

DOI: 10.11779/CJGE201709020

等应力和等孔隙比状态下的土-水特征曲线

邹维列¹, 王协群^{2*}, 罗方德³, 张俊峰⁴, 叶云雪¹, 胡中威²

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉建工集团股份有限公司, 湖北 武汉 430023; 4. 碧桂园房地产开发集团有限公司, 广东 佛山 528312)

摘要: 有研究结果表明, 孔隙比是影响土-水特征曲线(SWCC)的直接因素, 而应力状态是通过孔隙比影响SWCC的间接因素。然而相关文献中关于孔隙比对SWCC影响的试验研究, 一般只控制了试样的初始孔隙比相同或者不同, 而在SWCC试验过程中对试样的孔隙比并没有加以控制。为了深化对孔隙比和应力状态对SWCC影响的认识, 以山东东营黏土为研究对象, 采用应力相关土水特征曲线仪, 对试样沿预定路径进行单向压缩或单向压缩-回弹以后, 控制竖向应力或孔隙比在脱一吸湿SWCC试验过程中保持不变。结果表明: 在本次吸力范围内(未超过400 kPa)的脱湿一吸湿过程中, 即使竖向应力相同(等应力状态), 只要孔隙比不同, 则SWCC就不同; 但只要保持试验过程中试样孔隙比不变(等孔隙比状态), 则竖向应力的变化对SWCC几乎没有影响。等孔隙比状态下, 即使竖向应力不同, 但试样的进气值相近, 脱/吸湿速率也几乎保持一致; 等应力状态下, 进气值随着孔隙比的增大而减小, 脱一吸湿SWCC的滞回度和滞回圈面积随孔隙比增加而增大。研究结果对于建立SWCC模型时, 如何选取模型参数具有理论指导意义。

关键词: 等孔隙比状态; 等应力状态; 土-水特征曲线; 基质吸力; 单向压缩

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)09-1711-07

作者简介: 邹维列(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土特性、土工合成材料应用原理、道路中的岩土工程问题等方面的教学和科研工作。E-mail: zwilliam@126.com。

Experimental study on SWCCs under equal stress and equal void ratio states

ZOU Wei-lie¹, WANG Xie-qun^{2*}, LUO Fang-de³, ZHANG Jun-feng⁴, YE Yun-xue¹, HU Zhong-wei²

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430072, China; 3. Wuhan Construction Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430023, China; 4. Country Garden Real Estate Development Co., Ltd., Foshan 528312, China)

Abstract: The existing laboratory test results in the literatures show that the void ratio is a direct factor affecting the soil-water characteristic curves (SWCCs), whereas the stress state is an indirect factor affecting SWCC, via void ratio. However, in the experimental investigations on the influence of void ratio on SWCCs in the literatures, only the initial void ratios of samples are controlled to keep the same or different, but the void ratios of samples during the SWCC tests are not controlled. In the present experimental study, the vertical stress and void ratio of samples after the unidirectional compression or compression-rebound along the scheduled paths are controlled to keep the same during the drying-wetting SWCC tests by means of a stress-dependent SWCC (SDSWCC) apparatus. The test results indicate that even if the vertical stress is identical (equal stress state), the SWCCs are different as long as the void ratio is different during the drying-wetting SWCC tests. As long as the void ratios of samples are consistent (i.e., equal void ratio state) during the drying-wetting SWCC tests, the change of vertical stress has little effect on SWCCs. Under an equal void ratio state, the drying/wetting rates and air-entry values (AEVs) of the samples are almost the same even if the applied vertical stresses are different. Under an equal stress state, the AEVs of samples decrease with the increasing void ratios of samples, and both hysteresis degree and area of hysteresis loop increase with the increasing void ratio of samples. This study provides valuable reference for one to choose the parameters for a SWCC model.

Key words: equal void ratio state; equal stress state; soil-water characteristic curve; matric suction; unidirectional compression

0 引言

已有研究表明, 土的矿物成分、孔隙结构(可用

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479148); 防灾减灾湖北省重点实验室项目(三峡大学)(2016KJZ03); 中央高校基本业务费专项资金项目(2042016kf1117)

收稿日期: 2016-06-01

*通讯作者(E-mail: xqscwang@126.com)

孔隙比和孔隙分布曲线描述)、干湿历史、应力状态/应力历史^[1-12]、温度^[13-14]等因素都会对土-水特征曲线(SWCC)产生影响。相关研究涵盖的土类很广,包括冰渍土^[1]、残积土^[3]、砾石土^[4]、黏土^[5]、黄土^[6, 13]、膨胀土^[7]、膨润土等等。

在上述影响因素中,关于孔隙比和应力状态对SWCC的影响问题尚存争议。有学者认为孔隙结构才是影响SWCC的直接因素,而应力状态只是通过改变孔隙比而影响SWCC的间接因素^[7, 11-12, 15]。文献[11]的研究结果表明,当制样方法和初始孔隙比大致相同时,SWCC是相近的。

不过,即使制样方法和初始孔隙比相同的试样,在进行某一应力状态下的SWCC试验过程中,试样体积将会发生变化。与此同时,SWCC试验过程中施加的各级吸力对试样体积也会产生影响^[16-19]。因此,即使试样的初始孔隙比相同,但在SWCC试验过程中,其孔隙比未必相同。为了更加深刻地认识和理解应力状态和孔隙比对SWCC的影响,本次研究以山东东营黏土为研究对象,采用应力相关土水特征曲线仪,设计独特的单向压缩和单向压缩一回弹两种路径,分别完成了等孔隙比和等应力状态下的两组共3个试样的脱一吸湿SWCC试验。研究结果对于建立SWCC模型型,选取模型参数具有理论指导意义。

1 试验材料、仪器与方案

1.1 试验材料与仪器

试验所用土样取自山东东营,其主要物理性质指标如表1所示,为低液限黏土。

表1 土样主要物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of clay from Dongying

塑限 /%	液限 /%	塑性 指数	颗粒相 对密度	最优含 水率/%	最大干密度 /(kg·m ⁻³)
21.6	33.1	11.5	2.73	16.5	1701

试验仪器采用Geo-Expert公司生产的应力相关土水特征曲线(SDSWCC)仪。SDSWCC仪的具体操作、各部件的组成和工作原理可参考文献[20, 21]。为了消除仪器本身的变形影响,可用不锈钢标准块代替试样进行预压缩试验,并认为标准块在各级竖向应力下的竖向位移是仪器本身的变形。因此,试样的实际竖向位移应等于仪器显示的位移读数减去仪器本身的变形。

1.2 试验方案与试样制备

1.2.1 试验方案

如图1所示,A, B, C三点分别对应3种不同的应力历史。其中,A点和B点分别位于正常压缩曲线

和回弹曲线上,具有相同的孔隙比和不同的应力状态;B, C两点则具有相同的应力状态和不同的孔隙比。

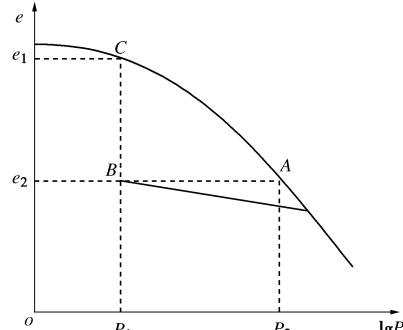


图1 饱和土样的单向压缩/回弹曲线

Fig. 1 Uniaxial compression/rebound curves of saturated samples

为了考察应力状态和孔隙比对SWCC的影响,设计两组试验,共3个试样,分别记为DY-1、DY-2、DY-3,它们的初始应力状态和初始孔隙比分别对应着A, B, C三点。其中试样DY-1和DY-2为第一组,试样DY-2和DY-3为第二组。两组试验的具体程序如下:

(1) 第一组

首先采用固结仪将试样DY-1压缩至A点状态,将试样DY-2经过压缩后回弹至B点状态,使这两个试样具有相同的初始孔隙比(e_2)、不同的竖向应力(分别为 P_2 和 P_1)。

然后对两个试样进行脱湿一吸湿SWCC试验。以连续72 h排水量不超过试样体积的0.05%,即0.03 mL作为吸力平衡的标准。

由于试样孔隙比在脱一吸湿SWCC试验过程中会不断变化,因此试验过程中需要调节竖向应力,以保证DY-1、DY-2两个试样的孔隙比始终保持为初始孔隙比 e_2 。

(2) 第二组

将试样DY-3压缩至C点状态后,始终保持与试样DY-2的竖向应力(P_1)相同,完成其脱湿一吸湿SWCC试验。

3个试样的加/卸载顺序为:

a) 试样DY-2:先25→50→100→200→400→200 kPa的加、卸载顺序至B点状态;然后保持竖向压力200 kPa不变,5→10→20→50→100→200→400→200→100→50→20→10→5 kPa的基质吸力顺序对试样进行脱一吸湿。

b) 试样DY-3:先按25→50→100→200 kPa的加载顺序压缩至C点状态;然后按与试样DY-2相同的基质吸力顺序进行脱湿一吸湿。

c) 试样DY-1:先压缩至A点状态,但A点的竖向压力需要根据试样DY-2在B点处卸载结束时的孔隙比来确定,即A点最终的竖向压力要使得试样DY-1

和 DY-2 在脱湿起点处的初始孔隙比 (e_2) 相等; 然后按与试样 DY-2 相同的基质吸力顺序进行脱一吸湿。在其脱湿一吸湿 SWCC 过程中, 始终保持与试样 DY-2 的孔隙比相同, 即为 e_2 。

1.2.2 试样制备

将土样自然风干、碾碎并过 2 mm 孔径的筛, 清除土样中的杂质, 按目标含水率 16%, 干密度 1500 kg/m³ 制样。试样采用直径 70 mm, 高度 19 mm 的环刀样。制样后抽气饱和。

实际制得的试样 DY-1、DY-2 及 DY-3 的初始干密度分别为 1501, 1509, 1513 kg/m³; 初始含水率分别为 15.96%, 16.05%, 15.84%; 抽气饱和后, 试样的参数见表 2。

表 2 饱和后各试样参数

Table 2 Physical indexes of three specimens after saturation

试样 编号	干土质量 /g	含水率 /%	饱和度 /%	孔隙比
DY-1	109.75	30.38	100.18	0.819
DY-2	110.35	29.64	100.15	0.809
DY-3	110.64	30.38	100.74	0.804

2 试验结果与分析

2.1 3 个试样 SWCC 之间的总体比较

3 个试样压缩或压缩 - 回弹后的曲线如图 2 所示。可以看出, 位于 A 点和 B 点处的试样 DY-1 和 DY-2 具有相同的初始孔隙比、不同的竖向应力状态; B 点和 C 点处的试样 DY-2 和 DY-3 具有相同的竖向应力状态、不同的初始孔隙比。

为了便于在半对数中坐标绘制 SWCC, 设置初始基质吸力为 0.01 kPa, 这一预压缩过程引起试样的排水量很小, 可以忽略不计。各试样的脱湿一吸湿试验数据如表 3 所示, 据此得到各试样的 SWCCs 如图 3 所示。

表 3 试样 DY-1 和 DY-2 的脱一吸湿试验数据

Table 3 Test data for DY-1 and DY-2 under drying-wetting paths

基质吸力 /kPa	饱和度/%			竖向应力/kPa			孔隙比		
	DY-1	DY-2	DY-3	DY-1	DY-2	DY-3	DY-1	DY-2	DY-3
0.01	100	100	100	374	200	200	0.7705	0.7706	0.7816
5	96.81	96.50	92.25	368	200	200	0.7703	0.7703	0.7803
10	94.07	92.34	87.56	364	200	200	0.7702	0.7702	0.7799
20	84.07	85.60	79.38	359	200	200	0.7701	0.7701	0.7794
50	50.19	48.21	39.21	353	200	200	0.7695	0.7695	0.7786
100	42.53	41.22	31.65	350	200	200	0.7679	0.7679	0.7776
200	41.50	35.52	27.11	349	200	200	0.7659	0.7659	0.7757
400	34.01	30.48	21.17	347	200	200	0.7627	0.7627	0.7727
200	34.57	32.02	22.73	356	200	200	0.7647	0.7646	0.7734
100	35.94	33.71	24.76	359	200	200	0.7667	0.7666	0.7747
50	39.79	37.22	28.56	360	200	200	0.7675	0.7676	0.7754
20	57.23	50.9	39.37	360	200	200	0.7683	0.7683	0.7756
10	80.50	75.01	68.63	361	200	200	0.7687	0.7687	0.7759
5	85.49	84.00	79.12	364	200	200	0.7689	0.7689	0.7758

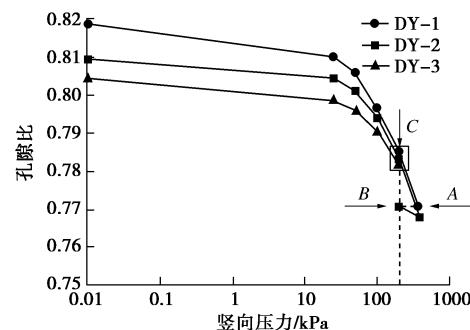


图 2 3 个试样的压缩曲线

Fig.2 Compression curves for three specimens

从图 3 可以看出, 试样 DY-1 和 DY-2 的 SWCCs 很接近, 说明在孔隙比相同的条件下, 竖向应力的变化对 SWCC 基本没有影响; 而试样 DY-2 和 DY-3 的 SWCC 之间则具有明显的差异, 且随着孔隙比的减小, 试样 SWCC 向右和向上移动。这说明应力状态相同时, 孔隙比的变化对 SWCC 的影响较大。

采用 V-G 模型^[22] (方程 (1)) 拟合 SWCC, 目的是通过比较各试样的模型拟合参数来更加深刻地描述应力状态和孔隙比对 SWCC 的影响。

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

式中, θ 为体积含水率, θ_s 为饱和体积含水率, θ_r 为残余体积含水率, ψ 为基质吸力, α , m 和 n 均为模型参数。

在此采用参数拟合方法来得到 θ_r 。利用非线性工具 1stopt 对试验数据进行拟合, 得到各试样的拟合参数如表 4 所示。由表 4 可知: ①在脱湿阶段, 试样 DY-2 比试样 DY-1 的残余含水率低, 但比试样 DY-3 的残余含水率高。可见在等孔隙比相同状态下, 竖向应力越小, 试样残余含水率越低; 等竖向应力状态下, 孔隙比越小, 试样残余含水率越高。其原因在于, 孔隙比

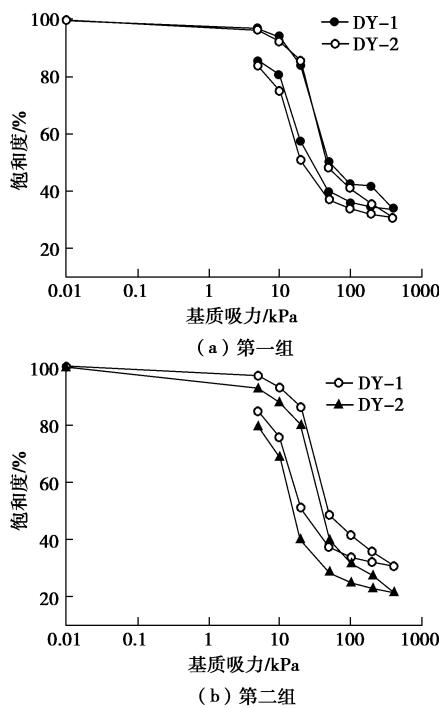


图 3 饱和度和基质吸力的关系

Fig. 3 Relationship between degree of saturation and matric suction

越小, 大孔隙越少, 小孔隙越多, 试样的持水性越好, 所以残余含水率越高。②试样 DY-2 和 DY-1 的其余参数都比较接近, 但与试样 DY-3 的其余参数相差较为明显。这同样说明, 在本文的吸力范围内, 孔隙比是影响 SWCC 的直接因素。

表 4 各试样的拟合参数

Table 4 Fitting parameters of VG models for three samples

水力路径	试样编号	θ_r /%	α	m	n
脱湿	DY-1	19.35	0.0370	0.8408	2.424
	DY-2	16.18	0.0362	0.7826	2.340
	DY-3	12.22	0.0171	2.3860	1.558
吸湿	DY-1	17.90	0.0389	0.2934	5.065
	DY-2	15.20	0.1167	0.0804	13.974
	DY-3	11.18	0.1168	0.0231	57.630

2.2 孔隙比与竖向应力的变化

等竖向应力状态下, 试样 DY-2 和 DY-3 的孔隙比在脱湿—吸湿过程中的变化如图 4 所示; 为了保持等孔隙比状态, 试样 DY-1 在脱湿—吸湿过程中因调整竖向应力而引起的变化如图 5 所示。

从表 3 和图 4 可以明显看出, 在脱湿—吸湿 SWCC 试验过程中, 试样孔隙比是变化的, 且试样 DY-3 的孔隙比比试样 DY-2 的孔隙比变化量要大。这是因为试样 DY-3 的初始孔隙比 (e_1) 比试样 DY-2 的初始孔

隙比 (e_2) 要大。初始孔隙比越大, 持水能力越差, 在同一竖向压力作用下排水越多。因此试样 DY-3 的孔隙比变化更大。

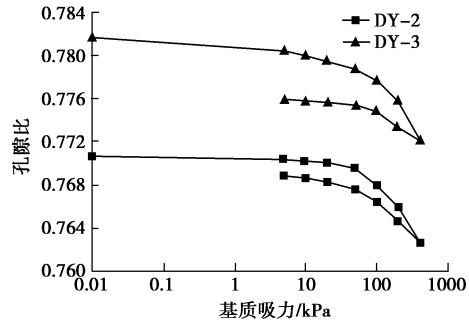


图 4 孔隙比在脱—吸湿过程中的变化

Fig. 4 Variation of void ratios of samples DY-2 and DY-3 with regard to matric suction during drying-wetting SWCC tests

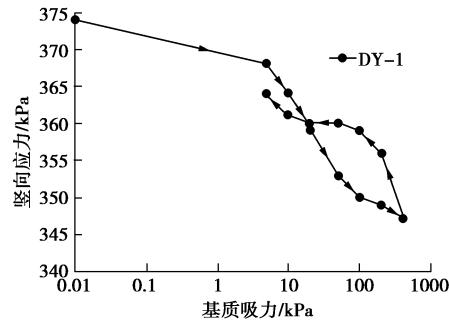


图 5 竖向应力在脱—吸湿过程中的变化

Fig. 5 Variation of vertical stress of sample DY-1 with regard to matric suction during drying-wetting SWCC tests

图 5 显示了试样 DY-1 在脱湿—吸湿 SWCC 试验过程中, 为了保持与试样 DY-2 的孔隙比相同, 其竖向应力因调整而发生的变化。

3 应力状态和孔隙比对土水特征的影响

3.1 脱湿、吸湿速率

孔令伟等^[23]认为, 单位时间内重力含水率的变化量, 实际上反映了试样的脱湿—吸湿速率。本次试验各试样在 SWCC 试验过程中的脱湿—吸湿速率曲线如图 6 所示。可见曲线两端的斜率较缓, 而中间段较陡。即中间段的脱—吸湿速率最快。

取中间段的脱—吸湿速率进行比较, 可得到各试样的脱湿—吸湿速率见表 5。表 5 中 ψ_a 为进气值, v_d 为脱湿速率, v_w 为吸湿速率。可以看出, 无论在脱湿阶段还是吸湿阶段, 在相同时间内, 尽管试样 DY-1 和 DY-2 的竖向应力不同, 但二者的脱湿—吸湿速率几乎保持一致; 而试样 DY-3 与 DY-2 相比, 尽管二者竖向应力相同, 但含水率变化相差较大, 尤其在脱湿

阶段。这同样表明孔隙比对试样脱湿—吸湿速率的影响比应力状态更大, 进而对 SWCC 的影响也更大。从表 5 还可以看出, 试样 DY-1 与 DY-2 的进气值十分接近, 且均大于试样 DY-3 的进气值。这表明等孔隙比状态下, 即使竖向应力不等, 但试样的进气值相近; 而等应力状态下, 若孔隙比不等, 则进气值就不同, 且进气值随着孔隙比的增大而减小。

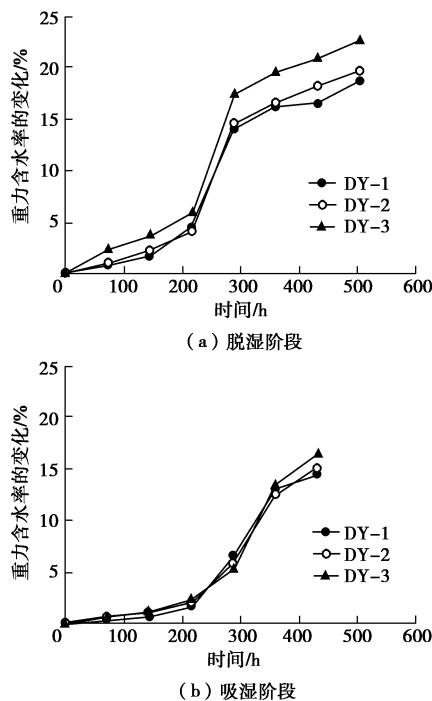


图 6 各试样脱—吸湿速率的变化

Fig. 6 Variation of gravity water contents of samples with time

表 5 各试样的脱—吸湿速率

Table 5 Drying-wetting rates of samples

试样编号	ψ_a /kPa	v_d /(%·h ⁻¹)	v_w /(%·h ⁻¹)
DY-1	7.64	0.133	0.080
DY-2	7.47	0.147	0.074
DY-3	6.48	0.159	0.116

3.2 滞回度和滞回圈面积

刘奉银等^[24]认为, 在定量描述 SWCC 的滞回特性时, 应综合考虑滞回圈面积和滞回度两个因素, 并给出了滞回度的表达式为

$$D_{d/w} = \frac{\Delta\theta_{\max}}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

式中 $D_{d/w}$, $\Delta\theta_{\max}$ 分别为一次干湿循环过程中 SWCC 的滞回度和体积含水率的最大差值; 其余符号同前。

据此, 可得到各个试样的滞回度如表 6 所示。表中 $D_{d/w}$ 指滞回度的差 (取绝对值), S 为滞回圈面积, ΔS 为滞回圈面积的差 (取绝对值)。

由表 6 可知, 试样 DY-1 的滞回度比试样 DY-2 的

小, 表明在等孔隙比条件下, 随着竖向应力的增大, 滞回度减小; 试样 DY-2 的滞回度比试样 DY-3 的小, 说明在等竖向应力条件下, 随着孔隙比的增加, 滞回度增大。

利用式 (2) 和表 4 对试样的脱湿、吸湿曲线进行积分求差, 计算滞回圈的面积 (其中吸力的范围为本次试验采用的 5~400 kPa), 得到试样 DY-1、DY-2 和 DY-3 的滞回圈面积分别为 3.060, 9.655 和 9.912 kPa (见表 6)。可见, 试样 DY-3 的滞回圈面积比试样 DY-1 和 DY-2 都大, 表明在等竖向应力条件下, 随着孔隙比的增大, 滞回圈的面积增加。这与文献[25]的结论是一致的。

表 6 各试样的滞回特性参数

Table 6 Parameters of hysteretic characteristics of samples

试样 编号	$\Delta\theta_{\max}$	$D_{d/w}$	$\Delta D_{d/w}$	S /kPa	ΔS /kPa
DY-1	0.1171	0.4267	0.0855	3.060	6.595
DY-2	0.1513	0.5122		9.655	
DY-3	0.1757	0.5283	0.0161	9.912	0.257

4 总结与结论

本文就孔隙比、应力状态对 SWCC 影响的问题及已有的相关试验研究尚存在的不足, 针对性地设计了单向压缩和压缩一回弹路径, 获得初始孔隙比相同、竖向应力不同和初始孔隙比不同、竖向应力相同的 3 个试样, 实施脱湿—吸湿 SWCC 试验, 更加深入而明确地揭示出了应力状态和孔隙比对 SWCC 的影响规律。

(1) 在脱湿—吸湿 SWCC 试验过程中, 试样孔隙比是变化的, 且在等应力状态时, 初始孔隙比大的试样比初始孔隙比小的试样的孔隙比的变化量要大。

(2) 无论在脱湿阶段还是吸湿阶段, 等孔隙比状态的试样, 即使竖向应力不同, 其脱湿—吸湿率却几乎保持一致; 而孔隙比不同的试样, 即使竖向应力状态相同, 其脱湿—吸湿速率也不同。因此孔隙比对应力状态对试样的脱湿—吸湿率影响更大, 进而对 SWCC 的影响也更大。

(3) 等孔隙比状态下, 即使竖向应力不等, 但试样的进气值相近; 等竖向应力状态下, 若孔隙比不等, 则进气值不同, 且进气值随着孔隙比的增大而减小。随着孔隙比的增大, 滞回度和滞回圈的面积均增加。

(4) 综上所述, 本次试结果可以夯实一个认识: 孔隙比是影响 SWCC 的根本因素, 而应力状态是通过孔隙比影响 SWCC 的间接因素。

基于这一认识,在建立 SWCC 模型时,则不用考虑应力因素,而考虑孔隙比因素,这样模型的建立和使用也方便和简单得多。

参考文献:

- [1] 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 - 159.
- [2] 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.
- [3] 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**: 511 - 521.
- [4] 罗启迅, 黄 靖, 陈 群. 竖向应力及干密度对砾石土土-水特征曲线的影响研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(3): 729 - 734. (LUO Qi-xun, HUANG Jing, CHEN Qun. Influence of vertical stress and dry density on soil-water characteristic curve of gravelly soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(3): 729 - 734. (in Chinese))
- [5] 胡孝彭, 赵仲辉, 倪晓雯. 应力状态对土-水特征曲线的影响规律[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2013, **41**(2): 150 - 155. (HU Xiao-peng, ZHAO Zhong-hui, NI Xiao-wen. Influence of stress state on soil-water characteristic curve[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2013, **41**(2): 150 - 155. (in Chinese))
- [6] 张 昭, 刘奉银, 赵旭光, 等. 考虑应力引起孔隙比变化的土水特征曲线模型[J]. *水利学报*, 2013, **44**(5): 578 - 585. (ZHANG Zhao, LIU Feng-yin, ZHAO Xu-guang, et al. A soil water characteristic curve model considering void ratio variation with stress[J]. *Chinese Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(5): 578 - 585. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 张雪东, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 土体密实状态对土-水特征曲线影响规律研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(5): 1463 - 1468. (ZHANG Xue-dong, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing, et al. Research on influence of soil density on soil-water characteristic curve[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(5): 1463 - 1468. (in Chinese))
- [9] 褚 峰, 邵生俊, 陈存礼. 干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(2): 413 - 420. (CHU Feng, SHAO Sheng-jun, CHEN Cun-li. Experimental research on influences of dry density and vertical stress on soil-water characteristic curves of intact unsaturated loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(2): 413 - 420. (in Chinese))
- [10] 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): 85 - 93. (Chen Zheng-han. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, **21**(1): 85 - 93. (in Chinese))
- [11] SUN D A, SHENG D C, XU Y F. Collapse behaviour of unsaturated compacted soil with different initial densities[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, **44**(6): 673 - 686.
- [12] 孙德安. 非饱和土的水力和力学特性及其弹塑性描述[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(11): 3217 - 3232. (SUN De-an. Hydro-mechanical behaviours of unsaturated soils and their elastoplastic modelling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(11): 3217 - 3231. (in Chinese))
- [13] 王协群, 邹维列, 骆以道, 等. 考虑压实度时的土水特征曲线和温度对吸力的影响[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(3): 368 - 372. (WANG Xie-qun, ZOU Wei-lei, LUO Yi-dao, et al. SWCCs and influence of temperature on matrix suction under different compaction degrees[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(3): 368 - 372. (in Chinese))
- [14] 高燕希, 符力平. 非饱和土吸力的温度性质[J]. *力学与实践*, 2003, **25**(3): 55 - 56. (GAO Yan-xi, FU Li-ping. The temperature property of soil suction for unsaturated soils[J]. *Mechanics in Engineering*, 2003, **25**(3): 55 - 56. (in Chinese))
- [15] 李 军, 刘奉银, 王 磊, 等. 关于土水特征曲线滞回特性影响因素的研究[J]. *水利学报*, 2015, **46**(增刊 1): 194 - 199. (LI Jun, LIU Feng-yin, WANG Lei, et al. A research of affect factor on hysteresis behavior for soil-water characteristic curve[J]. *Chinese Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **46**(S1): 194 - 199. (in Chinese))
- [16] FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Soil mechanics for unsaturated soils*[M]. New York: John Wiley, 1993.
- [17] 张芳枝, 陈晓平. 非饱和黏土变形和强度特性试验研究[J].

- 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 2): 3808 – 3814. (ZHANG Fang-zhi, CHEN Xiao-ping. Experimental study on characteristics of deformation and strength of unsaturated clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S2): 3808 – 3814. (in Chinese))
- [18] 戚国庆, 黄润秋. 基质吸力变化引起的体积应变研究[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(3): 491 – 497. (QI Guo-qing, HUANG Run-qiu. Laboratory test study on volumetric strain due to a simple change of suction[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(3): 491 – 497. (in Chinese))
- [19] 邹维列, 张俊峰, 王协群. 脱湿路径下重塑膨胀土的体变修正与土水特征[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2213 – 2219. (ZOU Wei-lie, ZHANG Jun-feng, WANG Xie-qun. Volume change correction and soil-water characteristics of remodeling expansive soil under dehydration path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2213 – 2219. (in Chinese))
- [20] NG C W W, PANG Y W. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(2): 157 – 166.
- [21] 叶云雪, 周 龙, 刘小文. 透水石对 GEO-Experts 土水特征曲线压力板仪排水的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2015, **43**(5): 74 – 78. (YE Yun-xue, ZHOU Long, LIU Xiao-wen. Permeable stones influence on the GEO-Experts SWCC pressure plate apparatus[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, **43**(5): 74 – 78. (in Chinese))
- [22] GENUCHTEN M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(44): 892 – 898.
- [23] 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 Ling-wei, LI Xiong-wei, GUO Ai-guo, 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. (in Chinese))
- [24] 刘奉银, 张 昭, 周 冬, 等. 密度和干湿循环对黄土土水特征曲线的影响[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 132 – 136. (LIU Feng-yin, ZHANG Zhao, ZHOU Dong, et al. Effects of initial density and drying-wetting cycle on soil water characteristic curve of unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 132 – 136. (in Chinese))
- [25] GALLAGE C P K, UCHIMURA T. Effects of dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of sandy soils[J]. Soils and Foundations, 2010, **50**(1): 161 – 172.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 – 4548, 国内统一刊号 CN 32 – 1124/TU, 国内发行代号 28 – 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhr.ac.cn。

(本刊编辑部)