

DOI: 10.11779/CJGE201608022

# 制样方法对非饱和土力学特性的影响

高游, 孙德安\*

(上海大学土木工程系, 上海 200444)

**摘要:** 以一种非膨胀性黏土为试验材料, 对孔隙比相近的非饱和压实试样和预固结试样进行一系列等吸力控制下的等向压缩试验和三轴剪切试验, 研究了制样方法对非饱和土的压缩特性和剪切特性的影响。由等吸力等向压缩试验结果表明: 初始孔隙比相近的预固结样和压实样在等向净应力 20 kPa 条件下进行等吸力平衡, 平衡过程中预固结试样的孔隙比明显减小而压实样的变化不大; 其原因是两种试样的初始吸力和土结构存在差异。此外, 预固结样和压实样在吸力 150 kPa 条件下, 预固结样的含水率随着等向净应力的增大而减小, 而压实样的含水率几乎不变。上述变形特性可用 SFG 弹塑性模型说明。在净围压和吸力相同条件下对剪切前孔隙比相同的两种试样进行了三轴剪切试验, 试验结果表明: 在剪切前的密度、剪切时的吸力和净围压相同条件下, 预固结样的偏应力-应变曲线和强度明显高于压实试样的曲线和强度。其原因可用两种试样的孔隙尺寸分布不同来解释。

**关键词:** 非饱和土; 预固结试样; 压实样; 力学特性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)08-1529-06

作者简介: 高游(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土力学的研究。E-mail: gaoyou824@163.com。

## Effect of specimen preparation on mechanical behavior of unsaturated soils

GAO You, SUN De-an

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** The soil used in this study is one of non-expansive clays. A series of suction-controlled isotropic compression tests and suction-controlled triaxial compression tests are designed with the main objective of investigating the compression and shear behavior of unsaturated soil samples made via either compaction or pre-consolidation method. The isotropic compression test results indicate that the void ratio of pre-consolidation specimen decreases with the increasing suction value under isotropic net stress of 20 kPa, while the void ratio of compacted specimen shows little change during the suction equilibrium process. The reason is that different initial suctions and soil structures exist in two types of specimens. In addition, the pre-consolidated specimen has obvious drainage occurring during imposing suction from the initial suction to 150 kPa under isotropic net stress of 20 kPa, while the compacted specimen shows a little change. These deformation characteristics can be explained by SFG elastoplastic model for unsaturated soils. The triaxial compression test results indicate that the deviatoric stress-strain curve and strength of pre-consolidation specimen are higher than those of compacted specimen under the same suction and net confining pressure during triaxial shearing and almost the same density before the shearing. The reason is the difference in the pore-size distributions of the two kinds of specimens.

**Key words:** unsaturated soil; pre-consolidated specimen; compacted specimen; mechanical behavior

## 0 引言

目前, 室内试验研究用的非饱和土试样主要有 3 种: ①取自现场的原状样; ②将土样风干或烘干, 配成一定含水率的击实或压实样; ③将土制备成泥浆, 固结压缩后再脱水成非饱和试样。第①种试样因取样的场地不可能完全一致, 导致各个试样很难保证完全相同, 且取样过程中要保持土样的天然结构难度较大。第②种试样因制样方便, 可以配制成不同含水率和密度等特定状态下的试样; 也是目前在非饱和土的水力-

力学特性试验研究中用得最多的试样。如陈正汉<sup>[1]</sup>研究了应力路径对压实黄土的变形、强度及水量变化的影响; 孔令伟等<sup>[2]</sup>应用非饱和土三轴仪, 研究了非饱和和压实膨胀土的变形及强度特性; Estabrag 等<sup>[3]</sup>研究了不同净围压对非饱和压实粉土力学特性和不同等吸力对压缩特性的影响; Farulla 等<sup>[4]</sup>研究了干湿循环对

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11272194, 41402271)

收稿日期: 2015-07-28

\*通讯作者 (E-mail: sundean@shu.edu.cn)

击实土体积变化的影响。用来验证非饱和土本构模型的大多数试验数据也是击实或压实样试验结果<sup>[5-6]</sup>。但在实际工程中所遇到的非饱和土不全是能用击实或压实土模拟的，也有试验采用泥浆先预固结然后形成非饱和土来研究其持水-力学特性。如 Wang 等<sup>[7]</sup>通过吸力控制的方法对非饱和粉土的泥浆样进行了排水剪切试验研究。此外，不同制样方法获得的试样，其内部孔径结构分布可能存在较大的差异。如 Li 等<sup>[8]</sup>研究了不同孔隙比和不同饱和度对压实试样微观孔径结构的影响，指出压实样内部孔隙分布主要为双峰孔径分布结构；文献[9]通过压汞试验测得高岭土泥浆样的内部孔径分布为单峰孔径分布结构。因此，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样的土水与剪切特性进行比较分析。

本文采用相同的土粉末配制土样：一组调配到一定含水率后，通过压实方法获得试样；另一组将土样调成泥浆状态后，逐级固结得到预固结饱和试样。对两种制样方法得到的试样分别进行吸力控制下的等向压缩试验和三轴排水剪切试验，研究制样方法对土体压缩特性和力学特性的影响。

### 1 试验概况

#### 1.1 试验材料及试样制备

本试验所用的土样是一种叫做珍珠土 (Pearl-clay) 的非膨胀性黏土。用光电液塑限联合测定仪测得液限为 43%，塑性指数为 17.5，比重为 2.71，图 1 是珍珠黏土的颗粒级配曲线，从图可知：这种土的黏粒（小于 5 μm）成分约占 50%。

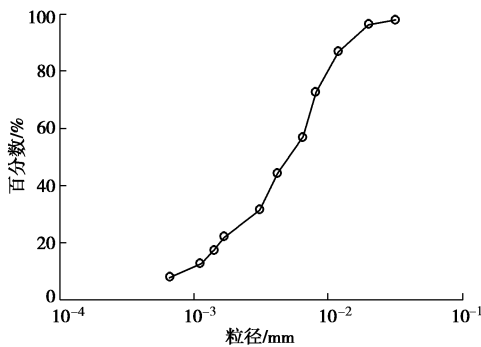


图 1 珍珠土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curve of pearl clay

压实样制备：土样调制的含水率约 25%，三轴试样直径 3.8 cm，高度 7.6 cm，分 6 层压实，压实试样的初始孔隙比约 1.0、初始饱和度约 68%、试样的初始吸力约 120 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，施加最大固结压力为 49 kPa。当固结充分完成后试样从固结容器里面取出，其含水率大致为 42.5%，孔隙比约为 1.15。因取样等扰动的影响，测得试样初始吸力约为 20 kPa。

#### 1.2 试验仪器

试验使用 GDS 非饱和土三轴仪 (图 2)。该试验仪将内室设计成瓶状，试验时内室水位变化控制在瓶颈范围内。由于过水的截面积减少，试样体积变化引起的水位升降变得更为明显，灵敏度也随之提高。另外采用一高精度的双向差压传感器测量内室里的水位变化，从而可以较精确地量测试验过程中试样的体积变化<sup>[10]</sup>。

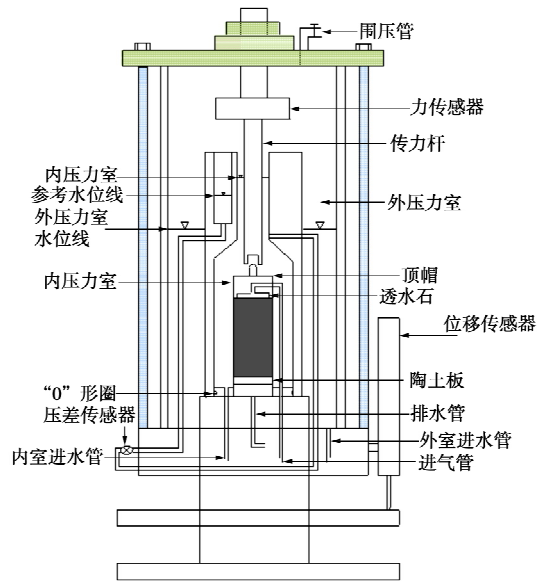


图 2 GDS 非饱和土三轴试验仪示意图

Fig. 2 GDS triaxial apparatus for testing unsaturated soils

#### 1.3 试验方法

为研究不同制样方法对土体压缩特性的影响，一共进行 7 组吸力控制下的非饱和等向压缩试验。其中 5 组是预固结样等向压缩试验，试样初始孔隙比约为 1.15，在净应力 20 kPa 条件下进行吸力平衡（平衡吸力值分别为 0, 150, 250, 350, 450 kPa），待吸力平衡后再对试样进行等向压缩。剩余两组则为压实样的等向压缩试验，初始孔隙比分别约为 1.17 和 1.02，平衡时吸力值为 150 kPa。

为研究不同制样方法对非饱和土剪切特性的影响，一共进行了 6 组在排水、排气条件下吸力控制的非饱和土三轴试验，试样的初始状态及吸力平衡后状态值如表 1 所示，具体的吸力路径如图 3 所示。其中， $s$  表示吸力（孔隙气压  $u_a$  与孔隙水压  $u_w$  之差）； $q$  为偏应力； $p$  为平均净应力。具体的试验过程如下：首

先在不排水状态下, 加载 20 kPa 的围压进行预压平衡, 平衡时间约为 1~2 d, 其状态可表示如图 3 中的 *b* 点。其次是吸力平衡阶段, 维持等向净应力 20 kPa, 施加吸力至目标值 (250, 350, 450 kPa), 各试样的吸力路径为: (1) 50→100→150→200→250 kPa; (2) 50→100→150→200→250→350 kPa; (3) 50→100→150→200→250→350→450 kPa。每级吸力平衡一般需要 4~5 d 左右 (平衡条件: 每 2 h 体积变化量和排水量分别不超过 0.01 cm<sup>3</sup>), 使试样达到图 3 中的 (c)、(d)、(e) 点的应力状态。其次为压缩阶段, 保持吸力值不变, 净应力从 20 kPa 加至 200 kPa, 平衡一般需要 4~5 d 左右。最后是三轴剪切阶段, 利用应变控制模块进行剪切, 保持净围压和吸力不变 (轴向剪切速率约为 0.0028 mm/min), 即沿 *hk*, *gj*, *fi* 路径三轴剪切。

表 1 初始状态和剪切前三轴试样的含水率及孔隙比

Table 1 Water contents and void ratios of triaxial specimens at initial state before shearing

编号	制样方法	吸力 /kPa	初始状态		三轴剪切前	
			$w_0$	$e_0$	$w_c$	$e_c$
P2	泥浆样	250	43.58	1.181	28.49	0.939
P3	泥浆样	350	42.10	1.143	23.59	0.931
P4	泥浆样	450	41.73	1.132	19.47	0.923
C2	压实样	250	25.25	0.995	23.08	0.930
C3	压实样	350	25.27	0.996	21.44	0.931
C4	压实样	450	25.43	0.998	18.74	0.926

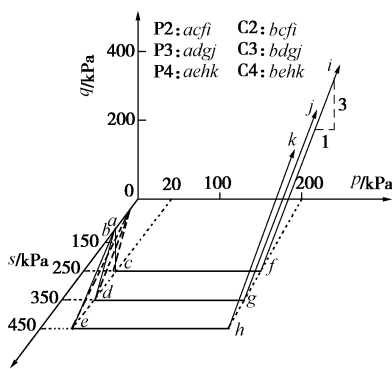


图 3 应力路径

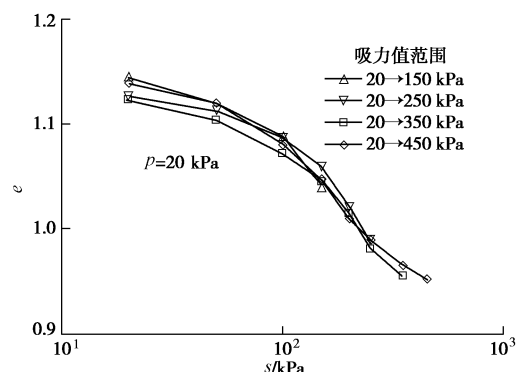
Fig. 3 Stress paths

## 2 试验结果与分析

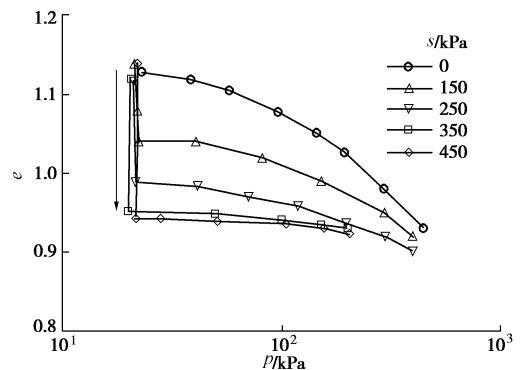
### 2.1 等吸力下等向压缩试验结果

图 4 表示用非饱和三轴仪对预固结试样在等向净应力为 20 kPa 条件下施加不同目标吸力 (150, 250, 350, 450 kPa) 进行吸力平衡的  $e - \lg s$  关系曲线和吸力平衡后的等吸力的  $e - \lg p$  压缩曲线。由图 4 (a)  $e - \lg s$  关系曲线可知, 预固结试样在吸力平衡后的孔

隙比随着吸力值增大而减小。当吸力从 350 kPa 增至 450 kPa, 试样的孔隙比变化不变小。主要是预固结试样进气值较大 (约为 220 kPa<sup>[11]</sup>), 所施加的平衡吸力值小于或接近进气值时, 此时试样为饱和状态, 吸力平衡过程类似于等向净应力作用下饱和土的等向压缩过程, 吸力的效果等价于有效应力, 故其孔隙比变化较大; 而当吸力大于进气值时, 吸力效果要小于有效应力。由图 4 (b) 吸力平衡后的等吸力  $e - \lg p$  压缩曲线可知, 随着试样平衡吸力值的增大, 试样的等向压缩曲线越平缓, 即平衡吸力值越大试样越难压缩。其次, 随着等向净围压增大, 不同吸力的压缩曲线差异越小, 即孔隙比的差异越小。



(a) 吸力平衡



(b) 等吸力压缩

图 4 预固结试样的不同吸力平衡及等吸力压缩试验结果

Fig. 4 Results of suction equalization and compression tests on pre-consolidated specimens under constant suction

图 4 所示的预固结试样变形特性可以用 Sheng 等<sup>[12]</sup>提出的非饱和土弹塑性本构模型来解释。如图 5 所示, 初始饱和预固结试样的状态点为图中 *A* 点或接近 *A* 点, 当吸力增大时, 屈服曲线从倾斜 45° 直线向右上方移动, 如图 5 中曲线①变至曲线②, 会产生较大的塑性变形, 这也可以解释在等向净应力约为 20 kPa 的条件下施加不同吸力 (150, 250, 350, 450 kPa), 试样会产生较大变形的原因。随着吸力逐渐的增大, 屈服线向右偏移, 与吸力轴偏离 (如图 5 曲线③和④)。等向净应力 20 kPa 条件下吸力从 350 kPa 增至 450 kPa

时,即图5中的应力路径DE段,屈服线③变至曲线④,在弹性区域内,故其孔隙比变化小。此外,图4中在等吸力为0,150 kPa下,等向净应力从20 kPa增至400 kPa的压缩过程中会产生较大的孔隙比变化,主要是此时试样对应图5中的屈服线类似于曲线①或曲线②,在增大等向应力过程中,其应力路径会超越原始屈服面而产生较大的塑性变形,故其的压缩曲线较陡。此外,图4中在等吸力350,450 kPa作用下,等向净应力从20 kPa增至200 kPa的压缩过程中,对应的屈服线类似图5中曲线③和④,应力路径分别为DG和EF段,都在弹性区域内,故它们的压缩曲线较平缓。

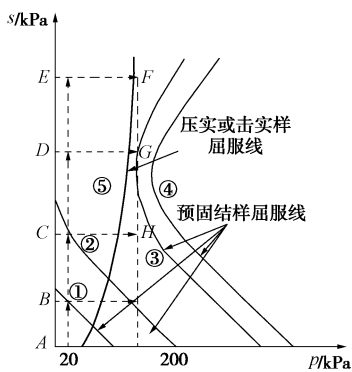


图5 非饱和和预固结样与压实或击实样的屈服曲线

Fig. 5 Yield loci for unsaturated pre-consolidated and compacted soils

图6表示用非饱和三轴仪对预固结样和压实样在净应力为20 kPa和吸力为150 kPa条件下进行吸力平衡,平衡后保持吸力不变,增大等向净应力的压缩试验,最后得到 $e - \lg p$ 曲线和 $w - \lg p$ 曲线。由图6(a)可知,在初始孔隙比相近条件下,平均净应力20 kPa和平衡吸力150 kPa作用下预固结试样的孔隙比明显减小,而压实样的孔隙比在此过程中几乎不变。这是因为压实样的初始吸力(约120 kPa),若按Alonso等<sup>[13]</sup>提出的非饱和土弹塑性本构模型解释,其屈服线为图5曲线⑤,在平均净应力20 kPa作用下,吸力增至150 kPa过程中,其应力路径大部分在弹性区域内,故此过程压实样的孔隙比变化不大。此外,在相近初始孔隙比(约为1.15)和相同平衡吸力150 kPa下预固结试样和压实样压缩曲线对比可知,预固结试样的压缩曲线明显低于压实样的压缩曲线,即在相同平衡吸力和等向净应力条件下预固结试样的孔隙比明显小于压实样的孔隙比。此外,预固结试样的压缩曲线与初始孔隙比约为1.02压实样的压缩曲线比较接近。

由图6(b)可知,在平均净应力20 kPa和施加平衡吸力150 kPa进行吸力平衡过程中,预固结试样的含

水率急剧下降,而压实样的含水率几乎不变。主要是预固结样进气值大于150 kPa,故在此平衡吸力条件下,预固结试样基本处于饱和状态,所施加的吸力等同于施加有效应力作用在试样上,试样所产生变形量的大小大致等同于排水量大小。在图4(a)中分析可知,平衡吸力150 kPa和平均净应力20 kPa作用下预固结试样会产生较大的塑性变形,故此时预固结试样含水率变化较大。而压实样在此过程含水率几乎不变,主要是压实样的进气值接近150 kPa,试样在此平衡吸力作用下排水较小,且压实试样在此应力路径条件下处于弹性区,以及压实试样本身变形量较小,故其含水率变化不大。

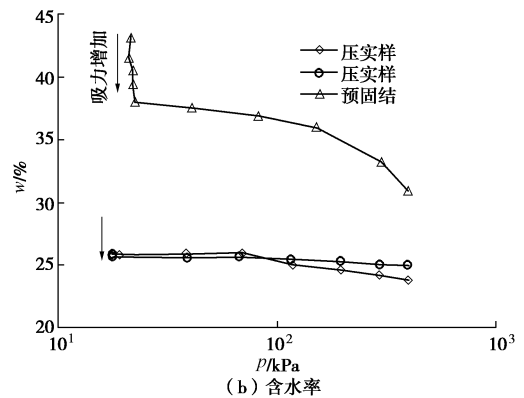
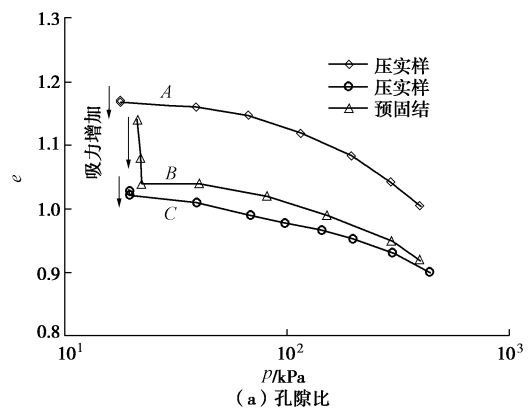


图6 预固结和压实样的吸力平衡及压缩试验结果

Fig. 6 Results of suction equalization and compression tests on pre-consolidated and compacted specimens

## 2.2 不同等吸力下的排水三轴剪切试验结果

为了比较压实样和预固结样在非饱和状态下的剪切特性,须控制两种试样在剪切前(即固结完成后)的孔隙比相近。若两种试样的初始孔隙比相近,则剪切前的孔隙比相差较大。即因预固结样在吸力平衡过程中的孔隙比变化明显大于压实样,如图6(a)中曲线A与B所示,这样预固结样在剪切前的孔隙比明显小于压实样的。从而会导致预固结样的应力-应变曲线更大。因此,在比较时为了消除孔隙比影响,控制压实样的初始孔隙比小于预固结试样的初始孔隙比,使

两组试样在三轴剪切前孔隙比相近, 这样得出两组试样的应力 - 应变关系才有可比性。故表1中压实样的初始孔隙比均比预固结样小, 是为了使得试样在吸力平衡后, 剪切前两组试样的孔隙比相近。

图7表示了压实样和预固结样在等吸力 ( $s=250, 350, 450 \text{ kPa}$ ) 和常净围压 $200 \text{ kPa}$ 条件下, 三轴排水排气剪切试验得到的应力 - 应变关系。表1有6个试样初始状态量和剪切前的孔隙比和含水率, 对比可知三轴剪切前各个试样孔隙比大致相同, 而含水率在同吸力下因土结构不同而不一样。这与文献[11]中两种制样方法试样的土水特征曲线不同的试验结果相一致。由图7可知, 在净围压相同条件下, 压实样 (c2, c3 和c4) 和预固结样 (p2, p3和p4) 的偏应力 - 应变曲线随着等吸力值的增大而升高。在相同吸力和净围压 $200 \text{ kPa}$ 条件下, 预固结样的偏应力 - 应变曲线明显高于压实试样的该曲线。笔者的前期压汞试验 (MIP) 结果<sup>[11]</sup>表明: 本研究所用的压实样为双峰孔径大小分布结构, 孔隙主要由积聚体内孔隙和积聚体间孔隙组成, 而预固结样为单峰孔径分布结构。在孔隙比相近条件下, 孔径分布较压实样的均匀, 从而导致排水剪切过程中预固结试样的偏应力和强度大于压实试样的。此外, 初始孔隙比为1.0左右的压实试样在剪切全过程都表现为剪缩; 而平衡吸力为 $350, 450 \text{ kPa}$ 的预固结样, 在剪应变达到8%之后, 试样表现出较明显的剪胀。同时预固结试样在剪切后破坏后会产生明显的剪切破坏面, 而压实试样在剪切后只产生“侧鼓”的现象, 如图8所示。因此, 在相近初始孔隙比、净围压和等吸力相同条件下, 预固结样强度比压实样强度高。故不同的制样方法或土结构对非饱和土应力 - 应变关系和强度存在着影响。

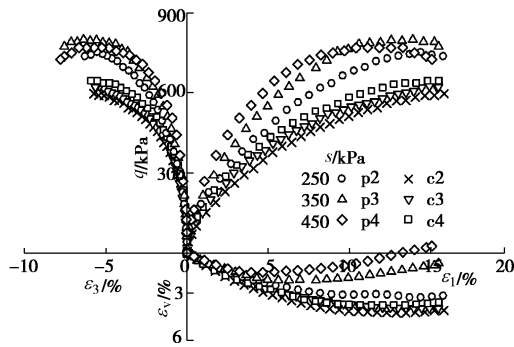


图 7 等吸力剪切过程中预固结样与压实样的应力 - 应变关系  
Fig. 7 Stress-strain relations of pre-consolidated and compacted specimens during shearing under constant suction

图9表示了压实样和预固结样在等吸力 ( $s=250, 350, 450 \text{ kPa}$ ) 和常净围压 $200 \text{ kPa}$ 条件下, 三轴排水剪切过程中含水率、饱和度与轴向应变关系。由图可知, 在排水剪切过程中, 预固结样的含水率和饱和度

都随着轴向应变的增加而减小。压实样的含水率随着轴向应变的增加而减小, 其饱和度则随着轴向应变的增加而略微增大。主要是因为压实样在等吸力下含水率下降较小, 且剪切过程试样体积减缩明显, 故其饱和度在剪切过程中表现为略微上升趋势。此外, 图9 (a) 可知, 在相同吸力和等净围压 $200 \text{ kPa}$ 条件下, 预固结样含水率与轴向应变关系曲线高于压实样的曲线, 说明在相同应力条件下预固结试样的持水性较压实样好, 此结果与文献[11]的结果相一致。对于图9(b) 中在等吸力 $350, 450 \text{ kPa}$ 条件下, 预固结样剪切过程中饱和度出现小于压实样的现象, 主要是饱和度项中包含试样体积变化和含水率两项共同影响的结果。

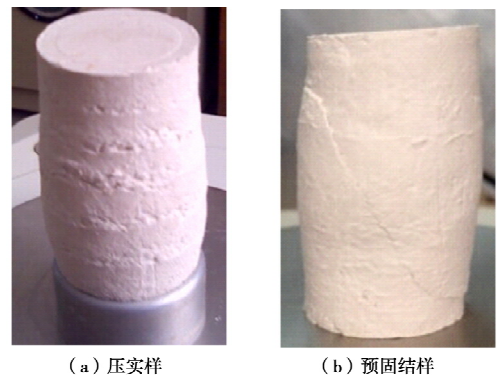


图 8 等吸力  $450 \text{ kPa}$  三轴剪切后的预固结样与压实样

Fig. 8 Pre-consolidated and compacted specimens after triaxial shear under constant suction of  $450 \text{ kPa}$

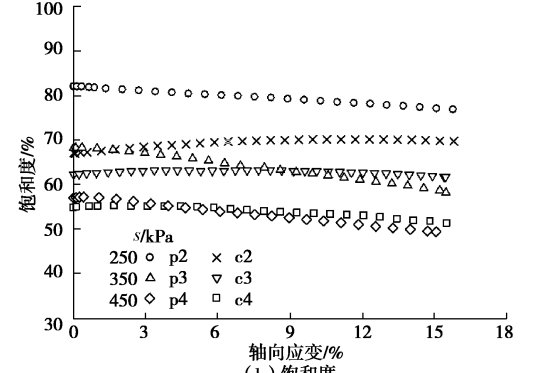
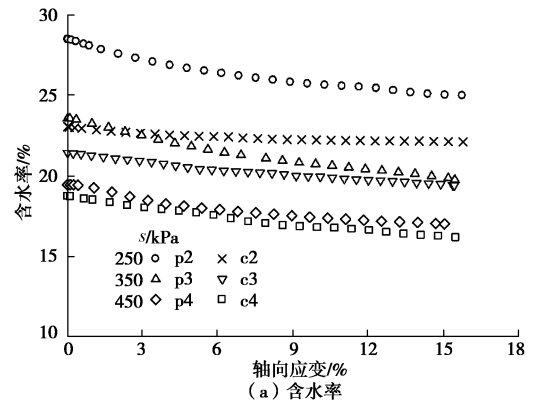


图 9 试样在等吸力剪切过程中饱和度和含水率的变化  
Fig. 9 Variation of water content and saturation degree of specimens during shearing stage under constant suction

### 3 结 论

本文对非膨胀性黏土用不同制样方法得到的非饱和土试样进行一系列等向压缩和剪切特性试验, 总结和分析试验成果可得到以下结论。

(1) 等吸力下的三轴剪切试验结果表明, 在剪切前孔隙比相近、吸力相同和净围压均为200 kPa的条件下, 预固结样的偏应力-应变曲线和强度明显高于压实样的曲线和强度; 破坏时预固结样形成明显的剪切面。这是因为在孔隙比相近条件下, 预固结样孔径大小分布为单峰、孔径分布较压实样的单一, 即预固结样的孔径尺寸大小的分布较集中, 没有压实样那样大的孔隙。

(2) 两种试样在吸力 150 kPa 条件下, 随着等向净应力的增大预固结样的含水率显著减小, 而压实样的含水率几乎不变。上述变形特性可用弹塑性模型解释。

#### 参考文献:

- [1] 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))
- [2] 孔令伟, 周保春, 白 颢, 等. 荆门非饱和膨胀土的变形与强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3036 - 3042. (KONG Ling-wei, ZHOU Bao-chun, BAI Hao, et al. Experimental study of deformation and strength characteristics of Jingmen unsaturated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3036 - 3042. (in Chinese))
- [3] ESTABRAGH A R, JAVADI H. Effect of suction on volume change and shear behaviour of an overconsolidated unsaturated silty soil[J]. Geomechanics and Engineering, 2012, 4(1): 55 - 65.
- [4] FARULLA C A, FERRARI A, ROMERO E. Volume change behaviour of a compacted scaly clay during cyclic suction changes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(6): 688 - 703.
- [5] WHEELER S J, SIVAKUMAR V. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil[J]. Géotechnique, 1995, 45(1): 35 - 53.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] LI X, ZHANG L M. Characterization of dual-structure pore size distribution of soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(2): 129 - 141.
- [9] PENUMADU D, JOHN D. Compressibility effect in evaluating the pore-size distribution of kaolin clay using mercury intrusion porosimetry[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(2): 397 - 400.
- [10] NG C W W, ZHAN L T, CUI Y J. A new simple system for measuring volume changes in unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(2): 757 - 764.
- [11] 孙德安, 高 游. 不同制样方法非饱和土的持水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 91 - 97. (SUN De-an, GAO You. Water retention behaviour of soils with different preparations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 91 - 97. (in Chinese))
- [12] SHENG D C, FREDLUND D G, GENS A. A new modeling approach for unsaturated soils using independent stress variables[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(4): 511 - 534.
- [13] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Géotechnique, 1990, 40(3): 405 - 430.