

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.02.15

不同影响因素下非饱和红土土-水特征曲线的试验研究

刘小文, 叶云雪

(南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 以江西典型的红土为研究对象, 利用 GEO-Experts 压力板仪进行不同影响因素下红土的土-水特征曲线试验研究。研究内容包括不同粒径、不同干密度、不同含水率、不同预固结压力、脱湿和吸湿循环以及反复脱湿和吸湿循环对土-水特征曲线的影响; 通过三种常用的 SWCC 模型 (Brooks 和 Corey 模型、van Genuchten 模型及 Fredlund 和 Xing 模型) 对试验数据进行拟合和分析, 找出适合江西典型红土的土-水特征曲线方程, 并提出了模型中参数的取值范围; 本文还提出了土-水特征曲线的双曲线模型, 该模型对计算残余含水率非常方便, 参数变化范围小, 容易选取。

关键词: 非饱和红土; 土-水特征曲线; 影响因素

中图分类号: TU411.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2015)02-0097-08

Experimental study of the soil-water characteristic curve of unsaturated laterite under different affecting factors

LIU Xiaowen, YE Yunxue

(School of Architectural Engineering, Nanchang University, Jiangxi, Nanchang 330031, China)

Abstract: The soil-water characteristic curve of the typical laterite in Jiangxi is tested with the GEO-Experts pressure plate apparatus under different affecting factors. The influence of different particle sizes, dry densities, water contents, pre-consolidation pressures, moisture and moisture absorption cycle, repeated moisture and moisture absorption cycle on soil-water characteristic curve is examined. The suitable soil-water characteristic curve equation for the Jiangxi typic laterite can be obtained with the experimental data fitted by three kinds of commonly used SWCC model (Brooks and Corey model, van Genuchten model and Fredlund and Xing model). The scope of model parameters of soil-water characteristic curve is put forward. Finally, this paper puts forward a hyperbolic curve model of SWCC. It is very convenient to calculate the residual moisture content, and the parameter variation range for this model is small and easy to select. The results are used as reference for engineering practice.

Keywords: unsaturated laterite; soil-water characteristic curve; influencing factor

在工程中, 大多数的岩土工程问题完全或部分属于非饱和土的范畴。因此, 研究红土的非饱和特性具有重要的理论和实际意义。研究非饱和土特性的首要问题是掌握不同影响因素下土-水特征曲线 (SWCC) 的变化规律。土-水特征曲线 (SWCC) 描述了含水率和基质吸力之间的关系, 含水率可以用饱和度 S_w 、重

力含水率 ω 和体积含水率 θ 表示。

影响土-水特征曲线的因素可分为内部因素和外部因素, 内部因素主要有土的矿物成分、孔隙结构、土的粒径和级配及初始含水率等, 外部因素主要有土的应力历史、应力状态和温度等。很多学者通过大量的试验, 建立了各种不同的土-水特征曲线模型。

收稿日期: 2014-07-14; 修订日期: 2014-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51268046; 51468041)

第一作者: 刘小文 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事特殊土工程性质、边坡稳定等研究。E-mail: 112164163@qq.com

Vanapalli 等^[1]研究了砂质黏性冰渍土在不同初始含水率下的土-水特征曲线;宋亚亚等^[2]分析了非饱和重塑黏土试样在不同竖向压力和固结压力下的土-水特征曲线;Charles 等^[3]研究了应力历史对土-水特征曲线的影响;吕海波等^[4]对南宁地区原状膨胀土进行了干湿循环土-水特征曲线试验的研究;张俊然等^[5]利用已有的试验数据提出了能预测反复干湿循环后土-水特征曲线的方法。

土-水特征曲线的测量不仅需要专门的仪器,而且需要花费大量的时间,从而导致土-水特征曲线在工程应用中并不方便,因此很多学者提出了 SWCC 模型,但这些模型都具有各自的适用范围,为了找到合适的 SWCC 模型,还需要通过试验进一步验证。

本文针对江西典型非饱和重塑红土开展土-水特征曲线试验,详细研究了含水率、干密度、固结压力和粒组等因素以及脱湿和吸湿循环和反复脱湿和吸湿循环对红土土-水特性的影响,采用常用的三种模型,即 Brooks 和 Corey 模型(1964)^[6,10]、van Genuchten 模型(1980)^[7,11]、以及 Fredlund 和 Xing 模型(1994)^[8,12]对试验数据进行拟合,分析了各种因素对土-水特征曲线模型参数的影响,提出了土-水特征曲线的双曲线模型,该模型可以方便地测得试样的残余含水率。

1 土-水特征曲线模型

土-水特性曲线常用的三种模型为 Brooks 和 Corey 模型、van Genuchten 模型、以及 Fredlund 和 Xing 模型。

Brooks 和 Corey (1964) 模型(简化为 B-C 模型)表达式如下:

$$\theta = \begin{cases} \theta_s \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ, θ_s ——体积含水率和饱和体积含水率;

θ_r ——残余体积含水率;

ψ ——吸力/kPa;

ψ_b ——进气压力值/kPa;

λ ——土的孔径分布指数。

此模型一般适用于粗粒土,该类土在吸力变化较小的条件下即可排出孔隙水。当含水率趋近于残余含水率状态时,相应的吸力很大,此时模型就不再适用。

van Genuchten (1980) 模型(简化为 VG 模型)表达式如下:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right]^m \quad (2)$$

式中: a, m, n ——拟合参数;

其余参数说明同上。

a 与土的进气状态有关,其单位为 kPa^{-1} , 等于进气压力值的倒数。参数 n 与土中孔径分布有关,参数 m 与土体特征曲线的整体对称性有关,常与参数 n 具有下列关系:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3)$$

Fredlund 和 Xing 模型(1994) (简化为 F-X 模型)根据孔径分布提出,与 VG 模型相类似:

$$\theta = C(\psi) \theta_s \left[\frac{1}{\ln[e + (\psi/a)^b]} \right]^c \quad (4)$$

式中: $C(\psi)$ ——修正系数,一般取 1。

a ——与进气压力值有关的参数/kPa;

b ——基质吸力大于进气值之后与土体脱水速率有关的土参数;

c ——与残余含水率有关的参数。

2 试验仪器和试验方案

2.1 试验仪器

试验仪器为 GEO-Experts 土水特征曲线压力板仪(图 1),主要用于应力相关的土水特征曲线及其滞后现象的研究。其工作原理为在不锈钢试样室内施加不高于进气值的气压,作用于土内的气压力使孔隙水通过高进气值陶土板排入量管内,逐级增加容器内的气压 u_a ,量管中的水会不断增加,卸压则会减少;待到基质吸力 $(u_a - u_w)$ 平衡时,孔隙水压力 $u_w = 0$,即气压 u_a 就等于基质吸力,并记录 u_a 值及含水率变化。计算出初始饱和和重力含水率,利用从试验开始到每级基质吸力平衡时量管体积的变化量反算每级基质吸力下试样的重力含水率。据此绘出土-水特征曲线。

2.2 试验方案

本试验土样取自南昌高新区瑶湖森林公园路基土,二氧化硅、铝、铁等含量较高,具有网纹层结构,属粉质黏土。试样的颗粒组成见表 1。

表 1 试样的颗粒组成

Table 1 Grain component of the soil sample

小于某粒径土的质量百分含量/%				
2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.074 mm
100	87.9	67.8	20.1	5.4

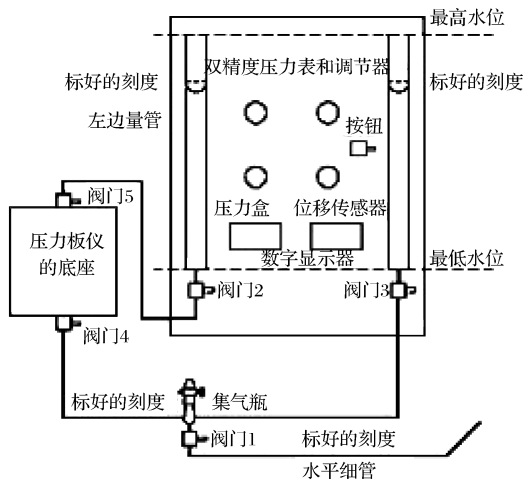


图 1 GEO-Experts 压力板仪的示意简图

Fig. 1 Schematic diagram of the GEO - Experts pressure plate apparatus

试验采用重塑样,环刀直径 70 mm,高度 19 mm,将土样烘干、击碎,过 2 mm 孔径筛,清除土样中的杂质。将制备好的试样抽气饱和。液限为 32.1%,塑限为 20.6%,比重为 2.75。为了分析含水率、干密度、固结压力和粒组等因素以及脱湿和吸湿循环和反复脱湿和吸湿循环对红土土-水特性的影响,制定如下试验方案:

(1) 不同含水率

按干密度为 $\rho_d = 1.69 \text{ g/cm}^3$ (压实度为 0.90) 制样,初始含水率选取在最优含水率 ($\omega_{op} = 15\%$) 附近,即 $\omega = 14.2\%$ 、 14.9% 、 16.2% 、 17.4% 、 18.8% 。

(2) 不同干密度

试样的初始含水率选取为最优含水率,即 $\omega_{op} = 15\%$,干密度按照压实度为 0.92、0.95、0.98 选取,即 $\rho_d = 1.73 \text{ g/cm}^3$ 、 1.79 g/cm^3 、 1.85 g/cm^3 。

(3) 不同固结压力

试样在不同压力下进行固结时,试样中孔隙的大小将会不同,高压下试样容易被压密,进而使孔隙变小,影响水在土中的运移规律。为了研究红土在不同固结压力下,土-水特性的变化规律。按 $\omega = 15\%$, $\rho_d = 1.79 \text{ g/cm}^3$ 制样,固结压力分别为:50 kPa、100 kPa、200 kPa。

(4) 不同粒组

将土样分别过 2 mm、1 mm、0.5 mm 的筛,按 $\omega = 15\%$, $\rho_d = 1.78 \text{ g/cm}^3$ 制样。不同粒组反映出试样中孔隙结构的不同,进而影响水在土中的运移规律。

(5) 不同固结压力下饱和样脱湿和吸湿循环在实际环境中,脱湿和吸湿是密不可分的,为了研

究红土在脱湿和吸湿循环下的土-水运移规律,按 $\omega = 15\%$, $\rho_d = 1.79 \text{ g/cm}^3$ 制样,土体在吸湿和脱湿过程中土-水特征曲线并不会重合,反而会形成一个滞回圈。

(6) 饱和样反复脱湿和吸湿循环

在大气或湿度条件变化时,土体处于反复的脱湿和吸湿过程的实际工程环境中。因此,有必要研究红土在反复脱湿和吸湿循环下的土水运移规律。按 $\omega = 15\%$, $\rho_d = 1.79 \text{ g/cm}^3$ 制样,分 3 次循环,固结压力为 200 kPa。

3 试验结果及分析

3.1 初始含水率

试验结果如图 2 所示。在干密度相同的条件下,初始含水率越大,试样的进气压力值越小,越容易排水,这和尹盼盼等^[13]研究结论类似。分别用 B-C 模型、VG 参数模型和 F-X 参数模型拟合(表 2),从拟合结果可知, F-X 模型可以较好地拟合土-水特征曲线,因为 B-C 模型中 ψ_b 为进气压力值,在非饱和土样中进气压力值不可能为 0。同理, VG 模型中的进气压力值的倒数 α 也不可能为 0,因此 B-C 模型和 VG 模型不适合不同初始含水率下的非饱和和红土。这也证实了 B-C 模型和 VG 模型在土样含水率很小且相应的吸力很大时就不再适用。

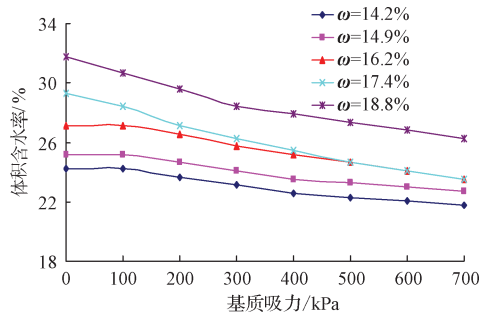


图 2 不同含水率下土水特征曲线

Fig. 2 SWCC under different water contents

由表 2 可知,在不同干密度下,3 种模型都可以很好地拟合红土的土-水特征曲线,说明 3 种模型对不同干密度的红土具有很强的适用性。

3.2 不同干密度

试验结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,干密度越小,试样的进气压力值就越小,因此干密度小的试样较容易排水。这是由于干密度决定了土体结构的紧密性,干密度越大,土体孔隙结构就越紧凑,对水分的束缚能力也就越强,在相同的吸力范围内,干密度大的土体较难失水。

表2 不同影响因素下土-水特征曲线拟合参数
Table 2 SWCC fitting parameters under different affecting factors

试样状态	曲线拟合参数									
	B-C 模型			VG 模型			F-X 模型			
	λ	ψ_b	α/kPa^{-1}	n	m	a	b	c	θ_s	
不同含水量 $\omega/\%$	14.2	-0.067	0	0	0.033	111.7	193.88	2.98	0.08	0.243
	14.9	-0.071	0	0	0.034	136.7	193.64	2.99	0.075	0.252
	16.2	-0.107	0	0	0.051	673.9	288.45	2.2	0.17	0.272
	17.4	-0.187	0	0	0.087	1056.7	237.24	1.38	0.32	0.293
	18.8	-0.225	0	0	0.106	584.9	194.2	1.26	0.26	0.318
不同干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.73	0.395	0.258	1.368	8.76	0.08	4.668	0.282	13.79	16.41
	1.79	0.394	0.260	0.772	8.59	0.108	7.712	0.109	10.28	5.99
	1.85	0.38	0.251	0.507	7.89	0.117	8.017	0.066	9.51	3.51
不同固结压力 P/kPa	50	0.404	0.236	10.19	1.184	0.085	2.434	0.537	12.8	21.93
	100	0.404	0.248	11.07	1.19	0.057	2.036	0.761	12.96	16.65
	200	0.405	0.258	11.23	1.212	0.042	1.955	0.986	13.18	18.88
不同粒径 d/mm	<2	0.401	0.241	12.71	1.277	0.071	5.945	0.249	13.64	10.88
	<1	0.413	0.258	12.89	1.151	0.069	5.877	0.232	13.94	8.54
	<0.5	0.4	0.26	12.86	1.334	0.063	4.837	0.367	13.72	12.66
不同固结 压力下吸湿 /kPa	50	0.337	0.223	0.809	0.19	0.771	1.36	0.199	1.319	1.148
	100	0.339	0.235	0.345	0.256	0.127	1.09	0.608	2.749	1.898
	200	0.35	0.245	0.309	1.677	0.153	0.914	0.704	1.944	1.499

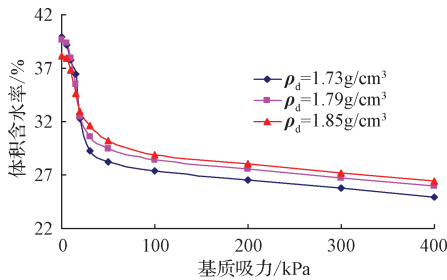


图3 不同干密度下土水特征曲线

Fig.3 SWCC under different dry densities

3.3 不同固结压力

从图4中可以看出,随着基质吸力逐渐增大,土体含水率和饱和度在迅速减小,吸力超过25 kPa以后,含水率和饱和度的减小逐渐趋于缓和;在吸力一定的条件下,固结压力越大,土体进气压力值越大,相应含水率和饱和度也越大,这和 Vanapalli^[9,14] 研究结论相同。这是因为土样在较高竖向压力作用下土颗粒发生错位、移动,重新排列使土体被进一步压缩,孔隙结构变得致密,排水较困难。由表2可知,不同固结压力下,3种模型都可以很好地拟合红土的土-水特征曲线。

3.4 不同粒径

从图5中可以看出,粒径小于2 mm的土样,进气值较低,排水较早;粒径小于0.5 mm的土样进气值较高,排水较晚。这是由于粒径小于0.5 mm土样中的

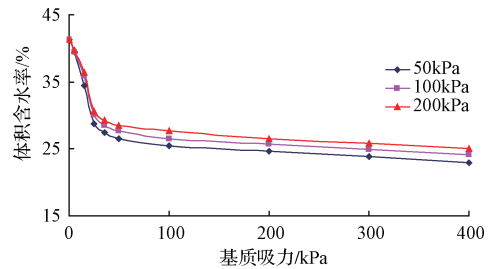


图4 不同固结压力下土水特征曲线

Fig.4 SWCC under different consolidation pressures

细颗粒含量较多,比表面积大,对水分子的吸附交换能力强,从而使进气压力值较高。在干密度相同的条件下,粒径小于2 mm的土样与粒径小于1 mm的土样饱和和含水率相近,而粒径小于1 mm的土样饱和和含水率较低,这是因为在制样过程中,粒径影响了试样的密实度,粒径小的土样结构密实度较大,因此饱和含水率较低。由表2可知,不同粒径土样,3种模型都可以很好地拟合土-水特征曲线。

3.5 脱湿和吸湿循环

试验结果如图6所示。从图6中可以看出,相同的基质吸力下,固结压力越大,土体的饱和度越大,同时土体进气压力值越大;相同的含水率下,固结压力越大,土体的基质吸力越大;土样在脱湿和吸湿的过程中产生滞回圈,固结压力越大,土体的滞回圈越小,对应的饱和度越高。另外,在相同的固结压力下,吸湿曲线

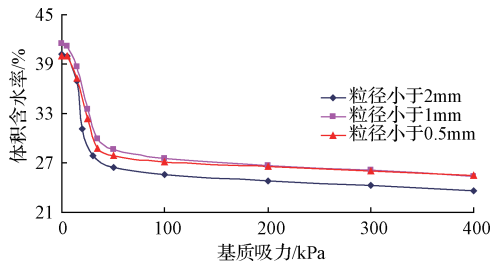


图 5 不同粒径下土水特征曲线

Fig. 5 SWCC under different particle sizes

和脱湿曲线在吸力为 0 的点并不重合。从表 2 中可以发现 3 种模型对红土的吸湿曲线具有较强的适用性。

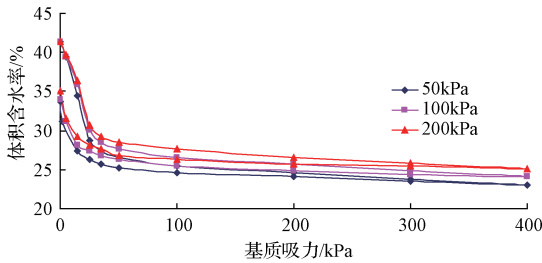


图 6 不同固结压力下脱吸湿循环土水特征曲线

Fig. 6 SWCC during drying and wetting cycles under different consolidation pressures

3.6 反复脱湿和吸湿循环

试验结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,红土在第一次脱湿和吸湿循环中的滞后现象比较明显,经过第二次循环之后,滞回圈明显变小,滞后现象减弱。这是因为墨水瓶效应等原因依然存在,使得每次循环中,脱湿含水率大于吸湿含水率,而下次循环是在上次循环吸湿的基础上,再进行脱湿,因此滞回圈变小。随着循环次数增加滞回圈大小变化不大,说明土中孔隙结构趋于稳定,形成了一定的孔隙通道,墨水瓶效应等因素对土样吸排水的影响越来越弱。

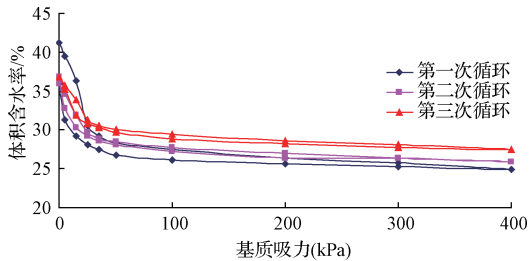


图 7 反复脱吸湿循环下土水特征曲线

Fig. 7 SWCC under repeatedly drying and wetting cycles

在同样的基质吸力范围内,重塑饱和红土随着脱湿和吸湿循环次数的增加,脱湿曲线斜率逐渐减小,而吸湿曲线斜率则变化不大,趋于常数;在反复脱湿和吸

湿循环中,基质吸力一定的条件下,含水率随着循环次数的增加而变大,相应的饱和度也变大。

3.7 非饱和红土土水特征曲线参数取值

江西红土不同影响因素下 3 种模型的取值范围见表 3。

表 3 不同影响因素下模型参数取值范围

Table 3 Three kinds of model parameter values range under different affecting factors

B-C 模型		VG 模型			F-X 模型		
λ	ψ_b	α	n	m	a	b	c
0.3 ~ 13	0.1 ~ 9	0.01 ~ 1	0.1 ~ 9	0.01 ~ 1	1 ~ 14	1 ~ 22	0.1 ~ 0.2

B-C 模型中,参数 λ 随着干密度的增大而减小,随着固结压力的增大而增大,随着粒径范围的增大基本不变,参数 ψ_b 随着干密度、固结压力和粒径范围的增大基本不变。

VG 模型中,参数 α 随着干密度和粒径范围的增大而增大,随着固结压力的增大而减小;参数 n 随着干密度和粒径范围的增大而增加,随着固结压力的增大而减小;参数 m 随着干密度和粒径范围的增大而减小,随着固结压力的增大而增加。

F-X 模型中,参数 a 随着干密度的增大而减小,随着固结压力的增大而增大,随着粒径范围的增大基本保持不变;参数 b 随着干密度、固结压力和粒径范围的增大而减小;参数 c 随着干密度和固结压力的增大而减小,随着粒径范围的增大而增大。

由表 3 也可看出,不管是哪个模型,参数取值范围较大,在实际工程中不容易选取。

4 土-水特征曲线的双曲线模型

根据土-水特征曲线的实测数据,笔者发现 $(u_a - u_w) / \omega = a(u_a - u_w) + b$ 近似成线性关系。但 $a \neq 0$ 且 $b \neq 0$ 是该线性方程的约束条件,也就是说,超过一定的吸力范围就可以用双曲线拟合江西红土的土-水特征曲线,即 $\omega = \frac{(u_a - u_w)}{a(u_a - u_w) + b}$ 曲线。其中 a 、 b 为试验参数。

当吸力趋于无穷大时, $\omega = 1/a$, 此时的含水率为残余含水率 ω_r 。利用软件进行拟合得出 a 、 b 。

4.1 不同影响因素下的双曲线模型

将试验成果整理后进行拟合,结果如图 8 和表 4 所示。其中 φ_r 为残余体积含水率,且 $\varphi_r = \rho_a \cdot \omega_r$; Δ 为偏差的绝对值,且 $\Delta = |\theta_r - \varphi_r|$ 。

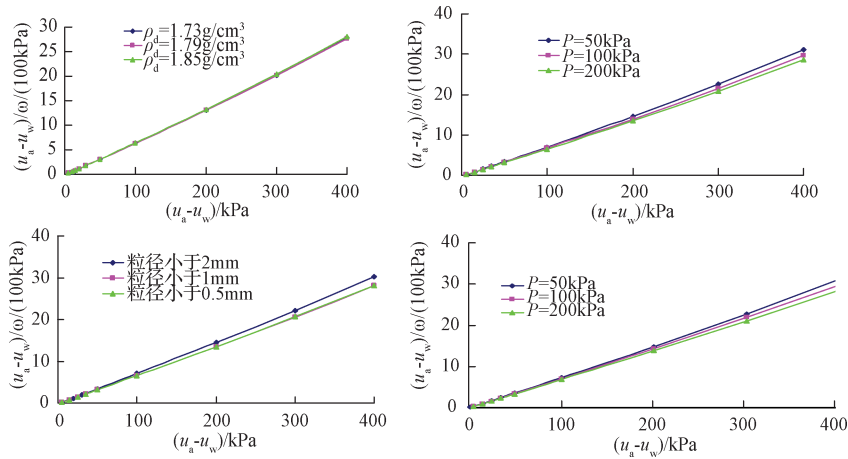


图8 不同试验条件下 $(u_a - u_w)/\omega \sim (u_a - u_w) + b$ 的关系

Fig. 8 $(u_a - u_w)/\omega \sim (u_a - u_w) + b$ curve of different experiment conditions

表4 不同影响因素下红土的拟合参数

Table 4 Fitting parameters of the saturated clay under different influencing factors

试样状态	$a/\%$	b	$\omega_r/\%$	$\varphi_r/\%$	$\theta_r/\%$	$\Delta/\%$
$\rho_d = 1.73 \text{ g/cm}^3$	6.931	-0.362	14.43	25.8	25	0.8
$\rho_d = 1.79 \text{ g/cm}^3$	6.896	-0.342	14.5	26.0	26	0
$\rho_d = 1.85 \text{ g/cm}^3$	6.986	-0.34	14.31	25.1	26.5	1.4
$P = 50 \text{ kPa}$	7.763	-0.485	12.88	23.6	23.1	0.5
$P = 100 \text{ kPa}$	7.412	-0.448	13.49	24.7	24.1	0.6
$P = 200 \text{ kPa}$	7.13	-0.408	14.03	25.7	25.1	0.6
$d < 2 \text{ mm}$	7.627	-0.547	13.11	24.1	23.5	0.6
$d < 1 \text{ mm}$	7.06	-0.416	14.16	25.8	25.3	0.5
$d < 0.5 \text{ mm}$	7.039	-0.341	14.21	26	25.4	0.6
吸湿 ($P = 50 \text{ kPa}$)	7.754	-0.293	12.9	22.3	23.1	0.8
吸湿 ($P = 100 \text{ kPa}$)	7.438	-0.264	13.44	23.5	24.1	0.6
吸湿 ($P = 200 \text{ kPa}$)	7.14	-0.222	14.01	24.5	25.1	0.6

表5 试验数据(取自文献[15])

Table 5 Experiment data (from reference [15])

S/kPa	$\omega/\%$	$(S/\omega)/100 \text{ kPa}$
60	15.38	3.901
100	13.86	7.215
150	13.34	11.244
250	11.82	21.151
350	11.31	30.946
500	11.09	45.086

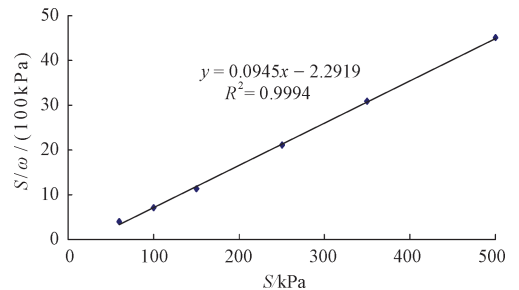


图9 $S/\omega-S$ 的关系

Fig. 9 Relationship of $S/\omega-S$

由表4可知,通过对3种模型得出的 θ_r 和双曲线模型得出的 φ_r 进行对比,发现两者相接近,说明利用该模型可以较方便的得到残余体积含水率。在不同的影响因素下,针对江西饱和红土笔者建议参数 a 的取值范围在0.06~0.08,参数 b 的取值范围在-0.6~-0.2。 a 和 b 参数变化范围相对常用的3个模型中参数要小,很容易选取,具有较大的实用性。

4.2 双曲线模型的适用性

为了研究双曲线模型对其它土样的适用性,现利用双曲线模型对申春妮^[10,15]等人使用粉质壤土所得的土水试验数据进行拟合,试验数据如表5和图9所示,其中 S 为基质吸力, ω 为重力含水率。

由图9可以看出, $S/\omega-S$ 的拟合近似直线,符合 $S/\omega = a \cdot S + b$ 的关系,且 $a = 0.0945$, $b = -2.292$,这说明该土水特征曲线的残余含水率 $\omega_r = 10.58\%$,同时也证实了双曲线模型具有较好的适用性。

另外,双曲线模型在非饱和试样中也具有较高的适用性,由表2可知 F-X 模型虽然能较好地拟合含水率较低且吸力值较大的非饱和试样,但无法得到残余体积含水率,而利用双曲线模型则可以方便地得到,结果如图10和表6所示。

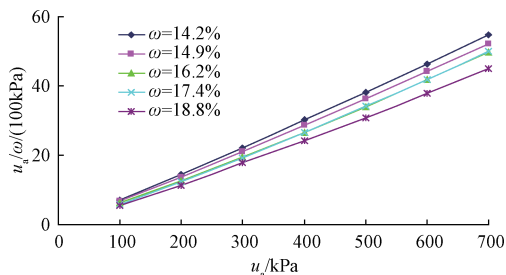
图 10 不同含水率下 $u_a/\omega \sim u_a$ 的关系Fig. 10 Relationship of $u_a/\omega \sim u_a$ under different water contents

表 6 不同含水率下的拟合参数

Table 6 Fitting parameters under different water content

$\omega/\%$	$a/\%$	b	$\omega_s/\%$
14.2	7.967	-1.472	12.56
14.9	7.583	-1.348	13.19
16.2	7.277	-1.873	13.74
17.4	7.371	-2.319	13.57
18.8	6.589	-1.667	15.18

由图 10 可知,双曲线模型对非饱和红土具有较高的拟合精度。从表 6 中可以看出,非饱和红土试样的残余含水率随初始含水率的增大而增加,非饱和红土中参数 a 的取值范围在 0.06 ~ 0.08,参数 b 的取值范围在 -1 ~ -3,对比饱和红土参数 a 的取值范围一致,而参数 b 差别较大,因此笔者大胆猜测参数 b 与土样的饱和度有关。

5 结论

(1) 不同因素下重塑红土土-水特征曲线试验结果表明,干密度相同,初始含水率越大,越容易排水;吸力相同,固结压力越大,土体饱和度也越大;随着脱吸湿循环次数的增加,脱湿曲线的斜率逐渐减小,而吸湿曲线的斜率则变化不大;吸力一定,含水率随着循环次数的增加而变大。

(2) 在低含水率和高吸力范围内,F-X 模型对江西典型红土具有很高的拟合精度。在不同干密度、颗粒粒径和固结压力下,3 种模型的拟合曲线可以很好的接近试验数据;试样残余含水率随初始含水率的增大而增加,随着固结压力、循环次数的增大以及粒径范围的增大而减小。

(3) 提出利用双曲线模型模拟土-水特征曲线的新观点,利用该模型可以较方便地得到残余体积含水率。

(4) 在不同影响因素下,江西饱和红土双曲线模型中参数 a 的取值在 0.06 ~ 0.08 之间,参数 b 的取值在 -0.6 ~ -0.2 之间,相比较其它模型,该模型参数

的取值范围波动小,取值方便,具有明显的优越性。双曲线模型对其它土样也有较高的适用性。

参考文献:

- [1] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. Relationship between soil-water characteristic curves and the as-compacted water content versus soil for a clay till [C]//Proceedings of XI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Brazil: I guanzu Falls, 1999: 991 - 998.
- [2] 宋亚亚,卢廷浩,季李通. 应力作用下非饱和土土-水特征曲线研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(6): 147 - 150. [SONG Y Y, LU T H, JI L T. Research on Soil-water Characteristic Curve of Unsaturated Soil under Stress State [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(6): 147 - 150. (in Chinese)]
- [3] KAWAI K, KARUBE D, KATO S. The model of water retention curve considering effects of void ratio [C]//RAHARDJO H, TOLL D G, LEONG E C. Unsaturated Soils for Asia. Rotterdam: Balkema, 2000: 329 - 334.
- [4] 吕海波,曾召田,赵艳林,等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797 - 3802. [LYU H B, ZENG Z T, ZHAO Y L, et al. Experimental studies of strength of expansive soil in drying and wetting cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3797 - 3802. (in Chinese)]
- [5] 张俊然,许强,孙德安. 多次干湿循环后土-水特征曲线的模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 689 - 695. [ZHANG J R, XU Q, SUN D A. Simulation of soil-water characteristic curves during drying and wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 689 - 695. (in Chinese)]
- [6] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous medium[M]. Colorado State University (Fort Collins). Hydrology Paper 3. 1964.
- [7] Van Genuchten M. T. A Closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci. Soc. Am J. 1980, 44: 892 - 898.
- [8] Lebedeff A F. The movement of ground and soil waters[C]// Proc. 1st Int. Cong. Soil. 1927, 1: 459 - 494.
- [9] 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 J, WANG Z, LI W X. Measurement

- techniques of Unsaturated soil suction force [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Sup1): 905-909. (in Chinese)]
- [10] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media [M]. Hydrology Papers, No. 3. Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 1964.
- [11] 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.
- [12] Fredlund D G, Anqing X. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [13] 伊盼盼,牛圣宽,韦昌富. 干密度和初始含水率对非饱和和重塑粉土土水特征曲线的影响[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 42-46. [YI P P, NIU S K, WEI C F. Influence of dry density and initial moisture content for unsaturated remolding silt soil water characteristic curve [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 42-46. (in Chinese)]
- [14] Vanapalli S K, Pufahl D E, Fredlund D G. The influence of soil structure and stress history on the soil: water characteristic of a compacted till [J]. Geotechnique, 1999, 49(2): 143-159.
- [15] 申春妮,方祥位,王和文,等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347-1351. [SHEN C N, FANG X W, WANG H W, *et al.* Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1347-1351. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞

(上接第 88 页)

- [7] 龚裔芳,金福喜,张可能,等. 红砂岩泥化夹层力学特性及其对边坡稳定性的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 220-223. [GONG Y F, JIN F X, ZHANG K N, *et al.* Influence on Slope Stability of Physical-mechanical Property of Clayer Thin Interlayer in Red Sandstone [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(2): 220-223. (in Chinese)]
- [8] 卢海峰,陈从新,沈强,等. 鄂西南巴东组红层边坡夹层成因及特性[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 54-61. [LU H F, CHEN C X, SHEN Q, *et al.* Genesis and characteristic of weak intercalation existed in the red-bed slope of Badong formation in southwestern Hubei Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(1): 54-61. (in Chinese)]
- [9] 柳群义,朱自强. 不同含水量条件下红砂岩泥化夹层的剪切特性[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(2): 220-223. [LIU Q Y, ZHU Z Q. Shear characteristics of siltized intercalation in red sandstone at different water contents [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012, 34(2): 220-223. (in Chinese)]
- [10] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐,等,译,北京: 中国建筑工业出版社, 1997. [Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanical for unsaturated soils [M]. CHEN Z Y, *et al.*, translated, Beijing: China Building Industry press, 1997. (in Chinese)]
- [11] ZHAN Liang-tong. Field and laboratory study of an unsaturated expansive soil associated with rain-induced slope instability [D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2003.
- [12] 詹良通,吴宏伟. 非饱和膨胀土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 196-201. [ZHAN L T, NG C W W. Experimental study on mechanical behavior of recompacted unsaturated expansive clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 196-201. (in Chinese)]
- [13] NG C W W, ZHAN L T, CUI Y J. A new simple system for measuring volume changes in unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(2): 757-764.
- [14] Chen Zhenghan, Zhou Haiqing, Fredlund D G. A non-linear model for unsaturated soils [C]//Pro of 2nd Int Conf on Unsat Soils, 1998.

责任编辑:张明霞