维普资讯 http://www.cqvip.com

第24卷第6期 岩 土 力 学 Vol.24 No.6
2003年12月 Rock and Soil Mechanics Dec. 2003

文章编号：1000－7598－(2003) 06－1001－06

连云港软土蠕变特性及其工程应用

于新豹，刘松玉，缪林昌

（东南大学 岩土工程研究所，江苏 南京 210096）

摘 要：为了研究软土的蠕变固结特性，进行了一维的固结蠕变压缩试验。得到了连云港软土的蠕变特性。以参数 $C_\alpha/\Delta e_{100}$ 分析了次固结对固结过程的影响。把饱和粘性土骨架视为粘弹性体，提出了一种划分主次固结的方法，并且，此方法可以应用于实测资料进行主次固结划分。

关 键 词：软土；蠕变；主固结；次固结；粘弹性体

中图分类号：TU 411 **文献标识码**：A

Creep properties of Lianyungang soft clay and its engineering application

YU Xin-bao，LIU Song-yu，MIAO Lin-chang

(Institute of Geotechnical Engineering，Southeast University，Nanjing 210096，China)

Abstract: In order to study the creep properties of soft soil, a 1-D consolidation–creep test has been completed. The creep properties are summed up from the test results. The effect of the secondary consolidation on the consolidation process is analyzed by the parameter $C_\alpha/\Delta e_{100}$ Taking the saturated soft clay as viscoelastic body, a new method of separation of the secondary consolidation and primary consolidation is proposed. The method can also be used by the data collected at the field. Some interesting conclusions concerning the effect of secondary consolidation are drawn from the test results.

Key words: soft soil; creep; primary consolidation; secondary consolidation; viscoelastic body

1 引 言

软土具有含水量高、孔隙比大，压缩性高、承载力低、流变性大等工程特点。在软土地区修筑高速公路的工程建设中，从技术上必须解决稳定和过量沉降两方面的问题。而其中最重要的就是解决沉降问题。在连云港地区修建的连-徐高速公路路基的部分路段沉降量过大等问题，引起了人们对该区软土工程特性的高度重视。

连云港地区广泛分布着海相淤泥、淤泥质粘土。该土层具有高含水量、高液塑限、低密度、低强度、低透水性、高灵敏度等特点。含水量 w＝45 %～85 %，平均值为 66 %～72 %；液限 W_L＝40.1 %～65.1 %，孔隙的 e＝1.0～2.56，塑性指数 I_P＝16～37.8，a_v＝0.9～4.0 MPa^{-1}，固结系数 C_v＝10^{-3}～10^{-4} cm^2/s，灵敏度平均值为 4～6.5，最大值为 10.0。由于软土具有明显的次固结沉降和流变特性，因此，易产生诸如施工工期延长，工后沉降难以控制等一系列的问题。

2 次固结

在流变学中，把应力不变下应变随着时间的增加而增大的现象称之为蠕变。在固结过程中，则把由于骨架的蠕变变形而产生的固结变形称之为次固结。关于次固结，有多种定义。随着实践经验的增多，人们逐渐发现，在固结后期，当孔隙水压力基本消散后，沉降实测值与理论值的差异随时间的推移而增大。人们把这种固结后期，实际变形量随着时间的推移而偏离理论估算值的现象称之为次固结。对于土的变形而言，次固结与蠕变只是同一现象的不同名称，其本质是相同的。

关于次固结的形成机理，目前众说纷纭，尚未形成统一的认识。Taylor 等（1940 年）提出：固结试验中的次固结压缩实际上是粘土结构的塑性调

收稿日期：2002-09-04

作者简介：于新豹，男，1978 年生，硕士研究生，从事软土的蠕变工程特性的研究工作。

论文联系人：刘松玉，南京市东南大学岩土工程研究所，电话：025-3795086，E-mial：Liusy@seu.edu.cn

维普资讯 http://www.cqvip.com

整[1]。由于这种调整过程是个时间过程，因而又称之为时间效应。引用太沙基（1953 年）观点：时间效应现象至少是规律不同而相互独立的两过程所控制。其一是在侧限条件下，继主固结变形之后，粘土颗粒逐渐调整到稳定平衡位置；其二是一定厚度的土层受到剪应力后，逐渐发生侧向位移。陈宗基（1958 年）[2]认为，造成次固结的变形的时间效应的机械作用主要有两个，即因剪应力产生的滞流和因静水压力而产生的体积蠕变。由于两个过程产生的时间效应还可能受第三过程的影响，即因固结和剪切变形而产生土骨架的硬化。所有这些过程都会对时间效应的产生起着重要作用，每一过程起作用的大小主要视土骨架本身的性质、外荷的大小以及粘土层和粘土试样的边界条件而定[3]。

上述观点认为次固结由粘滞蠕变引起。公认的观点是：次固结是由土骨架变形引起的。

然而，De Jong 等[4]（1965 年）通过对球状粘土试样的等压固结试验的资料进行分析后指出：关于次固结的变形机理，还存在着这样的一种可能性，即次固结是由更为细小孔隙网络中的水排出而造成的，这种说法还没有得到广泛的验证。

3 固结蠕变试验

3.1 试验方法

本文取了 4 种深度的原状软土，各深度的土的物理力学性质指标如表 1 所示。

试验仪器为固结仪。设计加荷等级分别为 100，200，400，600，800，1 000 kPa。

3.2 试验结果分析

各深度的应变随时间关系图如图 1 所示（取 4d 的数据）。

表 1 各土层的物理力学性质表

Table 1 Fundamental mechanical characteristics of soil at different layers

深度 / m	颜色	含水量 / %	密度 / g·cm^{-3}	饱和度 / %	孔隙比	液限 W_L / %	塑限 W_P / %	塑性指数 I_p / %
2	黄褐色	50.98	1.76	100	1.37	68.676	29.747	38.929
4	青灰色	67.93	1.581	97.25	1.921	73.866	47.489	26.377
8	青灰色	60.14	1.635	97.66	1.693	69.696	28.704	40.992
10	青灰色	51.06	1.700 9	97.35	1.44	56.347	33.581	22.766

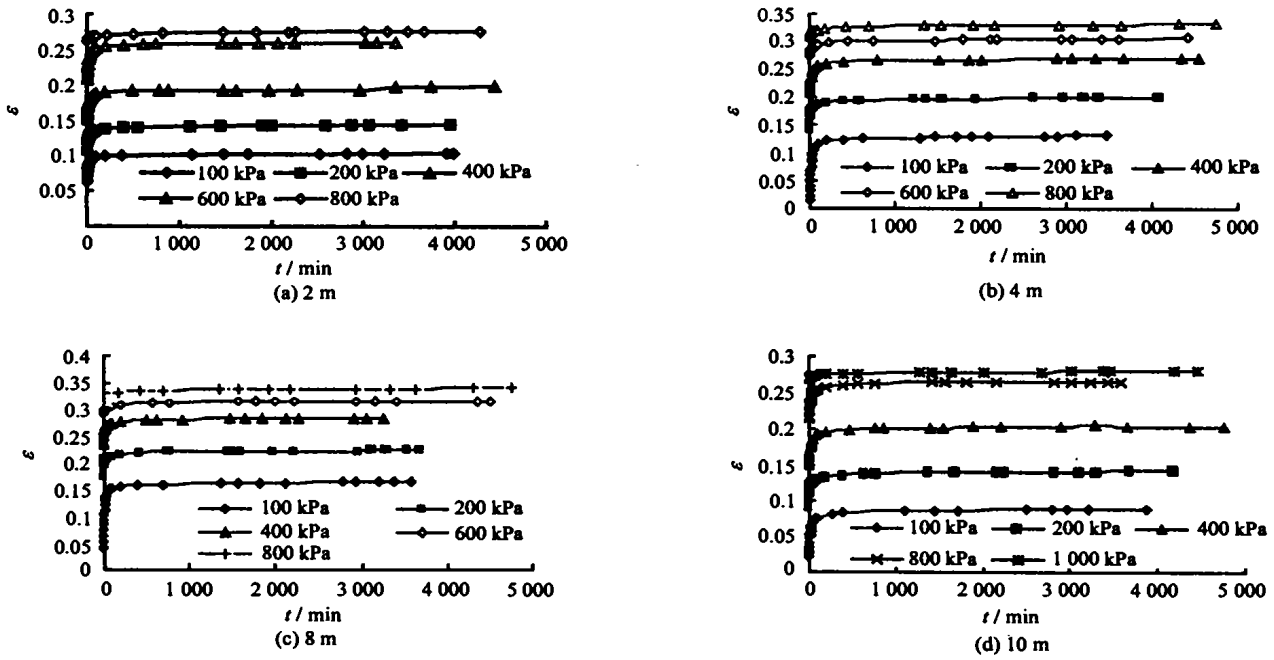


图 1 各深度土样的应变-时间曲线

Fig.1 Curves of strain versus time at different depths

维普资讯 http://www.cqvip.com

根据上述的丰富的试验资料可以得到。变形参数、主固结终了时的应力-应变曲线，以及应力-应变等时曲线（图 2）等。根据这些整理的资料，可以得到连云港软土的蠕变特性：

(1) 在同一深度，荷载越大，瞬时变形越小，表明随着荷载级别的增大，土样被压密，变形模量增大，故而瞬时变形减小。

(2) 在同一深度，荷载级别越高，蠕变曲线越趋于平缓。而在低应力荷载下，蠕变曲线斜率较大，表明在该荷载下土的蠕变是非稳定蠕变。

(3) 分析蠕变变形所占的总百分比，可得到 8 m 深度下土的蠕变特性最为明显。

从应力-应变等时曲线可知，不同时刻的应力-应变曲线是不同的，而且在一般情况下，均不是直线，而是曲线，说明蠕变是非线性的，是与时间相关的，且不可逆。

应力-应变等时曲线有一明显拐点式转折点，可以认为，与此转折点相对应的应力水平即为屈服应力。当应力水平小于此屈服应力时，土体为粘弹性体，处于弹性流变阶段；大于屈服应力时，为粘塑性体，处于塑性流变阶段；屈服应力水平下应力-应变等时曲线近似为一直线。图 2 显示，土体粘弹性阶段近似于线性，且可在较短时间内，较快地就进入粘塑性阶段，所以这 4 种深度处的软土的粘塑性应变占总应变的主要部分。

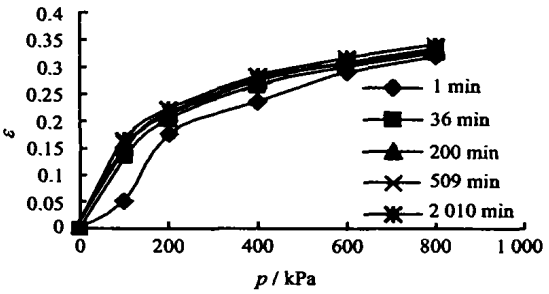


图 2　不同时刻的应力-应变关系图（8 m）

Fig.2　Curves of strain versus stress at different times

3.3 次固结对固结过程的影响

根据太沙基理论，变形-时间对数曲线在初始阶段为一曲线，而后会出现反弯点，后面的变形主要为次固结变形，如图 3（100 kPa）所示。经过对所有结果的分析可以看出：在低的应力水平下，曲线有较大曲率，主固结与次固结区分明显；当应力水平在 800 kPa 时，基本上变成直线。800 kPa 下的变形-时间对数的曲线，如图 3 所示。可以看出在此应力水平下，图形发生了较大的变化，接近为直线。无明显的曲率变化点，无明显的主固结阶直线段，不会出现反弯点。此时，已无法区分主次固结，也无法用太沙基理论来解释。之所以出现这种情况是由于存在以下两个方面的影响：

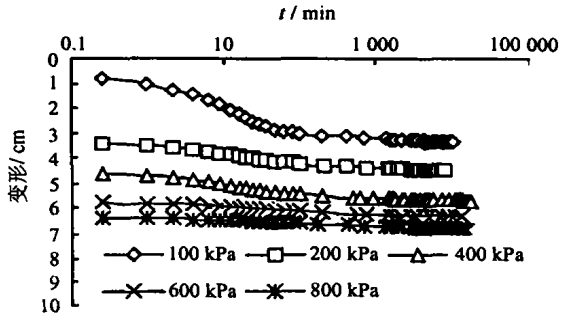


图 3　变形-时间对数关系图

Fig.3　Curves of deformation versus log(time)

（1）次固结作用的影响；主固结过程中同时存在着次固结。在 800 kPa，1 000 kPa 荷载，其加荷比分别为：$\Delta p/p=1/3$，$\Delta p/p=1/4$。其荷载增量较在 Δp 作用下的固结变形量就比较小。而次固结变形速率受加荷比的影响不大，这样次固结变形便在总变形中占有较大的份量[5]，从而，模糊了主固结变形，使得固结曲线偏离了理论曲线。

（2）土体被压密，土的渗透性降低。100 kPa 下土的主固结系数为 0.343 799 cm^2/s，在 1 000 kPa 下土的主固结系数为 0.040 996 cm^2/s。这样孔隙水消散就随荷载的增大，而变得越来越缓慢。

3.4 次固结系数

通过对长期变形观察资料的研究分析发现，在次固结阶段，变形与时间对数间呈线性关系，并由此引出了次固结系数。这种经验关系被广泛采纳。然而，也有一些学者认为，此种线性关系不可能无限制地延伸，经过了一段时间后，变形终究会稳定下来[4]。在笔者所做的试验中，也发现了这种现象，如图 4 所示。但多数学者认为，至少在两个时间对数周期内，该线性关系是有效的。关于次固结系数的定义有多种，本文采用 $C_a=\dfrac{\Delta e}{\Delta \lg t}$ 的计算方法；其中 t 为时间，e 为空隙比。

各种深度下的次固结系数和应力的关系，见图 5。由图可以看出，在 2 m 的深度，次固结系数随应力的增加而变大，在 400 kPa 时到达最大值。然后，逐渐减小；当深度为 4 m 时，在较低的应力水平下次固结系数比较大，随着应力的增大，其值变化不大；在 8 m 的深度处，基本和 4 m 深度处的变化趋势相同，不过在 400 kPa 处，次固结系数降低

维普资讯 http://www.cqvip.com

较多；在 10 m 深度下，当应力低于 800 kPa，次固结系数变化不大，当应力为 1 000 kPa 时，C_α值突然增大。

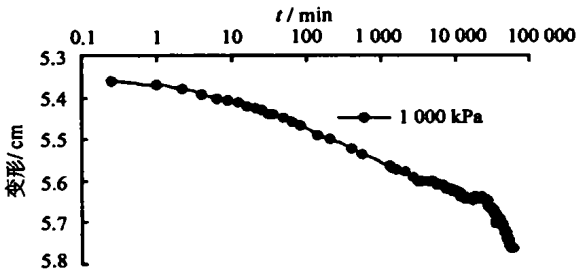


图 4 一个月内的变形时间对数关系图

Fig.4 Curve of deformation vs lg(time) for one month

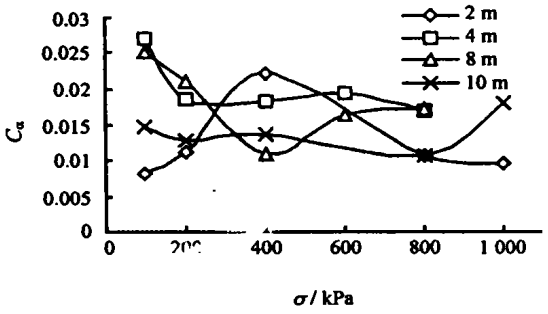


图 5 不同深度下的 C_α-应力关系图

Fig.5 Curves of C_α versus stress at different depths

4 主次固结划分

主次固结的划分对实际工程有着重要的意义。关于主次固结的划分，Casagrande(1936 年)[9]建议的作图法如图 6 所示。根据作图法可以确定主次固结的分界时间，这一方法已被广为采纳。然而，这一方法只是从几何上粗略给定，含有一定的主观因素，并且受时间零点的影响。其并不具有明确的物理意义。下面从土的本构关系，推导如何划分主次固结变形。

大多数的学者认为：主固结和次固结是同时存在的，在主固结阶段，主固结占主导地位，随着孔隙水压力的消散，主固结逐渐完成，土体的变形以次固结变形为主。这里，主次固结，指的是次固结占主导地位的时候，而认为主固结已经完成。

土在压缩过程中，饱和粘土可以表现出弹粘塑性的诸多方面的力学性质。钱家欢[5]和王盛源[6]建议了如下蠕变度函数，来描述粘土的骨架变形特性：

$$\delta(t,\tau)=a_0+\sum_1^n a_n\left[1-\mathrm{e}^{-\gamma_n(t-\tau)}\right] \qquad (1)$$

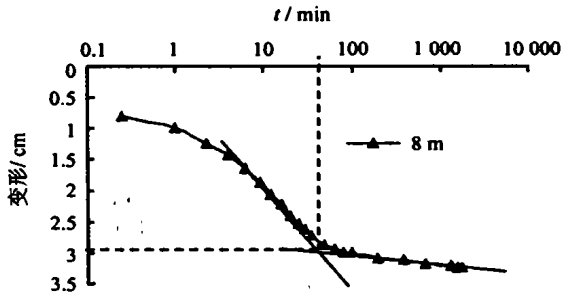


图 6 Casgrande 法确定主固结

Fig.6 Determining primary consolidation by Casgrande method

选取如图 7 所示的三单元力学模型，则式（1）可化简为下式：

$$\delta(t,\tau)=a_0+a_1\left[1-\mathrm{e}^{-\gamma_1(t-\tau)}\right] \qquad (2)$$

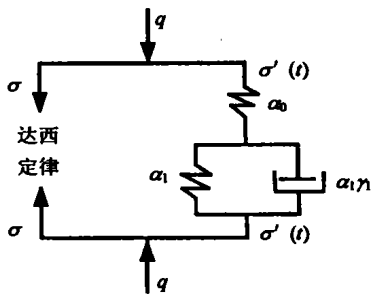


图 7 三单元力学模型

Fig.7 Three units model

在单位骨架应力下，蠕变度就是应变随时间变化的函数关系。

当 $\tau=0$ 时，施加荷载，式（2）可变为

$$\delta(t)=\frac{\varepsilon(t)}{\sigma'}=a_0+a_1\left(1-\mathrm{e}^{-\gamma_1 t}\right) \qquad (3)$$

式中 σ' 即为骨架应力；$\varepsilon(t)$ 为骨架应变；a_0，a_1，γ_1 均为骨架变形特性常数，或称为流变常数。

当 t 无限大时，最终应变为

$$\varepsilon(\infty)=\sigma'(a_0+a_1) \qquad (4)$$

合并式（3）和式（4），得

$$\frac{\varepsilon(\infty)-\varepsilon(t)}{\sigma'}=a_1\mathrm{e}^{-\gamma_1 t} \qquad (5)$$

两边取对数，得

$$\lg\left[\frac{\varepsilon(\infty)-\varepsilon(t)}{\sigma'}\right]=\lg a_1-0.434\gamma_1 t \qquad (6)$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

这是一条以 $\lg\left[\frac{\varepsilon(\infty)-\varepsilon(t)}{\sigma'}\right]$ 为纵轴，t 为横轴的直线方程。而土骨架中的有效应力很难准确测定，当渗水固结完成后，即主固结结束后，此时的孔隙水压力已经完全消散，所施加的荷载已由土骨架承担，总应力等于有效应力，这时式（6）才能适用。

将式（6）改写为[7]

$$\lg\left[\frac{\varepsilon(\infty)-\varepsilon(t)}{q}\right]=\lg a_1-0.434\gamma_1 t \qquad (7)$$

式中　q 为所施加的外荷；$\varepsilon(\infty)$ 为最终应变量，由此，可将固结蠕变试验中的荷载资料和应变资料，用来绘制 $\lg\left[\frac{\varepsilon(\infty)-\varepsilon(t)}{q}\right]$-$t$ 关系曲线。当主固结完成时，q 即等于有效应力，此时次固结阶段应为直线段。因此，当出现直线段的时候，就可以认为主固结已经完成，次固结开始。但是在求取 $\varepsilon(\infty)$ 时候，存在着较大困难，为了避免求解 $\varepsilon(\infty)$，可令 $t_2=t_1+\Delta t_0$，则可以得出：

$$\lg\frac{\varepsilon(t_2)-\varepsilon(t_1)}{q}=\lg\left(1-e^{-\gamma_1\Delta t_0}\right)-0.434\gamma_1 t \qquad (8)$$

利用上式，无需要求解 $\varepsilon(\infty)$。图 8 表示按该法确定主固结时间 t_{100} 为 100 min，而按 Casgrande 法确定的时间 t_{100} 为 64 min。为了较准确得到 t_{100}，在主固结完成前后，应多观测几次。

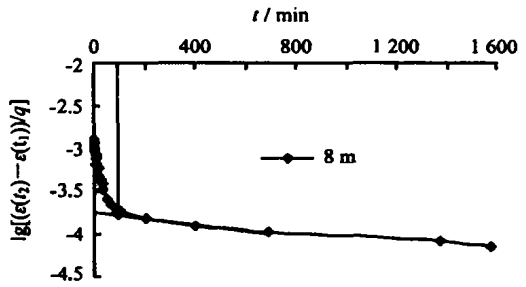


图 8　$\lg[(\varepsilon(t_2)-\varepsilon(t_1))/q]$ 一时间的关系
Fig.8　Curve of $\lg[(\varepsilon(t_2)-\varepsilon(t_1))/q]$ vs time

上述的分析表明，由于次固结的影响，随着应力的增大，使得曲线的形状也发生变化。为了分析这种影响，可以用 $C_\alpha/\Delta e_{100}$ 来表征主次固结的相对大小。C_α 为次固结系数，Δe_{100} 为由 e-lg$t$ 曲线上读取的主固结阶段孔隙比变化量，显然，其中也包括由次固结所产生的在主固结阶段的孔隙比改变。用上述方法确定 t_{100}，求得 Δe_{100}。各深度下 $C_\alpha/\Delta e_{100}$ 与应力的关系如图 9 所示。

参数 $C_\alpha/\Delta e_{100}$ 可以反映次主固结的相对大小，在某种程度上能够表示次固结在主固结过程中其作用大小。开始时，8 m 下的 $C_\alpha/\Delta e_{100}$ 值较小，反映出此时次固结作用较小；而在 600，800 kPa 下，其值增长很快，其变形和时间的对数关系如图 3 所示，可以发现，参数 $C_\alpha/\Delta e_{100}$ 值的大小和曲线的形状存在着对应关系，$C_\alpha/\Delta e_{100}$ 值越大，曲线就越平缓，且趋近于直线。参数 $C_\alpha/\Delta e_{100}$ 是随着应力大小不同而改变的。总体趋势是先增大，200 kPa 时开始减小，而后又增大，随深度的不同，增大的值不同，到 1 000 kPa 时增至最大。

根据工程资料划分主次固结时，q_0 为施工施加的荷载；$\varepsilon(\infty)$ 为地基最终应变量。

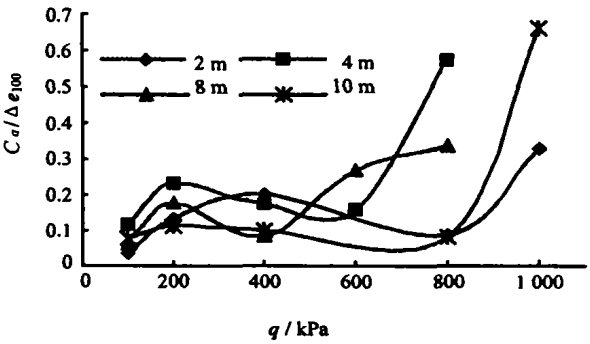


图 9　$C_\alpha/\Delta e_{100}$ 与应力的关系
Fig.9　Curve of $C_\alpha/\Delta e_{100}$ versus stress

5　工程实例

连一霍国道主干线——连云港至徐州高速公路 A1～A7 标段，沿线广泛分布着滨海相沉积软土，交通部第一公路勘察设计院采用砂垫层和粉喷桩进行处理。砂垫层设置在预压处理段的路堤底部，厚度为 30 cm，在砂垫层下铺设一层有纺土工布，并上裹 3 m。软土的物理力学性质如表 2 所示。

K21+130 右断面的实测沉降曲线如图 10 所示。上述的观测资料利用双曲线求得最终沉降量为 217.3 mm。由工程实际情况可以得到压缩层的厚度为 12 m，从沉降过程曲线中取得与各时间相对应沉降值 $S(t)$。由工程资料，可得各时间的 $\varepsilon(t)=\frac{S(t)}{H}$，$\varepsilon(\infty)=\frac{S(\infty)}{H}$，$q_0$ 和 t 值等，由此可以绘出 $\lg\left[\frac{\varepsilon(\infty)-\varepsilon(t)}{q}\right]$-$t$ 曲线，如图 11（曲线 BAC）所示。该曲线的前期为 BA 段为曲线，AC 段为直线，A 点为这两段分界点。曲线中的 A 点反映了饱和粘土的变形特性，它具有如下两个方面的意义[7]：

维普资讯 http://www.cqvip.com

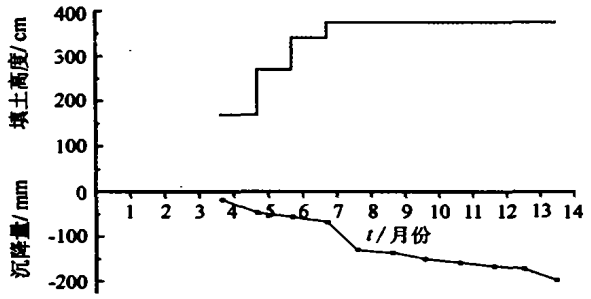


图 10 砂垫层处理预压沉降过程曲线

Fig.10 precompression settlement curve treated by sand mat

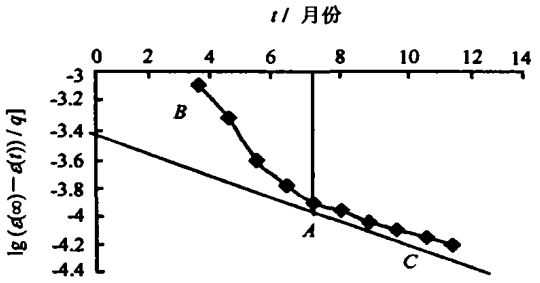


图 11 砂垫层处理预压沉降主次固结曲线

Fig.11 Primary and secondary consolidation curve treated by sand mat

表 2 软土物理力学性质表

Table 2 Fundamental mechanical characteristics of soft soil

含水量	天然重度	孔隙比	液限	塑限	塑性指数	液性指数	粘粒含量	压缩模量	快剪指标	
W/%	γ/kN·m^{-3}	e	W_L/%	W_P/%	I_P	I_L	/%	E_s/MPa	c/kPa	ϕ/(°)
73.53	15.80	2.027	63.9	28.67	35.23	1.30	56	2.11	8.07	3.49

（1）物理意义：对于曲线段 BA，这段时间内的变形包括由孔隙水的排出产生的主固结变形和骨架的蠕变两个部分，但是，以主固结变形为主；对于直线段 AC，该直线段内的变形几乎全是土的骨架变形。

（2）工程意义：A 点可以用来判断沉降所在阶段，对于预压加速固结排水处理地基的工程，当达到 A 点时，主固结已经完成，以后的变形量很小，因此，可以停止预压。

6 结 论

为了研究次固结对沉降的影响，进行了一维固结蠕变试验，并进行了长时间的观察，一般每级荷载下的稳定时间需要 7～8 d，最后一级需一个月，共需历时两个多月。

（1）次固结的存在会影响变形（或孔隙比）-时间对数曲线的形状，当这种影响较大时，曲线的形状与太沙基理论曲线有很大的不同。笔者对这种影响从理论上进行了解释。并以参数 $C_\alpha/\Delta e_{100}$ 分析了这种影响。

（2）把饱和粘性土体的骨架视作粘弹性体，孔隙流体服从达西定律，用此理论得出了一种划分主次固结的方法，并且可以应用到实际工程中。用此种方法，可以计算出 $C_\alpha/\Delta e_{100}$。

（3）从试验结果得到了连云港软土的蠕变特性；对次固结的机理进行了阐述；着重研究了主次固结划分方法及其工程应用。

参 考 文 献

[1] Tayor D W, Merchant W. A theory of day consoldation accounting for secondary compressions[J]. **Journal of Mathematics and Physics**, 1940, 19(23)14: 167.

[2] 陈宗基. 固结及次时间效应的单维问题[J]. 土木工程学报, 1958, 5(1): 1－3.

[3] 刘世明. 软粘土的次固结变形特性研究[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 1988.

[4] De Jong G D J, Berruijt A. Primary and secondary consolidation of a spherical day sample[A]. Proc. 5th ICSMFE[C], Paris: [s.n.], 1961, 2: 254.

[5] 钱家欢. 粘弹性理论在土力学方面的应用[J]. 高等学校自然科学学报(土木、建筑、水利版), 1966, (2): 73－80.

[6] 王盛源. 饱和多孔介质理论[J]. 中国科学(A 辑), 1989, 7(7): 739－748.

[7] 王盛源. 饱和粘土土主固结与次固结变形分析[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 70－75.

[8] 赵为民. 加荷比对土体压缩、流变性影响的研究及一维弹粘塑性分析[硕士学位论文 D]. 南京: 南京河海大学, 1998.

[9] Casagrande A, Fadum R E. Notes on soil testing for engineering. Purpose, Harvard soil Mechanics series[J]. **Cambridge Massachusetts**, 1940, 8: 36－39.