

干密度和初始含水率对非饱和重塑粉土 土水特征曲线的影响

伊盼盼¹, 牛圣宽², 韦昌富³

(1. 武昌理工学院, 武汉 430223; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 采用压力板仪详细研究了不同击实条件对非饱和重塑粉土土水特征曲线的影响, 并采用 van Genuchten 模型对实测试样的土水特征曲线进行了拟合。分别取在初始击实含水率相同的条件下, 击实干密度不同的试样以及在击实曲线上同一干密度处对应的不同初始击实含水率的试样, 对其进行土水特征曲线测试。结果表明: 击实干密度越大, 空气进气值越高。击实含水率越大, 试样可塑性越好, 其空气进气值越大。

关键词: 土水特征曲线; 击实干密度; 击实含水量; 模型

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012) 01-0042-05

土水特征曲线表示非饱和土的基质吸力与含水量(体积含水量或饱和度)之间的关系, 是非饱和土研究的重要内容。土体的许多重要信息, 如渗透系数、抗剪强度、应力状态等力学或水力学参数都可以从土水特征曲线中获得^[1~4]。

土水特征曲线受到很多因素的影响, 如土体类型、矿物成分、结构、初始含水量、干密度、空隙比、应力历史等。Vanapalli 等^[5]引入“等效压力”的概念, 研究了砂质粘性冰碛土在不同竖向压力、不同初始含水量下的土水特征曲线。Kawai 等^[6]对非膨胀的非饱和土进行了研究, 考虑了固结压力和不同初始含水量对土水特征曲线的影响。Ng 等^[7]对火山碎屑土进行研究, 分析了对同样固结试样施加不同竖向压力下的土水特征曲线。刘艳华^[8]等分析了河南南阳的膨胀性原状土和击实土在不同固结压力下的土水特征曲线。周建^[9]总结了国内外的研究工作, 对非饱和土土水特征曲线的主要影响因素进行了综述。汪东林^[10]等研究

了重塑非饱和粘土, 从固结压力等五个方面分析了对土水特征曲线的影响。

国内外的许多研究人员对非饱和土土水特征曲线的各种影响因素进行了分析, 但大多文献仅描述了各种因素对非饱和土土水特征曲线影响的大致趋势, 因而详细具体的分析各种因素对非饱和土土水特征曲线的影响是必要的。本文针对非饱和重塑粉土开展了一系列试验, 详细研究了击实条件下击实干密度和初始击实含水率对试样土水特征曲线的影响。采用 van Genuchten 模型^[11]对实测的土水特征曲线进行拟合, 进而详细分析了不同击实条件对非饱和重塑粉土的土水特征曲线影响。

1 土水特征曲线模型

目前, 已有多个模型来描述土水特征曲线。常用模型有 Garden 模型^[12]、Brook and Corey 模型^[13]、van Genuchten 模型^[11]、Fredlund and Xing 模型^[14]。

Garden^[12]提出的土水特征曲线模型, 其表达式为:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{1 + \alpha \varphi^n} \quad (1)$$

式中: S_e ——相对饱和度;

φ ——基质吸力;

α, n ——拟合参数。

Brooks 和 Corey^[13]提出的土水特征曲线模型, 其表达式如下:

收稿日期: 2011-05-23; 修订日期: 2011-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(19872211); 岩土力学与工程国家重点实验室重点方向性项目(Q110601); 中国科学院“百人计划”择优项目资助

作者简介: 伊盼盼(1984-), 女, 博士研究生, 从事非饱和土渗流与边坡稳定的研究。

E-mail: ppan2003@163.com

通讯作者: 韦昌富(1966-), 男, 研究员, 从事非饱和土力学与多相孔隙介质多场耦合问题研究工作。

E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn

$$S_e = \begin{cases} \left(\frac{\varphi^b}{\varphi}\right)^\lambda & \varphi > \varphi^b \\ 1 & \varphi \leq \varphi^b \end{cases} \quad (2)$$

式中: φ^b ——进气值;

λ ——拟合参数。

van Genuchten^[11]提出的土水特征曲线模型,其表达式如下:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_s ——饱和含水率;

θ_r ——残余含水率;

h ——压力水头;

α, n, m ——经验参数。

Fredlund 和 Xing^[14]提出的土水特征曲线模型,其表达式如下:

$$S_e = \frac{1}{\left(\ln\left(e + \left(\frac{\varphi}{\alpha}\right)^n\right)\right)^m} \quad (4)$$

式中: α, n, m ——拟合参数。

本文采用 van Genuchten 模型对实测试样土水特征曲线进行拟合,这里参数 m 取用 $1 - n^{-1}$, θ_s 为已知值。由于 θ_r 的测试方法没有统一的标准,这里采用拟合的方法来得到 θ_r 值。

2 实验装置和实验方案

2.1 试验装置简介

本文测定击实条件下非饱和粉土的土水特征曲线,采用的仪器为压力板仪,其示意图如图1所示。

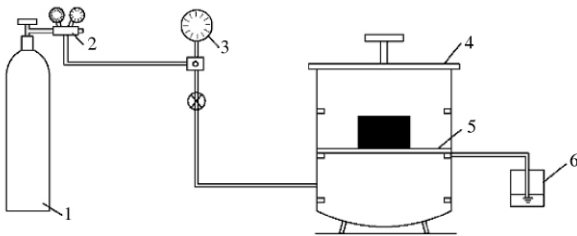


图1 压力板仪示意图

Fig.1 Sketch map of pressure plate apparatus

1—高压氮气瓶;2—减压阀;3—调压阀;

4—压力锅;5—高进气值陶土板;6—盛水容量瓶

仪器主要由供气系统、调压阀、压力锅及盛水容量瓶等组成。供气系统由高压氮气瓶、减压阀构成。减压阀把氮气瓶里的高压气体变成低压气体,起粗调作用。调压阀能精确控制给压力锅输入的气压力值,起

到细调作用。试样在各级吸力下溢出水排到盛水容量瓶里。用精密的电子天平可以量测出试样在各级吸力下平衡时的溢出水质量。

其操作流程如下:

(1) 把制备好的试样和高进气值陶土板进行饱和。可以采用抽真空饱和法对制备好的试样进行饱和,而高进气值陶土板的饱和宜采用脱气压力水(400kPa左右)进行饱和。

(2) 把饱和好的陶土板放在压力锅的支架上并连好通往外部的排水管,取出饱和试样,测量饱和试样质量,迅速将试样放置在陶土板上并确定试样与陶土板表面接触良好。盖好压力容器上盖,利用调压阀调节压力直至预定压力值。

(3) 采用精密电子天平测量盛水容量瓶的质量,待试样出水停滞时,则试样在该级吸力下达到平衡状态。把吸力降为零,打开压力锅的上盖,称量各试样的质量,重新放回,盖上盖子,根据饱和试样质量和在该吸力平衡时试样质量的差值可以得到试样溢出水的质量,进而可以换算出试样的饱和度。重复以上步骤,逐级施加下一级吸力,直至试验结束。根据量测的各级吸力下试样的溢出水质量,可以换算出试样在各级吸力下平衡时对应的饱和度。在后面的试验方案设计中,每一种类型的试样都做了两组平行试样,每级吸力下试样平衡时的饱和度取这两组试样饱和度的平均值。

2.2 实验方案

试验用土为取自黄河三角洲的粉土,取重塑土样过2mm筛,测得该土的比重为2.71;液限为29.4,塑限为19.8。

根据土的塑限预估最优含水率,配制一定土样,对该土样进行轻型击实实验。

为了考虑干密度对非饱和土土水特征曲线的影响,取击实曲线上含水率为17.6%的点,配制3组试样。1组进行轻型击实试验,分5层击实,每层击实次数为25次;另外2组也分5层击实,每层击实分别控制在40次和56次。分别从击实好的试样中用环刀切取高度为2cm,直径为6.18cm的3组试样,为了进行平行试验,每组试样取2个。各组试样的干密度分别为1.68g/cm³,1.72g/cm³,1.74g/cm³。利用抽真空饱和法对各组试样进行饱和,然后用上述压力板仪对试样进行土水特征曲线测试。

为了考虑不同击实含水率对非饱和土土水特征曲线的影响,分别取击实曲线上干密度为1.65g/cm³处和1.67g/cm³处对应的含水率。其中,干密度1.65

g/cm^3 对应的含水率分别为 14.2% 和 21.9%;干密度为 $1.67 \text{ g}/\text{cm}^3$ 对应的含水率分别为 16.2% 和 21.1%。据此制备 4 组土样,进行轻型击实,然后分别从击实试样上切取 4 组环刀样,每组 2 个,采用抽真空饱和法对各组试样进行饱和,接着进行土水特征曲线测试。

3 试验结果分析

3.1 不同击实干密度对土水特征曲线的影响

对应于含水率为 17.6%,分别取干密度为 $1.68 \text{ g}/\text{cm}^3$, $1.72 \text{ g}/\text{cm}^3$, $1.74 \text{ g}/\text{cm}^3$ 的 3 组试样。其实测土水特征曲线如图 2 中数据点所示。用 van Genuchten 模型进行拟合,其拟合曲线如图 2 中实线所示。从拟合结果可以看出, van Genuchten 能够较好地拟合试样土水特征曲线。其拟合参数如表 1 所示。

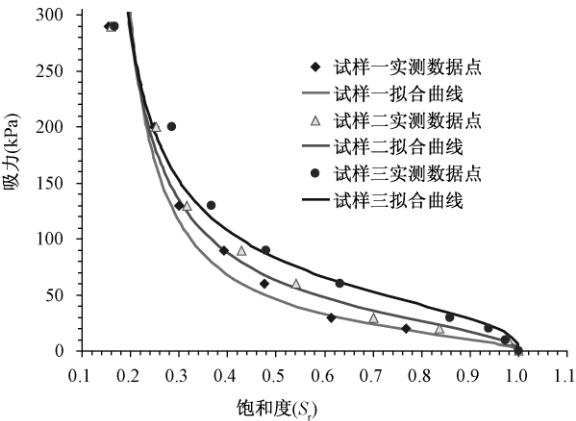


图 2 $\omega = 17.6\%$ 时不同干密度土水特征曲线

Fig.2 SWCC using different dry densities at $\omega = 17.6\%$

表 1 $\omega = 17.6\%$ 时不同干密度土水特征曲线拟合参数

Table 1 SWCC fitting parameters for different dry densities at $\omega = 17.6\%$

名称	干密度 (g/cm^3)	模型参数		
		$\alpha(\text{cm}^{-1})$	n	m
试样一	1.68	0.005	1.9	0.47
试样二	1.72	0.003	2.1	0.52
试样三	1.74	0.0019	2.5	0.6

名称	干密度 (g/cm^3)	模型参数		
		θ_r	θ_s	l
试样一	1.68	0.05	0.4	0.5
试样二	1.72	0.045	0.38	0.5
试样三	1.74	0.05	0.38	0.5

从图 2 中可以看出,在相同击实含水率下,随着土的击实程度发生变化,测得试样土水特征曲线的位置和形状都发生了明显的改变。击实干密度大的土样的

土水特征曲线在干密度较小的试样土水特征曲线的上方。在初始施加相同吸力的情况下,干密度较大试样饱和度的变化较慢。其原因为:试样的干密度越大,土样内部结构孔隙空间越小,随着基质吸力的增加,试样中的水分排出速率越慢。因而,试样干密度的越大,试样的进气值也越高。

3.2 不同击实含水率对土水特征曲线的影响

为了考察不同击实含水率对试样土水特征曲线的影响,分别取了击实曲线上干密度 $1.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ 对应含水率为 14.2% 和 21.9% 的 2 组试样,以及干密度 $1.67 \text{ g}/\text{cm}^3$ 对应含水率为 16.2% 和 21.1% 的 2 组试样。

其中,干密度 $1.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ 对应的 2 组试样的实测土水特征曲线如图 3 中数据点所示。用 van Genuchten 模型进行拟合,其拟合曲线如图 3 中实线所示,可以看出,拟合结果较好。其拟合参数如表 2 所示。

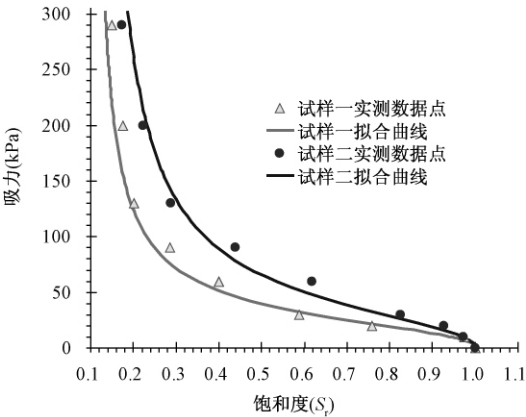


图 3 $\rho = 1.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时不同含水率土水特征曲线

Fig.3 SWCC using different compaction water contents at $\rho = 1.65 \text{ g}/\text{cm}^3$

从图 3 中可以看出,相同干密度下,初始击实含水率大的试样土水特征曲线在击实含水率小的试样土水特征曲线上方,空气进气值也较大。图 3 中所取 2 组初始含水率位于最优含水率的两侧,当初始含水率低于最优含水率时,土水特征曲线的斜率变化较大,空气进入值较低,这是由于击实含水率小于最优含水率时,土体的可塑性较差,使空气进入值较小;当击实含水率高于最优含水率时,土水特征曲线斜率较平缓,空气进入值较高,这是由于击实含水率大于最优含水率时,土体的可塑性较好,孔隙分布较均匀,因而试样的进气值较大。

干密度 $1.67 \text{ g}/\text{cm}^3$ 对应的 2 组试样的实测土水特征曲线如图 4 中数据点所示。用 van Genuchten 模

型进行拟合,其拟合曲线如图 4 中实线所示,可以看出,拟合结果也比较好。其拟合参数如表 3 所示。

表 2 $\rho = 1.65\text{g}/\text{cm}^3$ 时不同含水率土水特征曲线拟合参数

Table 2 SWCC fitting parameters for different compaction water contents at $\rho = 1.65\text{g}/\text{cm}^3$				
名称	含水率 $\omega(\%)$	模型参数		
		$\alpha(\text{cm}^{-1})$	n	m
试样一	14.2	0.004	2.4	0.58
试样二	21.9	0.0028	2.16	0.54

名称	含水率 $\omega(\%)$	模型参数		
		θ_r	θ_s	l
试样一	14.2	0.045	0.42	0.5
试样二	21.9	0.042	0.37	0.5

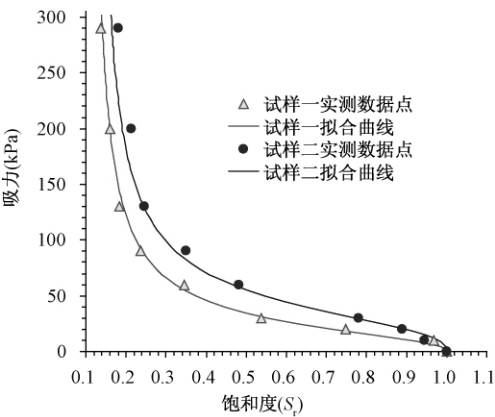


图 4 $\rho = 1.67\text{g}/\text{cm}^3$ 时不同含水率土水特征曲线
Fig.4 SWCC using different compaction water contents at $\rho = 1.67\text{g}/\text{cm}^3$

从图 4 中可以看出,该组试验得到的结果和上组类似。即随着击实含水率的增大,其空气进气值也相应增大。

表 3 $\rho = 1.67\text{g}/\text{cm}^3$ 时不同含水率土水特征曲线拟合参数

Table 3 SWCC fitting parameters for different compaction water contents at $\rho = 1.67\text{g}/\text{cm}^3$				
名称	含水率 $\omega(\%)$	模型参数		
		$\alpha(\text{cm}^{-1})$	n	m
试样一	16.2	0.028	2.55	0.61
试样二	21.1	0.005	2.25	0.56

名称	含水率 $\omega(\%)$	模型参数		
		θ_r	θ_s	l
试样一	16.2	0.05	0.38	0.5
试样二	21.1	0.045	0.41	0.5

以上 2 组试验表明,即使在干密度相同的条件下,由于击实含水率的不同,得到的试样土水特征曲线也不相同,故击实含水率影响了试样的微观结构。在击

实含水率小于最优含水率时,土体有较大的宏观结构,这会使试样的进气值较小,容易排水。而击实含水率大于最优含水率时,土体的可塑性较好,空隙尺寸小且分布均匀。使得试样的进气值较大,水分不容易排出。

4 结论

(1) 通过压力板仪,详细研究了不同击实条件对非饱和和重塑粉土土水特征曲线的影响。并采用常用的土水特征曲线模型 van Genuchten 模型对实测试样的土水特征曲线进行了拟合,从拟合结果可以看出拟合效果较好。

(2) 在初始击实含水率相同的条件下,通过改变击实次数,得到不同的击实干密度。通过研究发现,随着试样击实干密度的增大,试样土水特征曲线的位置和形状都发生了明显的改变。即击实干密度越大,空气进气值越高。

(3) 在击实曲线上取同一干密度对应的不同初始击实含水率的试样,对其进行土水特征曲线测试。研究发现,不同的击实含水率可以影响试样的结构。击实含水率较小时,试样的可塑性较差,空气进气值较低;击实含水率较大时,试样的可塑性较好,空气进气值较高。

(4) 通过对非饱和和重塑粉土进行研究,可以看出不同击实条件对试样土水特征曲线影响较大。因此,测定非饱和土土水特征曲线时,不能忽视了这些影响因素,要结合实际情况分析试样的土水特征曲线。

参考文献:

[1] 李爱国,岳中琦,谭国焕,等.野外土-水特征及其工程意义[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):969-973. [LI A G, YUE Z Q, TAN G H, et al. Field soil-water characteristics and its engineering implication[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 969-973. (in Chinese)]

[2] Fredlund D G, Xing A Q, Fredlund M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 440-448.

[3] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D G, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379-392.

[4] WEI C F, DEWOOLKAR M M. Formulation of

- capillary hysteresis with internal state variables [J]. Water Resources Research, 2006, 42, W07405: 1 – 16.
- [5] 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: Iguanzu Falls, 1999: 991 – 998.
- [6] 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.
- [7] Ng C W W, Pang Y W. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(2): 157 – 166.
- [8] 刘艳华, 龚壁卫, 苏鸿. 非饱和土的土水特征曲线研究[J]. 工程勘察, 2002(3): 8 – 11. [LIU Y H, GONG B W, SU H. Research on SWCC of unsaturated soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2002(3): 8 – 11. (in Chinese)]
- [9] ZHOU Jian, YU Jian-lin. Influences affecting the soil-water characteristics curve [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2005, 6A(8): 797 – 804.
- [10] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 重塑非饱和黏土的土 – 水特征曲线及其影响因素研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 751 – 756. [WANG D L, LUAN M T, YANG Q. Experimental study of soil-water characteristic curve of remolded unsaturated clay [J]. Rock and Mechanics, 2009, 30(3): 751 – 756. (in Chinese)]
- [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: 892 – 898.
- [12] Gardner W R. Some steady-state solutions of the moisture flow equations with application to evaporation from a water table [J]. Soil Science, 1958, 85: 228 – 232.
- [13] Brooks H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media [C] // Colorado State Univ. Hydrol. Paper, 1964, 3.
- [14] Fredlund D G, Xing A Q. A Equation for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31: 521 – 532.

Effect of dry density and initial moisture content on soil water characteristic curve of remolded unsaturated silt

YI Pan-pan¹, NIU Sheng-kuan², WEI Chang-fu³

(1. Wuchang University of Technology, Wuhan 430223, China;

2. Changjiang Survey Planning Design and Research Limited Company, Wuhan 430010, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Pressure plate apparatus are used to study the influences of different compaction conditions on soil water characteristic curve of unsaturated remolded silt. van Genuchten model are employed to fit the soil water characteristic curve. We can get different dry densities when the compaction water content is the same in the initial conditions and different initial moisture contents corresponded to the same dry density in the compaction curve which are used to testing the soil water characteristic curves. The results show that the higher compaction dry densities, the higher air entry values are, and the higher compaction water content, the better plasticity of the sample is and the higher air entry value is.

Key words: soil-water characteristic curve; compaction dry density; compaction water content; model

责任编辑: 张明霞