

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.03.010

土水特征的台式离心机法试验研究

孙雨婷¹, 谭晓慧¹, 胡木子², 肖颖¹

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥新站高新技术产业开发区管委会, 安徽 合肥 230013)

摘要:文章采用台式离心机试验法对合肥市非饱和黏性土进行离心试验, 获得土样的吸力与含水率的关系; 以 van Genuchten 模型为基础, 采用 MATLAB 中的 lsqcurvefit 函数对试验结果进行曲线拟合, 获取黏性土样的土水特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC); 通过 15 组离心试验得到试验土体 SWCC 拟合参数的概率统计特征。研究表明: 台式离心机试验法是合理可行的, 采用该方法可以快速地测量黏性土体在脱湿过程的 SWCC, 有效地缩短当前常用土水特征试验所需的试验时间; 离心机试验得到的脱湿过程 SWCC 与渗析法试验得到的吸湿过程 SWCC 具有良好的对应关系。

关键词:土水特征曲线(SWCC); 台式离心机试验法; van Genuchten 模型; 曲线拟合; 非饱和土
中图分类号:TV41 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)03-0347-05

Study on measuring soil water characteristic curve by desktop centrifuge test method

SUN Yuting¹, TAN Xiaohui¹, HU Muzi², XIAO Ying¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Hefei Xinzhan High-tech Industrial Development Zone Management Committee, Hefei 230013, China)

Abstract: In this paper, the desktop centrifuge test method was conducted on unsaturated clay samples in Hefei City to obtain the relationship between matric suction and water content of soil samples. Based on the van Genuchten model, curve fitting was performed on the test results to obtain the soil water characteristic curve(SWCC) by using the lsqcurvefit function in MATLAB, and the probability statistical characteristics of fitting parameters of SWCC of fifteen unsaturated clay samples were obtained by using the centrifuge test method. Results show that the desktop centrifuge test method is reasonable and feasible, and the method can quickly measure the SWCC of clays during dewetting and effectively shorten the test time required for obtaining a SWCC for clays. The SWCC of dewetting process obtained by the centrifuge method has good correspondence with the SWCC of moisture absorption process obtained by the osmotic method.

Key words: soil water characteristic curve(SWCC); desktop centrifuge test method; van Genuchten model; curve fitting; unsaturated soil

土水特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC)表示非饱和土的基质吸力与含水率的关系, 是非饱和土力学研究中的一条重要曲线, 对于研究土体的变形、强度等特征具有重要影响, 有助于认识与解决非饱和土问题。测定

SWCC 的方法很多, 常用的方法有压力板法、湿度计法、张力计法、渗析法、滤纸法、热传导传感器法、蒸汽平衡法、Tempe 仪测试法及 Dew-point 电位计法等。其中, 渗析法与滤纸法由于其试验设备简单、操作方便而越来越受到重视。上述方

收稿日期:2023-10-13; 修回日期:2023-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41972278)

作者简介:孙雨婷(1999—), 女, 吉林吉林人, 合肥工业大学硕士生;

谭晓慧(1971—), 女, 安徽宣城人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: tanxh@hfut.edu.cn.

法的共同特点是测量吸力需要较长的时间^[1-3]。例如,采用渗析法与滤纸法测量 1 个吸力值大约需要 10 d,进行 1 组试验一般需要 60~90 d;采用蒸汽平衡法,土样平衡需要约 90 d。

为了减少试验时间,提高试验效率,许多研究者对 SWCC 的测定方法进行改进。文献[4]采用蒸发法和冷镜露点法测量大吸力范围的 SWCC,并利用收缩曲线对土体变形进行修正;文献[5]通过在压力板提取器上增加储水装置、数据采集系统和气泡冲刷装置对压力板法进行改进,以缩短试验时间;文献[6]开发了一种新型全自动系统,将采样方法与一种连续加压法结合测定无黏性土的 SWCC,得到的曲线与传统多步流出法测得的 SWCC 重合率高,但花费的时间只有后者的 10%,证明这种新型系统可以快速、准确地测定 SWCC;文献[7]通过改进压力板提取器法中流出量计算方法,避免了因操作过程中损失部分土体和陶瓷板下气泡积聚导致的测量误差。这些改进方法缩短了测量时间,提高了试验准确度,但试验需要的仪器增多,操作复杂,成本高。

文献[8]通过调整离心机转速,测定不同离心力作用下土样的含水量,得出土体的 SWCC。然而,由于老一代离心机转速低,能够测量的吸力范围有限,在 20 世纪早期土水特征试验中较少使用离心机方法。随着离心技术的改进,研究者再次关注获得 SWCC 的离心方法,采用离心机法来进行土水特征试验^[9-11],但通常采用的离心机体积较大,购置成本相对较高。目前,台式离心机由于其体积小、成本低而得到广泛使用,但采用台式离心机来测定土样 SWCC 的相关研究报道很少。

土体沉积环境、矿物组成及试验条件等各种差异,土体的性质参数具有很大的变异性,因此,必须考虑土体参数的变异性,采用以概率论及数理统计为基础的可靠度方法对土体工程进行稳定性分析与概率极限状态设计,而进行可靠分析的前提是获取土体性质参数的概率统计特征。对于土体物理、力学性质参数的变异性,相关研究成果较丰富^[12-15],但对于土体水力参数(如 SWCC 拟合参数)变异性的研究则相对较少。

因此,本文以合肥市非饱和黏性土为试验对象,研究采用台式离心机测定土样 SWCC 的方法,并在试验研究的基础上进行 SWCC 拟合参数的统计分析,获取 SWCC 拟合参数的统计特征。

1 SWCC 简介

SWCC 是非饱和土力学中的一条基本性质

曲线,用于描述非饱和土的基质吸力与质量含水率、体积含水率或饱和度之间的关系。其实质都是以含水率形式表示的与土体吸力变化相关的非饱和土的持水能力,因此纵坐标无论是饱和度还是体积含水率,都代表着非饱和土中含水率的变化情况,其规律是一致的,都可根据含水率的变化规律分为干燥(脱水)和浸湿(吸水)2 种曲线。一般地,土水特征具有回滞性,即脱湿与吸湿曲线不重合,两者能形成一个回滞环,如图 1 所示。

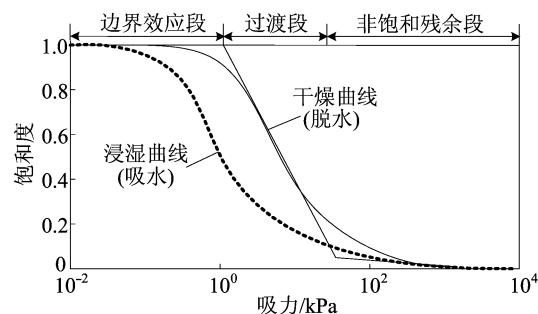


图 1 典型的 SWCC

SWCC 可以通过某种数学模型来表示,即采用某种特定型式的函数来表示试验所得的吸力与含水率或饱和度的关系。文献[16]详细评述了多种 SWCC 拟合模型,其中 van Genuchten 模型由于其模拟的吸力范围广、拟合参数具有明确的物理意义而被广泛使用。本文采用 van Genuchten (1980)模型对试验结果进行 SWCC 拟合。当采用质量含水率表示土体中的含水程度时,该拟合模型的表达式为:

$$w = w_r + \frac{w_s - w_r}{[1 + (\psi/a)^n]^m} \quad (1)$$

其中: w 为土体的质量含水率; w_s 、 w_r 分别为土体的饱和含水率、残余含水率; ψ 为土体的吸力; a 、 n 、 m 为 SWCC 曲线拟合参数, $m=1-1/n$ 。

2 离心机法试验

通过对土体在不同含水率条件下测定其吸力,即可得到吸力与含水率的对应关系,基于式(1)进行曲线拟合,即可得到试验土体的 SWCC。

2.1 试验原理

用离心机测定土样吸力的基本原理是把重力场装置搬到离心力场^[10]。在重力场中,孔隙中水体受到重力加速度的作用;在离心场中,重力加速度的作用由离心加速度代替。采用离心机法获取 SWCC 的示意图如图 2 所示,离心管中的土样围绕轴心在离心力作用下高速旋转。

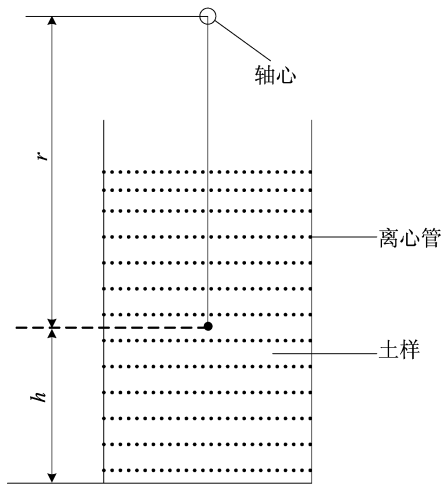


图 2 离心机法原理示意图

在离心机法试验中,土体的吸力水头 H 表达式^[10]为:

$$H = (r - 0.5h)h\omega^2/g \quad (2)$$

其中: r 为土样中心点的运转半径,即离心半径; h 为土样高度的 $1/2$; ω 为角速度, $\omega = 2\pi n_0$, n_0 为离心机的转速; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。式(2)中长度的单位为 cm ,则将角速度与重力加速度统一量纲得:

$$H = (r - 0.5h)h \frac{(2\pi n_0/60)^2}{980} = 1.118 \times 10^{-5} (r - 0.5h) h n_0^2 \quad (3)$$

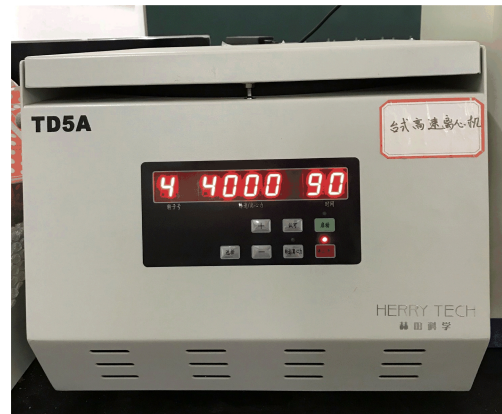
式(3)中 H 的单位为 cm ,其对应的吸力 ψ (单位为 kPa) 计算公式为:

$$\psi = 0.098H = 1.1 \times 10^{-6} (r - 0.5h) h n_0^2 \quad (4)$$

由式(4)可知,只需测量土样的离心半径及土样高度,即可得到在不同转速下土体的吸力。在测量土样吸力的同时,配合测定土样的含水率 w ,即可得到土样的 (w, ψ) 数据,再对这些试验数据进行曲线拟合,即可得到土样的 SWCC。

2.2 试验仪器

本文离心试验采用 TD5A 型台式离心机(上海赫田科学仪器有限公司),如图 3 所示,其最大离心半径为 16.5 cm ,最大转速为 4000 r/min ,在离心机法试验中可以测量的土样最大吸力为 547 kPa 。该离心机有 4 根离心管,因此一次可以同时 4 个土样进行离心试验;离心管的直径为 4 cm ,高为 17 cm 。与文献[9-10]相比,本文采用的离心机体积较小,离心管的体积也较小。为了能够使土样与离心管密切贴合在一起,定制特定尺寸的环刀来制作离心试验所需的土样,如图 4 所示。该环刀高 4 cm ,外径与离心管的内径相同。



(a) 离心机外立面



(b) 离心机转子

图 3 台式离心机



图 4 试验土样及定制的环刀

2.3 试验方案

以合肥市某工地的非饱和黄褐色黏性土为研究对象进行试验研究。在现场用钻机取 15 个土柱,每个土柱高约 20 cm ,用于进行土体基本性质及土水特征试验。在现场取样后,立即对土样进行密封及标记,运送至实验室后在恒温恒湿条件下保存^[17]。对每个土样分别进行 2 组平行试验,以减少偶然误差对试验结果的影响。为了验证采用离心机法测定 SWCC 的可行性,采用渗析法进行对比试验^[18]。

试验前,用特制的环刀切取原状土样,根据文献[19]的规定对土样进行饱和。土样达到饱和后,对环刀土样称质量,再将盛有土样的环刀放入

离心管,在恒温 20 °C 下进行离心试验。

一般地,SWCC 用半对数坐标表示。为了使试验结果能够较均匀地分布在半对数坐标系中,试验前设计离心机转速分别为 100、200、500、750、1 050、1 450、1 650、2 300、3 300、4 000 r/min。预试验表明,每级转速下离心约 90 min 后可以达到较好的离心效果,因此,本文试验在每级转速下离心 90 min。在每级转速下离心达到规定的时间后,用游标卡尺测定土样顶面及底面至旋转中心的距离,并换算得到离心半径及土样高度;同时,用电子天平测量环刀土样的质量;快速测量完毕后,即可在下一级转速下继续对土样进行离心试验,获取土样的吸力值 ϕ 。整个离心试验结束后,将土样烘干、称质量,并计算各级转速下土样的含水率 w 。这样,即可得到若干组 (w, ϕ) 数据。基于式(1)所示的 SWCC 模型,采用最小二乘法(具体由 MATLAB 语言中非线性拟合函数 lsqcurvefit 实现)对试验结果进行曲线拟合,即可得到试验土样的 SWCC。

3 试验结果分析

3.1 离心机法与渗析法试验结果的对比分析

通过 15 组离心试验,发现试验结果能较好地反映试验土体的土水特征。以 1# 土样为例,离心机法与渗析法试验、拟合结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,红色小圆点较好地分布在相应的拟合曲线周围,对应的拟合相关系数较高($R^2 = 0.96$),这表明采用台式离心机法获取土体的 SWCC 是可行的。

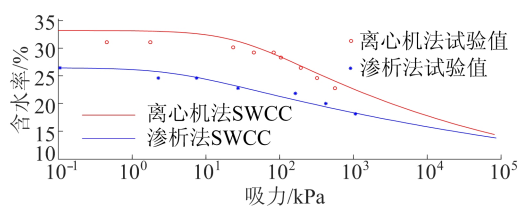


图 5 1# 土样离心机法与渗析法试验、拟合结果对比

由图 5 可知,离心机法与渗析法试验得到的 SWCC 具有良好的对应关系,这进一步验证了台式离心机法的合理性。在离心机法试验中,土样处于脱湿状态,而在渗析法试验中,土样处于吸湿状态,因此,图 5 中的拟合曲线能较好地反映 SWCC 的回滞性,与图 1 所示的一般规律较为一致。

从试验时间看,通过渗析法获取 1 条完整的 SWCC 大约需要 10 d,而通过台式离心机试验法

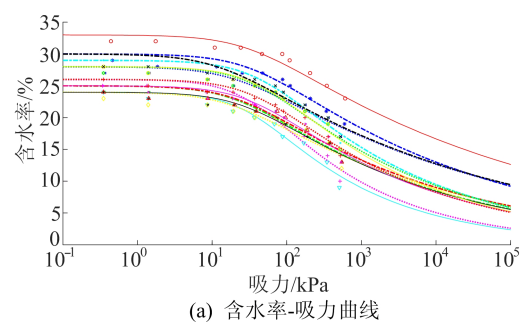
每隔 90 min 即可获得 1 个数据点,获得 1 条 SWCC 只需不到 1 d 的时间,因此,台式离心机法可有效缩短 SWCC 试验时间,提高试验效率。

3.2 SWCC 拟合参数的统计特征

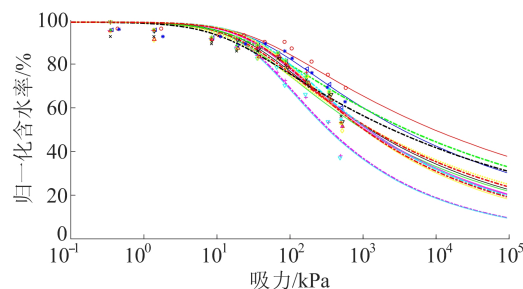
本文采用台式离心机法共进行 15 组试验,试验所得 (w, ϕ) 数据点及其拟合曲线如图 6 所示。图 6b 中,归一化含水率 w_n 的求解公式为:

$$w_n = \frac{w - w_r}{w_s - w_r} \quad (5)$$

从图 6 可以看出,各组试验所得的 SWCC 在一定范围内波动,具有明显的变异性。15 组试验 SWCC 的拟合参数及其统计特征见表 1 所列。



(a) 含水率-吸力曲线



(b) 归一化含水率-吸力曲线

图 6 15 组试验的数据点及其拟合曲线

表 1 15 组试验 SWCC 拟合参数及其统计特征

土样编号	a/kPa	n	w_s	R^2
1#	33.6	1.12	0.33	0.96
2#	38.1	1.15	0.30	0.95
3#	36.0	1.31	0.26	0.95
4#	36.1	1.31	0.24	0.96
5#	25.5	1.18	0.25	0.93
6#	25.0	1.17	0.24	0.93
7#	20.7	1.16	0.24	0.94
8#	22.2	1.17	0.25	0.95
9#	32.5	1.16	0.28	0.95
10#	34.2	1.19	0.25	0.95
11#	38.8	1.19	0.29	0.96
12#	38.5	1.20	0.28	0.96
13#	38.5	1.20	0.28	0.96
14#	20.6	1.15	0.30	0.92
15#	38.6	1.20	0.26	0.96
均值	31.4	1.19	0.27	0.95
变异系数	0.23	0.05	0.10	

表 1 中, R^2 为拟合相关系数。由于各组残余

含水率 w_r 的拟合结果均近似为 0,表 1 未列出 w_r 值。由表 1 可知:

1) 各组试验结果均具有较高的 R^2 ,再次表明采用台式离心机法测定 SWCC 是合理可行的。

2) SWCC 拟合参数的均值分别为 $\mu_a = 31.4 \text{ kPa}$, $\mu_n = 1.19$, $\mu_{w_s} = 0.27$ 。

3) 在 4 个拟合参数(a 、 n 、 w_s 、 w_r)中, a 的变异系数为 0.23,其变异性相对较大; n 的变异系数为 0.05,其变异性相对较小; w_s 的变异系数为 0.10,其变异性中等; w_r 的值为 0,不必考虑其变异性。参数 n 代表 SWCC 的斜率,其值与土样的粒径分布有关^[11]。本研究中 15 个土样的粒径分布大体相同,故 n 值较为接近,其变异性较小。

4 结 论

1) 试验研究表明,采用小型台式离心机来测定 SWCC 是合理可行的。离心机法试验得到的 SWCC(脱湿过程)与渗析法试验得到的 SWCC(吸湿过程)具有较好的对应关系。

2) 采用台式离心机法获取 SWCC 的优点是试验时间短、效率高。此外,采用小型台式离心试验测定 SWCC 所需的土样较少,制样方便。

3) 根据 15 组离心试验结果,分析试验土体 SWCC 拟合参数的概率统计特征,得到参数的均值及变异系数,这些参数能为非饱和土体工程的可靠度分析提供必要的输入参数。

4) 本文试验土体在离心试验过程中的体积变化不大。但对于膨胀土等非饱和土,试验过程中土样的体积可能有较大的变化,在后续研究中,需要考虑试验过程中土样体积变化对试验结果的影响。

[参 考 文 献]

[1] 李芃,谭晓慧,辛志宇,等. 确定渗析平衡时间的数值模拟方法[J]. 岩土力学,2017,38(11):3363-3370.

[2] 朱赞成,孙德安,田进. 高吸力高温下 2 种滤纸率定曲线及其应用[J]. 岩土工程学报,2014,36(6):1020-1027.

[3] ZHU J H, SU Z Y, ZHANG H Y. Soil-water characteristic curves and hydraulic conductivity of Gaomiaozi bentonite pellet-contained materials [J]. Environmental Earth Sciences, 2022, 81(3): 92.

[4] SATYANAGA A, RAHARDJO H, KOH Z H, et al. Measurement of a soil-water characteristic curve and unsaturated permeability using the evaporation method and the chilled-mirror method[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2019, 20(5): 368-374.

[5] WU J Q, LI H, WANG A M, et al. Improvement of experimental equipment based on the one-step outflow test and research on rapid determining SWCC[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 6696527.

[6] ALLOWAISY A, YASUFUKU N, ISHIKURA R, et al. Continuous pressurization method for a rapid determination of the soil water characteristics curve for remolded and undisturbed cohesionless soils[J]. Soils and Foundations, 2020, 60: 634-647.

[7] CHEN H, WEI C F, YAN R T, et al. On the determination of the soil-water characteristic curve using the pressure plate extractor [C]//Advances in Environmental Geotechnics: Proceedings of the International Symposium on Geoenvironmental Engineering. Berlin: Springer, 2010: 511-514.

[8] BRIGGS L J, MCLANE J W. The moisture equivalents of soils [M]. Washington, D. C. : Government Printing Office, 1907.

[9] ZOMBERG J G, MCCARTNEY J S. Centrifuge permeameter for unsaturated soils, I : theoretical basis and experimental developments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(8): 1051-1063.

[10] 潘宗俊. 膨胀土公路路堑边坡工程性状研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.

[11] KHIRE M V, SARAVANATHIIBAN D S. Centrifuge testing of unsaturated hydraulic properties of municipal solid waste[C]//GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. [S. l.]: American Society of Civil Engineers, 2012: 3487-3496.

[12] 祁小辉, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑不排水抗剪强度空间变异性的条形基础极限承载力随机分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1095-1105.

[13] 刘鑫, 王宇, 李典庆. 考虑土体参数空间变异性的边坡大变形破坏模式研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1078-1084.

[14] 蒋文华, 刘贤, 黄发明, 等. 考虑多参数空间变异性的降雨入渗边坡失稳机理及可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 900-907.

[15] 王景梅, 谢平. 考虑土性参数空间变异性的桩基可靠度分析[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(1): 112-119, 125.

[16] SILLERS W S, FREDLUND D G. Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(6): 1297-1313.

[17] 李芃. 合肥市非饱和黏土的空间变异性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.

[18] 沈梦芬, 谭晓慧, 李丹, 等. 渗析法确定土水特征曲线的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 241-245.

[19] 水利部水利水电规划设计总院, 南京水利科学研究院. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 11-13.

(责任编辑 张淑艳)