

上海软土土水特征的室内试验研究

叶为民¹, 白云², 金麒¹, 陈宝¹, 崔玉军³

(1. 同济大学岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 上海城建集团, 上海 200023; 3. 法国国立路桥大学, 巴黎)

摘要: 详细介绍了滤纸法、渗析法与气相法 3 种室内土样吸力量测方法, 并采用这 3 种方法获取了上海浅层②₁ 层土在 0~1400 kPa 范围以及全吸力范围上的土水特征曲线。由此可得以下结论: ①明确上海第②₁ 层软土的进气值在 110~250 kPa 之间; ②上海第②₁ 土层的残余饱和度对应的吸力值约为 20 MPa; ③上海地区软土的减饱和过程具有明显的阶段特征; ④低吸力范围内, 上海软土土水特征曲线存在明显的滞后性。

关键词: 吸力; 滤纸法; 渗析法; 气相法; 土水特征曲线

中图分类号: TV411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0260-04

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、非饱和土力学教研工作。

Lab experimental study on soil-water characteristics of Shanghai soft clay

YE Wei-min¹, BAI Yun², JIN Qi¹, CHEN Bao¹, CUI Yun-jun³

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Urban Construction Group, Shanghai 200023, China; 3. CERMES, Ecole National des Ponts et Chaussées, France)

Abstract: The filter paper method, osmotic method and vapor phase technique for measuring soil suction were introduced. The soil water characteristics curves of the typical Shanghai soil (layer ②₁) in a suction range of 0~1400 kPa and a full suction range were obtained using these three lab techniques. From the soil-water characteristic curves obtained, it is clear that, the air-enter value for the testing soil is about 110~250 kPa, the residual saturation degree value is about 20 MPa, the SWCC for desorption process of Shanghai soil shows clearly in step-phase, and for the lower suction range (0~1400 kPa), the soil water characteristics curves for Shanghai soft clay shows significantly in hysteretic loop.

Key words: suction; filter paper method; osmotic method; vapor phase technique; soil water characteristic curve (SWCC)

0 引言

非饱和土分布十分广泛: 干旱与半干旱地区表层土是严格意义上的非饱和土; 土坡、土坝、路基填土及填埋场中隔水土层大都处于非饱和状态; 膨胀土、湿陷性土及港口海岸工程中遇到的地下水位以上的海相沉积土均属于非饱和土范畴。可见, 对非饱和土的研究具有很高的工程实践价值^[1]。

土水特征曲线(SWCC)是指非饱和土中吸力 ψ ($u_a - u_w$)和重力含水率 w (g_w / g_s)、体积含水量 θ (V_w / V)或饱和度 S (V_w / V_v)之间的关系。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。它是用来解释非饱和土性状的主要本构关系, 将理论、实验测试与预测方法有机地联系起来^[2]。土水特征曲线对非饱和土的意义就如同描述孔隙比和有效应力之间关系的固结曲线对饱和土的意义一样^[3]。通过土水特征曲线和常规的饱和土参数, 可用理论和经验的关系来模拟和预测非饱和

土的参数, 如渗透系数和抗剪强度等^[4~7]。这一过程对工程实践者很有吸引力, 因为严格的非饱和土室内试验是很困难、很耗时的, 而且费用也高。

与固结曲线中分成压缩曲线和膨胀曲线相类似, 土水特征曲线也可由含水率变化的规律来分为干燥(脱水)和浸湿(吸水)两种曲线。土水特征曲线是存在滞后性的, 也就是说, 对于一个特定的含水率, 干燥过程的吸力要高于浸湿过程的吸力^[8]。

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^[9], 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, 同样具有重要的实际意义^[1]。

基金项目: 上海市 2004 年度重大科研课题(04dz12007); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目; 上海市岩土工程重点学科
收稿日期: 2004-12-15

胡展飞等^[10, 11]对深基坑底部饱和软土的降水预压加固机理, 以及原状土与重塑土的室内试验结果进行了研究, 探讨了上海地区软土强度与含水率之间关系。谢华昌等^[12]通过室内试验和试验路基测试, 建立了上海浦东某路基处治土回弹模量与饱和度以及张力与饱和度之间的关系, 通过土张力的现场测试, 并利用上述两个关系可以预估路基回弹模量。结果表明, 随着张力减小, 饱和度增大, 处治土路基回弹模量显著减小。叶为民等^[1]采用渗析(液相)法(低吸力段)与气相法(高吸力段)获取了上海地区浅部特征土层减饱和过程的土水特征曲线, 研究了相应的土水特征。

本文在介绍滤纸法、渗析(液相)法与气相等室内吸力量测方法的基础上, 对上海地区②₁粉质粘土的土水特征进行了室内试验研究, 获取了相应土层的土水特征曲线, 并对其基本特征进行了分析研究。

1 试验土样的物理力学性质指标

试验土样为上海地区第②₁层土, 见表1。

表1 土样的部分物理性质指标

Table 1 Some physical properties of soil specimen								
层序	土名	取样深度/m	w /%	ρ / (g · cm ⁻³)	G _s	w _p /%	w _L /%	e
② ₁	粉质粘土	1.5~1.8	28.3	1.95	2.73	20.9	35.6	0.95

2 吸力量测方法

土水特征曲线往往是通过量测土体不同含水率所对应的吸力来获得的。非饱和土中吸力测定方法中, 滤纸法简便实用, 渗析法与气相法安全方便, 控制吸力范围大, 效果可靠。

2.1 滤纸法

滤纸法是由Gardner (1937) 最先用于测定土的吸力。该方法认为, 当滤纸与被测土之间水分迁移达到平衡后, 只要知道滤纸含水率和自身吸力间的关系, 通过量测滤纸含水率就可以得到被测土样的吸力。当滤纸与被测土直接接触时, 吸力为基质吸力; 当滤纸与土不相接触时, 吸力为总吸力。此后, 许多学者对滤纸法进行了大量的研究^[13] (Mc Queen和Miller, 1968; Al-Khafaf和Hanks, 1974; Mc Keen, 1980; Hamlin, 1981; Chandler和Gutierrez, 1986; Chandler等, 1992; Harrison和Blight, 1998等)。

本试验采用Whatman No.42定量分析滤纸。此滤纸率定曲线^[4]已得到非饱和界的广泛认同 (见图1)。基质吸力 ψ 与滤纸含水率 w_f 间关系式^[2]为

$$\begin{cases} \log \psi = 2.909 - 0.0229w_f, (w_f \geq 47) , \\ \log \psi = 4.945 - 0.0673w_f, (w_f < 47) . \end{cases} \quad (1)$$

实际量测时, 需将预先准备好的三张滤纸夹入两

块呈圆饼状的被测土样之间, 呈“三明治”状, 再将土样整体密封, 放在密封良好的储罐中恒温 (20±1℃) 保存。以上操作过程应熟练、迅速, 以减少操作过程对土样含水率的影响。待土样和滤纸间水份交换达到平衡后打开土样, 迅速取出滤纸, 采用精度为0.0001 g的天平量称量其重量; 再将该滤纸放入110±5℃的烘箱中烘烤24 h后, 称量烘干后的滤纸重量。以获取滤纸平衡时的含水率, 根据滤纸的率定曲线得到对应的吸力, 即被测土样的吸力值。

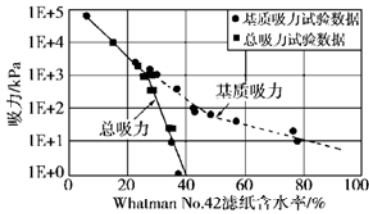


图1 Whatman No. 42 滤纸率定曲线^[4]

Fig. 1 Calibration curve of Whatman No. 42^[4]

2.2 渗析法

1961年Lagerwerff等^[8]首先在生物学上应用渗析技术, 后来Zur等^[14]将渗析技术用于土壤学及岩土力学中。其测定非饱和土中吸力的基本原理是采用半透膜将土样与聚乙二醇 (Polyethlen Glycol, 简称PEG) 隔开, 水分子可通过半透膜在土样与PEG溶液间自由交换, 而超过半透膜孔径的大分子量的PEG溶质分子无法通过。当土样与PEG溶液中吸力不同时, 在吸力差作用下, 水分子在半透膜的两侧移动, 直到土样与溶液中的吸力达到平衡。通过称量土样重量的变化, 求得对应吸力下的土样含水率。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透膜中土样中的吸力。

渗析法测定的吸力范围由PEG溶液的饱和浓度控制。采用PEG20000溶液, 吸力可达6.3 MPa; 采用PEG4000或PEG1000, 吸力可达到12.6 MPa。本试验采用PEG20000, 相应的半透膜采用MWCO (阻隔分子大小) 为14000的半透膜, 其渗透系数为5×10⁻⁹ m/s。

PEG 溶液浓度越高, 渗透吸力越大。用去离子水配置不同吸力下的PEG 溶液, 并加入少量青霉素, 消除土样中细菌对半透膜的侵蚀。再将其放在电磁振荡器上搅拌, 以维持PEG 溶液的均匀程度并加速土样和溶液间吸力平衡进程。由于PEG 纯度不同及水分蒸发, 试验前及试验过程中, 需用折射计调整溶液浓度。便捷式折射计是通过Brix 指数直接测定PEG 溶液浓度。Brix 指数与吸力 s 间的关系式^[13]为

$$B_r = \frac{90}{\sqrt{11/s + 1}} \quad (2)$$

本文试验采用Spectra/Por 4半透膜, 使用前将干燥状的半透膜在去离子水中浸泡30 min以上, 以消除半

透膜保护层对试验的影响。本次试验采用PEG20000溶液进行吸力控制。实际实验时,将切成重约10 g的土样在0.001精度的天平上称量重量,并放入半透膜,悬挂在PEG溶液中,再用聚乙烯薄膜封好烧杯,减少PEG溶液中水分的蒸发。最后,将烧杯放入恒温($20\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)水槽中,并通过电磁振荡器搅拌,以保持PEG溶液的均匀,如图2。该试验装置是在Delage等、叶为民等^[1]的实验装置基础上改进而来的。

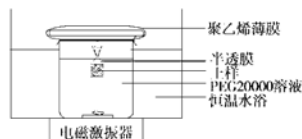


图2 渗析试验装置图

Fig. 2 Setup of osmotic technique

2.3 气相法

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3。

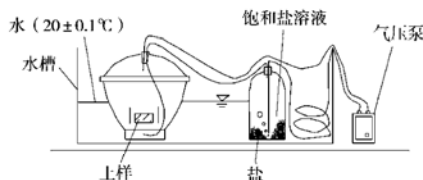


图3 气相法试验装置示意图^[1]

Fig. 3 Schematic map of vapor phase method^[1]

3 试验结果与分析

3.1 土水特征曲线

试验得到典型上海第②₁层土的低吸力部分的干燥与吸湿过程的土水特征曲线如图4所示,全吸力范围的干燥过程土水特征曲线见图5。

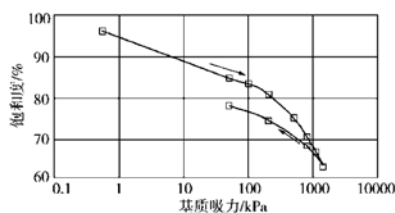


图4 上海软土的土水特征曲线（低吸力范围）

Fig. 4 SWCC of Shanghai soft soil (for low suction)

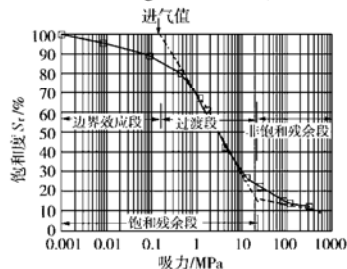


图5 上海地区浅部土层土水特征曲线

Fig. 5 SWCC of Shanghai soft soil (layer ②₁)

3.2 试验土层的土水特征

(1) 低吸力范围的回滞特征

由图4可以看出,上海第②₁层土的低吸力部分的干燥(脱水)过程和吸湿(吸水)过程曲线间存在滞后性。即同温度条件下,土样的吸湿和脱水过程中土的土水特征是不同的。直接反映是,对一特定的含水率,干燥过程曲线对应的吸力要高于吸湿过程的吸力。这可能是由于低吸力范围内上海第②₁层土有以下特征:①存在大小不均匀的孔隙。大孔隙较易进水和脱水,小孔隙则反之,因此脱水过程中小孔隙内残留的水使含水率要高于吸水时的含水率;②存在“瓶颈效应”,即连通孔隙的喉道与孔隙之间的尺寸差异(即“瓶颈”,如图6),导致脱水时含水率高、吸水时含水率低;③存在“雨点效应(BEAR J)”,即脱水与吸水过程决定着水-气分界面接触角的大小,脱水时小、吸水时大,接触角大小的不同就决定了水的滞留特性的不同。

(2) 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的进气值在180 kPa左右。这与叶为民等^[1]得到的上海地区软土(粉质粘土、粘质粉土)的进气值在120~250 kPa结论相一致。

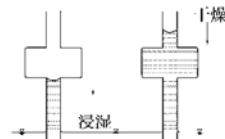


图6 瓶颈效应示意图

Fig. 6 Schematic map of ink neck effects

(3) 残余饱和度

残余饱和度 S_r 可认为是当液相开始变得不连续时的饱和度,它代表了一个含水率值。当减饱和到此值后,土样中的水会越来越难于通过吸力的增大而排出,即吸力对减饱和的作用大幅下降了,而此后只有通过蒸发才能有效排水。残余饱和度点往往难于确定。

传统意义上,土水特征曲线被定义在0~1500 kPa的吸力范围内。吸力1500 kPa具有重要意义,称为“残余吸力”,因为它对应于很多植物的枯萎点^[6]。同时根据残余饱和度可获取数值模型中的有关参数,用以预测非饱和土的渗透性或抗剪强度等。然而,该随意确定的吸力值并不能准确对应于实际的残余饱和度。有学者证实,含水率接近残余饱和度时(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^[6]。当应用包含整个吸力范围(即0~10⁵ kPa)的土水特征

曲线时,可以通过作图方法确定残余饱和度(图5),该方法类似于在一个变形-时间对数关系表上寻找100%的固结点。作法是先将曲线中部的直线段延长,再从 10^5 kPa沿曲线作另一条延长线,则残余饱和度可定义为上述两条延长线的交点对应的饱和度(图5)。显然,土性不同,残余饱和度便不相同,本次试验土的残余饱和度对应吸力值约为20 MPa。

(4) 减饱和过程的分段性

图5所示的上海地区软土的减饱和过程可分为:边界效应段,过渡段和非饱和残余段^[6],具有明显的阶段特征。这一点也与叶为民等^[1]所得的结论一致。

4 结 论

在低吸力范围(0~1400 kPa)内,上海浅部第②₁土层的土水特征存在明显的滞后性,这主要是由于土体自身的微观结构造成的。全过程土水特征曲线表明,上海第②₁土层的进气值在180 kPa左右。

非饱和土的残余饱和度对应于很多植物的枯萎点,并可用以预测非饱和土的渗透性或抗剪强度等参数。残余饱和度数值上与土性等有关,本次试验用上海第②₁土层的残余饱和度对应的吸力值约为20 MPa。

上海地区软土的减饱和过程具有明显的阶段特征,可分为3个阶段:边界效应段,过渡段和非饱和残余段,边界效应段和过渡段构成饱和残余段,残余段后期,吸力沿着土-水特征曲线增加而渐近于无穷大。

致谢: 本文部分实验工作是在法国国立路桥大学土力学实验中心(CERMES/ENPC)中完成的,该实验中心的 Anh-Minh TANG 博士和 Grégoire PRIOL 博士给予了很大的帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 叶为民,唐益群,崔玉军. 室内吸力量测与上海软土土水特征[J]. 岩土工程学报, 2005, **127**(3): 347 - 349. (YE Wei-min, TANG Yi-qun, CUI Yu-jun. Measurement of soil suction in laboratory and soil-water characteristics of Shanghai soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **127**(3): 347 - 349.)
- [2] LEE Barbour. The soil water characteristic curve: a historic perspective[C]// Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium. 1998.
- [3] FREDLUND D G, XING An-qing. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Can Geotech. 1994, (31): 521 - 532.
- [4] LEONG E C, HE L, RAHARDJO H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. Geotechnical Testing, 2002, **25**(3): 322 - 333.
- [5] TINJUM James M, BENSON Craig H, BLOTZ Lisa R. Soil-water characteristic curve for compacted clays[J]. Journey of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 1997, **123**(11): 1060 - 1069.
- [6] FREDLUND Vanapalli 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] LAGERWERFF J V, OGATA G, EAGLE H E. Control of osmotic pressure of culture solutions with polyethylene glycol[J]. Science, 1961, **133**: 1486 - 1487.
- [9] DGJ08 - 37 - 2002 岩土工程勘察规范[S].
- [10] 胡展飞. 降水预压改良坑底饱和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. (HU Zhan-fei. Research on strengthened unsaturated soft soils by dewatering and its engineering practice[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(3): 27 - 30.)
- [11] 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. (HU Zhan-fei, FU Yan-rong. Experimental study of the shear strength of soft soil with different initial water content[J]. Shanghai Geology, 2001, **77**: 38 - 42)
- [12] 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, 2001, **14**(增): 19 - 21. (XIE Hua-chang, WU Hai-ping, LING Jian-ming. Effects of moisture and suction on rebounding modulus of improved soil embankment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, **14**(Sup): 19 - 21.)
- [13] 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.
- [14] Zur. Osmotic control of the matric soil-water potential: I. soil-water system[J]. Soil Science, 1966, **102**(6): 394 - 398.