

基于可靠度方法的全基质吸力段土-水特征模型研究

刘青灵, 简文彬, 许旭堂, 聂 闻

A study of the soil-water reliability model in the whole matrix suction range

LIU Qingling, JIAN Wenbin, XU Xutang, and NIE Wen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑基质吸力作用的Newmark改进模型在地震滑坡风险评价中的应用

Application of Newmark improved model considering matrix suction in earthquake landslide risk assessment

冯卫, 唐亚明, 赵法锁, 陈新建 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 154-160

不同类型黏土的强度特性及其预测

Strength of different clayey soils and its prediction

陈嘉伟, 高游, 付俊杰, 李东映 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 101-106

非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究

An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models

魏建柄, 刘卫斌 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 67-73

原状黄土土水特征滞后性研究

A study of hysteresis of soil and water characteristics of intact loess

康海伟, 李萍, 侯晓坤, 李同录, 夏增选, 张辉 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 76-83

不同沉积环境下马兰黄土孔隙分布与土水特征的模式分析

Mode analysis of pore distribution and soil -water characteristic curve of Malan loess under different depositional environments

李同录, 张辉, 李萍, 康海伟, 葛书磊 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 107-114

考虑土参数自相关距离影响的单桩可靠性设计方法

Pile reliability design considering the influence of soil auto -correlation distance

刘超, 袁颖, 左朝晖, 宁志杰, 周爱红 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 122-127



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104033

刘青灵, 简文彬, 许旭堂, 等. 基于可靠度方法的全基质吸力段土-水特征模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 92-100.
LIU Qingling, JIAN Wenbin, XU Xutang, *et al.* A study of the soil-water reliability model in the whole matric suction range [J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 92-100.

基于可靠度方法的全基质吸力段土-水特征模型研究

刘青灵¹, 简文彬², 许旭堂³, 聂 闻⁴

(1. 福州大学紫金矿业学院, 福建 福州 350116; 2. 福州大学环境与资源学院, 福建 福州 350116;
3. 福建农林大学交通与土木工程学院, 福建 福州 350116; 4. 中国科学院海西研究院
泉州装备制造研究所, 福建 泉州 362200)

摘要: 土-水特征曲线是非饱和土入渗和流-固耦合分析的基础, 目前该模型的研究成果由于试验方法和设备的局限, 仅能够得到局部基质吸力段(低吸力或高吸力)的土-水特征曲线; 而如何根据局部试验数据集推断与试验结果相吻合的全基质吸力段范围的土-水特征曲线是一个难题。对东南沿海广泛分布的原状残积土进行了不同基质吸力段的土-水特征试验。根据残积土低吸力段和高吸力段的试验数据, 运用可靠度分析方法, 从土壤孔隙微元破裂失稳的角度, 建立了土壤全基质吸力段的土-水特征模型。根据 UNSODA2.0 数据库提取砂土、粉土、黏土等 3 种类型土样本(52 个)的试验数据, 讨论了模型参数意义和不同土类的模型适用性, 进行了不同土-水特征模型比较分析。对比验证研究表明, 形状参数 σ 和中值比例参数 μ 使提出的模型具有很强的适应性, 并且具有依据局部试验数据(低或高基质吸力段)快速获得全基质吸力段土壤土-水特征曲线的能力。与其它模型相比, 模型计算过程适应性强, 模型决定系数 $R^2 > 0.98$ 。研究结果对快速获取不同类型土壤的全基质吸力段土-水特征曲线具有参考价值。

关键词: 土-水特征模型; 基质吸力; 残积土; 全基质吸力段; 可靠度

中图分类号: P642.11⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0092-09

A study of the soil-water reliability model in the whole matric suction range

LIU Qingling¹, JIAN Wenbin², XU Xutang³, NIE Wen⁴

(1. College of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China; 2. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China; 3. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350116, China; 4. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institute, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou, Fujian 362200, China)

Abstract: Soil-water characteristic curves (SWCCs) are considered as a basis for analyzing fluid-solid coupling of unsaturated soil. How to estimate the SWCC over the whole region with matric suction based on the limited local datasets is challenging. Laboratory test is separately carried out on the ranges with low and high matric suctions of the undisturbed residual soil widely distributed in southeast China. With the test data, a model for SWCCs of soil in the whole range with matric suction is established by applying the reliability analysis method.

收稿日期: 2021-02-02; 修订日期: 2021-04-15

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41861134011; U2005205); 福建省中青年教师科研项目(JAT190001)

第一作者: 刘青灵(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土与工程地质方面的科研工作。E-mail: 957653977@qq.com

通讯作者: 简文彬(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、地质工程方面的科研与教学工作。E-mail: jwb@fzu.edu.cn

Through analysis and verification based on the test data and data of 52 samples of three types of soil (sand, silt-loam and clay) obtained from UNSODA, it is found that the model parameters involved in the model show significant physics meaning. The model can be used to estimate the SWCC of soil within the whole range with matric suction according to part of the data (in the low or high matric suction part). Compared with the other models, the model is robust and is applicable for acquiring SWCCs of different types of soil within the whole range matric suction with $R^2>0.98$. In addition, the model provides an important method to obtain SWCCs of soils with different texture, and is of the reference significance to the geotechnical AI analysis.

Keywords: soil water characteristic curve; residual clay; matric suction; fully matric suction; reliability

土-水特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC)描述的是土壤基质吸力与持水量(饱和度、含水量)之间的量化关系^[1]。其表征了土壤的持水能力、渗透系数^[2]、剪切强度^[3]、颗粒分布^[4-5]。全基质吸力段的土-水特征曲线是降雨型滑坡体进行科学分析评价的前提和基础^[6]。然而,常规的土-水特征曲线试验过程耗时长,并且采用单一的设备或试验方法仅能获得局部基质吸力段(低吸力或高吸力)的土-水特征曲线^[7]。如何根据有限的试验数据集,快速、准确推断该类型土壤的全基质吸力段的土-水特征曲线,并应用于岩土稳定性分析是亟需解决的基础课题^[8-9]。

土-水特征曲线模型的研究起源于 20 世纪 60 年代,基于基质吸力在脱湿和吸湿变化过程中体积变化为 0 的假设, Gardener 等^[10], Brooks 等^[11], Mualem^[12], Fredlund 等^[13]提出了一系列土-水特征曲线模型。这些模型中, VG 模型是岩土工程中最常用的模型^[14]。 Gallipoli 等^[15]提出土-水特征曲线应当考虑土体的变形, Ciervo 等^[16]认为应当引入多峰孔隙密度分布函数表征土-水特征曲线。目前研究多是基于孔隙结构连续分布假设得出土-水特征曲线, 近期研究中计算模型考虑了基质吸力变化过程中土壤的体积变形^[17]这一因素。土-水特征曲线的基本参数有进气值、反弯点斜率、残余饱和度、残余基质吸力值^[18-19]。准确确定这些基本参数是非饱和土强度、渗透性及土体本构关系研究的基础^[20]。测量基质吸力的方法有接触式滤纸法、轴平移法、电/热传导传感器法、张力计法^[21]。目前研究侧重土壤类型^[22]、微观结构^[23]、孔隙分布^[24-25]、密度等因素对土-水特征曲线的影响, 如何建立适应性强的土-水特征曲线模型, 以便应用于岩土大数据分析研究较少。另一方面, 目前土-水特征曲线模型参数多、计算过程复杂, 且不能够适用不同类型的土壤, 这些不利因素限制了模型的广泛使用。

为解决上述问题, 本文尝试引入可靠度分析方法, 从土壤孔隙微元破裂失稳的角度出发, 建立一种新的土-水特征曲线模型。该模型能够依据有限局部

吸力试验数据推断全基质吸力段的土-水特征曲线。

1 土-水特征曲线试验

试验土类型为福建东南沿海广泛分布的残积土(表 1), 该土样的工程地质性质较差, 台风降雨后容易产生崩塌、滑坡、泥石流等不良地质现象。该类型土黏粒含量较大, 小于 0.075 mm 粒径对应的累积含量百分比为 61.4%, 试验用土的平均粒径(D_{50})为 0.050 mm, 有效粒径(D_{10})为 0.008 mm。

表 1 残积土的物理性质

Table 1 Physical properties of the residual clay profiles	
性质	均值
密度/(g·cm ⁻³)	1.48
初始含水率w/ %	15
重度G/(kN·m ⁻³)	14.5
孔隙率e	0.79
塑限/%	30.3
液限/%	41.4
有机质含量/%	0.5
级配系数CU	8.75
曲率系数CC	1.21
有效粒径D ₁₀ / mm	0.008
平均粒径D ₅₀ / mm	0.050

采用英国 GDS 公司生产的 Geo-experts 压力板仪对土体进行试验, 按照《土工试验规程(SL237)》对试样进行抽真空饱和, 然后分 10 级进行加压、脱湿和排水, 获得土体在低基质吸力段(小于 1 000 kPa)的土-水特征曲线, 各级别对应的基质吸力值为 0, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 400, 600 kPa。试验数据记录频率为 12 h/次, 平衡标准为 24 h 内排水小于试样体积的 0.05%。试验装置由压力板仪组件、控制面板、垂直气动加载系统和水体积量测系统 4 部分组成(图 1)。

制备干密度 1.48 g/cm³ 的 7 个环刀黏土样本, 采用滤纸法试验获取土体高基质吸力段(大于 1 000 kPa)的土-水特征曲线^[26], 各试样对应的初始含水率为 10.0%、11.5%、13.5%、15.0%、16.5%、19.0%、20.0%,

不同含水率试样试验 14 d 后, 记录试验结果。根据物理方法计算试验基质吸力^[27]:

$$\psi = -\frac{RT}{V} \ln\left(\frac{P}{P_{sw}}\right) \quad (1)$$

式中: ψ ——基质吸力;

R ——气体常数;

T ——绝对温度;

V ——纯水的摩尔体积;

P ——土样孔隙水的蒸汽压;

P_{sw} ——相对于土样中水溶液的饱和蒸汽压。

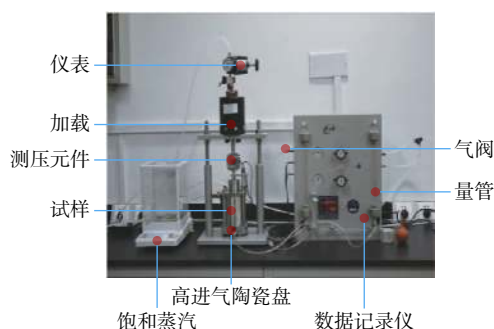


图 1 Geo-experts 压力板仪装置

Fig. 1 Pressure plate apparatus system for SWCC

2 土-水特征模型

固态颗粒、液态水以及气体是大自然中土的 3 个组成部分。土体中的水常分为 2 类, 一类是结合水, 特指受物理分子吸引力吸附于土粒表面的吸附水; 另一类是自由水, 它不受土粒表面电场影响, 可以正常流动, 并传递静水压力^[28]。地下水水位、降雨等外界条件的改变, 将改变土体中自由水的状态。饱和度 S 为^[29]:

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = 1 - \bar{S} \quad (2)$$

式中: θ ——土的含水量;

$\bar{S}$ ——不饱和度。

土体在脱湿(失去水)和湿润(捕获水)的过程中, 结合水的含量受到的影响很微小, 因此土壤的残余饱和度和残余含水率 θ_r 基本保持不变^[30]。

一种给定的土样中虽然土样内部各个孔隙的体积和半径都不相同, 但其总孔隙体积 V 是确定的。将孔隙体积 V 进行离散, 分为 n 个孔隙微元(n 趋向于正无穷)。微元孔隙的半径为 dr , 体积为 dv , 孔隙微元 $\Omega(n) = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ 。在任意时刻, 某一孔隙微元将呈现以下 3 个状态的一种: (1) 自由水逸散, (2) 静止状态, (3) 自由水捕获:

$$\text{sgn}x = \begin{cases} -1 & \text{捕获水} \\ 0 & \text{静止} \\ 1 & \text{水逸散} \end{cases} \quad (3)$$

可靠度分析方法在岩土工程领域得到了广泛的应用^[31-32], 它通常假设研究目标(结构疲劳寿命)满足某种概率分布, 从而获得与实际工程一致的分析结论^[33]。基质吸力间接表达了土体宏观的持水能力, 是微孔隙单元失去水、获得水、静止状态时的宏观体现。因此, 在宏观层面上, 土样的基质吸力与含水状态存在对应关系。某一时刻 i , 数量 N_i 的孔隙微元在外界条件的影响下破裂失稳, 自由水逸散; 孔隙微元随即处于不饱和状态, 基质吸力变化值为 $d\psi$ 。假设土样孔隙微元的破坏服从一种概率分布, 其概率密度是基质吸力 ψ 的函数, 为 $pdf(\psi)$ 。在宏观基质吸力区间 $[\psi, \psi + d\psi]$, 破坏的孔隙微元的数量为 $npdf(\psi)d\psi$; 在基质吸力水平 ψ , 得出破坏的孔隙微元的数量值^[34]:

$$N_i(\psi) = \int_0^\psi npdf(t)dt \quad (4)$$

因此, 孔隙微元破坏失效概率, 对应于土样不饱和度和 $\bar{S}_i$:

$$\bar{S}_i = \frac{N_i}{n} = \frac{\int_0^\psi npdf(t)dt}{n} = \int_0^\psi pdf(t)dt \quad (5)$$

土-水特征曲线描述的是基质吸力空间与含水率分布空间、饱和度分布空间的一一映射关系。因此, 获得土样孔隙微元的破坏概率分布后, 能够建立一个新的模型准确描述土-水特征曲线。

首先, 定义精度为 1×10^{-6} , 采用极大似然估计法(maximum-likelihood, MLE)、最小二乘法获得最优化模型参数 $\hat{\alpha}_e$:

$$l(\alpha) = p(\Omega|\alpha) = p(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n|\alpha) = \prod_{i=1}^N p(\psi_i|\alpha) \quad (6)$$

$$\hat{\alpha} = \operatorname{argmax}_{\alpha} l(\alpha) = \operatorname{argmax}_{\alpha} \prod_{i=1}^N p(\psi_i|\alpha) \quad (7)$$

$$M(\hat{\alpha}_e) = \min \|\vec{S}_e(\hat{\alpha}) - \vec{S}\|_2^2 \quad (8)$$

式中: $l(\alpha)$ ——似然函数;

$\hat{\alpha}$ ——初始参数;

$M(\hat{\alpha}_e)$ ——误差函数;

$\vec{S}_e$ ——土样估计饱和度;

$\vec{S}$ ——饱和度。

采用决定系数 R^2 描述模型与试验值的接近程度:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (S_i - \hat{S}_i)^2}{\sum S_i^2} \quad (9)$$

式中: S_i ——土样试验饱和度值;

$\widehat{S}_i$ ——土样计算饱和度值。

决定系数 R^2 越趋近于 1, 表明模型越能够与试验数据匹配。

采用对数正态分布描述离散孔隙微元破坏失稳从而失去水的概率:

$$f(\psi, \mu, \sigma) = \frac{1}{\psi \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(\ln \psi - \mu)^2 / 2\sigma^2} \quad (10)$$

式中: ψ ——基质吸力;

μ ——变量对数的平均值;

σ ——变量对数的标准差。

将式(10)代入式(5)得到饱和度 S :

$$S = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(\psi) - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right] \quad (11)$$

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt \quad (12)$$

式中: $\operatorname{erf}(u)$ ——高斯误差函数。

将式(11)代入式(5)得到含水率与基质吸力的关系:

$$\theta = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(\psi) - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right] \right) (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (13)$$

基质吸力与含水率的关系:

$$\psi = e^{\left[\sqrt{2} \operatorname{erfcinv} \left(\frac{2(\theta - \theta_r)}{\theta_s - \theta_r} \right) + \mu \right]} \quad (14)$$

式中: $\operatorname{erfcinv}(u)$ ——逆互补误差函数。

3 结果和讨论

3.1 残积黏土的土-水特征可靠度模型

将残积黏土试验结果分为 2 类: 低基质吸力段(基质吸力 $< 1\,000$ kPa)(10 组数据)试验结果, 高基质吸力段(基质吸力 $\geq 1\,000$ kPa)试验结果(7 组数据)。基于本文给出的土-水特征模型, 分 3 种情况建立基质吸力 ψ 与饱和度 S 的关系曲线(图 2):

(1) 依据全部试验数据(17 组), 见图 2(a), 进行土-水特征模型计算, 获得模型参数 $\mu = 5.68$, $\sigma = 2.93$; 此时决定系数 $R^2 = 0.977\,6$ 。

(2) 依据低基质吸力段试验数据(10 组), 见图 2(b), 获得模型参数 $\mu = 5.61$, $\sigma = 2.77$; 此时决定系数 $R^2 = 0.980\,4$ 。

(3) 依据高基质吸力段试验数据(7 组), 见图 2(c), 获得模型参数为 $\mu = 5.64$, $\sigma = 3.05$; 此时决定系数 $R^2 = 0.972\,1$ 。

3 种情况建立基质吸力 ψ 与饱和度 S 的关系曲线, 其对应的模型参数 μ 和 σ 是相近的, 且模型决定系数

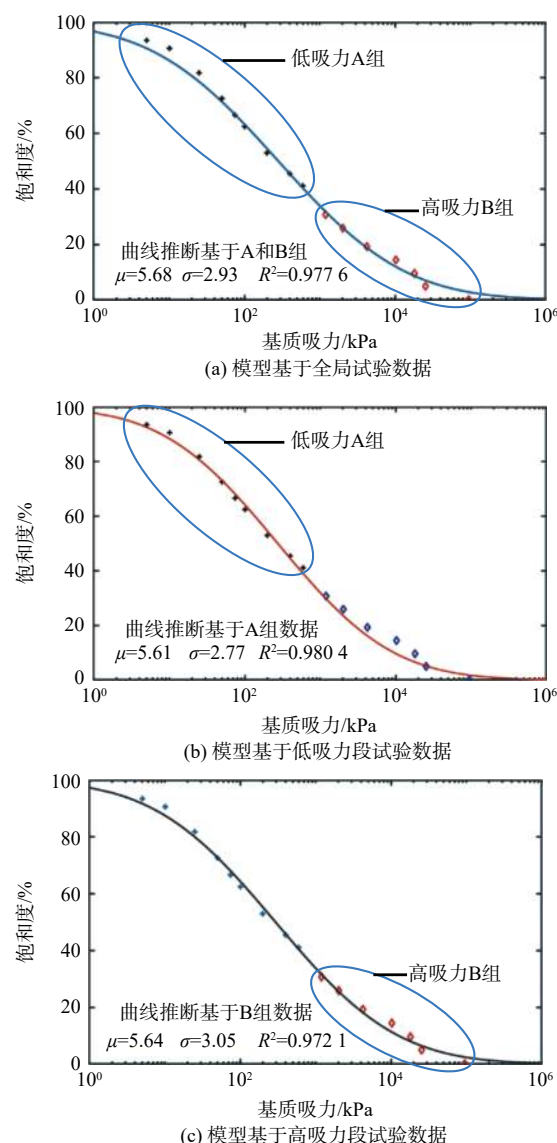


图 2 基于不同来源试验数据推断土-水特征曲线图

Fig. 2 Relationships between the matric suction and saturation of residual soil

R^2 均大于 0.972 1, 接近于 1。因此, 对于福建省东南地区广泛分布的残积黏土, 本文提出的土-水特征模型可以依据局部吸力段试验数据推断该类型土壤全基质吸力段的土-水特征曲线, 并具有良好的匹配关系。针对采用单一的试验设备或方法只能获得部分基质吸力段(低吸力段或高吸力段)试验数据的情况, 运用本文的模型, 可以快速、可靠地获得全基质吸力段的土-水特征曲线。

3.2 孔隙微元失稳概率分布对模型的适用性

对残积黏土土-水特征曲线试验数据, 分别运用可靠度理论中常用的指数分布、正态分布、对数正态分布、韦伯分布、瑞利分布、伽马分布、广义极值分布等 7 种概率模型描述土样孔隙微元破裂失稳的概率

分布(表 2), 建立残积黏性土的土-水特征模型, 讨论不同概率分布条件下模型的适用性。

表 2 基质吸力空间的不同概率描述

Table 2 Different probability distribution models for the test data

编号	概率分布	低基质吸力段组			高基质吸力段组			全基质吸力段		
		MLE <i>a</i>	MLE <i>b</i>	<i>R</i> ² (1)	MLE <i>a</i>	MLE <i>b</i>	<i>R</i> ² (2)	MLE <i>a</i>	MLE <i>b</i>	<i>R</i> ² (3)
1	伽马分布	0.38	2 234.09	0.956 2	0.13	33 749.73	0.762 8	0.28	7 206.14	0.928 4
2	广义极值分布	548.59	362.22	0.975 3	6 123.45	28 758.52	0.601 4	1 103.94	906.40	0.957
3	对数正态分布	5.61	2.77	0.980 4	5.64	3.05	0.972 1	5.68	2.93	0.977 6
4	瑞利分布	315.38	/	0.910 4	894.77	/	0.829 0	318.16	/	0.914 8
5	韦伯分布	627.39	0.47	0.964 5	1 834.35	3.48	0.466 6	948.58	0.37	0.946 4
6	指数分布	385.42	/	0.835 5	1 330.13	/	0.692 8	470.04	/	0.828 8
7	正态分布	384.85	428.29	0.978 2	2 043.83	2 777.75	0.567 2	643.19	886.78	0.965 2

计算结果表明, 采用低基质吸力段局部数据(10 组)建立残积黏性土土-水特征模型时, 不同的概率分布均可以得出全基质吸力段的土-水特征曲线, 此时对数正态概率分布拥有最高的决定系数, R^2 为 0.980 4; 正态概率分布次之, R^2 为 0.978 2。然而, 当采用高基质吸力段局部数(7 组)建立残积黏性的土-水特征模型时, 一些概率分布(如广义极值分布、韦伯分布、正态分布等)不能较好地得出全基质吸力段的土-水特征曲线, 表现为模型参数跳跃, 模型决定系数低于 0.70; 此时对数正态概率分布仍然拥有最高的模型决定系数, R^2 为 0.972 1; 瑞利概率分布次之, R^2 为 0.829 0。因

此, 从土样孔隙微元破裂失稳、失去自由水的假设出发, 基于可靠度理论, 建立土-水特征模型是可行的, 其对不同的概率分布模型具有很强的适应性。采用对数正态分布描述孔隙微元破裂失稳概率时, 土-水特征模型的适用性最优, 其具备根据局部基质吸力试验数据给出全基质吸力段土-水特征曲线的能力, 且模型决定系数趋近于 1.0。

3.3 模型参数分析

典型的土-水特征曲线分为毛细管饱和区、变化饱和区和残余饱和区 3 个区域。本文模型可以表达土-水特征曲线的 3 个区域, 见图 3(a), 此时 $\mu=8, \sigma=$

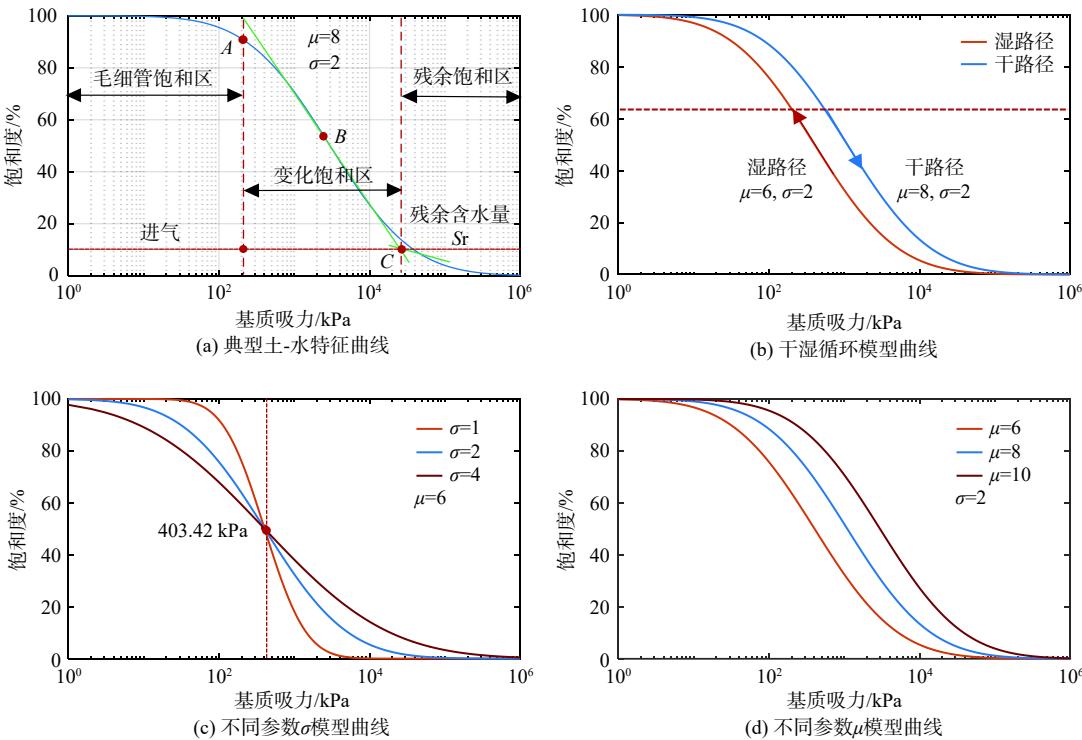


图 3 模型参数与 SWCC 曲线的关系

Fig. 3 Relationship between the model parameters and SWCCs

2. 土壤在脱湿、吸湿工况下, 其对应的土-水特征曲线不同。不饱和土在湿路径下的曲线滞后于干路径的土-水特征曲线, 即同一含水率, 吸湿过程对应于更低的基质吸力。不饱和土孔隙的大小、形状不均匀性分布是滞后效应的主要原因。采用两组模型参数 ($\mu=6, \sigma=2; \mu=8, \sigma=2$) 可以很好地逼近模拟土壤在干路径和湿路径的滞后效应, 见图 3(b)。模型参数 σ 是土壤土-水特征曲线的形状参数, 见图 3(c), σ 越小, 表明在变化饱和区中, 土-水特征曲线中的曲线斜率越大, 下降梯度越大。模型参数 μ 是土壤土-水特征曲线的中值比例参数, 见图 3(d), μ 值越大, 土样完全饱和时对应的基质吸力越大。

3.4 模型在不同土类型的适用性

为了进一步验证本文土-水特征模型对不同类型土壤的适用性, 从美国农业部获得不饱和土的水力性质数据库 (Unsaturated Soil Hydraulic Database, 简称

UNSODA) 提取不同土壤试验数据^[35]。考虑试验结果的代表性和完备性 (图 4), 分别取 31 个砂土样本, 9 个粉砂土样本, 12 个黏土样本 (表 3)。

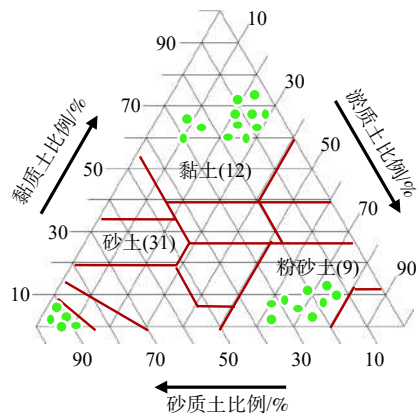


图 4 UNSODA 土壤选择样本类别分布图
Fig. 4 Textural distribution of the 52 samples used in this study

表 3 UNSODA 不同土壤特征试验数据

Table 3 Basic information of the selected soil data from UNSODA						
类型	样本数	UNSODA 编码	数值	密度/(g·cm ⁻³)	粒径试验组数	土-水试验组数
砂土	31	1140 1141 1142 1465	均值	1.58	8	15
		1466 1467 2221 2310 3132 3141 3142 3143	最大值	1.81	16	42
		3144 3153 3154 3155 3162 3163 3164 3165	最小值	1.43	6	10
		3172 3173 3174 3181 3206 4440 4441 4444				
粉砂土	9	4520 4521 4522	均值	1.38	5	13
		2404 2405 2760 2761	最大值	1.56	9	25
		3260 3261 4071 4570	最小值	1.13	3	7
		4671	均值	1.25	6	13
黏性土	12	1400 2361 2362 2620	最大值	1.61	9	25
		2621 2660 3281 3282 4120 4121 4680 4681	最小值	1.03	3	7

对不同类型土壤样本, 运用土-水特征模型, 得出砂土, 粉砂土, 黏土的土-水特征曲线 (图 5), 不同类型土壤的土-水特征模型具有很高的决定系数, $R^2>0.996$ 。砂类土具有最小的模型参数 μ 和 σ ; 黏土类土壤具有最大的模型参数 μ 和 σ , $\mu=6.44, \sigma=3.96$ 。

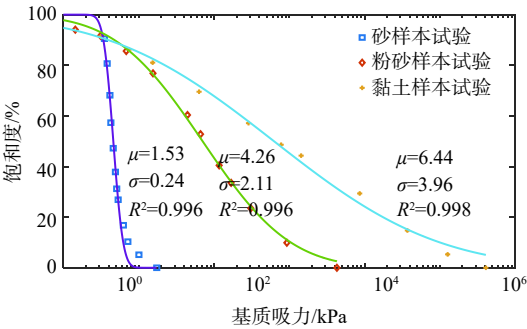


图 5 不同类型土壤的土-水特征曲线
Fig. 5 SWCCs with different soil texures

3.5 模型比较分析

常用的土-水特征曲线模型有 Gardner 模型 (Gard)、Brooks and Corey 模型 (BC)、Van Genuchten 模型 (VG)、Kosugi 模型、Fredlund and Xing 模型等 (表 4)。

表 4 土-水特征曲线模型

Table 4 Different models for the soil characteristic curve	
模型	公式
Gardner (1956)	$S = \frac{1}{1 + \alpha\psi^\beta}$
Brooks and Corey (1964)	$S = \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^{-\beta}$
Fredlund and Xing (1994)	$S = \frac{1}{\left(\ln(e + (\psi/\alpha)^\beta)\right)^\gamma}$
Van Genuchten (1980)	$S = \frac{1}{\left(1 + (\alpha\psi)^\beta\right)^\gamma}$
Kosugi (1994)	$S = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\ln\psi}{2\sqrt{2}\alpha\beta}\right)$
McKee and Bumb (1987)(Boltzman)	$S = \exp(-\psi/\alpha)$

注: S 是饱和度, ψ 是基质吸力值, α, β, γ 是模型参数。

选择常用的 VG 模型、Gard 模型、BC 模型、Kosugi 模型与本文模型进行比较,抽取 UNSODA2.0 数据库中的 3 类土壤样本试验数据进行模型比较验算。根据基质吸力大小和顺序,将不同类型土壤土-水特征试验结果分为 A 组(低基质吸力试验组)和 B 组(高基质吸力试验组)。

(1) 砂土样本(31 个样本)

VG 模型、Garden 模型和本文模型都可以根据有限的低吸力段 A 组数据估计全吸力段的土-水特征曲线,见图 6(a)。但是, Kosugi 模型具有使用局限性,当仅有低吸力段局部数据时,该模型不能应用有限的试验数据推断全基质吸力段的土-水特征曲线。

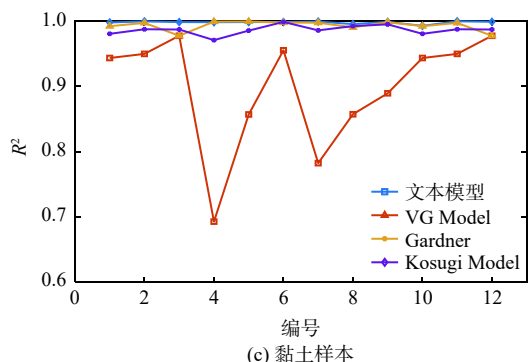
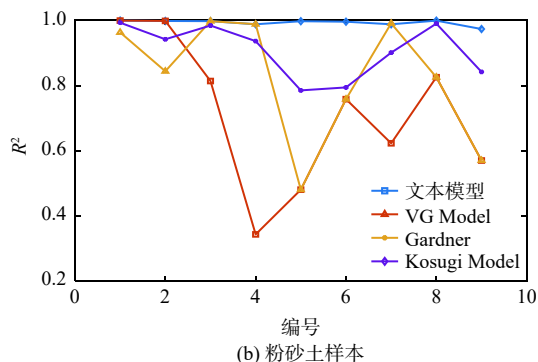
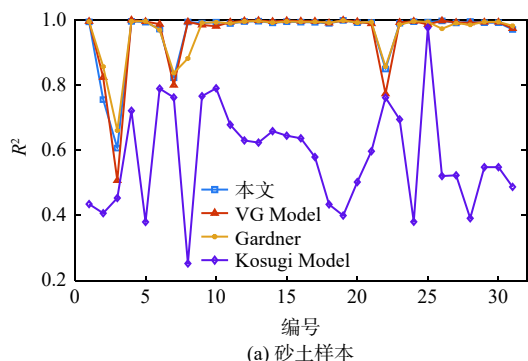


图 6 局部数据推断条件下模型与决定系数关系

Fig. 6 Coefficients of determination of different samples based on the diverse calculation models

(2) 粉砂土样本(9 个样本)

VG、Garden 和 Kosugi 模型都不能很好地根据 A 组局部低吸力段数据推断全基质吸力段的土-水特征曲线,见图 6(b),其决定系数表现出很大的波动性。

(3) 黏土样本(12 个样本)

VG 模型不能很好地根据 A 组局部低吸力段数据推断全基质吸力段的土-水特征曲线,该模型的模型决定系数表现出很大的波动性,见图 6(c)。Garden、Kosugi 模型能较好地根据局部低吸力段局部数据估计全基质吸力段土-水特征曲线,但这 2 种模型的决定系数仍然有小的波动。

不同模型对比结果表明,当采用全部试验数据获得全基质吸力段土-水特征曲线时,上述模型都有很好地匹配关系。然而,当采用 A 组局部试验数据推断全基质吸力段土-水特征曲线时,上述模型表现出局限性。而本文提出模型的决定系数一直趋近于 1,表现出良好的模型匹配关系。

4 结论

(1) 从土样孔隙微元破裂失稳、失去自由水的假设出发,基于可靠度理论,建立土-水特征模型是可行的,其对不同的概率分布模型具有很强的适应性。特别地,采用对数正态分布描述孔隙微元破裂失稳概率时,本文模型的适用性最优。

(2) 试验研究表明,对于福建省东南地区广泛分布的残积黏性土,本文提出的土-水特征模型可以依据局部吸力段试验数据推断该类型土壤全基质吸力段的土-水特征曲线,并具有良好的匹配关系。

(3) 进一步的验证表明,本文模型对于不同类型(砂土、粉砂土、黏土)的土壤样本适应性均很好,不同类型土壤的土-水特征模型决定系数很高。

(4) 与其它土-水特征模型相比,本文模型可以根据低基质吸力段或高基质吸力段的局部试验数据建立土壤全基吸力段的土-水特征曲线;并能够快速获取大量土壤类型的土-水特征曲线,适用于建立各种类型土壤的全基质吸力段土壤土-水特征曲线。

参考文献 (References) :

- [1] FREDLUND D, HOUSTON S. Interpretation of soil-water characteristic curves when volume change occurs as soil suction is changed[C]// Advances in Unsaturated Soils - Proceedings of the 1st Pan-American Conference on Unsaturated Soils, PanAmUNSAT 2013. Colombia: CRC

- Press, 2013: 15 – 31.
- [2] FREDLUND D G, XING A Q, HUANG S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 533 – 546.
- [3] FREDLUND D G, RAHARDJO H, FREDLUND M D. Unsaturated soil mechanics in engineering practice[J]. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2012, 132(3): 286 – 321.
- [4] HAN Z, VANAPALLI S K, ZOU W L. Integrated approaches for predicting soil-water characteristic curve and resilient modulus of compacted fine-grained subgrade soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(5): 646 – 663.
- [5] KOSUGI K, HOPMANS J W. Scaling water retention curves for soils with lognormal pore-size distribution[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(6): 1496 – 1505.
- [6] MERAT S, DJERBAL L, BAHAR R. Numerical analysis of climate effect on slope stability[C]//Second Pan-American Conference on Unsaturated Soils. November 12–15, 2017, Dallas, Texas. Reston: American Society of Civil Engineers, 2017: 308 – 318.
- [7] 徐全, 谭晓慧, 辛志宇, 等. 土水特征曲线的概率分析[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(3): 79 – 85. [XU Quan, TAN Xiaohui, XIN Zhiyu, et al. Probabilistic analysis of the soil-water characteristic curve[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(3): 79 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [8] BORDONI M, BITTELLI M, VALENTINO R, et al. Improving the estimation of complete field soil water characteristic curves through field monitoring data[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 283 – 305.
- [9] JOHARI A, HABIBAGAH G, GHAHRAMANI A. Prediction of SWCC using artificial intelligent systems: a comparative study[J]. *Scientia Iranica*, 2011, 18(5): 1002 – 1008.
- [10] GARDNER W R, HILLEL D, BENYAMINI Y. Post-irrigation movement of soil water: 1. redistribution[J]. *Water Resources Research*, 1970, 6(3): 851 – 861.
- [11] BROOKS R, COREY A. Hydraulic properties of porous media[J]. *Hydrology Papers*, 1964, 3(3): 37.
- [12] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 513 – 522.
- [13] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 521 – 532.
- [14] 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(5): 892 – 898.
- [15] GALLIPOLI D, WHEELER S J, KARSTUNEN M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(1): 105 – 112.
- [16] CIERVO F, CASINI F, PAPA M N, et al. Some remarks on bimodality effects of the hydraulic properties on shear strength of unsaturated soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2015, 14(9): 1 – 12.
- [17] GHORBANI J, AIREY D W, EL-ZEIN A. Numerical framework for considering the dependency of SWCCs on volume changes and their hysteretic responses in modelling elasto-plastic response of unsaturated soils[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, 336: 80 – 110.
- [18] 潘登丽, 倪万魁, 苑康泽, 等. 基于VG模型确定土水特征曲线基本参数[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(1): 69 – 76. [PAN Dengli, NI Wankui, YUAN Kangze, et al. Determination of soil-water characteristic curve variables based on vg model[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(1): 69 – 76. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈东霞, 龚晓南. 非饱和残积土的土-水特征曲线试验及模拟[J]. *岩土力学*, 2014, 35(7): 1885 – 1891. [CHEN Dongxia, GONG Xiaonan. Experiment and modeling of soil-water characteristic curve of unsaturated residual soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7): 1885 – 1891. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 伊盼盼, 牛圣宽, 韦昌富. 干密度和初始含水率对非饱和和重塑粉土土水特征曲线的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(1): 42 – 46. [YI Panpan, NIU Shengkuan, WEI Changfu. Effect of dry density and initial moisture content on soil water characteristic curve of remolded unsaturated silt[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(1): 42 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张爱军, 王毓国, 邢义川, 等. 伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线拟合模型[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(6): 1040 – 1049. [ZHANG Aijun, WANG Yuguang, XING Yichuan, et al. Fitting models for soil-water characteristic curve of total and matrix suctions of Yili loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,

- 2019, 41(6): 1040 – 1049. (in Chinese with English abstract)]
- [22] ALDAOOD A, BOUASKER M, AL-MUKHTAR M. Soil-water characteristic curve of lime treated gypseous soil[J]. *Applied Clay Science*, 2014, 102: 128 – 138.
- [23] 尹振华, 张建明, 张虎, 等. 融化压缩下水泥改良冻土的微观孔隙特征演变[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 97 – 105. [YIN Zhenhua, ZHANG Jianming, ZHANG Hu, et al. Microcosmic pore characteristics evolution of the cement improved frozen soil after thawing compression[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 97 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 胡冉, 陈益峰, 周创兵. 基于孔隙分布的变形土土水特征曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1451 – 1462. [HU Ran, CHEN Yifeng, ZHOU Chuangbing. A water retention curve model for deformable soils based on pore size distribution[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1451 – 1462. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 李同录, 张辉, 李萍, 等. 不同沉积环境下马兰黄土孔隙分布与土水特征的模式分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 107 – 114. [LI Tonglu, ZHANG Hui, LI Ping, et al. Mode analysis of pore distribution and soil-water characteristic curve of Malan loess under different depositional environments[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 107 – 114. (in Chinese with English abstract)]
- [26] DAVID SUITS L, SHEAHAN T C, LEONG E C, et al. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2002, 25(3): 8198.
- [27] LEONG E C. Soil-water characteristic curves - Determination, estimation and application[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2019, 7(2): 21 – 30.
- [28] KOYLUOGLU U. Soil mechanics for unsaturated soils[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1993, 12(7): 449 – 450.
- [29] GAO Y, SUN D A, ZHOU A N, et al. Predicting shear strength of unsaturated soils over wide suction range[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(2): 04019175.
- [30] KRISTO C, RAHARDJO H, SATYANAGA A. Effect of variations in rainfall intensity on slope stability in Singapore[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2017, 5(4): 258 – 264.
- [31] MYERS D E. Reliability and statistics in geotechnical engineering[J]. *Technometrics*, 2005, 47(1): 103 – 104.
- [32] PHOON K K. Reliability-based design in geotechnical engineering: Computations and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [33] XIAO Z P, LÜ Q, ZHENG J, et al. Conditional probability-based system reliability analysis for geotechnical problems[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 126: 103751.
- [34] WANG Q, FANG H B. An adaptive high-dimensional model representation method for reliability analysis of geotechnical engineering problems[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2020, 44(12): 1705 – 1723.
- [35] NEMES A, SCHAAP M G, LEIJ F J, et al. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 251(3/4): 151–162.

编辑: 张若琳