

建筑技术

上海软黏土结构屈服特性的试验研究

柳艳华

(长安大学公路学院,西安 710064)

摘要 结构性与各向异性是天然沉积软黏土的两个重要特性。为研究其结构屈服特征,对上海软黏土进行了一系列相关试验,包括灵敏度试验、一维固结试验、 K_0 固结试验、三轴排水应力路径试验。灵敏度试验研究表明,天然沉积上海软黏土在结构破坏前后的不排水抗剪强度存在明显差异,灵敏度为4.86,属高灵敏性土。一维压缩试验结果表明,原状上海软黏土在结构屈服前后压缩特性存在明显的差别,具有结构性土所特有的分段特征。不同应力路径下三轴排水剪切试验表明,上海软黏土具有显著的塑性各向异性,其初始屈服面在 p' - q 平面上呈倾斜的椭圆形状,但其对称轴略低于 K_0 线。

关键词 软黏土 屈服 结构性 试验研究

中图法分类号 TU447; **文献标志码** A

土体相较于其他材料而言,具有显著的特殊性;其物质组成和结构共同决定着土的工程地质特性,即从本质上决定着土体的变形和强度。大部分天然土都有一定的结构性^[1,2],而有些黏土还具有很强的结构性,如湛江黏土、日本的有明黏土和瑞典黏土等。工程实践和试验^[3-5]均表明由于天然沉积软黏土结构性的存在,使其通常具有与相应的重塑土截然不同的力学性质。研究发现,结构性对土的压缩性、抗剪强度、应力-应变关系、渗透性及屈服特性等物理力学性质均有着重要的影响,可以说土结构性是决定软黏土力学特性的一个最为根本的内在因素^[6-8]。

由于天然沉积土在沉积和固结过程中处于非等向固结状态,因而具有显著的各向异性。国内外诸多学者都通过试验证明了各向异性的广泛存在,且对土的力学性质有着广泛的影响^[9,10],尤其是对软黏土屈服特性有着显著的影响^[11-13]。

本文对天然沉积上海软黏土进行了一系列有关屈服特性的试验研究,对结构性及各向异性对软黏土屈服特性的影响进行了探讨。

1 上海软黏土基本物理性质试验

1.1 试验土样采集

上海地区软黏土的分布范围十分广泛,其厚度

一般为几米至几十米厚,主要包括第③层的淤泥质粉质黏土和第④层的淤泥质黏土。本次试验的研究对象为第④层灰色淤泥质黏土原状样,土样取自上海某基坑工程,埋深为10 m。

为尽可能地减小对土样的扰动,本次试验现场取样采用PVC管切土法。试验所用土样均为10 m深度处的土体,根据10 m以上各土层的有效重度及其厚度,计算得原位竖向应力 σ'_{vc} 为68.6 kPa。

1.2 基本土性试验

本次试验所取原状软黏土基本物理性质指标如表1所示,由表可知,所研究的原状软黏土含水率高于液限,孔隙比大于1.0,经测试,试样的饱和度达到98%以上,超固结比为1.0,属于正常固结饱和软黏土。

表1 原状软黏土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical indices of Shanghai soft clay			
天然含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p
51.8	44.17	22.4	21.77
液性指数 I_L	比重 G_s	孔隙比 e_0	超固结比 OCR
1.35	2.74	1.402	1.0

2 软黏土结构屈服特性的试验研究

为研究结构性及各向异性两大因素对软黏土变形以及强度特性的影响,本文对上海软黏土进行了一系列与屈服特性有关的试验研究,包括灵敏度试验、一维压缩试验、 K_0 固结试验以及应力路径三轴

2014年1月14日收到 国家自然科学基金项目(51208055)、
中国博士后科学基金项目(2012M511960)资助
作者简介:柳艳华(1981—),女,内蒙古赤峰人,博士,讲师。研究方向:岩土体本构理论及地基基础。E-mail:yanhua3537@126.com。

排水剪切试验。

2.1 灵敏度试验

土的灵敏度是反应黏性土对扰动重塑作用敏感的一种特征量度。由于其反映了软黏土在结构破坏前后不排水抗剪强度的变化程度,因此可用来表征软黏土结构性的强弱。软黏土的灵敏度愈高,其结构性愈强。

本次研究对于软黏土灵敏度的测定采用无侧限抗压强度试验得到,原状样与相应重塑样的剪切应力应变曲线如图 1 所示。试验结果表明,本次试验所用的上海软黏土灵敏度 $S_l = 4.86$,根据灵敏性的分类,属高灵敏性土。

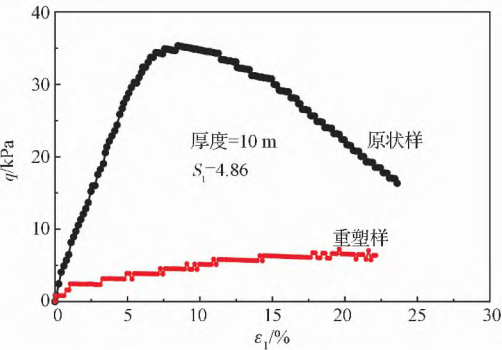


Fig. 1 Sensitivity test curve of Shanghai soft clay

2.2 固结试验

一维压缩试验是研究土结构性屈服最常用的手段之一,本次研究对上海软黏土进行了标准固结试验,试验结果如图 2 所示。

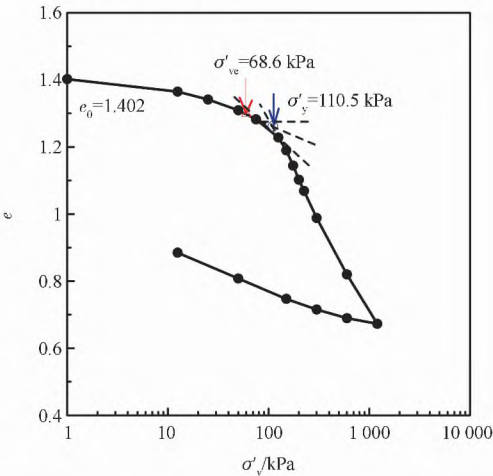


图 2 上海软黏土固结试验曲线

Fig. 2 Consolidation experimental curve of Shanghai soft clay

由图 2 可见,压缩曲线具有明显的拐点,即结构屈服破坏点。拐点处所对应的结构屈服应力 σ'_y 为

110.5 kPa,大于其对应的上覆有效自重应力 σ'_{ve} (对于正常固结土而言,即为其前期固结压力),而结构屈服应力大于有效上覆应力是天然沉积土受到土结构性影响的主要特征之一。在结构屈服前后,软黏土的压缩曲线特征有着显著的区别。

Burland^[3]将结构屈服应力与前期固结压力的比值称为“屈服应力比”,龚晓南^[14]则将此值称为“结构应力比”以表征结构性的强弱。本次试验的上海软黏土屈服应力比由结构屈服应力与原位竖向有效应力的比值 σ'_y/σ'_{ve} 近似确定为 1.61。因此,如果说用灵敏度的大小来表征软黏土结构性的强弱是反应了结构性对软黏土不排水抗剪强度的影响,那么屈服应力比(结构应力比)则体现了结构性对软黏土压缩性状的影响。

2.3 K_0 固结试验

天然沉积的软黏土在其固结过程中,竖向的上覆土体重力产生的竖向有效应力 σ'_{ve} 与水平土压力产生的水平向有效应力 σ'_{hc} 大小并不相等,即天然沉积软黏土往往处于 $K_0 = \sigma'_{hc}/\sigma'_{ve}$ 固结状态,从而产生了土的初始各向异性。为了在后续试验中真实地反应软黏土的这一特性,必须对软黏土的静止侧压力系数 K_0 进行测定。本次试验采用 GDS 应力路径三轴仪进行 K_0 系数的测定,结果见图 3。

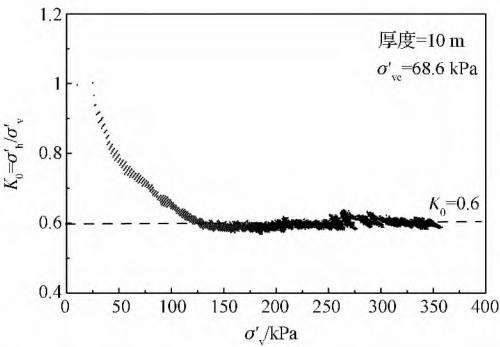


Fig. 3 K_0 coefficient of Shanghai soft clay

根据王立忠等^[15]的建议,在确定结构性软黏土的 K_0 系数时,应该取土体结构性已接近完全破坏后的数值,由图可见,本文上海软黏土在竖向有效应力达到 150 kPa 以后逐渐趋于稳定,由此确定的 K_0 系数为 0.6。由于试验土样对应的竖向有效应力 $\sigma'_{ve} = 68.6$ kPa,根据 K_0 系数可计算得到水平向有效应力 $\sigma'_{hc} = 41$ kPa,并进一步确定初始平均有效固结应力 $p'_0 = 50.3$ kPa,而初始偏应力 $q_0 = 27.6$ kPa。

2.4 应力路径三轴排水剪切试验

Smith 等^[4]对 Bothkennar 软黏土的屈服特性进行研究时,在 $p'-q$ 应力平面内定义了三个不同类型的屈服面 Y_1 - Y_3 ,并将状态边界面内的应力空间划分为三个区域,如图 4 所示。

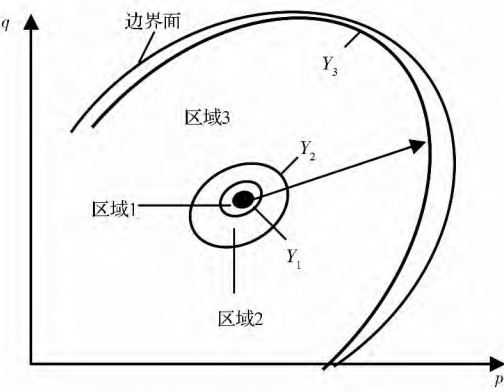


图 4 关于不同屈服面的定义^[4]

Fig. 4 Definition of different yielding surface^[4]

在上述不同屈服面的定义中, Y_1 是纯弹性区域的边界,该区域内应变完全可恢复,对于软黏土而言,该范围通常相当小,难以划定; Y_2 是非线性弹性区域的边界,该范围内加卸载循环形成应力应变滞回圈,应变完全可恢复, Y_2 面通常需由小应变循环荷载试验获得; Y_3 是结构屈服面,在该范围内颗粒开始相对移动,出现不可恢复的塑性变形,当加载点到达结构屈服面时,土体内部结构发生显著的变化,塑性应变的比率将明显增大, Y_3 面通常由应力路径三轴排水剪切试验获得。 Y_1 和 Y_2 面是随加载应力点而不断移动的运动硬化屈服面^[16],不在本次的研究范畴之内,本次仅对 Y_3 所对应的结构屈服面进行探讨。

为研究上述 Y_3 结构屈服面的特性,采用 GDS 应力路径三轴仪进行一系列排水剪切试验,加载路径如图 5 所示。

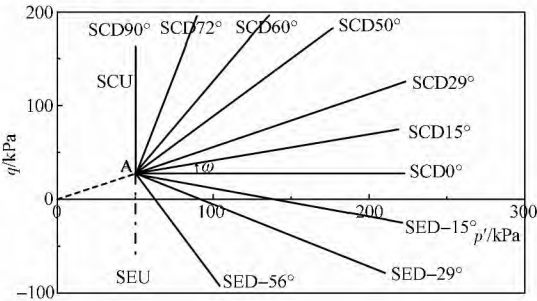


图 5 上海软黏土加载应力路径

Fig. 5 Loading stress paths of Shanghai soft clay

在试验时,首先将试样从 O 点固结到原位应力状态 A 点 ($p'_0 = 50.3 \text{ kPa}$, $q_0 = 27.6 \text{ kPa}$),然后沿如图 5 所示的不同直线应力路径进行剪切试验,试验类型包括排水压缩 SCD 试验或排水拉伸 SED 试验。图 5 示中排水剪切路径后的数字表示直线应力路径与水平方向的夹角 $\omega = \tan^{-1} \Delta q / \Delta p'$,以逆时针方向为正。此外,补充了一组应力路径三轴不排水压缩 SCU 试验和不排水拉伸 SEU 试验。

图 6 给出了上述各直线应力路径下的三轴排水剪切试验所得到的体积应力应变曲线 $p'-\varepsilon_v$ 和剪切应力应变曲线 $q-\varepsilon_s$,图 7 则给出了应力路径不排水压缩试验以及拉伸试验的应力应变试验曲线。由图 6 可见,沿 SCD0° 应力路径加载时,试样只有体积应变,没有剪切应变发生,随着应力路径倾角的增大,剪切应变所占比率逐渐增加,直到 SCD90° 路径时的只有剪切应变,而没有体积应变产生;在各直线拉伸路径下,同时有体积应变与剪切应变产生。无论是压缩路径还是拉伸路径,上海软黏土均表现出明显的结构屈服特征,将各种应力路径试验得到的屈服点同时绘于应力应变曲线中。

将图 6 各直线应力路径下的三轴排水剪切试验和图 7 的三轴不排水剪切应力应变曲线所综合确定的各屈服应力状态点绘于 $p'-q$ 应力平面内,如图 8 所示。

与 Bothkennar 等许多其它地区的软黏土^[4,12]类似,天然沉积上海软黏土具有明显的各向异性特征,其初始屈服面在 $p'-q$ 平面上呈倾斜的椭圆形状,但其对称轴并非恰好是 K_0 线,而是略低于 K_0 线。

3 结 语

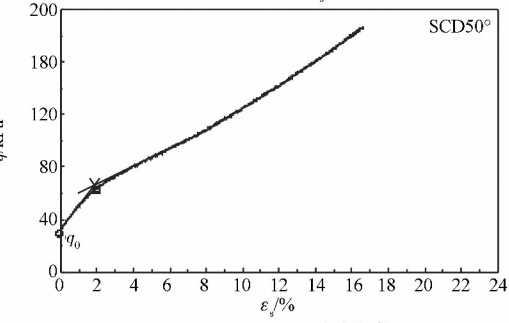
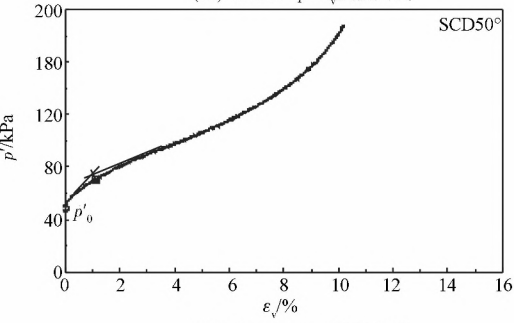
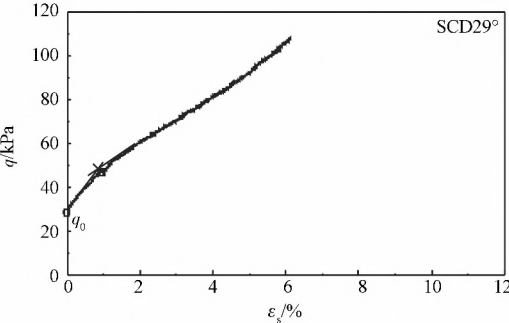
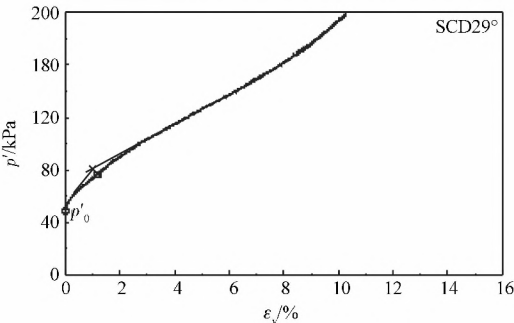
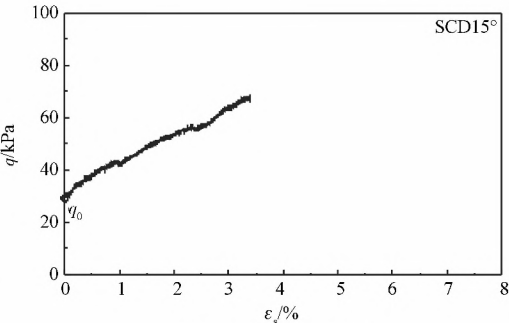
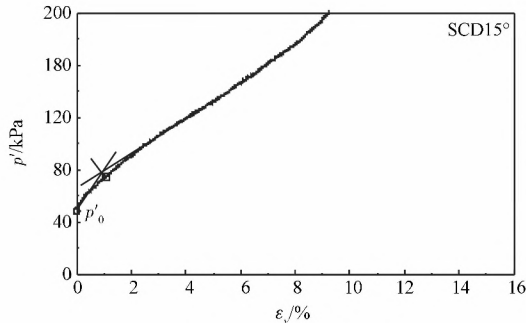
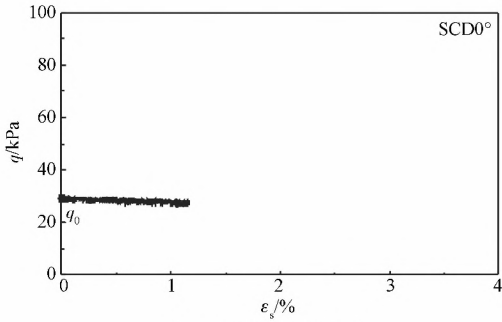
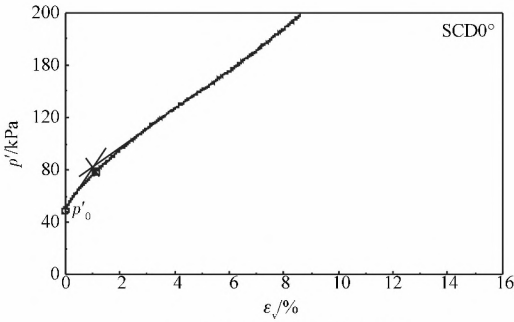
本文对天然沉积的上海饱和软黏土进行了一系列有关屈服特性的试验研究,分析探讨了结构性及各向异性对天然软黏土变形和强度特性的影响。根据对试验结果的分析,主要结论如下:

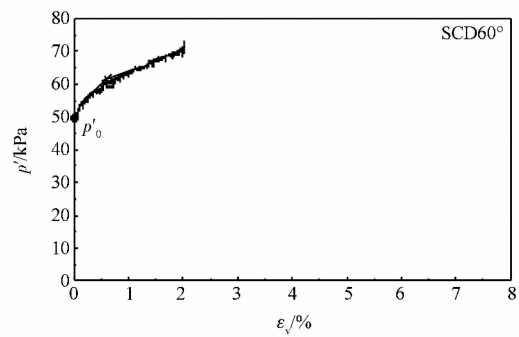
- (1) 灵敏度试验表明,天然沉积上海软黏土在结构破坏前后的不排水抗剪强度存在明显差异,灵敏度为 4.86,属高灵敏性土;
- (2) 一维压缩试验结果表明,天然沉积上海软黏土的压缩曲线表现出结构性土所特有的分段特征,在结构屈服前后压缩特性存在明显的差别。在固结压力未达到结构屈服应力时,孔隙比变化量较小;当固结压力达到结构屈服应力临界状态时,土的初始结构大部分被破坏,孔隙比大幅度降低;
- (3) K_0 固结试验结果表明,上海软黏土的静止

侧压力系数 $K_0=0.6$;

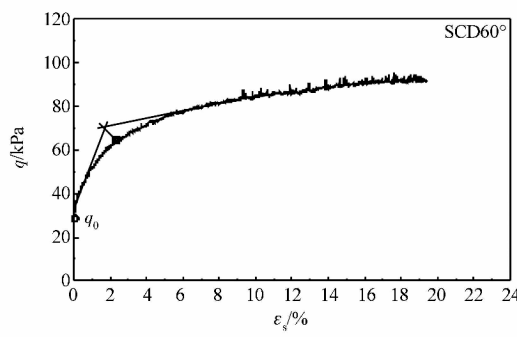
(4) 对上海软黏土进行的不同应力路径三轴排水剪切试验表明,天然沉积上海软黏土具有明显的各向异性特征,其初始屈服面在 $p'-q$ 平面上呈倾斜的椭圆形状,屈服面的对称轴低于 K_0 线。

本文的试验研究成果为结构性及各向异性对软黏土变形及强度特性的影响研究提供了基础试验数据,并为建立更合理的结构性及各向异性本构模型奠定基础。

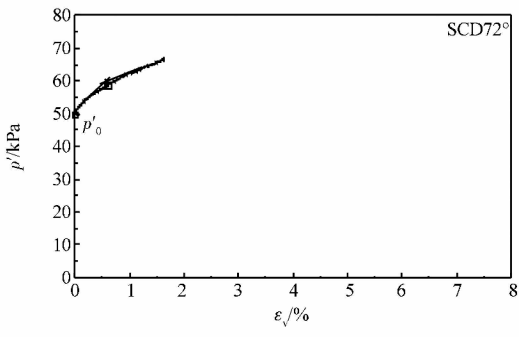




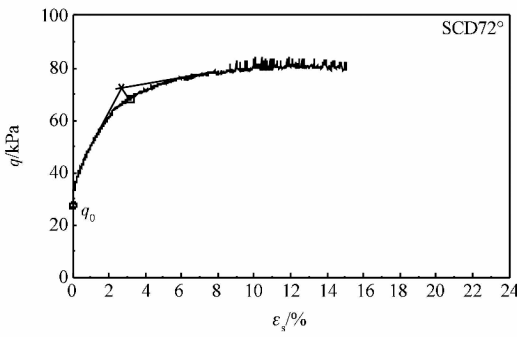
(e1) SCD60° $p'-\varepsilon_v$ 试验曲线



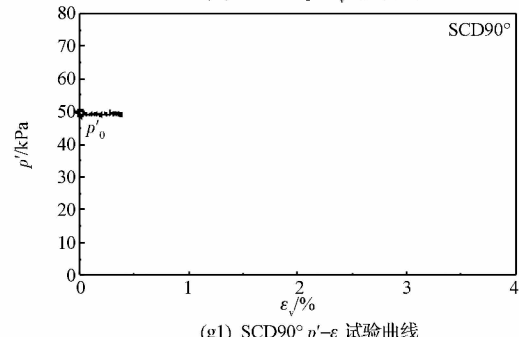
(e2) SCD60° $q-\varepsilon_v$ 试验曲线



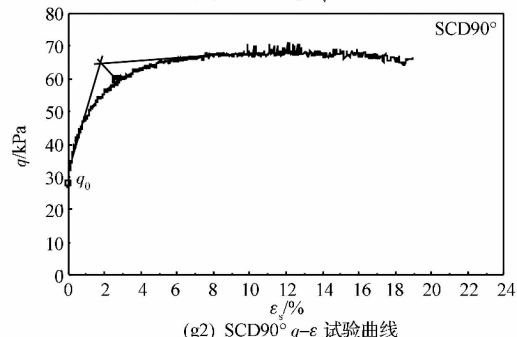
(f1) SCD72° $p'-\varepsilon_v$ 试验曲线



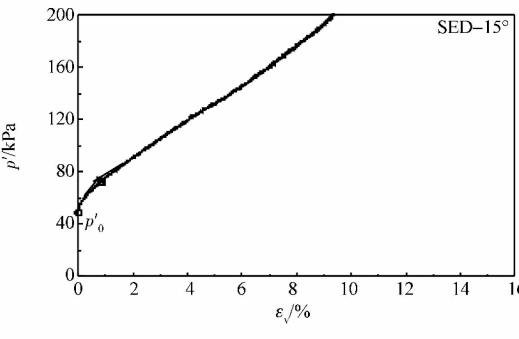
(f2) SCD72° $q-\varepsilon_v$ 试验曲线



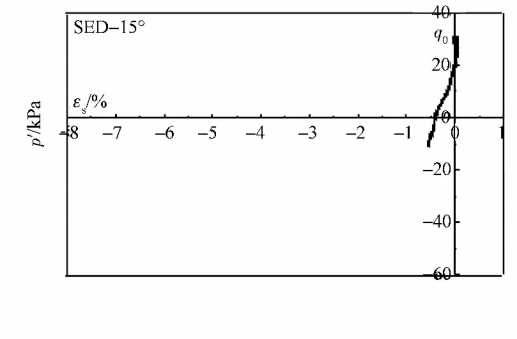
(g1) SCD90° $p'-\varepsilon_v$ 试验曲线



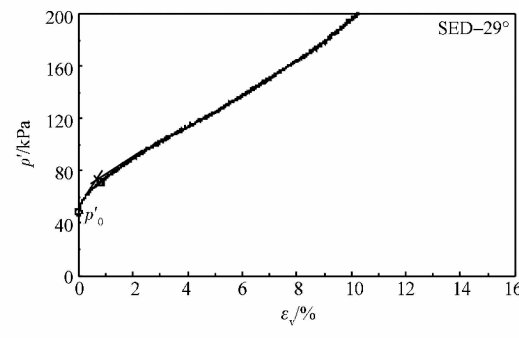
(g2) SCD90° $q-\varepsilon_v$ 试验曲线



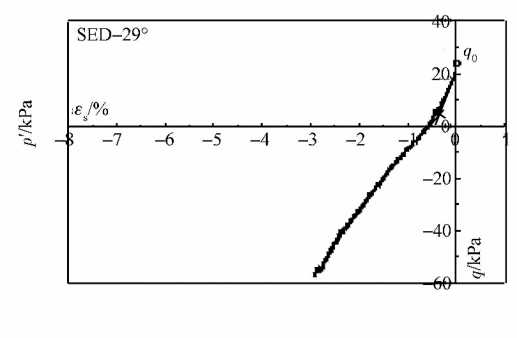
(h1) SED-15° $p'-\varepsilon_v$ 试验曲线



(h2) SED-15° $q-\varepsilon_v$ 试验曲线



(i1) SED-29° $p'-\varepsilon_v$ 试验曲线



(i2) SED-29° $q-\varepsilon_v$ 试验曲线

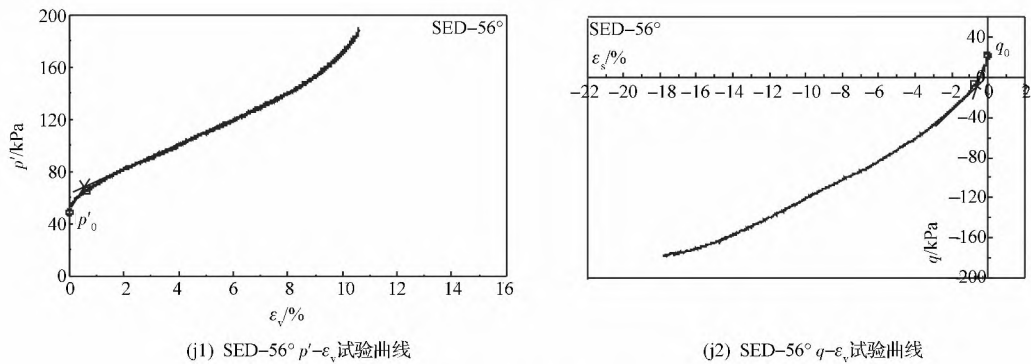


图 6 上海软黏土应力路径三轴排水剪切试验应力应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curve from drained stress probe tests for Shanghai soft clay

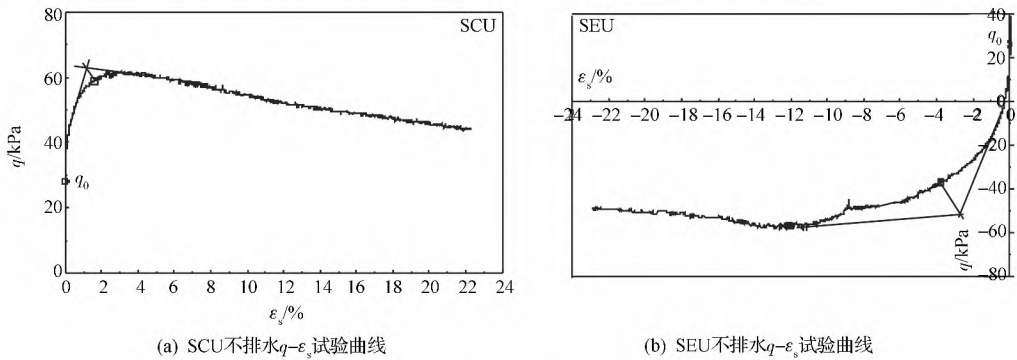


图 7 上海软黏土应力路径三轴不排水剪切试验应力应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curve from drained stress probe tests for Shanghai soft clay

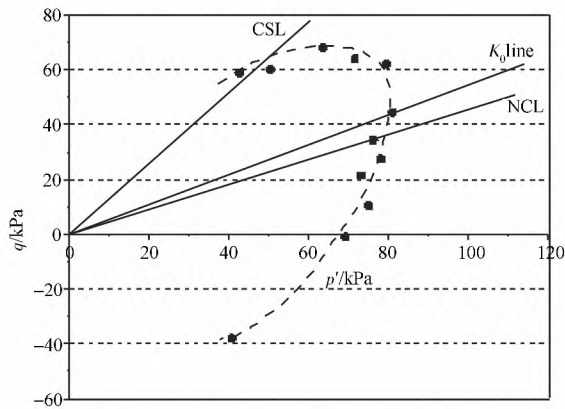


图 8 上海软黏土的试验屈服面
Fig. 8 Yielding surface of Shanghai soft clay

参 考 文 献

1 Tavenas F, Leroueil S. Laboratory and in situ stress-strain-time behavior of soft clays-state-of-the paper. Int Symp Geotech Engng Soft Soils, Mexico City 2, 1990

2 Mesir G. Discussion geotech. Div. ASCE, GT4, 1975: 409—412

3 Burlard J B. On the compressibility and shear strength of natural clays. Geotechnique, 1990; 40(3): 329—378

4 Smith P R, Jardine R J, Hight D W. On the yielding of Bothnkennar

clay. Geotechnique, 1992; 42(2): 257—274

5 Callisto L, Calabresi G. Mechanical behaviour of a natural soft clay. Geotechnique, 1998; 48(4): 495—513

6 Leroueil S, Vaughan P R. The general and Congruent effects of structure in natural soil and weak rock. Geotechnique, 1990; 40(3): 467—488

7 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径. 岩土工程学报, 1999; 21(6): 651—656

Xie D Y, Qi J L. soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999; 21(6): 651—656

8 沈珠江. 土体结构性的数学模型—21 世纪土力学的核心问题. 岩土工程学报, 1996; 18(1): 95—97

Shen Z J. An Elasto-plastic damage model for cemented clays. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996; 18(1): 95—97

9 Ladd C C, Foott R. The behavior of embankment on clay foundation: Discussion. Canadian Geotechnical Journal, 1980; 17(3): 454—460

10 王洪瑾, 张国平, 周克骥. 固有和诱发各向异性对击实黏性土强度和变形特性的影响. 岩土工程学报, 1996; 18(3): 1—10

Wang HJ, Zhang G P, Zhou K J. Effects of inherent and induced anisotropy on strength and deformation characteristics of compacted cohesive soil. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996; 18(3): 1—10

11 Diaz-Rodriguez J A. Yielding of Mexico City clay and other natural clays. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992; 118

(GT7): 981—995

12 沈恺伦, 王立忠. 天然软黏土屈服面及流动法则试验研究. 土木工程学报, 2009; 42(4): 119—127
Shen K L, Wang L Z. Experimental study on the yield surface and flow rule of natural clays. China Civil Engineering Journal, 2009; 42(4): 119—127

13 Wheeler S J. An anisotropic elasto-plastic model for soft clays. Canadian Geotechnical Journal, 2003; 40(2): 403—418

14 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 等. 黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析. 水利学报, 2000; 10: 43—47
Gong X N, Xiong C X, Xiang K X, *et al.* The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay. Shuili Xuebao, 2000; 10: 43—47

15 王立忠, 沈恺伦. K_0 固结结构性软黏土的本构模型. 岩土工程学报, 2007; 29(4): 496—504
Wang L Z, Shen K L. A constitutive model of K_0 consolidated structured soft clays. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007; 29(4): 496—504

16 Mroz Z. On the description of anisotropic hardening. Journal of Mechanical Physics Solids, 1967; 15: 163—175

Experimental Study on Structure Yielding Character of Shanghai Soft Clay

LIU Yan-hua

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China)

[Abstract] Both structure and anisotropy are important characters of natural soft clay. To study structural yielding character, a series of tests were carried out for Shanghai soft clay including to sensitivity test and one-dimensional consolidation tests and K_0 consolidation test along with drained stress probe tests. The test results of sensitivity show that the Shanghai soft clay is high sensitivity with $s_e = 4.86$, and the undrained shear strength is different obviously before and after the structure is destroyed. The test results from oedometer show that the compression curve is divided two parts, the compression properties is different before and after structural yielding. The test results from stress paths drained triaxial tests show that the anisotropy is significant for Shanghai soft clay. The initial yielding surface can be described by an inclined ellipse on the $p'-q$ plane, and the yielding surface is symmetrical with respect to some line below the K_0 line.

[Key words] soft clay yield structure experimental study