

DOI: 10.11779/CJGE2021S2015

# 两种固结状态下软土的三轴不排水剪切模量 非线性及对比

高彦斌<sup>1</sup>, 罗文康<sup>1</sup>, 骆佳樑<sup>2</sup>, 钱谨伟<sup>2</sup>, 张和森<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 太仓市产能电力集团有限公司, 江苏 苏州 215400)

**摘要:** 原位软土通常是具有初始各向异性的  $K_0$  固结土, 室内三轴试验通常使用各向等压固结的重塑土。通过对由上海软黏土制成的原状与重塑土样进行  $K_0$  固结与各向等压固结土的不排水剪切试验 (ICUC、ACUC、ACUE 三种试验), 对比两种固结方式下归一化强度  $c_u/\sigma'_{vc}$ 、归一化模量  $E_{u50}/\sigma'_{vc}$  及归一化模量  $E_u/E_{u50}-\varepsilon_a$  的非线性特性。研究结果表明, 两种固结方式下土体的应力 - 应变曲线具有明显的非线性特点, 在强度发挥、归一化强度上存在差异; 以  $E_{u50}$  作为归一化因子给出的归一化磨料  $E_u/E_{u50}$  非线性归一化效果很好, 原状土样和重塑土样的归一化模量曲线几乎是相同的。

**关键词:** 软黏土; 非线性变形; 各向异性; 割线模量;  $K_0$  与各向等压

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0064-04

**作者简介:** 高彦斌(1973—), 男, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为软土力学特性与软土工程。E-mail: yanbin\_gao@tongji.edu.cn。

## Nonlinear characteristics and comparison of triaxial undrained shear moduli of soft soils under two consolidation states

GAO Yan-bin<sup>1</sup>, LUO Wen-kang<sup>1</sup>, LUO Jia-lian<sup>2</sup>, QIAN Jin-wei<sup>2</sup>, ZHANG He-shen<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Taicang Cangneng Electric Power Group Co., Ltd., Suzhou 215400, China)

**Abstract:** The in-situ soft soil is usually the  $K_0$  consolidated one with the initial anisotropy, and laboratory triaxial tests usually uses the remolded soil with isobaric consolidation. The undrained shear tests (three kinds of tests: ICUC, ACUC, ACUE) about  $K_0$  consolidated and isotropic consolidated soils are carried out by using the original and remolded soil samples made by Shanghai soft clay, and the normalized intensity  $c_u/\sigma'_{vc}$ , normalized modulus  $E_{u50}/\sigma'_{vc}$ , normalized modulus  $E_u/E_{u50}-\varepsilon_a$  under characteristics of the nonlinear two consolidation states are compared. The results show that the stress and strain of soils under the two consolidation modes possess obvious nonlinear characteristics, and there are differences in strength exertion and normalized strength. The normalized effect obtained by using  $E_{u50}$  as the normalization factor is satisfactory, and the normalized curves of the undisturbed and remolded soil samples are almost the same.

**Key words:** soft clay; nonlinear deformation; anisotropy; secant modulus;  $K_0$  and isotropic consolidation

## 0 引言

工程中的天然软土为  $K_0$  固结状态, 通常具有絮凝结构。室内试验通常采用常规三轴试验对软土进行应力应变的变形分析, 土样通常采用结构性具有明显差异的重塑土样。

软土具有明显的非线性力学特征。Kondner 等<sup>[2]</sup>通过常规静三轴试验, 提出了表示各向等压固结土体非线性应力 - 应变特性的双曲线模型 - 邓肯张模型<sup>[3-4]</sup>。龚晓南<sup>[5]</sup>则指出, 各向异性与非线性在土体的应力 - 应变关系的研究中都十分重要, 需要同时考虑, 这也为  $K_0$  固结土体的非线性变形特性的分析奠定了思路。

为了研究具有各向异性特点的  $K_0$  固结土体的非线性变形特征, 曾国熙等<sup>[6]</sup>、李作勤等<sup>[7]</sup>、张勇等<sup>[8]</sup>通过归一化的分析方式, 对软黏土的非线性变形特性进行了研究。袁聚云等<sup>[9]</sup>通过  $K_0$  固结与各向等压固结下的三轴排水剪切试验, 分析了  $K_0$  固结状态对软土的强度和变形性能的影响。然而, 大多研究仅仅停留在两种固结方式下土体的非线性变形的归一化性状分析, 倾重于宏观试验曲线, 并未结合试验结果对变形特性及模量的对比。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41972273)

收稿日期: 2021-08-16

因此, 本文利用 GDS 应力路径三轴仪, 对上海软黏土制成的原状土样与重塑土样进行了  $K_0$  固结土与各向等压固结土的三轴固结不排水剪切试验, 对比两种固结方式下软土土体的应力-应变曲线、割线模量  $E_{u50}$  及割线模量  $E_u$  等能体现土体非线性变形特点的参数, 分析各向异性对土体变形的影响规律。试验结果可为研究软土的非线性变形特征的室内试验提供参考, 同时各向异性影响土体非线性变形的规律也可用于工程实践。

## 1 试验方案及试验处理方法

### 1.1 试验土样

试验土样采用原状与重塑状的上海软黏土, 原状土样取自上海某地铁车站基坑, 取土深度为 10 m。为了减少取土过程对土样的扰动, 采用直径为 35 cm, 高为 20 cm 的 PVC 管压入土中取土, 常规土工试验获得的土样的物理性质见表 1。重塑土样采用以下方法制备: 原状土样风干、碾碎后、过筛后, 加水制成含水率为 1.75 倍液限的泥浆; 然后采用直径为 10 cm, 高为 20 cm 的不锈钢固结仪进行固结在最大压力为 75 kPa 下固结 7 d, 然后切取三轴试样。三轴试样直径为 3.91 cm, 高度为 7.8 cm, 侧面则滤纸条以加速排水。

表 1 原状土样的物理性质

Table 1 Physical properties of undisturbed soil samples

含水率 $w/\%$	液限 $w_L$ /%	塑限 $w_P$ /%	塑性指数 $I_p/\%$	相对密度 $G_s$	级配/%		
					黏土 ( $<2 \mu\text{m}$ )	粉土 ( $2\sim60 \mu\text{m}$ )	砂土
47	43%	19%	24	2.75	30	70	0

### 1.2 试验方案

三轴试验采用 GDS 应力路径三轴仪<sup>[10]</sup>, 试验方案见表 2 所示。试验分为两大组: ①各向等压固结后不排水剪切试验(简称为 ICUC 试验); ② $K_0$  固结后不排水压缩剪切试验(简称为 ACUC 试验)和拉伸剪切试验(简称为 ACUE 试验)。试验编号中原状土样和重塑土样分别以试验编号首字母分别用 N 和 R 表示。以上 3 种试验(ICUC、ACUC、ACUE), 原状土和重塑土分别进行了两个固结压力等级的试验, 共计 12 个试验, 具体的固结压力(围压  $\sigma'_{rc}$  和轴压  $\sigma'_{vc}$ )见表 2 所示。

$K_0$  固结实施过程如下: 反压饱和后(反压值为 150 kPa), 在双面排水状态下保持  $\sigma'_{rc}/\sigma'_{vc}=0.5$  的比例同时缓慢施加固压  $\sigma'_{rc}$  和轴压  $\sigma'_{vc}$  到预定值, 加载时间为 40 h, 随后在恒定荷载下再固结 8 h。采用加载方法加载过程中的径向应变非常小, 接近侧限状态下的  $K_0$  固结过程。固结结束后进行排水状态下剪切至土样破坏。ICUC 和 ACUC 试验中土样在恒定的轴向位移速

率下剪切破坏, 速率约为 0.8 mm/h; ACUE 试验中在恒定的竖向固结应力加载速率下剪切破坏, 剪切阶段总时间约为 8 h。

表 2 试验方案及不排水抗剪强度  $c_u$

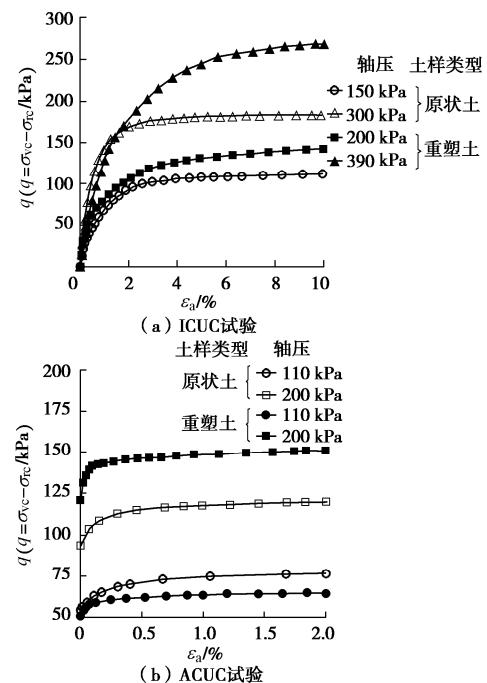
Table 2 Test programs and results of  $c_u$

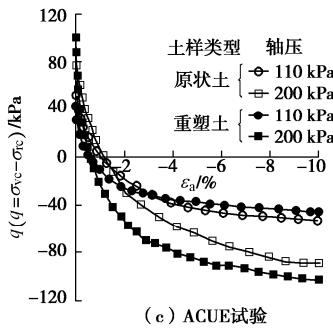
试验编号	$e_c$	$\sigma'_{rc}$ /kPa	$\sigma'_{vc}$ /kPa	$q_f$ /kPa	$c_u$ /kPa	$E_{u50}$ /MPa	$c_u$ / $\sigma'_{vc}$
I NIC1	1.100	150	150	112.4	56.2	9.07	0.37
C NIC2	0.940	300	300	184.6	92.3	23.37	0.31
U RIC1	0.729	200	200	143.2	71.6	11.19	0.36
C RIC2	0.675	390	390	269.4	134.7	12.59	0.35
A NAC1	1.260	55	109	76.8	38.4	5.76	0.35
C NAC2	1.100	105	200	120.2	60.1	10.91	0.30
U RAC1	0.855	55	106	65.0	32.5	9.29	0.31
C RAC2	0.765	127	248	152.2	76.1	27.63	0.31
A NAE1	1.254	60	112	54.8	27.4	4.95	0.24
C NAE2	1.102	100	200	89.0	44.5	6.86	0.22
U RAE1	0.868	50	95	45.6	22.8	9.01	0.24
E RAE2	0.765	130	250	106.0	53.0	20.95	0.21

## 2 应力-应变曲线及模量分析

### 2.1 应力-应变曲线与不排水抗剪强度

图 1 为两种固结模式 3 种剪切试验的偏应力  $q$  ( $q=\sigma'_{vc}-\sigma'_{rc}$ ) 与轴向应变  $\varepsilon_a$  的关系曲线。从图 1 可以看出: ①ICUC、ACUC、ACUE 试验的应力-应变曲线均呈应变硬化的特点, 并表现出明显的非线性特征; ② $K_0$  固结下 ACUE 试验曲线的非线性比 ACUC 试验曲线更强, 由此可见各向异性对软土非线性变形的影响; ③强度发挥差别较大, ICUC、ACUC 和 ACUE 试验中应变大致分别在 2%, 0.5% 和 5% 时, 强度大部分发挥。

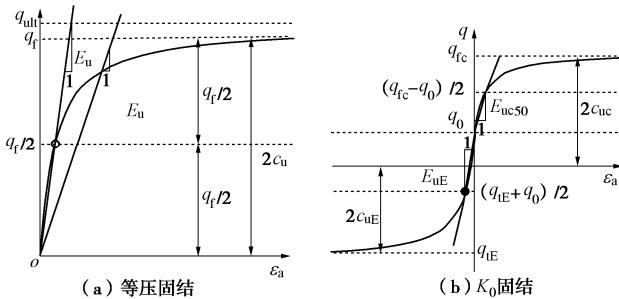


图1 两种固结模式下3种剪切试验的 $q-\varepsilon_a$ 曲线Fig. 1 Curves of  $q-\varepsilon_a$  of two kinds of consolidated soils

取轴向应变 $\varepsilon_a$ 作为破坏应变,得到的破坏偏应力 $q_f$  ( $q_f = \sigma_{if} - \sigma_{3f}$ )、不排水抗剪强度 $c_u$  ( $c_u = q_f/2$ )以及归一化强度 $c_u/\sigma'_{vc}$ 见表1。可以看出,ICUC试验与ACUC试验土体的归一化强度相差不大,大致在0.30~0.37,均显著大于ACUE试验的结果(0.21~0.24);另外,同一试验中两种土样的归一化强度差别不大。

## 2.2 $E_{u50}$ 分析

割线模量 $E_{u50}$ 是度量土样变形的参数,表示应力为50%破坏强度时土样的割线模量,在不排水剪切中,割线模量 $E_u=3G_u$ ,其中 $G_u$ 为剪切模量。等压固结中 $E_{u50}=q_f/2\varepsilon_{a50}$ , $K_0$ 固结中 $E_{u50}=(q-q_0)_{max}/2\varepsilon_{a50}$ ,其示意图见图2。表3为3种试验得到的 $E_{u50}$ 以及两种归一化割线模量 $E_{u50}/\sigma'_{vc}$ 。由表3可以得到以下结论:①各向等压固结试验中原状土的 $E_{u50}/\sigma'_{vc}$ 平均值大于重塑土,但 $K_0$ 固结试验中原状土的平均值小于重塑土;②对于原状土,各向等压固结试验给出的归一化模量略大于 $K_0$ 固结试验的结果,重塑土样的各向等压固结试验结果却显著小于 $K_0$ 固结试验的结果。

图2 确定 $E_{u50}$ 示意图Fig. 2 Diagram of determination of  $E_{u50}$ 

## 2.3 割线模量 $E_u$ 的非线性分析

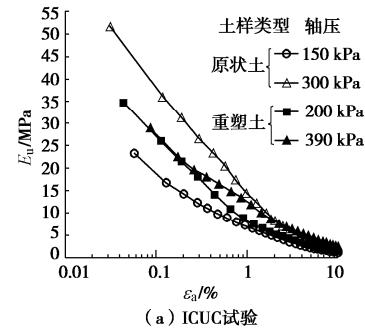
为研究土体的变形特性,对土样的割线模量进行分析。土体的割线模量是指土体的应力-应变曲线中原点与某点的割线斜率,可以反映土体发生变形时的非线性程度,其表达式为: $E_u=q/\varepsilon_a$ 。3种试验得到的 $E_u-\varepsilon_a$ 关系曲线见图3所示。

从图3可以看出,原状土与重塑土的 $E_u$ 均随竖向固结应力 $\sigma'_{vc}$ 的增大而增大,并随轴向应变 $\varepsilon_a$ 的增大而减小。为了对比不同类型试验的非线性变形特性,将 $E_u-\varepsilon_a$ 关系曲线进行归一化处理。采用 $E_{u50}$ 作为归

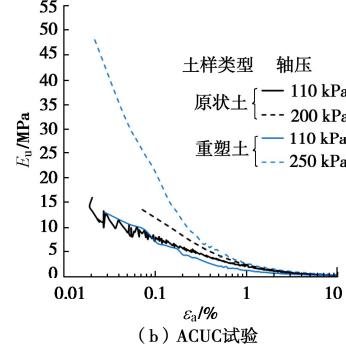
一化因子,得到的半对数坐标下归一化关系曲线如图4所示。表3中给出了3种试验的 $E_{u50}$ 值,从图4可以看出,3种试验采用得到的 $E_{u50}$ 作为归一化因子的归一化效果很好。这种归一化特性受土样的影响也较小,原状土样和重塑土样的归一化曲线几乎是一致的。对于3种试验的 $E_{u50}$ 值,ICUC试验与ACUE试验相近,均大于ACUC试验。当轴向应变 $\varepsilon_a=0.5\%, 1\%$ 时,3种试验的 $E_u/E_{u50}$ 大约分别为0.8和0.4。

表3  $E_{u50}$ 汇总表Table 3 Summary of  $E_{u50}$ 

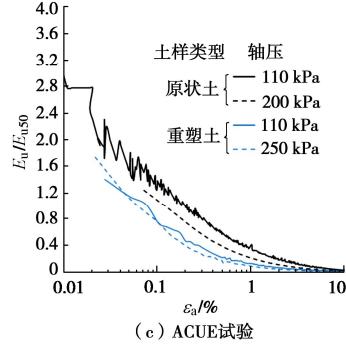
试验类型	土样	试验编号	$\sigma'_{vc}$ /kPa	$E_{u50}/\sigma'_{vc}$	$E_{u50}/\sigma'_{vc}$ 值的平均
各向等压 ICUC	原状	NIC1	150	60.45	69.17
		NIC2	300	77.89	
	重塑	RIC1	200	56.50	
		RIC2	390	32.45	
$K_0$ 压缩 ACUC	原状	NAC1	109	52.82	53.83
		NAC2	200	54.54	
	重塑	RAC1	106	87.67	
		RAC2	248	111.39	
$K_0$ 拉伸 ACUE	原状	NAE1	112	44.23	39.27
		NAE2	200	34.31	
	重塑	RAE1	95	94.79	
		RAE2	250	83.78	



(a) ICUC试验

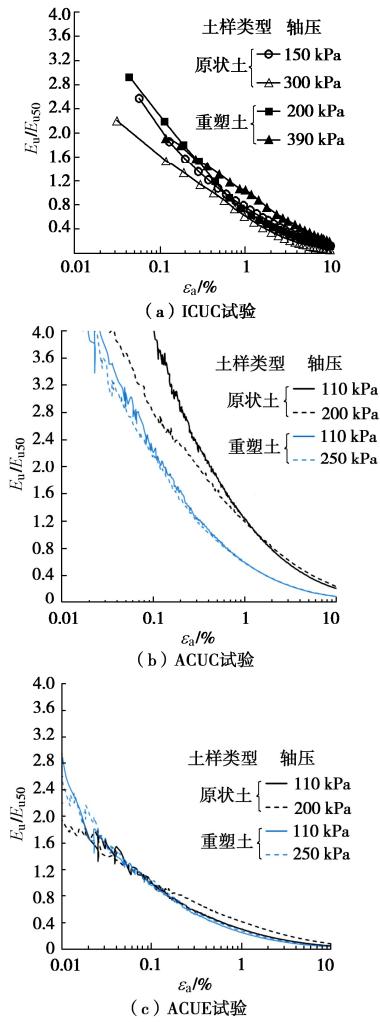


(b) ACUC试验



(c) ACUE试验

Fig. 3 Curves of  $E_{u50}$  obtained by three types of tests

图 4 3 种试验得到的  $E_u / E_{u50}$  -  $\epsilon_a$  曲线Fig. 4 Curves of  $E_u / E_{u50}$ - $\epsilon_a$  obtained by three types of tests

### 3 结 论

采用原状与重塑上海软黏土, 进行三轴 ICUC、ACUC、ACUE 对比试验, 研究软土的非线性变形特征, 具体分析了两种固结方式下土体的应力-应变曲线、割线模量  $E_{u50}$ 、割线模量, 得到以下 3 点结论。

(1) 两种固结模式下, 上海软黏土的应力-应变曲线均呈应变硬化特性。其非线性、强度发挥程度受各向异性的影响有差异, 总体上 ICUC 试验与 ACUC 试验土体的归一化强度相差不大, 均大于 ACUE 试验。

(2) 对于原状土与重塑土的  $E_{u50}$ , 各向等压固结试验中原状土的  $E_{u50}/\sigma'_{vc}$  平均值大于重塑土, 但  $K_0$  固结试验中原状土的平均值小于重塑土。对于原状土, 各向等压固结试验给出的归一化模量略大于  $K_0$  固结试验的结果, 重塑土样的各向等压固结试验结果却显著小于  $K_0$  固结试验的结果。

(3) 原状土与重塑土的  $E_u$  均随竖向固结应力  $\sigma'_{vc}$  的增大而增大, 并随轴向应变  $\epsilon_a$  的增大而减小。采用  $E_{u50}$  作为归一化因子, 对  $E_u$  进行归一化分析发现: 3

种试验采用  $E_{u50}$  作为归一化因子的归一化效果很好; 这种归一化特性受土样特性的影响也较小, ICUC 试验与 ACUE 试验相近, 均大于 ACUC 试验。

### 参 考 文 献:

- [1] 尹骥, 陈宝, 李煜, 等. 上海第②层粉质黏土非饱和强度与变形模量的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1619–1625. (YIN Ji, CHEN Bao, LI Yu, et al. Triaxial tests on strength and deformation modulus of No.2 layer silty clay of Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1619–1625. (in Chinese))
- [2] KONDNER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(1): 115–143.
- [3] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1629–1653.
- [4] VAID Y P. Effect of consolidation history and stress path on hyperbolic stress-strain relations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(2): 172–176.
- [5] 龚晓南. 软黏土地基各向异性初步探讨[J]. 浙江大学学报(工学版), 1986, 20(4): 98–110. (GONG Xiao-nan. A preliminary research on anisotropy of soft clay ground[J]. Journal of Zhejiang University, 1986, 20(4): 98–110. (in Chinese))
- [6] 曾国熙, 龚晓南, 盛进源. 正常固结黏土  $K_0$  固结剪切试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 1987, 21(2): 1–9. (ZENG Guo-xi, GONG Xiao-nan, SHENG Jin-yuan. Research on normally consolidated clay by  $K_0$  consolidated shear test[J]. Journal of Zhejiang University, 1987, 21(2): 1–9. (in Chinese))
- [7] 李作勤. 黏土归一化性状的分析[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(5): 67–75. (LI Zuo-qin. Analysis of the normalized property of cohesive clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(5): 67–75. (in Chinese))
- [8] 张勇, 孔令伟, 孟庆山, 等. 武汉软土固结不排水应力-应变归一化特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1509–1513, 1518. (ZHANG Yong, KONG Ling-wei, MENG Qing-shan, et al. Normalized stress-strain behavior of Wuhan soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1509–1513, 1518. (in Chinese))
- [9] 袁聚云, 赵锡宏, 杨熙章, 等.  $K_0$  固结条件对上海软土强度和变形影响的试验研究[J]. 勘察科学技术, 1995(6): 22–25. (YUAN Ju-yun, ZHAO Xi-hong, YANG Xi-zhang, et al. Experimental study of the strength and deformation effect of  $K_0$  consolidation condition to Shanghai soft soils[J]. Site Investigation Science and Technology, 1995(6): 22–25. (in Chinese))

(编校: 孙振远)