

潘登丽, 倪万魁, 苑康泽, 等. 2020. 基于 VG 模型确定土水特征曲线基本参数[J]. 工程地质学报, 28(1): 69-76. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-156

Pan Dengli, Ni Wankui, Yuan Kangze, et al. 2020. Determination of soil-water characteristic curve variables based on VG model[J]. Journal of Engineering Geology, 28(1): 69-76. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-156

基于 VG 模型确定土水特征曲线基本参数^{*}

潘登丽 倪万魁 苑康泽 张镇飞 王熙俊

(长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054, 中国)

摘要 土水特征曲线基本参数(进气值、残余吸力值和反弯点的斜率等)在非饱和土的强度理论、渗流理论以及体变特性等方面都是非常重要的参数,常常通过传统画图法来确定,其精确度难以保证。以洛川标准剖面 4 层原状黄土为研究对象,基于 VG 模型提出单峰和双峰 SWCC 基本参数的确定方法;采用滤纸法测得 SWCC 数据点,基于 VG 模型进行最优化拟合,获取拟合参数,利用单峰和双峰 SWCC 数据点验证该方法的可行性;进行自然状态下的水分蒸发试验,根据质量含水率与蒸发时间的关系确定蒸发残余饱和度 S_{ref} ,依据 S_{r1} 、 S_{r2} (S_{r1} 和 S_{r2} 分别由确定残余状态的两种方法得到)与 S_{ref} 的相对误差值,比较了两种确定残余状态的方法。结果表明:对于单峰和双峰 SWCC 曲线,该方法都可以得到合理的基本参数并有效地确定其残余状态。

关键词 土水特征曲线; VG 模型; 进气值; 残余状态

中图分类号: TU443 文献标识码: A doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-156

DETERMINATION OF SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE VARIABLES BASED ON VG MODEL

PAN Dengli NI Wankui YUAN Kangze ZHANG Zhenfei WANG Xijun

(School of Geological Engineering and Surveying Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract The variables of the soil-water characteristic curve (air-entry value, residual suction and slope at the inflection point) are very critical parameters in the strength theory, percolation theory and volume change behavior of unsaturated soil. It is often obtained by conventional graphical method, which is subjective and inaccurate. This study presents the methods for determining the variables of unimodal and bimodal SWCC based on VG model using the measured SWCC data of the four layers of undisturbed loess in Luochuan standard section. SWCC data were measured by filter paper method and best fitted using Van Genuchten's equation. Consequently the best fitting parameters were obtained, and the proposed methods were validated using the measured unimodal and bimodal SWCC data. The water evaporation test in the natural state was carried out. Then the evaporation residual saturation S_{ref} was determined according to the relationship between the mass moisture content and the evaporation time. According to the relative errors between S_{r1} , S_{r2} and S_{ref} (S_{r1} and S_{r2} were acquired from the two methods for determining the residual state, respectively), the comparison was made between the two methods for determining the

* 收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-10-25.

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(资助号: 2017ZDXM-SF-087, 2019ZDLSF05-07).

This research is supported by the Key Research and Development Program of Shaanxi Province(Grant Nos. 2017ZDXM-SF-087, 2019ZDLSF05-07).

第一作者简介: 潘登丽(1993-),女,硕士生,主要从事非饱和土特性研究. E-mail: 120072925@qq.com

通讯作者简介: 倪万魁(1965-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事黄土工程地质的研究. E-mail: niwankui@chd.edu.cn

residual state. The results suggest that the proposed methods can produce reasonable variables and determine the residual state effectively related to the unimodal and bimodal SWCC.

Key words Soil-water characteristic curve; VG model; Air-entry value; Residual state

0 引言

土水特征曲线(SWCC)反映了土中含水量(质量或者体积含水量)与吸力之间的关系(Sillers et al., 2001a, 2001b), 可以由其估计非饱和土的其他工程特性, 如渗透系数, 抗剪强度和体变特性(Cook, 1991; Rao et al., 2011)。以往大量的研究已经提出了很多封闭形式的经验模型来拟合 SWCC 数据点, 提出的每一个经验模型都能很好地拟合 SWCC 的减湿和增湿曲线(Fredlund, 2006)。其中, Genuchten(1980)提出的经验公式是最常用的模型之一, 如式(1)所示。

$$S = \frac{1}{[1 + (a\psi)^n]^m} \quad (1)$$

式(1)为饱和度形式表示的 VG 模型。式中, a , m , n 为拟合参数; ψ 为基质吸力(kPa); S 为饱和度。为了计算方便, 可取 $m = 1 - 1/n$, 此时 VG 模型演变为 Mualem(1976)模型, 只含有两个参数, 形式简单, 应用方便, 是岩土工程文献中常用的模型。

土水特征曲线的基本参数有进气值 ψ_{aev} , 反弯点斜率 K_i 、残余饱和度 S_r 和残余吸力值 ψ_r 等, 准确确定土水特征曲线基本参数是非饱和土强度、渗透性以及本构关系研究的基础(高游等, 2017)。近年来针对 SWCC 的影响因素方面的研究比较普遍(贾宝新等, 2018; 石振明等, 2018; 李同录等, 2019), 但是如何准确地确定 SWCC 基本参数的研究还较少。

目前对 SWCC 残余饱和度 S_r 较为广泛认可的定义是气连通而水不连通时的饱和度, 它在非饱和土水力、力学特性研究中有十分重要的位置。如非饱和土强度预测方面(Bishop, 1959), Bishop 单应力状态变量强度公式中, 需要求解有效应力参数 χ ($0 \leq \chi \leq 1$), 而 Vanapalli 证明该参数可用有效饱和度 S_e ($S_e = (S - S_r) / (1 - S_r)$) 来代替, 其中, S_r 为残余饱和度(Vanapalli et al., 1996); 在非饱和土渗透系数的预测方面, 残余饱和度 S_r 直接或间接应用在很多非饱和和渗透系数模型中, 如 CCG 模型(Childs et al., 1950)、Burdine 模型(Burdine, 1953)和 Mualem 模型(Mualem, 1976)。

残余基质吸力 ψ_r 的众多定义均是属于经验的定义, 没有明确的物理意义和理论支撑。如 Genuchten(1980)把残余基质吸力为 1500 kPa 时土体的状态定义为残余状态。Sillers et al. (2001a, 2001b) 认为残余含水量对应的基质吸力为 3000 kPa, 同时他认为残余状态是土中孔隙水从受毛细作用转变到受吸附力作用的状态, 这种定义方法目前比较流行。

在传统图解法中, 反弯点主要由人为主观确定, 在此点基础上画一条切线, 分别与边界区、残余区土水特征曲线的直线相交, 这 3 条直线两两相交, 得到交点 A 和 R , 如图 1 所示, 分别为进气点和残余点, 从而得到 SWCC 的基本参数。这种方法的精确度依赖于画图人员如何确定反弯点 I , 如图 2 所示, 不同的反弯点会产生不同的 ψ_{aev} , 这些 ψ_{aev} 值有很大差异性 ($\psi_{\text{aev}} = 17, 27, 43$ kPa), 说明传统画图法由于主观的不确定性和个人的判断会产生很大的误差(Soltani et al., 2017)。

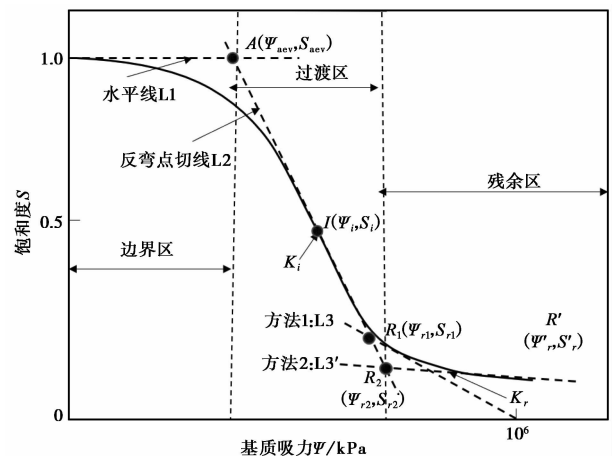


图 1 单峰土水特征曲线基本参数定义

Fig. 1 Definitions of unimodal SWCC variables

如果土水特征曲线的基本参数用 SWCC 拟合参数来表示(如 $\psi_{\text{aev}} = f(a, m, n)$), 就会避免传统画图法带来的误差。Zhai et al. (2012) 利用 Fredlund 和 Xing 模型导出了一系列的公式, 求得进气值和残余吸力值; 高游等(2017)基于修正 Fredlund and 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; Soltani et al. (2017) 利用 4 种常用的以体积含水率表示的 VG 模型 ($m = 1$; $m = 1 -$

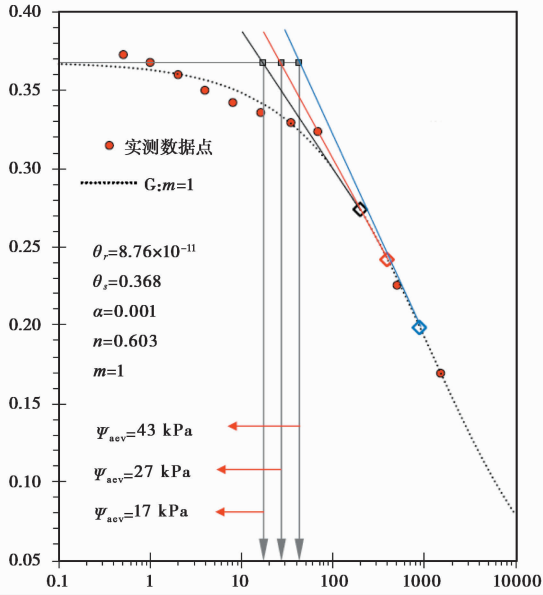


图 2 不同的反弯点会产生不同的进气值
Fig. 2 Different inflection points will lead to different air-entry values

I/n ; $m=1-2/n$; $m \neq 1$) 导出进气值和残余状态吸力值的表达式。相比体积含水率, 饱和度更能直观地反映非饱和土孔隙中充满水的程度。然而, 目前还没有提出有关以饱和度形式表示的 VG 模型的基本参数的表达式, 而且, 如何利用 VG 模型求双峰土水特征曲线基本参数的研究还并未见到。

因此, 本文的目的是提出关于 VG 模型的单峰和双峰土水特征曲线基本参数(进气值, 反弯点斜率和残余吸力值)的确定方法, 再对滤纸法试验测得的数据点进行最优化拟合, 获取拟合参数, 验证此方法的可行性, 再结合蒸发试验结果, 分别得到单峰和双峰 SWCC 残余状态的确定方法。

1 由 VG 模型确定基本参数

土体内部孔隙根据其孔隙分布可分为单峰孔隙分布, 双峰孔隙分布和多峰孔隙分布。当土体中存在 1 组所占比重相对较高的孔隙(优势孔隙)时, 土体即为单峰孔隙分布, 其内部孔隙为颗粒间孔隙, 其土水特征曲线称为单峰土水特征曲线(unimodal SWCC), 如图 1 所示, 曲线只有 1 个陡降段。当土体中存在两组所占比重相对较高的孔隙(优势孔隙), 土体即为双峰孔隙分布, 其内部孔隙主要为集聚体内孔隙和集聚体间孔隙, 其土水特征曲线称为双峰土水特征曲线(bimodal SWCC), 如图 3 所示, 曲

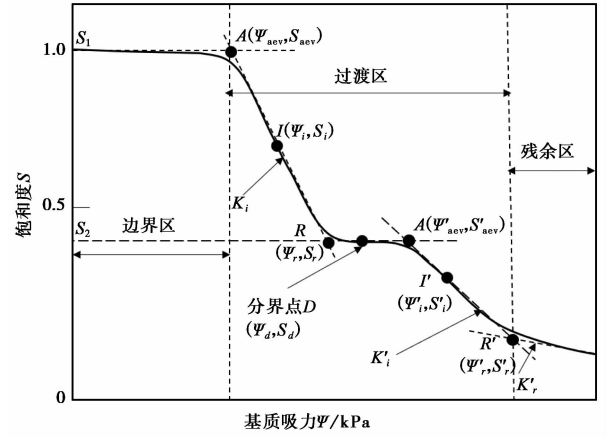


图 3 双峰土水特征曲线基本参数定义
Fig. 3 Definitions of bimodal SWCC variables

线具有两个不同斜率的陡降段和一个水平过渡段(Burton et al., 2014; Li et al., 2014)。因此, 土水特征曲线按孔隙分布类型可分为单峰土水特征曲线和双峰土水特征曲线。

1.1 单峰土水特征曲线基本参数的确定

要准确确定过渡区的切线方程, 反弯点 $I(\psi_i, S_i)$ 的确定至关重要。在数学中, x 是 $f(x)$ 的拐点的必要条件是 $f(x)$ 的二阶导数应该等于 0。因此, VG 模型的 SWCC 函数或式(1)的反弯点(图 2 中的点 I)可以通过以下 3 个步骤得到:

(1) 式(1)先对 $\lg(\psi)$ 求一阶导, 可得到任意吸力值所对应的斜率:

$$K = S'(\psi) = \frac{dS(\psi)}{d\lg\psi} = \psi \times \ln(10) \times \frac{dS(\psi)}{d\psi} = -\frac{\ln(10)mn(a\psi)^n}{[1 + (a\psi)^n]^{m+1}} \quad (2)$$

(2) 式(2)再对 $\lg(\psi)$ 求导:

$$S''(\psi) = \frac{dS'(\psi)}{d\lg\psi} = \psi \times \ln(10) \times \frac{dS'(\psi)}{d\psi} = \frac{\ln^2(10)mn^2(a\psi)^n [m(a\psi)^n - 1]}{[1 + (a\psi)^n]^{m+2}} \quad (3)$$

(3) 最后令式(3)等于 0, 可得反弯点 I 的坐标为:

$$\begin{cases} \psi_i = \frac{1}{am^{1/n}} \\ S_i = \frac{1}{(1 + 1/m)^m} \end{cases} \quad (4)$$

把 $\psi = \psi_i$ 带入式(2)中, 可以得到过反弯点的切线斜率 K_i :

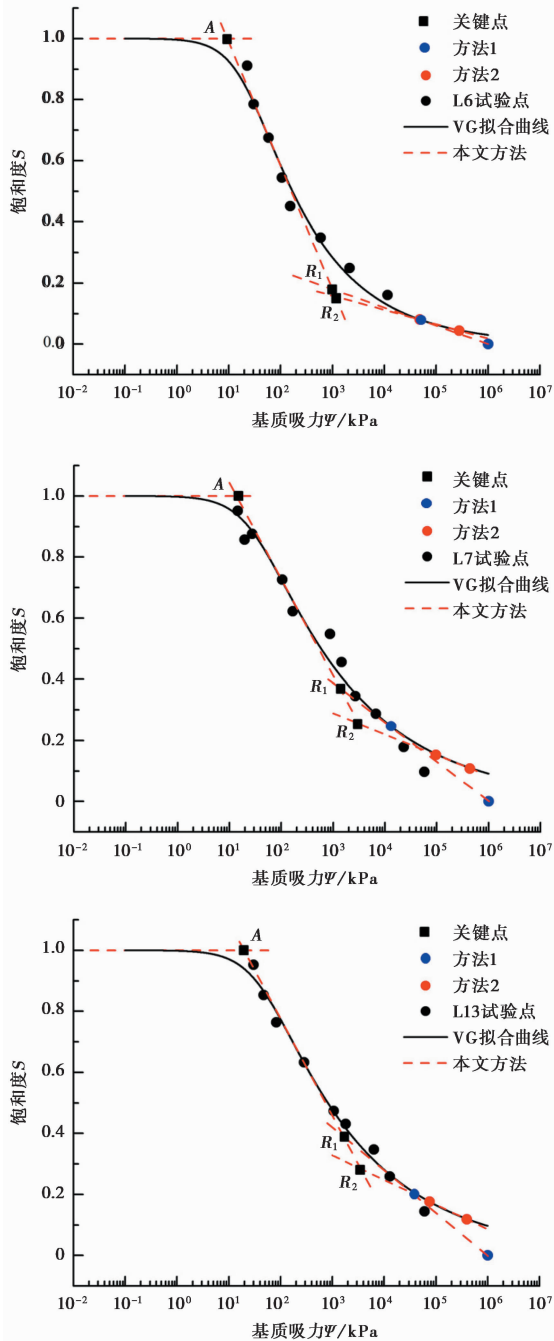


图4 基于本文方法确定单峰SWCC的基本参数
Fig. 4 The variables of unimodal SWCC are determined based on the method in this paper
a. L6; b. L7; c. L13

$$K_i = \frac{dS(\psi)}{d \lg \psi} \Big|_{\psi=\psi_i} = - \frac{\ln(10)n}{(1+1/m)^{m+1}} \quad (5)$$

由式(4)和式(5),可知反弯点的坐标和斜率,据此可得过渡区直线的方程:

$$S = K_i [\lg(\psi) - \lg(1/am^{1/n})] + \frac{1}{(1+1/m)^m} \quad (6)$$

将边界区的水平线方程 $S=1$ 带入式(6),可得

出进气值 ψ_{ave} :

$$\psi_{\text{ave}} = \frac{10^{\frac{1+m}{\ln(10)mn} [1 - (1+1/m)^m]}}{am^{\frac{1}{n}}} \quad (7)$$

残余状态的确定方法有两种。

方法1:已有研究(Fleureau et al., 1993)表明,当土的含水量接近0时,各种类型土的吸力大致相同,都接近于 10^6 kPa。也就是说,土水特征曲线要经过 $(10^6, 0)$ 点。所以经过该点并与SWCC相切的切线(图1中的L3)和反弯点切线L2的交点即为残余点 R_1 。

设L3与SWCC的切点为 (ψ_i, S_i) , 满足两个关系式:

$$\begin{cases} S_i = \frac{1}{[1 + (a\psi_i)^n]^m} \\ K_{r1} = \frac{S_i}{\lg(\psi_i) - \lg(10^6)} \end{cases} \quad (8)$$

K_{r1} 由式(2)确定,但是计算发现,解不出 ψ_i 和 S_i 的解析解。因此只能由点 $(10^6, 0)$ 引出一条直线,大致与拟合曲线相切,得到与L2的交点,即为 $R_1(\psi_{r1}, S_{r1})$ 。

方法2:在曲线近似直线下降的高吸力段(残余区)任取两点 (ψ_1, S_1) 、 (ψ_2, S_2) , 连成直线L3', L3'与L2的交点即为 $R_2(\psi_{r2}, S_{r2})$ 。L3'的斜率 K_{r2} 为:

$$K_{r2} = \frac{S_1 - S_2}{\lg(\psi_1) - \lg(\psi_2)} \quad (9)$$

故直线L3'的方程为:

$$S = K_{r2} [\lg(\psi) - \lg(\psi_1)] + S_1 \quad (10)$$

联立式(6)和式(10),可得残余点的吸力值:

$$\psi_{r2} = 10^{\frac{K_{r2} \lg(\psi_1) + \frac{1}{(1+1/m)^m} S_1 - K_{r2} \lg(\frac{1}{am^{1/n}})}{K_{r2} - K_i}} \quad (11)$$

将式(11)带入式(1),即解得残余饱和度 S_{r2} 。

本文按美国材料与试验协会标准(D18 Committee, 2010)对洛川原状黄土L6、L7、L13进行滤纸法试验,滤纸采用的是国产双圈牌滤纸。待吸力达到平衡后,由滤纸的含水率与滤纸率定公式计算试样的吸力,得到吸力-饱和度的数据点。3层试验黄土的基本物理指标见表1。

先利用VG模型(式1)对SWCC进行拟合,其拟合参数见表2,再根据上述确定单峰土水特征曲线基本参数的方法,在原拟合曲线的基础上分别画出边界区、过渡区和残余区的直线,见图4,最后确定出土水特征曲线的基本参数(表2)。

由表2可知,式(1)对试验点的拟合精度较高,

表 1 洛川原状黄土的基本物理性质

Table 1 Properties of Luochuan undisturbed loess

层号	埋深 /m	含水量 /%	孔隙比	干密度 /g·cm ⁻³	比重	饱和含水率 ω	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	颗粒组成 /%		
										细砂粒	粉粒	黏粒
L6	43	12.10	0.81	1.50	2.72	32.5	29.0	16.5	12.5	9.17	78.54	12.29
L7	48	14.40	0.75	1.54	2.72	30.1	30.1	19.6	11.2	1.32	72.83	25.85
L13	72	9.76	0.74	1.55	2.72	29.4	31.0	19.4	11.6	5.05	81.75	13.20

表 2 单峰土水特征曲线的拟合参数和基本参数

Table 2 Best fitting parameters and variables of the unimodal SWCCs

试验黄土	拟合参数			R^2	SWCC 基本参数				
	a	n	m		ψ_{aev}	$I(\psi_i, S_i)$	K_i	$R_1(\psi_{r1}, S_{r1})$	$R_2(\psi_{r2}, S_{r2})$
L6	0.047	1.326	0.246	0.973	9.41	(61.29, 0.671)	-0.404	(1002, 0.179)	(1136, 0.156)
L7	0.034	1.230	0.187	0.973	13.60	(114.96, 0.708)	-0.316	(1346, 0.370)	(3167, 0.255)
L13	0.024	1.232	0.188	0.989	19.30	(161.57, 0.707)	-0.318	(1627, 0.390)	(3509, 0.284)

均在 0.970 以上; L6、L7、L13 的进气值 ψ_{aev} , 残余吸力值 ψ_r 和残余饱和度 S_r 均随着埋深增大而增大, 而过渡区的直线斜率 K_i 并没有这一规律, 而是 L7 的斜率最小。这可能是由于 L7 的颗粒组成中黏粒含量较高, 细砂粒含量极少, 导致土体在相同的吸力增量下排出的水量较少, 表现为过渡区斜率最小。由图 4 可知, 采用本文提出的方法可以比较精确地确定土水特征曲线的基本参数。传统图解法主要由操作人员人为确定过渡区切线, 有很大的主观性, 而本文方法的精度只依赖于试验数据点和拟合参数, 精度大大提高。

1.2 双峰土水特征曲线基本参数的确定

双峰土水特征曲线可以看成是两个反“S”型 SWCC 曲线的叠加, 其过渡区由两个斜率的下降段和一个水平段组成, 如图 3 所示。低吸力段 SWCC 的下降段由集聚体间孔隙控制, ψ_{aev} 、 ψ_i 、 S_i 、 K_i 、 ψ_r 和 S_r 分别是该下降段的进气值、反弯点 I 的吸力值、饱和度和斜率、残余点 R 的吸力值和饱和度; 高吸力段 SWCC 的下降段由集聚体内孔隙控制, ψ'_{aev} 、 ψ'_i 、 S'_i 、 K'_i 、 ψ'_r 和 S'_r 分别是该下降段的进气值、反弯点 I' 的吸力值、饱和度和斜率、残余点 R' 的吸力值和饱和度。

以集聚体间孔隙和集聚体内孔隙的孔径分界点 $D(\psi_d, S_d)$ 为分界点, 将双峰土水特征曲线分为 $10^{-1} \sim \psi_d$ 和 $\psi_d \sim 10^6$ 两部分, 用式 (1) 进行分段拟合, 获得拟合参数分别为 a_0, n_0, m_0 和 a_1, n_1, m_1 (m 满足 $m = 1 - 1/n$), 这些参数将分别用于 $10^{-1} \sim \psi_d$ 段和 $\psi_d \sim 10^6$ 段的土水特征曲线基本参数的确定。

压汞试验得到的孔径分布曲线可获得集聚体间孔隙和集聚体内孔隙的分界孔径 D_d , 用 Young-Laplace 方程可换算出等价基质吸力:

$$\psi_d = \frac{4T_s \cos \alpha}{D_d} \quad (12)$$

式中, T_s 为水-气交界面上的表面张力系数, 当水与空气界面温度为 20 °C 时, $T_s = 0.07275 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; α 为土颗粒与孔隙水之间的接触角, 一般取 0。

$10^{-1} \sim \psi_d$ 段土水特征曲线基本参数的确定: 该段反弯点坐标 (ψ_i, S_i) 及反弯点处的斜率 K_i 和式 (4)、式 (5) 相同, 相应地过渡区直线方程和式 (6) 相同, 将边界区的水平线方程 $S_1 = 1$ 带入式 (6), 可得出进气值 ψ_{aev} 和式 (7) 相同。式 (12) 带入式 (1) 得到 S_d , 将过渡区水平线方程 $S_2 = S_d$ 带入式 (6), 可得到 $10^{-1} \sim \psi_d$ 段集聚体间孔隙所对应的残余点坐标 $R(\psi_r, S_r)$:

$$\begin{cases} S_r = S_2 \\ \psi_r = \frac{10^{\frac{1+m_0}{\ln(10)m_0n_0} [1-S_2(1+1/m_0)m_0]}}{a_0 m_0^{1/n_0}} \end{cases} \quad (13)$$

$\psi_d \sim 10^6$ 段土水特征曲线基本参数的确定: 该段 SWCC 拟合公式需要进行修改为:

$$S_m = \frac{S_d}{[1 + (a\psi)^n]^m} \quad (14)$$

则相应地 $S'_m(\psi)$ 、 $S''_m(\psi)$ 为:

$$S'_m(\psi) = S_d S'(\psi) \quad (15)$$

$$S''_m(\psi) = S_d S''(\psi) \quad (16)$$

同样地, 令式 (16) 等于 0, 可得反弯点 I' 的坐标为:

$$\begin{cases} \psi'_i = \frac{1}{a_1 m_1^{1/n_1}} \\ S'_i = \frac{S_d}{(1 + 1/m_1)^{m_1}} \end{cases} \quad (17)$$

把 $\psi = \psi'_i$ 带入式(15)中,可以得到过反弯点的切线斜率 K'_i :

$$K'_i = - \frac{S_d \ln(10) n_1}{(1 + 1/m_1)^{m_1+1}} \quad (18)$$

由式(17)和式(18)可得 $\psi_d \sim 10^6$ 段下降段切线方程为:

$$S = K'_i [\lg(\psi) - \lg(\psi'_i)] + S'_i \quad (19)$$

将过渡区的水平线方程 $S_2 = S_d$ 带入式(19),可得 $\psi_d \sim 10^6$ 段的进气值点 $A'(\psi'_{aev}, S'_{aev})$, 计算结果表明, $\psi_d \sim 10^6$ 段 ψ'_{aev} 的表达式与式(7)完全相同,只需要把 a, n, m 替换为 a_1, n_1, m_1 即可。

$\psi_d \sim 10^6$ 段集聚体内孔隙所对应的残余点坐标 $R'(\psi'_r, S'_r)$ 的计算与单峰土水特征曲线相同,按 1.1 节中确定残余状态的两种方法来确定。

图5为洛川原状黄土 L1 的孔径分布图(李云峰, 1994),其基本物理性质指标见文献(袁志辉等, 2015)。由图可大致估计出集聚体间孔隙和集聚体内孔隙的分界孔径 D_d 约为 $0.5 \mu\text{m}$,由式(12)可换算出等价基质吸力为 582 kPa ,即 $\psi_d = 582 \text{ kPa}$,表示在图 6 中。图 6 表示以 $\psi_d = 582 \text{ kPa}$ 为分界线,利用式(1)和式(14)分别对 L1 原状黄土土水特征曲线进行分段拟合的曲线图,拟合参数表见表 3。按照上述方法确定洛川原状黄土 L1 双峰土水特征曲线的基本参数,结果见表 4。由图 6 可知,该法可较好地拟合双峰土水特征曲线。

表 3 双峰土水特征曲线的拟合参数

Table 3 Bimodal SWCC best fitting parameters

L1	拟合参数			R^2
	a/kPa^{-1}	n	m	
$10^{-1} \sim \psi_d$ 段	0.161	1.283	0.221	0.964
$\psi_d \sim 10^6$ 段	$3\text{E}-4$	1.436	0.304	0.991

表 4 双峰土水特征曲线的基本参数

Table 4 Bimodal SWCC variables

$10^{-1} \sim \psi_{aev}/\text{kPa}$	$I(\psi_i, S_i)$	K_i	$R(\psi_r, S_r)$	—
ψ_d 段	2.79 (20, 0.686)	-0.366 (144.5, 0.376)	—	—
$\psi_d \sim \psi'_{aev}$	$I'(\psi_i, S_i)$	K'_i	$R_1(\psi_{r1}, S_{r1})$	$R_2(\psi_{r2}, S_{r2})$
10^6 段	1344 (7096, 0.239)	-0.184 (29847, 0.125)	(50938, 0.083)	—

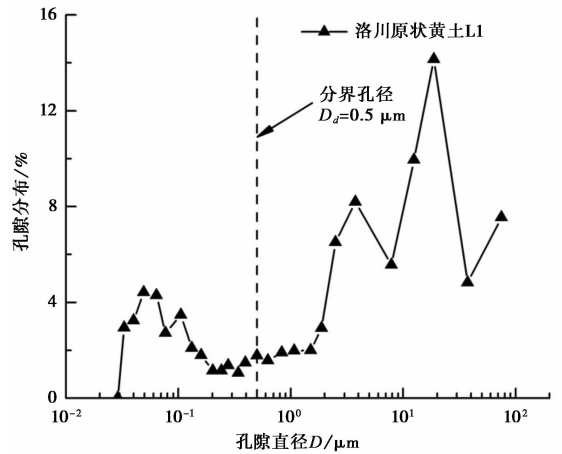


图 5 洛川原状黄土 L1 的孔径分布图

Fig. 5 Pore size distribution of Luochuan undisturbed loess L1

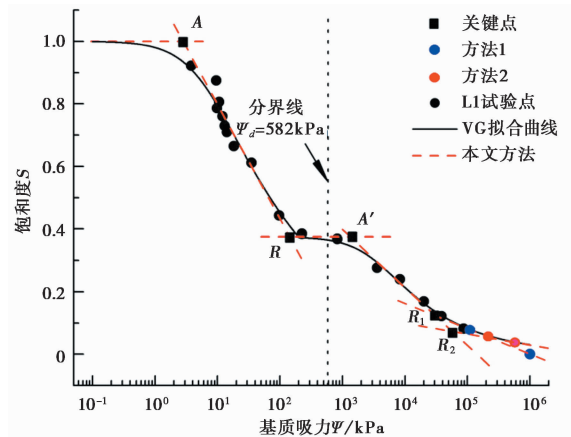


图 6 基于本文方法确定双峰 SWCC 的基本参数

Fig. 6 The variables of bimodal SWCC are determined based on the method in this paper

2 蒸发试验及残余状态的确定

第 1 节里提出了两种确定残余状态的方法,由表 2 和表 4 可知,这两种方法确定的残余状态相差较大,残余饱和度相差最大的 L7 达到了 11%,而 L1 的残余吸力值 ψ_{r1} 和 ψ_{r2} 竟相差了 $2 \times 10^4 \text{ kPa}$,因此,究竟哪种方法可以有效地确定残余状态?

陶高梁等(2018)通过进行模型拟合、水分蒸发试验以及核磁共振试验,得出这样的结论:水分蒸发试验是确定残余含水率有效可行的直接方法。因此,本文将采用蒸发试验获取残余含水率,从而判断第 1 节的两种方法的准确性。

取 L1、L6、L7、L13 的原状环刀样,每层 2 个平行试验,利用真空饱和法进行饱和,置于温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温箱里,自然风干,隔一定时间称量环刀

样总质量,得出土中含水量和蒸发时间的关系(图7)。

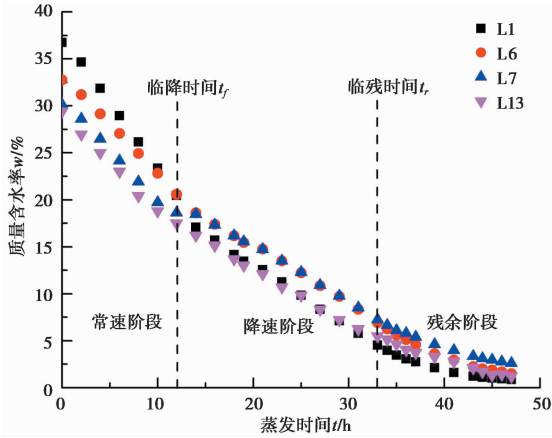


图7 洛川原状黄土蒸发试验结果

Fig. 7 Evaporation test results of Luochuan undisturbed loess

由图7中土中含水量随时间的变化规律可知,不同层原状黄土的蒸发过程可明显分为3个阶段:常速率阶段、降速阶段和残余阶段(唐朝生等,2011),符合一般土体水分蒸发的3个阶段。

按陶高粱等(2018)中定义分界时间点的方法,由图7可确定降速阶段和残余阶段的分界时间点(临残时间 t_r'), t_r' 对应的含水率即为残余含水率 ω_r 。利用图7的试验结果就可以确定残余含水率 ω_r ,最后结合质量含水率与饱和度之间的关系式(20)得到蒸发残余饱和度 $S_{r,f}$,结果如表5所示。分别计算 $S_{r,1}$ 、 $S_{r,2}$ 与 $S_{r,f}$ 之间的相对误差,列于表5。

$$S_{r,f} = \frac{\omega_r G_s}{e} \quad (20)$$

式中, ω_r 为残余质量含水率; G_s 为土粒比重; e 为土体的孔隙比。

表5 $S_{r,f}$ 值以及 $S_{r,1}$ 、 $S_{r,2}$ 与 $S_{r,f}$ 的相对误差计算结果

Table 5 $S_{r,f}$ values and the relative errors between $S_{r,1}$ 、 $S_{r,2}$ and $S_{r,f}$

土层	临残时间 t_r'/h	残余含水率 $\omega_r/\%$	残余饱和度 $S_{r,f}$	相对误差 $e_1/\%$	相对误差 $e_2/\%$
L1	33	4.52	0.111	12.8	25.1
L6	33	6.91	0.232	22.9	32.8
L7	33	7.22	0.262	41.3	2.6
L13	33	5.49	0.202	93.3	40.7

通过表5可以看出,蒸发试验得到的残余含水率在4.52%~7.22%之间,彼此相差不大。对于L1,其 $S_{r,1}$ 与 $S_{r,f}$ 的相对误差 e_1 小于 $S_{r,2}$ 与 $S_{r,f}$ 的相对误差 e_2 ,故建议用方法1确定双峰土水特征曲线的残余

状态;对于其余3层黄土,L7、L13的 e_2 远小于 e_1 ,尽管L6的 e_2 大于 e_1 ,但这两种方法确定的残余点 $R_1(1002, 0.179)$ 和 $R_2(1136, 0.156)$ 很接近,故建议用方法2来确定单峰土水特征曲线的残余状态。

黄土是由多种矿物组成,其吸附结合水(薄膜水)的能力主要是由其亲水性黏土矿物决定,非黏土矿物对其水合能力的影响很小(王铁行等,2014)。也就是说,黄土残余含水率的大小由其亲水性矿物的含量多少决定。已有研究表明,残余含水率与矿物成分特性有密切关系(Bates et al., 2013)。土样的矿物成分特性不同,其残余含水率就会不同。采用X射线衍射仪(XRD)分析实验黄土的矿物成分,其主要矿物组成成分如表6所示。

表6 试验黄土的主要矿物成分和含量

Table 6 The main mineral composition and content of the loess

矿物	L1	L6	L7	L13
石英	51.1	55.5	48.7	58.4
方解石	15.2	12.3	15.4	13.1
斜长石	7.7	11.8	19.0	10.4
绿泥石	9.0	7.0	6.0	7.0
伊利石	8.5	8.0	6.5	7.5

从表6可以看出试验所用的4层洛川黄土的主要矿物成分为弱亲水性的石英、方解石和斜长石,三者的总量为74%~83.1%。试验黄土中的亲水性黏土矿物为绿泥石和伊利石,这两种亲水性黏土矿物的含量在4层黄土中的分布较为均匀,其含量分别相差为3%、2%,可以认为4层试验黄土中的亲水性黏土矿物的含量相差很小,这可以解释4层黄土的残余含水率值相差不大的原因。

3 结论

(1)基于VG模型提出了确定单峰和双峰土水特征曲线基本参数的方法。首先由式(1)进行拟合确定其拟合参数,再根据拟合方程的几何关系求出过渡区和残余区的直线方程,最后由直线交点确定土水特征曲线基本参数。双峰土水特征曲线较单峰土水特征曲线的不同是,要根据孔径分界点将双峰土水特征曲线分成两段,进行分段拟合,分段求基本参数。

(2)用洛川标准剖面4层原状黄土的SWCC试验数据分别验证了求解单峰和双峰土水特征曲线基本参数方法的可行性。利用本文方法可较准确地确

定土水特征曲线的基本参数。

(3)分析蒸发试验结果,建议用方法 1 确定双峰土水特征曲线的残余状态,用方法 2 来确定单峰土水特征曲线的残余状态。

参 考 文 献

- Bates S,Jonaitis D,Nail S. 2013. Sucrose lyophiles: A semi-quantitative study of residual water content by total X-ray diffraction analysis[J]. *European Journal of Pharmaceutics & Biopharmaceutics*, 85(2): 184-188.
- Bishop A W. 1959. The principle of effective stress[J]. *Teknisk Ukeblad*, 39: 859-863.
- Burdine N T. 1953. Relative permeability calculations from pore size distribution data[J]. *Journal of Petroleum Technology*,5: 71-78.
- Burton G,Sheng D,Campbell C. 2014. Bimodal pore size distribution of a high-plasticity compacted clay[J]. *Géotechnique Letters*,4: 88-93.
- Childs E C, Collis-George N. 1950. The permeability of porous materials[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*,201: 392-405.
- Cook F J. 1991. Calculation of hydraulic conductivity from suction permeameter measurements[J]. *Soil Science*,152(5): 321-325.
- D18 Committee. 2016. Standard test method for measurement of soil potential(suction) using filter paper (ASTM D5298-16) [S]. West Conshohocken, PA.
- Fleureau J M, Kheirbekaoud S, Soemtro R, et al. 1993. Behavior of clayey soils on drying-wetting paths[J]. *Canadian Geotechnical Journal*,30(2): 287-296.
- Fredlund D G. 2006. Unsaturated soil mechanics in engineering practice[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(3): 286-321.
- Gao Y,Sun D A. 2017. Determination of basic parameters of unimodal and bimodal soil water characteristic curves[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,39(10): 1884-1891.
- Genuchten M T V. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*,44(4): 892-898.
- Jia B X,Wang H,Zhou L L, et al. 2018. Experimental study on soil-water characteristic curve of aeolian soil roadbed in western Liaoning Province[J]. *Journal of Engineering Geology*,26(3): 633-638.
- Li T L,Fan J W,Xi Y, et al. 2019. Analysis for effect of microstructure on SWCC of compacted loess[J]. *Journal of Engineering Geology*, 27(5): 1019-1026.
- Li X, Li J H, Zhang L M. 2014. Predicting bimodal soil-water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters[J]. *Computers & Geotechnics*,57(4): 85-96.
- Li Y F. 1994. Research on the relationships between permeability and porosity for loess[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Mualem Y. 1976. A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*,12(3): 513-522.
- Rao H R H, Venkataramana K V, Singh D N S N. 2011. Studies on the determination of swelling properties of soils from suction measurements[J]. *Revue Canadienne De Géotechnique*, 48(3): 375-387.
- Shi Z M,Liu W R,Peng M, et al. 2018. Experimental study on soil-water characteristic curve of reticulate red clay and its application in slope stability evaluation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26(1): 164-171.
- Sillers W S, Fredlund D G. 2001. Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering[J]. *Canadian Geotechnical Journal*,38(6): 1297-1313.
- Sillers W S,Fredlund D G,Zakerzadeh N. 2001. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models[M]. Springer Netherlands.
- Soltani A, Azimi M, An D, et al. 2017. A simplified method for determination of the soil-water characteristic curve variables[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, (3): 1-10.
- Tang C S,Shi B,Gu K. 2011. Experimental investigation on evaporation process of water in soil during drying[J]. *Journal of Engineering Geology*,19(6): 875-881.
- Tao G L, Li J, Zhuang X S, et al. 2018. Determination of the residual water content of SWCC based on the soil moisture evaporation properties and micro pore characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*,39(4): 1256-1262.
- Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. *Canadian Geotechnical Journal*,33(3): 379-392.
- Wang T H,Li Y L,Su L J. 2014. Types and boundaries of bound water on loess particle surface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,36(5): 942-948.
- Yuan Z H, Ni W K, Liu R, et al. 2015. Study of shear strength of unsaturated and undisturbed loess based on suction stress[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 38(5): 648-653.
- Zhai Q, Rahardjo H. 2012. Determination of soil-water characteristic curve variables[J]. *Computers & Geotechnics*,42(42): 37-43.
- 高游,孙德安. 2017. 单峰和双峰土水特征曲线基本参数的确定[J]. *岩土工程学报*,39(10): 1884-1891.
- 贾宝新,王荷,周琳力,等. 2018. 辽西风积土路基土水特征曲线试验研究[J]. *工程地质学报*,26(3): 633-638.
- 李同录,范江文,刁羽,等. 2019. 击实黄土孔隙结构对土水特征的影响分析[J]. *工程地质学报*,27(5): 1019-1026.
- 李云峰. 1994. 黄土渗透性与空隙性关系的研究[M]. 北京:地质出版社.
- 石振明,刘巍然,彭铭,等. 2018. 网纹红土土水特征曲线试验研究及其在边坡稳定性评价中的应用[J]. *工程地质学报*,26(1): 164-171.
- 唐朝生,施斌,顾凯. 2011. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. *工程地质学报*,19(6): 875-881.
- 陶高粱,李进,庄心善,等. 2018. 利用土中水分蒸发特性和微观孔隙分布规律确定 SWCC 残余含水率[J]. *岩土力学*,39(4): 1256-1262.
- 王铁行,李彦龙,苏立君. 2014. 黄土表面吸附结合水的类型和界限划分[J]. *岩土工程学报*,36(5): 942-948.
- 袁志辉,倪万魁,刘茹,等. 2015. 基于吸应力的非饱和黄土抗剪强度研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*,38(5): 648-653.