

# 结构性海积软土强度与变形时效特性试验研究\*

杨爱武<sup>1,2</sup>, 吴磊<sup>1</sup>

(1. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要:** 以天津地区海积软土为研究对象, 在不同固结压力、不同固结时间作用下开展分别加载的一维固结试验, 对固结后的原状样与相应重塑样进行微型十字板剪切测试, 分析海积软土强度和变形特性受固结压力、固结时间及结构性等因素的影响。试验结果表明: 天津海积软土在短时间固结作用下, 强度和变形时效特性表现明显, 且受结构性影响显著; 在长时间固结作用下, 土的强度和变形随固结压力和固结时间均呈衰减型增长, 结构性对其影响程度随时间增长在减小; 长期强度与土的初始强度、固结压力和时间有关, 随土的初始强度和固结压力的增大而增大, 而强度随时间增长达到最大值后又随之降低。

**关键词:** 时效性; 抗剪强度; 固结; 分别加载; 结构性

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2015)04-0919-07

## Experimental Study on Time-dependent Strength and Deformation of Structured Marine Soft Soil

Yang Aiwu<sup>1,2</sup>, Wu Lei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Characteristic and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P. R. China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, P. R. China)

**Abstract:** In order to analyze the strength characteristics and deformation characteristics of marine soft soil from the Tianjin region under different consolidation pressures, consolidation times and with different structures, the one-dimensional consolidation test at different consolidation pressures and different consolidation times is carried out, then the miniature vane shear test of the undisturbed sample and reconstituted sample after consolidation is carried out. The results show that, in short time consolidation, the strength and deformation had obvious time-dependence characteristics and were influenced significantly by the structure of soft soil; while in long time consolidation, the strength and deformation of soil with consolidation pressure and consolidation time showed attenuated growth, and its influence by structure reduced over time. The long-term strength is related to initial strength, consolidation pressure and time. It increases with the initial strength and the consolidation pressure, up to a peak then falls with time.

**Keywords:** time-dependent; shear strength; consolidation; respective loading; structure characteristics

## 1 引言

天津沿海地区广泛分布着海积软土, 其具有含

水量高、孔隙比大、抗剪强度低、结构性强等特点。自然界中大部分天然土都有一定的结构性 (Mesri, 1975, Tavenas, Leroueil, 1990<sup>[1,2]</sup>), 结构性是软土

\* 收稿日期: 2014-09-25(修改稿)

作者简介: 杨爱武(1971-), 男, 在站博士后, 教授, 主要从事软土地基处理及土体微观结构研究。E-mail: tulilab@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372291, 51179186)

的一个重要特性,对土的工程性质有强烈的影响(S. Leroueil and P. R. Vaughan, 1990<sup>[3]</sup>),也就是说结构性是决定土力学特性的一个最为根本的内在因素,并影响土的诸多工程特性如强度特性、变形特性等。

近年来,许多学者对软土强度和变形时效特性进行了大量的研究。如孔德金和苗中海<sup>[4]</sup>利用三轴试验针对天津地区软土进行了强度增长规律研究。胡亚元和陈云敏<sup>[5]</sup>通过研究不固结不排水强度、固结不排水强度、固结排水强度指标之间的内在关系,分析了本构模型参数对软黏土固结强度增长的影响。徐宏等<sup>[6]</sup>利用原位十字板试验和 FEM 模拟对真空预压排水固结软土强度增长规律性进行了研究。杨爱武等<sup>[7]</sup>针对天津吹填软土,通过模拟现场环境研究上覆压力及排水条件对吹填土强度的影响。刘莹等<sup>[8]</sup>以压缩试验和微观结构量化数据为基础,系统地分析了吹填土沉积固化后结构强度的增长机理,并提出了吹填土结构强度的概念。成玉祥等<sup>[9]</sup>针对天津滨海吹填土,通过分析等效荷载、有效应力增量、孔隙比和含水量与结构强度之间的关系,研究影响天津滨海吹填土结构强度增长的因素。陈晓平等<sup>[10]</sup>通过对软土变形机理进行的一系列室内试验,从固结和蠕变两方面对软土变形时效特性进行研究。尹振宇等<sup>[11]</sup>基于 Perzyna 超应力理论与修正剑桥模型,建立了一个能够模拟软土时效特性的简单的弹黏塑性本构模型。

现有研究成果多是针对软土在不同条件下强度增长规律性和变形时效性的研究,并未考虑结构性对软土的强度和变形时效性影响。已有研究成果表明,天津海积软土是一种结构性土<sup>[12]</sup>,而结构性对土体力学行为有着重要影响,所以,研究考虑结构性影响的海积软土强度与变形时效特性是一个不容忽视的问题。

本文针对天津滨海结构性海积软土,利用单向固结仪和微型十字板剪力仪开展不同固结压力和不同固结时间下的一维固结试验和微型十字板剪切试验,通过研究软土固结压力、固结时间与变形和强度之间的关系,分析其强度与变形时效特性及受结构性因素的影响,得出的一些结论对工程实践有一定指导意义。

## 2 土的物理性质及结构特性

试验土样取自天津滨海新区临港工业区吹填

场地,上部 2.0~4.0 m 为吹填土,下部为海积软土。为尽量减少因深度不同对软土的强度和变形的影响,选择同一深度下的海积软土,取土深度为 11.8~12.2 m。其基本物性指标如表 1 所示,一维固结试验成果见图 1。

表 1 海积软土物性指标

含水量 $w$ /%	密度 $\rho$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )	比重 $G_s$	液限 $w_L$ /%	塑性指数 $I_p$	孔隙比 $e$	灵敏度 $r$
39.7	1.85	2.73	43.2	21.6	1.058	3.24

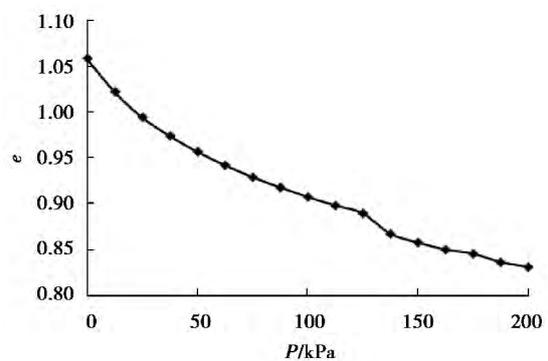


图 1 一维固结  $e-P$  曲线

Fig. 1 The  $e-P$  curve of one-dimensional consolidation

从图 1 中可以看出,土体在固结过程中存在明显结构屈服应力,应力值约为 125 kPa,在此处一维固结曲线发生明显转折,具有典型结构性粘土压缩曲线特征<sup>[13]</sup>,也就是说天津地区海积软土本身是一种结构性土。当固结压力超过结构屈服应力时,土颗粒间的胶结作用<sup>[14]</sup>遭到破坏彼此之间发生滑移,土体的结构开始发生突变和破坏,从而导致土工程性质发生改变。

## 3 试验方案

土体的固结是指在荷载作用下内部孔隙水逐渐排出,体积逐渐减小的现象<sup>[15]</sup>。本文对原状土和相应重塑土样进行分别加载的一维固结试验,再对每一个固结后的土样做微型十字板剪切试验测其抗剪强度。分别加载<sup>[16]</sup>就是对同一种土样,在相同仪器和相同的试验条件下,进行不同压力水平下的一维固结试验。由于软土在承受低于和高于结构屈服应力的压力时,力学特性表现出较大的差异,故在结构屈服应力 125 kPa 前后加密了加荷等级来研究土体在结构破坏前后力学性质的变化规律。为了研究土的强度和变形特性在不同固结时

间下的变化规律,对原状和重塑土分别作了四组不同固结时间下的一维固结试验及相应微型十字板剪切试验,试验方案详见表 2。

表 2 一维固结试验方案

Table 2 One-dimensional consolidation test scheme

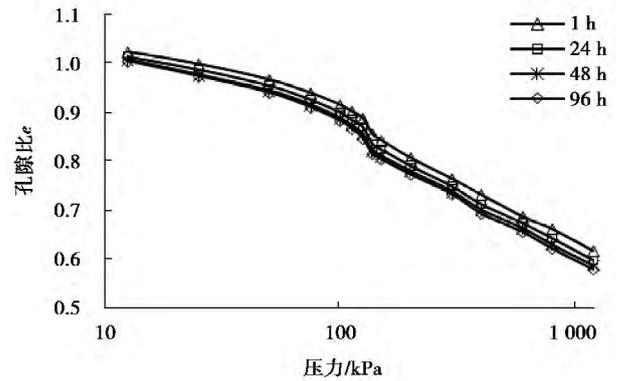
试验方法	加载方式	分别加载等级 /kPa	分别加载时间 /h
一维固结试验	分别加载	12.5	1/24/48/96
		25	1/24/48/96
		50	1/24/48/96
		75	1/24/48/96
		100	1/24/48/96
		112.5	1/24/48/96
		125	1/24/48/96
		137.5	1/24/48/96
		150	1/24/48/96
		200	1/24/48/96
		300	1/24/48/96
		400	1/24/48/96
600	1/24/48/96		
800	1/24/48/96		
1200	1/24/48/96		

### 4 试验结果及分析

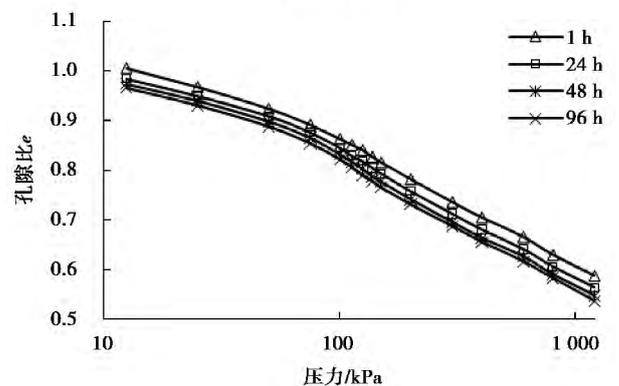
#### 4.1 一维固结变形特性

通过不同固结时间下分别加载的一维固结试验,可以得出软土在不同固结压力下的变形特性。一维固结等时曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出,分别加载原状土  $e-\log P$  曲线具有明显的屈服点,可以分成平缓段、陡降段和趋于重塑土压缩曲线段,体现出原状土有很强的结构性。而重塑土由于不受结构性影响,其初始一维固结曲线近似为一条直线,但随固结时间的增长重塑土被压密程度也在增长,颗粒之间逐渐形成了一定的胶结强度<sup>[17]</sup>,在曲线上表现出一定的弯曲,并且随时间的增长弯曲程度在增大,说明重塑土在固结作用下正处在一个结构再生的过程中。对于同一固结压力下,原状土孔隙比  $e$  要比相应重塑土的大,这说明土在沉积过程中颗粒之间相互粘结并产生胶结强度,使原状土保持较大孔隙。

Burland<sup>[18]</sup>定义的附加孔隙比就是用来描述原



(a) 原状土



(b) 重塑土

图 2 一维固结等时曲线

Fig. 2 Isochronous curves of one-dimensional consolidation of natural soil and remolded soil. The difference in pore ratio between natural soil and remolded soil at the same consolidation pressure is shown. The additional pore ratio and consolidation pressure isochronous curves under different consolidation times are shown in Figure 3.

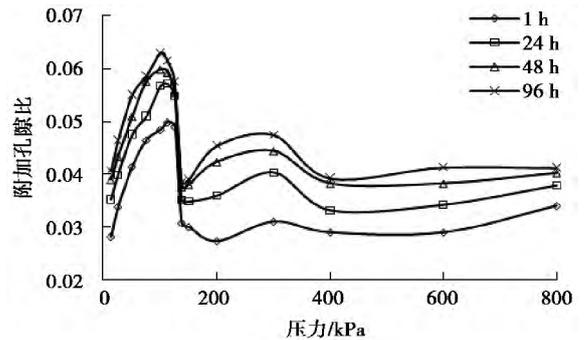


图 3 附加孔隙比与固结压力等时曲线

Fig. 3 Isochronous curves of additional pore ratio vs consolidation pressures

图 3 表明,相同固结压力下随时间的增长附加孔隙比值在变大,并且在结构屈服应力点前后附加孔隙比发生突变:在相同固结时间内附加孔隙比先是随固结压力的增长在缓慢增大达到结构屈服点后发生骤减,之后又保持相对稳定的值不变。可见原状土在结构破坏之前依靠颗粒间胶结作用维

持孔隙比在较小的范围内变化,当结构发生破坏时土体较大的孔隙比不能再继续维持而发生骤减,此后孔隙比的变化速率趋于稳定,土体性质趋于重塑。

#### 4.2 一维固结强度特性

微型十字板剪力仪<sup>[19,20]</sup>是一种简单的机械式土工测量仪器,能在室内对适度土质的抗剪强度进行快速检测。它利用力的传递,将指针、扭筒、扭力弹簧及剪力板四者与被测土质有机地联系在一起,并记录各种土质的抗剪强度。通过对单向固结后的原状和重塑土样的微型十字板测试,得到不同固结时间下的十字板抗剪强度与固结压力关系等时曲线如图 4 所示。

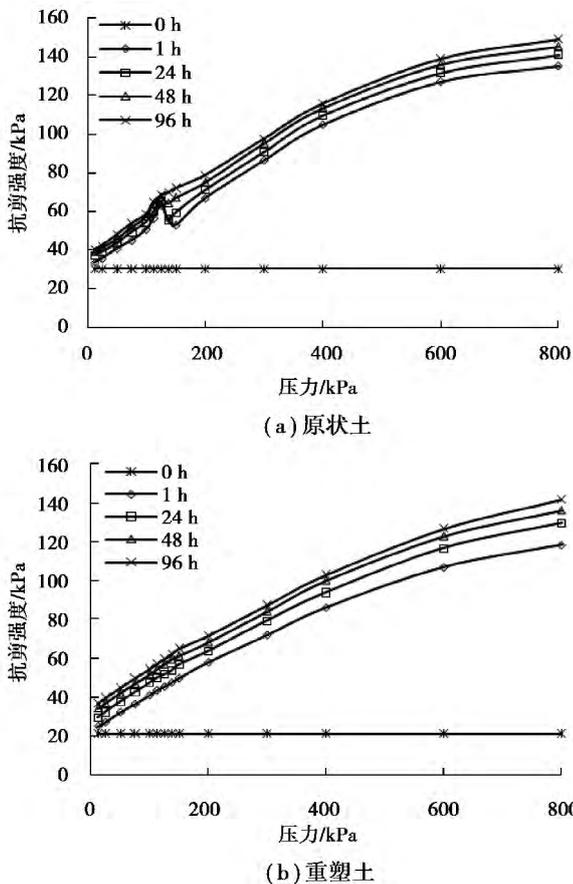


图 4 抗剪强度与固结压力等时曲线  
Fig. 4 Isochronous curves of shear strength vs consolidation pressures

由图 4 可知,原状土的抗剪强度总体趋势随固结压力的增大而增大,在结构屈服应力附近发生明显转折:土的抗剪强度先是陡降然后随固结压力的增长再次变大,说明结构破坏对土体的抗剪强度在短时间内产生明显影响,使其迅速降低。而抗剪强度随固结压力再次增长表明结构破坏后土体被

再次压密,并且压密程度随时间的增长也在增长。重塑土在较小固结压力作用下,短时间内,抗剪强度与固结压力表现出比较好的线性增长关系;随着固结时间增长,曲线表现出一定的弯曲且弯曲程度随时间的增长在增大,表明土体随固结时间增长在被压密的同时部分土颗粒之间形成一定的联结,表现出微弱的结构性。在较大固结压力下,抗剪强度增速变慢曲线趋于平缓,呈现衰减型增长,表明土体随固结压力增长被压密程度在增大,更多土颗粒之间形成的联结作用随之增强,即土体结构性增强。由于土体结构性的增强对土体被压密起到一定的抑制作用,使得抗剪强度随固结压力增长曲线呈衰减型增长。

从图 4(a) 还可以发现,曲线在结构屈服应力附近处的明显转折在随固结时间的增长变得越发平缓。也就是说,固结作用可以降低甚至消除结构性对土体强度的影响<sup>[21]</sup>。结构强度<sup>[22]</sup>是土结构在生成过程中形成的一种胶结性的联结强度,是结构性黏土特有的,伴随土体结构的生成而生成,土体结构的破坏而消失。本文把相同固结条件下原状土的强度与重塑土的强度之差称为土的附加结构强度。图 5 为土的附加结构强度与固结压力关系等时曲线。

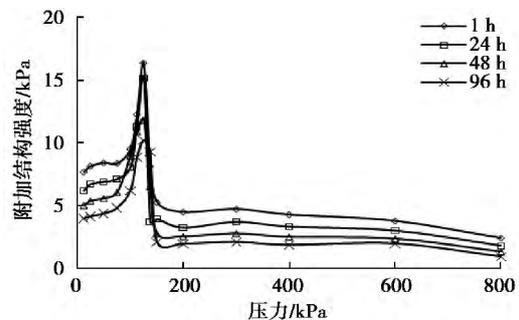
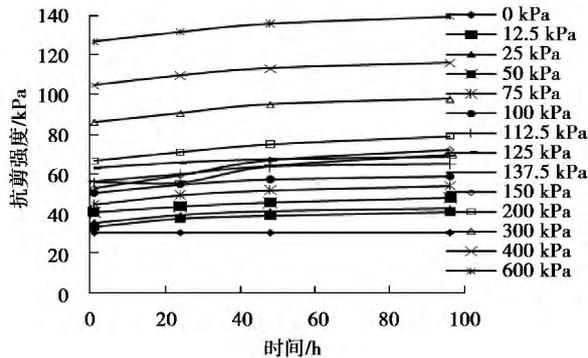


图 5 附加结构强度与固结压力等时曲线  
Fig. 5 Isochronous curves of additional structural strength vs consolidation pressures

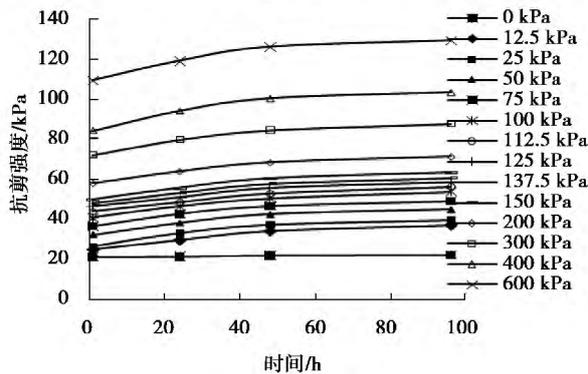
从图 5 中可以看出,加载初期土体附加结构强度随固结压力的增大而逐渐增大,在结构屈服应力附近发生陡升和陡降,说明原状土强度在临近结构破坏前增长较快,这一结论从图 4(a) 也可得出。土附加结构强度在结构破坏后随固结压力和固结时间的增长缓慢减小,逐渐趋近于 0,但始终保持在横轴上方。由此得出,虽然原状土结构性破坏,但是土颗粒之间的胶结作用并未被完全丧失,仍保持微弱的结构性。

图 6 为不同固结压力下原状土和重塑土的抗

剪强度与固结时间关系曲线。



(a) 原状土



(b) 重塑土

图 6 不同压力下抗剪强度与固结时间关系曲线

Fig. 6 Shear strength vs consolidation times curves under different pressures

图 6 表明,土样在加载初期强度增长速率较大且重塑土大于原状土,之后随固结时间增长强度增长趋于稳定,呈衰减型增长。在相同固结条件下原状土抗剪强度始终大于重塑土,这种情况在固结压力较小时(即土体结构破坏之前)表现相对明显。原因在于原状土颗粒之间的联结作用未被破坏即使在变形很小的情况下仍可以保持很高的强度。对比图 4 和图 6 可以发现,在有侧限条件下固结压力和固结时间都会促进土体强度的增长,且均呈衰减型增长。

### 4.3 长期强度

在实际工程中评价土体稳定性时,必须要考虑土体因蠕变而产生的强度变化问题。所以在计算中要引进长期强度,而不是用短期强度来确定实际的安全系数。本文通过对图 6 所示不同固结压力下抗剪强度与固结时间关系曲线的拟合,得出长期强度表达式:

$$P_t = e^{a+bt+ct^2} \quad (1)$$

式中:  $P_t$  为长期强度;  $t$  为固结时间;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为拟合参数,具体参数值见表 3、表 4。

表 3 原状土不同压力下抗剪强度与固结时间关系

曲线拟合参数表

Table 3 Fitting parameters for shear strength vs consolidation times curves under different pressures of undisturbed soils

压力/kPa	拟合参数			R
	a	b	c	
12.5	3.507 27	0.004 56	-2.68E-5	0.934 84
25	3.563 95	0.004 51	-2.76E-5	0.976 64
50	3.699 07	0.003 22	-1.49E-5	0.997 62
75	3.799 03	0.004 33	-2.50E-5	0.982 21
100	3.917 68	0.003 74	-2.24E-5	0.995 08
112.5	4.020 22	0.003 74	-2.23E-5	0.980 61
125	4.139 64	0.001 94	-1.10E-5	0.995 15
137.5	4.002 4	0.002 71	-1.56E-6	0.736 71
150	3.951 8	0.006 76	-3.49E-5	0.989 61
200	4.193 58	0.003 19	-1.43E-5	0.999 69
300	4.452 01	0.002 79	-1.49E-5	0.994 17
400	4.648 01	0.002 28	-1.24E-5	0.999 92
600	4.840 62	0.001 88	-9.29E-6	0.998 82

表 4 重塑土不同压力下抗剪强度与固结时间关系

曲线拟合参数表

Table 4 Fitting parameters for shear strength vs consolidation times curves under different pressures of reconstituted soils

压力/kPa	拟合参数			R
	a	b	c	
12.5	3.202 59	0.009 03	-4.99E-5	0.997 64
25	3.273 64	0.010 5	-6.54E-5	0.993 35
50	3.463 37	0.008 44	-5.13E-5	0.998 21
75	3.590 11	0.007 47	-4.52E-5	0.992 34
100	3.707 39	0.006 12	-3.41E-5	0.997 31
112.5	3.774 75	0.005 27	-2.76E-5	0.998 69
125	3.831 69	0.004 97	-2.66E-5	0.994 05
137.5	3.862 11	0.005 32	-2.94E-5	0.998 85
150	3.899 72	0.005 65	-3.21E-5	0.999 52
200	4.055 02	0.004 79	-2.72E-5	0.999 72
300	4.273 98	0.004 72	-2.78E-5	0.996 3
400	4.426 38	0.005 42	-3.39E-5	0.994 99
600	4.689 72	0.004 3	-2.63E-5	0.995 63

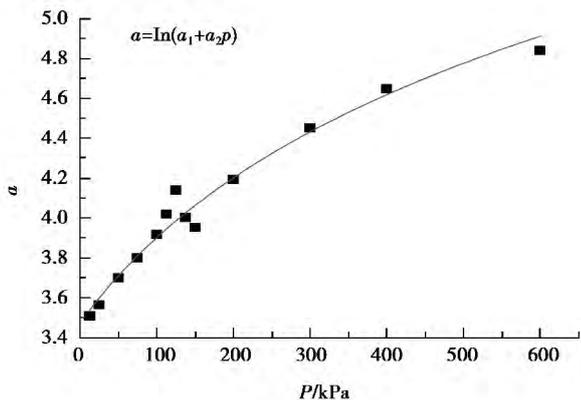
从表 3 可以发现拟合优度  $R$  普遍大于 0.99,说明用复合指数函数拟合有很高的吻合度,拟合参数  $b$ 、 $c$  值都非常趋近于 0,表明参数  $b$ 、 $c$  对长期强度影响较小,即长期强度  $P_t$  随时间  $t$  增长非常缓

慢,并且增长速率随时间增长在减小。从式(1)得出,长期强度  $P_l$  与时间  $t$  呈复合指数函数关系。当时间  $t = -b/2c$  时  $P_l$  达到最大值,当  $t > -b/2c$  时,  $P_l$  值随时间的增长而缓慢减小,说明土体的长期强度随时间增长达到最大值后又随之降低。而国内外的学者对长期强度的认识分歧很大,主要有以下 4 种学派:①长期强度降低派,持这种论点的学者较多;②长期强度提高派;③长期强度不变派;④长期强度不定派。笔者认为土的长期强度要根据具体的条件,通过理论分析和计算才能下结论。本文通过试验得出的结论与①长期强度降低的观点相一致。

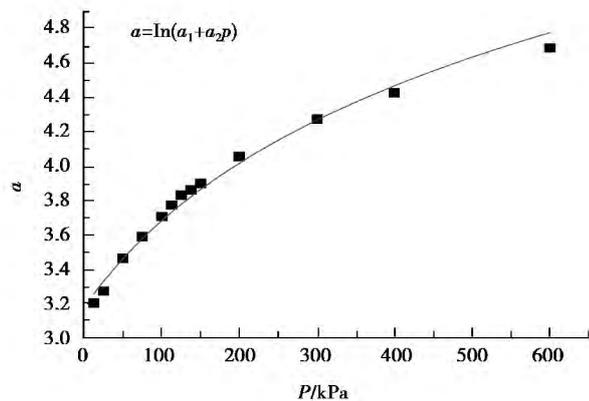
从式(1)中还可以发现,  $P_l$  的大小主要取决于参数  $a$  值的大小,通过对表 3、4 中参数  $a$  和压力值的拟合得出参数  $a$  与压力呈简单的对数函数关系,表达式:

$$a = \ln(a_1 + a_2 p) \quad (2)$$

参数  $a$  和压力  $P$  的关系如图 7 所示,拟合参数见表 5。



(a) 原状土



(b) 重塑土

图 7 参数  $a$  与固结压力拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of parameter  $a$  and consolidation pressures

把参数  $a$  的式(2)代入式(1)中可以得出长期强度  $P_l$  关于压力  $P$  和时间  $t$  的表达式:

$$P_l = (a_1 + a_2 p) \cdot e^{bt+ct^2} \quad (3)$$

由于参数  $a_2$  值较小,且原状土与重塑土变化不大,故长期强度  $P_l$  的大小主要取决于参数  $a_1$  和固结压力  $P$ 。当  $P, t$  同时为 0 时,  $P_l = a_1$ ,即  $a_1$  为土初始强度。用式(3)计算不同压力、不同时间下的长期强度值,得到的计算值与试验值有很好的吻合度,说明用式(3)计算天津海积软土的长期强度是适宜可行的。

表 5 参数  $a$  与固结压力拟合参数表

Table 5 Fitting parameters of parameter  $a$  and consolidation pressures

土样	拟合参数		R
	$a_1$	$a_2$	
原状	32.175 29	0.172 99	0.970 85
重塑	24.002 5	0.158 16	0.987 87

## 5 结 论

(1) 结构性海积软土分别加载的一维固结试验曲线可以分为三段:初始平缓段、陡降段和重塑土平行段,在结构屈服应力点前后附加孔隙比发生突变,并且其增长速率随时间的增长在减小。

(2) 天津海积软土在短时间(1 h)固结作用下,强度和变形随时间增长变化明显,且受结构性影响显著;在较长时间(96 h)固结作用下,软土的强度和变形随固结压力和固结时间均呈衰减型增长,结构性对其影响程度随时间增长在减弱,当固结时间足够长时,可以忽略结构性对强度和变形的影响。

(3) 天津海积软土长期强度值的大小与土的初始强度、固结压力和时间有关,随土的初始强度和固结压力的增大而增大。在一定的固结压力下,长期强度与时间呈复合指数函数关系,强度随时间增长到最大值后又随之降低。

### 参考文献(References)

- [1] Mesir, G. Discussion Geotech [J]. Div. ASCE GT4, 1975, 409-412.
- [2] Tavenas, F. and Leroueil, S.. Laboratory and in situ stress-strain-time behavior of soft clays-state-of-the-paper [A]//Int. Symp. Geotech. Engng. Soft soils [C]. Mexico City 2, 1990.
- [3] S. Leroueil and P. R. Vaughan. The general and Congruent effects of structure in natural soil and weak rock [J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 467-488.
- [4] 孔德金, 苗中海. 软粘土抗剪强度增长规律[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 757-759. (Kong Dejin, Miao Zhonghai. The regularity of shear strength increment for

- soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 757-759. (in Chinese)
- [5] 胡亚元,陈云敏. 本构模型与软黏土强度增长的关系研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(6): 731-735. (Hu Yayuan, Chen Yunmin. Research on correlation between soil model and shear strength gain in staged construction [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition) 2004, 38(6): 731-735. (in Chinese))
- [6] 徐宏,邓学均,齐永正,等. 真空预压排水固结软土强度增长规律性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 285-290. (Xu Hong, Deng Xuejun, Qi Yongzheng et al. Development of shear strength of soft clay under vacuum preloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 285-290. (in Chinese))
- [7] 杨爱武,闫澍旺,杜东菊,等. 上覆压力及排水条件对吹填软土强度影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 172-178. (Yang Aiwu, Yan Shuwang, Du Dongju, et al. Effects of overburden pressure and drainage conditions on strength of soft dredger fills [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 172-178. (in Chinese))
- [8] 刘莹,肖树芳,王清. 吹填土沉积固化后结构强度增长的机理分析[J]. 同济大学学报, 2003, 31(11): 1295-1298. (Liu Ying, Xiao Shufang, Wang Qing. Mechanism analysis of increase in structural strength of solidified dredger fill [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(11): 1295-1298. (in Chinese))
- [9] 成玉祥,杜东菊,张骏. 天津滨海吹填土结构强度增长机理[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(1): 45-49. (Cheng Yuxiang, Du Dongju, Zhang Jun. Research on the structural strength growth mechanism of seashore hydraulic fill in Tianjin area [J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(1): 45-49. (in Chinese))
- [10] 陈晓平,朱鸿鹄,张芳枝,等. 软土变形时效特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2142-2148. (Chen Xiaoping, Zhu Honghao, Zhang Fangzhi, et al. Experimental study on time-dependent deformation of soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2142-2148 (in Chinese))
- [11] Yin Zhenyu, Zhang Dongmei, Hang Hongwei, et al. Modelling of time-dependent behaviour of soft soils using simple elasto-viscoplastic model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 880-888.
- [12] 杜东菊,杨爱武,赵建军,等. 天津滨海软土[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (Du Dongju, Yang Aiwu, Zhao Jianjun et al. Soft fill of Tianjin Binhai area [M]. Beijing: Science Press 2012. (in Chinese))
- [13] 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 Tielin, Zhou Cheng, Shen Zhujiang. Compression and shear test of structured clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 31-35. (in Chinese))
- [14] 杨爱武,闫澍旺,杜东菊. 蠕变条件下吹填软土结构强度形成研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6): 62-67. (Yang Aiwu, Yan Shuwang, Du Dongju. A study of the formation of structure yield stress subject to creep of the soft dredger fill [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(6): 62-67. (in Chinese))
- [15] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (Qian Jiahuan, Yin Zongze. Theory and calculation method in geotechnique [M]. Beijing: Chinese Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [16] 张静娴,杨爱武,张彦,等. 天津海积软土蠕变特性试验研究[J]. 天津城市建设学院学报, 2010, 16(2): 102-106. (Zhang Jingxian, Yang Aiwu, Zhang Yan et al. Experimental study on creep characteristics of Tianjin marine soft soil [J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2010, 16(2): 102-106. (in Chinese))
- [17] 王立忠,丁利,陈云敏,等. 结构性软土压缩特性研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 46-53. (Wang Lizhong, Ding Li, Chen Yunmin, et al. Study on compressibility of structured soft soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4): 46-53. (in Chinese))
- [18] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clays [J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329-378.
- [19] 孟令福. 微型十字板的应用实践[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(5): 112-112. (Meng Lingfu. Application practice of miniature vane [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(5): 112-112. (in Chinese))
- [20] 贾文祥. 微型十字板剪力仪在软土测试中的应用[J]. 水文地质工程地质, 1986(6): 46-47. (Jia Wenxiang. Miniature vane shear test instrument in soft soil applications [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1986(6): 46-47. (in Chinese))
- [21] 陈晓平,曾玲玲,吕晶,等. 结构性软土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3223-3228 (Chen Xiaoping, Zeng Lingling, Lv Jing, et al. Experimental study of mechanical behavior of structured clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3223-3228 (in Chinese))
- [22] 杜东菊,杨爱武,刘举,等. 天津滨海吹填土[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (Du Dongju, Yang Aiwu, Liu Ju et al. Dredger fill of Tianjin Binhai area [M]. Beijing: Science Press 2010. (in Chinese))