

快速测量重塑土土水特征曲线的试验方法研究

张军辉, 张银银, 彭俊辉

(长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:土水特征曲线(SWCC)的测试技术很多,基于轴平移原理的压力板仪法是使用最多的直接量测方法之一。现有的压力板仪测出一条完整的 SWCC 需要数周到数月不等,费时且价格昂贵,主要原因是采用陶土板建立平衡条件需要较长时间。该文采用亲水性纤维薄膜代替 GEO-Experts 应力相关的土水特征曲线压力板仪中的陶土板测量 3 种不同压实度(90%、93%、96%)下重塑土样的 SWCC,以达到加快试验平衡速度的目的,并采用陶土板测量同种压实度条件下重塑土样的 SWCC 做对比试验。结果表明:采用 0.1 μm 孔径的亲水性纤维薄膜代替陶土板能够有效测量吸力范围不超过 400 kPa 的重塑红黏土 SWCC;测量一条脱湿土水特征曲线需要 27~45 h,大大节约了 SWCC 的试验时间。

关键词:土水特征曲线; 压力板仪; 亲水性纤维薄膜; 陶土板; 试验

1 前言

非饱和土的土水特征曲线(SWCC)是描述基质吸力与含水率(饱和度或体积含水率)之间的关系曲线。测量土体的 SWCC 对于预测非饱和土力学性质、渗透函数及抗剪强度有着重要的意义。

已有研究表明:SWCC 受土体类型、应力历史、孔隙结构、干密度及试验方法等诸多因素的影响。理论分析得到 SWCC 要考虑多种影响因素,因此主要采用室内试验方法获得 SWCC。试验室内测量 SWCC 较常用的有滤纸法、张力计法和轴平移法等。采用轴平移技术的压力板仪等仪器实测的土水特征曲线相对于其他试验方法更为准确可靠,其测量范围视陶土板进气值而定,但压力板仪测定 SWCC 需要在平衡状态下测定。Tinjum 等试验得知,对于黏土 SWCC 的量测,每一级吸力的平衡时间为 5~8 d, Vanapalli 等测得每一级吸力土样为 6~7 d 达到平衡。由此可知陶土板渗透性低,导致试验费时费力,并且价格昂贵。因此如何快速且准确测量室内重塑黏土土样的 SWCC 成为亟待解决的问题。

近年来,学者们对室内如何快速测定 SWCC 进行了深入研究。陈辉等利用联合测试系统测定非平衡状态的流动试验,该试验可快速测量不饱和粉土的

SWCC;伊盼盼等、李幻等对粉土试样开展了一步流动试验得出溢出水量随时间的关系曲线,利用 hydrus-1D 水分运移模型对该曲线进行拟合并得出相关参数,根据这些参数反算得出试样的 SWCC,与传统的测试方法比较,该方法能够节省大量时间;何锦堂等根据动态多步流动法的试验原理和试验步骤,对砂土、粉土、粉质黏土、黏土进行动态多步流动试验,以平衡态的试验结果为标准,结果证明动态多步流动法能够快速预测 SWCC;李幻等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试验,测得一条脱湿曲线的时间为 5 d 左右,具有较高准确性,与常规平衡态测试方法相比可以大大节省时间,方便快捷;Adel Alowaisy 等研制了一种适用于重塑土和原状土的连续加压全自动测定系统,在短时间内连续、直接和准确地测定 SWCC,干燥和润湿 SWCC 所需时间不到常规多步流动法的 10%;Tomoyoshi Nishiumura 等开发了一种利用纤维薄膜来测量低基质吸力范围内的 SWCC 的新仪器,采用该仪器测量了 5 种土的 SWCC,结果表明使用纤维薄膜进行 SWCC 测量所需的平衡时间比使用陶土板测量 SWCC 所需的平衡时间短得多,膜的排水时间为 2 min 左右,而陶土板的排水时间为 3 000~4 000 min,平衡时间较短的原因是纤维薄膜的厚度远远小于陶土板的厚度;Hong Won-Taek 采用纤维薄膜和 TDR 时域反射系统测量

收稿日期:2021-01-05(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878078)

作者简介:张军辉,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:zjhseu@csust.edu.cn

SWCC,结果表明:由 TDR 系统估算的体积含水量几乎与滴定管系统确定的含水量相同,这意味着体积含水量可由具有 TDR 的自动系统直接评估。证实了由于膜具有较高的水力传导率和膜的厚度优势,使用膜代替陶土板显著减少了 SWCC 测试时间;Wang Hailong 等采用过滤膜测试了砂土的 SWCC,并将其运用到三轴试验仪中进行三轴试验,结果表明过滤膜测 SWCC 能得到陶土板类似的曲线,将过滤膜应用于低吸力范围砂质材料的 SWCC 量测是个很好的选择。

中国南方湿热地区的红黏土分布十分广泛,由于受湿热气候及土质等复杂条件影响,南方地区现役路堤内部湿度状态随时间和空间变化的稳定性差,导致其湿化严重,刚度显著降低,变形持续增加。因此,快

速准确测量重塑黏土的 SWCC 对于研究其湿度变化具有重要意义。该文结合上述学者的研究,采用常规体积压力板仪与陶土板的组合测量不同压实度下重塑黏土的 SWCC,使用 GEO—Experts 应力相关的土水特征曲线压力板仪与亲水性纤维薄膜的组合测量同种条件下重塑黏土的 SWCC,将两种方法得到的 SWCC 做对比分析。

2 试验土样

中国南方湿热地区的高液限黏土分布十分广泛,该文土样来源于长沙。进行室内颗粒分析试验、界限含水率试验和击实试验得到土样的基本物理特性如表 1 所示。

表 1 土样基本物理性质指标

液限	塑限	塑性指数	最大干密度	最佳含水率	细粒含量	土样类型
$w_L/\%$	$w_P/\%$	I_P	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	$w_{opt}/\%$	$(<0.075 mm)/\%$	
56.9	28.8	28.1	1.57	23.3	95.95	高液限黏土

3 GEO—Experts 应力相关的土水特征曲线压力板仪改进试验

由于纤维薄膜的直径大小定制受到限制,该文采用 GEO—Experts 应力相关的土水特征曲线压力板仪进行改进试验,用纤维薄膜代替该仪器中的陶土板测量无预固结、零应力状态下压实度分别为 90%、93%、96%土样的 SWCC。

3.1 GEO—Experts 应力相关的土水特征曲线压力板仪原理

该仪器由压力板仪组件、压力控制面板、垂直气动加载系统和水体积测量系统组成。试验时,饱和土样放置在压力板仪底座的进气值为 5 Bar (1 Bar = 0.1 MPa) 的陶土板上,高进气值陶土板属于压力板仪组件的部件,陶土板可维持小于其进气值的气压,防止有气进入其下方而影响水体积变化的测量。利用垂直气动加载装置给土样施加一定竖向压力并使其固结,施加的竖向力由荷重传感器监测。固结完成后,采用轴平移技术控制土样的基质吸力。在外加基质吸力作用下,土样吸水或失水,通过竖向位移传感器和水体积量测系统分别监测试样竖向变形和水体积变化。吸力平衡后根据监测结果可计算得到试样在该吸力状态下的

体积含水量、重力含水量和饱和度。然后改变气压值,使试样在下一级吸力状态下平衡,并计算得到相应含水率和饱和度。据此得到一定应力状态试样的土水特征曲线。

为了与上述常规压力板仪进行对比分析,此次试验无预固结、不施加竖向应力。改进部分主要为压力板仪组件部分。

3.2 纤维薄膜介绍

轴平移技术使用高进气值材料的微小孔隙把非饱和土中的水相和气相隔开,当高进气值材料饱和时具有让水自由通过而限制气体通过的特性。用烧结的陶土板制造的高进气值材料,进气值可达 1 500 kPa,而特殊的纤维膜进气值则能达到 10 000 kPa。该文采用的纤维薄膜属于亲水性过滤膜、聚醚砜材质,具有良好的亲水性和水通量,很好的化学稳定性和惰性,碱性 pH 值稳定,具有药物相容性。其温度性能稳定,整片滤膜在高温下既可以保证其完整性又能进行灭菌消毒,并在此过程中保持良好的抗收缩性能,避免在滤器中发生膜的撕裂、流速的降低和整个过滤量的减少。纤维薄膜参数与陶土板的规格见表 2。

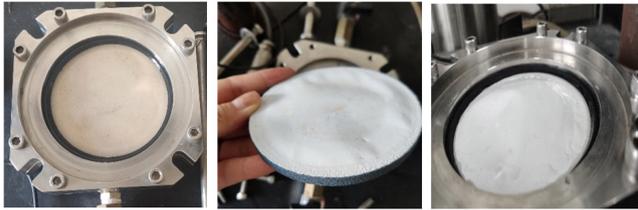
3.3 纤维薄膜测量 SWCC 试验

由于受到压力板仪组件底座的尺寸限制,首先定制一块直径、厚度均与陶土板一致的致密透水石,采用

孔径为 0.1 μm、厚度为 0.13 mm 的纤维薄膜与该透水石的组合代替陶土板进行试验,纤维薄膜的厚度可以忽略不计,如图 1、2 所示。

表 2 纤维薄膜与陶土板的规格

项目	单位	纤维薄膜	陶土板
孔径	μm	0.10	0.50
厚度	mm	0.13	7.50
进气值	MPa	0.40	50.00
材料		聚醚砜	烧结高岭土



(a) 陶土板底座 (b) 纤维薄膜与致密透水石 (c) 纤维薄膜底座

图 1 压力板仪组件底座替换示意图

3.4 试验方法

按 JTG E40—2019《公路工程试验规程》制样与饱和。试验前将纤维薄膜、定制致密透水石和土样放在真空饱和器中饱和 24 h。试验时饱和的环刀样置于纤维薄膜上,向压力室施加气压使试样达到预定的基质吸力。在气压的作用下,土中孔隙水排出以达到平衡,排出的水量通过量管测定。各级吸力状态下湿度平衡的判别标准:每 2 h 排水量不超过 0.012 mL 作为气压力平衡的标准。按顺序将仪器各组成部分安装好进行试验,具体试验方案如表 3 所示。

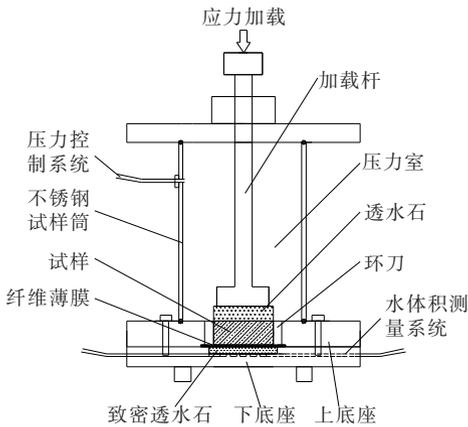


图 2 纤维薄膜压力板仪组件底座结构示意图

为了给纤维薄膜所测 SWCC 提供对比数据,在相同试验条件下,采用陶土板也进行了 3 组不同压实度情况下的 SWCC 试验。

表 3 高液限黏土土水特征曲线试验方案

压实度/%	控制的吸力状态/kPa
90	5, 10, 20, 30,60, 120, 200,300,390
93	5, 10, 20, 30,60, 120, 200,300,390
96	5, 10, 20, 30,60, 120, 200,300,390

3.5 试验结果和分析

(1) 纤维薄膜测量 SWCC 的试验结果和陶土板测量 SWCC 的试验结果绘制成图 3。

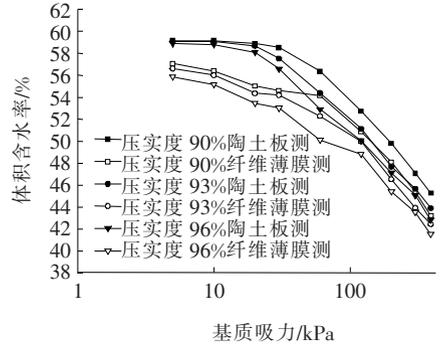


图 3 纤维薄膜和陶土板测量 SWCC 的试验结果对比

由图 3 可知:不同压实度条件下基质吸力变化的规律与陶土板测试所得结果大体一致,同一体积含水率下,压实度越高,基质吸力越低。

(2) 纤维薄膜改进压力板仪试验和实测平衡态试验分别历时 3、58 d。由纤维薄膜测得的 3 组压实度的土样每一级吸力的平衡时间为 3~5 h 不等,即采用 0.1 μm 纤维薄膜获得吸力为 400 kPa 以内一条脱湿土水特征曲线(9 级吸力)需要 27~45 h,可很大程度地节约试验时间。

(3) 不同压实度下的误差对比如图 4 所示,3 种压实度(90%、93%、96%)下纤维薄膜所测 SWCC 整体低于陶土板所测 SWCC。采用 Origin 软件中线性拟合分析分别求解 3 组数据的相关性,其相关系数分别为 0.981、0.981、0.985,均大于 0.98;3 种压实度(90%、93%、96%)下纤维薄膜所测体积含水率与陶土板所测体积含水率的差值分别为 4.48%、4.24%、4.82%,均小于 5%。根据前人试验总结即使在同一基质吸力下,基于不同测试方法测量出来的土样的含水率也会存在明显差异,误差达 5%~30%,甚至更高。基于轴平移技术原理的纤维薄膜与陶土板试验,差值控制在 5% 以下,结果较为理想。由此说明纤维薄膜可以替代陶土板有效进行 SWCC 试验。

分析试验结果产生误差的可能原因有:① 在低吸力区域,两者测量的差距较大,高吸力区域两者结果相

近,因为低吸力区域吸力控制较难;② 纤维薄膜测量所得曲线总体上低于陶土板所测,一是与采用的饱和和致密透水石有一定关系,致密透水石的孔径相较陶土板依然偏大,致密透水石中的水在水循环冲刷气泡的作用下,也有少部分水排到量管中,导致测得土样的含水率偏低;二是致密透水石的下方也有气泡聚集导致测量结果偏低;③ 间歇性做试验的影响。

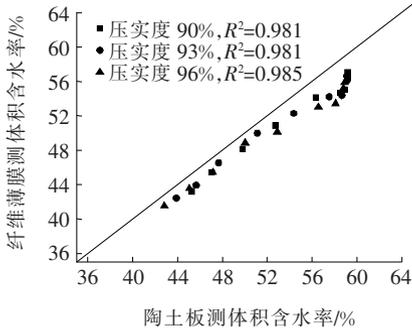


图 4 3 种压实度下纤维薄膜和陶土板测 SWCC 的对比图

3.6 SWCC 误差减小试验及拟合

为了减少致密透水石和下方气泡聚集对试验结果的影响,拟采用压实度为 96% 的土样做误差修正试验。在每一级吸力平衡时,将土样拿出压力室外称量其质量,直接得到土样的含水量变化,可排除致密透水石和下方气泡聚集的影响;同时做一组无试件情况下致密透水石与纤维薄膜的误差对比试验,每一级吸力加载持续 3 h 后,将致密透水石拿出压力室外测量其质量,由此可得知饱和的致密透水石是否对试验结果造成影响。试验结果及绘制修正后的 SWCC 如图 5 所示。

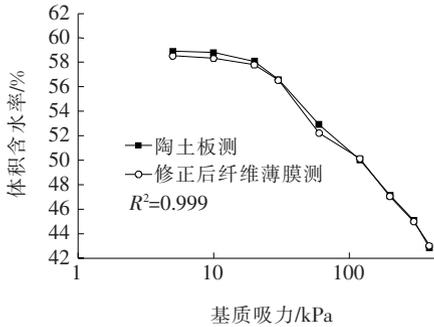


图 5 压实度为 96% 的土样误差减小前后 SWCC 对比图

由图 5 可知:两条曲线在高吸力区域高度吻合,低吸力区域有微小差别:饱和的致密透水石对土样排出水量的测量有一定的影响,可能是在称量过程中导致的质量增减,但影响微小,可忽略不计。由图 4、5 可知:修正前陶土板所测 SWCC 和纤维薄膜所测 SWCC

的相关系数 R^2 为 0.985,修正后 R^2 为 0.999,两次试验的相关性都很好,但修正后相关性更佳,因此该误差减小试验在一定程度上可降低透水石下方气泡聚集带来的主要误差,纤维薄膜能够替代陶土板进行试验。

在众多土水特征曲线模型中,Fredlund & Xing 模型[式(1)、(2)]适用于全吸力范围的任何土类,能与实测曲线更好地拟合。

$$\theta = C(\varphi) \frac{\left[\frac{\theta_s}{\left\{ \text{Ln} \left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \right]}{\left[\text{Ln} \left(1 + \frac{h}{h_r} \right) \right]} \quad (1)$$

$$C(\varphi) = 1 - \frac{\left[\text{Ln} \left(1 + \frac{h}{h_r} \right) \right]}{\left[\text{Ln} \left(1 + \frac{1 \times 10^6}{h_r} \right) \right]} \quad (2)$$

式中: a 为与进气值有关的参数; n 为与土水特征曲线过渡段斜率有关的参数; m 为与曲线末端残余含水率有关的参数; θ_s 为饱和体积含水率; θ 为体积含水率; h 为土体吸力; h_r 为残余含水率对应的吸力(kPa)。

图 6 为误差减小试验土水特征曲线的 Fredlund & Xing 模型(F&X 模型)的拟合曲线,曲线与实测值能较好地重合;表 4 为土水特征曲线 Fredlund & Xing 模型拟合结果,相关系数 $R^2=0.985$,表明 F&X 模型能对南方湿热地区的红黏土进行较好的拟合。

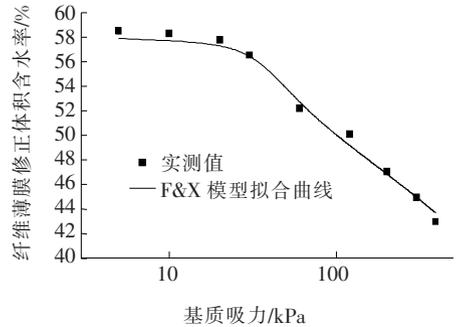


图 6 误差减小试验土水特征曲线 F&X 模型拟合曲线

表 4 土水特征曲线 Fredlund & Xing 模型拟合结果

压实度/%	a	n	m	h_r/kPa	R^2
96	33.398	4.479	0.064	220.141	0.985

4 结果与讨论

通过试验可知:纤维薄膜可以替代陶土板进行基于轴平移技术的土水特征曲线的测量。采用孔径为 $0.1 \mu\text{m}$ 、进气值为 400 kPa 纤维薄膜测量重塑黏土的 SWCC 所需的平衡时间远远短于使用高进气值陶土

板进行测量所需的平衡时间。纤维薄膜所测曲线低于陶土板所测 SWCC,但进行误差减小试验后,曲线基本与之吻合,F&X模型也能对南方湿热地区的红黏土进行较好的拟合。因此,如果能用纤维薄膜代替陶土板来改善达到吸力平衡所需的时间,将会很大程度上缩短整个试验的时间,具有一定的工程实际意义。

参考文献:

- [1] 栾茂田,李顺群,杨庆.非饱和土的理论土-水特征曲线[J].岩土工程学报,2005(6).
- [2] Fredlund D G, Xing A, Huang S. Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-Water Characteristic Curve[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1994, 32(4):A159.
- [3] 左威,郑明新,孙斌.基于PF土-水特征曲线的非饱和土渗透特性预测[J].中外公路,2011(2).
- [4] 左威,文强.基于非饱和土水特征曲线的路基(堤)边坡稳定分析[J].中外公路,2011(1).
- [5] 郑健龙,刘平.膨胀土土水特征曲线的研究[J].长沙交通学院学报,2006(4).
- [6] 罗启迅,黄靖,陈群.竖向应力及干密度对砾石土土-水特征曲线的影响研究[J].岩土力学,2014(3).
- [7] Junhui Zhang, Junhui Peng, Yejuan Chen, et al. Estimation of Soil-Water Characteristic Curve for Cohesive Soils with Methylene Blue Value[J]. Advances in Civil Engineering, 2018(5):1-7.
- [8] 李志清,李涛,胡瑞林,等.非饱和土土水特征曲线(SWCC)测试与预测[J].工程地质学报,2007(5).
- [9] 谭晓慧,余伟,沈梦芬,等.土-水特征曲线的试验研究及曲线拟合[J].岩土力学,2013(S2).
- [10] 李晓云,赵宝平.压力板仪法测土-水特征曲线试验研究[J].灾害与防治工程,2008(2).
- [11] 吴宏伟,陈锐.非饱和土试验中的先进吸力控制技术[J].岩土工程学报,2006(2).
- [12] James M. Tinjum. Soil-Water Characteristic Curves for Compacted Clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(11):1060-1069.
- [13] 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]. Géotechnique, 1999, 51(6):573-576.
- [14] 陈辉,韦昌富,陈盼,等.一种测定非饱和土-水力学参数的方法[J].岩土力学,2010(10).
- [15] 伊盼盼,牛圣宽,柳燕子.非饱和土的土水特征曲线测试方法研究[J].中国农村水利水电,2016(1).
- [16] 李幻,吴家琦,侯蕊,等.应用一步流动法快速测定土水特征曲线试验研究[J].人民长江,2020(2).
- [17] 何锦堂.非饱和土土水特征曲线的影响因素及其预测[D].桂林理工大学硕士学位论文,2017.
- [18] 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(4).
- [19] 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(3):634-647.
- [20] Nishiumura T, Koseki J, Fredlund D G, et al. Microporous Membrane Technology for Measurement of Soil-Water Characteristic Curve[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(1):201-208.
- [21] Won-Taek H, Young-Seok J, Seonghun K, et al. Estimation of Soil-Water Characteristic Curves in Multiple-Cycles Using Membrane and TDR System[J]. Materials, 2016, 9(12):1019.
- [22] Hailong Wang, Junichi Koseki, Tomoyoshi Nishimura, et al. Membrane Filter Properties and Application of the Filter to Undrained Cyclic Triaxial Test of Unsaturated Materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(8):1196-1202.
- [23] 姚永胜,张军辉,李崛,等.江西省昌樟高速公路改扩建工程老路基渗水处理方法研究[J].中外公路,2018(3).
- [24] 张军辉,邓宗煌,刘杰,等.南方湿热地区既有路基快速检测方法研究[J].中外公路,2019(6).
- [25] Junhui Zhang, Yejuan Chen, Houxuan Wu. Measurement of Water Content of Red Clays Using X-Ray CT[J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2015, 8(3):1099-1103.
- [26] 卢宁,William J. Likos.非饱和土力学[M].北京:高等教育出版社,2012.
- [27] 张芳枝,陈晓平.反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J].岩土工程学报,2010(1).
- [28] 叶云雪,周龙,刘小文.透水石对GEO-Experts土水特征曲线压力板仪排水的影响[J].煤田地质与勘探,2015(5).
- [29] 李顺群,贾红晶,王杏杏,等.轴平移技术在基质吸力测控中的局限性和误差分析[J].岩土力学,2016(11).