

DOI: 10.11779/CJGE201905002

非饱和土渗透系数的一种测量方法和预测公式

邵龙潭^{1, 2}, 温天德^{1, 2}, 郭晓霞^{1, 2}

(1. 大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116085; 2. 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116085)

摘要: 总结了非饱和土渗透系数的各种测量方法和预测模型。在此基础上, 提出一种直接测量瞬态渗透系数的方法和预测模型。这一测量方法采用多步溢出法测量土水特征曲线, 同时实时测量渗透流量和土样的含水率。在试验过程中, 把气压强增量分为两个部分: 一部分克服渗透阻力, 驱赶水分运动, 另一部分平衡静水平衡条件下的表面张力, 转化为基质势, 从而根据达西定律公式求出瞬态渗透系数。另一方面, 利用孔隙水的平衡微分方程, 引进雷诺层流理论来解释土体渗透产生的土骨架和孔隙水之间的相互作用力, 推导出了非饱和土渗透系数的理论公式, 该公式只有一个参数, 可以通过讨论不同孔隙率、饱和渗透系数与土水作用力系数之间的关系拟合得到, 从而预测出非饱和土渗透系数。通过与试验结果的对比, 证实了所提出的测量方法和预测模型的正确性。

关键词: 非饱和土; 渗透系数; 多步溢出法

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)05-0806-07

作者简介: 邵龙潭(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土和孔隙介质力学基本理论研究、土工结构稳定分析、土工试验测试技术与仪器研发。E-mail: shaolt@dlut.edu.cn。

Direct measurement method and prediction formula for permeability coefficient of unsaturated soils

SHAO Long-tan^{1, 2}, WEN Tian-de^{1, 2}, GUO Xiao-xia^{1, 2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian 116085, China)

Abstract: Various measurement methods and prediction models for the permeability coefficient of unsaturated soils are summarized. A method for measuring the permeability coefficient and a prediction model are proposed. This measurement method, based on the multistep outflow method, can measure the soil-water characteristic curve and the water content of the soil samples in real time. In this method, the increment of gas pressure potential is divided into two parts: one part overcomes the osmotic resistance and drives pore water, the other balances the surface tension of hydrostatic equilibrium conditions and converts it into matrix potential, then, the permeability coefficient can be obtained by the Darcy's law. On the other hand, the predicted model is derived based on the equilibrium equation of the water phase. Only one parameter is required, and this parameter can be more easily obtained by using the permeability tests on saturated soils with different porosity values. A number of test results in the literatures are employed to validate the proposed measurement method and predicted model, and they indicates good agreement with the experimental data.

Key words: unsaturated soil; permeability coefficient; multistep outflow method

0 引言

非饱和土水力特性包括土水特征曲线和渗透系数函数。其中, 土水特征曲线表示基质吸力与含水率(饱和度)的关系; 渗透系数函数描述的是渗透系数与基质吸力或含水率(饱和度)间的关系。

假设孔隙水在非饱和土中的流动满足达西定律公式, 即渗透流速与水势梯度成正比, 则公式中的比例系数被称为渗透系数, 也称为水力传导系数或导水系数。非饱和土的渗透系数是研究非饱和土渗流、沉降

变形、结构稳定以及污染物运移等问题的重要参数。它的大小主要受土的矿物成分、土中孔隙的大小及分布、土壤温度、土的含水率以及盐离子浓度的影响。目前非饱和土的渗透系数可以通过试验测量, 也可以用经验公式估算。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479023)

收稿日期: 2018-07-09

*通讯作者(E-mail: shaolt@dlut.edu.cn)

1 非饱和土渗透系数的试验测量方法

通过试验测量非饱和土渗透系数的方法可以分成常水头试验和变水头试验两类。常水头试验在试验过程中保持水头为常值, 即土水势保持为常值, 适用于测定透水性大的砂性土的渗透系数; 变水头试验是试验过程中水头差一直随时间而变化, 即水势为变值, 适用于测定渗透系数很小的黏性土, 这种方法也称为瞬态测量方法。

测量瞬态非饱和土渗透系数的方法有很多种, 比如水平入渗法、溢出法和瞬态剖面法等^[1-11]。水平入渗法是在保持常水头的条件下让水由水平放置的土柱一端进入土样, 使土样的含水率逐步增加, 直至饱和。然后分析不同时刻水平土柱的含水率分布, 通过给定试验系统的初始条件和边界条件, 确定土的水力扩散系数, 从而求得渗透系数。瞬态剖面法是沿着土柱安装一系列含水率和吸力的测量点, 实时进行测量, 得到整个土柱的含水率和吸力分布, 从而确定水力梯度, 最后采用达西定律求得渗透系数:

$$k_u = -\frac{\Delta V}{A \Delta t} \left(\frac{1}{dh/dz} \right), \quad (1)$$

式中, dh/dz 为水势梯度或者称为水力坡降, $v = \frac{\Delta V}{A \Delta t}$ 为渗流速率, 其中 ΔV 为数据采集点时间间隔 Δt 内排出孔隙水的体积变化量, A 是土样截面积。

瞬态剖面法是室内或施工场地确定渗透系数函数的瞬态测量技术。这种方法依赖于含水率和吸力传感器, 传感器越多测量效果越好, 因此成本比较高。此外传感器量测的是一个点, 而不是一个面, 这会造成测量结果存在离散性, 不能准确测量渗透系数。

溢出法是室内测量非饱和土渗透系数常用的一种瞬态试验方法。最早由 Gardner^[8]在 1956 年提出, 是在压力板仪试验的基础上发展而来的。具体做法是: 将土样置于压力板仪中, 通过增加孔隙气压来施加基质吸力, 监测每步吸力增量下的孔隙水排水速率与排水总量, 由此计算水力扩散系数。用孔隙水排水体积的线性方程来求解非饱和土的水力扩散系数,

$$\ln(V_0 - V_t) = \ln\left(\frac{8V_0}{\pi^2}\right) - \frac{D\pi^2 t}{4L^2}, \quad (2)$$

式中, D 为水力扩散系数, V_0 为施加某一步吸力增量排出的孔隙水体积, V_t 是以施加该级吸力瞬间到 t 时刻排出的孔隙水体积。

用式 (2) 拟合测量得到的 $(V_0 - V_t)$ 与时间 t 的关系, 拟合直线的斜率就是 D 。应用水力扩散系数 D , 可以求得在施加每一级吸力增量过程中的渗透系数。

$$k_u = D \frac{\Delta \theta}{\Delta \psi}, \quad (3)$$

式中, $\Delta \theta$ 是对应于该级吸力增量 $\Delta \psi$ 的体积含水率变化量。

该方法的主要优点是控制基质吸力, 可同时测量渗透系数和土水特征曲线。缺点是当试验时间比较长时会产生气泡并集聚在陶土板上, 影响测量精度。Miller 等^[12]、Rijterna^[13]、Kunze 等^[14]、Dam 等^[15]、Crescimanno 等^[16]、Hwang 等^[17]和 Figueras 等^[18]都曾对溢出法做过改进和完善。Benson 等^[3]对各种溢出方法进行过详细的讨论。可以说, 多步溢流法已成为测量和估计非饱和土渗透系数最有前途和最实用的方法之一^[19-22]。

2 非饱和土渗透系数的预测模型

与测量饱和土渗透系数相比, 测量非饱和土的渗透系数的试验操作复杂且费时费力。因此, 有学者研究发展了确定非饱和土渗透系数的简化方法, 称之为间接预测非饱和土渗透系数的方法, 即预测模型。Mualem 等^[23]、Fredlund 等^[24]、Leong 等^[25]和 Cai 等^[26]对不同的渗透系数模型进行过归纳总结:

(1) 经验模型是在试验测量出不同的吸力或含水率的非饱和土渗透系数的基础上, 通过拟合优化得到非饱和土的渗透系数 k_u 与吸力 ψ 或含水率 θ_w 的函数关系^[27-31]:

$$k_u = f(\psi), \quad k_u = f(\theta_w). \quad (4)$$

应该指出的是, 经验方程式需要基于大量的测试数据来归纳总结其规律, 这非常消耗时间和精力。因此使得它的发展和受到很大的局限。

(2) 宏观模型认为流体的流动可近似由土体内部整体的平均流速、平均水力梯度、平均水力半径及平均渗透系数等宏观变量来描述, 而并不考虑不同毛细管 (或孔隙) 的尺寸及其分布的影响。其模型最具代表性之一的是 Brooks 和 Corey 模型^[32], 此模型可以通过孔隙分布参数和模拟土水特征曲线间接得出渗透系数方程。其表达式可以最终简化为

$$k_r = S_e^{(2+3\lambda)/\lambda}, \quad (5)$$

式中, k_r 为相对渗透系数, S_e 为有效饱和度, λ 为孔径分布参数。

Brooks 和 Corey 模型先通过模拟土水特征曲线, 然后近似得到渗透系数方程。但 Brooks 和 Corey 模型中使用的吸力数据相对较低, 仅适用于非饱和土渗透系数较大的粗颗粒土。

(3) 统计模型是基于 Hagen-Poiseuille 方程和 Kelvin 毛细模型, 利用土水特征曲线计算土中孔隙的相关水力参数、或水在不同尺寸孔隙中连通的概率, 进而建立起非饱和土渗透系数的计算模型^[33-36]。

Parks 等^[19]; Nützmann 等^[37]; Chen 等^[38]; Crescimanno 等^[39]; Gnatowski 等^[40]; Mboh 等^[41]; Lazrang 等^[42]在多步溢出法的试验研究中,通过测得基质吸力与含水率的数据点,利用 van Genuchten 模型^[34]拟合出土水特征曲线,从而得到 4 个拟合参数,代入 Mualem 所提出的渗透方程中^[36],从而可以得出对应的渗透系数 k_u 。称其为 van Genuchten-Mualem 模型,其表达式如下:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m}, \quad (6)$$

$$k_u = k_s \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}}, \quad (7)$$

式中, S_e 为有效饱和度, θ 为体积含水率, θ_s 和 θ_r 分别是饱和和残余体积含水率, ψ 为基质吸力, k_s 为饱和状态下的渗透系数, α , m 和 n 是土水特征曲线拟合参数,其中 $m = 1 - 1/n$ 。

Rahimi 等^[43]和 Fredlund 等^[24]的研究表明:对渗透系数预测的准确性取决于试验数据的最佳拟合土水特征曲线和相对渗透系数预测模型的精度;土水特征曲线测量范围的大小也会影响渗透系数的估计值。在高吸力范围内,随着吸力的增大,渗透系数估计值的拟合效果会越来越差。

3 基于多步溢出法测量渗透系数的方法

由苏州汇才土水工程科技有限公司和大连理工大学共同研发的土水特征曲线-渗透系数联合测定仪,也就是改进的压力板仪^[44],如图 1 所示。压力板仪主要由压力室、环刀、气压力控制系统、排气冲刷系统、溢出水量测量系统、蒸发补偿系统以及计算机控制软件组成。其工作原理与传统压力板仪相同,主要的改进是增加了排出水量的蒸发补偿装置。试验时,试样底部和顶部始终与陶土板紧密贴合,施加的气体从环刀周围的小孔进入,这些通气小孔用一种透气不透水的半透膜与土样隔离,避免试样内的孔隙水从通气孔流出,同时也确保施加的气体可均匀的作用在土样上。采用这种做法可以有效抑制试样表面在压力室内的水量蒸发。试样排出水量的测量数据由高精度天平(精度为 0.001g)采集得到,图中的盛水瓶是密封的,其顶部保留 2 mm 的小孔,以便于排水针孔插入,从而可以实时测得排水量。

利用该仪器进行多步溢出法试验,基质吸力采用逐步加气压方式施加,邵和温等^[45-46]提出一种直接测量渗透系数的方法。如图 2 所示,在每一级试验过程中,瞬时施加气压强(基质吸力),即从图中的 A

点到 C 点,从 C 点到 B 点表示在该级基质吸力下土样含水率的变化过程,即图中的 CB 线,反映的是在该级气压强增量下土样的基质势与含水率的变化过程。设 E 为 CB 线上的任意一个试验数据点, F 是点 E 对应的静态土水特征曲线的点,则施加气压势的路径是线段 ACB,所对应的静态土水特征曲线路径是曲线 AFB。

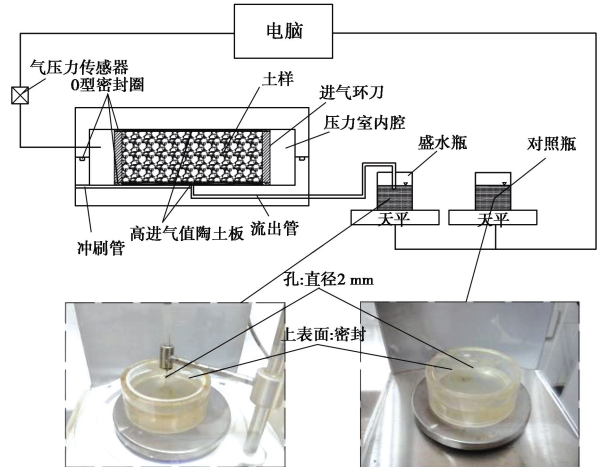


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental setup

在处理试验数据时,把气压势增量分为两部分,一部分克服渗透阻力,驱动水分运动;另一部分形成孔隙水的表面张力,转化为土水特征曲线上的静态基质势,即 $\Delta u_a = \Delta u_a^1 + \Delta u_a^2$,如图 2 所示。 Δu_a^1 克服渗透阻力,驱赶水分流出, Δu_a^2 平衡孔隙水的表面张力,转化成基质势。

从图 2 可以看到:在施加气压势增量的瞬间 $\Delta u_a^1 = \Delta u_a$,随着孔隙水流出逐渐减小,到达稳定状态时 $\Delta u_a^1 = 0$;而 Δu_a^2 则正好相反,在施加气压势增量的瞬间 $\Delta u_a^2 = 0$,随着孔隙水的排出,土样含水率降低,逐渐增大,至稳定状态时 $\Delta u_a^2 = \Delta u_a$,此时气压势增量全部转化为土样的基质势增量。

根据上面的分析可知, Δu_a^1 是克服渗透阻力、驱赶水分流动、提供水势梯度的那一部分气压势,因为总水头 $h = z + \psi / \gamma_w$,而试样高度很小,可视为一个单元体,于是

$$k_u = -\frac{\Delta V}{A \Delta t} \left(1 + \frac{\Delta u_a^1}{\gamma_w \Delta z} \right)^{-1}. \quad (8)$$

式中 ΔV 为在数据采集点的时间间隔 Δt 内排出的孔隙水的体积变化量; A 为土样截面积; Δz 为试样高度; γ_w 为水的重度。 Δu_a^1 为气压势增量驱赶水分运动的部分,其大小可以由试验数据点和土水特征曲线得出,每一个试验数据点对应一个 Δu_a^1 ,也对应一个 k_u ,即可以反映在该级吸力下,渗透系数的变化过程。

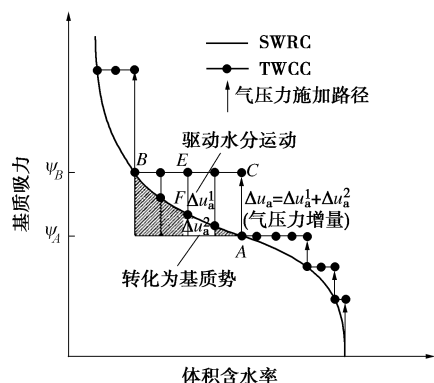


图 2 气压驱动水分运动原理图

Fig. 2 Diagram of measurement method

由本文所提出的直接测量方法可以计算得出非饱和土的渗透系数。分析多步溢出试验还可以运用 Gardner 分析方法和 van Genuchten-Mualem 模型预测法。Gardner 分析方法先得出水力扩散系数,再推算出渗透系数;van Genuchten-Mualem 模型预测法是基于测得的土水特征曲线,拟合曲线参数从而得出渗透系数预测曲线。

图 3 是在每级基质吸力下瞬态渗透系数与有效饱和度的关系曲线,分别显示了由本文的直接测量方法、van Genuchten-Mualem 模型预测方法和 Gardner 分析方法得到的渗透系数与有效饱和度之间的关系。

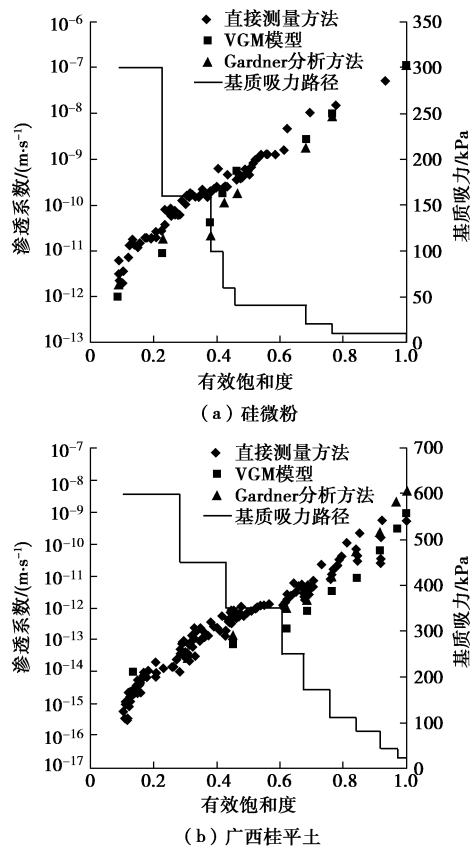


图 3 渗透系数与有效饱和度关系曲线/基质吸力与有效饱和度关系曲线

Fig. 3 Permeability coefficient-effective saturation curves and matric suction-effective saturation curves

从图中明显可以看出,用本文的方法处理试验数据,在每级吸力增量下,瞬态渗透系数都有明显的变化过程。而用 van Genuchten-Mualem 模型预测方法和 Gardner 分析方法得到的结果是每一级基质吸力对应一个渗透系数,不能反映在每一级基质吸力增量过程中渗透系数的变化过程。

4 非饱和土渗透系数预测方法

从非饱和土孔隙水平衡微分方程入手,用雷诺层流理论来解释土体渗透产生的土骨架和孔隙水之间的相互作用力,可以推导出非饱和土渗透系数的理论公式^[47-49],

$$k_u = \frac{n^2 \gamma_w}{\mu} S_r^{1+\beta} = k_s S_r^{1+\beta} \quad (9)$$

式中 k_s 为饱和土渗透系数; μ 为土水作用力系数, S_r 为饱和度;参数 β 与土颗粒的矿物成分,土中孔隙的大小及分布、温度、水中的盐离子含量和黏滞性等因素有关。参数 β 的数值可以由饱和土的渗透系数与孔隙率的关系曲线得到。

测量不同孔隙率的饱和土的渗透系数,拟合得出参数 β ,由此就可以简单地预测非饱和土的渗透系数。获得公式中参数的具体步骤:①测量不同孔隙率下的饱和土的渗透系数,得到饱和渗透系数和孔隙率的关系;②依据 $k_s - n$ 关系曲线,利用公式 $k_s = n^2 \gamma_w / \mu$,求得不同孔隙率下的土水作用力系数^[47];③用幂函数来拟合 $\mu - n$ 关系曲线,得到幂函数指数就为参数 β ;④把参数 β 、土样饱和度 ($S_r = \theta_w / \theta_s$) 和饱和渗透系数 k_s 代入式 (9) 便可得非饱和土渗透系数。

表 1 不同孔隙率下饱和渗透系数的试验数据及其曲线拟合参数

Table 1 Experimental data of saturated permeability at different porosity values and curve-fitting parameters for test soils					
土类	n	$k_s/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	μ	β	R^2
Touchet 粉砂壤土	0.395	3.43	0.455	4.507	0.902
	0.423	4.93	0.363		
	0.449	6.35	0.318		
	0.463	10.97	0.196		
Columbia 砂壤土	0.493	13.62	0.178	6.180	0.998
	0.449	8.01	0.252		
	0.471	12.27	0.181		
	0.485	15.66	0.150		
	0.527	31.20	0.089		
松砂	0.559	48.05	0.065	2.293	0.910
	0.417	1772.11	0.00098		
	0.435	2017.37	0.00093		
	0.444	2210.06	0.00089		
	0.452	2423.62	0.00084		
硅微粉	0.460	2722.03	0.00077	7.351	0.993
	0.401	0.392	4.10		
	0.470	1.500	1.47		
	0.530	5.400	5.20		

根据试验结果和引用文献的试验数据^[49], 分别分析整理 Touchet 粉砂壤土, Columbia 砂壤土, 松砂以及硅微粉 4 种不同类型的土的饱和渗透系数、参数 β 并应用式 (9) 预测非饱和状态的渗透系数, 结果示于表 1 中。

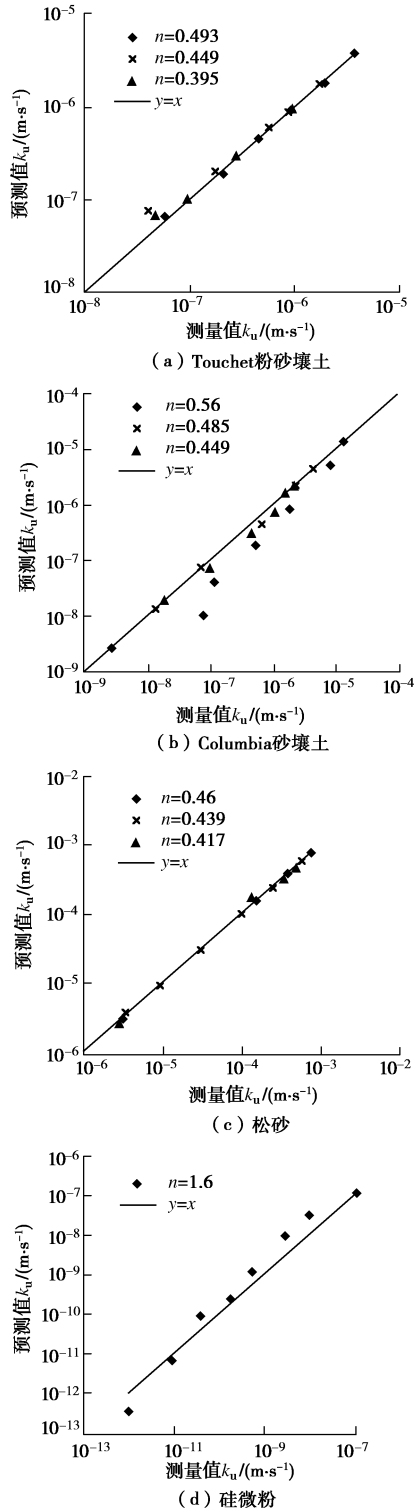


图 4 渗透系数的预测值和测量值对比

Fig. 4 Comparison between predicted and measured permeability coefficients

通过对比上述 4 种不同类型土样, 其预测值与试验结果基本吻合, 如图 4 所示。从 Touchet 粉砂壤土, Columbia 砂壤土, 松砂以及硅微粉 4 种不同类型的土来看, 土样颗粒尺寸越大, 其拟合参数 β 就越小, 即土水作用力系数越小, 土体渗流受到的阻力就越小。

5 结 论

(1) 基于多步溢出法, 利用土水特征曲线和瞬态含水率曲线提出一种直接测量非饱和土渗透系数的方法, 并与 Gardner 分析方法和 van Genuchten-Mualem 预测模型法比较, 结果表明 3 种分析方法符合得很好。

(2) 基于孔隙水平衡微分方程推导出非饱和土渗透系数的预测公式。公式中只有一个参数, 可以由饱和土的渗透系数与孔隙率的关系曲线得到。试验结果分析表明预测公式得到的非饱和渗透系数与试验结果基本符合。

参考文献:

[1] ABUHEJLEH A N, ZNIDARCIC D, ILLANGASEKARE T H. Permeability determination for unsaturated soils[C]// Unsaturated Soils, ASCE. 1993: 163 - 174.

[2] VEREecken H, KAISER R, DUST M, et al. Evaluation of the multistep outflow method for the determination, of unsaturated hydraulic properties of soils[J]. Soil Science, 1997, **162**(9): 618 - 631.

[3] BENSON C H, GRIBB M M. Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the laboratory and field[J]. Geotechnical Special Publication, 1997, **68**: 113 - 168.

[4] MEERDINK J S, BENSON C H, KHIRE M V. Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(7): 565 - 576.

[5] RAIMBAULT G. Diffusivite et conductivite hydrauliques de materiaux ou sols non satures en eau-mesure en laboratoire[J]. Bull Liaison Lab Ponts Chauss, 1986, **145**: 61 - 68.

[6] ELZEFTAWY A, MANSELL R S. Hydraulic conductivity calculations for unsaturated steady-state and transient-state flow in sand[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, **39**(4): 599 - 603.

[7] KLUTE A. The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils1[J]. Soil Science, 1992, **113**(4): 264 - 276.

[8] GARDNER W R. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data[J]. Soil Science Society of

- America Journal, 1956, **20**(3): 317 – 320.
- [9] MCCARTNEY J S, VILLAR L, ZORNBERG J G. Estimation of the hydraulic conductivity function of an unsaturated clay using an infiltration column test[C]// Proceedings of 6th Brazilian Conference on Unsaturated Soils (NSAT), UFBA. Salvador, 1981: 1 – 8.
- [10] OLSON R, DANIEL D. Measurement of the hydraulic conductivity of fine grained soils[R]// Permeability and groundwater contaminant transport (ASTM STP 746). West Conshohocken: ASTM, 1981.
- [11] WATSON K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials[J]. Water Resources Research, 1966, **2**(4): 709 – 715.
- [12] MILLER E E, ELRICK D E. Dynamic determination of capillary conductivity extended for non-negligible membrane impedance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1958, **22**(6): 483 – 486.
- [13] RIJTERNA P E. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data with nonnegligible membrane impedance. Institute for Land and Water Management[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science, 1959, **7**: 209 – 215.
- [14] KUNZE R J, KIRKHAM D. Simplified accounting for membrane impedance in capillary conductivity determinations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, **26**(5): 421 – 426.
- [15] DAM J C V, STRICKER J N M, DROOGERS P. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, **58**(3): 647 – 652.
- [16] CRESCIMANNO G, IOVINO M. Parameter estimation by inverse method based on one-step and multi-step outflow experiments[J]. Geoderma, 1995, **68**(4): 257 – 277.
- [17] HWANG S, POWERS S E. Using a multi-step outflow technique to estimate unsaturated hydraulic conductivity function for quartz sands with variable interfacial properties[C]// Presented at the annual AGU conference. San Francisco, 2001.
- [18] FIGUERAS J, GRIBB M M, MCNAMARA J P. Design of a new automated multi-step outflow test apparatus[C]// Presented at the AGU Fall Meeting. San Francisco, 2006.
- [19] PARKS J M, STEWART M A, MCCARTNEY J S. Validation of a centrifuge permeameter for investigation of transient infiltration and drainage flow processes in unsaturated soils[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2012, **35**(1): 182 – 192.
- [20] BREITMEYER R J, BENSON C H. Measurement of unsaturated hydraulic properties of municipal solid waste[J]. Geotechnical Special Publication, 2011, **211**: 1433 – 1442.
- [21] MINASNY B, HOPMANS J W, HARTE T, et al. Neural networks prediction of soil hydraulic functions for alluvial soils using multistep outflow data[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, **68**(2): 417 – 429.
- [22] VEREecken H, MAES J, FEYEN J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties[J]. Soil Science, 1990, **149**(1): 1 – 12.
- [23] MUALEM Y, DAGAN G. Hydraulic conductivity of soils: Unified approach to the statistical models[J]. Soil Science Society of America Journal, 1978, **42**(3): 392 – 395.
- [24] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 – 532.
- [25] LEONG E C, RAHARDJO H. Permeability functions for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(12): 1118 – 1126.
- [26] CAI G, ZHOU A, SHENG D. Permeability function for unsaturated soils with different initial densities[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(12): 1456 – 1467.
- [27] AHUJA L R, GREEN R E, CHONG S K, NIELSEN D R. A simplified functions approach for determining soil hydraulic conductivities and water characteristics in situ[J]. Water Resources Research, 1980, **16**(5): 947 – 953.
- [28] PHILIP J R. Linearized unsteady multidimensional infiltration[J]. Water Resources Research, 1986, **22**(12): 1717 – 1727.
- [29] DANE J H, KLUTE A. Salt effects on the hydraulic properties of a swelling soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, **41**(6): 1043 – 1049.
- [30] GILLHAM R W, KLUTE A, HEERMANN D F. Hydraulic properties of a porous medium: measurement and empirical representation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, **40**(2): 203 – 207.
- [31] DAVIDSON J M, STONE L R, NIELSEN D R, et al. Field measurement and use of soil-water properties[J]. Water Resources Research, 1969, **5**(6): 1312 – 1321.
- [32] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[R]. Fort Collins: Colorado State University, 1964: 24

- 37.
- [33] CHILDS E C, COLLIS-GEORGE N. The permeability of porous materials[J]. Proceedings of the Royal Society of London Ser A, 1950, **201**(1066): 392 - 405.
- [34] 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.
- [35] AGUS S S, LEONG E C, SCHANZ T. Assessment of statistical models for indirect determination of permeability functions from soil-water characteristic curves[J]. Géotechnique, 2003, **53**(2): 279 - 282.
- [36] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, **12**(3): 513 - 522.
- [37] NÜTZMANN G, THIELE M, MACIEJEWSKI S, et al. Inverse modelling techniques for determining hydraulic properties of coarse-textured porous media by transient outflow methods[J]. Advances in Water Resources, 1998, **22**(3): 273 - 284.
- [38] CHEN J, HOPMANS J W, GRISMER M E. Parameter estimation of two-fluid capillary pressure - saturation and permeability functions[J]. Advances in Water Resources, 1999, **22**(5): 479 - 493.
- [39] CRESCIMANNO G, GAROFALO P. Application and evaluation of the swap model for simulating water and solute transport in a cracking clay soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, **70**(5): 1943 - 1954.
- [40] GNATOWSKI T, SZATYLOWICZ J, BRANDYK T. Hydraulic properties of fen peat soils in Poland[J]. Geoderma, 2010, **154**(3): 188 - 195.
- [41] MBOH C M, HUISMAN J A, VAN G N, et al. Coupled hydrogeophysical inversion of electrical resistances and inflow measurements for topsoil hydraulic properties under constant head infiltration[J]. Near Surface Geophysics, 2012, **10**(5): 1 - 14.
- [42] LAZRANG T, KACEM M, SGHAIER J, et al. A determination of unsaturated hydraulic properties using drainage gravity test and particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Porous Media, 2013, **16**(16): 1025 - 1034.
- [43] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of range of soil-water characteristic curve measurements on estimation of permeability function[J]. Engineering Geology, 2015, **185**: 96 - 104.
- [44] WEN T D, SHAO L T, GUO X X. A new setup to measure hydraulic properties of unsaturated soils[C]// Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering, Vienna, 2018: 1644 - 1648.
- [45] SHAO L, WEN T, GUO X, et al. A method for directly measuring the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, **40**(6): 907 - 916.
- [46] WEN T, SHAO L, GUO X. Rapidly determining the unsaturated permeability by transient two-steps outflow experiment[C]// GeoShanghai International Conference. Shanghai, 2018: 228 - 235.
- [47] WEN T D, SHAO L T, GUO X X. Permeability function for unsaturated soil[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018. (doi:10.1080/19648189.2018.1515666)
- [48] 邵龙潭. 土力学研究与探索——土力学理论新体系 5 讲[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (SHAO Long-tan. Research and exploration of soil mechanics-5 lectures in the new system of soil mechanics theory[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [49] SHAO L, GUO X, LIU S, et al. Effective stress and equilibrium equation for soil mechanics[M]. London: CRC Press, 2017.
- [50] LALIBERTE G E, COREY A T, BROOKS R H. Properties of unsaturated porous media, (Hydrology Paper No 17)[R]. Fort Collins: Colorado State University, 1966.