

DOI: 10.11779/CJGE202204009

基于格子 Boltzmann 方法的土石混合体的渗流特性研究

金 磊¹, 曾亚武², 程 涛¹, 李晶晶¹

(1. 湖北理工学院土木建筑工程学院, 湖北 黄石 435003; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了探究土石混合体的渗流特性, 基于颗粒离散元法和三维离散元模型虚拟切片技术建立了土石混合体的三维随机孔隙结构模型并将其体素化, 引入三维格子 Boltzmann 方法从孔隙尺度对其渗流开展了模拟, 并据此分析了块石含量、相对密实度和块石粒径对土石混合体渗透率的影响, 最后探讨了不同条件下块石含量对土石混合体渗透率存在不同影响的内在机制。研究结果表明: 当相对密实度和块石粒径不变时, 随块石含量增加, 土石混合体的渗透率总体上是逐渐增大的, 且增大的速率越来越大; 相对密实度越高, 土石混合体的渗透率越低; 块石粒径对土石混合体的渗透率存在一定程度的影响, 当块石含量小于临界值时, 块石粒径越大则渗透率越小, 而当块石含量高于临界值时, 块石粒径越大则渗透率越大; 当土石混合体中土体的密度保持不变时, 其渗透率随块石含量增加先减小后增大。

关键词: 土石混合体; 格子 Boltzmann 方法; 渗流特性; 渗透率; 孔隙尺度模拟

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)04-0669-09

作者简介: 金 磊(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事复杂岩土体的力学与渗流特性等方面的研究。E-mail: whujinlei@whu.edu.cn。

Seepage characteristics of soil-rock mixture based on lattice Boltzmann method

JIN Lei¹, ZENG Ya-wu², CHENG Tao¹, LI Jing-jing¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to explore the seepage characteristics of soil-rock mixture (SRM), random pore-structural models of SRM are constructed and voxelized based on the discrete element method and the proposed virtual slicing technique for three-dimensional discrete element model. Then, the three-dimensional lattice Boltzmann method is introduced to conduct a series of numerical simulations of the seepage flow in SRM from the pore scale, and the influences of rock content, rock size, relative density on the simulated permeability of SRM are comprehensively investigated. Finally, the internal mechanism of the influences of rock content on the permeability of SRM under different conditions is discussed. The results show that when the relative density and rock size both remain unchanged, the permeability of SRM presents a gradually increasing trend with the increase of rock content, and the increasing rate also increases. When other conditions remain unchanged, the permeability of SRM decreases with the increase of relative density. When the rock content is lower than a threshold value, the permeability decreases as the rock size increases, while this trend gets reversed when the rock content exceeds the threshold value. When the density of soils in SRM remains unchanged, the permeability of SRM decreases first and then increases with the increase of rock content.

Key words: soil-rock mixture; lattice Boltzmann method; seepage characteristic; permeability; pore-scale modeling

0 引言

土石混合体(soil-rock mixture, 简称SRM)在自然界中分布广泛, 常见于斜坡、断层带、坝基等工程地质体。斜坡降雨入渗时的稳定性、隧道掘进中断层带的突水、坝基的渗漏等工程问题分析时都需要事先确定土石混合体的渗透性^[1-3]。因此, 研究土石混合体的渗透特性具有重要意义。

近十几年来, 一些学者采用原位试验、室内试验、

数值模拟等手段对土石混合体的渗透性开展了研究。徐文杰^[4]通过原位试坑单环/双环注水试验测定了土石混合体的渗透系数。王鹏飞等^[3]、周中等^[5]、Wang等^[6]通过室内渗透试验分析了块石含量等因素对土石

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2019CFB199); 国家自然科学基金项目(41272342, 12002121); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201823)
收稿日期: 2021-03-25

混合体渗透系数的影响。

物理试验往往耗时费力、试样尺寸受限且难以直接观察内部渗流场,而数值模拟能有效克服这些困难。作为岩土工程中最受欢迎的数值模拟方法,有限元法在土石混合体渗透性研究中也有一定的应用^[1,7]。然而,土石混合体内部结构十分复杂,生成有限元网格比较费时且网格质量难以保证。为此,Chen等^[8]引入基于规则网格的数值流形法对土石混合体的渗流进行了二维模拟。

已有的土石混合体渗流数值模拟研究还有一些方面亟待进一步改进。一方面,数值模型主要限于连续介质范畴,而土石混合体是典型的非连续颗粒材料。另一方面,已有数值模拟均是二维的,而实际的渗流发生于三维孔隙空间。

与传统的数值模拟方法相比,格子 Boltzmann 方法(LBM)是一种介观模拟方法,它克服了宏观连续性假设引起的计算精度问题以及微观分子动力学模型在时间和空间上的限制,具有物理条件清晰、算法简单、边界处理方便且并行性容易实现等优点^[9]。基于格子 Boltzmann 方法和介质的孔隙结构模型可进行孔隙尺度的渗流模拟,进而可用于研究宏观渗流的微细观机理,该方法已在多孔介质中获得了成功的应用^[10-14]。

在应用格子 Boltzmann 方法模拟渗流之前,需要建立土石混合体的孔隙结构模型。土石混合体结构模型的构建一般采用两种方法:基于数字图像处理的实测结构建模;随机结构建模。前者能较好地描述土石混合体物理模型的细观结构特征,但囿于物理模型的限制,很难在其他参数不变条件下独立改变模型的某一参量,而后者则能有效克服这一不足,能根据需要快速生成特定结构的模型。在已有的随机结构建模方法中,基于颗粒离散元法(DEM)的随机结构模型可实现土石混合体非均质非连续的内部结构特征,在土石混合体强度变形特性研究中已有较广泛的应用^[15-16],在多孔介质渗流的格子 Boltzmann 模拟中也有一定的应用^[12]。

从上述分析可知,联合运用颗粒离散元法和格子 Boltzmann 方法,构建土石混合体的三维孔隙结构模型并开展渗流的孔隙尺度模拟,可有望揭示土石混合体的渗透性变化规律及其内在机制,但目前仍鲜见这方面研究成果。

为此,本文基于颗粒离散元法建立土石混合体三维离散元随机结构模型,用立方体格子对生成的结构模型进行划分(即体素化),采用三维格子 Boltzmann 方法对土石混合体的渗流开展孔隙尺度的模拟并据此分析土石混合体的渗透特性,最后针对已有成果中块石含量对土石混合体渗透性存在的不同影响进行格子 Boltzmann 模拟并加以讨论。

1 土石混合体三维离散元模型

土石混合体由块石颗粒、土颗粒及孔隙组成,其物理力学特性与块石含量、块石粒径、密实程度等内部因素有密切联系。为了研究这些因素对土石混合体渗透性的影响,首先要建立相应的土石混合体孔隙结构模型。

由于土石混合体室内渗透试验的试样一般为圆柱形,这里将土石混合体 DEM 模型设为直径 0.3 m 的圆柱体。徐文杰^[4]建议土石混合体的土/石阈值计算公式为

$$d_{\text{S/RT}} = (0.05 \sim 0.07)L_c, \quad (1)$$

式中, $d_{\text{S/RT}}$ 为土/石阈值, L_c 为所研究问题的工程特征尺度(本文中为 0.3 m),据此将土/石阈值定为 0.015 m。考虑到后续 LBM 的计算效率,本文将土颗粒简化成直径为 0.015 m 的球体,用直径大于 0.015 m 的球体模拟块石颗粒。

为了研究块石含量对土石混合体渗透性的影响,在制样时要控制密实度等其他参量保持不变。关于密实度,一般是将不同块石含量的土石混合体试样中土体基质密度取为相同值^[3,6],但当块石含量较高(70%左右)时,土石混合体为骨架孔隙结构,此时块石之间的土体很难被击实到相同的密度。另外,周中等^[5]室内试验中是使各块石含量的土石混合体试样的压实度相同(95%)。

试样的密实度可由孔隙率、密度、压实度、相对密实度等多个物理量描述。相对密实度可用于不同级配土体的松密程度的对比,实际工程中常用来衡量无黏性土(砂土和砂砾石土等)的密实度。鉴于此,本文选用相对密实度来衡量土石混合体模型的密实程度。

为了构建一定相对密实度的土石混合体离散元模型,本文引入黄青富等^[17]提出的 DEM 建模方法,其核心思想是通过减小压实过程中颗粒间摩擦系数的“拟振动压实法”来模拟现实中的振动压实作用,从而可快速生成任意相对密实度的颗粒堆积体。

本文研究块石含量(C_R)、块石粒径(D)和相对密实度(D_r)对土石混合体渗透性的影响,其中块石含量(C_R)定义为块石质量与模型总质量的比值。具体的建模方案是:块石含量考虑 0, 20%, 40%, 60%, 80% 和 100% 共 6 种情形;块石粒径考虑 0.03, 0.04 和 0.05 m 共 3 种情形;试样密实度考虑松散($D_r=0$)、中密($D_r=0.5$)和密实($D_r=1$)共 3 种情形。DEM 建模过程中的细观力学参数取值与文献[17]中表 1 相同,每个方案的土石混合体模型通过设置不同的随机数种子制备了 3 个平行试样,模型高度均在 0.9 m 以上。

图1所示为 $C_R=40\%$, $D=0.04\text{ m}$ 时松散、中密和密实的土石混合体三维离散元模型。

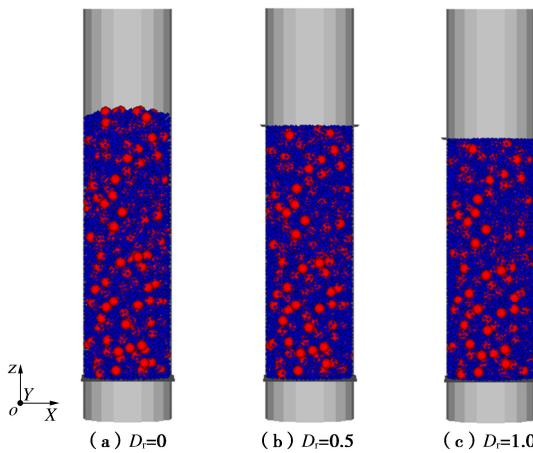


图1 土石混合体三维离散元模型 ($C_R=40\%$, $D=0.04\text{ m}$)

Fig. 1 3-D DEM models for SRM ($C_R=40\%$, $D=0.04\text{ m}$)

2 土石混合体渗流的 LBM 模拟

2.1 LBM 的基本原理

在格子 Boltzmann 方法中, 计算域由边长为 h (格子步长) 的立方体格子所划分, 在每个格点上定义一个粒子分布函数 $f_\alpha(\mathbf{r}, t)$ 表示在 \mathbf{r} 位置处 t 时刻运动方向沿 α 的流体粒子的数目。在离散的每个时间步 (Δt) 内, 流体粒子以离散的速度 \mathbf{e}_α 运动到最近的格点处, 紧接着在该格点处与其它的粒子发生碰撞, 碰撞后粒子的分布函数将更新^[9], 该过程称为迁移和碰撞, 可用公式分别表示为

$$f_\alpha(\mathbf{r} + \mathbf{e}_\alpha \Delta t, t + \Delta t) = f_\alpha(\mathbf{r}, t) \quad , \quad (2)$$

$$f_\alpha(\mathbf{r}, t) = \Omega(f_\alpha(\mathbf{r}, t)) \quad , \quad (3)$$

式中, Ω 为碰撞算子, 它规定了流体粒子的碰撞行为。通过迁移与碰撞的不断循环, 流体粒子逐步趋向平衡态分布 f_α^{eq} 。

本文采用最为常用的碰撞算子即单松弛时间 BGK 碰撞模型^[18], 可用下式表示:

$$\Omega(f_\alpha(\mathbf{r}, t)) = f_\alpha(\mathbf{r}, t) - \frac{\Delta t}{\tau} (f_\alpha(\mathbf{r}, t) - f_\alpha^{\text{eq}}(\mathbf{r}, t)) \quad , \quad (4)$$

式中, $f_\alpha^{\text{eq}}(\mathbf{r}, t)$ 为局部平衡态分布函数, τ 为无量纲弛豫时间。

本文采用的离散速度模型为常用的D3Q19模型^[19], 其平衡态分布函数及相关参数如下所示:

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

$$c = \frac{h}{\Delta t} \quad , \quad (6)$$

$$c_s^2 = \frac{c^2}{3} \quad , \quad (7)$$

$$\omega_\alpha = \begin{cases} \frac{1}{3} & (\alpha=0) \\ \frac{1}{18} & (\alpha=1,2,\cdots,6) \\ \frac{1}{36} & (\alpha=7,8,\cdots,18) \end{cases} \quad . \quad (8)$$

式中 c 为格子速度; c_s 为格子声速; ω_α 为权系数; ρ 为流体密度; \mathbf{u} 为宏观速度。

根据质量和动量守恒定律, 模型的宏观密度 ρ 、速度 \mathbf{u} 和压力 p 分别定义如下:

$$\rho = \sum_{\alpha=0}^{18} f_\alpha \quad , \quad (9)$$

$$\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=0}^{18} f_\alpha \mathbf{e}_\alpha \quad , \quad (10)$$

$$p = \rho c_s^2 \quad . \quad (11)$$

此外, 流体的运动黏滞系数 ν 与无量纲弛豫时间 τ 及格子参数间关系为

$$\nu = c_s^2 \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \Delta t \quad . \quad (12)$$

理论上, LBM 的 D3Q19 模型只能用于模拟可压缩流体的流动。为了保证 LBM 的数值解收敛于不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程, 流体流动的 M_a 数必须足够小, 至少应小于 0.1^[20], M_a 数定义为

$$M_a = \frac{u_{\max}}{c} \quad , \quad (13)$$

式中, u_{\max} 为流体最大速度。

在 LBM 中, 为了计算方便, 一般都将所有的单位做无量纲处理, 即采用格子单位。格子单位与物理单位的比值为一个固定的参考量, 也就是说格子单位的变化规律与物理单位的变化规律是完全一致的。关于格子单位与物理单位的相互转化可参考文献[20]。本文中, 为方便起见, DEM 模型相关的物理量采用物理单位, LBM 模拟相关的物理量采用格子单位, 如流域尺寸 (l.u.)、流速 (l.u./t.s.)、渗透率 (l.u.²)。

2.2 离散元模型的体素化与 LBM 的边界条件

为了将建立的土石混合体离散元模型用于渗流的 LBM 模拟, 需先将其用立方体格子进行划分, 即体素化。本文基于数字图像处理技术来达到这一要求, 其关键问题在于如何获取土石混合体三维离散元模型的一系列切片图像, 而这可以利用笔者所开发的三维离散元模型虚拟切片技术, 详见文献[21]。

考虑到后续 LBM 的计算效率, 本文中渗流的 LBM 模拟选取离散元模型中离底面 0.3~0.6 m 的中间部分, 图 2 (a) 所示即为图 1 (b) 模型离底面 0.3~0.6 m 的部分。将离散元模型的这一部分沿轴向 (Z 轴) 进行切割, 切片间隔 0.001 m, 每个模型共生成 300

一个切片, 图 2 (b) 和图 2 (c) 所示为图 2 (a) 底部(原离散元模型离底面 0.3 m 处)的切片。由于 LBM 计算域一般为长方体, 故在每个切片图像上固体区域还包括了圆形边界和其外切正方形之间的部分, 如图 2 (c) 所示。将每个切片图像的像素尺寸也设为 0.001 m (300×300 像素), 这样土石混合体离散元模型就被 27000000 个边长为 0.001 m 的立方体格子($h=0.001$ m) 所划分, 则 LBM 计算域的尺寸为 $300 \times 300 \times 300$ l.u.。

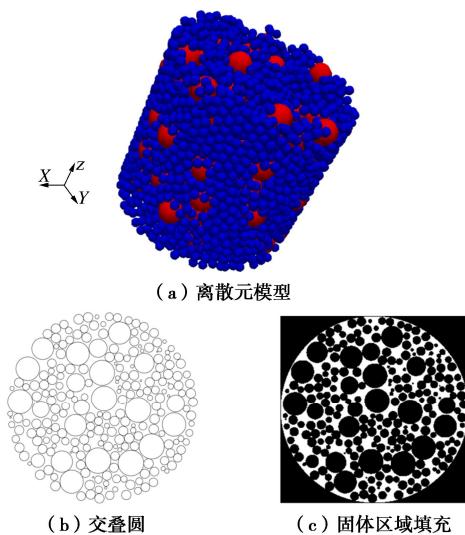


图 2 土石混合体三维离散元模型切片示意图

Fig. 2 Schematic diagram of slicing of SRM model

图像的分辨率和格子的数量对 LBM 的计算精度有重要影响。Pan 等^[11]研究表明当球体的直径大于 12 倍的格子步长时, 计算的渗透率将不随分辨率而改变。本文中格子步长 0.001 m, 最小固体颗粒直径为 0.015 m, 故满足要求。

实施渗流的 LBM 模拟还需要定义合适的边界条件。本文中, 流体流动方向沿 Z 轴正方向, 由入口和出口的压力差驱动, 压力边界采用 Zou/He 边界处理方法^[22]。模型四周壁面和固体颗粒表面为无滑移的流-固边界, 采用反弹格式进行处理^[18]。执行反弹处理之前需要确定固体格点和流体格点, 判断方法是: 像素值为 0 (黑色) 的体素属于固体格点, 而像素值为 255 (白色) 的体素属于流体格点。

2.3 渗透率与 LBM 的计算参数

多孔介质的渗透性能一般用渗透率或渗透系数表征, 渗透率由多孔介质自身的属性 (如孔隙率、颗粒比表面积等) 决定, 而渗透系数除了与多孔介质自身属性有关外还与流体的属性 (如密度、黏度等) 有关。本文中, 土石混合体的渗透性由渗透率表征。

已有的试验和理论研究表明颗粒材料渗透率的主要影响因素是孔隙率和颗粒级配特征 (如平均粒径、

不均匀系数等), 而颗粒级配特征实质上反映的是比表面积^[23-25]。一般来说, 当其它条件相同时, 孔隙率越大则渗透率越大, 比表面积越大则渗透率越小。为此, 本文还计算了各土石混合体离散元模型的孔隙率 n 和比表面积 S_0 (模型中固体颗粒表面积之和与模型总体积之比)。

渗透率由 LBM 模拟的流场通过达西定律计算得到公式为

$$k = \frac{\mu \bar{u}}{\nabla p} = \frac{\rho v \bar{u} l}{p_{in} - p_{out}} \quad . \quad (14)$$

式中 μ 是流体的动力黏滞系数; \bar{u} 表示平均流速; ∇p 是压力梯度; l 为模型沿渗流方向的尺寸; p_{in} 和 p_{out} 分别为渗流入口和出口的压力。

达西定律成立的前提条件是流动为层流, 本文通过在模型入口和出口处施加不同的压差, 计算不同压差下的渗透率, 检验渗透率是否保持恒定来确认层流状态。经过测试, 当压差 ($p_{in} - p_{out}$) 取 0.01 时, 本文土石混合体模型均可满足层流及 2.1 节中所述 M_a 数的要求。

多孔介质渗流的 LBM 模拟中还有一个重要的计算参数, 即无量纲的弛豫时间 τ , 它的取值对计算时间和精度都有重要的影响。参考 Pan 等^[11]的研究, 本文中 τ 取 0.8。

LBM 计算至流体达到稳定状态时停止, 这里稳定状态的判断准则是一一定的时步数内 (本文为 1000) 整个计算域的动能的标准差小于平均动能的 0.01%。计算收敛后, 根据达西定律即可计算模型的渗透率。

3 LBM 模拟结果及其分析

基于上述土石混合体 DEM 建模方法和渗流 LBM 模拟方法, 可得到不同块石含量、不同相对密实度和不同块石粒径的土石混合体模型的渗透率, 分析时取每种情况下 3 个平行试样所得渗透率的平均值。各土石混合体模型的渗透率见表 1, 各模型的孔隙率和比表面积见表 2 和表 3。

除了渗透率, LBM 模拟还能获得各模型孔隙尺度的渗流场, 图 3 所示为其中 3 个模型的流速场云图。图 3 (a) 对应的土石混合体 C_R 为 20%, D 为 0.04 m, $D_r=1$, 其渗透率为 0.099。图 3 (b) 对应的土石混合体 C_R 为 20%, D 为 0.04 m, $D_r=0$, 其渗透率为 0.241。图 3 (c) 对应的土石混合体 C_R 为 80%, D 为 0.04 m, $D_r=0$, 其渗透率为 0.710。由图可见, 图 3 (b) 中流动通道明显多于图 3 (a) 中的流场, 且通道中的流速较大, 故其渗透率较大, 而图 3 (c) 中的流动通道更

表 1 土石混合体的渗透率 (l.u.^2)Table 1 Simulated permeabilities of SRM (l.u.^2)

| $C_R/\%$ | $D=0.03 \text{ m}$ | | | $D=0.04 \text{ m}$ | | | $D=0.05 \text{ m}$ | | |
|----------|--------------------|-----------|---------|--------------------|-----------|---------|--------------------|-----------|---------|
| | $D_r=0$ | $D_r=0.5$ | $D_r=1$ | $D_r=0$ | $D_r=0.5$ | $D_r=1$ | $D_r=0$ | $D_r=0.5$ | $D_r=1$ |
| 0 | 0.241 | 0.155 | 0.094 | 0.241 | 0.155 | 0.094 | 0.241 | 0.155 | 0.094 |
| 20 | 0.245 | 0.169 | 0.104 | 0.241 | 0.160 | 0.099 | 0.227 | 0.156 | 0.102 |
| 40 | 0.283 | 0.192 | 0.127 | 0.256 | 0.176 | 0.112 | 0.236 | 0.163 | 0.106 |
| 60 | 0.368 | 0.253 | 0.158 | 0.339 | 0.218 | 0.143 | 0.291 | 0.193 | 0.127 |
| 80 | 0.595 | 0.424 | 0.252 | 0.710 | 0.410 | 0.246 | 0.916 | 0.487 | 0.230 |
| 100 | 1.423 | 0.888 | 0.564 | 3.024 | 1.928 | 1.147 | 5.280 | 3.647 | 2.057 |

表 2 土石混合体的孔隙率

Table 2 Porosities of SRM

| $C_R/\%$ | $D=0.03 \text{ m}$ | | | $D=0.04 \text{ m}$ | | | $D=0.05 \text{ m}$ | | |
|----------|--------------------|-----------|---------|--------------------|-----------|---------|--------------------|-----------|---------|
| | $D_r=0$ | $D_r=0.5$ | $D_r=1$ | $D_r=0$ | $D_r=0.5$ | $D_r=1$ | $D_r=0$ | $D_r=0.5$ | $D_r=1$ |
| 0 | 0.427 | 0.400 | 0.364 | 0.427 | 0.400 | 0.364 | 0.427 | 0.400 | 0.364 |
| 20 | 0.407 | 0.380 | 0.349 | 0.396 | 0.370 | 0.339 | 0.384 | 0.361 | 0.336 |
| 40 | 0.395 | 0.368 | 0.337 | 0.372 | 0.346 | 0.316 | 0.358 | 0.333 | 0.301 |
| 60 | 0.394 | 0.364 | 0.330 | 0.365 | 0.331 | 0.296 | 0.338 | 0.305 | 0.274 |
| 80 | 0.409 | 0.378 | 0.334 | 0.387 | 0.343 | 0.300 | 0.370 | 0.319 | 0.277 |
| 100 | 0.429 | 0.396 | 0.362 | 0.433 | 0.405 | 0.365 | 0.433 | 0.409 | 0.369 |

表 3 土石混合体的比表面积 (m^{-1})Table 3 Specific surface areas of SRM (m^{-1})

| $C_R/\%$ | $D=0.03 \text{ m}$ | | | $D=0.04 \text{ m}$ | | | $D=0.05 \text{ m}$ | | |
|----------|--------------------|-----------|---------|--------------------|-----------|---------|--------------------|-----------|---------|
| | $D_r=0$ | $D_r=0.5$ | $D_r=1$ | $D_r=0$ | $D_r=0.5$ | $D_r=1$ | $D_r=0$ | $D_r=0.5$ | $D_r=1$ |
| 0 | 210.6 | 222.7 | 237.5 | 210.6 | 222.7 | 237.5 | 210.6 | 222.7 | 237.5 |
| 20 | 194.3 | 204.2 | 217.1 | 190.3 | 200.6 | 212.9 | 186.7 | 198.5 | 208.3 |
| 40 | 173.3 | 183.3 | 193.3 | 165.7 | 174.7 | 185.6 | 161.0 | 173.0 | 181.4 |
| 60 | 150.8 | 158.1 | 167.9 | 139.9 | 146.5 | 156.5 | 135.5 | 142.9 | 148.7 |
| 80 | 123.3 | 130.0 | 141.2 | 104.3 | 112.9 | 121.5 | 93.1 | 101.4 | 107.6 |
| 100 | 96.2 | 103.2 | 110.5 | 67.3 | 73.4 | 78.7 | 52.6 | 53.7 | 60.5 |

宽, 流速也更大, 故其渗透率进一步提高。

石粒径的变化绘于图 4~9 (限于篇幅, 并未给出全部情形)。

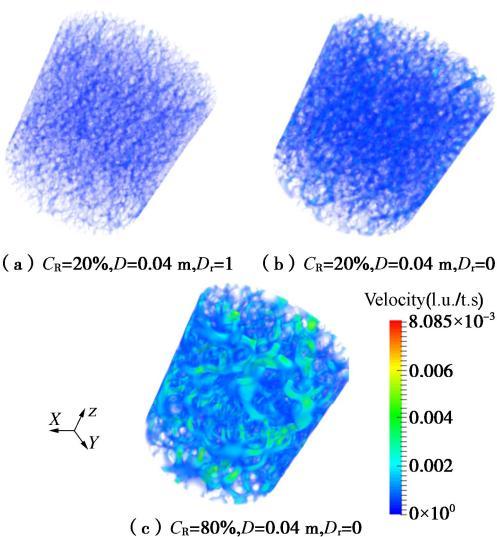


图 3 土石混合体的流速场

Fig. 3 Velocity contour plots of SRM

由表 1 和图 3 可以看到, 块石含量、块石粒径和相对密实度对土石混合体宏观的渗透率及微观的渗流场都有一定的影响。下面结合孔隙率和比表面积的变化就这些因素对渗透率的影响进行分析, 为此将渗透率、孔隙率和比表面积随块石含量、相对密实度和块

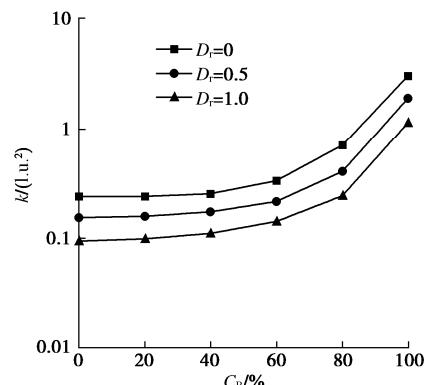
图 4 土石混合体渗透率随块石含量的变化 ($D=0.04 \text{ m}$)

Fig. 4 Variation of permeability of SRM with rock content

3.1 块石含量的影响

由图 4 和图 5 可见, 当相对密实度和块石粒径相同时, 随块石含量增加, 土石混合体的渗透率总体上是逐渐增大的, 且增大的速率也越来越大。这与 Zhou 等^[5]的室内试验结果是基本一致的。

由图 6 和图 7 可知, 当相对密实度和块石粒径相同时, 土石混合体的孔隙率随块石含量的增加先减小

后增大，在 60% 时取最小值。这是因为不同块石含量时土石混合体的细观结构特征不同^[4, 16]，在中低块石含量时 (<60%)，土石混合体为骨架-悬浮或骨架-密实结构，块石的增加使孔隙率减小，而当块石含量较高时 (>60%) 时为骨架-孔隙结构，块石的增加使孔隙率增大。

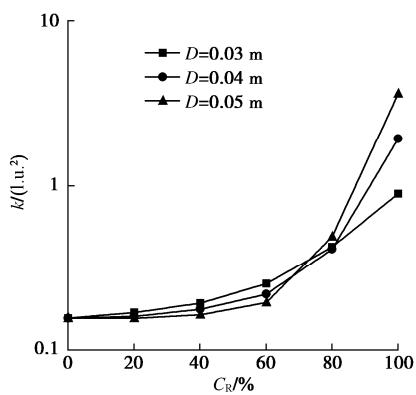


图 5 土石混合体渗透率随块石含量的变化 ($D=0.5$)

Fig. 5 Variation of permeability of SRM with rock content
($D_r = 0.5$)

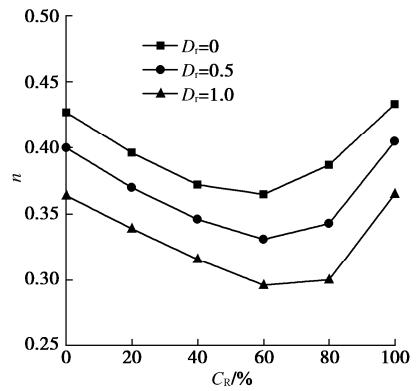


图 6 土石混合体孔隙率随块石含量变化 ($D=0.04 \text{ m}$)

Fig. 6 Variation of porosity of SRM with rock content ($D=0.04 \text{ m}$)

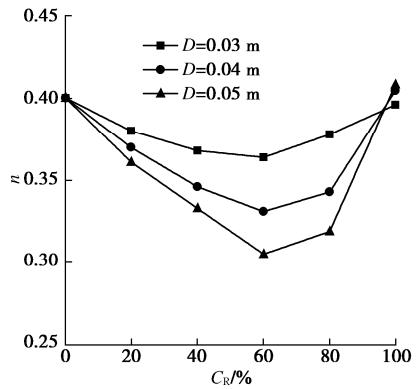


图 7 土石混合体孔隙率随块石含量变化 ($D_r=0.5$)

Fig. 7 Variation of porosity of SRM with rock content ($D_r=0.5$)

由图 8, 9 可知，当相对密实度和块石粒径相同时，

土石混合体的比表面积随块石含量的增加而不断减小。1 个半径为 R 的球体的比表面积为 $3/R$ ，因此颗粒粒径越大比表面积越小，故随块石含量增加，粗颗粒比例增大，模型的比表面积就逐渐减小。

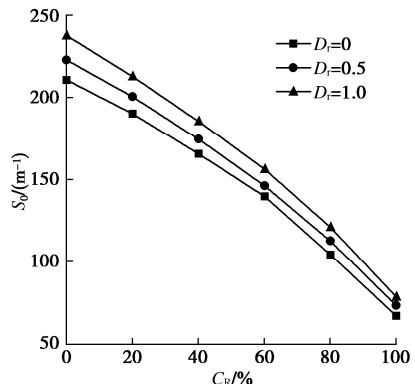


图 8 土石混合体比表面随块石含量的变化 ($D=0.04 \text{ m}$)

Fig. 8 Variation of specific surface area of SRM with rock content
($D=0.04 \text{ m}$)

($D_r = 0.04 \text{ m}$)

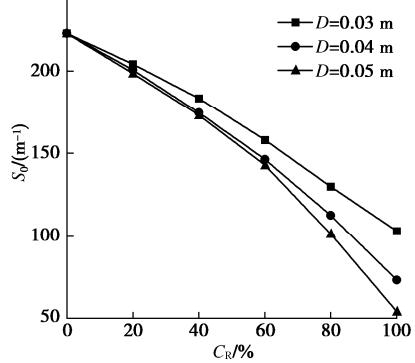


图 9 土石混合体比表面随块石含量变化 ($D_r = 0.5$)

Fig. 9 Variation of specific surface area of SRM with rock content
($D_r = 0.5$)

随块石含量增加，孔隙率先减小后增大使得渗透率有先减小后增大的趋势，而比表面积不断减小使得渗透率有逐渐增大的趋势，两者综合的效果是渗透率总体上逐渐增大且增大的速率逐渐增加，到 60% 时开始显著增大。

3.2 相对密实度的影响

由图 4 可见，当块石含量和粒径均相同时，试样的相对密实度越高，渗透率越低，这也符合一般认识。

由图 6, 8 可知，当其他条件相同时，随试样相对密实度的提高，孔隙率减小而比表面积增大，两者都会使得渗透率有减小的趋势，因此渗透率越来越小。

3.3 块石粒径的影响

由图 5 可见，块石粒径对土石混合体的渗透率存在一定程度的影响，且块石含量不同时其变化规律也不同。当块石含量小于某一值时，块石粒径越大则渗透率越小，而当块石含量高于某一值时，块石粒径越

大则渗透率越大, 即存在一个临界值, 本文中该值在 70%~80%附近。

由图 7 可知, 当其他条件相同时, 块石粒径越大孔隙率越小(除块石含量很高时以外), 这使得渗透率有减小的趋势。由图 9 可知, 当其他条件相同时, 随块石粒径增大, 比表面积逐渐减小, 这使得渗透率有增大的趋势。由图 7 和图 9 还可以看到: 当块石含量低于临界值时, 孔隙率随块石粒径的变化幅度较大而比表面积的变化幅度相对较小, 此时孔隙率的减小作用占主要地位, 因此总体结果是块石粒径越大渗透率越小; 而当块石含量高于临界值时, 比表面积随块石粒径的变化幅度较大, 此时其对渗透率的增大作用将占主要地位, 因此总体结果是块石粒径越大渗透率越大。

4 讨 论

王鹏飞等^[3]、Wang 等^[6]都开展了不同块石含量土石混合体试样的室内渗透试验, 并采取了同样的制样方法, 即在制样前先对不同块石含量的试样进行击实试验, 得到使其中土体密度达到相同值时各自所需要的击实次数, 并依此制备了土体基质密度相同的不同块石含量的土石混合体试样。其渗透试验结果表明随块石含量增加, 土石混合体试样的渗透系数先减小后增大, 在块石含量为 40%时达到最低。

徐文杰等^[7]、Chen 等^[8]分别基于有限元法和数值流行法对土石混合体随机细观结构模型的渗流进行了二维模拟, 其不同块石含量的土石混合体模型中土体基质是设为完全相同的, 模拟结果表明随块石含量增加, 土石混合体模型的渗透系数逐渐减小。

本文中, 不同块石含量的土石混合体三维模型的相对密实度保持不变, LBM 模拟结果表明随块石含量增加土石混合体的渗透率总体上是逐渐增大的。结合上述室内试验和其它数值模拟的结果可以看到, 不同条件下块石含量对土石混合体渗透性的影响不尽相同, 甚至截然相反。

为了明晰不同条件下块石含量对土石混合体渗透性存在不同影响的内在机制, 这里以图 10 所示的二维简化模型为例, 借助 LBM 渗流模拟来探讨土体基质保持相同时的情形。图中较大的方块表示块石颗粒, 较小的圆盘表示土颗粒, case1 代表均质土体, case2 代表较低块石含量的土石混合体(骨架悬浮结构), case3 代表中等块石含量的土石混合体(骨架密实结构), case4 代表较高块石含量的土石混合体(骨架孔隙结构), case5 代表块石体模型。模型大小均为 200×200 l.u., 各模型中土体颗粒排列保持不变, 各

模型渗透率的 LBM 模拟值如图 11 所示。

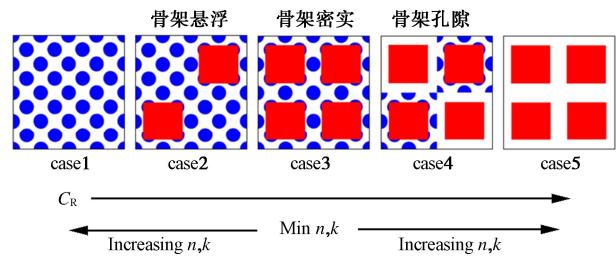


图 10 不同块石含量土石混合体的简化模型(土体密度相同)

Fig. 10 Simplified SRM models with different rock contents
(density of soil matrix remains unchanged)

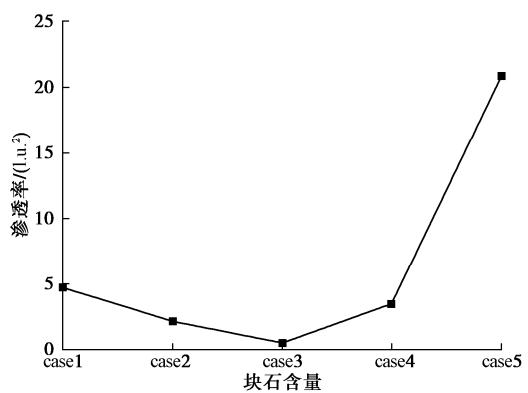


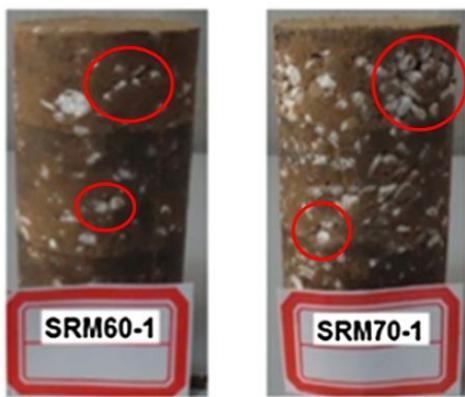
图 11 块石含量对土石混合体渗透率的影响(土体密度相同)

Fig. 11 Effects of rock content on permeability of SRM (density of soil matrix remains unchanged)

如图 10 和图 11 所示, 从 case1 到 case3 的情形与徐文杰等^[7]、Chen 等^[8]数值模型中块石含量的增加本质上是一致的, 此时因大块石的加入使得模型的孔隙率减小且水流因块石阻挡更加曲折, 因此渗透率逐渐降低。王鹏飞等^[3]、Wang 等^[6]室内试验中块石含量小于 40%时的情况亦是如此。

从 case3 到 case4 时, 块石含量增加无法由继续增加块石来实现, 而只能相对减少土体的量, 土石混合体为骨架-孔隙结构, 因此模型的孔隙率增大, 渗透率又开始提高。

Wang 等^[6]指出当块石含量大于 40%时, 随块石含量增加, 土-石界面增多, 而这些界面的流速相对较大, 故渗透性提高。本文分析认为, 尽管王鹏飞等^[3]、Wang 等^[6]制样时试图使各块石含量试样中土体基质的密度相同, 但实际上当块石含量较高时这是很难实现的。图 12 即是文献[6]中块石含量分别为 60% 和 70% 的土石混合体试样, 可以看到试样局部有一些大孔隙, 尤其是块石积聚的部位。因此, 该情形下土石混合体渗透率随块石含量增加而增大更可能是局部的骨架孔隙结构逐渐增多导致的, 这也类似于图 10 中 case3 到 case4 的情形。

图 12 室内土石混合体试样^[6]Fig. 12 Laboratory SRM samples^[6]

5 结 论

本文基于三维格子 Boltzmann 方法从孔隙尺度模拟了土石混合体中的渗流，分析了块石含量、相对密实度和块石粒径对土石混合体渗透率的影响，并对土体密度不变条件下块石含量对土石混合体渗透性的影响进行了探讨。本文的研究工作得到了以下结论：

(1) 当相对密实度和块石粒径不变时，土石混合体的渗透率随块石含量的增加总体上呈逐渐增大的趋势，且增大的速率也越来越大

(2) 当块石含量和块石粒径不变时，相对密实度越高，土石混合体的渗透率越低。

(3) 块石粒径对土石混合体的渗透率存在一定程度的影响，当块石含量小于临界值时，块石粒径越大则渗透率越小，而当块石含量高于临界值时，块石粒径越大则渗透率越大，本文中临界块石含量在 70%~80%附近。

(4) 不同条件下块石含量对土石混合体渗透性的影响不尽相同，当土石混合体中土体的密度保持不变时，其渗透率随块石含量增加先减小后增大。

采用本文的土石混合体 DEM 建模方法和渗流 LBM 模拟方法可进一步研究块石级配、块石形状、块石空间分布等细观结构特征对土石混合体渗流特性的影响，限于篇幅，这些内容将另文研究。

参考文献：

- [1] 廖秋林. 土石混合体地质成因、结构模型及其力学特性、固流耦合特性研究[D]. 北京：中国科学院地质与地球物理研究所，2006. (LIAO Qiu-lin. Geological Origin and Structure Model of Rock and Soil Aggregate and Study on Its Mechanical and MH Coupled Properties[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese))
- [2] 许建聪，尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报，2006, 25(11): 2264 - 2271. (XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2264 - 2271. (in Chinese))
- [3] 王鹏飞，李长洪，马学文，等. 断层带不同含石率土石混合体渗流特性试验研究[J]. 岩土力学，2018(增刊 2): 53 - 61. (WANG Peng-fei, LI Chang-hong, MA Xue-wen, et al. Experimental study of seepage characteristics of soil-rock mixture with different rock contents in fault zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018(S2): 53 - 61. (in Chinese))
- [4] 徐文杰. 土石混合体细观结构力学及其边坡稳定性研究[D]. 北京：中国科学院地质与地球物理研究所，2008. (XU Wen-jie. Study on Meso-Structural Mechanics of Soil-Rock Mixture and Its Slope Stability[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese))
- [5] 周中，傅鹤林，刘宝琛，等. 土石混合体渗透性能的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2006, 33(6): 25 - 28. (ZHOU Zhong, FU He-lin, LIU Bao-chen, et al. Experimental study of the permeability of soil-rock-mixture[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2006, 33(6): 25 - 28. (in Chinese))
- [6] WANG Y, LI X, ZHENG B, et al. Experimental study on the non-Darcy flow characteristics of soil–rock mixture[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 1 - 18.
- [7] 徐文杰，王永刚. 土石混合体细观结构渗流数值试验研究[J]. 岩土工程学报，2010, 32(4): 542 - 550. (XU Wen-jie, WANG Yong-gang. Meso-structural permeability of S-RM based on numerical tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 542 - 550. (in Chinese))
- [8] CHEN T, YANG Y T, ZHENG H, et al. Numerical determination of the effective permeability coefficient of soil–rock mixtures using the numerical manifold method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2019, 43(1): 381 - 414.
- [9] CHEN S Y, DOOLEN G D. Lattice Boltzmann method for fluid flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998, 30: 329 - 364.
- [10] SUCCI S, FOTI E, HIGUERA F. Three-dimensional flows in complex geometries with the lattice Boltzmann method[J]. Europhysics Letters (EPL), 1989, 10(5): 433 - 438.
- [11] PAN C, HILPERT M, MILLER C T. Pore-scale modeling of saturated permeabilities in random sphere packings[J].

- Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2001, **64**(6): 066702.
- [12] GHASSEMI A, PAK A. Pore scale study of permeability and tortuosity for flow through particulate media using lattice Boltzmann method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, **35**(8): 886 – 901.
- [13] BORUJENI A T, LANE N M, THOMPSON K, et al. Effects of image resolution and numerical resolution on computed permeability of consolidated packing using LB and FEM pore-scale simulations[J]. Computers & Fluids, 2013, **88**: 753 – 763.
- [14] COUSINS T A, GHANBARIAN B, DAIGLE H. Three-dimensional lattice Boltzmann simulations of single-phase permeability in random fractal porous media with rough pore-solid interface[J]. Transport in Porous Media, 2018, **122**(3): 527 – 546.
- [15] XU W J, WANG S, ZHANG H Y, et al. Discrete element modelling of a soil-rock mixture used in an embankment dam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, **86**: 141 – 156.
- [16] 金 磊, 曾亚武. 土石混合体宏细观力学特性和变形破坏机制的三维离散元精细模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(6): 1540 – 1550. (JIN Lei, ZENG Ya-wu. Refined simulation for macro-and meso-mechanical properties and failure mechanism of soil-rock mixture by 3D DEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(6): 1540 – 1550. (in Chinese))
- [17] 黄青富, 詹美礼, 盛金昌, 等. 基于颗粒离散单元法的获取任意相对密实度下级配颗粒堆积体的数值方法[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(3): 537 – 543. (HUANG Qing-fu, ZHAN Mei-li, SHENG Jin-chang, et al. Numerical method to generate granular assembly with any desired relative density based on DEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(3): 537 – 543. (in Chinese))
- [18] BHATNAGAR P L, GROSS E P, KROOK M. A model for collision processes in gases: I small amplitude processes in charged and neutral one-component systems[J]. Physical Review, 1954, **94**(3): 511 – 525.
- [19] QIAN Y H, D'HUMIÈRES D, LALLEMAND P. Lattice BGK models for navier-stokes equation[J]. Europhysics Letters (EPL), 1992, **17**(6): 479 – 484.
- [20] FENG Y T, HAN K, OWEN D R J. Coupled lattice Boltzmann method and discrete element modelling of particle transport in turbulent fluid flows: computational issues[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, **72**(9): 1111 – 1134.
- [21] 金磊, 曾亚武, 叶 阳, 等. 不规则颗粒及其集合体三维离散元建模方法的改进[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(7): 1273 – 1281. (JIN Lei, ZENG Ya-wu, YE Yang, et al. Improving three-dimensional DEM modeling methods for irregularly shaped particles and their assembly[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(7): 1273 – 1281. (in Chinese))
- [22] ZOU Q S, HE X Y. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model[J]. Physics of Fluids, 1997, **9**(6): 1591 – 1598.
- [23] CARMAN P C. Fluid flow through granular beds[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1997, **75**: S32 – S48.
- [24] KOPONEN A, KATAJA M, TIMONEN J. Permeability and effective porosity of porous media[J]. Physical Review E, 1997, **56**(3): 3319 – 3325.
- [25] CHAPUIS R P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(5): 787 – 795.