

抽、灌水作用下上海土层变形特征的探讨

苏 河 源

(上海地质处)

提 要

本文在总结分析以往大量的野外实测资料和室内试验资料的基础上,阐明了地下水位升降变化是导致上海地面沉降的主要原因。文中论证了第一、二压缩层的流变性质,并指出含水砂层的变形在上海地面沉降中的主要作用。通过对各土层单位变形量的分析,将各土层的实测变形量根据水位变幅予以规格化,以便判断各土层的回升与沉降情况。文中还运用了“胀缩比”的概念,分析了上海各土层的残余变形特征。

一、前 言

抽汲液体(油、气、地下水)引起区域性的地面标高下降的现象在世界上已很普遍。如美国长滩市(Long Beach),由于威明顿(Wilmington)油田的开采已造成地面沉降达9m之多;日本的东京、大阪,新泻等市的地面沉降也达2~3m;墨西哥城(Mexico City)的地面沉降更是闻名于世,其最大沉降量达8m以上。此外意大利的威尼斯市(Venice),泰国的曼谷市(Bangkok)以及其他国家的一些地区也都先后发生地面沉降^[1]。目前地面沉降对工农业生产、城市建设以及人民生活所造成的危害,已成为公害之一,因此日益引起人们的普遍关注。近几十年来,各国的地质学界和土力学界在查找原因、规律以及在寻求措施等方面都曾做了大量工作。

上海地面沉降现象在1921年初次发现,至1965年市区水准点的最大沉降量已达2.63米。从六十年代开始,有关方面开展了大量勘察研究工作,查明了过量抽汲地下水是造成上海地面沉降的主要原因,并积极采取了措施,现已基本上控制了上海市区的地面沉降。

本文在总结分析大量野外实测资料和一些室内试验资料基础上,应用土力学的基本观点和方法,对上海市区各土层的变形基本特征进行了分析。通过对土层先期固结压力的测定,室内的反复荷载试验以及流变试验,特别是单位变形量和胀缩比的分析,指出了上海各土层中砂层粘土层在目前特定的水位变化条件下还存在一定的残余变形,这是今后进一步采取措施时不能不考虑的一个客观事实。

二、上海复盖层的地质概况

上海地区第四纪复盖层厚达 300 米左右。根据其水文工程地质特征，可划分为五个承压含水层和13个工程地质层。水文地质剖面及70米以上各土层的岩性特征见图 1、2。

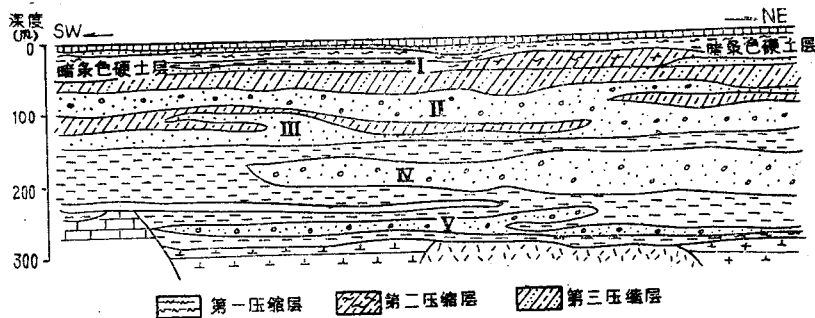


图 1 上海市水文地质剖面示意图
(I、II、III、IV、V表示含水层)

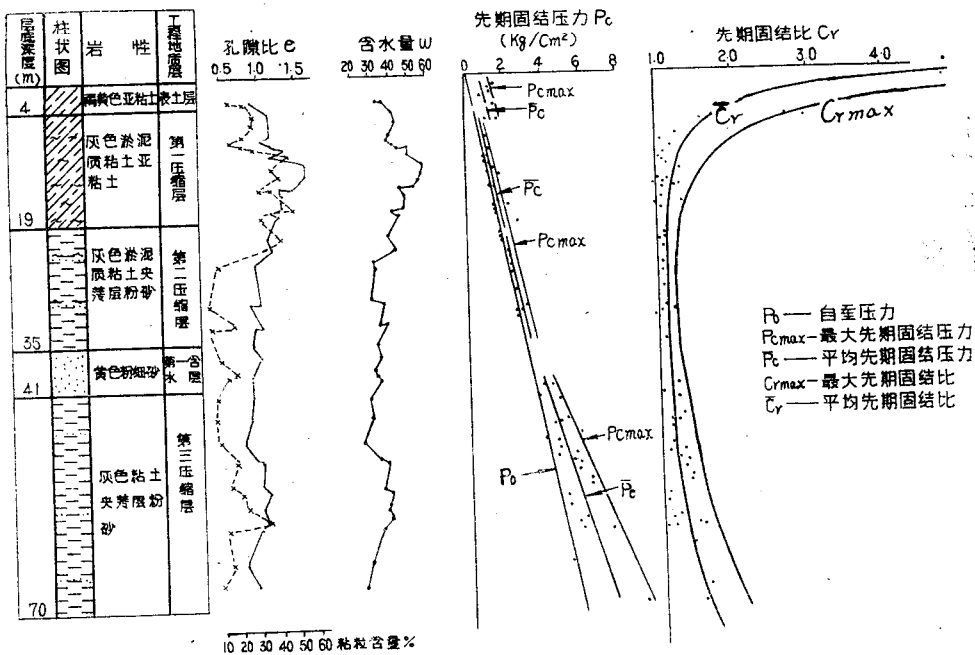


图 2 上海市区70米以上土层主要物理力学性指标随深度分布图。

上海市区地下水开采层次以第二、三、四、五承压水层为主(下简称二、三、四、五层)。根据观测资料，目前地面沉降主要发生在上部75米以内的三个软粘土层(即压缩层)。根据75米以内各土层的组成情况又可将全市区划分为四个不同类型的地质结构区(见表 1)。

表1 四种类型地质结构区
土层组成情况表

地质结构区 \ 地层情况组合	第一、二压缩层	暗绿色硬土层	第一含水层	第三压缩层	一、二含水层是否沟通
第一结构区	有	有	有	缺失	未沟通
第二结构区	有	有	有	有	未沟通
第三结构区	有	缺失	有	缺失	沟通
第四结构区	有	缺失	缺失	有	未沟通

三、水位历年升降作用下各土层的基本变形特征

(一) 第一、二压缩层的基本变形特征

一、二压缩层(下称浅层土)含水量较高, 渗透性较小(见图2), 故抽水过程中压缩性较大, 时滞较长。根据观测资料分析: 浅层土的变形主要取决于第一含水层的地下水位(下简

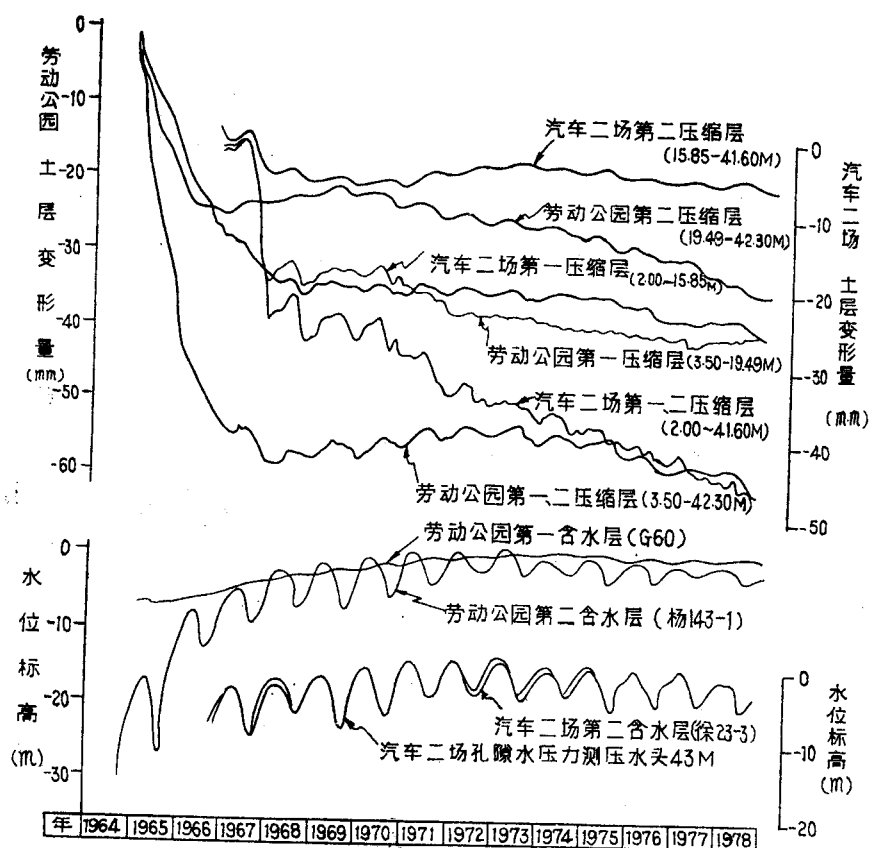


图3 汽车二场(第三结构区), 劳动公园(第四结构区)浅层土变形量和一、二含水层水位标高变化历时曲线

称水位)变化,并与水文工程地质条件(一、二含水层是否沟通和暗绿色硬土层是否存在)以及土的流变性质等有关,为便于分析比较,将两个不同类型地质结构区的代表观测点的实测浅层土的沉降过程线示于图3。由图可见,在历史上(1967年之前)浅层土具有较大压缩性,此后,随着一、二含水层水位标高的逐年回升(与灌水有关),浅层土的压缩量虽相应略有减少,但仍呈持续沉降趋势。这种沉降趋势也随地质结构而异。图3表明,在第四结构区(劳动公园标点),因一、二含水层无直接水力联系,且有暗绿色硬土层存在,自1967年以来,浅层土的沉降速率相对较小;但第三结构区(汽车二场标点),因一、二含水层直接沟通,且缺失第三压缩层,主要开采层次“二含”的水头变化直接影响“一含”并作用于浅层土的底板上,故其近期沉降速率和压缩量均较大,约自1966~1968起到目前为止累积沉降量达44.75mm,沉降速率为2~4mm/y,成为该地区沉降的主要压缩层次。由此可见水文工程地质条件对浅层土沉降的重大影响。

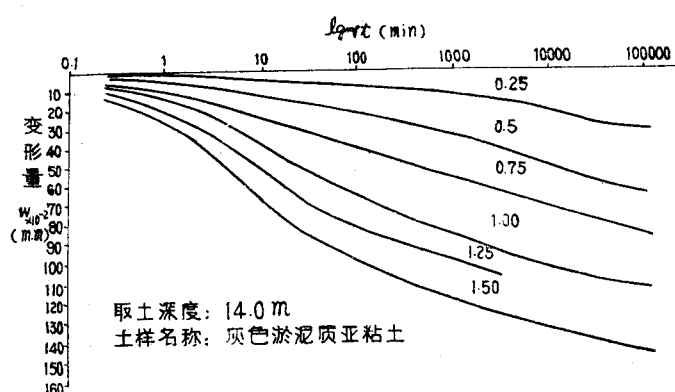


图4 第一压缩层固结试验的变形量(W)~时间(lgt)曲线

浅层土的持续沉降特征系与土的流变性质有关。由室内土的蠕变试验结果可见:试验进行了90天,其变形仍无稳定趋势(图4)。在0.2~0.6荷重率下,其固结比(次固结量/主固结量)为2~3(表2),这表明上海浅层土具有一定的流变特性。故本土层的沉降是解决上海地面沉降关键所在,这是需深入研究解决的重要课题。

表2 第一压缩层不同荷重率下主次固结量表

土样 编 号	含水量 W(%)	容 重 $\gamma(\text{g/cm}^3)$	饱和度 G(%)	有效应力 增量 ΔP (kg/cm^2)	荷重率 $\Delta P/P_0$	主固结量 $\times 10^2 S_{100}$ (mm)	40天之次 固结量 $S_s \times 10^2$ (mm)	单位有效压 力增量下二 次固结量 $S_s/\Delta P$	$\frac{S_s}{S_{100}}$
33#	54	1.69	100	0.25	0.2	8.1	22.5	90.0	2.8
34#	52	1.70	99	0.50	0.4	16.3	45.3	90.6	2.8
35#	53	1.71	100	0.75	0.6	24.6	56.1	74.8	2.3
36#	51	1.72	100	1.00	0.8	58.8	52.3	52.3	0.9
37#	50	1.73	100	1.25	1.0	68.5			
42#	48	1.74	100	1.50	1.2	78.0	65.3	43.5	0.8

(二) 第三压缩层的基本变形特征

上海市区代表性观测点的第三压缩层变形与水位变化历时曲线见图5,由图可见,“三压”的变形与水位波动密切相关,基本上可分为两个变形阶段:在1965年未采取注水措施前为一

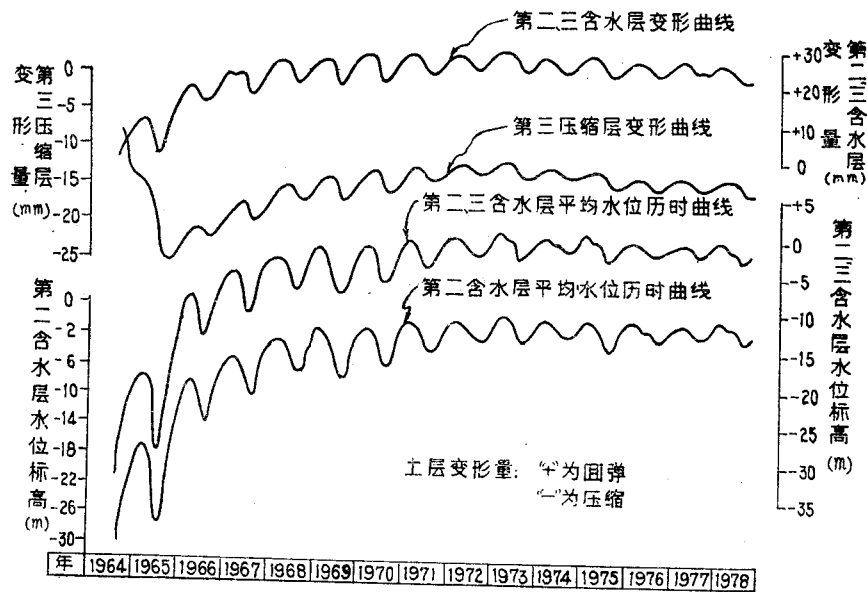


图5 劳动公园标点第三压缩层和第二、三含水砂层土层变形与平均水位标高变化历时曲线

阶段,此时水位标高较低(约为30米左右),故尽管水位呈季节性升降,但土层终年处于压缩状态;1966年采取措施后为另一阶段,水位标高大幅度回升,土层中不同深度的孔隙水压力也随之升高(图6),土层立即呈现回弹。此后,其变形则随季节性升降而呈现回弹与压缩,

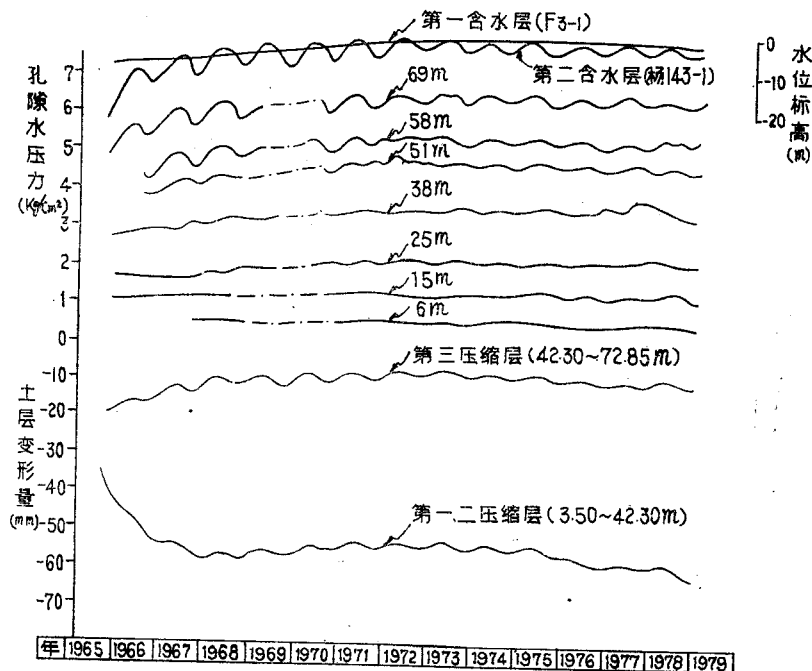


图6 劳动公园不同深度孔隙水压力和土层变形历时曲线

水位、孔隙水压力、变形峰谷值基本上相对应, 滞后极小。这表明目前该土层的变形主要取决于近期水位升降所引起的渗透固结变形, 先期水位变化的滞后影响已基本消失。由观测资料得知: 1966~1978年间, 该土层累积回弹量为8.86mm, 该值对于控制近期上海地面沉降起一定作用。此外, 从该土层的应力~应变关系分析(见图7)可进一步显示出其基本变形特征。

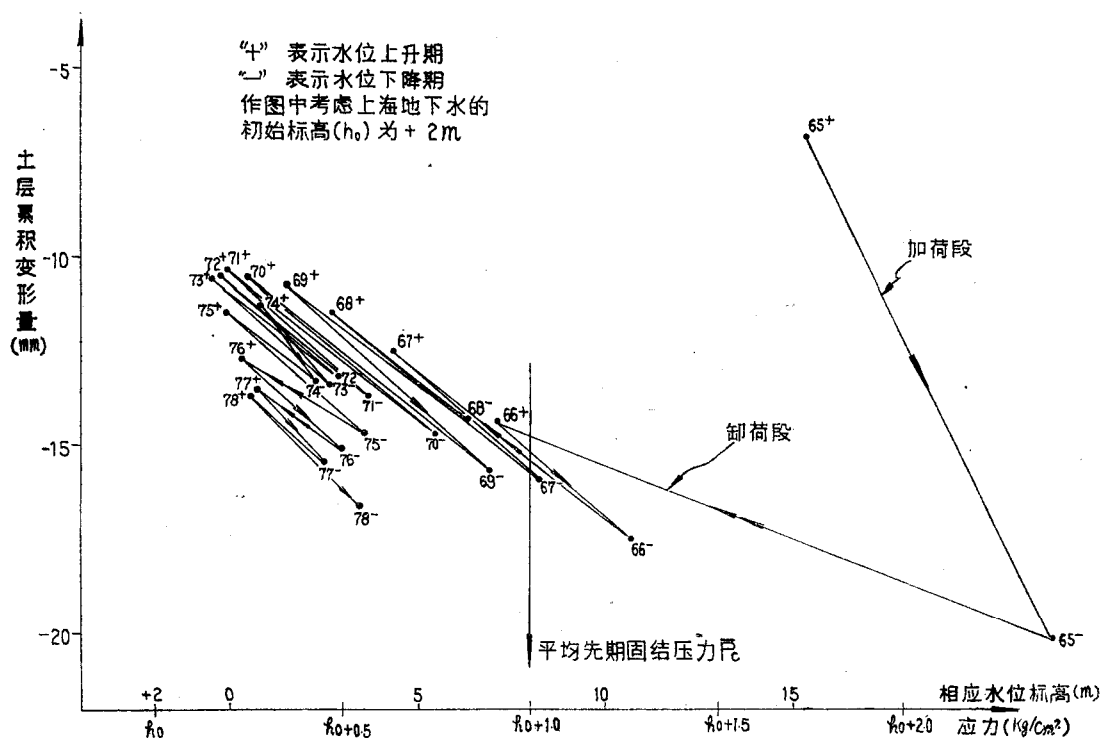


图7 劳动, 双阳, 北新泾三标点第三压缩层综合应力~应变图

由图可见: 在1965年较高应力状态下, 应力~应变环线加荷段斜率远大于卸荷段, 但当应力卸除至一定数值后(接近于先期固结压力 P_0 值), 其应力应变基本呈线性关系。亦即其应力~应变环线随每次反复加、卸荷逐步收敛而趋于平行, 表明土体的弹性特征逐步增长, 也表明先期固结压力对该土层变形的重要作用。今后如控制水头压力的变化范围不超过平均 $\bar{P}_0$ 值则该土层的绝对变形量是很微小的, 其变形纯为水位反复波动下土的残余变形。

(三) 含水砂层的变形特征

上海的具体地质条件是, 砂层的厚度远大于各粘土层。又由于砂层本身的压密、回弹量较大, 因此在季节性的水位升降中, 砂层的变形量占整个地面升降总量的比例较大(见表3), 因而, 加强对砂层变形规律的研究, 对控制地面沉降具有现实意义。兹将各主要开采含水层变形特征分述如下:

1. 第二、三含水砂层的变形特征

市区代表性观测点的二、三含水砂层变形与水位变化历时曲线示于图5。由图可见, 即使在1965年较低的水位标高下, 于季节性的水位回升中, 砂层也显示出回弹迹象, 这与前述“三压”的变形情况是有差别的, 表明了砂层具有较好的弹性特征。故一旦孔隙水压力恢复,

表3 地面标与“二含”以下土层七组标平均变形量对比

年 份	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
地面标变形量(mm)	-36.14	+3.56	-2.84	+2.17	-3.04	+2.48	+1.21	-0.29	-0.19	-2.58	-5.02	-0.64
“二含”及以下砂层变形量(mm)	+3.07	+10.09	+2.47	+2.56	-2.49	+1.53	+1.82	-0.40	-0.69	-1.24	-2.72	+0.59
“二含”及以下砂层变形占地面标变形量的百分比(%)	±8.49	283.43	±86.97	117.97	81.97	61.69	150.41	±138	87.34	48.06	54.18	+92.2

砂层变形也大部可得到恢复^[2]。1966年后,二、三含水砂层变形与水位变化密切相关,其峰值谷值相对应,无滞后现象。观测资料表明,自1965年以来,随着水位的恢复,市区二、三含水砂层的累积回弹量达15mm,此值对近十多年来市区地面沉降的基本稳定起了积极作用。

2. 第四、五含水砂层的变形特性

为控制浅部土层的沉降,自1968年起对上海市区地下水的主要开采层次作了调整,即限制与减小二、三含水层开采量,增加四、五含水层的开采量。因此自1968年后,四、五含水层开采量相应增大,水位标高逐年下降,由此导致了四、五含水层呈现逐年沉降趋势。尤其西区近郊(北新泾)一带,近几年来集中开采第五含水砂层,水位标高以2~3m/y速率下降,致使砂层也产生波浪式的下沉(见图8)。根据观测资料,1973~1978年间,第五含水层的累

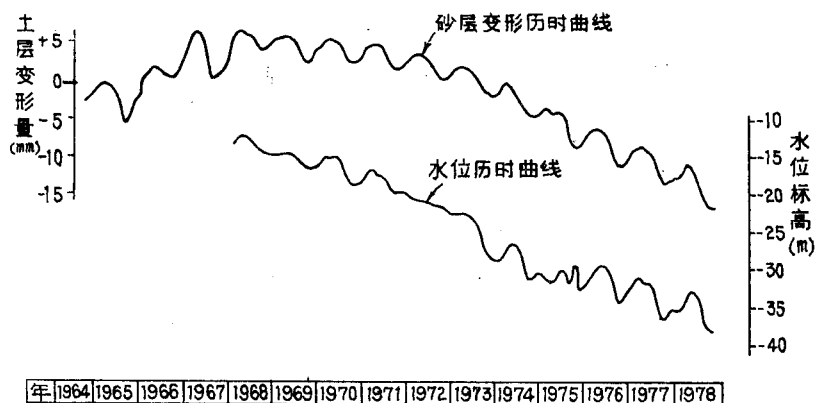


图8 北新泾第五含水砂层土层变形和水位变化历时曲线

积压量达17.16mm,沉降速率2.86mm/y,而成为该区地面沉降的主要层次。由此可见,即使具有弹性特征的深部砂层,一旦水位标高持续下降,亦将产生压密而导致地面沉降。

四、水位反复升降作用下各土层残余变形特征的探讨

十多年来,上海的地面沉降是在抽、灌水的季节性水位升降作用下,各土层回弹压密的综合结果。因而研究抽、灌水情况下土的残余变形特征,对掌握各土层变形的内在规律,以便控制各土层的沉降,具有现实意义。鉴于此情况,我们拟从土的室内反复荷载试验和野外土体的单位变形量分析两方面来探讨上海各土层的残余变形特征。

(一) 室内土的反复荷载试验结果及分析

75m以上浅层土和“三压”的反复荷载试验结果示于图9、10和表4。由图9可见,在不

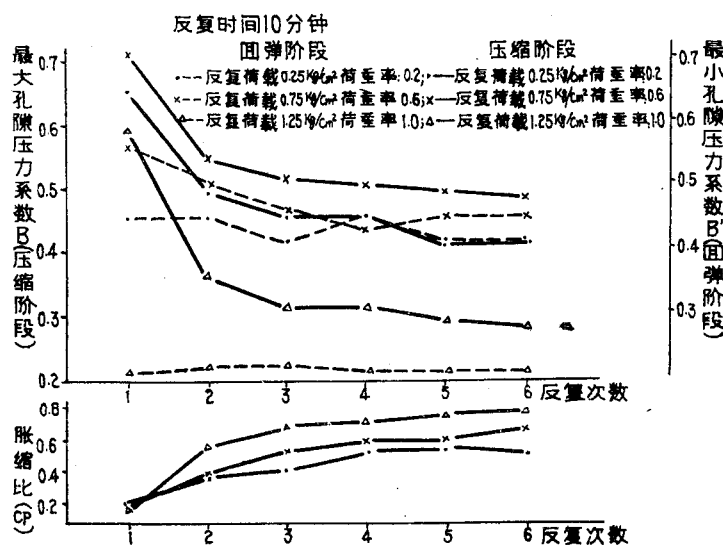


图9 上棉一厂第一压缩层反复荷载与最大、最小孔隙压力系数和胀缩比关系图

同荷重率下,浅层土的最大、最小孔隙压力系数(B 、 B')随反复荷载的次数增加而减小。当反复荷载为 $1.25\text{kg}/\text{cm}^2$ 和荷载率为 1.0 时,在最后一次反复荷载下,土的膨胀(即回弹)、压缩比(以 C_p 表示,并简称为胀缩比)为 0.79 ;而当反复荷载减至 $0.25\text{kg}/\text{cm}^2$ 和荷重率减至 0.2 时,最后一次反复荷载下,其 $C_p = 0.53$ 。在上海第一含水层(非开采层次)的实际水位复化条件下,其荷重率很小,仅为 $0.04 \sim 0.5$ 。故由试验结果推论:上海浅层土应具有较大的残余变形特征。此残余变形量大部份是由于浅层土的次固结所形成的。

为模拟第三压缩层的水位反复回升,在室内进行了反复加、卸荷载的试验(图10与表4)。由试验结果看出,对于透水性较好的“三压”,反复加、卸荷六次后,其回弹(a_s)、压缩(a_c)系数的比值(即 C_p 值)为 $0.67 \sim 0.76$,也表明该土层具有一定的残余变形量。但由于室内试验的条件所限,上述结果仅能作为定性分析之用。

(二) 土层的单位变形量与残余变形特征分析

土层的单位变形量是反映土体在现场实际应力状态下应力~应变关系的一个特征参数。它即能反映土层的应力(水位)~应变(变形)状态,又能用于判断土层的残余变形特征,同时

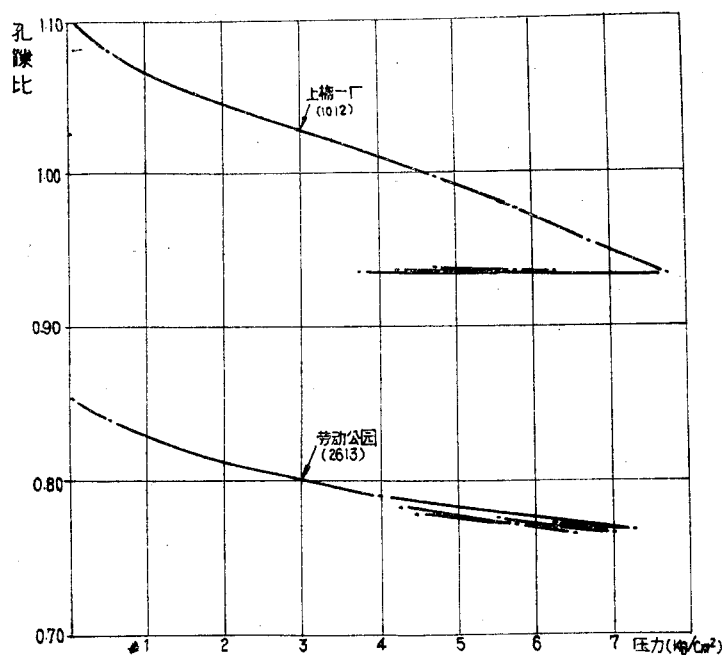


图10 第三压缩层室内反复荷载试验(模拟水位回升)成果曲线

表4 第三压缩层反复荷载试验模拟水位反复回升部份试验成果

试 验 地 点	土 名	取 土 深 度 m	容 重 (g/cm ³)	含 水 量 (%)	反复加卸荷6次平均值		
					a_c	a_s	$C_p = a_s/a_c$
上 棉 一 厂	粉质粘土	45.03~45.43	1.81	39.0	0.0023	0.0015	0.65
	粉质粘土	55.60~55.90	1.89	32.4	0.0013	0.0010	0.76
劳 动 公 园	亚粘土	47.86~48.20	1.89	29.8	0.0021	0.0013	0.62
	粉质亚粘土	56.85~57.25	1.81	26.5	0.0021	0.0015	0.71
卫生学校	亚粘土	58.50~59.00	1.87	37.1	0.0010	0.00067	0.67

还可用于进行简单的沉降预测。F. S. 赖利(Riley)和 D. C. 海姆(Helm)在美国加州地面沉降的研究中曾应用过类似的方法^{[3][4]}。在上海的地面沉降研究中此法得到广泛应用, 并收到较好效果。

所谓单位变形量是指土层在某一特定时段(水位上升期或水位下降期)内, 含水层水头每变化1米时其相应产生的变形量, 以下式表示:

$$I_s = \Delta S_s / \Delta h_s \quad (1)$$

$$I_c = \Delta S_c / \Delta h_c \quad (2)$$

式中: I_s 、 I_c 分别为水位上升与下降期的单位变形量, mm/m;

Δh_s 、 Δh_c 分别为同期的水位升降幅度, (m);

ΔS_s 、 ΔS_c 分别为相应于该水位变幅下土层的变形量, (mm)。

令 $|I_s|/|I_c| = C_p$, 它表征土层的弹性特征。在周期性的水位升降中, 一般 C_p 小于1, 当

$C_p \approx 1$ 时, 这时残余变形消失, 土体进入弹性变形阶段。

为反映地质条件和土层厚度与这一变形特征参数的关系, 又将土层的厚度(H)除上述单位变形量, 我们称它为比单位变形量, 以下式表示:

$$I'_s = I_s/H = \Delta S_s/\Delta h_s \cdot H \quad (3)$$

$$I'_c = I_c/H = \Delta S_c/\Delta h_c \cdot H \quad (4)$$

式中 I'_s 、 I'_c 分别表示水位升、降期的比单位变形量, (mm/m^2);

H 为土层厚度, (m);

其它符号同前。

此值在国外术语上相当于单位贮水系数(Specific storage or storage coefficient)^{[3][6]}。由于考虑了单位土层厚度及单位水头变化, 这样就有了统一的标准, 使所分析的问题“规格化”了, 使各土层间可用此值进行相互比较。

由上述(1)~(4)式计算得的市区七个主要观测点的 I_s 、 I_c 、 I'_s 、 I'_c 和 C_p 历年平均值列入表5, 并将各土层单位变形量和胀缩比的历年变化值绘制成图11。由图11, 表5可见: 无论

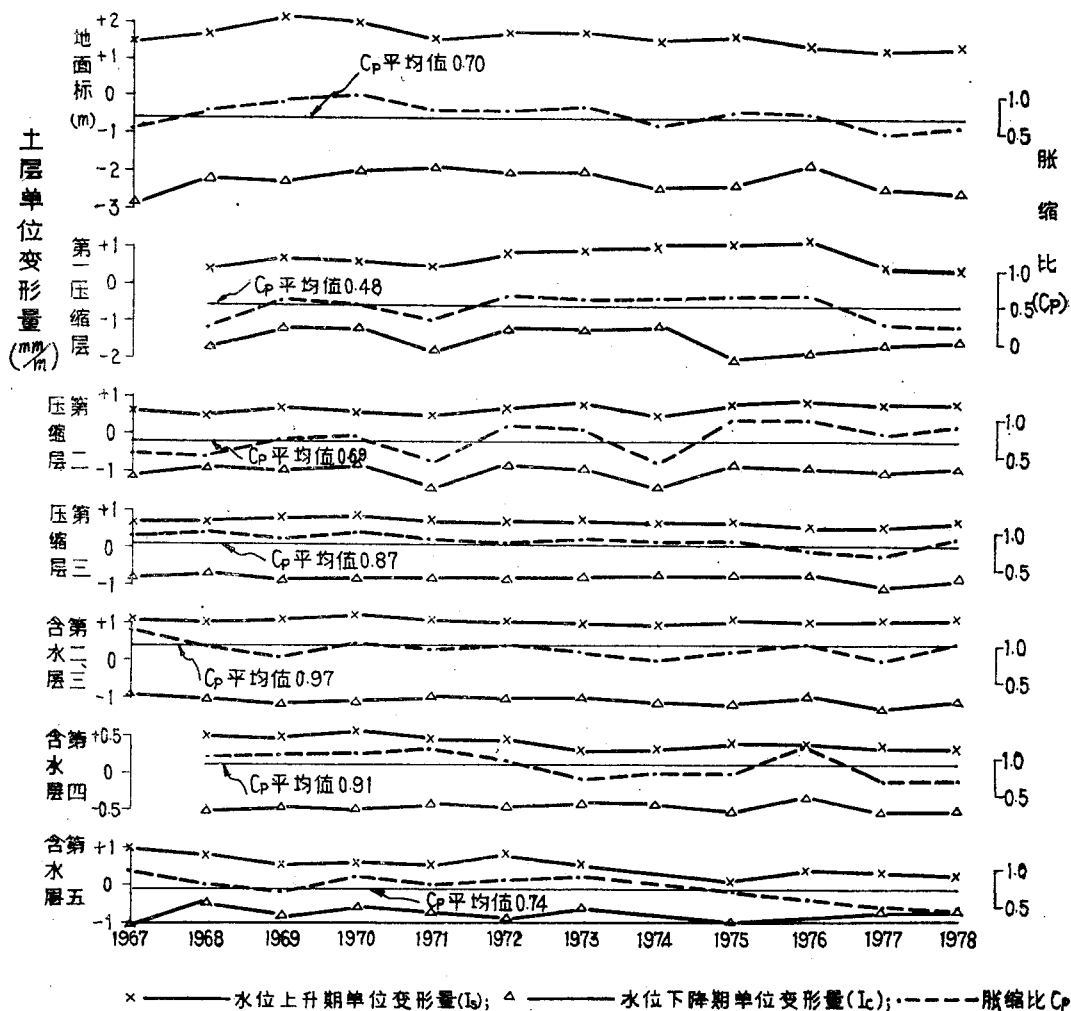


图11 各土层单位变形量随时间变化曲线

表5 各土层历年平均单位变形量表

土 层 名 称	单位变形量 mm/m		比单位变形量 mm/m ²		胀 缩 化
	I_s	I_c	I'_s	I'_c	C_p
地 面 标	+1.58	-2.26	+0.00860	-0.01241	0.70
第一压缩层	+0.74	-1.54	+0.04502	-0.09366	0.48
第二压缩层	+0.697	-1.004	+0.0362	-0.0532	0.69
第一、二含水层	+0.716	-1.433	+0.04061	-0.07298	0.50
第三压缩层	+0.68	-0.78	+0.02365	-0.265	0.87
第二、三含水层	+1.04	-1.07	+0.012	-0.0126	0.97
第四含水层	+0.41	-0.46	+0.0059	-0.0065	0.91
第五含水层	+0.54	-0.77	+0.00624	-0.00624	0.74

那个土层, 尽管其 I_s , I_c 值的绝对值各有差异, 但其胀缩比 C_p 却均小于1。其中, 第一、二压缩层的 C_p 值仅为0.48~0.69, 表明在目前的水位反复波动下, 浅层土的残余变形量较大(这与土的蠕变性质有关), 因此形成目前浅层土仍持续沉降的趋势。第三压缩层与第四含水层 $C_p=0.90$ 左右, 残余变形量相对较小, 如水位波动范围不变, 今后的累积变形量亦将较小。第二、三含水砂层 C_p 达0.97, 表明该砂层的残余变形量较小, 已接近于弹性状态。第五含水砂层的 $C_p=0.74$, 表明水位反复升降情况下, 土的残余变形量也较大。综合各土层的资料, 得地面标的 C_p 值为0.70, 表明上海地面总的升降情况仍具有非弹性特征。亦即在目前水位标高变化范围内, 每年的周期性水位变化, 每升、降一次, 地面标高将相对降低总变形量的30%。当然, 这种水位反复升降下土的残余变形量, 必将随反复次数增加而减小, 经过相当次数反复后, 土体将逐渐趋近于弹性压缩、回弹阶段。这一点可以从国外某些现场观测资料中得到验证^{[3][6]}。在上海实际条件下, 应进一步研究控制水位升、降幅度和变化型式, 使土层的残余变形量达到最小限度, 从而进一步控制地面沉降。

五、结 语

1. 上海各土层变形的基本特征表明, 土层的变形与相应含水层的水位变化密切相关。由此得出结论, 地下水位的变化是导致上海地面沉降的主要原因。
2. 试验分析结果表明: 上海的浅层土具有一定的流变性质, 该土层目前仍处于持续沉降状态, 并成为地面沉降的主要压缩层次。
3. 含水砂层虽具有弹性特征, 但在水位标高持续下降条件下, 亦将产生较大压密而导致地面沉降。
4. 由室内反复荷载试验和野外单位变形量分析得知, 上海各土层仍具有不同的残余变形量。这表明各土层在目前水位变化条件下仍具有非弹性的变形特征。它是今后进一步控制上海地面沉降需要深入研究的课题。

参 考 文 献

- [1] 国外地面沉降论文选译, 上海地质处编选, 地质出版社, 1978.9。
- [2] Poland. J. F, "Land Subsidence and aquifer—System Compaction, Santa clara Valley, California, U. S. A", International Symposium on Land Subsidence (ISLS), Japan, 1969, Vol. I, pp272~285。
- [3] Riley. F. S, "Analysis of borehole extensometer data from Central California", ISLS, Vol. II, pp423~431。
- [4] Helm. D. C, "One-dimensional Simulation of aquifer system Compaction near pixly Calitornia, 2. Stress—dependant paramaters", Water Resources Research, Vol. 12, No.3, 1976, pp 375~391。
- [5] Walton. W. C, "Ground Water Resource evaluation", pp623~625。
- [6] Lofgren. B. E, "Field measurement of aquifer system Compaction San Joaquin Califo-rnia, U. S. A.", ISLS, Vol. I, pp272~285。

Investigation of the Deformation characteristics of
Various Soil Staata under the Influence of Pumping
out & back of Ground Water in Shanghai

Su He-yuan

(Shanghai eological Survey)

Abstract

Based on analysing a large quantity of data obtained from in-situ observation and laboratory experiments, it is explored that the main causes of the land subsidence in Shanghai are the cyclic variation of the ground water table. The geological properties of the 1st and 2nd compressible strata are discussed. The important contribution of the compression of the aqueous sand stratum to the land subsidence in Shanghai is mentioned. In calculating the values of storage coefficient of various soil strata, the rule of rebound and settlement can be readily evaluated by normalizing the observed deformation of different soil strata according to the range of variation of the ground water table. The conception of the ratio between rebound and compression is used to study the characteristic of residual deformation of various soil strata in Shanghai.