

软土的次固结

Secondary consolidation of soft soils

殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 李国维
(河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 计算软土次固结的常用方法没有反映荷载变化的影响, 实际上只适用于正常固结土。而工程中所遇到的大都是超固结土。笔者所做试验表明, 当荷载不大时, 即处于超固结状态, 次压缩明显与荷载有关。本文在 Bjerrum 等时 $e - \lg p$ 曲线理论的基础上, 提出了相对时间坐标系与绝对时间坐标系的概念, 建议在次压缩计算中采用绝对时间坐标系, 即以正常固结状态的加荷时刻为时间零点的坐标系, 从而建立了一种新的次固结计算方法。通过等时 $e - \lg p$ 曲线建立起时间与荷载的关系, 使次压缩不仅仅与时间有关, 而且也与荷载有关。它可以用于正常固结土和超固结土。这一计算方法可以清楚解释许多试验现象和工程问题, 如次压缩随荷载的变化, 超载预压后的次压缩, 反复荷载对次压缩的影响等。该方法更符合次压缩的变形机理。

关键词: 次固结; 流变模型; 沉降; 软土

中图分类号: TU 411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2003)05-0521-06

作者简介: 殷宗泽(1937-), 男, 江苏海安人, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 土体本构关系、土工数值分析等。

YIN Zong-ze, ZHANG Hai-bo, ZHU Jun-gao, LI Guo-wei

(Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The conventional method to compute secondary consolidation of soft soils does not reflect the influence of load. It is only applicable to the normally consolidated soils actually. However, we often deal with over-consolidated soil in engineering problems. The tests performed by the authors show that secondary compression obviously relates to load on the over-consolidated soil. In this paper, the concept of absolute and relative time coordinate systems is proposed, and it is suggested to use the absolute time coordinate system in computation of secondary compression. In absolute time coordinate system, the beginning of loading on normally consolidated soil is taken as the origin of time. Based on Bjerrum's theory of equitime $e - \lg p$ curve and the absolute time coordinate system, a new method to compute secondary compression is developed. Through the equitime $e - \lg p$ curve, the relationship between time and load is set up. Then the secondary compression varies not only with time, but also with load. It can be used for both normally consolidated soil and over-consolidated soil. The proposed model of secondary consolidation can explain many tested phenomenon and engineering problems, such as influences of preloading and repeat of loading and unloading on secondary consolidation.

Key words: secondary consolidation; rheological model; settlement; soft soil

0 引言*

沿海软土存在着显著的次固结(也叫次压缩)特性, 就是说, 在孔压消散, 主固结完成后, 仍然会有随时间发展的长期压缩, 其量值不可忽略。人们早已注意到它, 并已提出了许多计算方法。其中 Crawford 的不同历时压缩试验图^[1], Bjerrum 等时 $e - \lg p$ 曲线^[2], 殷建华等的一维流变模型^[3]等都是值得肯定的。然而, 还有不少问题没有得到很好回答。

地基加固中, 有一种方法叫超载预压法, 就是将预压荷载加到设计荷载以上, 待发生相当大的沉降后再卸荷到设计荷载。这种超载预压法, 目前在高速公路建筑中, 被广泛采用。超载当然有利于减少工后主固结沉降, 但能否也减少工后次固结沉降呢? 还有, 反复荷载作用后, 次固结沉降是否也减少呢? 这些还可归结到一个似乎很简单的问题, 次固结与荷载有关吗?

许多试验表明, 同一种土不同荷载下的 $e - \lg t$ 曲

线次固结部分的斜率, 即次固结系数 C_α (如图 1 所示), 与荷载无关。

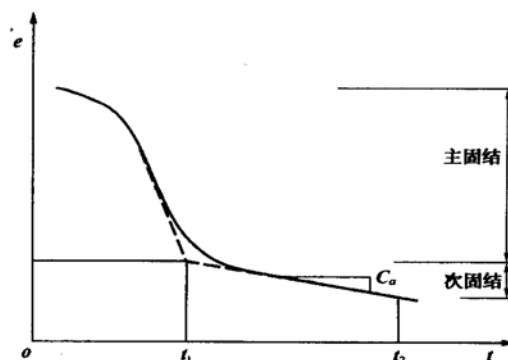


图 1 主固结与次固结

Fig. 1 Primary consolidation and secondary consolidation
由此得出:

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50079004)
收稿日期: 2002-10-29

$$\Delta e_s = C_{\alpha} \lg \frac{t_2}{t_1} \quad (1)$$

式中 Δe_s 为次压缩阶段的孔隙比变化; t_1 为主固结完成时刻; t_2 为次压缩量计算时刻。

该式在国内外许多大学教材中均作了介绍, 包括土工原理与计算一书^[4]; 此外, 公路软基规范也已规定了它在工程中的应用^[5]。根据该式, 次压缩与荷载无关。

然而, 工程师们会问, 填土 5 m 难道与填土 5 mm 所对应的次压缩量相等吗? 没有荷载, 没有主固结, 还会有次固结吗? 没有力的作用, 什么因素使土压缩? 显然, 式(1)不能回答这些问题。本文正是从这些问题出发, 来探讨次压缩。

1 次压缩试验

为了弄清次压缩与荷载的关系, 进行了一系列压缩流变试验。与普通压缩仪试验的不同仅在于每级荷载延迟时间 7~10 d, 并连续测读不同时刻的压缩量。试样取自上海南浦大桥附近软土层中, 为淤泥质土, 其物理力学性指标见表 1。试验分两组: 一组以通常方式逐级连续加荷, 另一组在加大荷载后改小荷载增量, 再加大荷载增量。前一组试验结果示于图 2, 可见几个压力下的次固结 $e - \lg t$ 曲线的斜率都相当接近, 假定它们相等是恰当的, 这表明式(1)是合理的, 次压缩与荷载大小无关。后一组试验结果示于图 3, 当荷载增量较小时, 次固结系数 C_{α} 明显降低, 这表明次压缩与荷载是有关的, 式(1)的使用是有条件的。

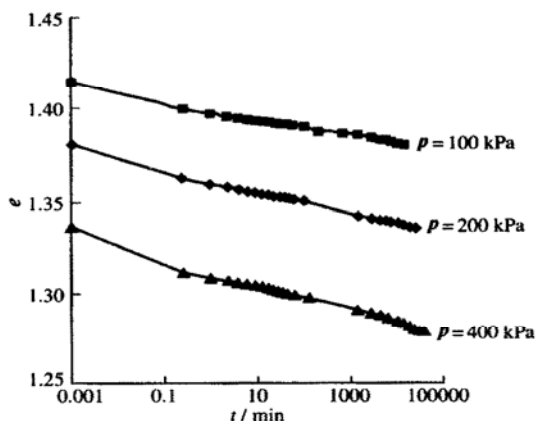


图 2 淤泥质粉土压缩流变试验 $e - \lg t$ 关系曲线

Fig. 2 Tested $e - \lg t$ curves of mucky silt

表 1 试样物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of the samples

土层名称	w / %	γ / (kN·m ⁻³)	e_0	I_L	a_{1-2} / (MPa ⁻¹)	c / kPa	φ / (°)
①	36.2	2.71	1.415	0.93	0.19	6.0	30.0
②	52.5	2.75	1.468	1.28	0.79	14.0	9.0

①为淤泥质粉土; ②为淤泥。

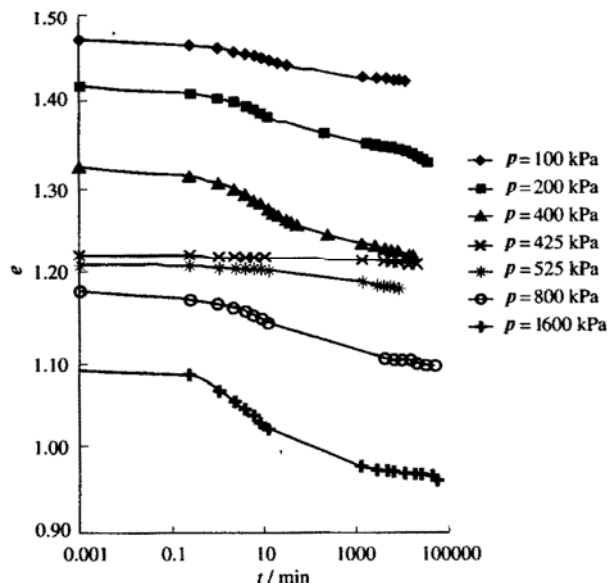


图 3 淤泥土压缩流变试验 $e - \lg t$ 关系曲线

Fig. 3 Tested $e - \lg t$ curves of muck

两组试验得出两种不同的结论。这就需要进一步探讨机理, 提出模型, 对此作出合理的解释。

2 一维次压缩计算方法

2.1 基本依据

(1) $e - \lg t$ 中次压缩段的线性关系

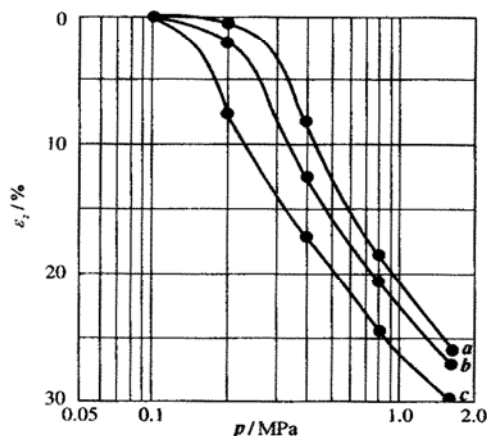
大量的研究资料表明, 次压缩与时间的对数成线性关系, 已为国内外公认, 而且还根据最多数十天的试验资料向外推估若干年, 乃至数十年的次压缩。因此, 这一规律应该肯定。此处仍以其作为建立模型的重要依据, 这意味着, 要承认式(1)。然而笔者所做试验表明, 次压缩量与荷载大小有关, 式(1)没有反映这一点。若要以式(1)为基础来反映, 只有两种可能: 变化 C_{α} , 或改变 t , 这须从其他方面来考虑。

(2) 等时 $e - \lg p$ 曲线

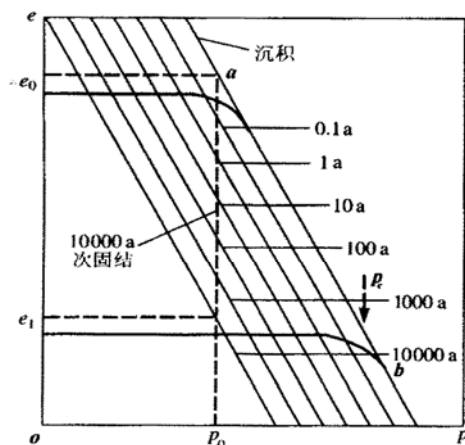
1964 年, Crawford 对正常固结土作压缩流变试验后, 点绘了不同固结时间的 $e - \lg p$ 曲线, 如图 4(a) 所示。图中, a 线为主固结完成时, b 线为固结 1 d, c 线为固结 7 d。不同的荷载历时, 实际上就是不同的次压缩时间。各线大体平行。1972 年, Bjerrum 作了发挥, 用平行直线近似代替这些曲线, 并设想, 如果每级荷载后 1 a, 100 a, 10000 a, 测孔隙比, 点绘 $e - \lg p$ 等时线, 也是平行直线。其关系图示于图 4(b)。由于次压缩与时间的对数成线性关系, 因此, 图中等时线的时间是 10 倍进的。该图现已被广泛应用, 它可以很好地解释拟超固结现象。许多原状土在历时上并没有受到过超过当前自重应力 p_0 的应力, 然而试验所得前期固结压力 p_c 却远大于自重应力 p_0 , 这是因为在自重应力 p_0

作用下已发生几千年,乃至几万年的次压缩。再加荷时将沿回弹再压线发展,到达 p_c 后才沿原压曲线发展,表现为超固结特征,故称拟超固结。

Bjerrum 等时 $e - \lg p$ 曲线图 of 正确认识次固结提供了一把钥匙。本文所提模型以其为基础。



(a) Crawford



(b) Bjerrum

图4 等时 $e - \lg p$ 曲线

Fig. 4 Equitime $e - \lg p$ curves

2.2 时间坐标系

确定时间坐标系,实际上就是要确定时间坐标零点。计算次压缩的时间坐标零点可以有2种取值方法。

(1) 按新增荷载开始施加时刻

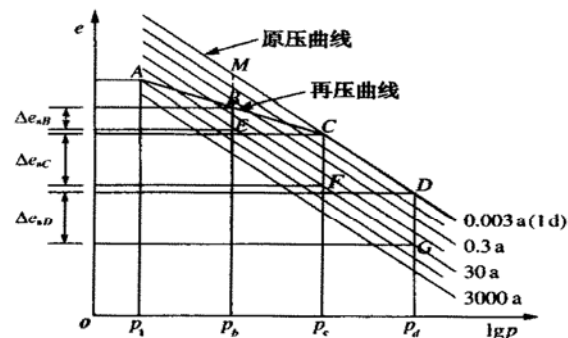
这是通常所用方法。如求完工后30a的次压缩,就是加荷后,待主固结完成,开始计算此后30a的次压缩量。但时间坐标的零点并不取在次固结开始时刻,而是取在加荷开始时刻。图1所示时间坐标就是这样的。图中次压缩计算时间从 t_1 开始,但它不是时间坐标的零点。这是因为取次压缩与时间的对数成线性关系,如果将次压缩开始时刻取为0,其对数是无意义的,会出现计算上的麻烦。因此,一般将时间零点向前取,取加荷开始时刻为零点。用新增荷载开始施加

时刻作为坐标零点的时间坐标系可称为相对时间坐标系,它是相对于加荷而言的。用式(1)计算次压缩,实际上就依据了这样的坐标系,结果次压缩量与荷载无关。

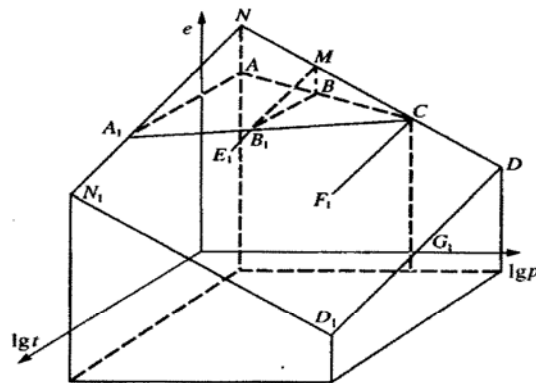
(2) 按正常固结状态加荷开始时刻

等时 $e - \lg p$ 曲线中,次固结开始时刻是原压曲线(即正常固结状态)对应的时刻,如图4(a)中a线对应的时刻;图4(b)中,ab线所对应的时刻为0.01a。而时间坐标的零点则在此之前,为正常固结状态的加荷开始时刻。这里强调了正常固结状态,就是不管土体当前处于正常固结还是超固结状态,时间坐标零点都取正常固结状态的加荷开始时刻。若处于超固结状态,要找出当前荷载所对应的正常固结状态线。例如图5(a)中的点B,处于超固结状态,它所对应的正常固结状态以原压线上的点M表示,点M所对应的时刻为计算历史上次压缩的开始时刻,而时间零点为设想处于正常固结的该荷载的加荷时刻。这样的时间坐标系就将正常固结与超固结取统一的时间坐标系,因而可称为绝对时间坐标系。Bjerrum 的等时 $e - \lg p$ 曲线是对正常固结土而言的。其时间坐标系正是这样的坐标系,然而,他没有提出要用这样的坐标系计算次压缩,特别是用于超固结状态。

本文次固结的计算一律用绝对时间坐标系。



(a) 二维图



(b) 三维图

图5 不同荷载下的次压缩

Fig. 5 Secondary compression under different load

2.3 工后次压缩量

次压缩量,通常的概念还是与荷载联系起来的,指的是荷载完成后发生的次压缩量。至于加荷前已发生的次压缩则不包括在内。这与工后沉降的概念是一致的。计算工后次压缩量,就要考虑应力状态的变化。

设加荷前受自重应力 p_1 的作用有 300 a 的历史,在 $e - \lg p$ 等时线上处于点 A,如图 5(a) 所示。图中的时间坐标系为绝对时间坐标系。若不加荷,它在自重应力作用下还会有次压缩。30 a 后到达 330 a 等时线。由于孔隙比随时间的变化是对数函数关系,从 300 年到 330 年的次压缩量是很小的,可忽略。

若加荷达到 p_b ,且 $p_b < p_c$ (p_c 为前期固结应力),则应力变形关系将沿回弹再压缩线发展,到达点 B。图上的 B 点所处的等时线约为 1 a,30 a 后到达 31 a 的等时线。它的次压缩量为图中的 Δe_{sB} ,显然要大于应力为 p_1 时 30 a 的次压缩量。

若加荷到达 p_c ,如 C 点所示,次压缩计算时间为从 0.003 a 到 30.003 a,次压缩量为 Δe_{sC} ,它又大于 Δe_{sB} 。

若加荷到达 p_d ,且 $p_d > p_c$,如 D 点所示,次压缩计算时间也是从 0.003 年到 30.003 年,次压缩量为 Δe_{sD} ,将有 $\Delta e_{sD} = \Delta e_{sC}$ 。

上述解释表明,用绝对时间坐标系,当荷载小于前期固结压力时,次压缩与荷载有关;当荷载大于前期固结压力时,次压缩与荷载无关。

为了更清楚地说明次压缩,还可点绘 $e - \lg t - \lg p$ 的三维关系图,见图 5(b),图中的时间坐标为绝对坐标系。图中平面 NN_1D_1D 表示次压缩量随应力和时间的变化,这里称它为次压缩面。它由斜率为 C_c 的原压直线 ND 和斜率为 C_a 的次压缩线 NN_1 构成。各时刻压缩曲线投影到 $e - \lg p$ 面上就是图 5(a) 中的一族等时斜线。用斜率为 C_e 且平行于 $\lg t$ 轴的平面 AA_1C 与次压缩面相交,其交线 A_1C 表示了超固结状态下的次压缩, A_1 表示自重应力作用下,历时 AA_1 产生 AN 的次压缩量。当加荷到 p_b 时,次压缩量沿 A_1B_1 线变化到 B_1 ,相应的已发生次压缩量成为 BM ,与图 5(a) 中的 BM 一致,已发生次压缩的时间为 BB_1 。今后发生的次压缩,将沿次压缩面变化,如图中的 B_1E_1 线所示。它投影到 $e - \lg p$ 面上为次压缩量,投影到地面上为相应次压缩时间。线段 CF_1 和 DG_1 也都代表了不同应力状态下的次压缩量与相应时间。

2.4 计算公式

图 6 中, t_c 表示原压线上的点在绝对时间坐标系

中对应的时刻。计算次固结所用的时间都从 t_c 开始,如果代表当前应力状态的点不处于原压曲线上,要由通过该点的竖直线与原压曲线的交点来确定 t_c 。

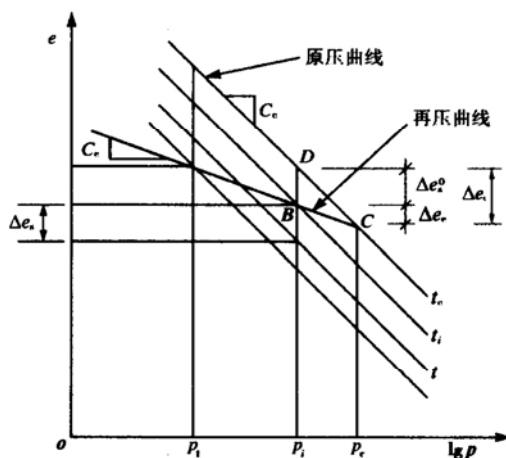


图 6 次压缩的计算

Fig. 6 Computation of secondary compression

设土体自重应力是 p_1 ,加荷后达到 p_i ,求此后 Δt 时间内的次压缩。

若 $p_i < p_c$,如图 6 所示,加荷后仍处于超固结状态,所对应的次压缩时刻为 t_i ,它是以绝对时间坐标系计时的。 Δt 时间后,时间 $t = t_i + \Delta t$ 。这样,次压缩为

$$\Delta e_s = C_a \lg \frac{t}{t_i} = C_a \lg \frac{t_i + \Delta t}{t_i}, \quad (2)$$

式中 t_i 的确定要依据 p_i 与 p_c 的相对关系。

由图 6 得

$$\Delta e_s^0 + \Delta e_e = \Delta e_c. \quad (3)$$

式中 Δe_s^0 为相对于 p_i 的应力,历史上已完成的次压缩, $\Delta e_s^0 = C_a \lg \frac{t_i}{t_c}$; Δe_e 为由 p_i 加荷到 p_c 的弹性压缩,

$\Delta e_e = C_e \lg \frac{p_c}{p_i}$; Δe_c 为假设处于正常固结状态,由 p_i 加荷到 p_c 的总压缩,即弹塑性压缩, $\Delta e_c = C_c \lg \frac{p_c}{p_i}$ 。其中 C_e 和 C_c 分别为回弹指数和压缩指数。将它们代入式(3),得

$$C_a \lg \frac{t_i}{t_c} + C_e \lg \frac{p_c}{p_i} = C_c \lg \frac{p_c}{p_i}, \quad (4)$$

由此可得

$$t_i = t_c \left| \frac{p_c}{p_i} \right|^{\frac{C_c - C_e}{C_a}}, \quad (5)$$

将上式代入式(2),所得次压缩量与荷载是有关的。

若 $p_i \geq p_c$,则次压缩计算与通常方法相同,仍可使用式(2),只是 $t_i = t_c$ 。此时式(2)与通常使用的式(1)是一样的。

须要进一步交待的是 t_c 的确定。它是计算正常固结土次压缩的起始时间,并不是时间坐标的零点。按理说,它是主固结完成的时刻,与式(1)中的 t_1 相似。然而,无论在教科书中,还是在规范中,都没有明确,所谓主固结完成是对试样而言,还是对实际土层而言,两者相差很大。本文建议取 $t_c = 1 \text{ d}$ (约 0.003 a)。这里明确规定,所谓主固结完成是对试样而言的,即常规固结仪试验,土样厚 2 cm , 双面排水的情况。当然,试样的主固结完成时间并不等于 1 d , 用 1 d 是一种近似,两者差异所引起的次压缩量差异很小,可忽略不计。至于实际土层,主固结完成时间是很长的,几年,乃至几十年。孔压消散在土层中的不同深度是不一样的,因此有效应力在变化,次压缩也在发展,不可能等到主固结完成后次压缩才开始,实际土层应同时考虑主、次压缩。

2.5 所含假定

上述计算实际上隐含了以下主要假定:

(1) 次压缩相当于一种老化,对正常固结土,它与荷载大小无关。应该说,这是有条件的,仅仅适用于常见的荷载段。当荷载较小时,是不成立的。如果没有任何荷载,连自重应力也没有,怎么可能压缩呢? Crawford 的试验结果也很说明问题。由图4可见,当荷载较小时,等时 $e - \lg p$ 曲线差不多是相交的。这意味着,荷载小,次压缩小。由图4还可见,不同荷载段,次压缩量实际上是不等的。另一方面,次压缩与荷载无关也仅仅适用于一定时间段。图2、图3都表明 $e - \lg t$ 关系曲线也不完全符合直线,其斜率在各时间段之间并不完全相等。不过不管怎样,在通常的应力条件下,这一假定还是合理的。

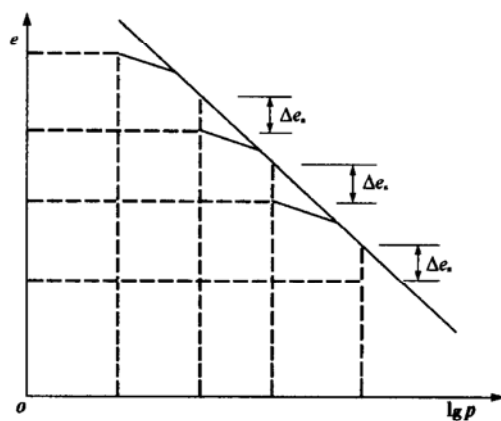
(2) 次压缩是一种塑性变形,它们之间可以相互转化。如图6所示,正常固结土在 p_i 作用下处于点 D , 如果保持应力不变,那么时间 t_i 以后由于次压缩,孔隙比减小,会达到点 B 的位置, DB 为次压缩;另一方面,如果由点 D 直接加荷到 p_c , 则变形沿原压曲线发展到点 C , 再卸荷到 p_i , 就沿回弹线到达点 B 。在加载、卸载循环中,发生塑性变形,其量值也是 DB 。可见次压缩与塑性压缩是可以互相转换的。从机理上讲,次压缩是无法恢复的,只能是一种塑性变形。

3 解释现象

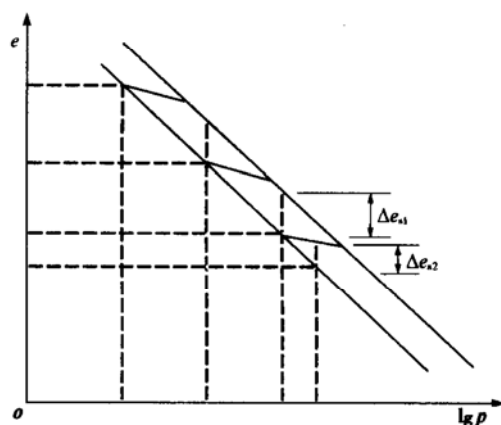
3.1 试验 $e - \lg t$ 线斜率相等与不等

前面提到,试验 $e - \lg t$ 线斜率有些基本相等,如图2中的试验结果,有些又明显不等,如图3。根据上述理论,再仔细考察一下这两种试验不难发现,图2中,荷载增量较大,加荷后都处于正常固结状态,次压

缩都从 t_c 开始,自然就有相同的次压缩量,如图7(a)所示。而图3中,曲线斜率小的情况都是处于超固结状态,次压缩量也就较小,在相同时间内表现为斜率较小,见图7(b)。



(a) 正常固结或弱超固结状态



(b) 超固结状态

图7 试验曲线的差异

Fig. 7 Difference of tested curves

3.2 超载预压

超载预压的情况示于图8(a), 荷载模拟从 p_a 增加到 p_d , 但为了增加预压效果, 先加到 p_c , 再降到 p_d 。应力变形的路径沿 $ABCDE$ 发展, 其中 ABC 为加荷, CD 为卸荷, DE 为次压缩。为了比较, 在图8(b)中示出不超载的情况, 加荷到 p_d 后即停止, 则应力变形路径沿 $ABDE$ 发展。显然, 图8(a)中的次压缩量 DE (即 Δe_s), 要小于图8(b)中的次压缩量。超载预压由于加荷退荷已产生塑性变形, 使荷载完成时刻处于超固结状态, 因而次压缩较小。可见, 超载预压对减少工后次压缩沉降是有利的。

3.3 反复荷载

反复荷载也会产生塑性变形, 如图9所示, 也使荷载完成时处于超固结状态, 因而也会减小次压缩。在应力 p_1 的作用下, 从 t_0 到 t_2 本应发生 Δe_{s1} 的次压缩, 然而由于反复卸荷加荷, 产生塑性变形 Δe_p , 相当于处

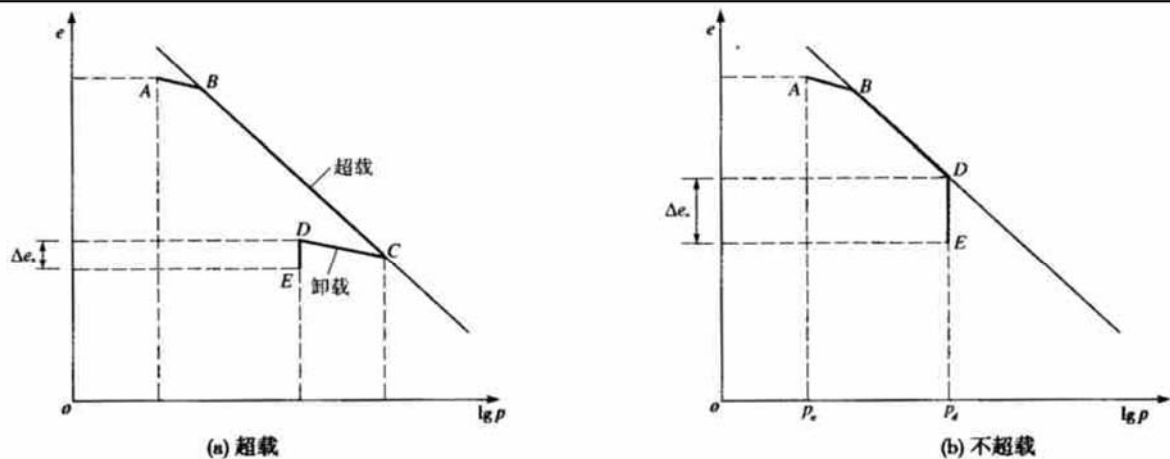


图 8 超载预压对次压缩的影响

Fig. 8 Influence of overloading on secondary compression

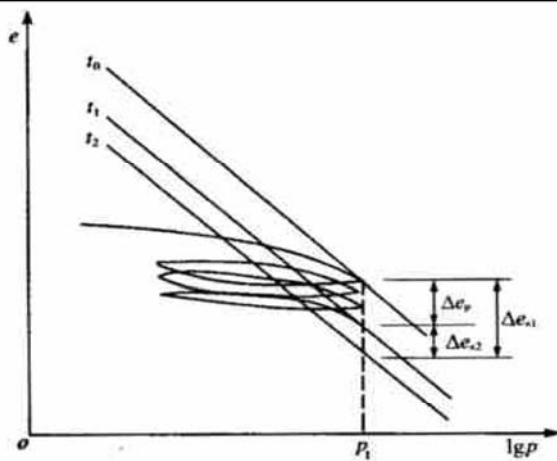


图 9 反复荷载

Fig. 9 Repeat of loading and unloading

于 t_1 状态。使到达 t_2 的次压缩成为 Δe_{s2} 。它显然小于 Δe_{s1} 。

4 结 语

次压缩的计算通常用式(1),它实际上只适用于正常固结土,而工程中所遇到的大都是超固结土。本文

以 Bjerrum 等时 $e - \lg p$ 曲线为基础,提出了相对时间坐标系与绝对时间坐标系的概念,进而提出一种次固结计算方法,可以合理地适用于各种荷载。在形式上,它与式(1)相似,但通过等时 $e - \lg p$ 曲线建立起时间与荷载的关系,从而使次压缩不仅仅与时间有关,而且也与荷载有关。用这一计算方法可以清楚解释许多试验现象和工程问题,如次压缩随荷载的变化,超固结、反复荷载对次压缩的影响等。该方法更符合次压缩的变形机理。

参考文献:

- [1] Crawford C B. Interpretation of consolidation tests[J]. J Soil Mech Found Div, ASCE, 1964, 90(5): 87-102.
- [2] Bjerrum L. Embankments on soft ground[A]. Proc Special Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures [C]. ASCE, 1972. 1-54.
- [3] Yin J H, Graham J. Elastic viscoplastic modelling of one dimensional consolidation[J]. Geotechnique, 1996, 46(3): 515-527.
- [4] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算(第2版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [5] JTJ 017-96, 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].