



非饱和黏性地基土的土-水特征曲线 试验及模拟*

魏占玺^{1,2,3,4}, 谢东武⁵, 袁材栋^{1,2,3,4}, 马文礼^{1,2,3,4}, 李元^{1,2,3,4}, 李云^{1,2,3,4}

- (1. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810007; 2. 青海九零六工程勘察设计院有限责任公司, 青海 西宁 810007;
3. 青海省环境地质重点实验室, 青海 西宁 810007;
4. 青海省地质环境保护与灾害防治工程技术研究中心, 青海 西宁 810007;
5. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 内地港口地基土在地下径流和降雨入渗作用下, 多为非饱和土, 其土-水特性影响港口地基稳定性。以安徽淮北港非饱和黏性地基土为研究对象, 开展不同初始含水率、初始干密度、竖向应力以及干湿循环次数下的土-水特征曲线 (SWCC) 试验。研究发现: 初始干密度和竖向应力对非饱和黏性地基土 SWCC 的影响相似, 对进气值、初气值、脱湿速率、吸湿速率和残余饱和度影响较大; 初始含水率对土体脱湿、吸湿速率影响较小, 随着初始含水率的提升, 进气值、吸湿速率、残余饱和度递增; 随着干湿循环作用的增强, 进气值和出气值的衰减逐渐削弱。结合地基土土-水特性, 修正几种常用的 SWCC 模型, 模拟不同工况下的 SWCC, 通过评分的方式得到适用于淮北港非饱和黏性地基土的推荐模型。研究成果可为不同工况下非饱和黏性地基土的土-水特性及港口地基稳定性研究提供参考。

关键词: 港口地基工程; 非饱和黏性地基土; 土-水特征曲线 (SWCC); 进气值; 出气值; 滞回效应

中图分类号: U 416

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0179-07

Experiment and simulation of soil water characteristic curve of unsaturated cohesive foundation soil

WEI Zhan-xi^{1,2,3,4}, XIE Dong-wu⁵, YUAN Cai-dong^{1,2,3,4}, MA Wen-li^{1,2,3,4}, LI Yuan^{1,2,3,4}, LI Yun^{1,2,3,4}

- (1. Qinghai Environmental Geological Exploration Bureau, Xining 810007, China;
2. Qinghai 906 Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., Xining 810007, China;
3. Key Laboratory of Environmental Geology of Qinghai Province, Xining 810007, China;
4. Qinghai Geological Environment Protection and Disaster Prevention Engineering Technology Research Center, Xining 810007, China;
5. Department of Underground Architecture and Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The foundation soil of inland port is mostly unsaturated soil under the action of underground runoff and rainfall infiltration, and its soil water characteristics affect the stability of port foundation. Taking the unsaturated cohesive foundation soil of Huaibei port in Anhui Province as the research object, we carry out the soil-water characteristic curve (SWCC) tests under different initial moisture content, initial dry density, vertical stress and dry wet cycles. The results show that the effects of initial dry density and vertical stress on SWCC of unsaturated cohesive foundation soil are similar, and they have a greater impact on air intake value, initial gas value,

收稿日期: 2021-03-14

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977227)

作者简介: 魏占玺 (1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为地基及地质灾害防治。

通讯作者: 谢东武 (1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为地下建筑工程。E-mail: yenuo557478941@163.com

dehumidification rate, moisture absorption rate and residual saturation; the effect of initial water content on soil dehumidification and moisture absorption rate is small, and with the increase of initial water content, air intake value, gas absorption value and residual saturation increase; with the increase of dry wet cycle, the effect of initial water content on SWCC of unsaturated cohesive foundation soil increases the attenuation of the inlet and outlet values gradually weakened with the increase of the pressure. Combined with the soil-water characteristics of foundation soil, we modify several commonly used SWCC models to simulate SWCC under different working conditions, and obtain the recommended model for unsaturated cohesive foundation soil of Huaibei port by scoring. The research results may serve as reference for the study of soil-water characteristics of unsaturated cohesive foundation soil and stability of port foundation under different working conditions.

Keywords: port foundation engineering; unsaturated cohesive foundation soil; soil water characteristic curve (SWCC); inlet value; outlet value; hysteresis effect

港口基坑施工建设中, 由于地下径流和降雨入渗的影响, 地基土多为非饱和土, 即固、液、气三相体系土。相比饱和土, 非饱和土还有气相存在, 土体内含有基质吸力, 其力学性质更为复杂, 影响港口地基的稳定性^[1-2]。土-水特性是非饱和土力学中的核心内容, 研究土-水特性对于掌握非饱和土工程特性、制定科学合理的设计方案具有较强的参考价值^[3-4]。

关于非饱和土的土-水特性研究已有较多成果; Gardner^[5]、Genuchten^[6]和 Fredlund^[7]等最早提出几种不同的土-水特征曲线(SWCC)模型, 至今在非饱和土-水特性研究中仍广为应用; 王铁行等^[8]、Ng 等^[9]、刘小文等^[10]、刘永强等^[11]和 Jeong 等^[12]研究不同因素(如初始含水率、初始干密度、颗粒级配、温度、围压等)对非饱和土 SWCC 的影响, 讨论不同因素对进气值、滞回特性等的影响规律; 刘艳等^[13]、Malaya 等^[14]、郭鸿等^[15]和叶云雪等^[16]系统研究了非饱和土 SWCC 的模拟预测。

本文研究背景为安徽淮北港基坑, 以基坑内非饱和黏性地基土为研究对象, 开展不同初始含水率、初始干密度、竖向应力以及干湿循环次数下的土-水特征曲线(SWCC)试验, 探索非饱和黏性地基土在不同工况下的土-水特性。在前人已建模型的基础上, 结合淮北港非饱和黏性地基土的土-水特性, 得到修正模型, 模拟不同工况下的

SWCC, 通过评分的方式得到适用于淮北港非饱和黏性地基土的推荐模型。研究成果可为不同工况下非饱和黏性地基土的土-水特性及港口地基稳定性研究提供参考。

1 土-水特征曲线试验

1.1 试验土样

试验土体基本物理参数见表 1。所取土体黏土矿物主要为蒙脱石、伊利石, 土样粒径大于 2 mm、介于 0.5~2 mm、0.25~0.5 mm、0.075~0.25 mm 及小于 0.075 mm 的颗粒质量占比分别为 9.24%、13.76%、12.38%、30.73%和 33.89%。图 1 为采用击实试验得到的地基土击实曲线。

表 1 土样基本物理参数

天然密度/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	天然含 水率/%	孔隙比	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数
1.65	17.4	0.48	37.3	18.5	18.8

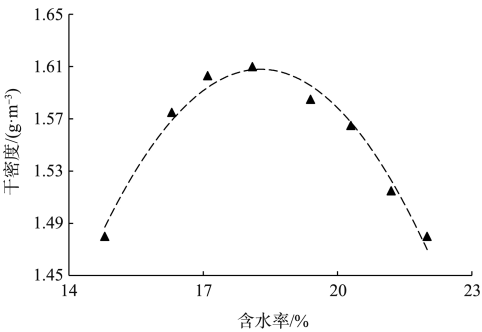


图 1 地基土击实曲线

由图1可知,原状地基土最大干密度为 1.61 g/m³,最优含水率为 18.1%。由表 1 可知,塑性指数为 18.8(>17),定义为黏土^[17],本文地基土为非饱和和黏性地基土。

1.2 SWCC 试验方案

为开展不同初始含水率、初始干密度、竖向应力以及干湿循环次数下的土-水特征曲线(SWCC)试验,制备不同工况下的重塑土样,试验工况设置见表 2。将原状土风干后过 2 mm 筛,按工况采用环刀法制备重塑样,SWCC 试验前进行真空饱和。其中压实度 = 干密度/最大干密度,表 2 中的干密度设置参考现有水运、公路规范中地基土压实度 90%、93%和 96%的要求。

表 2 试验工况设置					
试样编号	初始干密度/ (g·m ⁻³)	压实度/ %	初始含水率/%	竖向压力/ kPa	干湿循环 次数/次
C1	1.45	90	18.1	0	1
C2	1.50	93	18.1	0	1
C3	1.55	96	18.1	0	1
C4	1.50	93	16.4	0	1
C5	1.50	93	19.6	0	1
C6	1.50	93	18.1	100	1
C7	1.50	93	18.1	200	1
C8	1.50	93	18.1	0	3
C9	1.50	93	18.1	0	5

由表 2 可知,不同初始条件可组合为不同工况,其中 C1、C2 和 C3 反映不同初始干密度对 SWCC 的影响,C2、C4 和 C5 为不同初始含水率工况,C2、C6 和 C7 为不同竖向压力工况,C2、C8 和 C9 为不同干湿循环作用工况。

土-水特征曲线(SWCC)有多种试验方法,目前有体积压力板测试法、盐溶液法、Tempe 仪测试法、滤纸法、Dew-point 电位计法、TDR 基质吸力量测法、GDS 四维应力路径法等。体积压力板测试法便于操作,可量测基质吸力范围大,应用较广,但通常的体积压力板设备未考虑体积变化和竖向应力的影响。本文采用 SDSWCC 应力相关土水特征曲线压力板仪系统(图 2),区别于传统仪器之处在于可考虑体积变化和竖向应力的影

响,由此开展不同干密度、初始含水率、竖向应力以及干湿循环次数下的 SWCC 试验。试验得到完整的 SWCC 曲线包含脱湿、吸湿曲线(图 3)。

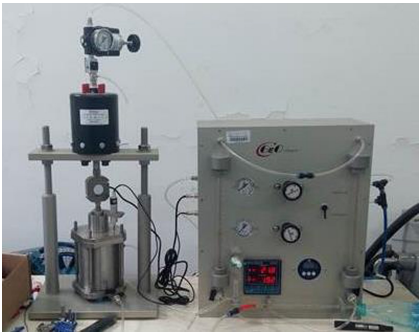


图 2 试验仪器

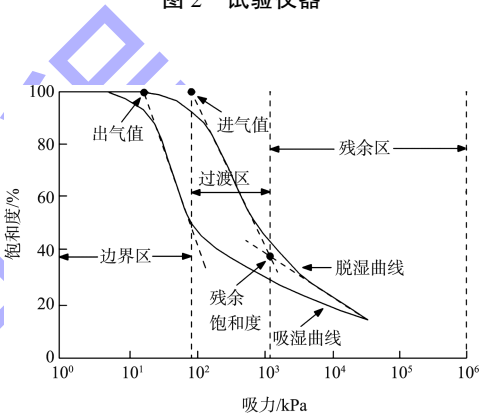


图 3 土-水特征曲线

图 3 中脱湿曲线体现基质吸力增大引起的土体水分损失情况,吸湿曲线体现基质吸力减小引起的土体吸水情况。通过脱湿、吸湿曲线取双切线交点的方法将进气值、出气值和残余饱和度量化,为 SWCC 研究提供重要参数。

2 试验分析

2.1 不同初始含水率下的 SWCC

初始干密度为 1.50 g/m³ 的不同初始含水率下的 SWCC 如图 4 所示。由图 4 可看出,不同初始含水率下的 SWCC 脱湿、吸湿曲线形态、走势较为相似,说明初始含水率对土体脱湿、吸湿速率影响较小。通过图 3 所示取双切线交点的方法粗略判断,3 种初始含水率下的进气值略大于出气值,随着初始含水率的提升,进气值、吸气值、残余饱和度递增。

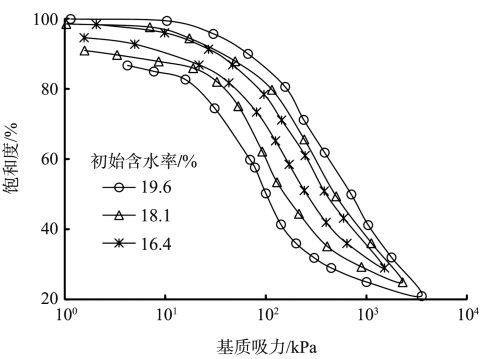


图 4 不同初始含水率下的 SWCC

SWCC 具有明显的滞回特性，经过一个吸力循环变化后，土体饱和度的变化不可恢复。初始含水率为 19.6% 的滞回环面积最大，初始含水率为 18.1% 的滞回环次之，初始含水率为 16.1% 的滞回环最小且居中。其原因可能为：较低初始含水率下的土样孔隙大小不一，在空间上呈二元分布，进气值较小，土样不容易脱水。较高初始含水率下的土体孔隙主要为分布相对均匀的小孔隙，进气值更高，更容易脱水。非饱和土内部孔隙大小分布越均匀，瓶颈效应越明显，SWCC 滞回环面积越大。瓶颈效应如图 5 所示。

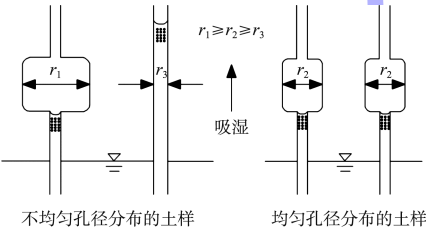


图 5 瓶颈效应

2.2 不同初始干密度下的 SWCC

初始含水率为 18.1% 的不同初始干密度下的 SWCC 如图 6 所示。由图 6 可看出，初始干密度对 SWCC 的过渡区和残余区影响显著，脱湿、吸湿曲线形态较为相似，脱湿曲线过渡区的斜率略大于吸湿曲线。通过图 3 所示取双切线交点的方法粗略判断初始干密度 1.55、1.50 和 1.45 g/m³ 下的土体进气值为 86、65 和 42 kPa，出气值分别为 71、38 和 26 kPa，残余饱和度分别为 41%、37% 和 23%，非饱和土进气值、出气值和残余饱和度皆随着初始干密度的增加而递增。由此认为，较高初始干密度非饱和土 SWCC 的进气值更大，

脱水速率更慢，持水能力较强。其原因可能为：较高初始干密度非饱和土孔隙相对较少，孔隙之间的连通性差，因而进气值更大；较低初始干密度非饱和土孔隙相对较多，孔隙之间的连通性较好，在低基质吸力条件下也能较快地失水，因而进气值更小。

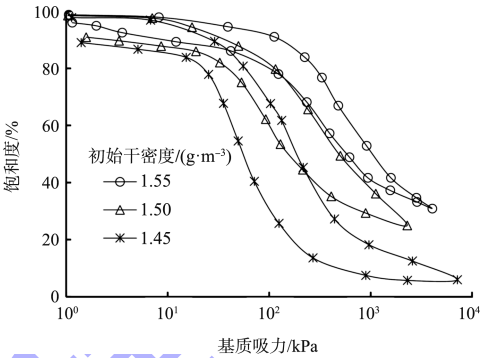


图 6 不同初始干密度下的 SWCC

图 6 中吸湿曲线均未达到完全饱和状态，初始干密度越大的试样，其残余饱和度越大，残余气体含量所占的比例越小。其原因可能为：非饱和土的初始干密度越小，其孔隙相对较多，毛细作用力更难排出孔隙内气体，土体更难恢复到完全饱和状态。

SWCC 产生了大小不等的滞回环，SWCC 产生滞回环的原因不仅在于瓶颈效应的影响，还与脱湿、吸湿过程中固、液接触角的差异相关。以斜面上水滴流动为例进行固、液接触角示意^[18]，如图 7 所示。

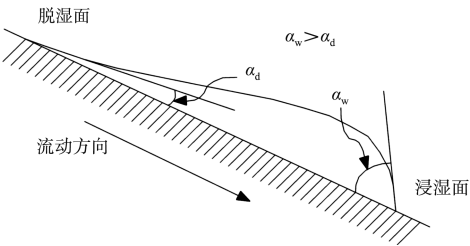


图 7 斜面上水滴流动模拟固、液接触角

图 7 中以水滴向下流动的前进面作为脱湿面、后退面作为浸湿面，一般情况下浸湿面的固、液接触角 α_w 大于脱湿面的固、液接触角 α_d 。从图 6 可看出，滞回环大小随着初始干密度的减小而递增。非饱和土的初始干密度越小，土体内部结构越松散，孔径分布越不均匀，瓶颈效应越显著，

由此非饱和土 SWCC 的滞回效应越明显。同时, 较低初始干密度的土样孔径分布相对不均匀, 大孔径的孔隙含量更多, 大孔径孔隙在脱湿、吸湿过程中的固、液接触角变化更大, 即 $(\alpha_w - \alpha_d)$ 更大, 导致滞回效应更显著。

2.3 干湿循环作用下的 SWCC

初始干密度为 1.50 g/m^3 、初始含水率为 18.1% 的不同干湿循环次数下的 SWCC 如图 8 所示。由图 8 可看出, 不同干湿循环次数下的脱湿、速率相差不大。经历 1 次干湿循环作用的 SWCC 滞回环面积较大, 经历 3 次和 5 次干湿循环的滞回环面积均较小且大小接近, 说明干湿循环作用对 SWCC 有明显的影响, 降低进气值和出气值; 经历 3 次和 5 次干湿循环的进气值和出气值差异不大, 说明干湿循环作用第 1 次附加在土体上时对 SWCC 影响显著, 但随着干湿循环次数的增加, 影响逐渐削弱。其原因可能为: 土体脱湿过程中, 土体骨架收缩, 胶结物溶蚀, 部分小孔隙连接贯通成大孔隙, 增强了滞回效应; 土体吸湿过程中, 土颗粒间结合水膜进一步增厚, 胶结物溶解, 土体颗粒局部运移, 最后土体结构趋于稳定。反复的干湿循环作用下, 土体胶结物溶蚀、溶解程度衰减, 土体内部结构不断调整逐渐趋于稳定, 进气值、出气值的衰减程度变弱, 滞回环面积减小, 滞回效应减弱, 干湿循环对 SWCC 的影响逐渐削弱。

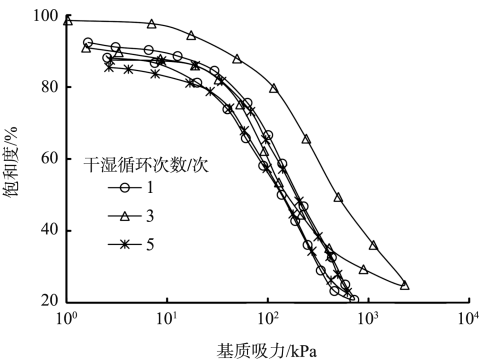


图 8 不同干湿循环次数下的 SWCC

2.4 不同竖向应力下的 SWCC

初始干密度为 1.50 g/m^3 、初始含水率为 18.1%、干湿循环 1 次的不同竖向应力下的 SWCC 如图 9 所示。由图 9 可看出, 竖向应力越大, 进气值、出气值、残余饱和度越大, 脱湿、吸湿速率越

小。其原因可能为: 竖向应力增大使得土体结构被压密, 土体脱湿过程中孔隙比减小, 吸入空气量更大, 而吸湿过程中土体内有更多气体排出, 由此进气值、出气值更大。图 9 和图 6 有相似之处, 初始干密度和竖向应力均主要影响 SWCC 过渡区和残余区, 说明竖向应力的作用对土体结构造成了密度变化, 由此导致图 9 和图 6 变化规律相似。

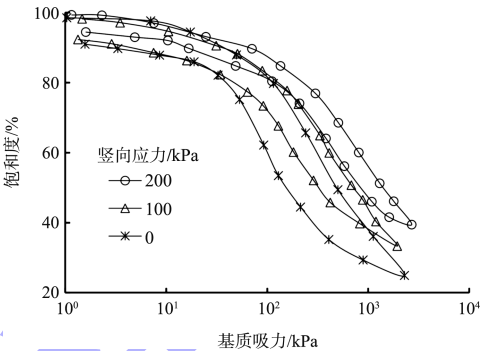


图 9 不同竖向应力下的 SWCC

3 土-水特性曲线模拟

3.1 土-水特性曲线模型

饱和度(体积分含水量)在非饱和土瞬态分析中尤为重要, 是 SWCC 模型中的重要参数, 工程实践中可能限于现场条件等客观因素无法及时、准确获取, 采取 SWCC 模型进行模拟求解无疑是一种可行的途径。目前已有较多 SWCC 模型, 例如 Gardner、Farrel、Van Genuchten、McKee^[19]、Fredlund & Xing、Likos^[20] 等模型, 常用模型如下:

Gardner 模型:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + a\varphi^b} \tag{1}$$

Van Genuchten 模型:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\varphi}{a}\right)^b\right]^c} \tag{2}$$

Fredlund & Xing 1 模型:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\varphi}{a}\right)^b\right]\right\}^c} \tag{3}$$

Fredlund & Xing 2 模型:

$$\theta = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\varphi_r}\right)}\right] \cdot \frac{\theta_s}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\varphi}{a}\right)^b\right]\right\}^c} \tag{4}$$

式中： θ 、 θ_r 和 θ_s 分别为土体体积含水量、残余含水量和饱和含水量， φ 和 φ_r 分别为基质吸力和残余基质吸力， a 、 b 和 c 皆为拟合参数。

实际上本文非饱和黏性地基土的 SWCC 曲线(图 4、6、8、9)并不是典型的“S”型，残余含水量难以精确测定，因此在式(1)~(4)的基础上剔除残余含水量从而进行修正，得到如下修正模型。

Gardner 修正模型：

$$S=\frac{100}{1+a\varphi^b}$$

(5)

Van Genuchten 修正模型：

$$S=\frac{100}{\left[1+\left(\frac{\varphi}{a}\right)^b\right]^c}$$

(6)

Fredlund & Xing 1 修正模型：

$$S=\frac{100}{\left\{\ln\left[e+\left(\frac{\varphi}{a}\right)^b\right]\right\}^c}$$

(7)

Fredlund & Xing 2 修正模型：

$$S=\left[1-\frac{\ln\left(1+\frac{\varphi}{d}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{d}\right)}\right]\cdot\frac{100}{\left\{\ln\left[e+\left(\frac{\varphi}{a}\right)^b\right]\right\}^c}$$

(8)

式中： S 为模型拟合所得饱和度， d 为拟合参数。

3.2 土-水特征曲线拟合

通过式(5)~(8)4个修正模型对本文 C1~C9 试样的土-水特征曲线进行模拟，拟合相关性系数 R^2 通过下式计算：

$$R^2=1-\frac{\sqrt{\sum(S_i-S)^2}}{\sum S_i^2}$$

(9)

式中： S_i 为试验实测饱和度。对不同修正模型的拟合结果评分， R^2 最高的记 4 分，以此类推，最低的记 1 分，拟合失败结果未收敛的记 0 分。

通过 Origin 软件，基于一般的非线性最小二乘法，分别采用式(5)~(8)拟合本文 C1~C9 试样的 SWCC，各修正模型的拟合结果见表 3。

表 3 修正模型的 R^2 及得分值

试样编号	状态	Gardner 修正模型		Van Genuchten 修正模型		Fredlund & Xing 1 修正模型		Fredlund & Xing 2 修正模型	
		R^2	评分	R^2	评分	R^2	评分	R^2	评分
C1	脱湿	0.965 4	1	0.997 3	3	0.996 5	2	0.998 4	4
C2		0.953 7	1	0.992 7	2	0.998 4	3	0.999 2	4
C3		0.958 6	1	0.990 8	2	0.997 3	3	0.997 5	4
C4		0.967 0	1	0.987 4	2	0.993 6	3	0.999 5	4
C5		0.958 8	1	0.989 2	3	0.986 4	2	0.998 6	4
C6		0.978 6	2	0.975 4	1	0.989 5	3	0.991 2	4
C7		0.993 2	4	0.986 1	3	0.984 0	1	0.986 3	2
C8		Failed	0	0.995 6	4	0.993 1	3	0.987 7	2
C9		0.989 3	1	0.996 2	2	0.999 1	4	0.998 3	3
C1	吸湿	0.996 4	3	0.965 8	1	0.984 4	2	0.998 8	4
C2		0.991 4	1	0.996 0	2	0.997 2	3	0.999 3	4
C3		0.955 4	1	0.991 1	2	0.994 8	3	0.997 4	4
C4		0.986 1	2	0.968 4	1	0.994 6	3	0.995 3	4
C5		0.953 8	2	Failed	0	0.996 9	4	0.996 2	3
C6		0.977 5	3	0.970 2	2	0.968 3	1	0.988 4	4
C7		0.962 3	1	0.989 2	4	0.980 9	2	0.987 5	3
C8		0.972 3	1	0.981 5	3	0.983 8	4	0.979 4	2
C9		0.978 6	2	0.967 3	1	0.990 5	3	0.993 2	4
R^2 平均值		0.972 8		0.984 7		0.990 5		0.994 0	
评分合计		28		38		49		63	

注：Failed 为模型未拟合出结果。

由表 3 可看出, 模型拟合效果从好到差依次为 Fredlund & Xing²、Fredlund & Xing¹、Van Genuchten 和 Gardner 修正模型, R^2 平均值分别为 0.994 0、0.990 5、0.984 7 和 0.972 8, 得分值分别为 63、49、38 和 28。其中 Van Genuchten 和 Gardner 修正模型的 R^2 小于 0.99, 拟合效果一般, Fredlund & Xing²、Fredlund & Xing¹ 修正模型的 R^2 大于 0.99, 拟合效果较好, 适用于本文非饱和地基土。尽管 Fredlund & Xing¹ 修正模型的 R^2 略小于 Fredlund & Xing², 但由于其模型结构简单, 形式简练, 工程实践中便于应用, 综合考虑将其作为本文安徽淮北港基坑非饱和黏性地基土的推荐 SWCC 模型。

4 结论

1) 初始含水率对非饱和土 SWCC 脱湿、吸湿速率影响较小, 随着初始含水率的提升, 瓶颈效应越明显, 滞回环面积越大, 进气值、吸气值、残余饱和度递增。

2) 初始干密度对 SWCC 的过渡区和残余区影响显著, 脱湿速率略大于吸湿速率。进气值、出气值和残余饱和度皆随着初始干密度的增加而递增。

3) SWCC 进气值、出气值随着干湿循环作用的增强而递减, 经历 1 次干湿循环作用的 SWCC 滞回环面积较大, 但随着干湿循环次数的增加, SWCC 滞回效应逐渐削弱。

4) 非饱和土承受竖向应力越大, 进气值、出气值、残余饱和度越大, 脱湿、吸湿速率越小, 竖向应力主要影响 SWCC 过渡区和残余区, 与初始干密度对 SWCC 的影响类似。

5) 本文非饱和黏性地基土 SWCC 并不是典型的“S”型, 残余含水量难以精确测定。将残余含水量剔除后得到 4 种修正模型, 分别拟合计算得到相关性系数和评分。对比发现, Fredlund & Xing¹ 修正模型的拟合相关性系数较高, 且模型结构简单, 便于应用, 适用于安徽淮北港基坑非饱和黏性地基土。

参考文献:

[1] 张钦喜, 陈鹏, 杨宇友, 等. 非饱和土土-水特征曲线试验及在工程中的应用[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(8): 1185-1189.

[2] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.

[3] 沈梦芬. 合肥地区非饱和膨胀土的粒度特性和土水特征的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.

[4] 潘登丽, 倪万魁, 苑康泽, 等. 基于 VG 模型确定土水特征曲线基本参数[J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 69-76.

[5] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil science, 1958, 85(4): 228-232.

[6] GENUCHTEN M T H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil science society of America journal, 1980, 44(5): 892-898.

[7] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian geotechnical journal, 1994, 31(4): 521-532.

[8] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 1-5.

[9] NG C W W, LEUNG A K. In-situ and laboratory investigations of stress-dependent permeability function and SDSWCC from an unsaturated soil slope[J]. Geotechnical engineering, 2012, 43(1): 26-39.

[10] 刘小文, 叶云雪. 不同影响因素下非饱和红土土-水特征曲线的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 97-104.

[11] 刘永强, 叶伟, 石北啸. 干湿循环条件下裂缝对土体吸力影响的机制研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 101-104.

[12] JEONG S, KIM Y M, PARK H. Influences of rainfall infiltration and hysteresis SWCC of unsaturated soil on settlement of shallow foundations[J]. Japanese geotechnical society special publication, 2019, 7(2): 569-575.

[13] 刘艳, 赵成刚, 王靖安, 等. 基于土性参数的土水特征曲线的预测方法[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(11): 1457-1464.