

DOI: 10.11779/CJGE201905016

非饱和土孔隙比与基质吸力关系的通用模型

叶云雪¹, 邹维列^{1,2}, 韩仲¹, 刘小文³

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 西京学院土木工程学院, 陕西 西安 710123;

3. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 基于土的土-水特征曲线 (SWCC) 和收缩特征曲线 (SSCC) 的特点及二者之间的联系, 采用三直线的分段 SSCC 模型及非饱和土的三相比例公式, 推导出了反映非饱和土孔隙比与基质吸力关系的通用模型。为了证实所提出模型的可靠性, 采用 GDS 三轴仪进行了一系列吸力平衡试验, 并对所提出模型的理论假设进行了验证。试验结果表明: 利用该假设并通过吸力平衡下试样的排水量, 可以准确地预测饱和试样在某一基质吸力和净围压共同作用下的体积变化量、进气量和总体变, 证明了所提出模型的假设是成立的, 且假设中的系数 u 具有明确的物理意义。

关键词: 非饱和土; 土-水特征曲线; 收缩特征曲线; 孔隙比; 基质吸力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)05-0927-07

作者简介: 叶云雪(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土特性方面的研究。E-mail: yeyunxue@163.com。

General model for relationship between void ratio and matric suction in unsaturated soils

YE Yun-xue¹, ZOU Wei-lie^{1,2}, HAN Zhong¹, LIU Xiao-wen³

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an

710123, China; 3. School of Architectural Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: A general model is proposed to simulate the dependence of void ratio on matric suction for unsaturated soils. This model can be derived based on (i) the characteristics and the relationship between soil-water characteristic curve (SWCC) and soil shrinkage characteristic curve (SSCC) and (ii) a SSCC formula using a three-segment linear model, and a three-phase basic formula for unsaturated soils. A series of unsaturated tests are conducted by using the triaxial apparatus on a red clay to further verify the theoretical assumption required for the proposed model. Only one parameter u is required in the theoretical assumption and has a clear physical meaning, which can be calibrated using the conventional SWCC tests. Based on the assumption with the amount of drainage of saturated samples at a given suction, the bulk volume change, the amount of the air entry into the soil and the total volumetric strain can be accurately predicted. The validity and application of the assumption are demonstrated by these tests, and hence the proposed assumption-based model is also validated.

Key words: unsaturated soil; soil-water characteristic curve; shrinkage characteristic curve; void ratio; matric suction

0 引言

与饱和土相比, 非饱和土在饱和度或基质吸力发生变化时, 其强度、变形和渗透性将随之发生变化。因此, 非饱和土抗剪强度公式中必定含有基质吸力或饱和度变量^[1-4]。非饱和土的研究首先需要解决三个基本问题^[5]: ①基质吸力或饱和度变化引起的土体变化(如地基沉降或湿陷); ②基质吸力或饱和度变化引起的抗剪强度变化(如降雨引起的边坡失稳或泥石流); ③基质吸力或饱和度变化引起的水力性质变化(如渗透系数和土-水特征曲线(SWCC))。基质吸力与土中的含水率紧密相关并影响土体的体变, 而饱和度受含水率与土体体变的共同影响, 故土的体积变化

是非饱和土的重要特征之一。在非饱和土中, 基质吸力与外部应力均会导致土的孔隙比的变化。本文仅考虑基质吸力对孔隙比变化的影响。SWCC 是非饱和土的基本本构关系, 常被用于预测抗剪强度、应力应变关系和渗透系数等^[6-8]。

由于室内试验测量 SWCC 需要花费的时间很长, 因此很多学者提出了利用数学模型定量地描述 SWCC, 并通过试验测量的若干数据点对模型中的参

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479148, 51779191)

收稿日期: 2018-05-14

*通讯作者(E-mail: zwilliam@126.com)

数进行校正,进而获得整个吸力范围内的 SWCC^[9-11]。然而,这些模型并没有考虑基质吸力的变化会导致试样发生体变。如脱湿(吸湿)过程中,试样发生体缩(膨胀)。这些体变包括弹性体变和塑性体变^[12],因此由基质吸力的变化导致的试样体变是不可忽略的。为了克服这个限制,一些学者在 SWCC 的模型中引入了孔隙比(e)或比体积($v=1+e$)这样一个变量,并构建了一个由饱和度-基质吸力-孔隙比 3 个变量组成的土水特征曲面模型^[13-15]。但这些模型中,引入的孔隙比或比体积的变量也是通过经验方程实现的。如 Gallipoli 等^[14]认为孔隙比与 VG 模型的进气值参数成幂函数关系,并将这种关系替换 VG 模型中的进气值参数,从而获得了考虑孔隙比影响的 SWCC 模型。

土的收缩特征曲线(soil shrinkage characteristic curve, 简记为 SSCC)描述了土的体积变化与含水率的变化关系。土体积的变化可以用孔隙比 e 或比体积 v 来表示,含水率可以用重量含水率 w 或含水比 φ 表示。含水比 φ 表示土中水的体积 V_w 与土颗粒的体积 V_s 之比,即 $\varphi = G_s w = e S_r$, 其中 G_s 是土的比重。不难发现,由于常规的 SWCC 试验可以获得基质吸力与重量含水率或饱和度的关系,而 SSCC 试验可以获得孔隙比与重量含水率或含水比的关系。因此,本文基于 SWCC 和 SSCC 的特点及其二者之间的联系,推导出了基质吸力与孔隙比的通用模型。

1 SWCC 和 SSCC 的特征

在一个典型的 SWCC (见图 1) 中,通常被划分为 3 个区域:边界效应区,过渡区和非饱和残余区^[16]。该曲线具有两个特征点,分别是进气值和残余饱和度。在研究 SSCC 时,根据土的结构性,可分为两类:结构性土(如原状土)和非结构性土(如重塑土)。这两类土的典型 SSCC 分别对应着图 2 中的虚线(结构性土)和实线(非结构性土),由于结构性土大多数与农业和地质问题相关,因此不在本文的研究范围内。图 2 中 φ_{sat} 是饱和含水比; φ_s 是缩限含水比,表示土的含水率减少至土的体积不再变化时的界限含水比,对应的孔隙比为 e_s ; φ_v 是基质吸力达到进气值时的含水比,对应的孔隙比为 e_v ; e_{min} 是孔隙比的最小值,对应土样处于完全干燥的状态; e_0 是饱和初始孔隙比。

对于非结构性土,SSCC 通常被划分为正常收缩,残余收缩和零收缩 3 个阶段。①正常收缩段是指土样从基质吸力为 0 (饱和状态) 开始到基质吸力达到进气值的阶段,对应的含水比范围为 $\varphi_v \leq \varphi \leq \varphi_{sat}$ 。该阶段的特征是土样的排水体积 ΔV_w 等于土中孔隙体积的减小量 ΔV_v 或土样的体积缩小量 ΔV 。因此该阶段的

SSCC 与饱和线(即 1:1 线)重合;②残余收缩阶段是指土样从进气吸力值开始到土样进入缩限的阶段,对应的含水比范围为: $\varphi_s < \varphi < \varphi_v$ 。该阶段的特征是土样的排水体积大于土中孔隙体积的减小,即 $\Delta V_w > \Delta V_v$ 。该阶段的特征是空气开始进入土的孔隙中,随着土中含水比不断地减小,土中孔隙气的体积不断地增加,因此该阶段 SSCC 不断地偏离饱和线并位于饱和线的上方;③零收缩阶段是指土样从缩限开始继续排水直到完全变干,对应的含水比范围为: $0 \leq \varphi \leq \varphi_s$ 。该阶段的特征是土样的体积基本不变,即 $\Delta V = 0$, 因此该阶段 SSCC 趋于水平(如图 2 中的①线所示)。最近有研究者^[17]指出,对于不含可交换阳离子的土样,如一些粉质土和非膨胀性粘土,SSCC 在零收缩阶段的斜率为零或几乎为零;而对于阳离子水合作用较强的土样,如膨胀性黏土,SSCC 在零收缩阶段都会表现出非零的斜率(如图 2 中的②所示)。

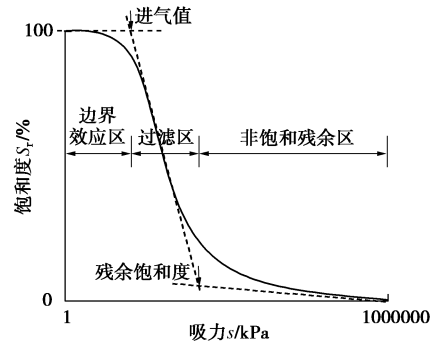


图 1 典型的 SWCC 示意图

Fig. 1 Schematic of typical SWCC

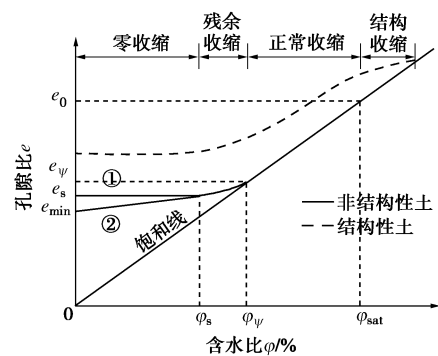


图 2 典型的 SSCC 示意图

Fig. 2 Schematic of typical SSCC

对于某些非结构性土来说,残余收缩阶段的曲线可以简化为一条直线,那么 SSCC 曲线可以简化为三直线分段方程,如 McGarry 等^[18]提出的三直线分段模型。Cornelis 等^[19]利用试验数据对比了 9 种 SSCC 本构模型,包括线性型,多项式型,幂函数型和对数函数型等,并通过比较统计指标(如均方根误差 RMSE, 确定系数 R^2 和赤池信息量准则 AIC), 得出三直线分

段模型表现得相当好。另外, 当需要将 SSCC 结合到其它模型中时, 简单的本构关系有利于模型的耦合, 当然也便于工程应用。

2 孔隙比与基质吸力关系的通用模型

本文仅考虑基质吸力对试样体变的影响 (不考虑外部应力), 研究试样从饱和状态到完全干燥 (脱湿) 的全过程。假设在某一级基质吸力作用下试样的体变与试样排水体积的关系为 $\Delta V = u \cdot \Delta V_w$ (其中 u 为 ΔV 和 ΔV_w 的比例系数, 其物理意义见下文), 且试样的体变等于土中孔隙体积的变化, 即 $\Delta V = \Delta V_v$, 那么孔隙气的体积变化 $\Delta V_a = (1-u) \cdot |\Delta V_w|$ 。根据饱和度的定义: $S_r = V_w / V_v$, 可以得到如下的增量关系:

$$\Delta S_r = \frac{\Delta V_w \cdot V_v - V_w \cdot \Delta V_v}{V_v^2} = \frac{\Delta V_w}{V_v} - S_r \frac{\Delta V_v}{V_v} \quad (1)$$

根据孔隙比的定义 $e = V_v / V_s$, 可得 $\Delta e = \Delta V_v / V_s$, 并将其和 $\Delta V_v = u \cdot \Delta V_w$ 代入式 (1) 中得

$$\Delta S_r = \frac{1 - S_r}{e} \cdot \Delta e \quad (2)$$

对于式 (2) 的约束条件是 $u \neq 0$ 。

根据重力含水率的定义: $w = M_w / M_s = \rho_w \cdot V_w / M_s$ (其中 M_w 是土中水的质量, M_s 是土颗粒的质量, ρ_w 是水的密度), 可以得到如下的增量关系:

$$\Delta w = \frac{\rho_w \Delta V_w}{M_s} \quad (3)$$

若将 $\Delta V_v = u \cdot \Delta V_w$ 和 $\Delta e = \Delta V_v / V_s$ 代入式 (3) 中可得

$$u = \frac{\Delta e}{\Delta w \cdot G_s} = \frac{\Delta e}{\Delta \varphi} \quad (4)$$

由式 (4) 可知, u 实际上是 SSCC (φ - e 曲线) 的斜率, 也称之为收缩率。因此本文假设的参数 u 具有明确的物理意思。

由上节可知, SSCC 在整个阶段中, $\Delta V_v \leq \Delta V_w$, 因此收缩率 u 的范围在 $0 \sim 1$ 之间。当 $u=1$ 时, SSCC 对应的是正常收缩阶段, 试样处于饱和状态, 此时空气并没有进入试样中, 因此 $\Delta V_a = 0$; 当 $0 < u < 1$ 时, SSCC 对应的是残余收缩阶段, 试样处于非饱和状态, 此时试样中孔隙的体积逐渐被空气占据, V_a 逐渐增大; 当 $u=0$ 时, SSCC 对应的是零收缩阶段, 此时试样不会因继续排水而发生明显的体变, 排出水的孔隙几乎全部为孔隙气所占据。当试样完全干燥时, 孔隙气体积增加到最大值。对于这类土, 其收缩率的范围应为: $0 \leq u \leq 1$ 。值得注意的是, 对于某些阳离子水合作用较强的土样, 如膨胀性黏土, 在零收缩阶段收缩率 u 并不等于 0, 因此其收缩率的范围应为 $0 < u \leq 1$ 。

如上节所述, SSCC 可以用三直线的分段模型来

描述, 那么在每一个分段区间上, 收缩率 u 均为常数, 分别记为 u_1 , u_2 和 u_3 。相应地, 式 (2) 可以使用分离变量法进行求解可得

$$u = \frac{e}{k + \varphi} \quad (5)$$

式中, k 为任意常数。在正常收缩阶段, $e_v \leq e \leq e_0$, $\varphi = e$ 。若将 $e = e_0$ 和 $\varphi = e$ 代入式 (5) 中可得 $k = (1/u_1 - 1) \cdot e_0$, 再将 k 代入式 (5) 中得

$$u_1 = \frac{e_0 - e}{e_0 - \varphi} = 1 \quad (6)$$

在残余收缩阶段, 即 $e_s < e < e_v$, $\varphi_s < \varphi < \varphi_v$ 。同理可得

$$u_2 = \frac{e_v - e}{e_v - \varphi} \quad (7)$$

在收缩率不为 0 的零收缩阶段, $e_{\min} \leq e \leq e_s$, $0 \leq \varphi \leq \varphi_s$ 且 $0 < u_3 < u_2 < u_1 = 1$ 。同理可得

$$u_3 = \frac{e_s - e}{e_s - \varphi} \quad (8)$$

在收缩率为 0 的零收缩阶段, 即 $e = e_s$, 此时 $u = 0$ 。将式 (4)、(6) ~ (8) 合并可得

$$\frac{\Delta e}{\Delta \varphi} = \frac{e^* - e}{e^* - \varphi} \quad (9)$$

式中, e^* 为特征孔隙比, 代表 SSCC 的 3 个特征孔隙比, 分别为 e_s , e_v 和 e_0 (见图 2)。式 (9) 可以改写为

$$\int_{\varphi_{\text{ref}}}^{\varphi} \frac{d\varphi}{e^* - \varphi} = \int_{e_{\text{ref}}}^e \frac{de}{e^* - e} \quad (10)$$

式中, e_{ref} , φ_{ref} 分别是参照孔隙比和参照含水比, 且 $e_{\min} \leq e_{\text{ref}} \leq e_0$, $0 \leq \varphi_{\text{ref}} \leq \varphi_{\text{sat}}$ 。由式 (10) 可得

$$e = \frac{e^* (\varphi_{\text{ref}} - e_{\text{ref}}) + \varphi (e_{\text{ref}} - e^*)}{\varphi_{\text{ref}} - e^*} \quad (11)$$

由于 e^* 是 SSCC 曲线上的特征点, 式 (11) 理论上还是 e - φ 曲线的分段函数。如果将含水比 φ 看作仅是基质吸力 s 的函数, 即 $\varphi = f(s)$, 则可得到整个含水率范围 (从饱和到完全脱水) 的 e - s 曲线。令 $e^* = e_0$, $e_{\text{ref}} = e_{\min}$ ($\varphi_{\text{ref}} = 0$), 则式 (11) 可以写为

$$e = e_{\min} + (e_0 - e_{\min}) \frac{f(s)}{e_0} \quad (12)$$

式 (12) 就是本文所推导出的反映孔隙比和基质吸力之间关系的通用模型。

在岩土工程中, SWCC 最常用的数学表达式有 VG 和 F-X 模型, 它们的方程分别如式 (13) ~ (15)。

$$w = w_r + (w_{\text{sat}} - w_r) \left(1 + \left(\frac{s}{\alpha} \right)^n \right)^{-m} \quad (13)$$

式中 w_r 为残余含水率, 为了简化起见, 常设 w_r 为 0;

w_{sat} 为饱和含水率; α 约等于进气值 (kPa); n 为与孔隙大小分布有关的参数; m 为与 SWCC 整体几何形状有关的参数, 且一般可认为 $m=1-1/n$ 。

$$w = C(s) \frac{w_{\text{sat}}}{\left\{ \ln \left[2.718 + (s/a)^b \right] \right\}^c}, \quad (14)$$

$$C(s) = 1 - \frac{\ln(1 + s/s_r)}{\ln(1 + 10^6/s_r)}, \quad (15)$$

式中, s_r 为残余基质吸力 (kPa); w_{sat} 为饱和含水率; a 为与进气值有关的参数 (kPa); b 和 c 为参数。

将式 (13) ~ (15) 分别代入式 (12) 中可得

$$e = e_{\min} + (e_0 - e_{\min}) \left[1 + \left(\frac{s}{\alpha} \right)^n \right]^m, \quad (16)$$

$$e = e_{\min} + C(s) \frac{(e_0 - e_{\min})}{\left\{ \ln \left[2.718 + (s/a)^b \right] \right\}^c}. \quad (17)$$

若零收缩阶段的收缩率为 0, 即 $e_{\min} = e_s$, 式 (16) 即转化为 Baumgartl 等^[20]所提出的模型。Stange 等^[21]利用大量的试验数据证实了该模型能够很好地描述孔隙比随基质吸力的变化关系。

Salager 等^[22-23]基于 F-X 模型和试验数据提出了孔隙比与基质吸力的关系为

$$e = \chi e_0 + C(s) \frac{(1 - \chi)e_0}{\left\{ \ln \left[2.718 + (s/a)^b \right] \right\}^c}. \quad (18)$$

式中, χ 是参数, 其余同上。若令 $\chi e_0 = e_{\min}$, 则式 (16)、(17) 是等价的。对于不同的饱和初始孔隙比 e_0 , 脱湿条件下的孔隙比 e_{\min} 也是不同的; 随着 e_0 的增大, 土样的总收缩体变是增大的^[21]。因此 χ 实际上并不是常数, 针对文献中给出的 5 组 (e_0, e_{\min}) 值, 通过反算发现文献[22, 23]中给出的 $\chi=0.79$, 实际是 5 组 χ 的平均值。

3 模型假设的验证

为了使本文所推导出的孔隙比与基质吸力关系的通用模型更具有可靠性, 还需要进一步验证模型推导所依据的假设的合理性。为此, 利用 GDS 非饱和土三轴仪, 并基于差压传感器的原理连续测量试样在每级基质吸力作用下的体积变化量及排水量, 获得吸力平衡时试样的孔隙比及饱和度; 通过式 (6) ~ (8) 计算 u 的值, 再根据测得的排水量反算吸力平衡试验的体变和进气量, 并与实测值进行比较。

3.1 试样制备

土样取自江西省南昌市瑶湖区某新建道路的路基。该土样为红褐色, 有少量的黄色网纹状夹层, 其基本物理性质指标如下: 土粒相对密度为 2.75; 液限为 32.1%, 塑限为 19.5%; 最优含水率为 15.4%, 最大

干密度为 1.88 g/cm³; <0.074 mm 的颗粒含量为 3.75%; 0.5~0.074 mm 的颗粒含量为 46.29%; 1~0.5 mm 的颗粒含量为 23.50%; 2~1 mm 的颗粒含量为 26.46%; 不均匀系数为 7.2。土样经过碾碎、风干并过 2 mm 筛, 根据最优含水率配制湿土样, 然后倒入塑料袋中密封并静置 48 h, 使土样中的水均匀分布。按照公路路基要求的最低压实度为 0.9, 本文设定的干密度为 1.78 g/cm³。将配置好的湿土, 分 5 层击实, 每层之间进行拉毛处理, 试样制备完成后的直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm。最后将试样进行抽气饱和。

3.2 试验方案

设计 3 组不同围压 (100, 200, 300 kPa) 下的 SWCC 试验, 每组试验施加的基质吸力分别为 20, 50, 80 kPa, 共计 9 个试样。每个试样在某个基质吸力和净围压作用下只做一次吸力平衡试验, 即从试样饱和状态到吸力平衡状态。试验所采用的吸力平衡标准为: 试样在 24 h 内的排水量小于试样体积的 0.05%^[24]。需要特别注意的是, 尽管本文不考虑外力的影响, 但所用的试样全部为饱和样, 施加净围压并不会引起试样饱和度的变化, 还能使试样加速排水, 缩短吸力平衡的时间。

3.3 试验结果和讨论

为了计算饱和试样在吸力平衡下的重量含水率, 通常有两种方法: ①在试验前称量饱和试样的重量, 利用达到吸力平衡时获取的排水量计算试样在设定基质吸力和净围压下的重量含水率; ②试样达到吸力平衡后, 取出试样并立即称重, 从而获取试样在设定基质吸力和净围压下的重量含水率。本文选择第二种方法。

由于人工制样的差异、试样在饱和过程中吸水产生的膨胀变形以及从击实器推出时对饱和试样产生的扰动等, 都将会引起试样的实际尺寸与标准尺寸 (直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm) 之间存在偏差。饱和试样尺寸的偏差会导致试样初始干密度与设定的初始值产生偏差, 也会影响试样达到吸力平衡时所计算的孔隙比值。因此, 本文采用反算法计算饱和试样的实际尺寸和吸力平衡下的孔隙比。

具体计算步骤如下: ①利用饱和试样达到吸力平衡时获取的排水量及吸力平衡下的重量含水率反算试样的初始含水率; ②假定试样经过抽气饱和后的饱和度为 1, 利用反算的初始含水率计算初始孔隙比和初始干密度; ③通过烘干法测量试样的干土重量, 并利用初始干密度计算饱和试样的体积。通过 GDS 三轴仪测量的饱和试样初始面积, 还可以反算饱和试样的实际高度; ④利用吸力平衡时获取的总体变, 并结合饱和试样的体积, 计算该吸力平衡下试样的孔隙比。

表 1 不同净围压下试样脱湿测量数据与反算数据

Table 1 Measured and back-calculated data of samples during drying under different net confining pressures

试样 编号	σ'_3 /kPa	s /kPa	A_0 /mm ²	w_i /%	反算				
					w_{sat} /%	e_0	V_0 /cm ³	e_i	h_0 /mm
S1-1		20	1200.724	18.87	23.62	0.6496	97.2940	0.5843	81.03
S1-2	100	50	1200.724	17.41	23.01	0.6328	96.3048	0.5671	80.21
S1-3		80	1200.724	16.90	23.05	0.6339	96.3676	0.5596	80.26
S2-1		20	1200.724	17.84	23.49	0.6460	97.0843	0.5499	80.85
S2-2	200	50	1200.871	17.05	23.27	0.6400	96.7319	0.5484	80.55
S2-3		80	1200.724	16.31	23.34	0.6419	96.8446	0.5677	80.66
S3-1		20	1200.724	17.50	22.22	0.6110	95.0208	0.4926	79.14
S3-2	300	50	1200.724	16.57	22.61	0.6219	95.6614	0.5058	79.67
S3-3		80	1200.724	16.11	22.37	0.6153	95.2722	0.4850	79.35

表 2 收缩系数 u 及相关参数的预测值和实测值

Table 2 Shrinkage coefficients and predicted and measured values of relevant parameters

试样 编号	实测参数值				u	预测参数值		
	ΔV_w /mm ³	ΔV /mm ³	ΔV_a /mm ³	ε_v /%		$\Delta V'$ /mm ³	$\Delta V'_a$ /mm ³	ε'_v /%
S1-1	-7705	-3850	3855	-4.008	0.500	-3852.50	3852.50	-3.960
S1-2	-9084	-3877	5207	-4.036	0.427	-3878.87	5205.13	-4.028
S1-3	-9974	-4379	5595	-4.559	0.439	-4378.59	5595.41	-4.544
S2-1	-9166	-5670	3496	-5.903	0.619	-5673.75	3492.25	-5.844
S2-2	-10095	-5403	4692	-5.624	0.535	-5400.83	4694.18	-5.583
S2-3	-11408	-4379	7029	-4.559	0.384	-4380.67	7027.33	-4.523
S3-1	-7654	-6897	757	-7.274	0.913	-6988.10	665.898	-7.354
S3-2	-9803	-6846	2957	-7.127	0.698	-6842.49	2960.51	-7.153
S3-3	-10160	-7687	2473	-8.002	0.757	-7691.12	2468.88	-8.073

不同净围压下试样脱湿的测量及反算数据如表 1 所示。其中, σ'_3 表示净围压; A_0 表示饱和试样两端的初始面积, 由 GDS 三轴仪根据差压传感器获得; w_i 表示试样在某级吸力平衡下的含水率; e_i 表示试样在某级吸力平衡下的孔隙比; V_0 表示饱和试样的实际体积; h_0 表示饱和试样的实际高度; 其余变量同上。

由于试样均为饱和样, 因此在计算收缩率 u 的时候选择式 (5)。尽管试样从饱和状态开始脱湿, 但 u 并不等于 1。这是因为试验测量的试样排水量和体变是净围压和基质吸力共同作用的结果。将式 (5) 进行变形可得

$$u_i = \frac{e_0 - e_i}{e_0 - G_s w_i} \quad (19)$$

表 2 中列出了收缩系数 u 及相关参数的预测值和实测值。其中, $\Delta V_w < 0$ 表示实测的试样排水量; $\Delta V < 0$ 表示实测的试样体缩量, $\Delta V_a > 0$ 表示实测的试样进气量; 且 $\Delta V_a = \Delta V_w - \Delta V$; ε_v 表示实测的试样体变; $\Delta V'$, $\Delta V'_a$, ε'_v 分别表示利用吸力平衡时的排水量所预测的试样体积变化量、进气量和总体变。其中, 总体变是指试样的体积变化量与试样初始体积的比值。

由表 2 可知, 在基质吸力和净围压的共同作用下, $0 < u < 1$, 符合试验预期, 因此试样均处在残余收缩阶段。在相同的净围压下, 随着基质吸力的增大, 收缩率 u 有减小的趋势, 这与 SSCC 是一致的; 在相同的

基质吸力下, 随着净围压的增大, 收缩率 u 有增大的趋势。换句话说, 随着净围压的增大, 试样的体缩量可能会增加, 符合常理。另外, 饱和试样在吸力平衡时的排水量、体积收缩量、进气量和总体变均随着基质吸力与净围压的增加而有增大的趋势。

将表 2 中的收缩率 u 和试样排水量按照假设可得到预测的体积收缩量、进气量与总体变, 并将其与 GDS 三轴仪得到的实测值共同绘制在 1:1 图中 (见图 3, 4 所示, 其中体积收缩量用绝对值表示)。由图 3, 4 可知, 预测的试样体积收缩量、进气量与总体变与实测值具有很好的一致性, 从而证实了本文所提出的假设是合理的。因此, 通过该假设并结合 SSCC 所提出的本文模型是可靠的。

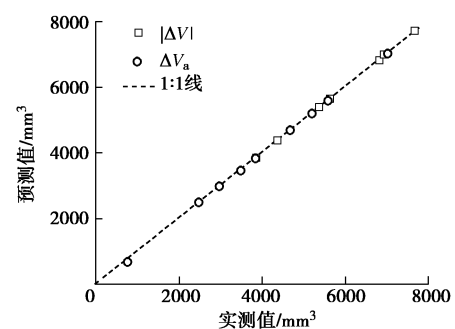


图 3 体积收缩量和进气量的实测值与预测的比较

Fig. 3 Comparison between measured values versus predicted values of volume shrinkage and inflow

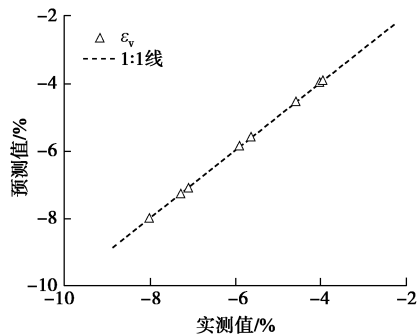


图4 总体变的实测值与预测的比较

Fig. 4 Comparison between measured and predicted values of total strain

4 结 论

(1) 本文基于典型的土水特征曲线 (SWCC) 和收缩特征曲线 (SSCC) 的特点及二者之间的联系, 利用理论公式推导出了孔隙比与基质吸力的通用模型。尽管该通用模型与 SWCC 的本构模型紧密相关, 即选择不同的 SWCC 模型, 所提模型的方程在形式上也是不同的, 但这些反映孔隙比与基质吸力关系的模型方程在现有的文献中已得到了充分的证实。

(2) 为了进一步证实本文所提出模型的合理性和可靠性, 采用了 GDS 三轴仪对所提出模型的理论假设进行了验证。模型假设的系数 u 具有明确的物理意义, 即为收缩率。

(3) 模型假设的成立具有重要的意义: 通过收缩率及吸力平衡下的试样排水量, 可以预测饱和试样在某一基质吸力和净围压共同作用下的体积变化量、进气量 (土中气体的变化量不仅会影响非饱和土中的渗流, 还会影响农植物的生长) 和总体变。

参考文献:

[1] 孙德安. 非饱和土的水力和力学特性及其弹塑性描述[J]. 岩土力学, 2009, **30**(11): 3217 - 3231. (SUN De-an. Hydro-mechanical behaviours of unsaturated soils and their elastoplastic modelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3217 - 3231. (in Chinese))

[2] 刘艳, 韦昌富, 房倩, 等. 非饱和土水-力本构模型及其隐式积分算法[J]. 岩土力学, 2014, **35**(2): 365 - 370. (LIU Yan, WEI Chang-fu, FANG Qian, et al. Implicit integration algorithm of a hydro-mechanical coupling constitutive model for unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(2): 365 - 370. (in Chinese))

[3] 周葆春, 孔令伟, 梁维云, 等. 压缩过程中非饱和膨胀土体变特征与持水特性的水力耦合效应[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(4): 629 - 640. (ZHOU Bao-chun, KONG Ling-wei,

LIANG Wei-yun, et al. Hydro-mechanical coupling effects on volume change and water retention behaviour of unsaturated expansive soils during compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(4): 629 - 640. (in Chinese))

[4] 陈正汉, 秦冰. 非饱和土的应力状态变量研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(1): 1 - 11. (CHEN Zheng-han, QIN Bing. On stress state variables of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 1 - 11. (in Chinese))

[5] 盛岱超, 杨超. 关于非饱和土本构研究的几个基本规律的探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 438 - 456. (SHENG Dai-chao, YANG Chao. Discussion of fundamental principles in unsaturated soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 438 - 456. (in Chinese))

[6] 徐筱, 赵成刚, 蔡国庆. 区分毛细和吸附作用的非饱和土抗剪强度模型[J]. 岩土力学, 2018, **39**(6): 1001 - 1007. (XU Xiao, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing. Shear strength with capillary and adsorptive mechanisms for unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(6): 1001 - 1007. (in Chinese))

[7] WHEELER S J, SHARMA R S, BUISSON MS R. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 41 - 54.

[8] 叶为民, 钱丽鑫, 白云, 等. 由土-水特征曲线预测上海非饱和软土渗透系数[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(11): 1262 - 1265. (YE Wei-min, QIAN Li-xin, BAI Yun, et al. Predicting coefficient of permeability from soil-water characteristic curve for Shanghai soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(11): 1262 - 1265. (in Chinese))

[9] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 - 532.

[10] 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**(44): 892 - 898.

[11] BROOKS R H, COREY AT. Hydraulic properties of porous media[R]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.

[12] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Géotechnique, 1990, **40**(3): 405 - 430.

- [13] SUN D A, SHENG D C, CUI H B, et al. A density-dependent elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated compacted soils[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, **31**(11): 1257 - 1279.
- [14] GALLIPOLI D, WHEELER, S J, KARSTUNEN M. Modelling of variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(1): 105 - 112.
- [15] 邹维列, 张俊峰, 王协群. 脱湿路径下重塑膨胀土的体变修正与土水特征[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(12): 2213 - 2219. (ZOU Wei-lie, ZHANG Jun-feng, WANG Xie-qun. Volume change correction and soil-water characteristics of remodeling expansive soil under dehydration path[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(12): 2213 - 2219. (in Chinese))
- [16] VANAPALLI S K, PUFAHL D E, FREDLUND D G. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till[J]. *Géotechnique*, 1999, **49**(2): 143 - 159.
- [17] LU N, DONG Y. Correlation between soil-shrinkage curve and water-retention characteristics[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, **143**(9): 04017054.
- [18] MCGARRY D, MALAFANT K W J. The analysis of volume change in unconfined units of soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, **51**(51): 290 - 297.
- [19] CORNELIS W M, CORLUIY J, MEDINA H, et al. Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve[J]. *Geoderma*, 2006, **137**(1/2): 179 - 191.
- [20] BAUMGARTL T, KÖCK B. Modelling volume change and mechanical properties with hydraulic models[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**(68): 57 - 65.
- [21] STANGE C F, HORN R. Modeling the soil water retention curve for conditions of variable porosity[J]. *Vadose Zone Journal*, 2005, **4**(3): 602 - 613.
- [22] SALAGER S, EI YOUSOUFI M S, SAIX C. Experimental study of the water retention curve as a function of void ratio[C]// *Proceedings of the International Conference Geo-Denver*. Denver, 2007.
- [23] SALAGER S, EI YOUSOUFI M S, SAIX C. Definition and experimental determination of a soil-water retention surface[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, **47**(6): 609 - 622.
- [24] ZHAN L T. Field and laboratory study of an unsaturated expansive soil associated with rain-induced slope instability[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2003.