

# 制样方法和干湿循环对粉质黏土土-水特征曲线影响

刘文化, 杨庆\*, 唐小微, 李吴刚

(大连理工大学 土木工程学院 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 基于压力板仪实测了粉质黏土击实试样和泥浆固结试样的脱湿土-水特征曲线(SWCC)以及泥浆固结试样在经历不同次数干湿循环后的SWCC,研究了制样方法和干湿循环对SWCC的影响;同时利用扫描电镜观测了泥浆固结试样干湿循环前后的微观结构特征.试验结果表明:泥浆固结三轴试样的SWCC位于三轴击实试样的上部;干湿循环使得试样的SWCC左移,泥浆固结试样的SWCC在经历2~3次干湿循环后趋于稳定. Van Genuchten模型能够很好地拟合不同干湿循环次数下的实测脱湿SWCC,其参数随干湿循环次数的变化规律可用指数函数进行描述.

**关键词:** 土-水特征曲线;制样方法;干湿循环;压力板仪

**中图分类号:** TU411      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7511/dllgxb201502009

## 0 引言

非饱和土的土-水特征曲线(SWCC)表征了土中含水率(或饱和度)与土中吸力的关系,是研究非饱和土水力-力学特性必不可少的工具.已有的研究表明SWCC受土体类型、矿物成分、应力历史、孔隙结构、干密度及试验方法等的影响<sup>[1-4]</sup>.此外,干湿循环也将对SWCC产生重要影响<sup>[5]</sup>.国内外学者对干湿循环条件下的SWCC进行了大量的研究,如刘奉银等<sup>[6]</sup>研究了干湿循环对黄土SWCC的影响,结果表明随着干湿循环次数的增加,滞回圈的面积逐渐减小最后趋于稳定. Mijares等<sup>[7]</sup>利用土壤水分传感器研究了多次干湿循环对压实冰碛土的影响. Miao等<sup>[8]</sup>则利用压力板仪研究了干湿循环3次后南阳膨胀土的土-水特性.张俊然等<sup>[9]</sup>通过引入一个与干湿循环次数有关的函数,提出了一个能够预测多次干湿循环后SWCC的数学模型,该模型是以基于压力板仪法的多次脱湿、吸湿试验数据为基础而推导的,能够较好地预测压力板仪法这类试验条件下干湿循环过程中的SWCC.

以往关于干湿循环条件下SWCC的研究主

要集中在干湿循环对SWCC土-水滞回特性的影响方面,研究方法主要基于轴平移技术,利用压力板仪、Tempe仪等进行脱湿和吸湿,进而获得SWCC的脱湿曲线和吸湿曲线.然而实际岩土工程中,地表土体多经受较大的基质吸力,且实际的干湿循环方式与利用轴平移技术进行脱湿再吸湿的方法存在一定的差异.因此,有必要深入研究自然条件下SWCC在干湿循环过程中的变化规律.此外,制样方法对试样的孔隙结构将产生重要影响<sup>[10]</sup>,从而影响非饱和土的SWCC,然而关于这方面的研究依然鲜见报道.基于此,本文针对大连地区粉质黏土,研究比较击实试样和泥浆固结试样的SWCC;并对泥浆固结试样进行自然风干而后抽真空饱和的干湿循环试验,模拟实际岩土工程干湿循环过程,研究干湿循环对SWCC的影响.

## 1 试验方案

### 1.1 试样制备

试验选用大连地区粉质黏土,天然含水率为5.0%,液限为23.3%,塑限为12.3%,塑性指数

为 11.0。本次试验采用击实法和泥浆固结法制备三轴试样,试样干密度  $1.65 \text{ g/cm}^3$ ,试样直径 39.1 mm、高 80 mm。对于泥浆固结试样,土样加水配制成初始含水率为 40% 的泥浆,用搅拌机搅拌均匀,闷料 24 h,确保泥浆水分平衡。将制备好的泥浆快速倒入固结箱中,分级施加荷载进行固结,通过测量泥浆下沉高度控制泥浆固结试样干密度。固结完成后采用内径为 39.1 mm 的薄壁取土器将三轴试样取出,装入三轴饱和器中,削平试样两端,制备成泥浆固结三轴试样。为研究干湿循环对 SWCC 的影响,对泥浆固结试样进行干湿循环试验。试验中将制备好的三轴试样在饱和器中自然风干脱水,每天夜晚将试样置于密闭容器中进行水分平衡,以使试样内部含水率分布均匀,早晨再将试样从密闭容器中取出继续进行风干脱水,如此交替进行,直至达到要求的风干剩余含水率 5.0%。脱湿完成后将试样放入真空锅中抽真空饱和,该过程作为一个干湿循环。已有的研究表明土体的变形和孔隙结构在经历 3~4 次循环后达到稳定<sup>[11-12]</sup>。为研究干湿循环次数对 SWCC 的影响,本次试验干湿循环次数为 0~6。将完成干湿循环试验的试样放入压力板仪中测定其 SWCCs。

## 1.2 试验方案

为减小试样差异性对试验结果的影响,每个试验工况制备两个相同的试样进行平行试验,试验结果取平均值。本次试验共制取 2 个击实试样 (SM) 和 14 个泥浆固结试样 (SC),研究制样方法和干湿循环对 SWCC 的影响。表 1 给出了各工况下两个平行试样的干密度平均值以及饱和含水率平均值和误差范围。

表 1 试样参数

Tab. 1 Specimen parameters

制样方法	试样编号	干湿循环次数	干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	饱和含水率/%
击实法	SM01	0	$1.655 \pm 0.002$	$21.69 \pm 0.04$
固结法	SC01	0	$1.649 \pm 0.003$	$21.69 \pm 0.17$
固结法	SC02	1	$1.646 \pm 0.001$	$21.97 \pm 0.18$
固结法	SC03	2	$1.651 \pm 0.002$	$21.83 \pm 0.32$
固结法	SC04	3	$1.650 \pm 0.004$	$21.80 \pm 0.06$
固结法	SC05	4	$1.648 \pm 0.002$	$21.85 \pm 0.13$
固结法	SC06	5	$1.651 \pm 0.001$	$21.89 \pm 0.14$
固结法	SC07	6	$1.650 \pm 0.003$	$21.70 \pm 0.11$

本次试验只对脱湿过程中获得的干燥曲线进

行研究,基质吸力测量范围为 0~400 kPa。试样脱湿采用美国 Soilmoisture 公司生产的 1250 型体积压力板仪,利用轴平移技术控制基质吸力。由于压力板仪未配备数据采集系统,采用称重法测量试样失水量。为了减少试样称量过程中压力板仪内环境与外界环境交换次数(降低蒸发效应),整个试验过程中,在每级基质吸力下平衡 15 d 后每隔 24 h 用 Sartorius 精密天平称量试样,测量精度 0.01 g。基质吸力平衡标准采用 24 h 内失水质量小于试样体积的 0.05%<sup>[13]</sup>,平衡后施加下一级基质吸力,直至最后一级。试样放回体积压力板仪之前,用细毛刷蘸无气水轻刷陶土板,使得陶土板表面覆盖一层无气水膜,这样既能保证试样与陶土板紧密接触,又能在一定程度上弥补部分水蒸气,减小蒸发效应<sup>[14]</sup>。脱湿完成后将试样取出烘干称重。本文采用体积含水率对 SWCC 进行研究。体积含水率定义为试样中水的体积与土颗粒所占体积的百分比,按下式计算各级基质吸力下的体积含水率:

$$\theta_w = \frac{\rho_d}{\rho_w} \times \left( \frac{M_i}{M_d} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\rho_d$  为试样干密度; $\rho_w$  为水的密度; $M_i$  为试样在各级基质吸力下平衡时的质量; $M_d$  为烘干试样质量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 制样方法的影响

图 1 显示了击实试样和泥浆固结试样的 SWCC。击实试样的 SWCC 位于泥浆固结试样的下方。随着基质吸力的增加,击实试样的体积含水率迅速减小,当基质吸力增加到 20 kPa 时,体积含水率已由饱和时的 36% 降低至 22%,而此时泥浆固结试样的体积含水率几乎保持不变;随着基质吸力的进一步增加,击实试样的失水速率降低,而泥浆固结试样的体积含水率则迅速减小,当基质吸力接近 300 kPa 时两者的体积含水率趋于一致。这可采用毛细管模型进行解释。孔隙半径与基质吸力存在如下关系:

$$R = 2T_s \cos \theta / \psi \quad (2)$$

式中: $R$  为孔隙半径, $T_s$  为水的表面张力, $\theta$  为接触角, $\psi$  为基质吸力。根据毛细管模型,当施加在试样上的基质吸力达到  $\psi$  时半径为  $R$  的孔隙将排水,而半径小于  $R$  的孔隙中的水则保持不变。

对于击实试样,击实过程中包裹在土颗粒或团粒间的气泡难以排出,导致击实试样更容易形成大孔隙<sup>[10]</sup>,大孔隙的存在使得试样在极小的吸力下就开始快速排水,试样的体积含水率迅速减小;当基质吸力达到一定值时大孔隙中的水已经排尽,继而中等孔隙陆续排水,体积含水率持续降低;随着基质吸力的进一步增加,中等孔隙中的自由水相继排空,试样的失水速率不断降低,体积含水率逐渐趋于稳定.泥浆固结试样则具有较均一的孔隙结构,试样中不存在大孔隙,而具有相对较多的中等孔隙,当基质吸力小于 20 kPa 时,试样因基质吸力小于空气进气值而几乎不排水,体积含水率保持不变;当基质吸力超过空气进气值时中等孔隙开始排水,体积含水率迅速减小直至中等孔隙中的自由水排空,体积含水率逐渐趋于稳定.因此,击实试样的 SWCC 位于泥浆固结试样 SWCC 的下方.

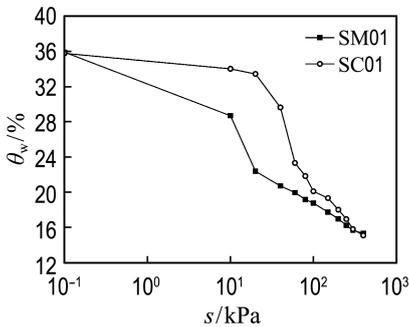


图1 击实试样与泥浆固结试样的土-水特征曲线

Fig. 1 SWCCs of the specimens prepared by moist tamping method and slurry consolidation method

## 2.2 干湿循环的影响

本次试验采用泥浆固结试样进行干湿循环条件下的 SWCC 研究.图 2 所示为不同干湿循环次数下粉质黏土试样的脱湿 SWCCs.由图 2 可知,在低基质吸力条件下(小于 10 kPa),干湿循环试样的体积含水率略高于原始试样的体积含水率;当基质吸力为 10 kPa 左右时干湿循环试样的 SWCC 与原始试样的 SWCC 出现交叉,随后干湿循环试样的 SWCC 位于原始试样 SWCC 的左侧,即相同基质吸力下干湿循环试样具有较低的体积含水率;随着基质吸力的进一步增加,干湿循环前后 SWCC 的差异逐渐减小.此外,对比不同

干湿循环次数下的 SWCC 可知,干湿循环对 SWCC 的影响主要发生在第一次循环.经过 2~3 次干湿循环后,试样的 SWCC 基本稳定.

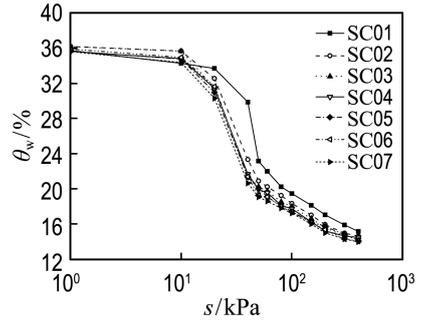


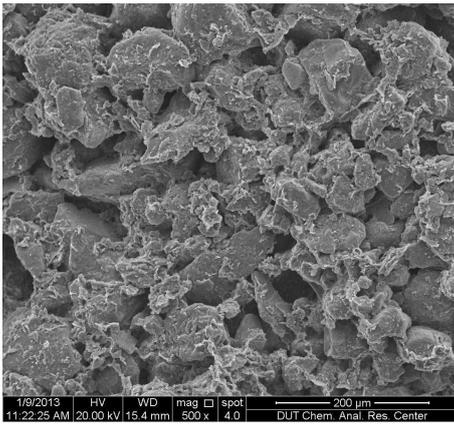
图2 泥浆固结试样不同干湿循环次数下的土-水特征曲线

Fig. 2 SWCCs of the slurry consolidation specimens subjected to different numbers of drying-wetting cycles

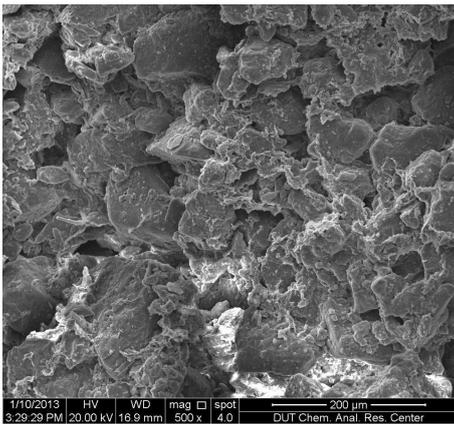
在土体材料一定的情况下,土体的 SWCC 主要取决于其孔隙结构.干湿循环对粉质黏土孔隙结构的影响主要体现在两方面:一方面是干湿循环过程中孔隙被压缩;另一方面是微裂隙的发展和可溶性胶结物的溶解导致固-液交界面表面特性发生改变.这两种作用改变了土颗粒间的相对位置、接触状态、孔隙半径、固-液交界面接触角,从而影响了土体的 SWCC.在干燥过程中土体受到较大的负孔隙水压力,有效应力增加,土骨架被压缩,在随后的吸水饱和过程中这种附加的体积压缩只能部分恢复,干湿循环过程中土体产生了不可逆的压缩变形,大孔隙被部分压缩,低基质吸力下干湿循环试样的体积含水率略高于原始试样的体积含水率.此外,土体在干燥过程中可能会产生微裂隙,在随后的吸水饱和过程中,由于结合水溶剂膜的楔入,微裂隙扩张,易溶盐组成的胶结物被溶解,土颗粒及团粒被磨圆,表面更为光滑. Morra 等<sup>[15]</sup>的研究表明,脱湿面(后退)接触角随表面粗糙度的降低而增大.根据毛细管模型(式(2)),随着脱湿面接触角的增大,弯液面半径减小,相同基质吸力下更小的孔隙中的水将排空,因此干湿循环试样的体积含水率小于原始试样.干湿循环过程中土体结构遭到破坏并逐渐形成新的稳定结构,随着干湿循环次数的增加,土体结构逐渐趋于稳定,土体的 SWCC 基本稳定.

为了从微观层面上理解干湿循环对土体

SWCC 的影响,利用环境扫描电镜对干湿循环前后的土体进行了电镜扫描试验.图 3 所示为泥浆固结试样干湿循环前后的 SEM 图像.如图 3(a)中,土样未经历干湿循环,即为原始试样,可以看出,原始试样中孔隙分布均匀,土颗粒排列松散,具有较大的孔隙度,颗粒磨圆较差.图 3(b)为干湿循环 6 次后土样的 SEM 图像,土颗粒排列比干湿循环前密实,孔隙分布均匀,颗粒表面更加“干净”.干湿循环前后的电镜扫描试验结果证实了干湿循环使得孔隙被部分压缩以及颗粒表面粗糙度降低的推论,从微观层面上解释了干湿循环使得土体 SWCC 发生变化的原因.



(a) 原始试样



(b) 干湿循环 6 次试样

图 3 泥浆固结试样干湿循环前后的 SEM 图像  
Fig. 3 SEM graphs of the slurry consolidation specimens before and after drying-wetting cycle

### 2.3 土-水特征曲线的拟合

采用 Van Genuchten 模型<sup>[16]</sup>对泥浆固结试样不同干湿循环次数下的 SWCC 进行拟合. Van Genuchten 模型的具体表达式如下:

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\psi/a)^b]^c} \quad (3)$$

式中:  $\theta_s$  为饱和体积含水率;  $\theta_r$  为残余体积含水率;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为材料参数. 模型的拟合结果如表 2 所示.

表 2 泥浆固结试样的 Van Genuchten 模型拟合结果

Tab. 2 The fitting results of the slurry consolidation specimens based on the Van Genuchten model

试样编号	$\theta_r/\%$	$\theta_s/\%$	$a$	$b$	$c$	$R^2$
SC01	12.923	34.528	25.949	6.35	0.142 5	0.974 3
SC02	12.832	35.999	16.092	44.91	0.018 4	0.996 0
SC03	12.763	35.991	14.979	57.34	0.014 8	0.993 3
SC04	12.198	35.280	15.782	53.58	0.016 7	0.993 6
SC05	12.841	35.271	15.305	47.99	0.018 6	0.993 4
SC06	12.505	35.492	15.963	56.18	0.016 7	0.991 2
SC07	12.762	34.763	15.066	53.21	0.017 9	0.992 9

由表 2 可知, Van Genuchten 模型对不同干湿循环次数下的 SWCC 具有较好的拟合效果, 拟合优度均大于 0.97. 不同干湿循环次数下粉质黏土试样具有近似相同的残余体积含水率, 且 Jotisankasa 等<sup>[3]</sup>的研究表明高吸力下 SWCC 对土体结构的依赖将减小而趋于均匀, 因此可假设不同干湿循环次数下的残余体积含水率相同. 不同干湿循环次数下的饱和体积含水率则存在细微的差异, 其最大差值约为 1.5%, 对于绝大多数工程而言, 这种细微的差异可以忽略, 即认为不同干湿循环次数下具有相同的饱和体积含水率. 由表 2 的数据还可以看出, 参数  $a$ 、 $c$  随着干湿循环次数的增加而呈减小趋势, 且随着干湿循环次数的增加而趋近稳定; 而参数  $b$  则随着干湿循环次数的增加而呈增大趋势, 最后稳定在某一数值. 由此可见干湿循环达到一定次数后, 干湿循环次数对参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的影响很小. 对比分析不同干湿循环次数下参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的值发现, 参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  随干湿循环次数的变化规律可用指数函数进行拟合. 具体表达式如下:

$$a = 15.421 + 10.529 \exp(-2.84n) \quad (4)$$

$$b = 53.668 + 47.429 \exp(-1.86n) \quad (5)$$

$$c = 0.016 52 + 0.125 98 \exp(-4.23n) \quad (6)$$

拟合优度分别为 0.987 36、0.950 30、0.999 17.

前已叙及, 对于本文所采用的干湿循环方法, 干湿循环条件下试样的饱和体积含水率及残余体

积含水率可视为恒定值。方便起见,本文采用原始试样的  $\theta_s$  及  $\theta_r$  作为各干湿循环次数下的  $\theta_s$  及  $\theta_r$  (也可采用不同干湿循环次数下  $\theta_s$  及  $\theta_r$  的平均值)。根据式(4)~(6)可获得不同干湿循环次数下参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的值,进而对 SWCC 进行预测。不同干湿循环次数下 SWCC 的预测结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,预测结果很好地再现了试验数据。

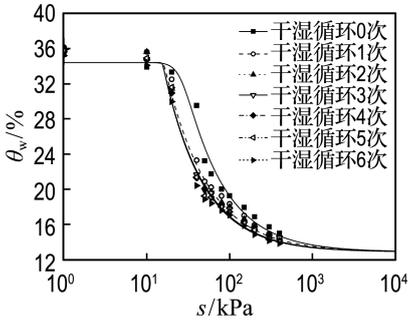


图 4 泥浆固结试样不同干湿循环次数下 SWCC 预测

Fig. 4 Prediction of the SWCCs of the slurry consolidation specimens under different numbers of drying-wetting cycles

### 3 结 论

(1)粉质黏土试样的 SWCC 与制样方法密切相关,泥浆固结三轴试样的 SWCC 位于击实三轴试样的上部。

(2)干湿循环使得泥浆固结试样的 SWCC 左移,且在经历 2~3 次干湿循环后趋于稳定。低基质吸力下干湿循环试样的体积含水率略高于原始试样,当基质吸力大于 10 kPa 左右时相同基质吸力下干湿循环试样的体积含水率小于原始试样;随着基质吸力的进一步增加,干湿循环对 SWCC 的影响逐渐减小。

(3)Van Genuchten 模型能够很好地拟合不同干湿循环次数下的 SWCC。Van Genuchten 模型参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  随干湿循环次数的变化规律可采用指数函数进行描述。对于其他土类, Van Genuchten 模型参数随干湿循环次数的变化规律则有待进一步研究。

(4)干湿循环过程中不同土类、不同初始干密度条件下土体的微观结构、渗透性,以及 SWCC 的变化规律等相关性问题还有待进一步深入研

究,以建立渗透性及 SWCC 的变化与微观结构改变的内在联系。

### 参 考 文 献:

- [1] Miller C J. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2002, **128**(9):733-742.
- [2] Malaya C, Sreedeeep S. Critical review on the parameters influencing soil-water characteristic curve [J]. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE**, 2012, **138**(1):55-62.
- [3] Jotisankasa A, Vathananukij H, Coop M R. Soil-water retention curves of some silty soils and their relations to fabrics [C] // **Unsaturated Soils: Theoretical and Numerical Advances in Unsaturated Soil Mechanics - Proceedings of the 4th Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils**. Newcastle: CRC Press, 2010:263-268.
- [4] Nam S, Gutierrez M, Diplas P, *et al.* Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils [J]. **Engineering Geology**, 2009, **110**(1-2):1-10.
- [5] 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.
- [6] 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 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**(Supp. 2): 132-136. (in Chinese)
- [7] Mijares R G, Khire M V. Soil water characteristic curves of compacted clay subjected to multiple wetting and drying cycles [J]. **Geotechnical Special Publication**, 2000(199):400-409.
- [8] Miao L C, Liu S Y, Lai Y M. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil [J]. **Engineering Geology**, 2002, **65**(4):261-267.
- [9] 张俊然,许 强,孙德安. 多次干湿循环后土-水特征曲线的模拟 [J]. **岩土力学**, 2014, **35**(3):689-695.

- ZHANG Jun-ran, XU Qiang, SUN De-an. Simulation of soil-water characteristic curves during drying and wetting cycles [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, **35**(3):689-695. (in Chinese)
- [10] Yao Y. Testing and modelling of silty and sulphide-rich soils [D]. Sweden: Lule University of Technology, 1993.
- [11] Al-homoud A S, Basma A A, Husein Malkawi A I, *et al.* Cyclic swelling behavior of clays [J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, **121** (7): 562-565.
- [12] ZHANG Rui, YANG He-ping, ZHENG Jian-long. The effect of vertical pressure on the deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying [J]. **Geotechnical Special Publication**, 2006(147):894-905.
- [13] Sivakumar V. A critical state framework for unsaturated soils [D]. South Yorkshire: University of Sheffield, 1993.
- [14] 杨钢, 杨庆. 土-水特征曲线测定过程中潜在影响因素与异常现象研究[J]. **岩土力学**, 2014, **35**(2):397-406.
- YANG Gang, YANG Qing. Experimental research on potential factors and abnormal phenomenon for measuring soil-water characteristic curve [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, **35** (2): 397-406. (in Chinese)
- [15] Morra M, Occhiello E, Garbassi F. Knowledge about polymer surfaces from contact angle measurements [J]. **Advances in Colloid and Interface Science**, 1990, **32**:79-116.
- [16] 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**:892-898.

## Effects of specimen preparation method and drying-wetting cycle on soil water characteristic curves of silty clay

LIU Wen-hua, YANG Qing\*, TANG Xiao-wei, LI Wu-gang

( Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** The dehumidified soil water characteristic curves (SWCCs) of the silty clay specimens prepared using the moist tamping method and the slurry consolidation method were measured based on the pressure plate extractor. The SWCCs of the slurry consolidated triaxial specimens subjected to different numbers of drying-wetting cycle were also measured. The effects of the specimen preparation method and drying-wetting cycles were analyzed. Additionally, the soil microstructure before and after drying-wetting cycle was investigated using the scanning electron microscopy (SEM). The experimental data shows that the SWCC of the slurry consolidated triaxial specimen is located in the upside of that of the impacted specimen. The SWCC shifts to the left after drying-wetting cycle and reaches an equilibrium state after 2-3 cycles of drying-wetting. The dehumidified SWCCs of the slurry consolidated triaxial specimens subjected to different numbers of drying-wetting cycles can be exactly fitted by the Van Genuchten model. The relationship between the parameters of the Van Genuchten model and the number of drying-wetting cycles can be described by an exponential function.

**Key words:** soil water characteristic curve; specimen preparation method; drying-wetting cycle; pressure plate extractor