



# 室内吸力量测与上海软土土水特征

## Measurement of soil suction in laboratory and soil-water characteristics of Shanghai soft soil

叶为民<sup>1</sup>, 唐益群<sup>1</sup>, 崔玉军<sup>2</sup>

(1. 同济大学 岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 法国国立路桥大学, 巴黎 法国)

关键词: 吸力; 渗析(液相)法; 气相法; 土水特征; 上海软土

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)03-0347-03

作者简介: 叶为民(1963-), 男, 安徽枞阳人, 博士后, 教授, 博士生导师。主要从事环境地质、非饱和土力学研究与教学工作。

### 0 引言

土-水特征曲线表征了非饱和土中吸力与含水率或饱和度间的关系,其实质是以含水率形式表示的、与土中吸力变化相关的非饱和土的持水(即储水)能力。土水特征曲线是解释非饱和土工程现象的一项基本的本构关系,它将理论、实验测试与预测方法有机地联系起来<sup>[1]</sup>。同时,在工程实践中,由于非饱和土的试验研究既费时又费钱,非饱和土的工程性质是通过非饱和土的土水特征曲线与相应的饱和土参数来加以预测<sup>[2~7]</sup>。因此,土水特征研究在非饱和土力学研究中,具有重要的作用<sup>[8~10]</sup>。

上海地区分布有大量的软土地层。尽管其地下水位埋藏较浅,年平均水位埋深一般为 0.5~0.7 m(上海工程建设规范“岩土工程勘察规范(DGJ08-37-2002)”),但对于地下工程施工过程中的降水作业区、地面以上的路基堤坝、以及沿江近海地段的因潮汐等引起的地下水位波动带等,非饱和土仍大量存在。因而,在上海地区开展非饱和土的研究,同样具有非常重要的实际意义。

胡展飞等人<sup>[11~12]</sup>在论述降水预压加固深基坑底部饱和软土机理的基础上,提出了相应的计算公式,工程实例的实测结果表明,降水预压对提高深基坑工程的稳定性起到了明显的效果。通过原状土与重塑土的室内试验,研究了上海地区软土强度参数  $c$ 、 $\phi$  值随含水率的变化规律。这实质上便是土在非饱和状态下,吸力与含水率之间的一种表现形式。谢华昌等人<sup>[13]</sup>结合上海地区罗山路延长线工程,现场实测了土中张力与含水率之间的关系。

在介绍渗析(液相)法与气相法的基础上,对上海地区软土(粉质粘土、粘质粉土)的土水特征进行了室内实验研究,获取了相应土层的土水特征曲线,并对所得土水特征曲线的基本特征进行了分析研究。

### 1 试验土的基本特性

本次试验所采用的土样取自上海市杨浦区。土性分别为褐黄色粉质粘土和灰色粘质粉土。其部分物理力学性质指标见表 1。

表 1 试验用土的部分物理力学性质指标

Table 1 Some physical and mechanical property indexes of tested soil specimen

| 试样编号   | 土名   | 层序 | 采集深度/m | 天然含水率/% | 孔隙比  | 粉粒/% | 粘粒/% |
|--------|------|----|--------|---------|------|------|------|
| SH 1-1 | 粉质粘土 | ②  | 1.5    | 28.3    | 0.95 | —    | —    |
| SH 8   | 粘质粉土 | ③  | 8.0    | 30.6    | 1.08 | 85   | 15   |

### 2 室内吸力量测

本次室内吸力量测,高吸力部分(4.2~309 MPa)采用气相法、低吸力部分(小于 2 MPa)采用渗析(液相)方法。气相法采用饱和盐溶液来控制用于放置土样的保湿器中的相对湿度,以最终控制土样中的吸力,如图 1。图中气压泵运行过程中产生的热量可以引起整个循环系统的温度上升 2~4℃<sup>[14]</sup>,本次实验采取增加溶液与气压泵之间的连接管长度,并将其放入 20℃ 左右的恒温水槽中的方法,以减少这一影响。

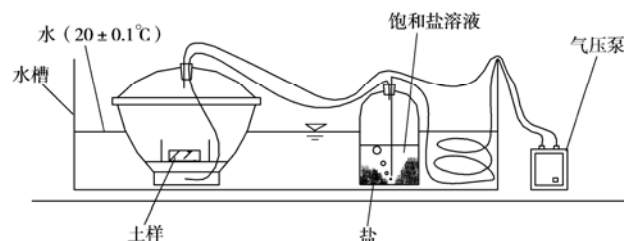


图 1 气相法试验装置示意图

Fig. 1 Schematic setup for vapor phase method

基金项目: 上海市 2004 年度重大科研课题资助项目 (04dz12007);  
上海市教委青年科学基金资助项目  
收稿日期: 2004-03-08

本文实验采用的盐溶液见表 2。

表 2 饱和盐溶液及与其对应的蒸汽吸力

| 饱和盐溶液                                           | 吸力/MPa |
|-------------------------------------------------|--------|
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                  | 4.2    |
| ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O            | 12.6   |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 24.9   |
| Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>               | 82     |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                  | 113    |
| LiCl                                            | 309    |

渗析(液相)方法是由 Lagerwerff<sup>[15]</sup>等生物学家(1961)提出的,Zur(1966)将这一方法引入土的研究中.Kassif 和 Ben Shalon(1971)<sup>[16]</sup>首先将其作为吸力控制方法应用于膨胀土的研究中.Komornik(1980)和 Delage 等人(1987)<sup>[17]</sup>在三轴试验中采用了该吸力控制方法。后来,Delage 等人(1990)又将其用于固结试验中的吸力控制。随着在土的研究中的应用,这项技术不断地得以完善。在固结试验中,Delage 等人(1992)采用了压力泵和闭路循环系统,以保证溶液的循环交换,以及对溶液与土样之间水量交换量实行更为精确的控制。Dineen 和 Burland(1995)提出了水量交换量的控制系统。Delage 等人(1998)<sup>[18]</sup>利用 NaCl 校对方法,将渗析法的最大量测值提高到了 10 MPa,这便大大地扩展了渗透方法的适用范围。

渗析技术的试验装置见图 2。存在于土样与聚乙二醇(Polyethylene glycol,简称 PEG)溶液之间的半渗透膜只允许水分子通过,而超过半渗透膜孔径的大分子量的 PEG 溶质分子无法通过。当土样中的吸力与 PEG 溶液中吸力不一致时,在吸力差的作用下,水分子在半渗透膜的两侧移动,直到土样与溶液中的吸力达到平衡。因此,实际上 PEG 溶液的浓度决定了试样中的吸力大小,吸力平衡时 PEG 溶液所对应的吸力即为此时半渗透膜中土样中的吸力。

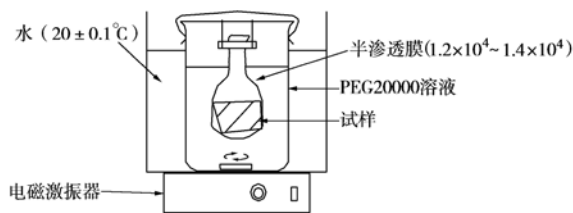


图 2 渗析法试验装置示意图

Fig. 2 Schematic setup for osmotic test

本次试验采用 PEG 20000 溶液和半渗透薄膜(允许通过的最大 PEG 分子为  $1.2 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4$ )进行吸力控制。该试验装置是在 Delage 等人(1995)的实验装置基础上改进而来的,其特点是在温度为 20℃左右的恒温室内,将水化系统放入带有恒温调节的、 $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 的水槽中,这样可以将整个实验过程严格控制在温度为  $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$  的条件下进行,从而将温度对渗析作

用的影响减小到最低值。本次试验所使用的溶液浓度与所对应的吸力见表 3。

表 3 PEG20000 含量与相应的吸力

| Table 3 Brix of PEG 20000 liquids and respective suction |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 含量 Brix / %                                              | 25.6  | 22.0  | 15.0  | 7.4   | 2.4   |
| 吸力/MPa                                                   | 1.740 | 1.150 | 0.440 | 0.088 | 0.008 |

### 3 上海软土的土 - 水特征

由此得到的各土样吸力与饱和度关系如表 4,对应的土水特征曲线如图 3 所示。由该图所示的特征曲线可以看出,上海地区软土具有如下土水特征。

表 4 室内试验取得的吸力与饱和度关系

| Table 4 Relationship between suction and $S_r$ of soil specimen |         |       |
|-----------------------------------------------------------------|---------|-------|
| 吸力/MPa                                                          | 饱和度 / % |       |
|                                                                 | SH8     | SH1-1 |
| 0.008                                                           | 93.29   | 95.66 |
| 0.088                                                           | 75.49   | 89.27 |
| 0.440                                                           | 60.70   | 80.27 |
| 1.150                                                           | 49.12   | 67.37 |
| 1.740                                                           | 34.71   | 61.52 |
| 4.2                                                             | 21.40   | 42.29 |
| 12.6                                                            | 9.99    | 26.94 |
| 24.9                                                            | 6.66    | 22.24 |
| 82.0                                                            | 4.28    | 14.99 |
| 113.0                                                           | 4.27    | 13.71 |
| 309.0                                                           | 3.33    | 12.00 |

#### 3.1 进气值

理论上讲,进气值表征了引起土体内部最大孔隙中,产生减饱和(即‘进气’)所必须的水、气压力差。通过将土 - 水特征曲线中斜率恒定的部分延长并与饱和度 100%时的吸力轴相交,交点对应的吸力值即为进气值。本次试验所得上海地区软土(粉质粘土、粘质粉土)的进气值在 120 ~ 250 kPa,且随土体颗粒粒径的增大而减小。

#### 3.2 减饱和过程的分段性

图 3 所示的上海地区软土的减饱和过程具有明显的阶段特征,可分为三个阶段:边界效应段,过渡段和非饱和残余段。

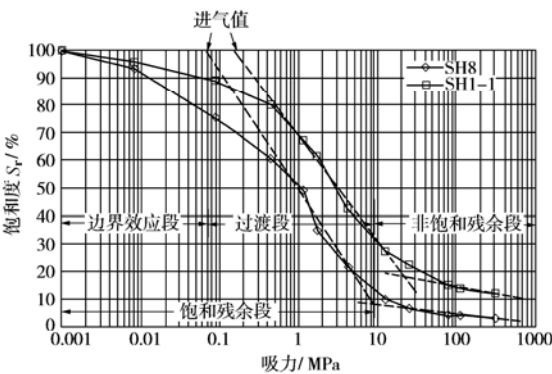


图 3 上海软土的土水特征曲线

Fig. 3 SWCC of Shanghai soft soil

在边界效应阶段,几乎所有土中的孔隙都充满水。在过渡阶段土会在进气值时减饱和。本阶段中,随着吸力增大,水呈液相流动,且土随吸力增加而迅速变干。孔隙和孔隙中水的连通性随着吸力值的增大而持续降低,最后吸力的大幅提高导致饱和度的变化速率趋缓。边界效应段和过渡段构成饱和残余段。处于该阶段内的土体,可通过重力作用排出其中的重力水。随减饱和过程的延续,当土体中液相开始不连续时,土体便进入了非饱和残余段。因此,饱和残余段代表一饱和度值,低于该值时,将会越来越难通过重力排除土样中的水。饱和残余段与非饱和残余段的交界点往往难于确定,但非饱和土特征曲线上,该特征点具有重要意义,因为它对应于很多植物的枯萎点。有学者证实,当饱和度接近残余状态时(即近似一常量),吸力会沿着土-水特征曲线增加而渐近于无穷大。

图3表明,土体颗粒越粗,重力排水时其减饱和速率变越大。反之,土体中细颗粒含量越高时,其持水能力便越强。显然,特征曲线的分段性研究,对于指导控制饱和土体中的工程降水、降水加固、气压法施工等地下工程施工是非常有益的。

## 4 结 语

实验室中渗析(液相)法(小于2 MPa)与气相法(从4.2~309 MPa)的结合,可以完成整个吸力范围内土的土-水特征曲线的量测。采用渗析(液相)法与气相法的结合获取了上海地区软土(粉质粘土、粘质粉土)的土水特征曲线。上海地区软土(粉质粘土、粘质粉土)的进气值在120~250 kPa,随土体颗粒粒径的增大而减小。上海地区软土的减饱和过程具有明显的阶段特征,可分为三个阶段:边界效应段,过渡段和非饱和残余段。

本文实验工作是在法国国立路桥大学土力学实验中心(CERMES/ENPC)完成的,在此表示衷心的感谢。同时感谢该实验中心的Emmanuel主任、实验员Dominique先生的帮助,及其他作者还有:黄雨,董炳炎,一并附志。

## 参考文献:

- [1] Lee Barbour. The soil water characteristic curve: a historic perspective [A]. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium[C]. 1998.
- [2] Fredlund D G, Anqing Xing. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Can Geotech J, 1994, 31: 521 - 532.
- [3] James M Tinjum, Craig H Benson, Lisa R Blotz. Soil-water characteristic curve for compacted clays [J]. J of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 1997, 123(11): 1060 - 1069.
- [4] Jean-Marie Fleureau, Siba Kheirbek-Saoud, Ria Soemiro, Said Taibi. Behavior of clayey soils on drying-wetting paths [J]. Can Geotech J, 1993, 30:287 - 296.
- [5] Mualem Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas [M]. Madison, Wis: American Society of Agronomy. 1986: 799 - 823.
- [6] 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]. Geotechnique, 1999, 49(2): 143 - 159.
- [7] Vanapalli S K, Fredlund D G, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction [J]. Can Geotech J, 1996, 33(3):379 - 392.
- [8] Cui Y J, Delage P. Yielding and plastic behavior of an unsaturated compacted silt [J]. Geotechnique 1996, 46(2): 291 - 311.
- [9] Komornik A, Livneh M, Smucha S. Shear strength and swelling of clays under suction [A]. Proc of the 4th Int Conf on Expansive Soils[C]. Denver, Colorado, 1980: 206 - 226.
- [10] Van Genuchten, M Th. A closed form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci Am J, 1980, 44:892 - 898.
- [11] 胡展飞. 降水预压改良坑底饱和软土的理论分析与工程实践[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 27 - 30.
- [12] 胡展飞, 傅艳蓉. 基于不同初始含水率的软粘土抗剪强度的试验研究[J]. 上海地质, 2001,77: 38 - 42.
- [13] 谢华昌, 吴海平, 凌建明. 湿度和吸力对处治土路基回弹模量的影响[J]. 中国公路学报, 14(增): 19 - 21.
- [14] Duilio Marcial, Pierre Delage, Yujun Cui. On the high stress compression of bentonites [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39: 812 - 820.
- [15] Lagerwerff J V, Ogata G, Eagle H E. Control of osmotic pressure of culture solutions with polyethylene glycol [J]. Science, 1961, 133:1486 - 1487.
- [16] Kassif G, Ben Shalom A. Experimental relationship between swell pressure and suction [J]. Geotechnique, 1971,21(3):245 - 255.
- [17] Delage P, Suraj de Silva, G P R De Laure E. Un nouvel appareil triaxial pour les sols nonsatures [A]. Proceedings of the 9th European Conference on soil mechanics and foundation Engineering[C]. Dublin, 1987, 1:25 - 28.
- [18] Delage P, Howat M, Cui Y J. The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay [J]. Engineering Geology, 1998, 50 (1-2): 34 - 48.