

DOI: 10.11779/CJGE201710017

# 单峰和双峰土水特征曲线基本参数的确定

高 游, 孙德安\*

(上海大学土木工程系, 上海 200444)

**摘要:** 土水特征曲线基本参数(如进气值、残余吸力值和过渡区脱湿曲线的斜率等)的确定是预测非饱和土强度、渗透性以及本构关系的基础。基于修正 Fredlund 和 Xing 拟合方程, 提出单峰和双峰土水特征曲线基本参数的确定方法。首先, 对试验数据点进行最优化拟合, 获取拟合方程的参数, 对于双峰土水特征曲线, 根据试样的孔径分布特征将其分段进行拟合; 其次, 根据拟合方程的几何关系求出过渡区和残余区土水特征曲线的斜率及其切线方程; 再根据切线方程可以准确地确定单峰和双峰土水特征曲线的进气值、残余吸力值等。最后, 利用单峰和双峰土水特征曲线的试验数据, 验证了此方法的可行性。

**关键词:** 土水特征曲线; 基本参数; 拟合; 单峰孔径分布; 双峰孔径分布

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)10-1884-08

作者简介: 高 游(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土力学的研究。E-mail: gaoyou824@163.com。

## Determination of basic parameters of unimodal and bimodal soil water characteristic curves

GAO You, SUN De-an

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** The determination of basic parameters (such as air-entry value, residual suction, slope at transition zone, etc.) of soil-water characteristic curve (SWCC) is the most fundamental for predicting the strength, permeability and constitutive relation of unsaturated soils. In this paper a method is proposed to determine the basic parameters of unimodal and bimodal SWCCs based on the modified Fredlund and Xing's fitting equation. Firstly, the parameters of the fitting equation can be obtained by the optimal fitting of experimental data. For the bimodal SWCC, the piecewise fitting method is adopted based on the pore size distribution characteristics of soils. Secondly, the slopes and equations of tangent lines are obtained in the transition and residual zones based on the geometric relationship of the fitting equation. Furthermore, the air-entry value and residual suction of SWCCs are determined by the geometric relationship of tangent lines. Finally, the proposed method is validated to be feasible by use of the experimental data of unimodal and bimodal SWCCs.

**Key words:** soil water characteristic curve; basic parameter; fitting; unimodal pore size distribution; bimodal pore size distribution

## 0 引言

土水特征曲线表示非饱和土持水能力的大小, 它是预测非饱和土强度、渗透性以及本构关系的基础<sup>[1]</sup>。如在非饱和土强度预测方面, 最关键的问题是如何考虑吸力和饱和度对非饱和土强度公式中增强项的影响。而在非饱和增强项中最关键的一个参数就是有效应力参数  $\chi$  ( $0 \leq \chi \leq 1$ )。很多学者基于大量的实验数据, 将非饱和强度增强项与有效饱和度  $S_e$  ( $S_e = (S_r - S_{re}) / (1 - S_{re})$ ,  $S_{re}$  为残余饱和度) 建立关系, 并将有效应力参数  $\chi$  用有效饱和度  $S_e$  替代<sup>[2-5]</sup>。在非饱和土渗透性的预测方面, 应用较广泛的非饱和渗透系数模型中含有有效饱和度  $S_e$ <sup>[6-8]</sup>。故残余点吸力值  $\varphi_{re}$  和残余饱和

度  $S_{re}$  的准确确定具有重要的实际意义。Kim 等<sup>[9]</sup>利用有效饱和度  $S_e$  代替有效应力参数  $\chi$  的非饱和强度预测公式探讨了残余饱和度对强度增强项预测的影响, 如图 1 所示。可以看出残余点取值对非饱和土强度增强项预测的结果影响很大。此外, 在非饱和土弹塑性模型中常常需要建立一个简单的土水特征曲线滞回模型, 如 Sheng 等<sup>[10]</sup>提出的土水特征曲线滞回模型, 包含了如进气值  $s_a$ , 过渡区脱湿曲线斜率  $\lambda_{ws}$ , 残余区脱

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402271, 11672172)

收稿日期: 2016-07-26

\*通讯作者 (E-mail: sundean@shu.edu.cn)

湿线斜率或扫描线斜率  $\kappa_{ws}$  等基本参数, 如图 2 所示。因此, 准确确定土水特征曲线基本参数(如进气值、残余吸力值和过渡区脱湿曲线斜率等)是非饱和土强度、渗透性以及本构关系研究的基础。

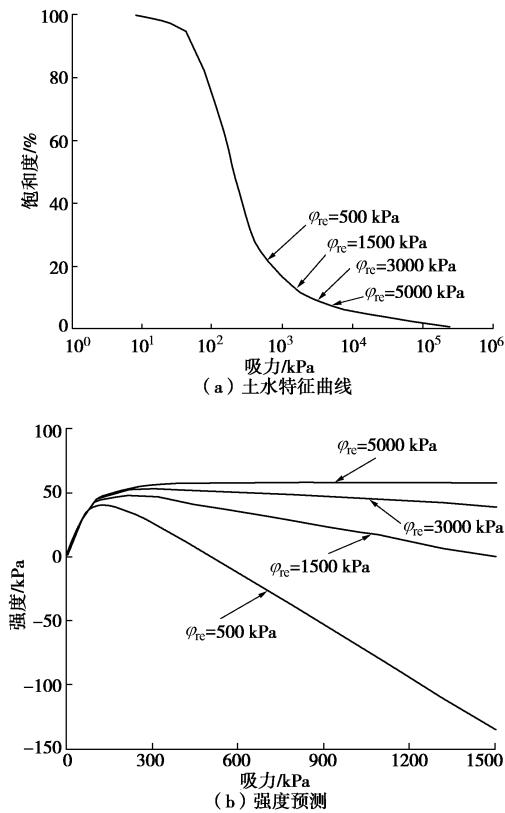


图 1 残余值对非饱和强度增强项预测的影响<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Effect of residual suction on predicted shear strength<sup>[7]</sup>

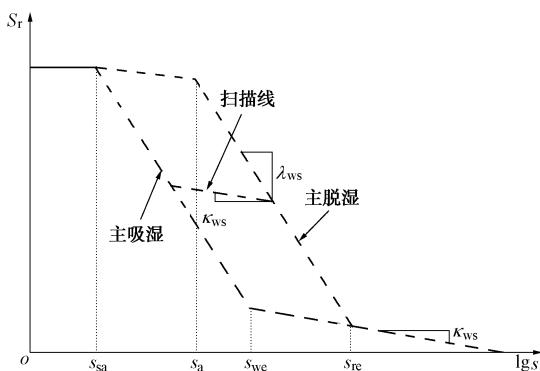


图 2 土水特征曲线模型<sup>[10]</sup>

Fig. 2 Model for soil-water characteristic curves<sup>[10]</sup>

目前, 土水特征曲线基本参数的确定主要是利用画图法。图 3 为单峰土水特征曲线, 其进气点坐标主要根据边界区和过渡区土水特征曲线切线的交点确定, 残余点坐标主要根据过渡区和残余区土水特征曲线切线的交点确定。此法确定土水特征曲线参数主观性较大。此外, 不同土水特征曲线的量测方法的量测吸力范围是不同的, 如压力板法(即轴平移技术)最

大吸力为 1.5 MPa、滤纸法(吸力范围约 0.5~40 MPa)和饱和盐溶液蒸气平衡法(吸力范围约 3~367 MPa)等。若只采用一种试验方法很难获取广吸力范围内的土水特征曲线, 而用单一试验方法获取的窄吸力范围内有限试验数据点确定土水特征曲线基本参数会存在较大误差。因此, 如何从窄吸力范围内有限试验数据, 较准确地确定土水特征曲线的基本参数是值得研究的一个问题。

用窄吸力或广吸力范围内有限试验数据点, 较准确地确定土水特征曲线的基本参数, 先需要确定其全吸力范围内土水特征曲线的表达方程。本文通过分析得知 Fredlund 等<sup>[11]</sup>拟合方程式中的残余吸力值  $\varphi_{re}$  并非实际残余吸力值, 故将 Fredlund 等的拟合方程视作四参数拟合方程对单峰土水特征曲线(即有限的试验数据点的水特征曲线)进行拟合确定全吸力范围内的土水特征曲线拟合方程, 再根据已知参数方程的几何关系求出过渡区和残余区土水特征曲线的斜率及其切线方程, 从而确定单峰土水特征曲线的基本参数。同时基于孔径分布特征将双峰土水特征曲线分两段, 提出拟合确定双峰土水特征曲线基本参数的方法。最后, 用试验数据验证了本文方法可准确地确定单峰和双峰土水特征曲线的基本参数。

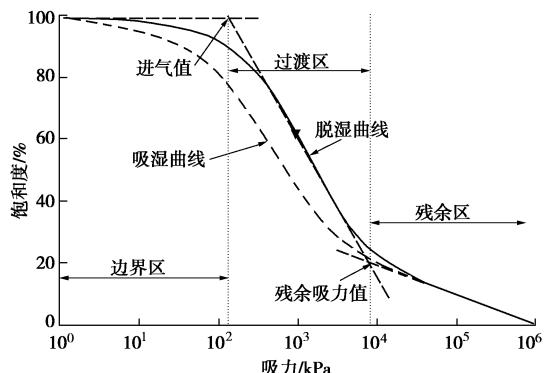


图 3 单峰土水特征曲线

Fig. 3 Unimodal soil-water characteristic curve

## 1 土水特征曲线的类型

微细观试验(如压汞试验)的深入测试和研究表明, 土样内部的孔隙结构可以分为单峰孔隙分布和双峰孔隙分布以及甚至多峰孔隙分布。如初始是泥浆状态的海相、湖相以及河相沉积土经过自重沉积、固结后形成的土样孔隙分布比较单一, 即为单峰孔隙分布, 其内部的孔隙主要是颗粒间孔隙, 如图 4 (a) 所示。对于单峰孔隙结构试样所测得土水特性曲线, 称为单峰土水特征曲线; 其特征是过渡区为单一斜率的下降段, 如图 3 所示。而击实或压实样的孔隙分布主要为

双峰孔径分布, 双峰孔径分布的试样主要包含两种类型的孔隙: 集聚体内孔隙和集聚体间孔隙, 如图 4(b) 所示。然而对于集聚体间孔隙相对不稳定, 如浸水湿化或在高压力作用下可以使集聚体间发生相对滑动而使集聚体间孔隙发生变化, 会使试样的孔径分布变成弱的双峰孔径尺寸分布或者趋于单峰孔径分布<sup>[12-14]</sup>。对于某一特定应力状态下的饱和试样, 如果孔径分布是双峰孔径分布或者弱双峰孔径分布, 则所测得的土水特征曲线过渡区会出现两个斜率的下降段和一个水平过渡段, 这主要由于土样孔隙有集聚体间孔隙和集聚内孔隙组成的缘故<sup>[15-16]</sup>。因此, 土水特征曲线按孔径分布的类型可以分为单峰土水特征曲线和双峰土水特征曲线。

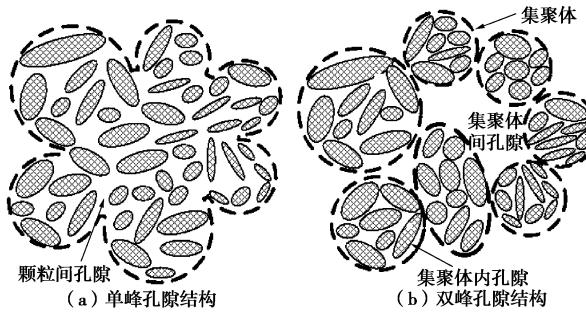


图 4 土样中不同类型的孔隙

Fig. 4 Different pore distributions in soil samples

## 2 土水特征曲线基本参数的确定

根据目前的量测技术, 要获取广吸力范围内土水特征曲线往往要利用几种不同的量测方法。因此, 要通过试验获取广吸力范围的土水特征曲线, 其过程复杂且耗时。故很多学者提出基于有限试验数据点来确定全吸力范围内土水特征曲线拟合参数的拟合方程。单峰土水特征曲线的模型有 Van 模型<sup>[17]</sup>、Fredlund 等模型<sup>[11]</sup>和 Kosugi 基于正态分布方程提出的单峰土水特征曲线模型<sup>[18]</sup>等。双峰土水特征曲线的模拟有 Li 等基于土水特征曲线的物理意义所提出的双峰土水特征曲线模型<sup>[19]</sup>, Satyanaga 等基于双峰粒径尺寸分布所提出的双峰土水特征曲线模型等<sup>[20]</sup>。

根据窄吸力或广吸力范围内有限试验数据点, 确定土水特征曲线的基本参数时, 首先要确定其全吸力范围内土水特征曲线的拟合方程, 再通过已知拟合方程的几何关系才能准确地确定土水特征曲线的基本参数。因此, 本文采用 Fredlund 等的拟合方程, 提出确定单峰和双峰土水特征曲线基本参数的方法。

### 2.1 单峰土水特征曲线基本参数的确定

Fredlund 等<sup>[11]</sup>在 1994 年提出一个能够较好拟合

土水特征曲线的方程:

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

式中,  $S_r(s)$  为非饱和时的饱和度 (%),  $s$  为吸力 (kPa),  $S_{rs}$  为饱和时的实际饱和度 (%), 完全饱和  $S_{rs}$  取 1,  $a$ ,  $n$ ,  $m$  为 3 个拟合参数。由于式 (1) 无法模拟残余区的土水特征特性, 如图 5 中式 (1) 模拟的结果所示, 故在式 (1) 乘上修正系数  $C(s)$

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

式中,  $\varphi_{re}$  为残余吸力值 (kPa)。式 (1) 乘上修正系数可得到很好拟合全吸力范围土水特性曲线的方程:

$$S_r(s) = \left\{ 1 - \frac{\ln(1 + s/\varphi_{re})}{\ln[1 + (10^6/\varphi_{re})]} \right\} \frac{S_{rs}}{\{ \ln[e + (s/a)^n] \}^m}. \quad (3)$$

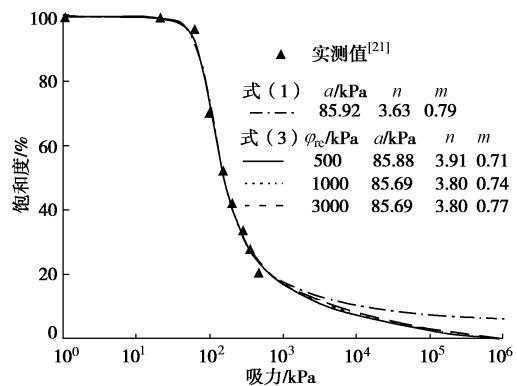


图 5 残余吸力值对拟合结果的影响

Fig. 5 Effect of residual suction on fitting results

但是, 式 (3) 中  $\varphi_{re}$  并不是实际意义上的残余吸力值, 如图 5 所示,  $\varphi_{re}$  分别取 500, 1000 和 3000 kPa, 均能很好的拟合全吸力范围内的土水特征曲线; 同时, Fredlund 等<sup>[11]</sup>也提到在大部分情况下  $\varphi_{re}$  可取 1500~3000 kPa 之间, 对不同类型土的土水特征曲线式 (3) 都能获得较好的拟合结果。文献[22, 23]也提到残余吸力值在较难确定情况下, 建议  $\varphi_{re}$  取 3000 kPa。此外, 根据有限试验数据点 (如图 5 中的实测数据点) 通过画图法是根本无法准确确定残余吸力值。因此, 式 (3) 中  $\varphi_{re}$  定义为残余吸力值是不准确的, 应作为拟合参数更为恰当。故区别于残余吸力值, 用  $\varphi$  表示, 即式 (3) 变成四参数拟合方程:

$$S_r(s) = \left\{ 1 - \frac{\ln(1 + s/\varphi)}{\ln[1 + (10^6/\varphi)]} \right\} \frac{S_{rs}}{\{ \ln[e + (s/a)^n] \}^m}. \quad (4)$$

此外, Fredlund 等<sup>[11]</sup>建议将式 (4) 中拟合参数  $a$  代替反弯点的吸力值  $s_{in}$ 。实际上计算得到的反弯点吸力  $s_{in}$  和  $a$  相差较大, 会导致过渡区切线方程无法准确确定, 特别是过渡区曲线坡度较缓的土水特征曲线。

文献[24]也提到很多情况下  $s_{in}$  和  $a$  存在较大差别。因此, 要准确确定过渡区的切线方程, 反弯点吸力值  $s_{in}$  的确定很关键。若式(4)对  $\lg(s)$  求导可求得任意吸力值所对应的斜率:

$$\begin{aligned} \lambda(s) &= \frac{dS_r(s)}{d\lg(s)} = \frac{dS_r(s)}{ds} \times s \times \ln(10) \\ &= s \ln(10) \left[ \left( 1 - \frac{\ln(1 + \frac{s}{\varphi})}{\ln(1 + \frac{10^6}{\varphi})} \right) \frac{-mS_{rs}}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^{m+1}} \frac{1}{a} \left( \frac{s}{a} \right)^n \right. \\ &\quad \left. - \frac{n}{e + \left( \frac{s}{a} \right)^n} - \frac{1}{\ln(1 + \frac{10^6}{\varphi})} \frac{s + \varphi}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

故反弯点吸力  $s_{in}$  可以由式(5)对  $\lg(s)$  求导为零或将已知拟合参数代入式(5), 并画出斜率  $\lambda(s)$  与吸力  $s$  关系图, 再找出峰值点, 即为式(5)最小斜率  $\lambda_{ws}$  (即为过渡区切线斜率) 点, 其坐标为  $(s_{in}, \lambda_{ws})$ 。再根据已知  $s_{in}$  代入式(4)可求得反弯点坐标  $(s_{in}, S_{rin})$ , 如图 6 所示。根据反弯点坐标  $(s_{in}, S_{rin})$  和斜率  $\lambda_{ws}$ , 可得到土水特征曲线过渡区的切线方程,

$$S_r(s) = \lambda_{ws}[\lg(s) - \lg(s_{in})] + S_{rin} \quad (6)$$

边界区的水平线方程为

$$S_r(s) = S_{rs} \quad (7)$$

进气值  $s_a$  可由式(6)和式(7)所示的直线交点求得

$$s_a = 10^{\frac{S_{rs} - S_{rin} + \lg(s_{in})}{\lambda_{ws}}} \quad (8)$$

取残余区直线段任意一点  $(s_0, S_{r2})$ , 如图 6 所示, 残余区切线的斜率  $\kappa_{ws}$  为

$$\kappa_{ws} = \frac{S_{r2}}{\lg(s_0) - \lg(10^6)} \quad (9)$$

故残余区段切线方程为

$$S_r(s) = \kappa_{ws}[\lg(s) - \lg(s_0)] + S_{r2} \quad (10)$$

残余点的坐标可联立求解式(6)和式(10)得到

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{re} &= 10^{\frac{S_{r2} - S_{rin} + \lambda_{ws} \lg(s_{in}) - \kappa_{ws} \lg(s_0)}{\lambda_{ws} - \kappa_{ws}}}, \\ S_{re2} &= \frac{\lambda_{ws} S_{r2} - \kappa_{ws} S_{rin} + \lambda_{ws} \kappa_{ws} [\lg(s_{in}) - \lg(s_0)]}{\lambda_{ws} - \kappa_{ws}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

图 7 表示利用式(4)对 3 种不同类型土的实测土水特性数据进行全吸力范围内的拟合, 其拟合参数如表 1 所示; 再利用全吸力范围的拟合方程, 根据几何关系确定过渡区和残余区的切线, 最后确定出土水特征曲线的基本参数, 如表 2 所示。由图可知, 如采用本方法, 只要根据有限的试验数据点就可以比较准确地确定土水特征曲线基本参数, 特别是对于图 7 中粉

土, 若按试验数据点结合画图法, 根本无法确定残余点的坐标和脱湿曲线残余区斜率。

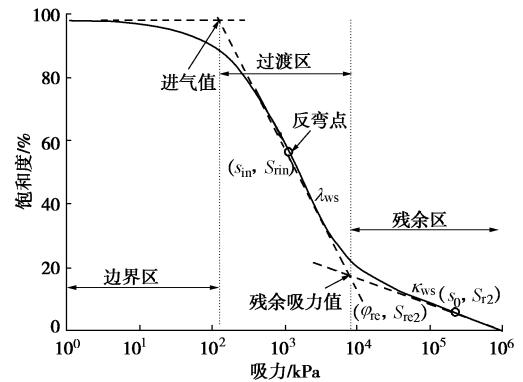


图 6 单峰土水特征曲线的几何关系  
Fig. 6 Geometrical relationship of unimodal SWCCs

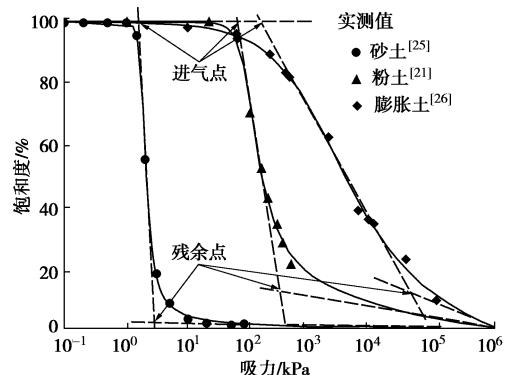


图 7 基于拟合方程确定 SWCC 基本参数  
Fig. 7 Basic parameters of SWCCs based on fitting equation

表 1 单峰土水特征曲线的拟合参数

Table 1 Fitting parameters of unimodal SWCCs

参数	砂土	黏土	膨胀土
$a/kPa$	1.783	85.73	852.71
$n$	9.885	3.713	0.779
$m$	1.112	0.766	0.872
$\varphi/kPa$	15.35	2462.7	1304.9

表 2 单峰土水特征曲线的基本参数

Table 2 Basic parameters of unimodal SWCCs

基本参数	砂土	黏土	膨胀土
进气值/kPa	1.53	63.5	149.3
残余吸力值/kPa	2.69	1014.6	37662
残余饱和度/%	1.93	5.80	12.86
过渡区脱湿曲线斜率 $\lambda_{ws}$	-4.012	-1.28	-0.363
反弯点吸力值 $s_{in}/kPa$	1.82	118.0	1910.9

图 8 表示图 7 中所示的 3 种土的土水特征曲线斜率随吸力的变化情况, 是根据已知的拟合参数代入式(5)计算得到的。由图可知, 在全吸力范围内都只有一个峰值, 峰值点坐标就是反弯点吸力值  $s_{in}$  和过渡区切线斜率  $\lambda_{ws}$ 。此外, 反弯点吸力值  $s_{in}$  和式(4)中拟合参数  $a$  的值存在较大差别, 如图 7 中的膨胀土  $s_{in}$  为 1910.9 kPa, 而拟合参数  $a$  为 852.71 kPa (见表 1)

和表 2)。故在确定土水特征曲线基本参数时, 不能将 Fredlund 等的拟合方程中  $a$  作为曲线的反弯点吸力值。

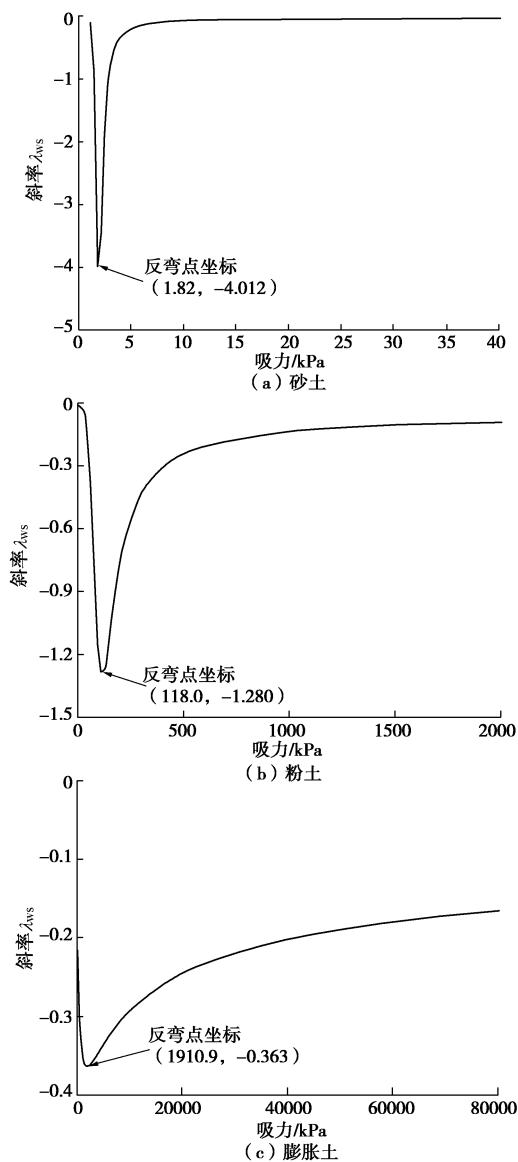


图 8 单峰土水特征曲线反弯点坐标确定

Fig. 8 Determination of inflection points for unimodal SWCCs

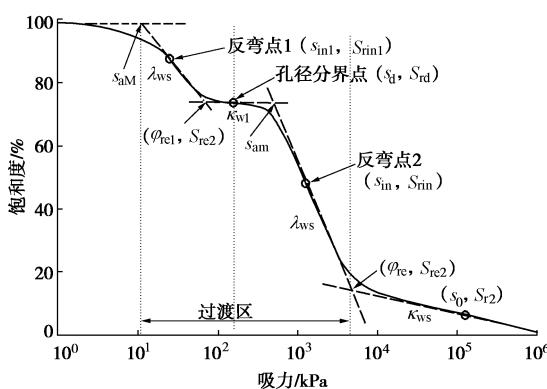


图 9 双峰土水特征曲线的几何关系

Fig. 9 Geometrical relationship of bimodal SWCCs

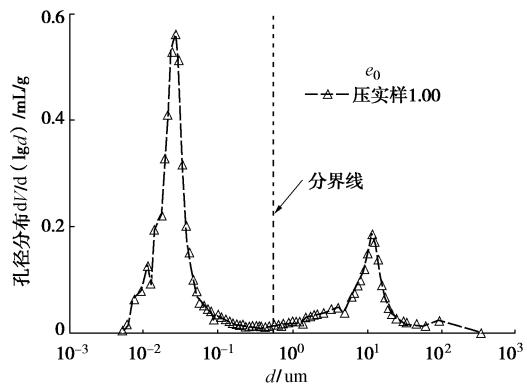


图 10 桂林红黏土压实样的孔径分布图<sup>[16]</sup>

Fig. 10 Pore-size distribution of Guilin lateritic clay<sup>[16]</sup>

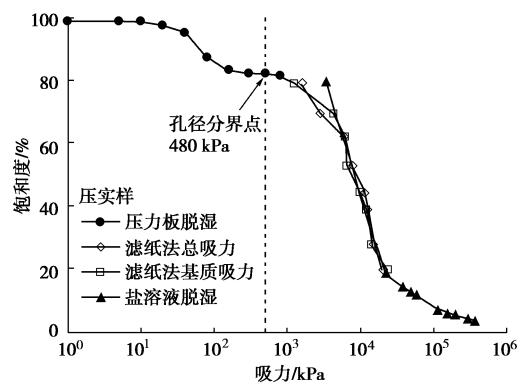


图 11 全吸力范围内桂林红黏土压实样的脱湿土水特征曲线<sup>[16]</sup>

Fig. 11 SWCCs of compacted Guilin lateritic specimens in full suction range<sup>[16]</sup>

## 2.2 双峰土水特征曲线基本参数的确定

双峰土水特征曲线主要由集聚体内孔隙和集聚体间孔隙控制, 所测得的土水特征曲线过渡区段会出现两个斜率的下降段和一个水平段, 如图 9 所示。图中  $s_{aM}$ ,  $\varphi_{re1}$ ,  $S_{re1}$ ,  $\lambda_{w1}$ ,  $s_{in1}$  和  $S_{rin1}$  分别是集聚体间孔隙对应的进气值、残余吸力值、残余饱和度、过渡段斜率、反弯点 1 的吸力值和饱和度;  $s_{am}$ ,  $\varphi_{re2}$ ,  $S_{re2}$ ,  $\lambda_{ws}$ ,  $s_{in}$  和  $S_{rin}$  分别是集聚体内孔隙对应的进气值、残余吸力值、过渡段斜率、反弯点 2 的吸力值和饱和度。图 9 中孔径分界点为集聚体间孔径和集聚体内孔径的分界点,  $s_d$  和  $S_{rd}$  分别表示分界点的吸力值和饱和度。分界点吸力  $s_d$  可以根据压汞试验结果来确定。图 10 为桂林红黏土压实样的孔径尺寸分布图<sup>[16]</sup>。由图可知, 集聚体间孔径和集聚体内孔径的分界点孔径大致可定为 0.6  $\mu\text{m}$ 。由 Young–Laplace 方程可以换算出基质吸力:

$$s = \frac{4\sigma \cos \theta_w}{d} \quad (12)$$

式中  $s$  为基质吸力 (Pa);  $d$  为孔隙的直径 (m);  $\sigma$  为水的表面张力 (N/m);  $\theta_w$  为水与土表面接触角。在

计算中表面张力按 25℃时取 0.072 N/m<sup>[1]</sup>,  $\theta_w$  取为 0°。由根据式 (12) 可以计算出孔径 0.6μm 对应的吸力为 480 kPa。故孔径分界点的吸力值  $s_d$  为 480 kPa, 表示在图 11 中。图 11 为用压力板法、滤纸法和饱和盐溶液蒸汽平衡法测得的全吸力范围内桂林红黏土压实样脱湿土水特征曲线<sup>[16]</sup>。图 10, 11 所使用土试样的初始条件是一样的。

双峰土水曲线基本参数的确定: 主要以孔径分界点的吸力值  $s_d$  作为分界, 将全吸力范围分为最小吸力值  $s_{\min} \sim s_d$  和  $s_d \sim 10^6$  两段分别进行拟合。其中  $s_{\min} \sim s_d$  段利用式 (1) 拟合确定参数  $a_0$ ,  $n_0$ ,  $m_0$ , 因为系数  $C(s)$  主要对高吸力段的修正, 因此  $s_{\min} \sim s_d$  段的曲线拟合不需要修正系数  $C(s)$ 。其过渡区切线斜率为式 (1) 对  $\lg(s)$  求导得到

$$\begin{aligned} \lambda_1(s) &= \frac{dS_r(s)}{d\lg(s)} = \frac{dS_r(s)}{ds} \times s \times \ln(10) \\ &= s \times \ln(10) \times \left[ \frac{-mS_{rs}}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{s}{a} \right)^n \right] \right\}^{m+1}} - \frac{n}{e + \left( \frac{s}{a} \right)^n} \left( \frac{s}{a} \right)^n \frac{1}{a} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

同理, 根据  $s_{\min} \sim s_d$  段拟合获取参数  $a_0$ ,  $n_0$ ,  $m_0$ , 结合式 (13) 可以求得反弯点 1 坐标 ( $s_{in1}$ ,  $S_{in1}$ ) 和过渡段斜率  $\lambda_{w1}$ , 如图 9 所示。集聚体间孔隙对应的过渡区的切线方程为

$$S_r(s) = \lambda_{w1}[\lg(s) - \lg(s_{in1})] + S_{in1} \quad (14)$$

联立式 (7) 和 (14) 可求得集聚体间孔隙对应的进气值:

$$S_{am} = 10^{\frac{S_{rs} - S_{in1} + \lg(s_{in1})}{\lambda_{w1}}} \quad (15)$$

吸力  $s_d \sim 10^6$  段利用式 (4) 进行拟合, 确定  $a$ ,  $n$ ,  $m$  和  $\varphi$ , 式 (4) 中  $S_{rs}$  等于分界点对应的饱和度  $S_{rd}$ , 即  $S_{rs} = S_{rd}$ , 可以将  $s_d$  代入  $s_{\min} \sim s_d$  段的式 (1) 得到。过渡区水平段的斜率  $\kappa_{w1}$  可以由  $s_d$  带入式 (5) 计算得到, 即  $\kappa_{w1} = \lambda(s_d)$ 。过渡区水平段切线方程为

$$S_r(s) = \kappa_{w1}[\lg(s) - \lg(s_d)] + S_{rd} \quad (16)$$

联立式 (14)、(16) 可以得到集聚体间孔隙所对应的残余点坐标 ( $\varphi_{re1}$ ,  $S_{re1}$ ):

$$\begin{aligned} \varphi_{re1} &= 10^{\frac{S_{in1} - S_{rd} + \lambda_{w1} \lg(s_{in1}) - \kappa_{w1} \lg(s_d)}{\lambda_{w1} - \kappa_{w1}}}, \\ S_{re1} &= \frac{\lambda_{w1} S_{rd} - \kappa_{w1} S_{in1} + \lambda_{w1} \kappa_{w1} [\lg(s_{in1}) - \lg(s_d)]}{\lambda_{w1} - \kappa_{w1}}. \end{aligned} \quad (17)$$

集聚体内孔隙所对应的下降段切线方程和式 (6) 相同, 故联立式 (6)、(16) 可以得到集聚体内孔隙对应的进气值  $s_{am}$  为

$$S_{am} = 10^{\frac{S_{in} - S_{rd} + \lambda_{ws} \lg(s_{in}) - \kappa_{ws} \lg(s_d)}{\lambda_{ws} - \kappa_{ws}}} \quad (18)$$

集聚体内孔隙所对应残余点坐标的计算与单峰土水特征曲线的确定方法相同, 即为式 (11)。

图 12 表示利用式 (1)、(4) 对全吸力范围内双峰土水特征曲线进行分段拟合的几何关系图, 其拟合参数如表 3 所示。由图可看出此法可以较好地拟合双峰土水特征曲线, 再利用式 (5)、(13) 确定集聚体内孔隙和集聚体间孔隙所对应过渡区的反弯点吸力值和斜率, 如图 13 所示, 最后利用几何关系确定桂林红黏土压实样双峰土水特征曲线的基本参数, 结果如表 4 所示。

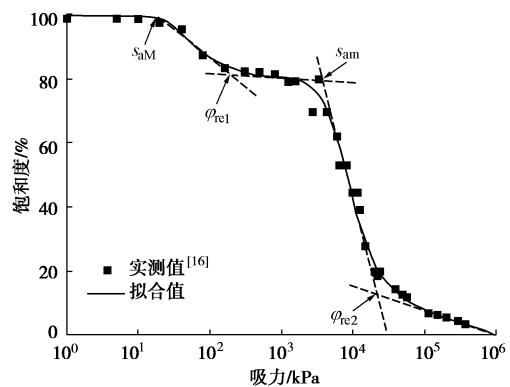


图 12 基于本文方法拟合桂林红黏土双峰土水特征曲线

Fig. 12 Bimodal SWCCs of Guilin lateritic clay predicted by using proposed method

表 3 双峰土水特征曲线的拟合参数

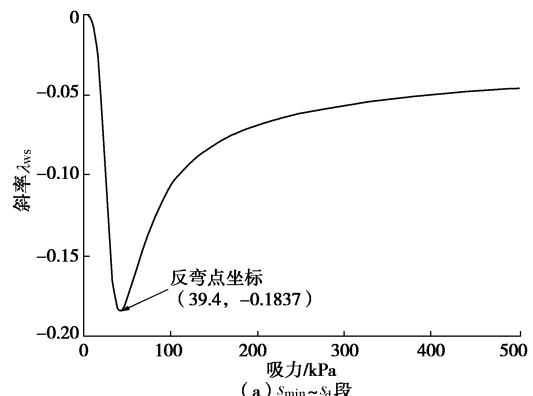
Table 3 Fitting parameters of bimodal SWCC

拟合参数	$s_{\min} \sim s_d$ 段	$s_d \sim 10^6$ 段
$a/kPa$	27.063	6349.3
$n$	3.807	2.513
$m$	0.087	1.150
$\varphi/kPa$	—	$6.24 \times 10^7$

表 4 双峰土水特征曲线的基本参数

Table 4 Basic parameters of bimodal SWCCs

$s_{\min} \sim s_d$ 段	$S_{am}/kPa$	$S_{rel}/kPa$	$S_{re1}/\%$	$\lambda_{w1}$	$\kappa_{w1}$
	19.6	192.7	81.77	-0.1837	-0.0150
$s_d \sim 10^6$ 段	$S_{am}/kPa$	$S_{re2}/kPa$	$S_{re2}/\%$	$\lambda_{ws}$	$\kappa_{ws}$
	3721.4	21103.6	12.97	-0.8882	-0.0772



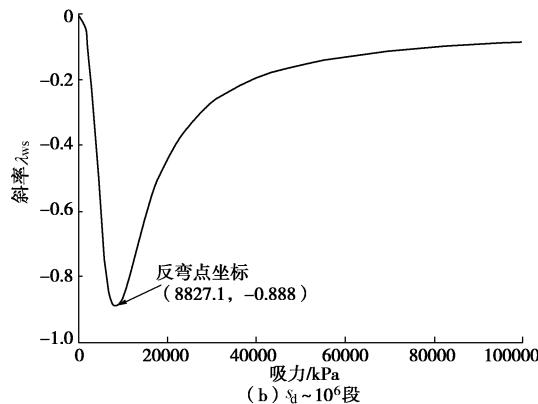


图 13 双峰土水特征曲线反弯点的确定

Fig. 13 Determination of inflection points for bimodal SWCCs

### 3 结语

本文通过分析得知 Fredlund 等拟合方程式中的残余吸力值  $\varphi_{re}$  并非实际的残余吸力值, 将拟合方程视作四参数的拟合方程。再根据孔径分布的类型将土水特征曲线分为单峰和双峰土水特征曲线。对单峰土水特征曲线, 首先由式 (4) 进行拟合确定拟合参数, 再根据已知方程的几何关系求出过渡区和残余区土水特征曲线的斜率及其切线方程, 从而确定单峰土水特征曲线的基本参数。对双峰土水特征曲线, 则可根据双峰孔隙结构分布的特征将双峰土水特征曲线分为对应集聚体间与集聚体内的两孔隙段, 并利用式 (1)、(4) 分段进行拟合确定两孔隙段的拟合参数, 再结合两孔隙段拟合方程的几何关系确定了双峰土水特征曲线基本参数。最后, 用试验数据验证了本文方法的可行性, 即根据窄吸力或广吸力范围内有限试验数据点, 利用本文的方法可较准确地确定土水特征曲线的基本参数。

### 参考文献:

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [2] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Géotechnique, 1999, 49(2): 143 – 159.
- [3] ALONSO E E, PEREIRA J M, VAUNAT J, OLIVELLA S. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2010, 60(12): 913 – 925.
- [4] LU N, GODT J W, WU D T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil[J]. Water Resources Research, 2010, 46(5): W05515.
- [5] ZHOU A N, SHENG D C, CARTER J P. Modelling the effect of initial density on soil water characteristic curves[J]. Géotechnique, 2012, 62(8): 669 – 680.
- [6] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513 – 522.
- [7] AGUS S S, LEONG E C, SCHANZ T. Assessment of statistical models for indirect determination of permeability functions from soil-water characteristic curves[J]. Géotechnique, 2003, 53(2): 279 – 282.
- [8] 张昭, 刘奉银, 张国平. 土在全含水率范围内持水及非饱和渗透特性的模型描述[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2069 – 2077. (ZHANG Zhao, LIU Feng-yin, ZHANG Guo-ping. Models for water retention and unsaturated permeability in full range of water content[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2069 – 2077. (in Chinese))
- [9] KIM W, BORDEN R H. Influence of soil type and stress state on predicting shear strength of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(12): 1886 – 1900.
- [10] SHENG D C, FREDLUND D G, GENS A. A new modeling approach for unsaturated soils using independent stress variables[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(4): 511 – 534.
- [11] FREDLUND D G, XING A. Equation for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521 – 532.
- [12] SIMMS P H, YANFUL E K. Measurement and estimation of pore shrinkage and pore distribution in a clayey till during soil-water characteristic curve tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(4): 741 – 754.
- [13] LI X, ZHANG L M. Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(2): 129 – 141.
- [14] BURTON G J, SHENG D, CAMPBELL C. Bimodal pore size distribution of a high-plasticity compacted clay[J]. Geotechnique Letters, 2014, 4: 88 – 93.
- [15] MIGUEL M G, BONDER B H. Soil-water characteristic curves obtained for a colluvial and lateritic soil profile considering the macro and micro porosity[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2012, 30(30): 1405 – 1420.
- [16] 孙德安, 高游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔

- [隙分布[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 351 - 356. (SUN De-an, GAO You, LIU Wen-jie, WEI Chang-fu, ZHANG Sheng. Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 351 - 356. (in Chinese))
- [17] VAN GENUCHTEN T M. A closed-form predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(44): 892 - 898.
- [18] KOSUGI K. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention[J]. Water Resources Research, 1994, 30(30): 891 - 901.
- [19] LI X, LI J H, ZHANG L M. Predicting bimodal soil-water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 57(4): 85 - 96.
- [20] SATYANAGA A, RAHARDJO H, LEONG E C, et al. Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 48(4): 51 - 61.
- [21] THU T M, RAHARDJO H, LEONG E C. Soil-water characteristic curve and consolidation behavior for a compacted silt[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(3): 266 - 275.
- [22] VANAPALLI S K, SILLERS W S, FREDLUND M D. The meaning and relevance of residual water content to unsaturated soils[C]// Proceedings of 51st Canadian Geotechnical Conference. Edmonton, 1998: 101 - 108.
- [23] 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].岩石力学与工程学报,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))
- [24] ZHAI Q, RAHARDJO H. Determination of soil-water characteristic curve variables[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 42(42): 37 - 43.
- [25] LINS Y, SCHANZ T. Determination of hydro-mechanical properties of sand[J]. Information Sciences, 2005, 181(17): 3570 - 3580.
- [26] 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.

## CNKI推出《中国高被引图书年报》

日前,中国知网(CNKI)中国科学文献计量评价研究中心推出了一套《中国高被引图书年报》,该报告基于中国大陆建国以来出版的422万余本图书被近3年国内期刊、博硕、会议论文的引用频次,分学科、分时段遴选高被引优秀学术图书予以发布。据研制方介绍,他们统计并分析了2013年—2015年中国学术期刊813万余篇、中国博硕士学位论文101万余篇、中国重要会议论文39万余篇,累计引文达1451万条。根据统计数据,422万本图书至少被引1次的图书达72万本。研制方根据中国图书馆分类法,将72万本图书划分为105个学科,分1949-2009年和2010-2014年两个时间段,分别遴选被引最高的TOP10%图书,共计选出70911本优秀图书收入《中国高被引图书年报》。统计数据显示,这7万本高被引优秀图书虽然只占全部图书的1.68%,却获得67.4%的总被引频次,可见这些图书质量上乘,在同类图书中发挥了更加重要的作用。该报告还首次发布各学科“学科h指数”排名前20的出版单位的评价指标,对客观评价出版社的社会效益——特别是学术出版物的社会效益具有重要的参考价值。

该报告从图书被引用的角度出发,评价图书的学术影响力,弥补了以销量和借阅等指标无法准确评价学术图书的缺憾,科学、客观地评价了图书、图书作者以及出版单位对各学科发展的贡献。

《中国高被引图书年报》把建国以来出版图书全部纳入评价范围属国内首创,是全面、客观评价图书学术影响力的重要工具,填补了目前图书学术水平定量评价的空白,在帮助图书馆建设特色馆藏和提高服务水平、帮助出版管理部门了解我国学术出版物现状、帮助科研机构科研管理、帮助读者购买和阅读图书等方面,均具有较强的参考价值,也为出版社评估出版业绩、决策再版图书、策划学科选题提供有用的信息。

《中国高被引图书年报》由《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司出版。该产品的形式为光盘电子出版物,分为理学、工学、农学、医学、人文科学和社会科学6个分卷,随盘赠送图书,欢迎您咨询、订购。咨询电话:010-82710850,82895056转8599, email: aspt@cnki.net。