

粘土固结变形的时间性

李作勤

(中科院武汉岩土力学研究所, 430071)

提 要

本文首先从理论分析并由试验结果验证了次固结的时间和变形量的有限性。其次, 讨论了次固结引起的拟似超固结的特点和超固结比和固结压力的关系。最后, 描述次固结变形随时间的变化以及次固结量 $(\epsilon_\infty - \epsilon_1)$ 与一次固结量 ϵ_1 的比值随压力的变化规律。

一、前 言

太沙基的渗透固结理论发表后, 人们很快从固结试验发现超静水孔压消散完成后, 固结变形并未止息, 理论与实测结果不符, 出现所谓次固结现象。几十年来, 相继的研究已取得丰硕的成果。但为了减少数学的复杂性和计算参数测定的难度, 人们常用半理论半经验的方法着手对问题进行解答。其中, 描述次固结现象最成功的经验公式是1935年 Buisman's 时间对数律。L.Bjerrum^[1,2]据此对固结变形作进一步研究, 提出了瞬时压密和迟滞压密的概念及简易的计算方法, 进而利用所建立的荷载-变形-时间关系来近似估算土层沉积“荷载年令”。J.E.Galanger^[3]沿着 Bjerrum 的思路, 概括了孔隙压力的影响, 提出了固结机理类同的固结数学方程和数值解答。I.F.Christie^[4]对 Bjerrum-Galanger 的固结时间-线理论 (time-line theory of consolidation) 定义一系数来确定瞬时压密, 消除瞬时压密时间的不确定性, 并讨论了准先期固结效应受土层厚度的影响。在这一系列的研究中, 有一个共同概念, 就是次固结时间的无限延续性。这从理论和实验都是缺乏依据的。本文就多年积累的试验资料围绕这一问题展开讨论。

二、次固结时间和变形量的有限性

软粘土的固结应变可描述如下:

$$\epsilon = C'_c \cdot \log \frac{\sigma}{\sigma_0} + C'_s \log \frac{t}{t_0} \quad (1)$$

式中 $C'_c = C_c / (1 + e_0)$, C'_c 和 C_c 均称压密指数; $C'_s = C_s / (1 + e_0)$, C'_s 和 C_s 均称二次压密指数。

这里的问题是: 固结时间 t 能否推延到10年, 100年, 1000年, 甚至更长, 回答是否定的。次固结时间和变形量是有限的, 理论和实验证实这一点。

首先, 从压实度来看, 倘若在高温高压作用下, 最极端的情况是分散系的土变为孔隙可

忽略的岩石, 这是一种地质构造过程, 次固结过程有别于此。退一步说, 若次固结能达到孔隙比 e 为零, 按关系式(1)所需的时间为

$$t = t_0 \exp \cdot \frac{(e_0 - C_c \cdot \log \frac{\sigma}{\sigma_0})}{C_s} \cdot \ln 10 \quad (2)$$

次固结是荷载有限的迟滞压密过程, 孔隙比与压力和时间有一定对应关系, 对特定的压力 σ 存在着次固结稳定的相应孔隙比 e_L , 所需的时间 t_L 应该是

$$t_L = t_0 \exp \cdot \frac{(e_0 - e_L - C_c \cdot \log \frac{\sigma}{\sigma_0})}{C_s} \cdot \ln 10 \quad (3)$$

其次, 从抗畸变的强度增长来看, k_0 固结条件下, 土体内倾角为 $\alpha = \frac{\pi}{4} + \phi'/2$ 的潜在滑裂面上的长期强度极限为

$$\tau_\infty = C'_\infty + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \phi'_\infty = C'_\infty + \frac{1}{2} \left[1 + K_0(t) + [1 - k_0(t)] \cdot \sin \phi'_\infty \right] \sigma_v \cdot \operatorname{tg} \phi'_\infty \quad (4)$$

主应力差 $[1 - K_0(t)]\sigma_v$ 引起的剪应力为

$$\tau_\alpha = \frac{1}{2} [1 - k_0(t)] \sigma_v \cdot \sin 2\alpha = \frac{1}{2} [1 - k_0(t)] \sigma_v \cdot \cos \phi'_\infty \quad (5)$$

次固结过程引起土体密度的逐渐增大, 因而 τ_∞ 也相应增大, 这是其一; 其二, 侧压力系数 $K_0(t)$ 从孔隙压力消散后的 K_0 值, 尔后有有的土保持常值, 有的土则逐渐增大至最后的稳定值 $K_0(\infty)^{[5]}$ 。这就是说, τ_∞ 值逐渐增大, 而 τ_α 值不会增大, 且有可能减小, 这一过程的最终结果必定是静态极限平衡条件 $\tau_\infty = \tau_\alpha$ 的实现。基于 K_0 固结体变和畸变的依存性, 体变和畸变的组合的次固结变形必将止息。

三、次固结有限性的验证和讨论

(一) 试样的物理性质

不同地区工程土类的物性指标列于表 I。

表 I

试样名称	含水量 w (%)	容重 γ (kN/m^3)	孔隙比 e	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性 指数 I_P (%)	液性 指数 I_L (%)	比重 G	饱和度 S_r (%)
上海淤泥质粘土	48.4~54.0	16.9~17.4	1.31~1.34	38.2	20.2	18.0	1.57~1.88	2.71	99~100
厦门筼 莲阪	60.0~69.0	15.6~16.1	1.63~1.87	51.6	26.1	25.5	1.33~1.68	2.72	98~100
筼淤泥 湖滨桥边	60.0~78.0	15.0~16.0	1.68~2.13	54.2	27.6	26.5	1.22~1.90	2.73	96~100
田关淤泥质粘土	44.7~47.7	17.3~17.5	1.28~1.33	47.7	28.0	19.7	0.85~1.0	2.74	98.8~
田关硬塑粘土	30.6~33.3	18.8~19.5	0.86~0.93	48.9	27.0	21.9	0.16~0.23	2.77	98.5~99.2
徐家沟亚粘土	33.3	18.7~18.8	0.89~0.90	36.5	21.6	14.9	0.79	2.67	98.5~99.9
高岭土(钻探用)	52.4	15.9~16.1	1.38~1.46	62.5	41.5	21.0	0.52	2.57	92.0~98.0

表 I 中最后列出的亚粘土和高岭土为人工制备样, 其余上列土类均为原状样。

(二) 试验条件和加载方式

试样截面积除上海土是 30cm^2 以外, 其余均为 50cm^2 , 仪器为一般杠杆式的固结仪和高压固结仪, 环刀侧壁涂润滑油脂以减小摩阻力和防止锈蚀。为减少温度波动的影响, 试验在年温度变化小于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的防空洞地下试验室中进行。加载方式, 为防止样品挤出, 采用分级加载, 一般加载比为1。为了解上海土恢复原位应力 125kPa 所产生的应变, 加载方式稍有变化如表2所示。试验变形稳定标准为10天以上变形为零增长或不超过 $0.1\%\text{mm}$ 。

(三) 试验结果及其分析

所述各土类的固结变形随时间的变化规律以上海淤泥质粘土和田关硬塑粘土为例, 表明于图1和图2。为了更全面、深入了解不同固结压力下, 不同时间段的应变增量和变形速率的变化,

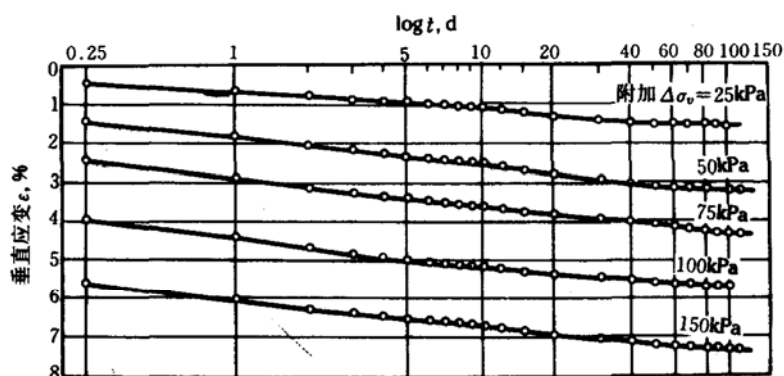


图1 上海淤泥质粘土次固结变形-时间关系曲线

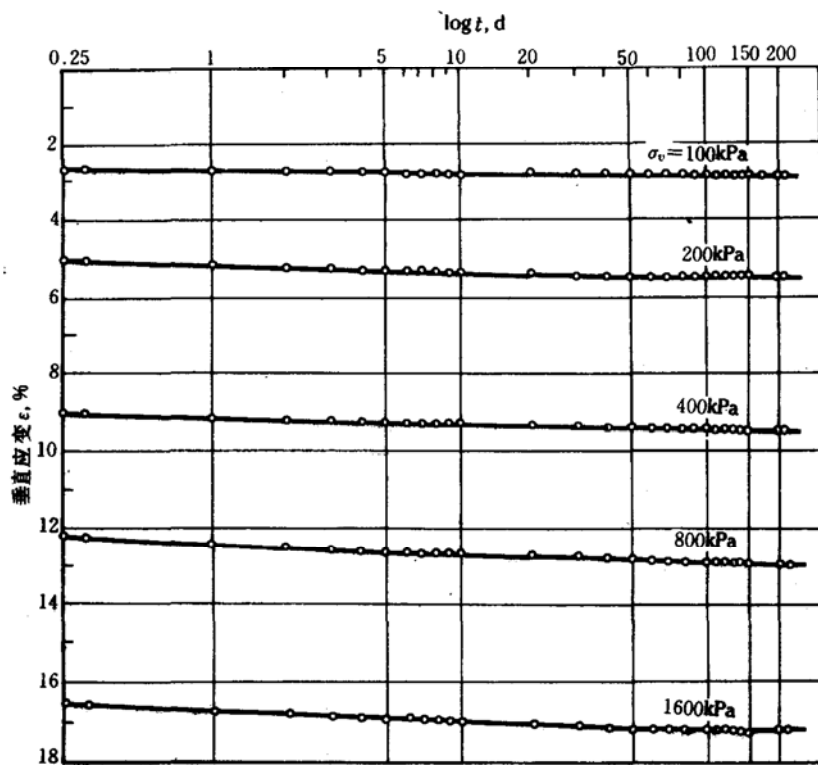


图2 田关硬塑粘土次固结变形-时间关系曲线

将各类土的试验结果整理汇集于表2和表3中。试样由肉眼观察是均匀的, 但实测的物性指标稍有差异, 不具有完全的同一性。试验结果显示一定的离散性, 但其整体的变化规律还是清晰的。上述结果可作进一步的分析和推论如下:

表2

试样 名称	压力 (kPa)		预压应变 $\epsilon_0 = \frac{S_0}{H}$ (%)	各时段的应变增量 $\Delta\epsilon = \frac{\Delta S}{H}$ (%)				各时段的 $C_\alpha = \Delta\epsilon / \Delta \log t$ (%)				1天固结 应变 ϵ_1 (%)	终止固结 应变 ϵ_m (%)	$\frac{\epsilon_m - \epsilon_1}{\epsilon_1}$ (%)	$\frac{\epsilon_m - \epsilon_1}{\epsilon_0 + \epsilon_1}$ (%)
	预压	附加		0.25~1.0 (d)	1.0~10 (d)	10~100 (d)	100~* (d)	0.25~1.0 (d)	1.0~10 (d)	10~100 (d)	100~* (d)				
上海 淤泥 质粘 土	125	25	3.69	0.155	0.430	0.440	0	0.260	0.430	0.440	0	0.72	1.59	120.8	19.7
	125	50	3.32	0.355	0.765	0.665	0	0.590	0.765	0.665	0	1.83	3.26	78.1	27.8
	125	75	3.26	0.430	0.735	0.693	0	0.714	0.735	0.693	0	2.93	4.36	48.8	23.1
	125	100	4.23	0.505	0.775	0.485	0	0.839	0.775	0.485	0	4.43	5.69	28.4	14.5
	125	150	5.21	0.470	0.695	0.545	0	0.781	0.695	0.545	0	5.38	6.61	22.9	11.6
厦 门 地 区 黄 埔 泥 滨 桥 边	25	0	0.065	0.090	0.110	(*270) 0.030	0.108	0.090	0.110	0.065	1.47	1.70	15.7	—	
	50	0	0.155	0.305	0.320	(*270) 0.125	0.257	0.305	0.320	0.290	3.93	4.68	19.1	—	
	100	0	0.620	1.00	0.960	(*420) 0.440	1.03	1.00	0.960	0.706	9.77	12.2	24.6	—	
	200	0	0.600	0.905	0.900	(*360) 1.090	0.997	0.905	0.900	1.96	16.5	19.4	17.6	—	
	400	0	0.435	0.745	0.600	(*430) 0.340	0.722	0.745	0.600	0.537	22.6	24.0	5.94	—	
	800	0	0.400	0.565	0.530	(*400) 0.405	0.664	0.565	0.530	0.673	29.1	30.2	3.76	—	
	25	0	0.225	0.275	(*95) 0.325	0	0.374	0.275	0.332	0	3.80	4.40	15.8	—	
	50	0	0.390	0.440	(*64) 0.110	0	0.648	0.440	0.136	0	7.23	7.78	7.61	—	
	100	0	0.860	1.160	0.935	(*280) 0.395	1.428	1.160	0.935	0.883	19.9	22.4	12.5	—	
	200	0	0.470	0.940	0.725	(*500) 0.605	0.781	0.940	0.725	0.866	28.2	30.5	8.04	—	
	400	0	0.475	0.690	0.615	(*500) 0.485	0.789	0.690	0.615	0.694	31.7	33.5	5.65	—	
	800	0	0.380	0.595	0.503	(*500) 0.363	0.631	0.595	0.503	0.519	35.1	36.5	4.15	—	

*表示变形稳定天数

表3

试样 名称	压力 (kPa)	各时段的应变增量 $\Delta\epsilon = \frac{\Delta S}{H}$ (%)				各时段的 $C'_s = \Delta\epsilon / \Delta \log t$ (%)				1天固结 变形量 ϵ_1 (%)	终止固结 变形量 ϵ_∞ (%)	$\frac{\epsilon_\infty - \epsilon_1}{\epsilon_1}$ (%)
		0.25~1.0	1.0~10	10~100	100~*	0.25~1.0	1.0~10	10~100	100~*			
		(d)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)			
田 关 淤 泥 质 粘 土	25	0.070	0.115	0.265	(*215)0.275	0.116	0.115	0.265	0.827	1.67	2.33	39.2
	50	0.190	0.175	0.215	(*122)0.025	0.316	0.175	0.215	0.289	3.50	3.92	11.9
	100	0.370	0.295	0.370	(*212)0.165	0.615	0.295	0.370	0.506	6.42	7.25	12.93
	200	0.475	0.375	0.445	(*155)0.045	0.789	0.375	0.445	0.236	10.80	11.70	8.01
	400	0.285	0.415	0.410	(*121)0.070	0.473	0.415	0.410	0.845	15.08	15.97	5.94
	800	0.230	0.465	0.360	(*153)0.100	0.382	0.465	0.360	0.541	20.80	21.73	4.45
田 关 硬 塑 粘 土	100	0.100	0.075	0.075	(*200)0.050	0.166	0.075	0.075	0.166	2.75	2.95	7.30
	200	0.150	0.150	0.150	(*200)0.050	0.249	0.150	0.150	0.166	5.25	5.60	6.67
	400	0.125	0.175	0.125	(*150)0.050	0.208	0.175	0.125	0.284	9.20	9.55	3.80
	800	0.250	0.200	0.200	(*150)0.050	0.415	0.200	0.200	0.284	13.20	13.65	3.40
	1600	0.250	0.200	0.175	(*150)0.075	0.415	0.200	0.175	0.426	16.72	17.17	2.69
徐 家 沟 亚 粘 土	50	0.130	0.170	0.110	(*301)0.055	0.220	0.170	0.110	0.115	5.23	5.55	6.12
	100	0.150	0.160	0.110	(*279)0.650	0.240	0.160	0.110	0.146	8.95	9.28	3.69
	200	0.100	0.160	0.110	(*249)0.040	0.170	0.160	0.110	0.101	12.00	12.30	2.50
	400	0.100	0.120	0.100	(*296)0.060	0.170	0.120	0.100	0.127	14.30	14.86	3.92
	800	0.100	0.150	0.100	(*276)0.095	0.170	0.150	0.100	0.210	17.65	18.00	1.98
高 岭 土 (钻 探 用)	50	0.230	0.250	0.150	(*299)0.070	0.382	0.250	0.150	0.147	6.57	7.23	10.05
	100	0.150	0.620	0.200	(*298)0.070	0.249	0.620	0.200	0.148	11.20	12.07	7.77
	200	0.300	0.300	0.180	(*297)0.065	0.498	0.300	0.180	0.137	16.10	16.65	3.42
	400	0.290	0.205	0.010	(*248)0.005	0.482	0.205	0.010	0.013	21.49	22.38	4.14
	800	0.303	0.185	0.090	(*276)0.015	0.498	0.190	0.090	0.034	26.86	27.15	1.08

1. 各类土在相当的时间范围, 其 ϵ - $\log t$ 关系是直线, 次固结变形的发展符合布衣斯曼公式, 但整个次固结过程, 却非完整的直线关系, 而是近似的由不同斜率的线段组成, 即二次压密指数 C'_s 是一变量, 其变化规律比较复杂, 受土的矿物成份, 结构性, 应力历史, 现有应力水平等因素的影响, 还与选取的时间范围, 时间单位有关。在以d(天)为计时单位所计算的各时段的 C'_s 值, 有随 $\log t$ 单调递减的情况, 也有时大时小, 起伏变化的情况。从变形读数发现, 当固结时间足够长时, 变形速率不连续, 出现跳跃现象, 这是粒间联结破坏和调整的表现。

2. 总的变形速率是衰减的, 不管过程延续或长或短, 最终将趋于稳定。将各类土的一天固结线 t_1 和最终稳定固结线 t_L 绘于图3中。可以看出, 在试验的压力范围, t_1 和 t_L 近于平行。 t_1 线是常规试验结果, 具有提供工程设计参数的实用意义, 它包含孔隙水压力完全消散后的主固结变形量和部份次固结变形量。倘若固结仪配有孔压测量装置, 则可测出像上海土(图3)那样的主固结线 t_0 。 t_0 线和 t_L 线把 ϵ - σ 平面区分为三个区域: 当土的状态落在 t_0 线上方, 处于主固结阶段; 当土的状态落在 t_0 和 t_L 之间, 处于次固结阶段, 具有拟似超固结性状; 当土的状态落在 t_L 线下方, 具有较强的超固结性状, 不仅不会进一步固结, 还有膨胀回弹的可

能。表2, 3表明, 在低压力范围, 固结应变增量 $\Delta\epsilon$ 和二次压密指数 C'_s 随压力增大而增大, 就是土的状态从较大超固结比向较小超固结比(如 t_L 向 t_0)转移的结果, 说明次固结变形量和速率与土的应力历史有关。

3. 次固结量(t_0 线到 t_L 线的铅直距离)和时间是有限的, 因而达到的拟似超固结比 OCR 也是有限的。由于不同时段 C'_s 值不同, 次固结引起的应变增量应写成

$$\Delta\epsilon_s = \log\left(\frac{t_1}{t_0}\right)^{C'_{s1}} \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{C'_{s2}} \cdots \left(\frac{t_L}{t_{L-1}}\right)^{C'_{sL}} \quad (6)$$

由应力增量引起的应变增量为

$$\Delta\epsilon_p = C'_c \cdot \log \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (7)$$

当上述二者等价, 即 $\Delta\epsilon_s = \Delta\epsilon_p$, 则由次固结引起的拟似超固结比为

$$\text{OCR} = \frac{\sigma}{\sigma_0} = \left[\left(\frac{t_1}{t_0} \right)^{C'_{s1}} \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^{C'_{s2}} \cdots \left(\frac{t_L}{t_{L-1}} \right)^{C'_{sL}} \right]^{1/C'_c} \quad (8)$$

t_L 是有限的, 例如本文中的厦门淤泥最长的 $t_L \approx 500\text{d}$, 因而拟似 OCR 一般是不大的。同时, 由于 t_L 线平行于 t_0 线, 由次固结引起的拟似超固结比 OCR 是一常量, 即 OCR 与压力 σ 大小无关, 也就是说土层中不同深度由次固结引起拟似超固结比是一常量, 这是次固结性状的另一特点。图4是以一天固结量为标准各类土的拟似超固结比与固结压力的关系, 由于试样的差异引起一定离散, 总的规律清晰地描述超固结比与压力无关的现象。

4. 在图3中描述的各类土, t_1 线与 t_L 线平行, 一天以后的次固结量是 t_1 到 t_L 的纵向距离 $(\epsilon_\infty - \epsilon_1)$, 其值为常量, 与压力水平无关, 但 ϵ_1 的值则与压力水平有关, 因而 $\frac{(\epsilon_\infty - \epsilon_1)}{\epsilon_1}$ 随压力

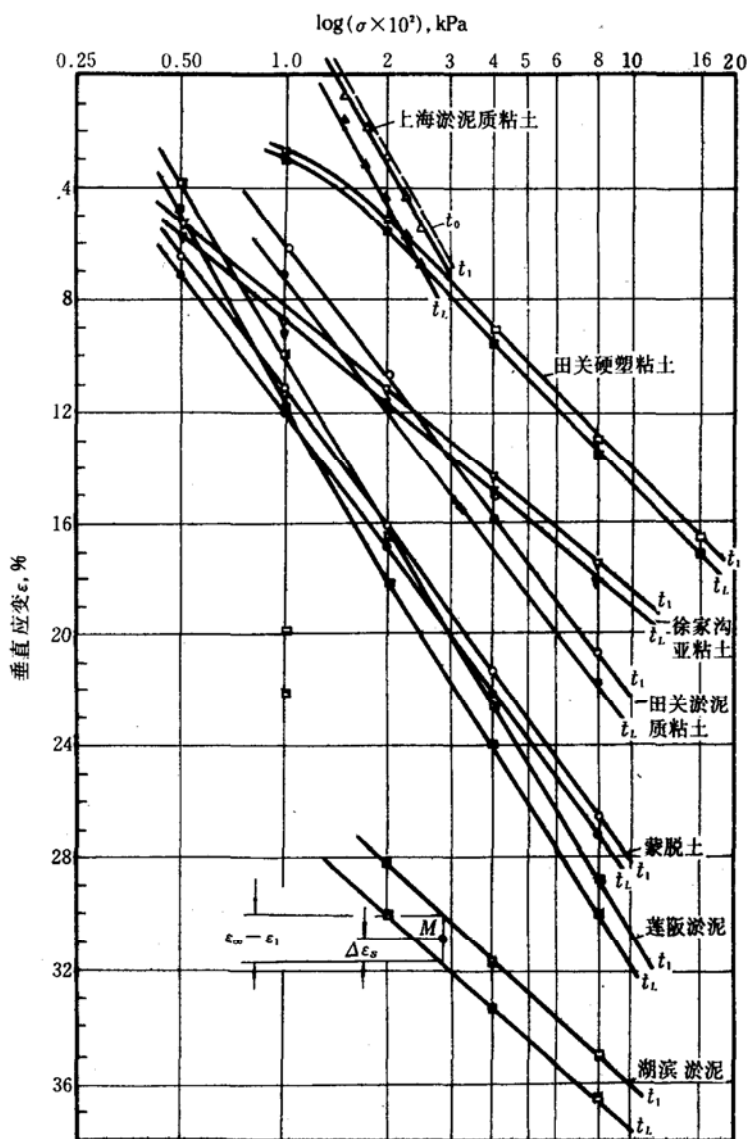


图3 各类土的固结应变与固结应力关系曲线

的变化如图5所示。它说明荷载越大,一天时间的次固结变形占总固结变形的比例越小。像莲阪淤泥从0.1MPa时的24.6%降到0.8MPa时的3.76%。如果土体在加载前处于超固结状态,施加荷载不足以产生超静水孔隙压力,这时只能产生次固结变形,如图3中的M点,只能出现未完成的部份次固结变形量 $\Delta\epsilon_{90}$ 。

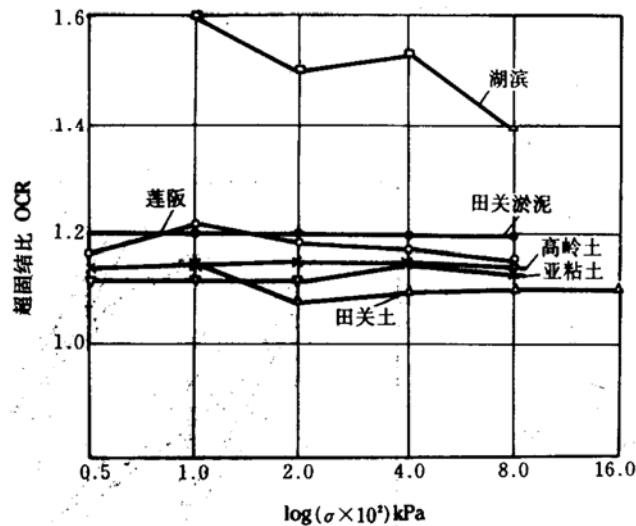


图4 次固结达到的超固结比与固结压力的关系

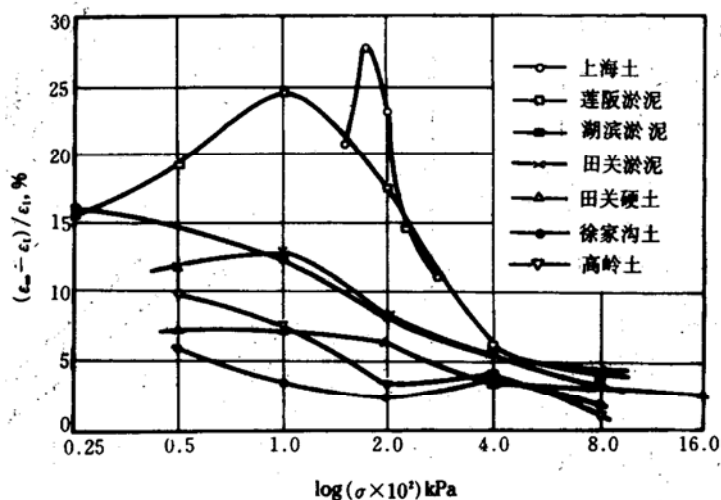


图5 次固结量 $\epsilon_{\infty} - \epsilon_1$ 与一曰固结量 ϵ_1 之比随压力的变化

5. 次固结变形量的有限性, 特别是在高压条件下占据总变形量的份额很小, 为排水固结法处理软土地基, 特别是用砂井砂垫层结合堆载顶压的方法, 能获得良好效果提供可信的依据。因为排水加固法的应用一般难以作到消除次固结(特殊情况例外), 但其份额很小, 无关大局。

6. 主、次固结两过程都有孔隙水挤出, 体缩是孔隙水挤出的结果。但前者是孔隙水压力梯度引起的, 其速率决定于土骨架的渗透系数, 过程的完成时间与土层的厚度平方成正比。

次固结是土骨架在有效应力作用的压缩蠕变, 水的挤出是土骨架和水相对位移所致, 不是由表及里逐步传递, 其速率决定于土骨架的粘滞度, 其过程完成时间与土层厚度无关^[6]。这一点, 再加上上述次固结时间的有限性, 可以得出推论: 对于厚土层, 虽然次固结作为一个独立过程跟随主固结之后, 但所需的时间比主固结完成的时间往往更短些, 且在长时间的主固结过程中不同部位完成次固结程度也不相同, 主固结完成时, 次固结也完成相当的份额, 因此, 从时间上考虑次固结是必要的, 特别是对某些特殊的工程更具实用意义。

四、结 论

1. 次固结时间和变形量, 从理论和实验证实是有限的, 而且是相当有限的, 可以直接测定, 资料积累多了可建立相关的经验关系来估算。

2. 在拟似超固结范围, 次固结量与超固结比(或已完成的次固结部份的大小)有关; 在正常压密状态范围产生的次固结量与压力水平无关。这是压力提高后所对应主固结完成的土体密度增大, 同时有效的体应力和偏应力也增大, 消长两方面因素, 其影响相消的结果。

3. 次固结量在全部固结变形中所占的份额随压力水平的提高而减小。

4. 次固结速率随固结时间逐渐减小, 但次固结指数 C_α 在相当时间段是常量, 对不同时段则是变量, 一般是越来越小, 最终趋于零。但由于应力历史、结构性等因素的影响, C_α 值变化复杂, 有起伏现象。

5. 次固结时间不是无完无了的, 它的主固结完成后一相当有限的时间就会止息, 何况在主固结过程中它已完成一定的份额, 因此从时间上考虑次固结影响是必须的。

6. 次固结量占全部固结变形量的比例与压力水平有关, 在沉降计算中是否考虑, 应该从工程实际出发, 有的可以忽略, 有的则须考虑, 如厚淤泥层上修建现代化的机场等。

本文的试验工作是由闻新芳、陈大珉等同志协助完成, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Bjerrum L. Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to the Settlement of Building. *Geotechnique*, 1967, 17: 83~117.
- [2] Bjerrum L. Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays. *Proc 8th ICSMFE* 1973, 3: 111~159.
- [3] Garlanger J E. The Consolidation of Soils Exhibiting Creep under Constant Effective Stress. *Geotechnique*, 1972, 22: 71~78.
- [4] Chrisite I F. Developments in the Time Lines Theory of Consolidation, *Proc. 11th ICSMFE*. 1985, 2: 423~426.
- [5] Tan T K. Time Dependent Lateral Pressure, Poisson's Ratio Measurement, *Proc, 10th ICSMFE*, 1981, 1: 797~800
- [6] B A 弗洛林. 土力学原理. 第二卷, 徐志英译, 中国建筑工业出版社, 1973: 432~444.

Time-Dependent Deformation of Consolidation in Clay

Li Zuo-qin

(Institute of Rock and Soil Mechanics Academia Sinica, Wuhan)

Abstract

Results of theoretical analyses and series of experiments on the limitation of the time and magnitude of the secondary consolidation deformation in clay are presented. Characters of quasi-overconsolidation brought in secondary consolidation, relations between OCR and consolidated pressure are discussed. Secondary consolidation deformation develops with time, and the variability of the ratio of secondary consolidation deformation to one-day's one $(\epsilon_{00} - \epsilon_1)/\epsilon_1$ with the pressure are finally presented.

《江苏水利科技》征订启事

《江苏水利科技》系江苏省水利厅、省水利学会主办的科技刊物。经省科委批准公开发行，国内统一刊号：CN32—1200/TV

本刊内容包括水利规划、水工建筑、农田水利、水利施工、工程运行管理、水文水资源、实验研究、工程勘测、水利经济和基层水利建设等；同时摘要刊载水利建设的方针政策和科技动态。

本刊为季刊，16K本，每期80页，季末出版。定价每期1.30元，全年四期共5.20元。自办发行，需订阅的单位和個人请直接向《江苏水利科技》编辑部函索订单。

编辑部地址：江苏省扬州市三元桥江苏水利工程专科学校内，邮政编码：225001。

欢 迎 订 阅

《桩基动测和静测译文专辑》

本译文专辑作为《土工基础》增刊于1992年6月公开出版，主要刊登1990年美国ASTM标准-高应变动力试桩的标准试验方法；加拿大国营建筑规范-桩基础总论；英国桩工专业联合会桩的试验规范及1988年英国土木工程师协会桩工规范-合同文件与测量(附录，桩的动静荷载试验指南)；国外应用PDA桩基分析仪系统测桩规范；以及第12届国际土力学与基础工程会议和第4届国际深基础(DFI)会议论文(桩基动静测试)选择，每本定价20元(包含邮费)，原来已交24元购了《土工基础》杂志的订户可不再重订此译文专辑。

订户可将订购费邮汇或信汇到武汉市武昌小洪山中科院武汉岩土所岩土专业委员会(邮政编码：430071)，工行武昌水果湖办，帐号：2559067010064955(用途注明订译文专辑)。