

文章编号: 1000-7598 (2012) 04-1025-06

测定非饱和土水力参数的一步流动方法研究

伊盼盼^{1,2}, 韦昌富¹, 陈盼¹, 马田田¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 武昌理工学院, 武汉 430223)

摘要: 详细介绍了改进的常流速联合测试系统, 该系统增加了气泡冲刷和量测装置, 能够冲刷试验过程中溢出陶土板的气泡并测量气泡的体积, 进而对溢出水量进行修正, 使测量值更加接近于真值。使用该系统对试样进行一步脱湿、吸湿流动试验, 得出溢出水量随时间变化的关系曲线, 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, 反算得出试样脱湿段和吸湿段的土-水特征曲线和渗透函数并和实测数据进行对比。结果表明, 该方法能很好的拟合实测溢出水量随时间变化的关系曲线, 通过模型得出的土-水特征曲线和实测值比较接近, 证实了该方法的可靠性。并且, 与传统的测试方法相比, 该方法能够节约大量的时间。因此, 通过一步流动试验测定非饱和土-水力学参数的方法是可行的。

关键词: 改进的常流速联合测试系统; HYDRUS-1D; 一步流动试验; 土-水特征曲线; 渗透函数;

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

A one-step outflow method for measuring hydraulic parameters of unsaturated soils

YI Pan-pan^{1,2}, WEI Chang-fu¹, CHEN Pan¹, MA Tian-tian¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Wuchang University of Technology, Wuhan 430223, China)

Abstract: An improved combined system with constant flow method and additional equipment to scour and quantify the air bubbles is introduced in detail. In order to make the measurement closer to the true value, we can correct the overflow of water by measuring the volume of the air bubbles. The curves of outflow with time are observed from one-step drying and wetting outflow experiment. The parameters which are evaluated using the HYDRUS-1D software are used to determine the drying and wetting soil-water characteristic curve (SWCC) and the hydraulic conductivity function. By comparing the measured data, it is shown that the method can fit the observed curves of outflow with time correctly so as to verify the reliability of the method. The difference of SWCCS between the estimated and measured is small. In addition, comparing with the traditional methods, the method proposed enables experiments to complete in a short period of time. Therefore, the method proposed for determining hydraulic parameters of unsaturated soils by one-step outflow test is feasible.

Key words: improved combined testing system with constant flow method; HYDRUS-1D; one-step outflow test; soil-water characteristic curve; hydraulic conductivity function

1 引言

非饱和土水力参数包含土-水特征曲线和渗透函数, 它们分别表示基质吸力和渗透系数随着含水率变化的关系。在分析非饱和土的变形与强度变化、降雨入渗、污染物地下迁移等问题时, 这些参数起到了不可或缺的作用^[1-6]。

目前常用的测定非饱和土水力参数的仪器主要

有压力板仪、Tempe 仪、常流速实验系统等^[7-10]。压力板仪、Tempe 仪只能测量平衡状态下试样脱湿段的土-水特征曲线, 然后根据试样的土-水特征曲线推算出渗透函数曲线^[11-12]。在压力板试验中, 试样取出称重时土颗粒容易剥落, 从而导致较大的试验误差。联合测试系统^[9]能较好地测量试样的土-水特征曲线, 但非饱和渗透系数的量测存在试验时间长、试验误差较大的问题。另外, 这些试验测试

收稿日期: 2010-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11072255, 10872211); 中国科学院方向性项目(No. kzcxz-yw-150); 中国科学院“百人计划”择优项目资助。

第一作者简介: 伊盼盼, 女, 1984 年生, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土水力学参数的测试方法方面的研究工作。E-mail: ppan2003@163.com

通讯作者: 韦昌富, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学与多相孔隙介质多场耦合问题方面的研究工作。

E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn

都是在平衡条件下进行, 根据土类不同测试过程需要几周甚至几个月的时间。因此, 能够快速、有效地测定非饱和土-水力学参数显得尤为重要。

近来, 研究者们对快速测定非饱和土-水力参数的方法进行了深入和广泛的研究。Gardner^[13]首次提出流动试验法, 该方法历时短, 没有复杂的边界条件, 得到广泛认可。由于该方法通过求解非线性流动方程得到非饱和土水力参数, 存在求解参数不惟一的问题, Doering^[14-17]等对此方法进行了完善, 得到比较理想的结果。Kool 等^[18]和 Parker 等^[19]提出通过一步流动试验, 并结合数值反算方法得到非饱和土-水力参数的方法, 得到了更加广泛的应用。

在流动试验中, 溢出水量随时间的演化规律除了受施加吸力大小的影响之外, 还受到陶土板材料渗透性的制约。上述流动试验均没有考虑到陶土板对试样溢出水量随时间变化规律的影响。最近, Lu 等^[10]提出, 可以把整个测试过程作为一个初始/边界值问题, 并把陶土板渗流过程和试样渗流过程一起加以考虑, 这样就能够很好地模拟陶土板对试样渗流过程的影响, 从而得到更为准确的溢出水随时间的变化曲线。本文在此基础上开展了一步脱湿、吸湿流动试验, 并且利用一维水分运移过程分析软件 HYDRUS-1D 分别对脱湿段和吸湿段溢出水随时间的流量曲线进行拟合, 同时分析反算出一些难以实测的水力学参数, 进而得到非饱和土干/湿土-水特征曲线和渗透函数曲线, 并与实测的平衡状态下试样的土-水特征曲线和饱和渗透系数进行对比, 以验证该方法的可靠性与实用性。

2 数学模型

2.1 水分运动基本方程

忽略土中水平和侧向水流运动, 仅考虑一维垂向运动, 土样中水分变化可由 Richards 方程描述, 即

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) \quad (1)$$

式中: θ 为体积含水率; h 为压力水头; $K(h)$ 为渗透函数; t 为时间; z 为土样深度。

2.2 土-水特征曲线及渗透函数

土-水特征曲线模型选用比较常用的 van Genuchten 模型^[20]:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

van Genuchten 模型与 Mualem 模型^[21]相结合得到渗透函数的表达式:

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中: θ_s 为饱和含水率; θ_r 为残余含水率; α 、 m 、 n 为经验参数; K_s 为饱和渗透系数; S_e 为有效含水率; l 为孔隙结构参数。

2.3 初边值条件

2.3.1 初值条件

对试样施加一步吸力 P 之前, 先施加一小吸力 P_0 (略大于试样进气值), 使试样由饱和状态变为非饱和状态。

$$h = h_0(z) + h't = 0, \quad 0 \leq z \leq H \quad (5)$$

这里 $h_0 = P_0 / \rho g$, $z = 0$ 是试样上部边界, $z = H$ 是试样下部边界。这里 h' 为试样底部与盛水杯内水面的高差。试样底部高于盛水杯水面为正, 反之为负, 但试验过程中宜控制两者在同一水平面上。

2.3.2 边值条件

上部边界流量恒为 0, 其数学表达式为

$$Q = 0, \quad t > 0, \quad z = 0 \quad (6)$$

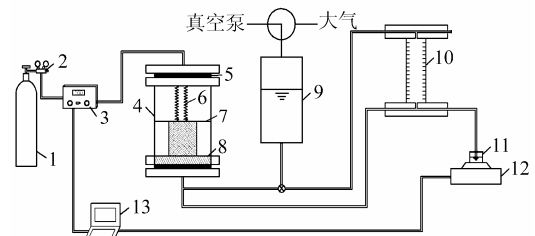
下部边界为压力边界, 用压力水头表示为

$$h = h(t), \quad t > 0, \quad z = H \quad (7)$$

这里 $h(t)$ 为试样下部边界的水头。

3 改进的常流速联合测试系统介绍

该改进的常流速联合测试系统是在原系统^[9]的基础上改制而成, 其示意图如图 1 所示。该系统主要由压力控制系统、压力室、储水容器及气泡量测系统、称量系统、数据采集系统等主要部分构成。



1—高压氮气瓶 2—减压阀 3—压力调节泵 4—压力室 5—密封圈
6—弹簧 7—铁丝网 8—高进气值陶土板 9—储水容器
10—气泡测量系统 11—盛水杯 12—电子天平 13—数据采集装置

图 1 改进的常流速联合测试系统示意图

Fig.1 The sketch of improved combined testing system with constant flow method

压力控制系统由高压氮气瓶、减压阀、压力调节泵等部分构成。减压阀把氮气瓶里的高压气体变成低压气体,起粗调作用。压力调节泵能精确控制给压力室输入的气压力值,起到细调作用,其量程为 500 kPa,精度为 0.1 kPa。

压力室做了较大的改进。由原来的顶部、底部都装有高进气值陶土板改成只有底部装有高进气值陶土板,进气方向也由原来的从环向进气改成从顶部进气,这种改进是为了更好地模拟一维渗流问题。压力室的内径为 6.3 cm,高为 8 cm,由于压力室腔体比较大,可以测试不同截面积(小于高进气值陶土板面积)、不同高度试样的水力参数。当试样高度小于压力室高度时,设计在试样上方盖一铁丝网,然后在铁丝网上放置两弹簧,通过弹簧的压缩作用来固定土样。从图 1 还可以看出,压力室的底部增加了排气泡的通路,能够及时排出由陶土板中渗出的气泡,进而对试样溢出水量进行修正,使测量值更加准确。

储水容器及气泡测量系统是由一标有刻度的玻璃管及若干管线连接组成。试验开始前要先把仪器上方储水容器中的水流入气泡量测系统,使之饱和。

称量系统主要由天平及上方开有一小孔的盛水杯组成。小孔的口径很小,有利于防止水分挥发。该天平后侧有一数据线接到电脑,故数据采集系统能实时采集到天平的读数。

数据采集系统是通过 LabVIEW 软件来完成数据采集功能,它有两个数据通道用于记录吸力及天平读数随时间的变化关系。采集的时间间隔可以根据试验需要任意设置。

4 试验方案及主要步骤

4.1 试验方案

试验所用土样取自黄河三角洲,其基本物理特性如表 1 所示。

表 1 土样基本物理特性

Table 1 Physical properties of the soil used in the test

土样名称	土颗粒含量/%			土粒相对密度
	砂粒	粉粒	黏粒	
粉质砂土	69.7	30.3	0	2.67

取重塑土样过 2 mm 筛,然后测定土样的相对密度。根据试验设计的干密度、初始含水率,计算出需要装入装样容器中土样的质量,用压样法把土样压入一个直径为 5.4 cm,高为 3 cm 的圆柱形装样

容器中饱和试样,然后把吸力加至 80 kPa,进行一步脱湿流动试验。等出水恒定后,把吸力降为 0,进行一步吸湿流动试验。因为吸力是一步施加的,为了确定合理的吸力步,而设计 1 组对比试验,即把吸力步改为 50 kPa,开展一步脱湿流动试验,并与吸力步为 80 kPa 的流动试验进行对比。

4.2 主要步骤

4.2.1 试样及陶土板饱和

把制备好的试样及试验选用的高进气值陶土板放入抽真空装置,用抽气饱和法进行饱和。等抽气一段时间后(砂土约 1~2 h,粉、黏土约 3~4 h),打开进水阀门,使水进入试样。为了使试样更好的饱和,控制水位分 3 次浸没土样,每次间隔约 1 h,这样可有效的排除水中溶解的部分气体。陶土板的饱和方法同试样饱和。

4.2.2 系统管路及气泡量测管的饱和

打开仪器上方储水容器阀门,使里面的水进入气泡量测管,使之饱和。然后通过调节阀门依次对试验用到的各管线进行冲刷,直到把管路中所有气泡排出为止。

4.2.3 装样

把饱和好的陶土板放入底座,并且四周用橡皮圈密封,然后把饱和试样取出放在陶土板上,盖上周围护筒,用螺栓使护筒和底座密封。把多孔铁丝网及弹簧放在土样上方。接着,在护筒上放一密封圈并且盖上上盖板,用螺栓使护筒和上盖板密封。通过快接头把各管线与装样容器连接。

4.2.4 脱湿段 $\theta-t$ 曲线测试

试验开始前,通过调节阀门使上部储水容器中的水进入陶土板底部,对陶土板底部进行冲刷,排出装样过程中可能进入陶土板底部的气泡。并记录下此时气泡量测管的示数。打开 labview 数据采集软件,然后对试样施加一小吸力步(砂土约 2 kPa,粉、黏土约 8 kPa),使之由饱和状态变为非饱和状态。待出水稳定后,对试样施加一较大吸力步,直到溢出水量稳定。这样就可以得到脱湿段溢出水量随时间变化的 $\theta-t$ 曲线。

4.2.5 吸湿段 $\theta-t$ 曲线测试

由于试样脱湿期间,部分气泡可能溢出陶土板使陶土板底部水分排到盛水杯,使实测的溢出水量偏大。所以脱湿段结束后应该对陶土板底部进行冲刷,并记录冲刷后气泡量测管的读数,根据测得的溢出气泡的体积对试样溢出水量进行校正。然后卸载,使吸力降为 0,待天平示数稳定。这样就可以

得到吸湿段出水量随时间变化的 θ - t 曲线。

5 试验结果分析

按照上述操作步骤对制备好的试样进行饱和、装样,然后开始进行一步脱湿、吸湿试验。先对饱和试样施加一较小吸力 1 kPa,有少量水溢出,这时试样从饱和状态进入非饱和状态,然后增加吸力至 80 kPa,进行脱湿试验。等出水恒定后,对陶土板底部进行冲刷,记录溢出气泡体积,最后将吸力降到 0,进行吸湿试验。施加的吸力步和试样溢出水量的关系曲线如图 2 所示。

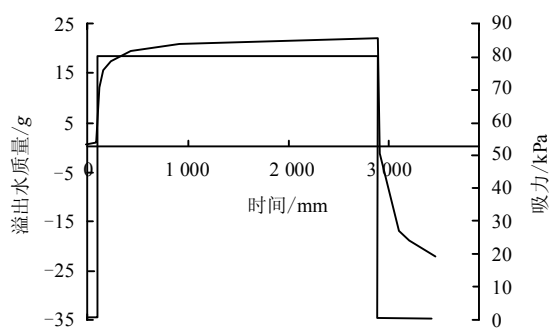


图 2 溢出水质量和基质吸力随时间变化的关系曲线

Fig.2 The curves of outflow and matric suction with time

5.1 脱湿段土-水特征曲线和渗透函数曲线

根据溢出气泡的体积修正试样溢出水质量,并换算成体积含水率,可以得到体积含水率随时间变化的关系。根据该关系曲线、初边值条件和陶土板材料参数运用 HYDRUS-1D 一维水分运移模型进行反算,拟合出试样脱湿段溢出水质量随时间的演化曲线。实测数据曲线和拟合曲线如图 3 所示,从图中可以看出, HYDRUS-1D 内部模型能够很好地拟合实测数据,其拟合参数如表 2 所示。

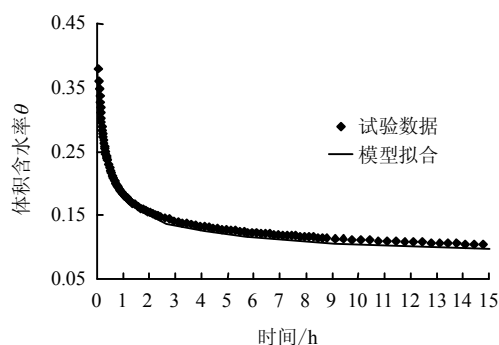


图 3 脱湿段 θ - t 曲线模型预测值与实测值比较

Fig.3 Comparison between the estimated and measured values of θ - t curve during drying

表 2 脱湿条件下的拟合参数

Table 2 The fitting parameters for drying

α / cm^{-1}	n	m	θ_r	θ_s	$k_{\text{sat}} / (\text{cm/s})$	l
0.007	5.50	0.82	0.084	0.42	5.9×10^{-5}	0.5

根据这些参数,运用 VGM 模型^[20-21],可以得到试样在脱湿段的土-水特征曲线及渗透函数曲线,如图 4 中实线所示。另外,在一步流动试验之前,用联合测试系统测得试样在平衡状态下的土-水特征曲线及饱和渗透系数,如图 4 中数据点所示。通过对比分析,模型反算得到的土-水特征曲线同实测的土-水特征曲线接近。另外,从图中还可以看出,模型预测的饱和渗透系数值和实测值也相差不大。因此, HYDRUS-1D 一维水分运移模型能够很好地反算非饱和土-土水特征曲线和渗透函数曲线。

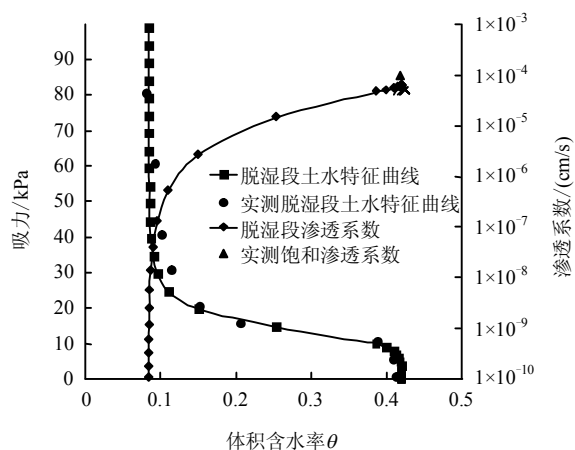


图 4 脱湿段土-水特征曲线和渗透函数曲线及与实测值的对比

Fig.4 The curves of soil-water characteristic and hydraulic conductivity function during drying and some comparison with measured values

5.2 吸湿段土-水特征曲线和渗透函数曲线

把吸力降到 0,盛水杯里的水开始进入试样。根据体积含水率随时间变化的关系数据、脱湿段的初边值条件和陶土板材料参数,运用 HYDRUS-1D 一维水分运移模型进行反算,拟合出试样吸湿段溢出水质量随时间的演化曲线。拟合曲线与实测数据的对比曲线如图 5 所示。从图中可以看出, HYDRUS-1D 内部模型能较好地拟合脱湿段试样的体积含水率随时间的变化规律,其拟合参数如表 3 所示。

把这些参数输入 VGM 模型,同样可以得出吸湿段的土-水特征曲线和渗透函数,如图 6 所示。

5.3 施加不同吸力步的对比分析

通过前面的分析结果可知,在吸力步为 80 kPa 下得到的试样平衡态的土-水特征曲线与实测值接

近。为了进行对比分析,把施加的吸力步改为 50 kPa 进行一步脱湿试验。其对比结果如图 7 所示。

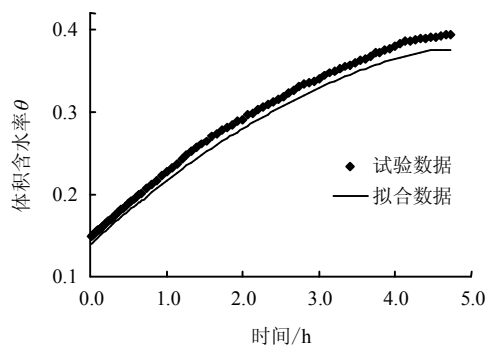


图 5 吸湿段 θ - t 曲线的模型预测值与实测值比较
Fig.5 Comparison between the estimated and measured values of θ - t curve during wetting

表 3 吸湿条件下的拟合参数

Table 3 The fitting parameters for wetting

α / cm^{-1}	n	m	θ_r	θ_s	$k_{\text{sat}} / (\text{cm/s})$	l
0.018	6.65	0.85	0.08	0.41	2.26×10^{-5}	0.5

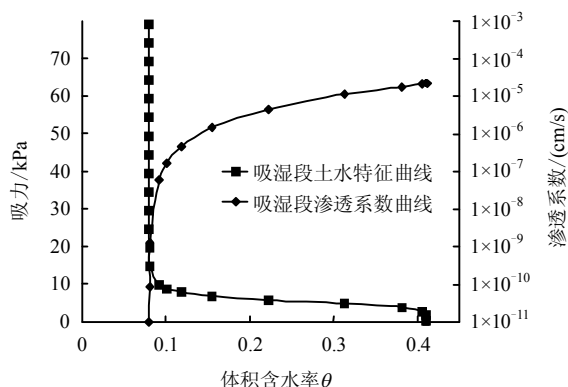


图 6 脱湿段土水特征曲线和渗透函数
Fig.6 The curves of soil-water characteristic and hydraulic conductivity function during wetting

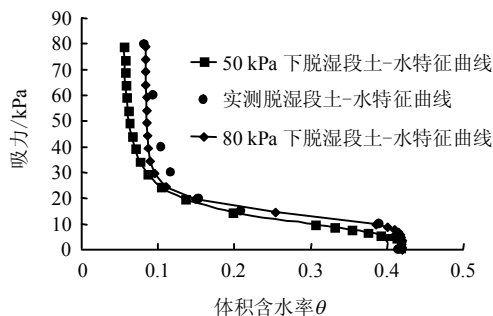


图 7 吸力为 50 kPa 和 80 kPa 下脱湿段土-水特征曲线与实测值的对比
Fig.7 Comparison of SWCCs between the measured and the one-step outflow tests during 50 kPa and 80 kPa

从图可以看出,在吸力步为 50 kPa 下,通过反算得到的试样平衡态土-水特征曲线,在体积含水率较大时与实测值接近,在体积含水率较小时与实测值相差较大,而吸力步为 80 kPa 时得到的平衡态土-水特征曲线与实测值接近。可以看出,施加的步长越小,对应的残余含水率越小。这也与以前的试验研究^[22]得到的结论相似。由于吸力步长对试验结果影响较大,故选择一个合理的吸力步是必要的。

6 结 论

(1) 改进的常流速联合测试系统增加了气泡量测系统,能够准确量测溢出气泡的体积,可以对溢出水量进行修正,进而得到溢出水量的真实值。另外,如果在脱湿过程中陶土板背面溢出气泡过多,对吸湿段的影响较大,因此,增加气泡冲刷和量测系统是必要的。

(2) HYDRUS-1D 一维水分运移过程分析软件能够很好地模拟陶土板对试样渗流过程的影响,从而能够更为准确地拟合一步流动试验测得的溢出水随时间的变化曲线,通过反算得出非饱和土的土-水特征曲线和渗透函数与实测值接近。另外,该方法历时较短,操作方便,因此,通过一步流动试验测定非饱和土水力参数是可行的。

(3) 由于该方法仅对试样施加一步吸力,通过对比试验可知,吸力步不同,反算得到的水力参数也不同,即试验结果受到施加吸力步大小的制约,这是该方法的缺点所在。故选择一个合理的吸力步是该方法可行的关键所在。

参 考 文 献

- [1] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 野外土-水特征及其工程意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 969—973.
LI Ai-guo, YUE Zhong-qi, TAN Guo-huan, et al. Field soil-water characteristics and its engineering implication[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(6): 969—973.
- [2] 刘汉乐, 周启友, 徐速. 非饱和带中非均质条件下 LNAPL 运移与分布特性实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 5: 52—57.
LIU Han-le, ZHOU Qi-you, XU Su. An experimental investigation of LNAPL migration and redistribution in unsaturated heterogeneous porous media[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 5: 52—57.

- [3] FREDLUND D G, XING A Q, FREDLUND M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(3): 440—448.
- [4] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D G, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(3): 379—392.
- [5] WEI C F, DEWOOLKAR M M. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables[J]. **Water Resources Research**, 2006, 42: 1—16.
- [6] FREDLUND D C, RAHARDJO. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑出版社, 1997: 129—137.
- [7] 孙树国, 陈正汉, 朱元青, 等. 压力板仪配套及 SWCC 试验的若干问题探讨[J]. 后勤工程学院学报, 2006, 4: 1—5.
- SUN Shu-guo, CHEN Zheng-han, ZHU Yuan-qing, et al. Coordinated ceramic plate extractors and some problems of SWCC test[J]. **Journal of Logistical Engineering University**, 2006, 4: 1—5.
- [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, 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.
- [9] 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, 31(10): 3348—3353.
- CHEN Hui, WEI Chang-fu, CHEN Pan, et al. A method for determining hydraulic parameters of unsaturated soils[J]. **Rock and Soils Mechanics**, 2010, 31(10): 3348—3353.
- [10] LU N, WAYLLACE A, CARRERA J, et al. Constant flow method for concurrently measuring soil-water characteristic curve and hydraulic conductivity function[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2006, 29(3): 230—241.
- [11] FREDLUND D G, XING A Q, HUANG S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(4): 533—546.
- [12] ALEXANDER L, SKAGGS R W. Predicting unsaturated hydraulic conductivity from the soil water characteristic[J]. **Transactions of the ASCE**, 1986, 29(1): 176—184.
- [13] GARDNER W R. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1956, 20: 317—320.
- [14] DOERING E J. Soil-water diffusivity by the one-step method[J]. **Soil Science**, 1965, 99(5): 322—326.
- [15] GUPTA S C, FARRELL D A, LARSON W E. Determining effective soil water diffusivities from one-step outflow experiments[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1974, 38: 701—716.
- [16] PASSIOURA J B. Determining soil water diffusivities from one-step outflow experiments[J]. **Australian Journal of Soil Research**, 1976, 15: 1—8.
- [17] VALIANTZAS J D, KERKIDES P G, POULOVASSILIS A. An improvement to the one-step outflow method for determination of soil water diffusivities[J]. **Water Resources Research**, 1988, 24: 1911—1920.
- [18] KOOL J B, PARKER J C, VAN GENUCHTEN M TH. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation: I. Theory and numerical studies[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1985, 49: 1348—1354.
- [19] PARKER J C, KOOL J B, VAN GENUCHTEN M TH. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation, II. Experimental studies[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1985, 49: 1354—1359.
- [20] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44: 892—898.
- [21] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. **Water Resources Research**, 1976, 12: 513—522.
- [22] 陈辉. 非饱和土水力特性测试理论与方法研究[博士学位论文 D]. 武汉: 武汉岩土力学研究所, 2010.