

DOI: 10.11779/CJGE20220065

基于各向等压压缩和土的收缩试验预测脱湿路径下的土水特征曲线

叶云雪^{1,2}, 徐帆³, 刘小文^{*4}, 吴珺华^{1,2}, 丁鲁强⁵

(1. 南昌航空大学土木建筑学院, 江西南昌 330063; 2. 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 江西应用科技学院建筑工程学院, 江西南昌 330100; 4. 南昌大学建筑工程学院, 江西南昌 330031; 5. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 由于土水特性试验需要专门的仪器且耗时, 所以土水特征曲线在工程设计中的应用尚未普及。以粉质砂土、黏性土和膨胀土为研究对象, 通过开展室内饱和土的各向等压压缩和土的收缩试验, 提出一个预测脱湿路径下低吸力范围内SWCC的简单方法。研究结果表明: 基于有效应力与变形的统一关系, 可以构建饱和土和非饱和土之间的联系; 针对不同初始干密度下土的收缩特征曲线, 利用曲率公式并结合所提均值法, 可定量获得残余含水量; 利用所提方法预测的低吸力范围SWCC与试验数据具有良好的一致性。该研究结果可以确保在进行必要的常规饱和土试验时, 能够间接获得非饱和水力参数。

关键词: 非饱和土; 各向等压压缩; 收缩; 土水特征曲线; 预测

中图分类号: TU433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)04-0847-08

作者简介: 叶云雪(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土方面的科研和教学工作。E-mail: yeyunxue@163.com。

Prediction of soil-water characteristic curves under drying path based on isotropic compression and soil shrinkage tests

YE Yunxue^{1,2}, XU Fan³, LIU Xiaowen⁴, WU Junhua^{1,2}, DING Luqiang⁵

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. College of Architectural Engineering, Jiangxi University of Applied Science, Nanchang 330100, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 5. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Because the soil-water characteristic tests require professional instruments and are time-consuming, the application of soil-water characteristic curves (SWCCs) in engineering design is not popular. Taking three kinds of soils as the research objects, including silty sand, cohesive soil and expansive soil, a simple method is proposed to predict the SWCCs in drying path within the low suction range by performing the isotropic compression tests of saturated soil and shrinkage tests of soil in the laboratory. The research results show that based on the unified relationship between the effective stress and the deformation, the connection between the saturated soil and the unsaturated soil can be established. According to the soil shrinkage characteristic curves under different initial dry densities, the residual water content can be obtained quantitatively by using the curvature formula and the proposed mean value method. The SWCCs within the low suction range predicted by the proposed method are in good agreement with the experimental data obtained in this study. This work contributes to ensure that the unsaturated hydraulic parameters are obtained indirectly when it is necessary to carry out the conventional saturated soil tests.

Key words: unsaturated soil; isotropic compression; shrinkage; soil-water characteristic curve; prediction

0 引言

土水特征曲线(SWCC)是确定非饱和土水力学性质的重要工具之一, 非饱和土理论已逐渐应用于南水北调等重大工程的边坡稳定性分析中^[1-2]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51268046); 水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2021A05); 南昌航空大学博士启动基金项目(EA201911396)

收稿日期: 2022-01-12

*通信作者(E-mail: cnliuxiaowen@126.com)

SWCC 的试验测量一般包括直接法和间接法^[3]。影响 SWCC 的因素有很多,如应力历史^[4]、初始含水率和干密度^[5]、制样条件^[6]、孔隙溶液中化学物质的浓度^[7]、压实度和温度等^[8]。为了定量地描述 SWCC,很多学者提出了 SWCC 数学模型^[9-11]。在常规的压力板试验中,SWCC 的测量范围很有限(与陶土板的规格有关),往往局限于毛细区(低吸力范围)。为了获得吸附区(高吸力范围)的 SWCC,通常是将毛细区拟合得到的参数代入 SWCC 模型中直接进行估算。事实上,这种方法是值得商榷的^[12-13]。围绕缩短试验时间和便于工程应用的目的,一些学者提出了 SWCC 的预测方法^[14]或研发了新型仪器^[15],但是始终没有得到真正适合工程推广和应用的简便方法。因此,有必要提出一个简单实用的方法来解决非饱和土参数在工程中不易获取的问题。

模拟非饱和土包气带中水的运移规律,不仅需要 SWCC 和渗透系数,还需要土的收缩特征曲线^[16]。收缩特征曲线(SGCC)描述了土体体积(孔隙比)与含水率之间的关系,而 SWCC 描述了土中吸力与含水率之间的关系,在试验过程中,还伴随着体变的发生。因此,一些学者建立了 SWCC 与收缩曲线之间的联系^[17-18]。土体体变通常是由外力(如竖向应力或围压)或内力(如吸力)引起的,因此土体体变即可用外力与孔隙比的关系曲线描述,亦可用吸力与孔隙比的关系曲线描述。基于这两种曲线在半对数坐标上的相似性,可使用同一种 SWCC 模型(如 VG 模型)进行定量描述,这种简化能够考虑水力-力学耦合作用下土的体变^[19]。

无论是饱和土还是非饱和土,有效应力是影响土体体变和强度的主要因素^[20]。由此可以假定,对于给定的土体,若施加的有效应力相同,则土样的孔隙比一致,与施加力的形式(外力或内力)无关。另外,当不同外力引起试样的体变一致时,外力对土水特性的影响可看作是等效的。因为孔隙比是影响 SWCC 的直接因素,而外力是影响 SWCC 的间接因素^[21]。换句话说,尽管外力和内力对有效应力的影响不同,但二者引起的有效应力若为等值关系,则土体的 SWCC 将是一致的。

本文拟通过理论和试验手段实现以下目的:基于 Bishop 非饱和土有效应力公式,建立饱和土常规试验与非饱和土土水特性试验之间的联系,从而提出预测脱湿路径下 SWCC 的简单方法。通过开展室内各向等压压缩和土的收缩试验,并结合土水特性试验,进一步验证所提的 SWCC 预测方法。

1 所提简单方法

鉴于有效应力是控制土体变形和强度的主要应力变量,故可利用非饱和土有效应力原理建立饱和土和非饱和土之间的联系。Bishop^[22]非饱和土有效应力公式如下所示:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) = (\sigma - u_a) + \chi s \quad (1)$$

式中: σ' 为有效应力(kPa); σ 为总应力(kPa); u_a 为孔隙气压力(kPa); u_w 为孔隙水压力(kPa); χ 为 Bishop 有效应力参数; $s = u_a - u_w$, 表示基质吸力(kPa)。

在各向等压压缩试验中,当饱和试样在每级围压(水压)作用下排水固结稳定时 $u_w = u_a = 0$,由式(1)可知, $\sigma' = \sigma = \sigma_3$ (其中 σ_3 为静水围压)。同样,在压力板试验中,饱和试样同样在围压(气压)作用下排水固结,当每级吸力平衡时 $u_w = 0$ 且 $\sigma = u_a$,将其代入式(1)中可得 $\sigma' = \chi s$ 。

基于上述假定,对于初始条件一致的饱和试样,若施加相同的有效应力,则土样的变形(孔隙比)接近一致。首先,利用各向等压压缩试验获得静水围压 σ_3 与孔隙比 e 的关系,即 σ_3-e 曲线。其次,利用饱和土干燥收缩试验得到质量含水率 w 与孔隙比 e 的关系,即 $w-e$ 曲线。若令 $\sigma_3 = \chi s$ 且 χ 值可确定,则可得到 $s-w-e$ 三者的关系,进一步可得到 $s-S_r$ 曲线,即脱湿路径下的 SWCC。最后,利用压力板试验得到实测 SWCC,并与预测 SWCC 进行对比,从而验证所提方法的准确性和适用性。

为定量地描述各向等压压缩曲线(ICC)、土的收缩特征曲线(SGCC)和 SWCC,需选取合适的数学模型,其表达式分别如式(2)~(4)所示。

基于 VG 模型^[10]的 ICC 模型:

$$e = e_{\min} + (e_0 - e_{\min}) \left(1 + \left(\frac{\sigma'}{\alpha_1} \right)^{n_1} \right)^{-1+1/n_1}, \quad (2)$$

SGCC 模型^[23]:

$$e = e_s + \lambda \exp(-uw^v), \quad (3)$$

SWCC 模型^[10]:

$$\frac{S_r - S_{\text{res}}}{1 - S_{\text{res}}} = \left(1 + \left(\frac{s}{\alpha_2} \right)^{n_2} \right)^{-1+1/n_2}. \quad (4)$$

式中: e_0 为饱和试样的初始孔隙比; e_{\min} 为不同静水围压下的最小孔隙比; e_s 为干燥状态下土的孔隙比,一般与缩限对应的孔隙比相等; S_r 为饱和度; S_{res} 为残余饱和度,且 $S_{\text{res}} = G_s w_{\text{res}} / e_{\text{res}}$, 其中 G_s 为土粒相对质量密度, w_{res} 为残余含水率, e_{res} 为残余含水率对应的

表 1 土样的基本物理性质指标
Table 1 Basic physical properties of soil samples

土样类型	G_s	最大干密度	最优含水率	液限	塑限	塑性指数	颗粒粒组/%		
		$\rho_{d\max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w_{opt}/\%$	$w_L/\%$	$w_P/\%$	I_p	砂粒	粉粒	黏粒
粉质砂土	2.71	1.86	16.9	31.5	19.1	12.4	95.3	4.7	—
黏性土	2.73	1.67	25.6	42.0	22.9	19.1	19.0	37.2	43.8
膨胀土	2.69	1.66	24.1	76.0	29.0	47.0	13.0	69.4	17.6

孔隙比, 由于准确获取残余含水率较难, 故可考虑利用缩限 w_s 来替代残余含水率^[1]; α_1 , α_2 , n_1 , n_2 , λ , u 和 v 为模型拟合参数。

为了确定土的缩限, Groenevelt 等^[23]建议以靠近收缩曲线(干燥段)曲率最大的点所对应的含水率为缩限 w_s 。对式(3)分别进行求导, 可得到一阶导函数和二阶导函数:

$$e' = \lambda uv \exp(-uw^{-v}) w^{-(v+1)}, \quad (5)$$

$$e'' = \lambda uv \exp(-uw^{-v}) w^{-(v+2)} [-(v+1) + uvw^{-v}]. \quad (6)$$

基于SSCC的导函数, 可得到曲率方程和残余含水率方程分别为

$$\kappa = \frac{|e''|}{(1+(e')^2)^{3/2}}, \quad (7)$$

$$w_{res} = w_s \approx \text{maximum}(\kappa) \quad (0 \leq w \leq w_{sat}). \quad (8)$$

式中: κ 为曲率; $\text{maximum}()$ 表示最大值函数; w_{sat} 为饱和含水率。

根据缩限定义可知, 曲率最大的点对应的含水率仅仅是接近缩限。对于不同初始干密度的饱和试样, 利用该方法得到的缩限近似值可能是不同的, 从而导致土的缩限值不统一。鉴于缩限是土的内在属性, 为了进一步提高缩限计算的准确性, 从而确保所提的SWCC预测精度, 针对不同初始干密度下土体收缩曲线的曲率最大点对应的不同含水率, 取其平均值作为缩限。为实现利用饱和土常规室内试验预测脱湿路径下SWCC这一目标, 关键在于有效应力参数 χ 的确定。参数 χ 表征吸力对有效应力的贡献, 为了定量的描述 χ , 国内外不少学者通过理论和试验确定了参数 χ 的表达式, 一般可表示为: 与非饱和土强度相关的表达式^[24], 与饱和度相关的表达式^[25-26], 与基质吸力相关的表达式等^[27]。在饱和土常规试验条件下, 为便于简化和应用, 参数 χ 选择与饱和度或基质吸力相关的表达式, 其表达式分别如下所示:

$$\chi = S_e = \frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}}, \quad (9)$$

$$\chi = \begin{cases} 1 & (s/s_\psi \leq 1) \\ (s/s_\psi)^{-\Omega} & (s/s_\psi \geq 1) \end{cases}. \quad (10)$$

式中: S_e 为有效饱和度; s_ψ 为进气值 (kPa); Ω 为模

型参数, 其余同上。根据 Brooks-Corey 模型^[9]可以发现, 式(9), (10)本质上是一致的, 因此本文选择有效饱和度 S_e 作为有效应力参数 χ 。

对于给定的饱和试样, 在初始脱湿过程中, 土的持水能力主要受表面张力(毛细力, 即 $u_a - u_w$)主导; 随着土中毛细水的持续减少, 土的持水能力逐渐由表面张力和界面张力互相独立控制; 随着土中毛细水的进一步消失, 土的持水能力主要受界面张力控制^[28]。在吸湿过程中或当 $S_r < 0.2$ 时, 界面张力对有效应力的贡献最大; 在脱湿过程中, 当 $S_r \geq 0.7$ 时, 界面张力对有效应力的影响可忽略^[29]。为了尽量减少界面张力对非饱和土有效应力的影响, 本文主要研究低吸力范围内脱湿 SWCC 的预测方法。

2 试验方案

为验证上述所提低吸力范围内脱湿路径下 SWCC 预测方法的准确性和适用性, 要求选用的数据范围广泛, 即从粗粒土到细粒土, 表 1 中列出了 3 类土的基本物理力学性质指标。土样经过碾碎、风干并过 2 mm 筛, 根据设定含水率和干密度配置湿土样, 并密封静置至少 24 h, 通过击样法完成三轴试样和环刀试样的制作, 所有压实试样在试验前都经过抽气饱和。

三轴试样(直径 39.1 mm, 高度 80 mm)用于各向等压压缩试验, 而环刀试样分别用于土的收缩试验和土水特性试验, 其中收缩试验的试样直径为 61.8 mm, 高度为 20 mm, 土水特性试验的试样直径为 70 mm, 高度为 19 mm。

所有试样设定的初始含水率 w_0 和初始干密度 ρ_{d0} 见表 2 所示, 每一类土均有 3 组试样, 每组试样的数量为 3 个, 分别进行各向等压压缩、土的收缩和土水特性试验。本次试验共有 9 组, 27 个试样。

表 2 制备试样的初始含水率和干密度

Table 2 Initial water contents and dry densities for sample preparation

土样类型	$w_0/\%$	$\rho_{d0}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
粉质砂土	16.9	1.60, 1.65, 1.70
黏性土	25.6	1.45, 1.65, 1.70
膨胀土	24.0	1.42, 1.50, 1.58

表3 ICC的拟合参数

Table 3 Fitting parameters of isotropic compression curves

粉质砂土					黏性土					膨胀土				
e_{\min}	e_0	α_1	n_1	R^2	e_{\min}	e_0	α_1	n_1	R^2	e_{\min}	e_0	α_1	n_1	R^2
0.50	0.69	19.2	1.63	0.998	0.68	0.88	20.9	1.44	0.997	0.42	0.89	19.9	1.14	0.996
0.45	0.64	19.1	1.35	0.995	0.42	0.76	17.0	1.14	0.994	0.27	0.79	17.9	1.08	0.996
0.41	0.59	73.5	1.62	0.992	0.54	0.66	55.8	1.77	0.992	0.20	0.70	78.2	1.14	0.998

各向等压压缩试验采用 SLB-1 型应力应变控制式饱和三轴仪, 通过施加不同水平的静水围压得到每级围压下饱和试样的排水量和体变, 围压施加的顺序依次为 1→5→10→25→50→100→200→400→800 kPa, 每级围压的平衡条件设为试样排水量变化不大于 0.01 mL/h, 或固结不少于 24 h。

干燥收缩试验过程中应保持室内恒温, 为防止水分蒸发过快, 在非测量时段(如夜间)采用保鲜膜将试样包裹好, 等到测量时段再打开, 利用电子天平和游标卡尺分别测量试样的质量和体积, 进一步计算出试样在当前状态下的质量含水率和孔隙比。

土水特性试验采用 GEO-Experts 压力板仪, 陶土板规格为 5 bar, 通过施加不同水平的气压得到每级气压下试样的排水量和体变, 气压施加的顺序依次为 1→5→25→50→100→200→300→400 kPa, 当量管内 2 h 排水量不超过 0.1 mL 且气压持续时间不少于 24 h, 则认为该级气压达到平衡。

3 试验结果及方法验证

3.1 各向等压压缩试验

图 1 是不同初始干密度下 3 类土的 ICC。由图 1 可知, 在一定静水围压范围内, ICC 随试样初始干密度的增加逐渐下移。当有效应力(静水围压)一定时, 孔隙比随初始干密度的增加而逐渐减小; 当孔隙比一定时, 有效应力随初始干密度的减小不断增大。

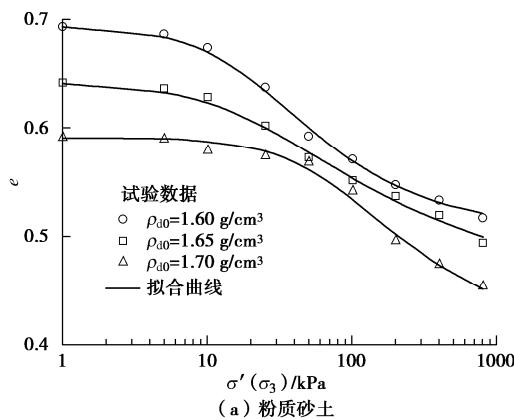


表4 SSCC 的拟合参数

Table 4 Fitting parameters of soil shrinkage characteristic curves

粉质砂土					黏性土					膨胀土				
e_s	λ	u	v	R^2	e_s	λ	u	v	R^2	e_s	λ	u	v	R^2
0.52	30238.2	9.11	0.21	0.998	0.72	0.77	0.29	1.50	0.996	0.56	0.98	0.26	1.29	0.998
0.49	67920.0	10.41	0.16	0.986	0.63	41268.5	9.70	0.21	0.995	0.48	0.60	0.08	1.74	0.999
0.44	160645.7	11.59	0.12	0.992	0.55	4262.4	6.80	0.31	0.999	0.43	2.72	0.97	0.64	0.999

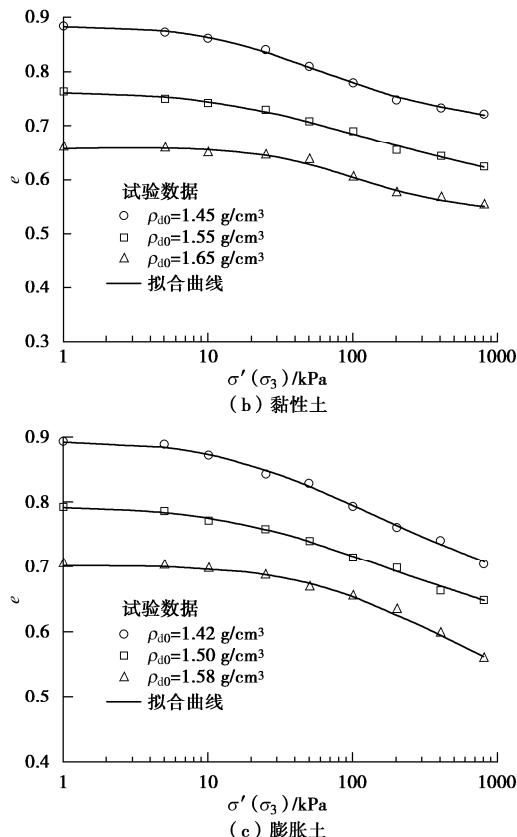


图1 不同初始干密度下土的 ICC

Fig. 1 Isotropic compression curves of soils under different initial dry densities

另外, 基于 VG 模型的式(2)可以很好地拟合 ICC, ICC 模型参数值详见表 3。

3.2 土的收缩试验

图 2 是不同初始干密度下 3 类土的收缩特征曲线, 即 SSCC。由图 2 可见, 在整个含水率(从饱和到干燥状态)范围内, SSCC 随试样初始干密度的增加逐渐上移。当含水率一定时, 孔隙比随初始干密度的增加而不断减小; 当孔隙比一定时, 含水率随初始干密度的增加而逐渐增大。

同样地, 式(3)可以很好地拟合 SSCC, SSCC 模型参数值详见表 4。

表5 不同初始干密度下土样的残余饱和度

Table 5 Residual degrees of saturation of samples under different initial dry densities

残余 饱和度	土的类型								
	粉质砂土			黏性土			膨胀土		
	1.60 g/cm ³	1.65 g/cm ³	1.70 g/cm ³	1.45 g/cm ³	1.55 g/cm ³	1.65 g/cm ³	1.42 g/cm ³	1.50 g/cm ³	1.58 g/cm ³
w_s	0.095	0.056	0.012	0.156	0.129	0.124	0.097	0.094	0.049
w_{res}	0.054	0.054	0.054	0.136	0.136	0.136	0.080	0.080	0.080
S_{res}	0.281	0.293	0.324	0.512	0.578	0.659	0.381	0.445	0.474

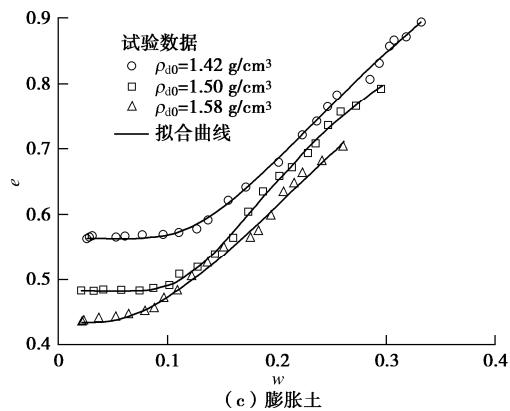
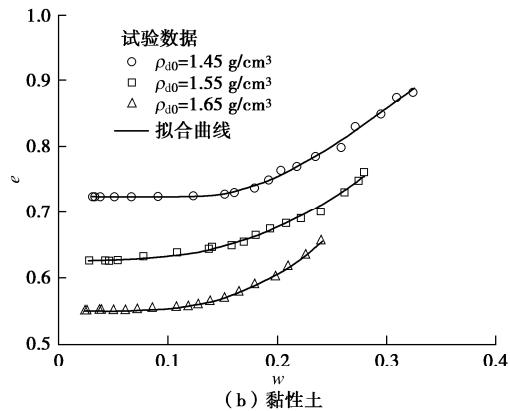
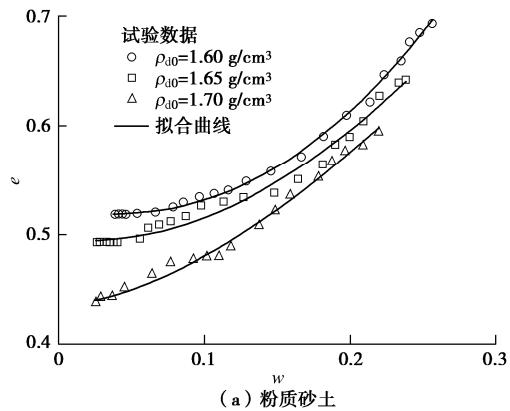


图2 不同初始干密度下土的收缩特征曲线

Fig. 2 Soil shrinkage characteristic curves under different initial dry densities

3.3 所提方法验证

基于上述试验结果, 利用 ICC 曲线和 SSCC 曲线, 可得到 σ_3 - e - w 3 个变量的关系, 进一步可得到 σ_3 - S_r 曲线。利用公式 $\chi = S_e$ 并令 $\sigma_3 = \chi s$, 可得到 s - S_r 的关系 (有限的数据点), 即预测 SWCC。

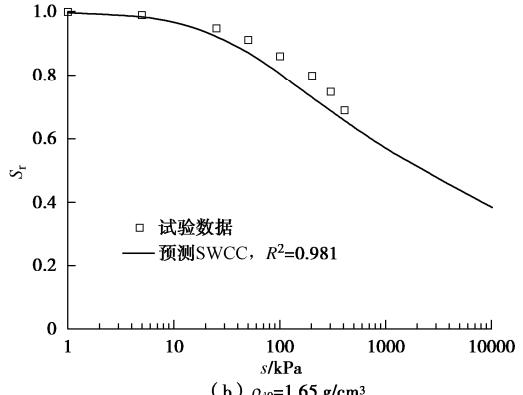
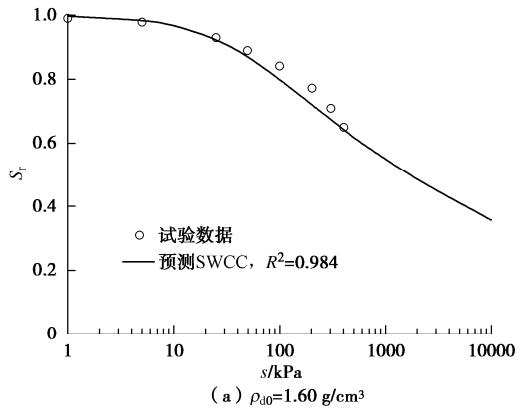
根据 SSCC 的拟合结果 (见表 4), 利用式 (8) 可求出不同初始干密度下土样的 w_s , 结合均值法和式 (3) 可分别求出 w_{res} 和 e_{res} 。

根据饱和度公式, $S_{res} = G_s w_{res} / e_{res}$, 求出 S_e 及 χ , 结合 σ_3 - S_r 曲线, 进一步求出 s - S_r 的关系。不同初始干密度下土样的残余饱和度 S_{res} 见下表 5 所示。

基于上述所求的 s - S_r 关系, 利用式 (4) 进行拟合可得到 VG 模型参数 α_2 和 n_2 。其中, 为方便拟合, S_{res} 均设为 0。预测 SWCC 的 VG 模型参数值列在下表 6 中。为了验证所提预测 SWCC 方法的准确性, 将预测 SWCC 与室内土水特性试验结果进行对比。图 4~6 是不同初始干密度下 3 类土的预测 SWCC。可见, 预测 SWCC 与试验数据具有良好的一致性。

观察上表 5 可知, w_{res} 与 w_s 相差并不大, 如果将式 (8) 求出的含水率直接看作是残余含水率也能得到较好的预测结果, 这一点已通过计算论证。

- (1) 粉质砂土的预测效果;
- (2) 黏性土的预测效果;
- (3) 膨胀土的预测效果。



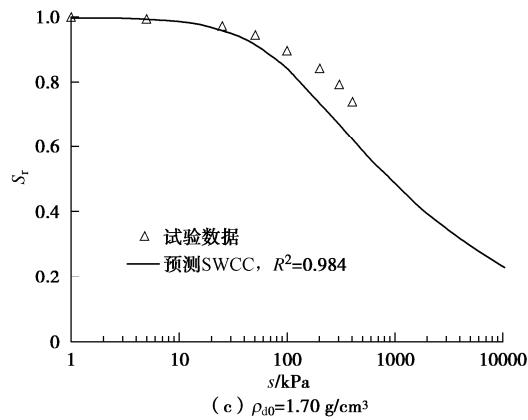


图 3 不同干密度下粉质砂土的预测 SWCC
Fig. 3 Predicted SWCCs of silty sand under different dry densities

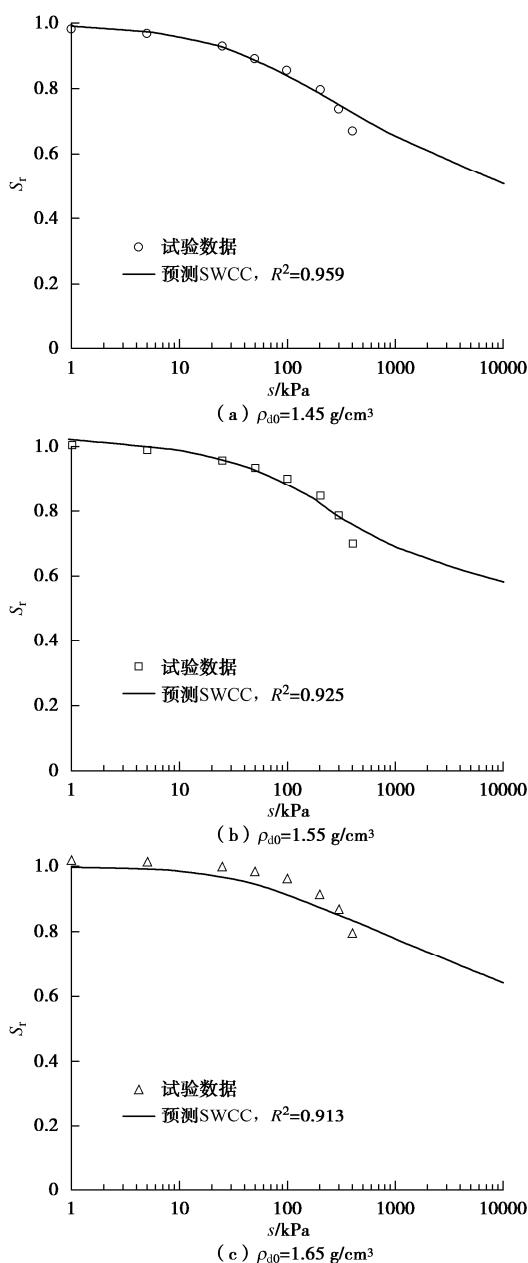


图 4 不同干密度下黏性土的预测 SWCC
Fig. 4 Predicted SWCCs of clay under different dry densities

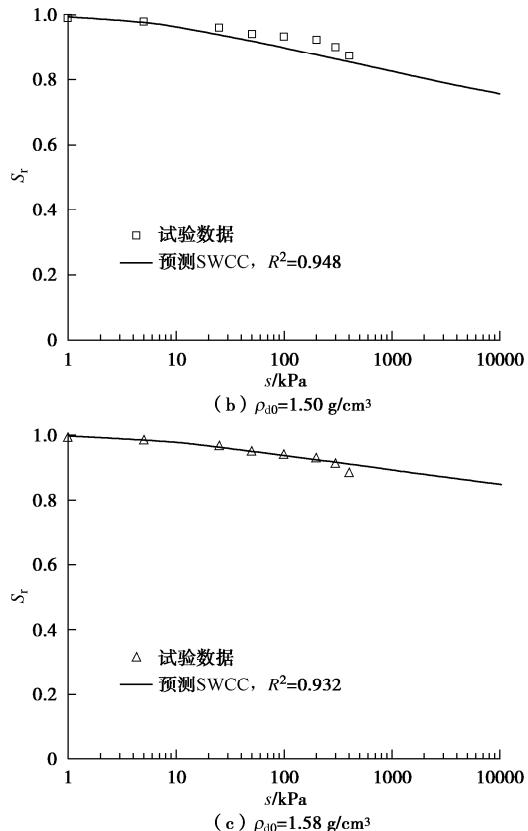
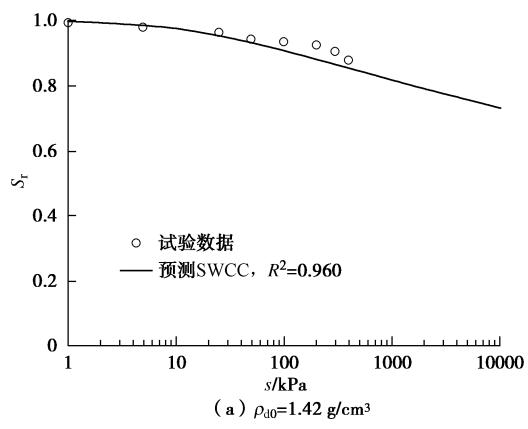


图 5 不同干密度下膨胀土的预测 SWCC

Fig. 5 Predicted SWCCs of expansive soil under different dry densities

4 结 论

通过开展室内常规各向等压压缩试验，确定饱和试样有效应力与变形的关系。同样，压力板试验可确定非饱和试样有效应力与变形的关系。基于这两个试验结果，可建立有效应力-基质吸力-变形三者的联系。结合室内收缩试验确定的干燥收缩曲线，可得到基质吸力与饱和度的关系，即脱湿路径下的 SWCC。主要得到以下 3 点结论。

(1) 对于给定的土体，若施加的有效应力相同，则土样的变形（孔隙比）一致，与施加力的形式（外

表 6 预测 SWCC 的拟合参数
Table 6 Fitting parameters of predicting SWCCs

粉质砂土				黏性土				膨胀土			
$\rho_{d0}/(g\cdot cm^{-3})$	α_2	n_2	R^2	$\rho_{d0}/(g\cdot cm^{-3})$	α_2	n_2	R^2	$\rho_{d0}/(g\cdot cm^{-3})$	α_2	n_2	R^2
1.60	38.5	1.19	0.998	1.45	24.6	1.11	0.999	1.42	15.2	1.05	0.996
1.65	34.8	1.17	0.997	1.55	31.1	1.09	0.979	1.50	6.48	1.03	0.996
1.70	100.6	1.32	0.995	1.65	50.7	1.08	0.973	1.58	6.07	1.02	0.984

力或内力)无关。在此基础上, 利用非饱和土有效应力原理建立各向等压压缩试验与压力板试验中有效应力与变形的统一关系。

(2) 针对不同初始干密度下土的收缩特征曲线, 利用曲率公式并结合所提均值法, 可定量获得残余含水率, 进而确定残余饱和度和 Bishop 有效应力参数。

(3) 利用所提方法预测的低吸力范围 SWCC 与试验数据具有良好的一致性, 从而能够满足工程设计对便捷获取非饱和水力参数的迫切需求。

参考文献:

- [1] 龚壁卫, 李青云, 文松霖. 非饱和土力学理论在南水北调工程中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2008, **6**(1): 143-147. (GONG Biwei, LI Qingyun, WEN Songlin. Mechanics for unsaturated soils and its application in the south-to-north water transfer project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, **6**(1): 143-147. (in Chinese))
- [2] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 1-15. (BAO Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 1-15. (in Chinese))
- [3] 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 Weixian. The measuring techniques of unsaturated-soil suction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(S1): 905-909. (in Chinese))
- [4] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Géotechnique, 1999, **49**(2): 143-159.
- [5] 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. (LIU Xiao-wen, YE Yun-xue. Experimental study of the soil-water characteristic curve of unsaturated laterite under different affecting factors[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, **42**(2): 97-104. (in Chinese))
- [6] 孙德安, 高游. 不同制样方法非饱和土的持水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(1): 91-97. (SUN Dean, GAO You. Water retention behaviour of soils with different preparations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 91-97. (in Chinese))
- [7] THYAGARAJ T, RAO S M. Influence of osmotic suction on the soil-water characteristic curves of compacted expansive clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(12): 1695-1702.
- [8] 王协群, 邹维列, 骆以道, 等. 考虑压实度时的土水特征曲线和温度对吸力的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 368-372. (WANG Xiequn, ZOU Weilei, LUO Yidao, et al. SWCCs and influence of temperature on matrix suction under different compaction degrees[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 368-372. (in Chinese))
- [9] BROOKS R H. Hydraulic Properties of Porous Media[M]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [10] 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.
- [11] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521-532.
- [12] YE Y X, ZOU W L, HAN Z, et al. Predicting the entire soil-water characteristic curve using measurements within low suction range[J]. Journal of Mountain Science, 2019, **16**(5): 1198-1214.
- [13] WEBB S W. A simple extension of two-phase characteristic curves to include the dry region[J]. Water Resources Research, 2000, **36**(6): 1425-1430.
- [14] ZHOU A N, SHENG D, CARTER J P. Modelling the effect of initial density on soil-water characteristic curves[J]. Géotechnique, 2012, **62**(8): 669-680.
- [15] LU N, KAYA M. A drying cake method for measuring suction-stress characteristic curve, soil-water-retention curve, and hydraulic conductivity function[J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, **37**(4): 440-448.

- Journal, 2013, **36**(1): 20120097.
- [16] CORNELIS W M, CORLUY J, MEDINA H, et al. Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve[J]. *Geoderma*, 2006, **137**(1/2): 179-191.
- [17] 叶云雪, 邹维列, 韩仲, 等. 非饱和土孔隙比与基质吸力关系的通用模型[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(5): 927-933. (YE Yunxue, ZOU Weilie, HAN Zhong, et al. General model for relationship between void ratio and matric suction in unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(5): 927-933. (in Chinese))
- [18] BOIVIN P, GARNIER P, VAUCLIN M. Modeling the soil shrinkage and water retention curves with the same equations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(4): 1082-1093.
- [19] BAUMGARTL T, KÖCK B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**(1): 57-65.
- [20] 谢定义, 冯志焱. 对非饱和土有效应力研究中若干基本观点的思辨[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 170-173. (XIE Dingyi, FENG Zhiyan. Consideration of some fundamental viewpoints in studying effective stress of unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(2): 170-173. (in Chinese))
- [21] 邹维列, 王协群, 罗方德, 等. 等应力和等孔隙比状态下的土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(9): 1711-1717. (ZOU Weilie, WANG Xiequn, LUO Fangde, et al. Experimental study on SWCCs under equal stress and equal void ratio states[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(9): 1711-1717. (in Chinese))
- [22] BISHOP A W. The principle of effective stress[J]. *Teknisk Ukeblad*, 1959, **106**(39): 859-863.
- [23] GROENEVELT P H, GRANT C D. Analysis of soil shrinkage data[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, **79**(1): 71-77.
- [24] 邢义川, 谢定义, 李振. 非饱和土的应力传递机理与有效应力原理[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 53-57. (XING Yichuan, XIE Dingyi, LI Zhen. Stress transmission mechanism and effective stress principle of unsaturated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(1): 53-57. (in Chinese))
- [25] COUSSY O, PEREIRA J M, VAUNAT J. Revisiting the thermodynamics of hardening plasticity for unsaturated soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2010, **37**(1/2): 207-215.
- [26] NOWAMOOZ H, JAHANGIR E, MASROURI F, et al. Effective stress in swelling soils during wetting drying cycles[J]. *Engineering Geology*, 2016, **210**: 33-44.
- [27] KHALILI N, ZARGARBASHI S. Influence of hydraulic hysteresis on effective stress in unsaturated soils[J]. *Géotechnique*, 2010, **60**(9): 729-734.
- [28] LU N. Generalized soil water retention equation for adsorption and capillarity[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, **142**(10): 04016051.
- [29] LIKOS W J. Effective stress in unsaturated soil: accounting for surface tension and interfacial area[J]. *Vadose Zone Journal*, 2014, **13**(5): 1-12.