

文章编号:1673-2049(2014)03-0072-07

# 天然软粘土屈服性状的试验研究与本构模拟

柳艳华, 谢永利

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为研究结构性及各向异性对天然软粘土屈服特性的影响,对上海软粘土进行了一系列相关试验,包括一维固结试验、三轴不排水剪切试验以及三轴排水应力路径剪切试验;同时在单面边界面模型框架内,引入考虑结构性及各向异性影响的内变量,建立本构方程。通过对边界面与传统屈服面模型计算结果的对比,证明了边界面模型在模拟天然软粘土屈服性状上具有一定的优势;通过对天然软粘土各种屈服试验结果的模拟,验证了模型的合理性。结果表明:修正后的边界面模型可以更有效地反映天然软粘土的变形特性。

**关键词:**天然软粘土;结构性;各向异性;屈服特性;边界面模型;本构模拟

**中图分类号:**TU441.3

**文献标志码:**A

## Test Research and Constitutive Simulation on Yielding Characteristic of Natural Soft Clay

LIU Yan-hua, XIE Yong-li

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To study the influence of structure and anisotropy on yielding characteristic of natural soft clay, a series of relative tests for Shanghai soft clay were carried out, including one-dimensional consolidation test, triaxial undrained shear test and drained stress probe test. At the same time, both structural and anisotropic inner variables were introduced into constitutive equations on the basis of single bounding surface model. The advantage of bounding surface model was verified by comparing the calculation results between the traditional yielding surface model and bounding surface model. The reasonability of the model was verified by the test results of yielding characteristic of natural soft clay. The results show that the modified bounding surface model can reflect the deformation characteristic of natural soft clay more efficiently.

**Key words:** natural soft clay; structure; anisotropy; yielding characteristic; bounding surface model; constitutive simulation

## 0 引言

关于土结构性的研究在岩土工程领域已经引起广泛重视。大部分天然土都有一定的结构性<sup>[1-2]</sup>,而有些粘土还具有很强的结构性,如中国湛江粘土、日本有明粘土和瑞典粘土等。工程实践和试验<sup>[3-5]</sup>均

表明,天然沉积软粘土结构性的存在,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,可以说结构性是决定软粘土力学特性的一个最根本的内在因素<sup>[6-8]</sup>。Tavenas等<sup>[9]</sup>对4种不同地

收稿日期:2014-04-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51208055);中国博士后科学基金项目(2012M511960)

作者简介:柳艳华(1981-),女,内蒙古赤峰人,讲师,工学博士,E-mail:yanhua3537@126.com。

区粘土的原状样及相应重塑样的屈服特性进行了总结,证明由于原状土结构性的存在,导致土体刚度增加而使其屈服面比相应重塑土要大。另一方面,大量的试验研究结果<sup>[10-14]</sup>表明,由于受到各向异性的影响,天然沉积软粘土的屈服特性、不排水剪切强度及孔压发展过程与各向同性固结的重塑土存在着显著的差异。由于软粘土初始各向异性的存在,使得原状土及重塑土的屈服面并不是关于静水压力轴对称,而是有一定的倾角,但是原状土屈服面的倾斜程度比重塑土要大,说明原状土各向异性程度比重塑土要高。

与试验研究相同步,近年来大量的学者<sup>[15-24]</sup>利用不同的方法对软粘土结构性及各向异性本构模型进行了研究,如堆砌体模型、二元介质模型、运动硬化界面模型、次塑性模型等。魏星等<sup>[25-26]</sup>以界面塑性理论为基础,在单面界面模型框架内建立了含结构性及各向异性影响的本构方程,其形式相对简单,且易于数值实现。本文中对天然软粘土进行了一系列有关屈服特性的试验研究,在试验的基础上,对文献<sup>[26]</sup>中所建立的单面界面模型进行了修正,对修正后的界面模型与传统的屈服面模型进行了对比,并对本文中进行的各种屈服试验进行了计算模拟。

## 1 界面方程的建立

### 1.1 界面方程

本文中笔者在传统的修正剑桥粘土模型(MCC模型)屈服面形式的基础上引入各向异性张量以及形状参数,定义了各向异性的重塑土的参考面,并在方程中引入结构性内变量 $r$ ,定义结构性土的边界面。重塑土的参考面与结构性土的边界面的定义如图1所示,其中, $q$ 为偏应力, $p$ 为平均应力, $\alpha$ 为 $p$ - $q$ 空间中屈服面的倾斜角,是各向异性张量的第二不变量, $p_c$ 为前期固结压力, $K_0$ 为静止侧压力系数。在加载过程中,随着结构的损伤,结构性土的屈服面逐渐向重塑土的屈服面(参考面)收缩。因此结构性参数 $r$ 是一个单调递减的变量,且 $r \geq 1.0$ ,当 $r = 1.0$ 时,结构性土和重塑土的屈服面重合。

各向异性的重塑土的屈服面方程 $f$ 为<sup>[25-26]</sup>

$$f = (p - p_c) \left( p + \frac{R-2}{R} r p_c \right) + (R-1)^2 \frac{q_a^2}{\chi} = 0 \quad (1)$$

相应的结构性土的边界面定义为

$$F = (p - r p_c) \left( p + \frac{R-2}{R} r p_c \right) + (R-1)^2 \frac{q_a^2}{\chi} = 0 \quad (2)$$

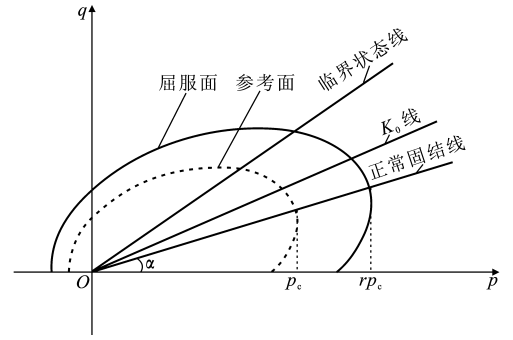


图1 重塑土的参考面与结构性土的屈服面

Fig. 1 Reference Surface of Disturbed Soil and Yielding Surface of Structured Soil

其中

$$I_1 = \sigma_{ij} \delta_{ij}, p = \frac{I_1}{3} \quad (3)$$

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{kk} \delta_{ij} / 3 \quad (4)$$

$$\alpha = \sqrt{3 \alpha_{ij} \alpha_{ij} / 2} \quad (5)$$

$$s_{ij}^a = s_{ij} - \sigma_{kk} \alpha_{ij} / 3 \quad (6)$$

$$J_a = \sqrt{s_{ij}^a s_{ij}^a / 2}, q_a = \sqrt{3} J_a \quad (7)$$

$$\chi = (M - \alpha) [2\alpha(R-1)^2 + M - \alpha + \sqrt{4\alpha(R-1)^2 M + (M - \alpha)^2}] / 2 \quad (8)$$

式中: $I_1$ 为第一应力不变量; $\alpha_{ij}$ 为各向异性张量,表征土体各向异性的大小; $\sigma_{ij}$ 为应力张量; $s_{ij}$ 为偏应力张量; $s_{ij}^a$ 为折减应力偏量; $q_a$ 为折减等效剪应力; $J_a$ 为折减第二应力不变量; $M$ 为临界状态应力比; $R$ 为形状参数; $\delta_{ij}$ 为Kronecker符号。

临界状态应力比 $M$ 由折减的应力Lode角 $\theta_a$ 定义为

$$\theta_a = \frac{1}{3} \arcsin^{-1} \left[ \frac{3\sqrt{3}}{2} \left( \frac{S_a}{J_a} \right)^3 \right] \quad (9)$$

$$S_a = \left( \frac{1}{3} s_{ij}^a s_{jk}^a s_{ik}^a \right)^{1/3} \quad (10)$$

$$M = M_c \left[ \frac{2m^4}{(1+m^4) - (1-m^4) \sin(3\theta_a)} \right]^{1/4} \quad (11)$$

式中: $S_a$ 为折减第三应力不变量; $m$ 为土性参数,表示 $p$ - $q$ 空间中轴对称拉伸应力状态的临界状态线斜率 $M_c$ 与轴对称压缩应力状态的临界状态线斜率 $M_c$ 之比,即 $m = M_c / M_c$ 。

对于初始各向异性张量 $\alpha_{ij}^0$ 的确定,即初始屈服面倾斜程度的确定,不同的学者给出了不同的表达形式。Wheeler<sup>[14]</sup>由模型一维固结条件下的体积应变和剪切应变的比例关系,结合相应屈服面流动法则,推导出初始各向异性张量 $\alpha_{ij}^0$ 的第二不变量 $\alpha_0$ 的表达式为

$$\alpha_0 = \frac{\eta_{K_0}^2 + 3\eta_{K_0} - M^2}{3} \quad (12)$$

式中:  $\eta_{K_0}$  为  $p$ - $q$  空间中  $K_0$  线所对应的应力比。

Ling 等<sup>[27]</sup> 建议初始各向异性张量  $\alpha_{ij}^0$  的各分量由土性修正系数  $A_0$  和初始应力状态确定, 即

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ij}^0 &= A_0 \frac{s_{ij}^0}{p_c} \\ s_{ij}^0 &= \sigma_{ij}^0 - p_c \delta_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:  $\sigma_{ij}^0$  为初始应力张量;  $s_{ij}^0$  为初始偏应力张量。

在文献[25], [26]中, 模型假设初始边界面关于  $K_0$  线对称, 初始各向异性张量  $\alpha_{ij}^0$  的各分量由静止侧压力系数  $K_0$  确定, 即

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{11}^0 &= 2k^0 \\ \alpha_{22}^0 &= \alpha_{33}^0 = -k^0 \\ \alpha_{12}^0 &= \alpha_{23}^0 = \alpha_{13}^0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$k^0 = \frac{1 - K_0}{1 + 2K_0} \quad (15)$$

大量关于各向异性的试验研究结果表明, 由于沉积环境等因素的不同, 天然沉积软粘土的各向异性屈服面并非均关于  $K_0$  线对称, 有可能略低于  $K_0$  线。为了更准确地描述软粘土的初始各向异性大小, 参照 Ling 等<sup>[27]</sup> 的建议, 引入土性修正系数  $A_0$ , 对式(14), (15)进行修正, 对于天然固结状态土,  $\alpha_{ij}^0$  的各分量由系数  $A_0$ ,  $K_0$  共同确定, 即

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{11}^0 &= 2A_0 \frac{1 - K_0}{1 + 2K_0} \\ \alpha_{22}^0 &= \alpha_{33}^0 = -A_0 \frac{1 - K_0}{2 + 2K_0} \\ \alpha_{12}^0 &= \alpha_{23}^0 = \alpha_{13}^0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

当  $A_0 = 1.0$  时, 初始屈服面将关于  $K_0$  线对称。

## 1.2 硬化法则

模型中有 3 个硬化内变量  $p_c$ ,  $r$ ,  $\alpha_{ij}$ , 各变量的硬化规律如下:

(1)  $p_c$  的等向硬化法则

根据剑桥粘土模型可知,  $p_c$  的硬化规律为

$$\left. \begin{aligned} p_c &= p_0 \dot{\epsilon}_v^p / (\lambda^* - k^*) \\ \lambda^* &= \lambda / (1 + e_0) \\ k^* &= k / (1 + e_0) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中:  $e_0$  为初始孔隙比;  $\lambda$ ,  $k$  分别为  $e$ - $\ln(p)$  空间中正常固结曲线和回弹曲线的斜率;  $p_0$  为初始固结压力;  $\dot{\epsilon}_v^p$  为塑性体应变。

(2)  $r$  的损伤软化法则

$r$  为决定结构性软粘土边界面大小的内变量, 按如下指数型规律衰减<sup>[19, 25-26]</sup>

$$r = 1 + (r_0 - 1) \exp\left(\frac{-k_d \epsilon_d^p}{\lambda^* - k^*}\right) \quad (18)$$

$$\epsilon_d^p = \int \sqrt{(1 - B)(d\epsilon_v^p)^2 + B(d\epsilon_s^p)^2} \quad (19)$$

式中:  $r_0$  为表征软粘土初始结构性大小的参数;  $d\epsilon_v^p$ ,  $d\epsilon_s^p$  分别为体积应变和剪切应变;  $k_d$  为结构性衰减速率;  $B$  为在土结构性损伤过程中体积应变  $d\epsilon_v^p$  与剪切应变  $d\epsilon_s^p$  所占比例大小。

(3)  $\alpha_{ij}$  的旋转硬化法则

$\alpha_{ij}$  为表征各向异性程度的内变量, 目前对于旋转硬化法则中涉及的各项异性演变机理、旋转方向等问题, 学术界存在诸多不同观点, 其旋转硬化法则的数学表述也不尽相同, 其中 Wheeler<sup>[14]</sup> 所建议的旋转硬化法则形式相对简单, 且综合考虑了塑性体应变及塑性剪应变的影响, 定义如下

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_{ij} &= \mu \left[ \left( \frac{3s_{ij}}{4p} - \alpha_{ij} \right) \cdot \langle \dot{\epsilon}_v^p \rangle + \right. \\ &\quad \left. \beta \left( \frac{s_{ij}}{3p} - \alpha_{ij} \right) \cdot |\dot{\epsilon}_s^p| \right] \end{aligned} \quad (20)$$

式中:  $\mu$  为椭圆屈服面的旋转速率;  $\beta$  为影响因子, 表征塑性体应变  $\dot{\epsilon}_v^p$  与塑性剪应变  $\dot{\epsilon}_s^p$  对屈服面旋转程度的影响;  $\langle \rangle$  为 Macaulay 括号, 确保  $\dot{\epsilon}_v^p$  为负时, 模型仍具敏感性。

当  $\beta = 0$  时, 塑性体应变占主导地位,  $\alpha_{ij}$  逐渐趋近于  $3s_{ij}/(4p)$ , 而对于实际土体, 给定一个有限的非零  $\beta$  值,  $\alpha_{ij}$  将向介于  $3s_{ij}/(4p)$  与  $s_{ij}/(3p)$  之间的某个目标值逐渐趋近, 当塑性剪应变占主导地位时,  $\alpha_{ij}$  逐渐趋近于  $s_{ij}/(3p)$ 。

模型采用相关联流动法则以及传统的线性径向映射准则。关于塑性模量以及模型求解过程的具体计算公式, 参见文献[25], [26]。

## 2 试验与模型对比验证

对天然沉积的上海软粘土进行了一系列与屈服性状有关的试验研究, 包括一维固结试验、三轴不排水剪切试验以及应力路径三轴排水剪切试验。利用本文模型对各种屈服特性的试验结果进行模拟, 以验证其在结构性及各项异性方面的计算能力。

### 2.1 试验概况

试验中的原状软粘土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, 现场取样采用 PVC 管切土法。原状软粘土基本物理性质指标如表 1 所示。

由表 1 可知, 所研究的原状软粘土含水率高于液限, 孔隙比大于 1.0, 经测试试样的饱和度达到

表 1 原状软粘土基本物理性质指标

Tab. 1 Basic Physical Performance Indices of Undisturbed Soft Clay

天然含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	相对密度 $G_s$	初始孔隙比 $e_0$	超固结比	静止侧压力系数 $K_0$
51.8	44.17	22.40	21.77	1.35	2.74	1.402	1.0	0.6

98%,超固结比为 1.0,属于正常固结饱和软粘土。根据 10 m 以上各土层的有效重度及其厚度,计算得到原位竖向有效固结应力  $\sigma'_{vc}=68.6$  kPa,根据系数  $K_0$  可计算得到水平有效固结应力  $\sigma'_{hc}=41$  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。

2.2 一维固结试验的对比验证

为验证本文模型对于天然软粘土结构性损伤的模拟能力,采用本文模型对上海软粘土一维固结试验所得到的孔隙比  $e$  与竖向固结应力  $\sigma'_v$  的变化关系进行了模拟,图 2 中给出了一维固结试验曲线与模型曲线的对比。由试验固结曲线可得到曲率半径最大点所对应的结构屈服应力  $\sigma'_y=110.5$  kPa,进而可确定初始结构性参数  $r_0=\sigma'_y/\sigma'_{vc}=1.61$ ;同时,由一维固结曲线可确定传统的修正剑桥粘土模型参数  $\lambda=0.212,k=0.046$ 。模型中临界状态线参数  $M_c$ ,

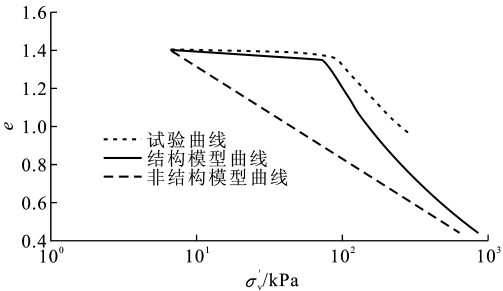


图 2 上海软粘土一维固结试验曲线与模型曲线的对比  
Fig. 2 Comparisons of Test Curves and Model Curves of One-dimensional Consolidation for Shanghai Soft Clay

$M_e$  由下述三轴不排水剪切试验得到;初始各向异性土性修正系数  $A_0$  由应力路径三轴排水剪切试验拟合得到;为便于与传统的修正剑桥粘土模型计算结果进行对比,形状参数  $R$  取 2.0。上海软粘土模型参数见表 2,参数确定方法参见文献[26]。

由图 2 可见:本文模型的计算曲线与试验曲线

表 2 上海软粘土模型参数

Tab. 2 Model Parameters of Shanghai Soft Clay

传统参数						结构性参数		各向异性参数		模量场插值参数		
$\lambda$	$k$	$M_c$	$M_e$	$\nu$	$R$	$k_d$	$B$	$\mu$	$\beta$	$\Psi_0$	$\xi$	$\zeta$
0.212	0.046	1.277	0.900	0.2	2.0	0.65	0.5	50.0	0.7	10.0	1.5	3.0

虽然有一定的偏差,但是模型很好地反映了结构性粘土结构损伤前后固结曲线的分段特征,当固结应力低于结构屈服应力时,由于初始结构抗力的存在,土的力学性质变化很小;当固结应力大于土结构屈服应力时,由于结构性损伤破坏,孔隙比变化明显;随着荷载的增加,原状土固结曲线逐渐趋近于重塑土固结曲线。

2.3 三轴不排水剪切试验的对比验证

对上海软粘土进行了一系列三轴不排水剪切试验,每个系列所采用的固结应力如表 3 所示。试验中的等压固结系列用 CIU 表示,偏压固结按  $K_0=0.6$  计算竖向有效固结应力及水平有效固结应力,其系列用 CAU 表示。

采用本文模型与传统的修正剑桥粘土模型对 CIU 及 CAU 两个系列的三轴不排水剪切试验进行模拟,试验中的初始平均有效固结应力  $p'_0=50,100$  kPa。图 3,4 中分别给出了等压及偏压固结模式下模型对应力-轴向应变( $q-\epsilon_1$ )及孔压-轴向应变( $u-\epsilon_1$ )关系的预测结果与试验结果的对比。

表 3 三轴不排水剪切试验的固结条件

Tab. 3 Consolidation Conditions of Triaxial Undrained Shear Tests

固结模式	等压固结				偏压固结			
	CIU-1		CIU-2		CAU-1		CAU-2	
试验编号	$\sigma'_{hc}$	$\sigma'_{vc}$	$\sigma'_{hc}$	$\sigma'_{vc}$	$\sigma'_{hc}$	$\sigma'_{vc}$	$\sigma'_{hc}$	$\sigma'_{vc}$
固结应力	50	50	100	100	41.0	68.6	81.8	136.4

由图 3 可见,由于将结构性以及各向异性纳入本构方程中,因此相对于传统的修正剑桥粘土模型而言,本文模型的预测精度更高,模型能够反映天然软粘土由于结构损伤造成的应变软化现象;传统的修正剑桥粘土模型在固结应力较大( $p'_0=100$  kPa)时,其预测精度要高于初始平均有效固结应力  $p'_0=50$  kPa;同时,传统的修正剑桥粘土模型在等压固结模式下的预测结果比偏压固结模式要好。

2.4 三轴排水应力路径剪切试验的对比验证

为研究上海软粘土的屈服面性状,采用 GDS 应力路径三轴仪进行一系列排水剪切试验,加载应力路径如图 5 所示,其中  $\omega$  为夹角。由图 5 可见,在试

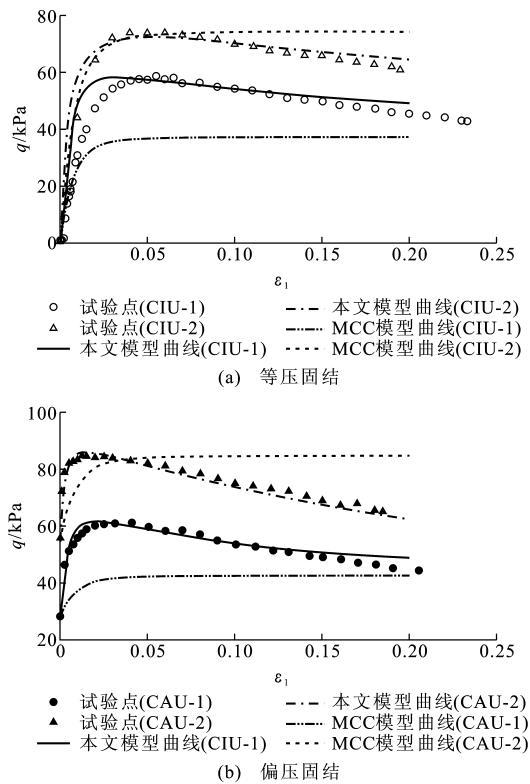


图3 上海软粘土不排水应力-轴向应变关系曲线  
Fig. 3 Relation Curves of Undrained Stress-axial Strain of Shanghai Soft Clay

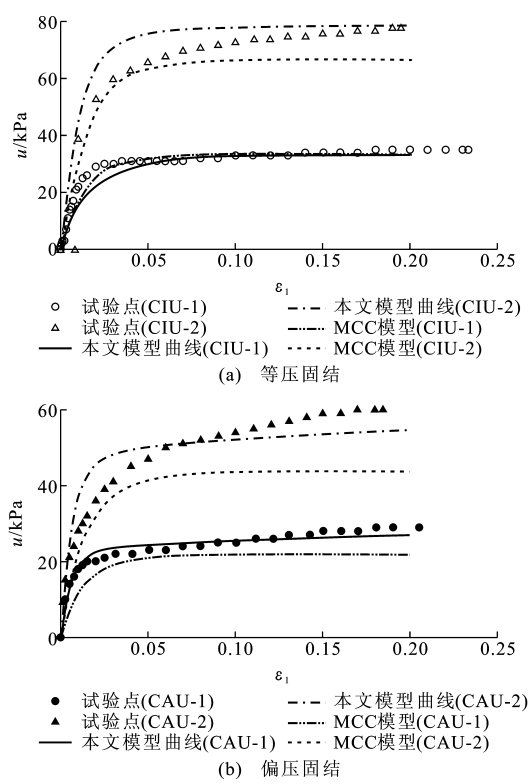


图4 上海软粘土不排水孔压-轴向应变关系曲线  
Fig. 4 Relation Curves of Undrained Pore Pressure-axial Strain of Shanghai Soft Clay

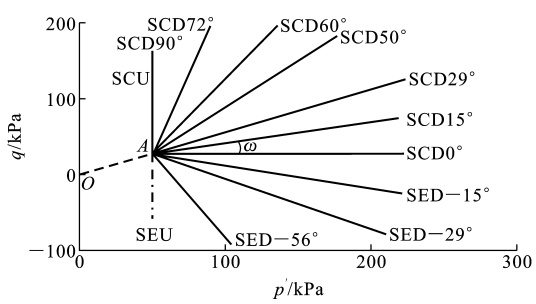


图5 上海软粘土加载应力路径  
Fig. 5 Loading Stress Paths of Shanghai Soft Clay

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中应力路径后的数字表示加载应力路径与水平方向的夹角 $\omega=\arctan(\Delta q/\Delta p')$ ,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。

由上述各直线路径下的体积应力-应变( $p'-\epsilon_v$ )曲线和剪切应力-应变( $q-\epsilon_s$ )曲线,可确定在该加载路径下试样的屈服点。将试验所得到各路径下的屈服点绘制于图6中,同时,将本文模型计算的初始边界面也绘制于图6中。对各路径下的屈服试验点进行拟合,可得到模型中表征屈服面倾斜初始各向异性程度的土性修正系数 $A_0=0.844$ 。

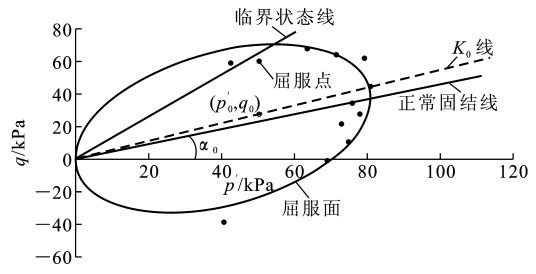


图6 上海软粘土的屈服面  
Fig. 6 Yielding Surface of Shanghai Soft Clay

由图6可见,模型计算的边界面与屈服试验点基本吻合,初始屈服面呈现不以 $K_0$ 线为对称轴的倾斜椭圆,证明了引入表征初始各向异性程度的土性修正参数 $A_0$ 的必要性。

2.5 边界面与传统屈服面理论的对比较证

本文模型建立于边界面塑性理论之上,使用边界面代替了经典弹塑性理论中的屈服面,为对比边界面模型与传统屈服面模型在计算天然软粘土应力-应变关系时的差别,使用2个模型同时对上海软粘土在等压固结及偏压固结( $K_0=0.6$ )2种模式下的三轴不排水剪切试验应力-应变曲线进行模拟。

在使用传统屈服面模型进行计算时,模型中的传统参数、结构性参数及各向异性参数与边界面模型完全一致,所不同的是将模量场插值参数 $\zeta$ 取为无穷大,从而将边界面模型退化为一般屈服面模型。

图7中给出了边界面模型与传统屈服面模型的计算结果对比。

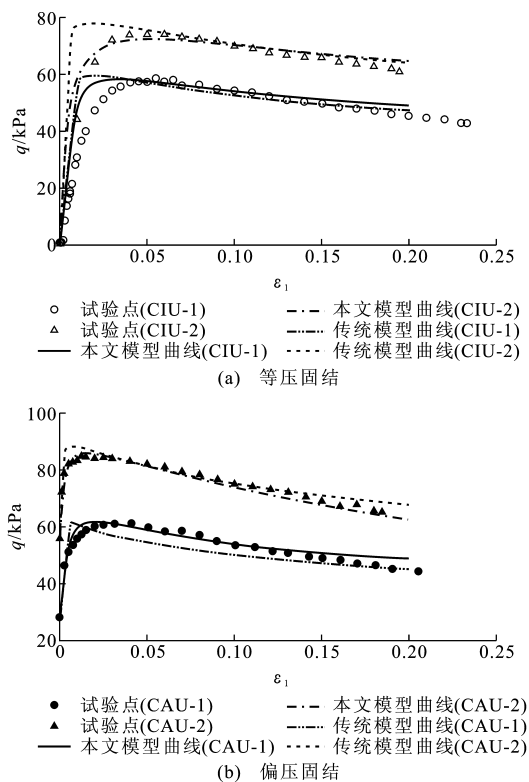


图7 边界面模型与传统屈服面模型的对比

Fig.7 Comparisons of Bounding Surface Model and Traditional Yielding Surface Model

从图7可以看出:由于本文中采用的边界面模型容许塑性变形以及与之相联系的材料硬化在一个边界面内逐步形成,因此其计算的应力-应变曲线比较光滑;而传统的屈服面模型,在屈服面内材料是完全弹性的,在应力达到屈服状态时突然产生塑性变形,因此其应力-应变曲线并不光滑,有一明显的尖点;计算结果与试验结果的对比表明,边界面模型较传统的屈服面模型能更合理地反映软粘土的变形特性。

### 3 结语

本文中对天然沉积的上海饱和软粘土进行了一系列有关屈服特性的试验研究,分析了结构性及各向异性对天然软粘土屈服性状的影响;在试验的基础上,对已有的考虑结构性及各向异性影响的单面边界面模型进行了修正,引入表征初始各向异性程

度的土性修正系数 $A_0$ ;对修正后的边界面模型与传统的屈服面模型进行对比,验证了边界面模型在模拟天然软粘土屈服性状上的优势;通过对一维固结试验、三轴不排水剪切试验以及三轴排水应力路径剪切试验的模拟,验证了模型的合理性。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 龚晓南,熊传祥,项可祥,等. 粘土结构对其力学性质的影响及形成原因分析[J]. 水利学报,2000(10):43-47.  
GONG Xiao-nan, XIONG Chuan-xiang, XIANG Ke-xiang, et al. The Formation of Clay Structure and Its Influence on Mechanical Characteristics of Clay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(10):43-47.
- [2] MESIR G. Discussion: New Design Procedure for Stability of Soft Clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1975, 101(4):409-412.
- [3] BURLARD J B. On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays[J]. Geotechnique, 1990, 40(3):329-378.
- [4] SMITH P R, JARDINE R J, HIGHT D W. The Yielding of Bothknennar Clay [J]. Geotechnique, 1992, 42(2):257-274.
- [5] CALLISTO L, CALABRESI G. Mechanical Behaviour of a Natural Soft Clay[J]. 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[J]. 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[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6):651-656.  
XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil Structure Characteristics and New Approach in Research on Its Quantitative Parameter[J]. 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[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1):95-97.  
SHEN Zhu-jiang. An Elasto-plastic Damage Model for Cemented Clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1):95-97.
- [9] TAVENAS F, LEROUEIL S. Laboratory and Its Stress-strain-time Behavior of Soft Clays: A State-of-the-art [C]//ISSMGE. International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils. Mexico City: Sociedad Mexicanade Mecanica de Suelos, 1987:3-48.
- [10] LADD C C, FOOTT R. The Behavior of Embankment on Clay Foundation: Discussion [J]. Canadian

- Geotechnical Journal, 1980, 17(3): 454-460.
- [11] 王洪瑾, 张国平, 周克骥. 固有和诱发各向异性对击实粘性土强度和变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 1-10.
- WANG Hong-jin, ZHANG Guo-ping, ZHOU Ke-ji. Effects of Inherent and Induced Anisotropy on Strength and Deformation Characteristics of Compacted Cohesive Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 1-10.
- [12] DIAZ-RODRIGUEZ J A. Yielding of Mexico City Clay and Other Natural Clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(7): 981-995.
- [13] 沈恺伦, 王立忠. 天然软黏土屈服面及流动法则试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 119-127.
- SHEN Kai-lun, WANG Li-zhong. Experimental Study on the Yield Surface and Flow Rule of Natural Clays[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 119-127.
- [14] WHEELER S J. An Anisotropic Elasto-plastic Model for Soft Clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 403-418.
- [15] VAUNAT J, GENS A. Bond Degradation and Irreversible Strains in Soft Argillaceous Rock [C]// ISSMGE. Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. London: ISSMGE, 2003: 479-484.
- [16] 沈珠江. 结构性粘土的堆砌体模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 1-4.
- SHEN Zhu-jiang. A Masonry Model for Structured Clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 1-4.
- [17] 刘恩龙, 沈珠江. 结构性土的二元介质模型[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 391-395.
- LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Binary Medium Model for Structured Soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 391-395.
- [18] ZENTAR R, KARSTUNEN M, WHEELER S J. Influence of Anisotropy and Deconstruction on Undrained Shearing of Natural Clays[C]//ENPC. Proceedings of the 5th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. Paris: ENPC, 2002: 21-26.
- [19] ROUAINIA M, MUIR WOOD D. A Kinematic Hardening Constitutive Model for Natural Clays with Loss of Structure[J]. Geotechnique, 2000, 50(2): 153-164.
- [20] KAWADAS M, AMOROSI A. A Constitutive Model for Structured Soils[J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 263-273.
- [21] 周 成, 沈珠江, 陈生水, 等. 结构性土的次塑性扰动状态模型[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 435-439.
- ZHOU Cheng, SHEN Zhu-jiang, CHEN Sheng-shui, et al. A Hypoplastic Disturbed State Model for Structured Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 435-439.
- [22] 雷华阳, 姜 岩, 陆培毅. 循环荷载作用下软粘土的强度判别标准试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6): 54-58.
- LEI Hua-yang, JIANG Yan, LU Pei-yi. Test on Shear Strength Criterion of Soft Soil Under Cyclic Loading[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 54-58.
- [23] 樊恒辉, 高明霞, 李 鹏, 等. 粘土分散性的判别试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(2): 76-80.
- FAN Heng-hui, GAO Ming-xia, LI Peng, et al. Experimental Study on Clay Dispersibility[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2): 76-80.
- [24] 谭昌明, 徐日庆, 周 建, 等. 软粘土路基沉降的一维固结反演与预测[J]. 中国公路学报, 2002, 15(4): 14-16.
- TAN Chang-ming, XU Ri-qing, ZHOU Jian, et al. Settlement Back-analysis and Prediction for Soft Clay Ground of Embankment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(4): 14-16.
- [25] 魏 星, 黄茂松. 天然结构性黏土的各向异性界面模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1224-1229.
- WEI Xing, HUANG Mao-song. Anisotropic Bounding Surface Model for Natural Structured Clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1224-1229.
- [26] 柳艳华, 黄茂松, 李 帅. 循环荷载下结构性软黏土的各向异性界面模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1065-1071.
- LIU Yan-hua, HUANG Mao-song, LI Shuai. An Anisotropic Bounding Surface Model for Structured Soft Clay Under Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1065-1071.
- [27] LING H I, YUE D, KALIAKIN V N, et al. Anisotropic Elastoplastic Bounding Surface Model for Cohesive Soils[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 129(7): 748-758.