

DOI: 10.11779/CJGE201501010

# 不同制样方法非饱和土的持水特性研究

孙德安, 高 游

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

**摘 要:** 以一种黏土为研究对象, 对其压实样和预固结样进行一系列的持水特性试验和压汞试验, 研究了不同制样方法对持水特性和内部孔隙结构分布的影响及在不同各向等应力作用下的持水特性。结果表明: 预固结样的内部孔隙分布为单峰孔隙结构, 孔隙大小分布较为均匀; 压实样则为双峰孔隙结构, 但压实样在 20 kPa 的竖向压力作用下浸水饱和后, 其内部孔隙分布变为单峰孔隙结构。此外, 在相同各向等应力条件下初始孔隙比相近的预固结样和压实样的持水特性试验结果表明, 预固结样的进气值要比压实样的大, 其原因是前者孔隙分布较均匀; 其次, 受各向等应力越大的预固结样其进气值越大。最后, 利用压汞试验的结果对预固结样和压实样的脱湿段的持水曲线进行了推算, 并与实测值进行了对比。

**关键词:** 非饱和土; 预固结样; 持水曲线; 压汞试验; 压实样

**中图分类号:** TU411

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 4548(2015)01 - 0091 - 07

**作者简介:** 孙德安(1962 - ), 男, 教授, 主要从事土力学的研究。E-mail: sundean@shu.edu.cn。

## Water retention behaviour of soils with different preparations

SUN De-an, GAO You

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A series of water retention tests and mercury intrusion porosimetry tests on a clay are performed to investigate the influence of different specimen preparations on water retention behaviour and its pore-size distribution as well as the influence of different isotropic stresses on water retention behaviour. The experimental results show that pre-consolidated specimens exhibit a unimodal pore-size distribution, and unsaturated compacted specimens usually have a double-porosity microstructure, while its microstructure can change due to saturation at the applied pressures of 20 kPa. Under the same initial void ratio and isotropic stress, the pore sizes of pre-consolidated specimens exhibit a uniform distribution, so they have higher air-entry value than the compacted specimens. Under the same initial void ratio of pre-consolidated specimens, the air-entry value increases with the increasing isotropic stress. Finally, based on the results of the mercury intrusion porosimetry tests, a method for predicting the water retention curve of pre-consolidated and compacted specimens during drying is proposed, and the predicted results are compared with the measured values.

**Key words:** unsaturated soil; pre-consolidated specimen; water retention curve; mercury intrusion porosimetry; compacted specimen

## 0 引 言

目前, 在非饱和土的水力-力学特性试验研究中, 一般采用压实或击实方法制备试样。如陈正汉<sup>[1]</sup>研究了基质吸力在 500 kPa 内正应力、偏应力及密度对击实土持水特性的影响及其广义的持水曲线模型。Vanapalli 等<sup>[2]</sup>研究了不同的初始含水率和应力历史对击实黏性粉土持水特性的影响; Thu 等<sup>[3]</sup>研究了固结应力对击实粉土持水特性的影响。用来构筑验证非饱和土本构模型的大多数试验数据也是采用压实样或击实样得到的, 如 Wheeler 等<sup>[4]</sup>提出非饱和土的弹塑性本构模型用击实样的数据验证; Sun 等<sup>[5]</sup>用压实样的

数据验证非饱和土水力-力学特性耦合弹塑性本构模型。但在实际工程中所遇到的非饱和土不完全是压实土能模拟的。如初始是泥浆状态的海相、湖相以及河相沉积土先经过自重沉积、固结, 再经过日晒、风干等自然环境作用, 最后形成的非饱和土。目前采用泥浆先预固结, 再进行非饱和化的试样来研究非饱和土的水力-力学特性研究较少; 如 Wang 等<sup>[6]</sup>利用初始是泥浆状态而制成的预固结样, 并通过吸力控制的方法

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272194); 上海市自然科学基金项目(13ZR1416200)

收稿日期: 2014 - 03 - 28

来研究其非饱和状态下的应力应变关系。然而,为了能够更准确地理解非饱和土的持水与力学特性,有必要通过试验将压实土和预固结土这两种不同非饱和土的持水与力学特性进行比较分析。

本文采用土粉末配制土样:一组调配到一定的初始含水率后,再通过压实方法获得试样;另一组将土样调成泥浆状态后,再逐级固结得到预固结的饱和试样。对这两种制样方法得到的试样分别在侧限压缩应力和各向等压应力状态下进行持水特性试验。同时利用压汞试验测定其微观孔隙结构,并用试样的微观孔隙结构分析不同制样方法对其持水特性的影响;最后,利用压汞试验结果计算侧限压缩应力状态下压实样和预固结样的脱湿线,并与实测值进行对比。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料及试样制备

本试验所用的土样为珍珠土(Pearl-clay)<sup>[7]</sup>,其比重为 2.71,液限为 49%,塑限为 27%。根据《建筑地基基础设计规范》<sup>[8]</sup>,是一种黏土。图 1 是珍珠土的颗粒级配曲线,从图可知,黏粒成分( $<5\ \mu\text{m}$ )约占 50%;用 X 光衍射试验得到该黏土的主要矿物成为石英、叶蜡石、高岭石。

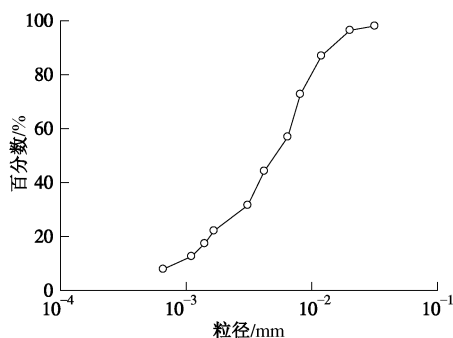


图 1 珍珠土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curve of pearl clay

压实样制备:调制土样的含水率约为 26%,控制初始孔隙比约为 1.10,制备成直径 6.18 cm,高度 2 cm 的环刀试样和直径 3.8 cm,高度 3.8 cm 的三轴试样(分 3 层压实),制备高度小的三轴试样是为了缩短吸力平衡的时间。得到压实样的初始饱和度为 50%~60%,初始吸力约为 110 kPa。

预固结样制备:首先在珍珠土粉末中加水,使含水率达到约为液限的两倍左右并搅拌均匀,再将搅拌均匀的泥浆倒入一个直径 15 cm 和高 16 cm 的固结容器里,施加竖向荷载,在侧限条件下逐级加载固结,最大固结压力为 49 kPa。当固结完成后试样从固结容器里面取出土样,其含水率大致为 43%,孔隙比约为 1.15。对于三轴样,先用钢丝锯切取稍大于三轴样土块,放在切土盘上下圆盘之间,用钢丝锯紧靠侧板,

由上往下细心切取,边切削边转动圆盘,直到切屑至所需直径。对于环刀样,先切取稍大于环刀土块,环刀内壁涂凡士林,刃口向下放在土块上,垂直下压,并用钢丝锯沿环刀外侧切削土样,整平环刀两端土样。

### 1.2 试验仪器及试验方法

试验所用的仪器为美国 GCTS 公司产的 SWC-150 土水特征压力仪(图 2)和非饱和土三轴仪(图 3)。如图 3 所示,在圆柱试样  $H/2$  处( $H$  是试样的高度)安装了贴有应变片的钢环,通过数据采集装置测量得到试样的侧向变形。根据轴向和径向两个方向的变形量可求出三轴试样的体积变形量。



图 2 SWC-150 土水特征压力仪

Fig. 2 SWC-150 soil-water characteristic pressure instrument



图 3 非饱和土三轴仪

Fig. 3 Triaxial testing apparatus for unsaturated soils

试验一共进行了 5 次,其中两次是利用土水特征压力仪对一个压实样( $e_0=1.10$ )和一个预固结样( $e_0=1.15$ )进行试验研究。应力条件如下:先试加 20 kPa 的竖向压力并打开陶瓷板底部连通排水管的排水阀,进行固结;待固结完成后保持轴向压力 20 kPa 不变,逐级施加吸力至 1500 kPa。普通土工实验室的压缩空气源的压力为 700~800 kPa,本研究使用增压气可提供至 1.6 MPa 的气源。其余三次是利用非饱和土三轴仪对一个压实土试样( $e_0=1.11$ )在各向等压应力( $p=140\ \text{kPa}$ )状态下和两个预固结土试样( $e_0=1.16$  和 1.18)分别在各向等压应力( $p=50\ \text{kPa}$  和 140 kPa)状态下固结,待其固结稳定后再进行脱湿和吸湿循环试验。逐级施加的吸力路径为 0 kPa→500 kPa→0 kPa。

变形和排水的稳定标准如下：每 2 h 竖向变形量和排水量分别不超过 0.01 mm 和 0.01 cm<sup>3</sup>，且每级吸力施加时间不少于 48 h。此外，5 个试样的固结完成前后的孔隙比变化及压应力如表 1 所示。

表 1 试样固结前后的孔隙比及压应力

制样方法	初始孔隙比 $e_0$	固结后孔隙比 $e_c$	压应力/kPa
压实样	1.10	1.07	$\sigma_v=20$
预固结样	1.15	1.15	$\sigma_v=20$
预固结样	1.16	1.12	$p=50$
压实样	1.11	1.04	$p=140$
预固结样	1.18	1.07	$p=140$

2 持水特性试验结果与分析

2.1 压力板试验结果与分析

图 4 表示利用土水特征压力仪对压实样和预固结样在初始孔隙比相近条件下测得的含水率、饱和度、孔隙比与吸力之间关系的脱湿曲线。由图 4 (a) 和 4 (b) 可知，预固结样的进气值（约为 220 kPa）大于压实样的进气值（约为 100 kPa）。且随着吸力的增加两曲线差异逐渐减小，当吸力值大于 800 kPa 左右两曲线几乎重合，故此阶段可以认为两试样的持水性几乎相同；当吸力值小于 800 kPa 时预固结样的脱湿线始终在压实样的上方，即相同孔隙比条件下预固结样的持水性要好。因此，相同初始干密度的同种土样，其持水特性因制样方法不同而变化。由图 4 (c) 可以看出，随吸力的增加，两试样的孔隙比都相应减小。但预固结样的孔隙比减小较为明显，特别是在吸力值小于预固结样进气值的阶段；在此阶段预固结样的饱和度几乎不变（100%），只是含水率略微的下降。故此过程中预固结样的体积变化量等同于试样内排水体积量。一般认为影响土水曲线的主要因素是土的矿物成分和孔隙比，对于孔隙比相近和土材料相同的预固结样和压实样，其土水曲线应该大致相同。仔细分析的话，预固结样的孔隙比略大，其持水性应差才对。但结果恰好相反，这主要是预固结样的内部孔隙比较均匀，而压实样的孔隙大小分布不均匀。在压汞试验一节给出两种样的微观孔隙结构，并进行对比分析。

2.2 等向应力下脱湿和吸湿试验结果与分析

对一个压实样在各向等压应力（ $p=140$  kPa）状态下和两个预固结样分别在各向等压应力（ $p=50, 140$  kPa）状态下进行的脱湿吸湿循环试验，图 5 表示用吸力与含水率、饱和度、孔隙比关系的试验结果。由图 5 (a) 和 5 (b) 可知，各向等压应力 140 kPa 作用下，压实样的进气值明显小于预固结样的进气值，而且在相同吸力下预固结样的脱湿线始终在压实样的上方，说明脱湿过程中预固结样在相同吸力条件下保持水分

的能力要比压实样强。在吸湿过程中，吸力从 500 kPa 降到 50 kPa 的过程中，相同吸力下预固结样的持水性要比压实样的好，但小于 50 kPa 的过程中压实样的吸湿线略大于预固结样。此外，在不同各向等压应力条件下的两预固结样： $p=140$  kPa 预固结样的进气值要略大于  $p=50$  kPa 的预固结样，且在相同吸力条件下  $p=140$  kPa 的脱湿和吸湿线都略高于  $p=50$  kPa 的曲线。故受各向等压应力大的试样，其持水性好。由图 5 (c) 可知，在脱湿过程中，随着吸力增大孔隙比都有减小的趋势，但预固结样的孔隙比受吸力的影响较大；而在吸湿过程中，孔隙比变化都比较平缓，几乎不受吸力的影响。由上分析可以得出不同制样方法和各向等应力的对相同土样的持水性是有一定的影响。

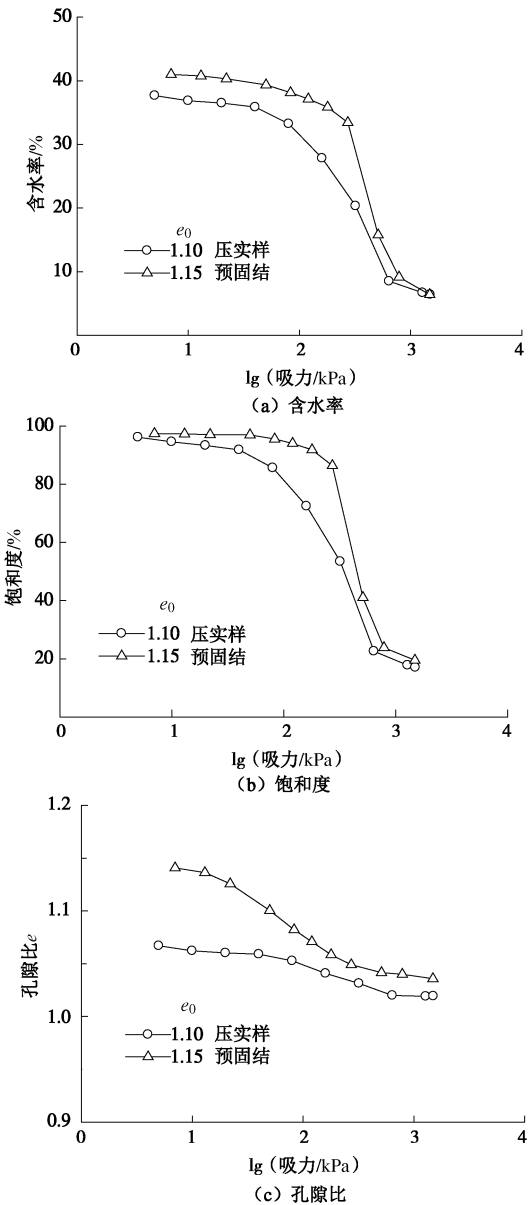


图 4 不同制样方法试样的脱湿线及孔隙比变化  
Fig. 4 SWCCs and deformation of differently prepared specimens during drying

关于图 5 试验结果的原因,可解释如下,由于在初始孔隙比相近条件下压实样孔隙大小的分布相对不均匀,导致在相同吸力下压实样的水分下降较快,且进气值较低。预固结样由于制样时将泥浆充分搅拌均匀后固结形成的,孔隙大小比较均匀。因此,预固结样的进气值比压实样要高。在不同的各向等应力条件下,应力越大,试样越密实,孔隙比越小,持水性也越好。

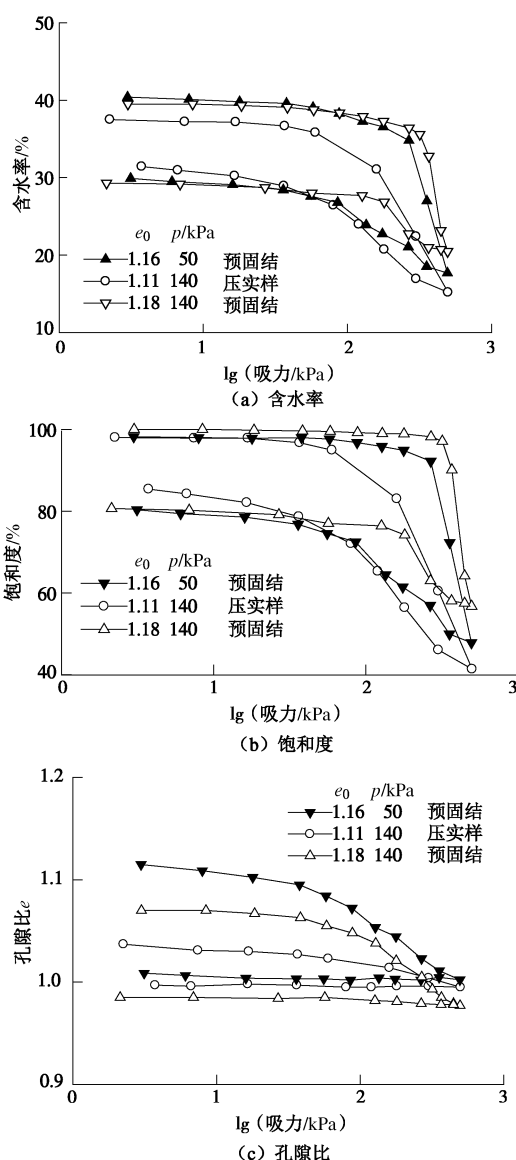


图 5 不同制样方法试样的土水特征曲线及孔隙比变

Fig. 5 SWCCs and deformation of differently prepared specimens

### 3 压汞试验结果与分析

#### 3.1 压汞试样的选取

目前,利用压汞试验对土样内部微观孔隙结构的研究比较多,如张平等<sup>[9]</sup>利用压汞试验研究了不同干燥方法对重塑膨润土内部孔隙分布的影响,得出风干和烘干法会引起土样的孔隙收缩;Delage 等<sup>[10]</sup>对初始干密度相同,大于和小于最优含水量的两个试样做了

压汞试验,得出小于最优含水量试样呈双峰孔隙结构、大于最优含水量试样的孔隙分布趋于单峰孔隙结构;Li 等<sup>[11]</sup>对压实样和经饱和后的压实样进行了压汞试验,得到饱和后试样的内部孔隙分布变成单峰孔隙结构。由此可知土样内部孔隙大小分布与干燥的方法、含水率等有关。

本研究取 4 个试样进行压汞试验,试验前对土样冻干或风干。两个预固结样初始孔隙比约为 1.14,一个为冻干,另一个为自然风干,其风干后的孔隙比约为 1.04;两个压实样初始孔隙比均为 1.15,均为冻干,不同的是其中一个先加 20 kPa 的竖向压力下浸水饱和并固结,冻干前的孔隙比约为 1.10。压汞试验仪是 Micromeritics AutoPore IV,高压可达 413.7 MPa。

#### 3.2 压汞试验的结果分析

图 6 表示压实样与预固结样的孔径与相应累计汞压入体积量之间的关系曲线。由图可知,两预固结样的孔径主要集中在  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  之间,此区间内其累计汞压入体积量急剧增加,即预固结样的孔径分布在此范围内比较集中,而且冻干试样的最终累计值比风干试样大,说明风干会引起孔隙的收缩。这也就是图 4, 5 中预固结样的孔隙比变化较大的原因。此外,压实样及饱和后的压实样的孔径分布范围约为  $0.1 \sim 12 \mu\text{m}$ ,但饱和后的压实样孔径为  $1 \sim 12 \mu\text{m}$  的孔隙分布量相应减少;两者的孔隙分布相对预固结样较不均匀;若在初始孔隙比相近条件下,  $1 \sim 12 \mu\text{m}$  孔径的孔隙占了一定体积量,  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  小孔径的体积量必然减少,这也就说明了图 4, 5 中预固结样持水性较好的原因。若按 Kodikara 等<sup>[12]</sup>对土体内部微孔隙的划分:颗粒间孔隙 ( $0.004 \sim 1 \mu\text{m}$ )、积聚体内孔隙 ( $1 \sim 30 \mu\text{m}$ )、积聚体外孔隙 ( $10 \sim 1000 \mu\text{m}$ ),则预固结样、饱和后压实样内部主要存在颗粒间孔隙和一些积聚体内孔隙;而对于压实样还存在一定量的积聚体外孔隙或积聚体内孔隙相对较大的孔隙。

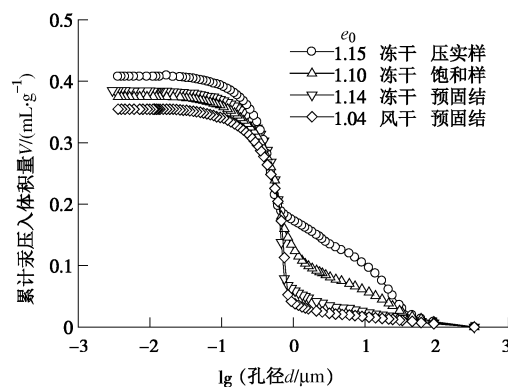


图 6 不同制样方法试样孔径与累计汞压入量关系曲线

Fig. 6 Relationship between diameter and cumulative intruded volume of specimens with different preparations

图7表示压实样和预固结样由压汞试验测得的孔径与孔径分布密度的关系图,反映了试样中相应孔径的孔隙体积所占的比例大小。由图可知,两个预固结样的孔径分布图均为单峰孔隙结构,风干试样峰值比冻干的略小点;而图7(b)中压实样的孔径分布为双峰孔隙结构,饱和后的压实样则变为单峰孔隙结构。主要是因为压实样还存在一定量的积聚体外孔隙或积聚体内孔隙相对较大的孔隙,在一定竖向压力作用下浸水饱和会发生压缩变形,而形成相对均匀的单峰孔隙结构。最后,图7(c)中预固结样和饱和后压实样的对比可知,当孔径约小于 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 两分布曲线几乎重合,这就可以解释图4中所示的两脱湿线在较大吸力

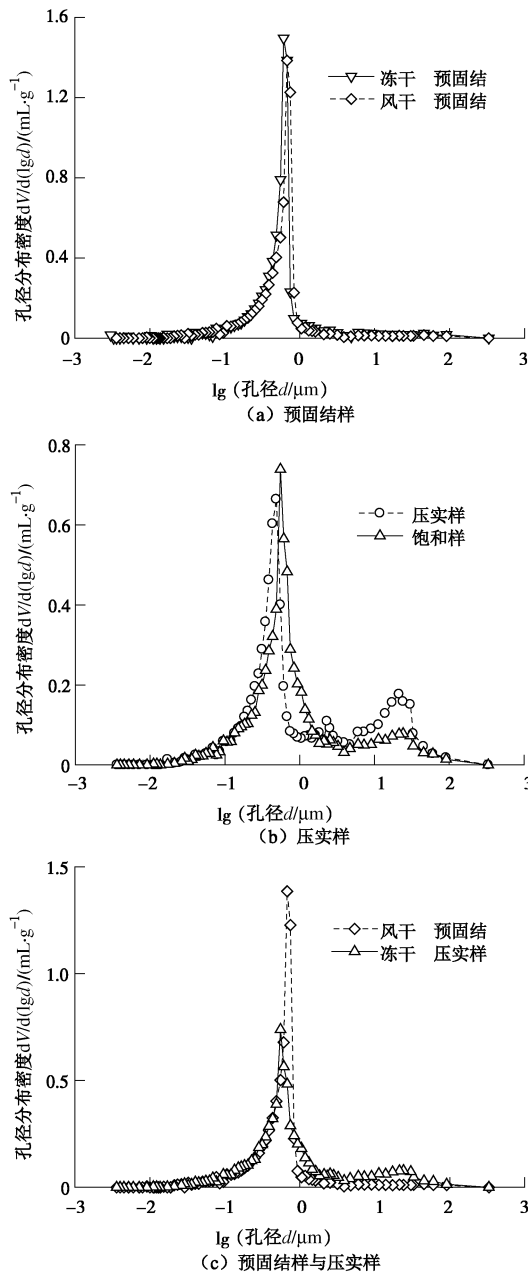


图7 孔径与孔径分布密度关系曲线

Fig. 7 Relationship between diameter and density of pore-size distribution

条件下持水性几乎相同的特性;其次,两试样孔径分布图主要集中在 $0.1\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 。但压实样孔径在大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 还有一定量孔隙体积的分布;若在孔隙比相近条件下预固结样的持水性要好,这也就解释了图4中吸力较小情况下预固结样的持水性较好。

## 4 利用孔径分布推算脱湿段持水曲线

首先,由图4的分析可知在吸力约小于进气值时,吸力对预固结样孔隙比的影响较大,且孔隙体积的变化量几乎和排水量一致,这是因为此时试样几乎饱和。因此,在下面计算预固结样的含水率与吸力关系时考虑吸力对孔隙比的影响(吸力小于进气值时),其余的计算中均不考虑吸力对孔隙比的影响。为了更加符合持水特性试验中试样的孔隙分布,选饱和后压实样、风干后的预固结样的孔隙分布来计算图4的脱湿线。

### 4.1 饱和度与吸力的关系

假设孔隙是圆柱形,可以根据压汞试验中所测得孔隙直径的大小,并由Young-Laplace方程可以换算出基质吸力大小:

$$s = \frac{4\sigma \cos \theta_w}{d}, \quad (1)$$

式中, $s$ 为基质吸力(Pa), $d$ 为孔隙的直径(m), $\sigma$ 为水的表面张力(N/m), $\theta_w$ 为水与土表面接触角。在计算中表面张力按 $25^\circ\text{C}$ 时取 $0.072\text{ N/m}$ <sup>[13]</sup>, $\theta_w$ 取为 $0^\circ$ 。

将图6中最小孔径所对应的累计汞压入体积量表示为 $v_z(\text{mL/g})$ (即为每克土中的孔隙体积量),任意直径 $d$ 所对应的累计汞压入体积量表示为 $v_d(\text{mL/g})$ 。假设施加某一吸力,在小于此吸力所对应孔径 $d$ 的所有孔隙中均达到饱和,故试样在此吸力所对应的有效饱和度和 $S_e(d)$ 可表示为

$$S_e(d) = \frac{v_z - v_d}{v_z} \times 100\% \quad (2)$$

试样中存在孤立孔隙(即全封闭性“死孔”)和一些微孔隙在压汞试验中是无法检测的,并将这些孔隙的体积量称为残余孔隙量 $V_{es}$ 。 $V_{es}$ 可以根据压汞试样的初始孔隙体积量 $V_0$ 与压汞试验测得孔隙体积量 $m_s v_z$ ( $m_s$ 为土颗粒的质量)的差值来计算;将残余孔隙饱和时水的体积量与初始孔隙体积之比称为残余孔隙饱和度 $S_{es}$ ,可表示为

$$S_{es} = \frac{V_{es}}{V_0} \times 100\% = \left( 1 - \frac{v_z G_s \rho_w}{e_0} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中, $\rho_w$ 为水的密度( $\text{g/cm}^3$ ), $e_0$ 为初始孔隙比, $G_s$ 为土颗粒的比重。

有效饱和度、残余孔隙饱和度与实际饱和度 $S_r$ 之间的关系为

$$S_e(d) = \frac{S_r - S_{es}}{100 - S_{es}} \times 100\% \quad (4)$$

最后, 根据图 6 孔径与累计汞压入体积量的关系曲线(取风干预固结样和冻干饱和压实样), 并利用式(1)~(4)可得到吸力与饱和度的关系, 其中  $m_s$  取 1 g,  $\rho_w$  取 1 g/cm<sup>3</sup>, 预固结样和饱和压实样的  $e_0$  分别取 1.04, 1.10。图 8 表示计算值与实测值的比较。由图可知, 计算值较好地预测了预固结样的实测值, 而压实样的计算值与实测值稍微有偏离, 但总体上较为一致。

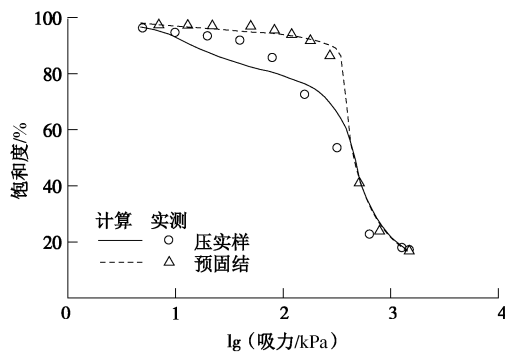


图 8 实测与计算饱和度的对比

Fig. 8 Comparison between measured and calculated saturation degrees

#### 4.2 含水率与吸力的关系

饱和和压实样含水率的推算方法与饱和度的推算相似, 其有效含水率  $w_e(d)$  为

$$w_e(d) = (v_z - v_d) \rho_w \times 100\% \quad (5)$$

预固结样选风干试样, 特别是在吸力小于进气值时会发生较明显的收缩变形。此收缩变形对饱和度的影响不大, 但对含水率存在影响; 且孔隙体积变化量与水体积的变化量几乎一致, 因此利用吸力与孔隙比的关系图对含水率进行修正。在小于进气值(取 220 kPa)时预固结样的吸力与孔隙比线性拟合关系式如图 9 所示。故由吸力增大产生的体积收缩, 而引起的排水量为

$$\Delta v(s) = \frac{[e(s) - e_0] m_s}{\rho_w G_s} \quad (6)$$

当预固结样吸力大于 220 kPa 时有效含水率与式(5)相同。当吸力小于 220 kPa 时, 要考虑  $\Delta v(s)$  的影响, 则有效含水率为

$$w_e(d) = \frac{[m_s v_z + \Delta v(s) - m_s v_d] \rho_w}{m_s} \times 100\% \quad (7)$$

将残余孔隙饱和时水的质量与土颗粒的质量之比称为残余孔隙含水率  $w_{es}$ , 其计算式为

$$w_{es} = \frac{V_{es} \rho_w}{m_s} \times 100\% = \left( \frac{e_0}{G_s} - v_z \rho_w \right) \times 100\% \quad (8)$$

有效含水率、残余孔隙含水率与实际含水率  $w$  之间的关系为

$$w = w_e(d) + w_{es} \quad (9)$$

最后, 再根据图 6 中的孔径与累计汞压入体积的关系曲线(取风干预固结样和冻干饱和压实样), 并利用式(5)~(9), 可得到吸力与含水率的关系。图 10 表示计算值与实测值的比较。由图可知, 计算值较好地预测了预固结样的实测值, 而于压实样的计算值与实测值稍微有偏离, 但总体上也比较一致。

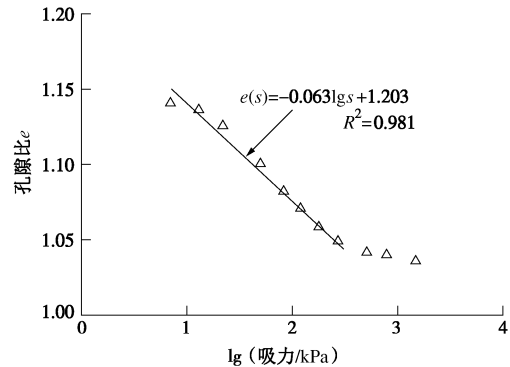


图 9 小于进气值时预固结样孔隙比与吸力关系的拟合线

Fig. 9 Fitting of relationship between void ratio and suction of pre-consolidated specimens when suction is less than air-entry value

持水曲线存在着明显的滞回效应, 脱湿线高于吸湿线。引起这种滞回的原因很复杂, 主要有<sup>[14]</sup>: 试样内部孔隙不均匀而产生的瓶颈效应, 脱湿和吸湿过程中流体与固体颗粒的接触角不同, 吸湿和脱湿过程中滞留在试样内的气体体积量差异, 膨胀和收缩引起的干湿过程中土结构的改变, 等等。而压汞试验测得的孔隙大小分布是假设试样内部孔隙为均匀的圆柱形, 无法考虑因瓶颈效应、脱湿和吸湿过程中接触角的差异和空气滞留量等引起滞回现象。因此, 本研究只对图 4 中的持水曲线的脱湿线进行计算。

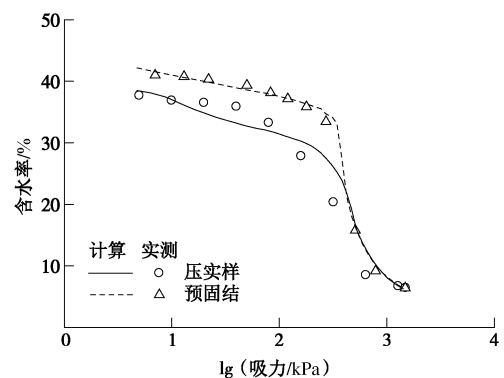


图 10 实测与计算含水率的对比

Fig. 10 Comparison between measured and calculated water contents

## 5 结 论

本文对一种粉质黏土的压实样和预固结样进行一系列的持水特性试验和压汞试验研究,分析总结可得到以下结论:

(1) 在孔隙比相近条件下两种不同制样方法的试样,由于预固结样的孔隙大小比压实土试样的均匀,使得预固结样比压实样的进气值要高。在不同的各向等应力下对初始状态相同的预固结样进行脱湿吸湿试验,各向等应力大的持水曲线进气值要高。

(2) 基于压汞试验结果得到预固结样的孔隙分布为单峰孔隙结构,若试样干燥方法为风干,会使其内部孔隙发生收缩,但不改变原有的单峰孔隙结构。压实样的孔隙分布为双峰孔隙结构,而一定的应力条件下浸水饱和,其内部孔隙分布会发生转变。

(3) 基于压汞试验的数据,并合理的选取压汞试样及干燥的方法使其孔隙分布更接近于持水试验所用的试样,就可以大致推算出预固结样和压实样的脱湿过程持水曲线。

### 参考文献:

- [1] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201 - 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201 - 272. (in Chinese))
- [2] VANAPALLI S K, FREDLUND D, 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 - 59.
- [3] THU T M, RAHARDJO H, LEONG E C. Soil-water characteristic curve and consolidation behavior for a compacted slit[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, **44**: 266 - 275.
- [4] WHEELER S J, SIVAKUMAR V. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil[J]. *Géotechnique*, 1995, **45**(1): 35 - 53.
- [5] SUN D A, SHENG D, SLOAN S W. Elastoplastic modelling of hydraulic and stress-strain behaviour of unsaturated soils[J]. *Mechanics of Materials*, 2007, **39**(3): 212 - 221.
- [6] WANG Q, PUFAHL D E, FREDLUND D G. A study of critical state on an unsaturated silty soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39**(1): 213 - 218.
- [7] SUN D A, MATSUOKA H, XU Y F. Collapse behavior of compacted clays in suction-controlled triaxial tests[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2004, **27**(4): 362 - 370.
- [8] GB5007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (GB5007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [9] 张平, 房莹光, 闫小庆, 等. 不同干燥方法对重塑膨润土压汞试验用土样的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 388 - 391. (ZHANG Ping, FANG Ying-guang, YAN Xiao-qing. Study of different dry methods for drying remolded bentonite sample with mercury intrusion test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(1): 388 - 391. (in Chinese))
- [10] DELAGE D, AUDIGUIER M. Microstructure of a compacted silt [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, **33**: 154 - 156.
- [11] LI X, ZHANG L M. Characterization of dual-structure pore size distribution of soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**: 129 - 141.
- [12] KODIKARA J, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Change in clay structure behaviour due to wetting and drying[C]// *Proceedings of 8th Australian-Zealand Conference on Geomechanics*. Hobart, 1999: 179 - 185.
- [13] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [14] LIKOS W J, LU N. Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, **130**(6): 646 - 655.