

文章编号: 1000-7598 (2014) 07-1885-07

非饱和残积土的土-水特征曲线试验及模拟

陈东霞^{1,2}, 龚晓南²

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058)

摘 要: 土-水特征曲线是指基质吸力与含水率或饱和度的关系曲线。土-水特征及其相关数学模型可用于非饱和土性质如渗透系数和抗剪强度模型的建立。通常, 土-水特征曲线仅有脱湿曲线。笔者详细讨论了初始含水率、干密度、竖向应力及干湿循环对脱湿曲线的影响。采用滤纸法测试了厦门地区残积土的土-水特征曲线(SWCC)及滞回环。结果表明, 初始含水率对 SWCC 影响较小, 最优含水率干侧试样 SWCC 的进气值小, 滞回环小; 湿侧试样的进气值大, 滞回环大; 最优含水率试样的滞回环居中。初始干密度对 SWCC 有显著影响, 低干密度试样 SWCC 进气值小, 脱湿速率快; 高干密度试样 SWCC 进气值高, 脱湿速率低。滞回环的大小随着初始干密度的减小而增大。不同竖向应力下 SWCC 变化较大。随着竖向应力的增加, 进气值增大, 脱湿速率减小, 滞回环减小并趋于稳定。第 1 次干湿循环对 SWCC 影响最大, 随着循环次数的增加, 进气值减小, 滞回环减小并趋于稳定。由于残积砂质黏性土 SWCC 的过渡区和残余区不易区分, 残余含水率难以确定, 因此, 提出 5 种剔除残余含水率参数的修正 SWCC 模型, 计算分析得出, 修正 Gardner 模型最适合厦门地区残积土的 SWCC 建模。

关键词: 基质吸力; 土-水特征曲线; 土-水特征曲线模型; 残积土

中图分类号: TU 449

文献标识码: A

Experiment and modeling of soil-water characteristic curve of unsaturated residual soil

CHEN Dong-xia^{1,2}, GONG Xiao-nan²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The soil-water characteristic curve (SWCC) is defined as the relationship between the suction and the water content or degree of saturation. The soil-water characteristics and related mathematical models can be used to model the unsaturated soil properties such as the permeability and the shear strength. Conventionally, only the drying soil-water characteristic curve of soil is determined. In this work, the influences of initial water content, initial dry density, the vertical stress and drying and wetting cycles are examined and discussed in detail. The SWCCs and hysteresis loops of residual soils in Xiamen were obtained by the filter paper method. The results show that the initial water content has negligible effect on SWCCs. The specimen at the wet of optimum moisture content (OMC) has the higher air entry value and the larger hysteresis loop than that of the soil specimen at the dry of OMC. The specimen with OMC lies between them. While, the initial dry density has considerable influence on SWCCs. The specimen at lower initial dry density exhibits smaller air entry value and higher rate of desorption than that of the specimen at higher initial dry density. The size of hysteresis loop decreases as the initial dry density increases. The specimens subjected to different vertical stresses have different SWCCs. The higher the applied load on the specimen, the higher the air entry value, the higher the rate of desorption, the smaller the size of hysteresis loop. In the drying and wetting process, the size of hysteresis loop has been substantially affected by the first drying and wetting cycle. With the increasing of drying and wetting cycle, the air entry value and the size of hysteresis hoop decrease. Since the features of soil-water characteristic of sandy clay are not well defined especially for the residual state of saturation, which desaturates continuously without a distinct break point, the residual suction or residual water content, one of the key parameters in the mathematical models of SWCC, is not well defined. As a result five improved models without the residual water content are proposed to describe the SWCCs of residual soil. The improved Gardner model has been found to be the most suitable model for all SWCCs of the residual sandy clay in Xiamen.

Key words: matric suction; soil-water characteristic curve(SWCC); SWCC models; residual soil

收稿日期: 2013-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51209180)。

第一作者简介: 陈东霞, 女, 1976 年生, 博士生, 主要从事残积土工程特性及非饱和土力学工程应用的研究工作。E-mail: dongxiachen@xmu.edu.cn

1 引言

残积土在厦门地区广泛分布, 残积层区约占岛内土地面积的 2/3, 最大厚度可达 70 余米, 是厦门地区工程建设土层的重要组成部分^[1]。工程实践中的土体几乎都是非饱和土, 而非饱和土的渗透性、抗剪强度和持水特性等均与土-水特征曲线存在一定的关系。土-水特征曲线能很好地反映非饱和土性状, 一直以来是非饱和土的研究重点之一。

土-水特征曲线 (soil-water characteristic curve, 以下简称 SWCC) 是吸力与土的含水率或饱和度的关系曲线。SWCC 影响因素众多, 内部因素主要包括土的矿物成分、土颗粒的粒径和级配^[2]、初始含水率^[3-4]、初始干密度^[5-7]、压缩性和结构性^[8]; 外部影响因素主要包括应力历史^[9-10]、围压^[11-12]、干湿循环^[10, 12]及温度^[13]等。已有的 SWCC 试验研究大都是考虑这些因素对脱湿曲线的影响, 且由于仪器量程的局限导致其基质吸力量测范围较小, 通常在几百至几千 kPa 之间, 因此, 大多仅得到完整脱湿曲线的一部分。大部分土体的土-水特征曲线均存在明显的滞回效应, 即脱湿曲线高于增湿曲线, 两者形成滞回环。而关于 SWCC 滞回环的试验数据的文献数量非常有限, 这可能与 SWCC 的试验方法周期长成本高的特点有关 (一个 SWCC 滞回环测试约需 4 个月)。现阶段 SWCC 滞回环的研究更多聚焦于 SWCC 滞回环模型的建立, 如经验模型和域模型。鉴于此, 本文以厦门地区常见的残积砂质黏性土为研究对象, 采用滤纸法测试样的基质吸力, 考虑初始含水率、干密度、竖向应力及干湿循环次数 4 种影响因素, 对 SWCC 及滞回环展开试验研究, 并根据试验结果建立了适用于厦门地区残积砂质黏性土的 SWCC 模型。

2 残积砂质黏性土 SWCC 试验方案

2.1 残积砂质黏性土的基本性质

本试验用土选自厦门某公寓附近土样, 土粒相对密度为 2.69, 液限含水率为 32.1%, 塑限含水率为 18.0%, 塑性指数 $I_p=14.1$, $17 > I_p > 10$, 定名为黏性土。土颗粒中不同粒级土粒质量分数如表 1 所示, 由表 1 可知, 大于 2 mm 粒径土颗粒质量占总重的 8.2%, 大于 5% 小于 10%, 根据《福建省地基基础技术规范》^[14]可定名为残积砂质黏性土。击实试验得到的含水率与干密度的关系曲线如图 1 所示, 由图可知, 最大干密度约为 1.75 g/cm^3 , 其对应的最优含水率约为 17.8%。

表 1 不同粒级土粒质量百分数 (单位: %)

大于 2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.074 mm	0.074~0.005 mm	小于 0.005 mm
8.2	10.2	10.8	9.8	7.0	30.1

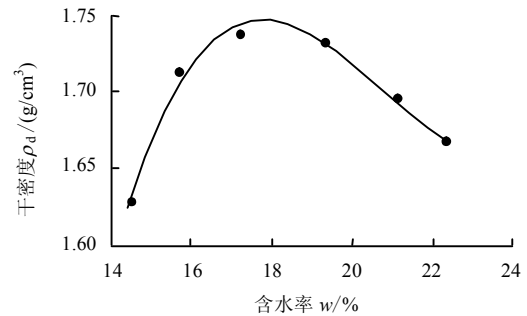


图 1 残积土的击实曲线

Fig.1 Compaction curve of the residual soils

2.2 残积砂质黏性土 SWCC 试验方案

表 2 是残积砂质黏性土的土-水特征曲线试验方案, 其中编号为 SC1、SC2N1、SC3 试样是比较不同初始干密度对 SWCC 的影响, SC2N1、SC4、SC5 试样是比较不同初始含水率对 SWCC 的影响, SC2N1、SC6、SC7 试样是比较不同竖向应力对 SWCC 的影响, SC2N1、SC2N2 和 SC2N3 试样是为了考虑干湿循环次数对 SWCC 的影响。其中, 初始干密度的设计是考虑现有公路或铁路路基规范中对压实土一般要求压实度 (压实度=干密度/最大干密度) 达到 90%、93%、95%进行设计。

SWCC 滞回环试验有助于了解一些填方边坡或路基工程中不同深度处 (含水率、密实度、竖向应力) 及干湿循环对其土-水作用关系的影响。

表 2 SWCC 试验方案

试样编号	初始干密度 / (g/cm³)	初始含水率 / %	压实度 / %	竖向压力 / kPa	干湿循环次数
SC1	1.58	17.8	90	0	1
SC2N1	1.63	17.8	93	0	1
SC3	1.66	17.8	95	0	1
SC4	1.63	14.0	93	0	1
SC5	1.63	22.0	93	0	1
SC6	1.63	17.8	93	100	1
SC7	1.63	17.8	93	200	1
SC2N2	1.63	17.8	93	0	2
SC2N3	1.63	17.8	93	0	3

3 滤纸法测 SWCC 试验

3.1 试样制备

将试验用土烘干碾碎过 2 mm 筛, 采用电动击

实仪分 5 层击实，按照试验方案制备成不同初始含水率或不同初始干密度的土柱，切取直径为 61.8 mm、厚度为 20 mm 的标准土饼装入叠式饱和仪，用真空饱和器抽气饱和后备用。

本试验采用接触滤纸法测量土样的基质吸力。滤纸选用国产双圈牌 No.203 中速型定量滤纸。王钊等^[15]通过试验测试了双圈牌 No.203 型滤纸的基质吸力率定方程如式 (1) 所示，该基质吸力率定方程已被多次应用且已证明其稳定性较高。

$$\left. \begin{aligned} \lg(\psi) &= -0.012w_{fe} + 2.470, w_{fe} > 47\% \\ \lg(\psi) &= -0.076w_{fe} + 5.493, w_{fe} \leq 47\% \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： ψ 为土体基质吸力； w_{fe} 为滤纸含水率。

将饱和试样上、中、下 3 层叠放，每两层土样中间水平放置接触法测试滤纸，滤纸分为 3 层（中间直径为 5 cm，用于测试；上、下直径为 6 cm，起到保护测试滤纸的作用）。用保鲜膜和塑料袋密封后静置 7 d，待滤纸与土样水分平衡后，将滤纸迅速取出并测量，精确到 0.000 1 g，得到滤纸含水率。取两张测试滤纸含水率的平均值，代入式 (1) 即可算出土样的基质吸力。

脱湿和增湿过程分别采用风干脱湿和喷雾器增湿，已知饱和土样下的含水率，通过监测土样质量控制其含水率，用接触滤纸法测量不同含水率下的基质吸力。其中，竖向应力对 SWCC 影响是在常规固结仪中进行试验，抽取及置放滤纸时会有短暂卸荷及再加荷，试验数据将有误差，但仍可反映竖向应力对 SWCC 影响。

3.2 初始含水率对残积砂质黏性土 SWCC 的影响

初始干密度为 1.63 g/cm³ 下不同初始含水率试样为 SC2N1、SC4 和 SC5。SC2N1 为最优含水率， $\omega_{op}=17.8\%$ ，SC4 为 ω_{op} 干侧， $\omega=14.0\%$ ，SC5 为 ω_{op} 湿侧， $\omega=22.0\%$ ，采用滤纸法测得的 SWCC 如图 2 所示。

由图 2 可知，不同初始含水率下 SWCC 脱湿曲线近乎平行，即其脱湿速率几乎相等，说明初始含水率对其脱湿速率影响很小。3 种初始含水率 SWCC 的空气进气值有所不同， ω_{op} 湿侧试样的进气值稍大于 ω_{op} 干侧试样的进气值，这与 Vanapalli^[4] 的试验结果相近。不同初始含水率 SWCC 均存在滞回环，但对滞回环影响较小。其中， ω_{op} 湿侧试样的滞回环最大， ω_{op} 干侧试样的滞回环最小，最优含水率试样的滞回环居中。这主要是由于 ω_{op} 干侧试样中的孔隙呈二元分布（孔隙大小不均匀），进气值较小，不易脱水。 ω_{op} 湿侧试样缺少大孔隙，孔

隙尺寸小且分布均匀，使其空气进气值较大，容易脱水。孔径大小分布越不均匀，其瓶颈效应越弱，相应滞回环越小。反之，孔径大小分布越均匀，瓶颈效应越显著，相应的滞回环越大，如图 3 所示。

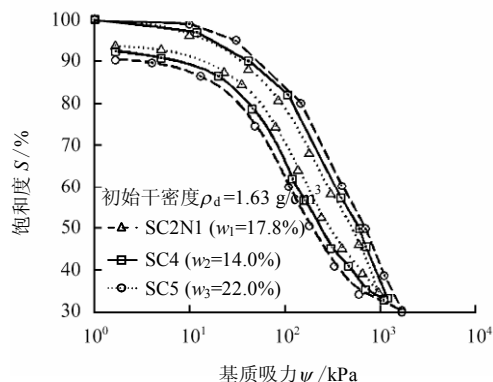


图 2 不同含水率下残积土的 SWCCs
Fig.2 SWCCs of residual soil with different water contents

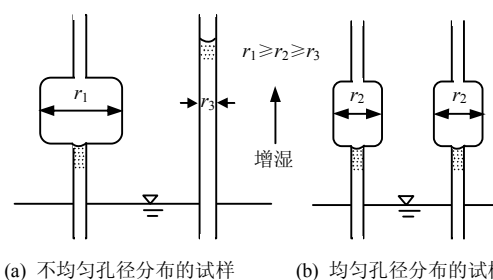


图 3 不同孔径分布试样的瓶颈效应示意图^[10]
Fig.3 Bottleneck effect analogy^[10]

3.3 初始干密度对残积砂质黏性土 SWCC 的影响

用滤纸法测定 SC1、SC2N1 和 SC3 试样在相同初始含水率不同干密度下土样的基质吸力。初始含水率为 17.8% 的各不同干密度下的试样 SWCC 滞回环如图 4 所示。由图可知，初始干密度对 SWCC 有显著的影响，主要体现在 SWCC 过渡区。由 SWCC 脱湿曲线通过作图法可粗略估计 SC1、SC2N1 和 SC3 的进气值分别为 34、43、60.5 kPa。即低初始干密度试样 SWCC 的进气值较小，曲线较陡，脱湿速率快，持水能力较弱；高初始干密度试样的 SWCC 则相反。这主要是由于低干密度试样中大孔隙较多，大孔隙的存在使其在相对较小的吸力条件下就开始且较快地失水，因而具有较低的进气值和较高的脱湿速率；相反，高干密度试样内大孔隙数量少且连通性较差，因而其进气值较高，脱湿速率较低。

从图 4 增湿曲线可知，所有的增湿曲线均达不到完全饱和状态。初始干密度越低的试样，其残余气体的含量所占的比例越大；这主要是由于试样干

密度越低，大孔隙含量相对越高，毛细作用力越难将大孔隙中残留的气体排出，则试样越不易恢复到完全饱和状态。脱湿和增湿曲线形状相似，在过渡区两曲线的斜率几乎相等。

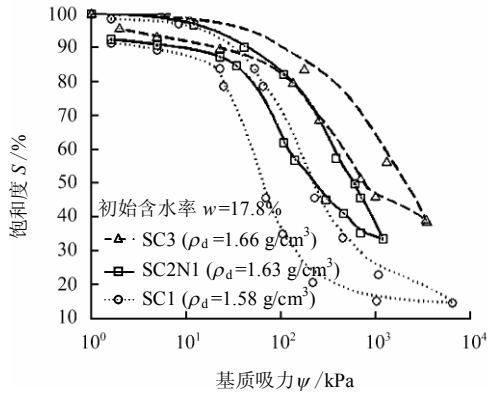


图4 不同干密度下残积土的SWCCs

Fig.4 SWCCs of residual soil with different dry densities

所有的试样SWCC都有大小不等的滞回环。产生滞回特性的原因不仅与瓶颈效应有关，也与脱湿、增湿过程中固-液接触角不同有关。图5采用斜面上水滴图解增湿与脱湿过程中固-液接触角的不同。水滴向下流动的前进面可模拟浸润面，后退面可模拟脱湿面。浸湿面的固-液接触角用 α_w 表示，脱湿面的固-液接触角用 α_d 表示，通常情况下 α_w 大于 α_d ^[16]。SWCC滞回环的大小随初始干密度的增大而减小。低初始干密度的疏松试样与高初始干密度密实试样相比较，其孔隙几何尺寸不均匀程度更显著，由此造成的瓶颈效应亦更显著。因此，其滞回效应亦更显著；此外，大孔径分布的疏松试样与小孔径分布的密实试样相比，前者在脱湿过程和吸湿过程接触角的变化更大，即初始干密度大的试样其($\alpha_w - \alpha_d$)值更大。因此，其滞回效应更加显著。

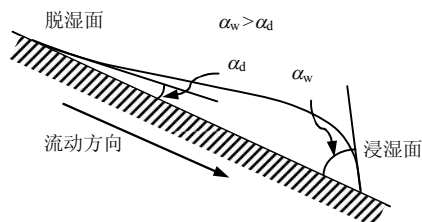


图5 斜面上水滴图解脱湿面与增湿面上固-液接触角^[16]
Fig.5 Water drop on a tilted surface illustrating hysteresis between wetting and drying (advancing and receding) contact angles^[16]

3.4 竖向应力对残积砂质黏性土SWCC的影响

初始干密度为 1.63 g/cm³，初始含水率为 17.8%

的残积砂质黏性土试样在侧限条件下施加不同的竖向应力 σ ，其中 SC2N1 的 $\sigma = 0$ kPa，SC6 的 $\sigma = 100$ kPa，SC7 的 $\sigma = 200$ kPa，采用滤纸法测其SWCC如图6所示。

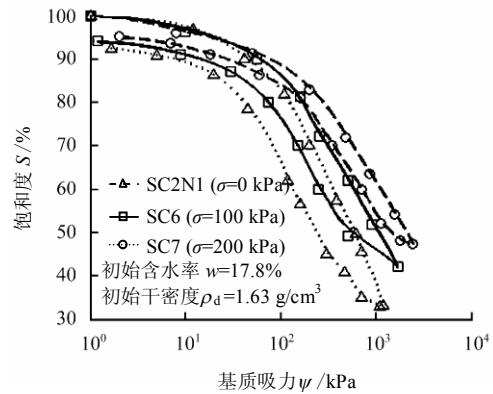


图6 不同竖向应力下残积土的SWCCs

Fig.6 SWCCs of residual soil in different vertical stresses

比较图6、4，不难发现竖向应力与干密度对残积砂质黏性土SWCC影响类似。由SWCC脱湿曲线可知，竖向应力越大，空气进气值越大，脱湿速率越小。这主要是在竖向应力作用下，孔隙比减小导致其试样持水能力增强，进气值增大。SWCC滞回特性随着应力水平的提高而逐渐减弱。从图6可以预测，在竖向应力达到某个数值后，继续增大竖向应力对其SWCC及滞回环大小的影响将越来越小。亦即当竖向应力较大时，土颗粒在外力作用下调整，试样内的孔隙大小及分布均趋于稳定状态，此时施加更大的竖向应力几乎不再影响其SWCC。

3.5 干湿循环对残积砂质黏性土SWCC的影响

对初始含水率为 17.8%，干密度为 1.63 g/cm³的残积砂质黏性土制备了 SC2N1、SC2N2 和 SC2N3 试样，分别经历 1、2、3 次干湿循环，测得的SWCC如图7所示。比较3个试样的脱湿曲线可知，第1次脱湿曲线空气进气值较高，第2、3次脱湿曲线进气值均降低，且第1次干湿循环后，进气值的降幅较大，其后随着干湿循环次数的增加，降幅逐渐减小。每次干湿循环均形成滞回环，第1次干湿循环产生的滞回环最大，随着干湿循环次数的增加，滞回环面积减小且趋于稳定。

SWCC在干湿循环作用下的变化可能主要依赖于干湿循环过程中试样内部结构的变化。增湿过程中，水分进入加厚了土颗粒间的结合水膜，胶结物溶解使部分颗粒发生相对位移后并形成新的稳定结构；脱湿过程中，土骨架收缩使内部结构再次扰动，胶结物溶蚀使部分中小孔隙连通发展成大气孔，另

外失水收缩使部分小孔隙扩大加深。总体上增加了土体大中孔隙数量，因此，第 1 次脱湿曲线进气值较高，滞回环大。干湿循环作用后进气值降低，滞回环减小。随着干湿循环次数增加，内部结构反复调整趋于稳定，这将逐步削弱干湿循环产生的影响。

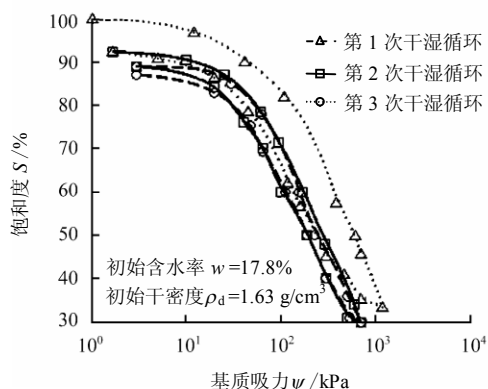


图 7 不同干湿循环次数下残积土的 SWCCs
Fig.7 SWCCs of residual soil in different drying-wetting cycles

4 残积土的土-水特征曲线模型

在土-水特征曲线运用中，大多要求能够用连续函数方式对土-水特征曲线进行描述，因此，相继有许多 SWCC 数学模型，如 Willams^[17]、Gardner^[18]、Brooks^[19]、Mckee^[20]、van Genuchten^[21]、Fredlund^[22]、Farrel^[23]等，这些模型参数多为三参数、四参数甚至更多，且模型参数中含有残余含水率。

三参数的 Gardner 模型为^[18]

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + a\psi^b} \tag{2}$$

三参数的 Mckee & Bumb 模型为^[19]

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \exp\left(\frac{\psi - a}{b}\right)} \tag{3}$$

四参数的 Van Genuchten 模型为^[20]

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]^c} \tag{4}$$

四参数的 Fredlund & Xing1 模型为^[22]

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]\right\}^c} \tag{5}$$

四参数的 Fredlund & Xing2 模型为^[22]

$$\theta = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1\,000\,000}{\psi_r}\right)}\right] \frac{\theta_s}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]\right\}^c} \tag{6}$$

式中： θ 为体积含水率； ψ_r 为残余基质吸力； θ_r 为残余体积含水率； θ_s 为饱和体积含水率； e 为自然对数； a 、 b 、 c 均为模型拟合参数。

由已测得的 SWCC 可知（图 2、4、6、7），厦门地区残积砂质黏性土的 SWCC 呈非典型“S”型曲线，残余含水率不易确定。因此，剔除残余体积含水率，对上述模型进行修正。

修正 Gardner 模型（二参数）为

$$S = \frac{100}{1 + a\psi^b} \tag{7}$$

修正 Mckee & Bumb 模型（三参数）为

$$S = \frac{100}{1 + \exp\left(\frac{\psi - b}{c}\right)} \tag{8}$$

修正 Van Genuchten 模型（三参数）为

$$S = \frac{100}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]^c} \tag{9}$$

修正 Fredlund & Xing1 模型（三参数）为

$$S = \frac{100}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]\right\}^c} \tag{10}$$

修正 Fredlund & Xing2 模型（四参数）为

$$S = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{d}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1\,000\,000}{d}\right)}\right] \frac{100}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]\right\}^c} \tag{11}$$

式中： S 为饱和度； a 、 b 、 c 、 d 均为模型拟合参数。

采用修正模型对上述残积砂质黏性土 SWCC 试验数据进行拟合，拟合优度 R^2 按下式计算：

$$R^2 = 1 - \sqrt{\frac{\sum(S_i - S_{fi})^2}{\sum S_i^2}} \tag{12}$$

式中： S_i 为试验测得试样的饱和度； S_{fi} 为修正 SWCC 模型拟合的饱和度； R^2 为拟合优度。

各修正后的 SWCC 模型拟合优度见表 3。模型的分值按拟合优度的高低记分，拟合优度最高的模型记 5 分，依此类推，拟合优度最低的模型记 1 分，

拟合失败的模型记 0 分。

由表 3 中模型分值知, 拟合优度高低依次为四参数修正 Fredlund & Xing2、三参数修正 Fredlund & Xing1、三参数修正 Van Genuchten、两参数修正 Gardner 模型和三参数修正 Mckee & Bumb 模型, 5 个模型分值分别为 74、68、62、48、17。其中, 修正 McKee & Bumb 模型 $R^2 < 0.9$, 拟合效果较差; 其

余 4 个修正模型 $R^2 > 0.9$, 拟合效果较佳, 均适用于厦门地区残积砂质黏性土的 SWCC 拟合。仅从拟合优度考虑, 最佳 SWCC 模型为修正 Fredlund & Xing2; 综合考虑模型参数及拟合优度, 最佳 SWCC 模型为修正 Gardner 模型。因此, 对于厦门地区残积砂质黏性土的土-水特征曲线可采用修正 Gardner 模型进行模拟。

表 3 修正后的 SWCC 模型拟合优度及得分值
Table3 R^2 and scores of modified SWCC's models

试样编号	试样状态	两参数修正 Gardner 模型		三参数修正 Mckee & Bumb 模型		三参数修正 Van Genuchten 模型		三参数修正 Fredlund & Xing1 模型		四参数修正 Fredlund & Xing2 模型	
		R^2	分值	R^2	分值	R^2	分值	R^2	分值	R^2	分值
		SC1	脱湿	0.969 2	2	0.799 1	1	0.995 4	3	0.999 0	4
SC1	增湿	0.882 5	2	0.837 9	1	0.899 0	3	0.920 6	4	0.955 9	5
SC2N1	脱湿	0.997 6	2	0.707 3	1	0.998 2	4	0.998 1	3	0.998 4	5
SC2N1	增湿	0.962 3	2	0.821 7	1	0.963 1	3	0.964 4	4	0.973 8	5
SC3	脱湿	0.995 5	2	0.794 8	1	0.997 4	4	0.997 2	3	0.998 7	5
SC3	增湿	0.955 1	2	0.810 0	1	0.957 4	3	0.959 3	4	0.972 4	5
SC4	脱湿	0.998 7	5	0.778 9	1	0.998 4	4	0.998 3	3	0.998 0	2
SC4	增湿	0.970 2	2	0.853 5	1	0.970 4	3	0.971 1	4	0.977 1	5
SC5	脱湿	0.998 9	4	0.757 9	1	0.999 0	5	0.998 8	3	0.998 6	2
SC5	增湿	0.949 0	2	0.793 5	1	0.951 1	3	0.953 5	4	0.969 9	5
SC6	脱湿	0.996 2	3	0.685 6	1	0.996 7	4	0.996 9	5	0.995 9	2
SC6	增湿	0.965 1	2	Failed	0	0.965 4	3	0.965 8	5	0.965 6	4
SC7	脱湿	0.998 0	5	0.719 3	1	0.997 6	3	0.997 7	4	0.993 7	2
SC7	增湿	0.974 2	3	0.876 5	1	0.974 2	4	0.974 4	5	0.947 4	2
SC2N2	脱湿	0.995 0	2	0.839 0	1	0.996 7	4	0.996 5	3	0.997 9	5
SC2N2	增湿	0.960 7	2	0.858 4	1	0.962 1	3	0.962 3	4	0.968 3	5
SC2N3	脱湿	0.994 2	2	0.801 3	1	0.995 4	3	0.995 5	4	0.998 8	5
SC2N3	增湿	0.977 1	4	0.870 7	1	0.959 0	3	0.958 9	2	0.982 3	5

5 结 论

以厦门地区非饱和花岗岩残积粘性土为研究对象, 考虑含水率、干密度、竖向应力及干湿循环 4 种影响因素, 采用滤纸法测得较完整的 SWCC 及滞回环, 得到以下结论:

(1) 初始含水率对 SWCC 的影响较小, 不同初始含水率下 SWCC 的脱湿速率几乎相等; 最优含水率干侧试样的进气值小, 滞回环小; 其湿侧试样的进气值大, 滞回环大; 最优含水率试样的滞回环居中。

(2) 初始干密度对 SWCC 有显著影响, 且主要体现在 SWCC 的过渡区; 低干密度试样 SWCC 进气值小, 脱湿速率快, 持水能力较弱; 高干密度试样 SWCC 具有高进气值及低脱湿速率。滞回环的大小随着初始干密度的减小而增大。

(3) 竖向应力对 SWCC 的影响较大。随着竖向应力的增大, SWCC 进气值增大, 脱湿速率减小, 且滞回环也减小并趋于稳定。

(4) 随着干湿循环次数的增加, SWCC 进气值减小, 滞回环逐渐减小; 第 1 次干湿循环对 SWCC 影响最大。3 次干湿循环后 SWCC 滞回环趋于稳定。

(5) 厦门地区残积砂质黏性土的 SWCC 的过渡区与残余区难以划分, 残余含水率难确定。提出剔除残余含水率参数的 5 种修正 SWCC 模型, 分别计算拟合优度。结果表明, 修正 Gardner 模型的拟合优度较高, 且模型拟合参数少, 适用于厦门地区砂质黏性土 SWCC 模型。

参 考 文 献

- [1] 王清, 蒋慧忠, 唐大雄. 闽南三角地区花岗岩残积土及其工程地质特性的研究[J]. 福建地质, 1990, 9(2): 90—99.
WANG Qing, JIANG Hui-zhong, TANG Da-xiong. A study on engineering geological properties of granitic residual soil in south Fujian[J]. *Geology of Fujian*, 1990, 9(2): 90—99.
- [2] MITCHELL P W, AVALLE D L. A technique to predict

- expansive soil movements[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils. Adelaide: Barton A.C.T., 1984.
- [3] MILL C J. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(9): 733—742.
- [4] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUF AHL 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.
- [5] MIU L C, JING F, HOUSTON S L. Soil-water characteristic curve of remolded expansive soils[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soils. Arizona: American Society of Civil Engineers, 2006.
- [6] 李志清, 胡瑞林, 王立朝, 等. 非饱和膨胀土 SWCC 研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 730—734.
LI Zhi-qing, HU Rui-lin, WANG Li-chao, et al. Study on SWCC of unsaturated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 730—734.
- [7] 张文杰. 城市生活垃圾填埋场中水分运移规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [8] 詹良通, 包承纲, 龚壁卫. 土-水特征曲线及其在非饱和土力学中的应用[C]//南水北调膨胀土渠坡稳定和滑动早期预报研究论文集. 武汉: 长江科学院, 1998.
- [9] DELAGE P, LEFEBVRE G. Study of structure of sensitive Champlain clay and its evolution during consolidation[J]. **Geotechnique**, 1983, 21(1): 21—35.
- [10] NG C W W, PANG Y W. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(6): 1252—1264.
- [11] KAWAI K, KARUBE D, KATO S. The model of water retention curve considering effects of void ratio[C]//Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils. Singapore: A.A. Balkema, 2000.
- [12] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土 SWCC[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2446—2453.
ZHAO Tian-yu, WANG Jin-fang. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess soil considering density and wetting-drying cycle effects[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2012, 43(6): 2446—2453.
- [13] 王铁行, 岳彩坤, 卢靖. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 1—5.
WANG Tie-hang, YUE Cai-kun, LU Jing. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 1—5.
- [14] 福建省建筑科学研究院, 福建省建筑设计研究院. DBJ13-07—2006 福建省建筑地基基础技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [15] 王钊, 杨金鑫, 况娟娟, 等. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 405—408.
WANG Zhao, YANG Jin-xin, KUANG Juan-juan, et al. Application of filter paper method in field measurement of matric suction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(4): 405—408.
- [16] WILLIAM J L, LU N. Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2004, 130(6): 646—655.
- [17] WILLIAMS J, PREEBLE R E, WILLIAMS W T. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristics[J]. **Australian Journal of Soil Research**, 1983, 21(1): 15—32.
- [18] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. **Soil Science**, 1958, 85(4): 228—232.
- [19] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[M]. Hydrology Papers No.3. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [20] MCKEE C R, BUMB A C. The importance of unsaturated flow parameters in designing a monitoring system for hazardous waters and environmental emergencies[C]//Proceedings of Hazardous Materials Control Research Institute National Conference. Houston: Tex, 1984.
- [21] VAN GENUCHTEN M TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44(5): 892—898.
- [22] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(4): 521—532.
- [23] FARREL A D, LARSON W E. Modeling the pore structure of porous media[J]. **Water Resources Research**, 1972, 8(3): 699—706.