

DOI: 10.11779/CJGE202110022

不同覆土压力下砂质黏性紫色土的土-水特征曲线研究

李 达¹, 汪时机^{*1}, 李 贤¹, 陈洪凯², 梁广川¹, 蒋文君¹

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 枣庄学院城市与建筑工程学院, 山东 枣庄 277000)

摘 要: 使用 Geo-Experts 高级型应力相关土-水特征曲线压力板仪对重庆砂质黏性紫色土在不同覆土压力下 (0, 40, 100, 200 kPa) 的土-水特征曲线 (soil-water characteristic curve, SWCC) 进行了研究; 采用双应力变量广义土水特征曲线模型对试验数据进行分析。研究发现: ①在覆土压力和吸力的双应力变量影响下, 土样的孔隙结构发生改变; 脱湿过程孔隙比发生显著减小时的拐点吸力值随着覆土压力的增大而增大。吸湿过程中, 土样的孔隙比变化不明显。②在双应力变量下, 较大覆土压力的土样 (100, 200 kPa) 脱湿 SWCC 呈现双峰特点, 而较小覆土压力的试样脱湿 SWCC 未出现双峰特点; 经历脱湿-吸湿过程后, 含水率出现滞回现象。③使用双应力变量广义 SWCC 模型可以较好的拟合不同覆土压力下紫色土的 SWCC, 拟合精度高。结合孔径密度函数和土性参数 S-index, 可得出土的最佳体积含水率公式, 可应用于相应紫色土地区工程建设指导。

关键词: 广义土水特征曲线; 覆土压力; 双应力变量; 孔径密度函数; 砂质黏性紫色土

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)10-1950-07

作者简介: 李 达(1996—), 男, 山东济南人, 主要从事岩土力学方面的研究。E-mail: 502961937@qq.com。

Soil-water characteristic curve of sandy clayey purple soil under different overburden pressures

LI Da¹, WANG Shi-ji¹, LI Xian¹, CHEN Hong-kai², LIANG Guang-chuan¹, JIANG Wen-jun¹

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of City and Architecture Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277000, China)

Abstract: The soil-water characteristic curve (SWCC) of sandy clayey purple soil in Chongqing of China is investigated under different overburden pressures (0, 40, 100, 200 kPa) using the stress-dependent SWCC pressure plate extractor by Geo-Experts Ltd. Furthermore, the dual-stress SWCC model is used to analyze the test data. The results show that: (1) The void structure of the soil samples changes under the dual-stress variable of overburden pressure and suction. In the process of desorption, the inflection point of purple soil's porosity ratio change appears later under large overburden pressure. The void ratio does not change significantly in the process of absorption. (2) Under the dual-stress variable, bimodal SWCC is found at high overburden pressures (100, 200 kPa). After the desorption-absorption process, the moisture content exhibits hysteresis. (3) The dual-stress generalized SWCC model can be used to simulate the SWCC of purple soil under different overburden pressures. By combining the pore-size density function and the soil parameter S-index, the formula for the optimal volume moisture content of soil is proposed, and can be applied to the corresponding engineering construction guidance in purple areas soil.

Key words: generalized soil-water characteristic curve; overburden pressure; dual-stress; pore-size density function; sandy clayey purple soil

0 引 言

覆土压力, 指的是地基中或土层下某点由其上覆土层的重力而产生的垂直压力。在工程中, 土壤所受到的内外应力致使土壤压实, 改变土体的孔隙结构, 进而影响工程建设或是农作物生产。为了探究土壤和水之间的复杂水力关系, 可对土壤的土水特征曲线 (soil-water characteristic curve, 可简称为 SWCC) 进行研究。SWCC 可直观地表征含水状态与吸力的关系,

能够反映土体在一定基质吸力下的持水能力, 是非饱和土力学中的重要工具, 例如计算抗剪强度^[1], 土壤渗透率^[2]。此外, 国内外学者研究了多种因素对 SWCC 的影响, 例如密度^[3]、孔隙比^[4]、孔隙尺寸、粒径级配、有机组成等。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11972311, 11572262); 中央高校基本业务费专项资金项目 (XDJK2018AB003)

收稿日期: 2020-08-06

*通信作者 (Email: shjwang@swu.edu.cn)

在 SWCC 的研究中, 大多数 SWCC 方程是假设土体体积不变或是变化较小^[5-6], 这忽略了应力对 SWCC 的影响。但应力不仅会引起土壤团聚体的重新排列、变形, 改变孔径分布, 还会影响土壤颗粒孔隙的形状和取向^[7]。土壤密实性的变化会对工程建设产生影响^[8], 但这方面的研究却相对较少。陈正汉^[9]是研究应力对土壤结构和土壤保水曲线影响的先驱者之一, Vanapalli 等^[6]应用预加载来模拟应力历史对 SWCC 的影响, 而不是测试期间的应力。黄海等^[10]提出了广义土 - 水特征曲线概念, 考虑了净平均应力对持水特性的影响; 汪时机等^[11]提出了双应力变量广义土 - 水特征曲线方程, 该方程仅含 3 个参数, 能够包容各种孔隙分布情况的复杂土 - 水关系。该方程只需要至少 3 个试验数据点便可预测更大吸力范围的土 - 水关系, 节省试验时间, 便于 SWCC 在工程上的运用。但该方程的精确性及实用性需要在试验研究中进一步进行检验。

为此, 本文以重庆紫色土为研究对象, 开展不同覆土压力下的土水特征试验, 使用试验数据拟合得到紫色土在双应力变量影响下的 SWCC。紫色土广泛分布于中国西南地区, 经过室内物理性质基本试验测定^[12], 取自重庆北碚地区的紫色土粒径塑性指数为 14.8, 属于黏性土; 饱和渗透系数处于 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/s 量级; 但该土粒径均小于 2 mm, 其中粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量占 79.5%, 按《建筑地基基础设计规范》分类法属于砂土; 结合土的工程分类, 将其定义为砂质黏性紫色土 (sandy clayey purple soil)。

1 试验方案

1.1 试验用土

试验所用紫色土取自重庆北碚区, 缙云山西南大学水土保持基地, 取土深度为距地表 40 cm 处。通过室内试验测得所取紫色土的基本物理性能指标见表 1。

表 1 重庆北碚区紫色土基本物理性能指标

Table 1 Basic physical property indexes of purple soil in Beibei District of Chongqing

天然含水率 w/%	密度 ρ /(g·cm ⁻³)	相对质量 密度 G_s	塑性 指数	液性 指数	缩限 w _s /%
20.78	1.68	2.69	14.80	0.088	16.06

1.2 试样制备

试验采用直径 71 mm、高度 19 mm 的环刀试样, 参照《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》, 将取回的紫色土自然风干后碾碎, 过 2.5 mm 筛子。制作重塑环刀样, 干密度为 1.39 g/cm³。进行 SWCC 试验之前应进行试样饱和, 采用抽气饱和法进行饱和, 饱和结束后称取环刀和试样总质量, 计算饱和度, 确认饱和

后用于试验。

1.3 试验仪器

所用仪器为高级型应力相关土 - 水特征曲线压力板仪 (SDSWCC-H), 可以对土样施加一维荷载 (K_0 状态); 可以精确测量土样的体变; 所得到的 SWCC 也更准确, 更接近现场土的性质。仪器如图 1 所示。



图 1 高级型应力相关土 - 水特征曲线压力板仪

Fig. 1 Stress-dependent SWCC pressure plate extractor

1.4 试验方案

制作 4 个试样, 按照 4 个不同的覆土压力 0, 40, 100, 200 kPa, 将 4 个试样分别记为 AF1、AF2、AF3、AF4。试验过程中, 同一个试样保持覆土压力的不变, 逐级施加基质吸力, 先进行脱湿试验, 因试验装置使用的陶土板进气值为 500 kPa, 故设置吸力路径为 0→1→10→25→50→100→150→200→300→400 kPa。当试样在 400 kPa 的基质吸力下平衡后, 接着进行土样吸湿试验, 吸力路径设置为 400→300→200→150→100→50→25→10→1→0 kPa。

仪器的自重会对试样产生附加应力, 因此需对覆土压力进行修正。称量饱和透水石质量是 45 g, 试样帽质量是 203.3 g, 加载杆质量是 269.5 g, 对覆土压力进行修正, 修正结果见表 2。

表 2 覆土压力的修正

Table 2 Modified values of overburden pressure

编号	施加荷载 σ'_v /kPa	覆土压力 F_0 /N	修正后覆土压力 力 F /N
AF1	0	0	0
AF2	40	157.00	151.93
AF3	100	392.50	387.43
AF4	200	788.00	782.93

1.5 试验过程

试验过程可分为 4 步: ①饱和和陶土板; ②预固结过程; ③SWCC 试验过程; ④拆样及处理。饱和过程一般为: 使用较高压力 (例如 450 kPa) 的水排出陶土板内部的空气, 高压水可以让气泡溶解于水中来完成初始饱和; 之后在高压下对水体积量测系统进行反复冲刷, 若无明显气泡产生, 说明完成饱和。使其内部的均匀小孔形成收缩膜, 该膜产生的表面张力阻隔了气体, 使得只有水可以通过, 防止气体进入水体积量测系统造成误差。陶土板饱和完成后, 安装试样进行预固结。该步骤的目的是模拟土体天然状态下的应力

情况,使试样在各自覆土压力下达到压缩变形稳定,从而在施加基质吸力后更准确地观测应力水平对SWCC的影响。当排水量 $v < 0.144 \text{ mL}/24 \text{ h}$ 或者轴向位移变化量 $h < 0.012 \text{ mm}/24 \text{ h}$ 时,则可判断预固结达到稳定状态。预固结过程完成后,进入SWCC试验过程。整个过程应确保竖向应力保持不变并不时冲刷系统排出气泡。当排水量 $v < 0.1 \text{ mL}/24 \text{ h}$ 或者轴向位移变化量 $h < 0.01 \text{ mm}/24 \text{ h}$ 的时候,则可判断土样达到吸力平衡状态。试样完成一个脱湿吸湿循环后完成试验。取出试样后称量试样和环刀的总质量,再将试样放入烘箱中烘干,得出试验完成时土样的含水率。

2 试验结果与分析

2.1 双应力变量状态变量

土体的应力状态对于变形、抗剪强度、渗透性等水力-力学性状非常重要。1977年, Fredlund等^[13]提出了3种应力状态变量组合,其中净法向应力 $\sigma - u_a$ 和基质吸力 $u_a - u_w$ 最适合用于工程实践,因为在大多数实际工程问题中,一般认为孔隙气压等于0(即为大气压力),以孔隙气压为基准推导得出的应力状态变量组合最为简单合理^[14],净法向应力 $\sigma - u_a$ 和基质吸力 $u_a - u_w$ 也被称为双应力状态变量。

2.2 双应力变量状态对土体结构的影响

当试样在试验仪器中完成固结时视为SWCC脱湿试验的初始状态;当试样在400 kPa气压下平衡时,视为SWCC吸湿试验的初始状态。试样高度 h_i 的变化由LVDT位移传感器实时量测记录。根据式(1)和式(2)计算孔隙比,绘制孔隙比-吸力曲线如图2所示。

$$\rho_i = h_0 \cdot (M_0 - \Delta M_i) / (h_i \cdot V_0) \quad (1)$$

$$e_i = G_s \cdot \rho_w \cdot \frac{1 + w_i}{\rho_i} - 1 \quad (2)$$

式中 e_i 为试样第 i 级吸力平衡时的孔隙比; ρ_i 试样第 i 级吸力平衡时的密度; h_i 试样第 i 级吸力平衡时的试样高度; ΔM_i 试样第 i 级吸力平衡时的含水质量改变量; h_0, M_0, V_0 分别为试样的初始高度、质量及体积。

由图2可知,固结后4组试样的初始孔隙比不同,覆土压力越大,初始孔隙比越小。脱湿时,较小覆土压力(0, 40 kPa)下,当基质吸力小于1 kPa时,孔隙比随基质吸力缓慢减小;大于1 kPa时,孔隙比随基质吸力急剧减小。说明紫色土的孔隙结构特征在低覆土压力下,对1 kPa以上的基质吸力更加敏感。观察较大覆土压力(100, 200 kPa)下的变化曲线,紫色土的孔隙结构特征对10 kPa以上的基质吸力更加敏感。不同覆土压力下,紫色土的孔隙比变化产生不同规律,说明覆土压力的存在,会影响吸力对孔隙结构

的改变。

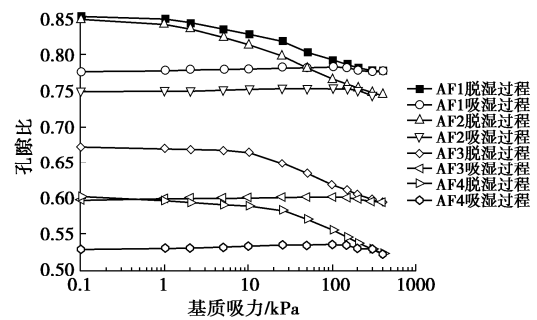


图2 不同覆土压力下紫色土的孔隙比-吸力曲线

Fig. 2 Curves of matric suction versus void ratio of purple soil under different overburden pressures

在吸湿状态下,孔隙比随吸力的减少小幅度回升直至没有变化,孔隙比变化出现了滞回现象。在Letey等^[15]的研究中,沙土的吸湿接触角高达 $60^\circ \sim 80^\circ$,而脱湿接触角的范围为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 。由此推测两种接触角之间的差异造成了这种结构变化的不同,使得吸力在脱湿过程中对土体结构改变效果更明显。

2.3 双应力变量作用对土持水特性的影响

绘制如图3所示的饱和度-基质吸力变化曲线及体积含水率-基质吸力变化曲线。随着覆土压力的增大,土样越来越密实,紫色土的体积含水率在降低,其持水能力整体上在减弱,这种持水性能的改变,实际上是土体孔隙性,颗粒接触关系等微观结构特性的综合反映^[16]。由图3可知,随着吸力的增大土壤的饱和度逐渐降低,覆土压力的不同,饱和度的降低水平出现了不同。当吸力低于50 kPa时,覆土压力越大,饱和度随吸力增大而降低的幅度越大,但当吸力高于50 kPa时,不同覆土压力下的曲线出现交叉。这说明覆土压力与吸力共同影响土样的持水量,但这种耦合作用会在较大吸力时逐渐减弱。通常认为,吸力是直接作用于液相,部分作用于土粒骨架,从而影响持水状态。而土壤所受的正应力是通过使土体变形来改变持水状态,二者的共同作用产生了耦合效果。正应力的作用使得试样孔隙结构的形状、大小、分布发生了改变,吸力的增大也在改变土体的孔隙结构,使得试样含水率不断减少。此外,该种土样的SWCC与其他土体不同的是,在较小的吸力下(小于1 kPa),土体的饱和度便较大的改变,是因为试样最大孔隙尺寸相对较大,因而较小的吸力也能够引起较大的含水率变化。

值得注意的是,覆土压力为100, 200 kPa的试样土水特征曲线呈现出双S型(bimodal-sigmoidal),在吸力5~50 kPa区域出现了第二个平台,即边界效应区II,且AF4的效应区比AF3的效应区更加明显覆盖区域更广。较低覆土压力的试样没有呈现出这样的特点。测得试验使用土样的粒径级配曲线, $C_c < 3$ 表

明该试样为连续级配。试样 AF1、AF2 在较小的覆土压力下, 土样的孔隙结构受覆土压力影响的改变较小, 仅有一个孔隙尺寸分布且分布范围较窄小, 因此 SWCC 没有呈现多峰的特点, 整条曲线较为平缓。试样 AF3、AF4 在较高的覆土压力下, 土样的孔隙结构发生了较大的改变, 土粒滑动, 较大的孔隙被土粒填补, 随后因覆土压力较高, 土体结构中的微细裂隙增多, 新的过水通道出现, SWCC 出现了双峰的特点。

如图 3 所示, 吸湿过程中土壤的含水率出现滞后效应, 土体在吸湿过程结束后, 并没有达到百分之百的饱和, 这是因为土壤在吸湿过程中产生了气泡占据了一部分孔隙体积, 导致试样无法达到完全饱和。

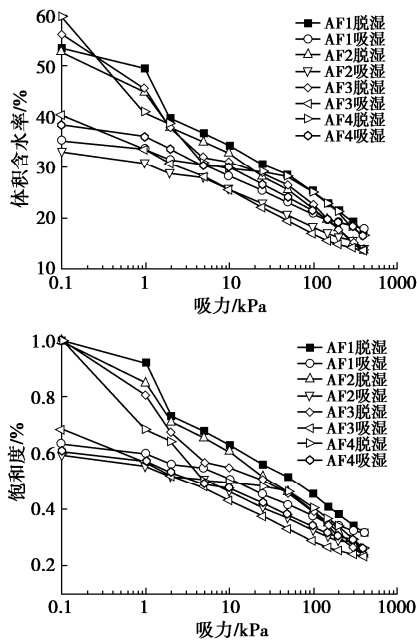


图 3 不同覆土压力下膨胀土含水率或饱和度 - 吸力曲线
Fig. 3 Curves of matric suction versus moisture content or degree of saturation of purple soil under different overburden pressures

3 双应力变量土水特征曲线的拟合

van Genuchten 的 SWCC 模型^[17]是被使用广泛的模型之一, 表达式如下:

$$S_r = \{1 + (\alpha\psi)^n\}^{-m} \quad (3)$$

式中, α , n , m 为拟合参数。为了考虑应力引起试样体变的影响, Tarantino^[18]在式 (3) 的基础上, 基于 $e_w = V_w/V_s$, 将其变形为

$$S_r = \frac{1}{\left\{1 + \left[\left(\frac{e}{a}\right)^{1/b} \psi\right]^n\right\}^{b/n}} \quad (4)$$

但式 (4) 存在两个值得商榷的地方: ①该公式所描述的情况中, 土样的残余含水率设置为 0, 但实际的 SWCC 试验中, 获得的数据点多是处于低吸力阶段, 很难达到残余含水率为 0 的情况; ②该式在较高

吸力时, 会趋于收敛, 如果土样的 SWCC 是双峰或是多峰特性, 使用该式会出现很大的误差。正如本文试验结果所示, 紫色土处于较高覆土压力时, SWCC 会出现双峰现象, 式 (4) 不适用此种情况。

有研究表明, SWCC 模型十分依赖土壤的孔径分布, 当孔径分布为多峰时(如孔径分布不连续), SWCC 也会呈现出相同的形状。这种孔径分布不连续的情况通常被归为两种:

(1) 间断级配土(可用晒相对质量密度法确定^[19]), 本文试验用土属于连续级配, 不属于该种情况。

(2) 土体受外力影响, 各个土颗粒之间重新排列组合形成土粒团聚体(可用 3DX 射线显微断层照相技术或电子扫描技术验证^[20])。本文试验在较大覆土压力下产生了该种变化。受覆土压力影响, 小土粒产生位移填充进大颗粒间原有的大孔隙中, 形成了土粒团聚体, 每个团聚体之间的孔径较大, 呈现为宏观孔隙, 团聚体内部产生了孔径极小的微细裂隙, 如图 4 所示。

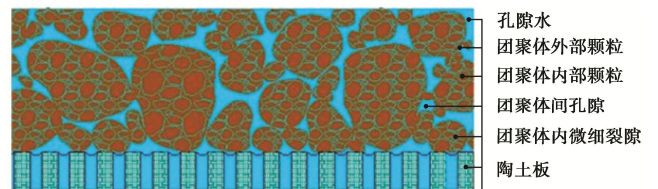


图 4 团聚体间和团聚体内孔隙示意图

Fig. 4 Diagram of inter-aggregates and intra-aggregates pores

基于此, 汪时机等^[11]提出相对体积含水比的概念:

$$\Gamma_w = \frac{V_w - kV_w^r}{V_0} \quad (5)$$

式中 Γ_w 为相对体积含水比; V_w 为某级吸力平衡时试样含水体积; V_0 为试样初始体积; V_w^r 为广义残余含水体积, 受双应力状态影响; k 为相对比容, $k = v/v_r$, 其中, v 为比容 ($1+e$), v_r 为残余含水率对应的比容 ($1+e_r$), e_r 为残余含水率对应的孔隙比。

在 Tarantino 方法的启发下, 笔者使用应力的反比例函数和基质吸力的幂律关系来表示含水率, 将应力变量引入 SWCC 模型中, 得到了广义双应力变量 SWCC 曲线(在下文中简称为 W-G 模型), 表达式为

$$\theta(\psi, \sigma'_v) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{1 + \left[\frac{v_0 \cdot 10^B}{v \cdot (\theta_s - \theta_r)}\right]^{-1/c} \times \psi^{-A/c}\right\}^c} \quad (6)$$

式中 A 为相对体积含水比与吸力的对数坐标系(即 $\sigma'_v - \lg(\Gamma_w) - \lg(\psi)$ 平面)中直线的斜率; B 为截距; c 为与残余含水率相关的拟合参数。式 (6) 有两种拟合方法^[21]: ①使用较少的试验数据由 $\sigma'_v - \lg(\Gamma_w) - \lg(\psi)$ 平面得到参数 A, B , 将 A, B 代入式 (6) 进行非线性最小二乘法拟合得到参数 c ; ②直接利用式 (6) 对

得到的所有试验数据进行拟合得到整条 SWCC。

将脱湿试验所得土水特征试验点代入 W-G 模型和 van Genuchten 的 SWCC 模型(在下文中简称为 v-G 模型)进行拟合, 图 5 为拟合曲线图。吸湿过程试样体积几乎未发生改变, 故 W-G 模型与 v-G 模型结果相似, 未在图中画出。拟合数据见表 3。

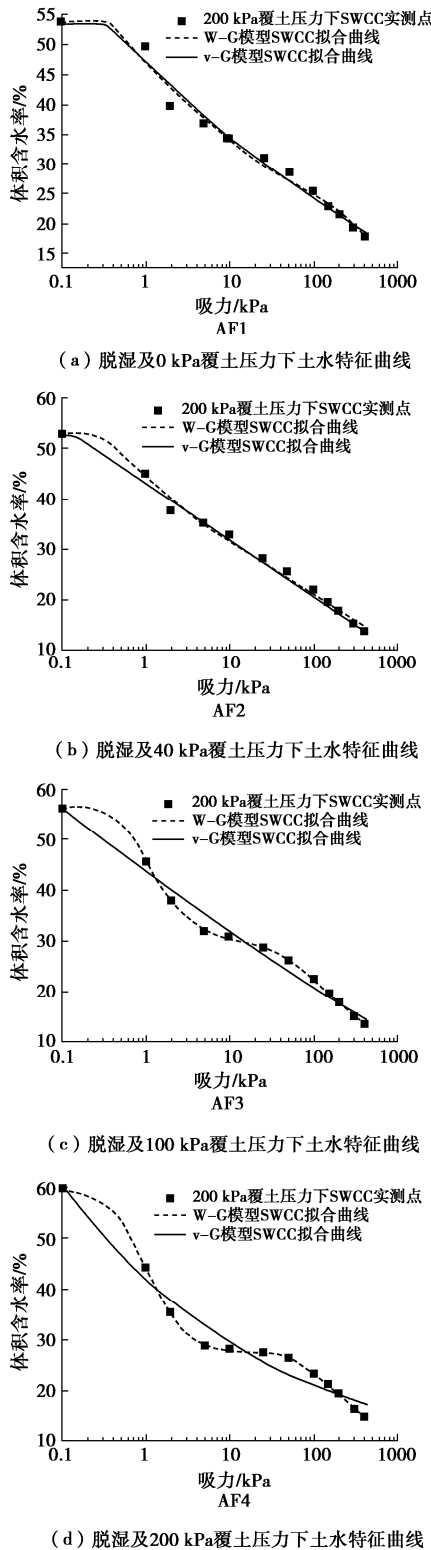


图 5 脱湿情况下 v-G SWCC 与 W-G SWCC 对比图
Fig. 5 Comparison between v-G SWCC and W-G SWCC under desorption

与 v-G 模型对比, 在覆土压力较低时, 两者均呈现了较好的拟合效果, 但在高覆土压力下, v-G 模型的拟合曲线与实测值出现了较大的偏差, 但 W-G 的拟合曲线拟合效果十分理想。W-G 模型的 AF1, AF3, AF4 拟合曲线的 R^2 均大于 0.99。很明显, 该模型很好地拟合紫色土在不同覆土压力下土水特征试验数据, 且曲线平滑。随着土样的覆土压力增加, SWCC 开始出现越来越明显的多峰特征, 模型的拟合效果也变得更好。通过拟合图可以明显地看出土体上部应力的明显地影响了 SWCC 的形状。可以推测, 土样的孔隙尺寸密度函数 (PDF, pore-sizedensityfunction) 已经被外力影响重新分布, 土体中宏观孔隙(不同团聚体之间的孔隙)和微观孔隙(同一个团聚体内部的裂隙)的比例发生了改变。在应力和吸力的耦合作用下, 随吸力的发展, 土体中的宏观孔隙向微观孔隙发展, 土样变得越来越密实。

在吸湿过程中, 由于孔隙比的降低, 加之在吸湿过程中可能产生气泡, 土样的持水能力明显减弱。如图 6 所示, 土样吸湿过程的 SWCC 拟合曲线较为平滑, 并未出现明显的多峰特征。这是因为土样的吸湿过程中, 紫色土在整个过程中孔隙比几乎未发生改变, 即脱湿过程中由宏观孔隙产生的微观孔隙并未再发展为宏观孔隙, 脱湿时产生孔隙变化在吸力和应力的共同作用下是不可逆的。

在工程中, 土壤的密实度至关重要, Durner^[22]指出可以使用孔隙密度分布 (PDF) 描述土样的孔隙特征从而探讨土样的压实度。根据拟合得到的 SWCC 曲线, 可以求得动态 PDF 指标, 其方程如下:

$$f(r) = \frac{d\theta(r)}{d(\lg r)} = -\ln(10) \cdot \psi \cdot \left[\frac{d\theta(\psi, \sigma'_v)}{d(\psi)} \right] \quad (7)$$

根据 Durner 的建议, 可以将吸力的对数坐标转换为新的单位, PF。其与土样的等效孔径分布密切相关, 表达式为 $pF = \lg(\psi)$ 。根据拟合曲线求得 $\frac{d\theta(\psi, \sigma'_v)}{d(\psi)}$,

做出脱湿过程中土样的动态 PDF 图, 如图 6。

如图 7 所示, 上部应力与吸力改变了土壤孔隙的几何形状, 较大的孔隙减少, 土粒的堆积密度增加, 这会使土壤的透气性, 透水性明显变差。覆土压力越高, 压实度越高, 这种现象越明显。Dexter 等^[23]提出了提出了 S_{index} 的概念, $S_{index} = d\theta/d(\ln \psi)$, 其为土性参数点。实质上, Durner 提出的 PDF 和 Dexter 提出的 S_{index} 基本相同, 因为 S_{index} 是 PDF 中的负最大值。故计算 S_{index} 的公式为

$$S_{index} = -f(\psi, \sigma'_v)_{max} = \ln(10) \cdot \psi \cdot \left[\frac{d\theta(\psi, \sigma'_v)}{d(\psi)} \right]_{max} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (6), 根据双应力变量广义土水特征曲线模型可得土的最佳体积含水率:

表 3 W-GSWCC 拟合参数表
Table 3 Fitting parameters of W-G SWCC

试样	残差平方和	R^2	A	B	C
AF1 (脱湿)	12.7384	0.99223	-0.03613	2.29412	4.8537×10^{-4}
AF2 (脱湿)	22.7165	0.98472	-0.02024	2.56416	9.3112×10^{-4}
AF31 (脱湿)	0.54776	0.99902	-0.8648	1.26626	0.25198
AF32 (脱湿)	0.16220	0.99915	-0.06132	2.23324	0.00934
AF41 (脱湿)	0.67771	0.99917	-1.84843	1.55143	0.99693
AF42 (脱湿)	0.07063	0.99949	-0.05876	2.2979	0.0136
AF1 (吸湿)	1.21098	0.99731	-0.61626	2.19386	0.95302
AF2 (吸湿)	1.24036	0.99729	-0.63528	2.23746	0.98523
AF3 (吸湿)	1.30203	0.99824	-0.13244	1.63989	0.12910
AF4 (吸湿)	1.74866	0.99695	-0.46248	1.9783	0.71526

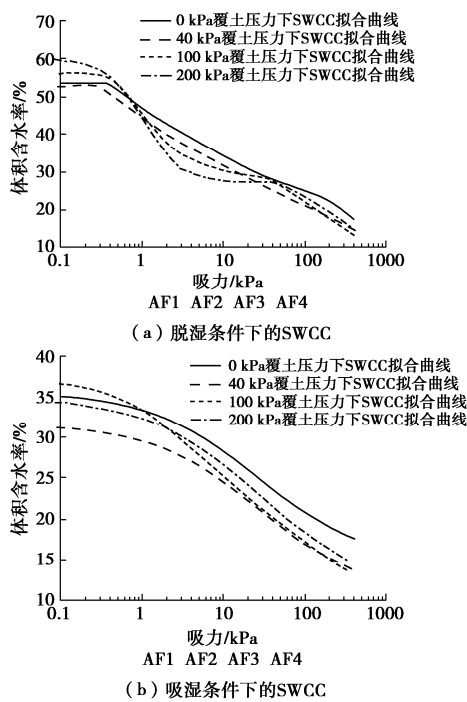


图 6 W-G 模型 SWCC 拟合图

Fig. 6 SWCCs fitted by W-G model

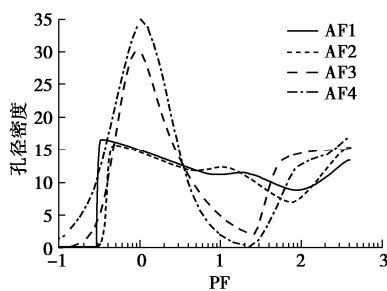


图 7 脱湿过程土样动态 PDF 图

Fig. 7 PDF of soil samples under desorption

$$\theta_{\text{index}} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [c / (c + 1)]^c \quad (9)$$

式中, θ_r 为残余体积含水率, θ_s 为饱和体积含水率, c 为双应力变量广义 SWCC 中的拟合参数。经过计算, 在 0, 40, 100, 200 kPa 覆土压力下, 紫色土土的最佳体积含水率分别为 53.30%, 52.58%, 46.86%, 43.69%。

4 结 论

(1) 随覆土压力和吸力的增大, 紫色土的孔隙比

减少, 低覆土压力下紫色土的结构变化对 1 kPa 以上的吸力更敏感, 高覆土压力下紫色土的结构变化对 10 kPa 以上的吸力更敏感; 紫色土在脱湿条件下孔隙比变小, 但在吸湿情况下, 孔隙比基本不变。

(2) 随覆土压力和吸力的增大, 紫色土的持水特性降低; 在高覆土压力下, 紫色土的 SWCC 出现双峰现象, 笔者认为在高覆土压力的作用下, 土壤中的大孔隙发生破坏变形, 土颗粒位移压实形成团聚体, 宏观的大孔隙减少, 随着吸力的进一步发展, 土颗粒间的微细裂隙发展, 因此呈现双峰特点。

(3) 广义双应力变量 SWCC 模型可以较好的拟合不同覆土压力下紫色土的 SWCC, 拟合精度高。结合 PDF、 S_{index} 和广义双应力变量 SWCC 模型, 推导出土的最佳体积含水率公式, 可用于工程建设指导。

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 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))
- [2] 陶高粱, 吴小康, 甘世朝, 等. 不同初始孔隙比下非饱和黏土渗透性试验研究及模型预测[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1761 - 1770, 1777. (TAO Gao-liang, WU Xiao-kang, GAN Shi-chao, et al. Experimental study and model prediction of permeability coefficient of unsaturated clay with different initial void ratios[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1761 - 1770. (in Chinese))
- [3] 蔡国庆, 张 策, 李 舰, 等. 考虑初始干密度影响的 SWCC 预测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 2): 27 - 31. (CAI Guo-qing, ZHANG Ce, LI Jian, et al. Prediction method for SWCC considering initial dry density[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 2018, **40**(S2): 27 - 31. (in Chinese))
- [4] 高游, 孙德安, 张俊然, 等. 考虑孔隙比和水力路径影响的非饱和土水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2191 - 2196. (GAO You, SUN De-an, ZHANG Jun-ran, et al. Study on soil-water characteristics of unsaturated soils with consideration of initial void ratio and hydraulic path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(12): 2191 - 2196. (in Chinese))
- [5] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 - 532.
- [6] 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, **49**: 143 - 159.
- [7] ZHOU C, NG C. A new and simple stress-dependent water retention model for unsaturated soil[J]. Comput Geotech, 2014, **62**: 216 - 222.
- [8] CHEN G, WEIL R R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops[J]. Soil Till Res, 2011, **117**: 17 - 27.
- [9] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(1): 82 - 90. (CHEN Zheng-han. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 82 - 90. (in Chinese))
- [10] 黄海, 陈正汉, 李刚. 非饱和土在 $p-s$ 平面上的屈服轨迹及土-水特征曲线的探讨[J]. 岩土力学, 2000, **21**(4): 316 - 321. (HUANG Hai, CHEN Zheng-han, LI Gang. A study on yield locus of unsaturated soils on $p-s$ plane and soil-water characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(4): 316 - 321. (in Chinese)).
- [11] 汪时机, 程明书, 李贤, 等. 非饱和土双应力变量广义土水特征曲线理论模型构建[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(6): 1 - 7. (WANG Shi-ji, CHENG Ming-shu, LI Xian, et al. Establishment of generalized soil-water characteristic curve theoretical model considering two stress state variables for unsaturated soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, **33**(6): 1 - 7. (in Chinese))
- [12] 李达, 汪时机, 李贤, 等. 非饱和砂质黏性紫色土一维渗透特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, **16**(2): 373 - 380. (LI Da, WANG Shi-ji, LI Xian, et al. Experimental study on one-dimensional permeability of sandy clayey purple soil at unsaturated condition[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, **16**(2): 373 - 380. (in Chinese))
- [13] FREDLUND D G, RAHARDJO H, FREDLUND M D. State variables for unsaturated soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, **103**(5): 447 - 466.
- [14] 陈正汉, 卢再华, 朱元青. 非饱和土的理论与实践[J]. 力学与实践, 2001, **23**(5): 8 - 15. (CHEN Zheng-han, LU Zai-hua, ZHU Yuan-qing. Theory and practice of unsaturated soil[J]. Mechanics in Engineering, 2001, **23**(5): 8 - 15. (in Chinese))
- [15] LETEY J. Measurement of contact angle, water drop penetration time, and critical surface tension[C]// Water Repellent Soils Proceedings of the Symposium on Water Repellent Soils, 1969, Riverside.
- [16] 陈波, 孙德安, 高游, 等. 弱胶结结构性软黏土力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(12): 2296 - 2303. (CHEN Bo, SUN Dean, GAO You, et al. Experimental study on mechanical behavior of weakly structured soft clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(12): 2296 - 2303. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] TARANTINO A. A water retention model for deformable soils[J]. Géotechnique, 2009, **59**: 751 - 762.
- [19] GERMAINE J T, GERMAINE A V. Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers[M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [20] MENON M, JIA X, LAIR G J, et al. Analysing the impact of compaction of soil aggregates using X-ray microtomography and water flow simulations[J]. Soil and Tillage Research, 2015, **150**: 147 - 157.
- [21] 程明书, 李贤, 汪时机, 等. 非饱和土双应力变量广义土水特征曲线模型验证[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(6): 8 - 17. (CHENG Ming-shu, LI Xian, WANG Shi-ji, et al. Model verification of generalized soil-water characteristic curve considering two stress state variables for unsaturated soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(6): 8 - 17. (in Chinese))
- [22] DURNER W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure[J]. Water Resources Research, 1994, **30**: 211 - 223.
- [23] DEXTER A R, BIRD N R A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve[J]. Soil and Tillage Research, 2001, **57**: 203 - 212.