

DOI: 10.11779/CJGE201912003

考虑孔隙比和水力路径影响的非饱和土土水特性研究

高游¹, 孙德安², 张俊然³, 罗汀⁴

(1. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 3. 华北水利水电大学河南省岩土力学与结构工程重点实验室, 河南 郑州 450045; 4. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 以非膨胀性黏土为试验研究的对象, 利用压力板法研究了初始孔隙比对不同水力路径下非饱和压实土土水特性的影响。试验结果表明, 不同初始孔隙比土水特征曲线均存在明显的滞回现象; 当吸力大于某一值时, 以含水率与吸力关系表示的话, 不同初始孔隙比主脱湿土水曲线几乎重叠; 以饱和度与吸力关系表示, 初始孔隙比对土水特征曲线存在较大的影响。还提出归一化处理全吸力范围内不同初始孔隙比土水特征曲线的方法。最后, 在归一化的处理方法基础上, 提出了考虑初始孔隙比影响的非饱和土滞回特性的模拟方法, 并利用相关实测数据加以验证。

关键词: 非饱和土; 压实样; 孔隙比; 土水特征曲线

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)12-2191-06

作者简介: 高游(1989—), 男, 讲师, 博士, 主要从事非饱和土力学的研究。E-mail: gaoyou@nbu.edu.cn。

Soil-water characteristics of unsaturated soils considering initial void ratio and hydraulic path

GAO You¹, SUN De-an², ZHANG Jun-ran³, LUO Ting⁴

(1. Faculty of Architecture, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Henan Province Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Structural Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 4. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To investigate the effects of the initial void ratio on the soil-water characteristic curves of non-expansive clay under different hydraulic paths, the suction is imposed or measured using the pressure plate method. The experimental results show that the obvious hysteresis phenomenon can be observed in the soil water characteristic curve (SWCC) with different initial void ratios. The main drying SWCCs of compacted specimens with different void ratios coincide with each other at the suction higher than a specific suction value when they are expressed by the relation between suction and water content. When the SWCC is expressed by the relation between suction and degree of saturation, the influence of the initial void ratio is highlighted. Moreover, a method to normalize the main drying and wetting SWCC in full suction range is proposed. Finally, a method to describe the hydraulic hysteresis behavior of specimens with different initial void ratios is proposed, and the predicted results are compared well with measured values.

Key words: unsaturated soil; compacted specimen; void ratio; soil-water characteristic curve

0 引言

土水特征曲线是研究非饱和土强度、渗透性以及本构理论的基础, 可以用吸力与重力含水率或吸力与饱和度的关系来描述, 它表示非饱和土的持水能力大小^[1]。土水特征曲线的影响因素很多, 如土的矿物成分、孔隙结构、应力状态、孔隙比和温度等等。

在相同温度环境下, 对于同类型土, 其孔隙比和应力状态是主要的影响因素, 而应力状态对试样土水特性的影响可以认为主要通过改变土体的孔隙比产生的^[2]。如邹维列等^[3]通过一系列土水特性试验得到不同应力

状态和相同孔隙比条件下压实样的土水特性几乎相同的结论。因此, 在相同的温度环境下, 同类型土孔隙比才是影响土水特征曲线的主要因素, 故研究初始孔隙比或干密度对土水特征曲线的影响有着重要的意义。

近年来, 国内外不少学者对此做了大量的研究工作: 如陈正汉^[4]研究了基质吸力在 500 kPa 范围内初始干密度和应力状态对非饱和压实土脱湿土水特性的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902279, 41602295, 51579005)

收稿日期: 2019-05-20

*通讯作者(E-mail: gaoyou@nbu.edu.cn)

影响;张雪东等^[5]研究了土体密实度对脱湿土水特征曲线的影响,并提出不同孔隙比土水特征曲线的预测方法;蔡国庆等^[6]在分析不同类型土土水特征曲线拟合效果的基础上,提出了一种考虑初始干密度影响的土水特征曲线预测方法;褚峰等^[7]利用非饱和土固结仪研究了初始干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征的影响。Ng等^[8]研究初始干密度、含水率及应力状态对压实样土水特性的影响。Salager等^[9]利用压力板和盐溶液试验法,得到广吸力范围内不同初始孔隙比的土水特征曲线。上述考虑初始孔隙比或干密度对土水特征曲线影响的研究已经取得了较好的成果。但是,对不同水力路径下考虑初始孔隙比或干密度对非饱和土土水特性影响的试验研究相对较少,以及考虑孔隙比和水力路径影响的非饱和土土水特性模拟研究也需要进一步深入。

因此,本文结合轴平移技术对非膨胀性黏土在不同初始孔隙比和水力路径下进行了一系列的土水特性试验,并结合试验结果详细分析了初始孔隙比对不同水力路径下非饱和土土水特性的影响。最后,提出不同初始孔隙比土水特征曲线的归一化处理方法以及考虑初始孔隙比影响的非饱和土滞洄特性模拟的方法,并利用本文和文献中的实测数据加以验证。

1 试验材料及试样制备

试验所用的土样是一种非膨胀性黏土,商品名为珍珠土,其液限为49%,塑性指数为22,相对密度为2.71。图1是珍珠土的颗粒级配曲线,从图1可知:这种土的黏粒(小于5 μm)和粉粒组分约各占50%。该黏土的主要矿物为石英、叶蜡石和高岭土,几乎不含膨胀性矿物。压实样制备方法如下:先调制土样的初始含水率约26%,用模具压制成直径38 cm、高度76 cm的三轴压实样。初始孔隙比分别约为1.0, 1.15, 1.26,试样的初始吸力约为110 kPa。试验仪器采用GDS非饱和三轴仪器。应力条件如下:先施加20 kPa净围压进行固结,待固结完成后保持净围压20 kPa不变,并打开陶瓷板底部连通排水管的排水阀;随后,

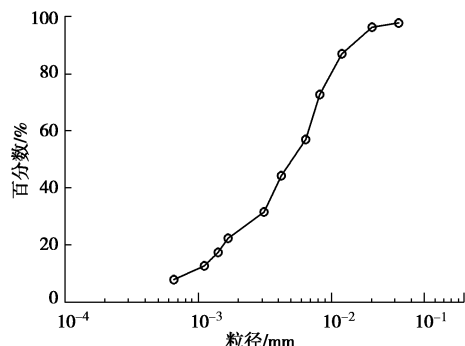


图1 珍珠土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of pearl clay

逐级施加目标吸力值进行不同水力路径下的吸湿和脱湿试验。吸湿路径:100→2 kPa;脱湿路径:100→250 kPa和2→490 kPa。每级荷载稳定后,通过量测土样的排水量和体积变化量,即可获取不同吸力下所对应的含水率与饱和度。

2 试验结果与分析

图2表示利用轴平移技术测得不同初始孔隙比($e_0=1.26, 1.15$ 和 1.0)压实样在不同水力路径下的吸湿和脱湿土水特征曲线,分别用吸力与含水率和吸力与饱和度的关系表示。由图2可以看出:在不同水力路径下获取的不同初始孔隙比土水特征曲线均存在明显的滞洄现象;不同初始孔隙比压实样($e_0=1.26, 1.15$ 和 1.0)的进气值分别约为51, 63和88 kPa。由图2(a)中吸力与含水率的关系图可知,在脱湿路径为100至250 kPa下,不同初始孔隙比土水特征曲线几乎重叠。在脱湿路径为2至490 kPa下,当吸力约小于150 kPa时,试样在饱和状态时的含水率随着初始孔隙比增大而增大;当吸力值约大于150 kPa时,不同孔隙比试样的土水特征曲线几乎重合,即在此吸力范围内不同初始孔隙比的土水特性几乎相同。在吸湿路径为100至2 kPa下,土水曲线随着初始孔隙比的增大而增大。

由图2(b)吸力与饱和度的关系图可知,当吸力小于进气值,不同初始孔隙比的土水曲线几乎重合;当吸力大于进气值时,土水曲线随着初始孔隙比的增大而略微下移。在吸湿路径为100至2 kPa下,当吸力大于20 kPa时,土水特征曲线随着初始孔隙比减小而向上方移动;当吸力小于20 kPa时,初始孔隙比对试样在吸湿过程中的土水特性几乎没有影响。此外,可以看出三组不同初始孔隙比压实样吸湿后的饱和度均未达到100%,主要是试样内部的不规则孔隙存在和少量空气滞留等导致试样吸湿饱和过程中无法达到真正意义上的饱和。

3 考虑初始孔隙比影响的滞洄模型

Fredlund等^[10]在1994年提出一个能够很好拟合全吸力范围内土水特征曲线的方程:

$$S_r = C(s) \frac{1}{\{\ln[2.718 + (s/a)^n]\}^m}, \quad (1)$$

式中, S_r 为非饱和时的体积含水率, a , n 和 m 为3个拟合参数。 $C(s)$ 为修正参数,可表示为

$$C(s) = 1 - \frac{\ln(1 + s/\psi_{re})}{\ln[1 + (10^6/\psi_{re})]}. \quad (2)$$

式中, ψ_{re} 为残余吸力值。Fredlund等^[10]提到在大部分情况下 ψ_{re} 在1500~3000 kPa之间取值,对不同类型土的土水特征曲线式(1)都能获得较好的拟合结果。文献[11]

也提到残余吸力值在较难确定情况下, 建议 ψ_{re} 取 1500 kPa。为了简便, 后文计算中的 ψ_{re} 统一取 1500 kPa。

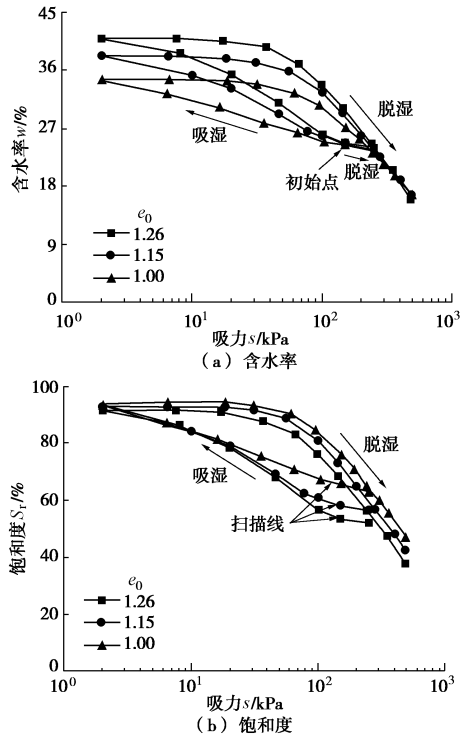
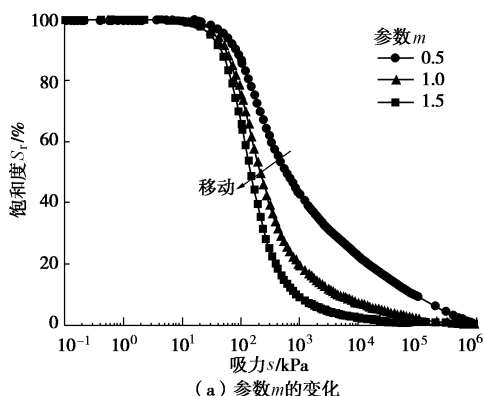


图 2 不同初始孔隙比压实的脱湿和吸湿土水特征曲线
Fig. 2 SWCCs of compacted clay with different void ratios in drying and wetting curves

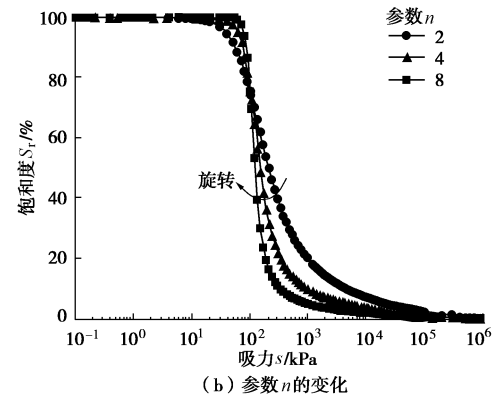
图 3 表示 Fredlund 和 Xing 拟合方程中 a , n 和 m 3 个参数的影响。由图 3 (a) 可知, m 值 ($m=0.5, 1.0$ 和 1.5) 的变化主要影响过渡区和残余区范围内的土水曲线; 由图 3 (b) 可知, 改变参数 n 值 ($n=2, 4$ 和 8) 将使土水特征曲线绕着反弯点的吸力值顺时针转动; 由图 3 (c) 可知, 参数 a ($a=10, 100$ 和 1000) 取值的变化恰好可以反映出土水特征曲线因初始孔隙比或干密度的影响导致曲线发生左右平移的这种特性。因此, 将 Gallipoli 等^[12]提出的土水特征曲线中的孔隙比影响项 $(e_0)^\psi$ 引入式 (1), 即可得考虑初始孔隙比影响的土水特征曲线拟合方程, 即

$$S_r(s, e_0) = C(s) \frac{1}{\{\ln(2.718 + [(e_0)^\psi s / a]^n)\}^m}, \quad (3)$$

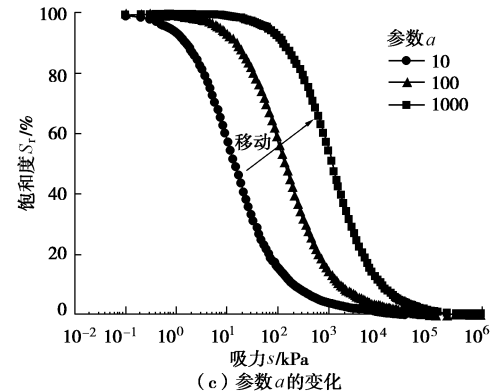
式中, ψ 为拟合参数, e_0 为初始孔隙比。



(a) 参数 m 的变化



(b) 参数 n 的变化



(c) 参数 a 的变化

图 3 参数 a , n 和 m 的影响

Fig. 3 Influences of parameters a , n and m

为了消除初始孔隙比的影响, 将 $(e_0)^\psi s$ 与 $S_r(s, e_0)/C(s)$ 分别利用变换吸力 s^* 和变换饱和度 S_r^* 替代, 即

$$s^* = (e_0)^\psi s, \quad (4)$$

$$S_r^* = \frac{S_r(s, e_0)}{C(s)}. \quad (5)$$

将式 (4) 和式 (5) 代入式 (3), 即可得不考虑初始孔隙比影响的归一化土水特征曲线方程

$$S_r^* = \frac{1}{\{\ln(2.718 + [s^* / a]^n)\}^m}, \quad (6)$$

式 (6) 在形式上就是不含修正系数的 Fredlund 和 Xing 拟合方程。图 4 表示利用式 (6) 变换处理后的珍珠土和砂性黏土在不同初始孔隙比条件下的土水特征曲线, 图 4 (b) 实测值来自文献[13]。由图 4 可以看出, 不同初始孔隙比利用变换饱和度式 (5) 和变换吸力 (4) 进行归一化处理后的脱湿土水特征曲线几乎重合。假定经归一化处理后的主脱湿和吸湿土水特征曲线分别称为主脱湿面和主吸湿面, 归一化处理后的扫描线称为扫描面。因此, 通过归一化处理后得到与孔隙比无关的主脱湿面和主吸湿面土水特征曲线, 主脱湿面和主吸湿面土水特征曲线可以利用式 (6) 进行模拟。主脱湿面和吸湿面之间的滞洄特性 (即扫描面), 可套用未考虑初始孔隙比影响的多种现有滞洄模型来考虑。

本文主脱湿面和主吸湿面之间的滞洄特性模拟 (即扫描面的模拟), 参考 Zhou^[14] 和 Azizi 等^[15] 提出考虑角度差异的滞洄模型, 即式 (6) 可以表示为

$$S_r^* = \frac{1}{\{\ln(2.718 + [s^* \cos \theta_R / a \cos \theta]^n)\}^m}, \quad (7)$$

式中, θ 为接触角, θ_R 为主脱湿或脱湿面的接触角, 为了简便 $\theta_R = 0^\circ$ 。若在主脱湿面上, 接触角 θ 等于 θ_R ; 在主吸湿面上, 接触角 θ 等于 θ_A , θ_A 为主吸湿面的接触角。式 (7) 中饱和度的增量形式为

$$dS_r^* = \frac{\partial S_r^*}{\partial s^*} ds^* + \frac{\partial S_r^*}{\partial \theta} \frac{d\theta}{ds^*} ds^* \quad (8)$$

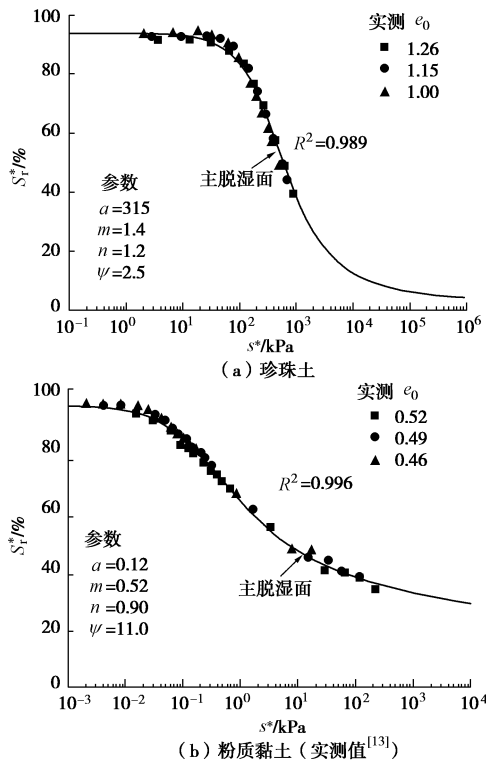


图4 归一化处理的主脱湿土水特性曲线

Fig. 4 Normalized main drying SWCCs

式 (7) 分别对接触角 θ 和变换吸力 s^* 求偏导可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S_r^*}{\partial \theta} &= \frac{S_{r0}^* mn \tan \theta A}{[\ln(2.718 + A)]^{m+1} (e + A)}, \\ \frac{\partial S_r^*}{\partial s^*} &= \frac{S_{r0}^* mn A}{s^* [\ln(2.718 + A)]^{m+1} (e + A)}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, A 的表达式为

$$A = \left(\frac{s^* \cos \theta_R}{a \cos \theta} \right)^n \quad (10)$$

再将式 (9) 和 (10) 代入式 (8) 可得

$$dS_r^* = \frac{S_{r0}^* mn A}{s^* [\ln(2.718 + A)]^{m+1} (2.718 + A)} \left(1 + s^* \tan \theta \frac{d\theta}{ds^*} \right) ds^* \quad (11)$$

在主脱湿面和主吸湿面的接触角为常数, 即 $d\theta/ds^* = 0$, 在扫描面上, 接触角随吸力的变化可以表示为

$$\frac{d\theta}{ds^*} = -\frac{H}{s^* \tan \theta}, \quad (12)$$

式中, H 的表达式的形式不固定, 本文中采用 Azizi 等^[15]提出的如下表达式:

$$H = \begin{cases} \left[\frac{\log\left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_R}\right)}{\log\left(\frac{\cos \theta_A}{\cos \theta_R}\right)} \right]^\beta & (ds^* > 0), \\ \left[\frac{\log\left(\frac{\cos \theta_R}{\cos \theta}\right)}{\log\left(\frac{\cos \theta_R}{\cos \theta_A}\right)} \right]^\beta & (ds^* < 0), \end{cases} \quad (13)$$

式中, β 为标定参数。

因此, 利用式 (7), (12) 和 (13) 对归一化处理后的主脱湿面、主吸湿面以及扫描面的土水特征曲线进行参数标定, 即可获取归一化处理后的考虑滞洄效应的土水特性曲线方程。再将变换吸力和变换饱和度还原为含初始孔隙项, 即式 (4) 和 (5)。最后, 可得到考虑孔隙比和水力路径影响的土水特性曲线模拟方程, 即可利用确定参数的方程式 (3), (7), (12) 和 (13) 对不同初始孔隙比和水力路径下的土水特性进行模拟。

4 模型验证

图 6 为考虑初始孔隙比影响的滞洄模型算例分析, 其中主脱湿面和主吸湿面的标定参数 a , n , m 以及 θ_A 分别取 200, 1.4, 1.2 和 80° , 参数 ψ 取 6.0, 以及扫描线的标定参数 β 取 0.3。上述参数实际应用中可以通过主脱湿面、主吸湿面以及扫描面实测数据进行标定。由图 6 可以看出, 利用确定参数的模型, 即可模拟不同初始孔隙比和不同水力路径条件下非饱和土的主脱湿面、主吸湿面以及滞洄特性。图 6 (b) 表示不同初始孔隙比 ($e_0=1.2, 1.0$ 和 0.8) 条件下主脱湿和主吸湿土水特征曲线以及不同水力路径下扫描线的模拟, 扫描线的脱湿路径为 50 至 350 kPa 和吸湿路径为 2000 至 150 kPa。由图 6 可知, 本文方法可以很好地反映出初始孔隙比和水力路径对土水特性的影响。

图 7 表示 Boom clay 在不同初始孔隙比条件下主脱湿面和吸湿面土水特征曲线的确定, 实测数据取自文献[16]。Boom clay 土样的相对密度为 2.65, 初始孔隙比为 0.93 和 0.59。通过式 (7) 的标定, 可获取主脱湿面和主吸湿面的参数 a , n , m 以及 θ_A 分别取 240, 0.7, 0.7 和 80° 。本实测数据未涉及扫描线, 因此也就没有对扫描面进行标定, 其中参数 β 也就没有给出。由图 7 可以看出, 不同初始孔隙比的主脱湿和主吸湿土水曲线归一化处理后的归一效果较好。

图 8 表示两种孔隙比 Boom clay 试样的土水特征曲线的计算值与实测值的对比。由图 8 可知, 计算值

较好地模拟了全吸力范围内的脱湿和吸湿土水特性。

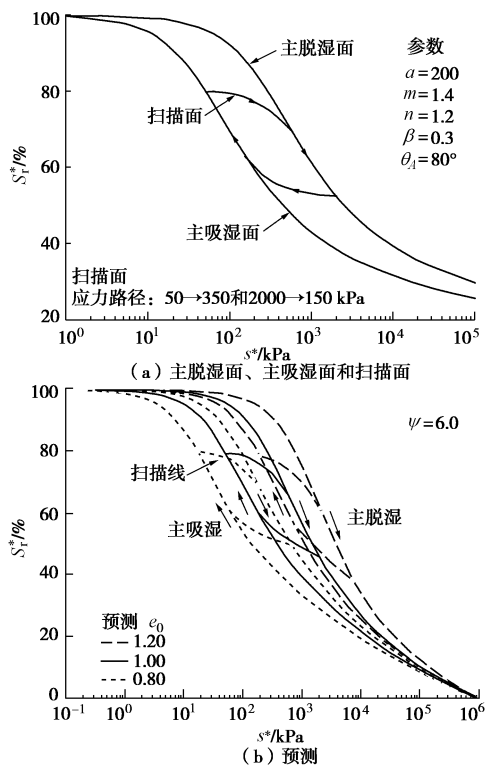


图 6 不同初始孔隙比土水特征曲线的预测

Fig. 6 Prediction of SWCCs with different initial void ratios

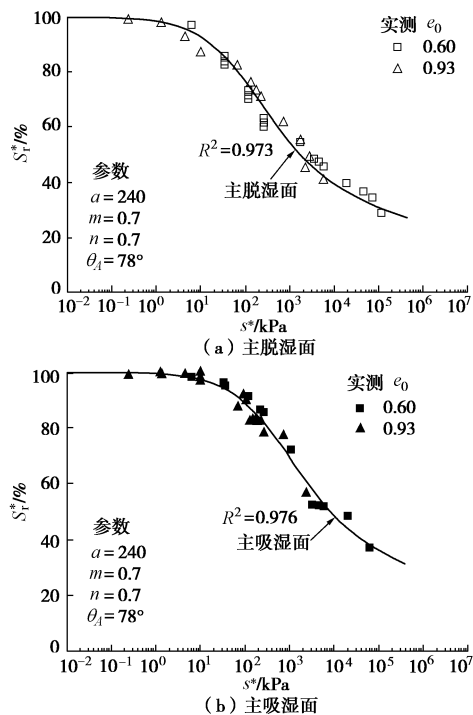


图 7 主脱湿面和主吸湿面的确定 (实测值^[13])

Fig. 7 Determination of main drying and wetting surfaces

图 9 表示对不同初始孔隙比和不同水力路径下珍珠土土水特性的模拟 (即本文实测数据)。参数 ψ 取 2.5, 再结合式 (4) 和式 (5) 对实测数据进行归一

化处理, 即可获得主脱湿面、主吸湿面以及扫描面, 再结合式 (7) 对主脱湿面和主吸湿面进行标定, 即可确定参数 a , n , m 和 θ_A 分别为 200, 1.4, 1.2 和 80° , 最后通过式 (12) 和 (13) 对扫描面进行标定, 可确定参数 β 为 0.5。模型参数确定后, 即可利用确定参数的模型对不同初始孔隙和不同水力路径下的土水特性进行模拟。由图 9 (b) 可以看出, 本文的方法可以较好的模拟不同初始孔隙比条件下主吸湿、主脱湿以及扫描线的土水特性。

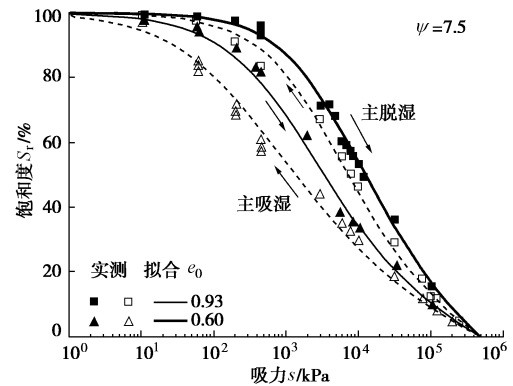


图 8 不同初始孔隙比 Boom clay 土水特征曲线的拟合

Fig. 8 Fitting of SWCCs for Boom clay with different initial void

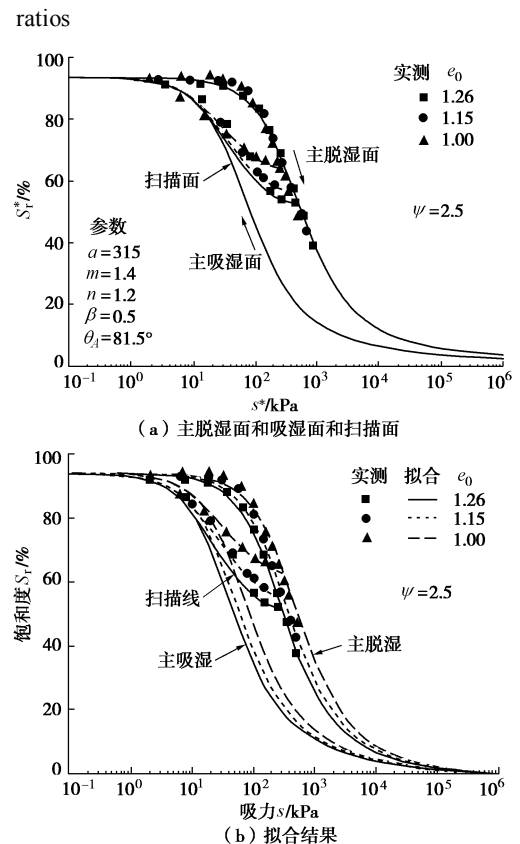


图 9 不同初始孔隙比珍珠土土水特征曲线的拟合

Fig. 9 Fitting of SWCCs with different initial void ratios

5 结 论

本文通过试验, 研究了初始孔隙比对不同水力

路径下非饱和土土水特性的影响。基于试验数据,提出了不同初始孔隙比土水特征曲线的归一化处理以及考虑初始孔隙比影响的非饱和土滞洄特性模拟的方法。可得出以下结论:

(1)在不同水力路径下不同初始孔隙比土水特征曲线均存在明显的滞洄现象。当吸力大于某一值时,以含水率与吸力关系表示的话,不同初始孔隙比主脱湿土水曲线几乎重叠;以饱和度与吸力关系表示,初始孔隙比对土水特征曲线存在较大的影响。

(2)不同初始孔隙比的主脱湿和主吸湿土水特征曲线通过变换饱和度和变换吸力处理后,不同初始孔隙比的主脱湿和主吸湿土水特征曲线分别可以归一化处理为一条曲线。

(3)在上述归一化处理不同初始孔隙比土水曲线的基础上,提出了考虑初始孔隙比影响非饱和土滞洄特性的模拟方法,并利用相关数据进行了验证。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [2] SUN D A, SHENG D C, XU Y F. Collapse behavior of unsaturated compacted clays with different initial densities [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(6): 673 - 686.
- [3] 邹维列, 王协群, 罗方德, 等. 等应力和等孔隙比状态下的土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(9): 1711 - 1717. (ZOU Wei-lie, WANG Xie-qun, LUO Fang-de, et al. Experimental study on SWCCs under equal stress and equal void ratio states[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(9): 1711 - 1717. (in Chinese))
- [4] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201 - 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201 - 272. (in Chinese))
- [5] 张雪东, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 土体密实状态对土-水特征曲线影响规律研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1436 - 1468. (ZHANG Xue-dong, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing, et al. Research on influence of soil density on soil-water characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1436 - 1468. (in Chinese))
- [6] 蔡国庆, 张策, 李舰, 等. 考虑初始干密度影响的SWCC预测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊2): 27 - 31. (CAI Guo-qing, ZHANG Ce, LI Jian, et al. Prediction method for SWCC considering initial dry density[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 27 - 31. (in Chinese))
- [7] 褚峰, 邵生俊, 陈存礼. 干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(2): 413 - 420. (CHU Feng, SHAO Sheng-jun, CHEN Cun-li. Experimental research on influences of dry density and vertical stress on soil-water characteristic curves of intact unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(2): 413 - 420. (in Chinese))
- [8] NG C W W, PANG Y W. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(6): 1252 - 1254.
- [9] SALAGER S, ALESSIO M, FERRARI A, et al. Investigation into water retention behavior of deformable soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(2): 200 - 208.
- [10] FREDLUND D G, XING A. Equation for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 - 532.
- [11] 周葆春, 孔令伟, 陈伟, 等. 荆门膨胀土土-水特征曲线特征参数分析与非饱和抗剪强度预测[J]. 岩土力学与工程学报, 2010, **29**(5): 1052 - 1059. (ZHOU Bao-chun, KONG Ling-wei, CHEN Wei, et al. Analysis of characteristic parameters of soil-water characteristic curve(SWCC) and unsaturated shear strength prediction of Jingmen expansive soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(5): 1052 - 1059. (in Chinese))
- [12] GALLIPOLI D, WHEELER S J, KARSTUNEN M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 105 - 112.
- [13] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**(3): 379 - 392.
- [14] ZHOU A. A contact angle-dependent hysteresis model for soil-water retention behaviour[J]. Computers & Geotechnics, 2013, **49**(4): 36 - 42.
- [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 & Geotechnics, 2017, **87**: 86 - 98.
- [16] 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.