

DOI: 10.11779/CJGE20220772

基于颗粒分形特征的土体渗透特性预测模型

黄献文^{1,2}, 姜朋明^{*1}, 周爱兆¹, 王伟³, 唐楚轩^{2,4}

(1. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 新加坡国立大学工学院, 新加坡 119077; 3. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 4. 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: 为预测土体渗透特性, 基于其微观结构, 提出了土颗粒分形特征识别算法与渗流孔隙通道重建算法, 并将重建几何模型与传统有限元法联合, 建立了土体渗透系数蒙特卡洛预测模型。首先, 依据土体的微观结构特征, 通过分形特征识别算法 (FCIM) 识别土壤中颗粒的椭圆度、粗糙度、级配、孔隙率以及长轴倾角; 而后依据这些特征参数, 采用渗流孔隙通道分形重建算法 (FCRM) 重塑土体微观结构模型; 基于生成的微观结构模型, 联合运用有限元法 (FEM) 与蒙特卡洛法 (MC), 获得具有统计意义的土体渗透系数。通过与试验结果对比, 验证了预测模型的合理性 (误差小于 5%)。通过多因素分析, 研究椭圆度、粗糙度、级配、孔隙率以及长轴倾角对土体渗透系数的影响, 其大小关系依次为: 级配 > 孔隙率 > 长轴倾角 > 椭圆度 > 粗糙度, 皮尔逊相关系数分别为 -0.3512, 0.3065, -0.101, -0.042 和 -0.010; 通过对渗流通道分析, 发现级配和孔隙率主要影响渗流通道的“宽度”和“曲折度”; 椭圆度、粗糙度和长轴倾角主要影响渗流通道绕行的“角度”和“长度”。

关键词: 渗透特性; 孔隙尺度模拟; 分形特性; 蒙特卡洛算法; 预测模型

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)09-1907-09

作者简介: 黄献文(1994—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程与土体微结构模拟方面的研究工作。E-mail: huangxianwen194@163.com。

Prediction model for soil permeability based on fractal characteristics of particles

HUANG Xianwen^{1,2}, JIANG Pengming¹, ZHOU Aizhao¹, WANG Wei³, TANG Chuxuan^{2,4}

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Faculty of Engineering, National University of Singapore, Singapore 119077, Singapore; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 4. State Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In order to predict the permeability characteristics of soils, a fractal recognition algorithm of soil particles and a seepage channel reconstruction algorithm are proposed based on the microstructure, and a Monte Carlo prediction model for permeability coefficient of soils is established by combining the geometric reconstruction model with the finite element method. Firstly, according to the microstructural characteristics of soils, the ellipticity, roughness, gradation, porosity and long-axis angle of soil particles are identified by the fractal characteristic identification method. Then, based on these characteristic parameters, the fractal channel reconstruction method is used to reconstruct the microstructural model. Based on the generated microstructure model, the finite element method and the Monte Carlo method are combined to calculate the permeability coefficient with statistical significance. Compared with the experimental results, the rationality of the prediction model is verified (the error is less than 5%). Through the multi-factor analysis, the influences of ellipticity, roughness, gradation, porosity and long-axis angle on permeability coefficient of soils are studied. The order of magnitude relationship is gradation > porosity > long-axis dip angle > ellipticity > roughness. The pearson correlation coefficients are -0.3512, 0.3065, -0.101, -0.042 and -0.010, respectively. Through the analysis of the seepage channel, it is found that the "width" and "tortuosity" of the seepage channel are mainly affected by the gradation and porosity. The ovality, roughness and long axis dip angle mainly affect the "angle" and "length" of the seepage channel.

Key words: permeability characteristic; pore scale simulation; fractal characteristic; Monte-Carlo method; prediction model

基金项目: 国家留学基金项目 (202108340062); 国家自然科学基金项目 (52174104)

收稿日期: 2022-06-17

*通信作者 (E-mail: jiangpm_sust@126.com)

0 引言

渗透性是岩土工程研究的关键问题之一,而渗透系数作为表征渗透性的最重要参数,其数值对土体的物理力学特性具有重要影响,也必然与边坡、隧道等岩土工程的安全施工紧密相关^[1]。受物理风化和化学侵蚀作用影响,土颗粒在形态和尺寸方面存在差异^[2-3],而这种差异会影响地下水在土壤孔隙中的流动阻力,表现为不同的渗透系数。目前,土壤渗透特性评估主要分为试验法^[4]与分析法^[5],前者具有较高的测试可靠度,但测试成本较高;后者简单快捷,但预测精度方面略显不足。如何依据土颗粒的分形特征^[6](分布特性与形貌特征),快速精准预测土体的渗透系数是岩土工程渗流领域亟待解决的科学问题。

近年来,随着土体渗透特性研究深入,基于土体原生结构特征的渗透系数预测方法逐渐得到推广,该方法为土体渗透系数的高效预测提供了一种解决方案^[7]。合理重建岩土体的微观结构,是准确预测土体渗透系数的前提^[8]。在土体微观结构重建过程中,不仅需要考察颗粒材料本身的形态特征(形状、粗糙度等)^[9],同时也需要考虑颗粒分布特性(级配、孔隙率等)^[10]。分形重建法、随机场法、时序增长法和四参数增长法等都可以重塑土体微观结构^[11],其中,分形重建法(FRM, fractal reconstruction method)可以很好地考虑土颗粒的几何形貌与分布特性。因此,FRM法被广泛应用于岩土体几何模型的构建中。Li等^[12]通过圆形模拟土体微观结构中的孔隙、水以及冰;黄献文等^[13]利用长径比不同的椭圆形模拟岩石;为进一步考虑颗粒材料的表面特性,Chen等^[14]通过圆形和矩形分别模拟光滑和粗糙的土颗粒表面;Liu等^[8]进一步量化了土颗粒表面特性,提出具有不同粗糙度的椭圆形;Sun^[15]通过“圆形堆积”的方式来生成土颗粒,以表征不同的表面特性。上述研究结果表明,FRM方法可以重建土体的微观结构特性,但重塑结构与真实结构在几何相关性方面仍有不足。

土体渗透特性影响因素众多,王海曼等^[16]研究了孔隙比和优势孔径对黄土渗透系数的影响,并基于达西定理提出了预测模型;丁小刚等^[17]依据试验结果,提出了考虑干密度和膨胀率的土体渗透性CCG预测方程;孔令伟等^[1]针对砂土中的细粒含量进行研究,分别建立了考虑细粒含量、非均匀系数、平均粒径和孔隙比的渗透系数预测模型;丁瑜等^[18]通过大数据分析,认为级配和孔隙率是土体渗透性的关键影响因素,其中 d_{10} 、 d_{40} 和 d_{80} 孔径影响系数最大。上述研究主要

集中在土颗粒的分布特性,然而土颗粒在自然沉积或化学侵蚀作用下,其颗粒形状也存在明显差异。Xu等^[19]依据数值分析结果,认为颗粒形状会对土体渗透特性产生影响;Chen等^[14]依据理论分析与试验结果,发现光滑颗粒比棱角颗粒具有更大的渗透系数。土体在漫长地质构造中,颗粒长轴倾角分布也存在一定的规律性^[20],且这种分布规律会对土体的渗透特性产生影响^[6]。目前尚无综合考虑颗粒级配、孔隙率、形态特征和长轴倾角特性对土体渗透系数影响的相关研究。

综合上述分析,为高效预测土体的渗透系数,建立基于微观结构重塑的土体渗透系数蒙特卡洛预测模型。为识别土颗粒特征参数,基于土体微观图像,提出了土颗粒分形特征识别算法(FCIM, fractal characteristic identification method);基于识别的统计参数,提出了土体渗流通道分形重建方法(FCRM, fractal channel reconstruction method);基于FCRM重建的土体渗流通道,联合有限单元法(FEM)与蒙特卡洛算法(MC)对土体的渗透系数进行预测;基于该方法,系统研究颗粒级配、孔隙率、椭圆度、粗糙度和长轴倾角对土体渗透特性的影响,并提出了归一化土体渗透系数预测模型,以期指导渗流工程的设计施工。

1 渗透系数计算

1.1 随机颗粒模型识别

孔隙通道是土体渗透系数的主要影响因素^[5],而颗粒的形状和分布特性均对孔隙通道具有决定性的影响。因此,对于几何形貌,通过椭圆度和粗糙度分别表征土颗粒的形状特征和表面特性;对于分布特性,通过级配、孔隙比和长轴倾角参数来分别表征土颗粒的大小、面积含量以及各向异性。

土颗粒分形特征识别算法(FCIM)计算模型如图1所示,识别过程可以分为微观结构摄影、椭圆度识别、粗糙度识别、颗粒面积计算、级配及长轴倾角统计。

(1)微观结构摄影是颗粒特征识别的基础,依据颗粒的粒径大小,可以选用光学显微镜图像、CT无损透视图像、SEM切片图像等。在微观图像中,应当包含比例尺,便于土颗粒级配特征统计。

(2)椭圆度识别通过IPP软件实现,其主要原理是通过尺寸逐渐减小的椭圆形来包裹颗粒,并最终获得与颗粒外接的椭圆形。依据椭圆形的长轴和短轴,颗粒的椭圆度参数为

$$r_t = \frac{L_1}{L_2} \quad (1)$$

式中: r_l 为椭圆度; L_1 和 L_2 分别为长轴和短轴长度 (m)。

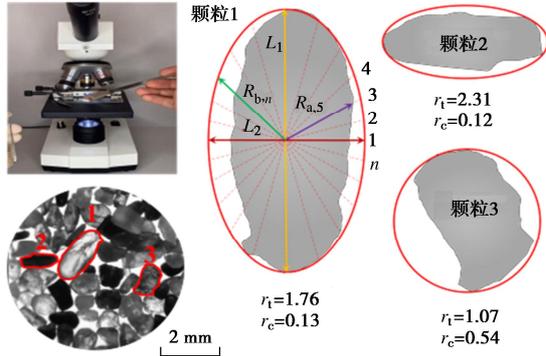


图 1 特征参数识别算法

Fig.1 Characteristic parameter identification algorithm

(3)粗糙度识别主要用来评估颗粒的表面形态特征。以椭圆中心为 midpoint, 在 360° 范围内均匀生成线段, 记录颗粒在每条线段上的分布长度以及对应线段长度, 土颗粒的粗糙度系数可表示为

$$r_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{r_{b,i} - r_{a,i}}{r_{b,i}} \quad (2)$$

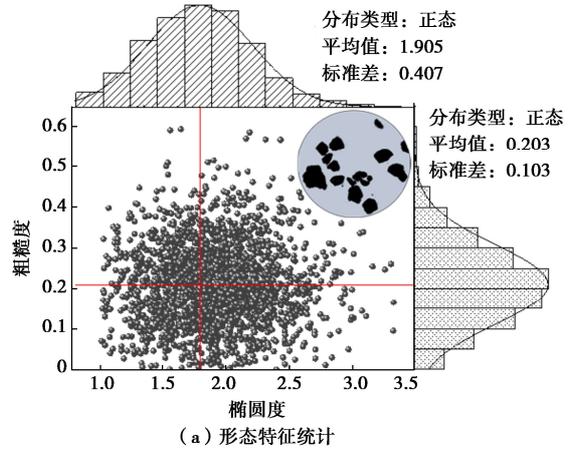
式中: r_c 为粗糙度; $r_{b,i}$ 和 $r_{a,i}$ 分别为同一线段上的土颗粒实体长度和椭圆半径长度 (m); n 为划分的线段总数。

(4)颗粒面积计算依据颗粒与图像背景的颜色差异, 通过网格划分和统计方式实现^[16]。当单个网格中颗粒的面积占比超过 50%时, 则将该网格定义为颗粒, 而后依据颗粒网格与网格总数的比值, 计算颗粒面积含量。

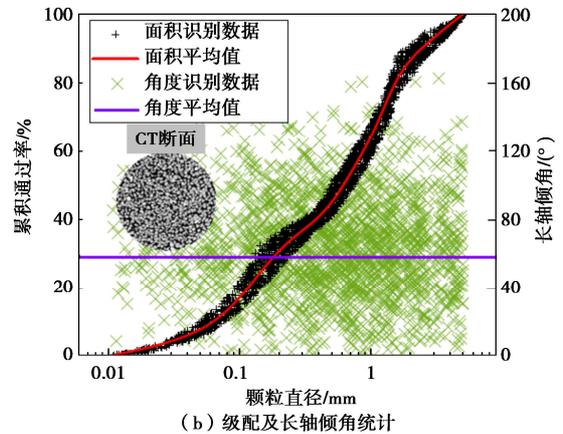
(5)级配及长轴倾角统计是获得颗粒分布特性参数的重要步骤。对于级配识别, 试样扰动与否对识别结果影响不大; 除了本文的图像识别算法外, 级配也可以依据《土工试验方法标准》^[21]中的试验方法测定。对于长轴倾角识别, 试样应为原状未扰动土样, 以保证统计结果的代表性, 其中长轴倾角为土颗粒长轴与渗流方向的夹角。

图 2 给出了 2300 个砂土颗粒分形特征的统计结果。如图 2 (a) 所示, 显示了烘干平铺后松散砂土颗粒形态特征的识别结果, 试验砂土样的平均椭圆度为 1.905, 为类球形颗粒; 颗粒表面粗糙度为 0.203, 较为粗糙。对比颗粒椭圆度和粗糙度分布规律, 可以发现, 两者均很好地满足正态分布特性, 这与 Ma 等^[22]在地质统计中描述的规律一致。图 2 (b) 显示了试验砂土级配与长轴倾角统计结果, 其中长轴倾角识别图像通过 CT 断层扫描获得。依据级配分布曲线可以发

现, 颗粒尺寸分布粒径在 0.01~5 mm, 且级配分布具有良好的趋势性。统计颗粒的长轴倾角主要分布在 $0^\circ \sim 150^\circ$ 内, 且满足正态分布特性, 平均值为 60° 。



(a) 形态特征统计



(b) 级配及长轴倾角统计

图 2 土体特征参数统计

Fig. 2 Statistics of characteristic parameters of soils

1.2 土体微观结构模型重建

快速重建符合土颗粒分形特征 (分布特性与形态特征) 的几何模型, 是精准预测其渗透系数的前提。为此, 基于 MATLAB 软件, 编写了渗流孔隙通道分形重建算法 (FCRM), 计算流程如图 3 所示。FCRM 法重建主要包括 4 个步骤: 参数输入、颗粒集生成、颗粒群投放和多组模型构建。

(1)参数输入: 依据识别算法中获得的颗粒特征, 分别输入模型边界参数、颗粒形态特征和分布特性参数以及蒙特卡洛循环次数。形态参数包括椭圆度和粗糙度; 分布参数包括级配曲线、孔隙率与长轴倾角。其中, 级配参数可以通过朱俊高等^[2]的连续级配方程输入, 也可通过多段线表征, 其中, 多段线表征指依据输入特征点通过线性插值的方式获得完整连续的土颗粒级配曲线。

(2)颗粒集生成: 依据级配和孔隙率参数计算颗粒的含量和尺寸; 然后基于分形参数建立满足级配和

孔隙率的土颗粒生成集(图3中的循环②)。其中,级配粒径与土颗粒短轴直径对应,长轴计算如式(3)所示;依据获得的椭圆颗粒,结合公式(4)对椭圆表面粗糙度进行调整。粗糙度调整后,通过“样条曲线”依次串联各点,以平滑颗粒棱角。颗粒在不同椭圆度和粗糙度下的生成结果如图3所示。颗粒椭圆度越大,其形状越细长;粗糙度越大,其颗粒表面棱角越分明。对比分析生成颗粒与真实颗粒的形状,发现其在几何形态上相似度较高,证明了FCRM法在土颗粒几何生成方面的合理性。当单个土颗粒生成后,计算其体积含量是否满足设计级配的容许误差,如满足,导入土颗粒生成集中,否则重新生成土颗粒;重复上述步骤,直至生成满足级配要求的土颗粒集。

$$L_1 = L_2(r_1 + r_{t-sd}) \quad (3)$$

$$r_{a,i} = r_{b,i} - (r_c + r_{c-sd,i}) \quad (4)$$

式中: r_{t-sd} 和 r_{c-sd} 分别为椭圆度和粗糙度容许误差范围内的随机值(m); i 为椭圆分段编号。

(3) 颗粒群投放: 按照由大到小的顺序在单位面积内依次随机放入满足长轴倾角特征的土颗粒(图3中的循环③)。颗粒放入过程中采用“INPOLYGON”函数进行碰撞检测,防止颗粒交叉重叠。当后放入的颗粒与已有颗粒碰撞时,则按照位置重置、角度重置、边界超出、颗粒删除的优先级顺序进行处置,以保证生成模型的合理性。

(4) 多组模型构建: 依据设计级配和输入参数,生成多组满足分形特性的土体微观结构模型,如图3中的循环①。

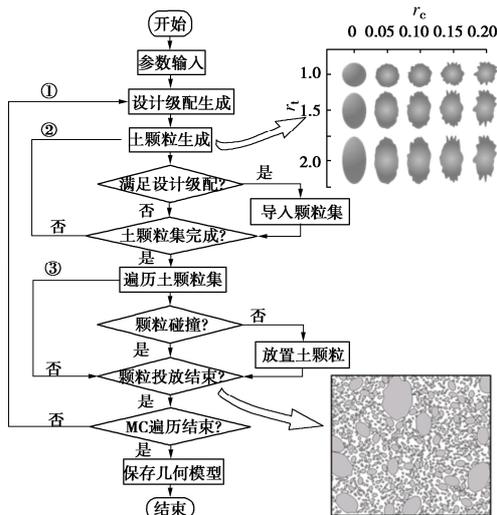


图3 土体微观结构模型构建流程

Fig.3 Construction process of microstructural model for soils

1.3 渗透系数计算

土体渗透特性计算采用 COMSOL 软件中“蠕流”模块进行,以模拟低流速下的水体渗透特性。计

算模型如图4(a)所示。考虑到土颗粒几何尺寸在0.01~5mm之间,为尽量消除“尺寸效应”对模型分析结果的影响,模型采用100mm×50mm的矩形单元,渗流通道在颗粒差集的基础上生成。需要指出的是,二维模型是三维模型的一个典型断面,受断面位置、接触点位置等因素影响,颗粒在二维模型中呈现出“悬浮”于水中的效果。在三维模型中土颗粒是相互接触且稳定的,因此二维模型中“悬浮”的颗粒不会受水流冲刷而移动。模型网格划分尺寸控制为最小土颗粒尺寸的2%~0.2%,且渗流通道边缘设置有网格边界层,以考虑流体的“边界层效应”。

在模型的左右两侧分别设置进水口和出水口边界,模型的上下端均设置对称边界条件,如图4(b)所示。通过稳态渗流场计算模型内的流体流动状态,计算结果如图4(b)所示。基于达西定律,土体的渗透系数为

$$v_{eff} = \frac{\sum Q \cdot L}{\alpha \cdot A \cdot \Delta p} \quad (5)$$

式中: Q 为面积流量(m^3/s); L 为渗流通道长度(m); α 为水压力-高度转化系数,取 $10^{-4} m/Pa$; A 为渗流面积(m^2); Δp 表示进出水口压力差(Pa)。

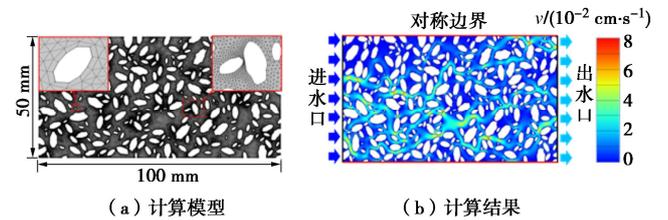


图4 数值计算模型

Fig.4 Numerical model

1.4 Monte Carlo 方法

蒙特卡洛算法(MC)是基于统计学理论的一种统计模拟方法,可以依据有限次数的抽样分析结果获得具有代表性的特征值^[23]。因此,本文采用蒙特卡洛算法对土体渗透系数进行预测,以期获得具有统计意义的平均渗透系数。模型计算结果如图5所示。

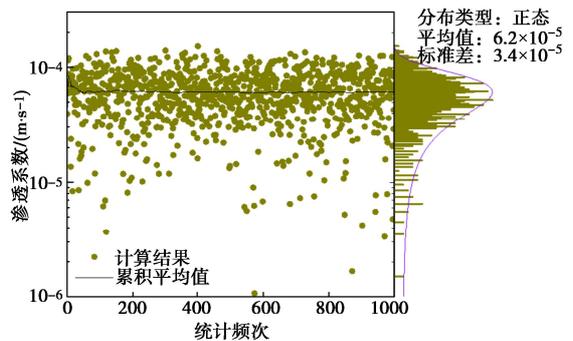


图5 计算结果

Fig.5 Calculated results

表 1 模型验证参数

Table 1 Parameters for model validation

对比算例	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{70}	d_{90}	e_0	r_t	r_{t-sd}	r_c	r_{c-sd}	α	$v_{exp}/10^{-4}$	$v_{num}/10^{-4}$	$\eta/\%$
算例 1	0.25	0.40	0.71	1.25	2.00	0.548	1.5	0.2	0.04	0.01	$0\sim\pi$	2.22	2.13	3.2
算例 2	0.25	0.50	1.00	2.00	3.70	0.548	1.5	0.2	0.04	0.01	$0\sim\pi$	5.47	5.31	2.9
算例 3	0.25	0.56	1.25	2.61	4.03	0.548	1.5	0.2	0.04	0.01	$0\sim\pi$	5.64	5.57	1.2
算例 4	0.25	0.63	2.00	3.07	4.23	0.548	1.5	0.2	0.04	0.01	$0\sim\pi$	6.03	5.94	1.5

注: e_0 , r_t , r_{t-sd} , r_c 和 r_{c-sd} 分别为孔隙率, 椭圆度, 椭圆度离散系数, 粗糙度, 粗糙度离散系数; α 为长轴倾角; v_{exp} , v_{num} 分别为实测渗流系数和预测渗透系数 (cm/s); η 为相对误差。

图 5 显示土体渗透特性 1000 次计算的统计结果。由图 5 可知, 随着模型计算次数的增加, 累积平均渗透系数曲线逐渐趋于稳定, 并最终稳定在 6.2×10^{-5} m/s。通过对累积平均值曲线的研究可以发现, 计算结果在 150 次以内时的波动较大, 150 次以后的波动较小; 当重复次数达到 650 次以后, 模型计算结果对累积平均值的影响幅值小于 0.01×10^{-5} m/s, 已满足计算精度的要求。因此, 本次计算将 650 次定义为统计阈值。通过对土体渗透系数分布特性分析, 发现其分布满足正态分布趋势, 标准差为 3.7×10^{-5} m/s。

2 合理性验证

为验证本文算法的合理性, 基于张宜健^[24]的试验结果对本文算法的合理性进行验证。在张宜健^[24]的研究中, 提供了完整的土颗粒级配曲线, 如图 6 所示。模型的试验参数和建模参数如表 1 所示, 其中模型试验参数依据《土工试验方法标准》^[21]获得, 建模参数通过图像识别和经验估算获得。在 4 种不同级配下的典型计算模型如图 6 所示, 可以发现, 在单位面积内, 算例 1 生成结果中颗粒尺寸明显小于算例 4, 且算例 1 中的颗粒数量多于算例 4。重塑模型中体现的级配特征与图 6 中的试验级配相符合, 证明了 FCRM 法的合理性。对比模型的预测结果与实测结果, 依据

$$\eta = \left| \frac{v_{num}}{v_{exp}} - 1 \right| \times 100\% \quad (6)$$

计算相对误差, 可以发现两者的最大误差小于 5%, 证明了 MC 法在土体渗透性预测方面的合理性。

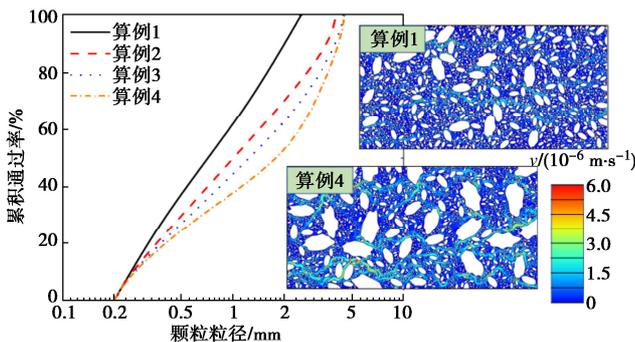


图 6 案例验证

Fig. 6 Case validation

3 模型影响因素研究

受分布区域、土壤成分和形成条件等因素影响, 土颗粒一般具有不同的级配、孔隙率、椭圆度、粗糙度和长轴倾角等。目前, 尚无统一考虑上述影响因素的土体渗透性综合预测模型。因此, 针对上述因素对土体渗透性的影响进行研究, 揭示其影响机理, 并提出多因素归一化预测模型, 以更好的支撑工程应用。为尽可能覆盖较多种类的土体, 土体级配采用朱俊高等^[21]提出的级配曲线, 粒径范围 0.001~5 mm; 孔隙率设置为 20%~80%; 椭圆度为 1.0~4.0 (圆形→长条); 粗糙度为 0~0.24 (光滑→粗糙); 长轴相对倾角考虑为 $0^\circ \sim 90^\circ$ (平行→垂直), 其中, 长轴相对倾角表示颗粒长轴与水平线的相对夹角, 其有效范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。基础模型参数为: 孔隙率为 50%, 椭圆度为 1.5, 椭圆度离散系数为 0.15, 粗糙度为 0.12, 粗糙度离散系数为 0.03, 随机长轴倾角。

3.1 颗粒级配影响

依据常见的土颗粒级配特性与尺寸范围, 参考朱俊高等^[21]的级配方程, 设置了 6 组不同的级配曲线, 级配参数如表 2 所示, 级配曲线如图 7 (a) 所示。

表 2 土颗粒级配参数

Table 2 Gradation parameters of soil particles

分级	M_{ax}	b	m	$v_{eff}/(m \cdot s^{-1})$
级配 1	5.0	0.3	0.80	1.45×10^{-4}
级配 2	5.0	0.88	0.99	2.07×10^{-6}
级配 3	5.0	0.99	1.30	1.78×10^{-5}
级配 4	0.5	0.30	0.80	1.58×10^{-6}
级配 5	0.5	0.88	0.99	2.39×10^{-8}
级配 6	0.5	0.99	1.30	1.70×10^{-8}

由图 7 (a) 可知: 级配 1~3 的颗粒尺寸范围在 0.01~5 mm, 属于粗颗粒组; 级配 4~6 的颗粒尺寸范围在 0.001~0.5 mm, 属于细颗粒组。每组中包含了 3 种不同的级配曲线, 基本涵盖了土颗粒的级配特征。图 7 (b) 显示了 6 种级配下土体渗透特性预测结果。对比粗粒组和细粒组的渗透系数, 可以发现粗粒组的平均渗透系数 (5.51×10^{-5} m/s) 大于细粒组 (5.91×10^{-7} m/s), 两者相差约 100 倍。对比相同颗粒组内不同级配特征的土体渗透性, 可以发现, 随着细粒含

量的增加，土体渗透系数逐渐减少，这与孔令伟等^[1]的试验结果相同。在对数图像中，随着细粒含量的增加，渗透系数对数呈现出线性减小的趋势，这意味着随着细粒增加，渗透系数呈现出非线性的降低趋势，且增幅逐渐减缓。在粗粒组和细粒组中，级配变化对渗透系数的影响分别为 8.2 倍和 9.3 倍，这意味着级配对细粒组渗透系数的影响更大。

对比图 7 (b) 粗粒组下的颗粒尺寸和数量可以发现，级配 1 中颗粒整体尺寸较大，而级配 3 中的颗粒尺寸整体较小，且级配 3 中的颗粒总数远大于级配 1。由于级配 3 中的颗粒总数远大于级配 1，因而土体中的渗流孔隙通道更加“曲折”，且通道“更窄”，增加了水流动阻力，因此细粒含量较多的级配 3 渗透系数较小。对比粗粒组和细粒组的分析模型，可以发现孔隙通道在尺寸上存在明显的差异。孔隙通道尺寸的减小，意味着颗粒表面对渗流的影响加剧，因而细粒组的渗透系数小于粗粒组。

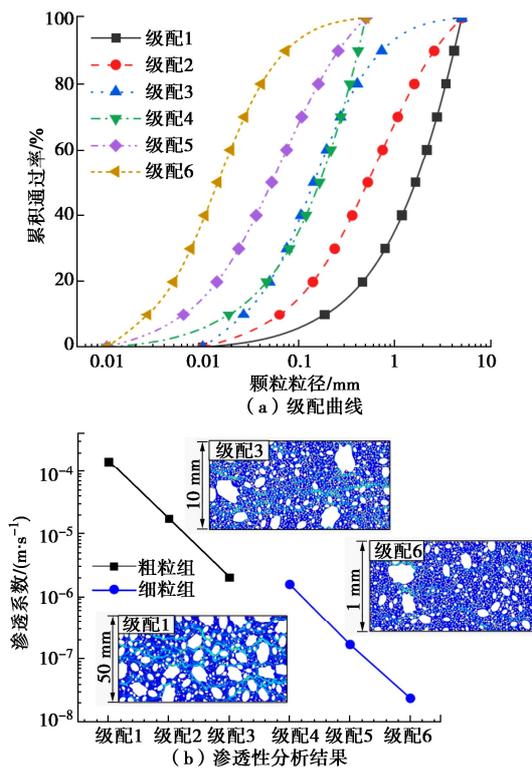


图 7 颗粒级配影响分析

3.2 孔隙率影响

图 8 显示了不同孔隙率下土体渗透系数预测结果。由图 8 可知，随着孔隙率增加，土体渗透系数对数逐渐增加，且增幅呈现出“先快后慢，最后稳定”的增加趋势。对比不同级配下孔隙率对渗透系数对数的影响，可以发现孔隙率对不同级配下土体渗透系数的影响基本相同，其中 80% 孔隙率下的渗透系数约为

20%孔隙率下渗透系数的 300 倍。对比 20%和 80%孔隙率下的计算云图可以发现，随着孔隙率增加，单位面积内土颗粒数量增加，孔隙通道在路径上会更加“曲折”，在宽度上会“更窄”，这些将增加水在土体中的渗流阻力，因而高孔隙率的土体渗透系数较大。当孔隙率在 20%~30%时，孔隙率含量变化对渗流通道“曲折度”和“宽度”影响更为明显，因而在该范围内随着孔隙率增加，土体渗透系数变化幅值较大。

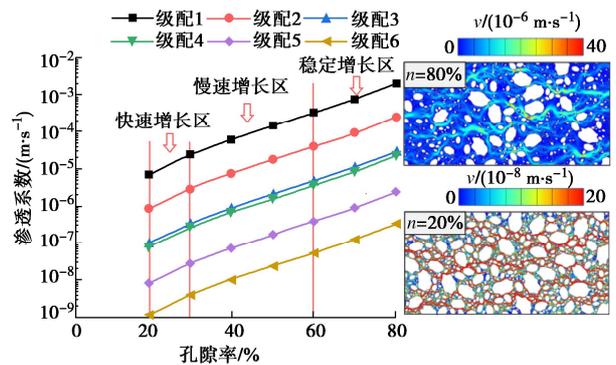


图 8 孔隙率影响分析

Fig. 8 Influence analysis of porosity

3.3 椭圆度影响

图 9 显示了不同椭圆度下土体渗透系数预测结果。由图 9 可知，随着颗粒椭圆度增加，土体的渗透系数逐渐减少，1.0 椭圆度的渗透系数是 4.0 椭圆度渗透系数的 1.39~1.51 倍，其中，土体中的细粒含量越多，影响幅值越大。当流体遇到土颗粒时，会沿着土颗粒边缘继续向前流动。此时，渗流通道转向的角度越大、长度越长，渗流压力损失越多，土体表现出的渗透系数越低。当土颗粒椭圆度较大时 (4.0)，大部分随机分布的土颗粒倾角与流体方向不平行，此时，流体会沿土颗粒长轴方向流动，这将导致渗流通道转向的“角度”增加、“长度”延长，因而椭圆度越大的土颗粒渗透系数越低，且这种影响在尺寸较小、细粒较多的土体 (级配 6) 中表现的更加明显。

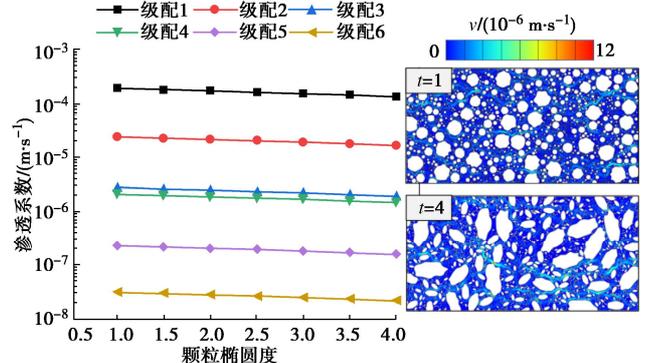


图 9 椭圆度影响

Fig. 9 Influence analysis of ovality

3.4 粗糙度影响

图 10 显示了颗粒粗糙度对渗透系数的影响结果。由图 10 可知, 随着颗粒粗糙度增加, 土体的渗透系数逐渐减少, 粗糙度由 0 增加至 0.24 时, 渗透系数下降幅值 38%~46%, 其中, 土颗粒中的细粒含量越多, 降低倍数越大。分析原因, 随着土颗粒粗糙度的增加, 颗粒几何棱角更加明显, 这使得孔隙通道在绕过颗粒时“角度”增加, 孔隙通道“长度”增加。因而在相同参数下, 土颗粒的表面越粗糙, 渗透系数越小。对于尺寸较小、细粒较多的土体(级配 6), 这种对孔隙通道“曲折度”和“长度”的影响会更加明显, 因而降低的倍数会更多。

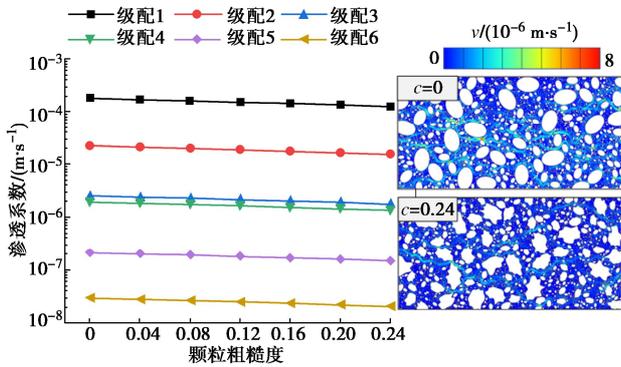


图 10 粗糙度影响

Fig. 10 Influence analysis of roughness

3.5 长轴倾角影响

图 11 显示了不同长轴倾角下的土体渗透系数。由图 11 可知, 随着颗粒长轴倾角角度的增加, 土体的渗透系数逐渐减少。长轴倾角由 0° 增加至 90° 时, 土体渗透系数下降 40%~50%, 且颗粒尺寸小、细粒含量多(级配 6)的土体下降幅值最为明显。对比图中两种不同倾角下的渗流速度云图, 可以发现土颗粒分布对渗流通道的“长度”和“角度”存在明显的影响。颗粒垂直与渗流方向的渗流路径平均长度较长, 流体转向角度较大。当流体遇到土颗粒时, 会沿着土颗粒的边缘继续向前流动。此时, 渗流通道转向的“角度”越大、“长度”越长, 渗流压力的损失越多, 土体表现出的渗透系数越低。当长轴倾角为 90° 时, 流体会沿着颗粒长轴方向进行流动转向, 此时流体的转向角度较大, 且转向长度较长, 因而渗透系数最小。对于尺寸较小、细粒较多的土体(级配 6), 这种对孔隙通道“长度”和“角度”的影响会更加明显, 因而降低的倍数会更多。

3.6 讨论与分析

结合上述分析可以发现, 级配和孔隙率对土体渗透性的影响主要体现在对渗流通道“宽度”和“曲折

度”影响, 如图 12 (a), (b) 所示。随着土颗粒级配中的细粒含量增加和孔隙率减少, 单位面积内土颗粒数量更多, 渗流孔隙通道拐点也越多, “曲折度”增加, 同时, 土颗粒之间的相对距离也会缩短, 导致渗流通道的“宽度”减少, 这使得渗流阻力增加, 土体表现出较小的渗透系数。颗粒椭圆度、粗糙度和长轴倾角多渗透系数的影响主要表现在对渗流通道拐点“角度”和“长度”的影响, 如图 12 (c), (d) 所示。随着椭圆度和长轴倾角增加, 当水流遇到部分非平行的长条形颗粒时, 渗流拐点的“角度”和“长度”增加, 这将导致渗流阻力增加, 土体渗透系数减少。对于粗糙度较大的土体, 流体将会沿着颗粒表面粗糙的棱角流动, 渗流通道的“角度”和“长度”增加, 因而土体渗透系数较低。

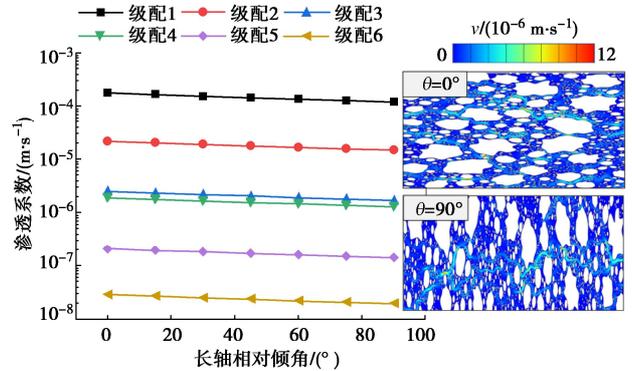


图 11 长轴相对倾角影响

Fig. 11 Influence analysis of long-axis relative angles

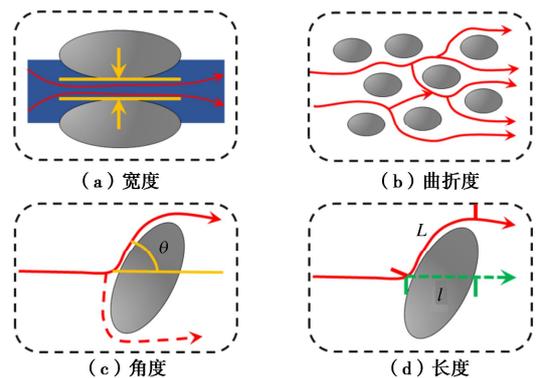


图 12 土体渗透性影响机理

Fig. 12 Influence mechanism of soil permeability

为量化分析各因素对土体渗透性的影响关系, 采用皮尔逊相关系数表征各变量的相关性。级配、孔隙率、椭圆度、粗糙度和长轴倾角对渗透率的相关系数分别为-0.3512, 0.3065, -0.042, -0.010 和-0.101, 其中“-”表示负相关。依据皮尔逊相关系数可以发现, 各影响因素的大小关系为级配>孔隙率>长轴倾角>椭

圆度>粗糙度。为方便工程应用,进一步提出了土体渗透性归一化经验公式:

$$v_{\text{eff}} = 0.01866(1.1 - 0.1t)(1 - 0.15c) \cdot (1.23 - 0.46 \sin \theta / 90) e^{9.1649n - 2.099a} \quad (7)$$

式中: t 为椭圆度; c 为粗糙度; θ 为长轴倾角; n 为孔隙率; a 为级配种类。式(7)基于本文模型预测结果,两者计算差值小于 8%,可用于土体渗透性初步预测。

需要指出的是,本文提出的预测模型并未系统考虑土颗粒“双电层”对地下水渗流的影响,可能会高估细颗粒岩土材料的渗透系数,该问题将在进一步的研究中予以考虑。

4 结 论

为高效预测土体渗透系数,基于土颗粒分形特征,建立了“识别-重建-统计”一体化土体微观结构渗透系数预测模型,得到以下 4 点结论。

(1) 提出了土颗粒分形特征识别算法(FCIM),可对土颗粒的形态特征和分布特性进行高效识别。土颗粒形态特征通过椭圆度和粗糙度进行表征;分布特性通过级配、孔隙率和长轴倾角表征。基于土颗粒的分形参数,提出了土体渗流通道分形重建方法(FCRM),该方法可以同时考虑颗粒形态特征(椭圆度和粗糙度)和分布特性(级配、孔隙率和长轴倾角),且具有较高的生成效率。

(2) 基于重建的土体微观渗流通道,联合有限单元法(FEM)和蒙特卡洛算法(MC),预测具有统计意义的土体渗透系数。通过与已有试验研究结果的对比,验证了预测模型的合理性。

(3) 基于提出的预测模型,通过因素分析,研究了级配、孔隙率、椭圆度、粗糙度、长轴倾角对土体渗透性影响;皮尔逊相关系数分析结果表明,各因素对渗透系数的影响关系为:级配>孔隙率>长轴倾角>椭圆度>粗糙度,并提出了理论的渗透系数预测方程。

(4) 依据相同渗流压力下土体的渗流场,研究各影响因素对土体渗透性的作用机理,结果表明:级配和孔隙率主要影响渗流通道的“宽度”和“曲折度”;椭圆度、粗糙度和长轴倾角主要影响渗流通道绕行的“角度”和“长度”。

参考文献:

[1] 孔令伟,李新明,田湖南. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 21-26, 41. (KONG Lingwei, LI Xinming, TIAN Hunan. Effect of fines

content on permeability coefficient of sand and its correlation with state parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 21-26, 41. (in Chinese))

- [2] 朱俊高,郭万里,王元龙,等. 连续级配土的级配方程及其适用性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1931-1936. (ZHU Jungao, GUO Wanli, WANG Yuanlong, et al. Equation for soil gradation curve and its applicability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1931-1936. (in Chinese))
- [3] 丁林楠,李国英. 基于分形级配方程的堆石料颗粒破碎 SBG 模型[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 264-270. (DING Linnan, LI Guoying. SBG model for particle breakage of rockfills based on fractal gradation equation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 264-270. (in Chinese))
- [4] PANDEY P, LYNCH K, SIVAKUMAR V, et al. Measurements of permeability of saturated and unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2021, 71(2): 170-177.
- [5] 陶高梁,孔令伟. 基于微观孔隙通道的饱和/非饱和土渗透系数模型及其应用[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 702-709. (TAO Gaoliang, KONG Lingwei. A model for determining the permeability coefficient of saturated and unsaturated soils based on micro pore channel and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 702-709. (in Chinese))
- [6] 金毅,王俏俏,董佳斌,等. 颗粒填充型分形孔隙结构复杂组构表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1160-1171. (JIN Yi, WANG Qiaoqiao, DONG Jiabin, et al. Characterization of the complexity assembly of fractal bed-packing porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1160-1171. (in Chinese))
- [7] 金磊,曾亚武,程涛,等. 基于格子 Boltzmann 方法的土石混合体的渗流特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 669-677. (JIN Lei, ZENG Yawu, CHENG Tao, et al. Seepage characteristics of soil-rock mixture based on lattice Boltzmann method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 669-677. (in Chinese))
- [8] LIU Y F, JENG D S. Pore scale study of the influence of particle geometry on soil permeability[J]. Advances in Water Resources, 2019, 129: 232-249.
- [9] QAJAR J, ARNS C H. Chemically induced evolution of morphological and connectivity characteristics of pore space of complex carbonate rock via digital core analysis[J]. Water Resources Research, 2022, 58(3): 1-30.

- [10] ORTEGA-RAMÍREZ M P, OXARANGO L. Effect of X-ray CT resolution on the computation of permeability and dispersion coefficient for granular soils[J]. *Transport in Porous Media*, 2021, **137**(2): 307-326.
- [11] 费锁柱, 谭晓慧, 孙志豪, 等. 基于微结构模拟的土体自相关距离分析[J]. *岩土力学*, 2019, **40**(12): 4751-4758. (FEI Suozhu, TAN Xiaohui, SUN Zhihao, et al. Analysis of autocorrelation distance of soil based on microstructure simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(12): 4751-4758. (in Chinese))
- [12] LI K Q, LI D Q, LI P T, et al. Meso-mechanical investigations on the overall elastic properties of multi-phase construction materials using finite element method[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, **228**: 116727.
- [13] 黄献文, 姚直书, 王伟, 等. 考虑块石长轴倾角和土石接触面的土石混合体边坡稳定性分析[J]. *工程科学与技术*, 2021, **53**(1): 47-59. (HUANG Xianwen, YAO Zhishu, WANG Wei, et al. Stability analysis of the soil-rock slope considering long axis inclination and soil-rock interface[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, **53**(1): 47-59. (in Chinese))
- [14] CHEN Z L, WANG N T, SUN L, et al. Prediction method for permeability of porous media with tortuosity effect based on an intermingled fractal units model[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2017, **121**: 83-90.
- [15] SUN J C. Permeability of particle soils under soil pressure[J]. *Transport in Porous Media*, 2018, **123**(2): 257-270.
- [16] 王海曼, 倪万魁. 不同干密度压实黄土的饱和/非饱和渗透系数预测模型[J]. *岩土力学*, 2022, **43**(3): 729-736. (WANG Haiman, NI Wankui. Prediction model of saturated/unsaturated permeability coefficient of compacted loess with different dry densities[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, **43**(3): 729-736. (in Chinese))
- [17] 丁小刚, 余云燕, 蔺文博, 等. 非饱和弱膨胀土土-水特征曲线拟合与渗透系数模型预测[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, **53**(1): 361-370. (DING Xiaogang, YU Yunyan, LIN Wenbo, et al. Fitting of soil-water characteristic curve and prediction of permeability coefficient model of unsaturated weak expansive soil[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, **53**(1): 361-370. (in Chinese))
- [18] 丁瑜, 饶云康, 倪强, 等. 颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2019, **46**(3): 108-116. (DING Yu, RAO Yunkang, NI Qiang, et al. Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, **46**(3): 108-116. (in Chinese))
- [19] XU S L, ZHU Y Z, CAI Y Q, et al. Predicting the permeability coefficient of polydispersed sand via coupled CFD-DEM simulations[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, **144**: 104634.
- [20] ASSOULINE S, OR D. Anisotropy factor of saturated and unsaturated soils[J]. *Water Resources Research*, 2006, **42**(12): 1-11.
- [21] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Test Methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [22] MA G, WANG Y H, ZHOU H, et al. Morphology characteristics of the fragments produced by rock grain crushing[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, **22**(4): 1-12.
- [23] LI K Q, LI D Q, LIU Y. Meso-scale investigations on the effective thermal conductivity of multi-phase materials using the finite element method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, **151**: 119383.
- [24] 张宜健. 不同粒径级砂性土渗透特性试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013. (ZHANG Yijian. Investigation on Permeability of Sands with Different Particle Size[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese))