

基于动态多步流动法的非饱和土 持水特性试验研究

冯巧云¹, 毕庆涛¹, 马佳兵¹, 梁世春², 徐迪¹

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046;

2. 山西省交通规划勘察设计院有限公司, 山西 太原 030012)

摘要: 土-水特征曲线是描述非饱和土基质吸力与饱和度之间的关系曲线。由于传统的测试方法耗时较长,在常规压力板仪测试系统上增加数据自动采集系统、气泡体积测量系统和储水冲刷系统。通过动态多步流动法试验对原状土和重塑土进行脱湿过程土-水特征曲线的测定,对比分析非饱和土的结构性对其土-水特征曲线的影响。结果表明:改进之后的压力板仪可以实时测定溢出水质量,精确测量气泡体积,节省试验时间;原状土与重塑土的饱和度均随基质吸力和加载时间的增大而减小;相比于原状土,重塑土的脱湿速率和最终溢水量较小,进气值较高,达到残余饱和度状态所需时间较短,其残余含水率也偏大。

关键词: 土-水特征曲线;非饱和土;动态多步流动法;改进的压力板仪

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)05-0058-05

Experimental Research on Water Holding Capacity of Unsaturated Soil Based on Dynamic Multistep Flow Method

FENG Qiaoyun¹, BI Qingtao¹, MA Jiabing¹, LIANG Shichun², XU Di¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450046, China;

2. Shanxi Provincial Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030012, China)

Abstract: Soil-water characteristic curve is a curve describing the relationship between matric suction and humidity of unsaturated soil. Focusing on the issue of expensive time consumption of traditional test method, this paper proposed a method which is a pressure plate apparatus testing system with automatic data acquisition system, bubble volume measurement system and the water flushing system, in which dynamic multistep flow method was adopted to test the undisturbed soil and remolded soil moisture determination of the process of soil and water characteristic curve, and the unsaturated soil structural effects on the soil and water characteristic curve was compared and analyzed. The results show that the improved pressure plate meter can measure the overflow water quality in real time, and accurately measure the bubble volume, and reduce the time consumption. The saturation of undisturbed soil and remolded soil decreased with the increase of matric suction and loading time. Compared with undamaged soil, the dehumidification rate and final water overflow of remolded soil are smaller, the air intake value is higher, the time to reach the residual saturation state is shorter, and the residual water content of remolded soil is larger.

Keywords: soil-water characteristic curve; unsaturated soil; dynamic multi-step flow method; improved pressure plate gauge

非饱和土是一种由固相、液相和气相组成的三相体。与饱和土相比,气相的存在使非饱和土的性质更加复杂,这给非饱和土工程特性的研究带来了许多困难。随着我国现代化建设的推进,工程中遇到的非饱和土问题日益突出,由于目前缺乏合理的非饱和土力学理论来指导工程设计和施工,引发了很多工程事故^[1]。其中,基质吸力是影响非饱和土工程性质的重要参数。通常采用土-水特征曲线(简称为 SWCC 曲线)描述基质吸力与饱和度之间的关系^[2]。SWCC 曲线作为非饱和土力学中最基础的本构关系,它对非饱和土工程特性,如渗透系数^[3-5],抗剪强度^[6-8]、应力和应变^[9-10]等的研究具有重要意义。

国内外很多学者开展了非饱和土水力特性研究,并对 SWCC 曲线进行了深入的探讨。Tarantino^[11]认为,通过改变孔隙比大小使土的密实程度发生变化,进而导致 SWCC 曲线的形态随之改变;李同录等^[12]用压汞试验、滤纸法测 SWCC 曲线,并用扫描电镜获得其微观结构图像,进行了击实黄土孔隙结构对土水特征曲线的影响分析;郑方等^[13]利用 GCTS 土-水特征曲线仪对三种不同粒度的土进行增减湿循环试验,分析粒度对非饱和土土-水特性的影响;Wang 等^[14]通过分析压力板试验原理和土样的微观结构,发现尺寸较小的圆形试样可以缩短 SWCC 曲线测试的时间;李幻等^[15]在改进的压力板仪测试系统上对粉土试样开展动态多步流动实验,最终得到平衡状态下 SWCC 脱湿曲线,与常规平衡态测试方法相比可以大大节省时间。

目前关于非饱和土 SWCC 曲线的研究大多数都是基于传统测试方法,即在平衡状态下测试,一条 SWCC 曲线的测试时间为数周甚至数月,耗时较长。动态多步流动法^[16]的提出为缩短试验时间做出了贡献。该方法是在试样含水率与基质吸力未达到平衡时,就施加下一级的基质吸力;通过理论分析,得到平衡状态下试样的 SWCC 曲线。

本文以山西太原非饱和黄土为对象,在改进的压力板仪上利用动态多步流动法测定原状土和重塑土的土-水特征曲线,并对比分析两者差异,为非饱和土持水特性的研究提供参考。

1 仪器改进和试验方案

1.1 试验仪器

试验利用 GEO-Experts 压力板仪测定非饱和黄土原状样与重塑样脱湿过程的 SWCC 曲线。此压

力板仪存在不能实时监测溢出水的质量,测试时间较长,无法准确测量陶土板底部气泡体积等问题,导致动态多步流动法试验无法进行,因此需要改进。改进后的压力板仪,增加了数据自动采集系统,气泡体积测量系统和储水冲刷系统,如图 1 所示。

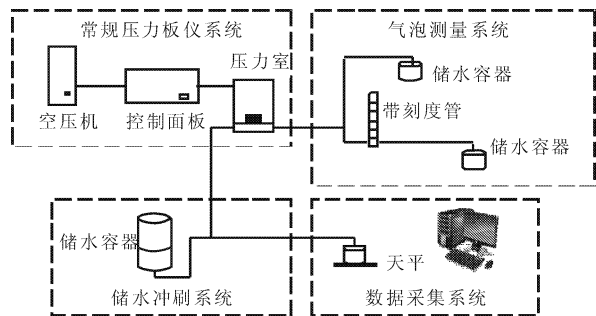


图 1 改进的压力板仪测试系统示意图

改进后的压力板仪可以人为设定记录溢出水质量的时间间隔(本试验设置为每 30 s 采集一次),避免了试验过程中将试样拿出时由于土体掉落产生的误差;在重力的作用下,打开储水冲刷系统的开关后可将陶土板下产生的气泡排除,气泡体积测量系统可以精确的测量气泡体积,减小试验数据的误差。

1.2 试验方案

试验土样取自山西太原某工程的非饱和原状黄土。根据《土工试验方法标准》^[17](GB/T 50123—2019),测得土样的基本物理性质指标如表 1 所示,颗粒级配曲线见图 2。

表 1 试验黄土基本物理性质指标

天然含水率 /%	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限 /%	塑限 /%	比重
6.0	1.46	29.8	17.5	2.71

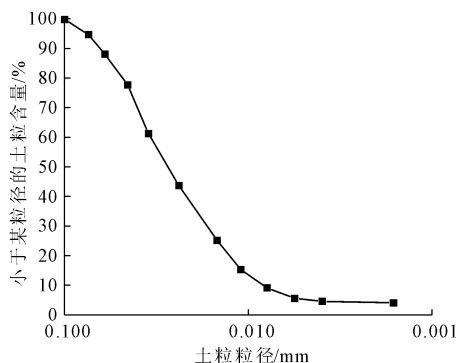


图 2 试验黄土颗粒级配曲线

制备原状土与重塑土环刀试样(直径 61.8 mm, 高 20 mm)。制备原状样时,把环刀放在水平土样层面,将环刀以外的土切掉,缓慢旋转环刀至土样完全

充满环刀,过程中应尽量避免环刀内土体结构受到扰动;利用原状土制备重塑样时,将土样烘干(105℃),碾碎,利用制样器与千斤顶制备与原状样相同含水率与干密度的重塑样。最后对试样进行真空抽气饱和后开始试验。

开始试验前,将底座中的陶土板和整个系统线路进行饱和。然后将土样放入压力室,转动调压阀施加一小吸力至 10 kPa,使得试样从饱和状态变为非饱和状态,即不再有水溢出后,开始动态多步流动试验。各级吸力的加载时间人为确定,这里参考伊盼盼等^[16]使用的加载方案,设定为 20 kPa→30 kPa→40 kPa→60 kPa→90 kPa→130 kPa→170 kPa→210 kPa→290 kPa,加载所用时间见表 2。利用数据采集系统记录溢出水的质量。试验过程中,在每级吸力加载结束后要对聚集在陶土板底部的气泡体积进行冲刷和测量,用以修正各级吸力作用过程中溢出水的质量。

表 2 动态多步流动试验加载时间

基质吸力 P/kPa	加载时间 t/h
20	2
30	8
40	12
60	12
90	12
130	12
170	18
210	24
290	24

2 试验数据分析

2.1 溢水量

改进后的压力板仪可以采集到饱和后土样溢出水累计质量的数据,但由于试验过程中陶土板底部气泡的存在导致采集系统监测的数据与实际溢水量相比偏大,需将排除的气泡体积换算成等体积水的质量,即多余溢水质量,然后对原始采集数据进行修正,可得到相对精确的试验数据。

对修正后的溢水量进行处理,获得了试样溢水量和基质吸力与时间的关系,如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出,试验前期,原状样和重塑样的溢水量和溢水速度均较小,曲线较平缓,这是因为施加的吸力较小,水不易从试样中排出。试验中期,对原状样而言,当基质吸力达到 40 kPa~60 kPa 时,曲线趋势开始变陡,斜率较大,此时溢水速率较大;而重塑

样的溢水速率开始变大时,对应的基质吸力则为 60 kPa~90 kPa。试验后期,随着基质吸力的变大,原状样与重塑样的溢水速率开始逐渐变小,曲线趋于平缓,此时试样将要达到残余状态;且与重塑样相比,原状样的溢水量较大,达到残余状态所需时间较短。

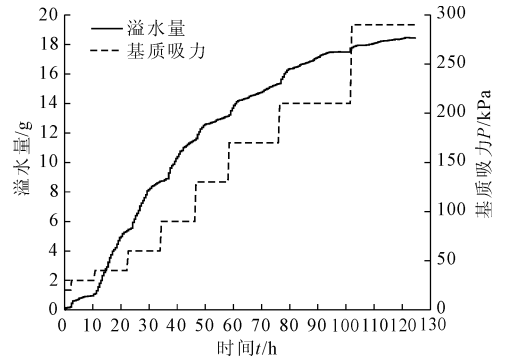


图 3 原状样溢水量和基质吸力与时间关系

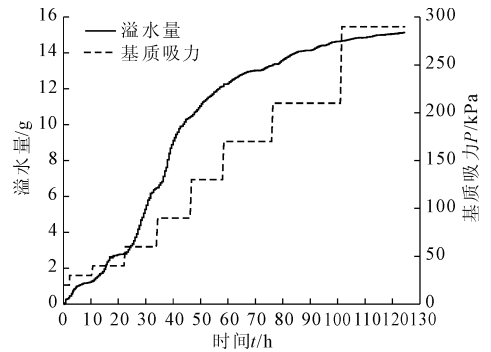


图 4 重塑样溢水量和基质吸力与时间关系

2.2 饱和度方程

由图 3、图 4 可以看出,试验在各级吸力作用下未达到平衡状态,为此伊盼盼等^[16]结合动态多步流动法原理,推导出非饱和土的饱和度演化方程:

$$S_r(t) = S_r^0 + \sum_{i=1}^n \Delta P_i C_i \left[1.0 - \exp\left(-\frac{t-t_i}{\tau_i}\right) \right] \quad (1)$$

式中: $S_r(t)$ 为 t 时刻饱和度; S_r^0 为试样初始饱和度; ΔP_i 为第 i 级基质吸力增量; C_i 为第 i 级基质吸力下容水率,指平衡态土水特征曲线斜率; t_i 为第 i 级基质吸力加载时刻; τ_i 为第 i 级基质吸力下扰动后孔隙水流动的特征时间。

方程(1)考虑到了各级基质吸力的增量对饱和度的影响,可将这种影响结果称为各级吸力下的“遗传效应”。

饱和度方程对于平衡态与非平衡态均适用,这为非平衡态下试验数据确定平衡态下的土水特征曲线奠定了基础。方程(1)中 C_i 与 τ_i 为未知量,其余量

均为试验实测量。

可以利用 Origin 软件建立饱和度随时间的演化方程模型,编译成功后,把试验数据导入软件中进行参数拟合,得到每级基质吸力对应的未知参数 C_i 和 τ_i 。

根据上述方法进行拟合,得到原状样与重塑样在各级基质吸力下的饱和度方程参数容水率 C_i 和特征时间 τ_i ,如表 3 所示。

表 3 饱和度方程参数表

基质吸力 P /kPa	容水率 C_i		特征时间 τ_i	
	原状样	重塑样	原状样	重塑样
0	—	—	—	—
10	-0.3282	-0.1282	1.5448	1.2788
20	-0.4117	-0.1543	0.8641	1.0367
30	-0.1854	-0.0203	3.4919	3.9275
40	-0.3095	-0.1088	2.0571	2.1857
60	-0.7932	-0.3476	2.9645	3.7812
90	-0.1037	-0.6483	3.6943	4.9011
130	-0.1086	-0.1293	3.9736	5.8171
170	-0.0554	-0.1525	4.0127	6.4606
210	-0.0257	-0.1067	5.5416	13.8964
290	-0.0140	-0.1570	10.3816	31.8872

利用饱和度方程反算非平衡态试验结果,并与实测结果对比,如图 5、图 6 所示;可以看出实测结果和基于饱和度时间演化方程模型的拟合结果曲线几乎重合,各级基质吸力对应的曲线拟合相关系数均达到 0.95,拟合度较高。

3 土-水特征曲线

土-水特征曲线是指平衡状态下饱和度与基质吸力的关系曲线。由上节饱和度方程得到每级基质吸力增量下的平衡态土水特征曲线斜率 C ,从而可以计算出第 k 级基质吸力下对应的平衡态饱和度,即

$$S_r^k = S_r^0 + \sum_{i=1}^k \Delta P_i C_i \quad (2)$$

$$P^k = \sum_{i=1}^k \Delta P_i \quad (3)$$

式中: S_r^k 为第 k 级基质吸力下平衡态饱和度; P^k 为第 k 级基质吸力。

根据式(2)、式(3),便可绘制土-水特征曲线。由试验结果,原状样与重塑样的土-水特征曲线如图 7 所示。

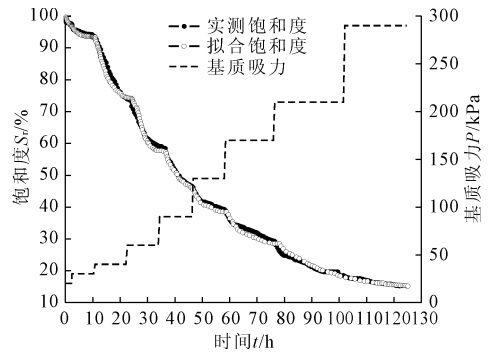


图 5 原状样饱和度、基质吸力与时间的关系

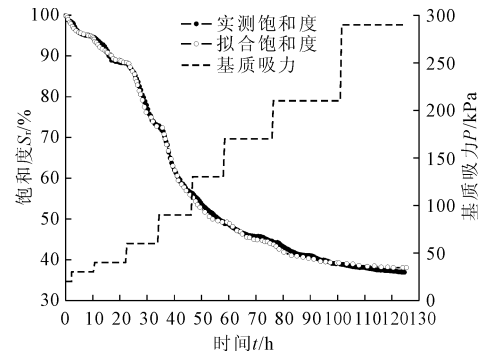


图 6 重塑样饱和度、基质吸力与时间的关系

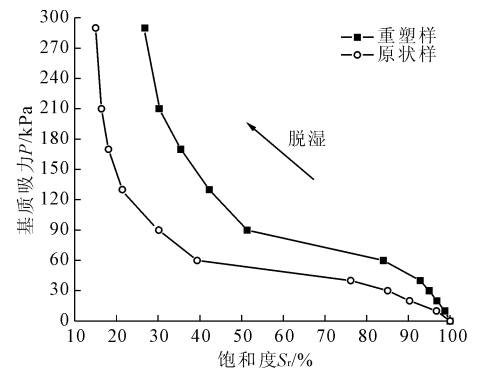


图 7 土-水特征曲线

由图 7 可以看出,原状土的土-水特征曲线位于重塑土的下方,即在相同基质吸力作用下,原状土的饱和度均小于重塑土,二者差异明显。饱和度的降低速率体现了土体内部水量减少的快慢,这与施加的吸力大小,土样孔径及内部含水率有关。原状土与重塑土的饱和度降低速率均随着基质吸力的逐级增加呈现先增长后减小,最终曲线趋于平缓的规律。

通过观察容水率 C 值的大小和土水特征曲线趋势可以看出原状土的进气值介于 40 kPa ~ 60 kPa,而重塑土的进气值在 60 kPa ~ 90 kPa 之间。由土的应力历史可知,原状土受上部土体长期作用后,内部颗粒按一定方向和次序排列,会形成具有方向性的孔隙结构,气体首先进入尺寸较大的通道,因

此进气值较小;重塑土样为静压制作,孔隙分布无方向性,水流路径较少,导致气体较难进入土体,表现出较高的进气值。

试验后期,继续增加基质吸力,土-液接触面之间的毛细作用力增大,试样中孔隙中的水分会持续排出,但是排水速率逐渐减小。当基质吸力达到 130 kPa 时,原状土排水速率开始低于重塑土,二者的土-水特征曲线开始并行,直到毛细作用力与基质吸力达到平衡时试样饱和度不再随基质吸力的增大而减小,达到残余饱和度状态,将此时的饱和度转换为对应的体积含水率即为残余含水率。重塑土的残余含水率高于原状土,重塑土的持水性能优于原状土。

4 结 论

(1) 由于传统的测试方法耗时较长,在常规压力板仪测试系统上增加数据自动采集系统、气泡体积测量系统和储水冲刷系统。改进之后的压力板仪系统可以实时测定溢出水质量,精确测量气泡体积可用以修正溢出水质量,减小试验误差。采用动态多步流动法测定土-水特征曲线,操作简便,大大节省了试验时间。

(2) 非饱和原状土与重塑土的饱和度均随基质吸力和加载时间的增大而减小。但由于重塑土的结构重塑性,使得内部排水通道不通畅,导致其脱湿速率和最终溢水量较小,达到残余饱和度状态所需基质吸力较大。

(3) 原状土的进气值低于重塑土,而重塑土残余含水率高于原状土,表明重塑土的持水性能优于原状土。

参考文献:

[1] 陈正汉,郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学,2019,40(1):1-54.

[2] Barbour, Lee S. Nineteenth canadian geotechnical colloquium: the soil-water characteristic curve: a historical perspective[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(5):873-894.

[3] Genuchten V, Th. M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.

[4] 林鸿州,李广信,于玉贞,等. 基质吸力对非饱和土抗

剪强度的影响[J]. 岩土力学,2007(9):1931-1936.

- [5] 宋亚亚,何忠意,朱佩宁,等. 降雨入渗对非饱和土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(3):72-78.
- [6] Fredlund D G, Xing A, Fredlund M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. Can. geotech. j, 1995,32(3):440-448.
- [7] 翟钱,戴国亮,赵学亮. 土-水特征曲线对非饱和砂土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报,2020,42(7):1341-1349.
- [8] Link R E, Babu G, Rao R S, et al. Evaluation of shear strength functions based on soil water characteristic curves [J]. Journal of Testing & Evaluation, 2005,33(6):461-465.
- [9] Dastjerdi M H T, Habibagahi G, Nikooee E. Effect of confining stress on soil water retention curve and its impact on the shear strength of unsaturated soils [J]. Vadose Zone Journal, 2014(13):362-368.
- [10] Gallage C, Uchimura T. Direct shear testing on unsaturated silty soils to investigate the effects of drying and wetting on shear strength parameters at low suction [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2016,42(3):15-21.
- [11] Tarantino A. A water retention model for deformable soils [J]. Géotechnique,2009,59(9):69-71.
- [12] 李同录,范江文,习羽,等. 击实黄土孔隙结构对土水特征的影响分析[J]. 工程地质学报,2019,27(5):1019-1026.
- [13] 郑方,刘奉银,王磊. 粒度对非饱和土土水特征曲线滞回特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):19-24.
- [14] Wang M, Kong L W, Zang M. Effects of sample dimensions and shapes on measuring soil-water characteristic curves using pressure plate [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015,7(4):150-162.
- [15] 李幻,侯蕊,樊铁兵,等. 基于动态多步流动原理的快速测定 SWCC 方法及压力板仪改装研究 [J]. 工程地质学报,2020,28(4):707-715.
- [16] 伊盼盼,牛圣宽,韦昌富,等. 基于动态多步流动法的非饱和土水力特性测试研究 [J]. 岩土工程学报,2016,38(10):1797-1801.
- [17] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.