DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.11.013 2013,30(11):67-71

以瞬态方法测试马兰黄土土-水特征曲线试验研究

郭 龙[a],刘清秉[b],王菁莪[b],雷 雯[a]
(中国地质大学(武汉) a.工程学院; b.教育部长江三峡库区地质灾害研究中心,武汉 430074)

摘要:选取陕西省子长县原状马兰黄土为研究对象,通过瞬态脱水和吸水(TWRI)试验方法,结合 Van Genuchten(1980)土-水特征曲线模型和 Mualem(1976)水力传导函数模型对土样的水-力作用参数进行反演计算,并绘制土-水特征曲线。试验结果表明,土样在不同脱湿和吸湿路径状态下的土-水特征曲线具有明显的回滞效应,其中,脱湿路径的进气值与饱和体积含水量分别为26 kPa和48%,不同干湿路径下与孔径分布有关的参数变化较小。为验证TWRI试验结果的正确性,针对同一个土样,采用2 Bar体积压力板仪对其基质吸力和体积含水量的关系进行稳态试验。对比以上2种方法的试验结果,可见瞬态脱水和吸水试验方法在低吸力范围内(0~300 kPa)的试验结果与压力板仪试验结果吻合较好,且具有试验周期短,测试吸力范围大的特点。

关 键 词:非饱和马兰黄土;土-水特征曲线;瞬态脱水和吸水(TWRI)试验方法;体积压力板仪
中图分类号:TU431 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-5485(2013)11-0067-05

1 研究背景

我国是世界上黄土分布最广的国家之一,黄土广泛分布于我国西北等地区。该地区黄土在干旱、半干旱及地下水水位较低条件下,常处于非饱和状态,而非饱和土的基质吸力对土的力学性状方面起着十分重要的作用。以基坑工程为例,非饱和土地基的基质吸力对基坑的稳定性有很大的影响,由于降雨或管道漏水等因素使土中含水量增加,造成基质吸力消减,导致土体中的孔隙水压力上升,土体的抗剪强度降低,可能会发生基坑倒塌事故[1]。基质吸力与土中的含水量密切相关,因此,确定非饱和土变形与强度特征的关键问题之一就是确定其土-水特征曲线(SWCC)。此外,土-水特征曲线将理论、试验测试与预测方法有机地联系起来[2],可以从土-水特征曲线中获得土的渗透系数[3-4]、抗剪强度[5]等有关参数。因此,对黄土的土-水特征曲线进行测试研究,对于了解非饱和黄土的工程性质具有重要意义。

土-水特征曲线表征的是土的含水量与吸力之间的关系,是解释非饱和土工程现象的本构关系之一。含水量可以由质量含水量、体积含水量或者是饱和度表征,吸力可以由总吸力或基质吸力表征[6]。本文对研究区非饱和马兰黄土的基质吸力与体积含水量之间的相互关系进行试验研究,通过一种瞬态测量方法(TWRI)[7]测得其土-水特征曲线,并与体积压力板仪得到的结果进行对比分析,采用Van Genuchten土-水特征曲线模型对试验数据进行拟合,对比这2种不同测试方法的拟合效果。

2 试验仪器与方法

2.1 试验仪器

测量非饱和土的土-水特征曲线的试验技术有很多种,主要有体积压力板仪、Temple仪、滤纸法、Dew-point电位计、TDR探头以及GDS四维应力路径法等[8],它们在试验成本、复杂程度和测量范围上各有不同,且多是稳态的测试方法,测试周期比较长。与以上方法不同,美国科罗拉多矿业大学 Ning Lu 教授提出了一种土-水特征曲线的瞬态测量方法——TWRI测试方法。该方法的基本思路是通过物理试验测量土样的基质吸力从一个值变化到另一个值的过程中,土体孔隙水排出或吸入的量随时间的关系曲线,并以此曲线作为目标函数,结合 Richards 方程[9]对物理试验过程进行数值模拟,从而反算出土样的水-力相互作用参数。

收稿日期:2013-05-21;**修回日期**:2013-06-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41202199)
作者简介:郭 龙(1990-),男,湖北仙桃人,硕士研究生,主要从事岩土体性质和地质灾害防治方面的研究工作,(电话)15871738058(电子信箱)cougarlong@126.com。
通讯作者:刘清秉(1984-),男,安徽芜湖人,助理研究员,主要从事岩土工程性质方面的研究工作,(电话)13419681857(电子信箱)qingbing@civil.uwa.edu.au。

TWRI 瞬态测试方法通过轴平移技术改变和控制基质吸力,即改变土样内的空气压力,土样平衡时,其含水量就对应于某一基质吸力。而土的基质吸力等于压力表气压值。由于仅需要测量 2 级基质吸力变化过程中的瞬态排水和吸水过程数据,而不需要等待多级基质吸力的稳定,TWRI 方法可以在一周时间之内测得粉砂土、粉土和粉质黏土土样在脱湿和吸湿路径下的土 - 水特征曲线。

TWRI 测试系统包括压力控制系统、渗流压力室、流量测量系统、气泡排除系统和数据采集系统 5 个主要部分组成。TWRI 测试系统总装图见图 1。

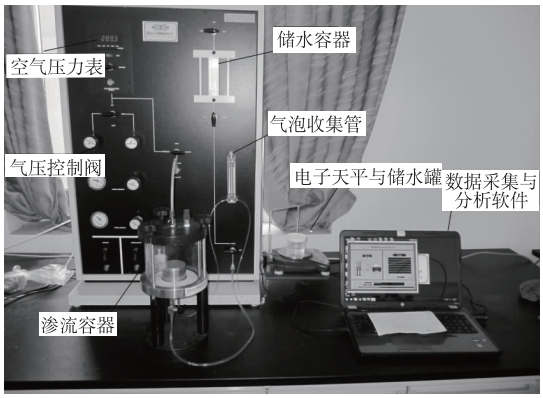


图 1 TWRI 测试系统总装图

Fig. 1 TWRI test system

2.2 试验方法

2.2.1 土样来源与基本性质

试验黄土取自陕西省子长县附近,属于 Q_3 马兰黄土,形成于中更新世以后,大孔隙较多,遇水具有中等的湿陷性。该土样物理性质指标见表 1。

表 1 土样物理性质指标

Table 1 Physical properties of loess sample

指标名称	试验方法	试验结果
密度	环刀法	1.46 g/cm^3
天然含水量	烘干法	9.32%
相对密度	比重瓶法	2.68
液限	锥式仪法	28.62%
塑限	搓条法	19.04%
渗透系数	变水头法	6.45×10^{-5} cm/s
湿陷性系数	双线法(300 kPa)	0.045 5

本试验土样,采用筛分法和虹吸比重瓶法进行颗粒分析试验,得到土样的颗粒级配曲线,如图 2 所示。该颗粒级配曲线较陡,说明颗粒粒径相差不大,土颗粒较均匀,分选性较好。根据土类命名可知,该黄土为粉质黏土。

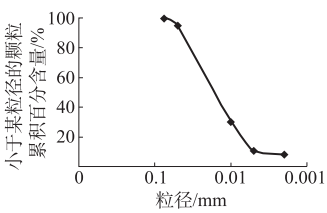


图 2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Grading curve of loess sample

2.2.2 TWRI 试验方法

完整的 TWRI 试验包括物理试验和数值模拟 2 个部分,其主要的试验步骤如图 3 所示。

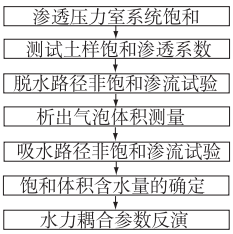


图 3 TWRI 试验流程图

Fig. 3 Process of TWRI test

(1) 将饱和的土样、陶土板放入组装好的渗流压力室中,渗流压力室底部连通水槽,通过底座另一个出口抽气以排出压力室底座内部的空气。

(2) 往压力室中的试样顶部加入 50 mL 水,密封压力室,从压力室顶部施加 50 kPa 空气压力,记录排出水从压力室底部渗出的流量随时间的关系,到渗出水量达到 30 mL 时结束,根据达西定律可算出系统组合渗透系数。

(3) 连接数据采集软件与测量流出水量的电子天平,归零天平读数。系统连接并设置完成后开始脱湿路径的测试,在给试验加压的过程中包括增加小压力和增加大压力 2 个阶段。首先对土样施加稍大于进气值的小气压,12 ~ 24 h 后,待流出水量不再增大时,在顶部气压增加大压力至 250 kPa,直到流出水量稳定。

(4) 由于陶土板上下存在空气压力差,脱水路径试验过程中会在陶土板底部产生气泡,这些气泡的体积会造成渗流量的误差。因此,在脱水路径完成后,要通过冲刷气泡将陶土板的空气冲刷到气泡收集管中,空气管中的空气体积即为析出的空气总量,这将为真实的渗出水量提供修正系数。

(5) 吸湿路径时,将试样顶部的气压降为 0,开始记时并记录流量。此时,储水容器中的水在土样基质吸力的作用下渗入土样。

(6) 吸水路径结束后,根据土样总质量、干土质量计算出饱和体积含水量 θ_w,计算公式如下:

$$\theta_w = \frac{m_w - m_s}{V} \quad 。 \tag{1}$$

式中:m_w 为土样的总质量;m_s 为烘干土样质量;V 为试样的体积。

(7) TWRI 参数反演计算采用 HYDRUS - 1D 软件进行,其反演算法使用的土 - 水特征曲线模型为 Van Genuchten 模型。脱湿路径的物理试验完成后,将得到的流出水量与时间的关系曲线作为目标函数通过 HYDRUS - 1D 软件的非饱和渗流反演算法对整个物理试验过程进行模拟,最终可分别得出土样脱湿路径的水 - 力相互作用性质参数 θ_r,θ_s,α

和n。其中,θ_r 为残余含水量;θ_s 为饱和含水量;α 为与土样进气值有关的参数,α 的倒数约等于进气值;n与土体孔隙尺寸分布有关。根据这些参数,可以得到土－水特征曲线方程。

有别于稳态测试方法,TWRI 试验是一个一维瞬态非饱和渗流过程,因此物理试验所获得的是流出或流入土样的水流量与时间的关系曲线,如图 4 所示。吸湿路径和脱湿路径历时约一周。

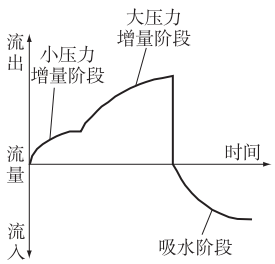


图 4　土样脱湿量和吸湿量与时间的关系曲线

Fig. 4　Curves of drying cover and wetting cover of the sample vs. time

2.2.3　*体积压力板仪试验方法*

将制备好的原状土样放入压力板仪中,然后逐级施加压力,使土样脱湿到非饱和状态;最后将土样取出称其质量,放入烘箱烘干,称得干土＋环刀质量。根据试验数据就可反算得到各个气压力值下土样的体积含水量。脱湿阶段具体试验数据见表 2。

表 2　脱湿阶段土的基质吸力和体积含水量

Table 2　Matrix suction and volume water content of the sample under drying state

基质吸力/kPa	体积含水量/%	基质吸力/kPa	体积含水量/%
0	48.2	125	10.7
25	30.7	150	10.2
50	20.1	175	9.6
75	14.6	200	9.2
100	12.6		

3　土－水特征曲线方程拟合分析

胡波等[10-12]的研究表明土－水特征曲线方程多是建立在经验公式基础之上的,有些方程只适用于特定的土类。土－水特征曲线的饱和含水量 θ_s 容易确定,而残余含水量 θ_r 无法定量确定。因此,选择合适的土－水特征曲线方程进行拟合分析是十分有必要的。吴元莉等[13]的非饱和黄土研究结果表明,在已有的土－水特征曲线方程中,Van Genuchten 土－水特征曲线方程对黄土拟合的效果较好(为讨论方便,未知参数均用 a,b 和 c 表示)。Van Genuchten 方程为

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\psi)^b]^c} \quad 。 \qquad (2)$$

式中:a 为与进气值有关的参数(kPa);b 为在基质吸力大于进气值后与土体脱水速率有关的土体参数;c 为与残余含水量有关的参数。

3.1　TWRI 拟合结果

通过 HYDRUS－1D 软件进行反演计算,得到土样的水－力相互作用性质参数见表 3。根据参数和模型绘制出来的土－水特征曲线见图 5。拟合的误差 *WCR* 值为0.000 47(*WCR* 为方程的误差指数,取值范围为 0～1,越接近 0,表明方程拟合的误差越小)。

表 3　土样脱湿路径水－力相互作用性质参数

Table 3　Hydro-mechanical property parameters of the sample in drying path

路径名称	模型参数 α/kPa^{-1}	模型参数 n	残余含水量 θ_r/%	饱和含水量 θ_s/%
脱湿路径	0.037 5	2.392 4	7.4	48.2
吸湿路径	0.087 4	2.110 0	7.4	42.0

由拟合结果可知,曲线呈“S”形,基质吸力在低吸力段和高吸力段的变化值小,中间段吸力变化较大。通过颗粒分析可知,土体中细颗粒含量越高,其持水能力也越强,即在图上吸湿和排水的速率变化越小。土样在不同脱湿和吸湿路径状态下的土－水特征曲线具有明显的回滞效应,脱湿路径和吸湿路径的进气值分别为 26.00,11.45 kPa,进气值变化是由于在脱湿或吸湿过程中土体结构和孔隙尺寸的改变而造成的。而与孔径分布有关的参数 n 变化较小。

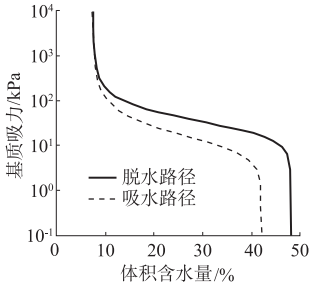


图 5　TWRI 测试拟合的土－水特征曲线

Fig. 5　Soil-water characteristic curve fitted by TWRI test

3.2　体积压力板仪拟合结果

采用 Matlab 软件对体积压力板仪所得到的数据(见表 2)进行拟合和分析,运用 Van Genuchten 方程拟合出本试验土样的土－水特征曲线,见图 6。拟合的 WCR 值为0.001 48。

采用 2 Bar 体积压力板仪对其基质吸力和体积含水量的关系进行稳态试验。对比 TWRI 的试验结果,可见瞬态脱水和吸水试验方法在低吸力范围内(0～300 kPa)的试验结果与压力板仪试验结果吻合较好。如

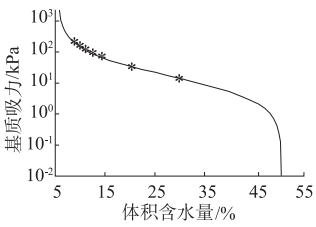


图 6　体积压力板仪测试拟合的土－水特征曲线

Fig. 6　Soil-water characteristic curve fitted by volume pressure plate test

图 7 所示。

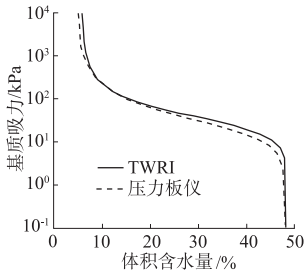


图 7 2 种测试结果的对比分析

Fig. 7 Comparative analysis of the two test results

4 结 论

(1) 由物理力学性质可知,陕西原状马兰黄土为粉质黏土,其孔隙率较大,遇水有中等湿陷性,工程性质较差。

(2) TWRI 试验中,曲线大致呈竖"S"形。两端吸力变化小,中间吸力变化较大。土样在脱湿路径和吸湿路径状态下的土 - 水特征曲线具有明显的滞回效应,脱湿路径和吸湿路径进气值的变化是由于土体结构和孔隙尺寸的改变造成的,而与孔径分布有关的参数 n 变化较小。

(3) 通过 Van-Genuchten 土 - 水特征曲线方程分别对 2 组试验数据进行分析,结果表明:瞬态脱水和吸水试验方法在低吸力范围内的试验结果与压力板仪试验结果吻合较好。

(4) 与当前测量吸力的方法相比,TWRI 测试方法简单易行,结果准确,且具有测试周期短、测试吸力范围大的特点。

参考文献:

[1] 吴剑敏,李广信,王成华. 非饱和土基质吸力对基坑支护计算的影响[J]. 工业建筑,2003,33(7):6 - 10. (WU Jian-min, LI Guang-xin, WANG Cheng-hua. Effect of Matrix Suction of Unsaturated Soil on the Estimation of the Load Internal Force on Supporting Structure for Deep Excavation[J]. Industrial Construction, 2003, 33(7): 6 - 10. (in Chinese))

[2] BARBOUR S L. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The Soil-Water Characteristic Curve: A Historical Perspective [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998,35(5): 873 - 894.

[3] BROOKS R H, COREY A T. Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow[J]. Irrigation and Draining Division, ASCE, 1896, 92(2): 61 - 88.

[4] VAN GENUCHTEN M T. A Close-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 - 898.

[5] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal Process in Soil Water Retention[J]. Water Resources Research, 1990, 26(5): 1047 - 1054.

[6] FREDLUND D G. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐译. 北京:中国建筑工业出版社,1997. (FREDLUND D G. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Translated by CHEN Zhong-yi. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))

[7] WAYLLACE A, LU N. A Transient Water Release and Imbibitions Method for Rapidly Measuring Wetting and Drying Soil Water Retention and Hydraulic Conductivity Function[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(1): 1 - 15.

[8] 李志清,李 涛,胡瑞林,等. 非饱和土土水特征曲线测试与预测[J]. 工程地质学报,2007,15(5):700 - 707. (LI Zhi-qing, LI Tao, HU Rui-lin, *et al*. Methods for Testing and Predicting of SWCC in Unsaturated Soil Mechanics[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(5): 700 - 707. (in Chinese))

[9] XU Y F, SUN D A. Determination of Expansive Soil Strength Using a Fractal Model[J]. Fractals, 2001, 9(1): 51 - 61.

[10] 胡 波,肖元清,王 钊. 土 - 水特征曲线方程参数和拟合效果研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2005,27(1): 30 - 33. (HU Bo, XIAO Yuan-qing, WANG Zhao. Study on Soil-Water Characteristic Curve Equations Parameters and Fitting Effect[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2005, 27(1): 30 - 33. (in Chinese))

[11] FREDLUND D G., RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1993.

[12] FAYER M J, SIMMONS C S. Modified Soil-Water Retention Functions for All Matric Suctions[J]. Water Resource Research, 1995, 31(5): 1233 - 1238.

[13] 吴元莉,项 伟,赵 冬. 非饱和马兰黄土土 - 水特征曲线研究[J]. 安全与环境工程,2011,18(4):39 - 42. (WU Yuan-li, XIANG Wei, ZHAO Dong. Research on Soil-Water Characteristic Curve of Unsaturated Malan Loess[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18(4): 39 - 42. (in Chinese))

(编辑:黄 玲)

Soil-Water Characteristic Curve of Malan Loess by Transient Water Release and Imbibitions Method

GUO Long[1], LIU Qing-bing[2], WANG Jing-e[2], LEI Wen[1]
(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. Three Gorges Research Center under Ministry of Education for Geo-hazard,
China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: A transient water release and imbibitions (TWRI) method together with Van Genuchten (1980) soil-water characteristic curve models and Mualem (1976) hydraulic conductivity function model was used for the inversion calculation of soil water-force parameters and the soil water characteristic curve (SWCC). The Malan loess at Zichang County in Shaanxi Province was selected as research object. Test results showed that the SWCC of soil samples under different drying and wetting states had apparent hysteresis effect. The air-entry value and saturated volumetric water content under drying state was 26 kPa and 48% respectively. Parameters related to pore size distribution changed slightly under different drying and wetting states. In order to verify the TWRI test results, steady-state test was carried out on the same soil sample using the volume 2 Bar pressure plate apparatus to study the relationship between their matrix suction and volumetric water content. By comparing the test results, it's found that the test results of TWRI agrees well with that of pressure plate apparatus under low suction (0-300kPa). It has short test time and wide test range of matric suction.

Key words: unsaturated Malan loess; soil-water characteristic curve; transient water release and imbibitions (TWRI) method; volume pressure plate

(上接第 66 页)

Application and Development of Centrifugal Modeling Technology for Geotechnical Engineering in China

BAO Cheng-gang
(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Centrifugal modeling technology has been applied to geotechnical engineering for more than half a century. It has been an important and indispensible means to simulate the geotechnical behavior because it can reflect the actual stress level. In this paper, the principle, advantages and deficiencies, as well as the main applications and history of centrifugal modeling technology are reviewed. Successful application examples in common engineering structures including soil slope, earth-rock dam, deep foundation pit, underground structure, soft foundation treatment, reinforced structure with geosynthetics, anti-seismic engineering, ocean platform, and harbor engineering are described in details. Moreover, experiences of using centrifuge in solving geotechnical research problems are presented, such as the dumping density of weathered sand in deep water, frozen soil engineering, blasting and earthquake and tsunami simulation, pollutant transport, and rock mechanics. Finally, the future development of centrifuge in China is also presented.

Key words: geotechnical engineering; engineering prediction; centrifugal model test; centrifugal modeling technology; development and prospect