

DOI: 10.11779/CJGE202101007

动态土水特征曲线滞后模型研究

刘艳^{1,2}, 于建涛^{1,2}

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 土水特征曲线是描述非饱和土力学特性必不可少的方程, 它的最大特点就是存在滞后效应, 尽管目前已经建立了很多的土水特征曲线滞后模型, 但这些模型都是针对平衡条件建立的。现有的理论和试验研究已经证实, 土水特征曲线存在动态效应, 与静态土水特征曲线相比, 相同的饱和度时, 动态土水特征曲线的吸力在干燥过程中要更大, 而湿化过程中则更低。为了描述动态条件下土水特征曲线, 首先从热力学的基础理论出发, 探讨了动态效应的理论基础, 并从熵增不等式中得到了动态的土水特征曲线方程。基于所得方程, 利用边界面塑性理论, 建立了可以预测任意扫描线的土水特征曲线模型。通过与已有的试验结果进行对比, 表明模型可以很好地预测土体在干燥和湿化不同过程中的扫描线变化。所得结果可以用于解释一些实际问题, 比如降水引起的沉降和降雨诱发滑坡等。

关键词: 土水特征曲线; 动态扫描线; 滞后; 非饱和土

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)01-0062-07

作者简介: 刘艳(1983—), 女, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土相关研究工作。E-mail: yanl@bjtu.edu.cn。

Hysteresis model for soil-water characteristic curve under dynamic conditions

LIU Yan^{1,2}, YU Jian-tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The soil-water characteristic curve (SWCC) is essential to describe the behavior of unsaturated soils. The capillary hysteresis is an important effect that should be accounted in the equations for SWCC. The existing SWCC models are mainly based on the equilibrium condition. However, there is ample theoretical and experimental evidence that the curve is not unique under dynamic conditions. The dynamic capillary pressure is larger than the static one in drainage and smaller in wetting. A thermodynamic theoretical basis for the SWCC under dynamic conditions is given. A dynamic capillary hysteresis model is developed based on the bounding surface plasticity. Provided that the main drying and wetting curves have been experimentally determined, the model is capable of predicting all the scanning curves. The model predictions are compared with the existing experiments found in the literatures, showing a good accordance with the test data for both the drying and wetting conditions. The results can then be used to explain some practical problems such as foundation settlement and slope stability.

Key words: soil-water characteristic curve; dynamic scanning curve; hysteresis; unsaturated soil

0 引言

土水特征曲线对于描述非饱和土力学行为至关重要, 借助土水特征曲线, 可以确立吸力与含水状态的关系, 进而对土体的抗剪强度、变形和渗透行为进行分析, 因此, 土水特征曲线方程成为描述非饱和土的渗流和本构关系中必不可少的方程^[1]。

土水特征曲线的一个最大的特点就是存在滞后效应, 干湿循环过程中得到的曲线并不重合, 不同水力历史条件下得到的扫描线也不重合。为了描述这种滞后效应, 研究人员对不同类型的土进行了大量的试验研究, 并提出了大量的理论模型^[2-9]。其中大部分模型描述的都是土水特征曲线的边界曲线, 即主干燥线和

主湿化线, 但实际工程中土体经历干湿循环的过程大多位于扫描线, 由于理论上存在无数条扫描线, 很难得知实际条件下扫描线的变化, 目前针对扫描线的预测模型主要有域模型^[10]、边界面模型^[11-14]和接触角模型^[14-17]。以上模型可以很好地预测土水特征曲线的扫描线并反映其滞后效应, 但是这些模型都是在平衡条件下建立, 并没有考虑非饱和土的渗流过程中由于流速变化引起的动态效应。动态效应与滞后效应均与水力历史相关, 区别在于: 滞后效应与饱和度改变的方

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2019JBM086)

收稿日期: 2020-01-16

向有关, 而动态效应与饱和度改变的速率有关。

受到气候环境影响, 实际工程中土的含水状态将不断改变, 在孔隙水瞬态流动的过程中, 土的持水特征会表现出明显的流速相关的率效应, 土水特征曲线和水力参数都与流速有关^[18-20]。大量试验已经证实^[21-22], 土水特征曲线存在动态效应, 与静态土水特征曲线相比, 相同饱和度时, 动态土水特征曲线的吸力在脱湿过程中要更大, 而吸湿过程中则更低。对于产生动态效应的原因有很多不同的解释, 如气液接触面的动态运动^[23]、接触角的动态变化^[24]、土体的不均性^[25]等。不论何种原因, 这种动态效应必将对土体的行为产生影响。以降雨入渗为例, 不同降雨强度下的土水特征曲线并不相同, 此时如果仍采用平衡条件下土水特征曲线来建立渗流方程, 就会产生误差。研究发现基于平衡条件的土水特征曲线求解的 Richard 方程无法准确预测动态多步排水过程中的水头变化^[26]。

为了更精确地描述非平衡过程中土的力学行为, 需要建立动态条件下的土水特征曲线模型。目前的模型主要有两类^[19]: 一是孔隙尺度的网格模型^[27], 需要考虑微观的交界面, 并借助统计学理论和电镜扫描等试验手段来进行计算, 较为复杂; 二是宏观尺度的动态模型, 主要基于试验现象和经验方程来建立, 便于应用, 本文将主要基于宏观模型来建立滞回模型。这类模型主要有两种不同的形式, 一种是给出动态毛细力的方程^[23], 另一种是给出动态含水率的方程^[28]。尽管目前已有关于动态土水特征曲线的试验研究和理论模型, 但这些模型只能描述主干燥和主湿化线, 无法预测任意扫描线的变化。

建立动态土水特征曲线滞后模型具有重要的现实意义, 实际过程中非饱和土力学的含水率大多处于动态变化的非平衡状态, 此时采用平衡条件下得到的土水特征曲线很难准确地描述其力学行为。本文将利用边界面模型的思想, 利用动态边界曲线方程来建立动态扫描线模型。首先对动态土水特征曲线的理论基础进行简单的论述, 然后建立动态滞回模型, 最后将利用已有试验结果对模型进行验证。

1 动态土水特征曲线的理论基础

赵成刚等^[29]以热力学基本平衡方程出发, 在不考虑温度影响和质量交换, 忽略固体颗粒和流体压缩性的假设下, 推导得到了单位体积的非饱和土变形功的基本表达式。在此基础上进一步考虑交界面影响, 刘艳等^[30]给出了非饱和土流体的熵增不等式:

$$\left[n(p_g - p_w) + \gamma^{wg} \frac{\partial a^{wg}}{\partial S_r} \right] dS_r - d\phi_w \geq 0 \quad (1)$$

式中 n 为孔隙率; p_g 和 p_w 分别为孔隙气压和孔隙水压; S_r 为饱和度; γ^{wg} 为表面张力; a^{wg} 为气液交界面面积; ϕ_w 为水的自由能。式中第一项为孔隙流体的压力差, 第二项为宏观毛细力, 用 p_c 表示。

Hassanizadeh 等^[31]从热力学角度探讨了非饱和土的毛细力, 指出毛细力本质上是气液交界面上的一种作用力, 并不完全等同于界面两侧流体的压力差, 并将宏观毛细力表示为

$$p_c = -\frac{\gamma^{wg}}{n} \frac{\partial a^{wg}}{\partial S_r} \quad (2)$$

在线性假设条件下, 根据熵不等式 (1) 可以得到液相广义力与广义流之间本构关系如下:

$$n[(p_g - p_w) - p_c] = -\tau' \dot{S}_r \quad (3)$$

式 (3) 与 Hassanizadeh 等^[31]给出的表达式是一致的, τ' 称为毛细阻尼系数 (capillary damping coefficient), 它控制了饱和度改变的速率。如果 τ' 取值很小, 说明系统受扰动后会迅速地恢复新的平衡。

将式 (3) 改写一下, 可以得到动态土水特征曲线的方程:

$$p_c^d = p_c - \tau \dot{S}_r \quad (4)$$

式中, $\tau = \tau'/n$, $p_c^d = p_g - p_w$ 表示动态毛细力, 等于流体的压力差, p_c 为平衡时的毛细力, 可以用传统的土水特征曲线方程来计算。等式右边第二项的存在说明此时动态毛细力与饱和度的变化历史有关, 已有试验证明这种水力历史会对土的变形和强度产生影响。由于流体压力差 ($p_g - p_w$) 与毛细力 p_c 的不平衡, 导致了系统饱和度的改变, 使系统向着新的平衡状态发展, 最终恢复流体压力差 ($p_g - p_w$) 与毛细力 p_c 的平衡。只有在平衡条件下, 饱和度不随时间变化, 右边第二项等于 0, 式 (4) 退化为传统的土水特征曲线方程。

2 动态土水特征曲线模型

利用热力学理论推导得到的式 (4), 可用于计算动态的土水特征曲线, 由于平衡条件下土水特征曲线的边界线可以利用经验方程给出 (如 VG 模型等), 因此式 (4) 可直接计算出动态边界线, 而扫描线的计算则需要借助于边界面模型。

2.1 边界面模型的理论基础

实际工程中, 土体受气候和环境影响经历干湿循环, 导致其持水特征曲线往往处于扫描线上, 一般通过室内试验比较容易确定边界线的方程, 而扫描线与水力历史密切相关, 难以确定。按照边界面塑性理论, 加载面上的塑性反应取决于加载面上的应力点与其在边界面上的映射点之间的距离。只要知道了边界面的塑性模量, 根据塑性边界面理论就可得出其中任一

条扫描线的塑性模量。

如图1所示,两条湿化扫描线 BC 和 $B'C'$,尽管它们起点和终点的饱和度相同,但吸力的变化是不一样的。原因就在于由于 B' 所在的动态干燥曲线与 B 所在的静态干燥曲线不重合,导致湿化扫描线也不重合。对于同一个点 A ,在静态和动态条件下可能处于不同的扫描线上。根据Wei等^[12],处于静态的土水特征曲线,其扫描线的斜率与 O, A, S 三点的距离的比值有关,基于这个思想,刘艳等^[13]给出了静态扫描线斜率的计算方法如下:

$$K(P_c, S_r) = \bar{K}(S_r) + c \frac{\phi}{r}, \quad (5)$$

式中, c 为材料参数, $\bar{K}(S_r)$ 为土水特征曲线边界线的斜率, K 为扫描线的斜率。 r 为当前饱和度下两边界曲线的吸力之差 (如图1中的 OS), 可以表示为

$$r = \kappa_D(S_r) - \kappa_W(S_r) \quad (6)$$

式中, $\kappa_\alpha(S_r)$ 表示静态条件下边界土水特征曲线方程, 下标 $\alpha = D$ 代表干燥过程, 下标 $\alpha = W$ 代表湿化过程。

ϕ 表示当前吸力与所对应的边界曲线的吸力之差, 如果是从 B 至 C 湿化时为图1中的 AS 段, 如果是从 C 到 B 的干燥则是图1中 OA 段, 因此可以表示为

$$\phi = |p_c - \kappa_\alpha(S_r)| \quad (7)$$

式(7)中 p_c 代表当前扫描线上的吸力。

边界线斜率可对边界曲线方程求导得到, 即

$$\bar{K}_\alpha(S_r) = -d\kappa_\alpha(S_r)/dS_r \quad (8)$$

把式(6)~(8)代入到式(5)中则可得扫描线斜率为

$$K_\alpha = \bar{K}_\alpha(S_r) + c \frac{|p_c - \kappa_\alpha(S_r)|}{\kappa_D(S_r) - \kappa_W(S_r)} \quad (9)$$

利用式(9), 给定初始条件, 就可以利用

$$\dot{p}_c = -K_\alpha \dot{S}_r \quad (10)$$

给出扫描线。式(9)预测扫描线的合理性已在文献^[13]中得到了验证。以这个模型为基础, 可以建立动态条件土水特征曲线的滞回模型。

2.2 动态条件下边界面模型的建立

在瞬态渗流过程中, 土体的土水特征曲线与流速相关, 此时可以利用动态的边界曲线来预测动态的扫描线。因此计算原理与静态曲线相同, 仍然可以采用式(5)的方法来计算, 但此时 $\bar{K}(S_r)$ 需采用动态土水特征曲线边界线的斜率, r 和 ϕ 的取值也将发生变化。

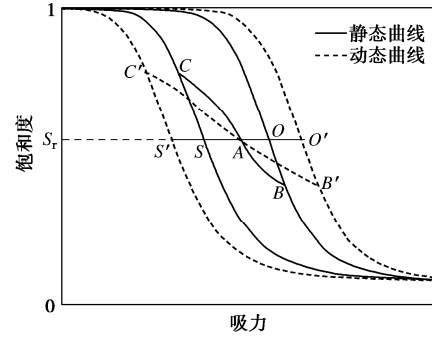


图1 土水特征曲线边界面模型示意图

Fig. 1 Schematic bounding surface model for SWCC

根据式(4)可知, 动态边界曲线与静态条件下的边界曲线不再相同, 分别为

$$p_c^d = \kappa_W(S_r) - \tau_W \dot{S}_{rW} \quad (\text{边界湿化曲线}), \quad (11)$$

$$p_c^d = \kappa_D(S_r) - \tau_D \dot{S}_{rD} \quad (\text{边界干燥曲线}). \quad (12)$$

预测扫描线时, 一般要采用与其相同速率的边界线, 如后文图2和图3所示。相同饱和度时, 两边界线的吸力之差 r^d (即图1中 $O'S'$) 可以表示为

$$r^d = \kappa_D(S_r) - \kappa_W(S_r) - (\tau_D \dot{S}_{rD} - \tau_W \dot{S}_{rW}) \quad (13)$$

对于当前吸力与所对应的边界曲线的吸力之差 ϕ^d , 如果是从 B' 至 C' 湿化时为图1中的 AS' 段, 如果是从 C' 到 B' 的干燥则是图1中 $O'A'$ 段, 可以统一表示为

$$\phi^d = |p_c - [\kappa_\alpha(S_r) - \tau_\alpha \dot{S}_{r\alpha}]| \quad (14)$$

把式(13), (14)代入到式(5)中则可得动态扫描线斜率为

$$K_\alpha^d = \bar{K}_\alpha^d(S_r) + c \frac{\phi^d}{r^d} \quad (15)$$

对式(11)或(12)求导, 假设饱和度变化率不随时间变化, 可得到边界线的斜率变为

$$\bar{K}_\alpha^d(S_r, \dot{S}_r) = -\frac{d\kappa_\alpha(S_r)}{dS_r} + \frac{d\tau_\alpha}{dS_r} \dot{S}_r \quad (16)$$

将式(8), (16)代入式(15), 可得

$$K_\alpha^d = \bar{K}_\alpha(S_r) + c \frac{\phi^d}{r^d} + \frac{d\tau_\alpha}{dS_r} \dot{S}_{r\alpha} \quad (17)$$

与静态条件下式(9)相比, 式(17)中 r 和 ϕ 的取值有所改变, 同时还多了一个第三项, 该项与饱和度和变化率有关, 同时也与参数 τ 有关。现有研究发现 τ 并不是一个常数, 而是会随着饱和度变化而改变^[32], 因此第三项不能忽略。通常可将 τ 表示为饱和度的函数, 目前主要做法是根据试验结果给出一个经验函数, 函数形式以线性和指数型为主 (如下文的式(20)和(21))。

结合式 (17) 给定初始条件, 利用

$$\dot{p}_c^d = -K_a^d \dot{S}_r \quad (18)$$

可以预测动态条件下的扫描线。

通过以上步骤, 建立了动态扫描线的模型, 计算时需首先给出边界面曲线的方程, 然后再标定出扫描线参数 c 和细阻尼系数 τ , 即可对动态扫描线进行预测。

3 模型验证

为了验证模型, 下面将利用上述模型跟已有的实验结果进行比较。首先要确定出边界面, 这里将选用 Feng 等^[33]提出的方程作为边界面的方程:

$$P_c = b \left(\frac{S_r^{\text{sat}} - S_r}{S_r - S_r^{\text{irr}}} \right)^{1/d}, \quad (19)$$

式中, b 和 d 为材料参数, 对于干燥和浸湿曲线分别取不同值, S_r^{sat} 为饱和时饱和度, S_r^{irr} 为残余饱和度。

模型的验证主要包含以下步骤: ①根据静态边界线试验结果, 利用式 (19) 拟合出干燥和湿化边界的参数 b 和 d ; ②根据任意一条静态扫描线试验结果, 利用式 (9) 标定出参数 c ; ③根据动态边界曲线和静态边界曲线试验结果, 利用式 (4) 标定出参数 τ ; ④将以上到的参数, 代入式 (17), (18) 可预测动态扫描线。

按照上述步骤, 接下来将利用 Zhuang 等^[34]给出的干燥曲线结果和 Milatz 等^[35]给出的湿化曲线的结果对模型进行验证, 模型的部分参数如表 1 所示。

表 1 土样材料参数列表

Table 1 Summary of material parameters

文献	S_r^{sat}	S_r^{irr}	干燥		浸湿		c
			b/kPa	d	b/kPa	d	
Zhuang 等 ^[34]	0.86	0.21	0.35	9.06	0.23	10.04	200
Milatz 等 ^[35]	1.00	0.18	5.59	8.73	2.95	3.28	18

3.1 干燥扫描线预测

首先利用模型对干燥条件下的扫描线进行预测, 选用试验数据来源于 Zhuang 等^[34]。Zhuang 等^[34]分别测量了砂土在静态和动态条件下的土水特征曲线, 如图 2 中的试验点所示。利用静态边界线试验点标定土水特征曲线参数 b 和 d , 再利用静态扫描线试验点可以标定参数 c , 所得参数如表 1 所示。

根据试验结果, 动态主干燥曲线的饱和度变化率为 $\dot{S}_{rD} = -0.05 \text{ s}^{-1}$ 。利用动态干燥线和静态干燥线可以标定参数 $\tau(\text{kPa}\cdot\text{s})$, Zhuang 等^[34]将其表示为

$$\tau = 200 \times 10^{9.4(0.85-S_r)} \quad (20)$$

边界线的确定对于预测扫描线非常关键, 但

Zhuang 等^[34]只给出了动态干燥曲线, 而动态湿化曲线由于试验失败, 没有相关数据, 可利用静态湿化边界曲线计算得到。假设参数 τ 在湿化与干燥条件下取值相同, 即可将式 (20) 得到的参数 τ 代入式 (4) 中计算出动态湿化边界线, 如图 2 中的虚线所示。然后将表 1 中的参数代入式 (17), (18), 可得到动态扫描线的预测结果, 如图 2 中的虚线所示, 所得结果与试验结果相符, 表明模型可以较好地反映干燥过程中动态试验的结果。

从图 2 可以看到动态干燥线位于静态干燥线的右侧, 表明相同饱和度条件下, 动态曲线的吸力要大于静态曲线的吸力。流速越大, 饱和度变化速率越快, 动态吸力会越大。这对于模拟地基降水过程中非饱和和土体的变形问题有重要的意义, 快速降水将导致土体中的吸力更大, 由吸力更大导致变形也将更大, 说明快速降水可能增加非饱和土地基的沉降。

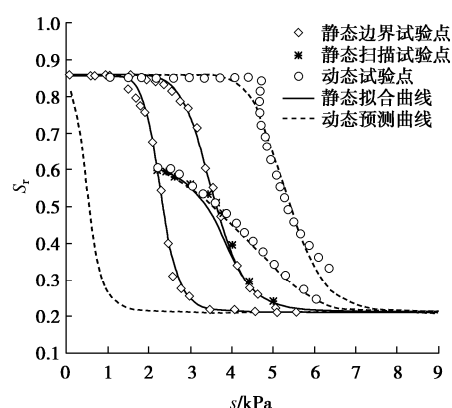


图 2 干燥条件下动态扫描线预测

Fig. 2 Prediction of dynamic scanning curve during drying process

3.2 湿化扫描线预测

为了说明模型在湿化过程中的合理性, 接下来采用 Milatz 等^[35]的试验结果对模型进行验证。Milatz 等^[35]采用改进的直剪仪对 3 种不同密实程度的砂土开展了测试, 这里选择动态效应最明显的细砂来进行验证。试验给出了水的流速为 $5 \text{ mm}^3/\text{s}$, 相应的饱和度变化率为 $\dot{S}_r = 2.9 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

由于试验只给了干燥边界线, 并没有湿化边界线, 这里只能假定给出一个静态的湿化边界面参数, 动态湿化曲线采用与动态干燥线相同的参数 τ 。计算所需的参数如表 1 所示。参数 $\tau(\text{kPa}\cdot\text{s})$ 采用 Milatz 等^[35]给出的表达式:

$$\tau = 5.2812 \times 10^3 - 3.795 \times 10^2 \times S_r \quad (21)$$

利用所得参数, 对动态扫描线进行预测, 所得结果如图 3 所示。虚线为动态扫描线的预测曲线, 与动

态扫描线试验点比较吻合,表明模型可以较好地反映湿化过程中动态试验的结果。

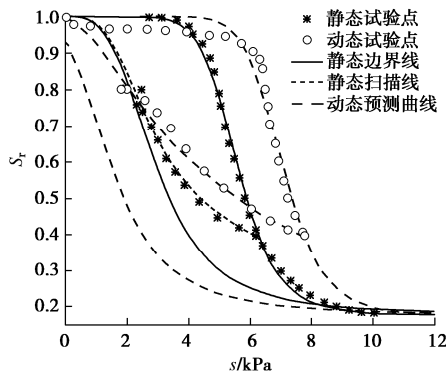


图3 湿化条件下动态扫描线预测

Fig. 3 Prediction of dynamic scanning curve during wetting process

动态湿化扫描线对于模拟降雨滑坡问题具有重要意义。目前模拟降雨滑坡问题采用的是静态曲线,但是通过以上计算可以看到,不同降雨强度使得饱和度的变化率不同,此时扫描线不重合,从图3可以看到动态湿化曲线位于静态湿化曲线下方。降雨强度越大,相同的饱和度对应的吸力将更小,根据非饱和土的强度理论可知,吸力对强度是有贡献的,吸力的减小可能降低土体的强度,从而可以解释为什么强降雨时更容易出现滑坡。

4 结 语

本文对非饱和土的动态土水特征曲线进行了探讨,建立了动态土水特征曲线的边界模型,利用模型可以较好地预测动态土水特征曲线的扫描线变化。

建立动态土水特征曲线模型对于实际应用具有重要的意义,目前的土水特征曲线大多是基于室内试验获得,这些试验都是在平衡条件下给出的,但实际问题可能一直处在一个动态过程,用平衡条件下得到的土水特征曲线和水力参数去预测一个动态或非平衡的实际问题,就会存在误差。

数值预测结果表明,相同饱和度,动态条件下所对应的吸力与静态条件不同,动态干燥过程吸力要更大,而动态湿化过程的吸力要更小,这对于分析实际问题具有重要意义,应用动态的土水特征曲线来分析实际问题是下一步要开展的工作。

参考文献:

[1] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1 - 54. (CHEN Zheng-han, GUO Nan. New developments of mechanics and

application for unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1 - 54. (in Chinese))

- [2] PHAM H Q, FREDLUND D G, BARBOUR S L. A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(6): 1548 - 1568.
- [3] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41 - 46. (ZHANG Fang-zhi, CHEN Xiao-ping. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 41 - 46. (in Chinese))
- [4] 李军, 刘奉银, 王磊. 关于土水特征曲线滞回特性影响因素的研究[J]. 水利学报, 2015, 46(增刊1): 194 - 199. (LI Jun, LIU Feng-yin, WANG Lei. Study on the influencing factors of hysteretic characteristics of soil-water characteristic curve[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 194 - 199. (in Chinese))
- [5] 陈留凤, 彭华. 干湿循环对硬黏土的土水特性影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2337 - 2344. (CHEN Liu-feng, PENG Hua. Experimental study on the water retention properties of the hard clay under cyclic suction conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2337 - 2344. (in Chinese))
- [6] 陈勇, 苏剑, 谈云志. 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(8): 2907 - 2913. (CHEN Yong, SU Jian, TAN Yun-zhi. Water retention capacities of soils under the coupling actions of cyclic drying-wetting and repeated loading-unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 2907 - 2913. (in Chinese))
- [7] 张俊然, 许强, 孙德安. 多次干湿循环后土-水特征曲线的模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 689 - 695. (ZHANG Jun-ran, XU Qiang, SUN De-an. Simulation of soil-water characteristic curves during drying and wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 689 - 695. (in Chinese))
- [8] 黎澄生, 孔令伟, 柏巍. 土-水特征曲线滞后阻塞模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 598 - 604. (LI Cheng-sheng, KONG Ling-wei, BAI Wei. Hysteresis model of soil-water characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 598 - 604. (in Chinese))
- [9] 杨明辉, 陈贺, 陈可. 基于分形理论的SWCC边界曲线滞后效应模型研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10):

- 3805 – 3812. (YANG Ming-hui, CHEN He, CHEN Ke. Study of the hysteresis effect model of SWCC boundary curves based on fractal theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(10): 3805 – 3812. (in Chinese))
- [10] 贺 炜, 赵明华, 陈永贵. 土-水特征曲线滞后现象的微观机制与计算分析[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(4): 1078 – 1083. (HE Wei, ZHAO Ming-hua, CHEN Yong-gui. Theoretical study of microscopical mechanisms and computational method of hysteresis in SWCCs[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(4): 1078 – 1083. (in Chinese))
- [11] LI X S. Modelling of hysteresis response for arbitrary wetting/drying paths[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, **32**(2): 133 – 137.
- [12] WEI C F, DEWOOLKAR M M. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables[J]. *Water Resources Research*, 2006, **42**(7): W7405.
- [13] 刘 艳, 赵成刚. 土水特征曲线滞后模型的研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **29**(3): 399 – 405. (LIU Yan, ZHAO Cheng-gang. Hysteresis model for soil-water characteristic curves[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **29**(3): 399 – 405. (in Chinese))
- [14] 陆业奇, 刘斯宏, 傅中志. 土水特征曲线的一个滞回模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, **40**(2): 186 – 190. (LU Ye-qi, LIU Si-hong, FU Zhong-zhi. A hysteresis model for soil-water characteristic curves[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, **40**(2): 186 – 190. (in Chinese))
- [15] AZIZI A, JOMMI C, MUSSO G. A water retention model accounting for the hysteresis induced by hydraulic and mechanical wetting-drying cycles[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, **87**: 86 – 98.
- [16] ZHOU A. A contact angle-dependent hysteresis model for soil-water retention behaviour[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, **49**: 36 – 42.
- [17] 高 游, 孙德安, 张俊然. 考虑孔隙比和水力路径影响的非饱和土土水特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(12): 2191 – 2196. (GAO You, SUN De-an, ZHANG Jun-ran. Soil-water characteristics of unsaturated soils considering initial void ratio and hydraulic path[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(12): 2191 – 2196. (in Chinese))
- [18] WILDENSCHILD D, HOPMANS J W, SIMUNEK J. Flow rate dependence of soil hydraulic characteristics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(1): 35 – 48.
- [19] DIAMANTOPOULOS E, DURNER W. Dynamic nonequilibrium of water flow in porous media: a review[J]. *Vadose Zone Journal*, 2012, **11**(3): vzj2011.0197.
- [20] 伊盼盼, 牛圣宽, 韦昌富. 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. (YI Pan-pan, NIU Sheng-kuan, WEI Chang-fu. Dynamic multi-step outflow method for tests on hydraulic properties of unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(10): 1797 – 1801. (in Chinese))
- [21] TOPP G C, KLUTE A, PETERS D B. Comparison of water content-pressure head data obtained by equilibrium, steady-state, and unsteady-state methods1[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1967, **31**(3): 312 – 314.
- [22] SMILES D E, VACHAUD G, VAUCLIN M. A test of the uniqueness of the soil moisture characteristic during transient, nonhysteretic flow of water in a rigid soil1[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1971, **35**(4): 534 – 539.
- [23] HASSANIZADEH S M, CELIA M A, DAHLE H K. Dynamic effect in the capillary pressure-saturation relationship and its impacts on unsaturated flow[J]. *Vadose Zone Journal*, 2002, **1**(1): 38 – 57.
- [24] FRIEDMAN S P. Dynamic contact angle explanation of flow rate-dependent saturation-pressure relationships during transient liquid flow in unsaturated porous media[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1999, **13**(12): 1495 – 1518.
- [25] WEI C, MURALEETHARAN K K. Linear viscoelastic behavior of porous media with non-uniform saturation[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2007, **45**(2/3/4/5/6/7/8): 698 – 715.
- [26] DIAMANTOPOULOS E, DURNER W, IDEN S C, et al. Modeling dynamic non-equilibrium water flow observations under various boundary conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **529**: 1851 – 1858.
- [27] JOEKAR-NIASAR V, HASSANIZADEH S M, DAHLE H K. Non-equilibrium effects in capillarity and interfacial area in two-phase flow: dynamic pore-network modelling[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, **655**: 38 – 71.
- [28] ROSS P J, SMETTEM K R J. A Simple Treatment of Physical Nonequilibrium Water Flow in Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(6): 1926 – 1930.

- [29] ZHAO C G, LIU Y, GAO F P. Work and energy equations and the principle of generalized effective stress for unsaturated soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, **34**(9): 920 – 936.
- [30] 刘 艳, 赵成刚, 李 舰, 等. 相间交界面对非饱和土应力状态的影响[J]. 力学学报, 2017(2): 335 – 343. (LIU Yan, ZHAO Cheng-gang, LI Jian, et al. The influence of interfaces on the stress state in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017(2): 335 – 343. (in Chinese))
- [31] HASSANIZADEH S M, GRAY W G. Thermodynamic basis of capillary pressure in porous media[J]. Water Resources Research, 1993, **29**(10): 3389 – 3405.
- [32] MIRZAEI M, DAS D B. Experimental investigation of hysteretic dynamic effect in capillary pressure-saturation relationship for two-phase flow in porous media[J]. AIChE Journal, 2013, **59**(10): 3958 – 3974.
- [33] FENG M, FREDLUND D G. Hysteretic influence associated with thermal conductivity sensor measurements[C]// Proceeding From Theory to the Practice of Unsaturated Soil Mechanics, 1999, Canada, 14214 – 14220.
- [34] ZHUANG L, HASSANIZADEH S M, QIN C, et al. Experimental investigation of hysteretic dynamic capillarity effect in unsaturated flow[J]. Water Resources Research, 2017, **53**(11): 9078 – 9088.
- [35] MILATZ M, TÖRZS T, NIKOOEE E, et al. Theoretical and experimental investigations on the role of transient effects in the water retention behaviour of unsaturated granular soils[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2018, **15**: 54 – 64.

第三届全国软土工程学术会议第一号通知（征文）

第一届全国软土工程学术会议本着“软土工程的理论创新与工程实践”的主题，于 2013 年 11 月在同济大学顺利召开。第二届全国软土工程学术会议围绕着“软土工程的性能与安全”的主题，于 2017 年 11 月在天津大学成功举办。第三届全国软土工程学术会议将于 2021 年 11 月中旬在南京召开。全国各地软土工程专家学者将欢聚一堂，以“软土工程智能建造”为主题，针对重大软土工程问题、软土工程新理论、新技术以及学科发展进行研讨。

本次会议将为学者和同行面对面深入广泛的学术交流研讨提供机会，届时将邀请土力学与软土工程领域的知名专家学者就软土工程学科的发展作综述报告，共同探讨土力学与软土工程学科的发展趋势，展现最新研究进展和成果。

会议将通过大会特邀报告、主题报告、分组报告、研究生专场报告等形式，大家共享新思想，激发新思维，拓宽新视野，进一步推动我国在软土工程的理论和工程实践等方面的进程，促进我国软土工程领域的可持续发展。

会议主要研讨软土工程的基本理论、实践探索、新技术和

新方法等。征文内容包括以下 10 个方面。①软土的基本特性与本构关系；②软土工程勘察、测试与智能评价；③软土地基处理创新与智能化施工；④软土基础工程；⑤软土地下工程；⑥软土动力学与地震工程；⑦软土工程数值仿真与信息化技术；⑧绿色软土工程；⑨软土地区重大工程实践；⑩软土工程的其他问题。

应征论文须符合上述征文内容要求，且未公开发表过，作者文责自负，字数一般不超过 8000 字（6 页以内，含图表与公式）。

学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查，录用论文将推荐至《岩土工程学报》增刊、《建筑科学与工程学报》正刊等形式发表。论文格式详见《岩土工程学报》征稿简则，期刊录用论文的版面费按照各期刊要求收取。

论文请通过电子邮件发到大会议秘书处会务邮箱（softsoilseu@163.com），并注明作者的详细通讯地址、邮编、联系电话及 Email 地址。