

# 应力作用下非饱和土土-水特征曲线研究

宋亚亚<sup>1,2</sup>, 卢廷浩<sup>1,2</sup>, 季李通<sup>3</sup>

(1. 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;

2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 3. 南京泰克奥科技有限公司, 江苏 南京 210017)

**摘要:** 总结有关土-水特征曲线的研究成果, 利用非饱和土固结仪进行非饱和重塑粘土试样的土-水特征曲线试验, 分析了竖向压力和固结压力对土-水特征曲线的影响, 并利用 Fredlund 3 参数模型对试验数据进行拟合。研究表明, 竖向压力越高, 土-水特征曲线越平缓, 空气进入值越大, 同吸力下的土体饱和度越大。固结压力的影响与竖向压力相似。

**关键词:** 非饱和土; 基质吸力; 土-水特征曲线; 竖向压力

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)06—0147—04

## Research on Soil-water Characteristic Curve of Unsaturated Soil under Stress State

SONG Ya-ya<sup>1,2</sup>, LU Ting-hao<sup>1,2</sup>, JI Li-Tong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Nanjing Tkatest Science and Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210017, China)

**Abstract:** The soil-water characteristic curve is an important concept of unsaturated soil mechanics. Based on the published data, the influence of compaction stress and consolidation pressure on soil-water characteristic curve is studied, the soil-water characteristic curve tests for remolded unsaturated clay specimens are carried out by means of the unsaturated consolidation apparatus, and the test data are fitted by using the Fredlund tri-parameter model. The study results show that the higher the compaction stress, the flatter is the soil-water characteristic curve, and the higher is the air entry value. Simultaneously, the effect of consolidation pressure is similar to that of compaction stress.

**Keywords:** unsaturated soil; metric suction; soil-water characteristic curve; compaction stress

非饱和土土-水特征曲线的研究最早起源于土壤学和土壤物理学, 它是指土中吸力与含水率或饱和度之间的关系曲线, 反映了非饱和土在吸力作用下土体的持水能力。土-水特征曲线是解释非饱和土性状的一个概念性工具, 将理论、试验研究与预测方法有机的联合起来。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、扩散系数、体应变等, 这在非饱和土力学中具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

土-水特征曲线受很多因素的影响, 如土体类型、矿物成分、孔隙结构、初始含水率、初始孔隙比、应力状态和温度等, 这些影响主要反映在土-水特征曲线的进气值、减湿率以及残余含水率这三个方面, 许多学者已经对这些影响因素做了大量的研

究<sup>[3-6]</sup>。在工程实践中, 土体大都处于一定的应力状态下, 因此研究应力作用对土-水特征曲线的影响有着非常重要的理论和实际意义。本文在总结国内外有关研究成果的基础上, 分析了竖向压力和固结压力对土-水特征曲线的影响。另外, 利用非饱和土固结仪对非饱和重塑黏土试样进行了有竖向压力和无竖向压力条件下的土-水特征曲线试验, 并采用 Fredlund 3 参数模型对试验数据进行拟合, 分析了竖向压力对各参数的影响。

### 1 典型的非饱和土土-水特征曲线

典型的非饱和土土-水特征曲线可以分为三个阶段, 如图 1 所示: 边界效应阶段、转化阶段和残余

阶段<sup>[7]</sup>。

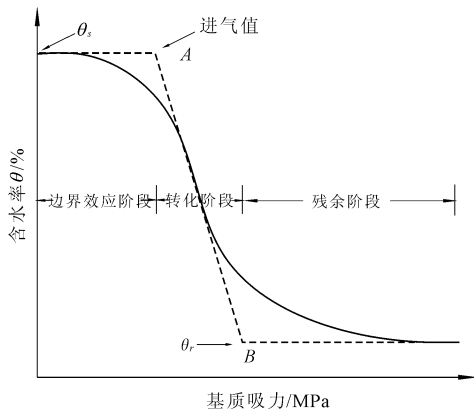


图 1 典型的非饱和土土-水特征曲线

图 1 中 A 点称之为进气值  $(u_a - u_w)_b$ , 即当基质吸力增大到该值时, 空气开始进入土体, 它是边界效应阶段的下边界。在边界效应阶段, 土体的孔隙中完全充满水, 土颗粒接触点处的水膜是连续的。在这个阶段只需一个应力状态变量, 即饱和土的有效应力就可以描述土体的力学特性。B 点称之为残余含水率  $\theta_r$ , 它是残余阶段的上边界。当土的含水率低于该值以后, 土体孔隙中的空气处于连通状态, 孔隙水仅残存于小孔隙中, 含水率的微小改变就会引起基质吸力剧烈地变化。空气进入值 A 点和残余含水率 B 点之间即转化段的曲线在半对数坐标中近似一条直线, 通常定义它的切线斜率为减湿率, 反映土体储水能力的大小。这一阶段中的气相处于“部分连通形态”, 土体性质复杂, 是工程中最关心的状态阶段。

空气进入值是非饱和土的一个重要参数, 它是一个临界值, 一般认为土体中的吸力小于此值时, 可简化为饱和土计算; 吸力大于此值时须选用非饱和土模型模拟。

## 2 应力状态对土-水特征曲线的影响

### 2.1 竖向压力的影响

Ng 和 Pang<sup>[8]</sup>采用改进的体积压力板仪对香港地区的火山碎屑土试样施加 40 kPa 和 80 kPa 的竖向压力进行了研究。分析试验结果可知, 竖向压力越大, 土-水特征曲线的进气值越大, 减湿率越小, 表明在高压下空气难以进入土体, 土体的持水能力较强, 排水和吸水都比较困难。研究还发现竖向压力越大, 土-水特征曲线的滞回圈面积越小, 土体的滞水特性越不明显, 这一发现对于研究吸力循环下非饱和土的滞水特性有非常重要的意义。唯一不足

的是试验所加的竖向压力不是很高, 且仅有两组。

Sharma<sup>[9]</sup>对高岭土和蒙脱土混合试样进行了研究, 试验所加的竖向压力较大, 分别为 400 kPa、800 kPa 和 3200 kPa。试验结果表明, 竖向压力越大, 同吸力下土体的饱和度越高, 滞回圈面积越小, 滞回特性越不明显, 这与 Ng 和 Pang<sup>[7]</sup>的结论一致。随着竖向压力的增大, 土体孔隙结构趋于稳定, 甚至形成一个稳定的“呼吸”通道, 消弱了土-水特征曲线的滞回特性。竖向压力对土-水特征曲线的影响是通过孔隙结构起作用的。

### 2.2 固结压力的影响

为研究固结压力对土-水特征曲线的影响, Kawai 等<sup>[10]</sup>对非饱和重塑土进行了试验研究。试验得到了一次完整干湿循环下的土-水特征曲线, 在土-水特征曲线的脱湿阶段, 固结压力越大, 相同吸力下土体的饱和度越高; 而在土-水特征曲线的吸湿阶段, 固结压力越大, 饱和度增加幅度越小。这是因为土体受到的固结压力越大, 土颗粒就越紧密, 空气难以进入土体, 土体无论是排水还是吸水都比较困难。

李志清等<sup>[4]</sup>研究了固结和未固结试样的土-水特征曲线, 研究结果表明固结后试样的进气值较高, 吸力超过进气值后的曲线较缓和, 说明土体的持水能力较未固结试样强; 在相同的吸力下, 固结后试样的含水率较未固结试样低, 并且含水率的差值随着吸力的增大而减小, 这表明在较高吸力下, 应力作用对土-水特征曲线的影响减弱。固结压力对土-水特征曲线的影响可以从实际工程得以证明: 土体经压实后达到最大干密度, 可以减小含水率的变化, 增强土体的强度。因此, 固结压力对土-水特征曲线的影响也是通过土体孔隙结构而起作用的。

## 3 土-水特征曲线试验研究

### 3.1 土样的基本物理性质

本文试验用土取自镇江市南徐大道某滑坡带, 属于高液限黏土, 土样的基本物理力学指标如表 1 所示。试验采用重塑样, 试样直径 61.8 mm, 高度 20 mm, 初始含水率 15%, 干密度 1.45 g/cm<sup>3</sup>, 具体制备方法参考《土工试验方法标准》<sup>[11]</sup>。在试验前将制备好的试样抽气饱和, 擦除饱和试样表面水分后称取试样的质量, 以计算饱和试样在试验开始前的饱和含水率。

### 3.2 试验方法

利用非饱和土固结仪对重塑土试样进行了两组土-水特征曲线试验, 两组试验施加的竖向压力分别

为 0 kPa 和 40 kPa。试验步骤如下:(1)称量饱和试样和高进气值陶土板的质量,安装试样;(2)施加竖向压力,固结稳定后记录百分表读数,固结稳定的标准为每 2 h 变形量不超 0.01 mm<sup>[6]</sup>; (3)逐级施加气压 5 kPa、15 kPa、25 kPa、50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa、250 kPa、300 kPa 和 350 kPa,分别记录气压平衡后的排水量管读数,以计算各级吸力下的含水率。以每 2 h 排水量不超过 0.012 ml 作为气压力平衡的标准<sup>[6]</sup>。试验过程中每 24 h 对高进气值陶土板底部进行一次冲刷,以除去排水量管中的气泡,排水量管读数以冲刷后读数为准;(4)最后一级气压达到平衡后,试验结束,卸除气压,称取湿土样和烘干后试样质量。根据排水量管初始和结束读数计算各级气压力下平衡时的含水率,得出相应的饱和度,即得到土-水特征曲线。

表 1 土样的基本物理力学性质指标

液限 /%	塑限 /%	塑性指数	干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	比重	< 2 mm /%
43.1	25.4	17.7	1.56	2.72	54.8

根据排水量管的读数变化计算每级吸力平衡后试样的重量含水率:

$$w_i = \frac{m_w - \Delta v_i \cdot \rho_w}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

其中:  $w_i$  为某级吸力下试样的重量含水率;  $\Delta v_i$  为从试验开始到该级吸力平衡时量管体积变化量;  $m_w$  和  $m_s$  分别为试验开始前饱和试样中水和土颗粒质量。

重量含水率与饱和度之间的转换关系为:

$$S_r = \frac{w G_s \rho_d}{G_s \rho_w - \rho_d} \quad (2)$$

其中:  $S_r$  和  $w$  分别为饱和度和重量含水率;  $G_s$  为土的比重;  $\rho_d$  和  $\rho_w$  分别为土和水的密度。

### 3.3 试验结果和分析

通过上述试验整理出了竖向压力作用下土-水特征曲线的实测数据,以下将对试验结果进行分析讨论。

Fredlund 等<sup>[12]</sup> 通过对土体孔径分布曲线的研究,用统计分析理论推导出适用于任何土类的土-水特征曲线表达式:

$$\theta = \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\frac{\Psi}{a})^n]\}^m} \quad (3)$$

其中:  $a$ 、 $n$ 、 $m$  均为拟合参数,  $a$  为与土体空气进入值有关的参数,  $n$  为与土体减湿率有关的参数,  $m$  为

与残余含水率有关的参数;  $\theta$  为体积含水率;  $\theta_s$  为饱和含水率;  $\Psi$  为基质吸力;  $e$  为自然对数的底数。

体积含水率与饱和度的关系如式(4)所示:

$$\theta = \frac{S_r e}{1 + e} \quad (4)$$

其中:  $\theta$  为体积含水率;  $S_r$  为饱和度;  $e$  为孔隙比。

将式(4)代入式(3)得饱和度与吸力之间的关系表达式:

$$S_r = \frac{1}{\{\ln[e + (\frac{\Psi}{a})^n]\}^m} \quad (5)$$

其中:  $S_r$  为饱和度,其它符号的意义同式(3)。

利用式(5),应用 origin 软件,采用最小二乘法对测得的土-水特征曲线数据进行拟合,拟合曲线见图 2,相应的参数  $a$ 、 $n$ 、 $m$  与残差平方和  $R^2$  如表 2 所示。由曲线拟合结果可知,使用式(5)即 Fredlund3 参数模型对本次试验土-水特征曲线拟合效果较好。

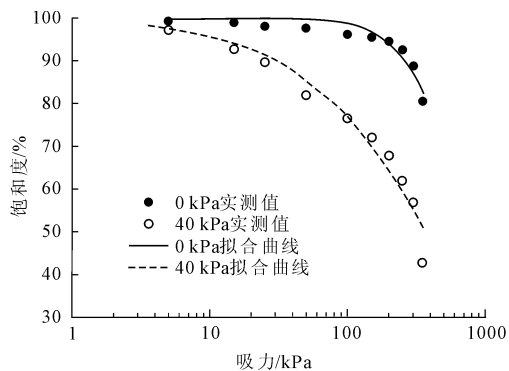


图 2 0 和 40 kPa 竖向压力下土-水特征曲线

表 2 竖向压力  $p$  下各参数值

$p$ /kPa	$a$ /kPa	$n$	$m$	$R^2$
0	211	2.51	0.44	0.89
40	243	1.42	1.70	0.96

由图 2 可以看出,各试样的饱和度随着吸力的增大而减小;竖向压力对高饱和度阶段(空气进入值之前)影响很大,无竖向压力条件下试样的土-水特征曲线在低吸力阶段较平缓,超过试样进气值后才逐渐变陡;竖向压力的存在使试样的进气值变大,空气较难进入土体;超过进气值后,竖向压力作用下曲线比较缓和,土样排水较慢,持水能力较强。

竖向压力使试样土颗粒被压密,土体结构更为均一,土体中的毛吸力增大,进而使得空气进入值增大,土体持水能力增强。应力作用改变了土体原有的孔隙结构,对土-水特征曲线有很大的影响。因此,在分析降雨入渗和蒸发等实际工程问题时必须

考虑不同应力状态土层的差别。

## 4 结 论

工程中的土体都会受到一定的外力作用,本文通过总结分析和试验研究,探讨了应力作用对土-水特征曲线的影响。研究结果表明:

(1) 竖向压力影响土-水特征曲线的进气值和减湿率,竖向压力越大,进气值越大,曲线越缓和,土体的持水能力越强;固结压力对土水特征曲线的影响与竖向压力相似。

(2) 竖向压力对高饱和度阶段的土水特征曲线影响很大,无竖向压力下的土水特征曲线在高饱和度阶段较平缓。

(3) 通过 Fredlund 3 参数模型对试验数据进行拟合,取得了良好的拟合效果,参数拟合结果验证了上述结论。

非饱和土的研究是一项复杂且费时的的工作,由于试验设备和时间的关系,本文试验研究内容较少,其结论还需要大量的试验进一步详细论证和探讨。

### 参考文献:

- [1] D G 弗雷德隆德, H 拉哈尔佐. 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: 56-58.
- [2] Fredlund D G, Xing A, Fredlund M D. The relationship of the unsaturated soil shear strength function to the soil-water characteristics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3):

440-448.

- [3] 龚壁卫, 吴宏伟, 王 斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1915-1918.
- [4] 李志清, 胡瑞林, 王立朝, 等. 非饱和膨胀土 SWCC 研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 730-734.
- [5] 刘艳红, 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.
- [6] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41-46.
- [7] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(6): 347-392.
- [8] Ng C W W, Pang Y W. Influence of stress state on soil-water characteristics and slop stability[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2000, 26(2): 157-166.
- [9] Sharma R S. Mechanical behavior of unsaturated highly expansive clays [D]. Oxford County: University of Oxford, 1998: 31-34.
- [10] Kawai K, Kato S, Karube D. The model of water retention cure considering effects of void ratio[C]//Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils, Singapore, 18 - 19 May, 2000, Singapore: Unsaturated soils for Asia, 2000: 329-334.
- [11] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123 - 1999. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999: 6-12.
- [12] Fredlund D C, Xing A Q. A equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(3): 521-532.