

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.010

考虑基质渗透性的裂隙岩体 REV 变化机制研究

王扬扬, 钱家忠, 马雷, 骆乾坤

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 表征单元体 (representative elementary volume, REV) 的存在是使用等效连续方法的前提。文章基于三峡工程收集的裂隙几何参数, 利用蒙特卡洛方法对裂隙岩体进行 20 次随机模拟, 基于 COMSOL Multiphysics 的数值模型对裂隙岩体进行数值建模, 从生成的裂隙岩体几何模型中提取不同尺寸的计算域 (边长为 6~70 m, 每次间隔 4 m), 在不考虑基质渗透性和考虑基质渗透性情况下, 计算不同尺寸的裂隙岩体渗透率大小, 探究渗透率 REV 随裂隙隙宽的变化规律。研究表明: 不考虑基质渗透性时, REV 与裂隙隙宽无关; 考虑基质渗透性时, REV 随裂隙隙宽的增大呈现增大趋势; 考虑基质渗透性且裂隙隙宽很小时, 裂隙网络更倾向为均质介质, REV 很小, 裂隙隙宽越大, 流场非均质性越强, REV 也随裂隙隙宽增大而增大。该研究拓展了裂隙岩体的等效性范围, 为考虑基质渗透性时的裂隙岩体渗流研究提供了参考。

关键词: 裂隙网络; 裂隙基质系统; 尺度效应; 表征单元体 (REV); 渗透率

中图分类号: P641.135

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)07-0926-06

Study on the mechanism of REV variations in fractured rock masses with consideration of matrix permeability

WANG Yangyang, QIAN Jiazhong, MA Lei, LUO Qiankun

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The existence of the representative elementary volume (REV) is a prerequisite for using the equivalent continuum methods. This paper utilized the geometric parameters of fractures collected from the Three Gorges Project and conducted 20 random simulations of fractured rock masses using the Monte Carlo method. A numerical model of fractured rock masses was established based on COMSOL Multiphysics. Different-sized computational domains (ranging from 6 to 70 m with a 4-m increment) were extracted from the generated geometric model of fractured rock masses. The permeability values of fractured rock masses of different sizes and the variation pattern of permeability REV with changes in fracture aperture were calculated with and without consideration of matrix permeability. The research findings indicate that when matrix permeability is not considered, REV is independent of fracture aperture; when matrix permeability is considered, REV tends to increase with the enlargement of fracture aperture. In cases where matrix permeability is considered and fracture apertures are small, the fracture network tends to behave as a homogeneous medium with a small REV. As the fracture aperture increases, the heterogeneity of the flow field becomes stronger, and REV also increases. This study expands the range of equivalency for fractured rock masses and provides reference for studying fluid flow in fractured rock masses when considering matrix permeability.

Key words: fracture network; fracture matrix system; scale effect; representative elementary volume (REV); permeability

收稿日期: 2023-04-20; 修回日期: 2023-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41831289; 42102283); 国家自然科学基金联合基金资助项目 (U2267218)

作者简介: 王扬扬 (1997—), 男, 安徽萧县人, 合肥工业大学硕士生;

钱家忠 (1968—), 男, 安徽凤阳人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: qianjiazhong@hfut.edu.cn.

0 引 言

理解裂隙岩体的渗流特性对于地下工程安全至关重要,如二氧化碳封存、核废料处置、地下水污染防治等。由于裂隙岩体强烈的非均质性,裂隙岩体中的水流运动十分复杂,给裂隙岩体的渗流研究带来了巨大困难。在实际研究中,为了简化计算,一般采用等效多孔介质模型(equivalent porous model, EPM),将裂隙岩体视为多孔介质来计算裂隙岩体的水力参数^[1-2],大量的工程应用实例已获得较好的经济效果^[3]。然而,等效连续方法在裂隙岩体的研究中并不总是适用^[4]。因此,对裂隙岩体等效多孔介质模型的适用性研究具有重要的工程实际意义。

使用 EPM 的一个重要前提就是裂隙岩体中存在渗流的表征单元体(representative elementary volume, REV)^[5-6]。REV 最早是文献[7]在研究土体渗流时提出的,文献[6]将 REV 引入到裂隙岩体的渗流研究中。对于某一裂隙岩体,随着岩体体积增加,岩体水力参数会发生改变,直到到达某一临界体积,之后水力参数保持稳定,这一临界体积就被称为裂隙岩体水力参数的 REV。在 REV 尺度上测得的水力参数可以代表整个研究区。因此,为研究 EPM 的适用性,首先要研究 REV 的特性。在裂隙岩体的渗流研究中,目前已经确定裂隙岩体水力参数的 REV 与裂隙岩体的几何参数有密切联系,如裂隙岩体水力参数的 REV 会随裂隙的迹长增大而减小^[8-9],随裂隙的间距增大而增大^[10],随裂隙网络的密度增大而减小^[1,11],并且裂隙的方向角^[12-13]以及裂隙的粗糙度^[1]都会对裂隙岩体水力参数的 REV 产生影响。

然而,绝大部分对裂隙岩体 REV 的研究都采用不考虑基质渗透性^[5,12]的离散裂隙网络模型(discrete fracture network, DFN),忽略基质渗透性的影响。文献[14]发现在不同风化条件下的天然花岗岩的渗透系数差异可以达到数个量级,强风化花岗岩的渗透率远远比之前研究所假设的大得多。而且,砂岩这种基质渗透性较好的岩体中,基质渗透性的影响仍然常被忽略^[15]。对基质渗透作用的忽略会导致对裂隙岩体水力参数计算存在误差,也会对裂隙岩体 REV 的计算产生错误估计。同时地下应力变化会导致裂隙隙宽发生剧烈变化,尤其是在考虑基质渗透性时,REV 随裂隙隙宽的变化规律也不明确。

本研究基于同时考虑裂隙和基质双重渗流的离散裂隙基质(discrete fracture matrix, DFM)模型,以中国三峡工程现场收集的裂隙几何参数为基础,基于蒙特卡洛方法构建随机裂隙网络,利用有限元多物理场软件 COMSOL Multiphysics 对不同尺寸的裂隙网络进行数值模拟,探究在考虑与不考虑基质渗透性情况下,裂隙岩体的渗透率随裂隙隙宽的变化规律及影响原因为高渗透基质的裂隙岩体等效渗透性研究提供参考。

1 裂隙岩体的几何和数值建模

裂隙岩体包括裂隙网络和基质 2 个系统。其中,基质通常不需要单独的几何建模,而裂隙网络使用蒙特卡洛方法进行几何建模。

1.1 基于蒙特卡洛的随机裂隙网络生成方法

二维裂隙网络生成示意图如图 1 所示。由图 1 可知,二维情况下,组成裂隙网络的单元单裂隙可用单裂隙位置、迹长、方向角、裂隙隙宽这 4 个参数描述,通常假定这些几何参数在宏观上服从一定的数学分布,根据野外收集的裂隙数据并结合数学分析,使用蒙特卡洛方法生成每条裂隙几何参数,从而对野外场地的裂隙岩体进行仿真。

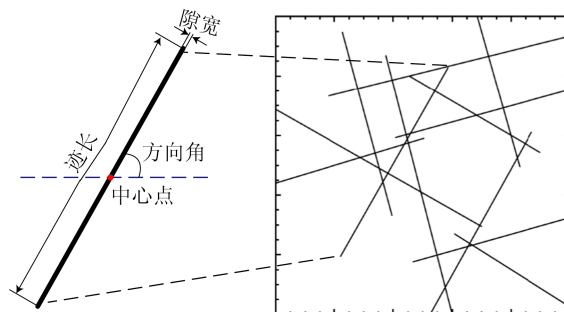


图 1 二维裂隙网络生成示意图

本研究使用的裂隙网络几何参数来自中国三峡工程^[16],裂隙网络几何参数详情见表 1 所列。从表 1 可以看出,裂隙的迹长服从对数正态分布,裂隙的方向角服从正态分布,裂隙中心点在模拟范围内服从均匀分布。

表 1 中国三峡工程采集的裂隙网络几何参数

裂隙 分组	方向角/(°)		迹长/m		裂隙隙 宽/mm	密度/ m ⁻²
	均值	方差	均值	方差		
1	332.5	7.5	5.63	0.45	0.27	0.35
2	17.5	6.5	4.53	0.35	0.27	0.17
3	57.5	13.0	3.82	0.82	0.27	0.11
4	285.5	13.5	4.54	0.22	0.27	0.08

1.2 裂隙岩体渗流的数值建模

DFM 模型可以同时考虑裂隙网络与基质中的流体流动,在裂隙岩体流体流动的模拟中得到广泛应用^[17-19]。本研究基于 COMSOL Multiphysics 对建立的裂隙岩体模型进行流场的数值模型构建,为便于分析,假设基质为均质各向同性介质,流体在岩石基质和裂隙中的流动都服从达西定律。

1.2.1 裂隙岩体中基质中的水流模拟

假设岩石基质为均质且各向同性,在不考虑重力作用的情况下,基质中水流动服从达西定律:

$$\mathbf{u}_m = -\frac{k_m}{\mu} \nabla p \quad (1)$$

其中: \mathbf{u}_m 为流速; k_m 为基质渗透率; ∇p 为基质中的流体压力梯度; μ 为水的动力黏滞系数。

假设流体和岩石基质不可压缩,基质中流体稳态流动的连续性方程可以描述为:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_m) = q_m \quad (2)$$

其中: ρ 为流体密度; q_m 为渗流过程中的源汇项。

1.2.2 裂隙岩体中裂隙的水流模拟

裂隙在裂隙岩体中常常作为没有厚度的单元仅进行数学求解^[20],可以有效降低计算量^[21],单裂隙中裂隙渗透率与裂隙隙宽为二次方关系,即

$$k_f = \frac{d_f^2}{12} \quad (3)$$

其中: k_f 为裂隙的渗透率; d_f 为裂隙隙宽。

裂隙与基质由于水头差会产生流量交换,耦合基质后,裂隙中水流的连续性方程为:

$$\nabla_T \cdot \left(-d_f \frac{k_f}{\mu} \nabla_T p \right) = q_f + q_{mf}^{up} + q_{mf}^{bottom} \quad (4)$$

其中: q_f 为裂隙系统中的流量; q_{mf}^{up} 和 q_{mf}^{bottom} 为基质与裂隙在交界处的交换通量(裂隙与基质之间的流量交换)。

$$q_{mf}^{up} = -\frac{k_f}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n_{up}} \quad (5)$$

$$q_{mf}^{bottom} = -\frac{k_f}{\mu} \frac{\partial p}{\partial n_{bottom}} \quad (6)$$

由于裂隙上、下边界都与基质存在通量交换, q_{mf}^{up} 和 q_{mf}^{bottom} 分别为基质与裂隙上边界和下边界的流量交换通量。

1.2.3 裂隙岩体等效渗透率计算

稳态饱和水流的数值模拟可用于研究考虑基质渗透性裂隙岩体的流体流动特性以及评价裂隙岩体的渗透性。在裂隙隙宽与基质的渗透率已知的情况下,结合相应的边界条件,有限元解的整体离散化方程可以表示为:

$$\mathbf{K}_p \mathbf{P} = \mathbf{Q}_p \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_p = \sum_{e=1}^n \iint_{\Omega_m} \nabla N_m^T k_m \nabla N_m d\Omega_m + \int_{\Omega_f} \nabla_T N_f^T k_f d_f \nabla_T N_f d\Omega_f \quad (8)$$

$$\mathbf{Q}_p = \sum_{e=1}^n \mathbf{Q}_p^e = \sum_{e=1}^n \iint_{\Gamma} N_m^T q d\Gamma \quad (9)$$

其中: Ω_m 、 Ω_f 和 N_m 、 N_f 分别为裂隙岩体基质、裂隙的域和形状函数; Γ 为 Ω_m 和 Ω_f 的交界面; e 为矩阵元素^[17]。

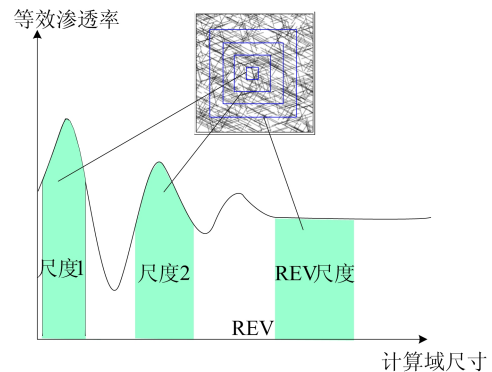
将式(8)、式(9)代入式(7),通过求解方程组得到裂隙岩体的水头分布,裂隙岩体的等效渗透率可以表示为:

$$\frac{1}{V} \left(\int_{\Omega_m} \mathbf{u}_m d\Omega_m + \int_{\Omega_f} \mathbf{u}_f d\Omega_f \right) = \frac{k_{eff}}{\mu} \frac{1}{V} \left(\int_{\Omega_m} \nabla p_m d\Omega_m + \int_{\Omega_f} \nabla p_f d\Omega_f \right) \quad (10)$$

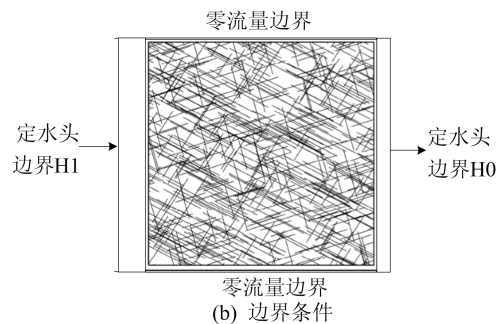
其中: V 为裂隙岩体的体积(二维情况下为面积); k_{eff} 为等效渗透率。

2 裂隙岩体 REV 计算方法

REV 的确定至关重要,其意味着实验或原位测量的水力参数是否可代表整个研究区。针对渗透率,裂隙岩体的 REV 计算原理如图 2 所示。



(a) 裂隙岩体渗透率REV示意图



(b) 边界条件

图 2 裂隙岩体 REV 计算示意图

由图 2 可知,在适当的边界条件下,计算得到的裂隙岩体等效渗透率在尺度较小时(如图 2 中的尺度 1),随计算域的尺寸会出现剧烈的波动,并且波动幅度随计算域尺寸增大而逐渐减小(如图 2 中的尺度 2),直到达到一个尺度后,随着尺度继续增大,裂隙岩体渗透率基本稳定且随尺度变化不大,此时裂隙岩体的尺度就被称为 REV 尺度,REV 尺度的起点被称作 REV。

为确定裂隙岩体的 REV,本文基于表 1 的裂隙几何参数对裂隙网络进行 20 个随机实现,为避免边界效应影响,生成的裂隙网络边长为 120 m,以渗透率张量的分量 k_{xx} 为研究对象,基于图 2 的方法对每个随机实现的裂隙网络提取不同尺寸的计算域进行 k_{xx} 计算,计算域从 6 m×6 m 变化到 70 m×70 m,计算域尺寸的每次变化间隔为 4 m。不考虑基质渗透性时, k_{xx} 的计算结果如图 3 所示。

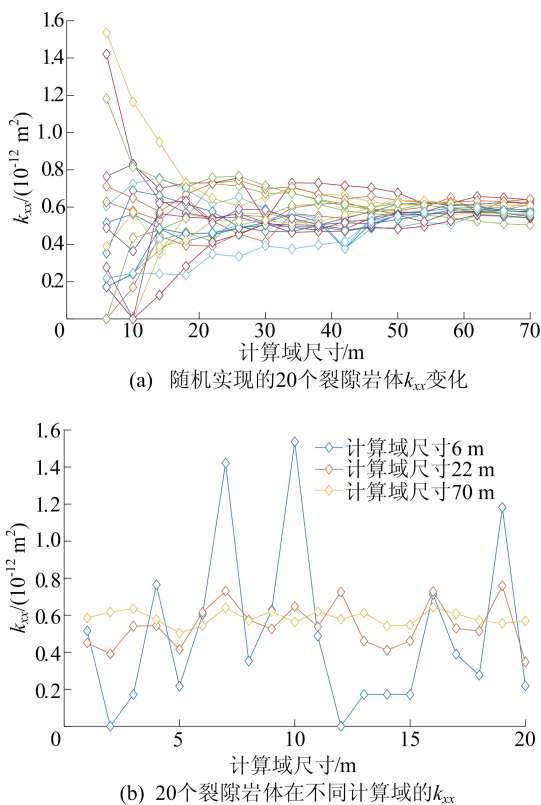


图 3 随机实现的 20 个裂隙岩体的 k_{xx} 随计算域尺寸的变化

由图 3a 可知,随机实现的 20 个裂隙岩体的 k_{xx} 都随着计算域尺寸的增大从变化剧烈到逐渐平稳,在计算域尺寸较小时,所有裂隙岩体的 k_{xx} 随计算域尺寸增大起伏很大,随着计算域尺寸的不断增大, k_{xx} 随计算域尺寸的起伏幅度逐渐减弱,在计算域尺寸的后段, k_{xx} 变化幅度已经比较

平缓。由图 3b 可知:计算域尺寸较小时,随机实现的 20 个裂隙岩体的 k_{xx} 变异性很大;当计算域尺寸为 6 m 时,20 个实现的裂隙岩体 k_{xx} 的变异性极大,随着计算域尺寸增大,不同裂隙岩体 k_{xx} 的变异性逐渐减小;当计算域尺寸为 22、70 m 的裂隙岩体 k_{xx} 的变异性依次减小,由此可见,随机实现的裂隙岩体 k_{xx} 的变异性可以较好地描述裂隙岩体渗透率的尺度效应,因此可以使用无量纲的变异系数作为到达 REV 的判据。

由于蒙特卡洛方法对裂隙岩体的每个实现都可以视作真实裂隙岩体的局部表示,以渗透率来说,如果裂隙岩体的多个随机实现计算的渗透率之间的差异在可接受的范围内,那么就可以被视为此时的渗透率可以在整个区域适用,此时的计算域尺寸即 REV 尺寸,在本研究中,当 20 个裂隙岩体的 k_{xx} 的变异系数小于 5% 时,判定此时到达 REV^[17]。变异系数的计算公式为:

$$C_v = \frac{\varphi_i}{\bar{k}_i} \quad (11)$$

其中: C_v 为无量纲的变异系数; \bar{k}_i 为第 i 个尺寸裂隙岩体 k_{xx} 的平均值; φ_i 为第 i 个尺寸裂隙岩体 k_{xx} 的标准差。

3 REV 随裂隙隙宽的变化规律研究

为探究考虑与不考虑基质渗透性情况下裂隙隙宽对 REV 的影响规律,本文计算了在 4 种裂隙隙宽下考虑与不考虑基质渗透性的裂隙岩体 k_{xx} 的变异系数和 REV,裂隙被假设为光滑平行板,裂隙隙宽大小分别为 0.027、0.270、0.540、1.080 mm。以文献[14]测量的强风化花岗岩的渗透率($2.36 \times 10^{-12} \text{ m}^2$)作为基质渗透率,其变异系数随计算域尺寸的变化如图 4 所示。

由图 4a 可知,不考虑基质渗透性时,4 种裂隙隙宽的 k_{xx} 变异系数几乎没有差异,在放大大次后,4 种裂隙隙宽的 k_{xx} 变异系数才出现了细微变化。在裂隙岩体的边长为 60 m 时,4 种裂隙隙宽的裂隙岩体 k_{xx} 变异系数首次降到 5% 以下,由此可知,不考虑基质渗透性时,4 种裂隙隙宽的裂隙岩体的 REV 都为 60 m,裂隙隙宽对裂隙岩体渗透率的 REV 几乎没有影响,结果与文献[9]的研究结果一致,在不考虑基质渗透性时,不同裂隙隙宽的裂隙岩体渗透率随尺度的变化规律完全一致,岩体的 REV 不受影响。

由图 4b 可知:在考虑基质渗透性时,裂隙隙宽为 0.027 mm 的裂隙岩体的 k_{xx} 变异系数在计

算域尺寸为 6 m 时就小于 5%，裂隙岩体的 REV 小于 6 m；裂隙隙宽为 0.270 mm 时， k_{xx} 的变异系数在 18 m 时首次降低至 5% 以下，之后也一直小于 5%，因此裂隙隙宽为 0.270 mm 时的裂隙岩体的 REV 为 18 m；裂隙隙宽为 0.540 mm 时， k_{xx} 的变异系数在 33 m 时首次降低至 5% 以下，之后也一直小于 5%，因此裂隙隙宽为 0.270 mm 的裂隙岩体 REV 为 33 m；裂隙隙宽为 1.080 mm 时， k_{xx} 的变异系数在 59 m 时首次降低至 5% 以下，之后也一直小于 5%，因此当裂隙隙宽为 1.080 mm 裂隙岩体的 REV 为 59 m。

不考虑基质渗透性时，REV 与裂隙隙宽无关，但是在考虑基质渗透性后，REV 会受到裂隙隙宽的明显影响，并且裂隙隙宽越小，REV 受到的影响越大，REV 与裂隙隙宽有明显的正相关关系。因此，在研究区岩体基质渗透性较强时，有必要根据调查的裂隙隙宽大小来考虑是否能使用等效多孔介质模型计算岩体水力参数。

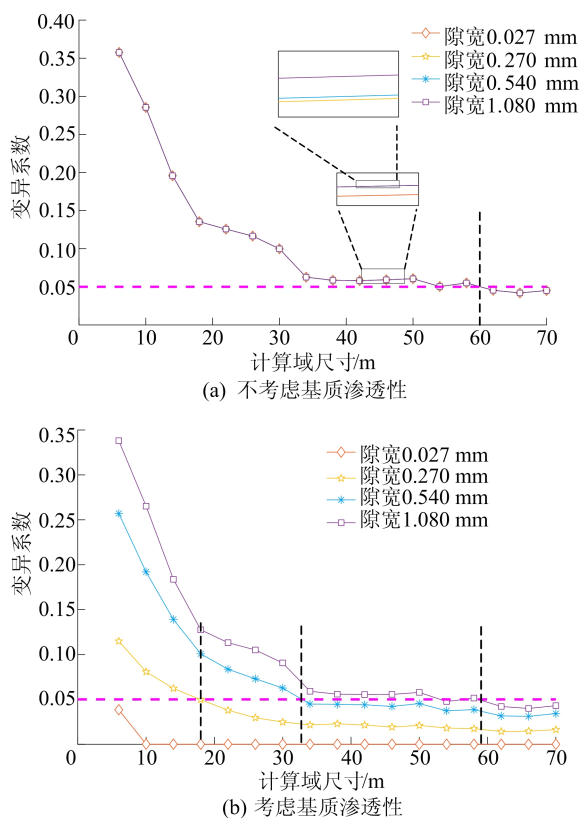


图 4 k_{xx} 变异系数随计算域尺寸的变化

4 考虑基质渗透性时 REV 变化原因分析

为进一步探究裂隙隙宽在考虑基质渗透性时 REV 随裂隙隙宽变化的原因，绘制了计算域尺寸

为 10 m 的 4 种裂隙隙宽在考虑基质渗透性条件下的流场图，如图 5 所示。

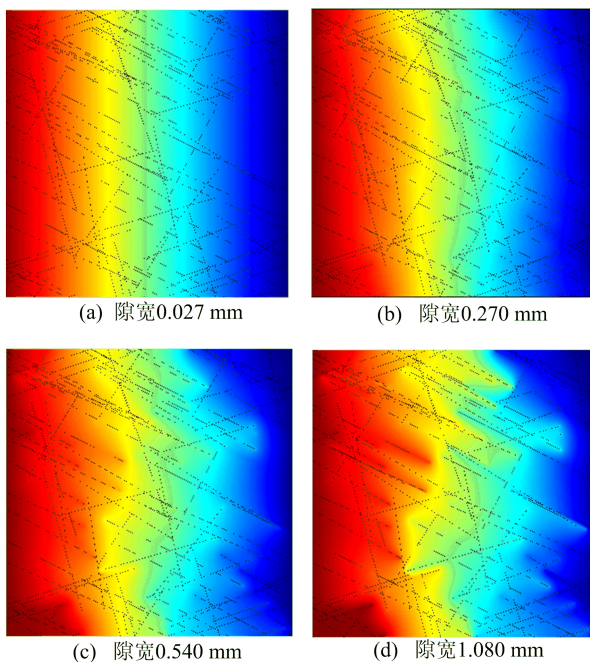


图 5 考虑基质渗透性时的裂隙岩体流场图

从图 5 可以看出：考虑基质渗透性时，裂隙隙宽为 0.027 mm 的裂隙岩体流场非常均匀，裂隙对流场的影响不大，水流主要在基质中流动，裂隙隙宽较小，裂隙对渗透率的贡献很小；裂隙岩体更倾向于均质介质，因此 REV 很小；随着裂隙隙宽的增大，裂隙对流场的影响也越来越明显，流场的非均质性也越来越强，裂隙岩体从裂隙隙宽很小的类均质介质转变为非均质性越来越强的非均质介质，因此 REV 也越来越大，裂隙隙宽的减小导致流场更加均匀，进一步使 REV 越来越小。

5 结 论

本文借助有限元多物理场软件 COMSOL Multiphysics 中的数值模型，对考虑基质渗透性的裂隙岩体的等效渗透性进行研究，阐述了裂隙岩体 REV 的计算方法，在不考虑与考虑基质渗透性情况下，以渗透率张量的分量 k_{xx} 为例，对裂隙岩体 REV 随裂隙隙宽的变化进行研究，得出以下主要结论：

- 1) 不考虑基质渗透性时，REV 与裂隙隙宽无关，所有裂隙隙宽的裂隙岩体 REV 尺寸都相同。
- 2) 考虑基质渗透性时，REV 随裂隙隙宽的增大呈现出增大的趋势，因此，在研究区岩体基质

渗透性较强时,有必要根据调查的裂隙隙宽大小来考虑是否能使用等效多孔介质模型计算岩体水力参数。

3) 考虑基质渗透性且裂隙隙宽很小时,裂隙对场的影响很小,裂隙岩体更倾向为均质介质,导致 REV 很小,裂隙隙宽越大,流场的非均质性越强,因此,REV 也随裂隙隙宽增大而增大。

[参 考 文 献]

- [1] 黄庭威. 裂隙岩体 REV 尺寸及等效渗透系数影响因素研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [2] 钱家忠,杨立华,李如忠,等. 基岩裂隙系统中地下水运动物理模拟研究进展[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2003,26(4):510-513.
- [3] ODA M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. *Water Resources Research*,1986,22(13):1845-1856.
- [4] 宋晓晨. 裂隙岩体渗流非连续介质数值模型研究及工程应用[D]. 南京:河海大学,2004.
- [5] WANG Z C,LI W,BI L P,et al. Estimation of the REV size and equivalent permeability coefficient of fractured rock masses with an emphasis on comparing the radial and unidirectional flow configurations[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,2018,51(5):1457-1471.
- [6] LONG J R J,WILSON C. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures[J]. *Water Resources Research*,1982,18(3):645-658.
- [7] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York:Elsevier Pub Co.,1972.
- [8] KULATILAKE P H S W,PANDA B B. Effect of block size and joint geometry on jointed rock hydraulics and REV[J]. *Journal of Engineering Mechanics*,2000,126(8):850-858.
- [9] 荣冠,周创兵,王恩志. 裂隙岩体渗透张量计算及其表征单元体积初步研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2007,26(4):740-746.
- [10] XIA L,ZHENG Y H,YU Q C. Estimation of the REV size for blockiness of fractured rock masses[J]. *Computers and Geotechnics*,2016,76:83-92.
- [11] 王振伟,马克,田洪圆,等. 基于 RFPA^{2D}-Flow 软件对裂隙岩体渗透特性表征单元体的研究[J]. *煤炭学报*,2019,44(10):3012-3021.
- [12] 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.
- [13] WANG X S,JIANG Y J,LIU R C,et al. A numerical study of equivalent permeability of 2d fractal rock fracture networks[J]. *Fractals*,2020,28(1):2050014.
- [14] 张翼宇,黄志全,赵菲,等. 风化花岗岩矿物组成与渗透特性相关性研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*,2022,43(1):103-108.
- [15] MULLER C,SIEGESMUND S,BLUM P. Evaluation of the representative elementary volume (REV) of a fractured geothermal sandstone reservoir[J]. *Environmental Earth Sciences*,2010,61(8):1713-1724.
- [16] 王肖珊. 岩体裂隙网络的渗流计算及分形特性研究[D]. 济南:山东大学,2014.
- [17] CHENG Z C,WANG L,XU W Y,et al. Numerical investigation of the flow characteristics and permeability of 2D irregular columnar jointed rock masses[J]. *Engineering Computations*,2021,38(10):4091-4110.
- [18] AZIZMOHAMMADI S,MATTHAI S K. Is the permeability of naturally fractured rocks scale dependent? [J]. *Water Resources Research*,2017,53(9):8041-8063.
- [19] 马利成,唐汝众,全兴华,等. 孔隙-裂隙双重变形介质中的油水两相流动理论研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*,2007,30(1):95-99.
- [20] 罗璨璨,宋俊,尚高增,等. 一种裂隙-连续介质的耦合渗流计算方法[J]. *水利与建筑工程学报*,2018,16(6):82-86,98.
- [21] LI X X,LI D Q,XU Y. Modeling the effects of microcracks on water permeability of concrete using 3D discrete crack network[J]. *Composite Structures*,2019,210:262-273.

(责任编辑 吴 亮)