

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0004

全吸力范围内渗透系数快速测定方法研究

刘阿强, 李 旭, 刘 艳, 张志远

(北京交通大学 城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044)

摘 要: 非饱和土渗透系数函数跨越多个数量级, 传统的测量方法动辄耗时数月, 且难以实现全吸力范围内渗透系数的测量。为了实现全吸力范围内渗透系数的快速测量, 将湿润锋前进法与瞬时剖面法相结合 (简称联合测定方法), 利用自行研制的土柱入渗装置, 开展了不同干密度条件下青海粉质黏土全吸力范围内渗透系数测量试验。试验结果表明: 在联合测定方法中, 湿润锋前进法适用于高吸力段 (基质吸力 $\psi > 25$ kPa) 渗透系数的测量, 瞬时剖面法则适用于低吸力段 (基质吸力 $\psi \leq 25$ kPa) 渗透系数的测量, 且两种方法在吸力重叠范围内渗透系数测量结果基本一致。联合测定方法可将全吸力范围内渗透系数的测量时长压缩至一周左右, 且精度良好。此外, 还对两种试验方法的误差来源进行了分析与讨论。研究结果表明: 联合测定方法能够实现全吸力范围内渗透系数的快速测量, 有望使得非饱和土渗透系数的测量成为土力学的常规试验。

关 键 词: 全吸力范围; 快速测定; 渗透系数; 湿润锋前进法; 瞬时剖面法

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 11-3209-11

A rapid determination method of hydraulic conductivity in full suction range

LIU A-qiang, LI Xu, LIU Yan, ZHANG Zhi-yuan

(Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The hydraulic conductivity function of unsaturated soil spans several orders of magnitude. Traditional measurement methods often take several months, and it is difficult to measure the hydraulic conductivity in the full suction range. In order to realize the rapid measurement of hydraulic conductivity in the full suction range, the wetting front advancing method is combined with the instantaneous profile method (here referred to as the combined determination method) in this study. A self-developed soil column infiltration device was used to measure the hydraulic conductivity of Qinghai silty clay in the full suction range under different dry densities. The test results show that in the combined determination method, the wetting front advancing method is suitable for the measurement of hydraulic conductivity in the high suction range ($\psi > 25$ kPa), while the instantaneous profile method is suitable for measuring the hydraulic conductivity in the low suction range ($\psi \leq 25$ kPa). The hydraulic conductivity determined by the two methods in the overlapped suction range is basically consistent. The combined determination method can reduce the measurement time of hydraulic conductivity in the full suction range by about one week with good accuracy. In addition, the error sources of the two measurement methods are also analyzed and discussed in this work. The results show that the combined determination method can realize the rapid measurement of hydraulic conductivity in the full suction range, which is expected to make the measurement of the hydraulic conductivity of unsaturated soil become a routine test in soil mechanics.

Keywords: full suction range; rapid determination; hydraulic conductivity; wetting front advancing method; instantaneous profile method

1 引 言

自然界和实际工程中所涉及的土壤大多处于非饱和状态。与饱和土不同, 非饱和土的渗透系数

不是常数, 而是随土壤吸力或含水率不断变化的, 其变化范围跨越多个数量级。非饱和渗透系数函数 (soil hydraulic conductivity function, 简称 SHCF) 是非饱和土渗流分析过程中的重要参数, 其测量的

收稿日期: 2022-01-05

修回日期: 2022-07-13

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51979002); 北京市自然科学基金 (No. 8192034)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51979002) and Beijing Natural Science Foundation (8192034).

第一作者简介: 刘阿强, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 主要从事非饱和土渗流方面的研究。E-mail: 19125866@bjtu.edu.cn

通讯作者: 李旭, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 主要从事特殊土力学、计算岩土力学、机器学习在岩土工程应用等方面的研究。E-mail: xuli@bjtu.edu.cn

准确性和时效性直接决定非饱和渗流问题求解精度。

目前,常用的非饱和渗透系数试验方法可被分为间接法和直接法。间接法主要根据土-水特征曲线^[1-4]、孔隙分布曲线^[5-9]、颗粒级配曲线^[10-11]等来预测 SHCF,然而预测结果与实测结果可能吻合度并不理想^[12-13]。直接法则通过试验直接测量 SHCF,可分为稳态法和非稳态法。Huang^[14]和 Samingan^[15]等基于稳态法,利用自行研制的柔性壁渗透仪测定了非饱和土的渗透系数。非稳态法进一步可被划分为瞬时剖面法(instantaneous profile method,简称 IPM)和湿润锋前进法(wetting front advancing method,简称 WFAM)。IPM 最早是由 Richards 等^[16]提出,后来逐渐被国内外诸多学者采用。Cui^[17]、Wang^[18]、Ye^[19-20]、Niu^[21]、Liu^[22]等基于 IPM,用温湿度传感器测得试验过程中的温度和相对湿度,研究了高压实高庙子膨润土在恒定体积条件下部分自由膨胀条件下的渗透特性,然而其耗时较长(数月至一年)。胡海军等^[23-24]利用 IPM 测定了非饱和黄土的渗透系数,但由于试验中入渗速率过快和传感器间距过大,所得到的渗透系数具有较大的误差。Li 等^[25]首次提出 WFAM,该方法不需要严格控制入渗速率,仅需要测量湿润锋前进速率及一个截面的含水率与吸力监测数据,即可得到 SHCF。与稳态法、IPM 相比,WFAM 将渗透系数的测量耗时从数月缩减至几天,因此具有广阔的应用前景。苗强强等^[26]基于 WFAM 对不同初始含水率的非饱和含黏土砂进行了毛细水上升试验,结果表明:可由湿润锋前进速率、含水率和吸力变化值快速确定非饱和土的渗透系数。李旭^[27]、刘丽^[28]等采用数值模拟的手段验证了 WFAM 的测量精度和适用范围,发现其能测量出较宽吸力范围内的渗透系数,且初始含水率、传感器间距和湿润锋阈值对 WFAM 的测量精度没有明显的影响。覃小华^[29]、Liu^[30]、蔡国庆^[31]等也采用了 WFAM 对非饱和渗透系数进行了探究。

虽然稳态法、IPM、WFAM 3 种试验方法都可以得到渗透系数函数,但 3 种试验方法都各有局限,其中,稳态法测量范围狭小,且需要严格控制进水量以达到稳定状态,该过程往往十分耗时。IPM 也有类似的弊端,其试验过程动辄数月,且在高吸力范围内测量的渗透系数往往具有较大的误差^[24]。与其他两种方法相比,WFAM 虽然大幅度缩短了试验时间,但是当土体从非饱和状态过渡至饱和状态时,即湿润锋消失后,便无法再继续发挥效用。因此也无法实现全吸力范围内渗透系数的测量。综上所述,目前尚缺少一种可在较短时间内(如一周左

右)实现全吸力范围内 SHCF 测量的有效方法,快速测量全吸力范围内 SHCF 仍是一项巨大的挑战。

Li 等^[32]采用数值试验验证了联合测定方法可以快速测得全吸力范围内的渗透系数,为了验证联合测定方法在室内试验中的有效性,本文利用自主研制的土柱入渗装置,实测了不同干密度条件下青海粉质黏土的 SHCF。该方法能够在同一套设备内实现全吸力范围内土体渗透系数的快速测定,并定量分析了 WFAM 和 IPM 的试验误差及适用范围,最终建立了一套标准化的测试流程。

2 试验原理

采用 Li 等^[25]提出的 WFAM,该方法基于时域上的线性假定,让时间趋近于一个很小的增量,假定湿润区的含水率等值线在入渗过程中平稳前进,在试验过程中,连续记录湿润锋、含水率及基质吸力随时间的变化,然后根据下式计算得到渗透系数:

$$k = \frac{(\theta_2 + \theta_1 - 2\theta_0)}{2(\psi_1 - \psi_2 + \gamma_w v \cdot \Delta t)} \gamma_w v^2 \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中: k 为 t_1 、 t_2 时刻的平均渗透系数,其所对应的吸力为 $0.5(\psi_1 + \psi_2)$; ψ_1 、 ψ_2 为监测截面 t_1 、 t_2 时刻的基质吸力; θ_0 为初始体积含水率; θ_1 、 θ_2 为监测截面 t_1 、 t_2 时刻的体积含水率; Δt 为时间差,即 $(t_2 - t_1)$; γ_w 为水的重度; v 为湿润锋前进速率。

IPM 是基于空间上的线性假定(即相邻监测截面上的线性假定),沿土柱安装一系列水分和吸力传感器,定期对这些点进行测量,从而得到整个土柱的含水率和吸力分布,然后根据下式计算得到渗透系数:

$$k = \frac{q\gamma_w L}{(\psi_{s1} - \psi_{s2} + \gamma_w L)S \cdot \Delta t} \quad (2)$$

式中: q 为时间间隔为 Δt 内通过某监测截面的流量; L 为相邻两监测截面的间距; ψ_{s1} 、 ψ_{s2} 为相邻两监测截面的吸力; S 为土柱的横截面积。

有关 WFAM 和 IPM 的详细介绍及理论推导参见 Li 等^[25]和 Daniel^[33]。

3 试验方法

3.1 试验方案

试验用土为来自青海省共和县橡皮山国道附近的粉质黏土,按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[34],测得土的基本物理性质见表 1。利用筛分法和密度计法测得的颗粒级配曲线如图 1 所示。计算得到的不均匀系数 $C_u = 9.38 (> 5)$, 曲率系数 $C_c = 2.38$ (介于 1~3 之间),因此该土为级配良好的土。

表 1 青海粉质黏土基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of Qinghai silty clay

土的类别	液限 W_L / %	塑限 W_P / %	最大干密度 / (g · cm ⁻³)	最优含水率 / %	土粒相对 密度 G_s
青海粉质黏土	27.2	15.1	1.75	15.5	2.7

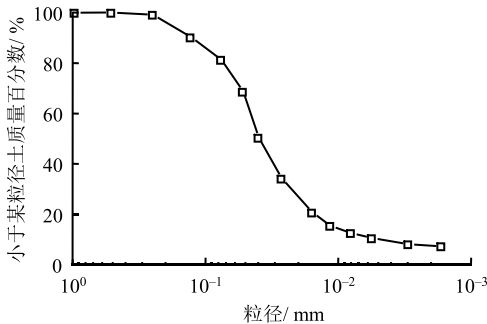


图 1 青海粉质黏土颗粒级配曲线
Fig.1 Gradation curve of Qinghai silty clay

为了探究联合测定方法测量全吸力范围内土体渗透系数的可行性，特开展土柱入渗试验研究。为获得全吸力范围内的渗透系数函数，特采用自然风干的青海粉质黏土土料，初始含水率为 0.85%；采用分层压实法进行制样，共分 20 层，每层压实 2 cm；共进行了 3 次试验，干密度分别为 1.58、1.49、1.40 g/cm³。

为了满足土柱入渗试验数据分析的需求，预先采用李旭等^[35]提出的 SWCC 快速测定方法对不同干密度土样进行了 SWCC 的测定，试验结果如图 2 所示，相应的 VG 模型^[36]拟合参数见表 2。

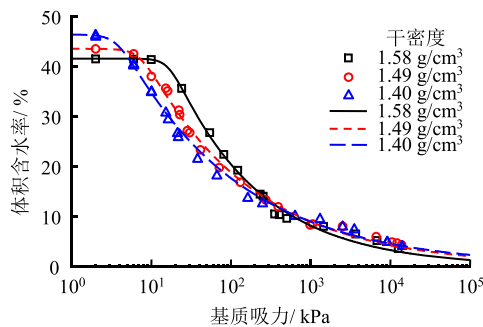


图 2 青海粉质黏土土-水特征曲线
Fig.2 Soil-water characteristic curves of Qinghai silty clay

表 2 青海粉质黏土土-水特征曲线 VG 模型拟合参数
Table 2 Fitting parameters of VG model for soil-water characteristic curve of Qinghai silty clay

干密度 / (g · cm ⁻³)	拟合参数		
	a / kPa ⁻¹	n	m
1.58	0.059	5.332	0.075
1.49	0.136	4.549	0.071
1.40	0.264	4.335	0.068

注：a 为与进气压力值相关的参数；n 为与土-水特征曲线斜率有关的参数；m 为与土-水特征曲线整体对称性有关的参数。

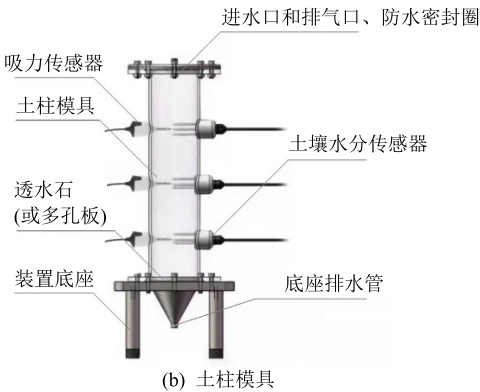
3.2 试验装置

采用自主研制的土柱渗流装置进行全吸力范围内土体渗透系数的联合测定试验，该装置主要包括土柱模具、数据采集系统和供（排）水系统，试验装置如图 3 所示。

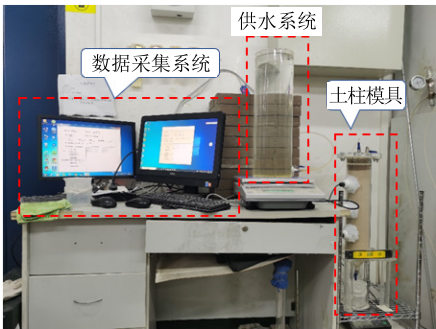
土柱模具是由一段高度透明的亚克力材质加工而成的圆筒，内径为 100 mm，壁厚为 5 mm，土柱高度为 400 mm。为了便于击实，土柱总长加工为 450 mm，土柱底板上设有 10 mm 厚的多孔板。试验分别采用 3 根 SM926 水分传感器和 TEROS31 吸力传感器（如图 3(a)所示）监测含水率及吸力随时间的变化。其中，水分传感器仅有探针部分插入土柱，探针直径为 4 mm，长为 50 mm，呈四爪结构分布，吸力传感器通过陶瓷头测量土体吸力，陶瓷头直径为 5 mm，长为 8 mm，水分传感器、吸力传感器等间距对称分布，如图 3(b)所示。数据采集



(a) 水分传感器（左）及吸力传感器（右）



(b) 土柱模具



(c) 试验装置

图 3 试验装置图

Fig.3 Test device diagram

系统需要采集含水率、吸力与水分的流入、流出质量。其中,含水率与吸力数据采用 CR1000 数采仪采集,采集间隔为 10 s;水分输入、输出质量采用精度为 0.1 g(量程为 15 kg)和 0.01 g(量程为 2 kg)的数采电子天平采集。

供水系统采用内径为 150 mm、高为 500 mm 的马氏瓶^[37],其可为土柱提供恒定水头的入渗条件,将马氏瓶用四氟乙烯管与土柱上顶盖进水口相连,打开土柱进水口阀门,马氏瓶内的水即可流入到土柱体内。土柱底板预留出水口,在试验过程中通过监测流出的水量,进而计算出水速率。

3.3 试验步骤

根据《土工试验方法标准》^[34]和 Li 等^[32]的建议,联合测定方法主要试验步骤如下:

(1) 将土样烘干、碾碎并过 2 mm 筛,称量所需质量的干土放在自然环境中静置 2 d。将土柱按照所设置的干密度分 20 层进行压实,每层压实厚度为 2 cm,直至压实到设计干密度,装填下一层时应将上一层表面刮花,避免土柱产生分层现象。填装过程中在传感器位置预先埋置钢针,以方便传感器的安装。

(2) 试样装填完毕后,在土柱上表面放置多孔板,并在多孔板上放置直径约为 5 mm 的石英砂作为缓冲层,防止破坏土柱试样。然后把水分传感器安装在预留位置并做好密封。

(3) 连接供水装置,在进行 WFAM 试验时,采用 0 kPa 水头进行垂直下渗,当湿润锋接近水分传感器时,把吸力传感器安装在预留孔洞中(若吸力传感器安装时间过早,土体基质吸力超过吸力传感器陶瓷头的进气值,会致使吸力传感器失效。对于大于吸力传感器测量范围的吸力采用预先测量的土-水特征曲线获得),待湿润锋击穿土柱一段时间后,采用 IPM 进行试验,为了缩短试验时间,把水位抬高至 5 kPa,待输入、输出流量达到稳定后即可结束试验。

(4) 拆除试验装置,采用分层取样的方式测量此时土样的烘干含水率,烘干法测量的土样含水率与水分传感器最终读数进行对比,差值应小于 1%,若差值大于 1%时,应检查传感器与土样接触是否紧密,并对传感器进行重新标定。

4 试验结果及分析

4.1 数据处理流程

联合测定方法的数据处理流程如下(以干密度 $\rho_d = 1.58 \text{ g/cm}^3$ 为例,如图 4 所示,图中, θ_d 为特征含水率):

(1) 当湿润锋通过整个土柱时,记为 t_{out} 。当 $t < t_{\text{out}}$ 时,渗流过程不符合 IPM 的线性假定(详见本文第 5 节),此时宜采用 WFAM 对实测数据进行处理:

① 由实测含水率数据绘制含水率历时曲线 $\theta(t)$ (见图 4(a));

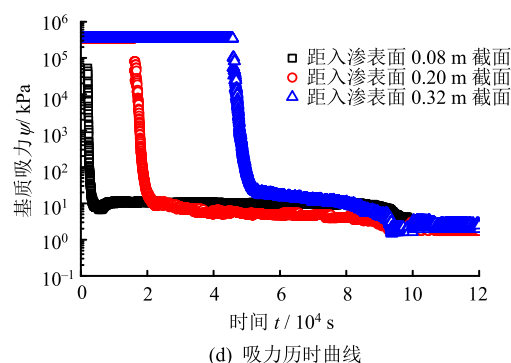
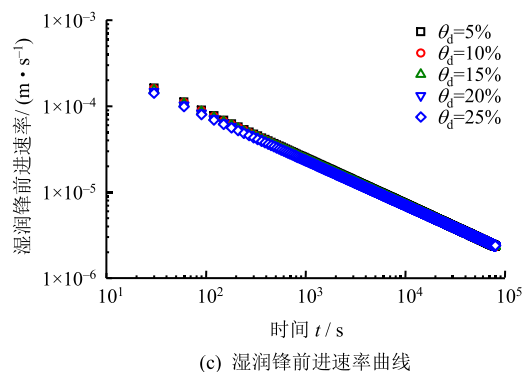
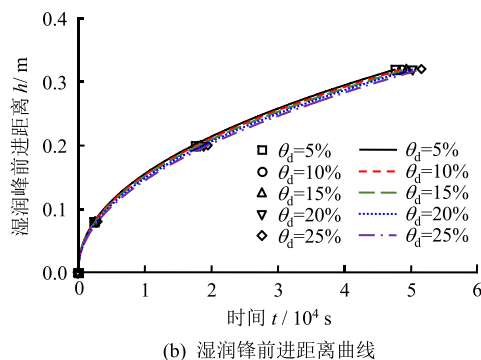
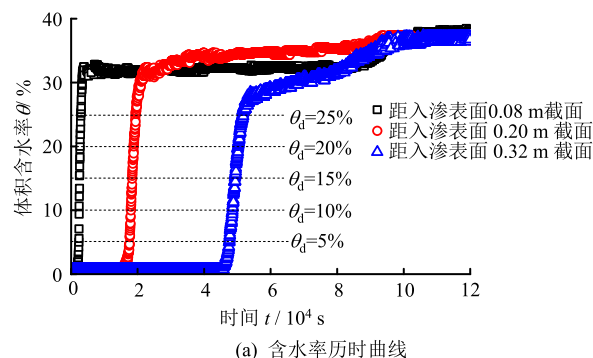


图 4 联合测定方法数据处理过程

Fig.4 Data processing process of combined determination method

②确定湿润锋前进距离曲线 $h(t)$ 。不同于传统的肉眼观测法, 本文采用数字湿润锋法^[32], 即通过水分传感器读数到达特征含水率 θ_d 来表征湿润锋到达该监测截面, 进而记录湿润锋到达该监测截面的时间。 θ_d 的选取如图 4(a)所示, 当监测截面含水率增至 θ_d 时, 即认为湿润锋行进至该位置, 由此可得到 $h(t)$ (见图 4(b));

③对 $h(t)$ 求导, 得到湿润锋前进速率曲线 $v(t)$ (见图 4(c));

④由实测的 $\theta(t)$, 根据预先测定的土-水特征曲线(见图 2 及表 2), 并结合吸力传感器实测数据, 得到吸力历时曲线 $\psi(t)$ (见图 4(d));

⑤将所得到的实测 $\theta(t)$ 、换算的 $\psi(t)$ 及求得的 $v(t)$ 代入式 (1), 即可求得 WFAM 吸力范围内的渗透系数;

(2) 当 $t \geq t_{\text{out}}$ 时, WFAM 不再适用。此时, 应采用 IPM 对实测数据进行处理。将此阶段测得的 $\theta(t)$ 、 $\psi(t)$ 代入式 (2), 即可求得 IPM 对应吸力范围内的渗透系数。

4.2 累计入渗质量及输入、输出速率

图 5 为 3 种不同干密度的土柱在不同时刻的累计入渗质量及水分流入、流出速率。以干密度 1.58 g/cm^3 测试组为例, 分析试验中的水分入渗过程。由图 5(a)可得, 在抬高水位之前, 随着时间的推移, 水分累计入渗质量 m_w 随时间的增长速率 (dm_w/dt) 逐渐减小; 为了加快入渗速率, 缩减试验时间, 将水位抬高至 5 kPa 以增大水压。由于水压力增大, dm_w/dt 较之前明显增大, 然后逐渐减小并最终趋近于常数, 说明土柱渗流已经达到稳定状态。由图 5(a)可知, 当时间约为 $6.5 \times 10^5 \text{ s}$ (约为 7.5 d) 时, 水分流入、流出速率最终趋于一致, 同样说明此时土柱渗流已经达到稳定状态。试验结果表明: 在本试验条件下, 采用联合测定方法完成一组渗透系数的测量仅需要一周左右, 与传统测量方法(稳态法、IPM)需要数月的测量时间相比, 大幅缩短了试验周期。

4.3 含水率变化过程

图 4(a)及图 6 为 3 种不同干密度条件下, 土柱在距离入渗表面 0.08 、 0.20 、 0.32 m 截面处含水率历时曲线 $\theta(t)$ 。根据 $\theta(t)$ 可得, 湿润过程大致可分为 3 个阶段: 恒定阶段, 即湿润锋未达到监测截面时, 土壤含水率维持在初始含水率; 快速增加阶段, 即当湿润锋到达监测截面时, 土壤吸力迅速下降, 产生了较大的水力梯度, 水分迅速进入干燥土壤孔隙中; 缓慢增加阶段, 即此阶段中, 湿润锋已经越

过传感器, 土壤的含水率缓慢增加并趋于稳定。

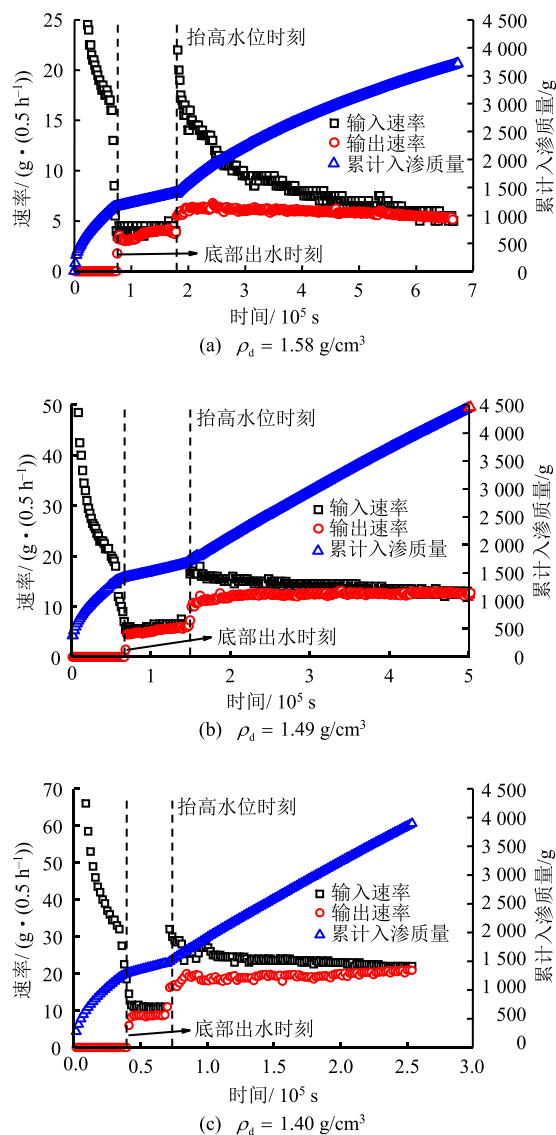


图 5 累计入渗质量及输入、输出速率
Fig.5 Cumulative infiltration mass and inflow and outflow rates

从 3 个监测截面快速增加阶段可知, 距入渗表面 0.08 m 处监测截面坐标点较为稀疏, 距入渗表面 0.32 m 处监测截面坐标点更加密集, 该现象表明湿润锋前进速率 v 随着时间的推移在减小。

4.4 湿润锋前进速率

本研究采用数字湿润锋来判断湿润锋的运动规律, 以特征含水率 θ_d (在快速增加阶段选取) 来表征湿润锋所在位置, θ_d 选取方法如图 4(a)所示, 分别选取含水率为 5% 、 10% 、 15% 、 20% 、 25% 作为 θ_d , 当监测截面含水率增至 θ_d 时, 即认为湿润锋行进至该位置, 此处的时间记为 t_i 。把某一 θ_d 下的湿润锋前进距离 h_i 与时间 t_i 绘制在图 4(b)中, 将图 4(b)中的试验曲线利用幂函数拟合并求导, 即可

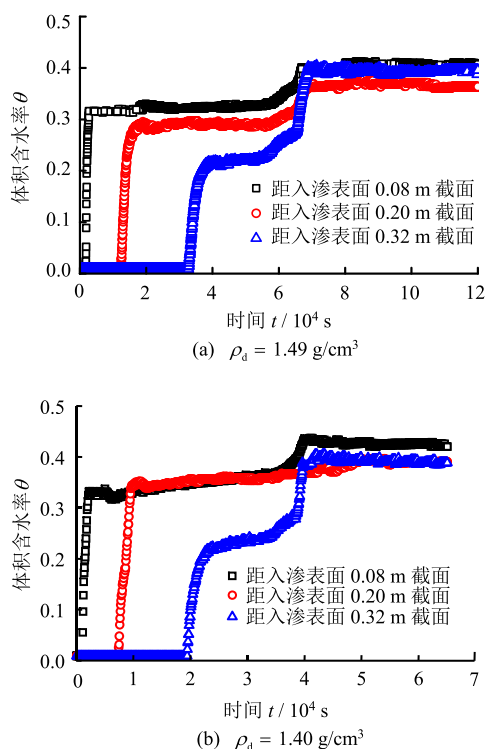


图6 不同监测截面含水率历时曲线
Fig.6 Duration curves of moisture content at different monitored sections

得到 v 随时间的变化关系, 如图 4(c) 中所示。

由图 4(b) 可以看出, 在不同 θ_d 下, 湿润锋前进距离曲线 $h(t)$ 会产生一定偏移, 随着 θ_d 的增大, $h(t)$ 会在时间轴上向右偏移。与初始含水率的差值越大, 偏移越严重。然而, 由图 4(c) 观察可知, 不同 θ_d 所得到的 v 几乎是重合的, 说明 θ_d 的选取对 v 几乎无影响。对于同一土柱, 由式 (1) 可得, θ_d 的选取对渗透系数也几乎不产生影响。因此, 采用数字湿润锋记录湿润锋前进位置, 进而计算 SHCF 是可靠的。

图 7 为不同干密度条件下的湿润锋前进距离及速率曲线。由图可得: ①对于同一干密度土体, 随着渗流的进行, v 逐渐减慢。这是由于随着土体含水率的增大, 其基质吸力减小, 引起水力梯度的降低; ②在不同干密度条件下, 干密度越大的土体, v 越大, 这是由于较大干密度的土体具有更小的内部孔隙, 阻碍了湿润锋的前进。在后续研究中, 将根据图 7(b) 中湿润锋前进速率曲线, 采用式 (1) 计算不同干密度的 SHCF。

4.5 渗透系数函数

图 8 为采用联合测定方法测得的各干密度下青海粉质黏土全吸力范围内的渗透系数。由图可得, WFAM 和 IPM 可以较好地测定不同吸力范围内的渗透系数, 且其在吸力重叠范围内的渗透系数测量

值基本重合, 说明两种试验方法渗透系数的测量结果是可靠的, 并且能够实现全吸力范围内渗透系数的测定。此外, 由 4.1 节可得, 联合测定方法完成一组渗透系数的测量仅需一周左右。因此, 该方法可以达到快速测定全吸力范围内渗透系数的目的。

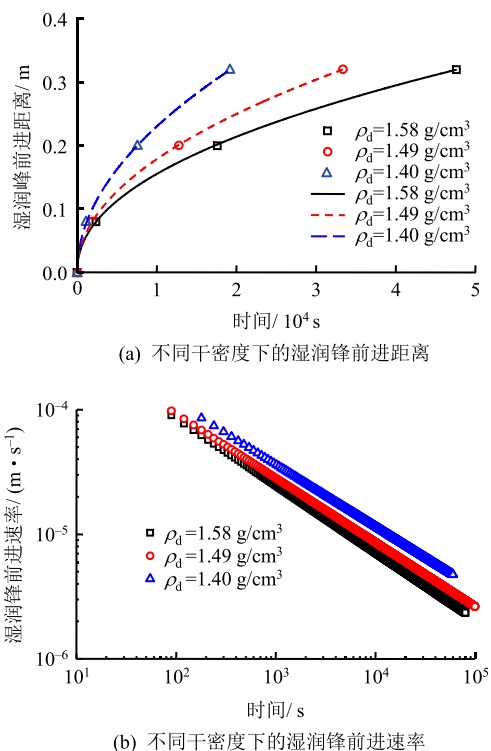


图7 不同干密度下的湿润锋前进距离及速率
Fig.7 Advancing distance and velocity of wetting front under different dry densities

本文以 Gardner 模型^[38]为例对实测数据进行拟合, Gardner 模型表达式为

$$k(\psi) = \frac{k_s}{1 + a\psi^n} \quad (3)$$

式中: k_s 为土体的饱和渗透系数。

采用 Gardner 模型对 3 种不同干密度条件下得到的渗透系数进行拟合, 结果如图 8 所示。图 8(a)、8(b)、8(c) 的拟合优度 R^2 分别为 0.94、0.97、0.94, 说明联合测定方法的测量结果能较好的体现全吸力范围内渗透系数的变化趋势。

以干密度为 1.58 g/cm^3 为例 (如图 8(a) 所示), 当仅采用 IPM 的数据对渗透系数进行拟合时, 其拟合曲线对于高吸力阶段的预测与实测数据相差较大, 即 IPM 在高吸力阶段无法反映渗透系数的变化趋势; 当仅采用 WFAM 的数据对渗透系数进行拟合时, 虽然其对高吸力阶段的渗透系数拟合效果较好, 但与低吸力阶段 IPM 的实测数据存在一定的误差, 即单独的 WFAM 同样无法反映全吸力范围内渗

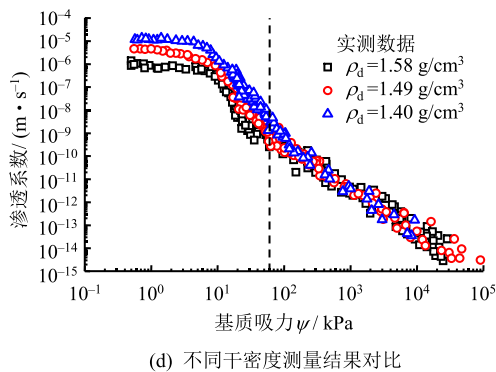
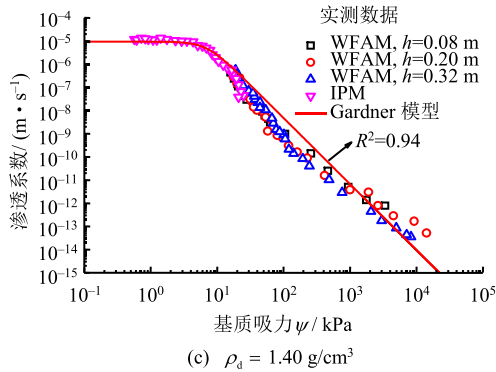
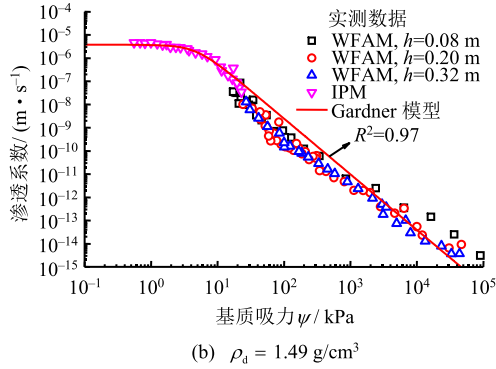
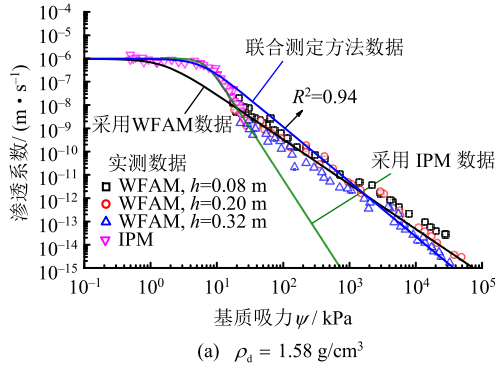


图 8 渗透系数函数
Fig.8 Hydraulic conductivity function

透系数的变化; 当联合 WFAM 和 IPM 的数据时, 实测数据能够较好地反应全吸力范围内渗透系数的变化趋势。上述分析表明, 单一的试验方法只能反映局部吸力范围内渗透系数, 无法代表完整的渗透系数函数形状。当采用局部吸力范围内的测试结果来拟合全吸力范围内 SHCF 时, 将产生不可避免的

误差。因此, 全吸力范围内渗透系数的测定宜采用联合测定方法。

由图 8(d)可得, 不同的干密度土柱的试验结果具有如下特征: 在吸力 $\psi \leq 60$ kPa 阶段, 干密度对渗透系数的影响较为明显, 且土体的渗透系数随干密度减小而增大; 在吸力 $\psi > 60$ kPa 阶段, 不同干密度的渗透系数几乎一致, 表明在吸力值较高时, 干密度对渗透系数的影响可以忽略不计, 该结果与文献[8, 39-41]中所得到的试验结果一致。

5 讨论

本研究基于 WFAM 和 IPM 联合测定方法进行, 为了实现全吸力范围内 SHCF 的快速测量, 试验中无需使用具有较高初始含水率的土体, 并保持较大的入渗速率。下面将对联合测定方法中 WFAM 和 IPM 的误差来源及适用范围进行详细的讨论。

5.1 WFAM 与 IPM 的误差来源

选取距入渗表面 0.20 m 截面为代表, 对比采用 IPM 与 WFAM 所求的水力梯度与流量, 以分析联合测定方法中 WFAM 和 IPM 的误差来源。

在距入渗表面 0.20 m 截面处将 IPM 和 WFAM 所求的水力梯度绘制在图 9 中, 图中 i^- 为 0.20 m 截面处向后方向上计算的水力梯度, i^+ 为 0.20 m 截面处向前方向上计算的水力梯度。由图 9 可得, 当 $t < t_{out}$ 时, 由 IPM 计算的 i^- 、 i^+ 、 $(i^-i^+)^{0.5}$ 之间存在较大的差异且持续时间较长, 难以满足 IPM 的线性假定; 由 WFAM 计算的 i^- 、 i^+ 、 $(i^-i^+)^{0.5}$ 三者较为接近, 虽有个别时间水力梯度很大, 但依然满足 WFAM 的时域线性假定。当 $t \geq t_{out}$ 时, 由 IPM 计算的 i^- 、 i^+ 、 $(i^-i^+)^{0.5}$ 三者非常接近, 此时可认为符合 IPM 的空间线性假定; 由于此时湿润锋已经消失, 由 WFAM 所计算的水力梯度失去物理意义, WFAM 不适用于该阶段。

选取 0.20 m 截面为代表, 分别使用 IPM 和 WFAM 计算流量 q , 汇总于图 10。其中, 由 IPM 计算得到的 q , 记为 q_{IPM} ; 由 WFAM 计算得到的 q , 记为 q_{WFAM} 。由图可得, 当 $t < t_{out}$ 时, 两者的计算流量很接近, 说明在 $t < t_{out}$ 时, 流量接近于真实流量, 该阶段渗透系数的计算误差是由于 IPM 水力梯度引起的; 当 $t \geq t_{out}$ 时, 此时 $q_{IPM} > q_{WFAM}$, 由于此时湿润锋已经通过整个土柱, 无法得到真实的 v , 故此时通过计算得到的 q_{WFAM} 是不正确的, 此阶段采用 WFAM 计算渗透系数的误差是由其错误地计算流量而引起的。

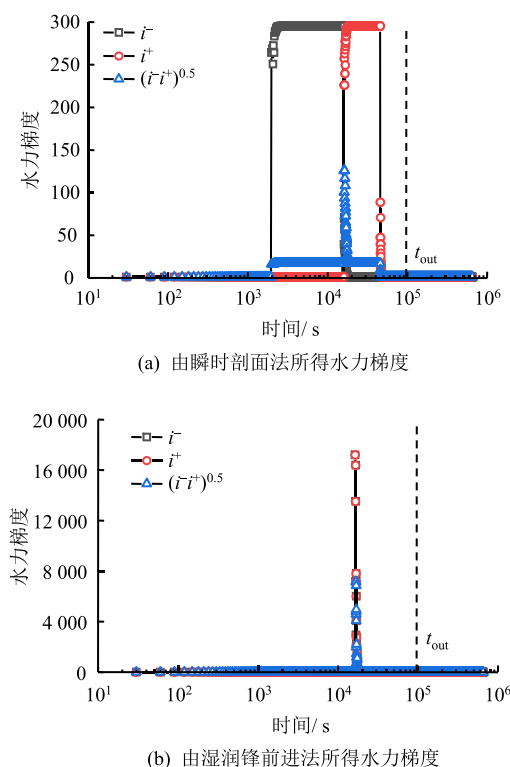


图 9 距入渗表面 0.20 m 截面处的水力梯度
Fig.9 Hydraulic gradient at the section 0.20 m from the infiltration surface

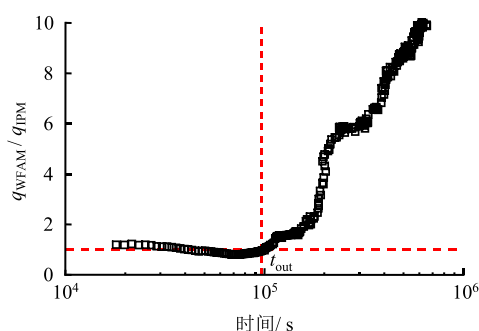


图 10 不同方法在距入渗表面 0.20 m 截面处的流量对比
Fig.10 Comparison of fluxes at the section of 0.20 m from the infiltration surface obtained by different methods

5.2 WFAM 与 IPM 的适用范围

图 11 为在全吸力范围内由 IPM 采用 3 种水力梯度计算的渗透系数。与 WFAM 的试验结果相比,在高吸力阶段 ($\psi > 25$ kPa), 采用 i^- 和 i^+ 计算的渗透系数相差 4~7 个数量级, 该误差显然不可接受; 当采用 $(i^- i^+)^{0.5}$ 进行计算时, $\psi < 1\ 251$ kPa 时得到的渗透系数与 WFAM 大致重合, 而 $\psi > 1\ 251$ kPa 时得到的渗透系数与 WFAM 相差 6 个数量级, 表明在 $\psi > 1\ 251$ kPa 也是不可接受的, 故 IPM 不适用于高吸力阶段渗透系数的测定。当底部出水时 ($t \geq t_{out}$), 整个土柱已经全部浸湿, 此时湿润锋已经消失且土体处于低吸力阶段 ($\psi \leq 25$ kPa), 无法得到

准确的 v , 因此由 WFAM 计算得到的渗透系数是错误的, 故 WFAM 不适用于低吸力阶段渗透系数的测定。该试验结果也印证了图 9、10 的分析结果。

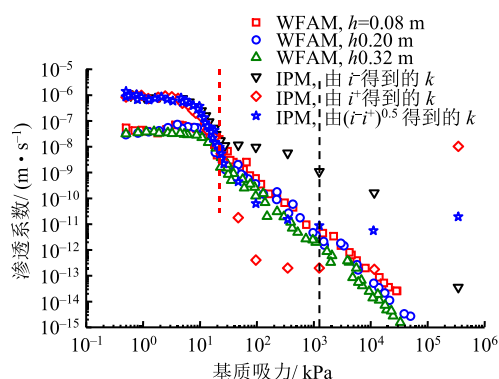


图 11 WFAM 与 IPM 在全吸力范围内的对比
Fig.11 Comparison of WFAM and IPM in the full suction range

综上可得, 在联合测定方法中, WFAM 适用于湿润锋尚未通过整个土柱之前 ($t < t_{out}$), 即高吸力阶段 ($\psi > 25$ kPa); IPM 适用于湿润锋已经通过整个土柱 ($t \geq t_{out}$), 即低吸力阶段 ($\psi \leq 25$ kPa)。

5.3 联合测定方法的适用土体类型

对于非饱和问题中常见的砂土、粉土、黏土, 联合测定方法都是适用的。但是, 在粗粒土中使用本方法时应该注意尺寸效应, 最好根据土体最大粒径设置合理的模具直径。当土颗粒粒径过大时, 水分传感器的探针可能无法与土体紧密接触, 难以获得有效的读数; 对于非常致密的黏土, 如高压实高庙子膨润土, 由于其存在吸水膨胀性, 可能导致仪器的破坏; 此外, 致密黏性土的渗透系数过低, 其渗透系数在 $10^{-13} \sim 10^{-15}$ m/s^[20], 如果采用 0 kPa 水头进行试验, 试验周期可能需要以月计数, 因此需要采用较高的入渗水头来缩短试验周期。对于原状黏性土, 由于制样、装样相对困难, 需要专门设计取样器并重新加工试验装置 (如两半模或三半模) 进行试验。

在土样干密度的控制方面, 有两种方式。其中一种是给定初始干密度和初始含水率进行制样; 另外一种是根据初始含水率和击实功进行制样, 拆样后反算干密度, 本文采用的是第 1 种方法。对于粉质土壤, 当初始含水率接近最优含水率时, 土柱虽然可以达到最大干密度, 但是由于此时初始含水率较高, 因此无法获得低于该含水率土壤的渗透系数, 因此也就无法实现测量全吸力范围内土壤的渗透系数; 当采用初始含水率接近 0 的土壤进行试验时,

土体无法压实至最大干密度, 因此需要根据实测地点的土体物性条件设计试验所需的干密度。对于本文采用的青海粉质黏土, 经试验测得, 在接近干土时, 所能达到的最大压实度为 0.93, 对应干密度为 1.63 g/cm^3 , 因此, 本文选用的干密度 $\rho_d < 1.63 \text{ g/cm}^3$ 。

6 结 论

(1) WFAM 和 IPM 可以较好地测定不同吸力范围内渗透系数, 在吸力重叠范围内, 其测量结果基本重合, 且试验时长从数月压缩至一周左右, 表明了联合测定方法在同一组土柱中可以实现全吸力范围内土体渗透系数的快速测定, 从而证明了联合测定方法的可行性, 有望使得 SHCF 的测量成为非饱和土力学中的常规试验。

(2) 在联合测定方法中, 在湿润锋尚未通过整个土柱之前 ($t < t_{\text{out}}$), 由于入渗速率过快, 导致该阶段 IPM 的水力梯度产生较大的误差, 不符合 IPM 的线性假定。当湿润锋已经通过整个土柱之后 ($t \geq t_{\text{out}}$), 此阶段无法得到准确的 v , 导致此阶段 WFAM 的流量产生误差。

(3) 在联合测定方法中, WFAM 适用于湿润锋尚未通过整个土柱之前 ($t < t_{\text{out}}$), 即高吸力阶段 ($\psi > 25 \text{ kPa}$) 渗透系数的测量; IPM 适用于湿润锋已经通过整个土柱之后 ($t \geq t_{\text{out}}$), 即低吸力阶段 ($\psi \leq 25 \text{ kPa}$) 渗透系数的测量。

参 考 文 献

- [1] MUALEM Y. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach[J]. **Water Resources Research**, 1978, 14(2): 325-334.
- [2] FREDLUND D G, XING A, HUANG S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(4): 533-546.
- [3] LEONG E C, RAHARDJO H. Permeability functions for unsaturated soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123: 1118-1126.
- [4] ZHAI Q, RAHARDJO H. Estimation of permeability function from the soil-water characteristic curve[J]. **Engineering Geology**, 2015, 199: 148-156.
- [5] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay[J]. **Engineering Geology**, 1999, 54(1-2): 117-127.
- [6] LI J H, ZHANG L M, LI X. Soil-water characteristic curve and permeability function for unsaturated cracked soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 48(7): 1010-1031.
- [7] HU R, CHEN Y F, LIU H H, et al. A water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity model for deformable soils: consideration of the change in pore-size distribution[J]. **Géotechnique**, 2013, 63(16): 1389-1405.
- [8] 李燕, 李同录, 侯晓坤, 等. 用孔隙分布曲线预测压实黄土非饱和渗透曲线及其适用范围的探讨[J]. **岩土力学**, 2021, 42(9): 2395-2404.
LI Yan, LI Tong-lu, HOU Xiao-kun, et al. Prediction of unsaturated permeability curve of compaction loess with pore-size distribution curve and its application scope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(9): 2395-2404.
- [9] 王海曼, 倪万魁. 不同干密度压实黄土的饱和/非饱和渗透系数预测模型[J]. **岩土力学**, 2022, 43(3): 729-736.
WANG Hai-man, NI Wan-kui. Prediction model of saturated/unsaturated permeability coefficient of compacted loess with different dry density[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(3): 729-736.
- [10] LI X, LI J H, ZHANG L M. Predicting bimodal soil-water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 57: 85-96.
- [11] 张昭, 程靖轩, 刘奉银, 等. 基于土颗粒级配预测非饱和渗透系数函数的物理方法[J]. **岩土力学**, 2019, 40(2): 549-560.
ZHANG Zhao, CHENG Jing-xuan, LIU Feng-yin, et al. Physical approach to predict unsaturated permeability function based on soil particle size distribution[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(2): 549-560.
- [12] MEERDINK J S, BENSON C H, KHIRE M. Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(7): 565-576.
- [13] GALLAGE C, KODIKARA J, UCHIMURA T. Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes[J]. **Soils and Foundations**, 2013, 53(3): 417-430.
- [14] HUANG S, FREDLUND D G, BARBOUR S L.

- Measurement of the coefficient of permeability for a deformable unsaturated soil using a triaxial permeameter[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(3): 426-432.
- [15] SAMINGAN A S, LEONG E, RAHARDJO H. A flexible wall permeameter for measurements of water and air coefficients of permeability of residual soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2003, 40(3): 559-574.
- [16] RICHARDS A L, WEEKS L. Capillary conductivity values from moisture yield and tension measurements on soil columns[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1953, 17(3): 206-209.
- [17] CUI Y J, TANG A M, LOISEAU C, et al. Determining the unsaturated hydraulic conductivity of a compacted sand-bentonite mixture under constant-volume and free-swell conditions[J]. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, 2008, 33: S462-S471.
- [18] WANG Q, CUI Y, TANG A M, et al. Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite sand mixture during hydration[J]. **Engineering Geology**, 2013, 164: 67-76.
- [19] YE W M, CUI Y J, QIAN L X, et al. An experimental study of the water transfer through confined compacted GMZ bentonite[J]. **Engineering Geology**, 2009, 108(3): 169-176.
- [20] 叶为民, 钱丽鑫, 陈宝, 等. 侧限状态下高压实高庙子膨润土非饱和和渗透性的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(1): 105-108.
- YE Wei-min, QIAN Li-xin, CHEN Bao, et al. Laboratory test on unsaturated hydraulic conductivity of densely compacted Gaomiaozi bentonite under confined conditions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(1): 105-108.
- [21] NIU W, YE W, SONG X. Unsaturated permeability of Gaomiaozi bentonite under partially free-swelling conditions[J]. **Acta Geotechnica**, 2020, 15(5): 1095-1124.
- [22] LIU Z, CUI Y, YE W, et al. Investigation of the hydro-mechanical behaviour of GMZ bentonite pellet mixtures[J]. **Acta Geotechnica**, 2020, 15(10): 2865-2875.
- [23] 胡海军, 李常花, 崔玉军, 等. 增湿情况重塑黄土非饱和和渗透系数的测定方法研究[J]. **水利学报**, 2018, 49(10): 1216-1226.
- HU Hai-jun, LI Chang-hua, CUI Yu-jun, et al. Research on the determination of permeability coefficient of unsaturated remolded loess under wetting condition[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2018, 49(10): 1216-1226.
- [24] HU H J, CUI Y J, LI C H, et al. Improvement of three common methods for determining hydraulic conductivity curve of unsaturated soil upon wetting[J]. **Journal of Hydrology**, 2021, 594: 125947.
- [25] LI X, ZHANG L M, FREDLUND D G. Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2009, 46(12): 1431-1445.
- [26] 苗强强, 陈正汉, 田卿燕, 等. 非饱和含黏土砂毛细上升试验研究[J]. **岩土力学**, 2011, 32(增刊1): 327-333.
- MIAO Qiang-qiang, CHEN Zheng-han, TIAN Qing-yan, et al. Experimental study of capillary rise of unsaturated clayey sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Suppl.1): 327-333.
- [27] 李旭, 范一锴, 黄新. 快速测量非饱和土渗透系数的湿润锋前进法适用性研究[J]. **岩土力学**, 2014, 35(5): 1489-1494.
- LI Xu, FAN Yi-kai, HUANG Xin. Applicability of the wetting front advancing method for measuring hydraulic conductivities of unsaturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1489-1494.
- [28] 刘丽, 吴羊, 陈立宏, 等. 基于数值模拟的湿润锋前进法测量精度分析[J]. **岩土力学**, 2019, 40(增刊1): 341-349.
- LIU Li, WU Yang, CHEN Li-hong, et al. Accuracy analysis of wetting front advancing method based on numerical simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(Suppl.1): 341-349.
- [29] 覃小华, 刘东升, 宋强辉, 等. 降雨条件下一维土柱垂直入渗模型试验研究及其渗透系数求解[J]. **岩石力学与工程学报**, 2017, 36(2): 475-484.
- QIN Xiao-hua, LIU Dong-sheng, SONG Qiang-hui, et al. Experimental study on one-dimensional vertical infiltration in soil column under rainfall and the derivation of permeability coefficient[J]. **Chinese**

- Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(2): 475-484.
- [30] LIU Q, XI P, MIAO J, et al. Applicability of wetting front advancing method in the sand to silty clay soils[J]. **Soils and Foundations**, 2020, 60(5): 1215-1225.
- [31] 蔡国庆, 刘倩倩, 杨雨, 等. 基于湿润锋前进法的不同应力状态砂质黄土土柱渗流试验[J]. **水利学报**, 2021, 52(3): 291-299.
- CAI Guo-qing, LIU Qian-qian, YANG Yu, et al. Seepage experiments of sandy loess soil column with different stress states based on wetting front advancing method[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2021, 52(3): 291-299.
- [32] LI X, ZHANG Z, ZHANG L, et al. Combining two methods for the measurement of hydraulic conductivity over a wide suction range[J]. **Computers and Geotechnics**, 2021, 135: 104178.
- [33] DANIEL D E. Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1982, 46(6): 1125-1129.
- [34] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—2019土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T50123 — 2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [35] 李旭, 刘阿强, 刘丽, 等. 全吸力范围内土-水特征曲线的快速测定方法[J]. **岩土力学**, 2022, 43(2): 299-306.
- LI Xu, LIU A-qiang, LIU Li et al. A rapid method for determining the soil-water characteristic curves in the full suction range[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(2): 299-306.
- [36] 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.
- [37] MCCARTHY E L. Mariotte's bottle[J]. **Science**, 1934, 80(2065): 100.
- [38] GARDNER W R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. **Soil Science**, 1958, 85(4): 228-232.
- [39] 陶高粱, 吴小康, 甘世朝, 等. 不同初始孔隙比下非饱和黏土渗透性试验研究及模型预测[J]. **岩土力学**, 2019, 40(5): 1761-1770.
- TAO Gao-liang, WU Xiao-kang, GAN Shi-chao, et al. Experimental study and model prediction of permeability coefficient of unsaturated clay with different initial void ratios[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(5): 1761-1770.
- [40] 李华, 李同录, 张亚国, 等. 不同干密度压实黄土的非饱和渗透性曲线特征及其与孔隙分布的关系[J]. **水利学报**, 2020, 51(8): 979-986.
- LI Hua, LI Tong-lu, ZHANG Ya-guo, et al. Relationship between unsaturated permeability curve and pore-size distribution of compacted loess with different dry density[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2020, 51(8): 979-986.
- [41] 刘丽, 吴羊, 李旭, 等. 压实度对宽级配土水力特性的影响研究[J]. **岩土力学**, 2021, 42(9): 2545-2555.
- LIU Li, WU Yang, LI Xu, et al. Influence of compaction on hydraulic properties of widely-graded soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(9): 2545-2555.