

基于四参数随机生长法重构土体的格子玻尔兹曼细观渗流研究

蔡沛辰, 阙云, 蒋振梁, 杨鹏飞

Lattice Boltzmann meso-seepage research of reconstructed soil based on the quartet structure generation set

CAI Peichen, QUE Yun, JIANG Zhenliang, and YANG Pengfei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

颗粒形状对粗粒土剪切变形影响的细观研究

A meso-scale study of the influence of particle shape on shear deformation of coarse-grained soil

魏婕, 魏玉峰, 黄鑫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 114-122

预制裂隙岩样宏细观力学行为颗粒流数值模拟

Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of the prefabricated fractured rock sample

王星辰, 王志亮, 黄佑鹏, 贾帅龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 86-92

典型地貌区原状黄土孔隙细观特征研究

Research on pore microscopic characteristics of undisturbed loess in typical geomorphologies

刘钊钊, 钟秀梅, 张洪伟, 高中南, 梁收运, 王谦 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 148-148

渗透率对干热岩开采过程储层变化规律的影响

崔翰博, 唐巨鹏, 姜昕彤 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 171-180

颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil

丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108-108

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106036

蔡沛辰, 阙云, 蒋振梁, 等. 基于四参数随机生长法重构土体的格子玻尔兹曼细观渗流研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 33-42.

CAI Peichen, QUE Yun, JIANG Zhenliang, *et al.* Lattice Boltzmann meso-seepage research of reconstructed soil based on the quartet structure generation set[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 33-42.

基于四参数随机生长法重构土体的格子玻尔兹曼 细观渗流研究

蔡沛辰¹, 阙云¹, 蒋振梁^{1,2}, 杨鹏飞¹

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 香港科技大学土木与环境工程系, 中国香港 999077)

摘要: 多孔介质模型的重构问题是土体细观渗流机理研究的基础和关键。由四参数随机生长法 (QSGS) 构建土体模型, 采用格子玻尔兹曼方法 (LBM), 通过 MATLAB 自编程序研究重构土在不同条件下的细观渗流机理。结果表明: 随模型尺寸增大, 孔隙连通程度显著提高, 300×300 格点大小的模型连通孔隙率增长幅度 (34.38%) 最大, 继续扩大模型尺寸发现增加不明显; 流体粒子在孔隙连通性好、孔径大的区域, 会形成主渗流通道, 且存在指进效应, 孔道中间流速最大, 可达 0.032 4, 越靠近孔壁流速越小; 大孔隙率土的流速比小孔隙率土大, 而低孔隙率土中的流速相比大孔隙土更稳定; LBM 模拟渗透率与经典 K-C 公式计算结果对比发现, 孔隙率越高计算渗透率越准确 ($n=0.78$, 误差为 10.22%); 土颗粒越小, 渗流孔道越细窄、分布越密集, 对应的速度场分布更为均匀, 同时流速也更小。该研究成果能较好地揭示重构土的细观渗流机理, 也可为现有细观土体孔隙流研究提供一定借鉴。

关键词: 格子玻尔兹曼; 细观渗流; 四参数随机生长法; 土颗粒大小; 渗透率

中图分类号: P642.11⁺5; O357.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0033-10

Lattice Boltzmann meso-seepage research of reconstructed soil based on the quartet structure generation set

CAI Peichen¹, QUE Yun¹, JIANG Zhenliang^{1,2}, YANG Pengfei¹

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 2. Department of Civil & Environmental Engineering, Hong Kong University of Science & Technology, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Reconstruction of the porous media model is the basis and key to the study of the meso-seepage mechanism of soil. The soil models are constructed by the quartet structure generation set (QSGS), and the lattice Boltzmann method (LBM) is used to examine the meso-seepage mechanism of the reconstructed soil under different conditions through MATLAB self-programming. The results show that the degree of pore connectivity increases significantly as the model size increases. The 300×300 grid size model has the largest increase in the connected porosity (34.38%). If the model size continues to be expanded, the increase is not obvious. Fluid particles can form the main seepage channel in the area with good pore connectivity and large pore size, and there

收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-07-19

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772297)

第一作者: 蔡沛辰 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事细观渗流研究。E-mail: peichen_fut@qq.com

通讯作者: 阙云 (1980-), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤渗流方面的研究和教学。E-mail: queyun_2001@fzu.edu.cn

is a fingering effect. The flow velocity in the middle of the pore channel is the largest, up to 0.0324. The flow velocity is getting smaller and smaller when it gets closer and closer to the pore wall. The velocity of the large porosity soil is larger than that of the small porosity soil, and the velocity of the low porosity soil is more stable than that of the large porosity soil. Comparing the calculation results of LBM simulation permeability with those of the typical K-C formula, it is found that the higher the porosity, the more accurate the calculation of permeability ($n=0.78$, the error is 10.22%). The smaller the soil particles, the narrower the seepage channels and the denser the distribution. The corresponding velocity field distribution is more uniform, and the flow velocity is also smaller. The research results can better reveal the meso-seepage mechanism of the reconstructed soil, and can also provide a certain reference for the existing meso-soil pore flow research methods.

Keywords: Lattice Boltzmann; meso-seepage; quartet structure generation set; soil particle size; permeability

流体在多孔介质中的流动现象称为渗流, 其涉及众多领域, 包括生物医学、能源开采、岩土工程等^[1-4]。渗流研究多采用宏观试验手段分析试验数据与结果间的关系, 进而建立渗流方程描述土体的渗流规律, 但这类研究无法直观地描述孔隙结构与渗流特性之间的内在关系^[5-6]。因此, 采用数值模拟方法研究流体流动过程对揭示渗流机理尤为必要。

多孔介质土体的重构问题是细观渗流模拟研究中最重要的一步, 目前多孔介质模型的生成主要有^[7-11]: 退火法、硬球 Monte-Carlo 法、球体沉降法、分数布朗运动法和随机生长法等。QSGS 通过控制 4 个参数 (分布概率、生长概率、概率密度、孔隙率) 构建多孔介质细观结构, 重构的结构形状各异, 与实际土体类似, 并可与格子玻尔兹曼方法 (LBM) 平顺结合到一起, 实现渗流场仿真模拟^[12-13]。LBM 方法最早在 1989 年由 McNamara 等^[14] 提出, 随后迅速在流体力学领域发展起来, 具有程序易于实现, 可以并行计算等优点^[15]。国内外众多学者^[12-13,16] 采用 QSGS-LBM 方法研究重构多孔介质模型孔隙渗流问题。以上研究均未涉及细观尺度渗流仿真最优代表性模型尺寸的选取问题, 而 LBM 方法最大的挑战是运算费时和需要巨大内存^[17], 确定最优仿真模型尺寸对于平衡模型尺寸大小与计算机内存容量及运行速度间的矛盾十分重要。

本文基于 QSGS 方法生成细观土体模型, 采用 LBM 方法进行渗流场数值模拟, 直观展现各孔隙区域内渗流速度及流线分布情况, 并探讨分析模型尺寸、孔隙结构、孔隙率及土颗粒大小对重构土细观渗流特性的影响情况。

1 土体细观结构表征及构建

1.1 细观结构表征

土体作为多孔介质材料, 一般可分为土体颗粒与

孔隙区域, 空间分布表达式为^[13]:

$$G(x) = \begin{cases} 1, & x \text{ 位于土体固相中} \\ 0, & x \text{ 位于土体孔隙中} \end{cases}$$

$$\langle G(x) \rangle = n \quad (1)$$

式中: $G(x)$ ——随机变量, 表征孔隙分布情况;

x ——土体中某一点所处的位置;

$\langle \rangle$ ——统计平均值;

n ——土体孔隙率。

1.2 四参数随机生长法

四参数随机生长法^[18] (Quartet structure generation set, QSGS) 可通过分布概率 p_c 、生长概率 p_d 、概率密度 p_i^s 和孔隙率 n 来控制土体多孔介质细观结构的生成, 其中 p_i^s 表示在 i 方向上第 r 相在第 s 相上的生长概率, 适用于各相间相互作用的模型中。令固体颗粒为生长相, 孔隙为非生长相, 重构过程如下:

(1) 在空间中按照一定分布概率 p_c 随机布置固相, 此分布概率须小于设置的孔隙率 n ;

(2) 在二维空间中, 按照一定生长概率 p_d , 令分布的固相单元向 8 个方向的相邻点生长, 见图 1;

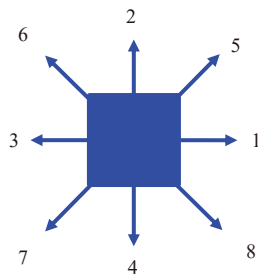


图 1 QSGS 生长相生长方向

Fig. 1 Growth direction of the QSGS growth phase

(3) 重复上述步骤, 直到生长相达到设定孔隙率 n 时, 停止生长, 即 QSGS 重构多孔介质模型完成。

分别控制分布概率 $p_c=0.01$ (大颗粒)、 $p_c=0.05$ (中颗

粒), $p_c=0.10$ (小颗粒), 孔隙率 $n=0.36, 0.50, 0.64$, 各向生长概率 $p_{d1-4}=p_{d5-8}=0.01$, 经过生长, 可得到不同孔

隙率下 300×300 格点大小的二维细观土体结构, 结果见图 2(以 $p_c=0.01$ 为例)。

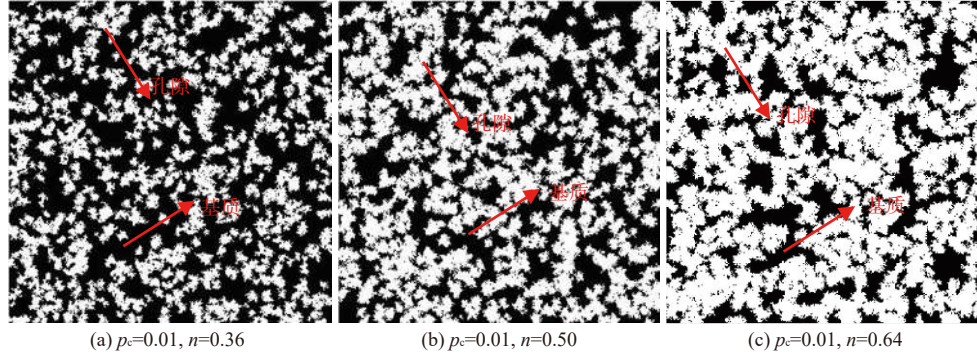


图 2 QSGS 重构细观土体结构 (以 $p_c=0.01$ 为例)

Fig. 2 QSGS reconstruction of the meso-soil structure ($p_c=0.01$ is taken as an example)

2 格子 Boltzmann 模型

2.1 格子 Boltzmann 方程

格子 Boltzmann 方程是 Boltzmann-BGK 方程的一种特殊离散形式^[19], 可通过求解时间 t 、位置 ω 处粒子分布函数 $F(\omega, t)$ 的离散 Boltzmann 方程推导出 Navier-Stokes 方程, 从细观尺度模拟流体流动的规律^[20]。不含有外力项时, 粒子分布函数 $F(\omega, t)$ 的演化可以通过离散的格子 Boltzmann 方程表示:

$$F_\alpha(\omega + \mathbf{e}_\alpha \delta_t, t + \delta_t) = F_\alpha(\omega, t) - \frac{F_\alpha(\omega, t) - F_\alpha^{\text{eq}}(\omega, t)}{\tau} \quad (2)$$

式中: $F_\alpha(\omega, t)$ —— t 时刻在格点 ω 处沿 α 方向的粒子分布函数;

$\mathbf{e}_\alpha$ ——离散速度;

δ_t ——离散时间;

τ ——无量纲的弛豫时间;

$F_\alpha^{\text{eq}}(\omega, t)$ ——离散速度空间的局部平衡态分布函数。

2.2 格子 Boltzmann 基本模型

格子 Boltzmann 模型一般由格子 (离散速度模型)、平衡态分布函数及分布函数的演化方程组成^[21]。Qian 等^[22]提出的 DdQm 系列模型是格子 Boltzmann 方法的基本模型, 其中 d 表示维度, m 表示离散速度个数。本文选择的模型是最为常用的 D2Q9 模型, 如图 3 所示。

D2Q9 模型共有 9 个运动方向, 离散速度 $\mathbf{e}_\alpha$ 满足:

$$\mathbf{e}_\alpha = c \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$c = \delta_x / \delta_t$

式中: c ——格点速度;

δ_x ——网格步长, 通常取为 1;

δ_t ——时间步长, 通常取为 1。

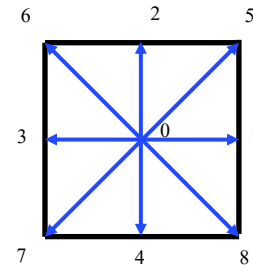


图 3 D2Q9 模型

Fig. 3 The D2Q9 model

D2Q9 模型的权系数 w_α 配置为:

$$w_\alpha = \begin{cases} \frac{4}{9}, & \alpha=0 \\ \frac{1}{9}, & \alpha=1,2,3,4 \\ \frac{1}{36}, & \alpha=5,6,7,8 \end{cases} \quad (4)$$

DdQm 系列模型平衡态分布函数可表示为:

$$F_\alpha^{\text{eq}} = \rho w_\alpha \left[1 + \frac{\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})^2}{2c_s^4} - \frac{\mathbf{u}^2}{2c_s^2} \right] \quad (5)$$

式中: c_s ——格子声速, c_s^2 取值为 $c^2/3$;

ρ ——密度;

w_α ——权系数;

$\mathbf{u}$ ——宏观速度。

采用文献 [23] 中 Chapman-Enskog 展开方法, 推导 LBE 基本模型对应的流体力学中的 Navier-Stokes 方程。模型的宏观密度 ρ 、速度 $\mathbf{u}$ 、压力 p 及黏滞系数 ν 与无量纲弛豫时间 τ 之间关系为:

$$\rho = \sum_{\alpha=0}^8 F_\alpha \quad (6)$$

$$\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=0}^8 F_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha} \quad (7)$$

$$p = \rho c_s^2 \quad (8)$$

$$\nu = c_s^2 \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \delta_t \quad (9)$$

2.3 边界条件处理

文中采用标准反弹格式^[24]模拟渗流过程中土体固体颗粒与流体间无滑移的流动行为。其基本思想是:自流体节点 $(\alpha-1, t)$ 入射到边界及节点 (α, t) 的分布函数 $F_{\alpha 1}$, 发生碰撞后即原路返回, 由此获得节点 (α, t) 上的 $F_{\alpha 0}$, 其他节点类似。即分布函数可表示为:

$$F_{\alpha 0}(x_b, t) = F_{\alpha 1}(x_f, t) \quad (10)$$

$$x_f = x_b - \mathbf{e}_{\alpha} \delta_t$$

式中: $\alpha 1$ ——指向壁面的方向;

$\alpha 0$ —— $\alpha 1$ 的反方向;

x_b ——固体壁面格点;

x_f ——流体格点。

对于土体渗流的压力边界, 采用 Guo 等^[25]提出的非平衡态外推格式。其基本思想是:将边界节点上的分布函数分解为平衡态 $F_{\alpha}^{\text{eq}}(O, t)$ 和非平衡态 $F_{\alpha}^{\text{neq}}(O, t)$ 两部分, O 表示边界上的格子。其中, 平衡态部分由边界条件定义可得, 而非平衡态部分需用非平衡外推确定:

$$\begin{cases} F_{\alpha}(O, t) = F_{\alpha}^{\text{eq}}(O, t) + F_{\alpha}^{\text{neq}}(O, t) \\ F_{\alpha}^{\text{neq}}(O, t) = F_{\alpha}(B, t) - F_{\alpha}^{\text{eq}}(B, t) \end{cases} \quad (11)$$

2.4 收敛性判别

参考文献[19]中的收敛判据方式判断文中计算结果是否收敛, 给定收敛标准的小量 $\varepsilon=10^{-6}$ 。若误差值 $\text{Error} < \varepsilon$, 则计算结果收敛, 否则返回计算。

$$\text{Error} = \frac{\sqrt{\sum [(u_x(\omega, t + \delta_t) - u_x(\omega, t))^2 + (u_y(\omega, t + \delta_t) - u_y(\omega, t))^2]}}{\sqrt{\sum [u_x(\omega, t + \delta_t)^2 + u_y(\omega, t + \delta_t)^2]}} \quad (12)$$

式中: u_x —— x 向格点速度;

u_y —— y 向格点速度。

2.5 LBM 算例验证

为验证文中数值计算方法的正确性, 采用经典 Poiseuille 流对自编 LBM 程序的正确性进行验证^[26]。选取 50×10 格点大小的网格作为验证计算模型区域, 其边界处理办法同 2.3 节所述, 本文模型中所有参数均采用格子单位^[13, 26-27]。具体计算参数见表 1, 其中 L 和 D 分别为计算模型的长度和宽度; p_{in} 和 p_{out} 分别

为入口和出口时流体压力; Re 为雷诺数。

表 1 验证算例参数表 (格子单位)

Table 1 Validation calculation example parameter table (grid unit)

参数	L	D	δ_x	δ_t	Re	p_{in}	p_{out}
计算值	10	50	1	1	100	1.000 6	1.000 0

采用 LBM 方法编程对选取的计算模型进行计算, LBM 结果与 Poiseuille 流理论值对照结果见图 4。LBM 模拟值与 Poiseuille 理论值拟合度较好, 模型流速最大误差仅 0.402%。

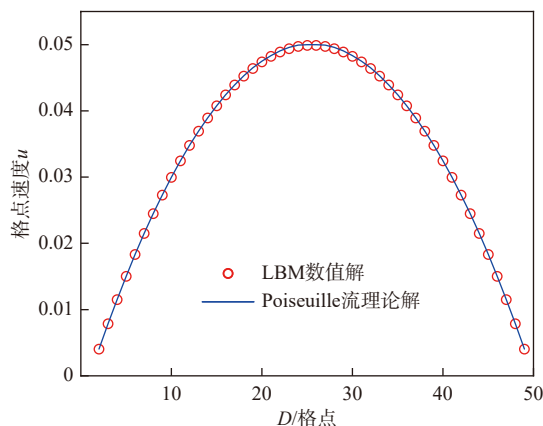


图 4 Poiseuille 理论值与 LBM 模拟值对比

Fig. 4 Comparison of the Poiseuille theoretical value and LBM simulation value

3 结果与讨论

为使渗流模拟结果更加贴近现实情况, 文中将土体孔隙渗流方向设定为沿土体的深度方向, 并设置模型以 $p_{\text{in}}=1.000 6$ 入渗, $p_{\text{out}}=1.000 0$ 流出, 具体计算模型边界条件设置见图 5。其他相关设置及计算参数均与上述验证算例相同。

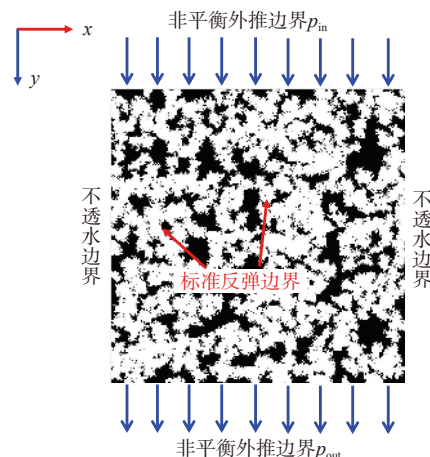


图 5 计算模型边界条件

Fig. 5 Boundary conditions for the calculation model

3.1 最优仿真模型尺寸确定

以 $p_c=0.01$, $n=0.64$, 50×50 、 100×100 、 200×200 、 300×300 、 400×400 、 500×500 格点大小的模型为例, 分析模型尺寸大小对渗流稳定时间和孔隙连通性的影响, 并确定数值仿真中最优模型尺寸的大小。其中, 渗流稳

定状态判断标准为^[12]: 首先提取渗流前 5 000 时步以内的速度最大点, 然后统计该点在 5 000, 10 000, ..., 90 000, 100 000 时步的离散速度大小, 当其离散速度不再随时步增加而变化时, 可认为渗流已处于稳定状态, 图 6 为不同尺寸模型渗流稳定后的速度场图像。

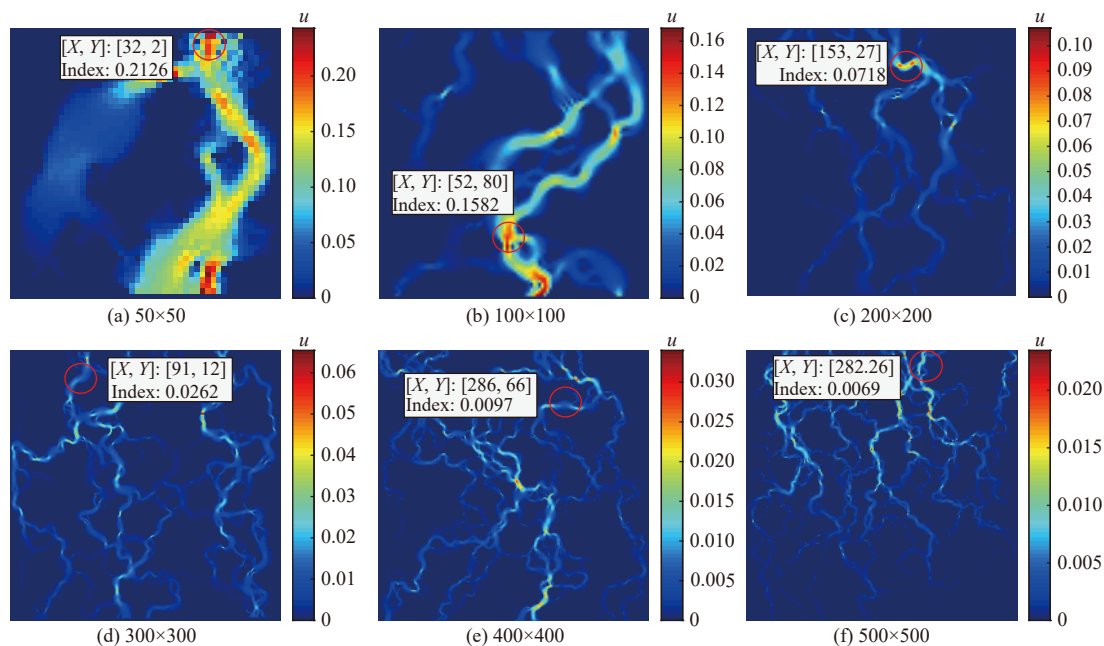


图 6 不同尺寸模型渗流稳定后速度场图像

Fig. 6 Velocity field images of the models with different sizes after stable seepage flow

图 7 为不同尺寸大小对渗流速度和稳定时间的影响情况。模型尺寸越大, 格点速度越小, 稳定所需时间更长, 尺寸 50, 100, 200, 300, 400, 500 的模型所需时间分别为 21, 97, 325, 504, 1 034, 1 124 min (运算所采用计算机配置为 Intel Core i5-10400@3.60 GHz 8 G RAM, 64 bit operating system, Windows 10)。分析原因是: 模型尺寸越大, 速度场分布也越加广泛, 使得平均速度越小, 稳定时间增加; 同时随模型尺寸扩大, 模型的孔隙结构更加复杂, 流体在孔隙结构中来回碰撞、迁移的次数随之增加, 这都将使渗流达到稳定所需的时间增加。

采用 Image J 软件中 Analyze particles 功能, 测试模型的孔隙参数, 统计结果见表 2。同一分布概率生成的模型尺寸越小, 孔隙数量越少, 但等效孔径大致相当。孔隙连通性是保证土体孔隙产生渗流的前提, 一般用连通孔隙率进行定量表征^[6]。随模型尺寸扩大, 孔隙连通程度明显增大, 最大增长率为 34.38%, 出现在 300×300 格点大小处, 继续扩大模型尺寸发现连通孔隙率增加并不明显, 结合图 7(b) 分析可知, $400 \times$

400 和 500×500 模型渗流稳定所需时间漫长, 长达近 1 d。因此, 综合孔隙连通性和运算时间因素, 最终选取 300×300 格点大小的多孔介质模型作为最优仿真模型尺寸, 用于后续研究。该研究方法可为其他类似岩土体最优仿真单元的选取提供一定借鉴。

3.2 孔隙结构对渗流场的影响

以 $p_c=0.01$, $n=0.64$, $p_{1-4}=p_{5-8}=0.01$, 300×300 格点大小的模型为例, 见图 2(c), 进行渗流模拟探讨孔隙结构特征对渗流过程的影响情况。

图 8 列出了时步 1 000, 6 000 和 100 000 时的渗流速度及流线分布情况。流体粒子在孔隙连通性好、且孔径较大的孔隙区域快速流过, 会形成主流通道, 见图 8(f), 但在部分孤立孔隙中流体无法流通。不同时步下, 流体随时步的增加, 分布范围越加广泛, 同时大孔隙优先流效应逐渐减弱, 这是因为所选取模型土体趋于饱和状态。如: 格点坐标 (178, 12) 处, 时步 1 000, 6 000, 10 000, 50 000, 100 000 时的格点速度分别为 0.143 2, 0.102 6, 0.089 9, 0.066 2, 0.025 4。

图 9 为渗流稳定后典型孔道横向速度分布关系曲

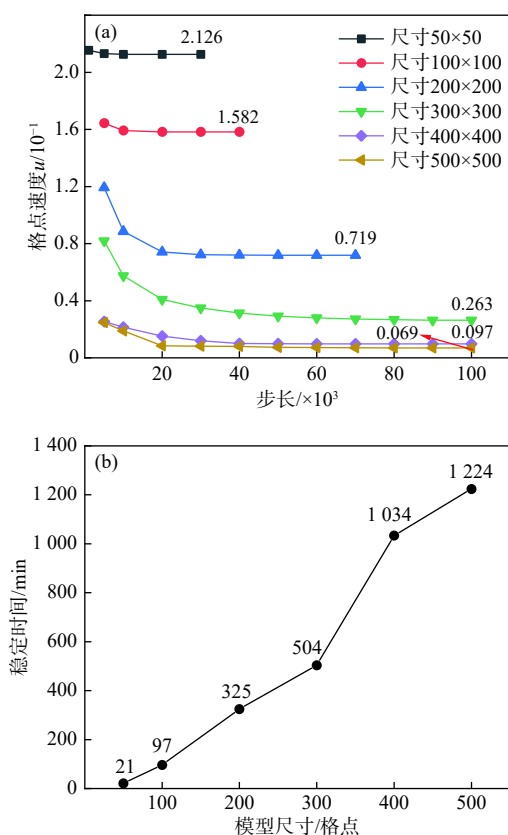


图 7 模型尺寸大小对渗流时间和速度的影响

Fig. 7 Influence of the model size on the seepage time and velocity

表 2 不同尺寸模型孔隙参数 (格子单位)

Table 2 Pore parameters of different size models (grid unit)

模型尺寸	孔隙率 n	孔隙数量/个	平均等效孔径	连通孔隙率 n_c
50	0.64	5	10	0.19
100		13	12.5	0.27
200		88	9.6	0.32
300		139	11.5	0.43
400		251	11.4	0.44
500		462	10.5	0.46

线,典型孔道见图 8(c)。多孔介质渗流过程中存在较为明显的指进效应,孔道中间流速最大,可达格点速度 0.032 4,越靠近孔壁渗流速度越小,接近于 0,其结果较为符合 Poiseuille 流理论。

3.3 孔隙率对渗流场的影响

以 $p_c=0.01$, $n=0.36, 0.50, 0.64, 0.78$, 300×300 大小的模型为例,分析孔隙率变化情况下,渗流稳定后渗流速度及渗透率变化情况。

对不同孔隙率下的土体模型进行渗流模拟,提取离散速度大小进行分析,并绘制重构土体模型的平均离散速度竖向分布情况,以 $n=0.50, 0.64, 0.78$ 为例,结果见图 10。孔隙率 0.50, 0.64, 0.78 的模型竖向平均离散速度围绕 5.87×10^{-4} , 9.13×10^{-3} , 1.61×10^{-2} 波动。由此可见,相同土颗粒大小条件下,大孔隙率土的渗流速度一般比小孔隙率土要大,而低孔隙率土中的渗流速

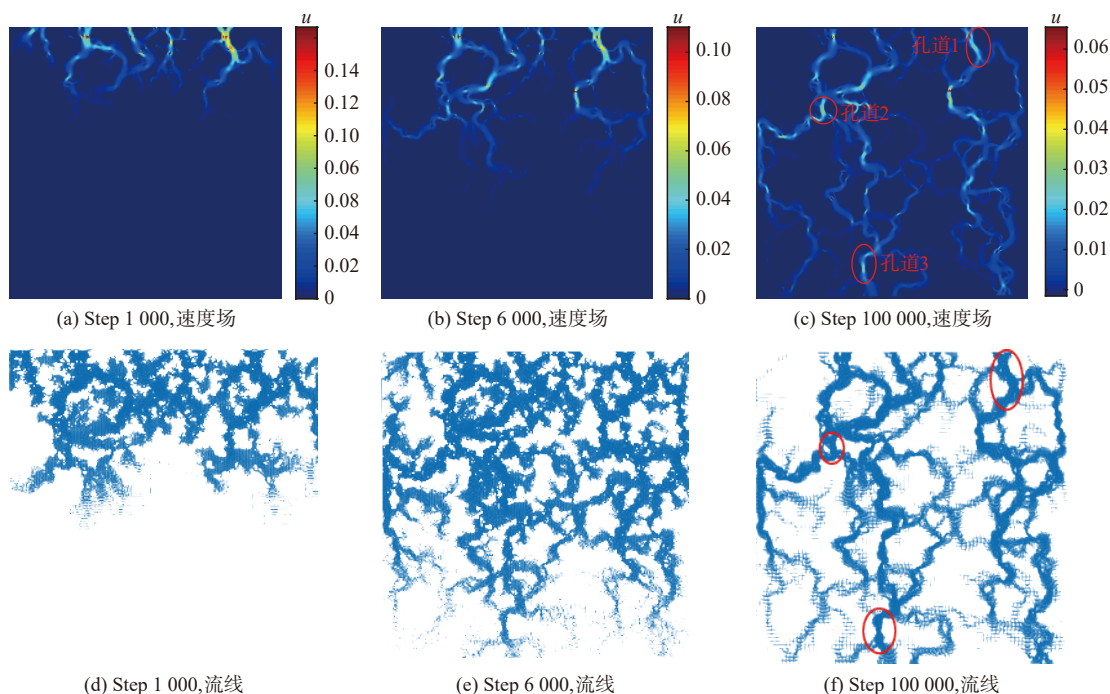


图 8 不同步长渗流场分布图

Fig. 8 Diagrams showing the asynchronous long seepage field distribution

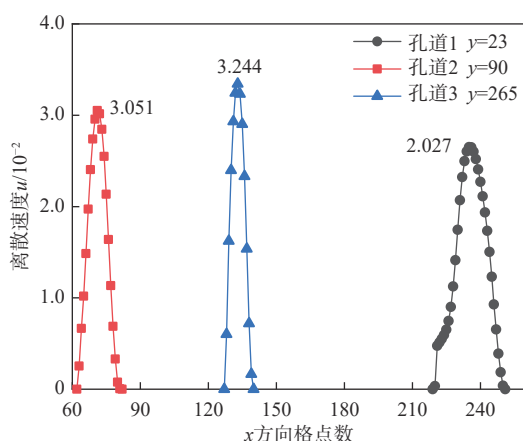


图9 典型孔道横向速度分布关系曲线

Fig. 9 Typical tunnel lateral velocity distribution

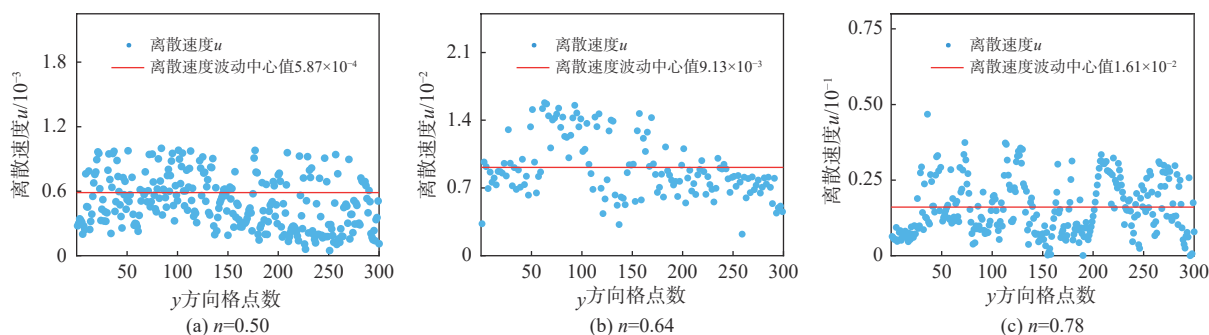


图10 平均离散速度竖向分布关系

Fig. 10 Vertical distribution of the average discrete velocity

K-C(Kozeny-Carman)模型^[30],文献[31]简化表述为:

$$K = \frac{d^2 n^3}{180(1-n)^2} \quad (14)$$

其中, d 为多孔介质模型中颗粒的有效平均直径, 可通过等面积法^[31]求得固相的平均直径作为等效直径 d 。

将LBM模拟结果与K-C模型计算得到的渗透率进行对比, 结果见表3。孔隙率越大模型计算渗透率结果更加准确。

表3 LBM模拟渗透率与K-C模型计算渗透率对比结果
(格子单位)

Table 3 Comparison results of the LBM simulated permeability and K-C model calculated permeability (grid unit)

孔隙率 n	LBM渗透率	K-C渗透率	误差/%
0.50	0.765 8	1.002 8	23.63
0.64	2.685 6	2.362 6	13.67
0.78	5.418 7	4.916 0	10.22

3.4 土颗粒大小对渗流场的影响

以 $p_c=0.01$ (大颗粒), 0.05(中颗粒), 0.10(小颗粒), $n=0.64$, 300×300 大小的模型为例, 分析土颗粒大小变

度波动相比于大孔隙土体更为稳定。

多孔介质的渗透率一般可用达西定律计算^[28]:

$$K = \frac{uL\mu}{p_{in} - p_{out}} \quad (13)$$

式中: K ——计算渗透率;

u ——平均流速;

μ ——流体动力黏度;

L ——渗流路径长度;

p_{in} ——进口水压;

p_{out} ——出口水压。

此外, 已有众多学者提出了相应的数学模型以预测多孔介质的渗透率^[29-30]。其中运用最为广泛的有

化情况下, 渗流场速度分布情况。

图11为不同颗粒大小下渗流速度场分布情况。土颗粒粒径越小, 渗流孔道也相应越细窄、分布越密集, 对应的速度场分布更为均匀, 但速度越小。如大颗粒、中颗粒、小颗粒模型渗流稳定后最大格点速度分别为0.062 3, 0.028 8, 0.016 2。

图12统计了3种土颗粒渗流稳定后不同深度处速度分布情况。大颗粒模型的离散速度最大处出现在中间位置, 其次是入口处, 出口处速度整体偏小, 且中间位置格点流速分布呈单峰状或多峰状, 进出口格点流速分布紊乱, 规律性不明显。相比于大颗粒模型, 中、小颗粒模型速度分布呈离散点状, 进口、中间、出口位置速度分布较为均匀且集中, 波动幅度较小。分析原因是: 重构土体颗粒越小, 土体内部孔隙分布越为均匀, 流体渗流过程中的流速分布也更加集中(图11)。

4 结论

本文采用QSGS法生成多孔介质模型, 通过调节孔隙率和分布概率得到不同孔隙率和颗粒大小的重

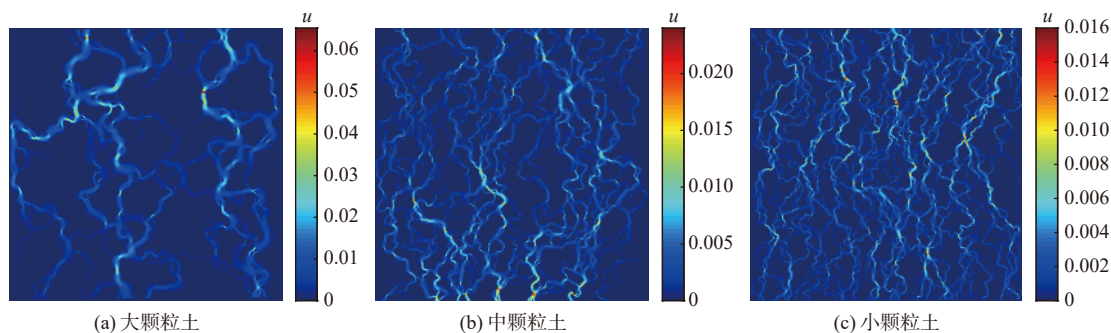


图 11 不同颗粒大小模型渗流稳定后速度场图像

Fig. 11 Velocity field images of the models with different particle sizes after stable seepage

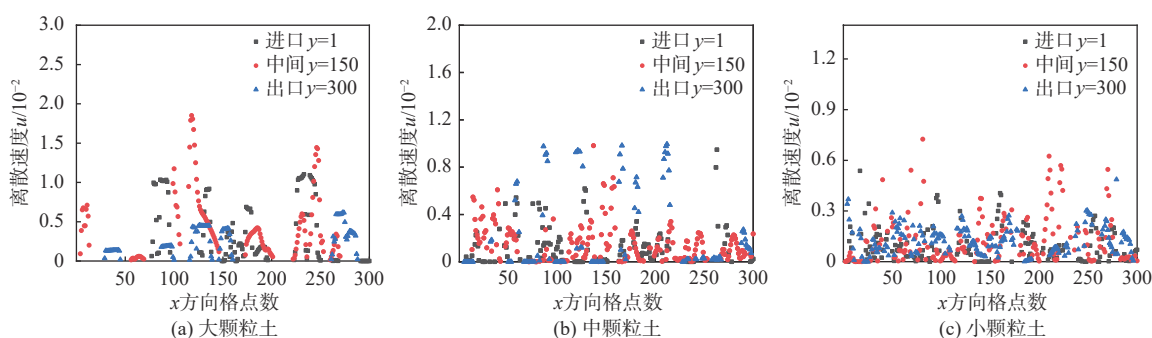


图 12 渗流稳定后不同深度处速度分布情况

Fig. 12 Velocity distribution at different depths after stable seepage

构土体模型,与 LBM D2Q9 模型结合模拟了不同影响因素下多孔介质的渗流过程。得到以下结论:

(1) 模型尺寸越大,格点速度越小,稳定所需时间更长。随模型尺寸扩大,孔隙连通程度明显增大,最大增长率为 34.38%,出现在 300×300 格点大小处,继续扩大模型尺寸发现连通孔隙率增加并不明显。

(2) 流体粒子在孔隙连通性好、孔径大的区域,会形成主渗流通道,且存在指进效应,孔道中间流速最大,可达 0.032 4,越靠近孔壁渗流速度越小,接近于 0,结果符合 Poiseuille 流理论。

(3) 相同土颗粒大小条件下,大孔隙率土的渗流速度比小孔隙率土要大,而低孔隙率土中的渗流速度相比于大孔隙土更为稳定。LBM 模拟渗透率与 K-C 理论公式计算结果对比发现,孔隙率越大的模型计算渗透率越准确。

(4) 土颗粒越小,渗流孔道也相应越细窄、分布越密集,对应的速度场分布更为均匀,同时速度也更小。大颗粒模型的速度最大处出现在中间位置,且流速分布呈单峰或多峰状,中、小颗粒速度分布呈离散点状,分布较为均匀且集中。

土体孔隙流是一个常见但复杂的过程,本文研究了不同孔隙条件对渗流机理的影响情况,但水气两相

渗流及基质域入渗问题有待考虑,故将此作为今后的研究方向。土体细观重构、最优仿真单元选取及 LBM 渗流仿真技术,该研究成果可为其他类似岩土体最优仿真单元选取方法提供一定借鉴,并为进一步认识土体孔隙流机理提供帮助。

参考文献 (References) :

- [1] HANES J, CHIBA M, LANGER R. Degradation of porous poly(anhydride-co-imide) microspheres and implications for controlled macromolecule delivery[J]. Biomaterials, 1998, 19(1/2/3): 163 – 172.
- [2] 吴蒙,秦勇,王晓青,等. 中国致密砂岩储层流体可动性及其影响因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(1): 35 – 51. [WU Meng, QIN Yong, WANG Xiaoqing, et al. Fluid mobility and its influencing factors of tight sandstone reservoirs in China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(1): 35 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张晨阳,张泰丽,张明,等. 东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 42 – 50. [ZHANG Chenyang, ZHANG Taili, ZHANG Ming, et al. Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope

- instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 42 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 蔡沛辰, 阙云, 李显. 非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 54 – 63. [CAI Peichen, QUE Yun, LI Xian. Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 54 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 蔡沛辰, 阙云, 李显. 围压条件下原状花岗岩残积土微观渗流数值模拟[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 400 – 406. [CAI Peichen, QUE Yun, LI Xian. Numerical simulation of meso-seepage flow in undisturbed granite residual soil under confining pressure [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(3): 400 – 406. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 钱尼贵. 基于格子 Boltzmann 方法的路面路基微观渗流特性及试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. [QIAN Nigui. Analysis and experimental investigation of mesoscopic seepage characteristics of pavement and subgrade based on lattice boltzmann method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [7] BROADWELL J E. Shock structure in a simple discrete velocity gas[J]. *Physics of Fluids*, 1964, 7(8): 1243.
- [8] MAIER R S, KROLL D M, BERNARD R S, et al. Pore-scale simulation of dispersion[J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(8): 2065 – 2079.
- [9] PILOTTI M. Generation of realistic porous media by grains sedimentation[J]. *Transport in Porous Media*, 1998, 33(3): 257 – 278.
- [10] MADADI M, SAHIMI M. Lattice Boltzmann simulation of fluid flow in fracture networks with rough, self-affine surfaces[J]. *Physical Review E*, 2003, 67(2): 1 – 12.
- [11] ZHANG H F, GE X S, YE H. Randomly mixed model for predicting the effective thermal conductivity of moist porous media[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(1): 220 – 226.
- [12] 周潇, 申林方, 阮永芬, 等. 基于四参数随机生长法重构土体的渗流微观数值模拟[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(4): 316 – 321. [ZHOU Xiao, SHEN Linfang, RUAN Yongfen, et al. Reconstructed soil meso-numerical seepage simulation based on quartet structure generation set[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 33(4): 316 – 321. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 申林方, 王志良, 李邵军. 基于土体微观结构重构技术的渗流场数值模拟[J]. *岩土力学*, 2015, 36(11): 3307 – 3314. [SHEN Linfang, WANG Zhiliang, LI Shaojun. Numerical simulation for seepage field of soil based on mesoscopic structure reconfiguration technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(11): 3307 – 3314. (in Chinese with English abstract)]
- [14] MCNAMARA G R, ZANETTI G. Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(20): 2332 – 2335.
- [15] 冯杰, 解河海, 黄国如. 土壤大孔隙流机理及产汇流模型[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [FENG Jie, XIE Hehai, HUANG Guoru, et al. The mechanism of soil macropore flow and the model of runoff generation[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [16] WANG Q F, LI C W, ZHAO Y C, et al. Study of gas emission law at the heading face in a coal-mine tunnel based on the Lattice Boltzmann method[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(5): 1705 – 1715.
- [17] SONG R, WANG Y, LIU J J, et al. Comparative analysis on pore-scale permeability prediction on micro-CT images of rock using numerical and empirical approaches[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(6): 2842 – 2854.
- [18] 李仁民, 刘松玉, 方磊, 等. 采用随机生长四参数生成法构造黏土微观结构[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(10): 1897 – 1901. [LI Renmin, LIU Songyu, FANG Lei, et al. Micro-structure of clay generated by quartet structure generation set[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(10): 1897 – 1901. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 何雅玲, 王勇, 李庆. 格子 Boltzmann 方法的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. [HE Yaling, WANG Yong, LI Qing. Lattice Boltzmann method: theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)]
- [20] KRUGER T, KUSUMAATMAJA H, KUZMIN A, et al. The Lattice Boltzmann method principles and practice [M]. New York: Springer, 2017.
- [21] WOLF-GLADROW D A. Lattice gas cellular automata and lattice boltzmann models[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [22] QIAN Y H, D'HUMIÈRES D, LALLEMAND P. Lattice BGK models for navier-stokes equation[J]. *Europhysics*

- Letters (EPL), 1992, 17(6): 479 – 484.
- [23] CHAPMAN S, COWLING T G. The mathematical theory of non-uniform Gases[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1970.
- [24] 郭照立, 郑楚光. 格子 Boltzmann 方法的原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. [GUO Zhaoli, ZHENG Chuguang. Theory and applications of lattice boltzmann method[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)]
- [25] GUO Z L, ZHENG C G, SHI B C. Non-equilibrium extrapolation method for velocity and pressure boundary conditions in the lattice Boltzmann method[J]. *Chinese Physics*, 2002, 11(4): 366 – 374.
- [26] 李晶晶, 金磊, 程涛. 土石混合体细观渗流场的格子 Boltzmann 模拟[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(29): 235 – 241. [LI Jingjing, JIN Lei, CHENG Tao. Numerical simulation of mesoscopic seepage field of soil-rock mixture based on lattice boltzmann method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(29): 235 – 241. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 蔡沛辰, 阙云, 杨鹏飞. 原状花岗岩残积土大孔隙细观渗流场的格子 Boltzmann 模拟[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 531 – 536. [CAI Peichen, QUE Yun, YANG Pengfei. Lattice Boltzmann simulation of macropore meso-seepage field in undisturbed granite residual soil[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(4): 531 – 536. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 杨峰, 王昊, 黄波, 等. 基于 CT 扫描的致密砂岩渗流特征及应力敏感性研究[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(4): 475 – 482. [YANG Feng, WANG Hao, HUANG Bo, et al. Study on the stress sensitivity and seepage characteristics of tight sandstone based on CT scanning[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(4): 475 – 482. (in Chinese with English abstract)]
- [29] LATIEF F D E, FAUZI U. Kozeny-Carman and empirical formula for the permeability of computer rock models[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 50: 117 – 123.
- [30] KAVIANY M. Principles of heat transfer in porous media[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2012.
- [31] 刘丹, 汪新智, 何玉荣. 随机四参数法生成多孔介质及渗流模拟[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(1): 210 – 214. [LIU Dan, WANG Xinzh, HE Yurong. Lattice boltzmann simulation of flow in random porous media constructed by quartet structure generation set[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(1): 210 – 214. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳