

# 节理迹长与隙宽的相关性对裂隙岩体水力学特性的影响

吴月秀<sup>1</sup>, 刘泉声<sup>1,2</sup>, 李金兰<sup>1</sup>, 何 军<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 节理迹长与隙宽的相关性影响节理网络的分布和透水性, 最终影响裂隙岩体的水力学特性。为此, 结合 Sellafield 处置库工程, 从统计学的角度研究节理迹长和隙宽符合幂律分布时的相关关系, 基于离散元软件 UDEC 分析节理迹长和隙宽的相关性对裂隙岩体水力耦合特性的影响, 给出一套考虑节理参数相关性的裂隙岩体水力学计算方法。计算结果表明: 节理迹长与隙宽符合幂率分布时, 其相关关系呈指数函数形式; 考虑两者相关性时, 裂隙岩体的渗透率张量及表征单元体积均变大, 因此不可忽略节理参数相关性的影响。

**关键词:** 渗透力学; 水力耦合; 渗透率; 表征单元体积; 相关关系; 幂律分布

**中图分类号:** O 319.56

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2014)增 2-3555-08

## EFFECT OF CORRELATION BETWEEN JOINT TRACE AND APERTURE ON HYDRO-MECHANICAL BEHAVIOR OF FRACTURED ROCK MASS

WU Yuexiu<sup>1</sup>, LIU Quansheng<sup>1,2</sup>, LI Jinlan<sup>1</sup>, HE Jun<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China*; 2. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*)

**Abstract:** The correlation between joint trace and aperture has an effect on the distribution and permeability of joint network. Finally, the hydro-mechanical behavior of fractured rock mass is influenced. Based on nuclear disposal project in Sellafield, the correlation between joint trace and aperture was studied when they followed the power-law distribution. With discrete element software UDEC, the effect of correlation between joint trace and aperture on hydro-mechanical behavior of fractured rock mass was analyzed. At the end, a calculation system was proposed to do the hydro-mechanical calculation for fractured rock mass considering the correlation between joint parameters. It is concluded that correlation between joint trace and aperture has a significant effect on hydro-mechanical behavior of fractured rock mass. When the correlation between joint trace and aperture was power-law function, permeability tensor and representative elemental volume(REV) of fractured rock mass increased.

**Key words:** seepage mechanics; hydro-mechanical coupling; permeability; representative elemental volume; correlation; power-law distribution

**收稿日期:** 2013-06-28; **修回日期:** 2013-10-14

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(41102193); 国家自然科学基金重点项目(41130742); 教育部创新团队项目(IRT1031)

**作者简介:** 吴月秀(1983-), 女, 2010 年于中国科学院武汉岩土力学研究所获博士学位, 现任讲师, 主要从事核废料地下处置库中地下水和核素运移方面的教学与研究工作。E-mail: yuexiuwu@whu.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.020

# 1 引言

从 20 世纪 60 年代开始，裂隙岩体就成为实际工程中研究的热点和难点。岩体内的随机节理形态、产状、大小各异，使得岩体的水、力学特性表现出复杂性、非均匀性及各向异性。如何真实模拟裂隙在岩体内的分布是研究裂隙岩体水力学特性的关键。目前常用的数值模拟方法是根据节理各产状参数的统计分布规律，采用 Monte Carlo 法随机抽样得到节理的各产状参数如迹长、倾角、中心点等，从而生成统计意义上相似的节理网络。目前通常采用现场试验和室内试验来得到节理参数统计分布规律，如 M. Rouai<sup>[1]</sup>和 P. Davy<sup>[2]</sup>分别得出节理迹长幂律分布的指数分别为 -1.99 和  $-1.3 \pm 0.3$ ；T. F. Wong 等<sup>[3]</sup>得出花岗岩和石英岩内节理隙宽幂律分布的指数分别为 -1.843 和 -1.804；A. Colleen 等<sup>[4]</sup>得出 2 ~ 9 cm 内隙宽幂律分布的指数为 2.47；J. Johnston 和 K. J. W. McCaffrey<sup>[5]</sup>得出 5 ~ 50 mm 内隙宽幂律分布的指数为 1.7 ~ 1.8；N. R. Barton 等<sup>[6]</sup>得出 1 ~ 10 mm 内隙宽幂律分布的指数为 1.53；W. C. Belfield 和 J. Sovitch<sup>[7]</sup>得出 6 ~ 40um 内隙宽幂律分布的指数为 2.0 ~ 2.4。在 Monte-Carlo 节理网络模拟方面，方涛等<sup>[8]</sup>编制了二维裂隙网络模拟程序；贾洪彪等<sup>[9]</sup>给出了三维裂隙网络模拟技术；龙治国等<sup>[10]</sup>利用建立的岩体裂隙网络模型对滑坡工程中 RQD 和岩体强度进行估算；王涛等<sup>[11]</sup>在 3DEC 中采用直接法生成节理网络，研究了优势节理组对洞室围岩稳定性的影响；王志鹏<sup>[12]</sup>采用 Monte Carlo 法模拟了节理网络的分布，分析了静力和地震荷载下，地下洞室围岩的应力及位移变化情况。

目前的研究中，均认为节理各产状参数之间是相互独立的。然而，大量的现场节理测量和室内节理测量证明：节理迹长与隙宽之间是存在相关性的，如 D. Stone<sup>[13]</sup>对加拿大 Atikokon 处 Eye Dashwa 湖深部岩体节理进行测量，证明了节理迹长与隙宽存在着一定的相关性；C. G. Hatton 等<sup>[14]</sup>对 Kelduhverfi 处的节理进行现场测量，得出节理迹长 L 与隙宽 A 呈区域性的指数关系；J. M. Vermilye 和 C. Scholz<sup>[15]</sup>通过大量的现场测量，得出节理迹长与隙宽呈非线性关系；N. E. Odling<sup>[16]</sup>通过现场测量，得出了节理迹长与隙宽呈指数关系；T. Hwalmann 等<sup>[17]</sup>通过大量的室内测量，得出节理迹长与隙宽之间呈指数关系。

上述试验研究表明，实际裂隙岩体中节理迹长与隙宽之间存在着相关性，而目前绝大部分数值分析<sup>[18-24]</sup>中将节理的迹长与隙宽视为相互独立的、不相关的，这必然使得数值分析中节理网络的模拟缺乏真实性，从而导致裂隙岩体水力耦合特性的研究存在很大的误差。目前只有极少数研究成果<sup>[25-30]</sup>对节理参数的相关关系进行了尝试，但关于相关性对裂隙岩体水力学特性影响方面的研究则非常欠缺，且不够系统和全面。

针对此问题，结合 sellafield 处置库工程，本文主要考虑节理迹长和隙宽均为幂律分布的情况，研究节理迹长与隙宽的相关关系，建立节理网络模型，分析相关关系对裂隙岩体渗透率张量及表征单元体积 REV 等水力耦合特性的影响，为研究参数相关性提供理论基础和模拟方法。

# 2 节理迹长与隙宽的相关性

Sellafield 核废料处置库位于英格兰坎布里亚郡的爱尔兰海岸。L. Nirex<sup>[31-32]</sup>对 Sellafield 处置库进行了全面的现场地质调查，而 Sellafield 处置库工程的研究范围较大，此处只研究了 Sellafield 处置库的一个有限范围。根据 Sellafield 处置库的现场地质调查结果的数值处理结构<sup>[33]</sup>，整个计算区域有 4 组节理，节理倾角均符合 FISHER 分布，节理迹长和隙宽均符合幂律分布，其幂指数分别为 2.2 和 2.804，取值区间分别为(0.5 m, 250 m)和(1 μm, 200 μm)。

为了使得数值模拟中的随机抽样数据能够在节理迹长和隙宽的取值范围内，可采用截断的概率分布来模拟这类参数。

假设  $x$  为  $(-\infty, +\infty)$  区间符合幂律分布的概率密度函数为  $f(x)$ ，累计概率分布函数为  $F(x)$  的随机变量；则和  $x$  有相同概率分布的、取值区间为  $(a, b)$  的变量  $y$  的截断概率密度分布函数为

$$tr(y) = \frac{f(y)}{\int_a^b f(y)dy} \quad (a < y < b) \quad (1)$$

截断累计概率密度分布函数为

$$TR(y) = \frac{\int_a^y f(y)dy}{\int_a^b f(y)dy} = \frac{F(y) - F(a)}{F(b) - F(a)} \quad (2)$$

幂律分布概率密度函数为

$$f_{pow}(x) = x^{-\alpha-1} \quad (3)$$

式中： $\alpha$  为幂律分布的参数。

幂律分布累积概率分布函数为

$$F_{\text{pow}}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x^{-\alpha-1} dx = x^{-\alpha} + C \quad (4)$$

则符合(a, b)区间截断幂律分布的随机数为

$$R = \frac{x^{-\alpha} - a^{-\alpha}}{b^{-\alpha} - a^{-\alpha}} \quad (5)$$

式中: R 为 0~1 之间符合均匀分布的随机数。

符合(a, b)区间截断幂律分布的 x 可表示为

$$x = [a^{-\alpha} + R(b^{-\alpha} - a^{-\alpha})]^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

由此可知,只要生成 0~1 之间均匀分布的伪随机数 R,则可生成(a, b)符合幂律分布的伪随机数。

若节理迹长 l 符合截断幂律分布,其幂律分布的参数与取值范围分别为  $\alpha_l$  和  $(l_{\min}, l_{\max})$ ;节理隙宽 b 符合截断幂律分布,其幂律分布的参数与取值范围分别为  $\alpha_b$  和  $(b_{\min}, b_{\max})$ 。根据式(5)可分别得到符合相应幂律分布的迹长 l 和隙宽 b 的伪随机数:

$$\left. \begin{aligned} R_l &= \frac{l^{-\alpha_l} - l_{\min}^{-\alpha_l}}{l_{\max}^{-\alpha_l} - l_{\min}^{-\alpha_l}} \\ R_b &= \frac{b^{-\alpha_b} - b_{\min}^{-\alpha_b}}{b_{\max}^{-\alpha_b} - b_{\min}^{-\alpha_b}} \end{aligned} \right\} \quad (7a)$$

若考虑迹长和隙宽的相关关系,则可以使式(7a)中的 2 个 0~1 之间均匀分布的伪随机数  $R_l$  和  $R_b$  相等,即只用一个 0~1 之间均匀分布的伪随机数 R 来同时生成节理迹长和隙宽:

$$R = \frac{l^{-\alpha_l} - l_{\min}^{-\alpha_l}}{l_{\max}^{-\alpha_l} - l_{\min}^{-\alpha_l}} = \frac{b^{-\alpha_b} - b_{\min}^{-\alpha_b}}{b_{\max}^{-\alpha_b} - b_{\min}^{-\alpha_b}} \quad (7b)$$

考虑了相关性的节理迹长 l 与隙宽 b 可由随机数生成得到:

$$\left. \begin{aligned} l &= [l_{\min}^{-\alpha_l} + R(l_{\max}^{-\alpha_l} - l_{\min}^{-\alpha_l})]^{-\frac{1}{\alpha_l}} \\ b &= [b_{\min}^{-\alpha_b} + R(b_{\max}^{-\alpha_b} - b_{\min}^{-\alpha_b})]^{-\frac{1}{\alpha_b}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将上述方法与 sellafield 实际工程中的节理迹长和隙宽的具体参数结合起来,可得迹长与隙宽间的相关关系(见图 1)为

$$b = -4.314 \times 10^{-5} + 4.261 \times 10^{-5} e^{\frac{l}{14.986}} \quad (9)$$

从图(1)可得,节理迹长与隙宽的相关关系为指数关系,这与 M. Rouai 等<sup>[1,3]</sup>的现场测量结果相符,验证了此结果的正确性。

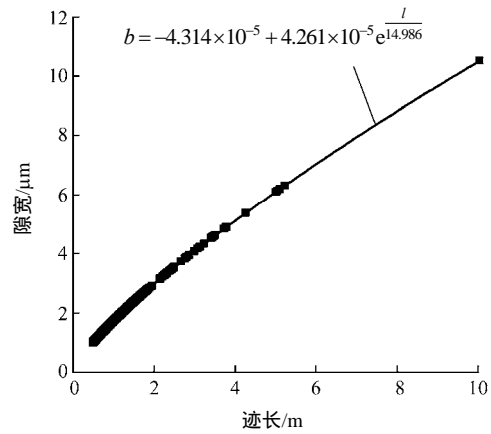


图 1 节理迹长与隙宽的相关关系  
Fig.1 Correlation between joint trace and joint aperture

### 3 离散元方法中的水力耦合作用

离散元中,节理将岩体划分为多个可变形块体,可变形块体被网格离散为多个常应变三角形单元,通过单元格点的运动来反映整个岩体的运动及变形。

单元格点 i 处的运动方程为

$$\ddot{u}_i = \frac{\sum f_i}{m} + g_i \quad (10)$$

其中,

$$f_i = f_i^c + \sum_{l=1}^M \left[ \sigma_{ij} \sum_{k=1}^N (n_j^k \Delta s^k) \right] \quad (11)$$

$$\Delta s^k = \Delta l^k d \quad (12)$$

式中:  $\ddot{u}_i$  为格点加速度; m 为分配到格点上的集中质量(三角形单元分配给各格点的质量为单元质量的 1/3,一个格点处的集中质量是所有包含该格点的单元分配给此格点的质量和);  $g_i$  为重力加速度; N 为单元节点数目(N=3);  $\sigma_{ij}$  为单元应力(对于常应变单元来说,  $\sigma_{ij}$  在单元内为常量); M 为与节点 i 相连的单元数目;  $n_j^k$  为单元内第 k 条边的单位法向量;  $\Delta l^k$  为单元内第 k 条边的边长; d 为单元厚度(二维情况下, d=1);  $\Delta s^k$  为面积;  $f_i^c$  为块体与块体间的接触力,可分为法向接触力  $\Delta F_n$  与切向接触力  $\Delta F_s$  两部分,其值与节理本构模型有关。

三角形单元的应变  $\Delta \varepsilon_{ij}$  为

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\dot{u}_{i,j} \pm \dot{u}_{j,i}) \Delta t \quad (13)$$

式中:  $\Delta t$  为计算时间步;  $\dot{u}_{i,j}$ ,  $\dot{u}_{j,i}$  为位移在各坐标轴上的导数,用张量的形式表示。

三角形单元应力  $\Delta \sigma_{ij}$  为

$$\Delta\sigma_{ij} = \lambda\Delta\varepsilon_v\delta_{ij} + 2\bar{\mu}\Delta\varepsilon_{ij} \quad (14)$$

式中： $\lambda$ ， $\bar{\mu}$ 均为拉梅常数； $\Delta\varepsilon_v$ 为体积应变。

节理假定为光滑壁面，则其水流流动规律符合立方定律：

$$q = va = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{l} \quad (15a)$$

其中，

$$k_j = \frac{1}{12\mu} \quad (15b)$$

式中： $q$ 为流量率， $v$ 为节理内流体速度， $a$ 为节理水力隙宽， $k_j$ 为节理渗透因子， $l$ 为流体流动长度， $\Delta p$ 为裂隙两头压力差， $\mu$ 为流体动力黏滞系数。

(1) 应力场对渗流场的影响

在离散元中，假定流体只在裂隙中流动，完整岩块为不透水材料。应力影响岩体位移，改变块体间相对位置即节理法向位移，从而改变节理隙宽、影响节理岩体渗透率，即

$$a = a_0 + u_n \quad (16)$$

式中： $a_0$ 为初始节理水力隙宽； $u_n$ 为节理法向位移，通过块体边界处格点间的相对位移得到，以拉为正、压为负； $a$ 为变形后节理水力隙宽。将式(16)代入式(15a)，得出变形后的节理渗透流量，实现了应力场对渗流场的影响。

(2) 渗流场对应力场的影响

节理内流体作用在节理壁面上压力的变化引起岩体受力状态的变化，最终影响了裂隙岩体的变形。

流体流入一点时，引起的渗透压力增量  $\Delta p$  (见图 2(a))为

$$\Delta p = \frac{K_w}{V_m} \left[ \sum(Q\Delta t) - \Delta V \right] \quad (17a)$$

其中，

$$\Delta V = V - V_0, V_m = (V + V_0) / 2 \quad (17b)$$

式中： $\sum(Q\Delta t)$ 为流入到节点的流量， $\Delta V$ 为变形前后的体积增量， $K_w$ 为流体的体积模量， $V_m$ 为变形前后体积的均值。

变形后渗透压力  $p$  与渗透力  $F_i$  (见图 2(b))为

$$p = p_0 + \frac{K_w}{V_m} \left[ \sum(Q\Delta t) - \Delta V \right] \quad (18)$$

$$F_i = pn_i L \quad (19)$$

式中： $F_i$ 为节理壁面所受的渗透力， $L$ 为单位厚度的节理面积。将式(19)加入到式(10)中的  $f_i$ ，可得在渗透压力影响下格点的位移，实现了渗流场对应力场的影响。

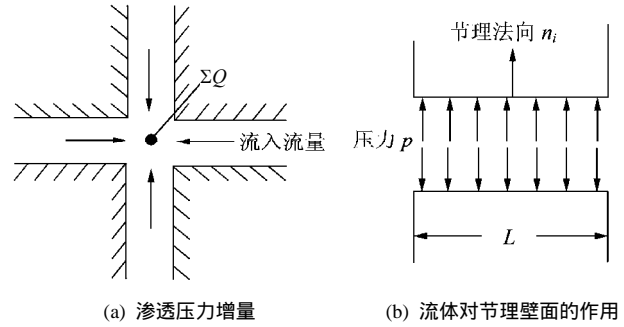


图 2 渗流场对应力场的影响示意图

Fig.2 Sketch of influence of stress field on seepage field

## 4 相关性对岩体水力学性质的影响

基于地质调查结果，采用 Monte Carlo 法生成节理网络模型，在此基础上进行水力耦合计算，研究了节理初始隙宽为常数、考虑参数相关性及不考虑参数相关性 3 种情况下，裂隙岩体的 REV 及等效渗透率张量的变化规律。

### 4.1 节理网络的模拟

基于 Sellafield 处置库的现场地质调查结果，岩体内有 2 组节理，节理中心点符合均匀分布，迹长与隙宽均符合幂律分布，倾角符合正态分布，其具体的参数见表 1，节理网络分布如图 3 所示。

表 1 节理网络参数

Table 1 Parameters of joint network

节理组 编号	密度/ m <sup>-2</sup>	迹长		隙宽		倾角	
		均值/ m	幂指数	均值/ μm	幂指数	均值/ (°)	方差
1	0.4	3.06	2.2	2.17	2.8	8	5
2	0.4	4.04	2.2	2.17	2.8	60	10



图 3 节理网络分布

Fig.3 Discrete fracture network

### 4.2 节理本构模型

由于 Saeb-Amadei(SA)节理模型考虑了节理法向变形对节理剪切变形及剪胀的影响及节理吻合度

对结果的影响，且适用于常法向应力边界与常法向刚度边界条件。因此，采用 SA 节理本构模型来模拟节理的力学变形行为，SA 节理本构模型可用下式表述：

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_n &= k_{nn}dv + k_{nt}du \\ d\tau &= k_{tn}dv + k_{tt}du \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中： $k_{nn}$ 、 $k_{nt}$ 、 $k_{tn}$ 及 $k_{tt}$ 为 4 个刚度矩阵分量； $v$  为节理的法向位移，以节理受压为正，节理张开为正； $u$  为节理的剪切位移。

结合 UDEC 中的 User-Defined Joint Constitutive Models 的接口，吴月秀等<sup>[34]</sup>将 SA 节理本构模型嵌入到 UDEC 软件中；并通过数值直剪实验和单轴压缩实验，验证了该本构模型数值程序的正确性，SA 节理本构模型的数值嵌入实现程序如图 4 所示，其具体的节理材料参数见表 2。

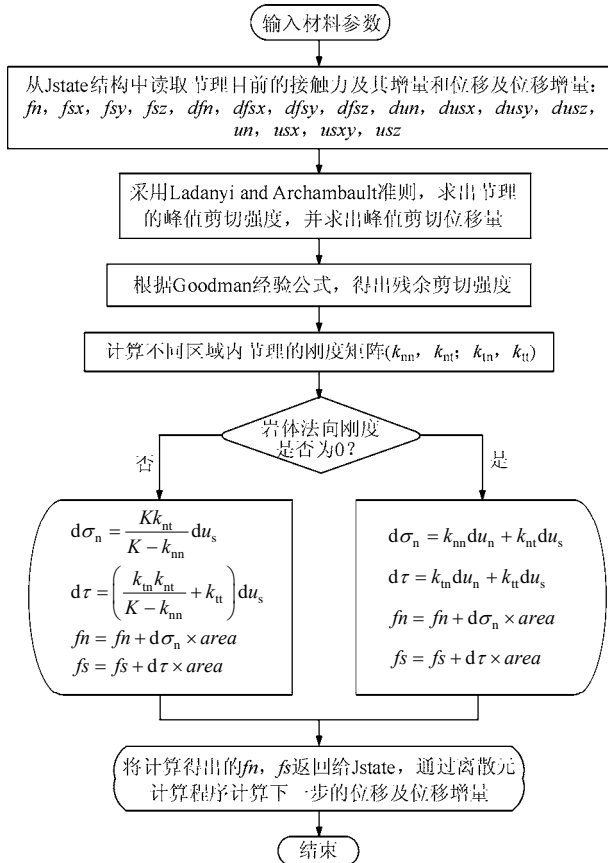


图 4 SA 节理本构模型实现流程图

Fig.4 Implementation of SA joint constitutive model

### 4.3 边界条件

(1) 渗透边界条件：水平方向流动时，在右边界施加 0.1 MPa 的水压力，左边界水头压力为 0 MPa，上下为不透水边界(见图 5(a))；垂直方向流动时，在上边界施加 0.1 MPa 的水压力，下边界水头

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

岩块(M-C 模型)									
密度/ ( $g \cdot m^{-3}$ )	体积模量/ Pa	剪切模量/ Pa	黏聚力/ Pa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )					
2 500	$5.0 \times 10^{12}$	$4.5 \times 10^{12}$	$1.0 \times 10^7$	31.5					
SA 模型									
法向 刚度/ Pa	切向 刚度/ Pa	内摩 擦角/ ( $^{\circ}$ )	最大 压缩 量/m	剪胀 角/ ( $^{\circ}$ )	临界 应力/ Pa	$k_1$	$k_2$	$b_0$	残余剪 切位移/ m
$5.0 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^8$	30	$5.0 \times 10^{-6}$	8	$8.0 \times 10^7$	0.25	0.81	0.9	$6.25 \times 10^{-3}$

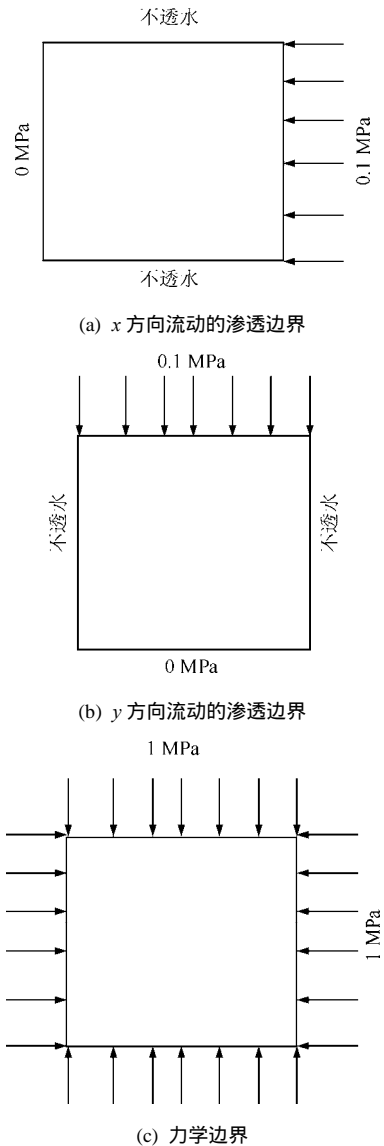


图 5 水力耦合计算时的边界条件

Fig.5 Boundary conditions for HM calculation

压力为 0 MPa，左右为不透水边界(见图 5(b))。

(2) 力学边界条件：在模型边界上施加 1 MPa 的围压(见图 5(c))。

4.4 等效渗透率

根据节 4.3 所施加的  $x$  方向流动的边界条件 (见图 5(a)), 等效渗透率  $k_{xx}, k_{xy}$  可由下式计算得出:

$$\left. \begin{aligned} k_{xx} &= \frac{Q_x l_x \rho_w g}{l_y (p_2 - p_1)} \\ k_{xy} &= \frac{Q_y \rho_w g}{p_2 - p_1} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中:  $l_x, l_y$  分别为梯度方向为  $x, y$  时的水流过水断面长度, 其过水断面的宽度均为单位长度。

根据节 4.3 所施加的  $y$  方向流动的边界条件 (见图 5(b)), 等效渗透率  $k_{yy}, k_{yx}$  可由下式计算得出:

$$\left. \begin{aligned} k_{yy} &= \frac{Q_y l_y \rho_w g}{l_x (p_2 - p_1)} \\ k_{yx} &= \frac{Q_x \rho_w g}{p_2 - p_1} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

在上述计算中可能出现  $k_{xy} \neq k_{yx}$ , 而假定岩体渗透率为对称的, 所以将  $k_{xx}, k_{xy}$  的平均数视为等效渗透张量斜对角上的元素, 即

$$k'_{xy} = k'_{yx} = \frac{k_{xy} + k_{yx}}{2} \quad (23)$$

4.5 计算结果分析

分别对不同尺寸 (2 m × 2 m, 4 m × 4 m, 6 m × 6 m, ..., 26 m × 26 m) 的裂隙岩体进行了不考虑相关性和考虑相关性两种工况下的水力耦合计算: 迹长符合幂律分布, 幂指数为 2.2, 取值范围为 (0 m, 25 m); 隙宽符合幂律分布, 幂指数为 2.804, 取值范围为 (1 μm, 200 μm)。2 种情况下等效渗透率随尺寸的变化情况如图 6 所示。

裂隙岩体的主渗透系数  $k_1, k_2$  以及主渗透方向通过下列式子计算可得

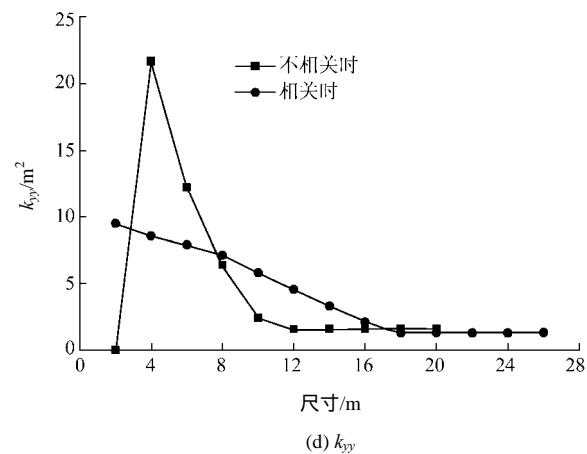
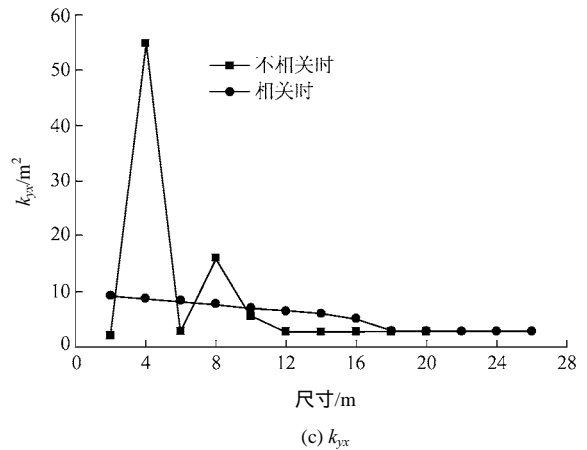
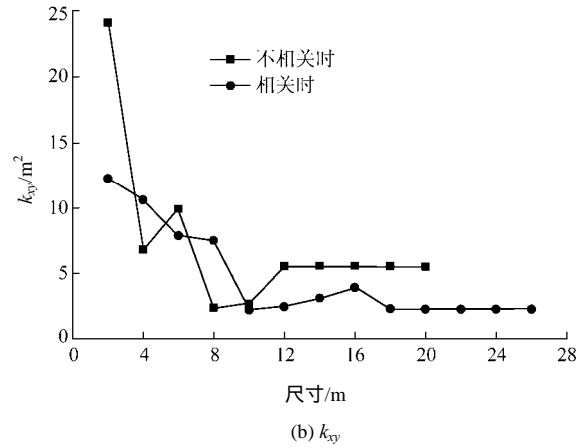
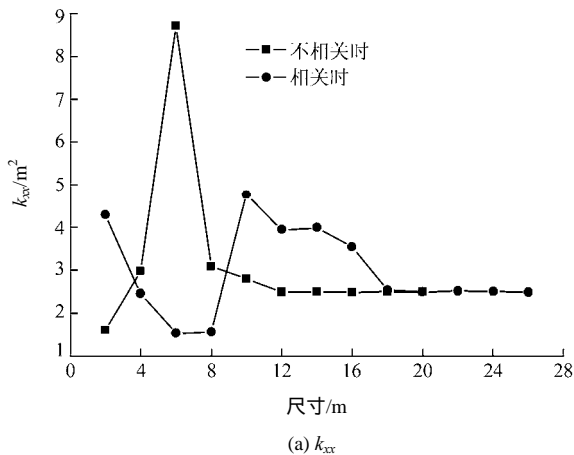


图 6 等效渗透率与尺寸的关系

Fig.6 Relationships between equivalent permeability and size

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{k_{xx} + k_{yy}}{2} + \sqrt{\left(\frac{k_{xx} - k_{yy}}{2}\right)^2 + k_{xy}^2} \\ k_2 &= \frac{k_{xx} + k_{yy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{k_{xx} - k_{yy}}{2}\right)^2 + k_{xy}^2} \\ \tan(2\alpha) &= \frac{2k_{xy}}{k_{xx} - k_{yy}} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

由图 6 可得:

(1) 不考虑参数相关性时, 各方向渗透率( $k_{xx},$

$k_{xy}, k_{yx}, k_{yy}$ ) 随计算模型尺寸的增大而减小, 当模型尺寸到达  $18 \times 18 \text{ m}^2$  时, 开始趋于稳定, 则表征单元体积  $REV = 18 \times 18 \text{ m}^2$ , 其渗透率张量为  $[k] = \begin{bmatrix} 2.48 & 0.554 \\ 0.282 & 1.56 \end{bmatrix} \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 。

(2) 考虑参数相关性时, 各方向渗透率随计算模型尺寸的增大而减小, 当模型尺寸到达  $22 \times 22 \text{ m}^2$  时, 开始趋于稳定, 其  $REV$  为  $22 \times 22 \text{ m}^2$ , 其渗透率张量为  $[k] = \begin{bmatrix} 2.49 & 0.228 \\ 0.301 & 1.30 \end{bmatrix} \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 。

将  $REV$  尺寸下的模型旋转不同的角度, 进行水力耦合计算, 在极坐标系中绘制旋转角度和  $1/\sqrt{k_{xx}}$  的关系曲线, 如图 7 所示。由图 7 可知, 考虑迹长与隙宽相关性时的渗透椭圆小于不考虑相关性时的渗透椭圆, 即考虑相关性时裂隙岩体的渗透性高于不考虑相关性的情况。

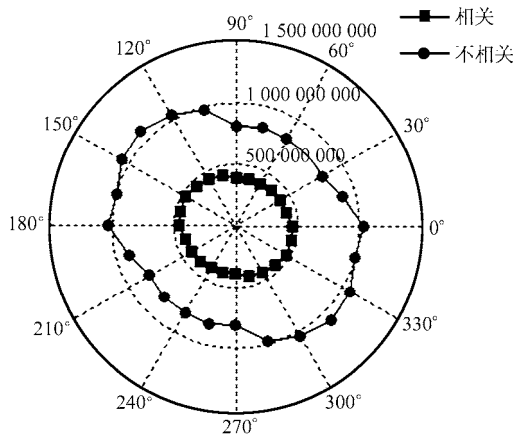


图 7  $1/\sqrt{k_{xx}}$  的极坐标图(单位:  $10^9 \text{ m}^{-1}$ )  
Fig.7 Polar diagram of  $1/\sqrt{k_{xx}}$  (unit:  $10^9 \text{ m}^{-1}$ )

## 5 结 论

基于大量现场节理测量资料, 本文重点研究了当节理迹长与隙宽符合幂律分布时的相关关系, 得出其相关关系呈指数函数的形式(见式(9))。应用 Monte Carlo 法, 生成了考虑迹长与隙宽相关、不考虑迹长与隙宽相关的节理网络模型; 并分别对其进行水力耦合计算, 对比其计算结果得:

(1) 不考虑迹长与隙宽相关的变隙宽情况下, 裂隙岩体的  $REV = 18 \times 18 \text{ m}^2$ , 其渗透率张量为

$$[k] = \begin{bmatrix} 2.48 & 0.418 \\ 0.418 & 1.56 \end{bmatrix} \times 10^{-19} \text{ m}^2, \text{ 其主渗透率 } k_1 \text{ 和 } k_2$$

分别为  $2.64 \times 10^{-19}$  和  $1.40 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ , 其主渗透方向

为  $21.13^\circ$ 。

(2) 考虑节理迹长与隙宽相关的情况下, 裂隙岩体的  $REV = 22 \times 22 \text{ m}^2$ , 其渗透率张量为  $[k] =$

$$\begin{bmatrix} 2.49 & 0.265 \\ 0.265 & 1.30 \end{bmatrix} \times 10^{-18} \text{ m}^2, \text{ 其主渗透率 } k_1 \text{ 和 } k_2 \text{ 分}$$

别为  $2.55 \times 10^{-18}$  和  $1.24 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ , 其主渗透方向为  $11.98^\circ$ 。

(3) 相关情况下的渗透率张量及其主渗透率大于不相关情况下的结果, 节理迹长与隙宽的相关性对裂隙岩体水力耦合特性的影响很大, 在实际工程中, 应根据地质调查结果分别进行研究。

## 参考文献(References):

- [1] ROUAI M. Application of Fractal Geometry to 2nd Fracture Networks in the Middle Atlas Aquifer(Morocco)[C]// At The 9th Agile Conference on Geographic Information Science. Visegrád: [s.n.], 2006: 339-344.
- [2] DAVY P. On the frequency-length distribution of the san and reas fault system[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(B7): 12 141-12 151.
- [3] WONG T F, FREDRICH J T, GWANMESIA G D. Crack aperture statistics and pore space fractal geometry of westerly granite and rutland quartzite: implications for an elastic contact model of rock compressibility[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B8): 10 267-10 278.
- [4] COLLEEN A, BARTON, ZOBACK MARK D. Self-similar distribution and properties of macroscopic fractures at depth in crystalline rock in the cajon pass scientific drill hole[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(B4): 5 181-5 200.
- [5] JOHNSTON J, MCCAFFREY K J W. Fractal geometries of vein systems and the variation of scaling relationships with mechanism[J]. Journal of Structure Geology, 1996, 18(2): 349-358.
- [6] BARTON N R, BANDIS S C, BAKHTAR K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1985, 22(3): 121-140.
- [7] BELFIELD W C, SOVITCH J. Fractures Statistics from Horizontal Wellbores[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1995, 34(1): 47-50.
- [8] 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, (1): 7-13.(FANG Tao, CHAI Junrui, HU Hailing, et al. Application of monte carlo method to simulating the fracture interconnectivity of rock mass[J]. Opencast Mining Technology, 2007, (1): 7-13.(in Chinese))
- [9] 贾洪彪, 唐辉明, 刘佑荣. 岩体结构面网络模拟技术研究进展[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 105-108.(JIA Hongbiao, TANG Huiming, LIU Yourong. Advanced in the study of rock discontinuity

- network modeling technique[J]. *Geological Science And Technology Information*, 2001, 20(1): 105–108.(in Chinese)
- [10] 龙治国, 刘佑荣, 倪恒. 岩体结构面网络模拟在滑坡中的应用[J]. *土工基础*, 2002, 16(4): 34–39.(LONG Zhiguo, LIU Yourong, NI Heng. Application of network simulation of discontinuities of rock mass on landslide[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2002, 16(4): 34–39.(in Chinese))
- [11] 王涛, 盛谦, 陈晓玲. 基于直接法节理网络模拟的三维离散单元法计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(10): 1 649–1 653.(WANG Tao, SHENG Qian, CHEN Xiaoling. 3D Discrete element method based on direct method of joint network simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(10): 1 649–1 653.(in Chinese))
- [12] 王志鹏. 节理裂隙网络模拟及其在地下工事稳定性分析中的应用[硕士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2012.(WANG Zhipeng. Joints network simulation and its application in the stability analysis of underground cavern[M. S. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2012.(in Chinese))
- [13] STONE D. Sub-surface maps predicted from borehole data: an example from the eye-dashwa pluton, Atikokan, Canada[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(1): 183–194.
- [14] HATTON C G, MAIN I G, MEREDITH P G. Non-universal scaling of fracture length and opening displacement[J]. *Nature*, 1967, 215(5102): 160–162.
- [15] VERMILYIE J M, SCHOLZ C. Relation between vein length and aperture[J]. *Journal of Structure Geology*, 1995, 17(3): 423–434.
- [16] ODLING N E. Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western norway[J]. *Journal of Structure Geology*, 1997, 19(10): 1 257–1 271.
- [17] HWALMANN T, MALTHE-SØRENSEN A, FEDER J, et al. Scaling relations for the lengths and widths of fractures[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(27): 5 393–5 396.
- [18] 刘泉声, 吴月秀, 刘滨. 应力对裂隙岩体等效渗透系数影响的离散元分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(1): 176–183.(LIU Quansheng, WU Yuexiu, LIU Bin. Discrete element analysis of effect of stress on equivalent permeability of fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(1): 176–183.(in Chinese))
- [19] MIN K B, JING L R. Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinct element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(6): 795–816.
- [20] WEI Z Q. permeability predictions for jointed rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(3): 251–261.
- [21] LONG J C S, REMER J S, WILSON C R, et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(3): 645–658.
- [22] 向文飞. 裂隙岩体表征单元体及力学特性尺寸效应研究[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉大学, 2005.(XIANG Wenfei. A study on the representative elementary volume of fractured rock masses and the size effects of mechanical properties[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.(in Chinese))
- [23] 张宜虎. 岩体等效水力学参数研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2006.(ZHANG Yihu. Equivalent hydro-mechanical parameters of rock mass[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2006.(in Chinese))
- [24] 张秀丽. 断续节理岩体破坏过程的数值分析方法研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.(ZHANG Xiuli. Study on numerical methods for modeling failure process of semicontinuous jointed rock mass[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.(in Chinese))
- [25] HAMM S Y, KIM M, CHEONG J Y, et al. Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite[J]. *Engineering Geology*, 2007, 92(1): 73–87.
- [26] RENSCHAW C, PARK J. Effect of mechanical interactions on the scaling of fracture length and aperture[J]. *Nature*, 1997, 386(6624): 482–484.
- [27] DREUZY J R DE, DAVY P, AND BOUR O. Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following power law distributions of length and aperture[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(12): 1–9.
- [28] BONNET E, BOUR O, ODLING N E, et al. Scaling of fracture systems in geological media[J]. *Reviews of Geophysics*, 2001, 39(3): 347–383.
- [29] JOURDE H, FENART P, VINCHES M, et al. Relationship between the geometrical and structural properties of layered fractured rocks and their effective permeability tensor: a simulation study[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 337(1/2): 117–132.
- [30] BAGHBANAN A, JING L R. Hydraulic properties of fractured rock mass with correlated fracture length and aperture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(5): 704–719.
- [31] NIREX L. The lithological and discontinuity characteristics of the Borrowdale Volcanic Group at the outcrop in the Craghouse Park and Latterbarrow areas[R]. Harwell, UK: [s. n.], 1997.
- [32] NIREX L. Evaluation of heterogeneity and scaling of fractures in the Borrowdale Volcanic Group in the Sellafield area[R]. Harwell, UK: [s. n.], 1997.
- [33] MIN K B. Fractured rock masses as equivalent continua—a numerical study[Ph. D. Thesis]. Sweden: KTH Land and Water Resources Engineering, 2004.
- [34] 吴月秀, 刘泉声, 卢海峰, 等. UDEC 中 Saeb-Amadei 节理本构模型的二次开发[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(增 1): 3 022–3 030.(WU Yuexiu, LIU Quansheng, LU Haifeng, et al. Implementation of saeb-amadei model into user-defined joint constitutive model in UDEC[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Supp.1): 3 022–3 030.(in Chinese))