

两种固结方式下软黏土三轴不排水剪切的模量

高彦斌, 罗文康, 李泳健

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 原位软土处于 K_0 固结状态因此变形具有显著的非线性和各向异性,然而室内三轴剪切试验通常采用等向固结方式,目前对 K_0 固结和等向固结两种方式下不排水剪切的模量 E_u 的差别还未系统的对比总结过。采用上海软黏土的原状土样和重塑土样,进行了三轴等向固结压缩(ICUC)、 K_0 固结压缩(ACUC)和 K_0 固结拉伸(ACUE)三种不排水剪切试验,对比分析了应力-应变曲线、不排水模量 E_u 的非线性特性以及双曲线模型的参数值。研究结果表明,同等应变下 ICUC 试验的 E_u 与 ACUE 试验相近,但要大于 ACUC 试验值; ACUC 试验与 ACUE 试验具有相近的初始模量和破坏比。结合试验结果和双曲线模型,推导给出了适用于这三种试验的归一化模量的统一表达式,并给出了上海软黏土的参数值。

关键词: 软黏土;非线性;不排水模量; K_0 固结。

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Undrained Modulus of Soft Clay Under Triaxial Shear with Two Consolidation Modes

GAO Yanbin, LUO Wenkang, LI Yongjian

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In-situ soft clays are in K_0 consolidation state and present mechanical nonlinearity and anisotropy, However, in laboratory triaxial shear tests isotropic consolidation is usually adopted. At present, there has been no systematic comparison and summary of the differences in the modulus E_u of undrained shear between K_0 consolidation and isotropic consolidation. Three kinds of triaxial shear tests, isotropic consolidation undrained compression (ICUC), K_0 consolidation undrained compression (ACUC), and K_0 consolidation undrained extension (ACUE), were conducted on undisturbed and remolded specimens of Shanghai soft clay. The stress-

strain curves, nonlinearity of the undrained modulus E_u and the parameter values of the hyperbolic model are presented and compared. The results show that at the same strain level, the E_u of the ICUC test is close to that of the ACUE test, but larger than that of the ACUC test; The ACUC test and ACUE test have similar initial modulus and failure ratio. Based on the test results and the hyperbolic model, a unified equation of the normalized modulus for the three kinds of undrained shear tests was developed and the parameter values for Shanghai soft clay were summarized.

Key words: soft clay; nonlinearity; undrained modulus; K_0 consolidation

在软土不排水剪切变形的总应力法分析中,当采用等效线弹性模型时需要确定弹性模量 E 和泊松比 μ 两个参数。由于不排水剪切情况下泊松比 μ 为 0.5,因此根据土体的变形大小确定合适的排水模量 E_u 就成为重点。原位软土处于 K_0 固结状态,其不排水剪切变形具有明显的非线性与各向异性特征^[1-3]。在剪切变形非线性模拟方面,Konder等^[4]提出的双曲线模型是一个重要的工具,广泛用于确定剪切过程中的割线模量或者切线模量^[5-8],割线模量用于等效线性分析而切线模量用于非线性增量分析。关于 K_0 固结土体的非线性变形特征,国内外已经开展了大量的研究工作。Clough^[9]、Vaid^[10]研究了双曲线模型在 K_0 固结土不排水剪切变形中的应用。曾国熙等^[11]采用金山黏土进行了三轴不排水剪切试验,发现等压固结软土与 K_0 固结软土的强度指标基本相同,而变形参数有较大差别,但并未给出具体的分析。杨同帅等^[12]研究了 K_0 固结上海黏性土的不排水剪切变形特性,认为 Hardin-Drnevich 模型能够较好地模拟不排水模量 E_u 的非线性特性。

收稿日期: 2021-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(41972273)

第一作者: 高彦斌(1973—),男,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为软土工程数值模拟。

E-mail: yanbin. gao@tongji. edu. cn



论文
拓展
介绍

三轴剪切试验是研究土体不排水剪切变形特性的重要手段^[2]。K₀固结三轴剪切试验在试验设备与试验技术上都要比常规的等向固结三轴剪切试验复杂,因此工程中仍然普遍采用等向固结三轴不排水剪切试验(简称 ICUC 试验)来获得软土的不排水模量 E_u 。对比这两种固结状态下的不排水模量 E_u 的非线性特性,对 ICUC 试验结果的评价有重要的意义。另外,尽管近些年来关于 K₀固结土的各向异性本构模型的研究取得较大的进展,但目前主流岩土工程有限元软件中采用的本构模型仍然以各向同性模型为主,例如摩尔-库伦模型、剑桥模型、修正剑桥模型、硬化土模型,而极少采用能够考虑 K₀固结软土各向性的本构模型。因此研究不排水模量 E_u 的合理取值,对软土工程数值分析中等效线弹性模型的应用也具有重要的意义。

本文采用应力路径三轴仪,对上海软黏土原状土样与重塑土样进行 K₀固结与等压固结的三轴不排水剪切试验,对比两种固结模式下的应力-应变曲线和不排水模量的大小,并给出基于双曲线模型的不排水模量的统一表达式。研究成果可为计算分析中软土不排水模量的合理确定提供依据。

1 试验土样与方案

1.1 试验土样

试验土样采用上海软黏土。原状土样取自上海某地铁站基坑,取土深度为 10 m,为上海第四层淤泥质黏土,将直径为 35 cm、高为 20 cm 的 PVC(聚氯乙烯)管压入坑底土中取得质量较高的块状土样。由常规土工试验得到的物理性质见表 1。重塑土样的制备方法为:原状土样风干、碾碎、过筛后,加水制

成含水量为 1.75 倍液限的泥浆,然后在直径为 10 cm、高为 20 cm 的不锈钢固结仪中在 75 kPa 下固结一周。三轴试样的直径为 3.91 cm,高度为 7.8 cm,侧面贴滤纸条以加速排水。

表 1 上海软黏土的物理性质
Tab. 1 Physical properties of Shanghai soft clay

含水率 w	液限 w_L	塑限 w_p	塑性指数 I_p	重度 G_s	颗粒级配		
					黏土	粉土	砂土
47 %	43 %	19 %	24	2.75	30 %	70 %	0

1.2 试验方案

三轴试验采用英国 GDS 公司生产的应力路径三轴仪,试验方案见表 2。试验分为三组:① 等向固结不排水剪切试验(简称 ICUC 试验);② K₀固结不排水压缩剪切试验(简称 ACUC 试验);③ K₀固结不排水拉伸剪切试验(简称 ACUE 试验)。试验编号中的首字母 N 和 R 分别代表原状土样和重塑土样。三组试验(ICUC、ACUC、ACUE)中原状土和重塑土分别进行了两个固结压力的试验,共计 12 个试验。所有试验的竖向固结压力超过了原位应力以保证试样处于正常固结状态,各试验中的固结压力(围压 σ'_{rc} 和轴压 σ'_{vc})以及固结后试样的孔隙比 e_c 见表 2。K₀固结过程如下:反压饱和后(反压值 150 kPa),在双面排水状态下按照 $\sigma'_{rc}/\sigma'_{vc}=0.5$ 的比例同时缓慢施加围压 σ'_{rc} 和轴压 σ'_{vc} 到预定值,加载时间约 40 h;随后在恒定荷载下再固结 8 h。采用此方法固结过程中径向应变非常小,接近 K₀固结状态。土样固结后进行不排水剪切至破坏,总时间约 8 h。ICUC 和 ACUC 试验中施加恒定的轴向位移速率(0.8 mm·h⁻¹)至破坏;ACUE 试验中施加恒定的围压加载速率至破坏。

表 2 试验方案及不排水抗剪强度
Tab. 2 Test plan and tests results of undrained shear strength

试验编号		孔隙比 e_c	围压 σ'_{rc} /kPa	轴压 σ'_{vc} /kPa	破坏偏应力 q_f /kPa	不排水抗剪强度 c_u /kPa	归一化强度 c_u / σ'_{vc}
ICUC	NIC1	1.100	150	150	112	56.2	0.37
	NIC2	0.940	300	300	185	92.3	0.31
	RIC1	0.729	200	200	143	71.6	0.36
	RIC2	0.675	390	390	269	134.7	0.35
ACUC	NAC1	1.260	55	109	77	38.4	0.35
	NAC2	1.100	105	200	120	60.1	0.30
	RAC1	0.855	55	106	65	32.5	0.31
	RAC2	0.765	127	248	152	76.1	0.31
ACUE	NAE1	1.254	60	112	-55	27.4	0.24
	NAE2	1.102	100	200	-89	44.5	0.22
	RAE1	0.868	50	95	-47	22.8	0.24
	RAE2	0.765	130	250	-106	53	0.21

2 试验结果

2.1 应力-应变曲线与不排水抗剪强度

图1给出了ICUC、ACUC、ACUE三种剪切试验的偏应力 q (即 $\sigma_v - \sigma_r$,为轴压减去围压)与轴向应变 ϵ_a 的关系曲线。在三轴不排水剪切试验中工程剪应变 γ 与轴向应变 ϵ_a 的关系为 $\gamma = 3\epsilon_a/2$ 。从图1可以看出:① 应力-应变曲线均为应变硬化型,并表现出显著的非线性;② ACUE试验曲线的非线性比ICUC试验和ACUC试验的强一些,表明非线性变形具有明显的各向异性;③ 强度发挥差别较大,ACUC试验的破坏应变最小(约为0.5%),其次为ICUC试验(约为2%~5%),ACUE试验的试验破坏应变在6%以上。

统一以轴向应变 $\epsilon_a = 10\%$ 为破坏标准得到的破坏偏应力 q_t (即 $\sigma_{vt} - \sigma_{rt}$,为破坏时轴压减去破坏时围压)、不排水抗剪强度 c_u (即 $|q_t|/2$)以及归一化强度 c_u/σ'_{vc} 见表2所示。可以看出,ICUC试验与ACUC试验的归一化强度 c_u/σ'_{vc} 相差不大,大致在0.30~0.37之间,平均值为0.33;ACUE试验的 c_u/σ'_{vc} 在0.21~0.24之间,平均值为0.23,约为ICUC试验与ACUC试验的0.7倍;同一类型试验中重塑土样和原状土样的 c_u/σ'_{vc} 差别不大。

2.2 E_{u50}

不排水模量 E_u (割线模量)的定义为 $E_u = |q - q_0|/\epsilon_a$,其中 q_0 为初始偏应力(即 $\sigma'_{vc} - \sigma'_{rc}$,为初始轴压减去初始围压),不排水模量 E_u 与不排水剪切模量 G_u 的关系为 $G_u = E_u/3$ 。由于模量具有非线性,工程应用中通常采用 E_{u50} ,即偏应力 $q = q_t/2$ 对应的割线模量。图2中给出了三种试验中确定 E_{u50} 的方法,其中下标C代表压缩剪切,E代表拉伸剪切, q_0 为初始偏应力(在ICUC试验中为0)。表3给出了三种试验得到的 E_{u50} 及其归一化值 E_{u50}/σ'_{vc} 和 E_{u50}/c_u 。根据这些归一化模量值,就能通过有效竖向应力 σ'_{vc} (通过埋深确定)或不排水抗剪强度 c_u (通过室内试验或原位测试确定)来预估 E_{u50} 。

由表3给出的结果可以得到以下结论:① 等向固结试验中原状土的 E_{u50}/σ'_{vc} 和 E_{u50}/c_u 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 原状土的等向固结试验给出的归一化模量大于 K_0 固结试验的结果,而重塑土的等向固结试验给出的归一化模量显著小于 K_0 固结试验的结果;③ ACUC和ACUE试验给出的重塑土归一化模量 E_{u50}/σ'_{vc} 和 E_{u50}/c_u 差别不大,ACUE试验给出的原状土的归一化模量约为重塑土的两倍。这些试验结果

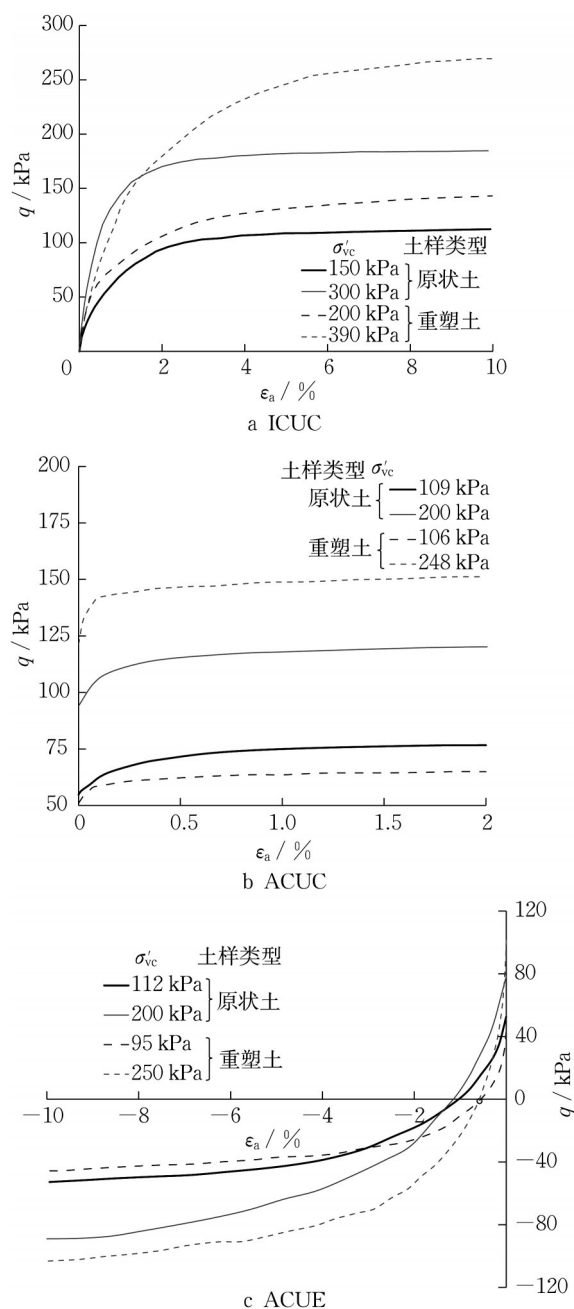


图1 三种不排水剪切试验的 q - ϵ_a 曲线

Fig. 1 q - ϵ_a curves obtained by three types of undrained shear tests

表明,土样结构性对模量的影响比对强度的影响更为复杂,剪切过程中土的结构性改变导致原状土表现出较为复杂的变形特性,有些应力路径下的模量比重塑土大,有些应力路径下则相反;采用原状土的ICUC试验会高估原位土体的 E_{u50}/c_u 约17%、 E_{u50}/σ'_{vc} 约28%(ACUC)和76%(ACUE),其原因可能是各向等压固结中的水平向固结应力大于 K_0 固结中的水平向固结应力。

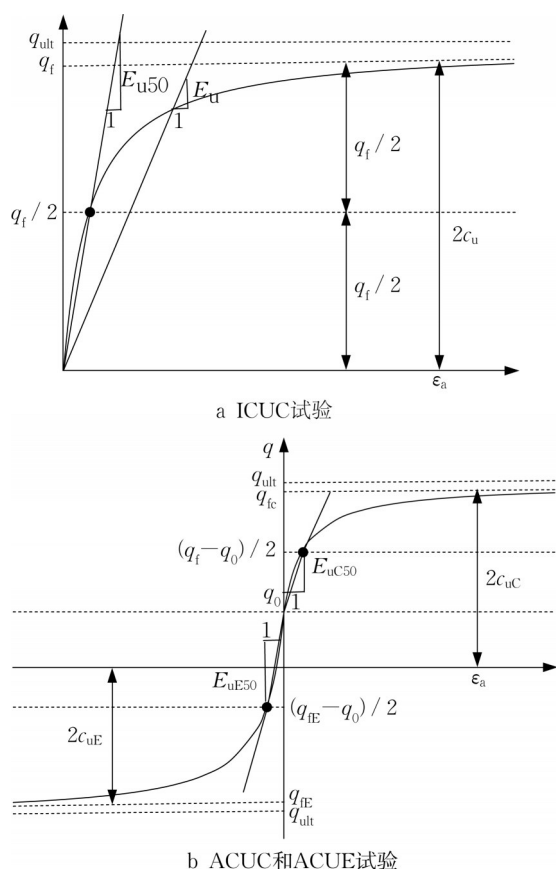


图 2 确定 E_{u50} 示意图

Fig. 2 Illustration of determination of E_{u50}

表 3 三种不排水剪切试验得到的 E_{u50}

Tab. 3 E_{u50} obtained by three types of undrained shear tests

试验类型	试验编号	E_{u50} (MPa)	E_{u50}/σ'_{vc}		E_{u50}/c_u	
			实测值	平均值	实测值	平均值
ICUC	NIC1	9.1	60.45	69.2	153.8	203.5
	NIC2	23.4	77.89		253.2	
	RIC1	11.2	56.50		156.3	
	RIC2	12.6	32.45		93.5	
ACUC	NAC1	5.8	52.82	53.8	165.3	173.4
	NAC2	10.9	54.54		181.5	
	RAC1	9.3	87.67		286.1	
	RAC2	27.6	111.39		369.6	
ACUE	NAE1	5.0	44.23	39.3	193.7	173.9
	NAE2	6.9	34.31		154.1	
	RAE1	9.0	94.79		394.3	
	RAE2	20.9	83.78		376.3	

2.3 E_u - ϵ_a 关系

为了反映不同试验中不同固结压力下模量的非线性性和归一化特性,本文分别采用了三种归一化方法: E_u/σ'_{vc} 、 E_u/E_{u50} 和 E_u/c_u 。图3—5分别给出了 E_u/σ'_{vc} 、 E_u/E_{u50} 和 E_u/c_u 与轴向应变 ϵ_a 的关系曲线,注意 ϵ_a 采用的是对数坐标。可以看出,这些曲线均随轴向

应变 ϵ_a 的增大而单调减小。三种归一化方法给出的归一化效果差别不大。重塑土样和原状土样的归一化曲线略微有差别,但难以给出一个统一的规律。

从图3所示的 E_u/σ'_{vc} - ϵ_a 曲线可以直观地对比三种试验在同等应变水平下不排水模量的大小。可以看出,同等应变水平下 ICUC 试验与 ACUC 试验的 E_u/σ'_{vc} 相近,均显著大于 ACUC 试验的数值,这与 ACUC 试验中土样更容易破坏有关。表4给出了轴向应变 $\epsilon_a=0.1\%$ 、 0.5% 和 1% 时三种试验的 E_u/σ'_{vc} 平均值。根据这些数据,ICUC 试验会显著高估原位土体主动破坏应力路径(即 ACUC 试验)下的模量。

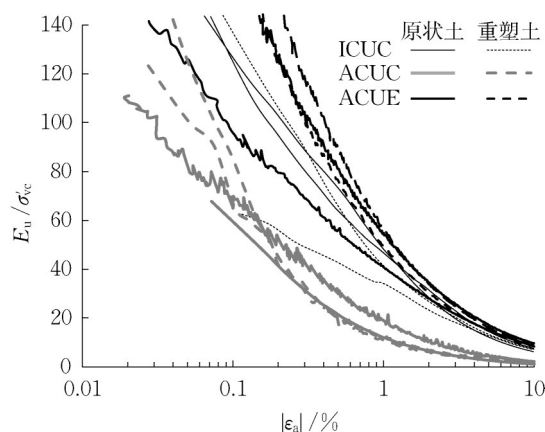


图 3 三种试验得到的 E_u/σ'_{vc} - ϵ_a 曲线

Fig. 3 E_u/σ'_{vc} - ϵ_a curves obtained by three types of tests

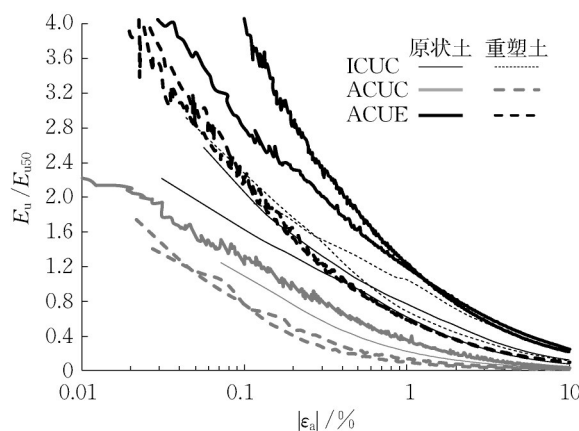


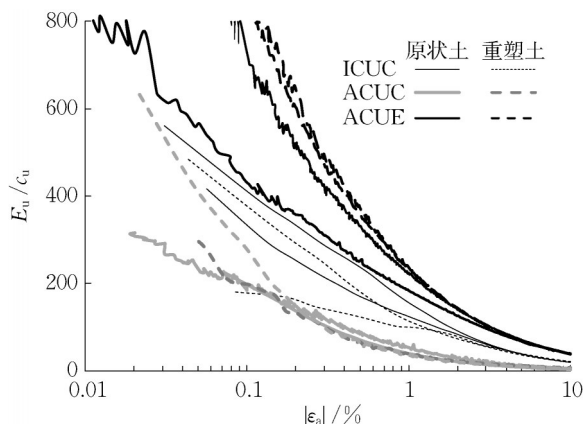
图 4 三种试验得到的 E_u/E_{u50} - ϵ_a 曲线

Fig. 4 E_u/E_{u50} - ϵ_a curves obtained by three types of tests

3 双曲线模型参数及归一化模量表达式

3.1 双曲线模型参数

Konder^[4]根据大量试验结果提出了描述等向固

图5 三种试验得到的 $E_u/c_u - \epsilon_a$ 曲线Fig. 5 $E_u/c_u - \epsilon_a$ curves obtained by three types of tests表4 不同应变等级下三种试验得到的 E_u/σ'_{vc} Tab. 4 E_u/σ'_{vc} obtained by three types of tests at different strain levels

轴向应变 $\epsilon_a / \%$	归一化模量 E_u/σ'_{vc}		
	ICUC 试验	ACUC 试验	ACUE 试验
0.1	130	80	160
0.5	65	30	80
1	50	18	50

结土样剪切变形的双曲线模型,其表达式为

$$q = \frac{\epsilon_a}{(a + b\epsilon_a)} \quad (1)$$

式中:参数 a 为初始模量 E_i 的倒数,即 $a = 1/E_i$; b 为极限偏应力 q_{ult} 的倒数,即 $b = 1/q_{ult}$ 。双曲线模型在 K_0 固结土中的应用也受到了大量关注^[13-14]。 K_0 固结土的三轴剪切双曲线模型可以表示为

$$q - q_0 = \frac{\epsilon_a}{(a + b\epsilon_a)} \quad (2)$$

式中:参数 a 的定义同上,但注意由于初始剪应力 q_0 的存在, b 的表达式与等向固结下略有不同。根据图2给出的 q_{ult} 的示意, ACUC 和 ACUE 两种试验中参数 b 可统一表示为 $b = 1/(q - q_0)_{ult}$ 。邓肯-张模型采用参数破坏比 R_f 来建立参数 b 与强度之间的关系。破坏比 R_f 定义为破坏偏应力 q_f (为 $2c_u$) 与极限偏应力 q_{ult} 的比值。根据图2给出的示意, ICUC 试验中破坏比 $R_f = 2c_u/q_{ult}$, ACUC 和 ACUE 试验中的破坏比表示为(注意式中 q 区分正负):

ICUC 和 ACUC 试验

$$R_f = (2c_u - q_0)/(q - q_0)_{ult} \quad (3a)$$

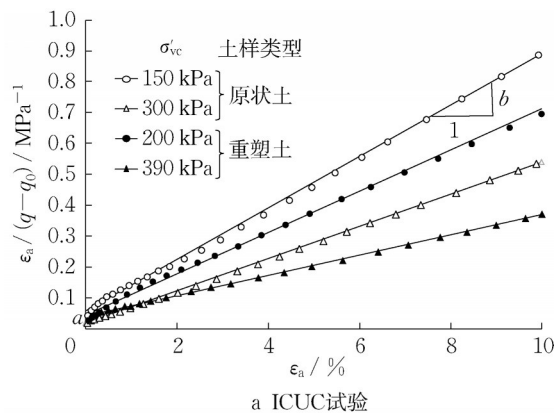
ACUE 试验

$$R_f = (-2c_u - q_0)/(q - q_0)_{ult} \quad (3b)$$

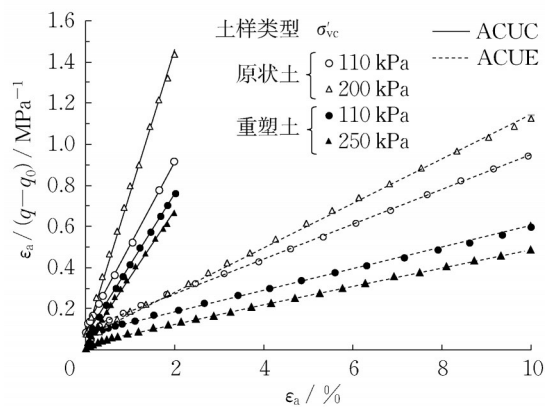
当初始剪应力 $q_0 = 0$ 时,式(2)便退化为式(1)。因此式(2)适用于等向固结与 K_0 固结两种固结模式。式(2)可进一步转化为

$$\frac{\epsilon_a}{q - q_0} = a + b\epsilon_a \quad (4)$$

因此,将三轴试验结果整理给出 $\epsilon_a/(q - q_0) - \epsilon_a$ 关系曲线,就可以根据其截距和斜率分别得到参数 a 和 b ,并进而得到初始模量 $E_i (=1/a)$ 和破坏比 R_f (ICUC 和 ACUC 试验 $R_f = b(2c_u - q_0)$, ACUE 试验 $R_f = -b(2c_u + q_0)$)。三种试验得到的 $\epsilon_a/(q - q_0) - \epsilon_a$ 关系曲线如图6所示。可以看出,所有试验结果均接近线性关系,表明符合用双曲线模型。根据这些曲线确定的参数 a 、 b 、 R_f 以及 E_{ui} 、 E_{ui}/σ'_{vc} 、 E_{ui}/E_{u50} 的数值见表5。



a ICUC 试验



b ACUC 和 ACUE 试验

图6 三种试验得到的 $\epsilon_a/(q - q_0) - \epsilon_a$ 关系曲线Fig. 6 $\epsilon_a/(q - q_0) - \epsilon_a$ curves obtained by three types of tests

可以看出, ACUC 与 ACUE 试验的 a 值非常接近,表明初始剪切模量 E_{ui} 基本相同。ACUC 和 ACUE 试验中原状土的 E_{ui}/σ'_{vc} 约为 75, 显著小于 ICUC 试验结果(约 140), 而重塑土的要大于 ICUC

试验结果。这些规律与前面给出的 E_{u50} 的规律基本相同。这些试验结果表明,土的结构性以及固结状态对初始模量 E_{ui} 影响显著。对于原状软黏土,采用 ICUC 试验会高估 K_0 固结土的 E_{ui}/σ'_{vc} 约 80 %;而重塑土具有相反的规律。由表 5 可以看出,三种试验的破坏比 R_f 的值比较接近,在 0.89~0.97 之间,重塑土的破坏比略大于原状土。

根据式(1)和式(2),可以推导出 E_{ui} 与 E_{u50} 的理论关系为 $E_{ui}/E_{u50}=2$ 。从表 5 给出的试验结果来看, ICUC 试验的 E_{ui}/E_{u50} 与理论值非常接近,而 ACUC 和 ACUE 试验要略小于理论值。另外可以看出,这个比值受土的结构性影响较小,重塑土和原状土的平均值差别不大。

表 5 双曲线模型参数汇总表

Tab. 5 Summary of hyperbolic model parameters

试验类型	试验编号	a	b	R_f	E_{ui}		E_{ui}/σ'_{vc}		E_{ui}/E_{u50}	
					/	MPa	实测值	平均值	实测值	平均值
ICUC	NIC1	0.059	0.083	0.93	16.9	113	139	88	2.01	2.05
	NIC2	0.020	0.519	0.96	49.0	163			2.09	
	RIC1	0.045	0.066	0.96	22.2	112			1.98	
	RIC2	0.041	0.033	0.89	24.4	63			1.94	
ACUC	NAC1	0.105	0.404	0.89	9.5	87	77	147	1.65	1.51
	NAC2	0.075	0.343	0.91	13.3	67			1.37	
	RAC1	0.059	0.698	0.97	15.4	145			1.66	
	RAC2	0.027	0.327	0.97	37.0	149			1.34	
ACUE	NAE1	0.105	-0.084	0.89	9.5	85	74	155	1.92	1.87
	NAE2	0.075	-0.053	0.89	12.5	63			1.82	
	RAE1	0.059	-0.108	0.96	15.4	161			1.71	
	RAE2	0.027	-0.046	0.95	37.0	148			1.77	

3.2 归一化模量统一表达式

从 3.1 节给出的试验结果来看,三种试验结果均符合双曲线模型,因此理论上可以通过双曲线模型获得归一化模量的表达式。由于 E_{u50} 是广泛采用的一个设计参数,且与 E_{ui} 具有很好的相关性,因此本文采用的归一化参数为 E_{u50} ,而不是其他学者普遍采用的 $c_u^{[1]}$ 。由式(2)所示的双曲线模型可以得到割线模量的表达式为

$$E_u = \frac{q - q_0}{\epsilon_a} = \frac{1}{a + b\epsilon_a} \quad (5)$$

因此归一化模量 E_{u50}/E_u 可以表示为

$$\frac{E_{u50}}{E_u} = \frac{a + b\epsilon_a}{a + b\epsilon_{a50}} \quad (6)$$

其中 ϵ_{a50} 为模量 E_{u50} 对应的轴向应变。

将 $a=1/E_{ui}$ 、 $b=R_f/(\pm(2c_u - q_0))$ 、 $\epsilon_{a50}=(\pm 2c_u - q_0)/(2E_{u50})$ 代入式(6),式(6)转化为

$$\frac{E_{u50}}{E_u} = \frac{2E_{u50}}{2E_{u50} + R_f E_{ui}} + \frac{2R_f E_{ui} E_{u50}}{(2E_{u50} + R_f E_{ui})(\pm 2c_u - q_0)} \bullet \epsilon_a \quad (7)$$

其中 $2c_u$ 前面的负号对应 ACUE 试验,正号对应 ICUC 和 ACUC 试验。由于 $E_{ui}=2E_{u50}$,因此式(7)可进一步改写为

$$\frac{E_{u50}}{E_u} = \frac{1}{1 + R_f} + \frac{2R_f E_{u50}}{(1 + R_f)(\pm 2c_u - q_0)} \bullet \epsilon_a \quad (8)$$

式(8)表明归一化模量 E_{u50}/E_u 与轴向应变 ϵ_a 存在线性关系,这为研究归一化模量提供了方便。式(8)可进一步改写为

$$\frac{E_{u50}}{E_u} = \frac{1}{1 + R_f} + \frac{2R_f (E_{u50}/\sigma'_{vc})}{(1 + R_f) [\pm 2(c_u/\sigma'_{vc}) - q_0/\sigma'_{vc}]} \bullet \epsilon_a \quad (9)$$

根据试验结果整理出三种试验的 $E_{u50}/E_u - \epsilon_a$ 关系曲线,另外将试验得到的 E_{u50}/σ'_{vc} 、 c_u/σ'_{vc} 和 R_f 代入式(9)得到理论曲线,二者的对比如图 7 所示。

由图 7 可知,理论曲线与实测曲线十分接近,个别试验结果的差别略大一些,这可能与不同应变应力路径下的复杂变形特性有关。总体上讲,式(9)的应用效果良好,可用于不同试验条件下的 E_u 的确定。为了应用方便,将式(9)进一步改写为

$$\frac{E_u}{E_{u50}} = (1 + R_f) \frac{1}{1 + 2R_f k \epsilon_a} \quad (10)$$

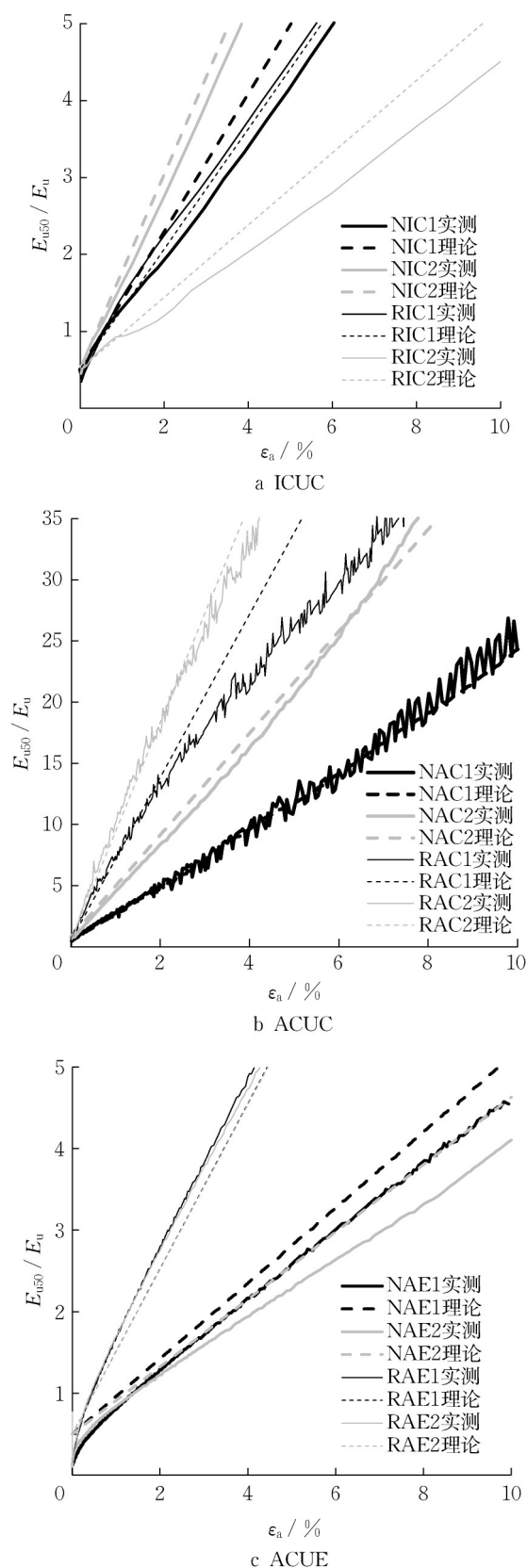
其中:

$$k = \frac{(E_{u50}/\sigma'_{vc})}{\pm 2(c_u/\sigma'_{vc}) - 1 + k_0} \quad (11)$$

参数 k 反映归一化模量 E_{u50}/E_u 的大小,这个参数值越大,表明相同应变下的 E_{u50}/E_u 也越大。其中参数 E_{u50}/σ'_{vc} 、 c_u/σ'_{vc} 可以采用一些经验的数值。注意其中 $2c_u$ 前面的负号对应 ACUE 试验,正号对应 ICUC 和 ACUC 试验。对于上海软黏土可以采用本文提供的归一化模量值来计算参数 k 值,其结果为:

- ① ICUC 试验,原状土 $k=102$,重塑土 $k=63$;
- ② ACUC 试验,原状土 $k=336$,重塑土 $k=711$;
- ③ ACUE 试验,原状土 $k=-43.2$,重塑土 $k=-98$ 。

对于 R_f 建议取平均值 0.93。

图7 实测与理论的 $E_{u50}/E_u - \epsilon_a$ 曲线Fig. 7 Measured and theoretical curves of $E_{u50}/E_u - \epsilon_a$

4 结论

采用上海软黏土原状土样与重塑土样进行了三轴 ICUC、ACUC 与 ACUE 试验,对比研究了 K_0 固结和等向固结下不排水剪切变形的非线性变形特征和不排水模量,研究了归一化模量的统一表达式,得到的结论如下:

(1) ICUC 试验与 ACUC 试验的归一化强度 c_u/σ'_{vc} 相差不大,约为 0.33; ACUE 试验的归一化强度约为 0.22,约为 ICUC 试验与 ACUC 试验的 0.7 倍。三种剪切实验的 $q - \epsilon_a$ 曲线均呈应变硬化型, ACUE 试验的非线性特性最突出。

(2) 同等应变水平下 ICUC 试验与 ACUE 试验的 E_u/σ'_{vc} 相近,均显著大于 ACUC 试验的结果。因此,采用常规的 ICUC 试验会在一定程度上高估主动破坏(即 ACUC 试验)下的模量。ACUC 试验与 ACUE 试验具有相同的 E_{u50}/σ'_{vc} ,破坏比 R_f 也差别不大。

(3) 三种试验得到的应力应变曲线以及归一化模量 E_u/E_{u50} 可统一采用本文给出的公式表示,需要的参数为 E_{u50}/σ'_{vc} 、 c_u/σ'_{vc} 和 R_f 。文中给出了上海软黏土的参数值,可用于不排水剪切变形分析中模量的确定。

作者贡献声明:

高彦斌:研究构思,室内试验,理论分析。

罗文康:数据分析,图表制作,稿件撰写。

李泳键:文字校对,稿件修订。

参考文献:

- [1] JARDINE R J, BURLAND J B, SYMES N J. The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus [J]. Geotechnique, 1984, 34(3): 323.
- [2] 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): 103.
GONG Xiaonan. A preliminary research on anisotropy of soft clay ground [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 1986, 20(4): 103.
- [3] 高彦斌, 楼康明. 上海软黏土强度固有各向异性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(11): 1658.
GAO Yanbin, LOU Kangming. Strength anisotropy of Shanghai soft clay induced by inherent fabric [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(11): 1658.
- [4] KONDER R L. Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division

- (ASCE), 1963, 89(1):115.
- [5] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division (ASCE), 1970, 96(5): 1629.
- [6] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves [J]. Geotechnical Special Publication, 1972, 98(7): 667.
- [7] 董建国, 赵锡宏. 上海四参数非线性加载地基模型 [J]. 工程勘察, 1990(2): 12.
- DONG Jianguo, ZHAO Xihong. A ground model of non-linear loading with four parameters which is suitable to Shanghai [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1990(2): 12.
- [8] 齐剑峰, 栾茂田, 王忠涛, 等. 饱和黏土不排水剪切特性及双曲线模型 [J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2277.
- QI Jianfeng, LUAN Maotian, WANG Zhongtao, *et al.* Study on undrained shear behavior and hyperbolic stress-strain relationship of saturated clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2277.
- [9] CLOUGH G W, HANSEN L A. Clay anisotropy and braced wall behavior [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE), 1981, 107(7): 893.
- [10] VAID Y P. Effect of consolidation history and stress path on hyperbolic stress-strain relations [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 23(1): 172.
- [11] 曾国熙, 龚晓南, 盛进源. 正常固结粘土 K_0 固结剪切试验研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 1987, 21(2): 5.
- ZENG Guoxi, GONG Xiaonan, CHENG Jingyuan. Research on normally consolidated clay by K_0 consolidated shear test [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 1987, 21(2): 5.
- [12] 杨同帅, 叶冠林, 顾琳琳. 上海软土小应变三轴试验及本构模拟 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1930.
- YANG Tongshuai, YE Guanlin, GU Linlin. Small-strain triaxial tests and constitutive modeling of Shanghai soft clays [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1930.
- [13] 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.
- YUAN Juyun, ZHAO Xihong, YANG Xizhang, *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.
- [14] 陈林靖, 戴自航, 刘志伟. 应力路径对软土应力-应变特性影响试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3249.
- CHEN Linjing, DAI Zihang, LIU Zhiwei. Experimental study of stress path of soft soils in influence range of foundation pit [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3249.