

# 反复荷载作用下软土次固结特性试验研究

朱俊高<sup>1,2</sup>, 冯志刚<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 在高压固结仪上, 对 3 种原状软土 13 个试样进行了反复加卸荷载的一维固结试验, 研究了反复荷载作用下软土的次固结特性。结果表明: 初始加荷时, 次固结系数  $C_{\alpha}$  随固结压力  $p$  先增大后减小, 但次固结系数峰值对应的荷载并非前期固结压力; 在超固结状态下, 第 1 次再加荷时,  $C_{\alpha}$  随  $p$  增大而减小, 但 35 次荷载循环后再加荷时即使在超固结范围内  $C_{\alpha}$  随  $p$  增大而增大; 次固结系数随荷载循环次数增加显著减小; 荷载比对次固结系数的影响明显。试验及分析结果对工程实际具有一定的指导意义。

**关键词:** 软土; 反复压力; 次固结系数; 荷载比; 前期固结压力

**中图分类号:** TU411.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2009)03-0341-05

**作者简介:** 朱俊高(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事软土流变、土体本构关系及土石坝工程方面的研究。E-mail: zhujungao@163.com。

## Experimental study on behaviour of secondary consolidation of soft soils under repeatedly dumped loads

ZHU Jun-gao<sup>1,2</sup>, FENG Zhi-gang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on a number of oedometer tests on 13 soil samples, the influence of repeated loading on the secondary consolidation properties is investigated. It is found that with the increase of consolidation pressure  $p$ , the secondary consolidation coefficient  $C_{\alpha}$  increases firstly to a maximum value and then decreases under initial loading, but the consolidation pressure corresponding to the maximum value is not equal to the preconsolidation pressure. It is also revealed that with the increase of  $p$ ,  $C_{\alpha}$  decreases under the first reloading and increases after 35 cycles in overconsolidated state. With the increase of loading cycle number,  $C_{\alpha}$  decreases significantly. The load ratio  $\Delta p/p$  has significant effects on  $C_{\alpha}$ . Experimental findings and results are significant to the settlement control of soft soil ground.

**Key words:** soft soil; repeated pressure; secondary consolidation coefficient; load ratio; preconsolidation pressure

## 0 前 言

软土的次固结是指孔隙水压力完全消散后, 仍然不断发展的变形, 它是由于土粒表面结合水膜的蠕变、土粒结构的重新排列等因素所引起。近年来, 随着工程建设的迅猛发展, 对地基变形的控制要求越来越高。次固结变形研究也越来越受到重视, 从而对其变形特性认识相对较多, 相关试验研究和计算分析方法研究较多<sup>[1-3]</sup>。另一方面, 国内外学者对砂土或饱和黏土在不排水条件循环荷载作用下变形特性或本构模型研究很多<sup>[4-8]</sup>, 但对反复加卸荷载下的土体次固结变形特性试验研究却很少。事实上, 有些反复荷载作用下的地基, 如油罐地基等的变形控制要求也较高, 反复充卸油过程中地基的变形对油罐运行有一定影响, 在集装箱码头、堆场等也存在荷载反复作用, 对其长期变形

特性进行深入研究很有必要。

本文对取自某高速公路地基的 3 种原状软土 13 个试样进行了一系列反复加卸荷载的一维固结试验, 研究了不同加卸荷条件下土体次固结系数的变化规律, 为反复荷载作用下软土次固结变形计算提供重要参考。

## 1 试验方案

### 1.1 试验土料

试验土样为用薄壁取土器取自浙江宁波某高速公路地基的原状样。从不同钻孔取得 3 筒原状样, 其基本物理性质指标如表 1 所示。

### 1.2 试验方案

3 筒原状土样分别编号 I、II、III。每筒样用环刀

表1 土体基本物理性质指标  
Table 1 Physical properties of soils

土样	取样深度 /m	含水率 /%	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和度 S <sub>r</sub> /%	液限 w <sub>L</sub> /%	塑限 w <sub>p</sub> /%	土粒比重 G <sub>s</sub>	孔隙比 e	液性指数 I <sub>L</sub>	塑性指数 I <sub>p</sub>
I	8.0~8.5	59.8	1.67	100	41.1	26.6	2.71	1.593	2.29	15
II	13.0~13.5	48.7	1.74	100	39.2	24.5	2.71	1.316	1.65	15
III	6.0~6.5	38.9	1.81	98	30.1	20.4	2.70	1.072	1.91	10

分别切得4~5个试样,其中,I号原状样(8.0~8.5 m)切得4个试样,编号I-#1~I-#4; II号原状样(13.0~13.5 m)切得5个试样,编号II-#5~II-#9; III号原状样(6.0~6.5 m)切得4个试样,编号III-#10~III-#13。试样高2 cm,横截面积30 cm<sup>2</sup>。

试验在有侧限的高压固结仪上进行,采用杠杆加荷方式,试样双面排水。

本文试验中,各试样先分级加荷至某压力 $p_c$ (第1次加荷),然后卸荷至0,再分级加至( $p_{c1}$ )100、200、400或800 kPa,并在该压力下持续4~7 d,测读次固结变形,完成第1个荷载循环。然后,按反复压力 $\Delta p = 100$  kPa (0→50→100→50→0)、200 kPa (0→100→200→100→0)或400 kPa (0→200→400→200→0)进行反复加卸荷载试验,并且每5个循环测读反复压力下的次固结变形。各试样加荷情况及部分试验结果见表2。第1次加荷过程中,除I-#4、II-#5和III-#10这3个试样外,其它试样加荷的荷载比 $R=1$ 。需要指出,这里进行的试验中,荷载反复的中心为 $p_0=0$  kPa,即荷载增加到某值如100 kPa后卸荷到0 kPa,再加荷、卸荷,如此反复。

试样先施加压力达某值 $p_c$ 并回弹后在较小压力下反复加卸荷,因此,可以认为在反复压力下试样处于超固结状态,如I-#1和II-#7样反复压力100 kPa,即认为对应超固结比为32和16(见表2)。

I-#4、II-#5和III-#10样反复加卸荷仅循环15次,其它试样均循环35次。之后各试样均按 $R=1$ 的加荷方式分级加至3200 kPa,并测读部分荷载下的次固结变形。对I-#4、II-#5、III-#10样,第1次加荷进行了变荷载比的试验。这3个试样第1次加荷的荷载为,I-#4样:100,200,400,500,600,700,800,1600,3200 kPa; II-#5样:50,100,125,150,175,200,400,800,1600,3200 kPa; III-#10样:100,200,400,800,1600,2000,2400,2800,3200 kPa。每级荷载均测读次固结变形。其它10个试样第1次加荷均没有测读次固结变形。

试验中,需测读次固结变形时,荷载持续至少4 d。对于其他荷载,在第1次加荷过程持续24 h,反复加卸的荷载维持12 h。

## 2 试验结果分析

对表2中的13个试样进行了单向固结试验。测读

了有关荷载下的次固结变形。 $e - \lg t$ 曲线显示,加荷不到100 min时,主固结基本完成。因此,以200 min以后的试验点( $e - \lg t$ )来求次固结系数。表2给出了部分试验成果,供后面分析用。

表2 各试样加荷情况及试验结果

Table 2 Loading schemes and test results

试样号	$\Delta p$ /kPa	$p_c$ /kPa	$p_{c1}$ /kPa	$\Delta C_{\alpha 1}$	$\Delta C_{\alpha 2}$
I-#1	100(35)	3200(1)	200		0.00333
I-#2	100(35)	3200(1)	400		0.00412
I-#3	100(35)	3200(1)	800		0.00290
I-#4	100(15)	3200(8)	100	0.0103	0.00233
II-#5	100(15)	3200(8)	100	0.0085	0.00280
II-#6	100(35)	3200(1)	800		0.00361
II-#7	100(35)	1600(1)	400		0.00300
II-#8	100(35)	800(1)	200		0.00236
II-#9	100(35)	400(1)	100		0.00188
III-#10	100(15)	3200(9)	100	0.0036	0.00119
III-#11	100(35)	1600(1)	100		0.00165
III-#12	200(35)	1600(1)	200		0.00120
III-#13	400(35)	1600(1)	400		0.00087

注:表中,第2列括号中数字为荷载反复循环次数;第3列括号中数字为第1次加荷最大荷载维持天数;第4列为第1次再加荷达到的最大压力; $\Delta C_{\alpha 1}$ 为第1次荷载循环引起的 $C_{\alpha}$ 减小量(第1次荷载循环与第1次加荷反复压力下 $C_{\alpha}$ 之差); $\Delta C_{\alpha 2}$ 为循环35次引起的 $C_{\alpha}$ 减小量(第1次荷载循环与第35次荷载循环反复压力下 $C_{\alpha}$ 之差)。

### 2.1 反复加卸荷循环次数 $n$ 对次固结系数的影响

按照通常定义,次固结系数为

$$C_{\alpha} = \frac{-\Delta e}{\lg(t_2/t_1)}, \quad (1)$$

式中, $\Delta e$ 为土体孔隙水压力为0的情况下从时间 $t_1$ 到 $t_2$ 的土体孔隙比变化。

图1给出I-#3样初始压缩及第1、10和35次循环下的压缩回弹曲线(图中,对应1 kPa被认为压力为0)。图中可以看出,在第1次循环之后,随着循环次数的增加,同样压力下的孔隙比逐渐减小。但是,第1次回弹(即第1次加荷后的回弹)时,其50、100 kPa下的孔隙比明显较小。这主要是前期所施加的压力较大,为3200 kPa,卸荷到50或100 kPa时没有到0 kPa充分,当压力再从0增加50或100 kPa时,由于土体的非线性性质,使得这时的孔隙比比初始回弹时大。

图2显示I-#3、II-#7、II-#8和II-#9样在反复压力100 kPa下的次固结系数 $C_{\alpha}$ 与反复加卸荷循环次数 $n$ 的关系曲线,其中,循环次数在图2(a)中为常坐标,图2(b)中为对数坐标。对这4个试样,初始加荷最大压力 $p_c$ 分别为3200,1600,800和400 kPa,反复

压力均为 100 kPa, 对应超固结比分别为 32, 16, 8, 4。由图 2 (a) 可见, 随循环次数  $n$  的增加, 次固结系数迅速减小, 荷载循环 20 次后减小缓慢。这是由于反复加卸荷试验刚开始的几个循环, 土体骨架结构比较松散, 相对容易压密, 因而随着荷载反复次数增加, 孔隙比减小, 次固结系数明显降低。这种性质是否可以用来进行软土地基的处理, 减小地基次固结沉降引起的工后沉降值得深入研究。例如, 如果反复荷载对  $C_{\alpha}$  减小显著, 则蓄水或其它可反复加卸荷的堆载预压地基处理方法中, 无疑是有重要实际应用价值的。

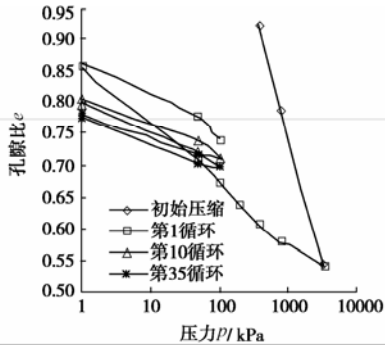


图 1 I-#3 样典型循环压缩回弹曲线

Fig. 1 Typical loading-unloading compression curves of sample I-#3

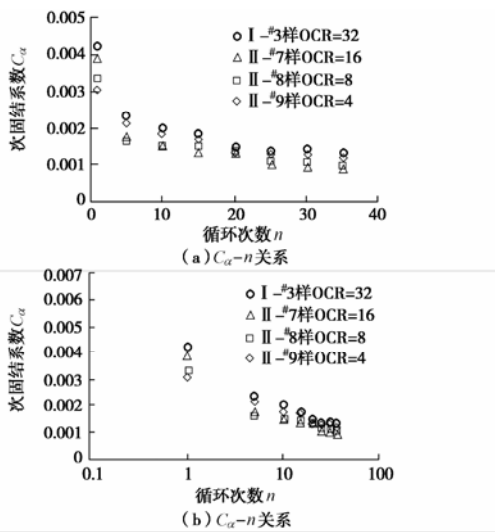


图 2 反复压力 100 kPa 下  $C_{\alpha}$  与循环次数关系曲线

Fig. 2 Relationship between  $C_{\alpha}$  and cycle number under 100 kPa

图 2 (b) 显示,  $C_{\alpha} - \lg n$  之间可近似用直线关系表示, 即

$$C_{\alpha} = a \lg n + b \quad (2)$$

式中,  $a, b$  为参数, 不仅与材料性质有关, 而且可能与前期固结压力大小、当前反复压力 (变化幅值) 大小以及反复荷载中心 (如前所述, 本文反复荷载中心均为  $p=0$ ) 有关。由于本文试验资料的限制, 这种相关性还有待进一步研究。I-#3、II-#7、II-#8、II-#9 样试验结果拟合得参数  $a, b$  见表 3。

表 3 不同试样参数  $a, b$  值

Table 3 Parameters  $a$  and  $b$  of different samples

参数	I-#3 样	II-#7 样	II-#8 样	II-#9 样
$a$	$1.86 \times 10^{-3}$	$1.83 \times 10^{-3}$	$1.40 \times 10^{-3}$	$1.23 \times 10^{-3}$
$b$	$4.00 \times 10^{-3}$	$3.56 \times 10^{-3}$	$3.06 \times 10^{-3}$	$3.03 \times 10^{-3}$

### 2.2 初始加荷条件下次固结系数与荷载关系

对取自现场的 3 筒原状样, 各整理了一个试样的  $e - \log p$  曲线, 发现在试验的压力范围 (50~3200 kPa) 内  $e - \log p$  关系基本为直线, 表明试样的前期固结压力较小。因此, 所有试样的第 1 次加荷 (尤其 100 kPa 以后的加荷) 都可以认为是初始加荷 (即当前有效应力即为历史上最大的有效应力)。在初始加荷之后的循环中, 由于荷载均小于初始加荷的最大压力, 因此, 认为各试样在室内初始加荷所施加的最大压力即前期固结压力  $p_c$ 。

根据试验结果整理了初始加荷条件下, 次固结系数随压力的变化, 如图 3 所示。图 3 中虚点所示的 3 条曲线 (荷载比  $R=1$ ) 均显示, 压力  $p < 200$  kPa 左右时, 次固结系数  $C_{\alpha}$  随  $p$  增大而增大;  $p > 200$  kPa 时,  $C_{\alpha}$  随  $p$  增大而减小。这种规律似乎与余湘娟等<sup>[1]</sup>的研究结果相近。余湘娟等对广东某软土进行的次固结试验表明, 在  $p < p_c$  时,  $C_{\alpha}$  随压力  $p$  增大而增大;  $p > p_c$  时,  $C_{\alpha}$  随  $p$  增大而减小。实际上, 文献[1]的结果与本文有所不同。文献[1]发现  $C_{\alpha}$  变化的拐点是  $p = p_c$ , 而本文的拐点并非前期固结压力, 而是在  $p = 200$  kPa 左右。这种现象究竟是由于超固结引起, 还是由于土样扰动、结构性或其它原因引起, 值得深入研究。

图 3 中的实点是荷载比  $R < 1$  情况下的次固结系数。其中,  $\blacklozenge$  形点为 I-#4 样, 对应荷载分别为 500, 600, 700, 800 kPa;  $\blacktriangle$  形点为 II-#5 样, 对应荷载分别为 125, 150, 175, 200 kPa。图中可见, 由于此时的荷载比较小, 次固结系数比  $R=1$  条件下的  $C_{\alpha}$  有显著减小, 这说明土体的次固结系数与所施加的荷载增量是密切相关的。目前, 大多假定  $C_{\alpha}$  不随荷载或荷载增量变化不尽合理, 典型的例子就是 Bjerrum<sup>[9]</sup> 的等时间线。因此, 在室内进行  $C_{\alpha}$  测定并用于实际工程的次固结沉降计算时, 对应试验应模拟实际工程对应的荷载及荷载增量测定  $C_{\alpha}$ 。

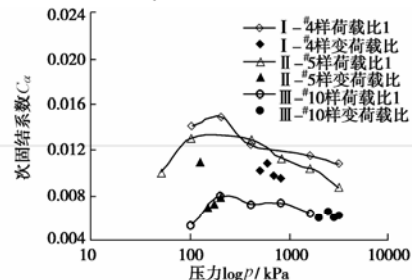


图 3 初始加荷条件下不同荷载比  $C_{\alpha} - p$  关系曲线

Fig. 3 Relationship between  $C_{\alpha}$  and  $p$  under different loading ratios

### 2.3 应力历史对次固结系数的影响

众所周知，超固结使得次固结系数  $C_{\alpha}$  减小。随着反复加卸荷循环次数的增加，尽管荷载没有增大，孔隙比却逐渐减小，导致试样的  $C_{\alpha}$  也随之减小。对照图 2 可以看出，荷载循环对减小  $C_{\alpha}$  明显。

图 4, 5 给出初始加荷后进行第 1 次再加荷情况下的  $C_{\alpha}$  随  $p$  的变化。尽管图中试验点有一定程度的离散，但  $C_{\alpha}$  随压力增大而减小的趋势是明显的。由于各试样初始加荷达到的最大压力  $p_c$  均大于图 4, 5 中各点对应压力，也就是这里似乎并未表现出类似文献[1]得到的结果，这是否意味着图 3 中的最大次固结系数点不一定对应前期固结应力。由于本文试验资料相对较少，这一点还有待进一步研究。

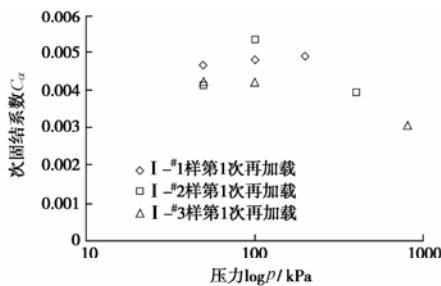


图 4 I-#1~I-#3 样第 1 次再加荷时  $C_{\alpha}$ - $p$  关系

Fig. 4 Relationship between  $C_{\alpha}$  and  $p$  of samples I-#1~I-#3 under initial reloading

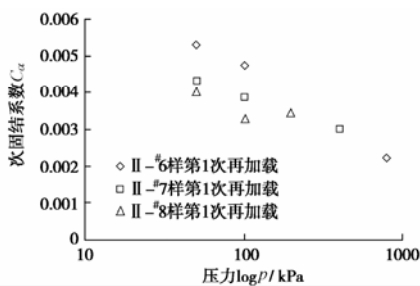


图 5 II-#6~II-#8 样第 1 次再加荷时  $C_{\alpha}$ - $p$  关系

Fig. 5 Relationship between  $C_{\alpha}$  and  $p$  of samples II-#6~II-#8 under first reloading

图 6~8 给出了几个试样在荷载循环 35 次(III-#10 样仅循环 15 次)后再加荷时，次固结系数随压力的变化。图中明显看出， $C_{\alpha}$  随着荷载的增大而增大，与图 4~5 显示的规律相反。

II-#8 和 II-#9 样初始加荷最大压力  $p_c$  分别为 800 和 400 kPa，对应图 7 中 II-#8 样 1600 kPa 压力的“ $\Delta$ ”点(A8 点)和 II-#9 样 400 和 800 kPa 压力的“O”点(A9、B9 点)的压力大于或等于  $p_c$ ，图 4, 5 和图 6~8 中其它所有点的压力都小于对应试样的  $p_c$ 。因此，图 7 中的 A8、A9、B9 点的  $C_{\alpha}$  明显比其它点的大。当然，即使不考虑这 3 个点，荷载循环 35 次后， $C_{\alpha}$  随  $p$  增大而增大的趋势仍是明显的，而  $p \geq p_c$  压力下  $C_{\alpha}$  随  $p$  增大而增大的趋势更加明显。同样，对于图 8 中的 A10、A11、B11、A12、B12、A13、B13 点也均表示其压力

大于或等于  $p_c$ ，也表现出与图 7 中同样规律。

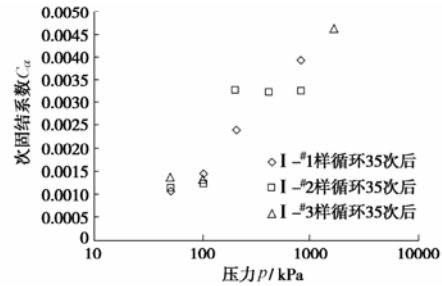


图 6 I-#1~I-#3 样荷载循环 35 次后  $C_{\alpha}$ - $p$  关系

Fig. 6 Relationship between  $C_{\alpha}$  and  $p$  of samples I-#1~I-#3 after 35 cycles

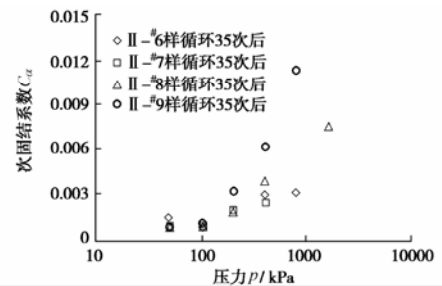


图 7 II-#6~II-#9 样荷载循环 35 次后  $C_{\alpha}$ - $p$  关系

Fig. 7 Relationship between  $C_{\alpha}$  and  $p$  of samples II-#6~II-#9 after 35 cycles

那么，图 4, 5 和图 6~8 显示的不同规律由什么原因引起的呢？从试验加荷情况看，只能是荷载反复引起。这里给出如下解释：次固结变形大部分为塑性变形，在初始加载后，试样超固结状态时的  $C_{\alpha}$  减小，但由于初始加荷维持时间相对较短（1 d），次固结变形并不能很充分发生就卸荷回弹了。因而，低压力下，仍表现为相对较大的  $C_{\alpha}$ 。随荷载增大，土体密实， $C_{\alpha}$  变小。相反，反复荷载作用后，在反复压力及其附近范围内，塑性次固结变形基本全部发生，弹性次固结变形较小， $C_{\alpha}$  较小，但随荷载增大，反复荷载的影响逐渐消失，对应塑性次固结变形变大， $C_{\alpha}$  变大。

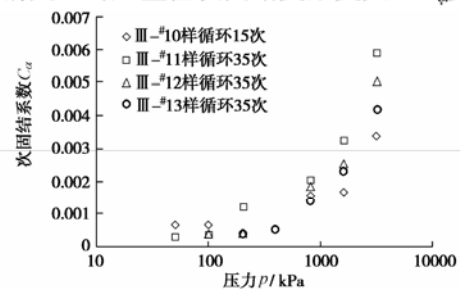


图 8 III-#10~III-#13 样荷载循环 35(15)次后  $C_{\alpha}$ - $p$  关系

Fig. 8 Relationship between  $C_{\alpha}$  and  $p$  of samples III-#10~III-#13 after 35(15) cycles

II-#6~II-#9 样的  $p_c$  分别为 3200, 1600, 800 kPa 和 400 kPa，图 7 中的试验点总体呈现出  $p_c$  越大， $C_{\alpha}$  越小的趋势。同样，图 8 中 III-#10 样，由于其  $p_c$  最大，尽管荷载仅循环 15 次使得低压力下的  $C_{\alpha}$  比其它试样

的大, 但高压范围内, 该试样的  $C_{\alpha}$  明显较小。因此, 可以认为, 经一定循环荷载作用后再加荷时, 同样压力下,  $p_c$  越大,  $C_{\alpha}$  越低。

另外, 图 8 中还可以看出, III-<sup>#</sup>11、III-<sup>#</sup>12、III-<sup>#</sup>13 样的反复压力分别是 100, 200 和 400 kPa, 荷载循环 35 次后再加荷时总体呈现出反复压力越大, 对应相同压力下的  $C$  越小。这是因为, 反复压力越大, 在此荷载循环作用下, 土体骨架结构越趋于紧密, 土粒重新排列越不容易进行, 从而导致相同压力下的次固结系数越小。

### 3 结 论

对 3 种原状软土 13 个试样进行了一系列反复加卸荷载的次固结试验研究, 得出以下主要结论:

(1) 反复荷载对减小软土次固结系数明显。反复压力越大, 荷载循环引起的次固结系数减小越明显。随荷载循环次数  $n$  增加, 同一反复压力下次固结系数  $C_{\alpha}$  越来越小, 但减小趋势越来越缓,  $C_{\alpha}$  与  $\lg n$  之间关系可近似用直线表示。相同大小的荷载循环后再加荷时, 总体上, 同样压力下,  $p_c$  越大,  $C_{\alpha}$  越低。

(2) 荷载比减小, 次固结系数降低。建议工程中, 针对实际地基应力及附加荷载进行试验用于次固结沉降的计算。

(3) 本文试验表明, 反复荷载对减小次固结系数的作用明显。因此, 对工后沉降要求严格的地基, 是否可以利用反复堆载以减小其次固结沉降(如充水作堆载时荷载反复就可很方便地实现), 值得深入研究。因为只要在较小荷载下反复就可能显著减小次固结系数。

(4) 初始加荷过程中, 3 种软土次固结系数随固结压力均呈先增大后减小的趋势, 但次固结系数峰值对应的荷载并非前期固结压力, 这种现象有待进一步深入研究。

(5) 超固结状态下, 第一次再加荷时, 土体次固结系数随荷载增大而减小, 而 35 次循环后再加荷时, 次固结系数则随荷载增大而增大, 这可能是由前期固结压力  $p_c$  及其持续时间、反复荷载中心  $p_0$  和反复压力的综合影响导致, 限于试验资料, 还有待进一步研究证实。

(6) 本文所有试验的反复荷载中心均为 0, 如果  $p_0$  不为 0, 次固结特性如何值得进一步研究。

#### 参考文献:

[1] 余湘娟, 殷宗泽, 董卫军. 荷载对软土次固结影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 913 - 916. (YU Xiang-juan, YIN Zong-ze, DONG Wei-jun. Influence of load on secondary consolidation deformation of soft soils[J].

Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 913 - 916. (in Chinese))

- [2] 周秋娟, 陈晓平. 软土次固结特性试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 404 - 408. (ZHOU Qiu-juan, CHEN Xiao-ping. Test study on properties of secondary consolidation of soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 404 - 408. (in Chinese))
- [3] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521 - 526. (YIN Zong-ze, ZHANG Hai-bo, ZHU Jun-gao, et al. Secondary consolidation of soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 521 - 526. (in Chinese))
- [4] 潘晓东, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载下黏弹性饱和土层的一维固结[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 272 - 276. (PAN Xiao-dong, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, et al. One-dimensional consolidation of viscoelastic soil layer under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 272 - 276. (in Chinese))
- [5] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(11): 907 - 916.
- [6] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891 - 895. (HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behavior of soft clay in cyclic undrained tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 891 - 895. (in Chinese))
- [7] 李兴照, 黄茂松. 循环荷载作用下流变性软黏土的边界面模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 249 - 254. (LI Xing-zhao, HUANG Mao-song. A bounding surface model for creeping soft clays under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 249 - 254. (in Chinese))
- [8] 陈颖平, 黄 博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1065 - 1071. (CHEN Ying-ping, HUANG Bo, CHEN Yun-min. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1065 - 1071. (in Chinese))
- [9] BJERRUM L. Embankments on soft ground[C]// Proceedings of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-supported Structures. Purdue University: ASCE, 1972: 1 - 54.