

DOI: 10.11779/CJGE202109014

基于土体孔径分布的土水特征曲线预测

费锁柱, 谭晓慧*, 董小乐, 查甫生, 许 龙

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 土水特征曲线 (SWCC) 是描述非饱和土的吸力与饱和度或含水率关系的一条重要曲线, 是分析非饱和土的强度、变形及渗流的重要基础。室内直接或间接测量土体的吸力非常耗时。为了快速准确获取非饱和土体的 SWCC, 提出了基于土体的孔径分布 (PSD) 预测 SWCC 的改进方法。该方法采用压汞试验 (MIP) 测量土体的 PSD, 采用滤纸法测量土样的一个吸力值及其对应的饱和度, 再根据该点的试验结果对 MIP 试验测得的土体孔隙体积进行校正, 并采用校正后的孔隙体积来计算不同吸力条件下土体的饱和度。该方法可以克服 MIP 试验测得的孔隙体积偏小的问题。通过对 9 组土样校正前后预测 SWCC 与实测 SWCC 的对比分析, 表明了该方法可以较为准确地预测非饱和土体的 SWCC。在此基础上, 可以方便快捷地得到多组土体的 SWCC 拟合参数及其概率统计特征。

关键词: 土水特征曲线; 孔径分布; 压汞实验; 非饱和土; 吸力

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2021)09 - 1691 - 09

作者简介: 费锁柱(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事土力学与岩土工程等方面的研究。E-mail: fsz2017@hfut.edu.cn。

Prediction of soil-water characteristic curve based on pore size distribution of soils

FEI Suo-zhu, TAN Xiao-hui, DONG Xiao-le, ZHA Fu-sheng, XU Long

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

Abstract: The soil-water characteristic curve (SWCC) is an important curve describing the relationship between the suction of unsaturated soils and the saturation or water content, and is an important basis for analyzing the strength, deformation and seepage of unsaturated soils. It is very time-consuming to measure soil suction directly or indirectly indoors. In order to quickly and accurately obtain the SWCC of unsaturated soils, an improved method for predicting SWCC based on the pore size distribution (PSD) of soils is proposed. This method uses the mercury intrusion porosimetry (MIP) to measure the PSD of soils, and the filter paper method is used to measure a suction value of soil samples and its corresponding saturation. Then according to the test results at this point, the pore volume of soils measured by the MIP tests is corrected, and the pore volume after correction is used to calculate the saturation of soils under different suction conditions. This method can overcome the problem of small pore volume measured by the MIP tests. The comparative analysis of the predicted and measured SWCCs before and after the correction of 9 groups of soil samples shows that the proposed method can predict the SWCC of unsaturated soils more accurately. On this basis, the fitting parameters of SWCC and their probability statistical characteristics of multiple groups of soils can be obtained conveniently and quickly.

Key words: soil-water characteristic curve; pore size distribution; mercury intrusion porosimetry method; unsaturated soil; suction

0 引 言

土水特征曲线 (soil water characteristic curve, 简称 SWCC) 是非饱和土力学研究中的重要关系曲线, 常用来描述非饱和土体的基质吸力与饱和度、重力含水率或体积含水率之间的关系, 它对于预测和分析非饱和土的水力性质、渗透系数、抗剪强度等具有重要意义。

获取土水特征曲线的方法主要有压力板法、饱和盐溶液法、蒸汽平衡法、渗析法和滤纸法等^[1-2], 这些

方法大多费时费力^[3-4], 所以国内外众多学者纷纷尝试通过其他方法来间接预测 SWCC。目前, 关于 SWCC 的预测方法主要可以划分为 3 大类: ①通过建立土体基本物理性质指标和 SWCC 之间的关系来预测 SWCC, 其中最具代表性的是 Auertin 等提出的 MK 模型^[5-7]; ②通过建立土体粒径分布或孔径分布与

基金项目: 国家重点研发计划课题项目 (2019YFC1509903); 国家自然科学基金项目 (41972278, 42030710, 41672306)

收稿日期: 2020 - 11 - 27

*通信作者 (E-mail: tanxh@hfut.edu.cn)

SWCC 之间的关系来预测 SWCC, 如广为人知的 AP 模型^[8-9]和 Simms 等^[10]提出的利用孔径分布预测 SWCC 的模型; ③基于大数据结合遗传算法和人工神经网络等方法, 建立 SWCC 的经验模型, 如 Abdul-Kareem 等^[11]、Johari 等^[4]。在这 3 类方法中, 由于土体的累计孔径分布曲线在形状上和 SWCC 较为相似, 所以利用土体孔径分布 (PSD) 预测 SWCC 更加容易被人们理解。

国内外众多学者在利用 PSD 预测 SWCC 方面进行了大量的研究, 如 Simms 等^[9]基于土体 PSD, 提出了一种考虑孔隙收缩的 SWCC 预测模型; Zhang 等^[3]针对一个参考状态下的 PSD, 提出移位因子和压缩因子, 建立了考虑不同孔隙比下的 SWCC 预测模型; Tao 等^[12]基于分形理论, 提出了一种考虑孔隙分形特征的 SWCC 预测模型。但是, 这些预测模型往往输入参数多, 专业性强, 且操作困难, 很难应用到工程实际中。现有基于土体 PSD 预测 SWCC 的方法中, Kong 等^[13]将压汞试验与收缩试验结果相结合, 提出了预测 SWCC 的理论公式, 但文中未将 SWCC 预测结果与实测结果进行对比分析, 其精度有待进一步验证; 文献^[14]中提出了一种较为简单实用的预测方法, 这种预测方法能够基于压汞试验 (MIP) 得到的土体 PSD 简单快速的进行 SWCC 预测, 但是该方法忽略了压汞试验自身的局限性, 预测的土体饱和度偏低。

为了克服现有基于土体 PSD 预测 SWCC 方法中存在的问题, 本文提出一种基于土体的孔径分布预测 SWCC 的改进方法, 该方法根据土样的一对吸力与饱和度试验数据点对 MIP 试验测得的土体孔隙体积进行校正, 再采用校正后的孔隙体积来计算不同吸力条件下土体的饱和度。最后, 通过对 9 组土样预测 SWCC 与实测 SWCC 的对比分析, 证明了本文方法具有良好的预测效果。

1 试验材料与方法

1.1 试验用土与试验方案

试验用土取自合肥市 7 个施工工地, 其中在第 1~第 5 个工地各取 1 组土样, 在第 6~第 7 个工地各取 2 组土样, 因此共有 9 组土样。取土地点见图 1, 取土深度均为地表下 3~5 m, 土样为黄褐色非饱和和弱膨胀性黏性土^[15]。土体的粒径分布及颗粒组成见图 2, 图 2 中的粒径分布曲线由 Mastersize 2000 激光粒度仪输出的频率分布数据直接绘制而成。图中, 黏粒组、粉粒组及砂粒组对应的粒径分布范围分别是 ≤ 0.005 mm, $0.005 \sim 0.075$ mm 及 $0.075 \sim 2$ mm^[16]。由图 2 可见: 9 组土样的粒径分布非常类似, 各土样黏粒组的

质量百分比为 40.6%~49.2%; 粉粒组的质量百分比略高于黏粒组, 为 48.4%~59.3%; 砂粒组的质量百分比小于 2.4%, 可忽略不计。



图 1 土样位置示意图

Fig. 1 Location of soil samples

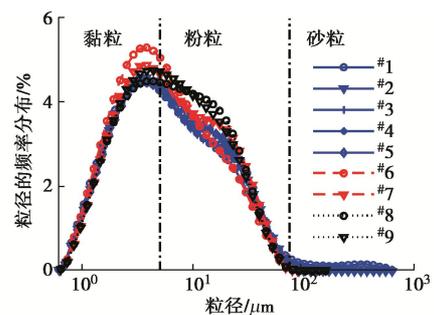


图 2 土样的粒径分布及粒度组成

Fig. 2 Grain-size distribution and composition of soil samples

为了验证基于土体孔径分布 (PSD) 预测土水特征曲线 (SWCC) 方法的正确性, 分别进行土水特征曲线试验及土体的孔径分布试验。其中, 土体的 SWCC 由渗析法及滤纸法联合测定, 孔径分布由压汞试验 (MIP) 测定。试验用土为重塑土样。由于非饱和土的 SWCC 试验历时较长, 因此试验共分 3 次完成, 各次试验中土样的基本性质参数见表 1。为分析干密度及含水率对土体孔径分布及土水特征的影响, 对于 #6 和 #7 土样, 分别制备 3 种不同干密度的试样; 对于 #8 和 #9 土样, 分别制备 3 种不同含水率的土样。土样的制备方法参见文献^[17, 18]。

1.2 土水特征曲线试验

(1) SWCC 拟合模型

土水特征曲线 (SWCC) 是非饱和土力学中的一条最基本的性质曲线, 可以用重力含水率 w 和吸力 ψ 之间的关系、体积含水率 θ 和吸力之间的关系以及饱和度 S_r 和吸力之间的关系来表征。岩土工程中存在多

种描述 SWCC 的模型, 其中, 常用的 SWCC 模型是 Van Genuchten 模型^[19-20]。当采用饱和度和吸力之间的关系 ($S_r-\psi$) 来描述 SWCC 时, 其表达式如下:

$$S_r = \frac{1}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{(1-1/n)}}, \quad (1)$$

式中, α , n 为曲线拟合参数, 参数 α 与土体的进气值相关, 参数 n 表示土水特征曲线的斜率。饱和度 S_r 与重力含水率 w 具有如下的对应关系:

$$S_r = \frac{w - w_r}{w_s - w_r}, \quad (2)$$

式中, w_s , w_r 分别为饱和及残余重力含水率。

表 1 基本土性参数

Table 1 Basic physical parameters of soil samples

试验编号	土样编号	含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	土粒相对质量密度
1	#1	21.4	1.79	2.67
	#2	20.7	1.76	2.66
	#3	21.5	1.84	2.70
	#4	20.0	1.66	2.71
	#5	20.0	1.66	2.73
2	#6-1	15.0	1.50	2.74
	#6-2	15.0	1.58	2.74
	#6-3	15.0	1.66	2.74
	#7-1	15.0	1.50	2.73
	#7-2	15.0	1.58	2.73
	#7-3	15.0	1.66	2.73
3	#8-1-1*; #8-1-2*	36.9	1.48	2.64
	#8-2-1; #8-2-2	26.2	1.48	2.64
	#8-3-1; #8-3-2	21.5	1.48	2.64
	#9-1-1*; #9-1-2*	36.1	1.54	2.69
	#9-2-1; #9-2-2	22.0	1.54	2.69
	#9-3-1; #9-3-2	18.4	1.54	2.69

注: *为试验失败。

(2) SWCC 试验方法

在室内测定土体 SWCC 的试验方法很多。相比于其他 SWCC 获取方法, 如蒸汽平衡法、压力板法、Tempe 仪测试法等, 渗析法和滤纸法具有试验设备简单、操作步骤和数据分析容易等优点^[15], 所以本文联合采用渗析法和滤纸法来获取试验土体的土水特征曲线, 二者分别用于测定低吸力范围及高吸力范围内的吸力与饱和度关系。

渗析法试验: 利用半透膜只允许离子和小于半透膜孔径的分子通过的性质, 将土样密封于半透膜中, 置于某一浓度的聚乙二醇 (简称 PEG) 溶液, 在 20°C 恒温条件下振荡。在振荡过程中, 溶液中的水分子透过半透膜进入土样。振荡约 10 d 后, 土样的吸力与溶液的吸力达到平衡。此时, 测量 PEG 溶液的浓度并计算对应的吸力, 即可得到土样的吸力; 同时, 测量土样的含水率并计算对应的饱和度, 即可得到土样吸力与含水率的对应关系^[21]。由于半透膜孔径的限制, 渗析法常用的吸力测量范围是 0~1600 kPa^[22]。本次试

验中, 分别以目标吸力为 0, 3, 8, 22, 65, 200, 550, 1600 kPa 来确定相应 PEG 溶液的浓度, 以便使测得的吸力值尽可能在半对数坐标系中均匀分布。

滤纸法试验: 该试验的原理是滤纸能够同一定吸力的土在水分传递上达到平衡。因此, 在恒温恒湿条件下, 将 3 层滤纸叠放在一起, 再分别在滤纸上下各放置一块土样。3 层滤纸中, 顶底面滤纸与土样直接接触, 对中间层滤纸起保护作用; 中间层滤纸用于测定滤纸的含水率并计算及其对应的吸力^[23]。当滤纸与土样密切接触时, 上下两块土样中的水分子以液态水的形式穿过滤纸进行迁移交换。试验约 10 d 后, 滤纸与土样的吸力将达到平衡。此时, 测量中间层滤纸的含水率并借助滤纸的率定曲线即可获得土样的基质吸力 (简称吸力)^[24]; 同时, 测量土样的含水率, 并根据式 (2) 计算对应的饱和度, 即可得到土样吸力与饱和度的对应关系。滤纸法主要用于高吸力段 (1600~30000 kPa) 土水特征的测量^[24-25], 因此, 环刀土样的含水率应相对较小。本次试验中, 令不同土样的初始含水率在 12%~20% 内均匀分布, 含水率间隔为 2%; 滤纸型号为双圈牌 No. 203 型滤纸, 其含水率-吸力率定曲线参见文献^[27]。

1.3 土体孔径分布试验 (压汞试验)

压汞试验 (MIP) 是测量材料微观结构的一种重要手段, 主要用于测量材料的孔隙大小及其分布。本文采用 MIP 试验测量土体的孔径分布。MIP 试验的基本原理是: 汞是非浸润性液体, 欲使汞进入孔隙中必需施加外压。施加在汞液上的汞压越大, 能测得的孔径尺寸越小。因此, 可以通过 MIP 试验来分析试样的孔径分布。但是, 由于试验仪器和设备的限制, 进汞压力不可能超过某个上限值; 此外, 试样中存在一些微小的封闭孔隙, 汞液无法进入这部分孔隙, 所以, MIP 试验无法测得极细微孔隙的孔径分布^[26]。本文采用美国 Micromeritics 公司生产的 AutoPore IV 9500 压汞仪来进行压汞试验, 3 次试验施加的最大汞压为 40000~60000 psia, 测量的最小孔径为 3.0~5.5 nm。MIP 试验的主要步骤: ①先按规范制备某一含水率及干密度的环刀土样, 再用刀片将土样切成大小约为 5 mm×5 mm×10 mm 的小长方体。②采用液氮极速冷冻法对切取后的小土样进行冷冻干燥, 避免试验过程中对土样的孔隙结构造成破坏, 达到既干燥又不变形土样的目的。③将冷冻后的试样放置于冷冻干燥机中, 通过抽真空对试样中的水直接升华为气体, 从而使试样干燥。④根据压汞仪的操作规范对试样进行 MIP 试验, 试验的基本操作流程及参数设置参见文献^[27]。

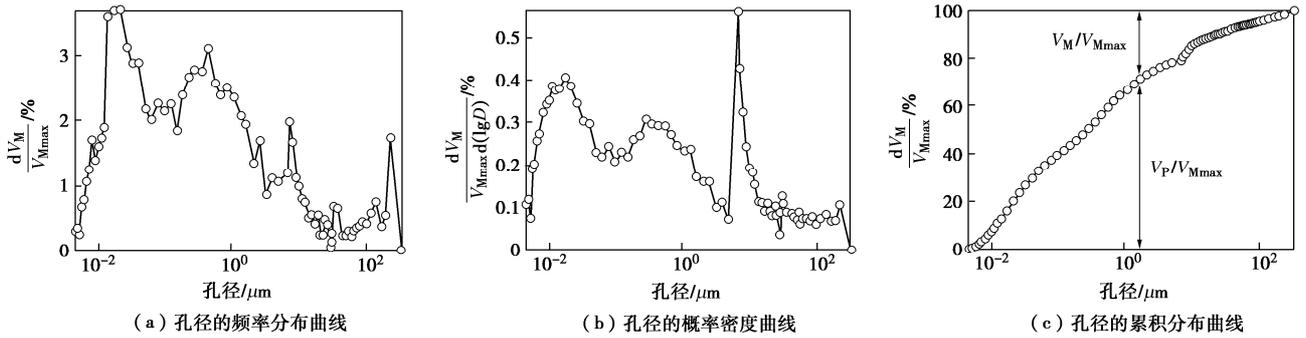


图3 孔径的频率及概率分布

Fig. 3 Frequency and probability distribution of pore sizes

2 压汞试验结果分析

通过压汞试验可以得到汞压及其对应的孔径分布。以#7-3 土样为例，由压汞仪输出的压汞阶段试验数据见表2。表中各列数据的含义如下。

第1列 (No.): 各级进汞压力对应的序号，进汞压力随着序号的增加而增加。

第2列 (p): 为了使汞进入土体孔隙中而施加在汞液上的压力 (简称汞压)。

第3列 (D): 与某级汞压 p 对应的孔隙直径。

第4列 (V_M): 某级汞压下，单位质量土体的累积进汞体积，即孔径大于 D 的孔隙体积之和。

第5列 (dV_M): 某级汞压下，单位质量土体中汞体积的增量。

第6列 (dV_M/V_{Mmax}): 某级汞压下，单位质量土体中汞体积的增量 (dV_M) 与压汞阶段最终累积进汞体积 (V_{Mmax}) 的百分比，其中 V_{Mmax} 即为根据 MIP 试验测得的孔隙总体积。

表2 压汞法试验结果 (#7-3 土样)

Table 2 Test results of MIP (soil sample No. 7-3)

No.	汞压 p /psia	孔径 D /nm	汞体积 V_M /($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)	dV_M /($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)	dV_M/V_{Mmax} /%
1	0.53	3402934.0	0.000	0.000	0.00
2	0.77	2362352.8	0.001	0.001	1.73
3	0.91	1978851.4	0.002	0.000	0.54
4	1.03	1751982.5	0.002	0.000	0.37
5	1.27	1428556.3	0.003	0.001	0.75
...
72	29988.53	60.3	0.084	0.001	0.76
73	32489.23	55.7	0.084	0.001	0.66
74	34988.89	51.7	0.084	0.000	0.25
75	37487.23	48.2	0.085	0.000	0.35
76	39973.55	45.2	0.085	0.000	0.30

在汞被压入土体的过程中，随着汞压 p 的增加，测得的孔径 D 减小，累积进汞体积 V_M 增加。以第 i 个压汞阶段为例，体积百分比 dV_i/V_{Mmax} 可视为第 i 个孔径区间 ($D_{(i+1)} < D < D_{(i)}$) 的孔径分布频率，因此，由 dV_M/V_{Mmax} 数据可以得到孔径的频率分布曲线 (图3 (a))。

由于土体的孔径变化范围非常大 (参见表2第3列数据)，因此，在对压汞试验数据进行分析处理时需要对孔径取对数，以便更好地表示微小孔径范围内的孔径分布情况。记第 i 个孔径区间的孔径范围差值为 $dlgD_{(i)} = lgD_{(i-1)} - lgD_{(i)}$ ，则在半对数坐标系中，该孔径区间内单位长度上孔径分布的频率 (即孔径分布的概率) 为 $dV_{(i)}/V_{max}/dlgD_{(i)}$ ，由此可得到孔径的概率密度曲线 (图3 (b))。

根据压汞试验结果亦可得到孔径的累积分布。记孔径的累积分布函数为 $F(x)$ ，则 $F(D)$ 表示孔径小于 D 的孔隙体积占全部孔隙体积的百分比。需要注意的是，表2中累积进汞体积 V_M 是根据压汞试验的过程中汞压由小到大的方式累加而得 (亦即按孔径由大到小的方式累加求得)，因此， V_M 值对应的是孔径大于 D 的累积孔隙体积。记孔径小于 D 的孔隙体积记为 V_P ，则

$$F(D) = \frac{V_P}{V_{Mmax}} = \frac{V_{Mmax} - V_M}{V_{Mmax}} = 1 - \frac{V_M}{V_{Mmax}} \quad (3)$$

式中， V_{Mmax} 为 MIP 试验测得的孔隙总体积。根据式 (3) 求得的数据可以绘出孔径的累积分布曲线 (图3 (c))。

3 基于 PSD 预测 SWCC

3.1 现有的预测方法

根据 Kelvin 毛细管理论，孔径为 D 的孔隙对应有一个极限吸力值，其数值如下所示^[10, 28]：

$$\psi = \frac{4T_s}{D} \quad (4)$$

式中， T_s 为水的表面张力，与温度有关。在 20°C 时， $T_s = 72.75 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ^[29]。在此极限吸力条件下，孔径大于 D 的孔隙中的水分已经全部排出土体，孔径小于 D 的孔隙中充满水。记孔隙总体积为 V_V ，孔隙中水的体积为 V_W (等于孔径小于 D 的孔隙体积 V_P)，并且视压汞阶段最终累积进汞体积 V_{Mmax} 为孔隙总体积 V_V ，则土体的饱和度为

$$S_r = \frac{V_W}{V_V} = \frac{V_P}{V_V} = \frac{V_{Mmax} - V_M}{V_{Mmax}} = 1 - \frac{V_M}{V_{Mmax}} \quad (5)$$

对比式 (3) 与式 (5) 可知, 土体的饱和度与孔径的累积分布函数在数值上相同。这表明可以直接由土体孔径的累积分布函数求解土体的饱和度。因此, 土体饱和度与孔径 ($S_r - D$) 的关系曲线 (图 4 (a)) 与孔径的累积分布曲线 (图 3 (c)) 形状相同, 二者的区别仅在于纵坐标的名称不同。

根据孔径与吸力的对应关系 (式 (4)), 可将图 4 (a) 的横坐标改写为吸力 ψ , 从而得到饱和度与吸力 ($S_r - \psi$) 的关系曲线 (图 4 (b))。需要指出的是, 由于孔径与吸力成反比, 与图 4 (a) 横坐标 (孔径) 对应的吸力值从左至右由大到小。因此, 绘图 4 (b) 时, 需要将横坐标的吸力值大小反转, 以便与常规 SWCC 曲线的坐标表示方式相同。最后, 对图 4 (b) 所示的 ($S_r - \psi$) 数据采用 VG 模型 (式 (1)) 进行曲线拟合, 即可求得 SWCC 曲线拟合参数。

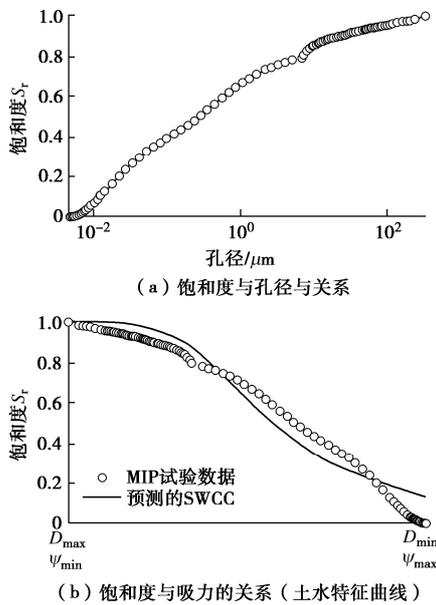


图 4 饱和度与孔径及吸力的关系

Fig. 4 Relationship among saturation, pore size and suction

综上所述, 基于土体的孔径分布 (PSD) 预测 SWCC 的具体步骤如下:

- (1) 对土样进行 MIP 试验, 得到不同压力 p 下的孔径、累积进汞体积、分级压汞增量及孔径的频率分布等数据 (参见表 2)。
- (2) 按式 (4) 求解各级孔径对应的土体吸力 ψ 。
- (3) 按式 (5) 求解各级孔径对应的土体饱和度 S_r 。

将所有 ($S_r - \psi$) 数据点按图 4 (b) 所示的半对数坐标系绘图, 再采用式 (1) 所示 VG 模型对 ($S_r - \psi$) 数据进行曲线拟合, 即可求得 SWCC 拟合参数。

3.2 改进的预测方法

如图 4 所示, 基于 MIP 试验得到的 PSD 预测的 SWCC 曲线在最小吸力 ψ_{\min} 或最大孔径 D_{\max} 处饱和度

$S_r = 1$, 在最大吸力 ψ_{\max} 或最小孔径 D_{\min} 处饱和度 $S_r = 0$ 。这表明由 PSD 预测得到的 SWCC 的吸力值有一定范围 ($\psi_{\min} \leq \psi \leq \psi_{\max}$), 其原因是 MIP 试验测得的孔径有一定范围 ($D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$)。由于试验仪器及土样本身结构的限制, MIP 试验无法测得极细微孔隙的孔径分布。因此, 通过 MIP 试验测得的孔隙体积偏小, 即 MIP 试验会低估孔隙的总体积。由式 (5) 知, 这将导致土体饱和度的预测值偏低。因此, 由现有预测方法预测得到的 SWCC 曲线低于土体真实的 SWCC。为了克服这一缺点, 本文提出基于 PSD 预测土体 SWCC 的改进方法。该方法假设土体在试验过程中体积不变, 并且已通过试验测得真实 SWCC 曲线上某一点 (记为 (S_{rT}, ψ_T) 点), 则可利用此数据对 MIP 法得到的孔隙总体积及 SWCC 进行校正, 使校正后的 SWCC 穿过该点。

如图 5 (a) 所示, 虚线及实线分别表示校正前后的 SWCC, 其中校正前的 SWCC 由第 3.1 节现有预测方法得到; (S_{rT}, ψ_T) 为已知的试验点, 它应位于真实的 SWCC (即校正后的 SWCC) 上。记校正后的孔隙总体积为 V'_V , 由于校正后的 SWCC 曲线应该穿过试验点 (S_{rT}, ψ_T), 则由式 (5) 可得

$$S_{rT} = 1 - \frac{V_{MT}}{V'_V} \quad (6)$$

式中, V_{MT} 为孔径大于 D_T 的累积孔隙体积, 可由 MIP 试验求得; 孔径 D_T 与吸力 ψ_T 相对应, 由式 (4) 求得。根据式 (6) 可得校正后的孔隙总体积为

$$V'_V = \frac{V_{MT}}{1 - S_{rT}} \quad (7)$$

显然, 由于校正后的 SWCC 位于校正前 SWCC 的上方, 饱和度有所增加, 因此, 校正后的孔隙总体积大于校正前的孔隙总体积。求得校正后的孔隙总体积 V'_V 后, 用 V'_V 替换式 (5) 中孔隙总体积 V_{Mmax} , 即可得到校正后的饱和度, 进而求得校正后的 SWCC。具体的校正方法如下。

- (1) 基于 MIP 试验按第 3.1 节方法求得校正前的 SWCC (图 5 (a) 中虚线)。
- (2) 通过室内试验测得一个土样的吸力 ψ_T 及其对应的饱和度 S_{rT} 。
- (3) 由式 (4) 求解与吸力 ψ_T 对应的孔径 D_T , 得: $D_T = 4Ts/\psi_T$ 。

(4) 根据 MIP 试验结果 (参见表 2 及图 5 (b)), 求得与 D_T 最接近孔径对应的累积压汞体积 V_{MT} 。

(5) 由式 (7) 求解校正后的孔隙总体积 V'_V 。用 V'_V 替换式 (5) 中 V_{Mmax} , 即可得到校正后的饱和度及校正后的 SWCC。

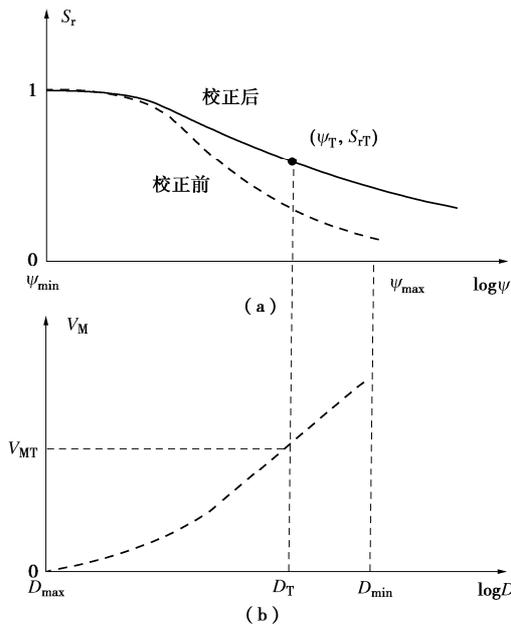


图5 校正前后 SWCC 对比

Fig. 5 Comparison of SWCCs before and after correction

对于压汞试验的第一级汞压，累积进汞体积 $V_M = 0$ (表 2)，由式 (5) 可得校正前后的土体饱和度不变；对于其它任一级汞压，校正后的饱和度均大于校正前的饱和度。这表明在吸力较小时，校正前后 SWCC 纵坐标的差值较小；在吸力较大时，校正前后 SWCC 纵坐标的差值较大。为了取得较为理想的 SWCC 校正曲线，试验点的吸力值 S_{rT} 应该相对较大，这可采用滤纸法来进行测量。但是，由于需要根据 MIP 试验结果查找与孔径 D_T 对应的累积压汞体积 V_{MT} ，因此 D_T 值应满足 $D_T \geq D_{min}$ (图 5 (b))；相应地，吸力 ψ_T 应满足 $\psi_T \leq \psi_{max}$ ，其中 $\psi_{max} = 4T_s / D_{min}$ 。否则，无法由 MIP 试验结果查得 V_{MT} 值。

4 试验结果分析与讨论

4.1 试验结果

(1) 土体的孔径分布 (PSD)

对表 1 中土样分别进行压汞试验。由于压汞试验共分 3 次取样并进行试验，因此 3 次试验的条件略有不同，3 次压汞试验的最大汞压分别约为 60000，

40000，35000 psia，相应的最小孔径分别为 3.0，4.5，5.2 nm。各次压汞试验得到的土体孔径分布 (PSD) 曲线分别见图 6 (a) ~ (c)。由于 #6、#7 土样及 #8、#9 土样的 PSD 曲线形状类似，文中只列出了 #1~#5，#6，#9 土样的 PSD 曲线。

由图 6 (a) ~ (c) 可见，#1~#5 土样的孔径概率密度 (PDF) 曲线呈双峰分布，两个主要孔径分别约为 0.01 及 7 μm ，两个峰值的大小基本相同。#6 土样孔径的 PDF 曲线在孔径为 10 μm 附近有明显峰值。#9 土样孔径的 PDF 曲线呈多峰型，两个主要峰值对应的孔径分别约为 0.01，6 μm 。对于 #6 土样，结合表 1 可知，随着土样干密度的逐渐增加，土样中大孔隙的体积逐渐减小，微孔隙的体积略有增加，但这种变化趋势并不明显。对于 #9 土样，不同含水率土样的孔径分布曲线无明显区别。因此，在后续的分析中，对于 #6~#9 的土样不再区分土样干密度及含水率的影响。

(2) 基于 PSD 预测 SWCC

采用现有方法及本文方法基于 PSD 预测得到的 SWCC 见图 7~9，图中离散的数据点代表基于室内 SWCC 试验得到的 (S_r, ψ) 试验值，用 SD 表示；黑色曲线是对 (S_r, ψ) 试验值采用 VG 模型拟合得到的 SWCC，用于验证基于 PSD 预测 SWCC 的效果，用 SC 表示；红色曲线是基于 PSD 预测得到的 SWCC，用 PC 表示；(a)，(b) 两图中红色曲线分别是校正前后的预测 SWCC。图 7 的图例中，每个小方框中从上到下的 5 行标记分别对应于 #1~#5 土样的相应曲线。本文在对 SWCC 进行校正时，校正点 (S_{rT}, ψ_T) 取相应 SWCC 试验中滤纸法的最大吸力点及其对应的饱和度和。

分析图 7~9 可见，现有方法对于 #1~#5 土样的预测效果较为理想，但对于 #6 和 #9 土样的预测 SWCC 与实测 SWCC 有较大差别。与通过室内试验得到的 SWCC 相比，采用现有方法预测得到的 SWCC 曲线斜率明显偏大，预测 SWCC 在高吸力段的饱和度明显偏低。采用本文方法进行校正后，所有土样的实测 SWCC 与预测 SWCC 均较为一致，这表明本文方法具有较强

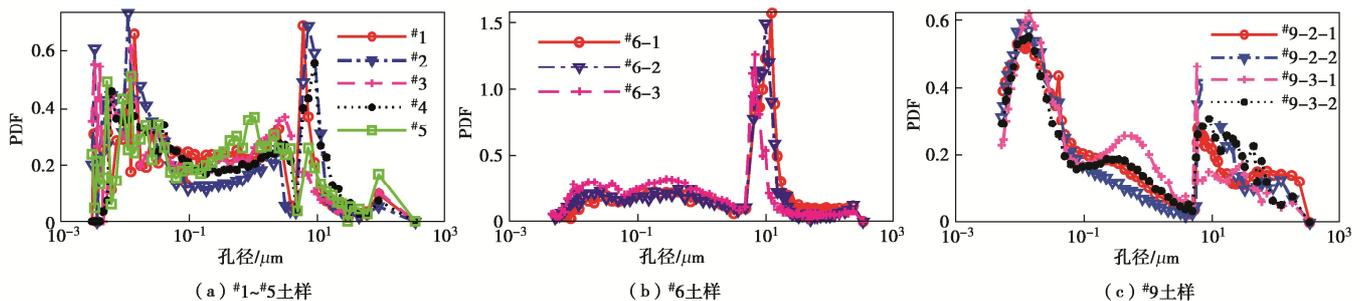


图6 孔径的概率分布

Fig. 6 Probability distribution of pore sizes

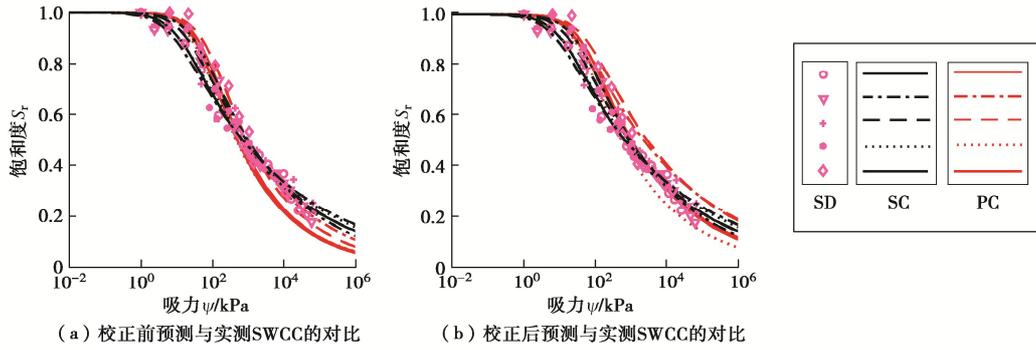


图 7 SWCC 的对比分析 (#1~#5 土样)

Fig. 7 Comparison of SWCCs (soil samples No. 1 ~ 5)

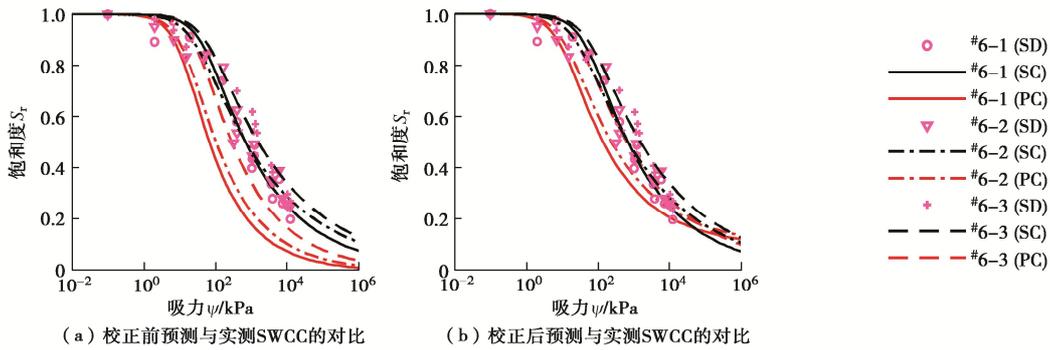


图 8 SWCC 的对比分析 (#6 土样)

Fig. 8 Comparison of SWCCs (soil sample No. 6)

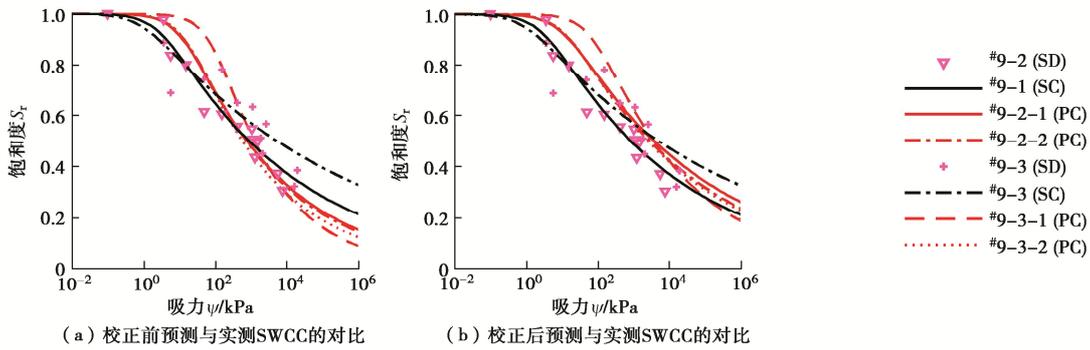


图 9 SWCC 的对比分析 (#9 土样)

Fig. 9 Comparison of SWCCs (soil sample No. 9)

的适用性,是一种理想的基于 PSD 预测 SWCC 的方法。

4.2 SWCC 的概率分析

采用室内试验直接测定土体的 SWCC 较为耗时,测量一条 SWCC 曲线至少需要约 10 d 时间,大量测量土体的 SWCC 一般需要历时数月甚至更久^[30]。但是,采用 MIP 试验可以快速得到土体的 PSD,从而可以方便地基于 PSD 得到土体的 SWCC。对于 9 组土样预测得到的 SWCC 见图 10, 图中离散的数据点代表基于室内 SWCC 试验得到的 (S_r, ψ) 试验值; 图 10

(a), (b) 中曲线分别为校正前后的预测 SWCC。可见,校正前的预测 SWCC 普遍低于实测的 SWCC 数据点(图 10 (a)); 除了极少数试验异常点,校正后的预测 SWCC 与实测的 SWCC 数据点的重合度非常好。因此,图 10 进一步证明了采用本文方法预测

SWCC 的正确性。各土样的预测 SWCC 曲线拟合参数及其统计值见表 3。

表 3 SWCC 拟合参数

编号	预测 SWCC (校正后)		
	a/kPa	n	w_r
#1	41.0	1.19	0.000
#2	29.1	1.15	0.000
#3	45.3	1.14	0.000
#4	33.2	1.24	0.000
#5	29.7	1.18	0.000
#6	16.9	1.26	0.064
#7	24.6	1.27	0.031
#8	10.1	1.19	0.000
#9	25.2	1.14	0.000
均值	28.3	1.20	0.011
COV	0.39	0.04	2.14

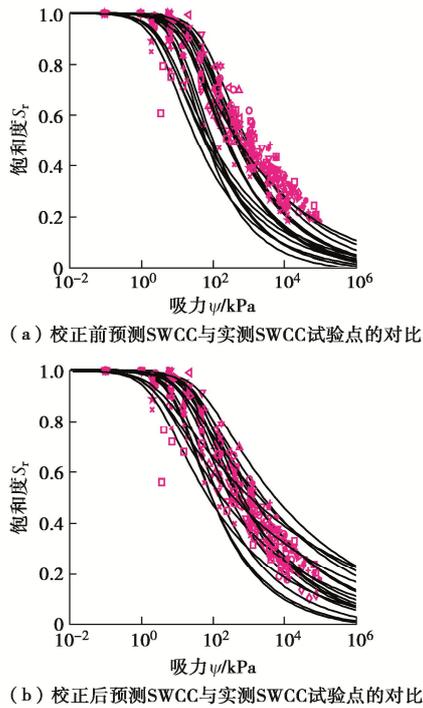


图 10 SWCC 的波动范围

Fig. 10 Fluctuation range of SWCCs

4.3 讨论

本文中土样属于弱膨胀性黏土。采用冷冻干燥法制取 MIP 试验的土样时, 严格根据文献[31]的要求制作土样, 从而达到既干燥又不变形土样的目的。在滤纸法试验过程中, 当土样的吸力与滤纸的吸力达到平衡时, 土样中水分的损失量非常小。因此, 本文方法主要适用于非变形土体。

5 结 论

非饱和土的土水特征 (SWCC) 与孔径分布 (PSD) 密切相关, 基于非饱和土体的 PSD 可以预测土体的 SWCC。论文分析了当前基于 PSD 预测 SWCC 方法中存在的问题, 在此基础上提出了基于 PSD 预测 SWCC 的改进方法。新方法只需对非饱和土采用滤纸法测量一个吸力值及其对应的饱和度, 即可基于压汞法得到的 PSD 预测非饱和土的 SWCC。通过对 9 组土样的预测 SWCC 与实测 SWCC 的对比分析表明, 本文方法能方便快捷且准确地预测非饱和土的 SWCC, 是研究非饱和土土水特征的一种较为理想的方法。通过该方法可以快速测定多组土样 SWCC 的拟合参数及其概率统计特征, 便于在此基础上进行非饱和土体中岩土工程的可靠度分析。

参考文献:

[1] FREDLUND D G, HOUSTON S L. Protocol for the assessment of unsaturated properties in geotechnical

engineering practice[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**: 694 - 707.

[2] NAM S, GUTIERREZ M, DIPLAS P, et al. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils[J]. Engineering Geology, 2009, **110**: 1 - 10.

[3] ZHANG Y W, SONG Z P, WENG X L, et al. A new soil-water characteristic curve model for unsaturated loess based on wetting-induced pore deformation[J]. Geofluids, 2019(3): 1 - 14.

[4] JOHARI A, HABIBAGAH I, GHARAMANI A. Prediction of soil-water characteristic curve using genetic programming[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(5): 661 - 665.

[5] AUBERTIN M, RICARD J F, CHAPUIS R P. A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(1): 55 - 69.

[6] AUBERTIN M, MBONIMPA M, BUSSIÈRE B, et al. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(6): 1104 - 1122.

[7] MBONIMPA M, AUBERTIN M, MAQSUD A, et al. Predictive model for the water retention curve of deformable clayey soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(9): 1121 - 1132.

[8] ARYA L M, PARIS J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, **45**(6): 1023 - 1030.

[9] 刘士雨, 俞 缙, 蔡燕燕, 等. 基于土壤物理特性扩展技术的土水特征曲线预测方法[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(5): 924 - 931. (LIU Shi-yu, YU Jin, CAI Yan-yan, et al. Prediction of soil water characteristic curve using physically based scaling technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(5): 924 - 931. (in Chinese))

[10] SIMMS P H, YANFUL E K. Predicting soil-water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore size distributions[J]. Géotechnique, 2002, **52**(4): 269 - 278.

[11] ABDUL-KAREEM E Z, SHAIMAA H F. Prediction of soil water characteristic curve using artificial neural network: a new approach[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, **162**: 01014.

[12] TAO G L, CHEN Y, XIAO H L, et al. Determining soil-water characteristic curves from mercury intrusion porosimeter test data using fractal theory[J]. Energies, 2019, **12**(4): 752.

- [13] KONG L W, TAN L R. A simple method of determining the soil-water characteristic curve indirectly[C]// 1st Asian Conference on Unsaturated Soils, 2000, Singapore.
- [14] 王磊. 土水特征曲线滞回特性的影响因素研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2013. (WANG Lei. Research on Influencing Factors of Hysteretic Characteristics of Soil-Water Characteristic Curve[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [15] 辛志宇, 谭晓慧, 王雪, 等. 膨胀土增湿过程中吸力-孔隙比-含水率关系[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(7): 1195 - 1203. (XIN Zhi-yu, TAN Xiao-hui, WANG Xue, et al. Relationship among suction, void ratio and water content of expansive soils during wetting process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(7): 1195 - 1203. (in Chinese))
- [16] 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 2008. (Standard of Engineering Classification of Soil: GB/T 50145—2007[S]. 2008. (in Chinese))
- [17] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Soil Test Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [18] 李芑. 合肥市非饱和黏土的空间变异性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. (LI Peng. Assessment of Spatial Variability of Unsaturated Clay in Hefei[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [19] 蔡国庆, 张策, 李舰, 等. 考虑初始干密度影响的SWCC预测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **20**(增刊2): 27 - 31. (CAI Guo-qing, ZHANG Ce, LI Jian, et al. Prediction method for SWCC considering initial dry density[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **20**(S2): 27 - 31. (in Chinese))
- [20] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [21] 叶为民, 白云, 金麒, 等. 上海软土土水特征的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 260 - 263. (YE Wei-min, BAI Yun, JIN Qi, et al. Lab experimental study on soil-water characteristics of Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 260 - 263. (in Chinese))
- [22] LU N, LIKOS W J. 非饱和土力学[M]. 韦昌富, 侯龙, 简文星, 译. 北京: 高等教育出版社, 2012. (LU N, LIKOS W J. Unsaturated Soil Mechanics[M]. WEI Chang-fu, HOU Long, JIAN Wen-xing, trans. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese))
- [23] Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper: ASTM D5298—16[S]. 2016.
- [24] 徐捷, 王钊, 李未显. 非饱和土的吸力量测技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(增刊1): 905 - 909. (XU Jie, WANG Zhao, LI Wei-xian. Suction force measurement technology of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(S1): 905 - 909. (in Chinese))
- [25] 白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 928 - 933. (BAI Fu-qing, LIU Si-hong, YUAN Jiao. Measurement of SWCC of Nanyang expansive soil using the filter paper method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 928 - 933. (in Chinese))
- [26] 谭罗荣. 岩土材料孔径分布测试结果的修正[J]. 岩土力学, 2002, **23**(3): 263 - 267. (TAN Luo-rong. Modification of measured results of pore size distribution for geomaterials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(3): 263 - 267. (in Chinese))
- [27] SASANIAN S, NEWSON T A. Use of mercury intrusion porosimetry for microstructural investigation of reconstituted clays at high water contents[J]. Engineering Geology, 2013, **158**: 15 - 22.
- [28] 汪贤恩. 合肥地区非饱和和膨胀土收缩性质和微观特性的试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015. (WANG Xian-en. Research on Shrinkage Properties and Microscopic Characteristics of the Unsaturated Expansive Soil in Hefei District[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [29] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [30] 吴家琦. 快速测定土水特征曲线方法试验与模型研究[D]. 石家庄: 华北水利水电大学, 2019. (WU Jia-qi. Experimental and Model Study on Rapid Determination of Soil Water Characteristic Curves[D]. Shijiazhuang: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019. (in Chinese))
- [31] 闫小庆, 房营光, 张平. 膨润土对土体微观孔隙结构特征影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 1302 - 1307. (YAN Xiao-qing, FANG Ying-guang, ZHANG Ping. Experiment study on the effects of bentonite on the micropore structure characteristics of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 1302 - 1307. (in Chinese))