

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.024

# 考虑测试过程体变影响的非饱和土 持水-渗透行为研究

仪立宇<sup>1,2</sup>, 曹天书<sup>3</sup>, 饶杰龙<sup>1,2</sup>, 许伟<sup>1</sup>, 陈之祥<sup>2</sup>, 郭晓霞<sup>4</sup>

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 武汉 湖北 430071;

3. 湖北省建设工程质量安全监督总站, 武汉 湖北 430064; 4. 大连理工大学, 大连 辽宁 116000)

**摘要:** 为定量评估测试过程体积变形对持水-渗透表征的影响, 构建了融合可视化三轴与数字图像相关(DIC)的持水-渗透联合测试平台, 采用吸力控制的气压驱动多步溢出脱湿试验, 同步连续监测试样排水量与轴、径向应变, 并基于实测应变更新试样高度与截面积, 建立渗透系数体变修正表达式。结果表明: 初始干密度为  $1.47 \text{ g/cm}^3$  的红黏土试样体积由  $96 \text{ cm}^3$  收缩至  $81 \text{ cm}^3$ , 体积减小  $15.62\%$ 。考虑体变后, 土水特征曲线整体上移, 进气值与残余含水率增大; 进气值之前两种处理得到的渗透系数接近, 超过进气值后二者差异迅速扩大, 考虑体变时渗透系数始终更小, 忽略体变将高估高吸力段渗透能力。基于试验数据形成的“ $\theta - \Psi - e$ ”三维表征与体变修正渗透函数, 可为压实黏土衬垫、防渗覆盖层等非饱和渗流分析提供更一致的参数依据并提升预测可靠性。

**关键词:** 非饱和土; 体积变形; 土水特征曲线; 非饱和渗透系数; 多步溢出法

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0169-08

## Water Retention Permeability Behavior of Unsaturated Soil Considering Volumetric Deformation During Testing

YI Liyu<sup>1,2</sup>, CAO Tianshu<sup>3</sup>, RAO Jielong<sup>1,2</sup>, XU Wei<sup>1</sup>, CHEN Zhixiang<sup>2</sup>, GUO Xiaoxia<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

3. Hubei Provincial Center for Quality Supervision and Test of Construction Engineering, Wuhan, Hubei 430064, China;

4. Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116000, China)

**Abstract:** To quantify the influence of volumetric deformation during testing on coupled water-retention-permeability characterization, an integrated testing system was developed by combining a visualized triaxial apparatus with digital image correlation. Suction-controlled, air-pressure-driven multi-step outflow drying tests were performed to synchronously and continuously monitor cumulative outflow and axial/radial strains, and a deformation-corrected hydraulic conductivity formulation was established by updating specimen height and cross-sectional area with measured strains. Results for a red clay specimen with an initial dry density of  $1.47 \text{ g/cm}^3$  show a volume reduction from  $96$  to  $81 \text{ cm}^3$  ( $15.62\%$ ). Accounting for volumetric deformation shifts the SWCC upward and increases both the air-entry value and the residual water content. Hydraulic conductivity estimates are similar before air entry but diverge rapidly beyond it; the deformation-corrected conductivity is consistently smaller, indicating that neglecting volumetric deformation leads to

收稿日期: 2026-01-10

修稿日期: 2026-03-08

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金(52322810); 国家自然科学基金(52308384); 湖北省自然科学基金杰出青年基金项目(2023AFA080); 岩土力学与工程安全全国重点实验室开放基金课题(SKLGME022005)

作者简介: 仪立宇(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为非饱和土力学及渗流特性。E-mail: yiliyu0821@163.com

通讯作者: 陈之祥(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事环境岩土工程等方面工作。E-mail: zichen@whrsm.ac.cn

systematic overestimation of conductivity at high suctions. The proposed three-dimensional  $\theta - \Psi - e$  characterization and deformation-corrected hydraulic conductivity function could provide a more consistent parameter basis for unsaturated seepage analyses of engineered barriers such as compacted clay liners and cover systems.

**Keywords:** unsaturated soil; volumetric deformation; soil-water characteristic curve; hydraulic conductivity; multi-step outflow method

准确量化非饱和土在渗流过程中的体积变化及其对渗透系数的影响,是提升非饱和渗流理论预测精度、推动岩土工程设计与评估迈向更精细化水平的核心课题。边坡、路基、垃圾填埋场及地下工程中的土体多处于非饱和状态<sup>[1-3]</sup>,在非饱和土的渗透过程中,土体的体积变化,起到了至关重要的作用<sup>[4-9]</sup>,其导致的孔隙结构变化会直接影响土壤的渗透性,从而影响其工程力学性能和稳定性<sup>[10-13]</sup>。因此,考虑体积变化对非饱和土渗透系数的影响,对于深入理解土的渗透行为以及土工程问题具有重要意义。

非饱和土渗透系数常用的测定方法主要为直接法和间接法两种。间接法是通过颗粒级配曲线<sup>[14]</sup>、土水特征曲线<sup>[15]</sup>和孔隙分布曲线<sup>[16-17]</sup>对渗透系数进行预测,其预测结果与实际值的吻合程度并不高。直接法又分为稳态法和瞬态法,这两种方法都需要通过测量流体通过土壤孔隙的流速。近年来,围绕非饱和土渗透系数的测定方法,国内外学者开展了广泛而深入的研究工作。郭顶等<sup>[18]</sup>基于动态土水特征曲线,考虑非稳定渗流,得到了考虑动态土水特征曲线情况下吸力的理论解,并对吸力分布规律进行了分析。王骛洵等<sup>[19]</sup>通过对土的孔隙表面分维、进气值和饱和渗透系数及降雨强度与非饱和土边坡的浅层破坏形式的相关性进行分析,发现降雨-蒸发循环作用引起的边坡土层的基质吸力变化比体积含水率的变化显著。陶高粱等<sup>[20]</sup>通过对不同大小孔隙通道渗透系数进行累加,提出了基于核磁共振的饱和/非饱和土渗透系数预测模型和快速预测方法,建议采用饱和状态试样核磁共振曲线直接预测非饱和相对渗透系数。Li 等<sup>[21]</sup>从孔径分布和颗粒组成出发,提出了能够表征双峰孔径结构的物理参数化土水特征曲线模型;Zhai 等<sup>[22]</sup>基于统计分析方法,由土水特征曲线反演非饱和渗透系数函数,为工程中在缺乏直接试验数据时通过 SWCC 估算渗透函数提供了思路;Gallage 等<sup>[23]</sup>在控制吸力的干湿循环试验中,同时测定压实黏土的土水特征曲线和渗透系数,揭示了干湿路径对应力-渗流耦合行为的影响。上述研究从模型构建、参数反演和试验技

术等方面显著推动了非饱和土水力性质的定量表征。

然而,非饱和土双变量理论表明,有效应力控制土体强度变形;土水特征曲线测定中脱水力作为有效应力引发土体变形,致使实测结果实为吸力-含水率-孔隙比三维关系,而非传统二维曲线形式<sup>[24]</sup>。这与现有计算所需的基质吸力-含水率关系的物理意义不同,基质吸力测试过程中的变形和基于有效应力的变形双重叠加,给渗流和结构稳定分析结果的可靠性带来了误差。上述不足使现有成果在指导压实黏土衬垫、低渗回填材料等工程的参数选取时,往往难以回答“在何种工况下可以忽略体变、忽略会带来多大偏差”等关键问题,从而凸显了开展考虑体变影响的非饱和持水-渗透耦合研究的必要性和针对性。为分析测试过程中体积变形对非饱和土持水与渗透行为的影响,基于数字图像相关技术(DIC)自主搭建了可考虑非饱和土体积变化的持水-渗透联合测定仪,开展了一系列控制吸力的脱湿渗透试验,旨在为发展更精确的非饱和土渗透系数测试方法提供试验依据与理论支持<sup>[25-30]</sup>。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用红黏土采自武汉市江夏区某一施工现场附近。主要矿物成分为石英、蒙脱石、高岭石等,该土颗粒黏粒含量较高,含水量较高状态易发生变形。最优含水率为 22.0%,最大干密度为 1.61 g/cm<sup>3</sup>。具体物理性质如表 1 所示。颗粒级配曲线以及 XRD 图谱分别为图 1 和图 2 所示。

表 1 试验用土物理参数

比重 $G_s$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	塑性指数 $I_p$
2.75	52.7	21.8	50.26	1.97	30.9

### 1.2 制样方法

土样制作过程如图 3 所示。试验用土的初始干密度为 1.47 g/cm<sup>3</sup>,具体制样方法及操作步骤如下:

(1) 将原状土 105℃ 烘干 12 h 后,破碎并过 2 mm 孔径的筛备用。

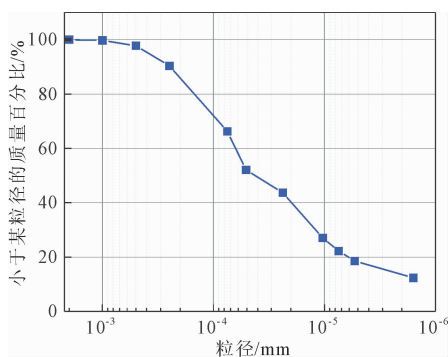


图1 颗粒级配曲线

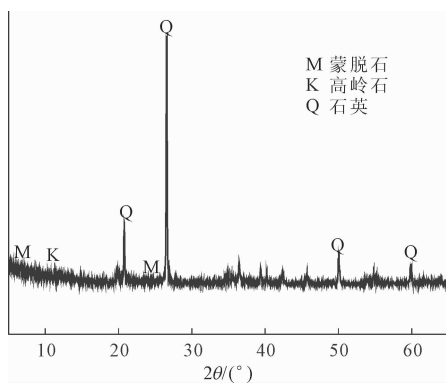


图2 XRD 图谱

(2) 按照试验条件称取所需干土,加入少量水后,搅拌均匀,密封备用。

(3) 将配制好的土样分成四等份,依次放入标准制样模具( $\Phi 39.1 \times 80$  mm)中,按照标准压样法将土样压实。每层土样压实后用刮刀将土样表面刨毛,确保每层土样能较好结合。

(4) 将试验所需土样用饱和架固定,连同陶土板一起抽真空 2 h 后,在室温环境浸泡约 12 h。

(5) 取出后套上定制橡胶膜,置于陶土板上,调整橡胶膜位置,试样顶部依次垫上滤纸和透水石后安装三轴试样帽,保证气压在土样表面均匀分布。

(6) 向三轴压力室内注满水后,冲刷陶土板底部及排水管内气泡,直至气泡冲刷完全。

(7) 打开图像采集软件,调整相机焦距和曝光度,进行土样橡胶膜角点识别。开启天平数据采集软件,记录土样渗透过程中的排水和蒸发重量,同时开启图像和天平数据采集。

(8) 打开围压控制系统,保证围压始终是所施加气压的 1.2~1.5 倍。观测土样的排水重量和土样的变形状态,直到土样的应变不再继续增加达到平衡,并且土样在 12 h 内不再继续排水。认为土样内孔隙气压和基质吸力达到平衡,开始施加下一级

压力。



图3 土样制作过程

## 2 考虑体变的非饱和土渗透系数测试方法及平台搭建

### 2.1 考虑体变非饱和土渗透系数测试系统

本试验结合 DIC 技术,提出了一种可用于非饱和土渗透系数测定的新方法,该方法能够考虑渗透过程中土体体积变化的影响<sup>[31-32]</sup>。基于此,研制了一套非饱和土持水-渗透联合测定装置。该装置是在常规三轴渗透仪基础上改进而成,主要包括可视化三轴压力室、排水量量测系统、蒸发补偿装置、气压控制单元、图像采集系统以及计算机控制软件等部分,该渗透系数测试系统可测量的基质吸力最大值为 1 MPa。

其中图像采集系统测试原理采用邵龙谭等<sup>[33]</sup>提出的非接触式图像测试原理,该原理基于亚像素角点识别技术跟踪橡皮膜表面特征角点的位置,借助平面镜反射获得试样全表面的变形场。图像采集系统主要由可视化三轴压力室、遮光罩和高精度工业相机构成,在可视化三轴压力室内部布置光源,以拍摄试验过程中的试样表面图像。图像测量系统测量得到的应变精度可以达到  $10^{-4}$  数量级或者更高。在试验之前,采用定制的黑色乳胶橡皮膜替换传统的白色乳胶橡皮膜。该定制橡皮膜外表面均匀分布尺寸为 7 mm × 7 mm 的白色方块,将白色方格的角点作为图像测量系统的识别特征点。在变形过程中,角点与试样之间没有相对运动。在试验过程中,试样的图像被相机以指定的帧速率捕获。通过匹配变形前后识别的区域,确定被测表面上每个点的位移,从而计算试样全表面变形。试验时,试样底部始终与陶土板紧密贴合,试样顶部放置滤纸和透水石。施加的气体通过透水石从试样顶部进入,确保施加的气体均可均匀的作用在土样上。试样排出水量的测量数据由高精度天平(精度为 0.001 g)采集得到,在盛水皿顶部保留 2 mm 的小孔,以便于排水针孔插入,从而可以得到土样的实时排水量。

## 2.2 非饱和土渗透系数测试方法

非饱和土渗透系数的测定方法大致可分为两类:一类为基于稳态渗流场的传统渗透试验(如变水头、恒水头等),通常需借助压力板试验或土水特征曲线间接反演渗透系数,测试周期较长且在高吸力段获取数据较为困难;另一类为瞬态渗流试验,通过施加气压或水力扰动,利用排水历程反演不同基质吸力下的渗透系数,并可同步获得 SWCC,测试效率较高<sup>[34-36]</sup>。综合考虑测试时间、吸力范围及结果的一致性,本文采用 Shao 等<sup>[37]</sup>提出的气压驱动多步溢出法作为非饱和渗透系数的测试手段。其原理如图 4 所示。

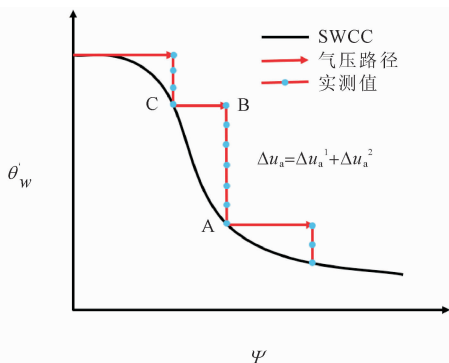


图 4 气压驱水原理图

在溢出试验中,通过增加瞬时气体压力,如图题中直线 AB 所示,进而促使土体排水,将气体压力增量( $\Delta u_a$ )分为两个部分,一部分( $\Delta u_a^1$ )克服土颗粒与液体之间的渗透阻力,另一部分( $\Delta u_a^2$ ),平衡孔隙中液体的表面张力,进而转化为土体的基质吸力。在施加气压增量后,土体内部的孔隙水开始排出,B 点逐渐到 A 点,这一过程反映了土体中的水势梯度逐渐减小,到达 A 点后水势梯度趋于 0,土体含水量达到平衡状态。于是可推导渗透系数的计算公式为:

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

式中: $\Delta V$ 为在数据采集点的时间间隔  $\Delta t$  内排出的孔隙水的体积变化量; $A$ 为土样截面积; $z$ 为试样高度; $\gamma_w$ 为水的重度。 $\Delta u_a^1$ 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  $\Delta u_a^1$ ,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。

试验在渗透过程中产生轴向应变  $\varepsilon_1$  和相应的体应变  $\varepsilon_v$ ,则试样的高度和截面积计算式为:

$$z' = z(1 - \varepsilon_1) \quad (2)$$

$$A' = A(1 - \varepsilon_v)/(1 - \varepsilon_1) \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)中,即可得到考虑体变后的渗透系数  $k_u'$ :

$$k_u' = - \frac{\Delta V}{(1 - \varepsilon_v)/(1 - \varepsilon_1) A \Delta t} \left( 1 + \frac{\Delta u_a^1}{\gamma_w z(1 - \varepsilon_1)} \right)^{-1} \quad (4)$$

其中,式(4)中的体变修正属于几何量修正,即通过  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_v$  更新试样高度与截面积,从而将体变导致的孔隙率变化及流通截面变化直接反映到  $k_u'$ 。在孔隙结构层面,体变通常会引起孔径整体收缩,并可能影响孔隙分布函数。本文的处理可理解为孔隙尺度近似“整体缩放”的假设,分布形态保持而特征孔径随  $\varepsilon_v$  迁移,因此无需额外引入独立的孔隙分布函数参数。若在高吸力或强结构重排条件下出现团聚-分散转变或多峰孔径演化,则分布形态可能发生改变,此时仅采用式(4)的几何修正仍可能不足,需结合 MIP/CT 等微观手段对孔径分布演化进行校核与模型更新。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 脱湿过程试样体积变化

图 5 描述了在渗透试验过程中,经由图像采集系统得到的试样整体轴向应变( $\varepsilon_1$ )、径向应变( $\varepsilon_r$ )和体应变( $\varepsilon_v$ )随时间的变化规律。

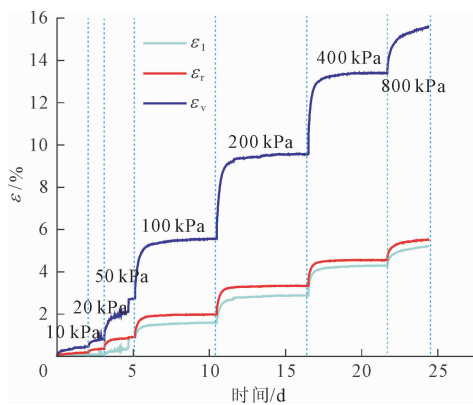


图 5 应变随时间的变化过程

由图 5 可知,随着每级气压的不断加载,土体都会产生相应的变形,并且随着每级气压的增大,土体变形平衡所需时间在不断减少,从最初的 3 d 左右缩短到了 2 d 左右。土体的变形主要发生在每级压力的初期,当施加压力后,土体快速发生变形,随后缓慢增长直至暂停。应变为单位时间内土样尺寸改变量与初始尺寸的比值。随着时间流逝,土样的径向应变和轴向应变都在逐渐增大,这意味着土样直

径和高度都在逐渐减小。从图 5 中可以观察到,土样在施加气压后,单位时间内的径向变形要大于轴向变形。该现象并非单由“受力面积差异”决定,而更与脱湿过程中吸力增量对应力状态的影响、试样结构性及边界约束有关。试验中围压随气压同步调整,使加载以平均应力增量为主、偏应力较小,收缩主要由吸力驱动的平均有效应力增长控制。同时,试样采用分层压实成型,颗粒取向与层间结合面使其呈横观各向异性,径向与轴向压缩刚度存在差异。在上下端的约束下,轴向收缩部分被抑制,收缩更倾向于在径向释放,从而表现为  $\varepsilon_r > \varepsilon_l$ 。

当应变不再增加时,可认为土样在该级气压下达到平衡。随着吸力增大,土样在该级吸力下达到平衡所需的时间逐渐增加。即气压力在 50 kPa 以下时,土样在每级气压力下达到平衡所需的时间不超过 2 d。而当气压力在 100 kPa 以上时,土样在该级气压力下达到平衡所需的时间在 4 d 左右。这是由于在脱湿初期,土样内部大孔隙优先排水,土样较容易达到平衡。而随着脱湿进程深入,土样内部大孔隙逐渐被压缩为小孔隙,排出水分难度加大,故土样达到平衡所需的时间逐渐增加。表现为土样的持水能力增大。

图 6 呈现了土样在各级气压作用下的体积变化规律。从图 6 可以看出,随着吸力增大,土样的体积逐渐减小。且随着吸力增大,每级气压下土样的体积减小量由增大转为减小。初始干密度为  $1.47 \text{ g/cm}^3$  的土样初始体积为  $96 \text{ cm}^3$ ,当土样在试验结束时的体积为  $81 \text{ cm}^3$ ,其体积减小量达到  $15 \text{ cm}^3$ ,占土样初始体积的 15.62%。这是由于在脱湿初期,土样内部大孔隙在气压作用下逐渐被压缩,导致体积持续收缩,且单位时间内的收缩速率加快;随着土体进一步压缩,其内部土骨架和颗粒间接触面积增大,有效应力相应提高,从而抑制了后续的体积收缩,使得收缩量逐渐减小<sup>[38]</sup>。

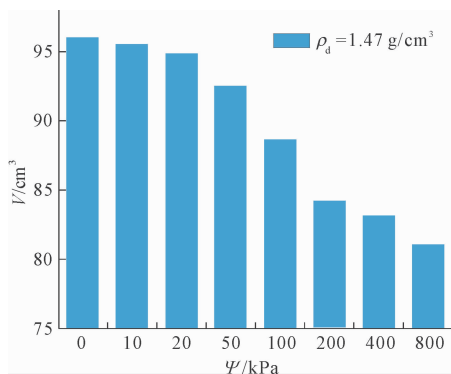


图 6 体积随基质吸力的变化过程

### 3.2 考虑体积变化 SWCC

将考虑体积变化的 SWCC 与未考虑体积变化的 SWCC 绘制于图 7 中进行对比分析。图 7 SWCC 曲线采用 VG 模型 ( $m = 1 - 1/n$ ) 进行拟合<sup>[39-40]</sup>,相应拟合参数如表 2 所示。

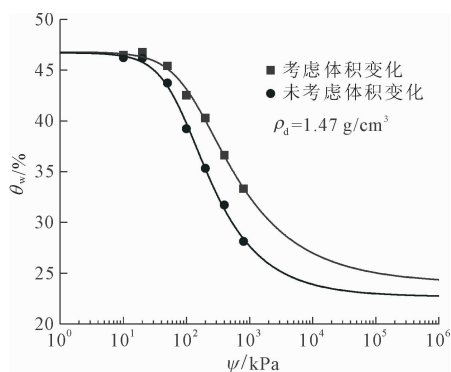


图 7 SWCC 的对比分析

表 2 VG ( $m = 1 - 1/n$ ) 拟合参数

SWCC	$\alpha/\text{kPa}^{-1}$	$n$	$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$	$R^2$
考虑体变	0.008	1.46	46.79	24.02	0.99
不考虑体变	0.013	1.62	46.71	22.71	0.99

从图 7 可以看出,考虑体积变化的 SWCC 曲线整体位于未考虑体积变化的曲线之上,表明土体收缩对 SWCC 形态具有显著影响。具体表现为,土样的参数  $\alpha$  由 0.013 变为了 0.008,其残余含水率由原来的 22.71% 变为了 24.02%,说明考虑体变后,SWCC 的进气值和残余含水率均明显增大。土中孔隙通常可分为大孔隙、中孔隙和微孔隙三类。在土体的脱水收缩过程中,大孔隙逐渐压缩减小,而进气值主要由大孔隙控制,因此土体收缩将导致进气值提高。同时,大孔隙也是影响脱水速率的关键因素;随着土体收缩和孔隙结构变化,脱水速率逐渐减缓,从而导致更高的残余含水率。

图 8 展示了图测三轴渗透试验土样孔隙比随基质吸力的变化关系,采用一元二次函数对“ $e - \Psi$ ”曲线进行拟合,决定系数  $R^2$  为 0.95,表明拟合结果良好。由图 9 可以看出,随基质吸力增大,试样孔隙比总体呈单调减小趋势;当吸力趋于充分高值时,大孔隙逐步被压缩为小孔隙,孔隙结构趋于稳定,孔隙比的进一步减小幅度显著减弱,理论上将趋于某一极限值。在该阶段继续采用一元二次函数进行“孔隙比-基质吸力”关系的外推,易导致孔隙比随吸力无限制减小甚至出现不合理值,因而不具备物理意义<sup>[41]</sup>。需要指出的是,图 7 和图 8 中采用的 VG 模型以及“孔隙比-基质吸力”一元二次拟合本质上均

为经验型表达式,其适用性受试验工况与土体类型的共同制约。本文所用 VG 模型建立在孔径分布近似单峰、仅沿脱湿路径演化且忽略滞回效应等假定之上,在该前提条件下能够较好拟合本研究红黏土的 SWCC;但对于具有明显双峰孔径分布、强膨胀性或经历复杂干湿循环的土体,高吸力段的残余含水率和进气值可能难以得到充分表征。同理,孔隙比-基质吸力关系采用的一元二次形式,仅宜在实测吸力范围内用于描述孔隙比随吸力的变化趋势;若简单外推至更高吸力区间,则二次项主导下的函数形态可能偏离真实体变规律,产生明显失真。基于上述考虑,本文仅在试验数据覆盖的吸力范围内,将 VG 模型和  $e - \Psi$  二次拟合作为对比“考虑/未考虑体变”两种处理方式的分析工具,并据此构建“ $\theta - \Psi - e$ ”三维关系,而不对其在更宽吸力区间及其他土类中的适用性作任何推广性结论。上述研究表明,试样在脱湿收缩过程中,其体积含水率变化同时受到吸力和孔隙比的影响。所以在测定土样的 SWCC 曲线时考虑其在脱湿过程中孔隙比的变化,并将其每一时刻的状态表示在“ $\theta - \Psi - e$ ”的空间坐标系中,则将形成空间曲线,如图 9 所示。该空间曲线能够直观反映土样在失水收缩过程中含水率与孔隙比随吸力变化的演变规律。

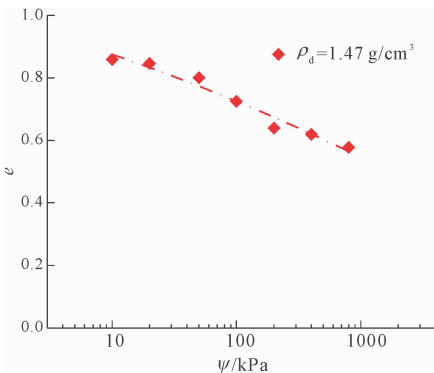


图 8 孔隙比随基质吸力的变化过程

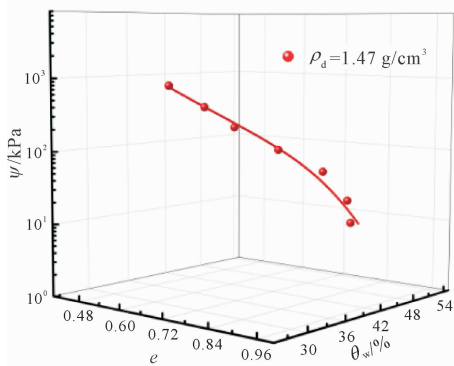


图 9 考虑体变后的三维 SWCC

### 3.3 考虑体积变化非饱和渗透系数

以土样体积含水率为纽带,将瞬态渗透系数测试结果与基质吸力关联起来,从而表征非饱和渗透系数随吸力变化的规律。图 10 对比分析了考虑体积变化与未考虑体积变化两种情况下的渗透系数随体积含水率的变化关系。

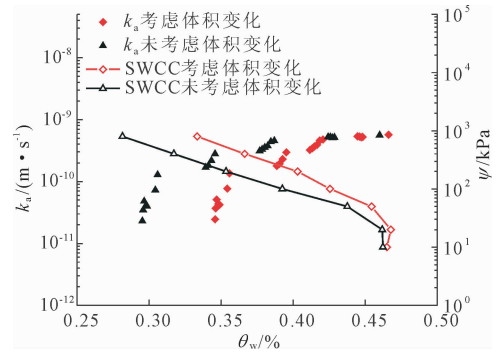


图 10  $k_a$  随  $\theta_w/\Psi$  的变化关系

从图 10 可以看出,在相同体积含水率的情况下,未考虑体变的渗透系数始终要大于考虑体变的渗透系数。在近饱和阶段,考虑体变后的渗透系数和未考虑体变的大小非常接近,几乎一致。但随着土体的含水率逐渐减小,二者之间的差距也在逐渐增大。可以看出,在传统的非饱和渗透系数的测试中,不考虑土体在渗透过程中的体积变化,会使得测得渗透系数偏大。在图测三轴渗透过程中,土体受到由含水率减小而急剧增大的基质吸力的影响,导致土颗粒间的间距减小,孔隙收缩,土体对水的吸持力大大增加,因此,土中水的渗透性减弱,体现到渗透系数减小<sup>[42-43]</sup>。从图 10 还可以观察到渗透系数随基质吸力的变化规律,随着基质吸力的逐渐增大,渗透系数从最初的缓慢减小转变为急剧减小。可以观察到,渗透系数急剧减小的转折点发生在气压达到略大于土体进气值之后。

### 3.4 工程启示与研究建议

研究表明,在非饱和土工程分析中,考虑体变效应具有重要且不可忽视的意义。对于垃圾填埋场黏土衬垫、防渗覆盖层以及低渗回填料等工程,若简单采用“固定体积”假定,则可能系统性低估高吸力区土体的持水能力和残余含水率,进而影响渗流、稳定性和变形分析的安全储备。工程设计与数值计算中,可结合现场压实干密度与结构特征,选取与原位状态相匹配的  $e - \Psi$  关系,用以修正传统参数,获得与实际工况更一致的水分-渗流特性。

需要指出的是,本文结果主要针对本研究所选

红黏土及其压实状态,且仅沿干燥(脱湿)路径开展试验,尚未覆盖湿润-湿胀过程以及强膨胀性、结构性更显著的土类。在膨胀土、结构性粉土及多峰孔径分布材料中,体变与孔隙结构演化可能更加复杂,简单的二次  $e - \Psi$  拟合及 VG 模型参数外推未必适用。本文在常规 SWCC 与非饱和渗透测试框架中引入体变效应,构建了“ $\theta - \Psi - e$ ”三维持水表征,并基于实测轴、径向应变对渗透系数函数进行体变修正,使渗流参数能够随结构收缩过程同步更新。目前仅验证了脱湿路径下的体变修正效应,尚未显式考虑干湿循环引起的滞回与累积结构演化,相关结论在循环工况下的适用性有待后续通过湿润/扫描曲线与循环试验进一步检验。未来研究可在以下方面进一步拓展:一是开展不同土类(如膨胀土、粉土、砂土-黏土混合料等)的系统对比,检验“ $\theta - \Psi - e$ ”表征框架及  $e - \Psi$  拟合形式的通用性;二是补充湿润及湿胀路径试验,引入滞回与扫描曲线,建立兼顾干湿循环的体变-持水关系,以评价在降雨入渗等工况下的适用性;三是将体变修正的 SWCC 与非饱和本构模型和数值算例相结合,分析其对边坡稳定、防渗系统长期渗漏控制等工程问题的影响,为参数选取和安全储备评估提供定量依据。

## 4 结 论

(1) 对初始干密度为  $1.47 \text{ g/cm}^3$  的红黏土,考虑体积变化后的 SWCC 整体高于未考虑体变的 SWCC,具体表现为:进气值提高、中高吸力段曲线抬升、残余含水率增大。该结果定量揭示了失水收缩和孔隙结构细化对持水能力的增强作用。

(2) 获得了考虑/未考虑体变两种条件下的非饱和渗透系数函数。结果表明:在近饱和及进气值之前,两种处理下的渗透系数相近;超过进气值后,考虑体变得到的渗透系数始终小于未考虑体变的结果,且随吸力增大二者差距明显放大。

(3) 构建了一套“试验获取-三维持水曲面构建-渗透函数修正”的成体系分析框架,定量评估了体变效应对非饱和参数的影响,为今后在边坡稳定、防渗系统及低渗回填分析中是否需要以及如何考虑体积变化提供了可直接调用的参数形式和判别依据,突出了考虑体变的必要性和工程应用价值。

### 参考文献:

[1] Feng Song, Liu Hongwei, Ng C W W. Analytical analysis of the mechanical and hydrological effects of vegetation

on shallow slope stability[J]. Computers and Geotechnics, 2020,118:103335.

- [2] Wu Lizhou, Cheng Ping, Zhou Jianting, et al. Analytical solution of rainfall infiltration for vegetated slope in unsaturated soils considering hydro-mechanical effects[J]. Catena, 2022,217:106472.
- [3] 詹良通,李鹤,陈云敏,等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J]. 岩土力学,2012,33(03):872-880.
- [4] 高苏,吴志强,杨宏刚,等. 基于 SSBA 模型的深基坑支护结构变形预测研究[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(03):212-221.
- [5] 赵红,董玉杰,李晓宁,等. 泥岩毛细吸水特性及吸水量时程模型研究[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(03):222-235.
- [6] 陈勇,苏剑,谈云志,等. 循环脱吸湿与加卸载耦合作用下土体持水性能试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(08):2907-2913.
- [7] 江峻毅,陈卫兵,江浩,等. 抽水蓄能电站运行期岸坡强化花岗岩变形参数演化机制[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(02):189-199.
- [8] 赵皓琪,张吾渝,刘昊阳,等. 冻融循环作用下木质素改良黄土的性能与评价[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(02):232-245.
- [9] 刘柄材,江兴元,孟生勇,等. 降雨与地下水联合入渗下斜坡变形机理研究[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(03):202-211.
- [10] Yan Huaxiang, Xie Haijian, Rajabi H, et al. Analytical solution for one-dimensional steady-state VOCs diffusion in simplified capillary cover systems[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2023,47(12):2304-2321.
- [11] Bai Bing, Xu Tao, Nie Qingke, et al. Temperature-driven migration of heavy metal  $\text{Pb}^{2+}$  along with moisture movement in unsaturated soils[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020,153:119573.
- [12] 周凤玺,罗珺,马强. 温度梯度作用下非饱和土中铅离子迁移机理研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(09):1822-1830.
- [13] 王凤池,秦美琦,李栋,等. 藁草根系纤维土渗透和崩解性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(02):287-295.
- [14] 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(02):549-560.
- [15] 赵俭斌,常新芳,邱战洪,等. 台州某填埋场覆盖层粉质黏土的土-水特征曲线研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(02):239-245.

- [16] 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(09):2395-2404.
- [17] 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(03):729-736.
- [18] 郭 顶,张明宇,刘 艳,等. 非稳定渗流作用下非饱和土朗肯土压力问题分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2025,57(11):45-52.
- [19] 王骛洵,蒋函静,许 帅,等. 降雨入渗下非饱和土边坡浅层破坏机制分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2024,55(07):2701-2711.
- [20] 陶高梁,彭寅杰,陈 银,等. 基于 NMR 的非饱和土相对渗透系数快速预测新方法[J]. 岩土工程学报,2024,46(03):470-479.
- [21] Li Xu, Li Jiahui, Zhang L M. Predicting bimodal soil-water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters[J]. Computers and Geotechnics, 2014,57:85-96.
- [22] Zhai Qian, Rahardjo H. Estimation of permeability function from the soil-water characteristic curve[J]. Engineering Geology, 2015,199:148-156.
- [23] 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(03):417-430.
- [24] 张 聪,张 昭,张同令. 考虑渗气渗水函数的非饱和土固结性状研究[J]. 水利学报,2022,53(12):1512-1525.
- [25] Xu Shuochang, Sun Xinjian, Chen Guangsi, et al. The impact of soil sample shrinkage on the soil-water characteristic curve obtained by centrifugation test: insights based on microstructural changes[J]. Journal of Hydrology, 2026,664(Part C):134566.
- [26] Pham H Q, Fredlund D G. Equations for the entire soil-water characteristic curve of a volume change soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008,45(04):443-453.
- [27] 唐晓林,童立红,徐长节,等. 考虑土的粒径级配及变形的土-水特征曲线模型[J]. 岩土工程学报,2025,47(08):1629-1640.
- [28] Liu Hengshuo, Rahardjo H, Li Yangyang. Simultaneous determination of soil-water characteristic and shrinkage curves of consolidated kaolin under continuous and discrete drying procedures[J]. Scientific Reports, 2025,15:40042.
- [29] 张 悦,叶为民. 考虑体变特征的遗址土脱湿过程持水特性[J]. 岩土工程学报,2022,44(03):456-463.
- [30] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994,31(04):521-532.
- [31] Hu Yiru, Ling Xianzhang. Study of a triaxial testing system for unsaturated subgrade fillers using a high-suction tensiometer and photogrammetry[J]. Applied Sciences, 2025,15(10):5380.
- [32] 林 鑫,唐朝生,程 青,等. 基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(07):1311-1318.
- [33] 邵龙潭,唐孝强,郭晓霞. 基于角点相关匹配识别的试样变形测量方法研究[J]. 岩土力学,2025,46(02):665-672.
- [34] Durner W, Iden S C. Extended multistep outflow method for the accurate determination of soil hydraulic properties near water saturation[J]. Water Resources Research, 2011,47:W08526.
- [35] 伊盼盼,牛圣宽,韦昌富,等. 基于动态多步流动法的非饱和土水力特性测试研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(10):1797-1801.
- [36] 邵龙潭,温天德,郭晓霞. 非饱和土渗透系数的一种测量方法和预测公式[J]. 岩土工程学报,2019,41(05):806-812.
- [37] Shao Longtan, Wen Tiande, Guo Xiaoxia, et al. A method for directly measuring the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2017,40(06):GTJ20160197.
- [38] 蔡国庆,刘 祎,徐润泽,等. 全吸力范围红黏土干湿循环土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报,2019,41(S2):13-16.
- [39] 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(05):892-898.
- [40] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976,12(03):513-522.
- [41] Wang Yang, Ye Weimin, Wang Qiong, et al. A critical saturated state-based constitutive model for volumetric behavior of compacted bentonite[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022,59:1872-1886.
- [42] 翟 钱,朱益瑶,叶为民,等. 全吸力范围非饱和土水力渗透系数的计算[J]. 岩土工程学报,2022,44(04):660-668.
- [43] 陶高梁,彭寅杰,陈 银,等. 基于 NMR 的非饱和土相对渗透系数快速预测新方法[J]. 岩土工程学报,2024,46(03):470-479.