

结构性软土力学特性的试验研究

孙德安 陈 波

(上海大学, 上海 200072)

摘要: 对扰动程度不同的原状样和重塑样分别进行单向固结试验和固结排水及不排水三轴剪切试验, 研究结构性对上海软土的变形、强度特性的影响。压缩试验结果表明: 结构性强的原状样具有明显的结构屈服应力, 结构性一般的原状样, 结构屈服应力不明显; 原状样比重塑样具有更大的压缩指数 C_c 和膨胀指数 C_s 。剪切试验结果表明: 相同固结压力下, 结构性强的土样强度不仅低于结构性弱的土样强度, 而且低于重塑样的强度。这是由剪切时土样的孔隙比差异造成的。若消除孔隙比的影响, 则结构性将使原状样具有更高的强度, 且结构性越强, 土体强度越高。

关键词: 原状土; 重塑土; 结构屈服应力; 孔隙比

中图分类号: TU411.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-431X(2011) S2-0065-04

Experimental study on the mechanical behavior of structural soft clay

Sun Dean Chen Bo

(Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A number of oedometer compression tests and consolidated-drained and undrained triaxial shear tests on undisturbed and reconstituted samples of Shanghai mucky clay, have been carried out to study the difference in compression and shear characteristics between them. Based on the comparison of compression curves of undisturbed and reconstituted samples, it is found that the compression curves of undisturbed samples have the structure yield stress which is obvious for samples taken by good quality, but not obvious for samples taken by poor quality; undisturbed samples have larger compression index (C_c) and swell index (C_s) than reconstituted samples. Based on the comparison of stress-strain curves of undisturbed and reconstituted samples, it is found that the strength of undisturbed samples is lower than that of reconstituted samples when being sheared at the same confining pressure, which is caused by the difference in void ratio before shear. At the same void ratio, the strength of undisturbed samples is higher than that of reconstituted samples, the better structure of the undisturbed samples, the higher the soil strength.

Keywords: undisturbed soil; reconstituted soil; structure yield stress; void ratio

E-mail: sundean@shu.edu.cn

引 言

软土在长期沉积过程中形成的结构性对土的力学特性具有重要影响。J. B. Burland^[1]指出天然土的特性与重塑土固有特性的差异反映了结构性的影响。S. Leroueil 等^[2]指出, 结构性对原状土的力学特性的影响, 与初始孔隙比及应力历史的影响是同等重要的。近 20 年来, 结构性对土力学特性的影响极大地吸引了国内外学者的关注和重视。随着研究的深入, 人们已在结构性土的微观结构、力学特性^[1-4]及本构模

型^[4-5]等方面取得了一定进展, 并从中总结出某些规律用以指导工程实践。

本文通过对上海淤泥质软黏土原状样和重塑样的单向压缩试验、固结排水和不排水三轴剪切试验, 研究结构性对土的强度、变形的影响。进一步分析了在相同围压下, 原状样强度低于重塑样强度的原因, 并认为是由于两者之间的孔隙比的差异造成的。

1 试验土样

试验用的原状样为取自上海浦西某地铁站基坑中的块状样, 取土深度为地表下 10m 左右, 为上海地区最具代表性的第 4 层淤泥质软黏土。原状样 1 取样位置为放坡开挖基坑的坡底, 取样前受过机械行走

基金项目: 上海大学第五届研究生创新基金(SHUCX111014)

作者简介: 孙德安, 博士, 教授

收稿日期: 2011-06-15

碾压,有一定程度的扰动。原状样 2 取样位置为放坡开挖基坑的边坡上,未受过机械碾压,扰动程度较小。

试验用的重塑样制备如下:将现场取来的原状样经长时间浸泡后充分搅拌,制成 2 倍及以上液限的饱和泥浆,倒入直径 15cm、高 16cm 的制样桶中,分级加载,固结成样,最大固结压力为 70kPa。试验时根据需要切取固结土样的一部分制成压缩试样和三轴试样。

2 压缩试验

2.1 试验内容

为研究结构性对土的压缩变形特性的影响,对扰动程度不同的块状原状样及重塑样分别进行单向压缩试验。试验共进行 8 次,其中原状样 1 进行 2 次,原状样 2 进行 3 次,重塑样进行 3 次,试验详情见表 1。

表 1 压缩试验试样的初始含水量、孔隙比、压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s

Table 1 Initial water content, void ratio, compression and swell indices of samples for compression tests

土样	初始含水量 $w(\%)$	初始孔隙比 e_0	压缩指数 C_c	回弹指数 C_s
原状土 1	45.48	1.244	0.356	0.066
原状土 1	44.62	1.222	0.353	0.068
原状土 2	52.89	1.449	0.556	0.098
原状土 2	54.80	1.500	0.610	0.096
原状土 2	54.75	1.533	0.620	0.092
重塑土	40.28	1.104	0.307	0.050
重塑土	40.95	1.122	0.311	0.048
重塑土	41.19	1.128	0.313	0.050

2.2 试验结果

根据试验结果,得到了图 1 所示的单向压缩曲线。从图可以得到以下结论:

(1) 根据原状样固结至有效上覆压力下的体变大小的分类可知^[6]:土样 1 的质量较差(约 7%),土样 2 的质量良好(约 4%)。相应的,试样 2(结构性强)的压缩曲线具有明显的结构屈服应力;试样 1(结构性较差)的压缩曲线虽有一定的结构屈服应力,但不是很明显,说明取样扰动对土样结构具有重要影响。而本文得到的重塑样的压缩曲线也存在应力屈服点,是由土样受过 70kPa 的前期固结压力造成的。

(2) 原状样的压缩曲线为陡降型曲线。即结构屈服应力之前,土样的变形很小,结构屈服应力之后,土样的变形急剧增大。随着固结压力的增加,结构性对土的力学特性影响逐渐减小,原状样的压缩曲线逐渐接近重塑土的压缩曲线。当固结压力达到一定值时,

结构性不同的原状样压缩曲线几乎重合,说明随着固结压力的增加,初始结构差异逐渐消失。而对于原状样与重塑样的压缩曲线在足够大的固结压力下能否重合,仍需进一步试验才能判定。

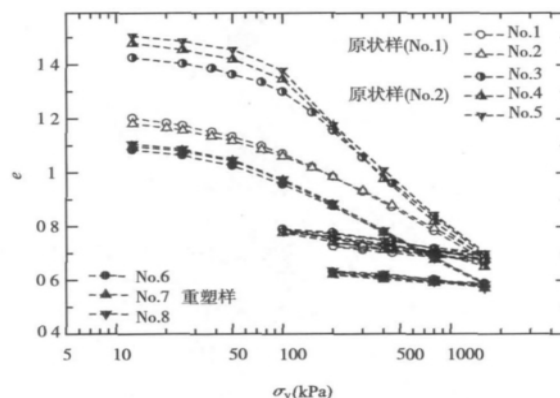


图 1 原状样和重塑样的单向压缩曲线

Fig. 1 Compression curves of undisturbed and reconstituted samples from oedometer tests

(3) 重塑样的压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 数值变异不大,平均值为 0.310 和 0.049,而原状样的压缩指数、回弹指数与土的初始状态密切相关。如:扰动较大原状样(土样 1)的压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 分别为 0.355 和 0.067,而扰动较小原状样(土样 2)的压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 却达到了 0.620 和 0.098。原状样与重塑样的压缩指数 C_c 、膨胀指数 C_s 值最大可差 1 倍。

3 三轴剪切试验

3.1 试验内容

为研究结构性对土的应力-应变曲线的影响,分别对两种质量不同的原状样及其重塑样进行一组不同围压下的等围压固结排水、固结不排水三轴剪切试验。固结排水剪切试验中,由于上海软土的渗透系数较小(约 10^{-7} cm/s),为保证剪切过程中产生的孔隙水压力全部消散,试验选用剪切速率为 0.0029mm/min 的慢剪形式。固结不排水剪切试验中,考虑到原状样在剪切围压大于结构屈服应力后,剪切速率对土的强度影响不大^[7],可适当的加快试验速度,试验选用的剪切速率为 0.033mm/min,试验的详细情况见表 2。

3.2 试验结果

根据结构性不同的土样 1、土样 2 及其重塑样的常规排水、不排水三轴剪切试验结果,得到图 2、图 3 所示的偏应力-应变-体变(孔压)曲线和图 4 所示的 $p'-q$ 曲线。根据图示的试验结果,可以得到以下结论:

表 2 三轴试验用试样的初始含水量和饱和度

Table 2 Initial water content and saturation degree of samples for triaxial tests

土样	100(CU)		200(CU)		400(CU)		100(CD)		200(CD)		400(CD)	
	w(%)	s _r (%)	w(%)	s _r (%)	w(%)	s _r (%)	w(%)	s _r (%)	w(%)	s _r (%)	w(%)	s _r (%)
原状样 1	44.28	99.8	46.84	100	44.56	100	45.25	97.4	48.02	100	46.31	100
原状样 2	50.94	100	49.93	100	48.54	96.2	49.10	100	48.34	98.8	49.92	100
重塑样	39.90	100	40.89	100	39.60	100	40.21	100	39.45	100	38.49	100

注: 表中的 w 是指试样的初始含水量; s_r 是指土样的初始饱和度, 计算饱和度超过 100% 时, 取 100%。

(1) 图 2 的试验结果表明: 土样 2 的结构性强于土样 1 的结构性, 而结构性将使土样具有更高的强度, 因此, 原状样的强度应大于重塑样的强度, 且土样 2 的强度大于土样 1 的强度。本研究的试验结果却正好相反, 即在同一围压下, 无论是排水剪还是不排水剪, 土样 2 强度均小于土样 1 强度, 甚至还小于重塑样的强度; 结构性一般的原状样 1 在低围压下 ($\leq 200\text{kPa}$), 排水、不排水剪切强度均高于重塑样的剪切强度, 而在高围压下 ($>400\text{kPa}$) 原状样 1 的排水剪切强度与重塑样的强度相当或略小于重塑样的强度, 如图 3、图 4 所示。这主要是由于试样在相同围压下固结完成后, 不同试样之间的孔隙比差异引起的, 具体分析见下节。

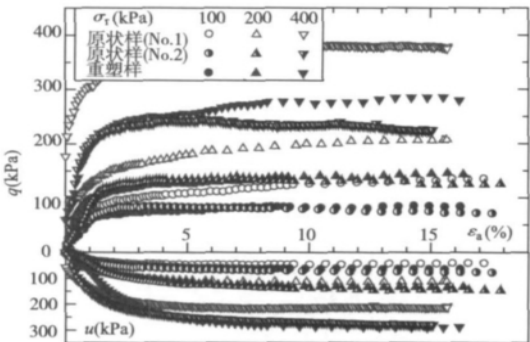


图 2 原状样及重塑样的应力-应变曲线 (不排水剪)

Fig. 2 Stress-strain curves of undisturbed and reconstituted samples (CU tests)

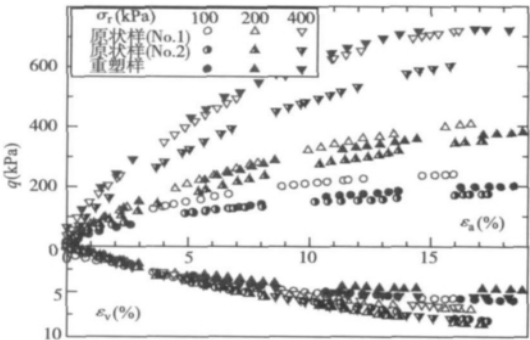


图 3 原状样及重塑样的应力-应变曲线 (排水剪)

Fig. 3 Stress-strain curves of undisturbed and reconstituted samples (CD tests)

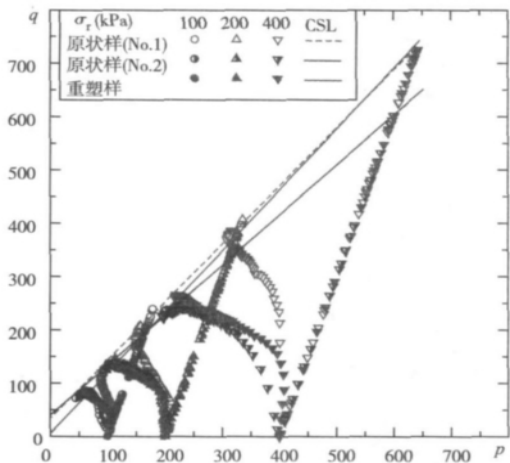


图 4 原状样及重塑样的 $p'-q$ 曲线 (排水剪及不排水剪)

Fig. 4 $p'-q$ curves of undisturbed and reconstituted samples

- (2) 重塑样的临界状态线在 $p'-q$ 平面上为一条过原点的直线, 而原状样的临界状态线并不通过原点, 这说明天然饱和的软黏土具有一定的黏聚力。
- (3) 本文得到的原状样的临界状态线可近似用一条直线表示, 这是由于本研究中, 试验的固结压力均大于土样的结构屈服应力。而刘恩龙等^[3]的试验结果表明: 原状样的强度包线虽然是是非线性的, 但固结应力高于结构屈服应力时, 强度变化近似为线性的, 可用线性强度与本文试验结果一致。

4 孔隙比对土的强度的影响

对于原状样和重塑样的强度比较, 国内外已开展了众多的试验研究, 并取得了不少的研究成果。有的试验结果表明, 由于结构性的存在, 原状样的强度高于重塑样的强度; 有的试验结果^[8-9]却与本文的试验结果一致。即在同一围压下剪切, 结构性土的强度反而低于重塑样的强度。两者结果的差异在于试验结果整理时, 是否消除掉原状样和重塑样的孔隙比差异。因为在相同的固结压力作用下, 原状样比重塑样具有更大的孔隙比, 如图 1 所示。而孔隙比对土体的

强度具有重要影响。

Z. S. Hong 等^[8]根据 Ariake 黏土的原状土样和重塑土样的不排水剪切试验结果,得到原状土强度低于重塑土的不排水剪切强度。在随后的研究中通过整理原状土和重塑土的比容 v 与不排水剪切强度 q_f 的关系,比较了在相同孔隙比条件下,原状样和重塑样的强度关系。本文也将结构性不同的两种原状样及其重塑样的试验结果重新整理后,得到土的临界孔隙比 e 与相应的排水剪切强度 q_f 的 $e-\lg q_f$ 曲线,如图 5 所示。图中虚线为根据最小二乘法拟合的结果。

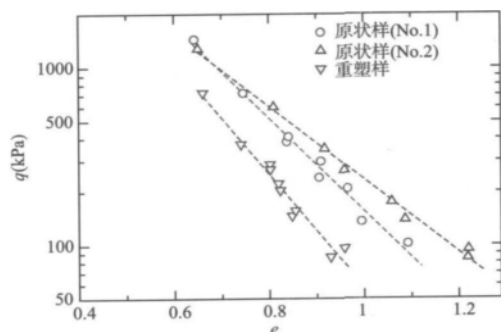


图 5 临界状态时原状土和重塑土的 $e-\lg q_f$ 曲线

Fig. 5 $e-\lg q_f$ curves of undisturbed and reconstituted samples at critical state

图 5 的试验结果显示: 正常固结状态下, 原状土和重塑土的 $e-\lg q_f$ 曲线都具有很好的线性相关性; 当土样处于同一孔隙比时, 结构性强的原状体强度大于结构性弱的土体的强度。原状样强度大于重塑样的强度。因此, 上文中得到的在相同围压下剪切时, 原状样的强度小于重塑样的强度是由于两者的孔隙比差异引起的。因为在相同的固结压力下, 原状样的孔隙比大于重塑样的孔隙比, 结构性越强, 孔隙比越大。若消除孔隙比影响, 则原状土强度大于重塑土的强度, 且结构性越强, 土样强度越高, 与现有的结构性强度理论相一致。

5 结论

本文通过对两种取土质量不同的上海淤泥质软黏土的原状样及重塑样分别进行单向压缩试验和固结排水、不排水三轴剪切试验, 得到三者的压缩曲线和不同围压下的应力-应变曲线。通过分析三者的试验结果的差异, 得到以下结论:

(1) 随着固结压力的增加, 结构性对土的力学特

孙德安(1962-), 男, 博士, 教授。主要从事土力学方面的研究。

陈 波(1984-), 男, 博士研究生。主要从事土地力学特性及本构模拟方面的研究。

性影响逐渐减小, 原状样的压缩曲线逐渐接近重塑土的压缩曲线。当固结压力达到一定值时, 结构性不同原状样的压缩曲线重合, 而对于原状样与重塑样的压缩曲线在足够大的固结压力下能否重合, 仍需进一步试验才能判定。

(2) 结构屈服应力在结构性好的试样中明显, 在结构性一般的试样不明显。土样的初始状态对土的压缩指数 C_c 、膨胀指数 C_s 具有重要影响。原状样与重塑样相比, 数值可相差 1 倍以上。

(3) 原状土的强度、变形特性不仅与土的结构性有关, 还与孔隙比密切相关。相同围压下剪切, 由于重塑土的孔隙比小于原状土的孔隙比, 可使重塑土的强度大于原状土的强度。若在相同孔隙比条件下, 由于结构性的影响, 原状土的强度大于重塑土的强度。

参 考 文 献

- [1] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clay [J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329-378
- [2] Leroueil S, Vaughan P R. The general and congruent effects of structure in soils and weak rocks [J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 467-488
- [3] 刘恩龙, 沈珠江. 结构性土强度准则探讨 [J]. 工程力学, 2007, 24(2): 50-55 (Liu Enlong, Shen Zhujiang. Investigation on strength criterion for the structured soils [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 50-55 (in Chinese))
- [4] Liu M D, Carter J P. A structured cam clay model [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(6): 1313-1332
- [5] Kavvas M, Amorosi A. A constitutive model for structured soils [J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 263-273
- [6] Lacasse S, Berre T, Lefebvre G. Block sampling of sensitive clays [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, 1985: 887-892
- [7] Zhu J G, Yin J H. Strain-rate-dependent stress-strain behavior of overconsolidated Hong Kong marine clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(6): 1272-1282
- [8] Hong Z S, Song Y, Liu S L, et al. Comparison in undrained shear strength between undisturbed and remolded Ariake clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(2): 272-275
- [9] Graham J, Li E C C. Comparison of natural and remolded plastic clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, 111(7): 865-881