

# 结构性对上海软土次压缩特性的影响

高彦斌<sup>1,2</sup>, 李 赫<sup>1,2</sup>, 张阿晋<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘 要:** 针对上海地区淤泥质粘土的原状土样(具有凝聚型结构)和重塑土样(具有分散型结构)进行一维压缩试验, 探讨结构性对上海淤泥质软土次压缩特性的影响。结果表明, 具有分散型结构重塑土的压缩指数 $C_c$ 、次压缩系数 $C_\alpha$ 以及 $C_\alpha/C_c$ 为定值, 并不随固结压力的变化而产生明显变化; 但原状土在达到结构屈服强度时, 由凝聚型结构向分散型结构转化, 并造成 $C_c$ 、 $C_\alpha$ 以及 $C_\alpha/C_c$ 值迅速增大直至峰值, 再随着压力的增大而减小。另外, 结构上的大幅调整造成了原状土 $e$ - $\lg p$ 曲线的反S特征不明显。

**关键词:** 软土; 结构性; 次压缩

**中图分类号:** TU411.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-1329(2011)04-0073-05

## 0 引言

土的结构是指土体颗粒的排列方式和粘结程度。软土结构性研究表明, 原状软土通常呈凝聚型结构<sup>[1]</sup>, 如下图1(a)所示, 大部分颗粒之间呈边一面或边一边的接触形式, 因此土的孔隙比较大, 结构性也较强, 当外界荷载超过其结构强度时容易产生较大的压缩变形; 在外界荷载的作用下, 软土的结构性会发生改变, 总体趋势是由图1(a)所示的凝聚型结构向图1(b)所示的分散型结构转化, 分散型结构的土颗粒多以面一面接触为主, 完全被重塑的土往往具有分散型结构<sup>[2]</sup>。



图1 软土的不同结构形式  
Fig.1 Structure forms of soft clay

土体在有效应力恒定的情况下由于土颗粒位置的调整而产生的压缩变形被称为“次压缩”。对次压缩

现象描述最成功的公式是Buisman(1936)提出的时间对数率<sup>[3]</sup>, 如式1所示:

$$\Delta e = C_\alpha \lg\left(\frac{t}{t_p}\right) \quad (1)$$

式中 $C_\alpha$ 为次压缩系数,  $t$ 为时间,  $t_p$ 为主固结结束时间。这个关系的最大价值在于它可以描述任何应

力状态的原状土和重塑土主固结结束后的的次压缩特性, 即只要改变其中的 $C_\alpha$ 值和 $t_p$ 值就可以了。

土的次压缩特性受多种因素的影响, 其中一个重要影响因素就是土的结构性<sup>[4]</sup>。Woo(1977)对人工制备土、Graham(1983)在对渥太华的湖泊沉积粘土的研究结果表明, 原状土的次压缩系数并不像重塑土一样具有一个恒定的值, 而是受压力的影响<sup>[5,6]</sup>。在应力较小时, 次压缩系数随着压力的增大而增大, 当压力达到结构强度时, 增大至最大值。然后随着压力的增大, 次压缩系数逐渐减小至某一恒定的值, 所以结构的损伤和破碎对次压缩系数有一定的影响。我国学者李作勤(1992)对湛江原状土和重塑土的次压缩特性研究结果也表明, 结构性对次压缩系数有一定的影响<sup>[7]</sup>。

上海地区广泛分布着厚度达几十米的软粘土<sup>[8]</sup>。高彦斌等(2004)采用上海饱和软粘土的重塑土样进行室内长期一维压缩试验, 研究了应力历史、加载比及加载时间对次压缩系数的影响, 得到了上海软粘土 $C_\alpha$ 与 $C_c$ 值间的关系<sup>[9]</sup>。徐珊等(2008)对上海地区原状软土进行试验, 分析了不同加荷比、加荷速率对蠕变变形的影响<sup>[10]</sup>。吴宏伟等(2011)通过对上海原状土的一维固结

收稿日期: 2011-10-17

修订日期: 2011-10-29

作者简介: 高彦斌(1973-),男,博士后,副教授,主要从事软土力学及加固研究。

电子邮箱: yanbin\_gao@tongji.edu.cn

联系电话: 021-65983715

基金项目: 国家自然科学基金项目(40702051)



应力接近原状土的结构强度（后面的分析将证明这一点），次压缩过程中土颗粒的结构调整剧烈，由凝聚型向分散型转化，一方面会延缓孔压消散的速度，另外一方面会产生较大的次压缩变形，从而造成 $e-lgt$ 曲线的反S特征不明显而难以确定主固结结束即次压缩开始的时间。而在较高的压力下，由于主固结过程中土的结构调整已大部分完成，主固结结束后的次压缩量较小，因此 $e-lgt$ 曲线呈明显的反S型。

### 2.3 主固结完成即次压缩开始时间

图4给出了利用Casagrande作图法确定的重塑土和原状土的主固结完成即次压缩开始的时间 $t_p$ 。由图4可见，重塑土的主固结完成时间要大于原状土的主固结完成时间，表明重塑土的固结系数小于原状土的固结系数。图4还可看出，随着固结压力 $p$ 的增大，主固结完成时间 $t_p$ 减小，其原因可能是土体压缩造成压缩模量 $E_s$ 的增大，进而造成固结系数的增大和固结时间的减小。

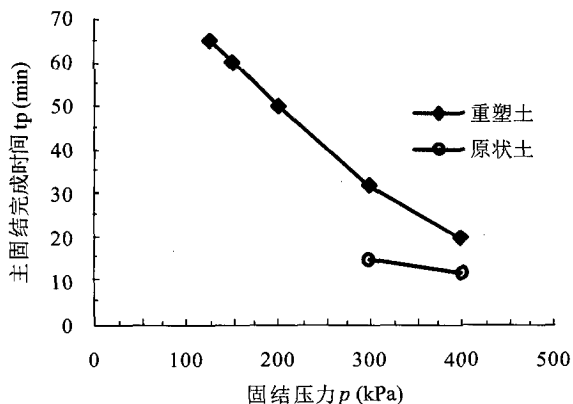


图4 主固结完成时间与固结压力的关系  
Fig.4 Relationship between the time of prime consolidation finished and consolidation pressure

### 2.4 $e-lgp$ 曲线特征

取重塑土与原状土在固结压力 $p$ 为12.5kPa~400kPa共9级荷载的作用下，孔隙比 $e$ 为加载1小时后的数据，可得两组土体的 $e-lgp$ 曲线如图5所示。由图5可以看出，重塑土的 $e-lgp$ 拟合曲线近似为一条直线。根据原状土的 $e-lgp$ 曲线，由Casagrande作图法可确定其结构强度 $p_c=150$ kPa，要明显大于根据取样深度估算出的现场有效自重应力 $p_z=90$ kPa。在结构强度 $p_c$ 附近， $e-lgp$ 曲线的斜率发生较大的变化。

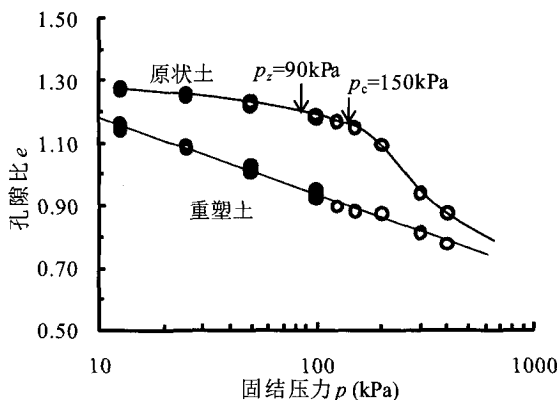


图5 重塑土与原状土的 $e-lgp$ 曲线  
Fig.5 The  $e-lgp$  curve of remolded soil and natural soil

### 2.5 压缩指数 $C_c$ 值

对图5中的数据进一步分析可以得到重塑土的压缩指数 $C_c=0.25$ 。由于原状土的 $e-lgp$ 的压缩指数 $C_c$ 随固结压力变化明显，故取固结压力 $p$ 分别为125kPa、150kPa、200kPa、300kPa和400kPa各点对应的切线斜率为相应压力点的压缩指数 $C_c$ 值。Mesri等(1987)指出压缩指数 $C_c$ 值可以通过两点的割线斜率或一点的切线斜率确定，当采用切线斜率确定压缩指数值时， $C_\alpha$ 与 $C_c$ 的坐标系下可以得到良好的线性拟合关系<sup>[14]</sup>。故本文中采用不同固结压力点处的切线斜率作为原状土的压缩指数（图6）。原状土的 $C_c$ 值呈现随压力增长先增大后减小的趋势。原状土的 $C_c$ 值最大为0.73，要明显大于重塑土的 $C_c=0.25$ 。

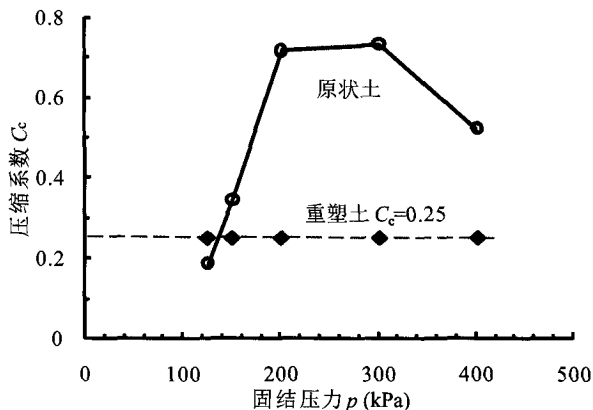


图6 固结指数与固结压力的关系  
Fig.6 Relationship between consolidation index and consolidation pressure

## 3 次压缩特征

### 3.1 次压缩系数 $C_\alpha$ 值

试验得到的重塑土与原状土在不同固结压力作用下的次压缩系数 $C_\alpha$ 值如图7所示。

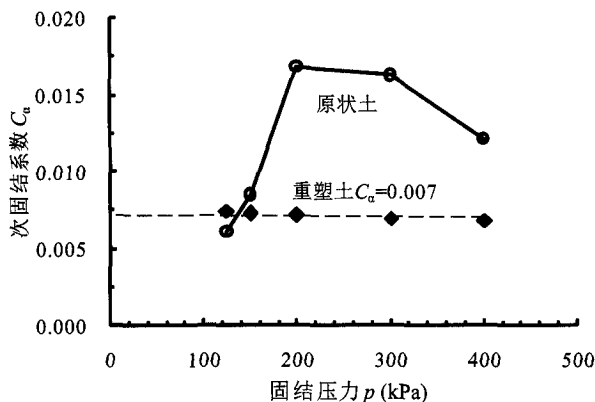


图7 次压缩系数与固结压力的关系

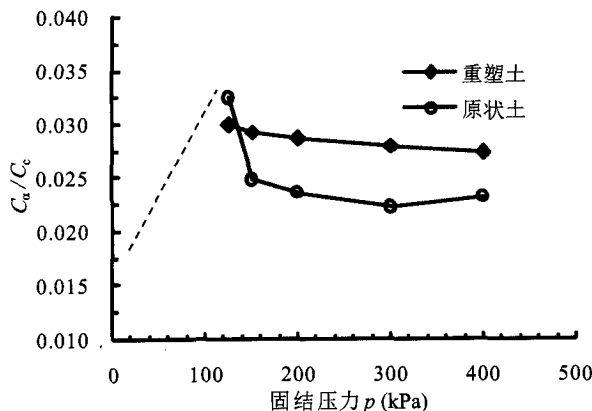
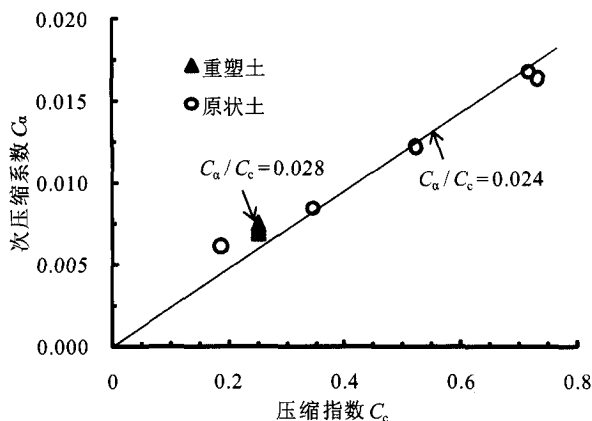
Fig.7 Relationship between coefficient of secondary compression and consolidation pressure

由图可见，重塑土在各级压力下具有一致的分散型结构，故次压缩系数  $C_\alpha$  随固结压力  $p$  的增大变化不大， $C_\alpha$  平均值约为0.007。对于原状土样，随着固结压力  $p$  增大，结构由凝聚型向分散型转化， $C_\alpha$  值出现先增大而后降低的现象。在超过土体的结构屈服强度后，原状土的结构调整剧烈，次压缩系数  $C_\alpha$  迅速增大至峰值。但随着  $p$  的进一步增大，土的结构接近分散型结构，次压缩系数  $C_\alpha$  呈减小的趋势。

试验得到的原状土的最大次压缩系数为0.017，要明显大于重塑土的  $C_\alpha=0.007$ 。

### 3.2 $C_\alpha/C_c$ 值

Mesri和Godlewski(1974)提出的  $C_\alpha/C_c$  概念指出：任何土体在其次压缩阶段，次压缩系数  $C_\alpha$  与其相对应同级压力下的的压缩指数  $C_c$  比值基本为一常数<sup>[15]</sup>。这一概念已被广泛应用于解释和预测土体的次压缩变形。根据试验结果整理的  $C_\alpha/C_c$  值如图8和图9所示。

图8  $C_\alpha/C_c$  与固结压力的关系曲线Fig.8 Relationship between  $C_\alpha/C_c$  and consolidation图9  $C_\alpha$  与  $C_c$  关系Fig.9 Relationship between  $C_\alpha$  and  $C_c$  pressure

由图8可见，重塑土的  $C_\alpha/C_c$  值要略高于原状土。重塑土的  $C_\alpha/C_c$  随压力的变化较小，其平均值约为0.028，略低于魏道堦等(1980)的上海淤泥质粘土（重塑土）的0.0291<sup>[16]</sup>，以及高彦斌等(2004)的两组上海地区淤泥质粘土（重塑土）的0.0328和0.0358<sup>[9]</sup>。原状土的数据要离散一些，在结构强度  $p=150\text{kPa}$  附近  $C_\alpha/C_c$  较大，而后随着压力得增大而呈减小的趋势，Graham(1983)的实验结果亦有此现象<sup>[5]</sup>。淤泥质原状粘土的  $C_\alpha/C_c=0.025$ ，也略低于魏道堦等(1980)的上海淤泥质原状粘土的0.0346<sup>[16]</sup>和吴宏伟等(2011)的上海淤泥质粘土和淤泥质粉质粘土的0.033<sup>[11]</sup>。其原因可能与本文得到的  $C_c$  值较大（最大高达0.73）有关，较大的  $C_c$  值会造成  $C_\alpha/C_c$  值减小。

图9是Mesri和Godlewski推荐的整理  $C_\alpha$  与  $C_c$  数据的方法<sup>[15]</sup>，横坐标为  $C_c$  值，纵坐标为  $C_\alpha$  值，过原点作这些数据点的拟合直线便可以得到一个平均的  $C_\alpha/C_c$  值。从图9可以看出，拟合得到的平均值约为0.025。但是，从该图仍然可以明显看出，重塑土的数据点位于该拟合直线的上方，表明具有略大的  $C_\alpha/C_c$  值，而原状土的数据点具有一定的离散性。

## 4 结论

(1) 重塑土具有单一的分散型结构，在压缩过程中，虽然存在结构调整现象，但结构类型不会产生较大的变化。实测压缩指数  $C_c$ 、次压缩系数  $C_\alpha$  以及  $C_\alpha/C_c$  为一定值，且不随固结压力的变化而变化。本文实测的重塑上海淤泥质粘土的  $C_c=0.25$ ， $C_\alpha=0.007$ ， $C_\alpha/C_c=0.028$ 。

(2) 原状软土的压缩过程是从凝聚型结构向分散型结构的转化过程，在达到结构屈服强度  $p_c$  时，结

构调整剧烈,会造成 $C_c$ 、 $C_\alpha$ 以及 $C_\alpha/C_c$ 值迅速增大到峰值。试验得到的这三个参数的最大值分别为 $C_c=0.73$ ,  $C_\alpha=0.017$ ,  $C_\alpha/C_c=0.032$ 。

(3) 试验得到的上海原状淤泥质粘土的结构屈服强度 $p_c$ 为150kPa。当固结压力与结构屈服强度相近时,由于土颗粒的结构调整剧烈,延缓孔压消散的速度, $e$ - $\lg t$ 曲线的反S特征不明显。

(4) 本文实测的原状土 $C_\alpha/C_c$ 随固结压力会有明显的变化,尽管可以按照Mesri和Godlewski提出的方法可以得到一个平均的 $C_\alpha/C_c$ 值,但数据点较为离散。

#### 参考文献:

- [1] Gong Shi-Liang. The microscopic characteristics of Shanghai soft clay and its effect on soil body deformation and land subsidence[J]. Environmental Geology, 2009,56(6):1051-1056.
- [2] Mitchell J K, Soga K. Fundamentals of soil behavior[M]. John Wiley & Sons, 2005.
- [3] Buisman A S K. Result of long duration settlement test[A]. Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Cambridge:Mass,1936,1:103-107.
- [4] 黄雨,李景琳. 国际工程地质研究中的若干热点科学问题[J]. 上海地质, 2010, 31(2):1-7.
- [5] Woo S M, Moh Z C, Burmungsup T. Effects of soil structure on

compressibility of an artificially sedimented clay[A]. Proceedings, International Symposium on Soft Clay[C]. Bangkok: Asian Institute of Technology, 1977: 311-325.

- [6] Graham J, Crooks J H A, Bell A L. Time effects on the stress-strain behavior of natural soft clays[J]. Geotechnique,1983,33:327-340.
- [7] 李作勤. 软土一维固结变形特性[J]. 岩土力学,1992,13(9):24-36.
- [8] 李晓. 上海地区晚新生代地层划分与沉积环境演化[J]. 上海地质,2009,30(1): 1-7.
- [9] 高彦斌,朱合华,叶观宝,等. 饱和软粘土一维次压缩系数 $C_\alpha$ 值的试验研究[J]. 岩土工程学报,2004,4(7):459-463.
- [10] 徐珊,陈有亮,赵重兴. 单向压缩状态下上海地区软土的蠕变变形与次固结特性研究[J]. 工程地质学报,2008,16(4):495-501.
- [11] 吴宏伟,李青,刘国彬. 上海粘土一维压缩特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011,33(4):630-636.
- [12] 史玉金,陈洪胜,杨天亮,等. 上海市工程地质层层序厘定及工程地质条件分析[J]. 上海地质,2009,30(1): 28-33.
- [13] Casagrande A, Fadum R E. Notes on soil testing for engineering purpose, Harvard soil Mechan icsseries [M]. Cambridge, Mass: Harvard University, Graduate School of Engineering, 1940,(8):36-39.
- [14] Mesri G, Castro A.  $C_\alpha/C_c$  concept and  $K_0$  during secondary compression[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987,113(3):230 -247.
- [15] Mesri G, Godlewski P M. Time and stress-compressibility interrelationship[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974,103 (5):417-430.
- [16] 魏道琛,胡中雄. 上海浅层地基土的前期固结压力及有关压缩性参数的实验研究[J].岩土工程学报,1980,4(12):13-22.

## Influence of Soil Structure on Secondary Compression Behavior of Shanghai Soft Clay

GAO Yan-Bin<sup>1,2</sup>, LI He<sup>1,2</sup>, ZHANG A-Jin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Tongji University, Ministry of Education, Shanghai 200092, China;  
2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** One dimensional compression tests were conducted on natural samples (with flocculated structure) and remolded samples (with dispersive structure) of Shanghai soft clay to study on the influence of soil structure on the secondary compression behavior of Shanghai soft clay. Results show that the compression index  $C_c$ , coefficient of secondary compression  $C_\alpha$  and  $C_\alpha/C_c$  of remolded samples are almost constant and don't change much with increase of consolidation pressure. When the consolidation pressure reach the yield strength of natural structure and the flocculated structure turns to the dispersive structure,  $C_c$ ,  $C_\alpha$  and  $C_\alpha/C_c$  increase quickly to the peak value and decrease as the consolidation pressure increase. What's more, the drastic change of soil structure will influence the dissipation of pore pressure, so the kind of anti-S shape of  $e$ - $\lg t$  curve isn't obvious in natural samples and it will be very difficult to determine the time  $t_p$ , when prime consolidation finished and secondary compression began.

**Key words:** soft clay; soil structure; secondary compression