

上海软土的流变特性试验研究

孙德安, 申海斌
(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 本文利用无侧向变形的单向压缩试验仪, 对原状和重塑上海软土进行了压缩试验和流变试验, 研究了不同压力和超固结比对次固结系数的影响以及压缩特性和次固结变形特性的关系。试验结果表明, 原状上海软土的次固结系数随着压力而变化, 而重塑上海软土的次固结系数随压力变化不大。上述研究得到的结论及相关参数可为工程实践、上海软土流变模型的建立提供参考数据。
关键词: 上海软土; 次固结系数; 流变特性; 压缩指数
中图分类号: TU411.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3665(2010)03-0074-05

随着社会的进步, 经济的发展, 兴建了大量的社会基础设施。但是, 各种工程问题也就会随之而来, 很多工程事故都与土体的流变有关。比如, 1954 年兴建的上海工业展览馆中央大厅, 因地基约有 14m 厚的淤泥质软粘土, 尽管采用了 7.27m 的箱形基础, 建成后当年就下沉 600mm。1957 年 6 月展览馆中央大厅四角的沉降最大达 1 465.5 mm, 最小沉降量为 1 228 mm。1979 年 9 月时, 展览馆中央大厅平均沉降达 1 600mm, 室内产生严重裂缝^[1]。这么长时间的变形一般认为是软土流变导致的。上海地区城市地面沉降问题、建筑物的不均匀沉降问题以及高速公路工后沉降变形问题等无不与土的流变特性有关^[2]。因此, 研究上海软土的流变特性对建筑设计和施工有一定的实际指导意义。

土的流变一方面是由于土骨架在应力作用下, 由于颗粒表面所吸附的水(气)的粘滞性, 颗粒的重新排列和骨架体的错动引起的; 另一方面是由于土体变形受到边界约束, 这种约束有抵消蠕变变形趋势, 因此土体内部应力必须调整。这些土体变形都与时间有关, 具有时间效应。

本文利用无侧向变形的单向压缩试验仪, 对原状和重塑上海软土进行了压缩试验和流变试验。采用分级加载的方式, 研究了上海软土的压缩特性和次固结变形特性。研究内容主要包括固结压力和超固结比对次固结系数的影响以及压缩特性和次固结变形特性的

关系。

1 试验概况

1.1 试验所用材料

试验用土取自上海浦东地区, 地表以下深度 9 ~ 10m 和 19 ~ 20m 土样编号分别为 A、B, 为上海地区最具代表性的第 4 层淤泥质粘土。为了研究土的压缩变形和次固结变形特性, 首先将现场取来的二种原状样进行了无侧向变形的单向压缩试验和在不同固结压力下次固结压缩试验(流变试验)。然后, 对其重塑样也进行单向试验和不同压力下次固结压缩试验(流变试验), 得到饱和上海原状土和重塑土的流变曲线。重塑土样的制备如下: 将施工现场取来的土样经过长时间浸泡后充分搅拌, 制成饱和泥浆, 然后倒入直径 15cm、高 16cm 的制样桶中, 分级加载, 固结成样。最后一级竖向荷载为 70kPa, 并在此荷载下固结压缩 3 天。然后将土样从固结桶中取出放入密闭容器中储存。试验时, 根据试样尺寸切取固结土样的一部分, 制成试样。原状土样和重塑土样的物理指标分别见表 1、表 2。

表 1 原状上海软土样的物理指标
Table 1 Physical parameters of undisturbed
Shanghai soft clay

编号	初始含水量 <i>w</i> (%)	初始孔隙比 <i>e</i>	饱和度 %	液限 <i>w_L</i> (%)	塑限 <i>w_p</i> (%)	塑性指数 <i>I_p</i>
A	48.0 ~ 51.9	1.28 ~ 1.40	97.0 ~ 100.0	41.4	31.2	10.1
B	38.0 ~ 42.0	1.03 ~ 1.13	98.6 ~ 100.0	43.4	30.9	12.5

1.2 试验仪器

试验采用的是 TK-STC 型台式杠杆高压固结仪,

收稿日期: 2009-09-27; 修订日期: 2009-11-23
作者简介: 孙德安(1962-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事非饱和土力学、岩土工程材料本构模型及数值计算的研究。
E-mail: sundean@shu.edu.com

采用分级加载的方式对上海软土的压缩变形特性及其固结压力和超固结比对次固结系数的影响进行了研究。

表 2 重塑上海软土样的物理指标
Table 2 Physical parameters of remoulded Shanghai soft clay

编号	初始含水量 w (%)	初始孔隙比 e	饱和度 %	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P
A	43.0 ~ 46.0	1.16 ~ 1.24	98.4 ~ 100.0	41.4	31.2	10.1
B	36.0 ~ 38.0	0.97 ~ 1.02	99.2 ~ 100.0	43.4	30.9	12.5

1.3 试验过程

用环刀切取高度 20.0mm、直径 61.8mm 的试样。将切好的土样装入环刀中,然后采用分级加载的方式,加载比为 1。每级荷载以 12h 作为主固结时间。在土样的最后一级荷载下进行流变。在此荷载下分别按 1s,2s,4s,8s,16s,32s …… 方式记录下竖向位移读数,一直保持荷载不变,并根据一定的时间间隔读取竖向位移值。

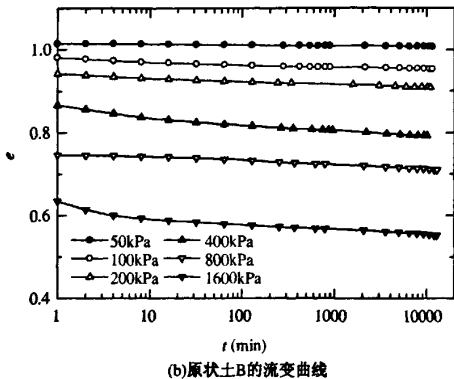
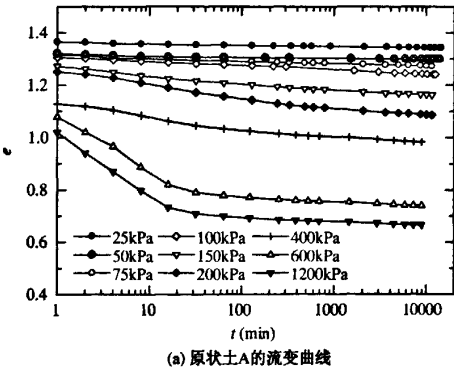


图 1 原状上海软土的流变曲线
Fig.1 Rheological curve of undisturbed Shanghai soft clay

2 试验结果及分析

图 1、图 2 分别表示二种不同深度取来的原状土样和重塑土样在不同荷载下的单向次固结压缩试验结果,用 e - $\log t$ 关系整理。该曲线表示了原状和重塑上海软土在荷载作用下的次固结变形过程。

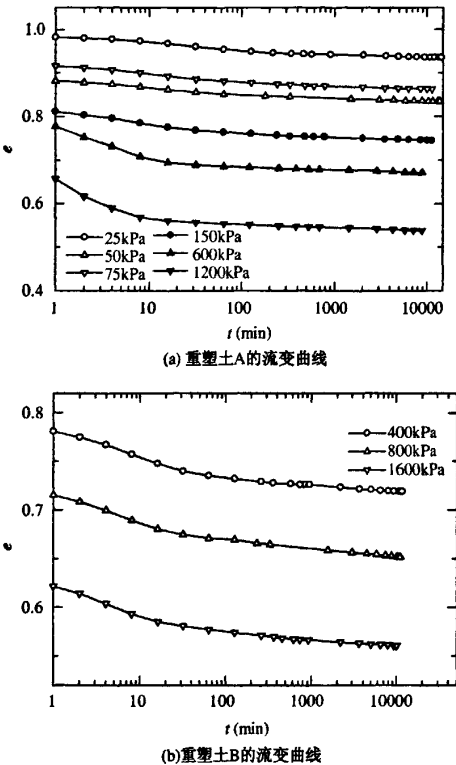


图 2 重塑上海软土的流变曲线
Fig.2 Rheological curve of remoulded Shanghai soft clay

从图 1、图 2 中可以看出,土在刚开始时压缩速度较快,这是由于土中的孔隙水排出而导致土体骨架的压缩,称为主固结。随后,土的压缩速度逐渐减缓,最后达到稳定状态,明显地表现出压缩量与时间有关的特性,通常将这些变形归为流变。它是由于土在有效应力作用下薄膜水体的转化、土颗粒的塑性调整和骨架的流动引起的。

图 3 为上海软土的压缩曲线。可根据卡萨格兰德法计算确定原状土样 A、B 的前期固结压力分别为 88kPa、172kPa。从取样的深度计算,其相应的上覆层自重应力分别为 85kPa、170kPa。由此,可以判断这两种土处于正常固结土状态。

从图 3 中可以明显看出,固结压力相同时,原状土

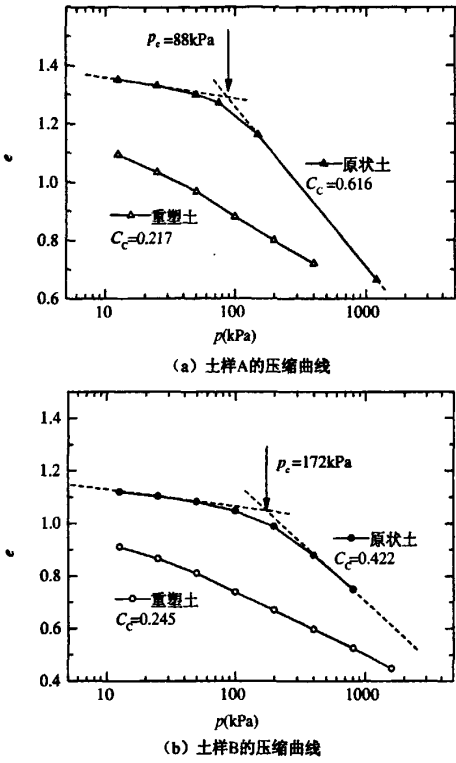


图 3 压缩曲线

Fig.3 Compression curve

比相应的重塑土具有较大的孔隙比,原状土的压缩曲线为一条有明显的屈服点曲线。在结构屈服应力以前,土体的压缩量较小,是土体的回弹再压缩过程,其变形系数与土体回弹曲线斜率接近。当固结压力超过结构屈服应力,其压缩性明显增大。而重塑土的压缩曲线没有明显的屈服点,其压缩曲线近似为一直线,压缩指数 C_c 为一常数。这是因为人工制备土的微结构已完全破坏造成的。从图 3 中还可以看出,随着结构的破坏,原状土的力学特性逐渐向重塑土的力学特性转化。

2.1 次固结系数与固结压力的关系

对于次固结系数与固结压力之间的关系,国内外已有人做了试验研究并得到了一定试验结果。有人认为土的次固结系数与土的最终固结压力无关,但与荷载增量比有关^[3,4]。有人认为土的次固结系数与土的荷载增量比无关,但与土的最终固结压力有关^[5,6]。依据上述试验结果来研究原状上海软土和重塑上海软土的次固结系数与荷载的关系。本文采用下式计算次固结系数:

$$C_s = - \frac{\Delta e}{\log t_2 / t_1} \quad (1)$$

式中: Δe ——次固结压缩阶段的孔隙比变化;

t_1 ——固结完成时刻;

t_2 ——压缩量计算时刻。

根据公式(1)计算的结果,将次固结系数与固结压力整理成图 4。由图可知,原状上海软土 A、B,当压力较小时,次固结系数均随着压力而增大,原状土样 A 在 200kPa 左右,原状土样 B 在 400kPa 左右时次固结系数最大。以后次固结系数随着压力增大而小幅度地减小。次固结系数的最大值不是出现在前期固结压力值的附近而是稍有推后。此结论与余湘娟等^[7]得出的结论一致。其原因可理解为:对于结构软土而言,胶结结构能够约束土骨架的蠕变变形,胶结性越强,对次固结变形的阻碍越强,次固结系数越小。当压力逐渐增大,次固结系数增大,超过土体的结构屈服压力,因土体结构胶结联结逐渐破坏,次固结系数继续增大,但结构性破坏较大时,对次固结的阻碍作用逐渐减弱甚至消失,次固结系数逐渐减小。

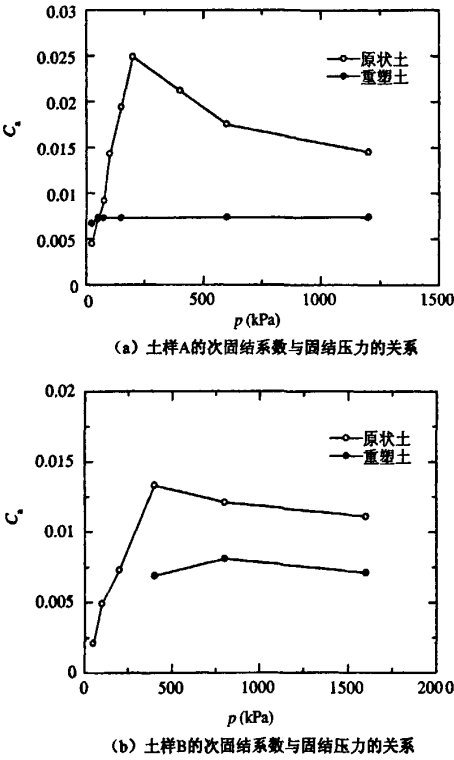


图 4 次固结系数 C_s 与固结压力 p 关系

Fig.4 Relationship between coefficient of secondary consolidation and consolidation pressure

从图 4 还可以看出重塑上海软土的次固结系数变化不大,基本上为一条水平线。考虑到实验过程中的

误差,可认为它们是相等的。这说明重塑上海软土的次固结系数与固结压力无关。因此,重塑上海软土在正常固结状态下的次固结系数与固结压力无关。而此结论与高彦斌等^[3]得出的结论相一致。出现这一现象的原因是重塑土的结构遭到彻底破坏以及几天时间结构没有恢复导致结构没有形成。

2.2 次固结系数与压缩指数的关系

根据图 3 和图 4 所示的数据,可得到重塑土的 C_s/C_c 值以及压力较大(1 000kPa 以上)时原状上海土的 C_s/C_c 值,如图 5 所示。由图 5 知,上海软土次固结系数和压缩指数的比值基本上是常数 $C_s/C_c = 0.0336$ 。Mesri 和 Godlewski^[7](1997)进行了大量的试验得到粘性土的 C_s/C_c 值在 0.03 ~ 0.05 之间。上海饱和粘土试验得到的 $C_s/C_c = 0.0336$ 在这个范围内。但是超固结上海原状土 C_s/C_c 值会小于 0.03。

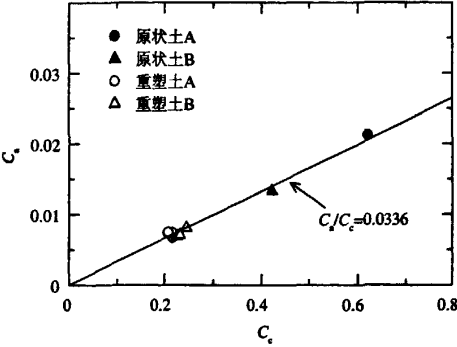


图 5 次固结系数和压缩指数的关系

Fig.5 Relationship between coefficient of secondary consolidation and compression index

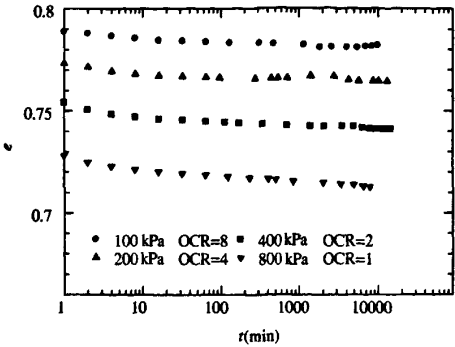
2.3 超固结比与次固结系数的关系

本研究进行了 2 组不同超固结比下原状上海软土的流变试验。2 组试验的最大固结压力分别为 800kPa、1 600kPa。各组进行了 4 次,试验结果如图 6 所示。不同压力下的次固结系数值见表 3。

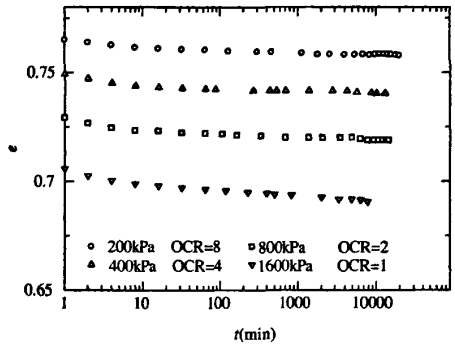
表 3 不同超固结比下的次固结系数

Table 3 Coefficient of secondary consolidation at different overconsolidation ratios

固结压力 σ_v (kPa)	超固结比 OCR	次固结系数 C_s	前期固结压力 p_c (kPa)
100	8	0.00095	800
200	4	0.00102	
400	2	0.0017	
800	1	0.0029	
200	8	0.00086	1 600
400	4	0.0010	
800	2	0.0014	
1 600	1	0.0026	



(a) 前期固结压力 800kPa 时原状上海软土 A 的流变曲线



(b) 前期固结压力 1600kPa 时原状上海软土 A 的流变曲线

图 6 原状上海软土的流变曲线

Fig.6 Rheological curve of undisturbed Shanghai soft clay

把在超固结状态下得到次固结系数和相应的超固结比整理成图 7。由图 7 可见,超固结比对上海软土的次固结变形有显著的影响。即随着超固结比(OCR)的增大,次固结系数 C_s 逐渐减小。

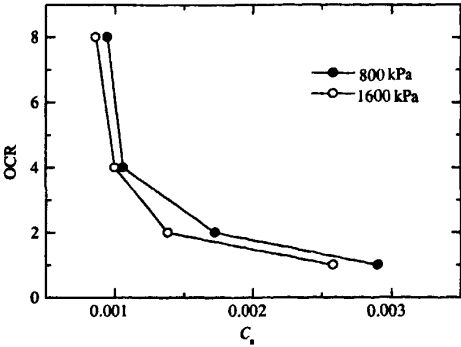


图 7 次固结系数和超固结比的关系

Fig.7 Relationship between coefficient of secondary consolidation and overconsolidation ratio

此外,由图 6(a)、(b)比较可知,前期固结压力不同而围压相同时,其次固结系数 C_s 会随着前期固结压

力的增大而稍微减小。

3 结论

(1) 重塑上海软土的次固结系数与基本压力无关,是常数,其值约为 0.007,正常固结状态下的上海软土的次固结系数要大于此值。

(2) 根据不同压力下原状上海软土的变流试验结果,发现在比前期固结压力大的某一压力时次固结系数数值为最大,比此压力小时次固结系数随着压力的增加而较快地增大,超过此压力后随着压力的增加而次固结系数开始减小,逐渐趋向一稳定值。此稳定值大于重塑上海软土的次固结系数。

(3) 超固结比对上海软土的次固结变形有显著的影响。随着超固结比的增大其次固结系数逐渐减小。

参考文献:

- [1] 谢宁,姚海明. 土流变研究综述[J]. 云南工业大学学报,1999,15(1): 52-56.
- [2] Mesri G, et al. Shear Stress - Strain - Time Behavior of Soils [J]. Geotechnique, 1981, 31(4): 545-552.
- [3] 高彦斌,朱合华,叶观宝,等. 饱和软粘土一维次压缩系数 C_α 值的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 459-463.
- [4] 于新豹,刘松玉,缪林昌. 连云港软土蠕变特性及其工程应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1001-1006.
- [5] 雷华阳,肖树芳. 天津软土的次固结变形特性研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 385-389.
- [6] 余湘娟,殷宗泽,董卫军. 荷载对软土次固结影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 913-916.
- [7] Mesri G, Godlewski P M. Time and stress compressibility interrelationships [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1977, 103(5): 417-430.

Experimental study on rheology behaviour of Shanghai soft clay

SUN De-an, SHEN Hai-e

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: One-dimensional compression tests and secondary consolidation tests on undisturbed and remolded Shanghai soft clays were conducted using oedometer. Effects of the applied pressure and over-consolidated ratio on the coefficient of secondary consolidation and correlation of compression characteristics and secondary consolidation characteristics of Shanghai soft clay are studied. It was found that the coefficient of secondary consolidation of disturbed Shanghai soft clay changes with the applied loading and coefficient of secondary consolidation of remolded Shanghai soft clay is constant and independent on the applied loading. The obtained parameters and conclusions from the investigations above are valuable to engineering practices and the establishment of rheological model for Shanghai soft clay.

Key words: Shanghai soft clay; coefficient of secondary consolidation; rheology behaviour; compression index

责任编辑:张明霞