

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.037

应力作用下非饱和重塑黏土土水特征曲线研究

宋亚亚¹, 卢廷浩^{2,3}, 季李通⁴

(1. 广东天信电力工程检测有限公司, 广东 广州 510663;

2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;

4. 南京泰克奥科技有限公司, 江苏 南京 210017)

摘要: 利用最新研制的全自动非饱和土固结仪,研究了竖向应力对非饱和重塑黏土土水特征曲线的影响,并采用FX模型,通过最小二乘法对试验结果进行拟合。结果表明,竖向应力越大,试样的空气进入值越大,曲线越平缓,水越难排出,相同吸力下含水率越高。FX模型可以较好的描述本次试验各组试样的土水特征曲线。通过分析拟合参数,提出一个只与竖向应力有关的土水特征曲线经验公式。

关键词: 非饱和土;土水特征曲线;竖向应力;经验公式

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0185-04

Experimental Study of Stress State – dependent SWCC of Remolded Unsaturated Clay

SONG Yaya¹, LU Tinghao^{2,3}, JI Litong⁴

(1. Guang Dong Tianxin Electric Power Engineering Test Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510663, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Dam Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

4. Nanjing Tkatest Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210017, China)

Abstract: Automatic instruments of unsaturated soil consolidation were used to analyze the influences of vertical stress on SWCC of remolded unsaturated clay. Through least – square method, FX model was chosen to fit the test data. The results show that the higher the vertical stress, the flatter the curve with higher air entry value and higher water content under the same suction. Through the fit results of SWCC, it was found that FX model can reflect the ability of water-retainment of clay in this study well. Besides, An empirical formula of SWCC only related with vertical stress has been proposed.

Keywords: unsaturated soil; soil-water characteristic curve; vertical stress; empirical formula

土水特征曲线是非饱和土力学中的一个重要概念,它是指土中吸力与土的含水率之间的关系曲线,反映非饱和土在不同吸力作用下的储水能力。通过土水特征曲线的特征值可以推导非饱和土的渗透系数、抗剪强度、扩散系数等参数,因此,土水特征曲线是非饱和土力学研究的重要内容之一^[1-2]。影响非饱和土储水能力的因素有很多,如土的类型、矿物成分、孔隙结构、应力历史和干湿循环等,体现在土水特征曲线上主要是改变土水特征曲线的进气值、减

湿率以及残余含水率三个方面,国内外学者对此做了大量的研究^[3-6]。

在实际工程中,土体都处在一定的应力状态下,因此,研究应力作用对非饱和土土水特征曲线的影响有非常重要的意义。本文利用最新研发的全自动非饱和土固结仪对四组非饱和和重塑黏土试样进行了不同竖向应力条件下的土水特征曲线试验,采用FX模型对试验结果进行拟合,分析了竖向应力对土水特征曲线的影响,并提出了一个只与竖向应力有关

的经验公式。

1 试验研究

1.1 土样的基本物理性质

试验用土取自河海大学校园内清凉山处某边坡,土样的基本物理力学指标见表 1。试样采用重塑环刀样,试样直径 61.8 mm,高度 20 mm,干密度 1.55 g/cm³,初始含水率 16.00%。试样制备方法参考《土工试验方法标准》^[7](GB/T 5012—1999)。

表 1 试样的基本物理力学指标

液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	比重	最优含水率 /%	<0.075mm 含量/%
50	27	23	2.67	17.23	89.3

1.2 试验仪器

试验仪器采用南京泰克奥科技有限公司最新研发的全自动非饱和土固结仪。该系统采用电脑自动控制试验进程和数据采集,与传统非饱和土固结仪相比,具有智能化控制试验进程和长时间连续采集试验数据等优点。相关文献^[8]已对该系统的原理、构造与软件使用方法等作了详细介绍,这里不再赘述。

1.3 试验方法和步骤

本次共进行了四组不同竖向应力条件下的土水特征曲线试验。四组试样的初始状态相同,在不同的竖向应力作用下分级施加吸力并测量相应地稳定含水率进而得到土水特征曲线,试验方案如表 2 所示。

表 2 土水特征曲线试验方案

试样 编号	竖向应力 /kPa	吸力路径/kPa
SY1	0	0 10 25 50 80 100 150 200 300
SY2	50	0 10 25 50 80 100 150 200 300
SY3	100	0 10 25 50 80 100 150 200 300
SY4	200	0 10 25 50 80 100 150 200 300

试验进程和数据采集通过与仪器配套使用的“非饱和土固结仪高级测试软件”全自动控制,文献^[8]对软件的使用和参数设置作了详细介绍。试验步骤如下:(1)对试样与高进气值陶土板进行抽气饱和,称取饱和试样质量,计算其初始质量含水率、初始体积含水率与密度。打开软件并设置“试样参数”,安装试样;(2)添加并设置相应的试验模块。设置各模块目标值、采集时间和终止条件并添加到

试验列表中。采集时间间隔为 600 s,吸力平衡标准为:排水量每两小时不超过 0.012 ml,竖向变形量每两小时不超过 0.012 mm^[9]。(3)点击“进入试验”按钮,试验正式开始。试验开始后电脑自动采集数据并作相应处理,通过显示界面可以实时观测各参数的变化情况。各阶段试验吸力达到平衡标准后自动进入下一级,直至试验结束。(4)试验结束后,退出软件程序,数据自动保存。拆卸仪器,称取试样重量。根据各级吸力及其相应稳定含水率或饱和度得到土水特征曲线。

1.4 试验过程的数据校正

非饱和土的渗透性非常小,一般需要较长时间才能保证试样在每级吸力状态下的排水量和变形都达到稳定。

考虑到试验周期较长,试样排水量测量存在一定的误差,需要对测量值进行校正。根据试验开始和结束时称取的试样重量,可以计算出整个试验过程中试样的实际排水量,进而可以计算出测量排水量与实际排水量之差,并据此把试验过程中所测量的各级吸力下排水量按历时进行校正。表 3 给出了不同竖向应力下土水特征曲线试验排水总量的对比。试验结果表明排水测量值与实际值有一定差别,下文中的体积含水率是按照校正排水量计算得到的。

表 3 试样排水总量测量值与实际值的比较

竖向压力 /kPa	排水总量/ml		总量差值 /ml	相对误差 /%
	量测值	实际值		
0	8.85	8.27	0.58	7.01
50	9.13	8.34	0.79	9.48
100	9.91	8.97	0.94	10.35
200	8.52	8.13	0.39	4.72

1.5 试验结果与分析

1.5.1 不同竖向应力下土水特征曲线

图 1 为不同竖向应力作用下的土水特征曲线。由于试验吸力变化范围较小,土水特征曲线可以分为两个阶段:(1)边界效应阶段:吸力小于进气值时,含水率随着吸力的增大而缓慢减小。此时土体处于高饱和阶段,只有大孔隙中的水可以排出,土颗粒接触点的水是连通的。(2)转化阶段:当吸力大于进气值后,土水特征曲线明显变陡,含水率随着吸力的增加迅速减小,即土体脱水速率增大。在此阶段中,随着吸力的增大,气体开始进入土中小孔隙并与水分混合,水气处于部分连通状态。

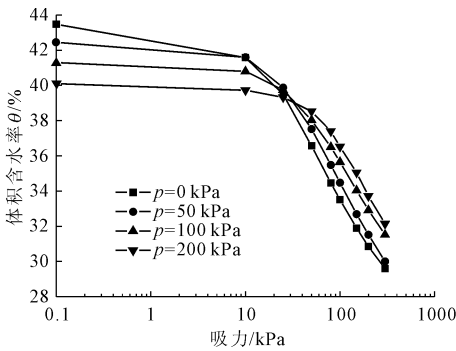


图 1 不同竖向应力下的土水特征曲线

竖向应力对本次试验的土水特征曲线形态特征有明显影响。随着竖向应力增大,土水特征曲线的进气值点明显后移,吸力超过进气值后,曲线斜率有减小趋势。竖向应力越大,土体被压得越密实,土中孔隙相对越小且更均匀,土体毛细吸力增大,在进气排水的过程中空气越难进入,水分排出的速率也越小,即土体持水能力增强。因此,竖向应力是通过改变土体的孔隙结构而影响土水特征曲线的。

1.5.2 土水特征曲线拟合

Fredlund D G 等^[10]运用统计分析理论对土体孔径分布曲线进行研究,推导出一个适用于任何土体类型的土水特征曲线数学表达式,即 FX 模型:

$$\theta_w = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\frac{\psi}{a})^n]\}^m} \tag{1}$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \tag{2}$$

式中: a 、 n 、 m 均是拟合参数, a 是与空气进入值相关的参数, n 是与减湿率相关的参数, m 是与土体残余含水率相关的参数, θ 是体积含水率, θ_s 是饱和体积含水率, ψ 是基质吸力, ψ_r 是与残余含水率相对应的基质吸力。

然而本次试验吸力变化范围较小,最大吸力为 300 kPa,没有得到完整的土水特征曲线。Fayer 的研究表明,FX 模型中的修正参数 $C(\psi)$ 可以改善土水特征曲线在高吸力范围内的拟合精度,但是对于整个吸力范围内土水特征曲线的拟合精度有所降低^[11]。另外, $C(\psi)$ 是一个函数,它的存在大大增加了数据拟合的难度。由此可见,在没有达到残余含水率的情况下,修正参数 $C(\psi)$ 的存在不仅降低了曲线拟合精度而且造成拟合过程复杂。根据相关文献可知,粉质黏土残余含水率对应的吸力约为 3 000 kPa^[12],本文根据公式(2)对试验中各级吸力对应的 $C(\psi)$ 值进行了计算,计算结果见表 4。

表 4 各级吸力下的修正参数

ψ/kPa	10	25	50	80	100	150	200	300
$C(\psi)$	1.0006	1.0014	1.0028	1.0045	1.0056	1.0084	1.0111	1.0164

由表 4 可以看出,在本次试验吸力范围内,大部分试验点的修正参数 $C(\psi)$ 都小于 1.01,由此可见 $C(\psi)$ 对低吸力范围的土水特征曲线修正效果很小,因此可取 $C(\psi) = 1$ 。将 $C(\psi) = 1$ 代入公式(1)即为本文使用的土水特征曲线拟合公式:

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\frac{\psi}{a})^n]\}^m} \tag{3}$$

利用公式(3),应用 Origin 软件对土水特征曲线试验结果进行拟合,拟合效果图见图 2。

由图 2 可以看出,拟合曲线与试验数据相近,拟合效果良好,公式(3)可以较好地描述本次试验土样的土水特征曲线。

由图 2 可知,拟合参数 a 随着竖向应力的增大而增大,参数 n 随着竖向应力的增大而减小,这说明竖向应力的存在增强了土体的持水能力。

图 3 为各组试样在不同竖向应力下固结排水完成后的孔隙比与对应进气值 a 的关系图。由图 3

可以看出,竖向应力越大,固结完成后试样的孔隙比越小,其对应的进气值越大,这也反映了竖向应力是通过改变试样的孔隙比即颗粒结构和孔隙分布来影响土水特征曲线的。

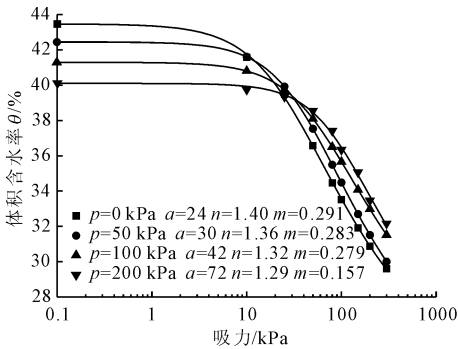


图 2 不同竖向应力下土水特征曲线试验的拟合曲线

1.5.3 与竖向应力 p 有关的土水特征曲线经验公式
应力作用对土水特征曲线在半对数坐标系中的形态和位置有明显影响,而从定量上看,应力作用对

土水特征曲线的影响主要反映在各拟合参数上。可以大胆推测,如果拟合参数 a 、 n 、 m 分别与竖向应力 p 存在某种定量函数关系,那么公式(3)就可以转化为一个只与竖向应力 p 有关的函数,即:

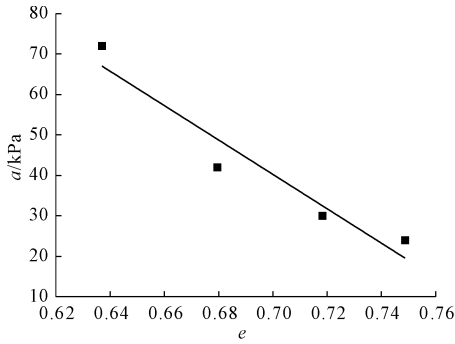


图 3 进气值 a 与孔隙比 e 的关系图

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a(p)} \right)^{n(p)} \right] \right\}^{m(p)}} \tag{4}$$

其中, $a(p)$ 、 $n(p)$ 和 $m(p)$ 分别为与竖向应力 p 有关的函数。如果此想法可行,通过该公式可以得到任意竖向应力作用下的土水特征曲线。

图 4 ~ 图 6 分别为拟合参数 a 、 n 、 m 与竖向应力 p 的关系图。由图可以看出,各拟合参数与竖向应力呈现良好的线性或二次函数关系,其函数关系式分别为: $a = 20.4 + 0.2496p$ 、 $n = 1.3903 - 0.0005p$ 与 $m = -4.9 \times 10^{-6}p^2 + 0.0003p + 0.2876$ 。

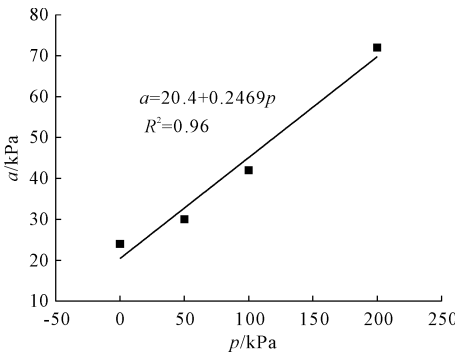


图 4 a 与竖向应力 p 关系图

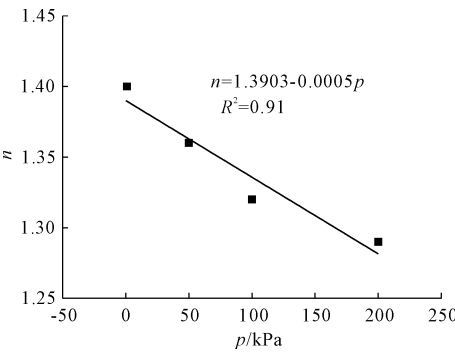


图 5 n 与竖向应力 p 关系图

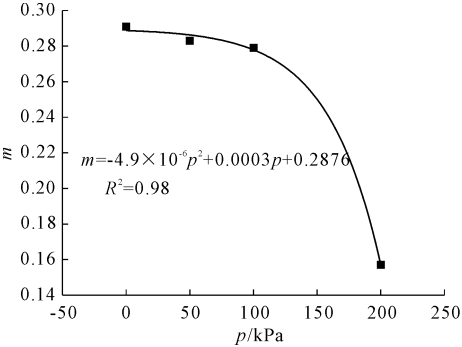


图 6 m 与竖向应力 p 关系图

将拟合参数 a 、 n 、 m 与 p 的关系代入公式(4),得到一个只与竖向应力 p 有关的土水特征曲线经验公式,即:

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{20.4 + 0.2496p} \right)^{1.39 - 0.0005p} \right] \right\}^{-4.9 \times 10^{-6}p^2 + 0.0003p + 0.2876}} \tag{5}$$

其中, θ_w 为体积含水率, ψ 为吸力, θ_s 为饱和体积含水率, p 为竖向应力。

公式(5)中只有竖向应力 p 一个参数,理论上,通过该公式可以计算出任意竖向应力作用下各级吸力对应的体积含水率。通过土水特征曲线可以确定非饱和土的抗剪强度、渗透系数、体应变等,对于涉及竖向应力作用的稳定性及渗流问题,该公式将竖向应力与非饱和土的抗剪强度、渗透系数等参数联系起来,使非饱和土的强度与渗流计算更为简单,也更加符合工程实际。

2 结 论

(1) 竖向应力对土水特征曲线的影响主要体现在进气值和减湿率两方面:竖向应力越大,进气值越大,曲线越缓和,土体的储水能力越强;竖向应力对土水特征曲线的影响是通过改变土体孔隙结构而实现的。

(2) 使用 FX 模型对试验数据进行拟合,取得了良好的拟合效果,FX 模型能够较好地描述本次试验土样的持水能力。

(3) 土水特征曲线的拟合参数 a 、 n 、 m 与竖向应力 p 之间存在定量函数关系,提出了一个只与竖向应力 p 有关的土水特征曲线经验公式。

参考文献:

[1] Fredlund D G, Rahardio H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (下转第 192 页)