

# 脱湿路径下重塑膨胀土的体变修正与土水特征

邹维列<sup>1</sup>, 张俊峰<sup>1\*</sup>, 王协群<sup>2</sup>

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 采用南水北调中线工程河南南阳试验段重塑中膨胀土为试验土样, 完成了 5 种不同初始干密度试样的脱湿试验和平行收缩试验, 推导给出了更为合理的体积修正公式。试验结果表明, 膨胀土脱湿路径下的体积收缩对其土水特征曲线 (SWCC) 影响较大, 同一基质吸力状态下, 体积修正后的试样饱和度/体积含水率明显高于修正前的饱和度/体积含水率, 在吸力越高的区域, 差别越明显。以 Fredlund-Xing 模型和试验结果为基础, 建立了能考虑膨胀土体积变化的 SWCC 模型, 并结合前人的试验成果深入分析了初始孔隙比对模型参数的影响规律。最后探讨了反映含水率-吸力-孔隙比关系的土水特征曲面的特性, 考虑膨胀土试样体变修正时, 孔隙比与含水率之间的函数关系为一个三次多项式, 而不是线性关系。

**关键词:** 膨胀土; 土水特征曲线; 体变; 初始干密度; 吸力; 土水特征曲面

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)12-2213-07

**作者简介:** 邹维列(1969-), 男, 重庆丰都人, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土特性、土工合成材料应用、道路中的岩土工程问题等方面的教学和科研工作。E-mail: zhangjf@whu.edu.cn。

## Volume change correction and soil-water characteristics of remodeling expansive soil under dehydration path

ZOU Wei-lie<sup>1</sup>, ZHANG Jun-feng<sup>1</sup>, WANG Xie-qun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** A set of dehydration tests and shrinkage tests of the specimens with five different initial dry densities are conducted to investigate the effects of volume change on soil-water characteristics of remodeling expansive soil from the field test section in Nanyang, where the Middle Route of the South-to-North Water Diversion project of China passes. A more reasonable formula for volume change correction is derived. The test results indicate that the volume change of expansive soil specimens has significant influence on the soil-water characteristic curve (SWCC) under dehydration path. For the same matric suction, the saturation degree/volumetric water content of the specimens after volume change correction is greater than that before volume change correction, while the difference between them is more distinct in the high suction section. Based on the Fredlund-Xing model and the test results, a SWCC model, which can take the volume change of specimens during dehydration process into account, is developed, and the effect laws of the initial void ratio of the specimens on the parameters of the SWCC model are discussed. Moreover, the behavior of spatial curved surface showing the relationship among water content, suction and void ratio is investigated. Considering the volume change of the specimens during dehydration process, the functional relationship between the void ratio and the water content is a cubic polynomial, not linear relation.

**Key words:** expansive soil; soil-water characteristic curve; volume change; initial dry density; suction; soil-water characteristic curved surface

## 0 引言

土水特征曲线 (SWCC) 是表示非饱和土吸力与水分 (重力含水率、体积含水率或饱和度) 之间关系的曲线, 反映了土中水相的能量与其质量或体积之间的关系<sup>[1]</sup>, 能够影响非饱和土的渗透、变形、强度等特性, 是描述非饱和土性状的重要工具。对于膨胀土

而言, 失水收缩干裂、吸水膨胀软化, 其土水特征与

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50979080, 51109171); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2012210020208); 武汉理工大学自主创新研究基金项目 (2011-IV-060)

**收稿日期:** 2012-02-20

\*通讯作者

体积变化之间存在着强烈的相互作用,吸力变化会导致持水状态与体积变化,而体积变化也会导致持水状态的变化<sup>[2]</sup>,吸力与含水率和孔隙比之间存在着复杂的水力耦合作用<sup>[3]</sup>。

针对膨胀土的土水特征问题,刘艳华等<sup>[4]</sup>、孙德安等<sup>[5]</sup>、张雪东等<sup>[6]</sup>、Miao Lin-chang 等<sup>[7]</sup>以及孔令伟等<sup>[8]</sup>从不同的角度研究了膨胀土的土水特征,但较少关注土样在脱湿过程中的体积变化及其对非饱和膨胀土 SWCC 的影响。周葆春等<sup>[2]</sup>基于浸水后自由膨胀的荆门膨胀土开展土水特征试验,并通过平行收缩试验对土样体积进行了修正,建立了吸力作用下的体变方程。但文中直接采用线缩率代替体缩率所建立的体变模型尚嫌粗略,而且其试验中所使用的试样为经浸水自由膨胀而得,与实际工程中的土体应力状态有较大区别;Salager 等<sup>[3]</sup>基于 Fredlund-Xing 模型, Mbonimpa 等<sup>[9]</sup>基于 MK 模型以及 Péron 等<sup>[10]</sup>提出了考虑体积变化的 SWCC 模型,但大多是基于非膨胀土的试验结果,对膨胀土的适用性尚待探讨<sup>[2]</sup>。

本文以取自南水北调中线工程河南南阳试验段的重塑中膨胀土为试验土样,进行 5 种初始干密度试样在脱湿路径下的 SWCC 试验和收缩试验,分析膨胀土试样脱湿过程中不可忽略的体积变化(收缩)对 SWCC 的影响;推导给出更为合理的体变修正公式,并以 Fredlund-Xing 模型和试验结果为基础,建立能考虑体积变化的、用饱和度表征的 SWCC 模型,最后探讨反映含水率-吸力-孔隙比三者关系的土水特征空间曲面特性。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

南阳中膨胀土样呈褐黄色,因已经过较长时间的存放而失水集结成大的团状块体。在利用塑料锤对土样进行碾磨过程中,有白色颗粒被碾碎成为纯白色粉末。土样过筛(2 mm)后,所得到的膨胀土即为试验用土,其物理性质指标如下:液限为 66.38%;塑限为 23.15%;塑性指数为 43.23;自由膨胀率为 70%;最大干密度为 1.82 kg/cm<sup>3</sup>;最优含水率为 16.70%;比重为 2.71。粒径分布曲线如图 1 所示。

### 1.2 脱湿路径下的 SWCC 试验

SWCC 试验采用压力板仪完成。其中有 3 块进气值为 15 bar (即 1500 kPa) 的陶土板,能够同时放入 24~27 个试样。

采用直径为 61.8 mm、高度为 20 mm 的环刀试样。为探讨不同初始孔隙比条件下膨胀土的土水特征,控制干密度共 5 种,分别为 1.40, 1.45, 1.50, 1.55, 1.60 g/cm<sup>3</sup>。每种干密度制作 3 个平行试样同时放入压力板

仪内进行试验。

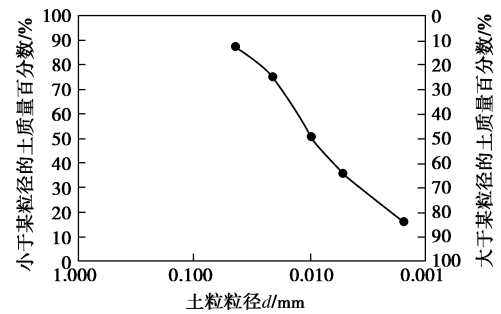


图 1 膨胀土样颗粒分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of expansive soil testing

试样的制备过程为:①土样风干、击碎、碾磨,过 2 mm 筛后密封,静置 24 h;②测定其风干含水率,根据控制含水率(20%)计算加水量;③将土样平铺在托盘内,用喷雾器均匀喷洒预计的加水量。拌合均匀后,装入塑料袋密封,静置 24 h 以上,使土样含水率均匀;④测定③中得到的土样含水率,根据控制干密度计算装入环刀击样器中的土样质量,按照《土工试验规程》(SL 237—1999)<sup>[11]</sup>中的“击样法”制作试样;⑤将环刀试样装入饱和器,置于真空缸内进行抽气饱和后备用。

对应于干密度分别为 1.40, 1.45, 1.50, 1.55, 1.60 g/cm<sup>3</sup> 的试样,抽气饱和后的含水率分别为 34.54%, 32.30%, 30.22%, 27.48% 和 25.81%,饱和度分别为 100.17%, 100.45%, 100.10%, 100.21% 和 100.66% (由于在试样制作时击样造成了土样质量误差,因此最终根据称量质量所计算的饱和度并不严格等于 100%)。但在整理试验数据时,将试样抽气饱和后的饱和度都修正为 100%,据此反算试样的实际干密度,利用该实际干密度计算后续气压状态下的含水率以及饱和度。

试样放入压力板仪之前,首先对其中的陶土板参照孙树国等<sup>[12]</sup>建议的方法进行抽气饱和。

将饱和后的试样置于陶土板表面,施加气压等级设定为 50→100→200→400→700→1000→1300 kPa。由于气压使用高压氮气瓶施加,且每一级压力下达到试样排水稳定所需要的时间较长,过程中压力会有所下降,实际排水稳定时的各级压力分别为 50→100→200→390→678→980→1280 kPa。

以排水量连续 3 d 小于 0.01 g 作为各级气压下排水稳定标准。稳定后称取各试样的质量。

### 1.3 收缩试验

采用与 SWCC 试验相同的制样条件,制作完全饱和的膨胀土试样进行平行收缩试验,获得试样体积随含水率的变化曲线,用以修正以体积含水率和饱和度表征的 SWCC。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 未加体变修正的 SWCC

在脱湿路径下的 SWCC 试验中, 随着施加吸力的增加, 膨胀土试样含水率不断降低, 同时试样体积不断缩小, 并与试样环刀脱开, 但并未开裂 (见图 2)。

整理试验数据, 得到用重力含水率表征的 SWCC 如图 3 所示。

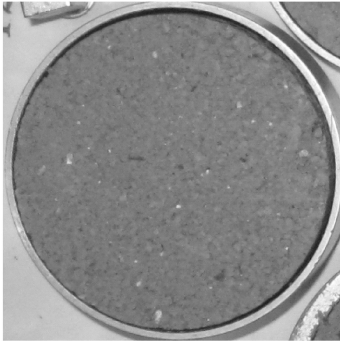


图 2 试验后的试样

Fig. 2 Specimen after tests

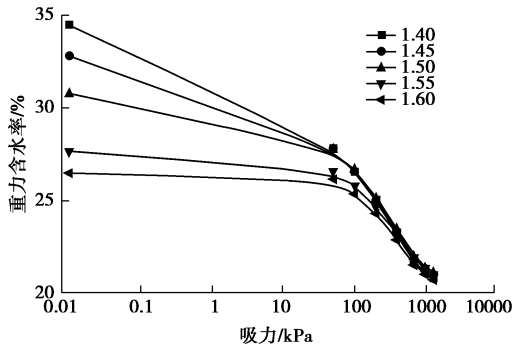


图 3 重力含水率 - 吸力曲线

Fig. 3 Gravimetric water content-suction curves

从图 3 可以看出, 随着吸力的增大, 不同初始干密度试样的 SWCC 之间并无交叉, 但在高吸力区逐渐聚拢; 初始干密度越小的试样, 重力含水率的变幅越大, 表明其持水能力更低、进气值更小; 达到本次试验的最大吸力 (1280 kPa) 时, 重力含水率都趋于同一数值 21% (变化不超过 0.5%)。因此可以推测, 对于不同初始干密度的膨胀土样, 其残余含水率差别将会更小 (受压力板仪陶土板进气值的限制, 本试验中膨胀土样未能到达其残余含水率)。对于这一现象, 刘艳华等<sup>[4]</sup>、张雪东等<sup>[6]</sup>以及 Salager 等<sup>[3]</sup>均认为, 对于体积易随基质吸力 (含水率) 发生变化的土, 其 SWCC 上存在着一个基质吸力的阈值  $\Psi_{cr}$ , 初始孔隙比 (干密度) 的差异只有在基质吸力小于  $\Psi_{cr}$  的范围内才会影响 SWCC, 一旦基质吸力值超过  $\Psi_{cr}$ , 初始孔隙比的差异将不再影响 SWCC 的位置和形状, 即此时具有不同初始孔隙比的 SWCC 将趋于重合。

### 2.2 收缩系数

在本次所有膨胀土试样 SWCC 试验结束时, 试样

含水率 20%, 即在 SWCC 试验过程中, 试样均处于收缩曲线 (见图 4) 的第一阶段 (直线段)。

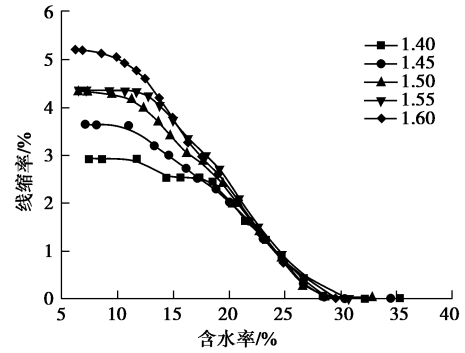


图 4 收缩曲线

Fig. 4 Shrinkage curves

基于此, 可以假设对本次试样, 线缩率随含水率呈线性变化, 表示为

$$\delta = \frac{\Delta z}{z_0} = K_V (w_0 - w) \quad (1)$$

式中  $\delta$  为线缩率 (%);  $\Delta z$  为某一时刻试样由于失水所减小的高度 (cm);  $z$  为试样的初始高度 (cm);  $w$  为收缩试验第一阶段中某一时刻的含水率 (%);  $w_0$  为试样初始 (饱和) 含水率 (%);  $K_V$  为收缩系数。

通过对收缩曲线第一阶段即直线段的拟合, 可以得到不同初始干密度试样的收缩系数, 如表 1 所示。

表 1 不同初始干密度膨胀土试样的收缩系数

Table 1 Contraction coefficient of expansive soil specimens with different initial dry densities

初始干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60
$K_V$	0.2395	0.2435	0.2540	0.2842	0.3055

从表 1 可以看出, 随着试样初始干密度的增大, 收缩系数也增大。这一结果与周葆春等<sup>[2]</sup>所得到的膨胀土收缩曲线的初始直线段倾斜程度随初始孔隙比  $e_0$  的增大而降低的结论是相吻合的。

### 2.3 体积收缩理论及其修正

一般通过收缩试验仅可得到试样的线缩率与含水率之间的变化关系。对于线缩率与体应变之间的关系, 不同学者采取了不同的计算方法, 如周葆春等<sup>[2]</sup>采用线缩率代替体应变; 张华等<sup>[13]</sup>根据 3 个方向的线缩率, 采用下式来考虑膨胀土的体应变:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = (K_V + 2K_H)(w_0 - w) \quad (2)$$

式中  $\Delta V$  为试样的体变 (cm<sup>3</sup>);  $V_0$  为试样初始体积, (cm<sup>3</sup>);  $K_V$  为竖向收缩系数;  $K_H$  为横向收缩系数; 其余符号意义同前。

该方法将试样在空间 3 个方向上的线缩率进行叠加, 这仅在试样体变为小变形的假定下是合理的。

Bronswijk<sup>[14]</sup>采用式 (3) 进行线缩率和体应变之

间的换算:

$$1 - \frac{\Delta V}{V_0} = \left(1 - \frac{\Delta z}{z_0}\right)^{r_s} \quad (3)$$

式中  $\Delta z$  为试样的竖向变形 (cm);  $z_0$  为试样的初始高度 (cm);  $r_s$  为几何系数, 与试样的几何形状、是否开裂等因素有关。对于立方体试样, 在没有开裂的情况下,  $r_s=3$ 。

下面将在此基础上, 针对本次试验所采用的环刀试样, 提出膨胀土试样的体积修正公式。

设环刀直径为  $r_0$ , 高度为  $z_0$ , 在试样失水收缩过程中的某一个含水率状态下, 试样半径变化为  $\Delta r$ , 高度变化为  $\Delta z$ 。则试样变形前、后的体积分别为

$$V_0 = \pi r_0^2 z_0 \quad (4)$$

$$V_0 - \Delta V = \pi (r_0 - \Delta r)^2 (z_0 - \Delta z) \quad (5)$$

由于试样尺寸较小, 根据张华等<sup>[13]</sup>通过膨胀土三向收缩试验得到的水平和竖直方向收缩系数近似相等的结论, 可以假设试样在任意时刻的竖向线缩率与横向线缩率都相等, 且试样含水率均匀。则有

$$\frac{\Delta z}{z_0} = \frac{\Delta r}{r_0} \quad (6)$$

将式 (5) 和式 (4) 相除并展开, 结合式 (6), 可以得到与式 (3) 类似的关系。将试样的体积变化  $\Delta V$  表示成竖向变形  $\Delta z$  的函数, 有

$$\left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right) = \frac{\left(1 - \frac{\Delta z}{z_0}\right)^2 (z_0 - \Delta z)}{z_0} = \left(1 - \frac{\Delta z}{z_0}\right)^3 \quad (7)$$

若假设试样为小变形, 可略去式 (7) 中的高阶小项, 即可得到

$$\left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right) = \frac{r_0^2 z_0 - 3r_0^2 \Delta z}{r_0^2 z_0} = \left(1 - \frac{3\Delta z}{z_0}\right) \quad (8)$$

因此, 假设式 (2) 中的竖向和横向收缩系数相等时, 式 (8) 和式 (2) 是等价的。

当试样胀缩性不明显时, 式 (7)、(8) 的结果差别不大; 但是当试样随含水率的体积变化比较明显时, 使用式 (8) 就会产生较大的误差。所以本文中采用式

(7), 根据线缩率计算试样的体积变化, 得到膨胀土体积随含水率变化的公式, 即体应变:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 1 - \left(1 - \frac{\Delta z}{z_0}\right)^3 = 1 - [1 - K_v (w_0 - w)]^3 \quad (9)$$

利用式 (9) 和式 (10)

$$e = e_0 - \Delta V (1 + e_0) / V_0 \quad (10)$$

可以得到试样收缩过程中, 不同含水率下状态下的孔隙比  $e$ , 式 (10) 中  $e_0$  为试样的初始孔隙比。

根据土的基本体积 - 质量关系:

$$S_r = G_s w / e \quad (11)$$

式中,  $G_s$ ,  $S_r$  分别为试样比重、饱和度。因此可得到饱和度与吸力之间的关系, 可称之为修正后 SWCC。如果将式 (11) 中的孔隙比  $e$  使用初始孔隙比  $e_0$  代替, 则所得到的饱和度与吸力之间的关系可称为修正前 SWCC。

## 2.4 体变修正前后土水特征的比较

将体变修正前后分别用饱和度和体积含水率表征的 SWCCs 绘制在半对数坐标系中, 如图 5 所示。

从图 5 可以看出: ①相同吸力作用下, 体积修正后的饱和度/体积含水率要明显高于修正前的饱和度/体积含水率, 在吸力越高的区域, 差别越大。这是由于膨胀土在脱湿过程中时发生了较大的收缩变形, 试样孔隙体积减小。修正后的 SWCC 考虑了这一效应, 因此饱和度/体积含水率更高。②无论是体积修正以前还是修正以后, 由于试样初始干密度越小, 持水能力越低, 在受到第一级相同吸力 (50 kPa) 作用下的脱水量更大, 饱和度/体积含水率的降幅 (曲线斜率) 越大, 因此第一级吸力作用稳定后, 饱和度/体积含水率越低; 在其后的各级吸力 (已超过各干密度试样的进气值) 作用下, 不同初始干密度试样的饱和度/体积含水率降幅尽管仍有差异, 但已经不大, 这样各级吸力下初始干密度越小的试样, 饱和度/体积含水率也越低。

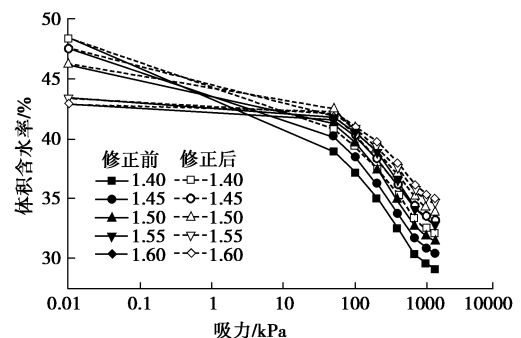


图 5 修正前后体积含水率 - 吸力曲线

Fig. 5 Comparison of volumetric water content-suction curves before and after volume change correction

## 3 考虑体变的 SWCC 模型及其参数分析

目前已有许多学者建立了不同特点的 SWCC 模型, 如 Van Genuchten 模型<sup>[15]</sup>、Fredlund-Xing 模型<sup>[16]</sup>、Leong 模型<sup>[17]</sup>等。由于 Fredlund-Xing 模型能够在较大范围内拟合 SWCC 的试验数据, 所以本文以该模型为基础, 建立能考虑体积变化的 SWCC 模型, 并分析试样初始孔隙比 (干密度) 对模型参数的影响。

根据前述收缩试验和 SWCC 试验的结果, 可以获

得膨胀土试样孔隙比随吸力的变化曲线, 如图 6 所示。

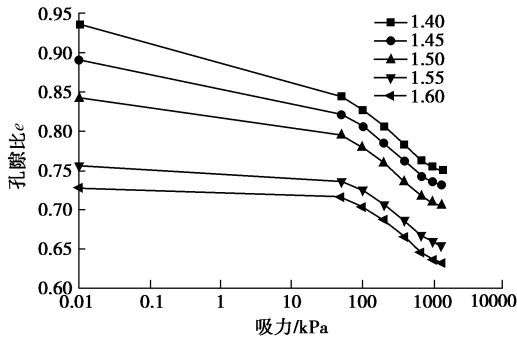


图 6 不同初始干密度试样孔隙比随吸力变化曲线

Fig. 6 Void ratio-suction curves of soil specimens with different initial dry densities

Fredlund-Xing 模型可用重力含水率表达为

$$w = \left[ 1 - \frac{\ln(1 + \psi / \psi_r)}{\ln(1 + 10^6 / \psi_r)} \right] \left( \frac{e_0}{G_s} \right) \left\{ \frac{1}{\ln \left[ e + (\psi / a)^n \right]} \right\}^m \quad (12)$$

根据式 (9) ~ (11), 可以得到考虑体积变化时土的饱和度与重力含水率之间的函数关系:

$$S_r = \frac{G_s w}{(1 + e_0) [1 - K_v (w_0 - w)]^3 - 1} \quad (13)$$

综合式 (12)、(13) 即可得到考虑体积变化的用饱和度表征的 SWCC 模型。

利用该模型, 结合式 (11) 和膨胀土试样孔隙比与吸力之间的函数关系 (见图 6), 即可对图 5 中修正后的土水特征曲线进行拟合, 得到不同初始孔隙比/初始干密度下的 3 个拟合参数  $a$ ,  $m$  和  $n$ , 随初始孔隙比的变化规律如图 7 所示。

从图 7 中可以看出: 3 个参数中, 参数  $a$  (表征进气值大小) 和参数  $n$  (表征 SWCC 进气值拐点之后的曲线斜率) 受试样初始孔隙比的影响较大, 而参数  $m$  (表征残余含水率) 则受其影响较小。另一方面, 随着试样初始孔隙比的增加, 对参数  $a$  和  $n$  的影响逐渐减小。造成上述现象的原因分析如下:

(1) 对于  $a$  值, 试样初始孔隙比越大, 其中的最大孔隙尺寸就越大, 从而导致进气值越小。Karube 等<sup>[18]</sup>、Salager 等<sup>[3]</sup>、Timothy 等<sup>[19]</sup>通过试验都发现  $a$  值与初始孔隙比存在着如下的函数关系:

$$a = Ae_0^{-B} \quad (14)$$

周葆春等<sup>[2]</sup>通过对荆门膨胀土的土水特征试验, 发现  $a$  值与初始孔隙比存在着如下的函数关系:

$$a = \sqrt{b(1 - ce_0^2)} \quad (15)$$

在式 (14) 所表示的函数关系中, 随着初始孔隙比的增大, 对  $a$  值的影响会减小; 而式 (15) 所表示的变化规律则正好相反。根据图 7, 可发现本文所得

到的  $a$  值变化规律与式 (14) 一致, 拟合所得到的参数  $A$  和  $B$  分别为 6.19 和 7.74 (拟合系数 0.99)。

(2)  $n$  值是反映孔隙大小分布的指标,  $n$  值越大表明土样的孔隙分布越均匀<sup>[20]</sup>。图 7 中  $n$  值的变化规律表明, 试样初始孔隙比越小, 孔隙分布越均匀, 其变化规律同样可以采用形如式 (14) 的函数关系进行拟合 (拟合系数 0.96), 即

$$n = 0.5975e_0^{-2.9328} \quad (16)$$

(3) 对于  $m$  值, 由于本次试验受压力板仪陶土板进气值的限制, 所施加的吸力还未使膨胀土试样达到其残余含水率, 所以拟合得到的  $m$  值受拟合过程中迭代初值的影响较大。

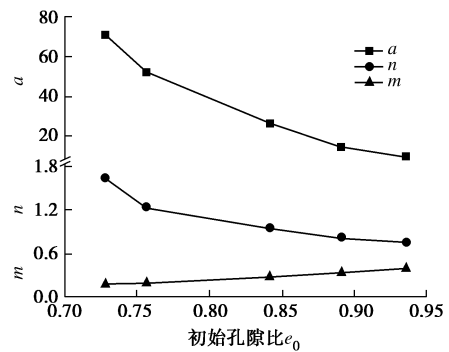


图 7 Fredlund-Xing 模型参数随初始孔隙比的变化

Fig. 7 Variation of parameters of Fredlund-Xing model with initial void ratio of specimens

综上所述, 将式 (14)、(16) 带入式 (12), 就可以得到包含初始孔隙比影响的 SWCC 模型:

$$w = \left[ 1 - \frac{\ln(1 + \psi / \psi_r)}{\ln(1 + 10^6 / \psi_r)} \right] \left( \frac{e_0}{G_s} \right) \frac{1}{\left\{ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{\psi}{Ae_0^{-B}} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (17)$$

模型参数个数原来的 3 个增加到 5 个。结合表 2 中的  $m$  值使用公式 (15) 得到的土水特征曲线与试验实测数据对比如图 8 所示, 结果表明使用本文模型得到的土水特征曲线与实测数据很接近, 是比较合理的。

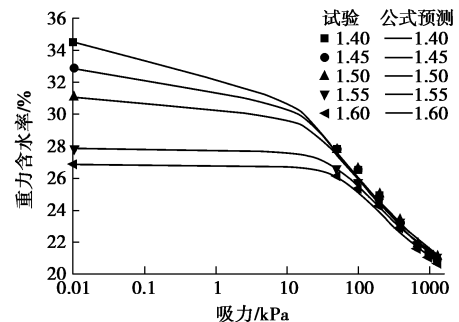


图 8 模型(17)预测 SWCC 与实测 SWCC 对比

Fig. 8 Comparison of SWCCs derived from proposed model (Eq. (17)) and tests

### 4 土水特征曲面

上述 SWCC 模型表明, 脱湿路径下, 试样含水率变化同时受到吸力和初始孔隙比的影响, 孔隙比也会受到含水率或者吸力的影响。所以对于某一特定的土样, 如果考虑其在脱湿路径下孔隙比的变化, 并将其每一时刻的状态表示在“含水率 - 吸力 - 孔隙比”的空间坐标系中, 则将形成一条空间曲线, 如图 9 所示。这条空间曲线在 3 个坐标平面上形成 3 个投影: 在含水率 - 吸力平面上, 为不考虑试样体积变化的 SWCC; 在孔隙比 - 吸力平面上, 为孔隙比随吸力变化的曲线, 与图 6 中曲线形状相似; 在孔隙比 - 含水率平面上, 为土样的收缩曲线。

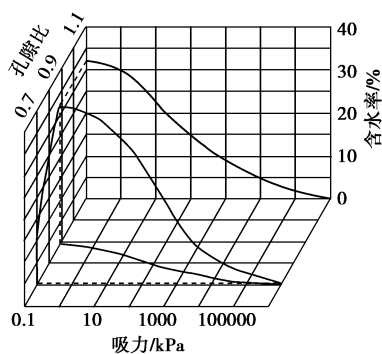


图 9 脱湿路径下的含水率 - 吸力 - 孔隙比空间曲线

Fig. 9 Spatial curve for relationship among water content, suction and void ratio under dehydration path

将不同初始孔隙比试样的脱湿曲线都表示在含水率 - 吸力 - 孔隙比空间中, 则形成一个完整的脱湿曲面, 如图 10 所示<sup>[3]</sup>。该曲面可以分为如图所示的 A、B 和 C 三个区域: 处于 A 区状态的试样, 其含水率同时受到吸力和孔隙比的影响; 处于 B 区状态的土样, 含水率仅仅受到吸力的影响, 该区域为一垂直于含水率 - 吸力坐标平面的曲面; C 区表示试样处于饱和状态, 该区域为一垂直于含水率 - 孔隙比的平面。

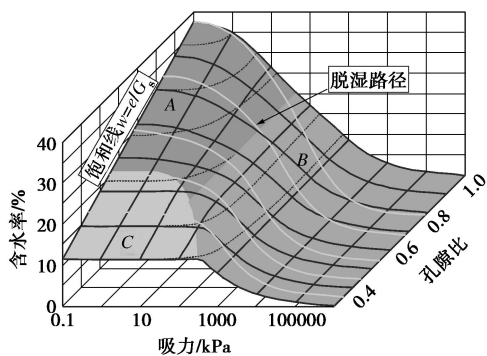


图 10 脱湿路径下的土水特征曲面<sup>[3]</sup>

Fig. 10 Spatial curved surface for soil-water characteristics under dehydration path<sup>[3]</sup>

在图 10 的曲面上, 当吸力一定时, 根据式 (9)、(10) 能够得到考虑膨胀土试样体变修正式, 孔隙比与含水率之间的函数关系为一个三次多项式:

$$e = (1 + e_0) [1 - K_v (w_0 - w)]^3 - 1 \quad (18)$$

Salager 等<sup>[3]</sup>认为, 在相同的吸力作用下, 土样的含水率与孔隙比成线性关系:

$$w = ae + b \quad (19)$$

将不同吸力作用下, 含水率随孔隙比的变化绘制成曲线, 如图 11 所示。可以看出, 在本次试验的吸力范围和孔隙比范围内, 试样的孔隙比与含水率之间并非线性关系。使用三次多项式进行数据拟合, 发现拟合系数都能够达到 0.99 以上。

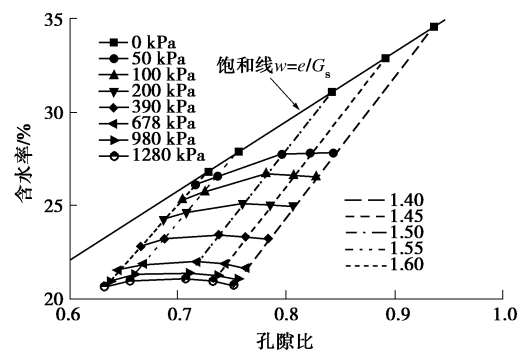


图 11 不同吸力下土样含水率 - 孔隙比关系曲线

Fig. 11 Evolution of water content with void ratio at given suction values

### 5 结 论

(1) 膨胀土在脱湿路径下的体积变化对其 SWCC 影响很大。由于膨胀土在脱湿过程中发生了不可忽略的收缩变形, 试样孔隙体积减小, 体积修正后的 SWCC 考虑了这一效应, 所以其饱和度/体积含水率明显高于修正前, 在吸力越高的区域, 差别更明显。

(2) 推导给出了更为合理的体积修正公式; 基于 Fredlund-Xing 模型, 建立了能考虑体积变化的、以饱和度表征的膨胀土 SWCC 模型。在该模型的 3 个参数中, 表征进气值大小的参数 *a* 和表征 SWCC 进气值拐点之后曲线斜率的参数 *n* 受膨胀土试样初始孔隙比的影响较大, 而表征残余含水率参数 *m* 则受其影响较小; 随着初始孔隙比的增加, 其对参数 *a* 和 *n* 所造成的影响逐渐减小。

(3) 在“含水率 - 吸力 - 孔隙比”的空间坐标系中, 膨胀土脱湿路径下的 SWCC 为一条空间曲线。将不同初始孔隙比的试样脱湿曲线表示在含水率 - 吸力 - 孔隙比空间中, 可得到完整的脱湿曲面, 在曲面的不同区域内, 试样将呈现出不同的特征。考虑膨胀土试样体变修正时, 孔隙比与含水率之间的函数关系为一个三次多项式, 而非线性关系。

## 参考文献:

- [1] BARBOUR S L. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: the soil-water characteristic curve: a historical perspective[J]. Canadian Geotechnical Journal. 1998, **35**(5): 873 - 894.
- [2] 周葆春, 孔令伟. 考虑体积变化的非饱和膨胀土土水特征[J]. 水利学报, 2011, **42**(10): 1152 - 1160. (ZHOU Bao-chun, KONG Ling-wei. Effect of volume changes on soil-water characteristics of unsaturated expansive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, **42**(10): 1152 - 1160. (in Chinese))
- [3] SALAGER S, EI YOUSOUFI M S E Y, SAIX C S C. Definition and experimental determination of a soil-water retention surface[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(6): 609 - 622.
- [4] 刘艳华, 龚壁卫, 苏 鸿. 非饱和土的土水特征曲线研究[J]. 工程勘察, 2002(3): 8 - 11. (LIU Yan-hua, GONG Bi-wei, SU Hong. Study on characteristic curve of soil and water for unsaturated soil[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2002(3): 8 - 11. (in Chinese))
- [5] 孙德安, 孟德林, 孙文静, 等. 两种膨润土的土 - 水特征曲线[J]. 岩土力学, 2011, **32**(4): 973 - 978. (SUN De-an, MENG De-lin, SUN Wen-jing, et al. Soil-water characteristic curves of two bentonites[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 937-978. (in Chinese))
- [6] 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): 1463 - 1468. (ZHANG Xue-don, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qin, et al. Research on influence of soil density on soil-water characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1463 - 1468. (in Chinese))
- [7] MIAO Lin-chang, FEI Jing, SANDRA L. Soil-water characteristic curve of remolded expansive soils[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils, ASCE, 2006: 997 - 1004.
- [8] 孔令伟, 李雄威, 郭爱国, 等. 脱湿速率影响下的膨胀土工程性状与持水特征初探[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 335 - 340. (KONG Ling-wei, LI Xiong-wei, GUO Ai-guo, et al. Preliminary study on engineering behaviors and water retention characteristics of expansive soil under influence of drying rate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 335 - 340. (in Chinese))
- [9] MBONIMPA M, AUBERTIN M, MAQSOUUD A, et al. Predictive model for the water retention curve of deformable clayey soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**: 1121.
- [10] PÉRON H, HUECKEL T, LALOUI L. An improved volume measurement for determining soil water retention curves[J]. Geotechnical Testing Journal. 2007, **30**(1): 1.
- [11] SL 237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL 237—1999. Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [12] 孙树国, 陈正汉, 朱元青, 等. 压力板仪配套及 SWCC 试验的若干问题探讨[J]. 后勤工程学院学报, 2006, **22**(4): 1 - 5. (SUN Shu-guo, CHEN Zheng-han, ZHU Yuan-qing, et al. Coordinated ceramic plate extractors and some problems of SWCC test[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2006, **22**(4): 1 - 5. (in Chinese))
- [13] 张 华, 陈守义, 姚海林. 用收缩试验资料间接估算压力板试验中的体积含水量[J]. 岩土力学, 1999, **20**(2): 22 - 26. (ZHANG Hua, CHEN Shou-yi, YAO Hai-lin. Estimation of volumetric water content in the pressure plate test by use of shrinkage test data[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(2): 22 - 26. (in Chinese))
- [14] BRONSWIJK J. Shrinkage geometry of a heavy clay soil at various stresses[J]. Soil Science Society of America Journal. 1990, 54.
- [15] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [16] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 - 532.
- [17] LEONG E C, RAHARDJO H. Review of soil-water characteristic curve equations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(12): 1106 - 1117.
- [18] KARUBE D, KAWAI K. The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering. 2001, **19**(3): 211 - 241.
- [19] TIMOTHY C, SIEGEL P E, RONALDO Luna, et al. Experimental study of the water retention curve as a function of void ratio[C]// Computer Applications in Geotechnical Engineering Denver Colorado United States. New York, 2007: 1 - 10.
- [20] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Wiley-Interscience, 1993.