

上海软黏土压缩特性的试验研究

陈 波, 胡云世, 张效忠, 田 芳, 王宝峰

(衢州学院 建筑工程学院, 浙江 衢州 324000)

摘要: 为研究结构性对上海软黏土压缩特性的影响, 利用单向高压固结仪, 对取自上海不同地点的 3 种软黏土的原状样及相应的重塑样进行了大量的一维主固结和次固结试验。主固结试验结果表明: 结构性的存在使原状样的压缩曲线位于重塑样的上方, 具有明显的结构屈服应力; 结构屈服应力的大小与取样方式密切相关, 现场直接切取试样的压缩曲线的结构屈服应力点最明显, 应力值最大, 厚壁样的压缩曲线则几乎没有屈服应力点。次固结试验结果表明: 结构性的存在使原状样的次固结系数与固结压力密切相关, 且次固结系数最大处的固结压力为结构屈服应力的 1.5 ~ 2.5 倍, 而正常固结状态的重塑样的次固结系数与固结压力几乎无关。最后, 正常固结状态下上海软黏土的次固结系数分布范围表明, 其次压缩性为中等至高等, 次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c 表明, 上海软黏土为无机质黏土及粉土。

关键词: 软黏土; 原状样; 重塑样; 结构屈服应力; 次固结系数

中图分类号: TU411. 3

文献标识码: A

Experimental study on compressibility of Shanghai soft clays

Chen Bo, Hu Yunshi, Zhang Xiaozhong, Tian Fang, Wang Baofeng

(College of Civil Engineering and Architecture, Quzhou University, Quzhou 324000, China)

Abstract: A large number of one-dimension primary and secondary consolidation tests have been carried out to study the effect of soil structure on compression characteristics on undisturbed and remolded samples obtained from three different soft clays in Shanghai. The primary compression test results show that the compression curves of undisturbed samples are above that of the remolded samples and the structure yield stress is obviously existed in the undisturbed samples. The magnitude of structure yield stress is related with the sampling method. The structural yield stress point is found in the samples taken by in-situ cut while no yield point is observed in the samples taken by thick wall method. Based on the secondary consolidation compression curves of undisturbed and remolded samples, it is found that the secondary consolidation coefficient of undisturbed samples is related with the consolidation pressure due to the soil structure and the consolidation pressure at maximum secondary consolidation coefficient is about 1.5 ~ 2.5 times of the structure yield stress for undisturbed samples. While there is no relationship between secondary consolidation coefficient and consolidation pressure for remolded samples. The values of secondary consolidation coefficient in normal consolidation state and the values of C_a/C_c show that the Shanghai soft clay is inorganic clay and silt with moderate to high secondary compressibility.

Key words: Soft clay; undisturbed sample; remolded sample; structural yield stress; coefficient of secondary consolidation

0 引言

典型的上海软黏土是指暗绿色硬土层以上的第三层淤泥质粉质黏土和第四层淤泥质黏土, 它们具有含水量高、孔隙比大、渗透性小、结构性强等特点^[1]。尤其是土体的结构性, 作为天然沉积软黏土

的一个重要力学特性, 对土的力学性质具有重要影

收稿日期: 2014-01-20; 修订日期: 2014-04-18

基金项目: 衢州学院人才培养基金 (BSYJ201306)。

作者简介: 陈波 (1984 -), 男 (汉族), 浙江衢州人, 博士, 讲师。

响, Leroueil (1990) 等^[2] 甚至指出, 结构性对于原状土的力学特性的影响, 与初始孔隙比及应力历史是同等重要的。

结构性是指土粒本身的形状、大小和特性, 土粒在空间的排列形式, 孔隙状况及粒间接触和联结特性的总和^[3], 结构性的存在使天然沉积土与其相应的重塑土在力学特性方面存在着明显的差异, Burland (1990)^[4] 指出天然土的特性与重塑土固有特性的差异反映了土体结构性的影响。

近二十年来, 结构性极大地吸引了国内外学者的关注和重视, 并在软黏土的力学特性^[5~9] 及微观结构^[10,11] 等方面开展了卓有成效的研究, 取得了大量的成果。尤其是在软黏土压缩特性研究方面, 通过对原状样和重塑样的主固结及次固结试验的比较研究, 分析了结构性对压缩曲线、次固结系数等方面的影响, 从中总结出某些规律用以指导工程实践^[5~9]。如: 主固结试验结果得出结构性黏土具有明显的结构屈服应力, 在结构屈服应力前, 压缩曲线初始段很平缓, 压力超过结构屈服应力后, 曲线出现陡降段, 并向重塑土的压缩曲线靠近^[5,6]; 次固结试验结果得出, 原状土的固结压力小于前期固结压力时, 次固结系数随固结压力的增长较快, 当固结压力大于结构完全屈服压力时, 次固结系数不随固结压力的变化而变化。次固结系数变化与否的荷载分界点不是先期固结压力, 而是结构完全屈服压力^[7~9] 等。

考虑到不同软黏土之间力学特性的差异, 本文利用单向高压固结仪, 对不同取样方式得到的 3 个地点的上海软黏土原状样及相应重塑样进行了大量的一维主固结和次固结试验。主固结试验结果表明: 原状样的压缩曲线位于重塑样的上方, 具有明显的结构屈服应力, 且屈服应力的大小与取样方式密切相关; 次固结试验结果表明: 结构性的存在使原状样的次固结系数与固结压力密切相关, 且次固结系数最大处的固结压力为结构屈服应力的 1.5 ~ 2.5 倍, 而正常固结的重塑样的次固结系数与固结压力无关。最后, 根据土体次固结系数分布值及次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c 显示, 上海软黏土属于中等至高等次压缩性的无机质黏土及粉土。

1 试验材料及试验内容

1.1 试验材料

(1) 试验用原状样

试验用的 3 种原状样分别为取自上海的浦东机场、虹桥枢纽和浦江南路的淤泥质软黏土。为便于

比较不同取样方式对土样的影响, 土样的取土深度均为地表以下 10m 左右。其中, 浦东机场原状样为厚壁取样方式得到, 虹桥枢纽原状样为薄壁取样方式得到, 浦江南路原状样为基坑现场的现场直接切取取样方式得到, 3 种土样的基本物理特性详见表 1。

试验土样的基本物理特性 表 1

土样	取样深度	天然含水量 (%)	结构屈服应力 (kPa)	液限 w_L (%)	塑限 w_p (%)	塑性指数 I_p
虹桥枢纽	10	38.5 ~ 43.6	86	41.7	20.2	21.5
浦东机场	10	44.0 ~ 54.0	84	44.5	22.4	22.1
浦江南路	9.7	44.6 ~ 55.9	118	47.7	25.5	22.2

注: 表格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

考虑到压缩和蠕变试验需要较长时间, 为了防止原状样在长期存储过程中, 土体中的水分蒸发导致土样的含水量发生较大变化, 进而对其力学特性产生影响, 对土样进行了如下的处理^[12]: ①切削好的试样外包装二层保鲜膜后, 在其外层包裹一层锡箔; ②锡箔外包装上一层棉布, 并及时浇上熔化的石蜡; ③重复步骤 2 直至棉布层数不少于 3 层。

(2) 试验用重塑样

试验用的重塑样制备方法如下: 将现场取来的原状土样经长时间浸泡, 充分搅拌, 制成饱和泥浆, 倒入直径 15cm、高 16cm 的制样桶中, 分级加载, 固结成样, 试样的固结压力为 70kPa。试验时根据试样尺寸切取固结土样一部分制成压缩试样。为保证相同固结压力下, 同一土样不同批次制成的重塑固结样具有基本相同的含水量或孔隙比, 饱和泥浆的初始含水量至少要保证在液限的 1.5 倍以上^[4], 本次研究将含水量控制在液限的 2 倍及其以上^[13]。

1.2 试验内容

单向压缩试验: 将 $h = 20.0\text{mm}$, $d = 61.8\text{mm}$ 的试样连环刀装入固结仪中, 再按加载比 1: 1 的条件分级加载, 每级荷载固结 12h。考虑到结构性对土的压缩曲线具有重要影响, 分别对扰动程度不同的三种原状样及相应的重塑样进行多次单向压缩试验, 并得到相应的 $e-\lg\sigma_v$ 曲线。

单向蠕变试验: 将 $h = 20.0\text{mm}$, $d = 61.8\text{mm}$ 的试样连环刀装入固结仪中, 在蠕变荷载前按加载比 1: 1 的条件分级加载, 每级荷载主固结时间为 12h。当固结压力达到次固结试验荷载后, 荷载保持不变, 分别记录下 1min、2min、4min、8min、16min、32min、64min、... 条件下的竖向位移值, 得到不同荷载条件下的 $e-\lg t$ 曲线, 试验一次的时间大约为 1 周。

2 压缩试验结果及分析

2.1 压缩试验结果

从3种不同软黏土的原状样和重塑样的多次单向压缩试验结果中选出部分试验结果整理后,得到图1所示的单向压缩曲线,从图1所示的试验结果中,可以得到以下结论。

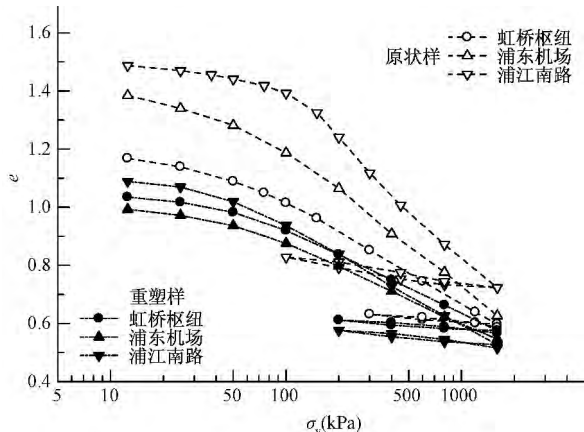


图1 不同土样的原状样和重塑样的 e - $\lg \sigma_v$ 曲线

(1) 原状样的压缩曲线位于重塑样压缩曲线的上方,表明在相同的固结压力下,结构性使原状土样具有更高的孔隙比。且随着固结应力的增大,两者孔隙比的差异逐渐减小。从图1的试验结果可知:在10kPa的竖向应力下,除虹桥枢纽的原状样和重塑样孔隙比差值为0.2外,另2种土样的孔隙比差值均为0.4左右,与国内相关统计结论一致^[6]。

(2) 根据 Lacasse (1985)^[14] 等人提出的分级评价方法,即通过不扰动土样固结至有效上覆压力下的体变大小衡量,根据图1所示的部分结果可知,浦东机场厚壁原状样的体变超过了10%,土样的质量很差;虹桥枢纽薄壁原状样的体变为7%左右,土样的质量差;浦江南路的现场直接切取原状样的体变仅为4%左右,属于中等质量的土样。

(3) 取样方式不同,对土样的扰动程度差异较大,进而对土的压缩曲线和结构屈服应力产生较大影响,如图1所示。浦江南路试样的压缩曲线有明显的屈服点,此点的应力称为结构屈服应力。采用薄壁或厚壁取样的其他两种试样,则结构屈服应力不是很明显,尤其是厚壁取样的浦东机场原状样,其压缩曲线接近为一条直线。相应地,结构屈服应力也随着扰动程度的增加而逐渐减小,其多次试验确定出的平均值详见表1。因此,为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

小的现场直接切取试样的方式采样再进行试验。

(4) 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;而重塑样的压缩曲线则几乎为一条直线。需说明的是,本文得到的重塑样的压缩曲线也有屈服点,貌似与原状样的压缩曲线类似,这是由于试验用的重塑样受过70kPa的前期固结压力造成的。而且,随着固结压力的增加,结构性对原状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样的压缩曲线。但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,仍存在一定的争议。Burland (1990)^[4]、Baudet (2004) 等^[15]认为,当土样中存在稳定结构时,则无论固结压力多大,两者的压缩曲线都不能重合;若土样中的结构不稳定,则当应力足够大时,两者的压缩曲线将重合。由于本试验的最大固结压力为1600kPa,因此,试验用的上海软黏土原状样和重塑样的压缩曲线能否重合,仍需进一步试验才能判定。

2.2 压缩结果归一化分析

重塑样的力学特性只反映土的基本性质,与土样的天然状态无关,故其力学特性称为土的固有特性。原状样的力学特性可简单地认为是其相应重塑样的力学特性与土体结构性的综合效果。为定量地评价天然土的压缩特性,Burland (1990)^[4]通过引入孔隙指数 I_v (Void index) 的方式,对初始含水率为1.0~1.5倍液限范围的不同软黏土重塑样的压缩曲线归一化后,得到不同软黏土的重塑土压缩曲线基本归一化为一条曲线的结论,Burland (1990)^[4]称之为土的固有压缩曲线 ICL (Intrinsic Compression Line),其孔隙指数 I_v 的定义如公式(1)所示。Burland (1990)^[4]对重塑土压缩曲线进一步处理后,认为当土样的液限变化范围为25%~127%时,其孔隙指数 I_v 也可按表达式(2)来近似确定。

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

$$I_v = 2.45 - 1.285x + 0.015x^3 \quad (2)$$

式中: e 为土的孔隙比; e_{100}^* 和 e_{1000}^* 分别为重塑土在单向压缩试验中固结应力 $\sigma_v = 100\text{kPa}$ 和 $\sigma_v = 1000\text{kPa}$ 时的孔隙比; C_c^* 为重塑土的压缩指数; $x = \lg \sigma_v$, σ_v 的单位为 kPa。

为了定量分析三种不同软黏土的结构性,对图1所示的单向压缩曲线也用孔隙指数 I_v (Void index) 归一化整理后,得到图2所示的归一化曲线。从图中所示的 I_v - $\lg \sigma_v$ 曲线中,可得到以下结论。

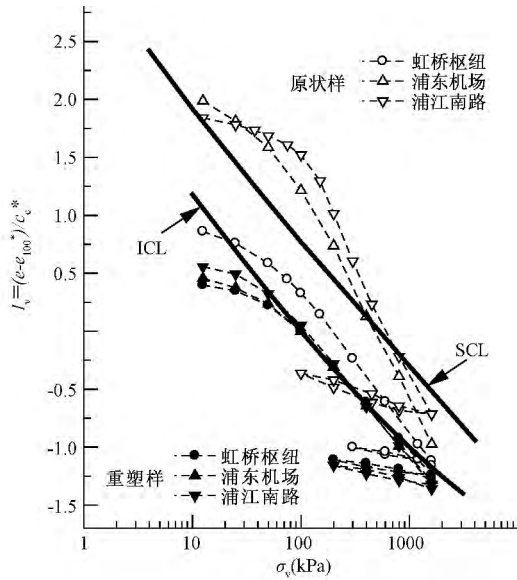


图2 原状样和重塑样的归一化压缩曲线

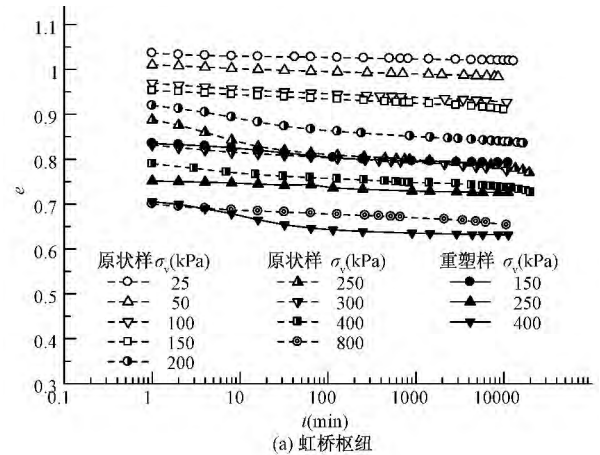
当固结应力大于土的前期固结应力后, 3 种不同软黏土的重塑样压缩曲线基本一致, 且与 Burland (1990) [4] 建议的固有压缩曲线 ICL 线基本重合。而原状样由于土体在沉积过程中形成的结构性, 其相同固结应力下比重塑样具有更大的孔隙比, 并使天然沉积土的压缩曲线均位于重塑土压缩曲线的上方。但由于土体结构性的差异, 虹桥枢纽原状样的压缩曲线位于自然沉积线 SCL (Sedimentation compression line) 和 ICL 之间, 其他两种土样原状样的压缩曲线则位于 SCL 线的上方。Burland (1996) 等 [16] 对原状样与重塑样压缩曲线的差异进一步分析后认为, 屈服应力位于 ICL 和 SCL 之间时, 原状样和重塑样力学特性的差异主要是由组构差异引起的; 屈服应力位于 SCL 线之上的土样, 原状样和重塑样力学特性的差异主要是胶结结构引起的。因此, 根据图 2 所示的试验结果可知, 浦东机场、浦江南路软黏土的结构性以胶结结构为主, 而虹桥枢纽软黏土的结构性则以组构结构为主。上述微观结构的差异可能是三种不同土体沉积环境的差异引起的, 因为根据上海地区各时期海岸线的位置图和地质单元分区图可知, 虹桥枢纽软黏土的成陆时间明显早于其他两种软黏土的成陆时间 [17]。

3 次固结试验结果及分析

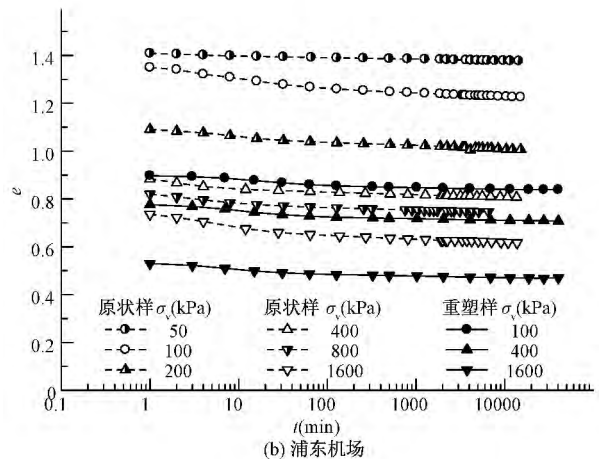
3.1 次固结试验结果

将 3 种不同软黏土的原状样和重塑样在不同固结压力下得到的蠕变试验结果进行整理后, 得到图

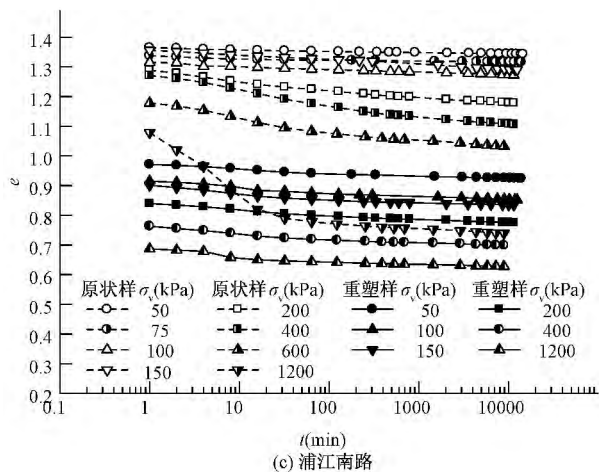
3 所示的 $e-\lg t$ 曲线。从图中可知, 由于软黏土中存在大量的自由水, 使土样在刚开始时产生大量的主固结变形。随后, 由于软黏土在有效应力作用下薄膜水体的转化、土颗粒的塑性调整和骨架的流动等, 使土的压缩量逐渐减缓, 并把此变形称为流变或次固结变形。



(a) 虹桥枢纽



(b) 浦东机场



(c) 浦江南路

图3 三种软黏土原状样和重塑样在不同围压下的蠕变曲线

研究表明, 软黏土由于具有明显的次固结变形而导致工程产生大量的工后沉降, 引发相关的工程事故^[18, 19]。作为反应软黏土次固结变形性能的重要指标, 次固结系数 C_a 目前已广泛用于计算软黏土的次固结变形沉降。次固结系数 C_a 的计算方法为: 根据试验得到的 $e-\lg t$ 曲线确定主固结完成后, 根据次固结试验结束时与确定的主固结完成点的孔隙比差异, 利用公式 (3) 进行计算得到。

$$C_a = -\Delta e / \lg(t/t_p) \quad (3)$$

式中: Δe 为次固结阶段的孔隙比变化; t 为次固结试验完成时间; t_p 为主固结和次固结分界点的时间。

3.2 次固结系数与固结压力的关系

对于次固结系数随固结压力变化的关系, 尤其是原状土的次固结系数与固结压力的关系, 国内外已开展了大量的试验和理论研究并得到了丰硕的成果^[7~9, 20, 22]。然而, 不同学者根据各自的试验结果得出了不同的结论。有的学者认为, 土的次固结系数变化主要是受到荷载增量比的影响, 与土的最终固结压力无关^[7]。更多的学者则认为次固结系数与荷载加载比无关, 主要取决于土样的最终固结压力^[8, 20]。因此, 有必要根据试样结果进一步去分析上海软黏土原状样和重塑样的次固结系数与固结压力的关系。

将公式 (3) 计算得到的次固结系数结果, 按次固结系数与固结压力的关系整理后, 得到图 4 所示的次固结系数与固结压力的关系曲线。根据图 4 的试验结果, 可得到以下结论。

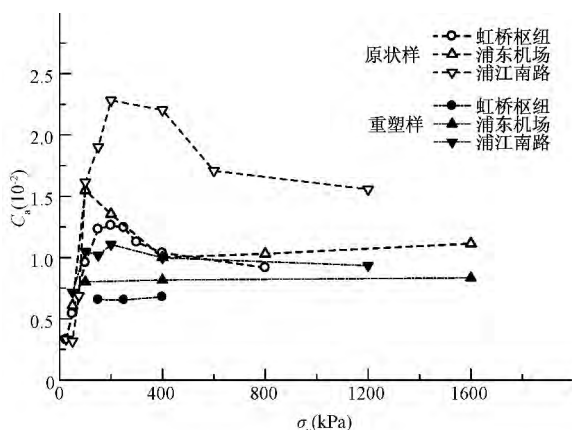


图 4 次固结系数与固结压力的关系曲线

(1) 对于重塑土而言, 除了浦江南路土样在 50kPa 压力下的次固结系数明显偏小以外, 其他各级压力下的次固结系数基本相同, 而其他两种土样的次固结系数也基本保持不变。试验得到的 50kPa 下的次固结系数明显小于其他压力下的次固结系

数, 主要是由于重塑土制样时受到 70kPa 的前期固结压力, 使土样处于超固结状态引起的^[7]。当固结压力大于前期固结压力, 重塑样处于正常固结状态时, 其次固结系数基本保持不变, 说明固结压力对正常固结重塑软黏土的次固结系数几乎没有影响。

(2) 三种不同土样重塑样的次固结系数存在着一定的差异, 这是由于不同土样的重塑样含水量存在一定差异引起的, 因为土的矿物成分决定了土的天然含水量, 而土的压缩指数和次固结系数又与其含水量有关。但是, 三种不同土样的塑性指数 I_p 几乎相同, 而国内外众多研究结果表明, 土的次固结系数与塑性指数具有很好的线性相关性^[21], 与本文的试验结果似乎矛盾, 这可能是物理特性试验过程中, 由于液、塑限相减产生的累积误差导致三者的塑性指数相差不大引起的。若采用液限含水量 w_L 作为土的基本物理指标, 则能很好地解释三者次固结系数为何存在差异, 因为三者的 w_L 存在明显的差异, 如表 1 所示。因此, 为了减小此方面引起的误差, 应尽量采用 Burland (1990)^[4] 建议的采用土体的液限 w_L 作为重塑土的基本物理指标。

(3) 对于原状土, 当固结压力小于结构屈服应力时, 土样的次固结系数随着固结压力的增大而逐渐增大, 达到最大值后次固结系数反而随固结压力的增大而减小, 并在一定压力后次固结系数保持不变。此外, 三种土样的次固结系数最大值处的固结压力也较为一致, 均在 200kPa 左右, 位于 Casagrande 方法确定出来的结构屈服应力 σ_p 的 1.5 ~ 2.5 倍之间, 当固结压力是结构屈服应力 σ_p 的 4.0 倍左右时, 则次固结变形特性就与无结构性的重塑土基本一致了。这主要是由于固结压力较大时, 多数颗粒间的联接已经被破坏, 进而导致次固结系数的下降, 并在结构屈服压力 4.0 倍左右时, 土样的结构性就达到完全破坏了。当固结压力超过前期固结压力后, 次固结系数主要分布在 0.8% ~ 1.6% 之间, 按照 Mesri (1973)^[22] 对软黏土次固结变形特性的分类, 上海软黏土的次压缩性处于中等至高等的范围内。

3.3 次固结系数与压缩指数关系

Mesri (1977)^[23] 根据 22 种不同黏土的次固结试验结果的统计后发现, 任何土体在次固结变形阶段, 次固结系数 C_a 的大小与其对应的压缩指数 C_c 的大小基本保持一致, 较大的压缩指数往往伴随着较大的次压缩系数。即, 对于同一种原状土, 次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c 是一个常数。随后, Mesri (1977)^[23] 根据试验统计的结果, 提出了

C_a/C_c 的概念并认为主固结沉降和次固结沉降的变形机理类似, 次固结沉降可看成是主固结沉降在次压缩阶段的延续的结论。目前, 国内外已将这一概念广泛用于土体的次压缩变形计算中。

试验结果进一步整理后, 得到图 5 所示的上海软黏土原状样和重塑样的次固结系数 C_a 与压缩指数 C_c 的关系。从图 5 中可知, 虽然试验数据有一定的离散型, 但无论是上海软黏土的原状样还是重塑样, 无论其处于超固结状态还是正常固结状态, 其次固结系数和压缩指数之间都具有很好的线性相关性, 其 C_a/C_c 的比值也基本上是常数。根据多次的试验结果, 拟合得到上海软黏土的 $C_a/C_c = 0.035$ ($R^2 = 0.91$), 与吴宏伟等 (2011) [8]、高彦斌 (2004) [7] 等的统计结果基本一致。同时, 根据图 5 中 C_a/C_c 的上、下界限值可知, C_a/C_c 的比值基本位于 0.03 ~ 0.05 之间。用 Mesri (1974) 等 [23] 根据 C_a/C_c 值对土体进行分类的方法, 判定上海软黏土主要为无机质黏土及粉土。

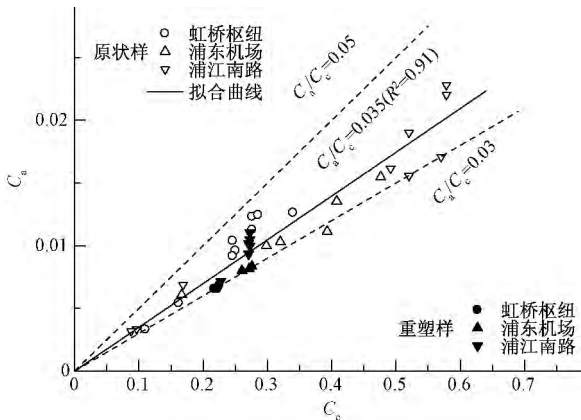


图 5 不同土样的原状样和重塑样的 C_a-C_c 曲线

4 结论

本文利用单向固结仪, 对取自不同地点的 3 种上海软黏土的原状样及相应的重塑样进行了大量的一维主固结和次固结试验。根据主固结试验得到的 $e-\lg \sigma_v$ 曲线及归一化整理后的曲线特点以及次固结试验得到的 $e-\lg t$ 曲线并分析研究了次固结系数与固结压力、压缩指数的关系后, 得到以下结论。

(1) 取样方式不同, 土样的扰动程度差异较大, 进而对土的压缩曲线产生影响。其中采用现场直接切取取样方式对试样的扰动最小, 压缩曲线具有明显的结构屈服应力, 采用薄壁或厚壁取样方式采取的试样, 则结构屈服应力不是很明显, 尤其是厚壁取样得到的原状样, 其压缩曲线接近为一条直线, 说明取样方式对土样结构具有重要影响。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。

(2) 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。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, 与土样的结构类型密切相关。由于本试验的最大固结压力有限, 因此, 上海软黏土原状样和重塑样的压缩曲线能否重合, 仍需进一步试验才能判定。

(3) 结构性的存在使原状样的次固结系数与固结压力密切相关, 且次固结系数最大处的固结压力为结构屈服应力的 1.5 ~ 2.5 倍, 正常固结重塑样的次固结系数与固结压力无关。最后, 根据固结压力超过前期固结压力后, 土体次固结系数的分布范围, 判定上海软黏土的次压缩性处于中等至高等范围内。根据次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c , 判定上海软黏土为无机质黏土及粉土。

参 考 文 献

- [1] 黄绍铭, 高大钊. 软土地基与地下工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] Leroueil S, Vaughan P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks [J]. Géotechnique, 1990, 40 (3): 467 ~ 488.
- [3] Mitchell J K. Fundamentals of Soil Behavior [M]. New York: Wiley, 1976.
- [4] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clay [J]. Géotechnique, 1990, 40 (3): 329 ~ 378.
- [5] 吕海波, 汪稔, 孔令伟等. 结构性对琼州海峡软土压缩特性的影响 [J]. 岩土力学, 2001, 22 (4): 467 ~ 473.
- [6] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20 (1): 100 ~ 111.
- [7] 高彦斌, 朱合华, 叶观宝等. 饱和软粘土一维次压缩系数 C_a 值的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (4): 459 ~ 463.
- [8] 吴宏伟, 李青, 刘国彬. 上海黏土一维压缩特性的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (4): 630 ~ 636.
- [9] 周秋娟. 不同卸荷路径下软土变形特性试验研究 [J]. 工程勘察, 2013, 41 (10): 17 ~ 22.
- [10] Delage P. A microstructure approach to the sensitivity and compressibility of some Eastern Canada sensitive clays [J]. Géotechnique, 2010, 60 (5): 353 ~ 368.
- [11] 张先伟, 王常明, 李忠生等. 不同地区结构性软土基本性质的对比研究 [J]. 工程勘察, 2011, 39 (5): 6 ~ 10.
- [12] Rochelle P L, Leroueil S, Tavenas F. A technique for long-term storage of clay samples [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23 (4): 602 ~ 605.
- [13] 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.

- [14] Lacasse S, Berre T, Lefebvre G. Block sampling of sensitive clays [A]. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C]. San Francisco, 1985, 887 ~ 892.
- [15] Baudet B, Stallebrass S. A constitutive model for structured clays [J]. *Géotechnique*, 2004, 54 (4): 269 ~ 278.
- [16] Burland J B, Rampello S, Georgiannou V N, et al. A laboratory study of the strength of four stiff clays [J]. *Géotechnique*, 1996, 46 (3): 491 ~ 514.
- [17] 叶为民, 唐益群, 张先林等. 上海市地下工程中地质灾害危险程度分区研究 [J]. *同济大学学报*, 2000, 28 (6): 726 ~ 730.
- [18] 马桂华, 陈锦剑, 王建华等. 上海软土地区多层建筑物长期沉降特性 [J]. *岩土力学*, 2006, 27 (6): 991 ~ 994.
- [19] 刘增贤. 公路软基次固结及其工程意义探讨 [J]. *公路*, 2006, (2): 73 ~ 76.
- [20] 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.
- [21] 白冰, 周健, 章光. 饱和软粘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.
- [22] Mesri G. Coefficient of secondary compression [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division-ASCE*, 1973, 99 (SM1): 123 ~ 137.
- [23] Mesri G, Godlewski P M. Time and stress compressibility interrelationship [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1974, 103 (5): 417 ~ 430.

(上接第 10 页)

因此, 为更好地反映岩体工程的力学行为, 在进行计算时有必要结合岩石实际的物理构造及力学特征综合考虑岩体工程中存在的宏、微观缺陷对岩体力学行为的影响, 以得到更符合实际的结果。

3 结论

本文首先分析了顺倾层状岩质边坡的失稳破坏模式, 然后基于欧拉压杆失稳模型建立了直立层状岩石边坡在自重荷载作用下的失稳计算模型及临界高度计算方法, 最后在此基础上建立了一般倾斜层状岩质边坡的临界高度计算方法。同时基于岩石内部含有初始损伤这一客观事实, 建立了基于统计损伤模型的直立层状岩石边坡失稳模型, 并获得以下研究结论。

(1) 基于能量法提出的顺倾层状岩质边坡在自重荷载作用下的失稳模型更符合边坡的实际受力特征及破坏情况, 计算结果也符合实际情况。

(2) 基于岩石统计损伤本构模型提出的顺倾层状岩质边坡失稳模型是对上述模型的改进和修正, 该模型不但考虑了岩石的弹性模量等参数, 而且结合了应力—应变曲线等特征, 因此得出的结果也将更符合实际。同时, 通过对模型参数变化对边坡临界失稳高度影响的研究可以看出, 模型参数即岩石

的应力—应变曲线特征对计算结果有一定影响。

参 考 文 献

- [1] 唐良琴, 刘东燕, 聂德新. 金川电站左岸引水发电系统进水口边坡块体稳定性分析 [J]. *工程勘察*, 2012, 40 (4): 1 ~ 4, 10.
- [2] 孙广忠, 孙毅. 岩体力学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] 孙强, 朱术云, 薛雷等. 力矩效应对顺层岩质边坡稳定性的影响 [J]. *煤炭学报*, 2011, 33 (5): 762 ~ 765.
- [4] 林杭, 曹平, 李江腾等. 层状岩质边坡破坏模式及稳定性的数值分析 [J]. *岩土力学*, 2010, 31 (10): 3300 ~ 3304.
- [5] 张天军, 李云鹏. 直立顺层边坡的粘弹性稳定性分析 [J]. *力学与实践*, 2003, 25 (6): 51 ~ 54.
- [6] 肖树芳, 杨淑碧. 岩体力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [7] 刘红岩, 丹增卓玛, 刘冶等. 基于统计损伤模型的直立层状岩质边坡失稳模型 [J]. *地质力学学报*, 2013, 19 (2): 198 ~ 205.
- [8] Zhi-liang Wang, Yong-chi Li, J. G. Wang. A damage-softening statistical constitutive model considering rock residual strength [J]. *Computers & Geosciences*, 2007, 33: 1 ~ 9.
- [9] Xiang Li, Wen-gui Cao, Yong-hua Su. A statistical damage constitutive model for softening behavior of rocks [J]. *Engineering Geology*, 2012, 143 ~ 144: 1 ~ 17.
- [10] 岳洋. 基于不同分布的岩石损伤本构模型的比较 [J]. *山西建筑*, 2010, 36 (24): 137 ~ 138.