

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0956

基于抽样可靠性的土体迂曲度计算

戴邵衡, 童晨曦, 颜 瀚, 滕继东, 张 升

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 迂曲度是研究土体渗水透气特性的重要参数, 反映了流体流经多孔介质过程中的迂回曲折程度。现有研究表明迂曲度不仅与孔隙率有关, 还与颗粒排列密切相关。在新提出的土体几何迂曲度模型基础上, 考虑孔隙率、颗粒排列对等效流经长度的耦合影响, 推导了单元体迂曲度计算模型, 对比前人的试验结果, 进一步探讨了颗粒排列、孔隙率对迂曲度的影响。基于抽样可靠性理论, 确定了在一定置信度与误差限度要求下, 计算土体整体迂曲度所需要的最小单元体样本量, 并验证了其可靠性。对比土体迂曲度理论解和基于 COMSOL Multiphysics 得到的数值模拟解, 验证了方法的合理性。该研究成果可为土体迂曲度的计算提供一种新的求解思路。

关 键 词: 迂曲度; 颗粒排列; 抽样可靠性; 最小样本量

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)03-0855-08

Calculation of soil tortuosity based on sampling reliability

DAI Shao-heng, TONG Chen-xi, YAN Han, TENG Ji-dong, ZHANG Sheng

(Department of Geotechnical Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: Tortuosity is an important parameter to study the permeability of soil, which reflects the degree of twists and turns of fluid flowing through porous media. Existing studies have shown that the tortuosity is not only related to porosity, but also closely related to particle arrangement of soil. Based on the new geometric tortuosity model of soil, a modified calculation model of tortuosity of soil unite is then proposed with emphasis on the coupling effect of porosity and particle arrangement on the equivalent flow length. The results showed that the proposed model agreed well with the experimental results in the literature, and the effects of particle arrangement and porosity on the tortuosity were further discussed. Furthermore, the minimum sample size needed for calculating the overall tortuosity of soil was determined under certain confidence and error limits based on the sampling reliability theory and this method has been proven to be reasonable and effective for representing the whole soil sample. Finally, the theoretical solution of soil tortuosity based on the proposed method was compared with the numerical simulation solution of soil tortuosity based on COMSOL Multiphysics, and the satisfactory agreement proved the reasonability and validity of the proposed method. The study provides an alternative approach for the calculation of soil tortuosity.

Keywords: tortuosity; particle arrangement; sampling reliability; minimum sample size

1 引 言

土体作为一种常见的多孔介质材料, 其内部孔隙结构的多样性导致液体或气体在土体孔隙中的渗透是一种十分复杂的现象^[1]。随着工程建设新领域的推进, 由渗水或透气所导致的岩土工程病害日益增多, 并成为岩土工程领域具有广泛研究意义的新

课题^[2-5]。为解决由土中不同物态水-气迁移集聚所导致的一系列病害问题, 首先需要研究土的渗水和透气特性^[6-8]。流体流经多孔介质, 形成形状和长度各异的流动路径, 是一种复杂的多尺度现象。当路径较短时, 多孔介质的阻力相对较低, 具有高渗透性; 而当路径长而弯曲时, 多孔介质的阻力则较高, 具有低渗透性^[9]。为量化描述这一效应, Kozeny^[10]

收稿日期: 2020-07-06

修回日期: 2020-12-25

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目 (No.51722812); 湖湘高层次人才聚集工程 (No.2018RS3016); 湖南省研究生科研创新项目 (No.CX20200220); 中南大学研究生自主探索创新项目 (No.2020zzts613, No.2020zzts629)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of China(51722812), the High-Level Talents Gathering Project in Hunan Province(2018RS3016), the Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province(CX20200220) and the Autonomous Exploration Project of Central South University (2020zzts613, 2020zzts629).

第一作者简介: 戴邵衡, 男, 1996年生, 硕士研究生, 主要从事土体渗流、铁路路基翻浆冒泥等方面的研究。E-mail: daishaocheng@csu.edu.cn

通讯作者: 张升, 男, 1979年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事计算土力学等方面的教学和科研工作。E-mail: zhang-sheng@csu.edu.cn

引入了一个新的物理量, 即迂曲度 Γ , 其定义为

$$\Gamma = \frac{L_t}{L_0} \quad (1)$$

式中: L_t 为流体在多孔介质中的实际流径; L_0 为宏观压力梯度上的直线距离^[11]。迂曲度越大, 意味着多孔介质中联通孔隙的弯曲程度越高, 颗粒的排列越紧密。

迂曲度的研究主要包括试验法^[12-13]、解析法^[14-15]和模拟法^[16-17]。国内学者对此开展了大量的研究, 部分学者通过试验测量, 直接或间接得到迂曲度, 如吕道平^[18]根据水力迂曲度与多孔介质中的孔隙半径、孔隙率、渗透率的关系, 利用气测岩心渗透率求取岩芯水力迂曲度; 此外, 多孔介质中的迂曲度, 实际上也可简化为数学的几何关系, Yu 等^[19]基于简单的几何模型推导, 得到了只与孔隙率有关的迂曲度表达式; 在几何模型中考虑分形特性, 也引起了很多学者的关注^[20], 如薛东杰等^[21]基于迂曲度曲线的分维特征, 推导了迂曲度关于孔隙率的毛细管模型算法。由此可以看出, 现有的研究普遍认为迂曲度主要受孔隙率的影响, 而多孔介质的颗粒排列对迂曲度的影响则鲜有研究^[22-23]。颜瀚等^[24]通过确定颗粒间的位置关系和流径的几何关系, 提出了迂曲度的上限和下限排列, 给出了单元体的迂曲度取值范围。考虑到多孔介质中的不同单元体排列组合具有多样性, 因此以某一单元体的迂曲度来表征土体整体的迂曲度并不合理。在保证计算精度和效率的前提下, 选择合理的单元体样本数量, 是土体整体迂曲度理论求解过程中需要解决的一大难题。

为解决这一难点, 本文拟采用抽样分析方法来确定所需单元体数量。笔者此前基于抽样可靠性方法研究了能真实反映工程现场土体整体级配情况的颗分试验取样量, 并成功应用于机场填料级配的确定^[25-26]。在此基础上, 本文对颜瀚等^[24]建立的几何模型中的等效流径长度进行了优化与改进, 综合考虑孔隙率、颗粒排列对迂曲度的耦合影响, 给出了基于抽样可靠性的土体迂曲度理论解。最后, 对比本文提出的迂曲度理论解和通过有限元程序 COMSOL Multiphysics 计算得到的数值模拟解, 验证了该方法的合理性。

2 孔隙率与颗粒排列耦合影响的单元体迂曲度模型

本文在颜瀚等^[24]工作的基础上, 基于流体在多

孔介质中的流动路径, 同时考虑孔隙率、颗粒排列对等效流径长度的耦合影响, 建立单元体迂曲度的几何模型。如图 1 所示, 流体自左向右层流流动, A 为土颗粒的长度, C 为流动方向两土颗粒之间的距离, B 为垂直流动方向两土颗粒之间的距离, 定义各向异性参数 $m = B/C$, θ 为两颗粒中心连线的水平夹角。

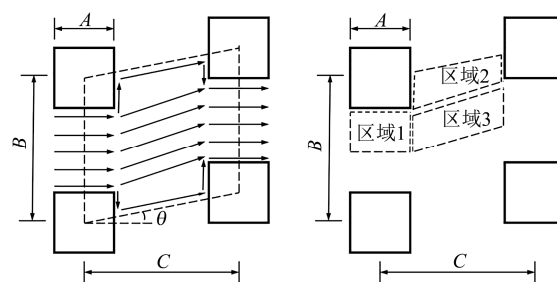


图 1 流体在单元体内流动示意图

Fig.1 Schematic diagram of fluid flow in the unit

取单元体上部进行分析, 流体从左至右流动, 其中, 区域 1 的流动路径长度为 A 。区域 3 的流动路径长度 L_3 为

$$L_3 = \sqrt{(C - A)^2 + C^2 \tan^2 \theta} \quad (2)$$

区域 2 的流动路径长度 L_2 为

$$L_2 = 0.5 \times \left[\sqrt{(C - A)^2 + C^2 \tan^2 \theta} + A + \left(\frac{C - A}{\cos \theta} \right) \right] \quad (3)$$

对于区域 2、区域 3, 颜瀚等^[24]取其平均值作为区域 2、3 的等效流动路径, 此方法对于区域面积接近的情况下是非常简便且合适的, 但对于面积大小悬殊的情况来说, 区域面积越大, 其客观存在的流径分布越多, 其对等效流径的贡献越大, 考虑流域面积确定等效流径的方法则更为合适, 见下式。考虑其面积占比可得区域 2 与区域 3 的等效流径长度 L 为

$$L = L \times \frac{C}{A} + L \times \left(\frac{A - C}{A} \right) = 0.5 \times \left[\sqrt{(B - C)^2 + B^2 \tan^2 \theta} + C + \left(\frac{B - C}{\cos \theta} \right) \right] \times \frac{C}{A} + \sqrt{(B - C)^2 + B^2 \tan^2 \theta} \times \left(\frac{A - C}{A} \right) \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 当区域面积相等时, 等效流经长度的取值与颜瀚等^[24]的取值一致。此外, 孔隙率越大, 阻碍参数 θ 的变化对流径长度的影响越小,

反之影响越大。因此考虑流径变化随着孔隙率的增大而变缓, 引进孔隙率 n 对角度 θ 进行折减, 可得其等效路径 $L_{\text{等效}}$ 为

$$L_{\text{等效}} = 0.5 \times \sqrt{(C-A)^2 + C^2 \tan^2[(1-n)^2 \times \theta]} \times \frac{A}{B} + \sqrt{(C-A)^2 + C^2 \tan^2[(1-n)^2 \times \theta]} \times \left(\frac{B-A}{B} \right) + 0.5 \times \left[A + \left(\frac{C-A}{\cos[(1-n)^2 \times \theta]} \right) \right] \times \frac{A}{B} \quad (5)$$

由迂曲度公式可得单元体迂曲度为

$$\Gamma = \frac{L_t}{L_0} = \frac{L_1 + L_{\text{等效}}}{C} \quad (6)$$

将 m 、 n 代入式 (6), 得到迂曲度的最终表达式:

$$\Gamma = \sqrt{(1-n)m} + \left(1 - 0.5 \times \sqrt{\frac{1-n}{m}} \right) \times \sqrt{\left[1 - \sqrt{(1-n)m} \right]^2 + \tan^2[(1-n)^2 \times \theta]} + \frac{1-n}{2} + \frac{\sqrt{\frac{1-n}{m}} - 1 + n}{2 \cos[(1-n)^2 \times \theta]} \quad (7)$$

式 (7) 即为迂曲度的计算模型, 由于土体颗粒的形状各异等复杂特性, 本文模型虽不能完美表征土体颗粒, 但值得一提的是, 对于不同形状土颗粒的模型, 其迂曲度的推导计算过程是一致的, 笔者在下一步的工作中也将深入考虑土体颗粒形状和颗粒级配等复杂因素。

考虑图 2 所示的颗粒位置关系, 模型参数的改变表征着颗粒 3 的移动: 各向异性参数 m 的改变对应于颗粒 3 的左右移动, 其数值越偏离 1, 多孔介质的各向异性越分明; 而阻碍参数 θ 的改变对应于颗粒 3 的上下移动。特别地, 当 $m = 1$, $\theta = 0$ 时, 模型变为颜瀚等^[24]研究中的下限 (LA) 排列; 当 $\theta = \arctan(1/2)$ 时, 模型为上限 (HA) 排列。可以看出, 各向异性参数 m 与阻碍参数 θ 表征了颗粒之间的复杂位置关系, 而影响多孔介质迂曲度的主要因素正是颗粒的相对位置关系。颗粒在外力作用下发生移动, 从而导致迂曲度及渗透系数相应地发生变化, 颗粒的堵塞作用形成相对不透水层, 其被认为是相应工程病害的诱因之一^[27]。

通过选取不同颗粒排列参数, 对比本文提出的

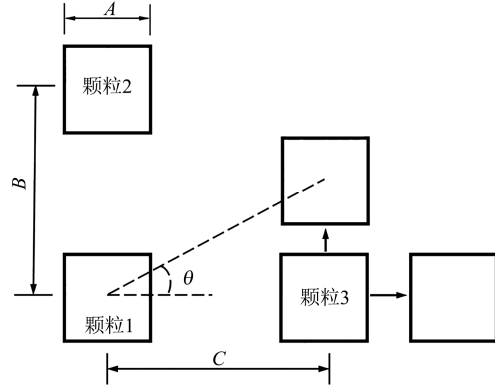


图2 颗粒位置关系示意图
Fig.2 Schematic diagram of particle position

单元体迂曲度模型与前人研究结果^[12, 16-17, 19], 如图 3 所示。由图可知, 迂曲度随孔隙率的变化趋势并不统一, 在孔隙率相同的情况下, 若颗粒排列方式 (即 m 、 θ) 不同, 则土体的迂曲度也不同。本文模型考虑颗粒排列方式的影响, 通过调整颗粒排列参数, 可以得到不同排列方式下的单元体迂曲度, 特定排列方式下的模型与文献中模型具有较好的一致性, 验证了本文模型的合理性。相对于前人的研究, 本文提出的单元体迂曲度模型综合考虑了颗粒排列方式、孔隙率对迂曲度的耦合影响, 体现了迂曲度在多孔介质中的各向异性与复杂性。

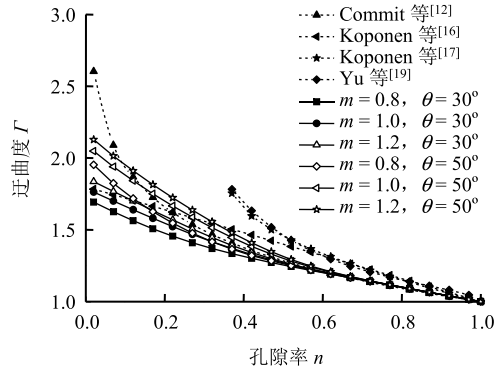


图3 本文模型与文献中其他模型对比图
Fig.3 Comparison between the proposed model in the study and other models in the literature

图 4 进一步探讨了各向异性参数、阻碍参数以及孔隙率对单元体迂曲度的影响。当孔隙率较大时 (大于 0.7), 颗粒尺寸相对于孔隙尺寸较小, 故颗粒的相对位置关系对迂曲度的影响较小, 迂曲度与孔隙率呈近似线性关系, 随着孔隙率的增大, 迂曲度减小并趋近于 1。当孔隙率小于 0.7 时, 颗粒尺寸相对于孔隙尺寸较大, 颗粒排列对迂曲度的影响较明显, 迂曲度与孔隙率呈现非线性关系; 同时由图 4

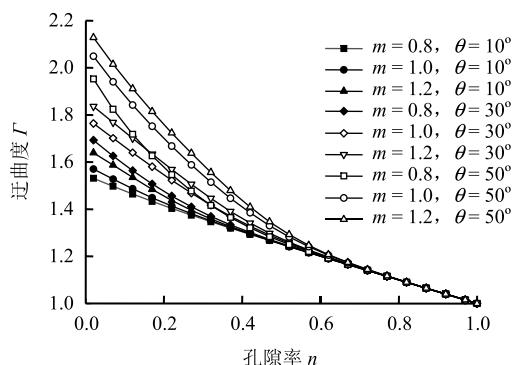


图4 颗粒排列方式与孔隙率对单元体迂曲度的影响

Fig.4 Effect of particle arrangement and porosity on the tortuosity of soil unit

可知,当孔隙率与阻碍参数一定时,各向异性参数越大,迂曲度越小;当孔隙率与各向异性参数一定时,阻碍参数越大,迂曲度越大;当颗粒排列相同时,孔隙率越大,迂曲度越小。总体而言,颗粒排列与孔隙率共同影响着迂曲度的大小。

3 基于抽样分析的土体迂曲度理论解

3.1 取样量的确定

上文建立了考虑颗粒排列与孔隙率耦合影响下的单元体迂曲度几何模型,本章节将进一步考虑基于抽样分析法如何确定表征土体整体迂曲度所需的单元体样本数。

假定取样过程中每个单元体被抽中的概率都是相等的,属于等概随机抽样。设土样的单元体总数即为样本总量 N (对于土样可视无穷大),待抽样的单元数即为所需要的样本量 q 。

从规模为 N 的总体中抽取一个样本量为 q 的简单随机样本,则总体中每个特定单元体入样的概率 p_i 为

$$p_i = \frac{q}{N} \quad (8)$$

两个特定单元体都入样的概率 $p_{i,j}$ 为

$$p_{i,j} = \frac{q(q-1)}{N(N-1)} \quad (9)$$

对总体中的每个单元 Y_i , 引进随机变量 a_i :

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{若 } Y_i \text{ 入样,} \\ 0, & \text{若 } Y_i \text{ 不入样,} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

考虑每个单元体 Y_i 都有可能入样也有可能不入样,属于典型的服从二项分布的随机事件,所以表示这 N 个随机事件的 N 个随机变量 a_i 都服从二项分

布,根据式(8)、(9), $a_i = 1$ 概率为 q/N , $a_i = 0$ 的概率为 $1 - q/N$ 。 $a_i \times a_j = 1$ 的概率为: $[q(q-1)]/[N(N-1)]$, $a_i \times a_j = 0$ 的概率为: $[1 - q(q-1)]/[N(N-1)]$, 于是可得其均值为

$$E(a_i) = 1 \times \frac{q}{N} + 0 \times \left(1 - \frac{q}{N}\right) = f \quad (11)$$

$$E(a_i a_j) = 1 \times \frac{q(q-1)}{N(N-1)} + 0 \times \left[1 - \frac{q(q-1)}{N(N-1)}\right] = \frac{q(q-1)}{N(N-1)}, \quad i \neq j \quad (12)$$

因而可得其方差为

$$V(a_i) = E[a_i - E(a_i)]^2 = (1-f)^2 \times \frac{q}{N} + (0-f)^2 \times \left(1 - \frac{q}{N}\right) = f(1-f) \quad (13)$$

$$\text{cov}(a_i a_j) = E(a_i a_j) - E(a_i)E(a_j) = \frac{q(q-1)}{N(N-1)} - f^2 = -\frac{f(1-f)}{N-1} \quad (14)$$

$$V(\bar{y}) = V\left[\frac{1}{q} \sum_{i=1}^q a_i Y_i\right] = \frac{1}{q^2} \left[\sum_{i=1}^q Y_i^2 V(a_i) + 2 \sum_{i < j} Y_i Y_j \text{cov}(a_i a_j) \right] = \frac{1-f}{qN} \left[\frac{N}{N-1} \sum_{i=1}^q Y_i^2 - \frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^q Y_i \right)^2 \right] \quad (15)$$

式中: $\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^q (Y_i - \bar{Y})^2$ 为单元体信息总体方差 S^2 , 则

$$V(\bar{y}) = \frac{1-f}{q} S^2 = \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{N} \right) S^2 \quad (16)$$

由上式可得:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{N} + \frac{V(\bar{y})}{S^2} \quad (17)$$

在抽样应用中,单元体抽样误差 $V(\bar{y})$ 与总体方差 S^2 有关,而总体方差 S^2 属于未知,所以本文用置信度 $1-\alpha$ 和绝对误差限度 d 来表示。即

$$P\{|\bar{y} - \bar{Y}| \leq d\} = 1 - \alpha, \\ \Rightarrow P\left\{ \frac{|\bar{y} - \bar{Y}|}{\sqrt{V(\bar{y})}} \leq \frac{d}{\sqrt{V(\bar{y})}} \right\} = 1 - \alpha \quad (18)$$

根据双侧分位数 $u_{\alpha/2}$ 的定义,有

$$P\left\{\left|\frac{\bar{y}-\bar{Y}}{\sqrt{V(\bar{y})}}\right|\leq u_{\alpha/2}\right\}=1-\alpha \quad (19)$$

比较两公式，即有

$$u_{\alpha/2}=\frac{d}{\sqrt{V(\bar{y})}} \quad (20)$$

于是可以得到，在置信度 $1-\alpha$ 、绝对误差限度 d 的要求下所需的样本量为

$$\frac{1}{q}=\frac{1}{N}+\frac{d^2}{u_{\alpha/2}^2 S^2} \quad (21)$$

由上式可以看出，样本量的大小由单元体的总体数量 N 、抽样精度要求及单元体信息总体方差 S^2 这3个因素决定，总体规模越大，抽样精度要求越高，总体单元体差异性越高，则所需样本量越多。

为得到简单随机抽样的样本量，我们要确定置信度 α 、绝对误差限度 d 和总体方差 S^2 。其中总体方差 S^2 是未知的，本文对总体先做样本量较少的调查，根据预查样本算出 S^2 的估计值，以此值作为 S^2 的粗略值确定所需样本量，在已调查的较少样本上再补充调查部分样本单元，达到所需的样本量。

3.2 抽样试验

本文通过编程生成随机排列的土体多孔介质模型，其孔隙率为0.574。以图5多孔介质为例，为了得到其总体特征，要求置信度为99%，绝对误差限为5%，由公式(5)可知，需要通过抽样得到总体的 m 与 θ 特征，本文通过SPSS随机预抽取4个样本，对总体先作样本量较少的调查，根据预查样本算出 m 与 θ 的均值、方差，并以此值作为总体方差 S^2 的粗略值确定所需样本量，由样本量公式可得其所需样本量如表1所示。

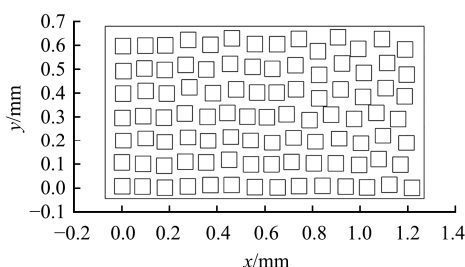


图5 随机多孔介质示意图

Fig.5 Schematic diagram of random porous media

由表1可知，所需最少样本量为26。在已调查的较少样本上再补充调查部分样本单元，达到所需的样本量，统计并得到样本信息如表2所示。

表1 初次样本量统计表

Table 1 Statistical table of initial sample size			
参数	均值	方差	所需样本量
m	1.086 26	0.014 24	25.52
θ	0.011 84	0.013 76	24.93

表2 样本量统计表

Table 2 Statistical table of sample size		
参数	均值	方差
m	1.109 1	0.005 2
θ	0.044 1	0.037 1

为验证取样量的可靠性，本文对此多孔介质进行抽样分析，得到参数 m 与抽样量的关系如图6。

基于以上4轮抽样分析，得到了抽样量 $q \geq 26$ 时的最大相对误差值如表3所示。

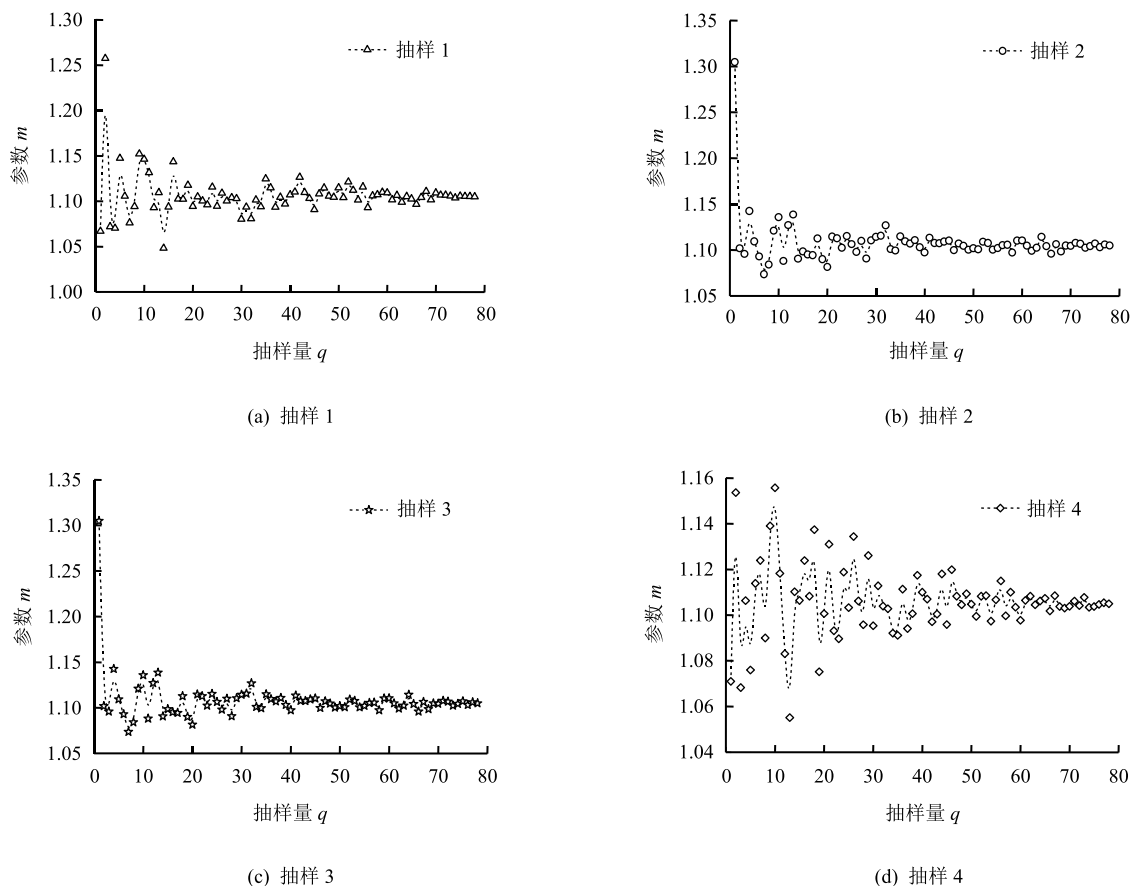
由图6可以看出，随着取样量的增加，由样本得到的参数统计量大体上越来越接近于由总体数据得到的参数统计量，由表3可知，抽样量 $q \geq 26$ 时其最大相对误差值未超过5%，说明本文的取样量理论是可以达到较好的效果。基于以上理论，可以得到土体整体迂曲度的理论值为 $\Gamma_{\text{理论解}}=1.215\ 33$ 。

3.3 数值模拟验证

为验证本文提出的基于抽样可靠性的模型，对上述多孔介质进行数值模拟分析。本文运用有限元程序COMSOL Multiphysics模拟牛顿液体在层流情况下流经多孔介质，结合一定初始和边界条件，可实现牛顿液体在多孔介质中层流过程的数值求解，进而分析其渗流特性。考虑到流域是本文重点关注的区域，因此本文将土体颗粒视为固体几何，不划分网格，对流域进行标准的网格划分。其网格划分如图7所示。

计算条件设定如下：为了在数值模型中满足层流流动，左侧入口边界设置为入口压力为10 Pa的层流流入，右侧出口边界设置为出口压力为0 Pa的层流流出，土颗粒设置为固体几何，土颗粒壁面及模型壁面无滑移，以水为流体，动力黏度为 $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，密度为 1 kg/m^3 ，控制温度为 20°C ，在入口设置探针测量入口压力及质量流等，在出口设置探针测量出口压力及单元雷诺数。数值计算涉及的参数见表4。

通过域探针得到单元雷诺数，保证多孔介质的层流流动，其达到稳定层流时流线分布见图8。由迂曲度定义可得其数值解为 $\Gamma_{\text{数值解}}=1.174\ 2$ ，而基于抽样可靠性得到的此多孔介质的理论解为 $\Gamma_{\text{理论解}}=1.215\ 33$ ，其相对误差 $\varepsilon=3.5\%$ ，表明二者具有较高的一致性，证明本文提出的基于抽样可靠

图 6 参数 m 随抽样量 q 变化示意图Fig.6 Variation curves of parameter m with sampling quantity q 表 3 抽样量 $q \geq 26$ 时的最大相对误差值

抽样	最大相对误差值/%
抽样 1	2.36
抽样 2	2.24
抽样 3	1.70
抽样 4	2.59

性的迂曲度计算方法具有较高的精确度。通过确定合理的样本数量,对土体进行抽样,以样本信息表征总体特征,为土体迂曲度的计算提供了一种新的求解方法。

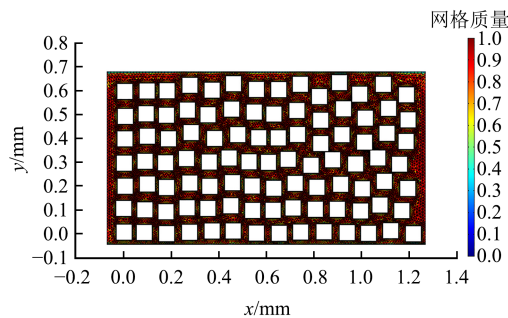


图 7 数值计算网格划分示意图

Fig.7 Plot of meshing in numerical simulations

表 4 数值模拟参数

Table 4 Numerical simulation parameters

参数	求解方程	入口边界	出口边界	壁面边界
方程	$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \mu \nabla u + \mu(\nabla u)^T] + F$ $\rho \nabla \cdot (u) = 0$	$L_{entr} \nabla_i \cdot [-pI + \mu(\nabla_i u + (\nabla_i u)^T)] = -p_{entr} n$	$L_{exit} \nabla_i \cdot [-pI + \mu(\nabla_i u + (\nabla_i u)^T)] = -p_{exit} n$	$u = 0$
流体性质	水	水	水	水
边界条件	—	层流流入	层流流出	无滑移

注: ρ 为流体密度; u 为流速; F 为质量力; μ 为动力黏度; I 为单位张量; ∇ 为拉普拉斯算子; ∇_i 表征瞬态; L_{entr} 、 L_{exit} 分别为入口长度、出口长度 (mm); p_{entr} 、 p_{exit} 分别为入口压力、出口压力 (P_a)。

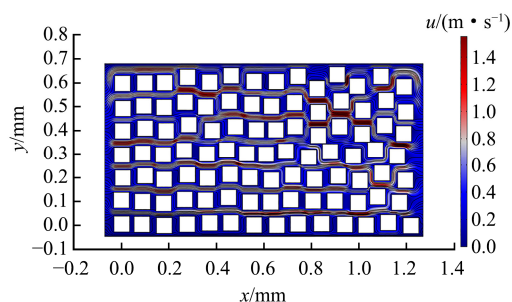


图8 流线分布示意图

Fig.8 Schematic diagram of streamline distribution

4 结 论

(1) 本文通过考虑孔隙率和颗粒排列的耦合影响, 建立多孔介质的简单几何模型, 推导了迂曲度与孔隙率 n 、各向异性 m 、阻碍参数 θ 的单元关系。

(2) 本文基于抽样可靠性, 得到了在一定置信度与误差限度要求下的所需的最小样本量, 并根据抽样调查获取的样本特征估计土体迂曲度, 通过与数值结果进行对比, 证明了本文模型的合理性。

参 考 文 献

- [10] 熊勇林, 朱合华, 叶冠林, 等. 降雨入渗引起非饱和土边坡破坏的水-土-气三相渗流-变形耦合有限元分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 284-290.
XIONG Yong-lin, ZHU He-hua, YE Guan-lin, et al. Analysis of failure of unsaturated soil slope due to rainfall based on soil-water-air seepage-deformation coupling FEM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(1): 284-290.
- [11] 张升, 高峰, 陈琪磊, 等. 砂-粉土混合料在列车荷载作用下细颗粒迁移机制试验[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1591-1598.
ZHANG Sheng, GAO Feng, CHEN Qi-lei, et al. Experimental study of fine particles migration mechanism of sand-silt mixtures under train load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(5): 1591-1598.
- [12] 盛建龙, 韩云飞, 叶祖洋, 等. 粗糙裂隙水、气两相流相对渗透系数模型与数值分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 1048-1055.
SHENG Jian-long, HAN Yun-fei, YE Zu-yang, et al. Relative permeability model for water-air two-phase flow in rough-walled fractures and numerical analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(3): 1048-1055.
- [13] 李强, 姚仰平, 韩黎明, 等. 土体的“锅盖效应”[J]. 工业建筑, 2014, 44(2): 69-71.
- LI Qiang, YAO Yao-ping, HAN Li-ming, et al. Pot-cover effect of soil[J]. **Industrial Construction**, 2014, 44(2): 69-71.
- [14] SHENG D, ZHANG S, NIU F, et al. A potential new frost heave mechanism in high-speed railway embankments[J]. **Géotechnique**, 2014, 64(2): 144-154.
- [15] ZHANG S, TENG J, HE Z, et al. Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soil[J]. **Géotechnique**, 2016, 66(11): 927-940.
- [16] ZHANG S, SHENG D, ZHAO G, et al. Analysis of frost heave mechanisms in high-speed railway embankment[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 53(3): 520-529.
- [17] TENG J, ZHANG X, ZHANG S, et al. An analytical model for evaporation from unsaturated soil[J]. **Computers and Geotechnics**, 2019, 108: 107-116.
- [18] SOBIESKI W, MATYKA M, GOEMBIIEWSKI J, et al. The Path Tracking Method as an alternative for tortuosity determination in granular beds[J]. **Granular Matter**, 2018, 20(4): 72.
- [19] KOZENY J. Über Kapillare Leitung des Wasser im Boden[J]. **Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien**, 1927, 136(2a): 271-306.
- [20] 员美娟. 多孔介质中流体的若干流动特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
YUAN Mei-juan. Research on some flow properties of fluid in porous media[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [21] IVERSEN N, BO B J. Diffusion coefficients of sulfate and methane in marine sediments: influence of porosity[J]. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 1993, 57(3): 571-578.
- [22] DIAS R, TEIXEIRA J A, MOTA M, et al. Tortuosity variation in a low density binary particulate bed[J]. **Separation and Purification Technology**, 2006, 51(2): 180-184.
- [23] PISANI L. Simple expression for the tortuosity of porous media[J]. **Transport in Porous Media**, 2011, 88(2): 193-203.
- [24] PISANI L. A geometrical study of the tortuosity of anisotropic porous media[J]. **Transport in Porous Media**, 2016, 114(1): 201-211.
- [25] KOPONEN A, KATAJA M, TIMONEN J. Tortuous flow in porous media[J]. **Physical Review E**, 1996, 54(1): 406-410.

- [26] KOPONEN A, KATAJA M, TIMONEN J. Permeability and effective porosity of porous media[J]. **Physical Review E**, 1997, 56(56): 3319-3325.
- [27] 吕道平. 多孔介质中水力学迂曲度因子的求取及应用[J]. 新疆石油地质, 2000(6): 515-517, 540.
LÜ Dao-ping. Solution of hydraulic tortuosity factor in porous media and its application[J]. **Xinjiang Petroleum Geology**, 2000(6): 515-517, 540.
- [28] YU B M, LI J H. A geometry model for tortuosity of flow path in porous media[J]. **Chinese Physics Letters**, 2004, 21(8): 1569-1571.
- [29] 员美娟. 分形毛细管中 Reiner-Philippoff 非牛顿流体的有效渗透率研究[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(2): 158-160.
YUAN Mei-juan. Effective permeability of Reiner-Philippoff fluid in a fractal capillary[J]. **Journal of Wuhan University of Science and Technology**, 2013, 36(2): 158-160.
- [30] 薛东杰, 周宏伟, 邓淋升, 等. 低渗煤岩气液两相流分形运动方程[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(4): 30-40.
XUE Dong-jie, ZHOU Hong-wei, DENG Lin-sheng, et al. Fractal dynamics of gas-liquid flow in low-permeability coal[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2018, 50(4): 30-40.
- [31] ANTONIO R D C, MEHREZ A, AZITA A S, et al. Numerical investigation of Herschel-Bulkley fluid flows in 2D porous media: yielding behaviour and tortuosity[J]. **Computers and Chemical Engineering**, 2020, 140, 106922.
- [32] LALA A M S. A novel model for reservoir rock tortuosity estimation[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2020, 192, 107331.
- [33] 颜瀚, 滕继东, 张升, 等. 考虑颗粒排列的土体几何迂曲度模型[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 195-200.
YAN Han, TENG Ji-dong, ZHANG Sheng, et al. Model for tortuosity of soil considering geometric arrangement of particles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(1): 195-200.
- [34] 李希, 张升, 盛岱超, 等. 基于抽样可靠性的颗分试验取样数量研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2122-2127.
LI Xi, ZHANG Sheng, SHENG Dai-chao, et al. Reasonable sample capacity for grain-size analysis tests based on sampling reliability[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(11): 2122-2127.
- [35] 张升, 乔春晖, 李希, 等. 考虑级配多样性的颗分试验取样质量理论研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2555-2562.
ZHANG Sheng, QIAO Chun-hui, LI Xi, et al. Theoretical study for determining sieving mass considering gradation diversity[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(7): 2555-2562.
- [36] CUI Y F, ZHOU X J, GUO C X. Experimental study on the moving characteristics of fine grains in wide grading unconsolidated soil under heavy rainfall[J]. **Journal of Mountain Science**, 2017, 14(3): 417-431.
-
- 上接第 832 页
- [10] 曹洪, 胡瑶, 骆冠勇. 滤管两端均不在含水层层面的承压不完整井近似计算方法研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2774-2780.
CAO Hong, HU Yao, LUO Guan-yong. Research on approximate calculation method for incomplete wells with filter screen ends away from the confined aquifer level[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(7): 2774-2780.
- [11] 沙金焯. 不完整井渗流的近似计算[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(5): 36-48.
SHA Jin-xuan. The approximate calculation of partially penetratinf well[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 7(5): 36-48.
- [12] 骆冠勇, 潘泓, 曹洪, 等. 承压水减压引起的沉降分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 196-200.
LUO Guan-yong, PAN Hong, CAO Hong, et al. Analysis of settlements caused by decompression of confined water[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Suppl.2): 196-200.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.