.001
2	8.066	$\Delta=5.625$	8.088	0.022
		$\Delta=4.500$	8.049	-0.017

(Q_{DFN}) 分析结果基本吻合, 误差分别为 2.42% 和 1.57%。交叉点水头的有限差分模拟值 H_{MOD} , 在工况 1 情形下, 粗细网格模拟值与理论值 H_{DFN} 的绝对误差分别为 -0.026 cm 和 -0.001 cm; 在工况 2 情形下, 粗细网格模拟值与理论值 H_{DFN} 的绝对误差分别为 0.022 cm 和 -0.017 cm, 两种工况下细网格的水头模拟与理论值均吻合较好。

2 模型应用

将 FC 模型应用于 2 个多裂隙算例, 裂隙特征参数假定通过野外试验已获得, 进一步验证程序的正确性。

2.1 算例的 DFN 渗流模拟

算例 1 模型域为边长 10 m 的方形域, 假定左右

边界为定水头边界, 压力水头分别为 10 m 和 5 m, 区域水力梯度为 0.5, 上下边界为隔水边界, 裂隙特征参数见表 3。裂隙网络的某一次随机实现如图 7a。

算例 2 的模型域为边长 20 m 的方形域, 裂隙密度设定为 $0.12 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$, 略高于算例 1 密度, 其余参数和边界条件同算例 1, 裂隙网络的某一次随机实现如图 7b。

利用裂隙渗流模拟程序^[18]应用于算例 1(图 7a), 得到连通图(图 8)。算例 1 产生的裂隙数 22 个, 二级连通图有裂隙 15 个(图 8a)。

类似地, 算例 2(图 7b)的连通图如图 9, 算例 2 由于模型域增大, 设定较大的密度以确保生成的网络能够发生渗流, 算例 2 生成裂隙 88 个, 二级连通图有裂隙 62 个(图 9a)。

分别对算例 1 和算例 2 的二级连通图(图 8a 和图 9a)进行 DFN 渗流模拟, 得出从左边界到右边界

表 3 裂隙特征参数的统计分布 (算例 1)^[22]Table 3 Statistical distribution of characteristic parameters of fractures for Case 1^[22]

裂隙组号	密度		方向 $\theta/^\circ$			迹长 l/m			中心点位置	导水系数 $T/\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$		
	$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	分布	μ	σ	分布	μ	σ	分布		μ	σ	分布
1	0.10	Poisson	15.0	8.0	正态	5.5	0.5	负指数	均匀分布	10^{-6}	$10^{0.5}$	对数正态
2	0.10	Poisson	126.0	21.0	正态	6.5	0.5	负指数	均匀分布	10^{-6}	$10^{0.5}$	对数正态

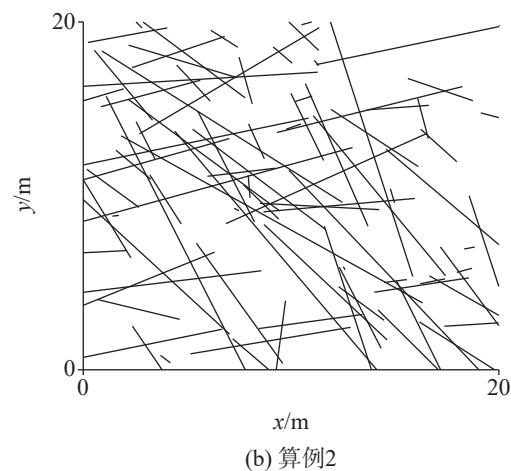
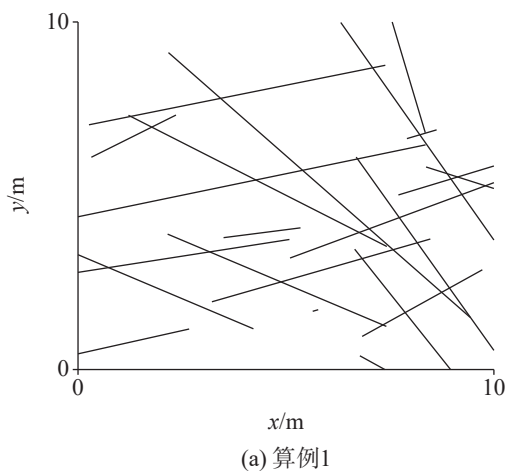


图 7 裂隙网络的某一次随机实现

Fig. 7 Stochastic generation of fissure networks (one realizations for Case 1 (7a) and Case 2 (7b))

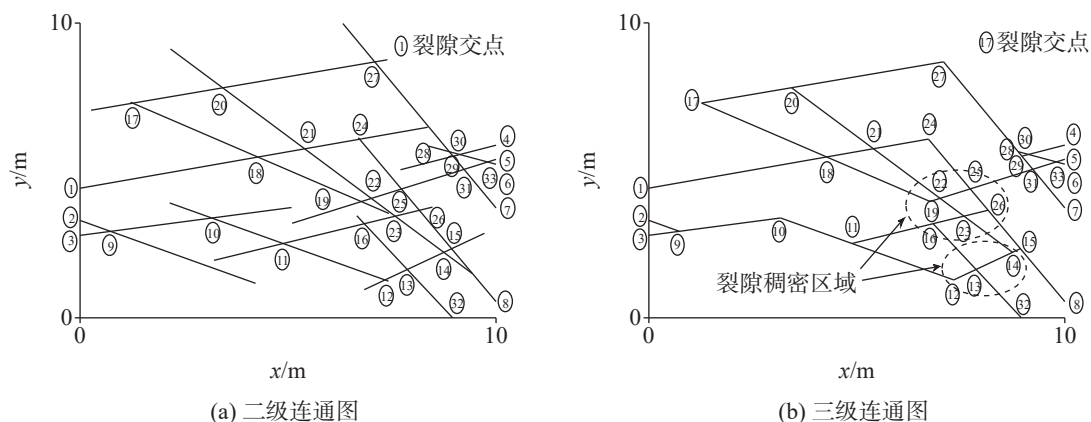


图8 图7a的连通图(算例1)

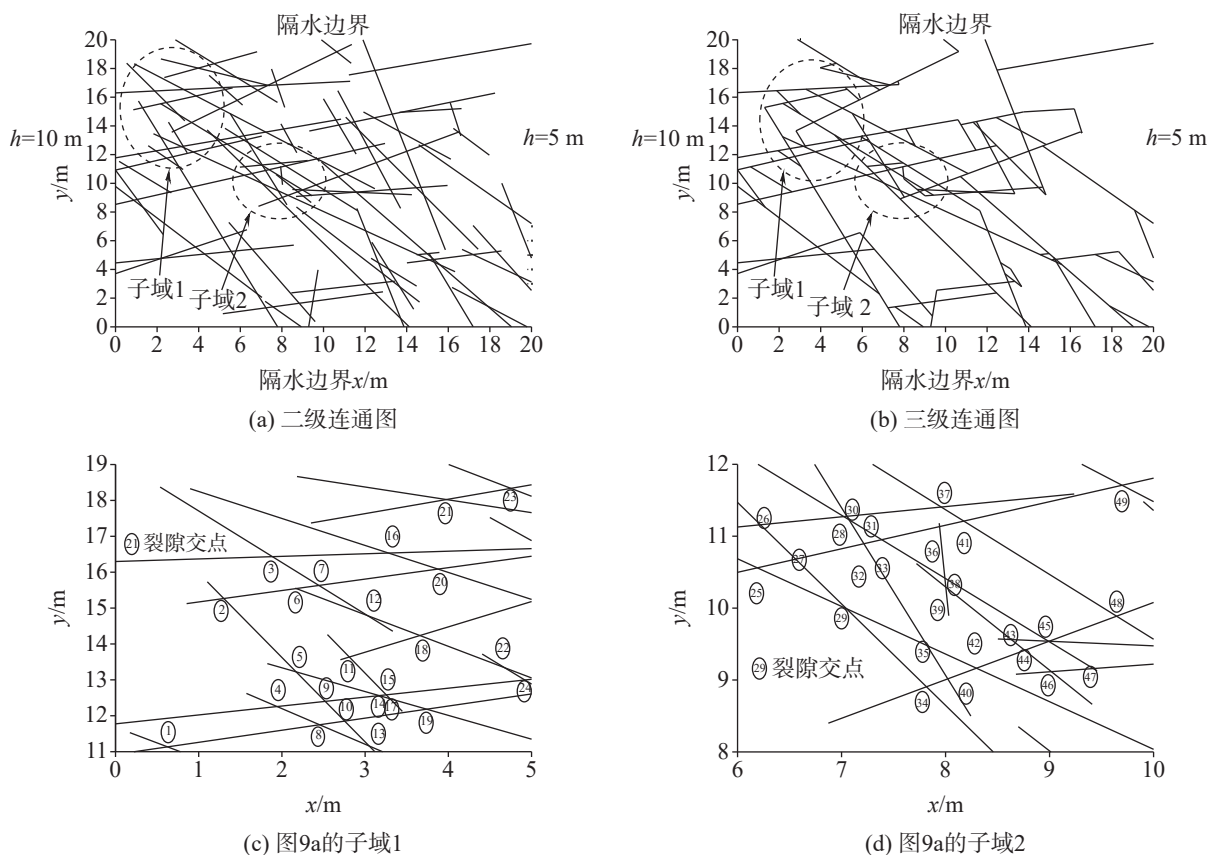
Fig. 8 Connectivity diagram of Fig. 7a for Case 1: (a) 2nd-round cutting; (b) 3rd-round cutting

图9 图7b的连通图(算例2)

Fig. 9 Connectivity diagram of Fig. 7b for Case 2: (a) 2nd-round cutting; (b) 3rd-round cutting; (c) subdomain 1 for Fig. 9(a); (d) subdomain 2 for Fig. 9(a)

的总流量和内部节点水头。算例1的 $Q_{DFN}=1.687 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 内部节点水头 H_{DFN} 列于表4; 算例2的 $Q_{DFN}=1.128 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 内部节点水头 H_{DFN} 列于表5。

2.2 算例的FC渗流模拟

利用有限差分剖分程序^[15]分别对算例1和算例

2的三级连通图(图8b和图9b)的模型域进行网格剖分, 获得不同网格分辨率从左边界到右边界的总网格流 Q_{MOD} 、内部节点水头 H_{MOD} , 分别与离散裂隙网络模型的 Q_{DFN} 、 H_{DFN} 作比较。

算例1(模型域 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$), 测试了三种不同的网格分辨率: $\Delta=0.10 \text{ m}$ 、 $\Delta=0.05 \text{ m}$ 和 $\Delta=0.02 \text{ m}$, 对应的模拟水头分别为 $H_{MOD, 0.10}$ 、 $H_{MOD, 0.05}$ 、 $H_{MOD, 0.02}$, 与

表 4 裂隙节点坐标和模拟水头 (算例 1, 单位: m)
Table 4 Node coordinates and simulated heads by DFN and MODFLOW for Case 1 (Unit: m)

节点	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑
X	0.74	3.17	4.88	7.33	7.87	8.74	8.93	6.83	1.27	4.28	6.76	3.43	5.40
Y	2.93	3.38	2.52	1.28	1.64	2.22	2.34	3.19	7.28	5.45	3.94	7.80	5.73
H_{DFN}	9.75	8.24	7.54	6.79	6.62	6.31	6.14	6.66	6.83	7.37	6.61	6.70	6.77
$H_{\text{MOD}, 0.02}$	9.75	8.23	7.51	6.76	6.60	6.28	6.14	6.63	6.82	7.36	6.58	6.68	6.75
$H_{\text{MOD}, 0.05}$	9.76	8.21	7.49	6.71	6.55	6.25	6.13	6.59	6.79	7.31	6.55	6.66	6.72
$H_{\text{MOD}, 0.1}$	9.75	8.19	7.44	6.63	6.48	6.16	6.10	6.52	6.79	7.29	6.49	6.68	6.68
Err. $H_{\text{MOD}, 0.02}$	0.00	-0.01	-0.03	-0.03	-0.02	-0.03	0.00	-0.03	-0.01	-0.01	-0.03	-0.02	-0.02
Err. $H_{\text{MOD}, 0.05}$	0.01	-0.03	-0.05	-0.08	-0.07	-0.06	-0.01	-0.07	-0.04	-0.06	-0.06	-0.04	-0.05
Err. $H_{\text{MOD}, 0.1}$	0.00	-0.05	-0.10	-0.16	-0.14	-0.15	-0.04	-0.14	-0.04	-0.08	-0.12	-0.02	-0.09
节点	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜	㉝	
X	7.00	7.58	6.72	7.72	8.16	7.08	8.88	8.97	9.13	9.23	8.96	9.79	
Y	4.05	3.45	6.06	4.37	3.64	8.68	5.63	5.48	5.54	5.04	0.00	5.28	
H_{DFN}	6.54	6.47	6.58	6.32	6.28	5.88	5.08	5.07	5.06	5.14	6.62	5.02	
$H_{\text{MOD}, 0.02}$	6.52	6.44	6.57	6.31	6.27	5.88	5.08	5.07	5.06	5.14	6.60	5.02	
$H_{\text{MOD}, 0.05}$	6.49	6.41	6.54	6.29	6.25	5.87	5.07	5.07	5.06	5.13	6.55	5.02	
$H_{\text{MOD}, 0.1}$	6.43	6.35	6.50	6.24	6.22	5.86	5.08	5.07	5.06	5.12	6.48	5.01	
Err. $H_{\text{MOD}, 0.02}$	-0.02	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00	
Err. $H_{\text{MOD}, 0.05}$	-0.05	-0.06	-0.04	-0.03	-0.03	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.07	0.00	
Err. $H_{\text{MOD}, 0.1}$	-0.11	-0.12	-0.08	-0.08	-0.06	-0.02	0.00	0.00	0.00	-0.02	-0.14	-0.01	

表 5 裂隙节点坐标和模拟水头 (算例 2, 单位: m, 部分节点)
Table 5 Node coordinates and simulated heads by DFN and MODFLOW for Case 2 (Unit: m, partial nodes)

节点	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	㉐	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖
X	3.17	3.25	3.28	3.30	3.66	3.74	3.88	3.98	4.68	4.75	5.03	6.19	6.22
Y	12.56	12.58	16.53	12.48	14.24	12.18	16.09	18.02	13.34	18.34	13.03	10.56	11.16
H_{DFN}	8.88	8.86	8.78	8.86	8.64	8.83	8.71	8.65	8.58	8.65	8.55	8.55	8.42
$H_{\text{MOD}, 0.04}$	8.87	8.86	8.77	8.87	8.64	8.83	8.70	8.64	8.58	8.64	8.55	8.55	8.42
$H_{\text{MOD}, 0.1}$	8.90	8.89	8.80	8.88	8.68	8.86	8.73	8.67	8.60	8.67	8.58	8.57	8.44
$H_{\text{MOD}, 0.2}$	8.94	8.93	8.85	8.93	8.75	8.90	8.80	8.74	8.67	8.74	8.65	8.60	8.55
Err. $H_{\text{MOD}, 0.04}$	-0.01	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
Err. $H_{\text{MOD}, 0.1}$	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
Err. $H_{\text{MOD}, 0.2}$	0.06	0.07	0.07	0.07	0.11	0.07	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.05	0.13
节点	㉗	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜	㉝	㉞	㉟	㊱	㊲	㊳	㊴
X	6.56	7.02	7.05	7.05	7.07	7.22	7.39	7.82	7.82	7.94	7.96	7.99	8.00
Y	10.68	11.27	9.99	11.28	11.23	10.90	10.95	8.91	9.48	11.13	11.41	10.42	10.29
H_{DFN}	8.46	8.38	8.40	8.38	8.38	8.37	8.35	8.26	8.28	8.30	8.33	8.29	8.29
$H_{\text{MOD}, 0.04}$	8.47	8.38	8.39	8.38	8.38	8.36	8.35	8.26	8.28	8.30	8.34	8.29	8.29
$H_{\text{MOD}, 0.1}$	8.49	8.40	8.41	8.40	8.40	8.39	8.38	8.28	8.30	8.33	8.36	8.32	8.31
$H_{\text{MOD}, 0.2}$	8.55	8.49	8.44	8.49	8.49	8.47	8.47	8.35	8.37	8.44	8.45	8.42	8.41
Err. $H_{\text{MOD}, 0.04}$	0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Err. $H_{\text{MOD}, 0.1}$	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02
Err. $H_{\text{MOD}, 0.2}$	0.09	0.11	0.04	0.11	0.11	0.10	0.12	0.09	0.09	0.14	0.12	0.13	0.12

H_{DFN} 的绝对误差(模拟水头减去 H_{DFN})分别为 $\text{Err. } H_{\text{MOD}, 0.10}$ 、 $\text{Err. } H_{\text{MOD}, 0.05}$ 、 $\text{Err. } H_{\text{MOD}, 0.02}$ (表4)。对于算例2(模型域 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$), 测试的三种网格分辨率分别为: $\Delta = 0.20\text{ m}$ 、 $\Delta = 0.10\text{ m}$ 和 $\Delta = 0.04\text{ m}$ 。对应的模拟水头分别为 $H_{\text{MOD}, 0.20}$ 、 $H_{\text{MOD}, 0.10}$ 、 $H_{\text{MOD}, 0.04}$, 与 H_{DFN} 的绝对误差(模拟水头减去 H_{DFN})分别为 $\text{Err. } H_{\text{MOD}, 0.20}$ 、 $\text{Err. } H_{\text{MOD}, 0.10}$ 、 $\text{Err. } H_{\text{MOD}, 0.04}$ (表5)。

两个算例 MODFLOW 模拟的边界条件与各自的 DFN 模型相同, 流动路径为 MODFLOW 模拟路径。为了分析 Q_{MOD} 是否完全保留下了裂隙流 Q_{DFN} , 假定岩石基质不透水, 其导水系数设定一个很小的值, 如 $10^{-12}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 而裂隙导水系数设为 $10^{-6}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 二者相差约6个数量级, 以确保流动主要发生在裂隙单元格。

(1) 算例1(图8b)用网格 $\Delta = 0.10\text{ m}$ 、 $\Delta = 0.05\text{ m}$ 和 $\Delta = 0.02\text{ m}$ 剖分时, MODFLOW 的总流量模拟值 Q_{MOD} 分别为 $1.808 \times 10^{-6}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $1.727 \times 10^{-6}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $1.710 \times 10^{-6}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。 Q_{MOD} 与 Q_{DFN} 的相对误差, 两种细网格($\Delta = 0.02\text{ m}$ 和 $\Delta = 0.05\text{ m}$)剖分时分别为 1.36% 和 2.37%, 而粗网格($\Delta = 0.10\text{ m}$)剖分时较大, 为 7.17%。表4显示 MODFLOW 模拟水头 H_{MOD} 和 DFN 模拟水头 H_{DFN} 的差异(绝对值), 对于精细网格($\Delta = 0.02\text{ m}$)为 $0.00 \sim 0.03\text{ m}$, 细网格($\Delta = 0.05\text{ m}$)为 $0.00 \sim 0.08\text{ m}$, 而粗网格($\Delta = 0.1\text{ m}$)为 $0.00 \sim 0.16\text{ m}$ 。结果表明, 精细网格的 MODFLOW 模拟水头非常接近 DFN 模拟水头, 但粗网格显著低估了水头(表4的 $\text{Err. } H_{\text{MOD}, 0.10}$ 为负值), 大的低估值发生在稠密的裂隙分布区(图8b的节点⑫、⑬、⑭、⑯、⑰、⑱和㉓)。

低估的水头表明, 粗网格剖分拉长了裂隙长度导致相邻节点间的水力梯度被低估。从表6可以识别出这些被拉长的裂隙长度, 粗网格在较稠密的裂隙节点间的 L_f 大多被高估, 如节点⑪→⑫的裂隙长度被高估了 0.08 m , 节点⑪→⑯为 0.03 m , 节点⑰→⑱为 0.06 m (表6括号中的值), 在稠密裂隙区域高估长度的累积效应显著降低了水头。

相比之下, 位于稠密裂隙分布区域边界附近的节点㉔~㉖和㉗(图8b), 节点间 L_f 也被高估(粗网格高估值在表6的节点㉔→㉕为 0.04 m 、节点㉕→㉖和㉔→㉗均为 0.05 m), 但这些节点的水头差异(表4的节点㉔~㉖和㉗的 $\text{Err. } H_{\text{MOD}, 0.1}$)远小于稠密中心区域节点的水头差异, 表明给定的边界条件约束了其

邻近节点的水头计算, 从而减小了它们的计算误差。

(2) 算例2(图9b)用网格 $\Delta = 0.20\text{ m}$ 、 $\Delta = 0.10\text{ m}$ 和 $\Delta = 0.04\text{ m}$ 剖分时, MODFLOW 的总流量模拟值 Q_{MOD} 分别为 $1.231 \times 10^{-6}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $1.195 \times 10^{-6}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $1.155 \times 10^{-6}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。 Q_{MOD} 与 Q_{DFN} 的相对误差, 精细网格($\Delta = 0.04\text{ m}$)剖分时为 2.39%, 相对较小, 细网格($\Delta = 0.10\text{ m}$)剖分时为 5.94%, 而粗网格($\Delta = 0.20\text{ m}$)剖分时达 9.13%。表5显示 MODFLOW 模拟水头 H_{MOD} 和 DFN 模拟水头 H_{DFN} 的差异(绝对值), 对于精细网格($\Delta = 0.04\text{ m}$)为 $0.00 \sim 0.01\text{ m}$, 细网格($\Delta = 0.10\text{ m}$)为 $0.01 \sim 0.04\text{ m}$, 而粗网格($\Delta = 0.20\text{ m}$)为 $0.02 \sim 0.14\text{ m}$ 。精细网格的 MODFLOW 模拟水头非常接近 DFN 模拟水头, 但粗网格显著高估了水头(表5的 $\text{Err. } H_{\text{MOD}, 0.20}$ 为正值), 较大差异往往发生在节点间距小、或稠密的裂隙分布区(图9b的节点㉔、㉕、㉖、㉗、㉘、㉙)。

如表7所示, 裂隙长度 L_e 的网格估计 L_f 大多被高估或低估, 然而, L_f 的精细网格估计相比细网格、粗网格的估计更接近 L_e 。精细网格 $\Delta = 0.04\text{ m}$ 能间隔开这些节点间距小的裂隙(如表7节点㉔→㉕ L_e 为 0.03 m 、㉕→㉖ L_e 为 0.05 m 、㉔→㉖ L_e 为 0.06 m), 精细网格的裂隙长度 L_f 能够很好地接近表7的真实裂隙长度 L_e , 从而获得实际的裂隙网络流量和水头。

2.3 裂隙死端对基于MODFLOW的FC模型模拟的影响分析

将含裂隙死端的二级连通图刻画到有限差分网格, 对于算例1精细网格($\Delta = 0.02\text{ m}$)、细网格($\Delta = 0.05\text{ m}$)和粗网格($\Delta = 0.10\text{ m}$), 基于 MODFLOW 模拟的流量 Q_{MOD} 与 DFN 模拟的流量 Q_{DFN} 相对误差分别达 15.81%、16.76% 和 20.98%。对于算例2精细网格($\Delta = 0.04\text{ m}$)、细网格($\Delta = 0.10\text{ m}$)和粗网格($\Delta = 0.20\text{ m}$), 基于 MODFLOW 模拟的流量 Q_{MOD} 与 DFN 模拟的流量 Q_{DFN} 相对误差分别为 4.35%、10.68% 和 18.17%。通过两个算例的计算结果表明, 裂隙死端对基于 MODFLOW 的裂隙-连续介质模型的模拟具有不可忽略的影响。

2.4 讨论

算例1大多数节点的水头在粗网格低估, 大的低估值发生在稠密的裂隙分布区。粗网格剖分拉长了裂隙长度 L_e 的网格估计长度 L_f , 导致相邻节点间

表 6 MODFLOW 网格倾斜长度、阶梯长度与 DFN 流动路径对比 (算例 1, 单位: m, 部分节点)
(括号里的值表示 L_f 和 L_e 的误差)

Table 6 Comparison of MODFLOW inclined fissure length, stair step length and DFN flow path
(Case 1, Unit: m, partial nodes) (The bracket value indicates error between L_f and L_e)

节点	DFN	倾斜裂隙长度			阶梯长度		
	L_e	粗网格 L_f (0.10 m)	细网格 L_f (0.05 m)	精细网格 L_f (0.02 m)	粗网格 L_g (0.10 m)	细网格 L_g (0.05 m)	精细网格 L_g (0.02 m)
②⑨-③①	0.52	0.50(-0.02)	0.51(-0.01)	0.53(+0.01)	0.70	0.70	0.72
③①-⑦	1.52	1.48(-0.04)	1.50(-0.02)	1.51(-0.01)	2.00	2.05	2.06
③①-③③	0.62	0.54(-0.08)	0.60(-0.02)	0.62	0.70	0.80	0.82
③③-⑤	0.22	0.22	0.22	0.22	0.30	0.30	0.28
③③-⑥	0.22	0.20(-0.02)	0.21(-0.01)	0.22	0.20	0.25	0.28
③⑩-④	0.93	0.85(-0.08)	0.92(-0.01)	0.92(-0.01)	1.10	1.20	1.18
③⑩-③③	0.71	0.67(-0.04)	0.70(-0.01)	0.70(-0.01)	0.90	0.90	0.90
②②-②⑤	0.79	0.76(-0.03)	0.78(-0.01)	0.79	1.00	1.05	1.04
②⑤-②⑥	0.84	0.81(-0.03)	0.87(+0.03)	0.83(-0.01)	1.10	1.20	1.14
②⑤-③①	1.64	1.66(+0.02)	1.63(-0.01)	1.64	2.20	2.15	2.16
②⑥-①⑤	1.52	1.53(+0.01)	1.50(-0.02)	1.52	2.10	2.05	2.08
①①-①⑥	2.06	2.09(+0.03)	2.06	2.06	2.60	2.60	2.62
①①-①②	2.74	2.82(+0.08)	2.75(+0.01)	2.73(-0.01)	3.80	3.70	3.66
①⑥-②③	0.78	0.76(-0.02)	0.79(+0.01)	0.78	1.00	1.00	1.00
①⑥-①③	1.86	1.80(-0.06)	1.87(+0.01)	1.87(+0.01)	2.50	2.60	2.60
①②-①③	0.64	0.64	0.65(+0.01)	0.64	0.90	0.90	0.88
②③-①④	1.69	1.70(+0.01)	1.66(-0.03)	1.71(+0.02)	2.40	2.35	2.42
①③-①④	1.05	1.08(+0.03)	1.04(-0.01)	1.05	1.50	1.45	1.46
②③-②⑥	0.61	0.63(+0.02)	0.63(+0.02)	0.61	0.80	0.80	0.78
①⑨-②②	0.26	0.32(+0.06)	0.27(+0.01)	0.26	0.40	0.35	0.34
②②-②③	0.83	0.78(-0.05)	0.81(-0.02)	0.82(-0.01)	1.10	1.15	1.16
①⑥-②③	0.78	0.76(-0.02)	0.79(+0.01)	0.78	1.00	1.00	1.00
①④-①⑤	0.22	0.22	0.22	0.23(+0.01)	0.30	0.30	0.32
②⑧-②⑨	0.18	0.22(+0.04)	0.18	0.17(-0.01)	0.30	0.25	0.24
②⑨-③⑩	0.17	0.22(+0.05)	0.16(-0.01)	0.16(-0.01)	0.30	0.20	0.20
②⑧-③⑩	0.27	0.32(+0.05)	0.27	0.28(+0.01)	0.40	0.35	0.36

的水力梯度被低估,高估长度的累积效应显著降低了水头。相比之下,位于稠密裂隙分布区域边界附近的节点,节点间 L_f 也被高估,但这些节点水头模拟的差异远小于稠密中心区域节点的水头差异,表明给定的边界条件约束了其邻近节点的水头计算,从而减小了它们的计算误差。

算例 2 的粗网格剖分基本均高估了水头,裂隙长度 L_e 的网格估计长度 L_f 大多被高估或低估。MODFLOW 模拟水头 H_{MOD} 和 DFN 模拟水头 H_{DFN} 较大差异往往发生在节点间距小、或稠密的裂隙分布区。

研究发现,算例 1 粗网格剖分基本低估了水头,精细网格远小于互连节点间的窄距离(算例 1,精细网格 $\Delta=0.02\text{ m}$ 相对于互连节点的窄距离②⑨→③⑩的 L_e 为 0.17 m 、②⑧→②⑨的 L_e 为 0.18 m)。而算例 2 粗网格剖分基本均高估了水头,精细网格分辨率非常接近互连节点间的窄距离(算例 2,精细网格 $\Delta=0.04\text{ m}$ 相对于互连节点的窄距离为 0.03 m 、 0.05 m 和 0.06 m)。两个算例通过细化网格可大大消除估计误差,精细网格的估计长度 L_f 能够很好地接近真实裂隙长度 L_e ,从而获得实际的裂隙网络流量和水头。

MODFLOW 网格剖分尺寸选择通常要结合研究

表 7 MODFLOW 网格倾斜长度、阶梯长度与 DFN 流动路径对比（算例 2，单位：m，部分节点）
（括号里的值表示 L_f 和 L_g 的误差）

Table 7 Comparison of MODFLOW inclined fissure length, stair step length and DFN flow path
(Case 2, Unit: m, partial nodes) (The bracket value indicates the error between L_f and L_g)

节点	DFN	倾斜裂隙长度			阶梯长度		
	L_e	粗网格 L_f (0.20 m)	细网格 L_f (0.10 m)	精细网格 L_f (0.04 m)	粗网格 L_g (0.20 m)	细网格 L_g (0.10 m)	精细网格 L_g (0.04 m)
⑤-⑨	0.89	0.89	0.89	0.88(-0.01)	1.20	1.20	1.16
⑤-⑭	1.20	1.28(+0.08)	1.22(+0.02)	1.19(-0.01)	1.80	1.70	1.64
⑨-④	0.60	0.63(+0.03)	0.63(+0.03)	0.62(+0.02)	0.80	0.80	0.76
⑨-⑩	0.60	0.63(+0.03)	0.63(+0.03)	0.59(-0.01)	0.80	0.80	0.76
⑨-⑭	0.67	0.60(-0.07)	0.61(-0.06)	0.66(-0.01)	0.60	0.70	0.80
④-⑧	0.72	0.85(+0.13)	0.71(-0.01)	0.74(+0.02)	1.20	1.00	1.04
⑭-⑰	0.53	0.57(+0.04)	0.58(+0.05)	0.52(-0.01)	0.80	0.80	0.72
⑭-⑮	0.08	0.20(+0.12)	0.10(+0.02)	0.08	0.20	0.10	0.08
⑭-⑰	0.15	0.20(+0.05)	0.14(-0.01)	0.17(+0.02)	0.20	0.20	0.24
⑰-⑮	0.11	0.00(-0.11)	0.10(-0.01)	0.13(+0.02)	0.00	0.10	0.16
⑳-㉓	0.06	0.00(-0.06)	0.00(-0.06)	0.06	0.00	0.00	0.08
㉓-㉔	0.03	0.00(-0.03)	0.00(-0.03)	0.04(+0.01)	0.00	0.00	0.04
㉔-㉕	0.05	0.00(-0.05)	0.00(-0.05)	0.04(-0.01)	0.00	0.00	0.04
㉕-㉖	0.36	0.45(+0.09)	0.45(+0.09)	0.36	0.60	0.60	0.48
㉕-㉗	0.43	0.45(+0.02)	0.42(-0.01)	0.43	0.60	0.60	0.60
㉖-㉗	0.18	0.00(-0.18)	0.14(-0.04)	0.16(-0.02)	0.00	0.20	0.20
㉖-㉙	1.54	1.52(-0.02)	1.52(-0.02)	1.56(0.02)	2.00	2.00	2.04
㉗-㉚	0.58	0.63(+0.05)	0.63(+0.05)	0.59(+0.01)	0.80	0.80	0.76
㉗-㉛	0.80	0.72(-0.08)	0.78(-0.02)	0.79(-0.01)	1.00	1.10	1.12
㉙-㉜	1.33	1.28(-0.05)	1.28(-0.05)	1.32(-0.01)	1.80	1.80	1.84
㉙-㉝	0.92	0.89(-0.03)	0.94(+0.02)	0.92	1.20	1.30	1.28

区域大小来确定,应足够小以捕捉流动中的细节特征,同时足够大以减少计算时间和成本,一般通过试算法确定网格尺寸,同时应用于实际流域,还要考虑地形地貌等因素的时空变异性,如考虑耦合地表高程 DEM 数据等。

3 结 论

基于 MODFLOW 的裂隙-连续介质模型既包含复杂裂隙信息,又得益于连续介质模型的处理速度,主要结论如下:

(1)根据裂隙统计参数,生成裂隙网络并提取主干网,对基于交叉节点分析的 DFN 模型,及裂隙死端对 MODFLOW 模拟具有不可忽略的影响,提出不同等级连通图的各自适用情形。

(2)将第三级连通图映射到有限差分网格,根据

裂隙进出单元格的的不同方式,对裂隙单元格在 x 方向和 y 方向的渗透系数独立计算,可计算出每个单元格不同的各向异性比。

(3)利用交叉裂隙物理模型和两个复杂裂隙网络从流量、水头、裂隙长度分析验证了 FC 模型程序代码的正确性和有效性,通过细化网格可大大提高 MODFLOW 的模拟精度。将裂隙网络映射到计算高效的网格上,主要优势是可以使用传统的多孔介质水流模拟软件如 MODFLOW,来求解相互连通裂隙网络和岩石基质之间的压力水头分布。

在岩溶地区,基于水文地质试验获得的溶孔(微裂隙)、溶隙(裂隙)的渗透系数,利用 FC 模型分别赋值给裂隙单元格和基质单元格,可实现岩石基质和裂隙介质的压力水头计算。如结合流域降水、植被、土壤、地下水动态监测等,可用于岩溶区水文过程研究。

参考文献

- [1] WILLIMAS P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review[J]. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(1): 1-10.
- [2] 陈喜, 张志才. 喀斯特地区地球关键带科学与生态水文学发展综述[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(3): 356-364.
CHEN Xi, ZHANG Zhicai. An overview on the development of science and ecological hydrology of the earth critical zones in karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(3): 356-364.
- [3] 张君, 陈洪松, 聂云鹏, 付智勇, 连晋姣, 王发, 罗紫东, 王克林. 西南喀斯特关键带结构及其水文过程研究进展[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(4): 985-996.
ZHANG Jun, CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, FU Zhiyong, LIAN Jinjiao, WANG Fa, LUO Zidong, Wang Kelin. Research progress on structure and hydrological processes in the karst critical zone, southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(4): 985-996.
- [4] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理[J]. *热带地理*, 1998, 18(4): 322-326.
JIANG Zhongcheng. Features of epikarst zone south China and formation mechanism[J]. *Tropical Geography*, 1998, 18(4): 322-326.
- [5] 刘晓丽, 王恩志, 王思敬, 樊赞赞. 裂隙岩体表征方法及岩体水力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1814-1821.
LIU Xiaoli, WANG Enzhi, WANG Sijing, FAN Yunyun. Representation method of fractured rock mass and its hydraulic properties study[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1814-1821.
- [6] YE Zuyang, FAN Xincheng, ZHANG Jun, SHENG Jianlong, CHEN Yuting, FAN Qingli, QIN Huikai. Evaluation of connectivity characteristics on the permeability of two-dimensional fracture networks using geological entropy[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(10): 1-16.
- [7] HU Mengsu, RUTQVIST J, WANG Yuan. A practical model for fluid flow in discrete-fracture porous media by using the numerical manifold method[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 97: 38-51.
- [8] 罗明明, 尹德超, 张亮, 陈植华, 周宏, 韩兆丰, 史婷婷. 南方岩溶含水系统结构识别方法初探[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(6): 543-550.
LUO Mingming, YIN Dechao, ZHANG Liang, CHEN Zhihua, ZHOU Hong, HAN Zhao Feng, SHI Tingting. Identifying methods of karst aquifer system structure in South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(6): 543-550.
- [9] 徐中平, 周训, 崔相飞, 拓明明, 王昕昀, 张颖. 岩溶区地下水数值模拟研究进展[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(4): 475-483.
XU Zhongping, ZHOU Xun, CUI Xiangfei, TA Mingming, WANG Xinyun, ZHANG Ying. Research advances of numerical simulation of groundwater in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(4): 475-483.
- [10] 常勇. 裂隙-管道二元结构的岩溶水文过程分析与模拟[D]. 南京: 南京大学, 2015.
CHANG Yong. Analysis and simulation of the hydrological process of the karst aquifer with fracture-conduit dual structure [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [11] 党志文, 邵景力, 崔亚莉, 李军, 宫志强, 赵良杰, 梁永升. 基于MODFLOW-CFP的贵州大井流域岩溶地下水数值模拟[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(2): 266-276.
DANG Zhiwen, SHAO Jingli, CUI Yali, LI Jun, GONG Zhiqiang, ZHAO Liangjie, LIANG Yongsheng. Numerical simulation of karst groundwater in Dajing basin of Guizhou Province based on MODFLOW-CFP[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 266-276.
- [12] 赵良杰, 夏日元, 杨杨, 邵景力, 易连兴, 王喆. 基于MODFLOW的岩溶管道水流模拟方法探讨与应用[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 346-351.
ZHAO Liangjie, XIA Riyuan, YANG Yang, SHAO Jingli, YI Lianxing, WANG Zhe. Discussion and application of simulation methods for karst conduit flow based on MODFLOW[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 346-351.
- [13] 王晋丽, 陈喜, 黄远洋, 张志才. 岩体裂隙网络随机生成及连通性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(2): 30-35.
WANG Jinli, CHEN Xi, HUANG Yuanyang, ZHANG Zhicai. A study of stochastic generation and connectivity of fracture network in rock mass[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(2): 30-35.
- [14] BOTROS F E, HASSAN A E, REEVES D M, POHLL G. On mapping fracture networks onto continuum[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44, W08435: 1-17.
- [15] 王晋丽, 陈喜, 常彦伟, 张志才, 康建荣, 程勤波. 基于裂隙网络连通性的裂隙流的MODFLOW模拟方法, CN108399290B[P]. 2021-07-06.
WANG Jinli, CHEN Xi, CHANG Yanwei, ZHANG Zhicai, KANG Jianrong, CHENG Qinbo. MODFLOW simulation method for fracture flow based on fracture network connectivity, CN108399290B[P]. 2021-07-06.
- [16] 方涛, 柴军瑞, 胡海浪, 徐文彬. Monte Carlo方法在岩体裂隙结构面模拟中的应用[J]. *露天采矿技术*, 2007(1): 7-9+13.
FANG Tao, CHAI Junrui, HU Hailang, XU Wenbin. Application of Monte Carlo method to simulating the fracture interconnectivity of rock mass[J]. *Surface Mining Technology*, 2007(1): 7-9+13.
- [17] LONG J C S, BILLAUX D M. From field data to fracture network modeling: An example incorporating spatial structure[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(7): 1201-1216.
- [18] 王晋丽, 陈喜, 常彦伟, 张志才, 康建荣. 一种基于图论的裂隙网络连通性及渗流计算的方法[P], 公告号: CN106991244B. 申请(专利)号: CN201710240011.0, 2019-06-28.
WANG Jinli, CHEN Xi, CHANG Yanwei, ZHANG Zhicai, KANG Jianrong. A method based on graph theory for fracture

- network connectivity and seepage calculating[P], CN106991244B. 2019-06-28.
- [19] BERKOWITZ B. Analysis of fracture network connectivity using percolation theory[J]. *Mathematical Geology*, 1995, 27(4): 467-483.
- [20] SNOW D T. Anisotropic permeability of fractured media[J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(6): 1273-1289.
- [21] PRIEST S D. Discontinuity analysis for rock engineering [M]. London: Chapman and Hall, 1993.
- [22] 王晋丽, 陈喜, 张志才, 康建荣, 高满. 基于离散裂隙网络模型的裂隙水渗流计算[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(4): 363-371.
WANG Jinli, CHEN Xi, ZHANG Zhicai, KANG Jianrong, GAO Man. Computation of fracture water flow based on discrete fracture network model[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(4): 363-371.
- [23] REEVES D M, BENSON D A, MEERSCHAERT M M. Transport of conservative solutes in simulated fracture networks: 1. Synthetic data generation[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44, W05404: 1-10.
- [24] 詹美礼, 速宝玉. 交叉裂隙水流 N-S 方程有限元分析[J]. *水科学进展*, 1997(1): 4-11.
ZHAN Meili, SU Baoyu. Finite element analysis of N-S equation of intersection fissure flow[J]. *Advances in Water Science*, 1997(1): 4-11.
- [25] 速宝玉, 詹美礼, 郭笑娥. 交叉裂隙水流的模型实验研究[J]. *水利学报*, 1997(5): 2-7.
SU Baoyu, ZHAN Meili, GUO Xiaoe. Experiment research of cross fracture flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(5): 2-7.

MODFLOW-based analysis on seepage in discrete fissure networks

WANG Jinli¹, CHEN Xi², ZHANG Zhicai³, KANG Jianrong¹, HU Jinshan¹

(1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract Studies on karst bedrock fissures face challenge in modeling due to the heterogeneity and anisotropy of fissures. Groundwater primarily flows through fissure and pipe networks within karst aquifer systems, while the bedrock pores and micro-fissures mainly serve as water storage. Therefore, the ideal hydrological model for karst areas is the continuum–fissure–pipe model. Fissures, as the main pathway for groundwater flow, significantly influence seepage in fissure media due to their connectivity. The fissure–continuum model (FC), which integrates the advantages of continuum models and discrete fissure network (DFN) models, can realistically characterize the dual texture of karst aquifers. The FC model can also account for matrix diffusion and water exchange between the matrix and fissures. However, this model remains challenging to accurately determine water exchange between rock matrix and fissure media.

This study was based on the statistical distribution of fissure geometry and hydraulic parameters. It utilized the Monte Carlo stochastic simulation technique and MATLAB program to generate a two-dimensional fissure network diagram that mirrored the distribution of actual rock fissures. The adjacency matrix of an undirected graph of graph theory was employed to represent the intersection relationships between fissures in the fissure network. In addition, this study utilized percolation theory to eliminate isolated fissures and clusters of isolated fissures that cannot conduct fluid. This approach facilitated the generation of a first-level connectivity diagram. Fissures with single nodes were then eliminated to create a second-level connectivity diagram, and dead-ends in fissures were eliminated to generate a third-level connectivity diagram. Based on the connectivity diagrams of fissure networks, the cubic law and the continuity equation for seepage were applied to establish a single-phase, saturated, and stable DFN model. Each fissure in the connectivity diagram was mapped onto a finite difference grid to develop an FC model that combines DFN with MODFLOW. When eliminating the fissure dead-ends, computational rounding may result in the loss of some nodes. Therefore, the second-level and third-level connectivity diagrams were separately used for DFN seepage simulation and FC seepage simulation, respectively. Simulation programs were developed to reproduce cross-fissure test scenarios, and two multi-fissure cases were analyzed to investigate the effects of finite difference grid resolution and fissure dead-ends on the accuracy of stable seepage simulations. The DFN was used as a metric to evaluate the correctness and validity of FC model code writing.

This study was based on the statistical distribution of fissure geometry and hydraulic parameters. It utilized the Monte Carlo stochastic simulation technique and MATLAB program to generate a two-dimensional fissure network diagram that mirrored the distribution of actual rock fissures. The adjacency matrix of an undirected graph of graph theory was employed to represent the intersection relationships between fissures in the fissure network. In addition, this study utilized percolation theory to eliminate isolated fissures and clusters of isolated fissures that cannot conduct fluid. This approach facilitated the generation of a first-level connectivity diagram. Fissures with single nodes were then eliminated to create a second-level connectivity diagram, and dead-ends in fissures were eliminated to generate a third-level connectivity diagram. Based on the connectivity diagrams of fissure networks, the cubic law and the continuity equation for seepage were applied to establish a single-phase, saturated, and stable DFN model. Each fissure in the connectivity diagram was mapped onto a finite difference grid to develop an FC model that combines DFN with MODFLOW. When eliminating the fissure dead-ends, computational rounding may result in the loss of some nodes. Therefore, the second-level and third-level connectivity diagrams were separately used for DFN seepage simulation and FC seepage simulation, respectively. Simulation programs were developed to reproduce cross-fissure test scenarios, and two multi-fissure cases were analyzed to investigate the effects of finite difference grid resolution and fissure dead-ends on the accuracy of stable seepage simulations. The DFN was used as a metric to evaluate the correctness and validity of FC model code writing.

Results show that the total flow simulation values and head simulation of the fine grid under the two test conditions are in good agreement with the theoretical values of DFN. However, the node heads and total grid flow simulated by the FC model in two cases are either overestimated or underestimated in the coarse grid. Although elongated paths of grid flow L_g between cells are corrected by increasing the permeability coefficients of the cells, the coarse grid based on MODFLOW cannot accurately analyze the length of inclined fissures L_f on the grid. If the size of selected coarse grid is larger than the distance between two adjacent fissures, part of the two adjacent fissures will be merged in the grid, thereby shortening the actual flow path. Secondly, the length of inclined fissure L_f is either overestimated or underestimated. The inaccurate analysis of flow paths will lead to an increase in the estimation error of flow rates and heads, especially in dense fissure zones near the center of the model domain. This effect can be greatly alleviated by refining the grid. The fissure dead-ends have non-negligible effects on MODFLOW grid flow. In this study, the MODFLOW-based FC model can be used to solve the pressure distributions between interconnected network of fissures and the rock matrix, overcoming the difficulty of determining water exchange between rock matrix and fissure media. This study can realize the expression of heterogeneity and anisotropy of fissure permeability in numerical computational units, which will promote the understanding of MODFLOW simulation of fissure flow based on connectivity.

Furthermore, The size of the MODFLOW grid should be determined in combination with the size of the study area, which should be small enough to capture the detailed features in the flow, and large enough to reduce the computational time and cost. Generally, the grid size is determined by a trial algorithm. When FC approach is applied to the actual watershed, the spatial variability of topography and landform factors should also be considered, such as coupling surface elevation DEM data.

Key words DFN, connectivity, MODFLOW, seepage, fracture-continuum model

(编辑 杨杨)