

上海黄浦江岸边淤泥质粘土的 固结状态及强度特性

张诚厚 王伯衍 汪兆京

(土工研究室)

提 要

本文简要的叙述了对上海黄浦江岸边淤泥质粘土的研究成果。试验的目的是为了明确该土层的天然固结状态,天然强度及加荷、卸荷状态下的强度变化规律。全部室内试验计包括:固结试验及三轴固结不排水压缩试验并测孔隙压力。试验中采用了固结之前施加反压力及在试样两端涂硅脂等项技术。

按照对粘性土的固结、抗剪强度基本特性的认识,从土的准先期固结压力、孔隙压力系数 A 、应力途径、应力圆包线、应力—应变曲线的规格化等方面分析试验成果,认为上海黄浦江岸边的淤泥质粘土处于轻度超压密状态。最后,提出了各种状态下的强度参数。

一、引 言

在上海地区,于标高约 -13 米以上普遍存在着一层较软弱的淤泥质粘土层,其强度较低,压缩性较大,对建筑物的稳定及变形起控制作用。近来,在黄浦江上游的立丰船厂须兴建一座二万五千吨级的修船码头,如何保证岸坡的稳定性已成为工程成败的关键问题之一。过去,大多认为此土层处于正常压密状态,并依此进行分析计算。为了充分利用土的天然强度,以期得到较经济的设计,故对此土层做进一步的研究,以便明确:(1)天然地基中淤泥质粘土的固结状态;(2)土层的天然强度;(3)加荷及卸荷状态下的强度变化规律。

为解决上述问题,进行了现场十字板剪切试验,并钻取未扰动试样,在室内进行固结试验及三轴固结不排水压缩试验。

二、土质情况

在该厂范围内,自地表至标高 -2 米为灰色淤泥质亚粘土,含较多的细砂及粉砂层,平均含水量约 40.8% ,平均容重 1.8T/M^3 ,流限 39.7 ,塑限 23.9 ,塑性指数 15.8 。自标高 -2 至 -13 米范围内,为灰色淤泥质粘土,夹有较多的薄粉砂层,在 -12 至 -13 米范围内含较多的细砂及碎贝壳。 -13 米以下为粉砂及细砂层,厚约 $2\sim 3$ 米。其下为亚粘土

层，其物理力学特性均较淤泥质粘土为好。本研究仅限于-13米以上的淤泥质粘土层。

为开展研究工作，在现场进行两个断面8孔十字板试验及8个原状取土孔。十字板剪切仪为我所制造的电阻应变式十字板剪切仪，直接测定十字板测头处所受的力矩⁽¹⁾。所用取土器为 $\phi 100$ 薄壁活塞取土器，壁厚2毫米，能取得质量较高的未扰动土样。

现场十字板强度试验表明，此土层比较均匀，且强度较低，沿深度略有增大。

本文以5号孔的试验成果，讨论此土层的固结状态及强度特性，其柱状图如图1所示。

淤泥质粘土的平均物理性指标见表1。

表1

含水量 %	容 量 T/M^3	流 限	塑 限	塑性指数	孔 隙 比
49.5	1.73	42.2	22.5	19.7	1.40

三、室内试验

室内试验包括固结试验及三轴试验。

固结试验用以确定准先期固结压力。为消除侧壁摩阻的影响，在试样四周涂一薄层硅脂；为减轻加荷速率对土结构的影响，在试验中采用小的加荷等级，在0.8公斤/厘米²之前，每阶荷重仅0.1公斤/厘米²，其后用较大的荷重等级。最大荷重到8公斤/厘米²。

三轴试验均为固结不排水压缩试验，依固结状态可分为三类：（1）以等于及小于有效上复压力的固结压力进行固结，经24小时，待固结稳定后进行不排水压缩试验；（2）固结压力大于有效上复压力，固结稳定后进行不排水压缩试验；（3）以准先期固结压力进行固结，退至不同的压力，待吸水膨胀稳定后进行不排水压缩试验。

所有三轴试验均在固结之前施加1公斤/厘米²的反压力，并在试样的两端放置涂有硅脂的薄膜。天然地基的土体处于饱和状态，承受着与该深度的水头相应的水压力，取土卸荷后使原先溶于水中的气体游离出来，施加反压力之后，能使气泡再度溶于水，从而提高土的饱和度，并模拟土的天然应力状态⁽²⁾。在常规试验中，试样两端与透水石相接触，在试样压缩过程中在端部产生较大的摩阻力，对试样的应力、应变产生很

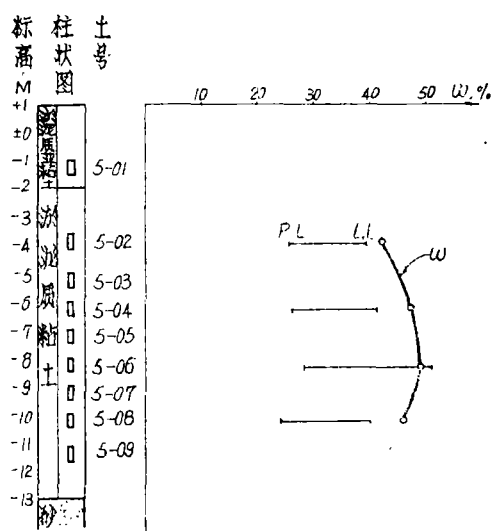


图1 土层柱状图

大的约束,这就造成了沿试样高度方向上应力、应变的不均匀,影响试验成果。在试样两端放置涂有硅脂的薄膜之后,在较大的压缩变形状态下,试样中部的鼓形程度有明显的减轻。在采取这两项措施之后,已获得较好的应力—应变关系。

四、土层的荷重历史与强度的关系

地基的固结状态是以超压密比的数值来表征的。一般认为,所谓超压密比,是指土层在历史上曾受过的最大荷载与现存的有效上复压力之比;比值等于 1 为正常压密粘土,大于 1 的为超压密土*。

为说明简单起见,设想在地面以下 H_1 、 H_2 深度处,存在 P、Q 二土单元,其天然有效上复压力分别为 γH_1 、 γH_2 。如果此土层在地质历史上曾经受过更大的荷载(可能是上部土层逐渐被冲蚀,或者是原地下水位较低而后水位抬高等原因造成的),其先期固结压力为 $\gamma(H_1 + H_0)$ 及 $\gamma(H_2 + H_0)$,见图 2(a)。在 $e \sim \log P$ 曲线上, P 单元自压缩主枝的 A_1 点卸荷,如在室内做固结试验,则得 $D_1 B_1 N$ 线,相应于有效上复压力 P_{01}' 为 B_1 点,见图 2(b)。同样,对 Q 单元,则有 $D_2 B_2 N$ 线及 B_2 点。 $O' B_1 B_2 K$ 线可

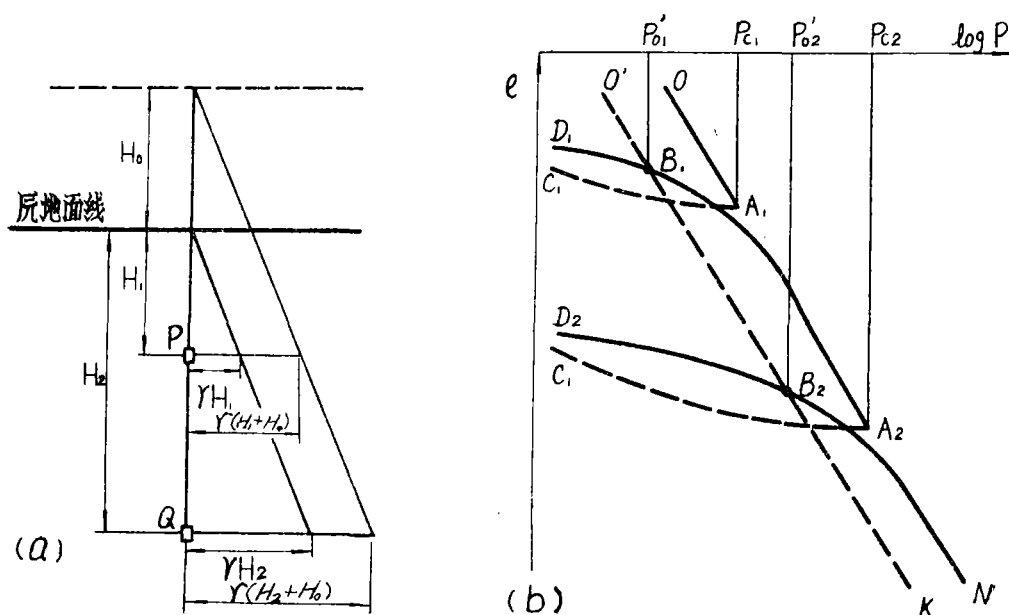


图 2

1. 在某些情况下,土层在地质历史上虽未受过更大的荷载,但由于时间老化等因素的作用,使土具有较强的结构性,呈现出较高的准先期固结压力。我们不妨称准先期固结压力与现存的有效上复压力之比为超压密比。此种土也具有超压密土的特性。本文所介绍的上海淤泥质粘土,可能属于此类情况。
2. 如土层在总上复压力作用下未完全固结,则总上复压力与有效上复压力之比小于 1,此种土称为欠压密土。

近似认为代表地层中的天然孔隙比线。在强度图上, 图 2(c), $O'B_1B_2K$ 线代表与天然孔隙比线相应的超压密土的天然强度线; 卸荷时 P、Q 单元的强度曲线分别为 $A_1B_1C_1$ 及 $A_2B_2C_2$ 线。加荷的强度线为 B_1A_1N 及 B_2A_2N 。由超压密状态转变为正常压密状态的交点 A_1 、 A_2 , 代表 P、Q 二单元的先期结压力。

如地基为正常压密粘土, 则 $P'_0 = P_e$, 与压缩主枝相应, 在强度图上则有剪力主枝 ON 线, 为正常压密土的强度线。此时, 二单元的卸荷强度线为 $A_1'C_1'$ 、 $A_2'C_2'$ 。

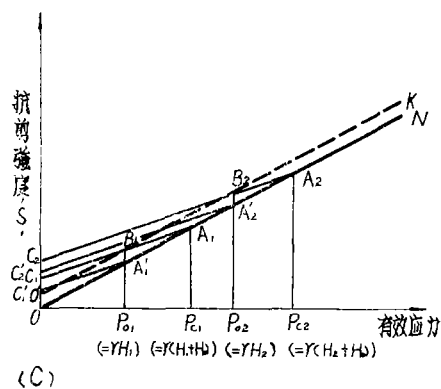


图 2 荷重历史与强度关系示意图

五、成果与讨论

一、固结试验:

由试验可得 $e \sim \log P$ 曲线, 按国际上广泛采用的卡萨格兰德 (A. Casagrande) 方法确定准先期固结压力 P_e 。典型的试验曲线见图 3。由图看出, 在超过准先期固结压力之后, 曲线急剧下降, 表明土层处于超压密状态。在不同深度的 P_e 值分别约为 0.9、1.0、1.1、1.2 公斤/厘米²。

将有效上复压力 P'_0 、准先期固结压力 P_e 、及准超压密比 $O.C.R (= P_e/P'_0)$ 等值沿深度的变化线, 分别绘于图 4。在各深度处, 准先期固结压力均大于有效上复压力, 准超压密比沿深度上变化为 2.4~1.4。

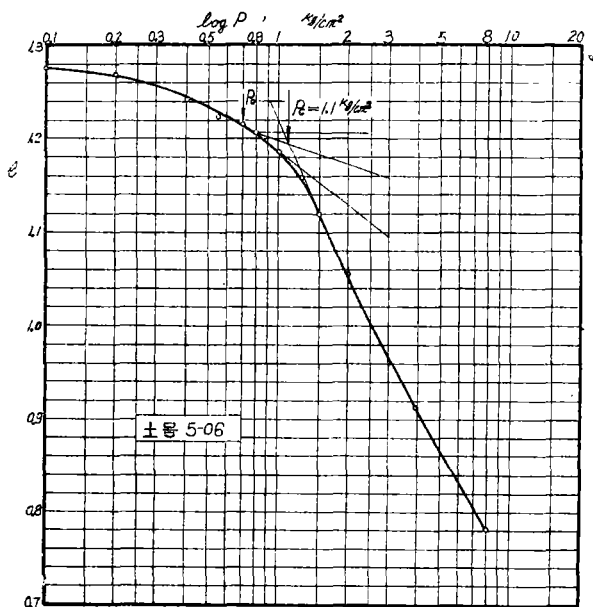


图 3 固结曲线

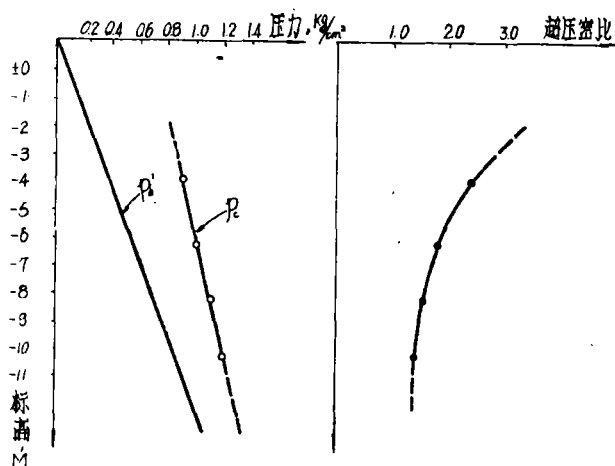


图4 有效上复压力、准先期固结压力、超压密比沿深度变化线

二、三轴压缩试验:

将5号孔的试验成果列于表2。我们从下列几方面来讨论土层的固结状态:

1. 孔隙压力系数A

我们由第2类试验中的 $\sigma'_c \gg P'_0$ 的试验结果定出处于正常压密状态试样的 A_r 平均值为0.9。由第3类试验中预固结压力为1.0公斤/厘米²的试验成果,给出准超压密比与破坏时的孔隙压力系数 A_r 的关系曲线,见图5。它表明, A_r 值随准超压密比的增大而降低,曲线的起始段变化急剧,而后逐渐平缓。以5—04、5—06土样为例,绘出孔隙压力系数A与轴向应变 λ 的关系曲线,见图6。对固结压力大于准先期固结压力的试验,试样处于正常压密状态, A的数值较高,且 $A-\lambda$ 线基本上为一条线;当固结压力等于或低于有效上复压力时, A 值明显降低,固结压力越小(即准超压密比越大), A 值降低的越多。

2. 应力途径

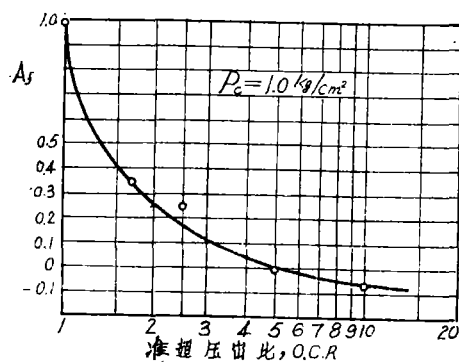
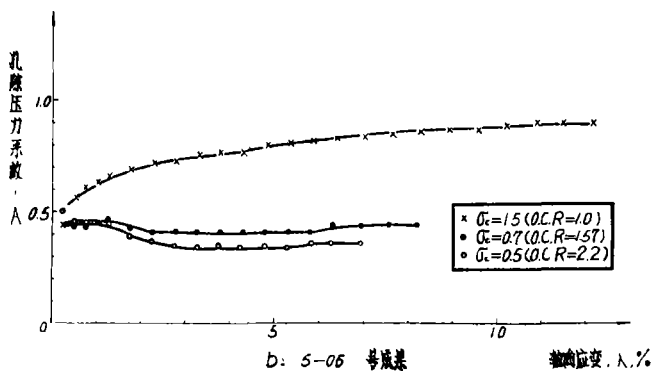
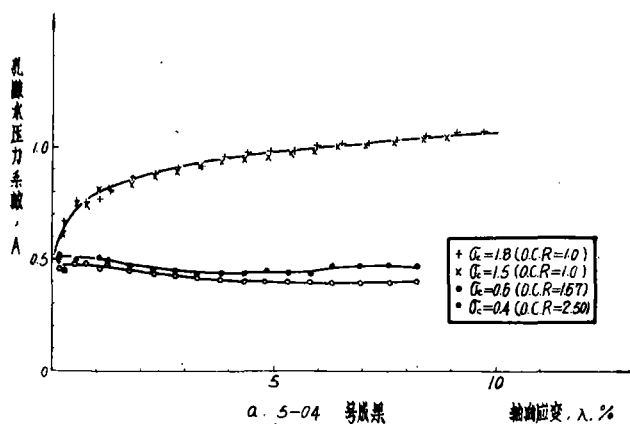
在不排水压缩过程中,不同固结状态的试样,有效应力途径的变化趋势也截然不同。对正常压密土而言,在不排水压缩过程中,平均有效法向应力逐渐降低;而超压密土,在初期,有效法向应力基本不变,在轴向应变达一定数值之后,其值逐渐增大。在 $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sim \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ 图上,二种固结状态试样的有效应力途径具有不同的倾斜方向。我们的试验表明,对固结压力等于或小于有效上复压力的试样,其应力途径显示出明显的超压密特征,见图7。

3. 抗剪强度包线

图8绘出破坏时刻的有效应力圆。固结压力较有效上复压力大得多的一组试样 ($\sigma'_c \gg P'_0$),肯定处于正常压密状态,其有效应力圆的强度包线为一条通过座标原点的直线;固结压力等于或低于有效上复压力的试样,其包线为较平缓的直线。对不同取土深度的试样,强度包线与纵轴的截距也不相同,大致与准先期固结压力成比例。二线交点的横座标即为准先期固结压力,其值分别为0.9、1.0、1.1及1.2公斤/厘米²。

表2 三轴压缩试验成果汇总表

试验类型	土号	σ_c kg/cm ²	$(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ kg/cm ²	v_r kg/cm ²	$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_r/2$ kg/cm ²	$(\sigma'_1 + \sigma'_3)_r/2$ kg/cm ²	σ'_3 kg/cm ²	P'_0 kg/cm ²	P_c kg/cm ²	O.C.R.	A_r	$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_r}{\sigma_c}$
1 ($\sigma_c \leq P'_0$)	02	0.4	0.60	0.21	0.30	0.49	0.19	0.38	0.9	2.37	0.35	1.5
	02	0.2	0.39	0.13	0.20	0.27	0.07				0.33	1.5
	04	0.6	0.75	0.33	0.38	0.65	0.27	0.55	1.0	1.82	0.44	1.25
	04	0.4	0.57	0.23	0.29	0.46	0.17				0.40	1.43
	06	0.7	0.87	0.36	0.44	0.78	0.34	0.70	1.10	1.57	0.41	1.24
	06	0.5	0.74	0.26	0.37	0.61	0.24				0.35	1.48
	08	0.9	0.99	0.53	0.50	0.87	0.37	0.84	1.20	1.43	0.54	1.07
	08	0.2	0.53	0.11	0.27	0.36	0.09				0.21	2.65
2 ($\sigma_c > P'_0$)	02	1.9	0.86	0.56	0.43	0.87	0.44				0.65	0.86
	02	1.5	1.20	1.00	0.60	1.18	0.58				0.83	0.80
	04	1.0	0.85	0.58	0.43	0.85	0.42				0.68	0.85
	04	1.5	1.07	0.98	0.54	1.06	0.52				0.92	0.71
	04	1.8	1.21	1.20	0.61	1.21	0.60				0.99	0.67
	06	1.0	0.97	0.55	0.49	0.94	0.45				0.57	0.97
	06	1.2	1.02	0.70	0.51	1.01	0.50				0.69	0.85
	06	1.5	1.19	0.92	0.59	1.17	0.58				0.77	0.79
3 ($\sigma_c = P_c \rightarrow \sigma_c = \sigma_{cl}$)		1.0	0.91	0.60	0.46	0.86	0.40				0.66	0.91
	08	1.5	1.19	0.92	0.60	1.18	0.58				0.77	0.79
	08	2.0	1.35	1.34	0.68	1.34	0.66				0.99	0.68
	04	1.0-0.6	0.81	0.28	0.41	0.73	0.32			1.67	0.35	1.36
	02	1.0-0.4	0.72	0.18	0.36	0.58	0.22			2.50	0.25	1.80
	02	1.0-0.2	0.74	0	0.37	0.57	0.20			5.00	0	3.70
	02	1.0-0.1	0.67	-0.04	0.34	0.48	0.14			10.00	-0.06	6.80
	06	1.15-1.0	0.97	0.57	0.48	0.91	0.43			1.15	0.59	0.96
	06	1.15-0.7	0.96	0.31	0.48	0.87	0.39			1.64	0.32	1.38
	06	1.15-0.5	0.87	0.17	0.44	0.77	0.33			2.30	0.20	1.76

图5 $A_r \sim$ 准超压密比关系线图6 孔隙水压力系数 A 与轴向应变 λ 关系曲线

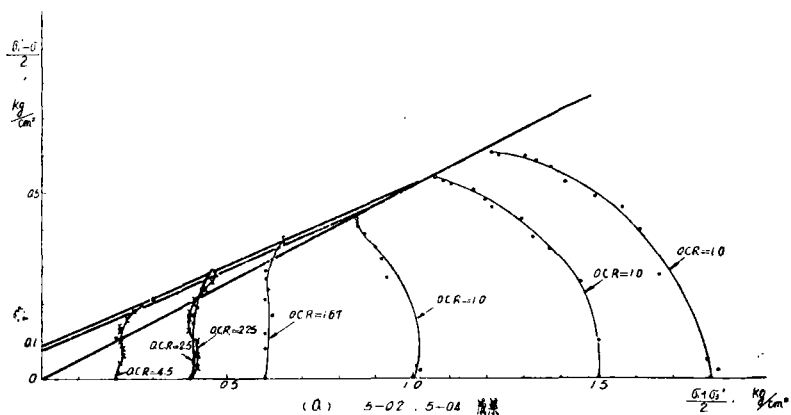
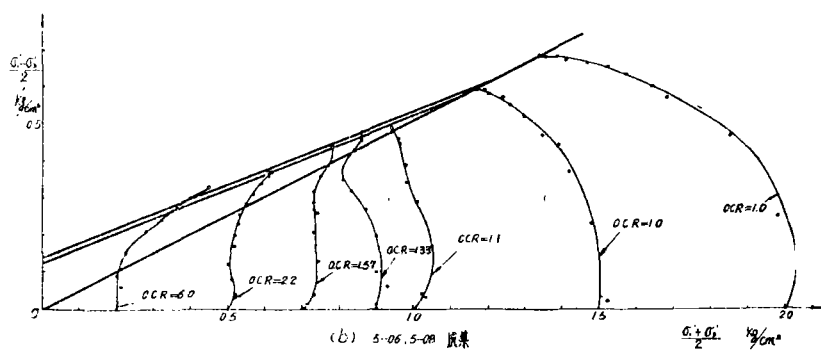


图 7 应力途径

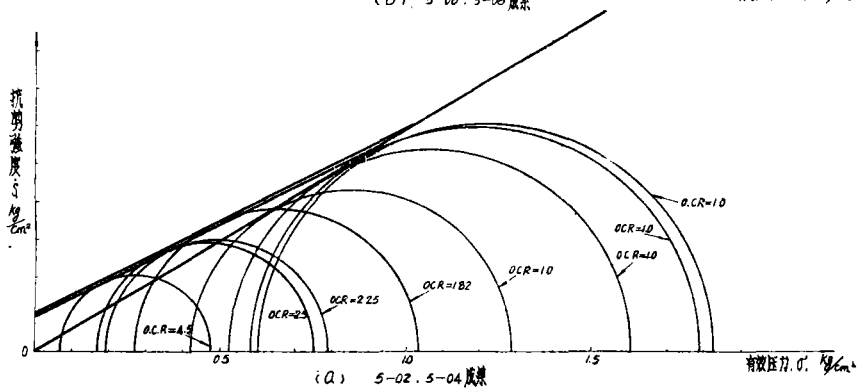
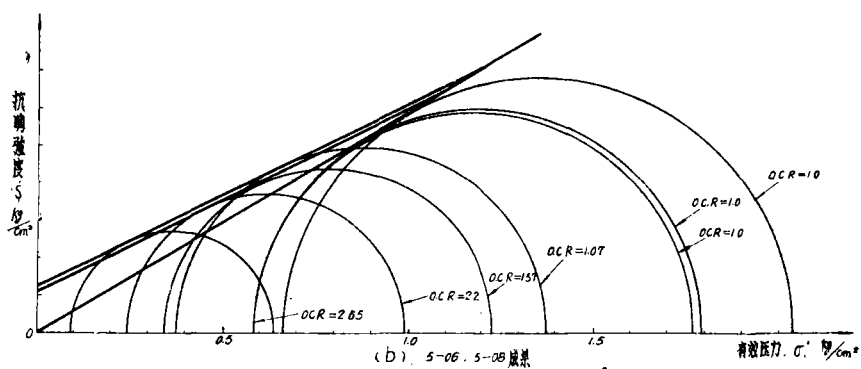


图 8 应力圆包线

4. 应力—应变曲线的规格化特性

由第3类试验可以绘出 $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\sigma_c}$ 与准超压密比的关系线, 随准超压密比的增大, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \sigma_c$ 值也明显的增大, 见图9。将5—04号土样的一组应力—应变曲线绘于图10(a), 各试样所能承受的剪应力随固结压力的增大而增大; 但在除以各自的固结压力(即所谓“规格化”)之后, 曲线呈现出不同的特征。处于正常压密状态的试样, 基本上为一条曲线, 由于土的不均匀性, 试验点在较小的范围内变化; 而准超压密土则因准超压密比的不同而不相同, 准超压密比越大, $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c}$ 值也越大, 见图10(b)。

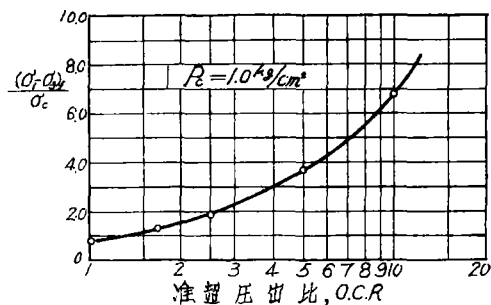


图9 $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\sigma_c} \sim$ 准超压密比关系线

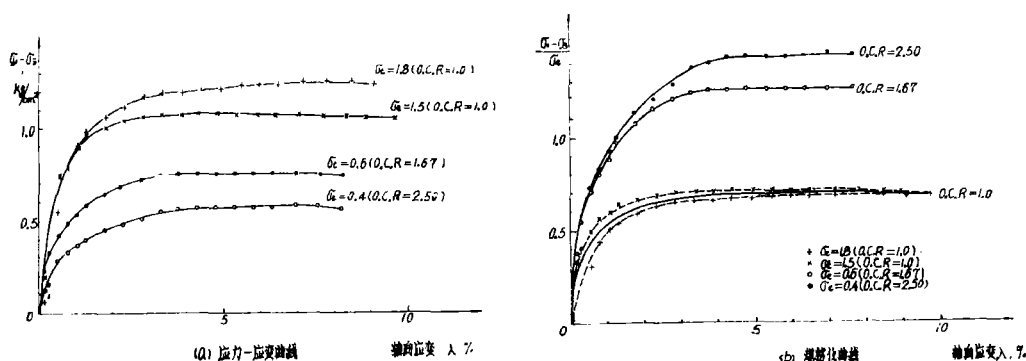


图10 规格化特性图(5—04)

综上所述, 我们认为上海黄浦江岸边的淤泥质粘土处于轻度超压密状态。

为实用起见, 我们将5号钻孔的全部试验结果绘于图11。对不同的天然有效上复压力的试验点连线, 得天然强度线, $C' = 0.04$ 公斤/厘米², $\phi' = 30.6^\circ$ 。由低于有效上复压力的试验求出卸荷状态的强度线, 为实用方便起见, 可以标高-8米为界。-8米以上自1.0公斤/厘米²卸荷, 得 $C' = 0.09$ 公斤/厘米², $\phi' = 25.8^\circ$; -8米以下自1.15公斤/厘米²卸荷, $C' = 0.11$ 公斤/厘米², $\phi' = 25.8^\circ$ 。以固结压力大于有效上复压力的试样, 定出加荷时的强度线, $C' = 0$, $\phi' = 30.6^\circ$ 。

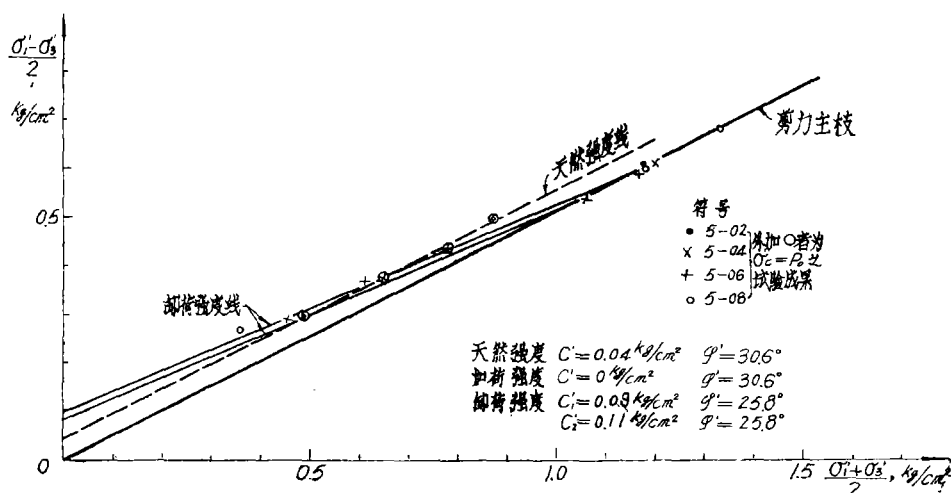


图11 5号孔三轴试验强度包线

最后,由其他钻孔的淤泥质粘土试验,也得到完全相同的结果^[3]。考虑到5号钻孔的顶部标高与岸顶地面标高仅相差2米,而准超压密比值为2.4~1.4,我们认为,远离岸边的地基也可能具有类似的特性,这有待于今后进一步验证。

六、结 语

1. 可以由室内试验依据土的准先期固结压力、孔隙压力系数A、应力途径、应力-应变包线以及应力-应变曲线的规格化特性判别土的天然固结状态。为获得良好的试验资料,要求在取土和试验的各个环节中尽量减轻扰动,并提高测试精度。

2. 从目前的试验水平出发,在试验中采取固结之前施加反压力及在试样两端涂硅脂的措施,有助于提高测试精度。

3. 大量的试验说明,上海黄浦江岸边的淤泥质粘土处于轻度超压密状态。沿深度方向上,准先期固结压力自0.9公斤/厘米²变化到1.2公斤/厘米²,准超压密比约2.4至1.4。由三轴固结不排水压缩试验与固结试验所得的准先期固结压力值相近。

4. 第5号钻孔淤泥质粘土的天然强度约为 $C' = 0.04$ 公斤/厘米², $\phi' = 30.6^\circ$;卸荷的强度参数,沿土层深度分别为 $C' = 0.09$ 公斤/厘米², $\phi' = 25.8^\circ$ 及 $C' = 0.11$ 公斤/厘米², $\phi' = 25.8^\circ$;加荷的强度参数为 $C' = 0$, $\phi' = 30.6^\circ$ 。

参 考 文 献

- [1] 朱勤顺、陈绪照, 电阻应变测量在十字板剪切仪中的应用, 南京水利科学研究所, 1964。
- [2] 张诚厚、万骏义, 基坑开挖与井点降水作用下未扰动饱和粘土的强度测定, 南京水利科学研究所, 1976。
- [3] 张诚厚、汪兆京、王伯衍, 上海立丰船厂修船码头岸坡稳定性的研究, 南京水利科学研究所, 1980。

**THE CONSOLIDATED CONDITION AND SHEAR
STRENGTH BEHAVIOUR OF SOFT CLAY
AT THE BANK OF HUANG—PU RIVER,
SHANGHAI**

Zhang Chenghou Wang Boyan Wang Zhaojing
(Nanjing Hydraulic Research Institute)

Synopsis

This paper describes briefly the results of the investigation of soft clay at the bank of Huang-Pu River, Shanghai. The purposes of the tests are to determine, the consolidated condition of this layer in natural state, the in-situ shear strength and the variation of shear strength under loading and unloading.

The laboratory measurement consists of consolidation tests and triaxial consolidated undrained tests with measurement of pore pressures. In the triaxial tests back pressure was applied before consolidation to the specimen with a coat of silicon oil on both ends.

According to the fundamental concepts of consolidation and shear strength of cohesive soils, the preconsolidation pressure, the pore pressure coefficient A , the stress path, the failure envelopes and the normalized behaviour of stress-strain have been discussed. It is concluded that this layer should be considered to be in the condition of slightly over-consolidated. Finally, the strength parameters under different conditions are presented.