

文章编号: 1000-7598 (2013) 02-0381-08

海相软土压缩特性的试验研究

陈 波^{1,2}, 孙德安¹, 吕海波³

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 衢州学院 建筑工程学院, 浙江 衢州 324000; 3. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 对不同取样方式得到的上海、江苏地区海相软黏土的原状样和重塑样进行了单向压缩和等向压缩试验, 分别得到各自的压缩曲线、压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s 。通过比较原状样、重塑样的归一化压缩曲线的差异, 确认了结构性对软黏土压缩特性的影响。把屈服应力后的压缩曲线外延至 10 kPa 时的孔隙比定义为参考孔隙比 e_{10}^* , 用于简单量化土的组构。根据多次单向压缩试验结果得到的压缩指数 C_c , 建立了原状样和重塑样的压缩指数 C_c 与孔隙比 e_{10} 或参考孔隙比 e_{10}^* 的相关方程, 并通过单向、等向压缩指数的比较, 认为此方程也适用于等向压缩试验结果。根据原状、重塑样压缩指数 C_c 与参考孔隙比 e_{10}^* 具有基本相同关系的结论, 对原状样的结构屈服特性进行了探讨, 认为原状样在压力大于结构屈服应力后, 胶结已基本破坏, 原状样和重塑样压缩特性差异主要是由组构的差异引起的。该研究成果, 尤其是压缩指数 C_c 与参考孔隙比 e_{10}^* 的相关方程, 可为工程提供重要的参考。

关 键 词: 原状土; 重塑土; 压缩试验; 参考孔隙比; 结构屈服

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Experimental study of compression behavior of marine soft clays

CHEN Bo^{1,2}, SUN De-an¹, LÜ Hai-bo³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: A series of one-dimensional and isotropic compression tests have been carried out on undisturbed and remolded samples of marine soft clay taken from Shanghai and Jiangsu, with different sampling methods. The compression curves, compression index C_c , and swell index C_s are obtained from the tests. According to the normalized compression curves of undisturbed and remolded samples, the effect on compression characteristics of the soil structure is confirmed. The compression curves after the yield stress are extended to determine a reference void ratio e_{10}^* which is used to quantify the fabric simply. Based on the compression index C_c obtained from oedometer tests, the correlation between the compression index C_c and void ratio e_{10} or reference void ratio e_{10}^* are obtained. From the compression index C_c between oedometer and isotropic tests, it is shown that they are the same on the whole, so the relationship obtained from the oedometer tests can be used for isotropic test results. In terms of the same relationship between the compression index C_c and the reference void ratio e_{10}^* between undisturbed and remolded samples, the characteristics of yielding of structure are discussed. The conclusion that the consolidation pressure is larger than the structure yielding stress, most of the bonding is broken, the difference of compression characteristics is caused by the difference in the fabric, is obtained. The conclusions especially the relationship between the compression index C_c and reference void ratio e_{10}^* provide important reference value for engineering practice.

Key words: undisturbed soil; remolded soil; compression test; reference void ratio; yielding of structure

1 引 言

随着有限元计算在土工结构分析中的采用, 以重塑软黏土的试验结果为基础, 在临界状态土力学框架下建立起来剑桥模型^[1]广泛地运用于复杂土工

结构的计算中。如, 基坑开挖过程中的围护墙变形、地表沉降、坑底隆起等变化规律; 软土堆载地基固结过程中的孔压、沉降及水平位移的变化规律等。然而, 有限元分析计算结果依赖于土的模型参数。因而, 要获得准确的数值模拟结果, 需通过一系列

收稿日期: 2011-11-22

基金项目: 上海大学第五届研究生创新基金 (No. SHUCX111014); 广西岩土力学与工程重点实验室开放基金 (No.11-KF-04)。

第一作者简介: 陈波, 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 主要从事土的基本力学特性及本构模型的研究工作。E-mail: chenbo20020178@163.com

通讯作者: 孙德安, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事土力学教学和研究工作。E-mail: sundean@shu.edu.cn

的压缩、剪切等土工试验获得模型参数。

土工试验虽能取得较好的模型参数,但比较费时费力。而大量的试验和统计结果表明,土的模型参数与土的物理指标之间具有很强的相关性。对于软黏土而言,选择的物理指标主要集中在反映其工程特性的液限或其对应的孔隙比、塑性指数和初始孔隙比等。如: Nakase^[2], 白冰等^[3]建立了压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 、次固结系数 C_a 与塑性指数 I_p 的关系; Burland^[4]、Sridharan 等^[5]建立了土的压缩指数 C_c 与土的液限 w_L 或液限孔隙比 e_L 的关系。

目前,多数的统计结果是根据重塑样的单向压缩试验结果得出的,其统计结果具有很好的相关性。但由于重塑样的压缩特性与现场具有结构性的原状土的压缩特性差别较大,其结果并不完全适用于原状样。此外,剑桥模型参数中的压缩指数、回弹指数为等向压缩、回弹试验的结果。因此,若能建立原状样与物理指标的相关方程,并将其推广到等向压缩结果中,则有重要的实用价值。

本文对不同取样方式得到的上海、江苏地区海相软黏土的重塑样和原状样进行一系列的单向压缩和等向压缩试验,得到各自的压缩曲线,压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s ; 通过比较原状样和重塑样归一化压缩曲线的差异,确认结构性对土压缩曲线的影响。建立了重塑样和不同扰动程度原状样单向压缩指数 C_c 与孔隙比 e_{10} (压缩曲线上竖向应力 10 kPa 时的孔隙比) 或参考孔隙比 e_{10}^* (屈服应力后的压缩曲线外延至 10 kPa 时的孔隙比) 之间的相关方程,并通过单向、等向压缩指数的比较,认为可将此方程推广到等向压缩试验结果中。最后,通过对压缩指数 C_c 与参考孔隙比 e_{10}^* 关系的分析,对土样的结构屈服特性进行了探讨。

2 试验土样及内容

2.1 试验用原状样

试样用的原状样取自上海市的川沙镇、浦江南路、浦东机场、虹桥枢纽和江苏省苏州市的海相沉积软黏土。其中,浦江南路试样的取样在基坑底面采用 Block 方法; 苏州和虹桥枢纽试样为薄壁样; 浦东机场和川沙镇的试样为厚壁样。各土样的基本物理指标及塑性图分别如表 1、图 1 所示。图中,“川沙第 3 层”表示取自上海市川沙镇地区的第 3 层上海软土,其他类推。从图 1 可知,所有试验土样均位于 A 线之上,且除虹桥枢纽、川沙第 4 层土在 B 线右侧外,其他土样均位于 B 线的左侧,为低液限的黏性土。

表 1 试验土样的基本物理特性

Table 1 Basic physical properties of test samples

土样	取样深度 / m	天然含水率 / %	结构屈服应力 / kPa	液限 w_L / %	塑限 w_p / %	塑性指数 I_p
川沙第 3 层	7	47.0~54.4	70	41.5	21.6	19.9
川沙第 4 层	14~15	46.4~55.8	116	53.9	25.8	28.1
虹桥第 3 层	10	38.5~43.6	86	41.7	20.2	21.5
虹桥第 4 层	17	42.6~44.6	132	52.7	23.6	29.1
浦东第 4 层	10	44.0~54.0	84	44.5	22.4	22.1
浦江第 4 层	9.7	44.6~55.9	118	47.7	25.5	22.2
苏州第 5 层	17~18	30.5~39.6	157	36.4	17.4	19.0

注: 表中的结构屈服应力值为原状样多次单向压缩试验结果的平均值。

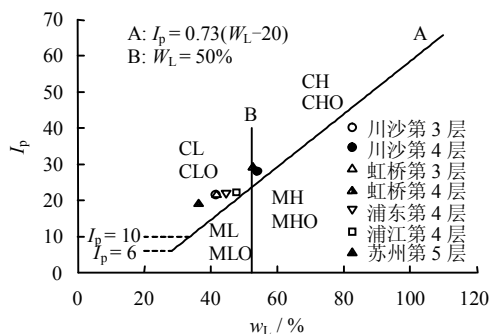


图 1 试验土样的塑性图

Fig.1 Plasticity chart for different clays used in tests

根据 Lacasse 等^[6]提出的分级评价方法,即通过不扰动样固结至有效上覆压力下的体变大小衡量,对各种原状样的扰动程度进行统计分析,得到图 2 所示的扰动程度统计图。从图 2 中可以看出,对于 Block 样,土样扰动较小,绝大部分土样质量为一般,对于薄壁样,土样扰动一般,绝大部分土样质量较差,对于厚壁样,土样扰动很大,则绝大部分土样的质量很差。

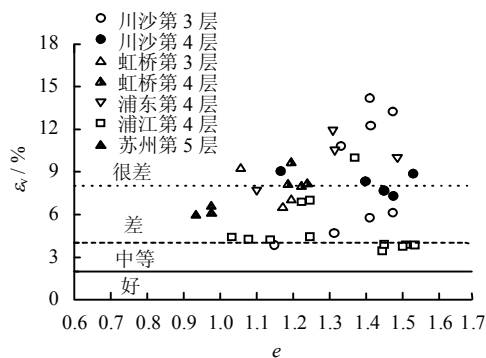


图 2 不同取样方法原状样的扰动程度统计分析

Fig.2 Statistical analysis of disturbance on undisturbed samples with different sampling methods

2.2 试验用重塑样

将现场取来的土样经长时间浸泡后,充分搅拌,

制成饱和泥浆,倒入直径为 15 cm、高为 16 cm 的制样桶中,分级加载,固结成样,最后一级的固结压力约 70 kPa。试验时根据试样尺寸切取固结土样一部分,制成压缩试验用的试样。为保证同一固结压力下不同批次重塑样具有相同的初始含水率或初始孔隙比,饱和泥浆的初始含水率至少要保证在液限的 1.5 倍以上^[4],试验中含水率控制在液限的 2 倍左右。

2.3 试验内容

对不同海相软黏土的原状样和重塑样分别进行了多次单向压缩和等向压缩试验。

单向压缩试验:将 $h=20.0$ mm, $d=61.8$ mm 的试样连环刀装入固结仪中,再分级加载,每级荷载固结 12 h。根据固结过程中试样高度的变化,得到各级荷载下的孔隙比 e 及相应的 $e-\lg \sigma_v$ 曲线。

等向压缩试验:将土样切成标准的三轴试验小型试样,即 $h=80.0$ mm, $d=39.0$ mm。然后装入三轴压力室中进行分级加载、卸载,每级荷载固结 24 h。根据固结过程中试样体积的变化,得到各级荷载下的孔隙比 e 及相应的 $e-\lg p$ 曲线。

3 试验结果的归一化整理

重塑样的力学特性只受土的基本性质的影响,与其天然状态无关,故其力学特性称为土的固有特性。Burland^[4]对不同重塑样的压缩曲线通过式(1)所示的孔隙指数 I_v 进行归一化后,得到重塑土的压缩曲线基本一致,称之为土的固有压缩曲线 ICL (intrinsic compression line)。

$$I_v = (e - e_{100}^*) / (e_{100}^* - e_{1000}^*) = (e - e_{100}^*) / C_c^* \quad (1)$$

式中: e_{100}^* 、 e_{1000}^* 分别为重塑土在 100、1 000 kPa 固结压力下的孔隙比; C_c^* 为重塑土的压缩指数。

为定量评价结构性对天然土压缩特性的影响,本文从不同土样的原状样和重塑样多次单向压缩回弹试验结果中,选取有代表性的压缩曲线进行归一化后,得到图 3 所示的结果。据此可以得到以下规律。

(1) 当固结应力大于土的前期固结应力后,7 种软黏土的重塑样的压缩曲线可基本归一化为一条曲线,且与 Burland^[4]建议的 ICL 线基本重合。而对于原状土,由于土样在沉积过程中形成的结构性,使土样在相同应力下具有更大的孔隙比。因此,原状样的压缩曲线均位于重塑样压缩曲线的上方。其中,部分原状样的压缩曲线位于自然沉积线 SCL (sedimentation compression line) 的上方,部分则

位于 SCL 和 ICL 之间。Burland^[4]认为,这是由于土体结构类型的差异引起的。

(2) 不同的取样方式得到的土样扰动程度差异较大,进而对压缩曲线产生重要影响。如图 3(b)所示。

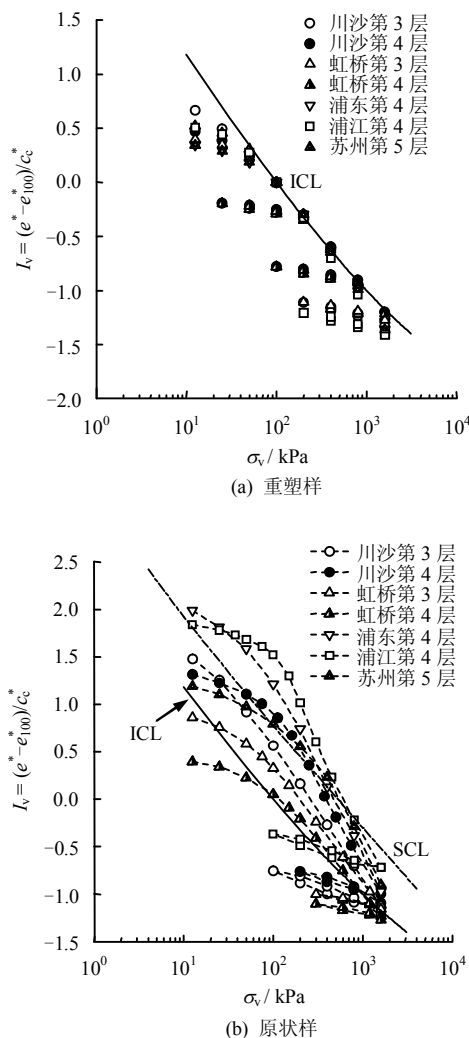


图3 原状样和重塑样的归一化压缩曲线

Fig.3 Normalized intrinsic compression curves of undisturbed and remolded samples

采用 Block 取样的浦江南路试样,其压缩曲线上具有明显的屈服点,采用薄壁或厚壁取样的试样,则结构屈服应力不是很明显,尤其是扰动程度很大的川沙第3层采用厚壁取土样,其压缩曲线接近为一条直线。因此,为了更好地研究结构性对土的力学特性的影响,应尽量采用扰动程度小的 Block 试样进行试验。

(3) 重塑样的压缩曲线近似为一条直线,而扰动程度较小的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。

4 参数相关性分析

4.1 物理指标的选用

大量的试验结果表明,土工参数间常常存在一定的相关性,可用物理性指标估算压缩指数^[2-5,7]。但对于物理参数的选用方面,具有一定的差异,主要集中在如下物理参数:塑性指数 I_p ^[2-3]、液限 w_L 或其对应孔隙比 e_L ^[4-5]、土的初始含水率或其对应的孔隙比 e_0 ^[7]。

对于重塑样,建议采用液限孔隙比 e_L 作为土的物理指标。一方面是由于液限与塑性指数之间具有线性相关性,且液限相比塑性指数,可减小液、塑限相减产生的累积误差;另一方面是对不同重塑样的压缩曲线用 e_L 归一化后可发现,当固结应力大于前期固结压力后,其压缩曲线的偏差在很小的范围内,可近似为一条直线,如图4所示。但对于原状样,由于液限孔隙比 e_L 无法反映结构性对压缩特性的影响,应选用初始孔隙比 e_0 ,因为其能在一定程度上反映结构性的影响,土样的结构性越强,一般其初始孔隙比就越大。但初始孔隙比是土样受过的前期固结压力后回弹至某一负孔压时的孔隙比,对应的有效应力不仅与受过的前期固结压力,还与扰动程度有关,具有不确定性。为了统一起见,本文将屈服应力后的压缩曲线外延至10 kPa时的孔隙比

定义为参考孔隙比 e_{10}^* ,如图5所示。将参考孔隙比 e_{10}^* 作为土的物理指标,主要是基于以下2方面的考虑:

(1) Hong等^[8]的试验结果表明,固结应力很小时,重塑样的压缩曲线并不是直线,而是一条向上凹的曲线;对于饱和泥浆含水率为2倍左右液限的重塑样,10 kPa之后的压缩曲线近似为一条直线。因此,本文参考孔隙比取固结压力为10 kPa时的孔隙比,即 e_{10}^* 。

(2) 试验用的重塑样受过一定的前期固结压力(本研究为70 kPa),其压缩曲线的特征为图5所示的OBC曲线。即,类似于超固结黏土的压缩曲线。因此,O点的孔隙比 e_{10} 与土的性质、应力历史有关,而参考孔隙比 e_{10}^* 与土样的应力历史无关,只简单反映重塑样的组构特性。故选用参考孔隙比 e_{10}^* 为代表土性状的指标。

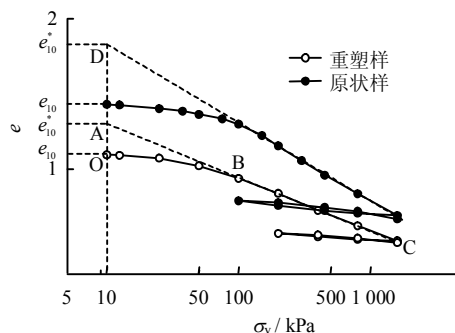


图5 e_{10} 和 e_{10}^* 的定义
Fig.5 Definitions of void ratio e_{10} and reference void ratio e_{10}^*

4.2 压缩指数 C_c 与 e_{10}^* 的关系

将7种软黏土的原状样和重塑样的多次压缩试验结果整理后,分别得到原状样和重塑样的压缩指数 C_c 与孔隙比 e_{10} 或参考孔隙比 e_{10}^* 的关系,分别如图6、7所示。从图6中可知,对于重塑样,由于孔隙比 e_{10} 只与应力历史相关,其压缩指数 C_c 与孔隙比 e_{10} 具有很好的线性相关性,但对于原状样,其孔隙比 e_{10} 与应力历史、结构性等相关,其试验结果具有很大的离散型,压缩指数 C_c 与孔隙比 e_{10} 的关系与土样的扰动程度密切相关,如图6(b)所示。土样的扰动程度越大,则在相同的孔隙比条件下,压缩指数 C_c 越小。而用参考孔隙比 e_{10}^* 进行整理后,无论是重塑样,还是扰动程度不同的原状样,其压缩指数 C_c 与参考孔隙比 e_{10}^* 具有很好线性相关性,如图7所示。从图7中还可知,原状样和重塑样的压缩指数 C_c 与参考孔隙比 e_{10}^* 的关系虽略有差异,但基本一致。

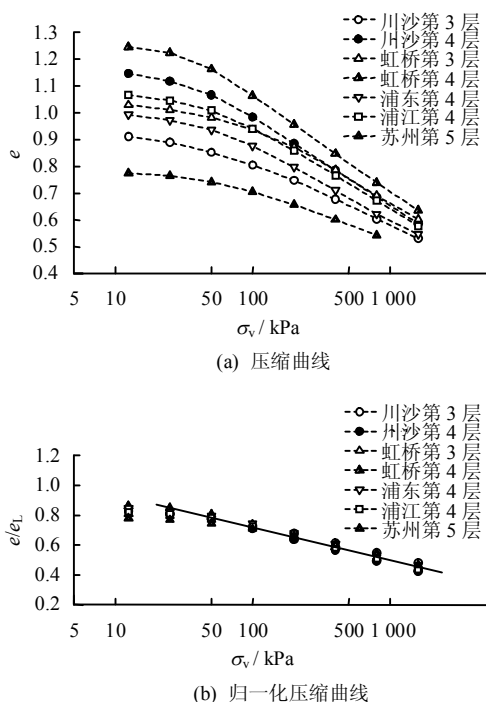
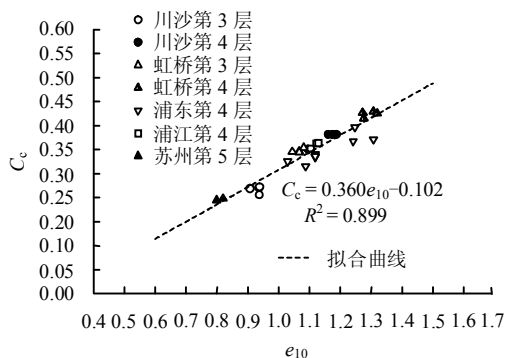
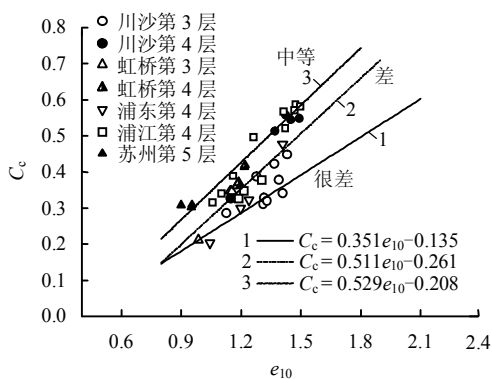


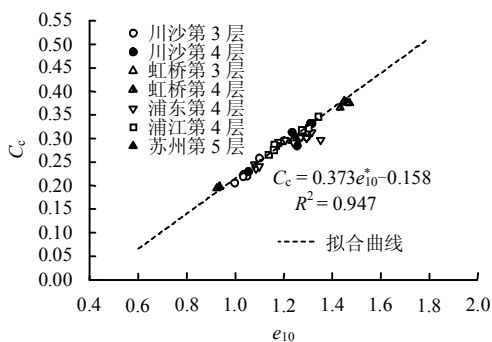
图4 重塑土的压缩曲线及归一化
Fig.4 Compression curves of remolded soil and normalized curves



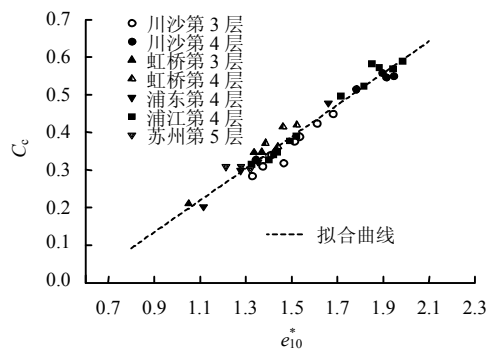
(a) 重塑样



(b) 原状样

图6 压缩指数 C_c 与孔隙比 e_{10} 的关系Fig.6 Compression index C_c versus void ratio e_{10} relation

(a) 重塑样

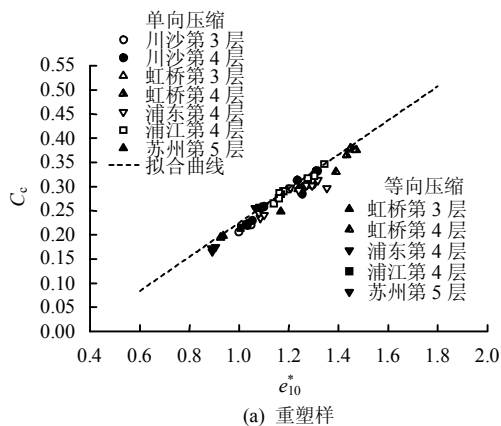


(b) 原状样

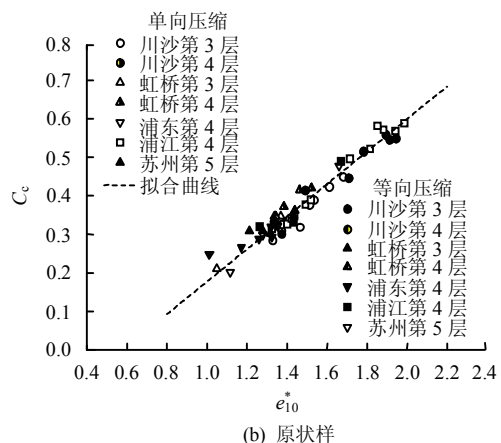
图7 压缩指数 C_c 与参考孔隙比 e_{10}^* 的关系Fig.7 Compression index C_c versus reference void ratio e_{10}^* relation

4.3 单向、等向压缩指数 C_c 比较

压缩指数的取值, 普遍采用单向压缩试验的结果, 而剑桥模型中采用的压缩指数为等向压缩试验的结果。因此, 能否将单向压缩试验结果得到的回归方程推广到等向压缩试验中, 有必要进行探讨。将原状样和重塑样的单向压缩、等向压缩试验结果整理后, 得到如图8所示的关系图。从图可得到如下结论。



(a) 重塑样



(b) 原状样

图8 单向压缩和等向压缩指数的比较

Fig.8 Comparison of compression indices between isotropic compression and oedometer tests

重塑样的单向压缩 (oedometer) 和等向压缩 (isotropic) 的压缩指数 C_c 均位于拟合曲线附近, 如图8(a)所示, 考虑试验误差, 可认为两者基本一致, 这与 Nakase 等^[3]对重塑 Kawasaki 黏土的试验结果一致。但对于原状样, 由单向压缩和等向压缩试验得到的压缩指数之间的关系具有一定的离散型, 如图8(b)所示, 这可能是由于原状样扰动程度的差异造成的。但总体而言, 对于结构屈服应力不是特别大的土样而言, 可认为单向、等向压缩试验的压缩指数基本相等, 因此, 由单向压缩试验结果建立的经验公式可推广到等向压缩试验结果中, 也即可用于剑桥模型参数的确定。

4.4 压缩指数 C_c 与回弹指数 C_s 的关系

由于土样的回弹指数较小, 其计算结果易受人 为因素影响, 若用 e_{10}^* 整理往往导致数据的离散型较大, 规律性不明显。为避免这种离散性, 本文采用 压缩指数 C_c 与回弹指数 C_s 的比值进行统计比较, 得到图 9 所示的试验结果。从图 9 中可知, 对于重塑 样, 试验结果的离散型相对较小, 其压缩指数和回 弹指数的比值 C_c/C_s , 单向压缩试验结果的平均值为 6.75, 等向压缩试验结果的平均值为 5.25。对于 原状样, 试验结果的离散型则较大, 其压缩指数和 回弹指数的比值 C_c/C_s , 单向压缩试验结果的平均 值为 5.86, 等向压缩试验结果的平均值为 4.72。而 由图 8 可知, 单向压缩和等向压缩的压缩指数 C_c 基 本是相同的。因此, 对于回弹指数的选用, 由单向 压缩试验测的 C_s 值应适当增大 20%~30%才可作 为剑桥模型中的 C_s 值, 这是由于单向试验回弹过程

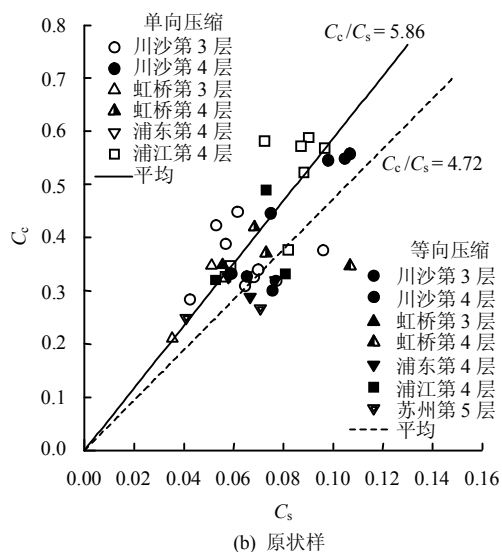
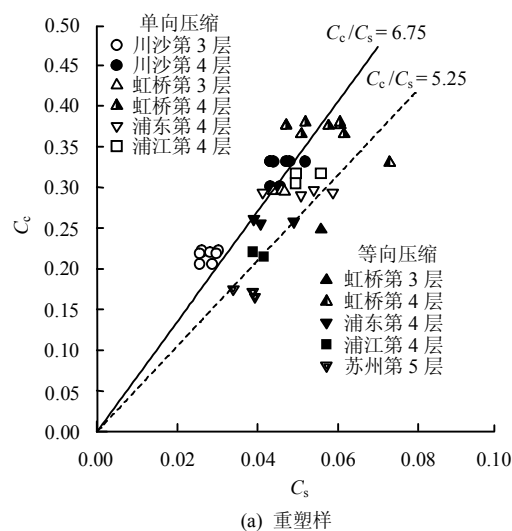


图 9 压缩指数 C_c 与回弹指数 C_s 的关系

Fig.9 Compression index C_c versus swell index C_s

中, 试样的 K_0 值不断增大引起的^[9]。

需要注意的是, 本文得出原状样的压缩指数和 回弹指数的比值 C_c/C_s 反而小于重塑样的结果, 与 一般的试验结果^[6]不符合, 这是由于本文试验中, 原状样的回弹压力大多在 1 600 kPa 左右, 而原状样 的结构破坏则随着回弹压力的增大而增大, 从而导 致相应的回弹指数也相应的增大^[10]。因此, 在工程 应用时, 原状样的压缩指数和回弹指数的比值 C_c/C_s 应根据回弹压力适当的增大。

5 土体结构屈服破坏的探讨

天然土在沉积过程中形成的结构性使原状样与 重塑样的压缩曲线存在显著的差异。目前一般认为, 天然土在结构屈服应力前, 由于结构产生的抵抗作 用, 土样的压缩变形很小; 结构屈服应力后, 结构 屈服破坏, 土样的压缩曲线陡降。但对于结构屈服 破坏形式, 则存在一定的分歧。有的学者根据屈服 后天然土压缩曲线逐渐与重塑样趋于一致的事实, 认为结构性的影响是逐渐丧失的^[11]; 有的学者认为 达到结构屈服应力时, 结构性完全丧失, 屈服后天 然土的压缩性与结构性无关, 压缩特性差异是由于 屈服后土样间孔隙比的差异引起的^[12]。

将屈服应力后的压缩曲线外延至 10 kPa 时的孔 隙比定义为参考孔隙比 e_{10}^* , 用于简单量化土的组 构, 如图 5 中所示。即, 用 D 点或 A 点的孔隙比 e_{10}^* 用于简单地量化土的组构。如果以参考孔隙比 e_{10}^* 为 参数整理压缩指数 C_c 的话, 可得到图 10。从图中可 知, 虽然原状样的压缩指数 C_c 与参考孔隙比 e_{10}^* 的 关系与重塑样的关系略微存在一点差异, 但其关系 基本一致。由于试验所用土样来自江苏苏州和上海 的不同地点, 各土样组成也不完全一致, 但可整理 得到统一的参考孔隙比 e_{10}^* 与压缩指数 C_c 的相关关 系。因此, 参考孔隙比 e_{10}^* 可简单表示土的组构。

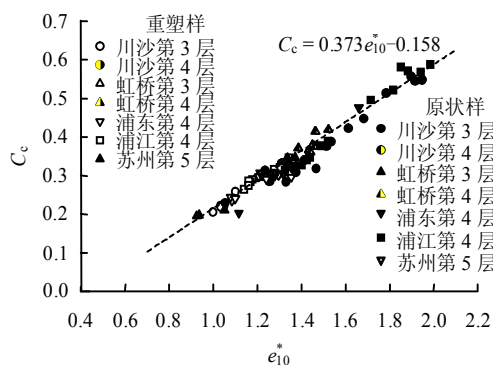


图 10 压缩指数 C_c 与参考孔隙比 e_{10}^* 的关系

Fig.10 Relations between compression index C_c and reference void ratio e_{10}^*

土的结构性是指构成土体颗粒的形状、大小、表面特征、定量的比例关系、空间上排列状态以及骨架颗粒与胶结物的胶结形式,孔隙的形态、大小、数量以及分布情况,简单地把土结构分成组构(fabric)和胶结(bonding)^[13]。Burland^[4]和 Baudet & Stallebrass^[14]进一步将结构分为稳定结构和非稳定结构,并认为土体的非稳定结构主要是土的胶结,而稳定结构为土的组构,即使固结压力达到足够大时,组构的影响也难以消除。国内张先伟^[15]等对漳州和黄石软土的微观孔隙分析后,也认为当压力大于结构屈服应力后,颗粒间胶结连接已大部分破坏。而图 10 中的试验结果显示,原状样与没有任何胶结作用的重塑样的关系基本一致。因此,可推断原状样在结构屈服应力后,土体结构中的胶结已基本破坏,但两者的组构仍然存在着差异。这种差异使得原状样在相同固结压力下,比重塑样具有更高的孔隙比,进而导致了两者压缩曲线产生差异。但无论是重塑样还是原状样,可用 e_{10}^* 可作为最简单表示组构的指标。

由于本文试验土样的结构屈服应力不是很大,均未超过 150 kPa,且原状样屈服后的压缩曲线可近似为一条直线。因此,其参考孔隙比 e_{10}^* 可用屈服后压缩曲线外延至 10 kPa 时的孔隙比来定义。而对于某些存在明显应力转化区域的结构性强软黏土^[16],其屈服后的压缩曲线并非直线,而是典型的反“S”型曲线,其参考孔隙比 e_{10}^* 也无法用本文的方法确定。因此,上述结果能否适用于此类原状样,仍有待讨论研究。

6 结 论

(1)无论是重塑样还是扰动程度不同的原状样,其单向压缩指数 C_c 与等向压缩指数 C_c 均位于拟合曲线附近。因此,可认为单向压缩指数 C_c 与等向压缩指数 C_c 是相等的。

(2)重塑样和原状样的单向压缩指数和回弹指数比值 C_c/C_s 的平均值分别为 6.75 和 5.86,而等向压缩试验结果的平均值分别为 5.25 和 4.72。因此,对于回弹指数的选用,由单向压缩试验测得的 C_s 值应适当增大 20%~30%才可作为剑桥模型中的 C_s 值。

(3)重塑样的压缩指数 C_c 与孔隙比 e_{10} 具有很好的线性相关性。但对于原状样,压缩指数 C_c 与孔隙比 e_{10} 的关系与试样的质量密切相关,应根据扰动程度分别建立相关方程;而压缩指数 C_c 与参考孔隙比 e_{10}^* 的关系与重塑样的基本一致。因此,上海、江苏地区海相软黏土的不同扰动程度原状样和重塑样

的压缩指数 C_c 与组构参数(参考孔隙比 e_{10}^*) 关系基本一致。

(4)根据不同软黏土原状样和重塑样的压缩指数 C_c 与组构参数 e_{10}^* 的关系基本一致的试验结果,可推论原状样在结构屈服应力后,其结构中的胶结已基本破坏。此时原状样和重塑样压缩曲线的差异是由于原状样比重塑样具有更大的孔隙比引起的结论。

参 考 文 献

- [1] ROSCOE K H, BURLAND J B. On the generalised stress-strain behavior of “wet” clay[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1968: 535—609.
- [2] NAKASE A, KAMEI T, KUSAKABE O. Constitutive parameters estimated by plasticity index[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1988, 114(7): 844—858.
- [3] 白冰, 周健, 章光. 饱和软黏土的塑性指数对其压缩变形参数的影响[J]. *水利学报*, 2001, 11: 51—55.
BAI Bing, ZHOU Jian, ZHANG Guang. Effect of plasticity index of saturated soft clay on its deformation parameters[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 11: 51—55.
- [4] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clay[J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3): 329—378.
- [5] SRIDHARAN A, NAGARAJ H B. Compressibility behavior of remolded, fine-grained soils and correlation with index properties[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37: 712—722.
- [6] LACASSE S, BERRE T, LEFEBVRE G. Block sampling of sensitive clays[C]//Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco: [s. n.], 1985, 887—892.
- [7] NISHIDA Y. A brief note on compression index of soil[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE*, 1956, 82(3): 1—14.
- [8] HONG Z S, YIN J, CUI Y J. Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(9): 691—700.
- [9] 孙德安, 陈波, 周科. 重塑上海软土的压缩和剪切变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1389—1394.

- SUN De-an, CHEN Bo, ZHOU Ke. Experimental study on compression and shear deformation characteristics of remolded Shanghai soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1389—1394.
- [10] PICARELLI L. Discussion on the paper “the general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks” by Leroueil and Vaughan[J]. **Géotechnique**, 1991, 41(2): 281—284.
- [11] NAGARAJ T S, MURTHY B R S, VATSALA A, et al. Analysis of compressibility of sensitive soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, 1990, 116(1): 105—118.
- [12] 殷杰. 基于重塑土力学特性的结构性评价基准研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
- [13] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 1976.
- [14] BAUDET B, STALLEBRASS S. A constitutive model for structured clays[J]. **Géotechnique**, 2004, 54(4): 269—278.
- [15] 张先伟, 王常明, 李军霞. 软土结构性及结构破损机理[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3): 373—379.
- ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming, LI Jun-xia. Structural characteristics and the damage mechanism of soft clay[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2010, 39(3): 373—379.
- [16] LAGIOIA R, NOVA R. An experimental and theoretical study of the behavior of a calcarenite in triaxial compression[J]. **Géotechnique**, 1995, 45(4): 633—648.

上接第 364 页

- [7] LAI Y, ZHANG S, YU W. A new structure to control frost boiling and frost heave of embankments in cold regions[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2012, 79—80: 53—66.
- [8] KONRAD J M. Freezing-induced water migration in compacted base-course materials[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, 45(7): 895—909.
- [9] KONRAD J M, LEMIEUX N. Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42(2): 515—527.
- [10] VINSON T S, AHMAD F, RIEKE R. Factors important to the development of frost heave susceptibility criteria for coarse-grained soils[J]. **Transportation Research Record**, 1986, 124—131.
- [11] CHEN X, WANG Y. Control of frost heave in geotechnical engineering[C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. [S. l.]: Publ by American Soc. of Mechanical Engineers (ASME), 1989.
- [12] 叶阳升, 王仲锦, 程爱君, 等. 路基的填料冻胀分类及防冻层设置[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(1): 1—7.
- YE Yang-sheng, WANG Zhong-jin, CHENG Ai-jun, et al. Frost heave classification of railway subgrade filling material and the design of anti-freezing layer[J]. **China Railway Science**, 2007, 28(1): 1—7.
- [13] 许建, 牛富俊, 牛永红, 等. 换填法抑制季节冻土区铁路路基冻胀效果分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 1—7.
- XU Jian, NIU Fu-jun, NIU Yong-hong, et al. Analysis on the effect of replacing-soil method on inhibiting frost heave of railway roadbed in seasonal frozen soil region[J]. **China Railway Science**, 2011, 32(5): 1—7.
- [14] 张以晨, 李欣, 张喜发, 等. 季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性及其分类研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1522—1526.
- ZHANG Yi-chen, LI Xin, ZHANG Xi-fa, et al. Research on frost heave susceptibility and classification of coarse grained soil of highway subgrade in seasonally frozen ground region[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(10): 1522—1526.