

饱和软粘土一维次压缩系数 C_a 值的试验研究

The investigation of the coefficient of secondary compression C_a in odometer tests

高彦斌, 朱合华, 叶观宝, 徐超
(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 采用上海饱和软粘土的重塑土样进行室内长期一维压缩试验, 研究了应力历史、加载比以及加载时间对次压缩系数 C_a 值的影响, 得到了上海软粘土 C_c 与 C_a 值间的关系, 并采用 e_0 与 e_p 的关系来解释 C_a 值在某些情况下发生变化的现象。

关键词: 次压缩; 主固结; 流变

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0459-05

作者简介: 高彦斌(1973-), 男, 现在同济大学地下建筑与工程系, 从事土动力学及软土工程研究工作。

GAO Yan-bin, ZHU He-hua, YE Guan-bao, XU Chao

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The coefficient of secondary compression C_a is investigated in the long-term odometer tests. All the samples are made from the reconstituted Shanghai soft soils. The test condition includes different stress history, different loading duration and different stress ratio. The ratio of C_c/C_a for Shanghai soft soil is got through the test. The reason why the C_a changes in some conditions is also explained in this paper by inducing the e_0 and e_p concept.

Key words: creep; secondary compression; consolidation

0 前言*

饱和软粘土的一维压缩主要由两部分组成: 一部分是由于在总应力不变的情况下, 随着孔隙水的排出, 有效应力逐渐增大, 从而导致土体骨架的压缩, 这一部分被称为主固结; 另一部分则由于土颗粒的塑性调整而导致的土骨架流变特性而引起, 由于具有流变特性, 土骨架在有效应力不变的情况下也会产生压缩, 这种压缩被称为次压缩(或次固结)。对于有机质含量较高的软土地基, 由于次压缩引起的工后沉降不容忽视。以前人们在研究土的固结压缩变形时简单的将土的固结压缩分为主固结和次固结两个阶段。随着人们对土的次固结机理的了解, 人们对“次固结”这种描述方法提出了异议, 建议采用“次压缩的概念”^[1,2]。本文中则采用“次压缩”来描述这种由于流变特性造成的土体的压缩。

图1为一维固结压缩试验得到典型的 $e - \lg(t)$ 曲线, 该曲线清晰地反映了饱和粘土在外界荷载作用下固结压缩的两个过程: 主固结过程和次压缩过程。可以采用 Casagrande 法来确定主固结结束的时间 t_p (见图1)。以前人们认为 t_p 标志着主固结的结束和次固结的开始。Bjerrum(1967)^[3], Crawford(1986)^[4] 指出土体在受荷之后便会立即产生次压缩变形, 而不只是在主固结结束后产生。这个观点符合土体这一具有流变特性的工程材料的力学特性并已被工程界广泛接受。Mosleh(1996)^[5] 从一试验路堤的孔隙水压力消散

曲线和路堤沉降曲线对比中发现, 采用如上方法确定的主固结结束时间 t_p 偏大, 从而会低估总沉降中的次压缩部分。

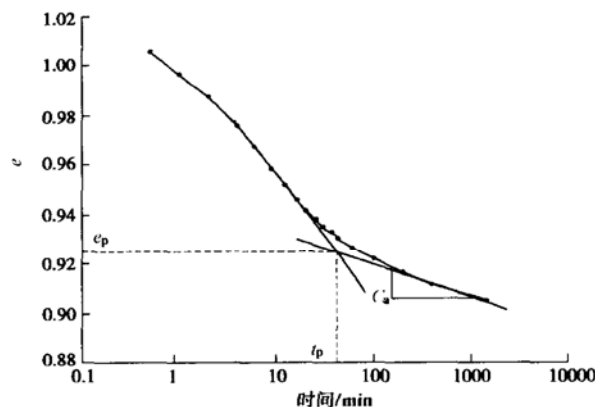


图1 典型的一维固结压缩曲线

Fig. 1 Typical consolidation curve

$e - \lg(t)$ 曲线的第二个折线段的斜率被称为次压缩系数 C_a , 它是反映土体次压缩性的一个重要参数。求得 C_a 之后, 便可以采用下式来计算由于次压缩而产生的沉降 S_s :

$$S_s = \frac{C_a}{1 + e_p} H_p \lg \frac{t_f}{t_p}, \quad (1)$$

式中 H_p 为时间 t_p 下压缩层的厚度; t_f 为计算时间;

* 基金项目: 教育部(2002)留学回国人员科研启动基金资助项目;
上海市重点学科建设项目(沪教委科[2001]44号)
收稿日期: 2003-05-28

e_p 为主固结结束时的孔隙比。需要说明的是,采用式(1)计算得到的次压缩沉降并不包括在主固结期间内产生的那一部分次压缩沉降。如果土的渗透性较小,主固结时间较长,采用式(1)计算得到的值将低估由于次压缩产生的沉降量。因此许多学者建议将公式(1)中的 t_p 用 t_0 (加载时间)代替。

虽然现在已经能够采用复杂的本构模型成功地解释一维固结压缩过程中包括次压缩的各种特性,但是形式都较为复杂。由于式(1)概念清楚、使用简单,工程界仍普遍应用。另外,在研究土的流变本构模型中,也需要研究土的体积流变特性,因此研究 C_a 值对于工程应用以及理论分析都有一定的意义。

1 试验方案

共进行了 3 组 6 个土样的一维压缩试验,仪器采用国产 YS- I 型压缩仪,土样面积为 30 cm^2 ,高度为 2 cm 。所有土样均采用重塑土,土样取自上海第 ③ 层淤泥质粉质粘土和第 ④ 层淤泥质粘土,取土深度为 $6.5\sim 13.0\text{ m}$ 。A 组 2 个土样采用逐级加载的方法,加载等级分别为 $50, 100, 200, 400, 800, 1600\text{ kPa}$,共 6 级,每级加载 24 h 。B 组 2 个土样先加载 400 kPa 预压 1.5 h ,

然后卸载至 0 kPa 。 24 h 后再进行逐级加载,加载等级分别为 $50, 100, 200, 400, 800, 1600\text{ kPa}$,共 6 级,每级荷载维持 24 h 。C 组的 2 个土样采用不同的加载比和加载时间。详细试验方案列于表 1。

表 1 长期压缩试验方案及土样特性

Table 1 Test condition and specimen characteristic of consolidation tests

组号	土样号	土层 编号	w_0 /%	e_0	备注
A 组	2-4-a	③	50.99	1.36	压力等级为 $50, 100, 200, 400, 800, 1600\text{ kPa}$,每天 1 级加载。2-6-a 最后一级荷载维持时间为 31 d 。
	2-6-a	④	48.50	1.34	
B 组	2-5-a	④	45.70	1.27	400 kPa 下预压 1.5 h ,回弹至 0 kPa 24 h 后加载,加载等级同上,每天 1 级。
	2-5-b	④	38.57	1.08	
C 组	2-3-b	③	33.33	1.13	200 kPa (19 d), 400 kPa (400 min), 800 kPa (20 min), 1600 kPa (1 d)。
	2-6-b	④	48.00	1.33	

注:()内数字为该级荷载维持的时间。

2 正常固结粘性土的 C_a 值

图 2 为土样 2-4-a 和 2-6-a 在各级压力下的一维压缩曲线。可以看出两个土样在各级压力下次压

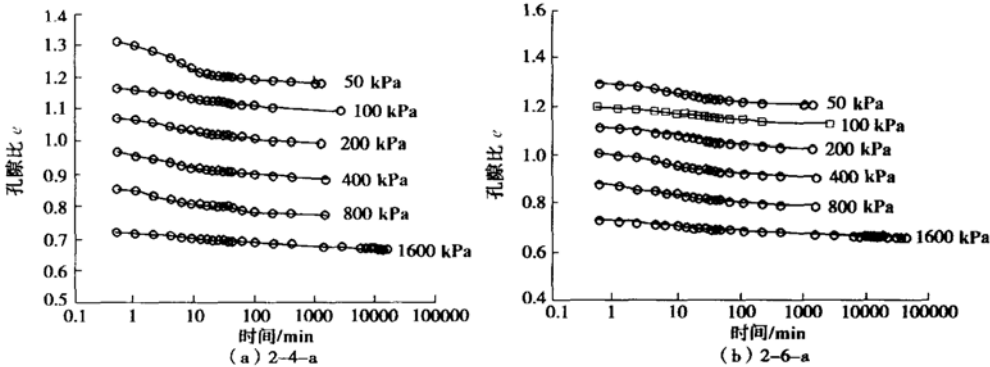


图 2 正常固结土压缩曲线

Fig. 2 Compression curves of normally consolidated soil

Fig. 2 Compression curves of normally consolidated soil

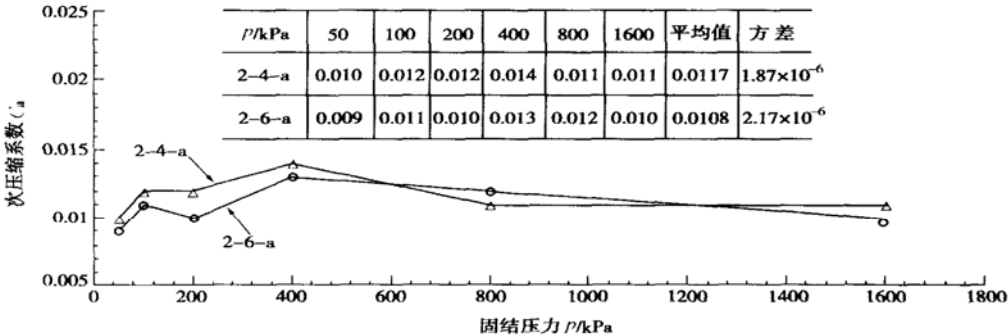


图 3 正常固结粘性土固结压力与次压缩系数值关系

Fig. 3 Relationship between consolidation pressure and C_a for normally consolidated Shanghai reconstituted soils

缩阶段的斜率基本相同,呈一组相互平行的直线。这一点说明各固结压力下次固结系数 C_a 值基本相同。采用前面讲到的方法,对以上压缩曲线进行分析计算得到的 C_a 值以及其与固结压力 p 的关系见图3。

两个土样的试验结果表明,正常固结粘性土的 C_a 值随固结压力的变化并不明显,这一结果与 Lo (1961)^[6] 的试验结果是相一致的。当固结压力较小时, C_a 值波动大一些,但总体上讲,对于正常固结粘性土,可以将 C_a 值看作一恒定的值(平均值)。两个土样的 C_a 的平均值分别为 0.0117 和 0.0108。

3 预压处理后粘性土的 C_a 值

为了研究超固结粘性土及预压处理后粘性土的次压缩特性,土样 2-5-a 和 2-5-b 在试验前进行预压处理,预压荷载为 400 kPa,预压时间为 90 min,保证在这个时间段内主固结已经结束。预压结束后卸载,回弹 24 h 后开始加荷进行固结试验。试验加荷等级以及每级荷载维持时间与前面的正常固结粘性土试验方案相同。

图4为经过预处理之后的土样 2-5-b 在固结压力 100 kPa 和 800 kPa 下的固结压缩曲线。土样在 100 kPa(小于预压力 400 kPa)下的次压缩速率较低, $C_a = 0.0014$ 。然而在 800 kPa(大于预压力 400 kPa)下的次压缩速率要高的多, $C_a = 0.0065$ 。这说明预压对土的次压缩特性有很大的影响。图5为预压处理后两个土样的 C_a 值与固结压力 p 的关系图。经过预压处理后,当固结压力小于预固结压力 400 kPa 时, C_a 值很小,且在一定压力范围内为一恒定值 C_{a1} ;当固结压力大于预固结压力 400 kPa 时, C_a 值增大至某一恒定值 C_{a2} ,而这个值与预压 400 kPa 时得到的 C_a 值很接近。这一点说明预压处理在一定压力范围内可以大大减小土的次压缩性,而当压力增大至某一值后,这种处理效应便会消失。

图6为两个经过预压处理后的土样的 $e - \lg(p)$ 曲线,该曲线的斜率就是压缩指数 C_c 值,随着压力的增大, C_c 值逐渐增大,最后趋于一定值。这样的变化规律与 C_a 值的变化规律极其相似。对两个参数进行相关性分析后得到的图7可以更加清楚地反映出这两个参数之间的关系,即 $C_a = kC_c$ 。相关分析得到的两个土样的 C_c/C_a 值分别为 0.0328 和 0.0358,相关系数达到 0.99。Mersi and Castro(1987)^[4] 进行了大量的试验,得到粘性土的 C_c/C_a 值在 0.03~0.05 之间。笔者本次对上海饱和软粘土试验得到的 C_c/C_a 值也在这个范围内。这个规律为 C_a 值的确定提供了一个新的途径。

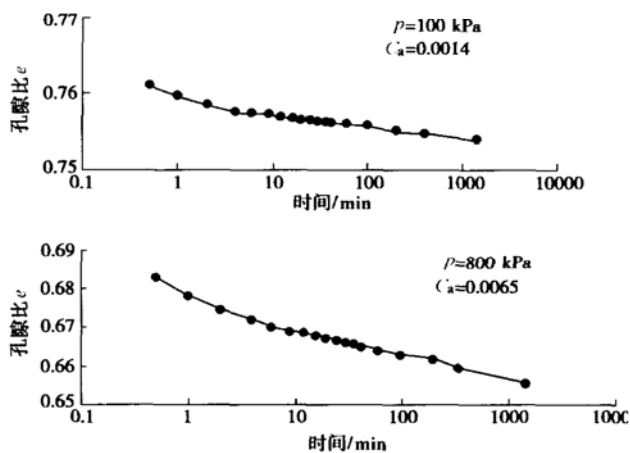


图4 预压处理后土的固结压缩曲线

Fig. 4 Consolidation curves of preloaded soils

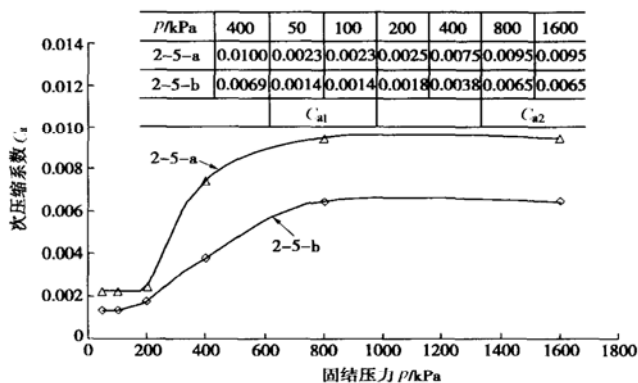


图5 预压处理后粘性土固结压力与次压缩系数值关系

Fig. 5 Relationship between consolidation pressure p and C_a for preloaded Shanghai reconstituted soils

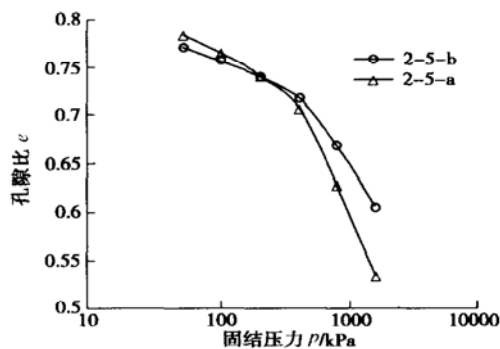
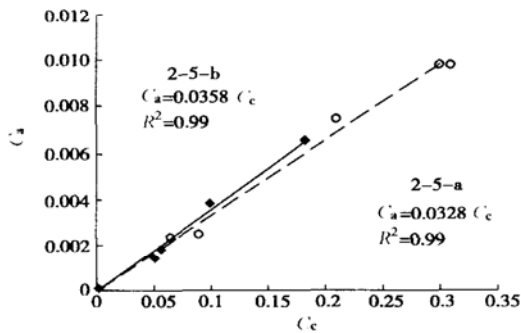


图6 两个预压土样的 $e - \lg(p)$ 曲线

Fig. 6 $e - \lg(p)$ curves of two preloaded samples

4 关于 C_a 随时间的变化问题

大量压缩试验得到的次压缩曲线显示,在恒定有效应力下,次压缩系数 C_a 值是一固定不变的值,并不随时间而发生变化,因此可以采用式(1)来计算次压缩量,但是式(1)表述的次压缩存在2个问题:①压缩速率在 $t = 0$ 时无定义;②压缩不收敛。因此,有些学者认为^[7],

图7 $C_a - C_c$ 关系图Fig. 7 $C_a - C_c$ relationship

C_a 值应当随时间而变化。为了研究 C_a 值与时间的关系问题,对 2-6-a 试样在最后一级荷载 1600 kPa 下进行了一个加载时间较长的压缩试验,试验共进行了 31 d,得到的压缩曲线如图 8 所示。该曲线表明 $e - \lg(t)$ 坐标下的次压缩曲线基本保持为一直线,即 C_a 值随时间的变化在该试验时间段内并不明显。

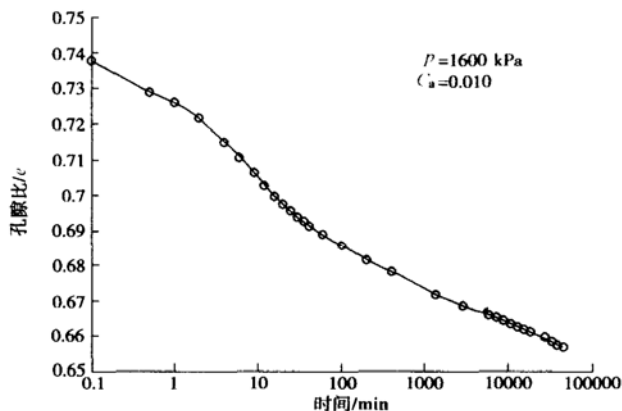


图8 一个长期压缩试验曲线

Fig. 8 A long term compression test

5 C_a 值与加载间隔时间和加载比之间的关系

已有研究表明,在压缩试验中,加载比($\Delta p/p$)以及加载间隔时间(Δt)都将影响压缩曲线第一阶段(主固结阶段)的形状,从而影响到固结系数 C_v 值。而关于这两方面因素对次压缩曲线的影响,试验资料还比较少。

为了研究加载时间对于 C_a 值的影响,土样 2-3-b 采用如下试验方案:土样先在 200 kPa 下固结 19 d,然后在 400 kPa 下固结 400 min, 800 kPa 下固结 20 min(主固结结束),再在 1600 kPa 下固结 1 d。在这个试验中,采用的加载时间变化很大,从最短的主固结结束后立即加载到固结 19 d 后再加载。试验得到的 C_a 值如表 2 所示,可以看出,在 $\Delta p/p = 1$ 的加载比例下,尽管加载时

间变化很大, C_a 值却始终接近一恒定值。而廖红建等^[8]的试验表明,主固结结束后立即加载得到的 C_a 值要大于压缩一天后加载得到的 C_a 值。试验的加载比同样是 $\Delta p/p = 1$,唯一不同的是试验采用的荷载不同。

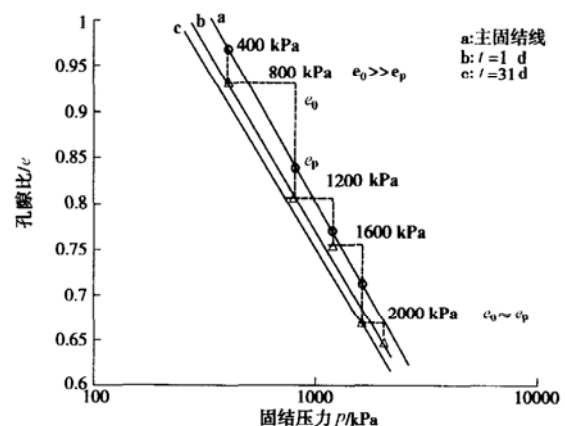
表2 土样 2-3-b 在不同加载时间下的 C_a 值Table 2 C_a value with different loading duration for sample 2-3-b

荷载/kPa	加载比 $\Delta p/p$	荷载维持时间	C_a 值
200	1	19 d	0.0130
400	1	400 min	0.0135
800	1	20 min	(只有主固结曲线)
1600	1	24 h	0.0130

为了研究加载比 $\Delta p/p$ 对 C_a 的影响,土样 2-6-b 采用如下试验方案: 400 kPa 下固结 24 h, 800 kPa 下固结 24 h, 1200 kPa 下固结 1 h, 1600 kPa 下固结 31 d, 2000 kPa 下固结 24 h。试验结果见表 3。在 400, 800, 1200 kPa 荷载下,加载比尽管变化很大,但 C_a 值变化并不明显。而在 1600 kPa 下固结 31 d 后而按一个相对较小加载比施加 2000 kPa 荷载时得到的 C_a 值将明显的减小,由 0.0130 降至 0.0045。

表3 土样 2-6-b 在不同加载时间下的 C_a 值Table 3 C_a value with different loading duration for sample 2-6-b

荷载/kPa	加载比 $\Delta p/p$	荷载维持时间	C_a 值
400		24 h	0.0130
800	1	24 h	0.0125
1200	0.5	60 min	0.0130
1600	0.33	31 d	0.0130
2000	0.25	24 h	0.0045

图9 不同压缩时间的 $e - \lg(p)$ 曲线(土样 3-6-b)Fig. 9 $e - \lg(p)$ curves with different compression duration (sample 2-6-b)

以上试验结果表明,在有些情况下加载比和加载时间对 C_a 几乎没有影响,而在有些情况下,影响却很大。究竟哪些因素在何种程度上会对 C_a 值有影响,应当是研究的一个焦点。图 9 是不同压缩时间的 $e - \lg(p)$ 曲线。不同时间的压缩曲线大致呈一组平行的直线。曲线

上 e_0 为加载 p 时土的孔隙比, e_p 为相同荷载 p 在主固结曲线上的孔隙比。可以看出, 当 $p = 800, 1200, 1600$ kPa, 而荷载维持时间又相对较短时, 这时 $e_0 \gg e_p$, 在这些荷载下得到的 C_a 值相差不多, 也就是前一级荷载产生的次压缩变形并不会影响到下一级荷载的次压缩变形特性。然而土在荷载 $p = 1600$ kPa 下压缩较长时间 (31 d) 后, 再施加 $p = 2000$ kPa 的荷载时, $e_0 \approx e_p$, 这个时候土的 1600 kPa 下产生的次压缩对土在下一级 2000 kPa 下的次压缩特性造成影响, 次压缩速率大大降低, C_a 值大大减小。实际上, 这个理论同样可以很好地解释经过预压后土样的 C_a 值减小的现象, 当荷载 $p \leq p_0$ 时 (p_0 为预压荷载), 加载时 $e_0 < e_p$, 因此预压会对土的次压缩特性产生影响, 造成次压缩速率的降低, C_a 值较小; 随着荷载的增大, e_0 逐渐接近 e_p , 次压缩速率也逐渐增大, C_a 值增大; 当荷载 $p = p_0$ 时, $e_0 < e_p$ 的关系仍旧成立, 因此虽然预压前后的荷载相同, 但 C_a 值并不相同, 预压后的 C_a 值要小于预压前的 C_a 值; 当 $p > p_0$ 时, 如果试验采用的加载比 $\Delta p/p = 1.0$, 则加载时 $e_0 \gg e_p$, 前一级荷载产生的次压缩并不能够对本级荷载土的次压缩性产生影响, 因此次压缩速率基本相同, C_a 值基本为一定值。通过以上分析, 可以这样认为, 在加载时, 如果 $e_0 < ae_p$ (a 为一系数, 值大于 1), 前一级荷载产生的次压缩会对本级荷载下土的次压缩特性造成影响, 从而 C_a 值发生变化。而在其他情况下, C_a 值基本为一固定不变的值。当然, 系数 a 的大小还有待进一步研究。

6 结 语

笔者所进行的上海重塑粘性土次压缩试验结果表明, 应力历史对土的次压缩特性有很大的影响: 重塑饱和软粘土的 C_a 值在荷载较小时有所波动, 但总体上变化不大, 接近一恒定值; 经过预压后, C_a 值会降低, 而对

于同一种土, C_c/C_a 为一恒定值。国外研究资料表明, 粘性土的 C_c/C_a 值在 0.030~0.050 之间, 笔者对上海饱和软粘土进行试验得到的值 (0.033 和 0.036) 也在这个范围内。

试验结果表明: 在 Δt 较小而 $\Delta p/p$ 较大情况下, 加载时 $e_0 \gg e_p$, C_a 值基本不变。在 Δt 较大而 $\Delta p/p$ 较小的情况下, 加载时 $e_0 \approx e_p$ 或 $e_0 < e_p$, C_a 值便会发生变化。因此, 可以这样认为, 当 $e_0 < ae_p$ 时 (a 为一系数, 值大于 1), 前一级荷载产生的次压缩会对本级荷载下土的次压缩特性造成影响, 从而 C_a 值发生变化。当然, 笔者只是在这方面作一初探, 还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 (第二版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [2] 魏汝龙. 软粘土的强度和变形 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [3] Bjerrum L. Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings [J]. Geotechnique, 1967, 17(2): 83-118.
- [4] Crawford C B. State of the art: evaluation and interpretation of soil consolidation tests [A]. Yong R N, Townsend F C, eds. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation [M]. American Society for Testing and Materials, 1986. 71-103.
- [5] Mosleh A Al-Shanrani. Application of the C_a/C_c concept to secondary compression of sabkha soils [J]. Can Geotech J, 1998, 35: 15-26.
- [6] Lo K Y. Secondary compression of clays [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1961, 87(SM4): 61-87.
- [7] Yin J-H. Non-linear creep of soils in odometer tests [J]. Geotechnique, 1999, 49(5): 699-707.
- [8] 廖红建, 等. 次固结沉降对压缩时间曲线的影响研究 [J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 536-540.