

DOI: 10.11779/CJGE2018S1038

# 考虑净正应力影响的膨胀土土-水特征曲线试验研究

王晓琪<sup>1</sup>, 汪时机<sup>\*1</sup>, 程明书<sup>1</sup>, 李 贤<sup>1,2</sup>, 周超云<sup>1</sup>, 何丙辉<sup>2</sup>

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘 要:** 工程建设中, 具有胀缩性、裂隙性和超固结性等特殊性质的膨胀土多处于非饱和状态和复杂变化的外加应力环境下, 对膨胀土进行考虑应力状态的土-水特征曲线 (soil-water characteristic curve, SWCC) 试验研究, 定性描述和定量表征膨胀土在一定应力状态下的土水特征, 具有工程实践意义。采用 GEO-Experts 高级型应力相关土-水特征曲线压力板仪 (SDSWCC-H) 测定了河南南阳膨胀土在 4 个不同净正应力下 (0, 40, 99, 199 kPa) 的土-水特征曲线, 并利用试验数据对提出的能明确考虑净正应力影响的膨胀土 SWCC 表征方程进行验证。结果表明: ①由于土体的间断级配, 南阳膨胀土呈现出双峰土-水特征曲线 (bimodal soil-water characteristic curve); ②净正应力会对膨胀土的持水能力与进气值产生影响, 具体表现为在 10~100 kPa 基质吸力范围内, 净正应力会显著影响膨胀土在脱湿过程中水分排出的速度; 净正应力也改变了双峰 SWCC 第二个波峰的进气值; ③已提出的 SWCC 模型曲线拟合精度较高, 拟合结果良好, 模型可以很好地表征南阳膨胀土在恒定净正应力下基质吸力与持水量的关系。

**关键词:** 膨胀土; 土-水特征曲线; 净正应力; 持水特性; 拟合

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0235-06

**作者简介:** 王晓琪(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事岩土力学方面的研究。E-mail: xqwang1994@163.com。

## Experimental study on soil-water characteristic curve of expansive soil considering net normal stress

WANG Xiao-qi<sup>1</sup>, WANG Shi-ji<sup>1</sup>, CHENG Ming-shu<sup>1</sup>, LI Xian<sup>1,2</sup>, ZHOU Chao-yun<sup>1</sup>, HE Bing-hui<sup>2</sup>

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Resource and Environment,

Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The expansive soil is a kind of special soil with swell-shrinking, fractured and over-consolidated properties. In engineering construction, the expansive soil is generally under unsaturated state and complex applied stress environment. It is practical to describe qualitatively and quantitatively the soil-water characteristic curve (SWCC) of the expansive soil under a certain stress state. Based on this, the SWCC of Nanyang expansive soil in Henan Province are measured under four different net normal stresses (0, 40, 99, 199 kPa) using the GEO-Experts high-type pressure plate apparatus for stress-dependent SWCC (SDSWCC-H). Furthermore, a proposed SWCC equation which can clearly consider the effect of the net normal stress is validated using the experimental data. The results suggest that: (1) Nanyang expansive soil presents bimodal SWCCs because of gap-graded soil; (2) The net normal stress can significantly affect moisture release speed of soil in the matrix suction range from 10 to 100 kPa and also change the air-entry value of expansive soil; (3) The accuracy of the SWCC model based on measured data of bimodal SWCC for Nanyang expansive soil is verified with high fitting precision. The proposed SWCC model can well reflect the relationship between matrix suction and water retention capacity under constant net normal stress.

**Key words:** expansive soil; soil-water characteristic curve; net normal stress; water retention property; fitting

## 0 引 言

膨胀土地区边坡失稳、地基隆起、基础沉降等系列工程问题与土体处于复杂的干湿交替气候环境中导致土体胀缩变形、裂隙发育密切相关。膨胀土特有的胀缩性和裂隙性在本质上是由于土体孔隙内的水分迁移所导致的, 是一种水-土作用机制, 可以利用非饱和土研究领域中的基本性质曲线土-水特征曲线

(soil-water characteristic curve, SWCC) 来分析或预测土体含水率的变化对土体的渗透性和抗剪强度等水力-力学特性的影响, 进而为研究非饱和土的变形、强

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11572262, 41771312); 中央高校基本业务费专项资金项目 (XDJK2018AB003)

收稿日期: 2017-06-11

\*通讯作者 (E-mail: shijiwang@swu.edu.cn)

度、持水和渗透等工程特性提供依据<sup>[1-2]</sup>。

自 20 世纪 60 年代起, 众多学者<sup>[3-7]</sup>对非饱和土 SWCC 的研究大多是基于土体在试验过程中体变与孔隙结构不发生改变的情况。然而, 工程建设中的土体多处于非饱和状态和复杂变化的外加应力环境中, 非饱和土的多相性、可压缩性会导致土体在应力状态下发生变形<sup>[8]</sup>, 因此对于非饱和土 SWCC 的研究中, 理论上必须考虑应力状态这一影响因素。

Vanapalli 等<sup>[9]</sup>考虑了应力历史对非饱和土重塑黏性土 SWCC 的影响; Ng 等<sup>[10]</sup>研究了  $K_0$  应力状态下香港残积土的 SWCC 以及其对边坡稳定的影响; 2011 年, Ng 等<sup>[11]</sup>进行了香港残积土边坡 SWCC 的实地测量, 现场研究表明随着覆土深度的增加, 残积土 SWCC 的滞回圈有明显减小的趋势, 证实了不同深度的覆土压力对非饱和土的 SWCC 有影响。以上研究的试验对象是性质较为简单的非饱和土, 对于性质复杂又特殊的膨胀土来说, 缪林昌等<sup>[12]</sup>对南阳膨胀土进行了考虑初始应力影响的水分特征研究; 龚壁卫等<sup>[13]</sup>探讨了不同的应力状态(有侧限单向压缩和无侧限各向等压状态)对鄂西北膨胀土 SWCC 的影响, 得出不同应力条件下膨胀土的体积变化曲线, 发现应力作用对膨胀土的体积变化有重要影响。

基于此, 本文选取 4 个不同深度(0, 2, 5, 10 m)的覆土压力作为应力条件, 探索不同净正应力状态对南阳膨胀土的土-水特征曲线的影响, 并利用试验实测数据, 对已提出的膨胀土 SWCC 模型进行拟合验证。

1 SWCC 试验

1.1 试样基本物理性质

试样所用膨胀土取自河南南阳, 其制备与饱和参考《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)<sup>[14]</sup>, 以 19% 的含水率制成重塑样, 高度 1.90 cm, 直径 7.10 cm。试样的基本物理力学参数见表 1, 其自由膨胀率为 59%, 据《膨胀土地区建筑技术规范》(GB50112—2013)<sup>[15]</sup>可知为弱膨胀土。土体粒径级配曲线见图 1, 不均匀系数  $C_u=51.149>5$ , 说明土粒分布范围较大且不均匀, 土颗粒大小相差悬殊, 曲率系数  $C_c=6.504>3$ , 说明土粒为不连续级配, 存在某粒组缺失的情况。

表 1 南阳膨胀土的基本物理力学参数

Table 1 Parameters of Nanyang expansive soil

比重	干密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	塑限 /%	液限 /%	塑性 指数	自由膨胀 率/%
2.73	1.71	18.9	50.1	31.2	59

1.2 试验装置及工作原理

本文试验采用体积压力板仪测试法, 所用设备是一套简便易用的非饱和土试验装置——高级型应力相关土-水特征曲线压力板仪 (SDSWCC-H), 仪器基本参数见表 2。

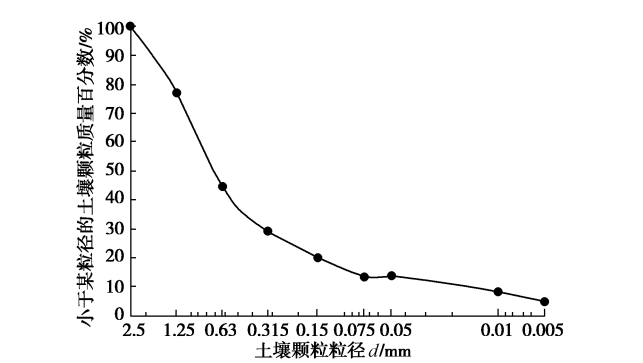


图 1 南阳膨胀土的粒径级配曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curve of Nanyang expansive soil

表 2 应力相关土-水特征曲线压力板仪参数

Table 2 Parameters of SDSWCC-H

基质吸力 控制范围 /bar	工作温 度/℃	加载气缸 量程/kN	加载气缸杆 件移动量程 /mm	LVDT 量程 /mm
0~5	5~50	10	50	5

和传统的土-水特征曲线压力板仪相比, SDSWCC-H 能给土样施加一维荷载; 可以精确测量土样的体变以及土样在不同基质吸力下的水体积变化; 所得到的 SWCC 也更准确, 更接近现场土的性质。装配好的 SDSWCC-H 见图 2, 仪器主要由 4 个部分组成, 分别是垂直气动加载系统、压力板仪组件、压力控制面板和水体积测量系统。

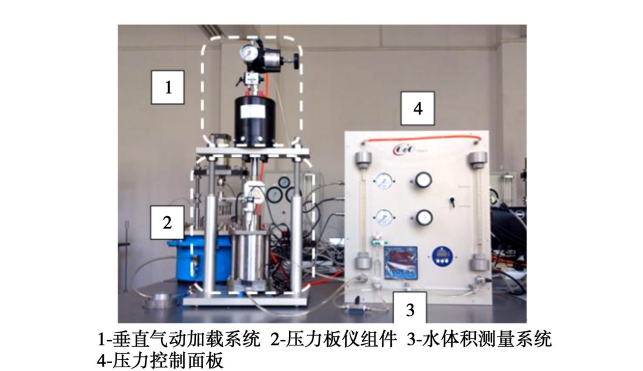


图 2 高级型应力相关土-水特征曲线压力板仪 (SDSWCC-H)

Fig. 2 High-type pressure plate apparatus for SDSWCC-H

SDSWCC-H 工作原理的关键是采用轴平移技术控制土样的基质吸力, 使得土样内的基质吸力与外加的气压相等<sup>[17]</sup>, 该技术的吸力控制范围主要取决于不锈钢试样室的最大室压值和多孔材料的进气值, 此次

试验所采用的多孔材料是进气值为 5 bar 的陶土板。

通过垂直气动加载系统给试样施加净正应力，试验过程中，试样室内土体水分开始排出，通过压力室底板的“蛇形”排水凹槽进入水体积测量系统中。由于 SWCC 试验历时较长，因此在试验过程中水体积测量系统会不可避免地产生气泡，只需将气泡冲刷至集气瓶并排出，便可得到土样精确的水量变化，从而得到每次吸力平衡时膨胀土试样的含水率。

1.3 试验方案

试验总共分 4 组，分别编号为 AF1、AF2、AF3、AF4，4 组重塑膨胀土试样的初始状态一致，以外加的不同深度（0，2，5，10 m）的覆土压力为影响变量，分别对应 0，40，99，199 kPa 的净正应力 $\sigma'_v$ ，控制试验温度为 12℃~16℃，使 4 个试样经历 0 至 450 kPa 的脱湿吸力路径，吸力路径的设置见表 3。

表 3 基质吸力路径

Table 1 Path of matrix suction	
阶段	吸力值/kPa
脱湿过程	0→1→10→25→50→100→150→200→300→400→450

2 净正应力对 SWCC 的影响

2.1 净正应力对膨胀土土体结构的影响

南阳膨胀土 SWCC 的实测数据见表 4。4 组试样在不同的恒定净正应力下的孔隙比  $e$  与基质吸力  $\psi$  的关系见图 3。

可以看出：在相同基质吸力下，试样孔隙比满足  $AF1>AF2>AF3>AF4$ ，整个脱湿过程中一直保持着这个规律，且曲线几乎成线性变化，尤其是 AF3 和 AF4 的线性变化更明显。说明土体的变形同时受膨胀土失

水收缩的性质和净正应力的影响，净正应力越大，土体变形越明显。换言之，应力状态会改变土体的孔隙结构，孔隙比减小，说明试样越来越密实，孔隙体积在变小，从侧面反映出了土体孔隙中水气含量在发生变化。

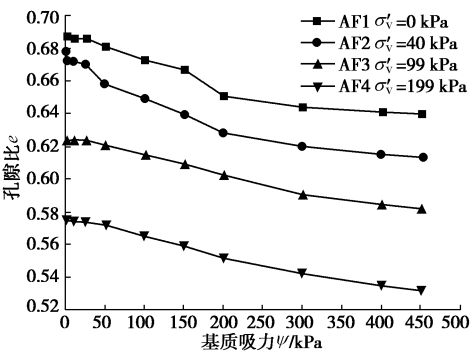


图 3 不同净正应力下孔隙比与基质吸力的关系

Fig. 3 Relationship between void ratio and matrix suction under different net normal stresses

2.2 净正应力对膨胀土持水特性的影响

体积含水率  $\theta$  与基质吸力  $\psi$  的关系见图 4。从图 4 可以看出：体积含水率  $\theta$  与基质吸力  $\psi$  的关系变化曲线呈现双峰形态，即双峰土-水特征曲线（bimodal soil-water characteristic curve），换言之，南阳膨胀土在每一个净正应力下的 SWCC 都存两个边界效应段和两个过渡段。这是由于土体的间断级配所造成的，由图 1 膨胀土的颗粒级配分布曲线可知，曲率系数  $C_c=6.504$ ，当  $C_c>3$  时，说明膨胀土的土体粒度成分不连续，主要由较大粒径颗粒和较小粒径颗粒组成，缺少某一组中间粒径颗粒<sup>[17]</sup>，这是 SWCC 出现“双峰”形态的主要原因。

表 4 南阳膨胀土 SWCC 实测数据

Table 4 Measured data of SWCC of Nanyang expensive soil								
基质吸力 /kPa	AF1 ( $\sigma'_v=0$ kPa )		AF2 ( $\sigma'_v=40$ kPa )		AF3 ( $\sigma'_v=99$ kPa )		AF4 ( $\sigma'_v=199$ kPa )	
	体积含水率/%	孔隙比	体积含水率/%	孔隙比	体积含水率/%	孔隙比	体积含水率/%	孔隙比
0	40.74	0.69	40.40	0.68	38.44	0.62	36.53	0.58
1	40.48	0.69	40.07	0.67	37.79	0.62	36.21	0.57
10	34.67	0.69	33.51	0.67	30.87	0.62	27.46	0.57
25	34.32	0.69	33.30	0.67	30.42	0.62	27.21	0.57
50	33.15	0.68	32.73	0.66	28.96	0.62	27.10	0.57
100	31.53	0.67	32.23	0.65	26.95	0.62	26.63	0.57
150	30.88	0.67	31.48	0.64	26.26	0.61	25.21	0.56
200	30.95	0.65	30.73	0.63	25.71	0.60	23.77	0.55
300	29.94	0.64	30.65	0.62	24.81	0.59	22.86	0.54
400	29.19	0.64	30.01	0.62	24.18	0.58	22.63	0.54
450	28.83	0.64	29.79	0.61	23.92	0.58	21.93	0.53

图 4 中, AF1 与 AF2 的 SWCC 很接近, 当基质吸力大于 100 kPa 时, 二组图像出现交叉重合现象, 说明 2 m 深范围内的覆土压力对膨胀土持水量的影响较小。

值得注意的是, 当图像经历双峰 SWCC 的第二段单峰 SWCC 时, 随着净正应力的增大, SWCC 的第二个边界效应段随之延长, 这说明在 10~100 kPa 这一基质吸力范围内, 净正应力会显著影响膨胀土排出水分的速度。在这一区间, 净正应力使得膨胀土土体被压缩, 孔隙体积减小, 因此净正应力越大, 则需要更大的基质吸力才能促使膨胀土排水, 土体体积含水率的变化也越缓慢, 这恰好解释了图 5 饱和度形式的 SWCC ( $S_r$ -SWCC) 中, 第二段 SWCC 的进气值  $AEV_m$  在不同的净正应力下存在较大差异且随净正应力的增大而增大的现象。而 4 组试样第一段 SWCC 的进气值  $AEV_M$  非常相近, 大约都在 1 kPa 左右, 在图上不方便绘出, 说明覆土压力对试样土体第一段 SWCC 的进气值影响并不明显。

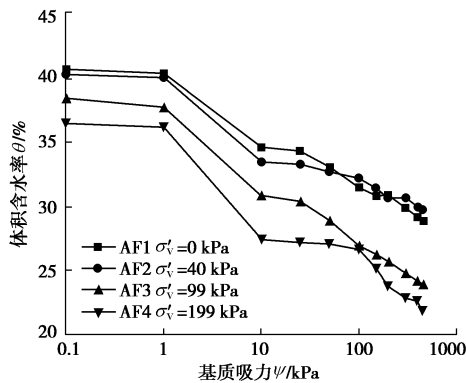


图 4 不同净正应力下体积含水率形式的 SWCC

Fig. 4  $\theta$ -SWCC under different net normal stresses

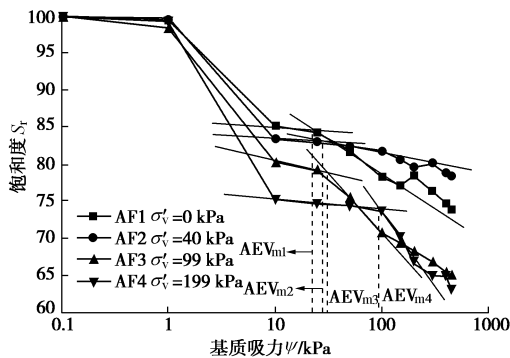


图 5 不同净正应力下饱和度形式的 SWCC

Fig. 5  $S_r$ -SWCC under different net normal stresses

### 3 SWCC 模型的验证

绘出两段单峰 SWCC 饱和体积含水率与净正应力的关系图  $\theta_s - \lg \sigma'_v$ , 如图 6。当  $\sigma'_v > 40$  kPa 之后, 曲

线急剧下降, 平缓段和下降段线性关系显著。把图 6 中曲线拐点所对应的净正应力当作参考净正应力  $\sigma'_{vc}$ , 分别对  $\sigma'_{vc}$  前后两段进行线性拟合, 得到斜率  $k_{ij}$  和截距  $b_{ij}$ , 拟合优度判定系数  $R^2 \geq 0.956$ 。以  $\sigma'_{vc}$  为分界,  $\theta_s$  与  $\sigma'_v$  的关系可归结为简单的线性函数  $\theta_s = k_{ij} \cdot \lg \sigma'_v + b_{ij}$ 。

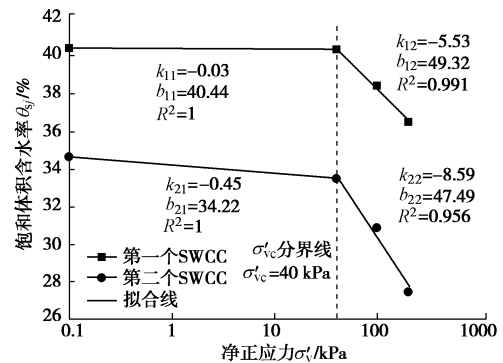


图 6 饱和体积含水率与净正应力的线性拟合

Fig. 6 Linear fitting curves of net normal stress and saturated volumetric water content

最终基于经典 Fredlund-Xing 方程, 提出能明确考虑净正应力影响的膨胀土 SWCC 模型

$$\theta_{ij} = \frac{k_{ij} \cdot \lg \sigma'_v + b_{ij}}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a_{ij}} \right)^{n_{ij}} \right] \right\}^{m_{ij}}}, \quad (1)$$

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \theta_{i1}(\sigma'_v) & \sigma'_v \leq \sigma'_{vc} \\ \theta_{i2}(\sigma'_v) & \sigma'_v > \sigma'_{vc} \end{cases}. \quad (2)$$

式中  $k_{ij}$  和  $b_{ij}$  表示饱和体积含水率与净正应力线性拟合直线 ( $\theta_s - \lg \sigma'_v$ ) 的斜率和截距;  $a_{ij}$ 、 $n_{ij}$  和  $m_{ij}$  表示恒定净正应力下的土性参数;  $\sigma'_{vc}$  表示参考净正应力, 是  $\theta_s - \lg \sigma'_v$  拟合线中拐点所对应的净正应力; 角标  $j$  表示  $\theta_s - \lg \sigma'_v$  线性拟合直线的第  $j$  段, 以  $\sigma'_{vc}$  为分界,  $j$  取 1, 2; 角标  $i$  表示双峰或多峰 SWCC 中的第  $i$  段 SWCC, 若为常规单峰 SWCC,  $i$  取 1 即可。

在此说明, 若得到双峰或多峰 SWCC, 需要拆解成多段单峰 SWCC 进行拟合验证。当  $\sigma'_v \leq \sigma'_{vc}$  时,  $j$  取 1, 此时  $\theta_{i1}$  表示净正应力小于参考净正应力时第  $i$  段 SWCC 的体积含水率; 当  $\sigma'_v > \sigma'_{vc}$  时,  $j$  取 2, 此时  $\theta_{i2}$  表示净正应力大于参考净正应力时第  $i$  段 SWCC 的体积含水率。

采用式 (1) 和式 (2), 分别代入对应的斜率  $k_{ij}$  和截距  $b_{ij}$ , 利用软件 Origin8.5 对四组试样的 SWCC 进行非线性最小二乘法拟合, 将双峰 SWCC 的第一段 SWCC 和第二段 SWCC 分开拟合, 参数  $a_{ij}$ 、 $n_{ij}$ 、 $m_{ij}$  皆为拟合得到, 最终拟合结果见图 7、图 8。图 7 第一段 SWCC 的拟合优度判定系数  $R^2$  分别为 0.993, 0.999,

0.999, 0.999; 图 8 第二段 SWCC 的拟合优度判定系数  $R^2$  分别为 0.965, 0.984, 0.985, 0.971。可见, 已提出的 SWCC 模型能够很好地拟合南阳膨胀土双峰 SWCC。拆分为两段单峰 SWCC 拟合时, 第一段 SWCC 的基质吸力范围为 0~25 kPa, 第二段 SWCC 的基质吸力范围为 10~450 kPa, 两段 SWCC 在选择基质吸力范围时有小部分重叠 (10~25 kPa), 分段拟合会导致重叠的基质吸力对应两个体积含水率  $\theta_{1j}$  和  $\theta_{2j}$ , 最终体积含水率取二者的平均值。

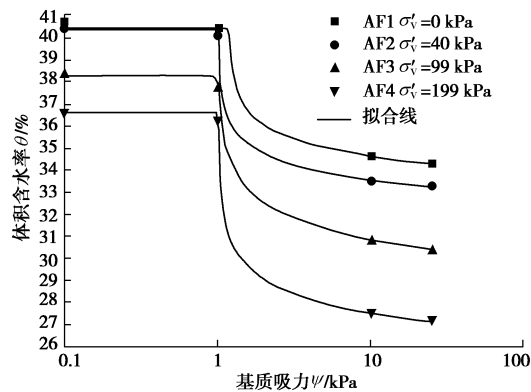


图 7 南阳膨胀土第一段 SWCC 拟合

Fig. 7 Fitting SWCCs of first segment of Nanyang expansive soil

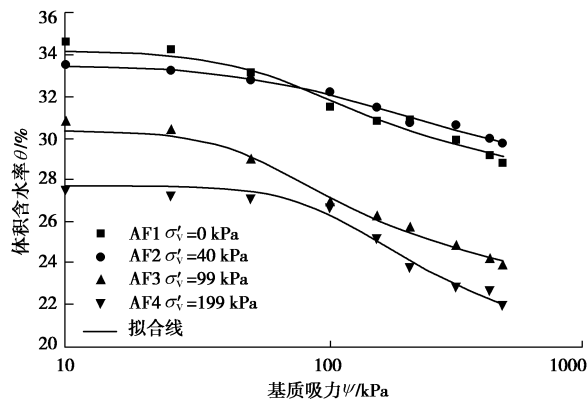


图 8 南阳膨胀土第二段 SWCC 拟合

Fig. 8 Fitting SWCCs of second segment of Nanyang expansive soil

4 结 论

本文的膨胀土 SWCC 试验以不同深度覆土压力 (净正应力) 为变量, 考虑了试样的体积变形与孔隙结构的改变, 并利用已提出的能明确考虑净正应力影响的膨胀土 SWCC 表征方程对试验数据进行拟合验证, 得出以下几点结论:

(1) 膨胀土在恒定净正应力下表现出了双峰土-水特征曲线, 且净正应力的增大延长了双峰 SWCC 的第二个边界效应段 (10~100 kPa), 这是由于净正应

力对试样孔隙结构的影响所造成的, 说明在 10~100 kPa 这一基质吸力范围内, 净正应力会显著影响膨胀土在脱湿过程中的排水速率, 净正应力越大, 水分丧失越缓慢。

(2) 净正应力会改变双峰 SWCC 中第二段单峰 SWCC 的进气值  $AEV_m$ , 净正应力越大,  $AEV_m$  越大。但净正应力对于第一段单峰 SWCC 的进气值影响较小, 在不同净正应力的作用下, 南阳膨胀土第一段单峰 SWCC 的进气值  $AEV_M$  皆为 1 kPa 左右。

(3) 利用南阳膨胀土 SWCC 试验的实测数据, 验证了已提出的能明确考虑净正应力且适用于多峰 SWCC 的表征方程, 曲线拟合精度较高, 拟合结果良好。

论文研究结果可以用于描述膨胀性土壤在不同覆土深度下的持水特性和渗透特性, 为膨胀土地区相关工程问题的研究提供参考。

参考文献:

[1] 郭利娜, 胡 斌, 宋友建, 等. 土-水特征曲线预测非饱和土的抗剪强度对比研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(6): 849 - 856. (GUO Li-na, HU Bing, SONG You-jian, et al. Contrast study on forecast of shear strength of unsaturated soil using soil water characteristic curve[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(6): 849 - 856. (in Chinese ))

[2] 辛志宇, 谭晓慧, 王 雪, 等. 膨胀土增湿过程中吸力 - 孔隙比 - 含水率关系[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1195 - 1203. (XIN Zhi-yu, TAN Xiao-hui, WANG Xue, et al. Relationship among suction, void ratio and water content of expansive soils during wetting process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1195 - 1203. (in Chinese))

[3] GENUCHTEN M T Van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(44): 892 - 898.

[4] FREDLUND D G, XING An-qing. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521 - 532.

[5] GALLIPOLI D, WHEELER S J, KARSTUNEN M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. Géotechnique, 2003, 53(53): 105 - 112.

[6] 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.
- [7] BROOKS R J, COREY A T. Hydraulic properties of porous medium[D]. Fort Collins: Colorado State University Hydrology, 1964, **3**(1): 352 - 366.
- [8] 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, 2016, **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, 2016, **33**(6): 8 - 17. (in Chinese))
- [9] 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, 1999, **49**(2): 143 - 160.
- [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] NG C W W, WONG H N, TSE Y M, et al. A field study of stress-dependent soil-water characteristic curves and permeability of a saprolitic slope in Hong Kong[J]. Géotechnique, 2011, **61**(6): 511 - 521.
- [12] 缪林昌, 刘松玉. 南阳膨胀土的水分特征和强度特性研究[J]. 水利学报, 2002(7): 87 - 92. (LIU Song-yu, MIAO Lin-chang. Soil-water characteristics and shear strength of expansive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(7): 87 - 92. (in Chinese))
- [13] 龚壁卫, 吴宏伟, 王 斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(12): 1915 - 1918. (GONG Bi-wei, WU Hong-wei, WANG Bing. Influence of stress states on soil-water characteristics of expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(12): 1915 - 1918. (in Chinese))
- [14] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [15] GB50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 2013. (GB50112—2013 Technical code for buildings in expansive soil regions[S]. 2008. (in Chinese))
- [16] 吴宏伟, 陈 锐. 非饱和土试验中的先进吸力控制技术[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 123 - 128. (NG C W W, CHEN Rui. Advanced suction control techniques for testing unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 123 - 128. (in Chinese))
- [17] 孙世国, 武崇福, 刘 洋, 等. 土力学地基基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 15. (SUN Shi-guo, WU-Chong-fu, LIU Yang, et al. Soil mechanics and foundation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)