裂隙岩体渗透系数的密集切面计算方法

韦娟华[1a]，付豪[1b]，唐朝晖[1c]，张腾飞[2]，柴波[1b*]

1. 中国地质大学（武汉）a. 地质调查研究院；b. 环境学院；c. 工程学院，武汉 430074；
2. 长庆油田技术监测中心，西安 710018

第一作者，E-mail：1556607473@qq.com

* 通信作者，E-mail：chaibo@cug.edu.cn

2023-12-08 收稿；2024-04-06 修回；2024-05-06 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42172318; 42177159)

中图分类号：TU45　　文章编号：2096-8523(2025)05-0191-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230680

摘　要：裂隙岩体渗流具有非均匀性和各向异性，其复杂性体现在单裂隙的密度、产状和迹长等参数上以及裂隙网络的连通性上，而裂隙网络的连通性是三维裂隙岩体渗流参数计算的一个难题。目前三维裂隙岩体渗流参数的计算方法因其模型假设的不同而各有优缺点。为分析裂隙岩体水力各向异性及其渗透系数，基于降维思路，提出了三维裂隙岩体密集切面求解渗透系数的新方法。该方法在三维裂隙网络模拟的基础上，通过不同方向密集切面逼近裂隙岩体，将三维裂隙网络分解成多个连续的二维切面裂隙网络，对切面裂隙网络使用图论法分析裂隙水力的连通性和渗透路径，设置水头边界条件计算渗透系数，通过空间上线、面、体的关系，将二维空间上的渗透系数计算结果表达三维空间上的方向性，构建三维裂隙岩体网络的渗透张量。将切面渗透系数视为渗透椭圆计算切面渗透系数，给出了一种新的岩体渗透张量的求解公式。同时讨论了尺度效应和裂隙岩体渗透各向异性的表征方式，通过构建三维和二维裂隙网络，截取不同大小的单元体计算渗透系数，得出典型单元体的边长为 20 m，并通过野外现场钻孔压水实验验证了方法的可行性。研究成果可以为求解不同尺度、非均质裂隙岩体各方向渗透系数提供参考。

关键词：三维裂隙网络；降维；多切面；渗透系数；裂隙岩体

在土木水利和资源环境领域，岩体结构及其水力性质的研究极其重要。裂隙岩体是由岩石块体和结构面(裂隙)组成的复杂结构体，其水力性质具有非均匀性和复杂性特征。裂隙是地下水储存和运移的主要通道，裂隙粗糙度、张开度和充填物等对单裂隙渗透系数影响大[1-2]，表征几何隙宽和水力隙宽的关系是单裂隙渗流量化分析的重要内容[3-4]。除单裂隙渗流外，裂隙岩体渗流与裂隙连通性关系密切[5-7]，并表现出显著的水力各向异性。裂隙连通性与裂隙密度、迹长和产状有关[8]，上述参数具有随机分布性，其结构性可通过随机模拟等方法定量呈现[9-10]，但复杂裂隙网络内流动路径模拟和裂隙岩体水力学参数分析仍然是科学难题。

目前，裂隙岩体渗流模型主要有裂隙-孔隙双重介质模型和非双重介质模型 2 种[11-12]。裂隙-孔隙双重介质模型[13-14]考虑孔隙岩块和导水裂隙 2 类介质，该模型认为裂隙岩体是由导水性强的裂隙系统和导水性弱的岩块孔隙系统共同构成的统一体，孔隙和裂隙之间存在水量交换。非双重介质模型忽略岩块的透水性，仅考虑裂隙内水流，可进一步分为等效连续介质模型和离散介质模型。等效连续介质模型[15-17]将裂隙岩体看作是无间隙的连续介质，适合于尺寸足够大、裂隙网络均匀的裂隙岩体，通过表征单元体将裂隙岩体等效为孔隙介质。离散介质模

著录信息：韦娟华, 付豪, 唐朝晖, 等. 裂隙岩体渗透系数的密集切面计算方法 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(5): 191-201.
WEI Juanhua, FU Hao, TANG Zhaohui, et al. Calculation method for the permeability coefficient of a fractured rock mass based on dense sections[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 191-201.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

型[18-20]将岩体视为沿随机裂隙渗流的介质，通过蒙特卡洛法等模拟岩体中的裂隙，基于立方定律计算裂隙内部渗流，采用线素法[21]和图论法分析裂隙网络渗流[22]。渗透张量用于表征裂隙岩体渗流各向异性[23]，其计算方法有基于液体耗散能量叠加原理的方法[24]、基于斯诺模型半解析方法[25]以及基于裂隙几何分布和任意方向渗透率值的解析方法[26]等。

离散介质模型裂隙系统连通关系复杂，常通过管道流表征裂隙之间的连通关系，将裂隙间水力连通关系简化为裂隙圆盘圆心与相交圆盘交线中点相连形成的管网[27-28]。管道内水流方向取决于其两端水头差，根据节点处流量平衡方程计算管段的传导系数[29]，通过单参数模型和多参数模型计算岩体渗透张量[30]。将裂隙水流视为管道流简化了计算，但当单个裂隙与多组不同方位裂隙形成复杂连通关系时，管道会存在复杂节点。此外，裂隙圆盘间虽然连通，但实际过水断面取决于圆盘形态和圆盘间交叉关系，简化后的管道则很难表征这一复杂关系。为此，本研究基于降维的思路，提出了以裂隙岩体密集切面分析岩体渗透张量的新方法，将该方法计算结果与裂隙岩体现场压水实验结果进行对比，以验证该方法的可靠性。

1　裂隙岩体渗透系数的密集切面求解法

裂隙岩体渗透系数与其连通性有关[31-32]，通过切面可以直观分析沿特定方向裂隙的连通性，将密集切面组合则可以表征该方向岩体的综合连通性。以密集切面法求解岩体渗透系数和分析水力各向异性的流程见图 1。在岩体裂隙现场测量（地面实测、钻孔摄像等）和几何参数分析统计[33]的基础上，通过蒙特卡洛法模拟岩体裂隙网络。选取切面方向，按照一定间距截取该方向的密集切面。在切面内去除无水力连通的裂隙，绘制裂隙连通图，运用图论法分析各切面的渗透路径和渗透系数，综合密集切面表征切面方向岩体的渗透系数。按照上述过程求取不同方向切面的渗透系数，确定渗透张量，绘制三维水头等值线切面图，表征岩体水力各向异性。

1.1　岩体裂隙网络及切面

根据裂隙几何参数测量统计结果，将裂隙假设为具有一定开度的圆盘，通过蒙特卡洛法[34]生成岩体三维裂隙网络（图 2）。以 x、y、z 正交方向作切面，通过 3 个正交方向密集切面能够表征裂隙连通性的空间差异，当切面密度足够大时，则切面组合后能够逼近三维裂隙网络。通过 MATLAB 编程完成三维裂隙网络和密集切面的绘制。

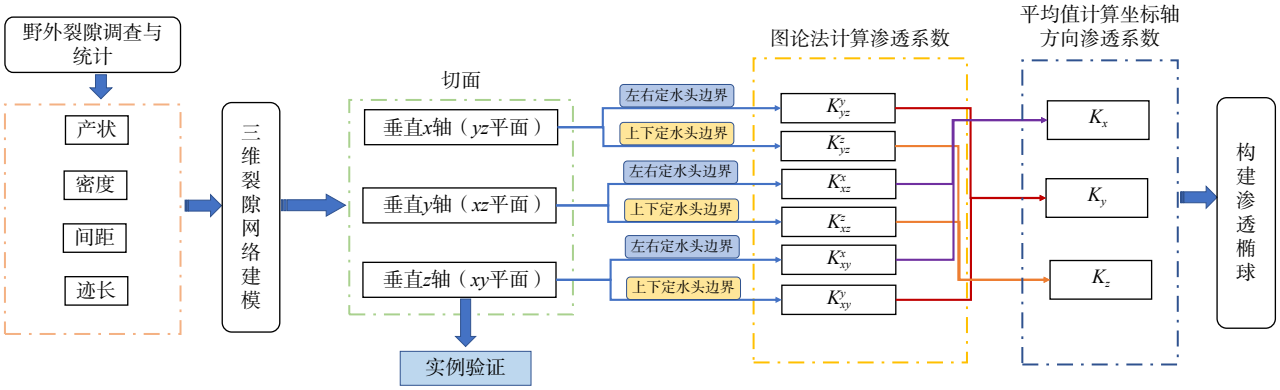
1.2　裂隙渗流路径图论

岩体中裂隙网络与渗流网络并不相等[35-36]，渗流网络由具有导水特性且处于裂隙网络连通位置上的裂隙组合而成（图 3）。在计算裂隙岩体内渗流时，首先去除孤立、无连通的裂隙，得到裂隙网络的渗流连通路径，并通过图论法求解渗流路径[37]。

图论模型以点表达裂隙端点和交点的对象信息，以线表达对象之间的联系，将点和连线用矩阵表示为：

$$\boldsymbol{G}=(\boldsymbol{V},\boldsymbol{E}), \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{G}$ 为一个满足 $\boldsymbol{E}\subseteq[\boldsymbol{V}]$ 平方的二元组；$\boldsymbol{V}$ 为 n 维向量，记录节点的信息；$\boldsymbol{E}$ 为 $n\times n$ 的邻接矩阵，表示节点之间的连接关系，若节点之间相互连接则对应行列的元素为 ±1（在水流分析中正负用于区分水流方向），不连通时为 0。



K_{yz}^{y}. yz 平面的切面上沿 y 轴方向的渗透系数；K_{yz}^{z}. yz 平面的切面上沿 z 轴方向的渗透系数；K_{xz}^{x}. xz 平面的切面上沿 x 轴方向的渗透系数；K_{xz}^{z}. xz 平面的切面上沿 z 轴方向的渗透系数；K_{xy}^{x}. xy 平面的切面上沿 x 轴方向的渗透系数；K_{xy}^{y}. xy 平面的切面上沿 y 轴方向的渗透系数；K_x. 三维坐标轴上沿 x 轴方向的渗透系数；K_y. 三维坐标轴上沿 y 轴方向的渗透系数；K_z. 三维坐标轴上沿 z 轴方向的渗透系数；下同

图 1　切面法求解裂隙岩体渗透系数流程图

Fig. 1　Flowchart for determining the permeability coefficient of a fractured rock mass via the section method

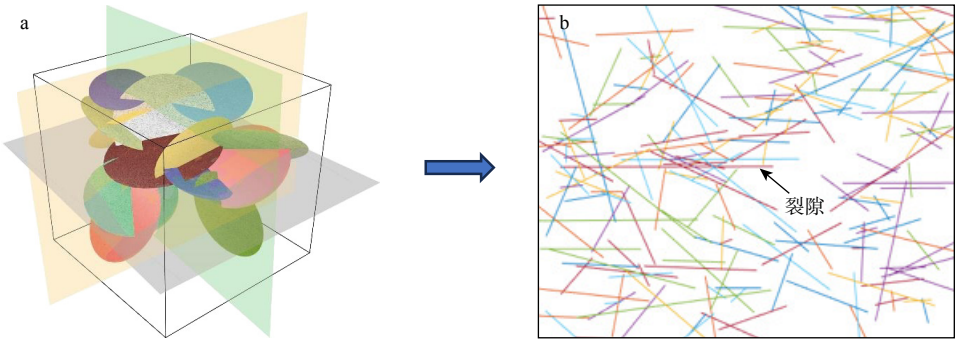


图 2　三维离散裂隙网络 (a) 切分成二维离散裂隙 (b) 过程

Fig. 2　Process diagram for segmenting a three-dimensional discrete fracture network (a) into two-dimensional fractures (b)

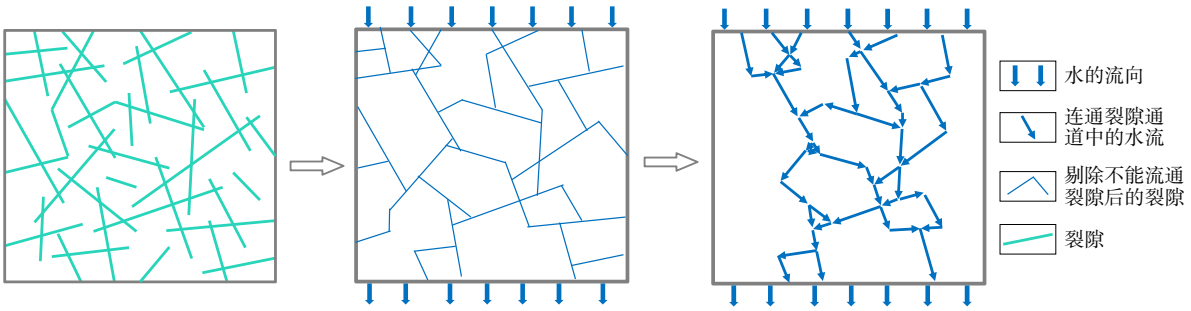


图 3　裂隙网络与渗流网络示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the fracture network and seepage network

根据立方定律，平行板间稳定流表达式为：

$$q=\frac{\rho g}{12\mu}e^3J, \tag{2}$$

式中：q 为平行板内单位宽度流量，m^2/s；ρ 为流体密度，kg/m^3；μ 为流体的动力黏滞系数，取 0.897×10^{-6} m^2/s；e 为平行板壁面间距离，即裂隙水力宽度，m；J 为水力梯度。

裂隙导水系数 T_f 可表示为：

$$T_f=\frac{\rho g}{12\mu}e^3。 \tag{3}$$

假设节点 i 和 j 间水头差为 ΔH_{ij}，节点连接距离为 l_{ij}，则节点间单位宽度流量 q_{ij} 为：

$$q_{ij}=T_f\frac{\Delta H_{ij}}{l_{ij}}=\frac{T_f}{l_{ij}}\Delta H_{ij}=C_{ij}\Delta H_{ij}, \tag{4}$$

式中：C_{ij} 为节点 i 和 j 间水力传导率，m/s。

在裂隙网络中，水流由一个节点流入下一个节点，流入节点和流出节点的水量相同，假设与节点 i 连通的节点数量为 m，编号 $j=1,2,\ldots,m$，则：

$$q_i=\sum_{j=1}^{m}C_{ij}\Delta H_{ij}, \tag{5}$$

$$H_i=\frac{\sum_{j=1}^{m}C_{ij}H_j}{\sum_{j=1}^{m}C_{ij}}, \tag{6}$$

式中：q_i 为节点 i 处的单位宽度流量，m^2/s；H_i 为节点 i 处的水头，m；H_j 为节点 j 处的水头。

裂隙岩体边界处节点为定水头，根据公式(6)求解内部节点的水头，节点间连接线水流总是从高水头流向低水头。当节点 i 在不同渗流场中既是水流入点也是水流出点，且以 i 为闭环的流通通道中流入量等于流出量时，可以看作该通道内水为“死水”，即该通道内各个节点的水头相等，剔除此类节点的裂隙网络是岩体渗流路径。

1.3　裂隙岩体渗透系数

1.3.1　切面渗透系数

设置水头和流量边界条件，使用图论法计算裂隙各节点的水头，通过公式(5)与边界处相交的裂隙单位宽度流量，将所有与边界相交的裂隙单位宽度流量乘以宽度后相加则可以得到该方向岩体的流量，改变边界处水头差，绘制流量和水头差的梯度曲线可以求解该方向的渗透系数。渗透系数可以通过如下公式求解：

$$K=\frac{V}{J}=\frac{q/(L\times1)}{(H_1-H_2)/L}=\frac{q}{\Delta H}, \tag{7}$$

式中：K 表示梯度方向渗透系数，m/s；V 为切面流速，m/s；H_1 为上边界水头；H_2 为下边界水头；L 为上边界与下边界之间的距离，m；ΔH 为水头差，m。

边界条件的设置参照前人研究成果[38]，以平行

xy 轴的切面为例，将平行 y 轴方向边界设为定水头边界，平行 x 轴边界设为定流量边界时，可求出 xy 平面的切面上沿 y 轴方向的渗透系数 K_{xy}^{y}；同理，改变切面水力边界设定，可求得 xy 平面的切面上沿 x 轴方向的渗透系数 K_{xy}^{x}。将切面不同方向的渗透张量视为椭圆，将沿 x 轴和 y 轴的渗透系数视为椭圆的长短轴，以渗透系数椭圆面积的原则求解 xy 平面的切面上渗透系数 $K(xy)$（图 4），即：

$$K(xy)=\sqrt{K_{xy}^{x}K_{xy}^{y}}。\tag{8}$$

同理可得 yz、xz 平面的切面上渗透系数 $K(yz)$ 和 $K(xz)$ 分别为：

$$K(yz)=\sqrt{K_{yz}^{y}K_{yz}^{z}},\tag{9}$$

$$K(xz)=\sqrt{K_{xz}^{x}K_{xz}^{z}}。\tag{10}$$

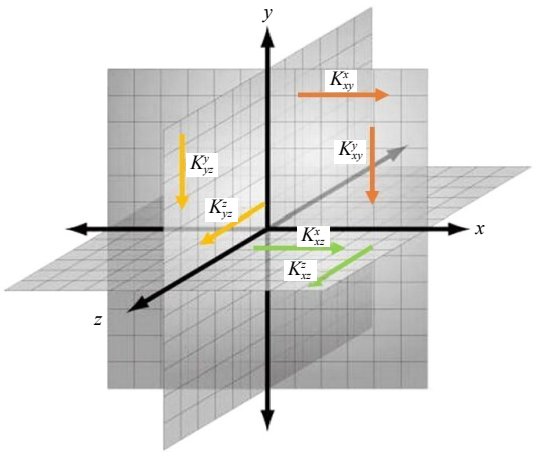


图 4　不同切面方向的渗透分量

Fig. 4　Permeability components in different sectional directions

1.3.2　裂隙岩体渗透系数

对于三维裂隙岩体，求解沿某一方向矢量的岩体渗透系数时，可根据过该方向矢量密集切面的渗透系数均值来求解。本研究通过密集切面逼近岩体的裂隙网络及其连通性，可通过计算 2 个正交密集切面系的平均渗透系数来求解渗透系数方向矢量。例如：求解沿 x 轴方向的渗透系数，需分别做平面 xz 和平面 xy 2 套密集切面，并求解沿 x 轴方向的渗透系数 K_{xz}^{x} 和 K_{xy}^{x}，二者的平均值来表征沿 x 轴方向的渗透系数 K_{xx}，同理，可求解其他轴向的渗透系数：

$$K_{xx}=\frac{K_{xz}^{x}+K_{xy}^{x}}{2},\tag{11}$$

$$K_{yy}=\frac{K_{yz}^{y}+K_{xy}^{y}}{2},\tag{12}$$

$$K_{zz}=\frac{K_{yz}^{z}+K_{xz}^{z}}{2},\tag{13}$$

$$K_{xy}=K_{yx}=\sqrt{K_{x}^{2}+K_{y}^{2}},\ xy\text{平面},\tag{14}$$

$$K_{xz}=K_{zx}=\sqrt{K_{x}^{2}+K_{z}^{2}},\ xz\text{平面},\tag{15}$$

$$K_{yz}=K_{zy}=\sqrt{K_{y}^{2}+K_{z}^{2}},\ yz\text{平面},\tag{16}$$

式中：K_{yy} 为沿 y 轴方向的渗透系数；k_{zz} 为沿 z 轴方向的渗透系数；K_{xy}，K_{yx} 均为 xy 平面上对角线方向的渗透系数；K_{xz}，K_{zx} 均为 xz 平面上对角线方向的渗透系数；K_{yz}，K_{zy} 均为 yz 平面上对角线方向的渗透系数；K_{x} 为三维坐标轴上沿 x 轴方向的渗透系数；K_{y} 为三维坐标轴上沿 y 轴方向的渗透系数；K_{z} 为三维坐标轴上沿 z 轴方向的渗透系数。

此时，三维裂隙岩体网络的渗透系数张量为：

$$\boldsymbol{K}=\begin{pmatrix}K_{xx}&K_{xy}&K_{xz}\\K_{yx}&K_{yy}&K_{yz}\\K_{xz}&K_{yz}&K_{zz}\end{pmatrix}。\tag{17}$$

2　计算实例和方法验证

以烟台某地下水封硐库为例，在岩体裂隙现场调查、钻孔摄影和钻孔压水实验的基础上，选取典型钻孔测试数据，应用本研究所提出的计算方法计算岩体不同深度的渗透系数，并将计算结果与钻孔压水实验确定岩体渗透系数进行对比，以验证切面法的合理性。裂隙几何参数确定方法：裂隙组数、产状、间距可通过 JL-IDOI2009 图像解译软件对裂隙钻孔成相图像进行解译确定[39]；裂隙迹长以地面实测确定；隙宽统一设为 0.000 1 m，隙宽直接作用的参数是导水系数。

钻孔 ZK01 的裂隙主要为南北走向，倾向向东或向西，平均倾角为 41° ~ 44°，服从正态分布，间距服从对数正态分布，迹长服从负指数分布。钻孔 ZK02 的裂隙相对分散，以陡倾角为主，可分为 4 组优势节理，产状服从正态分布，间距服从对数正态分布，迹长服从负指数分布（表 1 和图 5）。

根据钻孔确定结构面的几何参数建立 30 m×30 m×30 m 的三维裂隙网络模型（以 ZK02 模型为例，图 6）。从中截取出 20 m×20 m×20 m 的立方体，使用垂直于 z 轴的平面与裂隙网络相切，从 z=−10 m 到 z=10 m 所在平面每隔 0.5 m 分别与裂隙网络相切，得出切面裂隙网络。

ZK02 钻孔模型中的 z=0 m 切面为例，裂隙渗流网络如图 7。根据上述公式（10）求出各个切面的综合渗透系数。

将二维剖面切片法得出的渗透系数与压水实验

表 1　裂隙统计特征及数值模拟基本参数

Table 1　Basic parameters for fracture statistics and numerical simulation

钻孔	裂隙组	倾向/(°)	标准差	倾角/(°)	标准差	密度/(条·m^{-3})	迹长/m
ZK01	1	91	10.83	44	16.14	0.17	4.6
	2	257	9.10	43	16.46	0.12	5.8
	3	290	6.28	41	17.09	0.09	6.7
ZK02	1	231	12.19	63	15.98	0.17	4.7
	2	75	15.83	78	17.64	0.15	4.1
	3	312	12.52	62	13.18	0.12	6.4
	4	2	1.2	64	12.79	0.06	4.6
	5	170	6.12	87	13.12	0.06	5.9

渗透系数结果对比如图 8 所示，整体上，切面法也可表示出与压水实验结果相同的规律，即渗透系数在不同深度下的变化趋势。选取相同深度的压水实验与切面法渗透系数相对比，其绝对误差和相对误差如表 2 所示，可知在 ZK01 的 19 个数据中，有 10 个相对误差在 100% 以内，其中相对误差最小的为 8.84%；在 ZK02 的 13 个数据中，有 6 个数据的相对误差在 100% 以内，其中，有 3 个相对误差小于 10%，最小的为 1.22%。故由此可知，切面法计算渗透系数在准确度上仍有待提高，因为其方法没有考虑到裂隙的粗糙度、起伏度等情况，但仍可为计算三维裂隙网络渗透系数提供了一种新方法。

3　讨　论

3.1　尺寸效应对渗透系数大小的影响

在对裂隙网络模型的研究中，尺寸效应不可忽视，找到一个合适的典型单元体尺寸模型尤为重要[40]。为了分析裂隙水力参数的尺度效应，从 ZK01 模型截取边长为 12, 16, 20, 24, 28 m 5 个不同尺寸的立方体，使用垂直于 z 轴的切面分析渗透系数。通过不同尺寸的模型求解实例钻孔 28 ~ 218 m 区间的渗透系数，分析结果见图 9a。将图形进行平滑处理，得到图 9b 的图形。从图 9b 中可以看出，渗透系数随着单元体体积增加而趋于稳定。当单元体边长小于 20 m 时，渗透系数的变化幅度很大。本研究以 20 m 为立方单元体的边长值较为合理，也可将该尺寸作为等效介质模型的典型单元体尺寸。

除此之外，建立 30 m×30 m 的二维裂隙网络模型，在二维平面上分析尺度效应对渗透系数的影响。从中截取 5 m×5 m、10 m×10 m、15 m×15 m、20 m×20 m、25 m×25 m、30 m×30 m 不同尺度下的裂隙区域(图 10)，计算其渗透系数。得到的裂隙网络渗透系数如图 11 所示，可知模型尺寸越大，渗透系数越小，当尺寸边长达到 20 m 后，渗透系数趋于一个稳定值；同时在二维(切面)裂隙网络模型中，20 m 边长

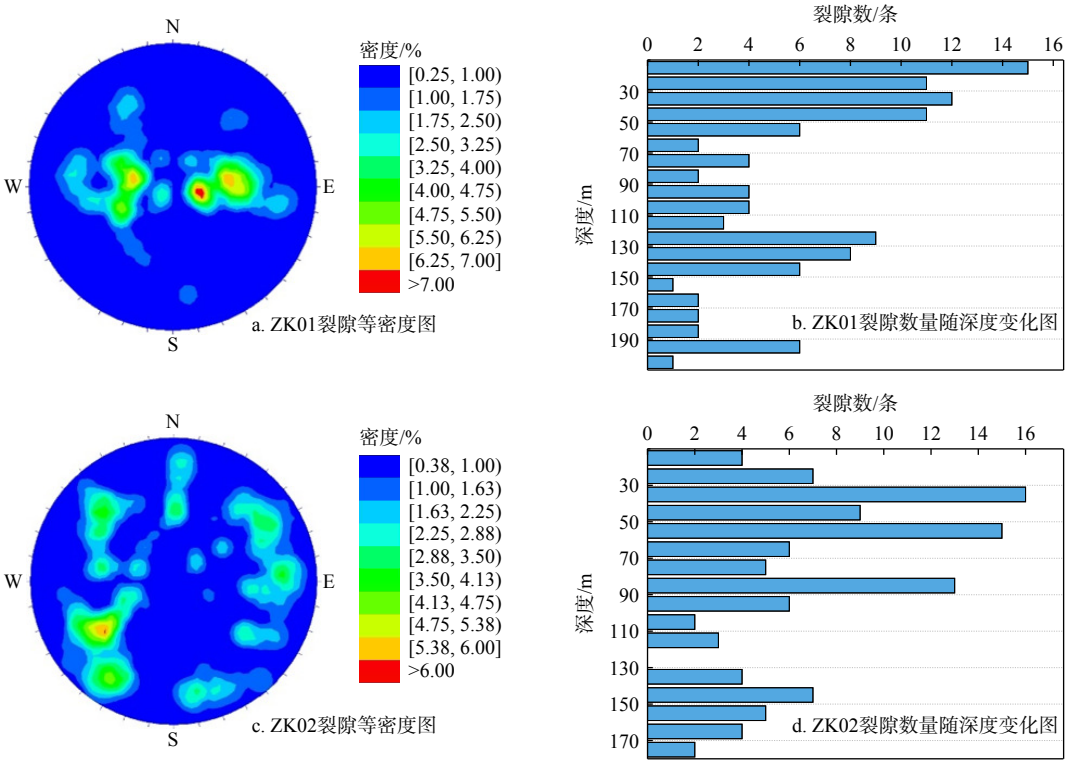


图 5　裂隙参数统计图

Fig. 5　Statistical chart of fracture parameters

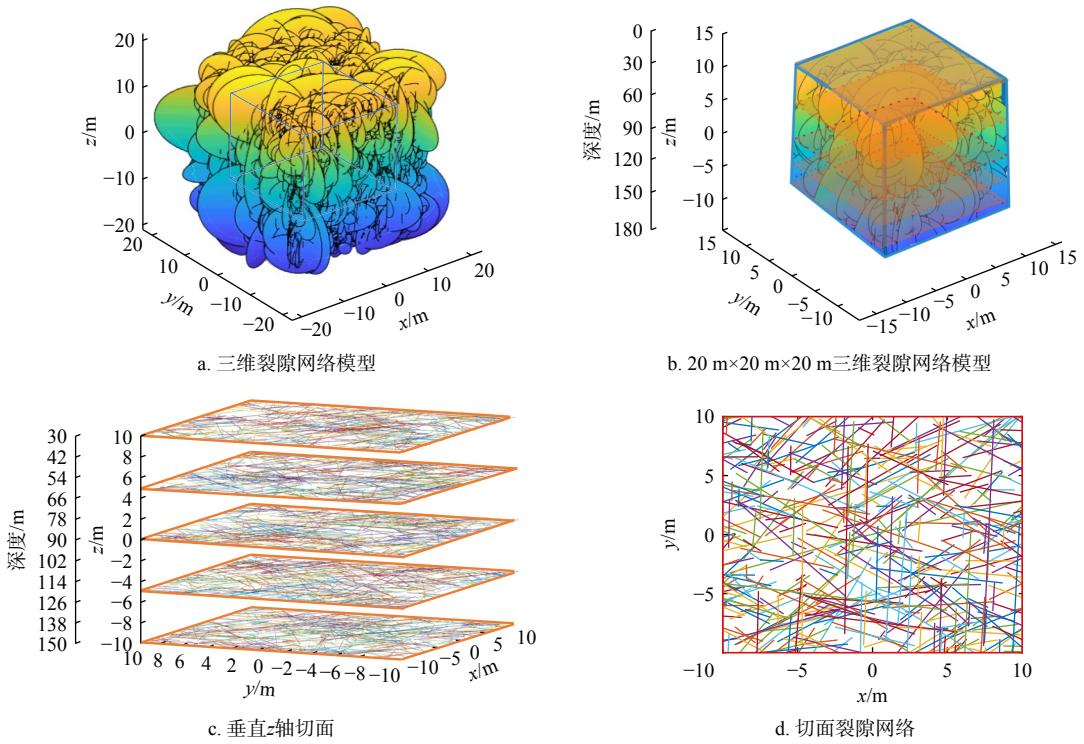


图 6　裂隙网络降维切面图

Fig. 6　Section diagram of fracture network by dimensionality reduction

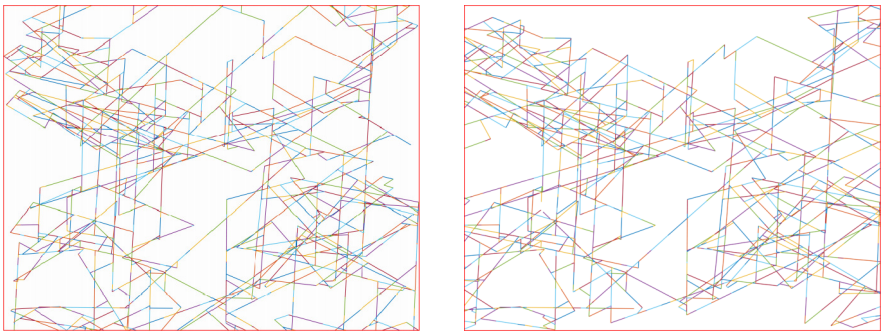


图 7　裂隙渗流网络

Fig. 7　Fracture seepage network

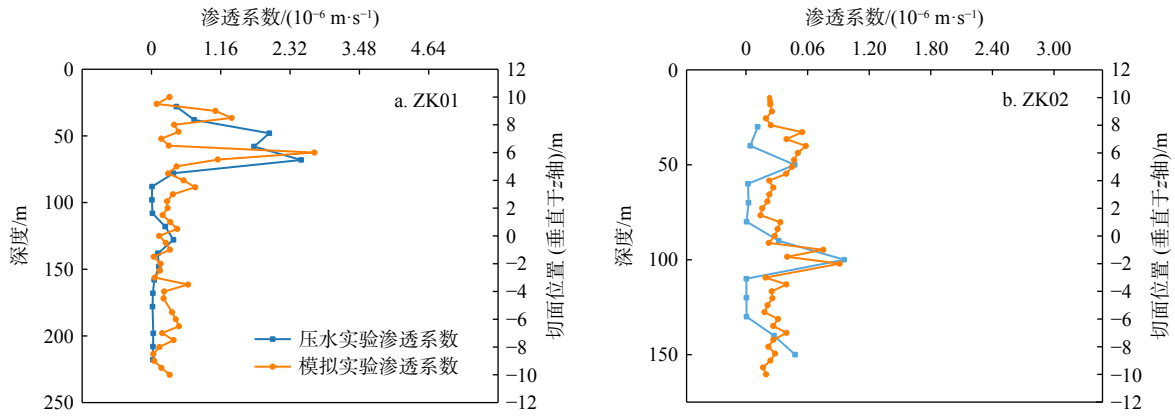


图 8　模拟实验与压水实验渗透系数对比

Fig. 8　Comparison of the permeability coefficients between the simulation experiments and water pressure tests

表 2　数据结果分析

Table 2　Analysis of the data results

ZK01	ZK02	ZK01	ZK02
绝对误差		相对误差/%	
0.000 99	0.000 693	27.58	70.21
0.003 05	0.003 058	49.43	844.75
0.013 72	0.000 05	80.71	1.22
0.013 37	0.001 783	90.34	1 007.34
0.001 91	0.001 587	8.84	745.07
0.000 43	0.002 838	13.44	5 415.27
0.004 538	0.000 84	4 905.41	30.43
0.003 01	0.000 37	3 781.91	4.48
0.002 201	0.002 139	1 583.45	6 991.50
0.000 72	0.001 519	36.18	3 714.18
0.002 07	0.003 366	65.09	7 597.52
0.001 738	0.000 09	186.48	3.81
0.000 15	0.002 44	14.02	59.08
0.004 887		1 212.66	
0.001 545		753.66	
0.003 349		2 080.12	
0.000 879		336.78	
0.000 18		79.34	
0.002 415		1 123.26	

的尺寸模型可作为典型单元体尺寸模型，这与在三维空间裂隙网络模型中的讨论结果一致。

3.2　切面法对渗流各向异性的表征

以 ZK01 为例，以垂直于 x、y、z 坐标轴进行切面，间距为 0.5 m，各轴可获取 41 个切面。各轴切面所在平面分别为 yz 平面、xz 平面、xy 平面。在切面中设置左右渗流和上下渗流 2 种边界条件，根据图论理论计算出裂隙各节点的水头值，当水流方向为 x 轴方向时，水头场分布如图 12a 所示；当水流方向为 y 轴方向时，水头场分布情况如图 12b 所示；当水流方向为 z 轴方向时，水头场分布情况如图 12c 所示。从图 12 中可以看出，当水流方向为 z 轴方向时，裂隙岩体的渗透能力最强。

计算每个切面垂直和水平方向的出口流量以及渗透系数，得 yz 平面上的 K_{yz}^{y} 为 9.17×10^{-5} m/s，K_{yz}^{z} 为 14.2×10^{-5} m/s，xz 平面上的 K_{xz}^{x} 为 2.40×10^{-5} m/s，K_{xz}^{z} 为 0.340×10^{-5} m/s，xy 平面上的 K_{xy}^{x} 为 3.50×10^{-5} m/s，K_{xy}^{y} 为 0.529×10^{-5} m/s。yz、xz、xy 平面的渗透系数椭圆如图 13 所示。

综合各个方向的渗透系数，根据公式(11)～(17)，得出渗透系数张量如下：

$$\boldsymbol{K}=\begin{pmatrix}2.95 & 3.54 & 2.42\\ 3.54 & 4.85 & 16.9\\ 2.42 & 16.9 & 7.27\end{pmatrix}\times10^{-5}(\mathrm{m/s})$$

将矩阵进行正交化，得到 $\boldsymbol{K}=\begin{pmatrix}-10.949\,6 & 0 & 0\\ 0 & 2.177\,6 & 0\\ 0 & 0 & 23.842\,0\end{pmatrix}\times10^{-5}$ m/s，即 3 个渗透系数主值分别为 $-10.949\,6\times10^{-5}$，$2.177\,6\times10^{-5}$，$23.842\,0\times10^{-5}$ m/s，对应的特征向量为 $n_1=(-0.070\,2,\ 0.736\,0,\ -0.673\,4)$、$n_2=(0.978\,0,\ -0.082\,2,\ -0.191\,9)$、$n_3=(0.196\,6,\ 0.672\,0,\ 0.174\,0)$，即渗透主方向。

4　结　语

密集切面法求解三维裂隙网络水力连通性和渗透系数简单直观，能够较好地反映岩体水力各向异性。通过蒙特卡洛法建立三维裂隙网络模型，构建裂隙圆盘方程和切面方程的数学表达式，计算出裂隙在切面上的表现形式，将三维裂隙网络分解成了多个连续的二维裂隙网络。切面降维法解决了三维空间上裂隙交错关系难以描述分析的难题，能够使用二维空间上的计算结果表达三维空间上的方向性。通过现场压水实验验证了降维密集切面法计算模型的可靠性，可以用于求解不同尺度、非均质裂隙岩体

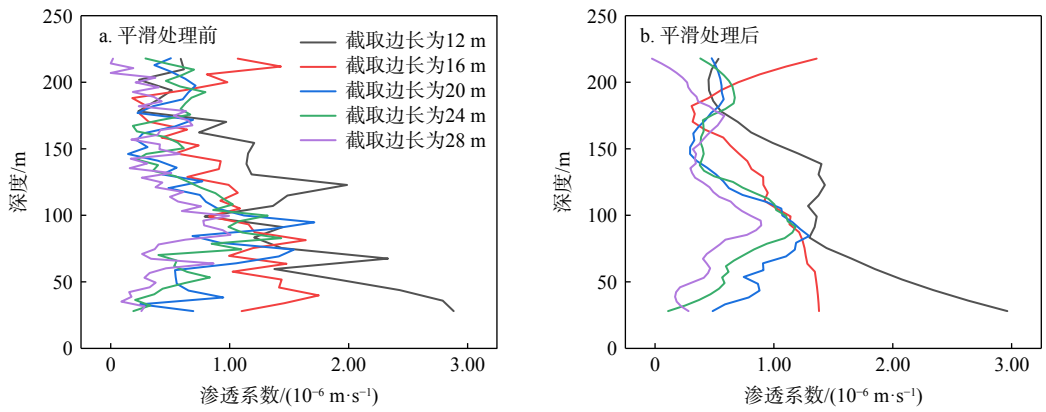


图 9　单元体尺寸与渗透系数关系图

Fig. 9　Relationship between the unit size and permeability coefficient

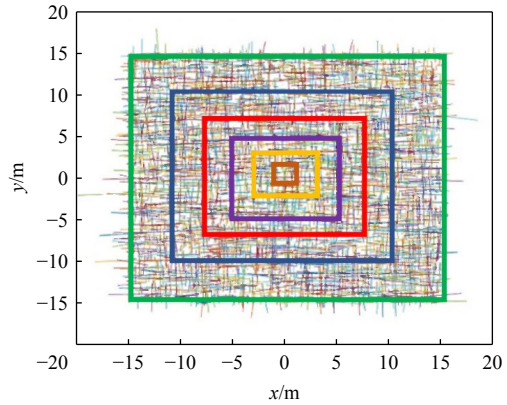


图 10　不同尺度模型的二维裂隙网络

Fig. 10　Two-dimensional fracture networks of models at different scales

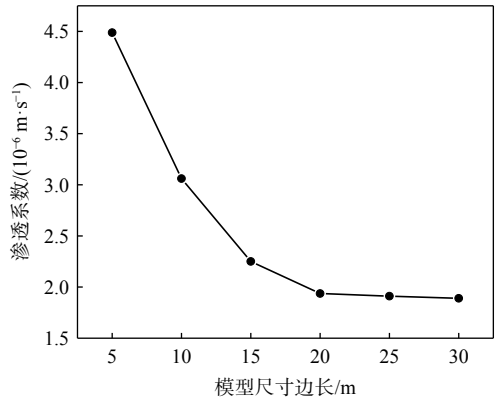


图 11　各个尺寸模型的渗透系数

Fig. 11　Permeability coefficients of models of different sizes

的各方向的渗透系数。通过讨论尺度效应和各向异性的表征方式，截取不同尺度的三维立方体和二维正方形区域计算渗透系数，结果得出当尺寸边长为 20 m 时的单元体计算得到的渗透系数趋于稳定，故典型单元体的边长为 20 m 较为合适，裂隙模型内部水头等值线切面图与渗透系数椭圆能够很好地表示出裂隙岩体的渗流情况，为渗透系数张量的计算提供了一种新的方法。但还有几点值得进一步研究：①该方法以切面法计算岩体内部水流，未考虑垂直

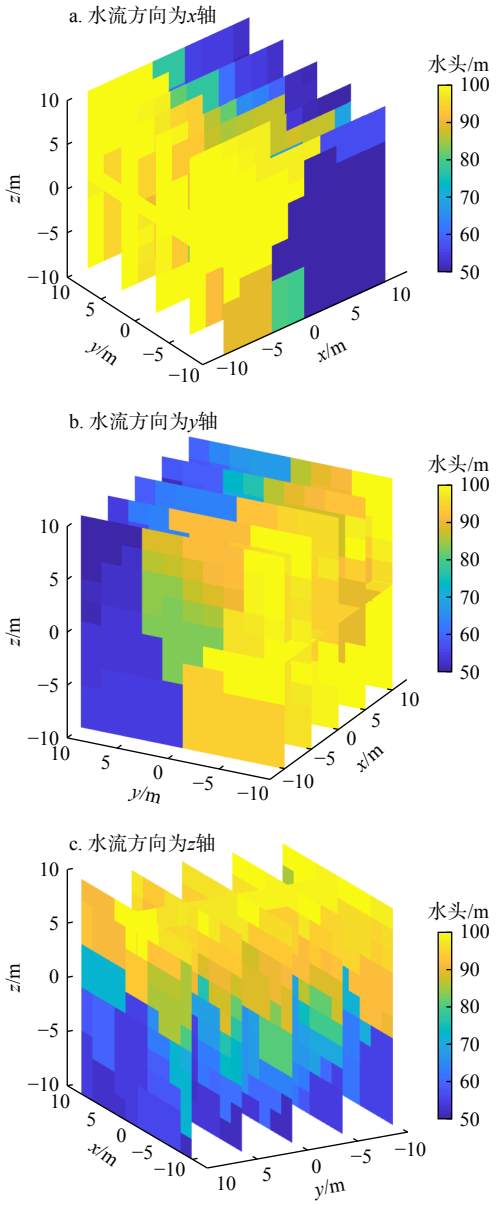


图 12　模型渗流场水头等值线分布切面图

Fig. 12　Section of the equipotential line distribution of the hydraulic head in the seepage field

切面方向水流，只能反映岩体切面的水力连通和水流方向，与实际岩体内部水流仍存在差异。②目前

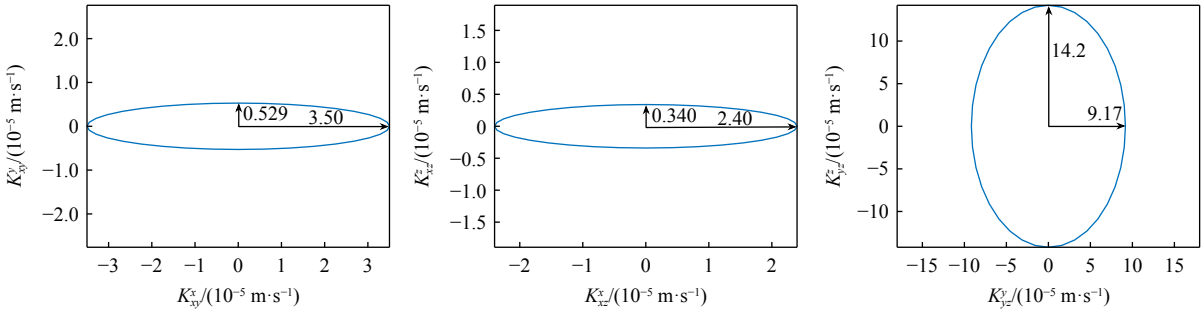


图 13　*xy*、*xz*、*yz* 平面渗透系数椭圆

Fig. 13　Permeability ellipses on *xy*, *xz*, and *yz* planes

的切面法只针对于 3 个坐标轴进行垂直切面，只能得出坐标轴方向的渗透情况，后续可以考虑建立三维裂隙网络球状模型，进行过圆心的任意旋转切面，可得到任意方向的岩体渗透情况。③本研究意在构建一种新的三维裂隙渗流的计算方法，故在考虑裂隙参数时只考虑了倾向、倾角以及迹长等基本参数，后续可增加粗糙度、起伏度等参数来计算渗透系数。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

感谢中国地质大学(武汉)环境学院陈刚副教授和胡成教授提供的现场实验数据。

参考文献：

[1] 陈刚, 徐世光, 刘春学, 等. 岩体单裂隙渗流研究进展 [J]. 人民黄河, 2019, 41(增刊 2): 64-66.
CHEN G, XU S G, LIU C X, et al. Research progress on rock mass single fracture seepage[J]. Yellow River, 2019, 41(S2): 64-66. (in Chinese with English abstract)

[2] 段玲玲, 邓华锋, 熊雨, 等. 岩体裂隙面形貌特征对其渗流特性的影响研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(1): 110-117.
DUAN L L, DENG H F, XIONG Y, et al. Study on the influence of morphology of rock mass fracture surface on its seepage characteristics[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(1): 110-117. (in Chinese with English abstract)

[3] 鲁俊杰. 花岗岩裂隙等效水力隙宽表征及渗透特性研究 [D]. 南京: 南京大学, 2019.
LU J J. Research on the characterization of equivalent hydraulic aperture and permeability in fractures of granite[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese with English abstract)

[4] BAGHBANAN A, JING L R. Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(5): 704-719.

[5] 王晋丽, 陈喜, 黄远洋, 等. 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 J L, CHEN X, HUANG Y Y, et al. A study of stochastic generation and connectivity of fracture network in rock mass[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 30-35. (in Chinese with English abstract)

[6] WILSON C R, WITHERSPOON P A. Steady state flow in rigid networks of fractures[J]. Water Resources Research, 1974, 10(2): 328-335.

[7] WITTKE W, SYKES T B R. Rock mechanics: Theory and applications with case histories[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1990.

[8] 张俊, 盛建龙, 黄涛, 等. 二维裂隙网络渗透特性及连通性研究 [J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(7): 6-10.
ZHANG J, SHENG J L, HUANG T, et al. Research on permeability and connectivity of 2D fracture network[J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(7): 6-10. (in Chinese with English abstract)

[9] 方涛, 柴军瑞, 胡海浪, 等. 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, 22(1): 7-9.
FANG T, CHAI J R, HU H L, et al. Application of Monte Carlo method to simulating the fracture interconnectivioy of rock mass[J]. Opencast Mining Technology, 2007, 22(1): 7-9. (in Chinese with English abstract)

[10] 张亚, 彭乐文. 基于 Monte-Carlo 的岩体三维裂隙网络模型研究 [J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(2): 124-131.
ZHANG Y, PENG L W. Study on the three-dimensional crack network model of rock mass based on Monte-Carlo[J]. Journal of Gansu Sciences, 2020, 32(2): 124-131. (in Chinese with English abstract)

[11] 祝云华, 刘新荣, 梁宁慧, 等. 裂隙岩体渗流模型研究现状与展望 [J]. 工程地质学报, 2008, 16(2): 178-183.
ZHU Y H, LIU X R, LIANG N H, et al. Current research and prospects in modeling seepage field in fractured rock mass[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(2): 178-183. (in Chinese with English abstract)

[12] 郭金喜, 易远. 裂隙土渗流模型研究进展综述 [J]. 土工基础, 2017, 31(6): 721-724.
GUO J X, YI Y. Review of seepage models in fissured soils[J]. Soil Engineering and Foundation, 2017, 31(6): 721-724. (in Chinese with English abstract)

[13] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3(3): 245-255.

[14] 年庚乾, 陈忠辉, 周子涵, 等. 基于双重介质模型的裂隙岩质边坡渗流及稳定性分析 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊 2): 736-746.
NIAN G Q, CHEN Z H, ZHOU Z H, et al. Seepage and stability analysis of fractured rock slope based on dual medium model[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 736-746. (in Chinese with English abstract)

[15] SNOW D T. Anisotropie permeability of fractured media[J]. Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273-1289.

[16] 汪旭涛, 刘杰, 郑德斌. 等效连续介质模型在某裂隙岩质边坡渗流稳定性分析中的应用 [J]. 工程勘察, 2012, 40(6): 27-30.
WANG X T, LIU J, ZHENG D B. Application of equivalent continuum model to the seepage and stability analysis of certain fractured rock slope[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(6): 27-30. (in Chinese with English abstract)

[17] 高瑜, 叶咸, 夏强. 基于等效连续介质模型的单裂隙渗流数值模拟研究 [J]. 地下水, 2016, 38(5): 40-43.
GAO Y, YE X, XIA Q. Study on numerical simulation of single fracture seepage based on equivalent continuum model[J]. Ground Water, 2016, 38(5): 40-43. (in Chinese with English abstract)

[18] 何忱, 姚池, 杨建华, 等. 基于等效离散裂隙网络的三维裂隙岩体渗流模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 2748-2759.
HE C, YAO C, YANG J H, et al. A 3D model for flow in fractured rock mass based on the equivalent discrete fracture network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 2748-2759. (in Chinese with English abstract)

[19] 李睿冉, 张国玉. 裂隙岩体离散裂隙网络介质模型研究 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2010, 41(2): 279-282.

LI R R, ZHANG G Y. The model studr of the discrete network media of fractured rock[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2010, 41(2): 279-282. (in Chinese with English abstract)

[20] 王晋丽, 陈喜, 张志才, 等. 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 J L, CHEN X, ZHANG Z C, et al. Computation of fracture water flow based on discrete fracture network model[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(4): 363-371. (in Chinese with English abstract)

[21] 李树文, 高轲, 王若男. 基于非连续裂隙介质网络流的线素法模型研究 [J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2013, 30(4): 73-77.
LI S W, GAO K, WANG R N. Research of the line element method model based on discontinuous fracture media network flow[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2013, 30(4): 73-77. (in Chinese with English abstract)

[22] 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 E Z. Network analysis and seepage flow model of fractured rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(3): 214-221. (in Chinese with English abstract)

[23] 彭国华. 三维离散裂隙网络模型确定岩体渗透张量的研究 [J]. 水利规划与设计, 2016, 55(9): 70-73.
PENG G H. Research on determining rock mass permeability tensor using three-dimensional discrete fracture network model[J]. Water Resources Planning and Design, 2016, 55(9): 70-73. (in Chinese with English abstract)

[24] RONG G, PENG J, WANG X J, et al. Permeability tensor and representative elementary volume of fractured rock masses[J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(7): 1655-1671.

[25] HE C, YAO C, JIANG Q H, et al. A new semi-analytical method for estimation of anisotropic hydraulic conductivity of three-dimensional fractured rock masses[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128056.

[26] ZHENG J, WANG X H, QING L, et al. A new determination method for the permeability tensor of fractured rock masses[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124811.

[27] 王俊奇, 董晔, 李鹏宇. 三维离散裂隙网络管单元模型确定岩体渗透张量的尝试 [J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 47-54.
WANG J Q, DONG Y, LI P Y. Attempts of pipe element model to determine rock mass permeability tensor for three dimensional discrete fracture network[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(3): 47-54. (in Chinese with English abstract)

[28] LI S C, XU Z H, MA G W. A graph-theoretic pipe network method for water flow simulation in discrete fracture networks: GPNM[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42: 247-263.

[29] JING Y, ARMSTRONG R T, MOSTAGHIMI P. Image-based fracture pipe network modelling for prediction of coal permeability[J]. Fuel, 2020, 270: 117447.

[30] WANG J Q, WANG Z Y, WEI X T. The seepage tensor of the multiparameter model of pipe element in fractured rock mass[J]. Frontiers in Built Environment, 2022, 8: 927100.

[31] 王恩志, 杨成田. 裂隙网络地下水流数值模型及非连通裂隙网络水流的研究 [J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(1): 12-14.
WANG E Z, YANG C T. Numerical model of groundwater flow in fracture networks and water flow in disconnected fracture networks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992, 19(1): 12-14. (in Chinese with English abstract)

[32] 兰志广. 复杂结构裂隙岩体三维统计连通率研究: 以广西大藤峡泄水闸坝基岩体为例 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
LAN Z G. Determination of three-dimensional statistical discontinuity persistence for a rock mass characterized by non-persistent fractures: A case study of the rock mass of the sluice gate of Datengxia Hydropower Station in Guangxi[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese with English abstract)

[33] 李露露, 李牧阳, 周志超, 等. 基于统计均质区方法的裂隙几何及渗流特性评价 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 288-298.
LI L L, LI M Y, ZHOU Z C, et al. Assessment of fractures geometries and seepage characteristics based on statistical homogeneous zone method[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(4): 288-298. (in Chinese with English abstract)

[34] 杜玉芳. 基于 Monte Carlo 方法的岩体三维裂隙网络建模研究 [D]. 石家庄: 河北地质大学, 2021.
DU Y F. Modeling 3D fracture network in rock masses based on Monte Carlo method[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[35] 赵红亮, 陈剑平. 裂隙岩体三维网络流的渗透路径搜索 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 622-627.
ZHAO H L, CHEN J P. Searching for seepage path of 3D network in fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 622-627. (in Chinese with English abstract)

[36] 刘华梅, 王明玉. 三维裂隙网络渗流路径识别算法及其优化 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, 27(4): 463-470.
LIU H M, WANG M Y. Algorithms and their optimization for identification of the connected flow paths for 3D fracture networks in fractured rocks[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2010, 27(4): 463-470. (in Chinese with English abstract)

[37] 刘日成, 蒋宇静, 李博, 等. 岩体裂隙网络非线性渗流特性研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2817-2824.
LIU R C, JIANG Y J, LI B, et al. Nonlinear seepage behaviors of fluid in fracture networks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2817-2824. (in Chinese with English abstract)

[38] YU L Y, ZHANG J, LIU R C, et al. Estimation of the representative elementary volume of three-dimensional fracture networks based on permeability and trace map analysis: A case study[J]. Engineering Geology, 2022, 309: 106848.

[39] 谭龙. 烟台某地下水封洞库裂隙岩体结构面对围岩稳定性及水封条件影响研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2021.
TAN L. Study on the influence of fractured rock mass structure on the stability of surrounding rock and water seal condition of an underground water sealed cavern in Yantai[D]. Wuhan: China Uni-

versity of Geosciences(Wuhan), 2021.（in Chinese with English abstract）

[40] 董晓飞, 胡成, 曹孟雄, 等. 裂隙介质渗透性的升尺度转换研究 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 259-267. DONG X F, HU C, CAO M X, et al. Study on the upscaling transformation of hydraulic conductivity in fractured media[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(4): 259-267.（in Chinese with English abstract）

Summary for “裂隙岩体渗透系数的密集切面计算方法”

Calculation method for the permeability coefficient of a fractured rock mass based on dense sections

WEI Juanhua[1a], FU Hao[1b], TANG Zhaohui[1c], ZHANG Tengfei[2], CHAI Bo[1b*]

1a. Institute of Geological Survey; 1b. School of Environmental Studies; 1c. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. Changqing Oilfield Technical Monitoring Center, Xi'an 710018, China

First author, E-mail: 1556607473@qq.com

* Corresponding author, E-mail: chaibo@cug.edu.cn

Abstract: [**Objective**] The seepage in fractured rock masses is non-uniform and anisotropic, with its complexity reflected in the density, orientation, and trace length of individual fractures, as well as the connectivity of fracture networks. The connectivity of fracture networks poses a significant challenge in calculating the seepage parameters of three-dimensional (3D) fractured rock masses. Currently, methods for calculating seepage parameters of 3D fractured rock masses have their own advantages and disadvantages, depending on the model assumptions they used. To analyse the hydraulic anisotropy and permeability coefficients of fractured rock masses, a new method for solving the permeability coefficient of a 3D fractured rock mass based on dense sections is proposed using the dimensionality reduction. [**Methods**] This method involves simulating 3D fracture networks and approximating fractured rock masses using dense sections in different directions. The 3D fracture network is decomposed into multiple continuous two-dimensional (2D) sectional fracture networks, and the graph theory is applied to analysing the hydraulic connectivity and permeability paths. Water head boundary conditions are then set to calculate the permeability coefficient. By leveraging the geometric relationships among lines, surfaces, and volumes in 3D space, the calculated permeability coefficient is expressed as the directional permeability in 3D space, and a permeability tensor for the 3D fractured rock mass is constructed. [**Results**] By treating the section permeability coefficient as a permeability ellipse, the new method calculates the equivalent permeability coefficient of the section and provides a formula for the equivalent permeability tensor of the rock mass. The scale effect and representation of anisotropy in the rock mass are also discussed. The 3D and 2D fracture networks are constructed, and different sizes of unit cells are intercepted to calculate the permeability coefficient, with a typical unit size determined to be 20 m. The method's feasibility is verified through field water pressure experiments. [**Conclusion**] This method provides a important reference for solving the permeability coefficients in different directions of heterogeneous fractured rock masses at various scales.

Key words: three-dimensional (3D) fracture network; dimension ality reduction; multi section; permeability coefficient; fractured rock mass

Received: 2023-12-08; Revised: 2024-04-06; Accepted: 2024-05-06

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230680