

天然沉积结构性黏土原位压缩规律及预测模型研究

刘维正¹, 瞿 帅¹, 张军辉²

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 通过天然沉积黏土的原状样与重塑样的压缩对比试验, 揭示了屈服后土结构性的渐进性破损过程以及由常规 $e-\lg \sigma'_v$ 曲线确定的压缩指数 C_c 随固结压力呈非线性变化性状给实际工程沉降计算参数选取带来不便。采用 $\lg(1+e)-\lg \sigma'_v$ 双对数坐标表示方法, 通过不同初始结构大小的黏土试验数据证实了 $\lg(1+e)-\lg \sigma'_v$ 压缩曲线在屈服前后段具有良好的线性关系, 实现了结构屈服应力、屈服前后压缩指标有效统一确定。在该坐标体系下给出了考虑取样扰动影响的原位压缩曲线恢复方法, 建立了结构性黏土的双线性压缩模型, 结合文中与文献中试验数据给出了结构屈服应力与不排水强度、屈服后压缩指标与稳定指数 SI 和液限 w_L 的经验关系。研究结果可为天然沉积土地基固结沉降计算参数的合理选取提供依据。

关 键 词: 土结构性; 原位压缩曲线; 双线性压缩模型; 结构屈服应力; 压缩指数

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598-(2015) 增 1-0101-08

In-situ compression law and prediction model of natural sedimentary structured clay

LIU Wei-zheng¹, QU Shuai¹, ZHANG Jun-hui²

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

2. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: The comparative compression tests were performed on the natural sedimentary undisturbed clays and corresponding remolded samples. The test results indicate that the destructuration after gross yield is a progressive process; the post-yield compression curve displays a nonlinear behavior in the plot of $e-\lg \sigma'_v$; and the compression index, C_c , designated by the slope of the curve, is not constant in the entire stress range, which cause trouble to settlement calculation. Therefore, the double logarithmic coordinates system is used to represent the compression curve. A good linear relationship between the logarithm of the specific volume and logarithm of consolidation stress is obtained for clays with different initial structures. The soil structural yield stress and compression indices in the pre-yield and post-yield phases are effectively and simultaneously determined. And then taking into account the sample disturbance, a method of modifying the compression parameters is presented to predict the virgin compression curve; and a bilinear compression model is developed for the structured clays. Based on the experimental data in this paper and other literatures, the empirical relationship between the yield stress and undrained strength, and relationship between compression index and stability index (SI) as well as liquid limit (w_L) are established. This study results provides a reasonable basis for determining the consolidation and settlement calculation parameters.

Keywords: soil structure; in-situ compression curve; bilinear model compression; structural yield stress; compression index

1 引 言

天然沉积土黏土由于在长期的形成过程中受到固结成岩、化学胶结、时间效应、触变硬化和淋溶作用等诸多因素的影响, 导致其力学性质与相应的重塑土截然不同, 而二者力学性状的差别可统一归

结为土结构性的影响^[1-3]。尽管不同区域的天然沉积黏土赋存不同类型和强弱的结构性, 但表现出的压缩特性较为一致, 即具有高于前期固结压力的结构屈服应力; 同一压力下原状样比相应重塑样有更高的孔隙比; 屈服前土结构保持初始完整状态, 变形小, 压缩曲线平缓; 屈服后土结构迅速破损, 变

形急剧增大, 压缩曲线陡降, 最后压缩性随结构的破坏逐渐变小, 趋于重塑土的压缩曲线^[4-9]。结构性黏土屈服后的结构破坏段压缩曲线在目前广泛使用的 $e-\lg \sigma'_v$ 半对数坐标中表现为明显的非线性, 只有在结构完全丧失后为线性关系^[10-13]。因此 $e-\lg \sigma'_v$ 压缩曲线斜率, 即压缩指数 C_c 是随应力水平而变化的, 并非常数, 给实际工程沉降计算参数选取带来不便, 但目前少见有关结构性土的线性压缩模型研究。

天然沉积结构性黏土灵敏度较高, 易受取样卸荷、制样等扰动, 导致压缩试验曲线失真, 由此得来的压缩指标与原位土相比误差较大, 因此需校正室内试验曲线, 再现土的原位压缩特性。目前主要以重塑土的压缩曲线为基准状态对室内压缩曲线进行修正, 比较典型方法的有: Schmertmann^[14]以自重应力和屈服应力为界分为 3 直线段压缩曲线。Nagaraj^[11]以屈服应力和转折应力为界分为刚性变形段、结构破坏段和结构完全丧失段, 其中结构破坏段采用幂函数模拟。王立忠等^[9]分别采用 3 段、4 段折线式压缩曲线, 模拟结构性较弱、较强土体的压缩规律。这些多段式压缩曲线基本符合结构性土体屈服前后的变形特征, 但结构屈服应力常采用最大曲率法等作图法确定, 有很大随机性, 转折点应力和孔隙比采用经验关系, 且屈服后多段式曲线同样带来压缩指数非常数的问题。

本文通过原状土和重塑土压缩试验深入认识结构性土体屈服前后的压缩性状, 引入能对天然土体压缩曲线进行线性化的双对数坐标 $\lg(1+e)-\lg \sigma'_v$, 提出综合考虑应力水平和扰动影响的原位压缩曲线恢复方法, 建立双线性压缩模型, 为天然结构性土地基沉降计算参数合理选取提供依据。

2 一维压缩规律

试验土样取自太湖湖沼相地区的宁常高速常州段和锡张高速张家港段 6 个典型断面, 钻孔编号分别为 NC1、NC2、NC3、NC4 和 XZ1、XZ2。原状土样均采用受扰动程度小的内径为 75 mm、长 50 cm 或 30 cm 的不锈钢薄壁取土器获取, 土样取出后立即用石蜡密封好, 采取减震措施运回试验室开展试验。NC2、NC3 孔的土样物理性质相比其余 4 孔要好, 密度大都大于 1.90 g/cm^3 , 孔隙比在 0.80 左右。其余 4 孔, 密度为 $1.75 \sim 1.95 \text{ g/cm}^3$, 孔隙比为 $0.8 \sim 1.3$, 天然含水率大都处于 $0.9 \sim 1.2$ 倍的液

限范围, 因此可将试验土样分为软黏土和硬黏土。土样按照钻孔和土样深度进行编号, 如 NC1-8, 表示 NC1 号孔的 8.0 m 深处土样。

图 1 为不同深度原状样与相应重塑样的压缩曲线。图中, 重塑样通过立即收取原状样制备过程中削余的土样, 包在塑料袋中, 用手捏搓, 充分破坏其结构, 保证与原状样有相同的颗粒组成、含水率和湿密度。从图中可以看出, (1) 原状样压缩曲线在重塑样的之上。原因是沉积过程中原状土颗粒之间形成的胶结强度阻止土体进一步压密, 使原状土体保持着较大的孔隙; (2) 重塑样压缩曲线基本为一直线, 原状样的为前缓后陡型的曲线, 存在明显的结构屈服应力, 结构屈服前后压缩性显著不同。随着土体的结构逐渐破损, 结构性土的压缩曲线向重塑土的压缩曲线逼近; (3) 软黏土相对于硬黏土在屈服后阶段的压缩曲线斜率较陡, 表明其结构破损速率更大。

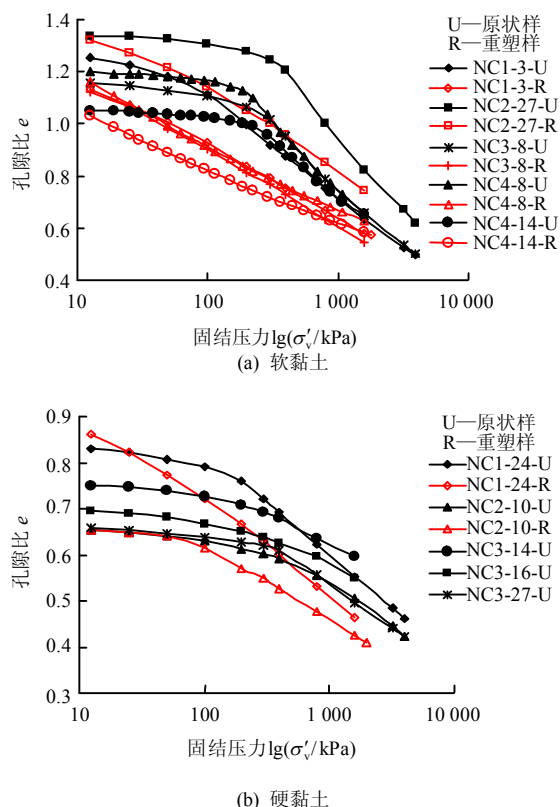
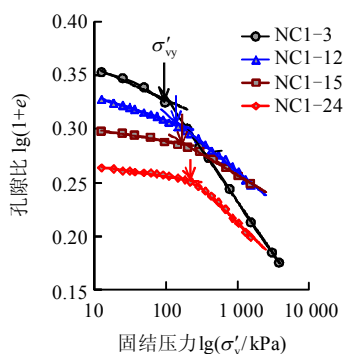


图 1 不同深度的原状样与重塑样压缩曲线

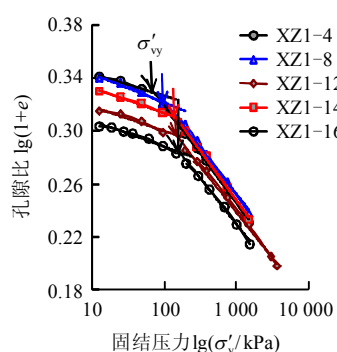
Fig.1 Compression curves of undisturbed and reconstituted samples

从图 1 压缩曲线可知, 结构屈服应力 σ'_{vy} 控制着变形性状, 是天然土体的一个重要参数。Nagaraj 等^[10]为减小传统作图法的人为因素影响, 提出采用 $\lg(1+e)-\lg \sigma'_v$ 双对数坐标确定结构屈服应力的方

法,认为压缩曲线在 $\sigma'_v < \sigma'_{vy}$ 和 $\sigma'_v > \sigma'_{vy}$ 两段均呈直线,且两直线的交点就是屈服应力。本文采用此方法对不同深度原状样的结构屈服应力进行确定,典型结果如图 2 所示。研究发现所有试验结果的直线拟合度很好,表明该方法有很好的适用性,且确定的结构屈服应力随深度的增大而增大。



(a) NC1 孔



(b) XZ1 孔

图 2 不同深度土样的结构屈服应力

Fig.2 Structural yield stress of clays at different depths

图 3 为不同原状样归一化的压缩指数随应力水平的变化关系。图中,原状土的 C_c 与固结压力 σ'_v 分别用 C_c^* 、 σ'_{vy} 进行归一化,消除了土的不同组构和不同结构屈服应力大小的影响。从图中可以看出,虽然不同土样压缩曲线的斜率在屈服前后变化幅度不尽一致,但压缩指数随固结压力的变化规律相同。当 $\sigma'_v/\sigma'_{vy} < 1$ 时,由于结构强度的存在,原状土骨架只发生很少量的弹性压缩变形,压缩指数较小;当 $\sigma'_v/\sigma'_{vy} > 1$,土体的结构受到较大程度的破坏,土体内的大孔隙在这一阶段被压密,压缩指数骤然变大,能达到 2 倍 C_c^* ;随着固结压力的进一步增大,当 $\sigma'_v/\sigma'_{vy} > 3$ 后,孔隙比随着应力的变化明显放缓,表现为压缩指数在峰值后逐渐减小到一定的值,最后趋于重塑土的 C_c^* ,其他学者^[5-6]同样指出结构性土体的压缩指数在整个应力水平下表现为非线性变化,在 1~2 倍屈服应力范围内与重塑土的 C_c^* 差异

最为显著。

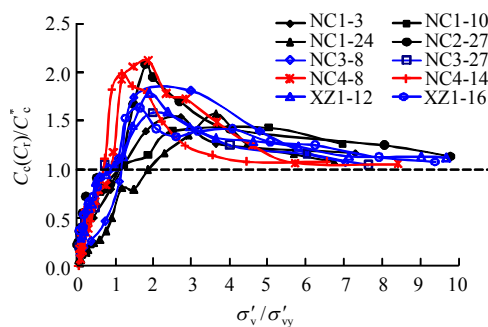


图 3 归一化的压缩指数与固结压力的关系

Fig.3 Relationships between normalized compression index and normalized consolidation pressure

3 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 坐标的适用性

e - $\lg \sigma'_v$ 压缩曲线曲线为土力学中经典的关系曲线,被广泛地应用于天然地基沉降计算。然而从上述分析中可知,由于土结构性在加载过程中的损伤演化,压缩指数随固结压力呈非线性变化。如果仅定义单一压缩指数 C_c 用于实际工程的沉降计算,必然给结果的准确性带来严重的负面影响;如果在沉降计算中考虑 C_c 随 σ'_v 变化的关系又给实际应用时带来不便,但从前述确定结构屈服应力 σ'_{vy} 的方法中可以看出,双对数坐标中屈服前后的线性关系很明显。

本文引入 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 双对数坐标,以期改善天然沉积黏土压缩曲线在 e - $\lg \sigma'_v$ 坐标中的非线性关系。不仅其纵坐标 $1+e$ 为土的比体积 v ,更加直观地描述了土骨架的体积和有效压力之间的关系。而且,在采用双对数坐标确定结构屈服应力时,屈服前后两段拟合直线的斜率就是 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 下的压缩指标 C'_t 、 C'_c ,本文定义为体积压缩指数。由两拟合直线交点的纵坐标可得出结构屈服应力对应的孔隙比 e_y ,两拟合直线交点的横坐标就是 σ'_{vy} 。从而实现结构屈服应力、屈服前后压缩指标有效统一确定。

图 4 为 5 种初始含水率为 40%~564% 的天然沉积黏土的 e - $\lg \sigma'_v$ 和 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 压缩曲线。结果表明,在双对数坐标中屈服后段压缩曲线的线性关系得到明显改善,屈服前后以结构屈服应力为界可以由双直线很好地表示,且在压缩性比较大(初始孔隙比大、灵敏度高)的土体中,这种线性改良作用更为明显。文献[2]指出,重塑土的压缩曲线在 e - $\lg \sigma'_v$ 坐标中略微向上弯曲,只能近似为直线,其压缩性的大小主要受液限含水率的影响,见图 5(a)。

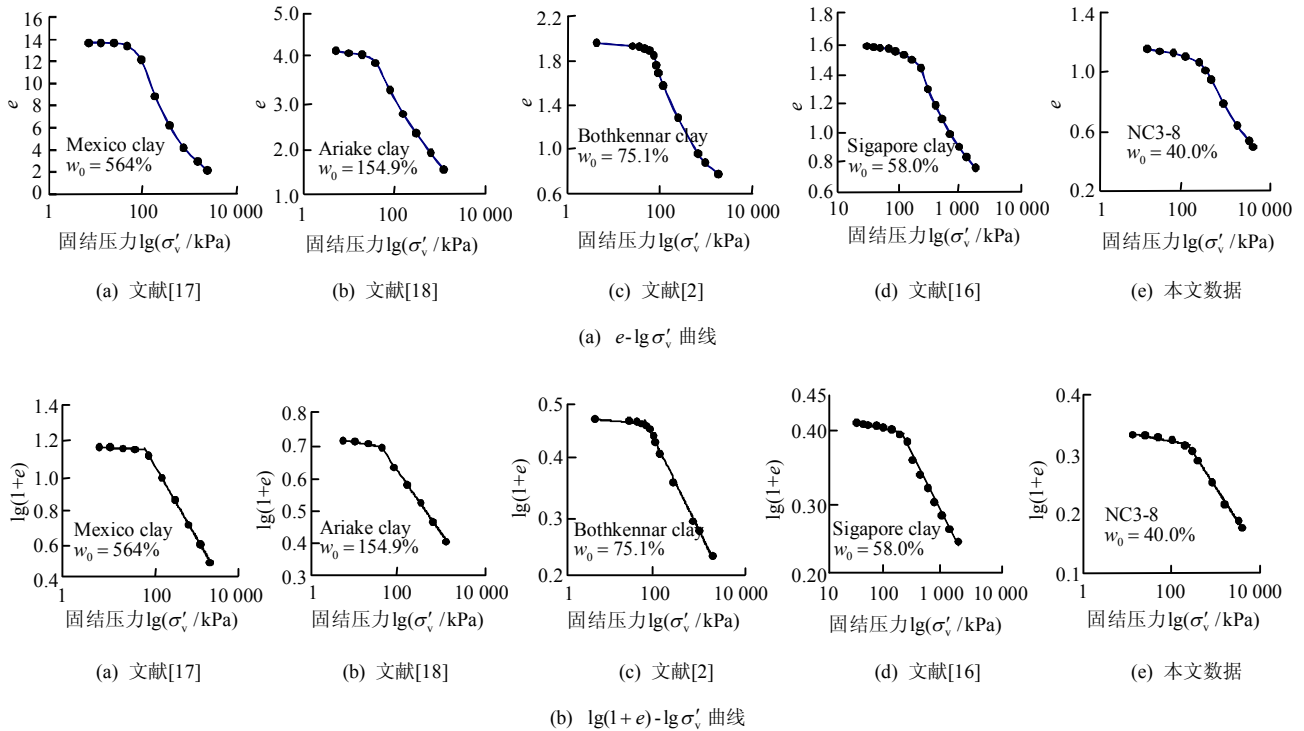


图4 两种不同坐标下天然沉积黏土原状样压缩曲线

Fig.4 Compression curves of natural sedimentary clays in two different coordinates

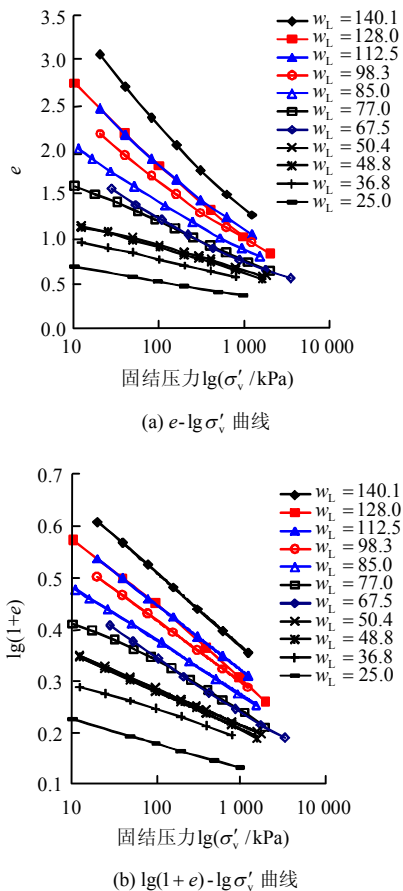


图5 不同液限重塑土的压缩曲线

Fig.5 Compression curves of different reconstituted clays

为了考察 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 坐标对重塑土的适用

性,收集了包括本文试验在内的 11 种液限含水率范围为 25%~140.1%的重塑样压缩试验数据。图 5(b) 为 11 种重塑土的 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 压缩曲线。从图中可以看出,其线性关系要好于图 5(a),改善了原来线性关系不明显的压缩曲线,保持了在 e - $\lg \sigma'_v$ 坐标中已有的良好线性关系。

4 原位压缩曲线恢复

4.1 扰动评价

基于土样扰动对其压缩性状的影响以及 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 压缩曲线在屈服前后 2 个阶段均呈直线, Skempton^[19]以重塑土压缩指标 C_c^* 作为参考基准,认为屈服前土体由于结构性作用其变形可以忽略不计,如图 6 所示,定义的扰动度为

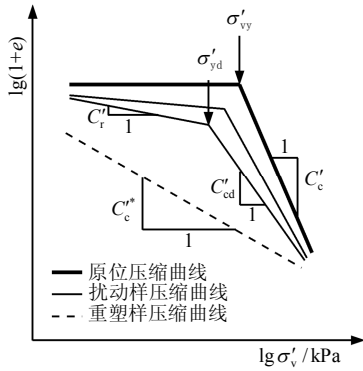
$$SD(\%) = \frac{C'_r}{C_c^*} \times 100\% \quad (1)$$

式中: SD 为扰动度; C'_r 为扰动土屈服前体积压缩指数。

该评价方法表达形式简洁,取值范围在 0~100%,物理意义明确,同时本文也是在双对数坐标体系下对原位压缩特性进行分析。因此,下文引入该方法对土体扰动度进行评价和修正扰动后的土体力学指标。

4.2 指标修正

进行修正前首先需要知道扰动度评价基准 C_c^*

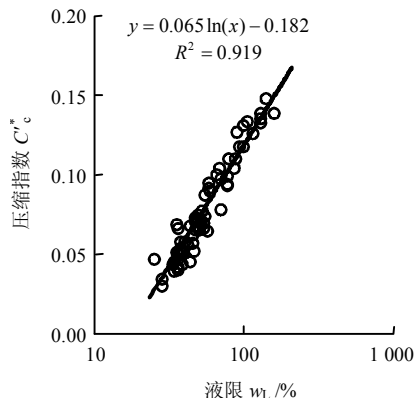
图 6 扰动度评价示意图^[19]Fig.6 Sketch of disturbance degree evaluation^[19]

的大小，而实际工程中很少针对完全重塑土的压缩试验，因此，过去不少学者努力寻求重塑土的压缩特性与土性指标之间的经验关系，较为准确的是刘维正^[20]建立的重塑土压缩指数 C_c 与液限 w_L 间的经验关系：

$$C_c = 0.007(w_L - 10) \quad (2)$$

式 (2) C_c 是在 e - $\lg \sigma'_v$ 坐标中定义的，在 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 体系中是否有此关系呢？为了分析 C_c^* 与液限 w_L 间的关系，收集了包括本文试验在内的 73 种液限含水率为 25%~158.9% 的重塑样压缩试验数据，基本指标以及相应的压缩指标 C_c^* 见文献 [21]。拟合 73 种重塑样的液限和体积压缩指数 C_c^* 发现，两者间存在很好对数关系，拟合系数达到 0.92，如图 7 所示。用式 (3) 经验关系计算扰动度表达式中参数 C_c^* 的大小：

$$C_c^* = 0.065 \ln(w_L) - 0.182 \quad (3)$$

图 7 压缩指数 C_c^* 与液限 w_L 的关系Fig.7 Relationship between C_c^* and w_L

有了重塑土的压缩指标 C_c^* 后，可根据室内扰动土样屈服前段的压缩指标 C_r 计算出土样扰动度 SD (%), 即对扰动样的力学指标进行修正。根据 Skempton^[2]指出结构屈服应力、屈服后的压缩指数

与扰动度成线性关系，本文定义 σ'_{vy} 、 C'_c 的修正公式为

$$\sigma'_{yd} = \sigma'_{vy} (1 - SD/100) \quad (4)$$

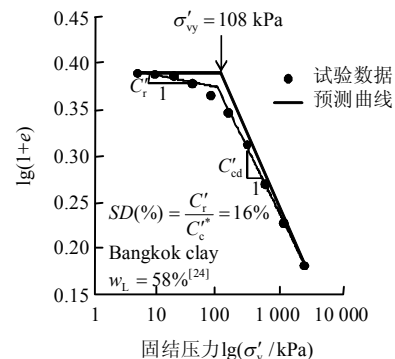
$$C'_{cd} = C'_c (1 - SD/100) \quad (5)$$

式中： σ'_{yd} 、 C'_{cd} 分别为室内扰动样的结构屈服应力、屈服后段压缩指数； σ'_{vy} 、 C'_c 分别为修正后的原位结构屈服应力、屈服后段体积压缩指数。

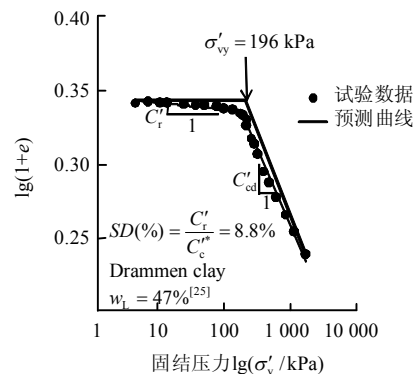
4.3 原位压缩曲线预测

结合扰动度评价方法以及压缩指标的修正公式，对室内压缩曲线校正，预测其原位压缩曲线。下面通过 Bangkok 黏土和 Drammen 黏土的拟合说明原位压缩曲线的预测方法。

首先，对室内压缩曲线用两条直线拟合，得到室内扰动土的 σ'_{yd} 、 C'_r 、 C'_{cd} ，根据液限 w_L 利用式 (3) 确定出 C_c^* 后，再根据式 (1) 得到扰动度 SD 的大小。然后，利用式 (4)、(5) 确定原位情况的 σ'_{vy} 、 C'_c 。屈服前段的原位压缩曲线为一孔隙比等于初始孔隙比的水平线。Bangkok 黏土和 Drammen 黏土预测的原位压缩曲线如图 8 所示。



(a) Bangkok 黏土



(b) Drammen 黏土

图 8 原位压缩曲线预测

Fig.8 Prediction of virgin compression curve

图 8 中, σ'_{vy} 的预测值分别为 108 kPa 和 196 kPa, 与文献中提供的 110 kPa^[21] 和 180~200 kPa^[22] 较为吻合。可见, 本文建议的方法恢复的原位压缩曲线能较好地反映土体的原位压缩特性, 且线性化模拟使压缩指数为常数, 更方便实际的应用。

5 双线性压缩模型

根据前面对原位压缩特性的分析, 可以建立天然沉积结构性黏土的双线性压缩模型, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \lg(1+e) &= \lg(1+e_0) - C'_r \lg(\sigma'_v / \sigma'_{v0}), (\sigma'_v \leq \sigma'_{vy}) \\ \lg(1+e) &= \lg(1+e_0) - C'_r \lg(\sigma'_{vy} / \sigma'_{v0}) - \\ &\quad C'_c \lg(\sigma'_v / \sigma'_{vy}), (\sigma'_v > \sigma'_{vy}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

基于建立的双线性压缩模型, 考虑结构性影响的天然地基沉降计算, 关键是结构屈服应力和压缩指标的选取。

5.1 结构屈服应力

当有原状样的室内压缩试验数据时, 结构屈服应力可以采用章节 4 中的方法通过对取样扰动的修正获得较为准确的原位值。在没有试验数据情况, 对于天然结构性土, 由于不排水强度 S_u 容易获取, 而 σ'_{vy} 、 S_u 是同一结构性的宏观反映。因此理论上不同天然沉积土在两者之间有着密切联系。图 9 为不同天然土样的 S_u 与 σ'_{vy} 之间的关系, 其数据来源于本文试验和一些文献中报道的土样, 见文献[21]。从图可见, 天然土样 $S_u > 10$ kPa 时, S_u 与 σ'_{vy} 存在很好的线性关系:

$$\sigma'_{vy} = 3.4S_u + 16.7 \quad (7)$$

已知不排水强度 S_u 时则可利用式 (7) 确定原位屈服应力的大小。

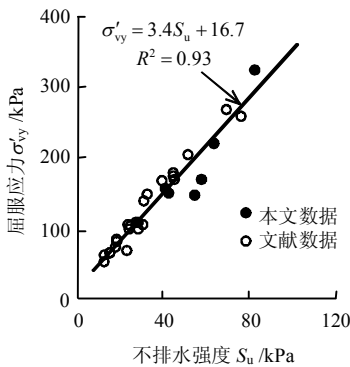


图 9 S_u 与 σ'_{vy} 的关系

Fig.9 Relationship between S_u and σ'_{vy}

5.2 体积压缩指数

天然结构性土相对于重塑土处于大孔隙比的亚稳状态, 将天然土样屈服前的亚稳状态视为初始结构状态, 随压力趋于稳定的重塑土状态视为最终状态。这样可以看出初始的亚稳状态和最终的重塑稳定状态对体积压缩指数 C'_c 都有影响。

根据文献[24], 亚稳状态可以通过稳定指数 SI 表示, 稳定的重塑状态可以用 w_L 表示, 其中 SI 为

$$SI = I_{vy} - I_{vr} \quad (8)$$

式中: I_{vy} 、 I_{vr} 分别为原状土和重塑土在结构屈服应力 σ'_{vy} 下的孔隙指数, 具体确定方法参见文献[24]。

为了能弄清 C'_c 与 w_L 、 SI 之间的定量关系, 本文搜集了包括本文试验在内 68 个原状黏土样的压缩试验数据, 见文献[21]。将屈服后体积压缩指数 C'_c 与 SI 汇于图 10 中, 发现两者间的关系很离散, 没有规律性, 这是因为 C'_c 不仅受 SI 的影响, 还受 w_L 的影响。当 C'_c 用 C'^*_c 归一化后, 再与 SI 比较, 关系如图 11 所示。从图中可以看出, 规律性明显增强, 经线性拟合可以得到关系式:

$$\frac{C'_c}{C'^*_c} = 0.573SI + 1 \quad (9)$$

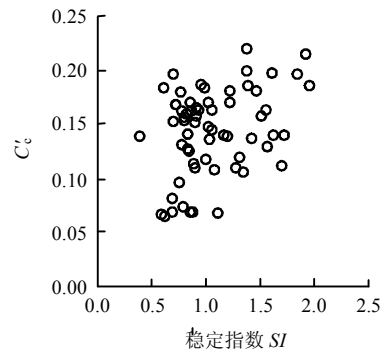


图 10 C'_c 与 SI 关系

Fig.10 Relationship between C'_c and SI

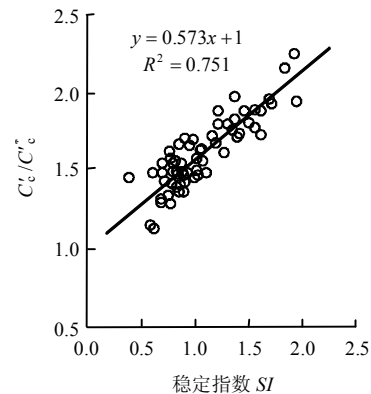


图 11 C'_c/C'^*_c 与 SI 关系

Fig.11 Relationship between C'_c/C'^*_c and SI

式(9)中,当 $SI=0$ 时,就退化为重塑土的情况,此时 $C'_c=C_c^*$ 。鉴于天然结构性土在屈服前变形很小,甚至可以忽略。因此, σ'_{vy} 处的孔隙比 e_y 与 e_0 相差不大,稳定指数 SI 的表达式(8)可用式(10)替代,即

$$SI = I_{v0} - I_{vr} \quad (10)$$

式中: I_{v0} 、 I_{vr} 确定的方法与前述相同。当已知结构屈服应力 σ'_{vy} 、液限 w_L 和初始孔隙比 e_0 (或初始含水率 w_0),可以用本文的经验关系式(3)、(9)、(10)确定天然结构性土体积压缩指数 C'_c 的大小。

6 结 论

(1) 常规 e - $\lg \sigma'_v$ 压缩曲线的归一化压缩指数与固结压力呈显著的非线性变化。当 $\sigma'_v/\sigma'_{vy} \leq 1$ 时,天然沉积土由于土结构支撑作用,压缩指数很小;当 $1 < \sigma'_v/\sigma'_{vy} \leq 3$ 时,伴随土结构大量破损,压缩指数骤然变大;当 $\sigma'_v/\sigma'_{vy} > 3$ 后,变化明显放缓,最后趋于重塑土的压缩指数 C_c^* 。

(2) 结合不同的原状土和重塑土的压缩试验数据,证实了 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 双对数坐标能改善 e - $\lg \sigma'_v$ 压缩曲线的非线性,且不会影响 e - $\lg \sigma'_v$ 中已有的良好线性关系,线性化模拟后使得压缩指标(C'_r 、 C'_c 、 C_c^*)为常数,可方便实际应用。

(3) 在 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 坐标体系下实现了对结构屈服应力、屈服前后体积压缩指数的有效统一确定,给出了考虑扰动影响的原位压缩曲线恢复方法,建立了结构性黏土的双线性压缩模型。

(4) 结合本文试验数据和已有文献中的压缩试验数据,在 $\lg(1+e)$ - $\lg \sigma'_v$ 坐标体系下给出了重塑土体积压缩指数 C_c^* 和液限 w_L 间的经验关系式和天然沉积土屈服后体积压缩指数 C'_c 与结构性指标 SI 与液限 w_L 的经验关系式。

参 考 文 献

- [1] LEROUÉIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks [J]. *Geotechnique*, 1990, 40(3): 467—488.
- [2] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(3): 329—378
- [3] CHANDLER R J. Clay sediments in depositional basin: The geotechnical cycle[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2000, 33(1): 7—39.
- [4] QUIGLEY R M, THOMPSON C D. The fabric of anisotropically consolidated sensitive marine clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1966, 3(2): 61—73.
- [5] MESRI G, OSKHSAR A, BOHOR B F. Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay [J]. *Geotechnique*, 1975, 25(3): 527—554.
- [6] LOCAT J, LEFEBVRE G. The compressibility and sensitivity of an artificially sedimented clay soil: The Grande Baleine marine clay[J]. *Quebec Marine Geotechnical*, 1985, 6(1): 1—27.
- [7] NASH D, SILLS G C, DAVISON L R. One-dimensional consolidation testing of soft clay from Bothkennar[J]. *Geotechnique*, 1992, 42(2): 241—256.
- [8] 张诚厚. 两种结构性黏土的土工性质[J]. *水利水电工程学报*, 1983, 4(4): 65—71.
- [9] 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, 137(14): 47—53.
- [10] WANG Li-zhong, DING Li, CHEN Yun-min, et al. Study on compressibility of structured soft soil[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 137(14): 47—53.
- [11] BUTTERFIELD R. A natural compression law for soils [J]. *Geotechnique*, 1979, 29(4): 469—480.
- [12] NAGARAJ T S, MURTHY B R S, et al. Analysis of compressibility of sensitive soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 1990, 116(1): 105—118.
- [13] CHAI J C, MIURA N, ZHU H H, Yudhbir. Compression and consolidation characteristics of structured natural clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(6): 1250—1258.
- [14] CHOWDHURY B, HAQUE A, MUHUNTHAN B. New pressure-void ratio relationship for structured soils in the virgin compression range[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2014, 140(8)
- [15] SCHMERTMANN J H. The undisturbed consolidation behavior of clay[J]. *Transactions of ASCE*, 1955, 120(2): 1201—1226.
- [16] TANAKA H, LOCAT J, SHIBUYA S. Characterization of Singapore, Bangkok, and Ariake clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(2): 378—400.
- [17] LOW H E, PHOON K K. Effect of cementation on the

- compressibility of Singapore upper marine clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, 45(7): 1018—1024.
- [16] MESRI G, ROKHSAR A, BOHOR B F. Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay[J]. **Geotechnique**, 1975, 25(3): 527—554.
- [17] HONG Z S, HAN J. Evaluation of sample quality of sensitive clay using intrinsic compression concept[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(1): 83—90.
- [18] HONG Z S, ONITSUKA. A method of correcting yield stress and compression index of Ariake clays for sample disturbance[J]. **Soils and foundations**, 1998, 38(2): 211—222.
- [19] SKEMPTON A W. Notes on compressibility of clays[J]. **Quarterly Journal of the Geological Society**, 1944, 100(2): 119—135.
- [20] 刘维正. 饱和黏性土原位力学特性分析与应用研究[博士学位论文 D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [21] HORPIBULSUK S, SHIBUYA S, FUENKAJORN K, et al. Assessment of engineering properties of Bangkok clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44(2): 173—187.
- [22] TANAKA H, TANAKA M, SHIWAKOTI D R. Characteristics of soils with low plasticity: Intermediate soil from Ishinomaki, Japan and lean clay from Drammen, Norway[J]. **Soils and Foundations**, 2001, 41(1): 83—96.
- [23] 刘维正, 石名磊, 缪林昌. 太湖湖沼相天然沉积土结构性评价[J]. **岩土工程学报**, 2010, 32(10): 1616—1620.
- LIU Wei-zheng, SHI Ming-lei, MIAO Lin-chang. Evaluation of soil structural characteristics of Taihu lacustrine-swamp natural sedimentary soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(10): 1616—1620.