

DOI: 10.11779/CJGE201712019

# 弱胶结结构性软黏土力学特性的试验研究

陈 波<sup>1, 2</sup>, 孙德安<sup>2</sup>, 高 游<sup>2</sup>, 李 健<sup>2</sup>

(1. 衢州学院建筑工程学院, 浙江 衢州 324000; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200444)

**摘 要:** 对取自不同地区的两种弱胶结结构性软黏土原状 (undisturbed) 样、重塑 (remolded) 样和泥浆 (reconstituted) 样进行了单向压缩和三轴剪切试验, 分别得到土样的压缩曲线和应力-应变曲线。试验结果表明: 原状样的压缩曲线为陡降型曲线, 而不同制样土样的压缩曲线存在明显的差异; 由于孔隙比和孔径分布对土体抗剪强度的综合影响, 不仅导致相同围压下三轴剪切时孔隙比不同的重塑样和原状样强度差异较大, 且孔隙比相近的不同土样的强度也存在不同程度的差异; 若同一孔隙比下, 两种软黏土的不同制样土样的强度关系均为原状样的强度最高, 重塑样的强度最低, 并可通过相近孔隙比下孔径大于  $0.2\ \mu\text{m}$  的孔隙体积量和孔径分布均匀性可合理地解释 3 种制样土样强度高低的关系。由于不同制样土样的孔径分布的差异不会随固结压力的增大而消失, 用参考孔隙比  $e_{10}^*$  简单表示土的孔隙比和孔径分布 (即组构) 参数, 对压缩和剪切试验结果进行归一化整理后, 发现不同土样的试验结果可归一化为相关度高的  $e/e_{10}^*-\sigma_v$  曲线和  $e/e_{10}^*-q_f$  曲线, 证明结构屈服应力后, 不同土样变形和强度差异主要是由孔隙比及孔径分布 (即组构) 的不同引起的, 用参考孔隙比  $e_{10}^*$  简单表示土的组构参数是有效的。

**关键词:** 软黏土; 压缩曲线; 应力-应变曲线; 孔径分布; 参考孔隙比

**中图分类号:** TU443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2017)12-2296-08

**作者简介:** 陈 波 (1984-), 男, 浙江龙游人, 副教授, 主要从事软土的基本性质研究。E-mail: chenbo20020178@163.com。

## Experimental study on mechanical behavior of weakly structured soft clays

CHEN Bo<sup>1, 2</sup>, SUN De-an<sup>2</sup>, GAO You<sup>2</sup>, LI Jian<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Quzhou University, Quzhou 324000, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** The oedometer and triaxial shear tests on undisturbed, remolded and reconstituted samples of two different weakly bonding soft clays are carried out to obtain the compression curves and stress-strain curves. The test results show that the compressibility abruptly increases in the compression curves of undisturbed samples, and the difference among compression curves of different samples is obvious. The strength is not only different for undisturbed and remolded samples for the difference in void ratio, but also different for samples with the close void ratio when they are sheared under the same confining pressures, because the strength of clay is affected by both void ratio and pore-size distribution. The undisturbed samples will have the highest strength and the remolded samples will have the lowest strength if they have the same void ratio, and it is valid for different soft clays used in the tests. The relation of strength among different samples can be explained reasonably by the volume of pore per unit soil volume with its diameter greater than  $0.2\ \mu\text{m}$  and the uniformity of pore-size distribution. Because the difference of the pore-size distribution curves among different samples cannot be eliminated by the increasing consolidation pressure, the reference void ratio  $e_{10}^*$ , a parameter simply describing the void ratio and pore size distribution of soil (fabric) is introduced. The compression and shear test results of different samples dealt with by the reference void ratio  $e_{10}^*$  show that they can be normalized to unique  $e/e_{10}^*-\sigma_v$  and  $e/e_{10}^*-q_f$  curves with high correlation. The normalized results show that if the stress is larger than the structures yield stress, the difference in compression and shear characteristics among the samples are caused by the void ratio and pore-size distribution (fabric), and it can be simply and usefully described by the reference void ratio  $e_{10}^*$ .

**Key words:** soft clay; compression curve; stress-strain curve; pore-size distribution; reference void ratio

## 0 引 言

软黏土沉积过程中形成的结构性, 是指颗粒和孔隙的大小、形状、排列及其之间的接触和联结关系的

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41402271); 浙江省自然科学基金项目 (Q17E080039); 衢州学院中青年学术骨干培养基金项目 (XNZQN201514)

**收稿日期:** 2016-10-11

总和, 可简单地将其分成组构 (fabric) 和胶结 (bonding)<sup>[1]</sup>。土体结构性是与初始孔隙比及应力历史同等重要的影响因素, 它对天然沉积软黏土的工程性质具有重要的影响<sup>[2]</sup>。目前, 国内外研究人员基于 Burland<sup>[3]</sup>提出的重塑样力学特性可作为土的固有力学特性的基础上, 开展了大量的原状样和重塑样的宏观力学比较试验, 得出结构性对软黏土的压缩、剪切特性具有重要影响的结论, 并将其运用于指导工程实践, 取得良好的效果<sup>[2-6]</sup>。然而, 土体的工程性质很大程度上是由土体内部微观结构决定的, 不同土样 (指不同制样方法获得的试样在相同应力条件下) 所表现出的宏观力学特性的差异只是不同微细观结构的综合反映的结果而已, 因此, 需要从微细观结构探究土体变形的内在机理, 建立微细观结构和宏观力学之间的联系。

压汞试验作为研究土体微细观结构的一个重要手段, 已广泛运用于测试土体微细观孔径大小及分布的研究, 并用其解释土体的水力和力学特性时, 取得了不错的成果。张先伟等<sup>[7]</sup>从土体的微观孔径分布变化角度解释湛江结构性软黏土触变后强度恢复的机理; 孙德安等<sup>[8]</sup>则从孔径分布角度解释了初始孔隙比相近的非饱和预固结样和压实样土水特征曲线不同的原因。但如何从微观孔径分布角度来合理解释土体结构对软黏土强度、变形等力学特性的影响方面, 则成果相对较少。

基于上述研究现状, 本文对采用块状 (Block) 取样方式得到的高质量上海浦东、江苏宝应的软黏土原状 (undisturbed) 样、重塑 (remolded) 样和泥浆 (reconstituted) 样分别进行了单向压缩试验和三轴剪切试验, 研究制样方法 (即土体组构) 对软黏土力学特性的影响, 并结合压汞试验得到的上海软黏土不同土样的孔径分布曲线, 对软黏土不同制样土样的变形和强度特性的差异进行了解释。最后, 对压缩和剪切试验结果用参考孔隙比 $e_{in}^*$ 进行归一化整理, 得出结构屈服应力后, 不同土样的变形、强度的差异主要是由于孔隙比及孔径分布, 即组构的不同引起的结论, 且验证了用参考孔隙比 $e_{in}^*$ 作为土的组构参数是简单有效的。

# 1 试验土样和内容

## 1.1 试验土样

原状样 (U 样): 试验用的原状样取自上海浦东和江苏宝应地区, 取土深度为地表以下约 9.8 m 和 1.5 m, 分别为典型的海相沉积和湖相沉积软黏土。为获得高质量的原状样, 取样方式均采用扰动程度较小的 Block 取样, 根据 Lacasse 等<sup>[9]</sup>提出的通过不扰动样固结至有效上覆压力下的体变大小衡量原状样的扰动程度的方法, 得到上海软黏土的体变平均值为 3.5%, 宝

应软黏土的体变平均值为 2.4%, 均在 4% 以下, 属于取样质量好或较好的土样, 土体的基本物理特性见表 1。

表 1 试验土样的基本物理特性

Table1 Basic physical properties of test samples						
土样	取土深度/m	比重 $G_s$	天然含水率/%	液限 $w_L$ /%	塑限 $w_p$ /%	结构屈服应力/ kPa
上海浦东	9.8	2.74	43.9~53.8	44.2	24.3	84
江苏宝应	1.5	2.75	47.8~52.4	58.3	26.7	41

注: 结构屈服应力值为原状样多次单向压缩试验结果的平均值。

重塑样 (R 样): 将根据试验需要而切取的部分原状样用保鲜袋包裹完整, 用手充分捏搓, 使原状样达到完全扰动的重塑状态后放入环刀或套筒中, 并切削两端后制成试验用的重塑样, 即 Remolded 样。此制样方式得到的重塑样在基本不改变原状样的含水率和密度情况下, 完全破坏了土体的胶结结构。

泥浆样 (S 样): 将现场取来的土样放入水中浸泡后, 充分搅拌, 制成饱和泥浆, 倒入直径 15 cm、高 16 cm 的制样桶中, 分级加载固结至 70 kPa 后, 待固结完成后制成试验用的重塑样, 即 Reconstituted 样, 为了区分不同制样方式得到的重塑样, 此类制样方式 (即重新构成) 得到的重塑样可称为泥浆固结样, 本文简称泥浆样。试验时根据试样尺寸切取固结土样一部分, 制成试验用的试样。为保证同一固结压力下, 不同批次重塑样具有相同的初始含水率或孔隙比, 含水率控制在液限的 2 倍左右。

## 1.2 试验内容

压缩试验: 分别用环刀将软黏土的原状样、重塑样和泥浆样制成  $h=20.0$  mm,  $d=61.8$  mm 的试样, 连环刀装入固结仪中, 按 1:1 的加载比分级加载。为确保试样主固结的完成, 每级荷载固结时间为 24 h。

剪切试验: 将软黏土的原状样、重塑样和泥浆样进行不同围压下的等围压固结不排水和固结排水剪切试验。排水剪切试验中, 考虑到软土的渗透系数较小 (约  $10^{-7}$  cm/s), 为保证剪切过程中产生的超孔隙水压力能全部消散, 试验选用慢剪形式, 轴向应变的剪切速率为 0.00275 %/min; 不排水剪切试验中, 由于剪切速率对正常固结软黏土的抗剪强度影响不大<sup>[10-12]</sup>, 为适当减少剪切时间, 将剪切速率提高至 0.0413 %/min。

压汞试验: 将不同方法制得的上海软黏土试样连环刀装入高压固结仪中, 分级加载到目标的固结压力, 待试样在该压力下变形达到稳定后, 从固结仪中取出, 选取具有代表性的中间部分土样, 采用对软黏土扰动和压汞测试结果影响均较小的真空冷冻升华干燥法进行土样干燥, 具体方法见文献[13], 制备好的土样用麦克 9500 型压汞仪进行压汞试验, 可得到上海软黏土

孔径在 0.005~300 μm 范围内的孔径分布情况。

1.3 土样结构性分析

重塑样的力学特性只受土的基本性质的影响，故其力学特性也被称为土的固有力学特性。如用 Burland<sup>[3]</sup>建议的孔隙指数  $I_v$  (式 (1))，对原状样和泥浆样进行归一化后对比分析，可定量的评价天然土的结构性。本文从不同土样的原状样和泥浆样多次单向压缩试验结果中，选取具有代表性的压缩曲线进行归一化整理后，得到图 1。图中，PD(1)、PD(2)分别表示上海浦东软黏土的第 1 次和第 2 试验结果，BY(1)、BY(2)表示江苏宝应软黏土的第 1 次和第 2 次试验结果。

$$I_v = (e - e_{100}^*) / (e_{100}^* - e_{1000}^*) = (e - e_{100}^*) / C_c^* \quad (1)$$

式中， $e_{100}^*$ 、 $e_{1000}^*$  分别为重塑土在 100、1000 kPa 固结压力下的孔隙比， $C_c^*$  为重塑土的压缩指数。

从图 1 中可以看出，两种不同土样的重塑样压缩曲线可基本归一化为一条曲线，与 Burland<sup>[3]</sup>建议的固有压缩曲线 ICL (intrinsic compression line) 基本重合。两种软黏土原状样的压缩曲线均位于重塑样压缩曲线的上方，且两者的归一化曲线均位于固有压缩曲线 ICL 和自然沉积线 SCL (sedimentation compression line) 之间。Burland 等<sup>[4]</sup>认为，具有强胶结结构的软黏土归一化曲线将越过 SCL 线，在 SCL 线的右侧进入屈服状态，而归一化曲线位于 SCL 和 ICL 之间的软黏土则是以组构为主的弱胶结结构性土。因此，本试验用的两种软黏土原状样的颗粒之间的胶结作用较弱，为弱胶结结构性土，土体结构性应从组构（即孔隙比及孔径分布）方面进行研究。

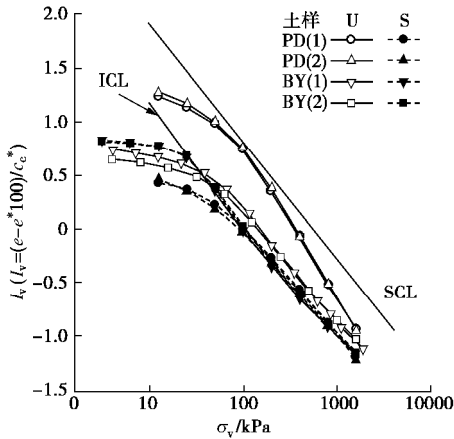


图 1 原状样和泥浆样的归一化曲线

Fig. 1 Normalized intrinsic compression curves of undisturbed and reconstituted samples

2 试验结果及分析

2.1 压缩试验结果与分析

图 2 为压缩试验得到的不同试样的  $e - \log s_v$  曲线。从图中的试验结果可知：原状样的压缩曲线在结

构屈服应力之前，土样的变形很小，结构屈服应力之后，土样的变形急剧增大，是一种具有明显结构屈服应力的陡降型曲线，与众多试验结果一致<sup>[2-3]</sup>。同时，由于试验用的原状样为弱胶结结构性土，其压缩曲线并未出现强胶结结构性土较为常见的反“S”型曲线。对于与原状样初始孔隙比较为接近的重塑样（R 样），由于其胶结强度已基本破坏，因此在一定的固结压力后（25 kPa），压缩曲线则基本为一条直线，且相同的固结压力下，孔隙比明显小于相应的原状样。泥浆样（S 样）则由于制样过程中约受过 70 kPa 的前期固结压力，导致初始孔隙比略小于原状样或重塑样的孔隙比，且土样的变形在前期固结压力之前较小，前期固结压力之后，土样的压缩曲线则基本为一条直线。随着固结压力的增大，泥浆样在相同固结压力下反而比重塑样具有更大的孔隙比，如图 2 所示。由 3 种制样方法的上海软黏土和宝应软黏土土样的压缩曲线的相对位置可知，当固结压力大于屈服应力后，原状样抵抗变形的能力大于相应的泥浆样，泥浆样的抵抗变形能力又大于相应的重塑样。这是由于不同土样的孔径分布不同引起的，将在第 3 节中详细分析。

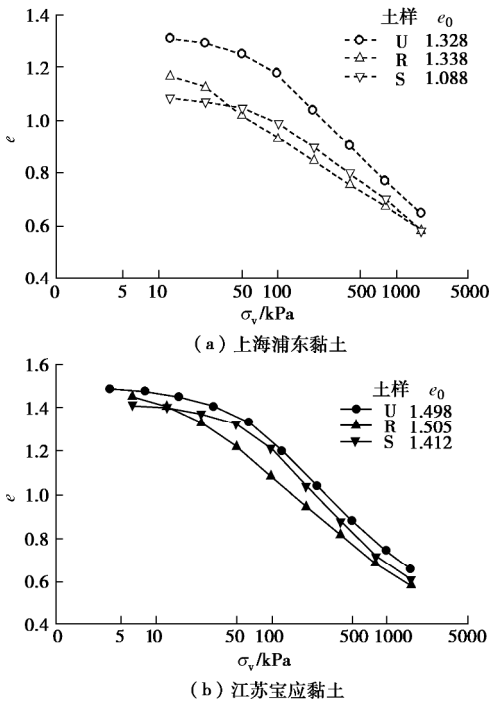


图 2 不同试样的  $e - \sigma_v$  曲线

Fig. 2  $e - \sigma_v$  curves of different samples

2.2 三轴剪切试验结果与分析

根据原状样、重塑样和泥浆样的固结排水剪切和固结不排水剪切试验结果，得到图 3 所示的偏应力 - 应变 - 孔压曲线和图 4 所示的偏应力 - 应变 - 体变曲线。图中，上半部分表示  $(s_a - s_r) - e_a$  关系、下半部分表示  $e_v(u) - e_a$  关系。其中  $s_a$  和  $s_r$  为轴向和侧向应力； $e_a$  和  $e_v$  为轴向应变和体应变； $u$  为孔隙水压力。

从图 3, 4 中可看出, 剪切围压大于土的结构屈服应力或前期固结压力时, 无论是原状样、重塑样还是泥浆样, 其应力 - 应变 - 体变 (孔压) 曲线均属于剪缩硬化型; 同一围压下剪切时, 除宝应软黏土在 100 kPa 下的固结不排水剪切试验显示为原状样的强度大于重塑样强度外, 其余均为原状样的强度小于重塑样的强度, 与陈铁林等<sup>[6]</sup>的试验结果不同。对于泥浆样与重塑样的抗剪强度关系, 则不同软黏土具有不同的规律, 上海软黏土泥浆样的抗剪强度与重塑样的抗剪强度相近, 且明显高于原状样的抗剪强度, 而宝应软黏土泥浆样的抗剪强度则明显的小于重塑样的强度, 且与原状样的强度较为接近。上述两种软黏土的不同土样得到的抗剪强度规律不同, 主要是三者在同一围压下剪切时, 不同的孔径分布不仅会导致不同土体的强度存在差异, 而且会导致它们在剪切前孔隙比存在较大差异, 而剪切前孔隙比对土的强度都具有重要的影响<sup>[14]</sup>。因此, 分析相同围压下土体的抗剪强度时, 需要考虑土样的结构 (孔隙比和孔径分布) 的综合影响。

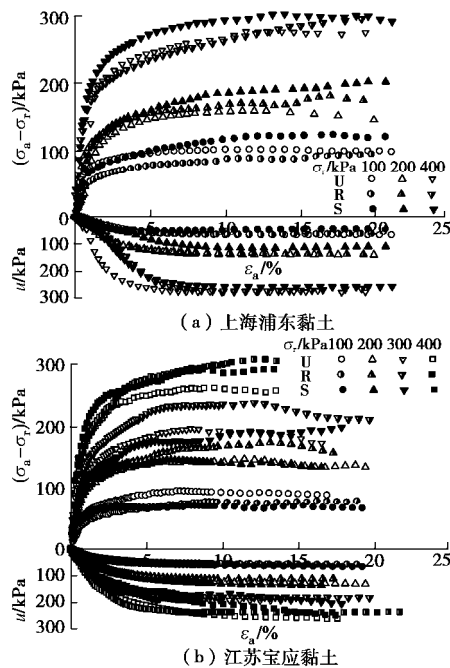
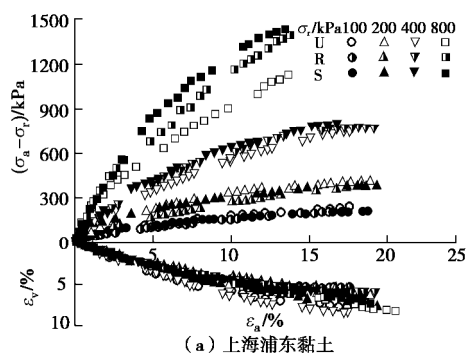
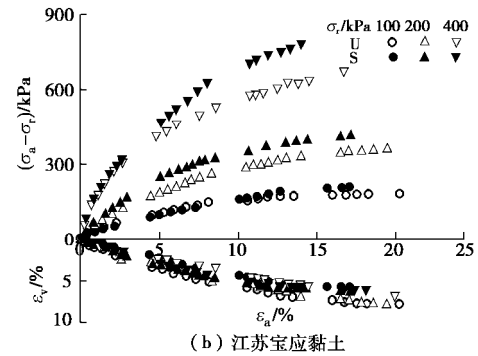


图 3 不同土样的偏应力 - 应变 - 孔压曲线 (固结不排水剪)  
Fig. 3 Deviatoric stress-strain-pore pressure curves of different samples (CU tests)



(a) 上海浦东黏土



(b) 江苏宝应黏土

图 4 不同土样的偏应力 - 应变 - 体变曲线 (固结排水剪)  
Fig. 4 Deviatoric stress-strain-volume strain curves of different samples (CD tests)

图 5 为 2 种软黏土的原状样、重塑样和泥浆样的三轴剪切前的孔隙比比较图。从图中可看出, 相同的固结压力作用下, 两种软黏土原状样的孔隙比均大于重塑样的孔隙比, 且在同一围压下上海软黏土原状样的剪切前孔隙比与泥浆样或重塑样的孔隙比差值较大, 从而导致其抗剪强度明显低于泥浆样或重塑样; 泥浆样的孔隙比虽略大于重塑样的孔隙比, 但泥浆样的孔径大小分布较为均匀<sup>[8]</sup>, 因此, 同一围压下, 泥浆样和重塑样的抗剪强度基本一致。对于宝应软黏土, 由于固结压力在 100 kPa 时, 3 种土样的孔隙比基本一致, 因此, 原状样的强度大于相应的重塑样或泥浆样的强度。随着固结压力的增大, 重塑样的剪切前孔隙比明显的小于泥浆样或原状样, 因而重塑样的强度明显的大于泥浆样或原状样; 当固结压力较大时, 泥浆样的剪切前孔隙比也小于原状样的剪切前孔隙比, 导致高围压下的泥浆样强度大于原状样的强度。

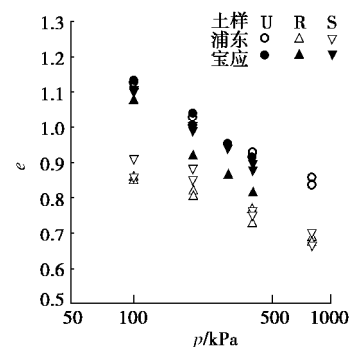


图 5 两种软黏土不同土样的剪切前孔隙比比较

Fig. 5 Comparison of void ratios between different samples of two soft clays before shear

### 2.3 相同孔隙比下强度分析

图 3, 4 的剪切试验结果表明, 不同制样土样在同一围压下剪切时, 由于孔隙比及孔径分布存在的差异, 使不同软黏土的不同制样土样的抗剪强度大小规律并不相同, 由于本文重点关注土体的孔径分布对软黏土的力学特性的影响, 因此, 比较不同孔径分布的原状样、重塑样和泥浆样的抗剪强度关系时, 需消除孔隙比对土体强度的影响。即, 比较孔隙比相同条件下三

者的强度关系。

Hong 等<sup>[14]</sup>将试验得到的不排水抗剪强度与土样剪切后的比容  $v$  ( $v=1+e$ ) 整理后, 分析了相同孔隙比条件下, Ariake 软黏土原状样和重塑样的强度关系。为比较相同孔隙比条件下原状样、重塑样和泥浆样的强度大小关系, 本文用类似方法对 2 种软黏土的原状样、重塑样和泥浆样的临界状态孔隙比  $e_f$  与相应的排水或不排水剪切强度  $q_f$  进行整理, 得到图 6 所示的  $e_f - q_f$  曲线。其中, 考虑有部分试样由于安装偏差、变形不均匀等导致土体抗剪强度达到峰值后略有下降, 影响它们在同一应变下强度的可比性, 因此,  $q_f$  选用是应力 - 应变曲线中的最大值, 图 6 的试验结果显示, 无论是上海软黏土还是宝应软黏土, 原状样的  $e_f - q_f$  曲线均位于相应泥浆样的上方, 泥浆样的  $e_f - q_f$  曲线则均位于相应重塑样的上方, 说明若 3 种不同土样的孔隙比相同时, 则原状样的强度将大于相应泥浆样的强度, 泥浆样的强度将大于相应重塑样的强度, 与图 2 中不同土体抵抗压缩变形的规律一致。考虑到三轴剪切试验的围压均大于原状样结构屈服应力, 且原状样本身的胶结强度不高及胶结结构是土体结构中的非稳定结构, 具有容易破坏的特点<sup>[3, 15]</sup>, 可认为剪切试验时, 原状样的胶结结构已基本破坏, 影响土体强度的主要因素为结构中较为稳定的组构, 即孔隙的形态、大小、数量以及分布情况。因此, 需要从微观孔隙分布方面去解释引起原状样、重塑样和泥浆样强度特性差异的原因。

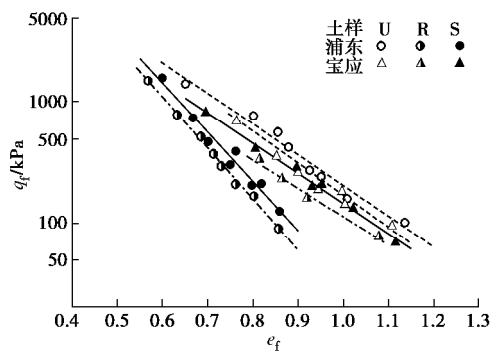


图 6 不同制样试样的  $e_f - q_f$  曲线比较

Fig. 6 Comparison of  $e_f - q_f$  curves between different preparations

3 压汞试验及分析

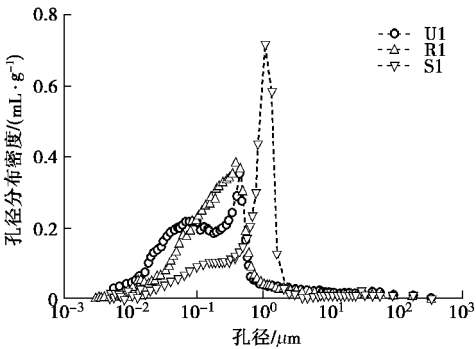
对孔隙比相近的上海软黏土原状样、重塑样和泥浆样分别开展压汞试验, 用于分析不同制样土样的孔径分布情况, 得到图 7, 8 所示的累计压入汞总体积量 CIV (cumulative intruded volume) 相近 (即相近孔隙比的土样) 的不同土样孔径分布密度曲线和累计压入汞体积曲线。不同试样的固结压力、压缩试验推算的孔隙比  $e_c$  及累计压入汞体积量详见表 2。

表 2 累计压入汞总体积相近的不同土样的孔径分布比较

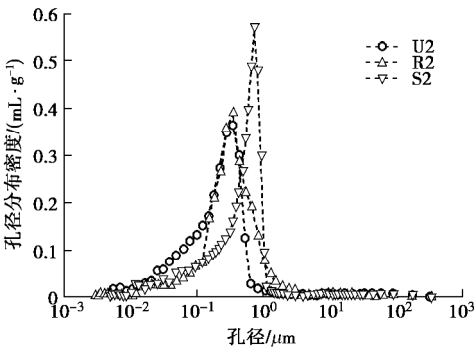
Table 2 Comparison of pore-size distribution among different samples under close cumulative intruded volume

图号	试样	最大固结压力/kPa	孔隙比 $e_c$	总累计压汞量 $/(cm^3 \cdot g^{-1})$	$>0.2 \mu m$ 体积 $/(cm^3 \cdot g^{-1})$	$>0.2 \mu m$ 所占比例 /%
7(a)	U1	200	1.026	0.380	0.180	47.37
8(a)	R1	100	0.988	0.377	0.279	74.00
	S1	100	0.953	0.361	0.290	80.33
7(b)	U2	800	0.794	0.280	0.165	58.93
8(b)	R2	400	0.753	0.277	0.212	76.53
	S2	400	0.779	0.268	0.210	78.36
7(c)	U3	1600	0.644	0.224	0.128	57.14
8(c)	R3	1600	0.581	0.213	0.137	64.32
	S3	1600	0.559	0.221	0.148	66.97

图 7 的孔径分布密度曲线表明: 虽然饱和状态下的原状样、重塑样和泥浆样的分布密度曲线均为典型的单峰孔径结构, 但是累计压入汞总体积量基本相同的三者 (U 样、R 样、S 样) 的孔径分布曲线却存在明显的差异, 说明制样方式对试样的孔径分布产生重要影响。土样的孔隙分布密度曲线峰值的相对位置说明泥浆样的孔径相对较大, 孔径分布相对集中。随着固结压力的增大, 土样的孔径分布范围逐渐减小, 说明土样的孔径分布随固结压力的增大也趋于集中, 尤其是原状样和重塑样, 这种现象更加明显。然而, 制样方式不同导致的孔径分布差别并不会随着固结压力的增大而消除, 如图 8(c) 所示, 当固结压力达到 1600 kPa 时, 不同试样的孔径分布曲线仍存在不小的差别。张先伟等<sup>[7]</sup>认为这是由于土体的初始结构破坏后, 微观孔径分布会发生重组, 并根据受力情况发生新的调节, 达到与对应压力相适应的结构形态。



(a) 累计压汞量 CIV  $\approx 0.36 \text{ cm}^3/\text{g}$



(b) 累计压汞量 CIV  $\approx 0.27 \text{ cm}^3/\text{g}$

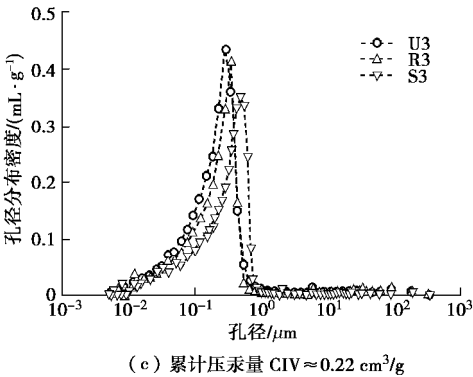


图 7 在相同孔隙比下不同制样土样孔径分布密度曲线

Fig. 7 Pore-size distribution density curves of differently prepared samples under same void ratio

为进一步明确土样的孔径分布对土样抗剪强度产生影响的机理, 需要详细分析土体中不同孔径范围

小的孔隙受到影响; 张先伟等<sup>[17]</sup>基于湛江软黏土的试验结果则认为体积含量高的孔隙组在外力应力下优先调整。但是, 他们的试验结果均表明, 土样中的微孔隙几乎不会随着固结压力的改变而发生变化。因此, 本文从同一孔隙比下, 对应力敏感的孔径尺寸大于微孔隙的孔隙累计体积量来分析土体抗剪强度的关系。

图 9 为采用具有较好科学依据的分形几何方法确定上海软黏土的孔径划分界限。从图中可看出, 上海软黏土以  $0.2\ \mu\text{m}$  孔径作为划分小孔隙和微孔隙的界限尺寸。从图 8 所示的不同土样累计压入汞体积曲线可得到不同试样的孔径大于  $0.2\ \mu\text{m}$  的累计孔隙体积, 具体数据详见表 2。表 2 中的累计体积表明, 相近累计压入汞总体积量时, 孔径大于  $0.2\ \mu\text{m}$  的原状样孔隙体积累积量明显的小于泥浆样或重塑样, 而泥浆样和重塑样的孔隙累计体积则基本相同。随着固结压力的增加, 原状样中孔径大于  $0.2\ \mu\text{m}$  的累计孔隙体积与泥浆样或重塑样的差值逐渐减小, 当固结压力足够大 ( $1600\ \text{kPa}$ ) 时, 三者的单位土体积的孔隙体积基本相同。由于相近孔隙比条件下, 原状样中孔径在  $0.2\ \mu\text{m}$  以上孔隙体积量的比例最小, 即孔径小于  $0.2\ \mu\text{m}$  微孔隙体积量的比例最大, 因而其抗剪强度将明显高于其他两种土样。孔隙比越大, 即累计压入汞总体积量越大, 原状样与泥浆样或重塑样的强度差异越明显, 与图 6 的三轴剪切试验结果基本一致。对于重塑样和泥浆样的抗剪强度比较, 可从孔径分布的均匀性方面去解释, 图 7 的孔径分布密度曲线表明, 泥浆样孔径分布明显比重塑样的集中, 而孔径分布的集中程度对土样的抗剪强度也有不同程度影响, 因而, 泥浆样的强度大于相应重塑样的强度。

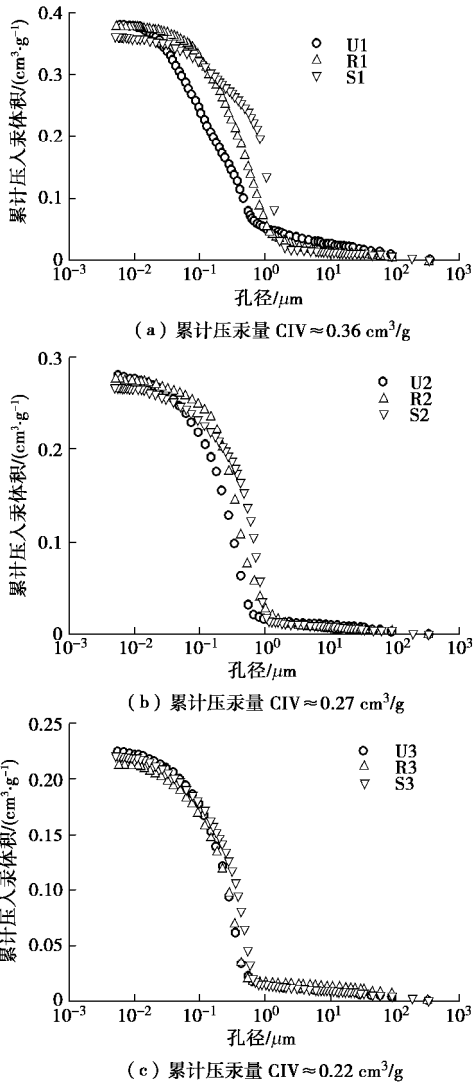


图 8 不同土样在相近孔隙比下的累计压入汞体积曲线

Fig. 8 Cumulative intruded volume curves of differently prepared samples under close void ratio

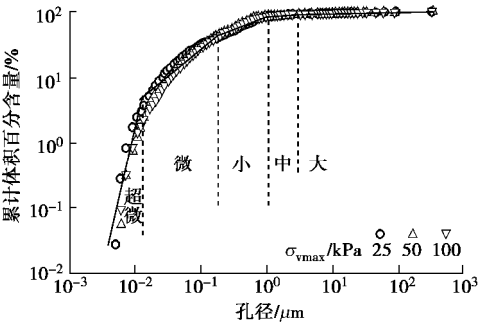


图 9 不同固结压力的原状样的孔隙分形曲线

Fig. 9 Pore-size distribution curves of undisturbed samples under different consolidation pressures

4 组构参数归一化

考虑到本次剪切试验采用的剪切围压均大于土体的结构屈服应力以及胶结是土体结构中的非稳定结构, 容易破坏的特点<sup>[3, 15]</sup>, 可认为固结压力大于土体的结构屈服应力后, 原状样的胶结结构已基本破坏,

导致土样变形、强度特性差异的主要原因是土体的孔隙比及孔径分布,即土结构中的组构部分。压汞试验结果也表明,不同制样方式得到的试样的孔径分布存在明显差异,且这种差异并不会随固结应力的增加而消除。考虑到土体的孔径大小及分布复杂且影响因素众多,准确地量化描述相对困难。另外, Hong 等<sup>[18]</sup>试验结果表明,由于土体吸力的影响,泥浆样的压缩曲线在固结应力极小时并不是一条直线,但当压力大于 10 kPa 后,其压缩曲线则基本为一条直线。因此,本文通过将屈服应力后的压缩曲线外延至 10 kPa 时的孔隙比定义为参考孔隙比  $e_{10}^*$ ,用于简单量化土的组构,如图 10 所示,即用图中的孔隙比  $e_{10}^*$  简单地量化土的组构,建立其土体的微观结构和宏观力学之间的联系。

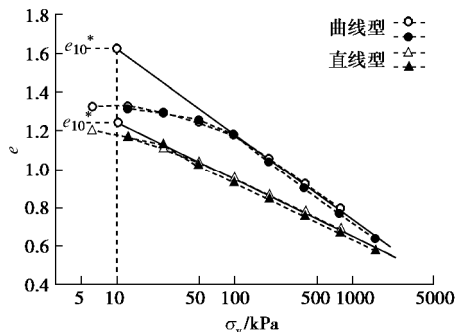


图 10 参考孔隙比  $e_{10}^*$  的定义

Fig. 10 Definitions of reference void ratio  $e_{10}^*$

将两种软黏土的不同土样的单向压缩曲线、临界破坏状态的  $e_f - q_f$  曲线以参考孔隙比  $e_{10}^*$  进行归一化整理后,得到图 11, 12 所示的结果。其中,图 11 中的 PD(O)、PD(I) 分别表示的是上海浦东软黏土单向压缩和等向压缩的试验结果; BY(O)、BY(I) 分别表示江苏宝应软黏土单向压缩和等向压缩的试验结果。

图 11 的结果显示,用参考孔隙比  $e_{10}^*$  进行归一化整理后,软黏土原状样、重塑样和泥浆样单向试验得到的  $e - s_v$  曲线可归一化为  $e/e_{10}^* - s_v$  曲线 (相关度  $R^2=0.964$ ),且将图 5 中剪切前的等向固结试验数据整理后,发现其试验点也位于拟合曲线的附近,说明该拟合曲线也同样适用于等向压缩的试验结果。

图 12 的结果显示,不同软黏土的原状样、重塑样和泥浆样剪切试验得到的  $e_f - q_f$  曲线也可归一化为  $e_f/e_{10}^* - q_f$  曲线 (相关度  $R^2=0.928$ )。图 11, 12 的归一化结果表明,当固结应力大于结构屈服应力后,原状样与没有胶结作用的重塑样和泥浆样的  $e/e_{10}^* - s_v$ 、 $e_f/e_{10}^* - q_f$  曲线基本一致,再次证明当固结压力大于结构屈服应力后,原状样的非稳定胶结结构已基本破坏,影响土体的变形、强度力学特性的主要是土样的孔径大小及分布,即土体的组构。用参考孔隙比  $e_{10}^*$  归一化后,则可消除土体组构的影响。因此,参考孔隙比  $e_{10}^*$  简单

表示土的结构,是合理有效的。

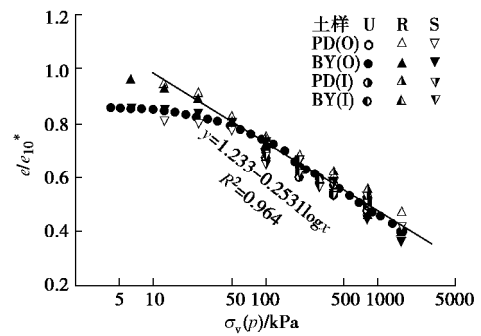


图 11 不同土样的  $e/e_{10}^* - \sigma_v(p)$  曲线

Fig. 11  $e/e_{10}^* - \sigma_v(p)$  curves of different samples

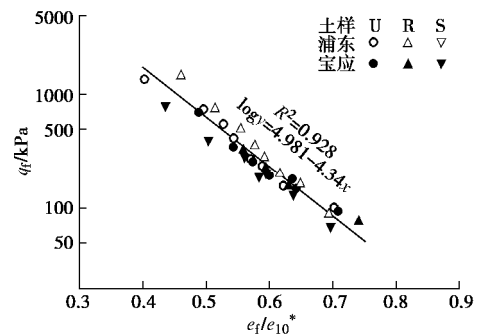


图 12 不同土样的  $e_f/e_{10}^* - q_f$  曲线

Fig. 12  $e_f/e_{10}^* - q_f$  curves of different samples

## 5 结 论

本文对两种软黏土的原状样、重塑样和泥浆固结样进行单向压缩和三轴剪切试验。重点分析和比较了不同制样方法得到的土样强度特性的差异,得出孔隙比及孔径分布对土体强度特性具有重要影响,并从孔隙体积量上对三者的强度大小关系进行了详细解释。用简单表示组构的参考孔隙比  $e_{10}^*$  归一化整理,不仅适用于不同土样的单向、等向压缩试验结果,而且适用于不同土样的抗剪强度,验证  $e_{10}^*$  表示组构是简单有效的。具体结论如下:

(1) 不同软黏土的原状样、重塑样和泥浆样在相同围压下剪切时,三者的强度关系规律并不相同。这是由于同一围压下,不同孔径分布会导致不同土体的强度存在差异,而且会导致它们在剪切前孔隙比存在差异,进而影响土体的抗剪强度。因此,比较不同土样在相同围压下的抗剪强度时,应考虑土体孔隙比和孔径分布的综合作用。

(2) 3 种制样土样的孔隙比相近时,原状样的抗剪强度大于泥浆样的抗剪强度,泥浆样的抗剪强度大于重塑样的抗剪强度,且单向压缩曲线的相对位置也印证了此结论的合理性。这是由于相近孔隙比下,原状样中孔径大于  $0.2 \mu\text{m}$  的孔隙体积量明显小于泥浆样或重塑样的孔隙体积量;而孔隙体积接近的泥浆样和重塑样抗剪强度的差异则是由于泥浆样的孔径分布

集中程度优于重塑样的孔径分布导致的。

(3) 当固结应力大于结构屈服应力后, 原状样与没有胶结强度的重塑样的  $e/e_{10}^* - p_f$ 、 $e_f/e_{10}^* - q_f$  曲线基本一致, 说明原状样在结构屈服应力后, 土体结构中非稳定的胶结结构已基本破坏, 不同土样变形、强度特性差异的主要原因是土体的孔隙比以及孔径分布, 即土的组构引起的, 且用参考孔隙比  $e_{10}^*$  作为组构参数是简单有效的。

#### 参考文献:

- [1] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 1976.
- [2] LEROUÉIL S, VANGHAN P R. The general and congruent effects of structure in soils and weak rocks[J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(3): 467 - 488.
- [3] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clay [J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(3): 329 - 378.
- [4] BURLAND J B, RAMPELLO S, GEORGIANNOU V N, et al. A laboratory study of the strength of four stiff clays[J]. *Géotechnique*, 1996, **46**(3): 491 - 514.
- [5] 吕海波, 汪 稔, 孔令伟, 等. 结构性对琼州海峡软土压缩特性的影响[J]. *岩土力学*, 2001, **22**(4): 467 - 473. (LÜ Hai-bo, WANG Ren, KONG Ling-wei, et al. The influences of soil structure on compressibility of Qiongzhou Strait soft marine clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, **22**(4): 467 - 473. (in Chinese))
- [6] 陈铁林, 周 成, 沈珠江. 结构性黏土压缩和剪切特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(1): 31 - 35. (CHEN Tie-lin, ZHOU Cheng, SHEN Zhu-jiang. Compression and shear test of structured clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(1): 31 - 35. (in Chinese))
- [7] 张先伟, 孔令伟, 李 峻, 等. 黏土触变过程中强度恢复的微观机理[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(8): 1407 - 1413. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, LI Jun, et al. Microscopic mechanism of strength increase of clay during thixotropic process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(8): 1407 - 1413. (in Chinese))
- [8] 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 behavior of soils with different preparations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(1): 91 - 97. (in Chinese))
- [9] LACASSE S, BERRE T, LEFEBVRE G. Block sampling of sensitive clays[C]// *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco, 1985: 887 - 892.
- [10] VAID Y P, CAMPANELLA R G. Time-dependent behavior of undisturbed clays[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1977, **103**(7): 693 - 709.
- [11] ZHU J G, YIN J H. Strain-rate-dependent stress-strain behavior of overconsolidated Hong Kong marine clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, **37**(6): 1272 - 1282.
- [12] 齐剑峰, 栾茂田, 聂 影, 等. 饱和黏土剪切变形与强度特性试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2008, **48**(4): 551 - 556. (QI Jian-feng, LUAN Mao-tian, NIE ning, et al. Experimental study of shear and strength behavior of saturated clay[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2008, **48**(4): 551 - 556. (in Chinese))
- [13] 刘汉民, 孟 斌, 吴 恒, 等. 冷冻与置换干燥法制备海积软土压汞试样的制备效果对比试验[C]//第十七届中国海洋(案)工程学术讨论会论文集. 南宁, 2015. (LIU Han-min, MENG Bin, WU Heng, et al. Comparative test on preparation effect of marine soft clay specimens for mercury intrusion porosimetry with freezing and drying methods[C]// *Proceedings of 17th Conference on China Ocean Engineering*. Nanning, 2015. (in Chinese))
- [14] HONG Z S, SHEN S L, DENG Y Y, et al. Loss of soil structure for natural sedimentary clays[J]. *Geotechnical Engineering*, 2007, **160**(3): 153 - 159.
- [15] BAUDET B, STALLEBRASS S. A constitutive model for structured clays[J]. *Géotechnique*, 2004, **54**(4): 269 - 278.
- [16] 吕海波, 赵艳林, 孔令伟, 等. 利用压汞试验确定软土结构性损伤模型参数[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(5): 854 - 858. (LÜ Hai-bo, ZHAO Yan-lin, KONG Ling-wei, et al. Determining parameters of damage model of soft soils using mercury intrusion porosimetry[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(5): 854 - 858. (in Chinese))
- [17] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 不同固结压力下强结构性黏土孔隙分布试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(10): 2794 - 2800. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Experimental study of pore distribution of strong structural clay under different consolidation pressures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(10): 2794 - 2800. (in Chinese))
- [18] HONG Z S, YIN J, CUI Y J. Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents[J]. *Géotechnique*, 2010, **60**(9): 691 - 700.