

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.014

# 岩体裂隙连通路径及岩体等效渗透张量参数研究\*

王鑫永<sup>1</sup>, 王锡勇<sup>2</sup>, 章杨松<sup>1</sup>, 李晓昭<sup>3</sup>, 许文涛<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学土木工程系, 江苏 南京 210094; 2. 中核集团核工业北京地质研究院, 北京 100029;  
3. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 在高放核废料的处置中, 掌握地下水在裂隙岩体中的渗流规律是当下的关键问题。以甘肃北山炭窑槽一测区为工程背景, 通过现场数据测得的裂隙统计参数, 应用编制的MATLAB语言程序生成全局域内的离散裂隙网络模型, 将三维裂隙以圆盘模拟并简化为变截面圆管单元渗流网络, 为考虑边缘效应以圆管作为单元体切割基准。通过比较随单元体尺寸增大的三个方向上的等效渗透系数变化趋势得到表征单元体REV, 并在该单元体中计算渗透张量以及应用Dijkstra算法识别对应边界方向的最优路径。结果表明: 该测区的渗透系数最大值分别为 $3.62 \times 10^{-6}$  m/s与 $9.19 \times 10^{-7}$  m/s, 水平向渗透性最小, 竖直向附近最大, 基本符合工程实际。

**关键词:** 裂隙岩体; 离散裂隙网络; 路径识别; 渗透系数

**中图分类号:** TU42; P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0789-07

## Study on Connected Path of Rock Fracture and Equivalent Permeability Tensor Parameters of Rock Mass

WANG Xinyong<sup>1</sup>, WANG Xiyong<sup>2</sup>, ZHANG Yangsong<sup>1</sup>, LI Xiaozhao<sup>3</sup>, XU Wentao<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;  
2. CNNC Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;  
3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** In the disposal of high-level nuclear waste, mastering the seepage law of groundwater in fractured rock mass is a key issue at present. With the engineering background of a surveying area in Gansu Beishan, the discrete fracture network model in the global domain was generated using the MATLAB code based on the statistical parameters of fracture properties measured by field data. The three-dimensional disc-shaped fractures are modeled and simplified as channel element network with variable cross-sections, and each channel element is cut in the research cube for the consideration of the edge effect. Then the Representative Element Volume (REV) is characterized by comparing the trend of the equivalent permeability coefficient in three directions which changes as the size of research cube is getting larger; the permeability tensor is calculated and the optimum path of the corresponding boundary direction is recognized by use of the improved Dijkstra algorithm in this REV cell. The results show that the maximum and minimum values of the permeability coefficient of the measured area

\* 收稿日期: 2018-09-19; 修回日期: 2018-10-25

基金项目: 国防部科技重点项目(科工二司[2015]297号)资助

作者简介: 王鑫永(1995-), 男, 硕士研究生。主要从事岩石力学、地下工程方面的研究。Email: wangxy7932@126.com

通讯作者: 章杨松(1962-), 男, 教授, 博士。主要从事岩石力学及隧道工程方面的研究。Email: zysnj318@126.com

are  $3.62 \times 10^{-6}$  m/s and  $9.19 \times 10^{-7}$  m/s, respectively, which has the lowest permeability in horizontal plane and the highest one around the vertical direction, and this results are basically in line with the actual project. All these programming ideas and simulation results can provide a reference for solving related engineering problems.

**Keywords:** fractured rock; discrete fracture network; flow path identification; permeability coefficient

## 引言

随着能源发展的需要,核能开发产生的核废料处置问题逐渐成为人类生存和环境安全的隐患。以往突发的核灾害都对生态社会造成了不可估量的影响,研究核废料处置也由此成为当下的一大热点问题。裂隙是构成岩体的重要部分,它不仅影响着岩体力学强度,还为气液的流动创造路径<sup>[1]</sup>,因此岩体裂隙一直是高放核废料深埋处理<sup>[2-3]</sup>、地热能开发<sup>[4]</sup>等课题的重要关注点。目前裂隙岩体模型主要有两种:适合处理裂隙规模小、分布密一类岩体的等效连续体模型以及离散裂隙网络模型(DFN: Discrete Fracture Network)。相较而言在大量的测量数据支持下,应用DFN模型更体现出岩体渗流的基本规律<sup>[5]</sup>,特别是经统计分析建立的三维空间DFN模型。同时大多数裂隙岩体(如花岗岩)的基质渗透性几乎可以忽略,结构面与岩石间的水流交换也很微弱<sup>[3]</sup>,此时就能近似认为水流只通过裂隙网络进行传输,因而DFN模型更能反映真实的渗流特征。

以往裂隙网络的渗流数值分析主要是:①划分网格离散化后应用有限元分析;②简化为管网模型。Q.H.Zhang<sup>[6]</sup>具体给出了复杂三维裂隙网络的三角形网格划分方法,并应用有限元分析算例以验证精确性。另一方面,王俊奇等<sup>[7]</sup>以Monte-Carlo法生成裂隙网络并简化为管单元,渗透分析的空间三维问题即转化为一维问题。E.Karimzade等<sup>[2]</sup>生成椭圆形裂隙并用矩形截面管单元来模拟渗流通道以预测开挖隧道的流量。对于大尺寸DFN模型,裂隙网络划分网格离散化会使计算节点激增,而管单元式简化既符合裂隙内水流路径呈沟槽状的特征<sup>[7]</sup>,又能保证高密度裂隙岩体计算效率。然而过于简化模型又会降低计算精度,因此本文针对管单元简化做适当补足,即以线性变截面管单元模拟裂隙水力隙宽的变化来提升计算精度,同时取小单元测区时可用切割管单元的方法消除边缘效应。

本文还应用改进Dijkstra算法进行最优路径搜索,能判断出岩体优势裂隙的大致走向。

本文基于MATLAB编译了三维DFN管单元模型的渗流分析软件。以三维DFN模型为基础,提出初步处理Monte-Carlo法生成的裂隙网络及生成路径管网的思路,再切割管单元生成当前研究域内的管网模型以消除边缘效应。然后应用改进后的迭代法计算稳定层流下的节点水头,得到研究域内表征单元体积下的等效渗透张量,同时给出从单路径识别延伸出的最优路径识别功能。最后应用甘肃北山一测区的实测数据对该范围内裂隙岩体的渗透参数进行了预测分析。

## 1 三维离散裂隙网络生成

DFN方法通过现场测量得到测区裂隙各性状的分布参数,再由Monte-Carlo法生成符合已知分布的裂隙数据,因而DFN模型应具有和真实裂隙接近的统计特征。通常有界裂隙可由Baecher圆盘模型和Veneziano多边形模型模拟。有研究认为真实裂隙的形状接近于椭圆状或圆状<sup>[5]</sup>,因此本文将裂隙视为两个平行光滑面相夹,单个裂隙用圆盘的空间位置、尺寸(直径)、产状、张开度这4个相互独立的随机变量定义。

### 1.1 裂隙几何参数的统计规律

#### 1.1.1 裂隙位置

裂隙(2D的线段和3D的圆盘)位置的模拟方式中最常用的是形心点的坐标<sup>[8]</sup>。生成裂隙空间分布的方式很多,本文应用体现点分布复杂空间随机性的均质泊松分布模型<sup>[8]</sup>来生成裂隙位置参数,主要受体密度 $\lambda$ 影响。

#### 1.1.2 裂隙尺寸

工程上能测得的裂隙尺寸只有岩石露头面上的迹长,测量岩体内部裂隙难度大,因此研究多着眼于分析裂隙迹长和尺寸之间的关系。宋晓晨等<sup>[5]</sup>提到圆盘形裂隙迹长的分布可近似看作指数分布,

且通过数值模拟发现圆盘直径的分布与裂隙迹长的分布相差无几。

### 1.1.3 裂隙产状——倾向和倾角

裂隙产状的模拟,需对现场测得的倾向 $\varphi$ 、倾角 $\theta$ 统计分析得其相应的均值及离散程度 $\kappa$ 。现实中裂隙岩体大量存在规律相同的节理等地质构造,因此可将所有裂隙预先根据节理划分为不同组别,然后单独对不同组用相同过程模拟<sup>[2, 5]</sup>。本文对裂隙产状两个角度分别进行一次 von-Mises 随机数生成。

### 1.1.4 裂隙张开度

裂隙张开度和迹长存在一定关系<sup>[2, 9-11]</sup>,因此可以用迹长 $l$ 来表示张开度,代替以往裂隙张开度及导水系数的随机分配方式。对于张开型裂隙,大部分报告倾向于用非线性关系来表达,大致服从根号下的幂率分布<sup>[9-10]</sup>:

$$e_{\max} = \alpha l^{\beta} \quad (1)$$

式中, $\alpha$ 和 $\beta$ 为与裂隙粗糙度有关的系数; $e_{\max}$ 为裂隙截面的最大张开度; $l$ (m)是裂隙迹长。C.Klimczak等<sup>[10]</sup>拟合了10个地区的系数 $\beta$ 大致在0.22~0.69,且均值为0.5,但具体数值应以现场测得为准。本文的模型根据甘肃北山一岩石露头区测得的数据取 $\alpha = 0.000\ 317\ 714$ , $\beta = 0.5$ 。

张开型裂隙的张开截面通常可视为扁圆形币状<sup>[11]</sup>,存在一个最大张开度 $e_{\max}$ (图1),根据面积等效将币状截面转换为宽 $L$ 和高 $e_{\text{avg}}$ 的矩形截面<sup>[11]</sup>:

$$e_{\text{avg}} = \frac{\pi e_{\max}}{4} \quad (2)$$

式中, $e_{\text{avg}}$ 为平均张开度; $L$ (m)为与币状截面等效的矩形截面宽度,对于圆盘形裂隙中心点处,等效矩形截面宽 $L$ 可近似取直径(即图1的 $2r$ ),对应裂隙间交线处可取交线长度,计算 $e_{\max}$ 时参数 $l$ 近似取为 $L$ 。式(2)可将 $e_{\max}$ 换算成平均张开度 $e_{\text{avg}}$ 。此处的 $e_{\text{avg}}$ 与立方准则(式(4))中的等效水力隙宽等价。

## 1.2 裂隙网络生成

对甘肃北山岌岌槽一花岗岩露头面的2191条样本裂隙进行测量后发现,该测区结构面可分为4优势组 $242.94^\circ \angle 69.07^\circ$ 、 $102.67^\circ \angle 66.80^\circ$ 、 $356.31^\circ \angle 69.63^\circ$ 及 $170.80^\circ \angle 72.12^\circ$ ,各组参数见表1。满足上述分布参数生成的该测区全局域(60 m×60 m)圆盘形裂隙几何模型如图2所示。

生成的裂隙模型,需进行:①求裂隙间、裂隙与

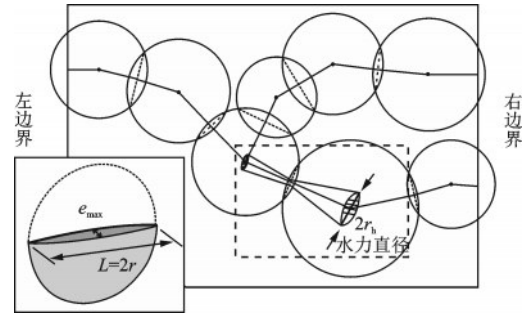


图1 结构面间渗流路径生成

Fig.1 Inflow path through fractures

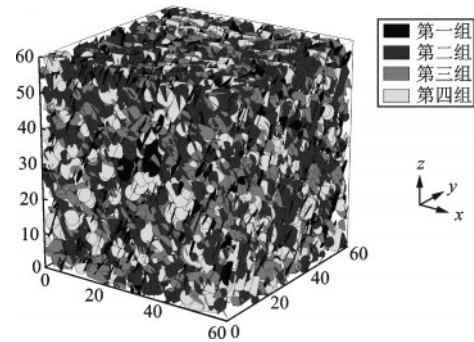


图2 随机生成的圆盘形裂隙模型

Fig.2 Randomly generated disc-shaped fracture model

注:不同灰度表示不同组别,孤立裂隙显示为透明

边界间的交线;②去除孤立裂隙。

## 2 水头计算及最优路径识别

### 2.1 渗流路径模拟和管道几何特征

水头的计算依赖总渗流路径数组(flowpath),相对应的还有单一渗流路径数组(singlepath)。

本文在单元体内对裂隙进行随机建模,生成离散分布的圆盘形裂隙。不同产状裂隙组互相交切成如图1中的裂隙交线,然后将各裂隙圆盘中心点和裂隙间交线中心点连接,最后将与边界连接的裂隙圆盘中心点和边界交线中心点也连接起来,形成渗流管道网络。在这个基础上,就将三维的裂隙网络水头分析简化成了用圆管代替的一维计算问题<sup>[7]</sup>。管网需进行如下初处理:①对每个聚类都检查是否同时存在至少一条与边界起始面相交裂隙以及与终端面相交裂隙;②去除“死点”路径(无流动)<sup>[2]</sup>;③去除“死循环”路径<sup>[2]</sup>。

对于渗流管道横截面的选型,可以是圆形截面,也可以是矩形截面<sup>[2]</sup>,每种截面又可分为沿路径方向是等截面或变截面。考虑到不同裂隙的尺寸

表1 测区各裂隙几何特征统计

Table 1 Geometry statistics of fractures in the survey area

分组	产状/(°)				直径/m			面密度
	分布类型	倾向	倾角	$\kappa$	分布类型	均值	标准差	均值/(条·m <sup>2</sup> )
1	Fisher	242.94	69.07	14.53	对数正态	5.01	2.12	0.033 5
2	Fisher	102.67	66.80	10.15	对数正态	3.88	1.85	0.035 1
3	Fisher	356.31	69.63	9.40	对数正态	3.93	1.88	0.031 5
4	Fisher	170.80	72.12	16.74	对数正态	3.84	1.86	0.018 1

大小不一,同时裂隙之间或裂隙与边界的相交程度也有所区别(即裂隙交线长短不一),这些都会影响等效管道的水力隙宽,因此本文应用沿路径方向改变半径的圆形变截面管道(图1虚线框内),程序中通过增加计算节点的方式实现。由式(1~2)得到的平均水力隙宽  $e_{avg}$  可通过近似等效为一个宽高分别为  $L$  和  $e_{avg}$  的矩形面积,来计算圆管横截面的水力半径  $r_h$ :

$$A = e_{avg} \times L = r_h^2 \pi \quad (3)$$

式中,  $L$ (m)对于裂隙圆盘直径处截面即为圆盘直径  $2r$ ,对裂隙交线处的截面则是交线长度,中间各部分简化为按线性过渡(图1虚线框内);管道的截面积  $A$ (m<sup>2</sup>)可替换式(4)中的  $e_h w$ 。

## 2.2 稳定层流下的节点压力水头计算

应用稳定层流条件下的立方准则,两光滑平板间的单裂隙导水率如下式<sup>[12]</sup>:

$$C = \frac{g e_h^3 w}{12 \nu L} \quad (4)$$

式中,  $C$ (m<sup>2</sup>/s)为管道导水率;  $g$ (m/s<sup>2</sup>)为重力加速度;  $e_h$ (m)为裂隙等效水力隙宽;  $w$ (m)为管道宽度;  $\nu$ (m<sup>2</sup>/s)为液体(水)运动粘度;  $L$ (m)为管道长度。

将式(1~2)代入立方准则,  $e_h^3 w$  变成  $e_h^5$  更体现出水力隙宽与流量间的非线性。文献[10]称之为“五次方准则”,并归因于裂隙壁面的粗糙性。

R.Liu等<sup>[11]</sup>提到由于裂隙表面的粗糙性,曲折长度  $L_t$  往往比  $L$  大,两者的关系近似如下<sup>[11]</sup>:

$$L_t = e^{1-D_\tau} L^{D_\tau} \quad (5)$$

式中,  $e$  即  $e_h$ ; 分形维数  $D_\tau$  为 1~2, 表示单裂隙由于表面粗糙度所致的渗流路径非线性。

另外现场调查也表明,存在一些局部具有胶结特性的结构面且通常不易渗水。李海枫等<sup>[13]</sup>将 I、II 级结构面分为导水和阻水,阻水结构面参与裂隙网络生成,但由于水力特性变化,因此不应组成渗流网络。本文将测区第 1 组裂隙定为胶结,其渗透特

性与花岗岩基质相同,  $k$  可取  $1e^{-8}$  m/s。

通过立方准则可以得到两节点  $i, j$  间的管道流量  $Q_{ij}$  如下式<sup>[12]</sup>:

$$Q_{ij} = - \frac{g e_h^3 w}{12 \nu} \frac{\Delta H}{\Delta L} = C_{ij} (H_i - H_j) \quad (6)$$

式中,  $H_i, H_j$  及  $C_{ij}$  为对应节点  $i, j$  的压力水头和两节点间管道  $ij$  的导水率,联合式(4~6)及流量守恒方程即可得到节点  $i$  的水头计算式:

$$H_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij} H_j}{\sum_{j=1}^n C_{ij}} \quad (7)$$

在由 1.2 节初处理后得到的渗流网络模型 flow-path 中,各节点根据所处位置可分为边界起始节点、内部节点和边界终端节点<sup>[1]</sup>。边界上的节点根据边界条件确定水头值,并在整个计算过程中保持不变,所有内部节点初始取零值,再应用式(7)对内部节点依次求解。之后应用改进的迭代法<sup>[2]</sup>,直到每个节点的水头值与上一轮迭代的差值在一个自定的“容忍度 tol”范围内。

初始研究域中的部分渗流路径如图 3 所示(管道经过一定放大)。不同灰度代表各管道节点水头大小区别( $H_1 \sim H_0$ ),边界条件为:  $x=0$  一侧为边界起始面,另一端为终端面,分别取均布水头  $H_1, H_0$  (图 3 中以阴影块体表示),其余边界不透水。

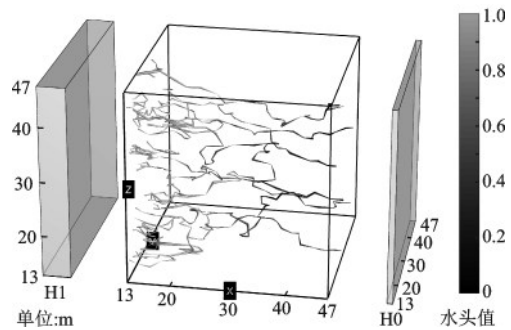


图3 部分渗流路径节点水头计算结果及边界条件示意

Fig.3 Calculation results of the hydraulic head of partial seepage paths and the illustration of boundary conditions

### 2.3 最优路径识别

本文编译并比较了路径搜索中较常用的三种算法:① 深度优先搜索的遍历算法;② Floyd算法;③ Dijkstra算法。改编后上述三种算法的邻接信息均用邻接链表的形式存储,可以显著减少内存空间。

基本上工程更关注最短时间路径,上述3种方法均能得到此结果。改进后Dijkstra算法只能得到对应一个起点的一条最优权值路径,这里权值通常设为渗流时间。相比较而言,深度优先搜索只能依次遍历不重复的所有单路径(数量极多),再得到最优解,若只需得到最优时间路径则显得效率低下。经比较,100个结构面(138个节点,7 140条单路径)的示例1及200个结构面(597个节点,6 380 032条单路径)的示例2,在只关注最短时间路径条件下,改编后的Dijkstra算法均远优于其他两种算法(见表2)。本文算例为某个方向上,对应最短渗流时间的部分起点上的渗流路径叠加,如图3所示。

表2 三种最优路径识别算法在不同示例下的耗时

Table 2 Consuming times of three optimal path recognition algorithms for different examples		
单位:s		
改编算法	示例1	示例2
深度优先遍历搜索	2.10	232.55
Floyd算法	39.48	—
改进Dijkstra算法	0.016	0.433

### 3 表征单元上的渗透张量计算实例

裂隙岩体的等效参数随尺寸而变化,当随尺度增大到某一值时岩体各参数趋于稳定<sup>[14]</sup>,此临界值即岩体REV(Representative Element Volume)尺度。

算例取初始研究域为全局域60 m×60 m×60 m的 $1/\sqrt{3}$ ,再从初始研究域1/10大小的单元体开始,将放大过程分10次,对包含在域 $V_i$ 中的DFN模型计算等效渗透系数,直到测区X轴、Y轴、Z轴的正向(分别对应地理的正东、正北、上下)三个方向上的变化都趋于稳定即认为得到了该测区的REV。随单元体尺度增大的3个方向上等效渗透系数变化如图4所示,得到REV尺寸约为34 m。

将此REV尺寸作为当前研究域可计算该单元

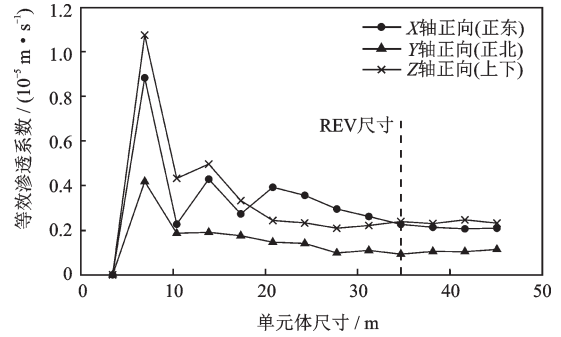


图4 随单元体增大的三个方向上的等效渗透系数  
Fig.4 Variations of the equivalent permeability coefficients in three directions as the size of element increases

体内渗流裂隙网络的水头分布及流量大小。将水力梯度和流量代入下式即可确定测区内考虑尺寸效应后岩体的真实等效渗透张量参数<sup>[15]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= -k_x \frac{\partial H}{\partial x} S_{yz} - k_{xy} \frac{\partial H}{\partial y} S_{yz} - k_{xz} \frac{\partial H}{\partial z} S_{yz} \\ Q_y &= -k_{yx} \frac{\partial H}{\partial x} S_{xz} - k_y \frac{\partial H}{\partial y} S_{xz} - k_{yz} \frac{\partial H}{\partial z} S_{xz} \\ Q_z &= -k_{zx} \frac{\partial H}{\partial x} S_{xy} - k_{zy} \frac{\partial H}{\partial y} S_{xy} - k_z \frac{\partial H}{\partial z} S_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中,边界流量 $Q_i(i=x,y,z)$ 为对应边界上所有节点的流量之和; $\partial H/\partial i$ 为 $i(i=x,y,z)$ 方向上的水力梯度; $S$ 为单元体对应的边界面积(如 $S_{yz}$ 表示与坐标面 $yOz$ 平行的边界面积)。通常程序计算所得 $x=0$ 与 $x=1$ 两平行边界面的流量大小 $Q_{x1}$ 和 $Q_{x2}$ 不一定完全相等(取决于迭代的预设精度),此时可取两者的平均值作为 $Q_x$ <sup>[15]</sup>。当采用如图3所示的边界条件,此时的方向渗透系数可由式(8)简化而来:

$$k_{xx} = -\frac{(Q_{x1} + Q_{x2})L_x}{2(H_2 - H_1)S_{yz}} \quad (9)$$

在本算例的计算过程中,保持边界条件大小不变并改变边界条件的方向即可求得各方向上的等效渗透系数。计算等效渗透张量 $K$ 的步骤如图5中的流程步骤。基于甘肃北山岌岌槽的现场实测数据,在60 m×60 m×60 m的立方体模型中截取REV边长约34 m的研究域,对内部的渗流网络模型取共计102个方向上的等效渗透系数进行计算(见图6,不规则体上任一点到原点的距离大小表示这一方向渗透系数数值;灰度越高表示该方向上的渗透性越小)。最终对这些数据进行拟合,得到该测区裂隙岩体的等效渗透张量 $K$ (式(10)),解特征值后得相应的渗透主值及主方向<sup>[3]</sup>(见表3)。该算例的仿真结果表明此测区裂隙岩体的渗透性大致

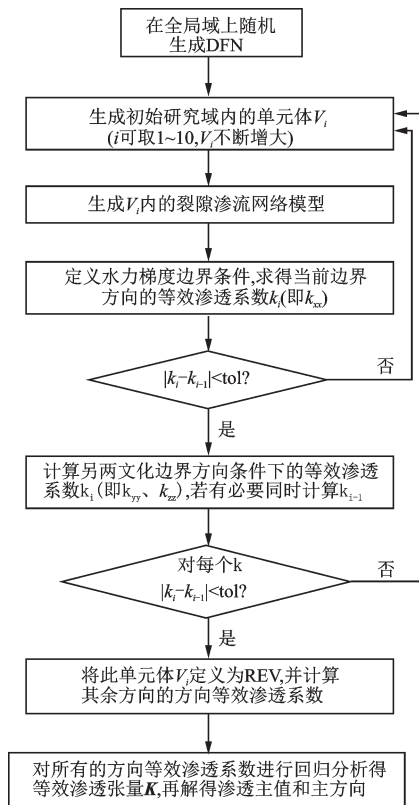


图5 等效渗透张量计算流程

Fig.5 Brief flowchart of calculating the equivalent permeability tensor

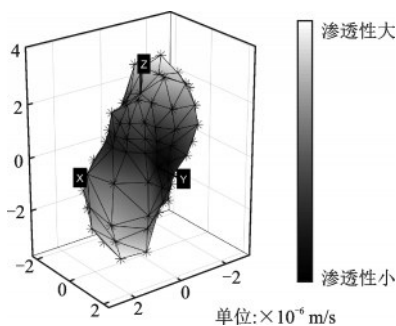


图6 102个方向的等效渗透系数变化

Fig.6 Equivalent permeability coefficients in 102 directions

表3 测区裂隙岩体渗透主值及相应主方向

Table 3 Principle values and directions of fractured rock in the survey area

主方向	渗透主值/( $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	倾向/( $^{\circ}$ )	与z轴夹角/( $^{\circ}$ )
$K_1$	0.770	159.8	87.1
$K_2$	1.671	67.3	49.8
$K_3$	3.222	253.2	40.3

为竖直方向,水平方向上的渗透性相对较小,这与实际规律相同,且仿真结果中的方向等效渗透系数取值范围均在  $4e^{-6} \sim 9e^{-7} \text{ m/s}$  之间,基本符合要求。

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} 2.16 & 0.47 & -0.75 \\ 0.47 & 0.93 & -0.18 \\ -0.75 & -0.18 & 2.57 \end{pmatrix} \times 10^{-6} \quad (10)$$

## 4 结论

(1)基于 MATLAB 编译了三维的离散裂隙网络管单元模型渗流分析软件,给出了关键部分的代码编译思路。软件可根据现场数据生成 DFN 模型,并简化为变截面管单元渗流网络,模型简化后提高了大尺寸 DFN 模型计算效率。该程序可在后续应用于隧道及地下实验室开挖时涌水量、突涌水高发带的预测,为减少工程事故提供计算依据。

(2)考虑了岩体渗透的特性——表征体积单元 REV。在全局域内先确定最大研究域,在此基础上划分 10 次计算,通过观察三个方向上的等效渗透系数变化趋势发现该测区的 REV 在 34 m 左右。同时在切割研究域时以截接管单元代替以往切割裂隙面的情况,能消除边缘效应的影响。还应用改进 Dijkstra 算法进行最优路径识别以找到渗流耗时最短的路径,后续经一定处理后能够预测岩体的优势裂隙走向,避免开挖过程中出现预防不及时产生的突涌水及携带核素渗出等灾难。

(3)算例应用甘肃北山岌岌槽一测区的现场数据,建立 DFN 模型进行渗流分析得到 REV 尺寸及 102 个方向等效渗透系数,计算结果大致分布在  $4e^{-6} \sim 9e^{-7} \text{ m/s}$  之间。对这些渗透系数拟合得到该区域的等效渗透张量,结果表明测区接近竖直方向时的渗透性相比水平方向更具优势,基本符合工程实际。

## 参考文献:

- [1] Alghalandis Y F. Adfne: open source software for discrete fracture network engineering, two and three dimensional applications[J]. Computers & Geosciences, 2017, 102:1-11.
- [2] Karimzade E, Sharifzadeh M, Zarei H R, et al. Prediction of water inflow into underground excavations in fractured rocks using a 3D discrete fracture network (DFN) model [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(9):206.
- [3] 纪成亮, 李晓昭, 王 驹, 等. 裂隙岩体渗透系数确定方法研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2):235-240. Ji Ch L, Li X Zh, Wang J, et al. Discrete fracture net-

- work model for hydraulic conductivity of fractured rock mass [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(2):235-240. (in Chinese)
- [4] 罗爽, 宋二祥. 热储岩层单条裂隙换热概念模型的解及相关讨论[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(4): 627-635.
- Luo Sh, Song E X. Semi-analytic solutions to thermal exchange conceptual models for a single fracture in a geothermal reservoir and related discussions[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(4):627-635. (in Chinese)
- [5] 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 X Ch, Xu W Y. 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)
- [6] Zhang Q H. Finite element generation of arbitrary 3-D fracture networks for flow analysis in complicated discrete fracture networks [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529:890-908.
- [7] 王俊奇, 岳潇, 李闯. 三维裂隙网络管单元模型确定岩体渗透张量[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(1):104-110.
- Wang J Q, Yue X, Li Ch. Three-dimensional pipe element model in fractured rock mass for determining seepage tensor[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2015, 42(1):104-110. (in Chinese)
- [8] Xu C, Dowd P. A new computer code for discrete fracture network modelling[J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(3):292-301.
- [9] Vermilye J M, Scholz C H. Relation between vein length and aperture[J]. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17(3):423-434.
- [10] Klimczak C, Schultz R A, Parashar R, et al. Cubic law with aperture-length correlation: implications for network scale fluid flow[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(4):851-862.
- [11] Liu R, Li B, Jiang Y. A fractal model based on a new governing equation of fluid flow in fractures for characterizing hydraulic properties of rock fracture networks [J]. *Computers & Geotechnics*, 2016, 75:57-68.
- [12] Priest S D. *Discontinuity analysis for rock engineering* [M]. London: Chapman & Hall, 1993.
- [13] 李海枫, 张国新, 朱银邦. 裂隙岩体三维渗流网络搜索及稳定渗流场分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2):3 447-3 454.
- Li H F, Zhang G X, Zhu Y B. Three-dimensional seepage network searching of fractured rock mass and steady seepage field analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2) : 3 447-3 454. (in Chinese)
- [14] 狄圣杰, 汪明元, 邓南沙, 等. 土石混合体REV尺度数值方法研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32(5): 523-527.
- Di Sh J, Wang M Y, Deng N Sh, et al. Numerical simulation study on rev's measure of soil-rock mixture[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(5):523-527. (in Chinese)
- [15] Chen S H, Feng X M, Isam S. Numerical estimation of REV and permeability tensor for fractured rock masses by composite element method[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 32(12):1 459-1 477.

(本文责编:赵霞)