

上海浅层地基土的前期固结压力及 有关压缩性参数的试验研究*

魏道堃 胡中雄

(同济大学, 上海)

提 要

地基土的前期固结压力是判断土体应力历史的一个指标, 在不同应力历史状况的土体变形分析中它也是一个重要的计算参数。本文根据试验结果确定了上海浅层地基土的前期固结压力 p_c 及其沿深度的分布, 并对由 Garlanger 给出的考虑到应力历史影响的应力-应变关系式中有关的压缩性参数(膨胀指数 C_e 、压缩指数 C_c 和次固结指数 C_{α})作了计算确定; 同时, 考虑到由于土体的次固结作用会产生所谓“准前期固结压力”, 本文亦就上海软土重塑土膏固结试验结果的分析, 提出估算准前期固结压力的公式。上述研究的初步结果可为今后上海软土的变形、强度研究提供参考。

一、引 言

土体的应力历史及其对变形、强度特性的影响已越来越受到重视。国内外都已作过许多研究。土的前期固结压力 p_c 是判断土体应力历史的一个指标, 在不同应力历史状况的粘土层的变形分析中它也是一个重要的计算参数。一般认为, 土的前期固结压力 p_c 系指土体在历史上曾经受过的最大压力。但近代的研究表明^[1,2], 由于恒压下土体的次固结作用, 正常固结粘土层的 p_c 有时会大于其历史上曾受过的最大压力, 即产生准前期固结压力 Q_c ^[3]。为使上海软土地基的变形研究特别是固结变形的研究, 以及强度特性研究能更符合实际情况, 必须判明上海浅层地基土的应力历史。我们在进行上海浅层地基土应力历史研究的过程中, 分别就上述有关内容作了试验研究。根据室内试验结果的计算分析, 确定了前期固结压力 p_c 及其沿深度的分布, 从而判明了上海浅层地基土的应力历史状况; 同时, 根据 Garlanger 提出的考虑到前期固结压力影响的应力-应变关系式^[4], 我们计算了应用这一公式所必需的压缩性参数(膨胀指数 C_e 、压缩指数 C_c 和次固结指数 C_{α}), 并给出初步计算结果; 另外, 我们还根据 Bjerrum 关于粘土层随年代的延续次固结作用引起超固结的概念^[1], 结合上海软土重塑土膏固结试验的结果, 提出估算准前期固结压力 Q_c 的近似公式, 并分析了 Q_c 随时间增长的规律。上述研究的初步结果可为今后上海软土地基的研究与设计工作提供参考。

* 参加本文试验工作的还有杨熙章、李乃菊等同志。

二、上海浅层地基土的前期固结压力 p_c 沿深度的分布

本文所说的上海浅层地基土系指地面以下约30m范围内的土层,自上而下包括:① 表层的褐黄色粘性土层,厚3m左右。它通常被用作浅基础的持力层;② 灰色淤质粘性土层,厚约20m。支承在天然地基上的建筑物沉降较大,主要是由于这个土层的影响;③ 暗绿色粘土层,厚约3m。这是较硬的土层。通常用作二、三十米长桩的持力层。上海浅层地基土的这种代表性剖面可参见图1~4。除土层厚薄上会有些差异及可能出现硬土层的局部缺失外,这种剖面是具有普遍意义的。因此对这样的浅层地基土的前期固结压力和有关压缩性参数进行试验研究和分析计算,对于基础工程设计具有重要意义。

我们从上海地区土样高压压力压缩试验(最后一级荷重达到16或20kg/cm²)的结果中,选定其中试验曲线较佳的106个土样进行整理分析。为了便于比较,所有的试验结果均作出 $e-\log p$ 曲线并用国际上通用的Casagrande图解法确定 p_c 值。同时根据沿深度变化的自重压力 p_0 ,计算超固结比 $r_{oc} = \frac{p_c}{p_0}$ 。这样就有助于我们判断上海地基土的应力历史和天然固结状况。

因为正如通常所认为的,若暂时不考虑准前期固结压力问题,则根据超固结比 r_{oc} 的变化可以判别土层或是正常固结的($r_{oc} = 1$),或是超固结的($r_{oc} > 1$)或是欠固结的($r_{oc} < 1$)。

图1~3是上海地区三个取土地点的土层剖面及其 p_c 和 p_0 沿深度变化的示意图。图中可见,

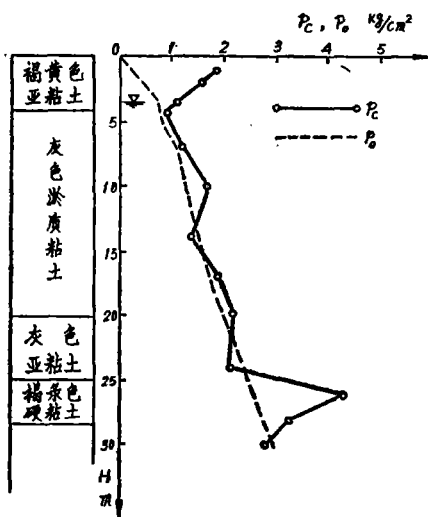


图1 金山某地土层剖面及 p_c , p_0 分布线

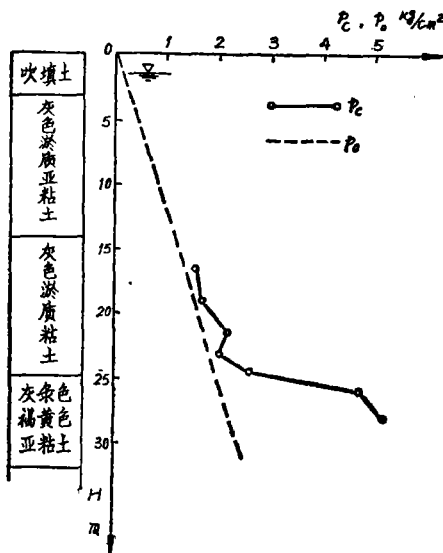


图2 高桥某地土层剖面及 p_c , p_0 分布线

就前述的由上海浅层地基的三个主要土层组成的典型剖面而言,在上、下两个厚度较薄的硬土层(相对于当中20多米厚的灰色淤质软土层)中,前期固结压力 p_c 均大于甚或远大于相应的自重压力 p_0 ;在软土层中则是接近于相应的 p_0 。根据分布于上海地区各取土点的土样试验结果所作的归纳分析,作出了超固结比 r_{oc} 沿土层深度的分布图(图4。图中的土层剖面是经过典

型化了的剖面), 并采用最小二乘法计算了上部硬土层和当中的淤泥质软土层的超固结比 r_{oc} 沿深度的变化规律如下:

表层褐黄色粘性土层

$$r_{oc} = 12.64 - 3.44H, \quad (1)$$

灰色淤泥质粘性土层

$$r_{oc} = 0.0046(H - 3) + 1.03, \quad (2)$$

上面二式中, H 指自地面起算的土层深度, 以米计。

在下部暗绿色硬土层中, r_{oc} 沿深度无明显变化, 近似可取平均值 $\bar{r}_{oc} = 2.15$ 。

上述的 r_{oc} 分布曲线表明, 上海浅层地基土的上下两个硬土层是超固结粘性土层, 当中的厚层灰色淤泥质粘性土则属于轻度超固结土层, 其超固结比 r_{oc} 沿深度只有微小的变化, 因此一般可以在整个厚度范围内近似取 $\bar{r}_{oc} = 1.08$ 作为平均值而不计其沿深度的微小增长。而且对该软土层说来, 若从有助于简化一般工程地基问题的分析着眼, 将其视作正常固结粘性土层亦是合适的。

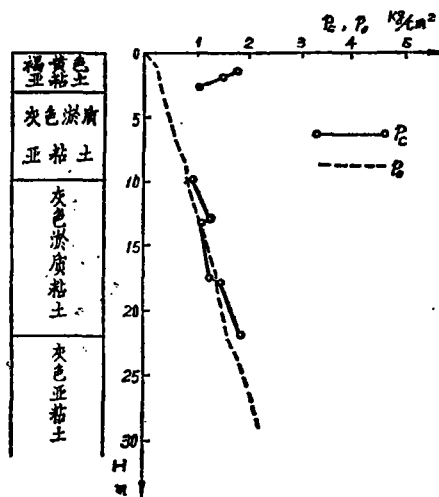


图3 宝山某地土层剖面及 p_e , p_0 分布线

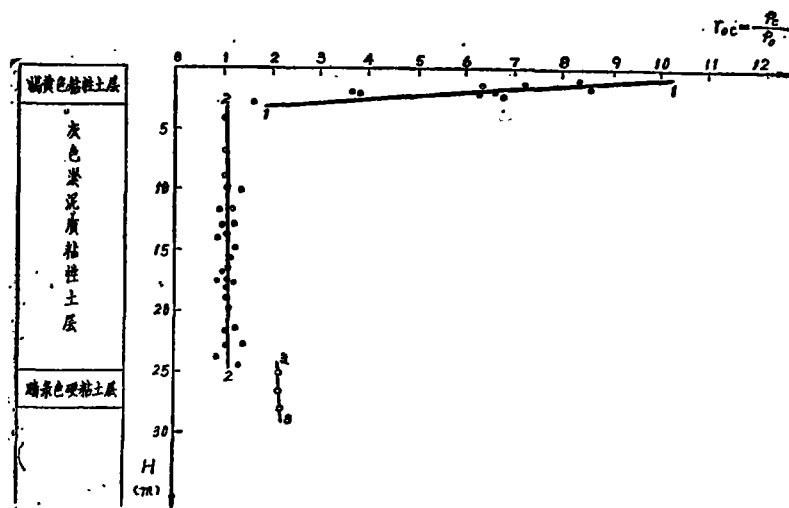


图4 上海浅层地基典型土层剖面中各主要土层的超固结比 r_{oc} 沿深度分布(1—1, 2—2, 3—3)

三、上海浅层地基土压缩性参数(膨胀指数 C_e 、压缩指数 C_c 和次固结指数 C_a)的计算结果

考虑土体应力历史的影响(通过前期固结压力 p_e 反映)以及土体在常量有效压力下的受荷历史延续过程中应变的发展(即次固结)的土层变形关系式已由 Garlanger 根据 Bjerrum 的概念^[6]提出, 它在 $e - \log p$ 坐标系统中具有如下形式^[4]:

$$\Delta e = C_e \log \frac{p_e}{p_0} + C_c \log \frac{p_f}{p_a} + C_a \log \frac{t_1 + t_0}{t_0}, \quad (3)$$

式中 Δe ——孔隙比变化量,

p_0 ——自重压力;

$p_f = p_0 + \Delta p$ (Δp 是压力增量或附加压力);

C_e 、 C_c 、 C_a ——分别为膨胀指数、压缩指数和次固结指数。它们的几何意义分别示于图 5 和图 6,

t_0 ——主固结历时结束的时刻;

t_1 ——次固结阶段中的某一时刻。

式(3)不仅对于不同固结程度(超固结、正常固结和欠固结)的土体是适用的,而且对于具有准前期固结压力的正常固结粘土也是适用的。从土体的应变特征来看,式(3)也是一个完整的关系式,因为它考虑到土体受荷历史的全过程而不是只考虑土体的前期受荷历史或仅考虑受荷后的变形延续过程。

显然,在应用式(3)时首先必须确定其中主要的指标前期固结压力 p_c 及 C_e 、 C_c 、 C_a 等有关压缩性参数。根据本文第二部分的分析结果,我们对上海浅层地基的三个主要土层的上述

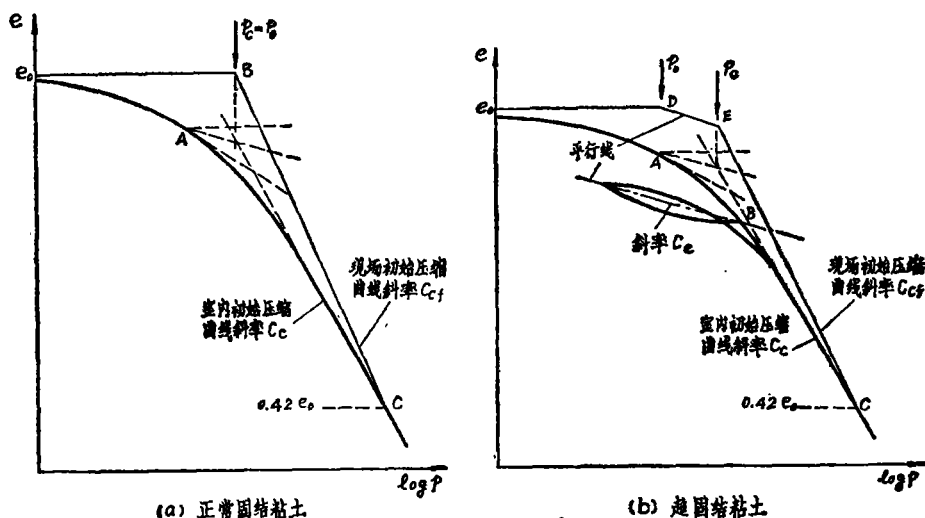


图 5 室内与现场初始压缩曲线及参数几何意义

计算参数分别作了确定。为了排除在取土、运输和试验过程中土样扰动等给试验结果造成的误差,我们在计算中,对于轻度超固结的灰色淤质软土层和超固结的上下两个硬土层,分别采用 Terzaghi 和 Peck^[6]以及 Schmertmann^[7]提出的半经验方法,将室内试验的 e - $\log p$ 曲线修正成现场压缩曲线(图 5),由此求出现场压缩指数 C_{cf} 。这样,根据修正后的现场 e - $\log p$ 曲线应用(3)式时,它应改写成如下形式:

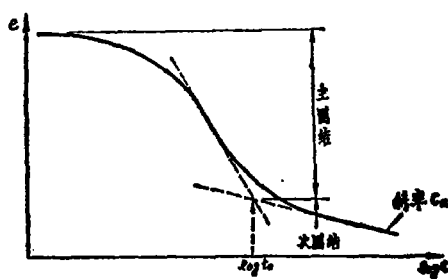


图 6 参数 C_a 的几何意义

$$\Delta e = C_e \log \frac{p_e}{p_0} + C_{ef} \log \frac{p_t}{p_0} + C_w \log \frac{t_1 + t_0}{t_0} \quad (4)$$

考虑到在通过室内试验作出 $e-\log p$ 曲线以确定 p_0 时, 可以比较方便地同时求取 C_e 值, 而且也为了便于分析参数间的相互关系, 所以我们引进参数比 r , 即令

$$r_e = \frac{C_e}{C_c}, \quad r_{ef} = \frac{C_{ef}}{C_c}, \quad r_w = \frac{C_w}{C_c}$$

则(4)式可改写为如下形式:

$$\Delta e = C_c \left(r_e \log \frac{p_e}{p_0} + r_{ef} \log \frac{p_t}{p_0} + r_w \log \frac{t_1 + t_0}{t_0} \right) \quad (5)$$

无疑, 如果能够经过比较细致的试验研究, 把对于某一土层的参数比稳定在某一数值或数值范围内(有一定的置信率或允许误差), 则在应用(4)或(5)式进行变形分析时, 只要依据常规的一次加荷的室内试验曲线便可以了, 而免去修正为现场曲线或对于超固结土的重复加荷试验等步骤。

上海地基土的上述各个指标、参数以及参数比的计算结果分别列于表1和图7~10中, 在进行统计分析时所取的置信率一律为95%。

图7、8分别表示灰色淤质粘性土层的 C_c 值与天然孔隙比 e_0 、天然含水量 W_0 的相关关系。

对于 C_c-e_0 关系

$$C_c = 0.598(e_0 - 0.575), \quad (6)$$

对于 C_c-W_0 关系

$$C_c = 1.843(W_0 - 0.222), \quad (7)$$

上述二式的误差约为13%左右。

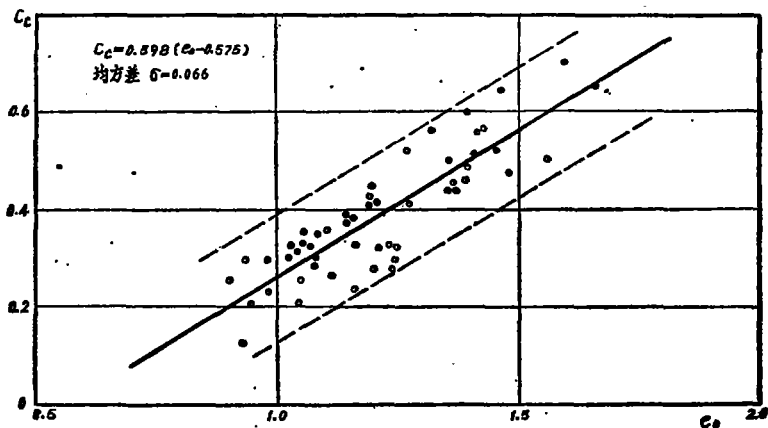


图7 灰色淤质粘性土层 C_c 与天然孔隙比 e_0 的相关关系

从表1的压缩指数参数比 r_c 一栏可以看到, 上海浅层地基的三个土层的参数比 r_c 其平均值及一般范围都十分接近, 特别是平均值都十分接近于1.20。这说明就上海地区而言, 由现场压缩曲线上求得的压缩指数 C_{ef} 和由室内试验曲线求出的压缩指数 C_e 之间有一个比较稳定的关系即 $C_{ef} \approx 1.20 C_e$, 而且这一关系不因土层类别和天然固结程度(超固结和正常固结)的不

同而异。

关于次固结指数 C_α 的计算仅限于灰色淤泥质粘性土层。在分析中发现,随着固结荷重的增加, C_α 值的逐渐增大, C_α 值有一缓慢的近于线性的增大过程;当固结压力超过 p_0 之后,在大

表1 上海浅层地基各土层的 p_0 及其有关压缩性参数计算结果

指 或 参 数	土 层		
	褐黄色粘性土层 (表层)	灰色淤泥质粘性土层	暗绿色粘土层 (桩基 持力层)
p_0	见图4中 $r_{0.1}$ 的分布线1—1, 2—2, 3—3		
C_c	0.028~0.044 平 均 值 0.035 ± 0.003	0.0306~0.0820	0.019~0.021
C_c	0.142~0.400 平 均 值 0.279 ± 0.052	$C_c = 0.598(e_0 - 0.575)$ $C_c = 1.843(w_0 - 0.222)$	0.116~0.182 平 均 值 0.150 ± 0.016
C_α		据94只测定值统计: 0.009~0.021 平 均 值 0.014 ± 0.003	
$r_0 = \frac{C_\alpha}{C_c}$	0.080~0.120 平 均 值 0.102 ± 0.008		
$r_0 = \frac{C_{\alpha 1}}{C_c}$	1.100~1.300 平 均 值 1.182 ± 0.029	1.120~1.320 平 均 值 1.209 ± 0.014	1.120~1.220 平 均 值 1.178 ± 0.020
$r_\alpha = \frac{C_\alpha}{C_c}$		0.0308~0.0351	

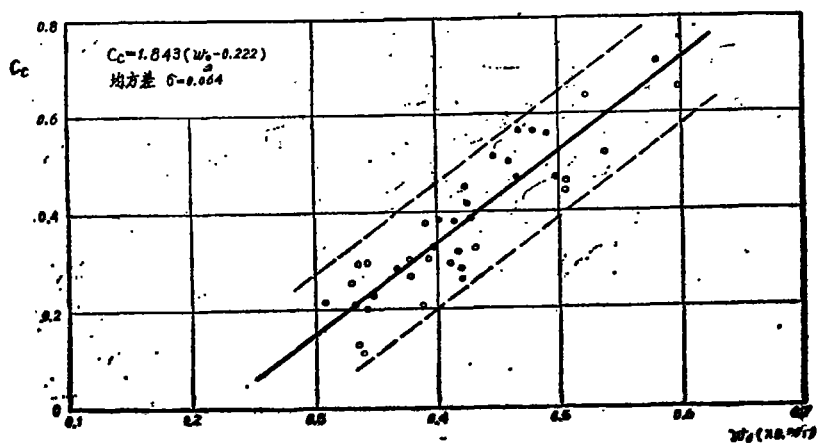


图8 灰色淤泥质粘性土层 C_c 与天然含水量 w_0 相关关系

于 p_c 的各级固结荷重作用下, C_a 值比较稳定地在某一范围内变动, 并趋于靠近其平均值, 而且 C_a 值并不随着荷重的加大而继续增大(图9)。考虑到这过程中 C_c 值保持为常量(即 $e-\log p$ 曲线的直线段), 则 C_a 的这种有与 C_c 变化相对应的变化规律, 有进一步试验研究之必要。 C_c 的这一特性在参数比 $r_a =$

$\frac{C_a}{C_c}$ 的分析中亦略可窥见。参数比 r_a 是通过作图法(图10是其中一示例曲线)得到的。本文所得到的结果与文献^[8,9]所搜集的资料及研究结果相近。

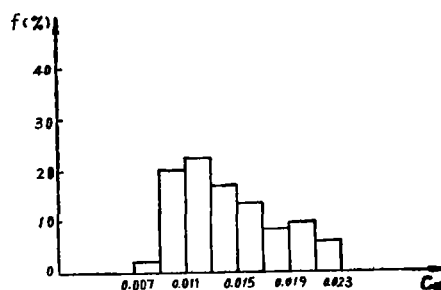


图9 灰色淤质粘土层 C_a 值直方频率图

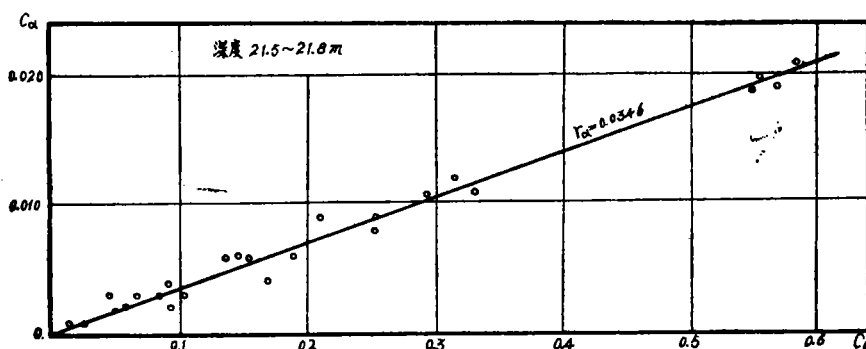


图10 灰色淤质粘性土层参数比 r_a 的示例图

四、上海软土准前期固结压力 Q_c 的试验与估算公式

一般认为, 土体的前期固结压力 p_c 系指该土层在历史上曾经受过的最大压力。但近代的研究表明^[1,2], 正常固结或轻度超固结粘土层, 在常量有效压力下, 由于土层的次固结作用, 会使得从压缩曲线上得到的前期固结压力大于土体历史上曾受过的最大压力, 即形成一个表观前期固结压力, 称为准前期固结压力 Q_c 以区别于通常的前期固结压力 p_c 。在正常固结粘土层中存在着准前期固结压力这一现象, 已为大量试验所证实。我们在进行上海软土应力历史研究的过程中也对此问题作了初步的试验和分析。为了模拟土的天然沉积条件, 我们将灰色淤质亚粘土重塑成土膏, 含水量35%, 容重 1.9t/m^3 , 初始孔隙比 $e_0 = 0.918$ 。土膏静置14天后进行固结试验。以 0.3kg/cm^2 的荷载增量每隔24小时一级直至 1.8kg/cm^2 。停止加荷, 恒压41天。接着以 0.1kg/cm^2 的增量继续加荷, 间隔时间仍为24小时一级直至压缩曲线的斜率出现明显变化, 再以大荷载增量加荷直至试验结束。图11为这种试验结果的代表性曲线之一。图中可以看到, 试样在 $p_0 = 1.8\text{kg/cm}^2$ 压力下恒压41天后再以小荷载增量加荷时, 开始阶段孔隙比几乎不减小, 形成一个压力平台; 当荷载超过 Q_c 时, 孔隙比随着荷载增加而迅速减小, 荷载继续增加压缩曲线将沿原来的斜率发展。在41天恒压中的次固结变形为 ab 。次固结变形与时间关系在 $e-\log t$ 图上呈直线关系(图12)。根据 Bjerrum 所提出的正常固结粘土随着年代的延续因次固结作用引起超固结的概念^[1], 有如图13所示。从图13可得

$$\Delta e = C_c (\log Q_c - \log P_o) = C_c \log \frac{Q_c}{P_o}, \quad (8)$$

面从图12可得

$$\Delta e = C_a (\log t - \log t_0) = C_a \log \frac{t}{t_0}, \quad (9)$$

上二式中

Δe ——恒压期间次固结变形量;

Q_c ——准前期固结压力;

p_0 ——常量有效荷重;

t ——恒压时间;

t_0 ——主固结结束时刻, 取为24小时, 其它符号意义同(3)式。

令(8)式与(9)式相等, 即

$$C_a \log \frac{Q_c}{p_0} = C_a \log \frac{t}{t_0},$$

则得

$$Q_c = p_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{r_a}, \quad (10)$$

$$\text{参数比} \quad r_a = \frac{C_a}{C_c}. \quad (11)$$

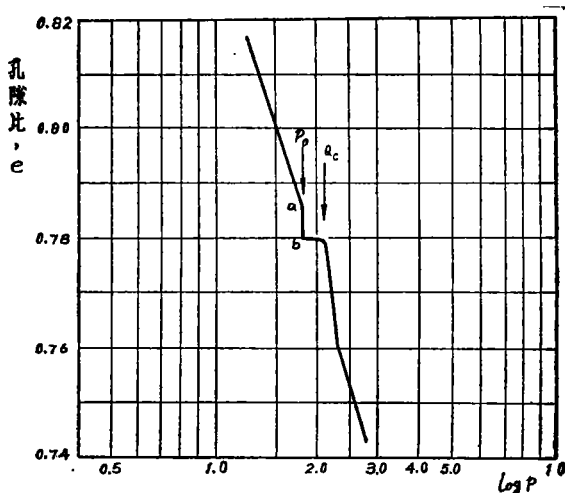


图11 重塑土的 $e-\log p$ 曲线

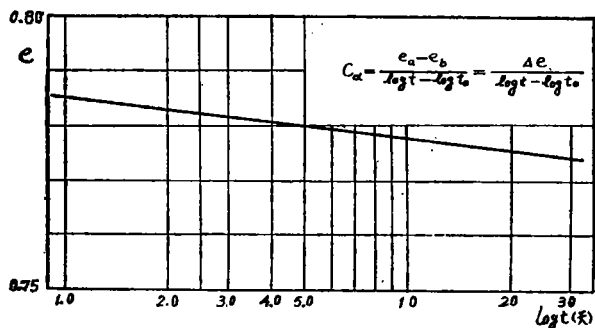


图12 重塑土次固结变形与时间关系

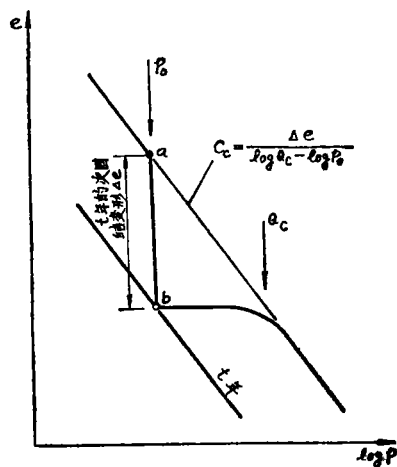


图13 次固结变形与准前期固结压力

式(10)表示粘性土由于次固结而引起的准前期固结压力随时间变化的关系。它同时取决于粘性土的压缩指数 C_c 和次固结指数 C_a 。由于在一般固结试验中, 开始阶段是以主固结为主, 随着时间的增长逐渐以次固结为主。所以主次固结之间并无一个明确的时间界线。为简化计, 我们取加荷后24小时时间为主固结结束、次固结开始的时间。

根据重塑粘性土膏固结试验结果得 $C_c = 0.206$, $C_a = 0.006$, 则算得 $r_a = 0.0291$ 。然后

表2 准前期固结压力 Q_c 随次固结时间的增长($p_0 = 1.8\text{kg/cm}^2$)

天(d)	41	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
年(yr)	0.11	0.274	2.739	27.397	273.97	2739.72
$\left(\frac{t}{t_0}\right)r_a$	1.114	1.144	1.223	1.308	1.398	1.495
Q_c	2.005	2.05	2.201	2.354	2.516	2.691
$\frac{Q_c - p_0}{p_0} \%$	11.4	14.4	22.3	30.8	39.8	49.5

按(10)式算得准前期固结压力 Q_c 随次固结时间的变化规律,其结果示于表2和图14中。从表2和图14可以看到,准前期固结压力随着次固结时间的增加而增长,但初期的增长速率大大高于后期的增长速率。在主固结完成后41天, Q_c 就能增加11%,三年之内可增长22%,此后增长的速率将迅速减小,并趋于稳定。可见由于这一特性,若简单地以为准前期固结压力 Q_c 是一个常数则是片面的。

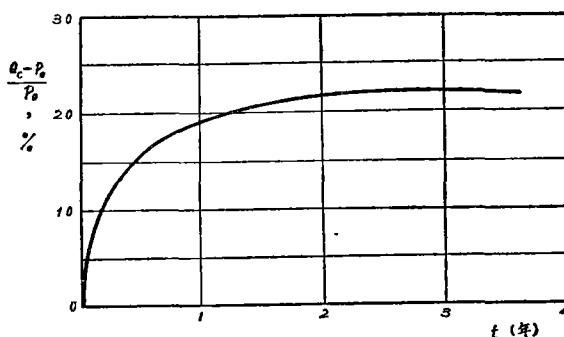


图14 准前期固结压力 Q_c 随次固结时间的变化规律。

五、结 语

根据以上所作的试验研究和初步分析,可以看到:

1. 组成如图4所示的典型剖面的上海浅层地基的三个主要土层,它们在应力历史上是不相同的。上下两个硬土层均是超固结土层,当中的灰色淤质软土层是轻度超固结的($r_{oc} \approx 1.08$),在一般情况下亦可近似作为正常固结土层考虑。

2. 考虑应力历史影响的应力-应变关系式(式(3))也适合上海地基土层。本文为其中各有关指标、压缩性参数提供了初步计算结果可作工程设计参考。其中,特别是参数比 r_c ,对上海浅层地基各土层均可近似取 $r_c = 1.20$ 。

3. 试验证明了正常固结粘性土层由于恒压下的次固结作用形成一个表观前期固结压力。为了区别于通常的超固结概念而称之为准前期固结压力 Q_c 。本文提出的准前期固结压力随次固结时间而增长的公式虽是初步的,但可为软土地基设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] Bjerrum, L., Embankment on Soft Ground, Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Vol. 2, part 2, 1972, pp. 1~54.
- [2] Narain, J. et. al., Quasi-preconsolidation Effects and Pore Pressure Dissipation During Consolidation, Proc. 7th. ICSMFE., Vol. I, 1969, pp. 311~315.

- [3] Edited by Winterkorn, H.F. and Fang, H. Y., Foundation Engineering Handbook, 1975.
- [4] Garlanger, J.E., The Consolidation of Soils Exhibiting Creep under Constant Effective Stress, Geotechnique, Vol. 22, No.1, 1972, pp. 71~78.
- [5] Bjerrum, L., Seventh Rankine Lecture, Engineering geology of Normally-Consolidated Marine Clay as Related to Settlements of Buildings, Geotechnique, Vol. 17, No. 2, 1967, pp. 83~118.
- [6] 太沙基, K., 佩克, R. B., 工程实用土力学, 蒋彭年译, 水利电力出版社, 1960年.
- [7] Schmertmann, J. H., The Undisturbed Consolidation of Clay, Trans. ASCE., Vol. 120, 1955, p. 1201.
- [8] 同济大学地基研究室、华东电力设计院、上海勘察院, 土的前期固结压力的测定与分析, 1978年5月.
- [9] Masri, G and Godlewski, P. W., Time-and Stress-Compressibility Interrelationship, Proc. ASCE., Vol. 103, GT 5, 1977, pp. 417~430.

Experimental Study of Preconsolidation Pressure and Compressibility Parameters of Shanghai Subsoil

Wei Dao-duo and Hu Zhong-xiong

(Tongji University, Shanghai.)

Abstract

Preconsolidation Pressure is an indication of the stress history of a soil layer, and is also an important parameter in settlement analysis dealing with soils having different stress histories. In this paper are reported the experimental determination of preconsolidation pressure of Shanghai soil and its variation within a depth of some thirty meters. Based upon these experimental results are also presented numerical data of the compressibility parameters, i. e., the compression, swelling and secondary consolidation indices (C_c , C_e and C_{α} , respectively), as suggested by Garlanger in his studies of stress-strain relationship of soil, considering stress history. Experimental investigation of "pseudo-preconsolidation pressure" due to secondary consolidation, using remoulded samples, is also reported, and based upon this a formula has been tentatively suggested for evaluating pseudo-preconsolidation pressure of Shanghai soil. It is hoped that the above-mentioned preliminary investigations may prove to be of value to studies of deformation and strength properties of Shanghai soft soil.