

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.06.016

土水特征曲线参数的概率统计及敏感性分析

谭晓慧, 李丹, 沈梦芬, 侯晓亮, 胡娜

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要:为了研究不同类型土体的土水特征曲线(SWCC)特性,以 Fredlund-Xing 模型的 3 种模式及 van Genuchten 模型的 3 种模式为 SWCC 拟合模型,以 MATLAB 编程语言中的 3 种函数为拟合方法,以 UNSODA 数据库中的黏土、砂土、广西膨胀土及合肥膨胀土为研究对象,对大量的基质吸力-体积含水率数据进行了曲线拟合及参数统计,分析了拟合模型与拟合方法对模型参数的影响,得到了这 4 类土的 SWCC 参数概率分布特征;提出了考虑变量间相关性时对体积含水率进行参数敏感性分析的计算公式。拟合结果表明:拟合方法对 SWCC 参数有一定影响;在低吸力部分,各种拟合模型的 SWCC 基本一致;在高吸力部分,FX2 与 VG2,FX3 与 VG3 的 SWCC 基本一致;体积含水率对参数 a 的敏感性很小,对参数 n 与 m 的敏感性较大。

关键词:非饱和土;土水特征曲线;曲线拟合;统计分析;敏感性分析

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)06-0097-07

Probability Statistics and Sensitivity Analysis of Parameters of Soil-Water Characteristic Curves

TAN Xiaohui, LI Dan, SHEN Mengfen, HOU Xiaoliang, HU Na

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, P. R. China)

Abstract: To study the characteristic of soil-water characteristic curves (SWCC) of several different types of soils, a number of data sets of matric suction-volume water content were studied for UNSODA clay, UNSODA sand, Guangxi expansive soil and Hefei expansive soil. Three types of Fredlund-Xing models and three types of van Genuchten models were used to study the influence of SWCC models, and three types of functions in the scientific programming language MATLAB were applied to analyze the effect of different fitting methods. Through the data fitting and statistic analysis, the probabilistic characteristics of the fitting parameters of SWCCs for the four types of soils were obtained. For analyzing the relative sensitivity of the normalized volume water content to the three fitting parameters of SWCC, a formula which considers the correlation of parameters was proposed. Through the data fitting of many data sets, it is found that the fitting methods influence the value of parameters of SWCC, while the influence is less than that of fitting models from the statistical point of view. The SWCCs of all the models are nearly the same when the suction is low. With the increase of the suction, the SWCCs of FX2 and VG2 are very close, and the SWCCs of FX3 and VG3 are the same. The sensitivity analysis shows that the normalized volume water content is more sensitive to parameters n and m than to parameter a .

Key words: unsaturated soils; soil-water characteristic curve; curve fitting; statistical analysis; sensitivity analysis

收稿日期:2011-09-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40972194);合肥工业大学博士后流动资助项目;中国博士后科学基金资助项目(2011M501039)

作者简介:谭晓慧(1971-),女,教授,博士,主要从事岩土工程的可靠度分析、数值模拟、非饱和土研究,(E-mail)tan-tan9666@126.com。

土水特征曲线 (Soil-water characteristic curve, 简称 SWCC) 表征非饱和土的基质吸力与含水率 (如重力含水率、体积含水率) 或饱和度之间关系, 它包含了土体在任一吸力时孔隙中含有的水量及孔径分布信息, 由土水特征曲线可以得到非饱和土的抗剪强度、渗透系数、体积变化等性质^[1-5]。由于土水特征曲线的重要性, 很多学者对之进行了研究, 并提出了大量有关土水特征曲线的数学模型^[6-7]。文[1, 6-7]通过研究, 指出 Fredlund-Xing 模型 (简称 FX 模型)^[10] 及 van Genuchten 模型 (简称 VG 模型)^[11] 效果较好, 它们适用的吸力范围广, 拟合参数的物理意义明确。采用数学模型来表示 SWCC 的优点在于: 模型的参数可以量化描述曲线的形状, 可用于土体的分类, 可方便地用于估计其它土性参数。在涉及到非饱和土的岩土工程数值分析中, 非饱和土的性质非常重要, 数值分析的结果是否正确在很大程度上依赖于 SWCC 参数等输入数据的可靠性。在进行可靠度分析时, 还需要提供参数的均值、均方差、分布类型等信息。因此, 对 SWCC 模型参数进行概率统计分析是十分重要的。

Sillers 等^[7]通过对二百多组数据的数理统计, 对 8 种土的多种 SWCC 模型及其修正型式求得了模型参数的均值、均方差及中值, 并指出在大多数情况下, 这些拟合参数的变异性都较大。Puppala 等^[8]采用 FX 模型研究了 2 种膨胀土的 SWCC 特征, 并采用线性回归分析的方法求解了模型参数与基本土性参数间的关系。Phoon 等^[9]以 VG 模型为基础, 指出可采用对数正态随机矢量来表示 SWCC 的 2 个拟合参数 a 及 n 。

由于 FX 模型及 VG 模型的拟合效果较好^[1, 6-7], 笔者以这 2 类模型及其修正型式为基础, 研究 SWCC 参数的拟合方法, 分析不同土类的 SWCC 参数的概率分布特征, 并进行参数的敏感性分析。

1 土水特征曲线模型及拟合方法

1.1 SWCC 模型

SWCC 可以通过某种数学模型来表示, 即: 采用某种特定型式的函数来表示试验所得的基质吸力与含水率的关系。笔者以 FX 模型和 VG 模型为基础进行研究。根据具体表达式的不同, 这 2 类模型又分别分为 3 种型式, 具体如下。

1.1.1 FX 模型 文[10]通过对土体孔径分布曲线的研究, 用统计分析理论推导出非饱和土体积含水率与基质吸力之间的对数函数型式的土水特征曲线, 其归一化表达式如下 (FX1 模型):

$$\theta_n = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (1)$$

式中: ψ 为基质吸力; θ 为与基质吸力 ψ 相对应的体积含水率, 其取值范围为 $[\theta_r, \theta_s]$, θ_r 和 θ_s 分别为残余含水率和饱和含水率; θ_n 为归一化的体积含水率 (有效饱和度); a, n, m 为拟合参数 (a 是与进气值有关的吸力值, 对应于曲线的拐点; n 是与孔径分布有关的参数, 对应于曲线的斜率; m 是与曲线拐点处的不对称性有关的参数); e 为自然对数的底。

若在曲线拟合时视残余含水率为零, 则上式变为 (FX2 模型):

$$\theta_n = \frac{\theta}{\theta_s} = \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2)$$

当土体的体积含水率小于残余含水率时, 上述模型常高估了含水率的数值。此时, 可采用下述方法进行修正 (FX3 模型):

$$\theta_n = \frac{\theta}{\theta_s} = C(\psi) \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (3)$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{\psi_r})} \quad (4)$$

式中: $C(\psi)$ 为修正函数, ψ_r 为与残余含水率 θ_r 对应的基质吸力, 一般取 $\psi_r = 3\ 000\ \text{kPa}$ ^[7]。

1.1.2 VG 模型 文[11]通过对土水特征曲线的研究, 得出非饱和土体积含水率与基质吸力之间的幂函数形式的土水特征曲线, 其归一化表达式如下 (VG1 模型):

$$\theta_n = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^m} \quad (5)$$

与 Fredlund-Xing 模型类似, van Genuchten 模型亦可写成如下 2 种型式^[7]:

$$\text{VG2 模型: } \theta_n = \frac{\theta}{\theta_s} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^m} \quad (6)$$

$$\text{VG3 模型: } \theta_n = \frac{\theta}{\theta_s} = C(\psi) \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^m} \quad (7)$$

1.2 SWCC 拟合方法

对于任一组基质吸力-体积含水率试验数据, 为获得上述各种 SWCC 模型的拟合参数, 笔者分别采用科学编程语言 MATLAB 中的非线性回归拟合函数 Nlinfit、最小二乘法拟合函数 Lsqcurvefit 及最优化求最小值函数 Fminsearch 来进行 SWCC 参数的求解。

方法1: Nlinfit 是 Matlab 统计工具箱中的非线性回归函数,它采用 Levenberg-Marquardt 算法来进行非线性回归。它需要的输入值是:待拟合的数据、非线性曲线函数及拟合参数的初值。

方法2: Lsqcurvefit 是 Matlab 优化工具箱中的函数,它采用最小二乘法来求解非线性函数的参数。它需要的输入值除了待拟合的数据、非线性曲线函数及拟合参数的初值以外,还可以限定所需求解参数的范围。

方法3: Fminsearch 属于 Matlab 的基本函数,它采用不需求导数的优化方法来求解无约束多变量函数的最小值。它需要的输入变量是目标函数及参数的初值。笔者定义目标函数值为体积含水率的拟合值与实测值之差的平方和。因此,用这种方法求解参数的实质也是最小二乘法。

2 土水特征曲线的拟合

为了研究各种不同土的 SWCC 形状及特性,分析 SWCC 模型、拟合方法等因素对参数拟合结果的影响,对大量的基质吸力-体积含水率数据进行了参数拟合及统计分析。

2.1 数据来源

2.1.1 UNSODA 数据库中的黏土和砂土

UNSODA是由美国农业部盐度实验室开发的有关非饱和土性质的数据库,全称为非饱和土水力数据库(UNsaturated SOil hydraulic DATabase)^[9]。该数据库包含世界各地约 790 个土样的试验数据,并含有土的分类、试验方法、粒径分布、密度、饱和体积含水率、土样所处环境的温度及降雨量等内容。由于篇幅所限,分别选取该数据库中实验室试验条件下的黏土(clay)与砂土(sand)为研究对象进行曲线拟合。其中,黏土与砂土所包含的基质吸力-体积含水率的数据分别为 23 组及 117 组。

2.1.2 广西膨胀土及合肥膨胀土

UNSODA 数据库中的数据主要是国外土样的试验结果。为了研究中国土体的 SWCC 曲线特征,经过查阅文献,得到了广西膨胀土的 9 组基质吸力-体积含水率数据^[12-13]。

上述 UNSODA 中的数据及广西膨胀土的数据都是由文献中的资料收集而得的,其各组土样的具体取样地点、试验方法及试验条件都不相同。为了研究同一种土、同一种试验方法下 SWCC 的统计规律,以合肥市某工地的膨胀土为例,采用渗析法试验进行了 6 组重复试验,得到了 6 组相同试验条件下的基质吸力-体积含水率数据。

2.2 SWCC 参数拟合结果

2.2.1 影响因素分析

1) 拟合方法对 SWCC 参数的影响

分别采用 3 种拟合方法及 FX1、FX2、FX3、VG1、VG2、VG3 这 6 种模型对 UNSODA 黏土、UNSODA 砂土、广西膨胀土、合肥膨胀土进行 SWCC 参数拟合。大量数据的拟合结果表明:对于同一种 SWCC 模型,采用不同的拟合方法均能得到很好的拟合效果,但它们所得到的拟合参数不完全相同,某些参数值甚至相差较大。例如,表 1 是对 UNSODA 中第 2361 # 黏土采用 FX2 模型进行拟合的结果,各种拟合方法的拟合参数初值相同。表 1 中 R^2 是决定系数,其表达式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \hat{\theta}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2} \quad (8)$$

式中: θ_i 及 $\hat{\theta}_i$ 分别为第 i 个数据的实测值及预测值, $\bar{\theta}$ 为 n 个数据的平均值。

表 1 UNSODA 中 2361 # 黏土的 SWCC 拟合参数值(FX2)

拟合方法	拟合参数			R^2
	a/kPa	n	m	
Nlinfit	329.91	0.51	0.83	0.996 0
Lsqcurvefit	285.04	0.52	0.79	0.996 0
Fminsearch	244.50	0.52	0.75	0.996 0

由表 1 可见,3 种拟合方法所得的拟合参数有一定差别,尤其是 a 值相差较大。但是,各种拟合方法的决定系数都大于 0.99,这表明这 3 种拟合方法的效果都很好。图 1 为各种拟合方法所得的 SWCC 拟合曲线,可见,这 3 种拟合方法所得的 SWCC 拟合曲线几乎相同。因此,对于同一组吸力-体积含水率数据及同一种曲线拟合模型,采用不同的拟合方法可以得到不同的拟合参数值,但是它们都能较好地拟合原有数据。

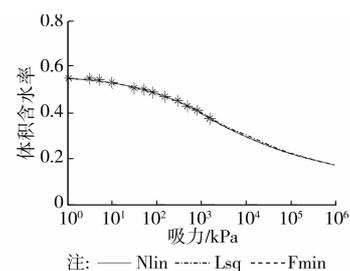


图 1 UNSODA 中第 2361 # 黏土的 SWCC (FX2)

2) 拟合模型对 SWCC 参数的影响

大量数据的拟合结果表明:拟合方法一定时,各种拟合模型所得的 SWCC 曲线参数亦有一定差异。图 2 是对 UNSODA 中第 2361 # 黏土采用 Nlinfit 进行拟合的结果。由图 2(a)可知:FX1、FX2 与 FX3 的差别主要在于高吸力部分。对于低吸力部分,它们的 SWCC 拟合曲线十分接近。由图 2(b)可知,对于 VG 系列模型亦有此规律。

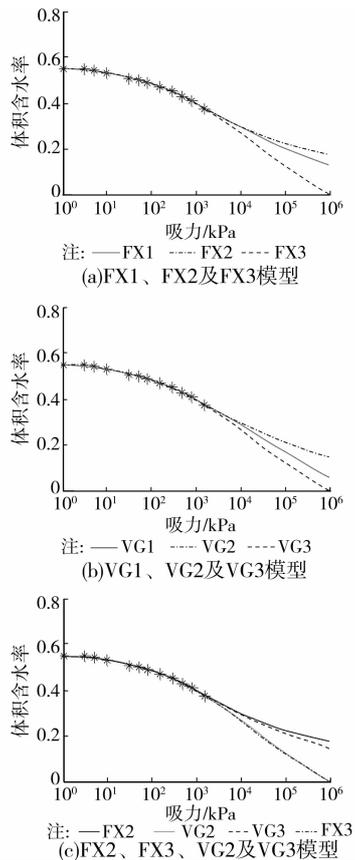


图 2 UNSODA 中第 2361 # 黏土的 SWCC (Nlinfit)

图 2(c) 将 FX2、FX3、VG2 及 VG3 的拟合曲线置于同一图形。尽管这 4 种模型的拟合参数有所不同,但由图 2(c) 可见,在低吸力部分,这 4 种模型的 SWCC 却十分接近;在高吸力部分,FX2 与 VG2 的 SWCC 接近,FX3 与 VG3 的 SWCC 几乎相同。

由于 FX1 及 VG1 都是 4 参数模型(参数: a 、 n 、 m 、 θ_r),而其它 4 个模型都是 3 参数模型(参数: a 、 n 、 m),因此,对于相同数目的试验数据点,FX1 及 VG1 对应的拟合效果相对较差,有时会出现残余含水率为负的不合理现象。后续分析只对 FX2、FX3、VG2 及 VG3 模型进行研究。

2.2.2 SWCC 参数的统计分析 为了研究 SWCC 曲线拟合参数的概率分布特征,基于上述研究,分别对采用 FX2、FX3、VG2、VG3 模型及 3 种

合方法得到的参数 a 、 n 、 m 进行统计分析,求解 UNSODA 黏土、UNSODA 砂土、广西膨胀土及合肥膨胀土的 SWCC 拟合参数的均值、均方差、变异系数、分布类型及参数间的相关系数。在进行参数的统计分析时,根据 3 倍均方差的原则进行异常数据的剔除。统计结果表明:UNSODA 黏土及砂土的 SWCC 拟合参数满足对数正态分布;广西膨胀土及合肥膨胀土由于参与统计的数据组数偏少,未对其统计参数的概率分布类型。4 种土的 SWCC 拟合参数均值统计结果见图 3。

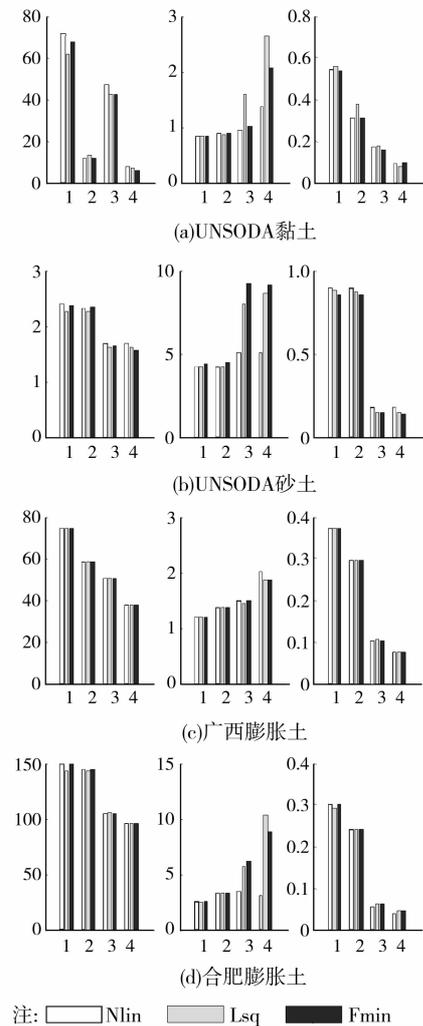


图 3 SWCC 拟合参数的均值

图 3 中,左、中、右图形分别代表参数 a 、 n 、 m 的统计结果;横坐标的数字 1~4 分别代表 FX2、FX3、VG2 及 VG3 模型;纵坐标代表参数 a 、 n 、 m 的均值, a 的单位是 kPa。

由图 3 可知:对于同一种土,SWCC 拟合方法及拟合模型不同时,拟合参数值不同。但是,从统计意义上看,参数 a 、 n 、 m 的均值受拟合方法的影响不大,而受拟合模型的影响较大,即:拟合模型相同但

拟合方法不同时,参数 a 、 n 、 m 的均值有一定变化,但相对变化量较小;拟合方法相同但拟合模型不同时,参数 a 、 n 、 m 的均值有较大变化。

对参数 a 、 n 、 m 的均方差及变异系数进行数理统计,亦可得出上述规律。为简化起见,文中只列出拟合方法 2 及模型 FX2、VG2 对应的拟合参数均值及变异系数,见表 2~5。

表 2 UNSODA 黏土的拟合参数 (Lsqcurvefit)

项目	FX2			VG2		
	a /kPa	n	m	a /kPa	n	m
均值	61.74	0.83	0.55	40.76	1.81	0.18
变异系数	0.79	1.73	1.66	0.74	0.85	0.99

表 3 UNSODA 砂土的拟合参数 (Lsqcurvefit)

项目	FX2			VG2		
	a /kPa	n	m	a /kPa	n	m
均值	2.26	4.22	0.88	1.61	8.20	0.15
变异系数	1.60	1.68	3.56	1.34	1.24	1.62

表 4 广西膨胀土的拟合参数 (Lsqcurvefit)

项目	FX2			VG2		
	a /kPa	n	m	a /kPa	n	m
均值	74.20	1.19	0.37	50.32	1.44	0.10
变异系数	2.51	6.90	2.57	1.87	6.17	2.10

表 5 合肥膨胀土的拟合参数 (Lsqcurvefit)

项目	FX2			VG2		
	a /kPa	n	m	a /kPa	n	m
均值	142.74	2.50	0.29	105.32	5.74	0.06
变异系数	1.58	2.31	2.51	1.10	1.57	0.91

以上述 4 种土的 SWCC 拟合均值为参数,可以绘制各种土的 SWCC 拟合曲线。例如,FX2 模型的 SWCC 曲线如图 4 所示。由该图知:UNSODA 黏土、广西膨胀土及合肥膨胀土的 SWCC 曲线形状较为一致,因为它们同属于黏土;相对于 UNSODA 砂土而言,它们的曲线相对平缓,曲线拐点不明显;而 UNSODA 砂土的 SWCC 曲线之斜率相对较大,曲线拐点相对较为明显。这种现象可结合表 6 进行解释。表 6 是对表 2~5 中 FX2 模型进行汇总得到的,它将 UNSODA 黏土、广西膨胀土及合肥膨胀土汇总为黏土,并统计了其拟合参数均值及变异系数

的变化范围。由表 6 可见,对于均值而言,黏土的 a 值远大于砂土的 a 值,但黏土的 n 及 m 值却分别小于砂土的相应值;但对于变异系数而言,黏土与砂土的变异系数大小无明显区别。对表 2~5 中 VG2 模型进行统计,亦可同到类似的结论。

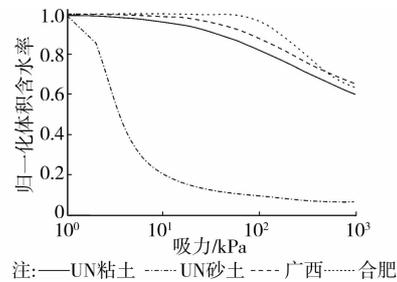


图 4 SWCC 拟合曲线 (FX2 模型, Lsqcurvefit)

表 6 黏土及砂土拟合参数对比分析 (Lsqcurvefit)

项目	FX2		
	a /kPa	n	m
均值	黏土 61.74~142.72	0.83~2.50	0.29~0.55
	砂土 2.26	4.22	0.88
变异系数	黏土 0.79~2.51	1.73~6.90	1.66~2.57
	砂土 1.60	1.68	3.56

2.2.3 SWCC 参数的敏感性分析

为研究 SWCC 参数 a 、 n 、 m 对体积含水率 θ 的影响程度,判断各参数的相对影响,需要进行参数的敏感性分析。

参数的敏感性可以用因变量对自变量的导数来表示。在进行敏感性分析时,SWCC 拟合参数为基本变量,饱和和体积含水率为定值。为消除饱和和体积含水率的影响,此处以归一化的体积含水率 θ_n 为研究对象进行参数的敏感性分析。

对于 FX2 模型,由式(1)可以推导出 θ_n 对 3 个拟合参数的导数公式如下:

$$\frac{\partial \theta_n}{\partial a} = \frac{m n}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^{m+1}} \cdot \frac{1}{e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n} \cdot \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \cdot \frac{1}{a} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta_n}{\partial n} = \frac{-m}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^{m+1}} \cdot \frac{\left(\frac{\psi}{a} \right)^n \cdot \ln \left(\frac{\psi}{a} \right)}{e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta_n}{\partial m} = -\frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \cdot \ln \left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\} \quad (11)$$

对于 VG2 模型,由式(5)可求得 θ_n 对 3 个拟合参数的导数公式为:

$$\frac{\partial \theta_n}{\partial a} = \frac{m n}{a \left[1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^{m+1}} \cdot \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \quad (12)$$

$$\frac{\partial \theta_n}{\partial n} = \frac{-m}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^{m+1}} \cdot \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \cdot \ln \left(\frac{\psi}{a} \right) \quad (13)$$

$$\frac{\partial \theta_n}{\partial m} = -\frac{\theta_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^m} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right) \quad (14)$$

对于 FX3 及 VG3 模型,只需将式(9)~(14)分别乘以修正函数 $C(\psi)$,即可得到其对应的导数求导公式。

为了消除变量单位的影响,文[14]定义了无量纲化的敏感因子。对于系统特性 $P(X)$, $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$,敏感性因子的计算公式为:

$$S_i(x^*) = \left| \frac{\partial P(x^*)}{\partial x_i} \right| \cdot \frac{x_i^*}{P(x^*)} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

式中: $x^* = (x_1, x_2, \dots, x_n)^*$ 为变量 X 的基准值。

当变量间具有相关性时,文[15]定义了可靠指标对参数均值的相对敏感性计算公式。借鉴这种方法,定义体积含水率对各参数的相对敏感性为:

$$S_i(x^*) = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{\partial \theta_n(x^*)}{\partial X_k} \rho_{x_i x_k} \sigma_{x_k}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial \theta_n(x^*)}{\partial X_i} \frac{\partial \theta_n(x^*)}{\partial X_j} \rho_{x_i x_j} \sigma_{x_i} \sigma_{x_j}}} \quad (16)$$

式中: $X = (X_1, X_2, X_3) = (a, n, m)$, σ_{x_i} 为变量 X_i 的均方差; $\rho_{x_i x_j}$ 为变量 X_i 与 X_j 的相关系数; x^* 为变量 X 的基准值,取基准值为变量的均值。

以 FX2 模型及 UNSODA 黏土为例,归一化体积含水率 θ_n 对 3 个变量的相对敏感性见图 5。其中,图 5(a)是假设变量间不相关时的敏感性曲线,图 5(b)是根据参数 a, n, m 的统计结果(参数 a 与 n 、 a 与 m 、 n 与 m 间的相关系数分别为 0.36、0.48、0.33)计算而得的敏感性曲线,它考虑了参数间的相关性。由图 5 可见,对于 UNSODA 黏土,在工程常见的吸力范围内, θ_n 对参数 a 的敏感性很小,对参数 n, m 的变化较为敏感;随着吸力的增加, θ_n 对参数 n 的敏感性逐渐减小,敏感性数值由正转负; θ_n 对参数 m 的敏感性数值为负值,其绝对值在 60 kPa 左右达到最大值;参数间的相关性对参数 a 的敏感性有较大影响,但对参数 n 及 m 的敏感性影响不大。

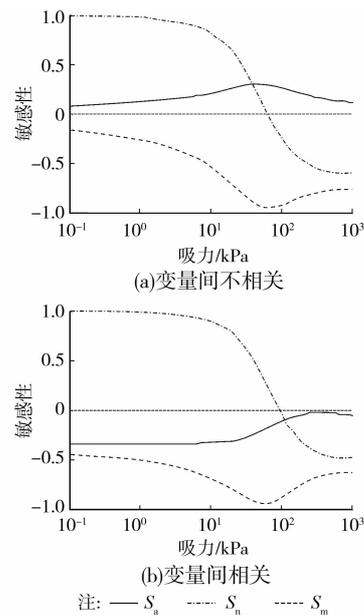


图 5 归一化体积含水率对 SWCC 参数的敏感性 (UNSODA 黏土)

3 结 论

以 Fredlund-Xing 模型的 3 种型式 (FX1、FX2、FX3) 及 van Genuchten 模型的 3 种型式 (VG1、VG2、VG3) 为 SWCC 曲线的拟合模型,以科学计算语言 Matlab 中的 3 种函数 (Nlinfit、Lsqcurvefit、Fminsearch) 为拟合方法,对 UNSODA 数据库中的黏土与砂土、广西膨胀土及合肥膨胀土的大量基质吸力-体积含水率数据进行了曲线拟合,得到了这 4 类土的拟合参数均值、均方差、变异系数、分布类型及参数间的相关系数;求得了这 4 种土的典型 SWCC 曲线;提出了归一化体积含水率对 SWCC 曲线参数的相对敏感性计算公式,进行了参数的敏感性分析。这些研究成果为非饱和土工程的可靠度分析提供了必要的研究基础。

计算结果表明:

1) 拟合方法对 SWCC 拟合参数有一定影响,不同的拟合方法可以得到不同的拟合结果;但从统计意义而言,大量拟合参数的均值、均方差及变异系数受拟合方法的影响不明显。

2) 拟合模型对 SWCC 拟合参数影响较大,采用不同的拟合模型可以得到不同的拟合参数。对于相同数目的数据点,FX2、FX3、VG2、VG3 的拟合效果优于 FX1 及 VG1;FX2、FX3、VG2 与 VG3 在低吸力部分的 SWCC 曲线一致;在高吸力部分,FX2 与 VG2 的 SWCC 接近,FX3 与 VG3 的 SWCC 接近。

3) UNSODA 黏土、广西膨胀土及合肥膨胀土同属于黏土,其 SWCC 曲线形状较为一致,它们的 a 值一般较大, n 值相对较小,曲线拐点不明显,曲线中部的斜率较小。UNSODA 砂土的 a 值较小, n 值较大,曲线拐点较为明显,曲线的斜率相对较大。

4) 敏感性分析结果表明:参数 a 对归一化体积含水率 θ_n 的影响程度较小, θ_n 对参数 a 的变化不敏感,而对参数 n 及 m 的变化则较为敏感。

参考文献:

- [1] 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 Baochun, KONG Lingwei, CHEN Wei, et al. Analysis of characteristic parameters of soil-water characteristic curve (SWCC) and unsaturated shear strength prediction of Jinmen expansive soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1052-1059.
- [2] Miao L C, Houston S L, Cui Y, et al. Relationship between soil structure and mechanical behavior for an expansive unsaturated clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44: 126-137.
- [3] Nuth M, Laloui L. Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils [J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35 (6): 835-844.
- [4] Pedrosa D M, Williams D J. A novel approach for modelling soil-water characteristic curves with hysteresis [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37 (3): 374-380.
- [5] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 土水特征曲线在滑坡预测中的应用性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2569-2576.
LIN Hungchou, YU Yuzhen, LI Guangxin, et al. On application of soil-water characteristic curves to landslide forecast [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2569-2576.
- [6] Nam S, Gutierrez M, Diplas P, et al. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils [J]. Engineering Geology, 2009, 110(1/2): 1-10.
- [7] Sillers W S, Fredlund D G, Zakerzadeh N. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001, 19: 243-283.
- [8] Puppala A J, Punthutaecha K, Vanapalli S K. Soil-water characteristic curves of stabilized expansive soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(6): 736-751.
- [9] Phoon K K, Santoso A, Quek S T. Probabilistic analysis of soil-water characteristic curves [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(3): 445-455.
- [10] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31: 521-532.
- [11] van Genuchten M T. A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.
- [12] 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 Lingwei, LI Xiongwei, GUO Aiguo, 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.
- [13] 谭波, 郑健龙, 余文成. 降雨条件下膨胀土路堑边坡渗流分析[J]. 中外公路, 2009, 29(2): 28-32.
TAN Bo, ZHENG Jianlong, YU Wencheng. Seepage analysis of expansive soil cutting slope subjected to rainfall infiltration [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2009, 29(2): 28-32.
- [14] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995, 128-144.
- [15] 谭晓慧, 王建国, 刘新荣, 等. 边坡稳定的有限元可靠度计算及敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 115-122.
TAN Xiaohui, WANG Jianguo, LIU Xinrong, et al. Finite element reliability computation and sensitivity analysis of slope stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 115-122.