

上海粘土在反复荷载作用下的主次固结特性研究

顾小芸 徐达能 (中国科学院力学研究所)

摘要 本文根据上海地下水位变化的特点进行了反复荷载作用下的主次固结特性研究, 对加卸载波形、反复荷载参量、加卸载次序、压密状态、次固结系数的变化、累积变形与次固结变形的互补性及非耦合性、以及孔隙压力等因素进行了大量试验, 为地面沉降计算提供了计算模型和土性参数。

一、前言

上海市地面沉降虽自 1965 年后基本得到了控制, 但近年来, 微沉趋势持续发展。基于主固结的沉降计算表明, 1981 年后计算与实测曲线出现了一些偏离。由此, 次固结成为不可忽视的因素^[1]。

引起上海市地面沉降的含水层水位变化具有每年一周期反复升降的特点(见图 1)。因此为验证计算模型和获得沉降计算所需土性参数, 进行了反复荷载作用下的主次固结试验。

二、试验方法

上海市浅层土的分布情况如图 2 所示。紧密结合上海市浅层土的实际应力状态是本项试验的特点。

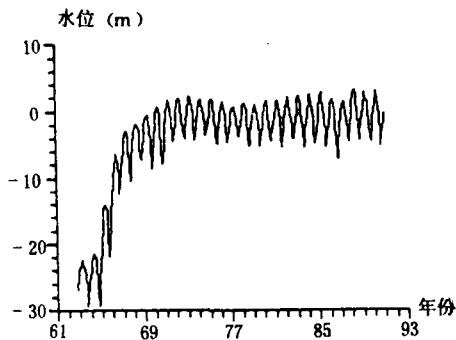


图 1 地下水位变化曲线

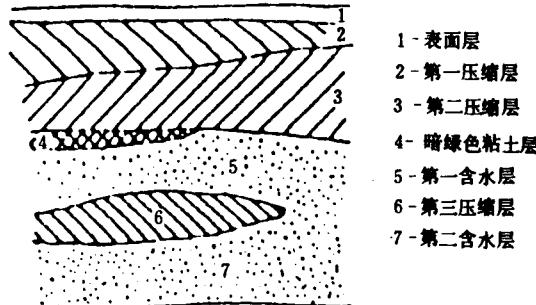


图 2 上海市浅层土地质剖面示意图

由于上海地面沉降当作一维问题处理的合理性^[2], 试验用单向固结仪进行。为提高测试精度, 用计算机控制和采集数据^[3]。试验在恒温条件下进行。

反复荷载试验一般具有以下几个步骤(见图 3): ①施加初始固结应力 P_0 ; ②施加反复荷载; ③反复荷载停止后观测次固结, 观测时间一般为 2 周。

在确定试验方案时, 考虑了以下因素:

1. 不同加载波形的影响

按上海市历年地下水位曲线，用接近正弦波的加载方式比较符合实际情况。但矩形波加载方式操作简便而又可能得到反复加卸载过程中固结系数的变化规律。因此，对两种不同加载波形进行了比较。

2. 反复荷载参数的影响

反复荷载参数包括反复荷载增量 ΔP 、周期 T 和反复荷载作用次数 N

3. 加卸载次序的影响

通常的反复荷载试验都是在先加载后卸载方式下进行的。但是，对受边界水位影响较大的土层，水位变化引起的受力状态如图 4 所示。可见，卸加式荷载可能对之更合适。因此，进行了加卸式（先加后卸）和卸加式（先卸后加）反复试验的比较。

4. 超固结状态的影响

图 4 表明，受历史上低水位的影响，接近第二含水层的 I 层土处于轻微的超压密状态，与我们测定的 $OCR = 1.5$ 一致。因此，了解超固结土与正常固结土在反复荷载条件下的变形特征是否一致，就显得很重要。

5. 反复荷载前次固结变形的影响

在实际中，反复荷载作用前是否已发生过次固结，尚不清楚，因此进行了如下对比试验。一组试样在初始压力 P_0 下先固结一昼夜，使次固结得到一定发展后进行反复荷载试验（简称过夜反复）。另一组试样在 P_0 下待主固结完成后立即施加反复荷载，再观测随后的次固结变形。

6. 检验反复荷载作用产生的累积变形和次固结变形是否可以叠加

对三个在 P_0 下完成主固结的试样进行试验：对其中之一加静载至 $2P_0$ ，观察次固结；对另一试样施加反复荷载，得累积变形量；第三个试样加载至 $2P_0$ 并进行反复荷载试验，随后观测次固结。比较实验结果，看前两者变形之和是否与后者变形量一致。

7. 孔隙水压力变化

为了解主次固结的区别，在少数试样中测定了孔隙水压力。

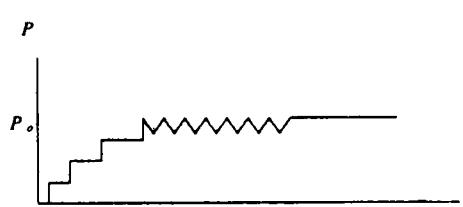


图 3 反复荷载试验加载过程示意图

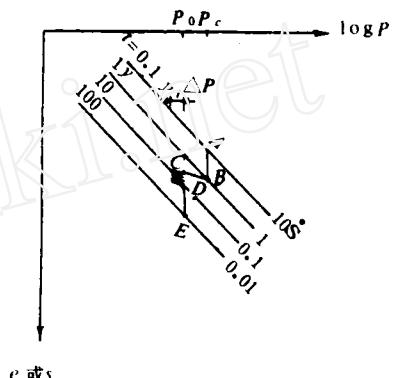


图 4 抽水引起的应力和变形变化

三、试验结果

1. 加载波形的影响

由表 1 看到，由反复荷载引起的累积变形量和其后的次固结特征与加载波形无关。因此，在实验研究中，可用矩形波荷载来模拟地下水位变化对土体产生的力学效应。

2. 反复荷载参数对变形的影响

(1) 荷载增量的影响

图 5 为对同一土层的 5 个不同试样进行不同 ΔP 的反复荷载试验结果。累积变形量随反复荷载增量的增加而增大。这表明在试验中对不同土层的试样应施加符合实际情况的

不同波形反复荷载下的累积变形 表 1

土样	Q15		Q28		W18		W31	
	152	154	283	284	185	182	314	313
波形方式	正弦波加卸式	矩形波加卸式	正弦波加卸式	矩形波加卸式	正弦波卸加式	矩形波卸加式	正弦波卸加式	矩形波卸加式
累积变形 (mm)	0.13	0.147	0.048	0.049	0.004	0.002	-0.001	0.000
次固结系数					0.0038	0.0037	0.0044	0.0041
反复参数	T=1min, N=40 $\Delta P=50\text{kPa}$	T=15min, N=20 $\Delta P=50\text{kPa}$	T=1min, N=20 $\Delta P=50\text{kPa}$	T=1min, N=20 $\Delta P=100\text{kPa}$				

ΔP 。对于 I 层土样，施加很小的 ΔP 时，引起的变形很小，有时甚至没有变形。对于 I 层以下土层的试样， ΔP 相对地较大，变形则明显。由此说明，上海市地下水位周期性变化对 I 层土变形影响不大，而对 II 层及以下土层却有较大的影响。

不同周期的反复荷载试验比较 表 2

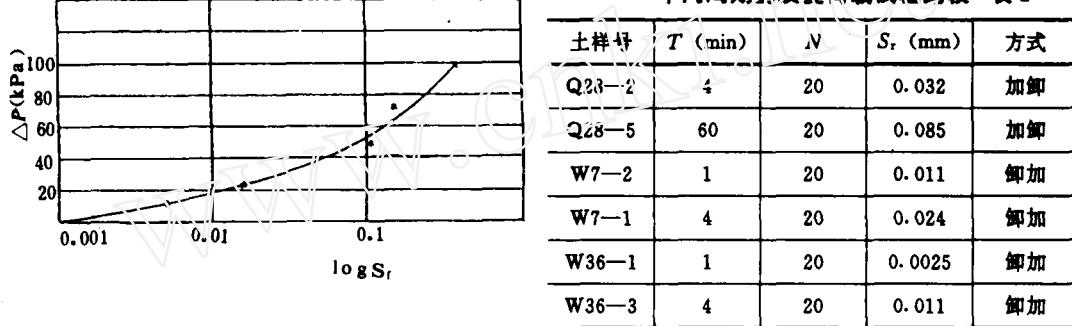


图 5 累积变形量与反复荷载增量的关系

(2) 周期的影响

表 2 的数字表明，周期加大会使反复荷载下的累积变形量增大。

(3) 反复次数的影响

图 6 为典型的变形周次曲线，表明累积变形随 N 的增加而有所增长，但其增长量呈衰减趋势。当 N 不很大时，增长趋势为曲线型。当 N>10 时，其增长趋势可以用不同斜率的直线段来表示。

累积变形与加卸载状态下体积压缩系数之差 ($m_{vc} - m_{vs}$) 有关。根据试验资料整理得到

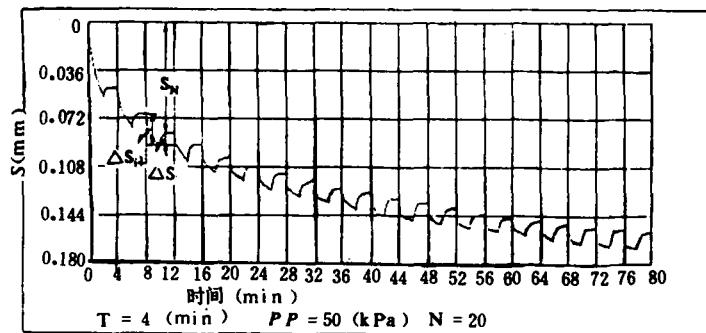


图 6 累积变形量随反复次数的发展曲线

如图 7 所示的 m_{vc} 和 m_{vs} 随 N 的变化曲线。 m_{vs} 基本上为一常数。 m_{vc} 的变化规律与加卸载次序有关, 将在下节中论述。

3. 加卸载次序的影响

图 6 为加卸式反复荷载的试验结果。卸加式情况示于图 8。图 6 中加卸式累积变形随 N 的变化可由幂函数进行数据拟合。幂函数形式为:

$$\sum_{i=1}^N (m_{vci} - m_{ysi}) = BN^a \quad (1)$$

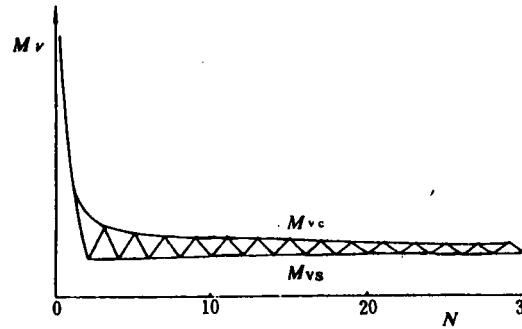


图 7 体积压缩系数随反复次数的变化

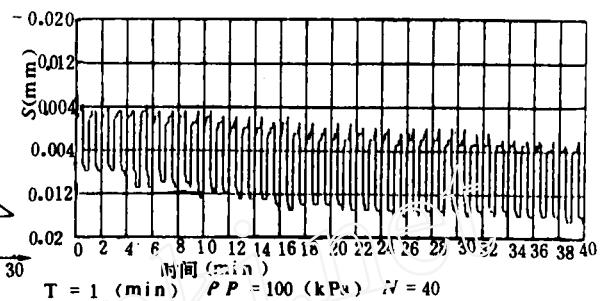


图 8 卸加式反复荷载下变形一周次曲线

由于 m_{vs} 为常数, 经整理, 可得 m_{vc} 的变化规律:

$$m_{vc} = B[N^a - (N-1)^a] + m_{vs} \quad (2)$$

但在 N 值增大到一定程度时, 拟合曲线所得结果往往略大于实测结果。因此当 $N > 10$ 时, 在不同区段, m_{vc} 取不同的常数。

卸加式的累积变形量往往和反复次数呈分段线性关系。有时即使出现曲线型衰减段, 也只在最初 1~2 周内才观测到。因此, 卸加式的 m_{vc} 用分段常数表示。

图 9 为卸加式情况下的全过程固结曲线。由图看到, 反复荷载前后的次固结系数基本不变。图 10 则为加卸式

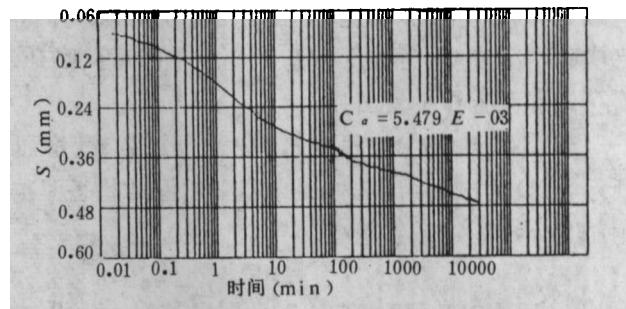


图 9 反复荷载作用下及其前后的固结曲线(卸加式)

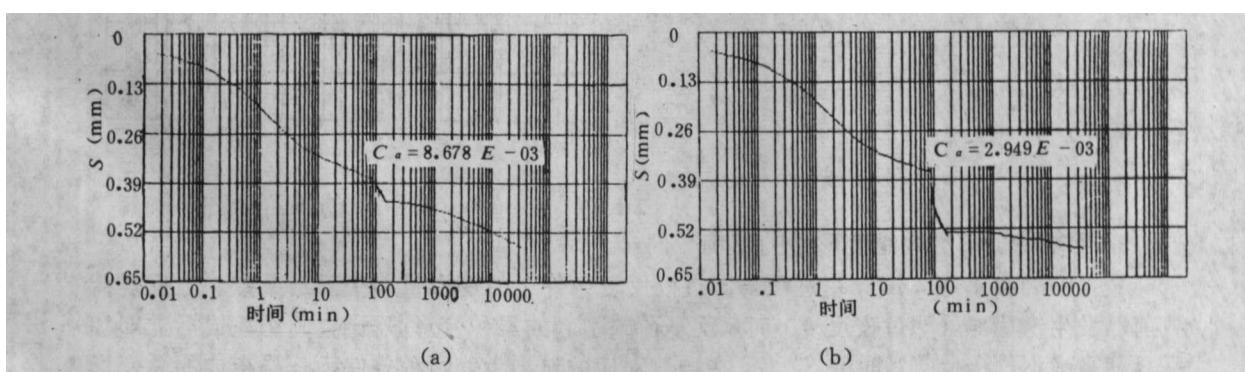


图 10 加卸式时的固结曲线

情况下的固结曲线。图 10a 的曲线表明，加卸式反复荷载引起的累积变形量比卸加式情况要大好几倍，反复荷载后的次固结曲线由缓逐渐变陡，最后达到反复荷载前的曲线斜率。图 10b 中反复荷载引起的变形量更大，反复荷载后曲线由缓变陡的趋势较慢，在 2 周内还达不到反复荷载前的曲线斜率。因此，反复荷载后次固结系数变化与否，和加卸载次序及累积变形量有关。当累积变形小时（包括卸加式和部分加卸式），次固结系数不变。当加卸式荷载引起的累积变形较大时，反复荷载后的次固结在相当一段时间内受到一定抑制，次固结系数减小。

4. 超固结状态的影响

图 11 为土样在超固结状态下进行卸加式反复荷载试验的结果。由图看到，变形向负方

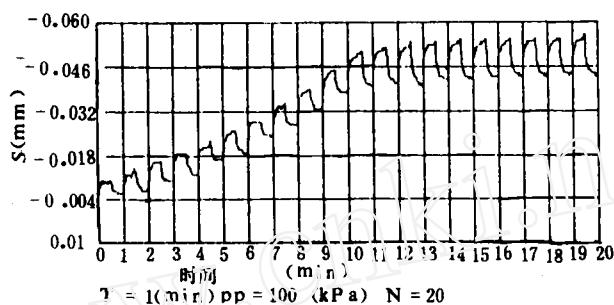


图 11 超固结土在反复荷载下的变形曲线

向发展，即反复荷载作用促使土样进一步回弹。这与图 8 所示正常固结土进行卸加式反复荷载试验时产生沉降的情况恰好相反，但其回弹量不太大，且很快趋于稳定。该特点反映到实际中则表明：若地下水位大幅度下降后又回升，并在此基础上进行小幅度的灌抽作用，有可能促使土样少量回弹。

超固结土由 P_1 卸载至 P_0 ，施加反复荷载，继而观测次固结，得到的全过程曲线如图 12 所示，CD 为次固结段。由此看到，超固结状态使次固结系数降低。表 3 的数字表明，OCR 值越大，次固结系数越小。

不同 OCR 下反复荷载后
次固结系数 表 3

土样号	OCR	$C_a (\times 10^{-3})$
Q22	2	0.5
	1	5.1
W31	1.5	1.3
	1	4.2

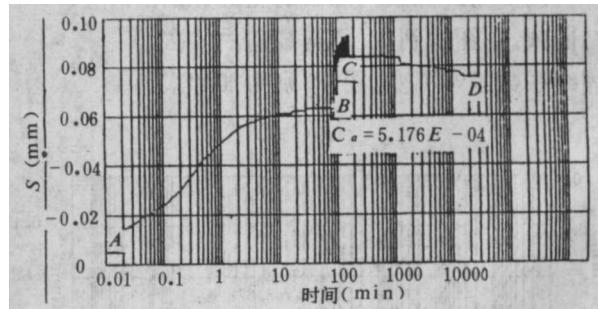


图 12 对超固结土施加反复荷载的固结曲线

5. 反复荷载前次固结变形量的影响

表 4 中列出了不同试样在过夜与不过夜反复条件下的变形量和次固结系数。当反复荷载前已发生次固结（即过夜反复）时，反复荷载引起的累积变形 S_1 比主固结完成后立即加反复荷载（不过夜反复）时的 S_1 小。在一对应的试样上，两种条件下一昼夜内的总变形量极为一致。由此可以认为，反复荷载引起的变形和次固结变形互为补偿。

次固结和反复荷载的不同次序下一昼夜变形量

表 4

土样号	加载形式	变形分量 (mm)	一天总变形量 (mm)	$C_s (\times 10^{-3})$
Q8—3	不过夜反复	$S_1=0.077; S_2=0.029$	0.106	8.7
Q8—4	过夜反复	$S_1=0.026; S_2=0.074$	0.1	8.6
Q22—2	不过夜反复	$S_1=0.161; S_2=0.007$	0.168	2.9
Q22—3	过夜反复	$S_1=0.107; S_2=0.06$	0.167	2.7
Q22—4	过夜反复	$S_1=0.008; S_2=0.048$	0.056	4.7
Q22—5	不过夜反复	$S_1=0.025; S_2=0.041$	0.066	5.5
W36—3	不过夜反复	$S_1=0.016; S_2=0.043$	0.059	3.2
W34—4	过夜反复	$S_1=0.004; S_2=0.054$	0.058	3.8

注: S_1 : 反复荷载作用下的变形量; S_2 : 一昼夜次固结变形量

6. 叠加原理的检验

表 5 中列出了对比试验组的结果。为排除试样的差异, 试样的变形量都除以该试样在 P_0 下完成主固结时的变形量 S_0 。表中数字表明, $(S/S_0)_1 + (S/S_0)_2 \approx (S/S_0)_3$, 从而检验了叠加原理, 换句话说, 反复荷载引起的累积变形和次固结变形具有非耦合性。

7. 孔隙压力和土样变形的关系

图 13 和图 14 分别为静载和反复荷载条件下的孔隙压力与土样变形间的关系曲线。图 13 中直线段表示主固结期间土样变形量和孔隙压力是一一对应的, 后期偏离直线的部分表示次固结的发生发展, 也就是主次固结过渡段。在过渡段中发生的次固结量比起主固结总量来是一个小量。因此, 从工程观点看, 可以在孔隙压力基本消散后再考虑次固结变形。但是, 严格说来, 在主固结发生后期已经伴随着次固结变形, 把主次固结截然分开的观点是不合适的。图 14 中曲线的平均值线也基本上为一直线, 直到 $U \approx 6 \text{ kPa}$ 时, 才偏离直线。这样的规律和静载时观测到的极为一致。因此可以认为, 反复荷载的存在基本上并不改变原有土样在静载作用下的特性。

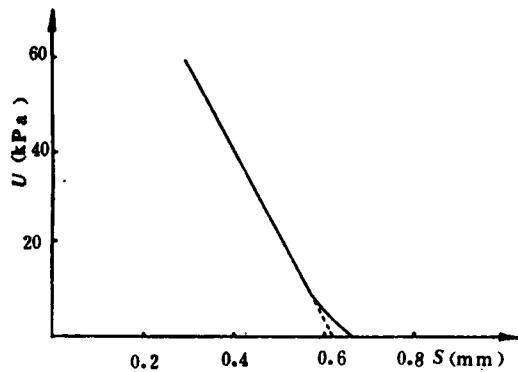
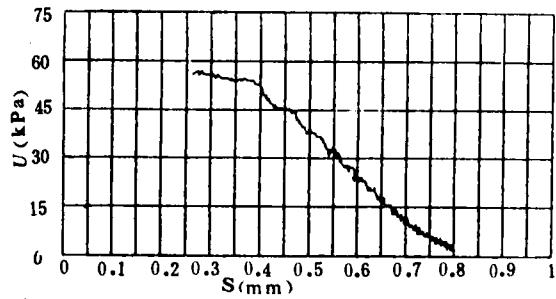
图 13 静载下 $U-S$ 关系曲线

图 14 反复荷载下孔隙压力和变形关系图

上述试验结果为地面沉降计算提供了计算模型, 并根据所得规律, 针对不同土层的具

体情况选用了土性参数，进行了包括主次固结的地面沉降计算^[4]。计算结果令人满意。试验结果还为减缓沉降的措施提供了一定的依据^[5]。

四、结语和感谢

本文在反复荷载作用下的主次固结特性研究中，针对上海地下水位变化的特点，对加卸载波形、反复荷载参量、加卸载次序、压密状态、累积变形与次固结变形的互补性及非耦合性，以及孔隙压力等因素进行了大量试验，得到了地面沉降的计算模型和符合实际情况的计算参数，为考虑次固结的沉降计算和建议减缓沉降的措施提供了基础。

试验土样是由上海市环境地质站提供的。在试验期间曾和钱寿易先生以及挪威土工所的 Andersen 博士进行了有益的讨论。在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Gu X. Y., Tsien S. I. et al (1991), Analysis of Shanghai Land Subsidence, Proc. FISOLS.
- [2] 钱寿易、顾小芸(1991), 上海地面沉降计算, 岩土工程学报, V. 3, No. 3, 英文版见 Proc. X ICSMFE.
- [3] 顾小芸、徐达能 (1991), 与地面沉降有关的上海浅层粘土主次固结特性研究。力学所报告, IMCASCR-91029
- [4] Gu X. Y. et al. (1993). Computation of Land Subsidence in Shanghai with Secondary Consolidation Effect, Proc. ICSEE.
- [5] 顾小芸 (1991), “上海浅层软粘土流变特性研究和土层最终沉降量估算”项目总报告。力学所报告, IMCASCR-91026。