

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 01 - 0128 - 05

非饱和土土-水特征曲线预估方法研究

陈 辉¹, 韦昌富², 陈芳芳³, 曾金峰¹

(1. 江西科技学院 土木工程学院, 南昌 330098; 2. 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; 3. 江西科技学院 工程训练中心, 南昌 330098;)

摘 要: 在 Wei 等^[1]基于多相孔隙介质非平衡渗流理论提出的多相介质热动力学混合物理论模型的基础上, 建立了一个能描述不考虑土骨架变形的非饱和土土-水特征曲线动态模型。依据非饱和土土-水特征曲线动态模型, 推导出不考虑土骨架变形的土-水两相非饱和土的饱和度演化方程。利用饱和度演化方程并结合多步流动瞬态试验的成果, 通过数值反演, 提出了一种能利用多步流动瞬态试验数据快速确定非饱和土土-水特征曲线的方法。通过对低液限粉土及低液限黏土的多步流动瞬态试验研究发现, 饱和度演化方程能较好地模拟非饱和土在小基质吸力步长变化下饱和度的变化规律。此外, 通过对多步流动瞬态试验试样饱和度的模拟确定的非饱和土土-水特征曲线与联合测试系统测得的土-水特征曲线的结果较为一致。

关键词: 非平衡流动理论; 多相孔隙介质; 多步流动瞬态试验; 土-水特征曲线。

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Research on prediction method of soil-water characteristic curve of unsaturated soils

CHEN Hui¹, WEI Chang-fu², CHEN Fang-fang³, ZENG Jin-feng¹

(1. Department of Civil Engineering, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Engineering Training Center, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China;)

Abstract: Based on the non-equilibrium flow theory of multiphase porous media, the thermodynamic mixed theoretical model is proposed by Wei et al^[1]. According to the model, the dynamic water-soil characteristic curve of unsaturated soil, which describes the incremental relationship between capillary pressure and saturation, is deduced. Within the context of the dynamic water-soil characteristic curve, an evolution equation of saturation in an unsaturated sample is developed. The equation describes well the variation of saturation with time in a multistep transient outflow experiment provided that the deformation of the matrix of the unsaturated sample is ignored. On the basis of the evolution equation and the characteristic of the multistep transient outflow experiment, a new predicted method is proposed to determine the soil-water characteristic curve. For the low liquid limit silt and the low liquid limit clay, by comparing the theoretical simulation with experimental data in the multistep transient outflow experiment, it is shown that the saturation evolution equation can very well describe the constitutive relationship between saturation and time provided that the incremental step of matric suction is small. In addition, the calculated results of the soil-water characteristic curve agree well with the measured results of that measured by the laboratory combined system.

Key words: non-equilibrium flow theory; multiphase porous media; multistep transient outflow experiment; soil-water characteristic curve

1 引 言

非饱和土土-水特征曲线描述的是基质吸力(或水头)与能表达含水率的物理量(如饱和度、体积含水率等)之间的关系。通过它能够推算非饱和土渗透函数^[2-4]、非饱和土抗剪强度^[6-9]、非饱和土带水分分布及污染物迁移^[10-11]等问题。因此,非饱和

土土-水特征曲线在非饱和土研究及工程实践中扮演着重要的角色。

通常,测量非饱和土土-水特征曲线的试验装置主要有压力板仪^[12]、Tempe 仪、联合测试系统^[13-14]等。由于这些试验装置在确定非饱和土土-水特征曲线需待试样达到平衡状态,且试样达到平衡状态是一个非常耗时的过程。一般,利用这些试验装置确

收稿日期: 2011-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 10872211, No. 11072255); 江西科技学院自然科学基金项目(No. XYKY11102)。

第一作者简介: 陈辉, 男, 1980 年生, 博士, 讲师, 主要从事多孔介质理论及其应用方面的研究工作。E-mail: chenhuifang3589@163.com

通讯作者: 韦昌富, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 主要从事多相孔隙介质理论及其应用方面的研究工作。E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn

定一条完整的非饱和土土-水特征曲线需要几个星期，有的甚至需要几个月，测试时间的长短主要由试验数据点的个数及所采用土样的物理性质来决定。因此，为了缩短土-水特征曲线的测试时间，近年来许多的科研工作者^[15-16]提出，利用多步流动试验数据来确定非饱和土土-水特征曲线。由于该类方法均需假定土-水特征曲线能用某一数学表达式来表达，且非饱和土土-水特征曲线数学模型选择的好坏直接影响其预估效果。因此，使得该类方法预估非饱和土土-水特征曲线的适用性受到了一定的限制。

基于前人的思想及缩短土-水特征曲线测试时间这一目的，本文基于 Wei 等的多相孔隙介质非平衡渗透理论，推导出在给定基质吸力序列作用下能反映试样饱和度变化规律的饱和度演化方程，并结合多步流动试验实测结果提出了一种预测非饱和土土-水特征曲线的方法，并对该方法的适用性进行了探讨。

2 土-水特征曲线动态模型

Wei 等^[1]基于多相孔隙介质非平衡渗流理论提出了多孔介质热动力学混合物理理论模型，其数学表达式为

$$\Delta p_f - \Delta p_s = \Theta_f [\Delta n_f + \tau_f \partial_t (\Delta n_f)] \quad (1)$$

式中： p_f 、 p_s 分别为多孔介质中流体、固体的压力； Θ_f 为材料参数； n_f 、 τ_f 分别为多孔介质中流体的体积分数和特征时间。

对于不考虑土骨架变形的土-水两相非饱和土而言，则式 (1) 可变为

$$\Delta p_a - \Delta p_s = \Theta_a [\Delta n_a + \tau_a \partial_t (\Delta n_a)] \quad (2)$$

$$\Delta p_w - \Delta p_s = \Theta_w [\Delta n_w + \tau_w \partial_t (\Delta n_w)] \quad (3)$$

式中： p_a 、 p_w 分别为气相和水相的压力； n_a 、 n_w 分别为气相和水相的体积百分数，且 $n_a + n_w = \phi$ ， ϕ 为多孔介质的孔隙率； Θ_a 、 Θ_w 分别为气相和水相的材料参数； τ_a 、 τ_w 分别为气相和水相的特征时间。

当试样达到平衡状态时，此时试样中的流体不发生流动，从而有

$$\partial_t (\Delta n_w) = 0 \quad (4)$$

由静态条件下土-水特征曲线(如图 1 所示)可知，当施加较小的基质吸力增量时，基质吸力增量的表达式为

$$(\Delta p_c)_{eq} = \frac{1}{C} \Delta S \quad (5)$$

式中： $(\Delta p_c)_{eq}$ 为平衡条件下多孔介质中基质吸力增量； ΔS 为饱和度的变化； C 为容水率，且 $C =$

dS/dp_c 。

根据基质吸力的定义，并结合式 (2)~(5)，整理可得到非饱和土土-水特征曲线动态模型，其表达式为

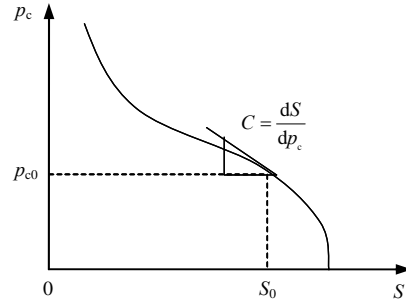


图 1 土-水特征曲线示意图

Fig.1 Sketch map of the soil-water characteristic curve

$$\Delta p_c = \frac{1}{C} \Delta S + \frac{\tau_c}{C} \Delta \dot{S} \quad (6)$$

式中： τ_c 为气水混合流体的平均特征时间。

3 饱和度演化方程

式 (6) 是一个一阶非齐次线性微分方程，通过常数变易法可得到其通解为

$$\Delta S = C \Delta p_c + B_3 \exp\left(-\frac{t}{\tau_c}\right) \quad (7)$$

式中： B_3 为常数。

开展如图 2 所示的多步流动试验，其基质吸力的施加过程如下所述：试样一开始在某一基质吸力 p_{c0} 作用下处于平衡状态，突然在 t_1 时刻，将基质吸力 p_{c0} 变为 p_{c1} ，并保持不变；在 t_2 时刻，将基质吸力 p_{c1} 变为 p_{c2} ，并保持不变；以此类推，在 t_i 时刻，将基质吸力 $p_{c(i-1)}$ 变为 p_{ci} ，并保持不变。

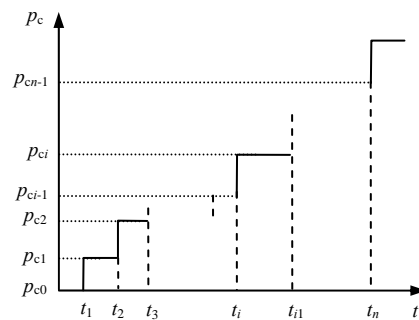


图 2 基质吸力随时间的变化

Fig.2 Relationship between matrix suction and time

由于流体的黏滞性，可以认为在基质吸力 p_{ci} 刚施加的一瞬间，非饱和土饱和度的变化为 0。于

是，可以得到开展如图 2 所示基质吸力变化的多步流动试验情况下非饱和土饱和度随时间的演化方程，其表达式为

$$S(t) = S(t_1) + \sum_{i=1}^n \Delta p_{ci} C_i \left[1.0 - \exp\left(-\frac{t-t_i}{\tau_{ci}}\right) \right] \quad (8)$$

式中： $S(t)$ 、 $S(t_1)$ 分别为任意时刻 t 、初始时刻 t_1 所对应的饱和度； C_i 、 τ_{ci} 分别为在基质吸力 p_{ci} 作用下试样达到平衡状态的容水率和平均特征时间； t_i 为基质吸力由 p_{ci-1} 变为 p_{ci} 所对应的时刻； Δp_{ci} 为基质吸力增量，即 $\Delta p_{ci} = p_{ci} - p_{ci-1}$ 。

4 土-水特征曲线的确定

采用如图 3 所示的多步流动试验装置并施加如图 2 所示变化规律的基质吸力，可以得到如图 4 所示的饱和度试验结果。

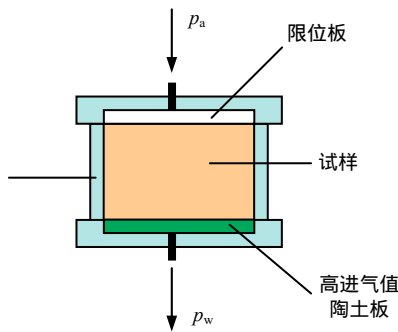


图 3 多步流动试验装置示意图
Fig.3 Sketch map of apparatus used in multistep outflow experiment

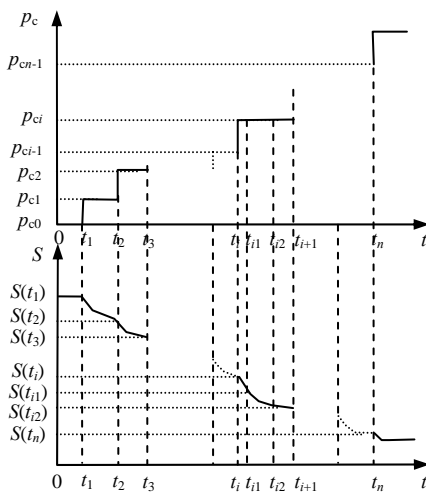


图 4 饱和度随时间的变化
Fig.4 Relationships between saturation and time

现在考虑某时间段 $t_i < t < t_{i+1}$ 中的两个时刻 t_{i1} 、 t_{i2} (见图 4)，它们所对应的饱和度 $S(t_{i1})$ 、 $S(t_{i2})$ 分别为

$$S(t_{i1}) = S(t_1) + \sum_{i=1}^n \Delta p_{ci} C_i \left[1.0 - \exp\left(-\frac{t_{i1}-t_i}{\tau_{ci}}\right) \right] \quad (9)$$

$$S(t_{i2}) = S(t_1) + \sum_{i=1}^n \Delta p_{ci} C_i \left[1.0 - \exp\left(-\frac{t_{i2}-t_i}{\tau_{ci}}\right) \right] \quad (10)$$

由于 Δp_{ci} 、 n 、 V 、 ρ_w 为已知量，且 $S(t_{i1})$ 和 $S(t_{i2})$ 可以通过试验测得。因此，可以通过式 (9)、(10) 得到 C_i 、 τ_{ci} 值。

根据求得的不同基质吸力下的容水率，可以建立基质吸力与容水率间的关系(如图 5 所示)。由容水率的定义可知，当基质吸力增量较小时，平衡状态下的试样饱和度 $S_{eq,i}$ 与基质吸力 p_{ci} 之间的关系近似等于图 5 中的阴影面积加上初始饱和度 $S_{eq,0}$ ，即

$$S_{eq,i} = S_{eq,0} + \sum_{i=1}^n \Delta p_{ci} C_i \quad (11)$$

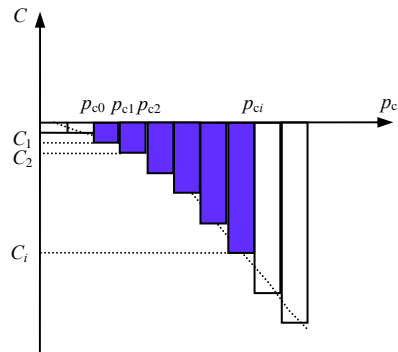


图 5 基质吸力与容水率间的关系
Fig.5 Relationships between matric suction and water capacity

5 试验成果分析

5.1 试样饱和度对比分析

试验采用如图 6 所示的多步流动试验装置，分别对低液限粉土、低液限黏土两种土样(其物理特性如表 1 所示)进行了多步流动试验研究，通过施加一定的基质吸力序列，可以得到试样饱和度的变化情况如图 7 所示。



图 6 多步流动试验装置
Fig.6 Photo of multistep outflow experimental apparatus

表 1 试验所用土样的物理特性

土样名称	土颗粒分布/%			预控干密度 /(g/cm ³)
	砂粒	粉粒	黏粒	
低液限粉土	19.4	71.6	9.0	1.650
低液限黏土	6.5	80.6	12.9	1.735

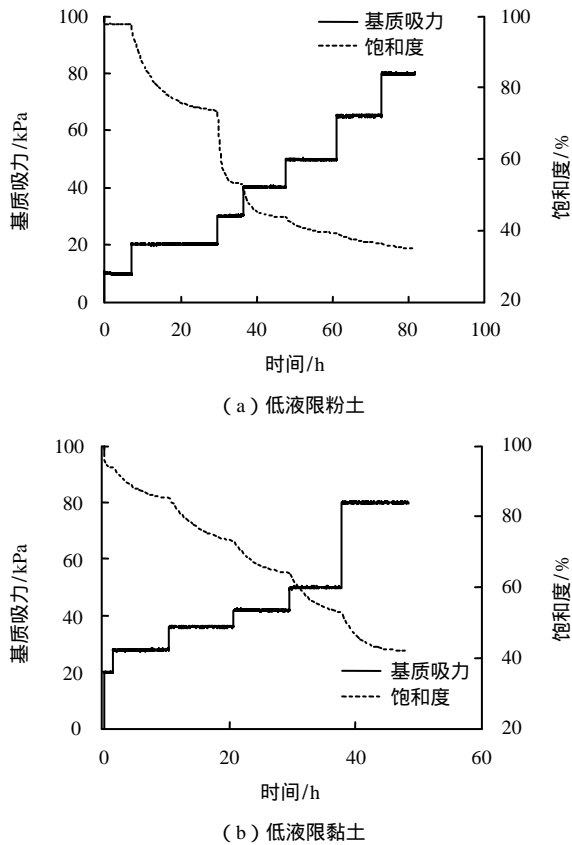


图 7 给定基质吸力序列作用下的饱和度-时间变化情况
Fig.7 Relationships between saturation and time under a given series of matrix suction

利用饱和度演化方程对给定基质吸力序列作用下的实测饱和度曲线进行拟合，其对比结果如图 8 所示。

由图可知，饱和度演化方程能较好地模拟试样饱和度的变化情况。

5.2 土-水特征曲线对比分析

通过对试样饱和度的模拟，可以得到不同基质吸力作用下的容水率 C 和平均特征时间 τ_c ，再结合容水率的定义可得到土-水特征曲线的预测结果，并与联合测试系统测得的实测结果进行对比，其对比结果如图 9 所示。

由图可知，通过对多步流动试验试样饱和度数据的拟合来确定非饱和土土-水特征曲线的方法得到的各级基质吸力作用下试样达到平衡状态时的饱和度预估值，与联合测试系统测得的各基质吸力作用下试样的饱和度接近。

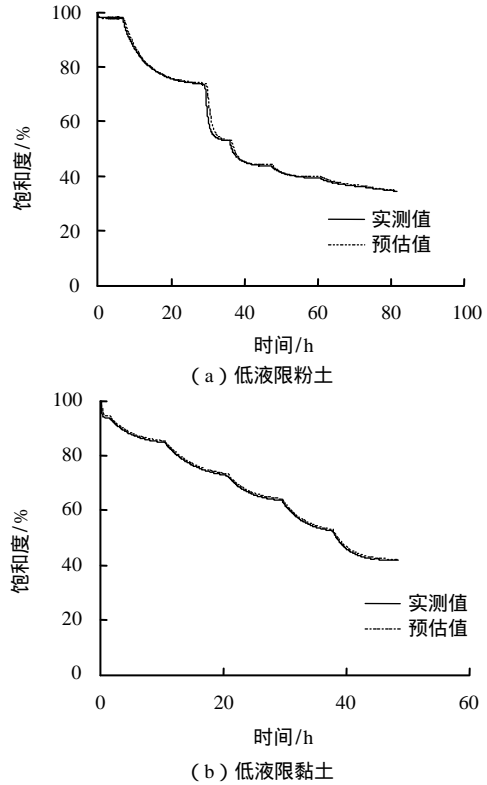


图 8 预测和实测饱和度对比分析
Fig.8 Comparison between predicted saturation and measured saturation

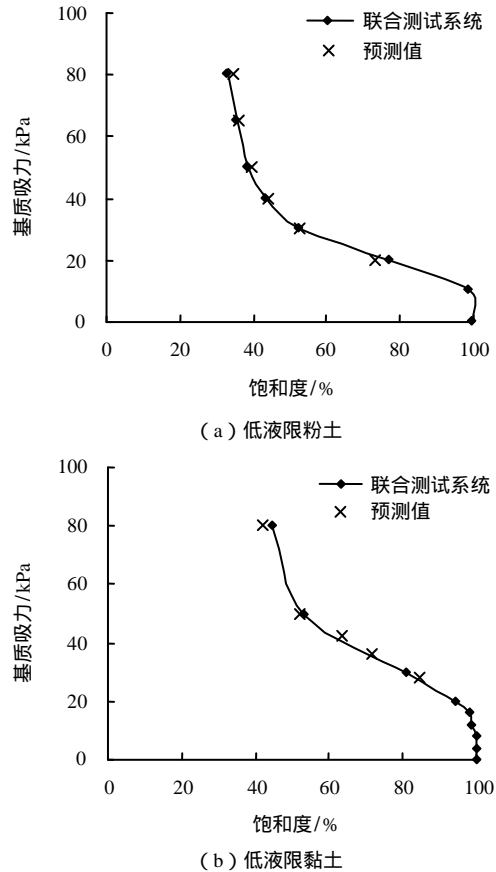


图 9 预测和实测土-水特征曲线对比分析
Fig.9 Comparison between predicted soil-water characteristic curve and measured soil-water characteristic curve

6 结 论

(1) 基于 Wei 等^[1]提出的多相孔隙介质非平衡渗流理论, 建立了一种利用试样饱和度确定非饱和土土-水特征曲线的方法。

(2) 饱和度演化方程能较好地模拟非饱和土在小基质吸力步长变化下饱和度的变化规律。

(3) 通过对多步流动试验试样饱和度数据的拟合来确定非饱和土土-水特征曲线的方法得到的各级基质吸力作用下试样达到平衡状态时的饱和度预估值, 与联合测试系统测得的各基质吸力作用下试样的饱和度接近。

参 考 文 献

- [1] WEI C F, DEWOOLKAR M M. A continuum theory of non-equilibrium two-phase flow through porous media with capillary relaxation[C]//Advances in Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics. Shanghai: [s. n.], 2006: 246 - 254.
- [2] BURDINE N T. Relative permeability calculations from pore size distribution data[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1953, 5(3): 71 - 78.
- [3] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[R]. Colorado: Civil Engineering Department, Colorado State University, 1964.
- [4] 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(5): 892 - 898.
- [5] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. **Water Resources Research**, 1976, 12(3): 513 - 522.
- [6] BABU G L S, RAO R S, PETER J. Evaluation of shear strength functions based on soil water characteristic curves[J]. **Journal of Testing and Evaluation**, 2005, 33(6): 461 - 465.
- [7] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFABI D E. The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1996, 19(3): 259 - 268.
- [8] FREDLUND D G, XING A, FREDLUND M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear to the soil water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(3): 440 - 448.
- [9] 黄润秋, 吴礼舟. 非饱和土抗剪强度的研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(3): 221 - 224.
- [10] 刘汉乐, 周启友, 徐速. 非饱和带中非均值条件下 LNAPL 运移与分布特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(5): 52 - 57.
- [11] 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, 33(5): 52 - 57.
- [12] 林琳, 杨金忠, 史良胜, 等. 区域饱和-非饱和地下水流运动数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6): 53 - 57.
- [13] LIN Lin, YANG Jin-zhong, SHI Liang-sheng, et al. Saturated and unsaturated groundwater flow numerical simulation in large scale zone[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2005, 38(6): 53 - 57.
- [14] 陈辉, 韦昌富, 李幻, 等. 测定非饱和土土-水特征曲线的溢出水校正称量法[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2141 - 2145.
- [15] CHEN Hui, WEI Chang-fu, LI Huan, et al. A modified weighing-outflow method for measuring soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2141 - 2145.
- [16] LU N, WAYLLANCE A, CARRERA L, et al. A constant flow for concurrently measuring soil water characteristic curve and hydraulic conductivity function[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2006, 29(3): 230 - 241.
- [17] 陈辉, 韦昌富, 陈盼, 等. 一种测定非饱和土水力参数的方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3348 - 3353.
- [18] CHEN Hui, WEI Chang-fu, CHEN Pan, et al. A method for determining hydraulic parameters of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3348 - 3353.
- [19] OCARROLL D M, PHELAN T J and ABRIOLA L M. Exploring dynamic effects in capillary pressure in multistep outflow experiments[J]. **Water Resources Research**, 2005, 41, W11419, doi: 10.1029/2005WR004010.
- [20] OUNG O, HASSANIZEDEH S M, BEZUIJEN A. Two-phase flow experiments in a geocentrifuge and the significance of dynamic capillary pressure effect[J]. **Journal of Porous Media**, 2005, 8(3): 247 - 257.