

上海地面沉降计算

钱寿易 顾小芸

(中国科学院力学研究所, 北京)

提 要

上海地面沉降是通过一维基本固结方程和拉普拉斯变换进行计算的。它基于下列论断: ①经典固结理论的有效性; ②叠加原理在含水层边界水位条件分析中的适用性; ③周期荷载下, 土的双线性模型的可取性。本文分析指出, 地面沉降现象可用地下水作用引起土层内应力重分布和由此导致的变形作合理的解释。将1965~1978年间的超静水压力和变形计算值同实测值作了比较, 结果令人满意。此分析也为把地下水回灌作为控制沉降的一个有效措施提供了有力的理论依据。

一、前 言

长期地面下沉阻碍上海市工业发展和危害人民正常生活, 因而必须对沉降机理、预估沉降的方法和有效控制沉降的有效措施等进行探讨。我所与上海市地质处长期协作, 在实验室和现场开展了广泛的研究^[1]。本文综述了我所近期完成的研究工作。

二、历史背景

有关上海市的地面下沉, 早在1921年就有初次报导^[2]。随着工业发展, 下沉范围继续扩

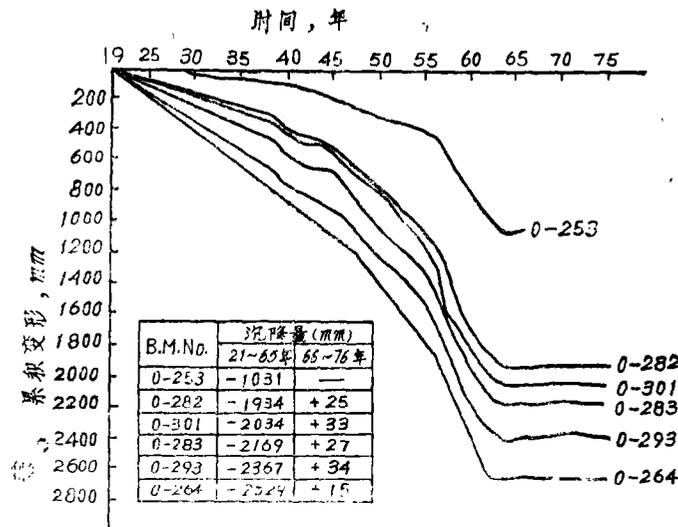


图1 典型的累积变形曲线^[2] “+”回升“-”下沉

大,并在主要抽水区域形成了碟形洼地。1921~1965年间,最大累积沉降量已达 2.63m ,最大沉降率为 $200\text{mm}/\text{年}$ 。1963年对用水采取了限制或合理使用等控制措施后,开始产生效果,沉降有所缓和,1965年平均下沉量为 23mm 。到1966~1971年间,沉降一般已被控制。由于进一步采用人工回灌含水层、制订年度用水计划(例如,“冬灌夏用”、“夏灌冬用”等)、并对全市各含水层的开采方案进行了调节等措施,在此期间,出现了大面积的微升现象。然而,从1972年开始,地面又有微沉,市区的年平均沉降值约为 3.6mm (图1)。因此,可以这样说,地面主要经历了以下三个阶段:明显下沉—回升—微沉。

三、地质特征

在市区,基岩上的第四系沉积物的厚度约为 300m 。从分层标的观测数据来看,主要压缩层位于地面下 70m 深度以内。压缩层的总厚度比起市区总抽水面积的尺度则要小得多。开采的含水层中,下降的水位虽然是漏斗形的,但漏斗线的梯度却很小。因此,把渗流和变形都作为一维问题来处理是合理的。本文对上海市的一个典型沉降区域——劳动公园进行了分析。

上海市地质处对每个土层发生的变形进行了大量和精确的量测工作^[8]。分层标量测误差的精度属于 0.1mm 的量级。为了测定地下水位的变化,又埋置了三个观测孔。此外,在压缩层内的孔隙水压力变化值是用卡萨格莱特(Casagrande)型孔隙水压力仪进行测定的。所有这些现场量测资料对分析是必不可少的。本文研究了两个主要压缩层的情况。

位于 $42.3\sim 72.8\text{m}$ 深的亚粘土层,含有粘土和亚粘土互层,液限 $w_L = 26\sim 40\%$,塑限 $w_p = 18.5\sim 24.7\%$,含水量 $w = 35\%$,容重 $\gamma = 18.2\text{kN}/\text{m}^3$;它受到下卧第二含水层水位的直接影响。该含水层是上海地区的主要抽水层之一。处于 $3.5\sim 19.5\text{m}$ 深的淤泥质粘土层, $w_L = 41.5\%$, $w_p = 25.7\%$, $w = 52\%$, $\gamma = 17.2\text{kN}/\text{m}^3$,受第二含水层的影响较小,但由于它本身的高压缩性,已成为主要的压缩层次。它的变形直接受到下卧第一含水层水位变化的影响。

四、实验室试验

(一)抽水作用下的固结试验

对于淤泥质粘土层土样的试验结果表明^[4],抽水作用下和常规加载下的固结过程本质上是类似的。在主固结阶段内,试验结果和泰沙基(Terzaghi)理论相符合^[5]。但是,这阶段完成后,出现了明显的次固结效应,尤其是在小加载比的情况下。

(二)重复荷载试验

由于抽水作用下含水层中的水位发生了年周期性的变化,探讨土对重复荷载的响应是重要的。选择了模拟现场条件的合适加载比后,进行的两个加载方案是:加载—卸载和变化边界水位条件。后者所使用的仪器示于图2。

试验指出,在重复加载下,土的变形基本处于主固结阶段。这为本分析中忽略次固结效应提供了依据。同时察觉到,经过一定次数的重复加载后,压缩和回弹系数间取一个平均值是允许的。图3表示了一个典型压缩—回弹曲线,可近似地用一个双线性模型来表述。

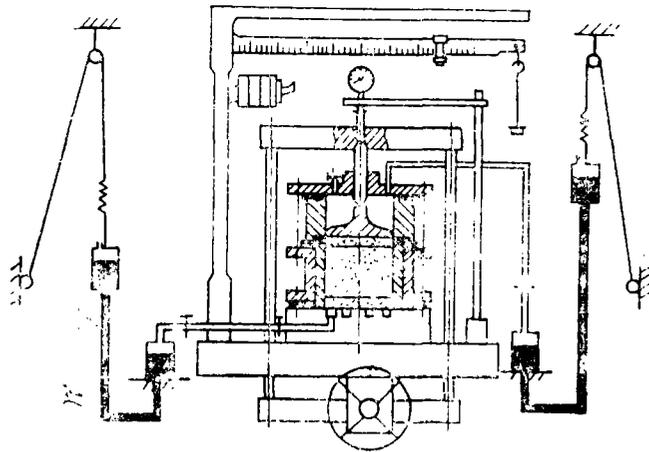


图2 重复加载固结仪^[6]

(三) 叠加原理的适用性

试验说明^[7], 为了建立土样内梯形有效应力增量的分布状态, 在土样两端施加不同的水头下降后, 其变形-时间曲线和由一个矩形及一个三角形有效应力增量二者叠加后的曲线相类似。

五、变形计算方法

(一) 方程

分析中采用了一维基本固结方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vc} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \text{ 和 } \frac{\partial u}{\partial t} = c_{vs} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中 下标 c 和 s 分别表示压缩和回弹。

(二) 各种边界条件下的基本方程解

在计算压缩变形时, 假定上端边界水位保持不变, 即 $z = 0, u(0, t) = 0$; 而下端边界水位则随着不同的下卧含水层中的水位变化而变化。第一、二含水层中地下水位的连续记录示于图4。

升降的水位可分解成三个组成部分, 即: 中心水位线的定值下降和线性上升及周期变化。对(1)式进行拉普拉斯变换, 可分别导出下列超静水压力值 u 的表达式。

1. 中心水位线的定值下降

$$\text{设 } A = \frac{z}{H}, B = n\pi, D = \frac{c_v}{H^2}, E = \sin AB \exp(-B^2 Dt),$$

$$u_i(z, t) = -\gamma_w h_2 \left[A + 2 \sum_{n=1, 2, 3, \dots}^{\infty} (-1)^n \frac{E_c}{B} \right] \quad (2)$$

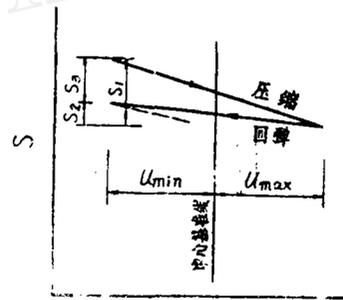
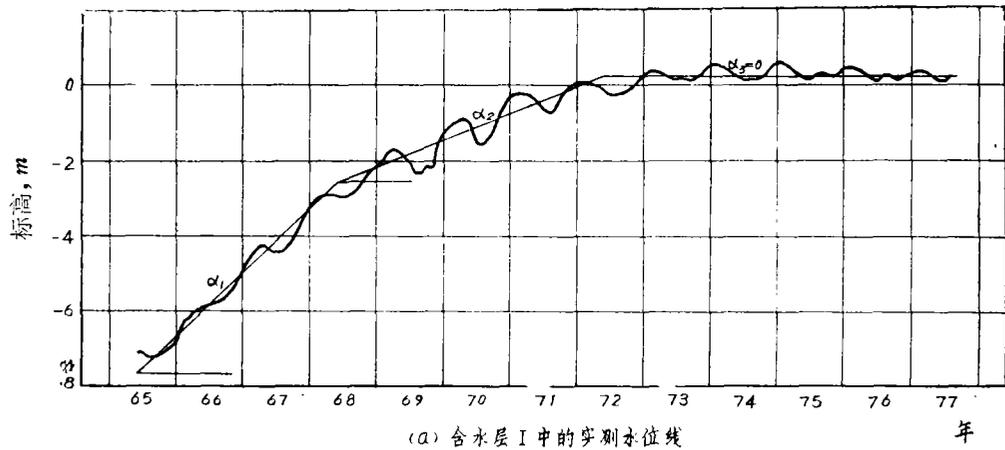
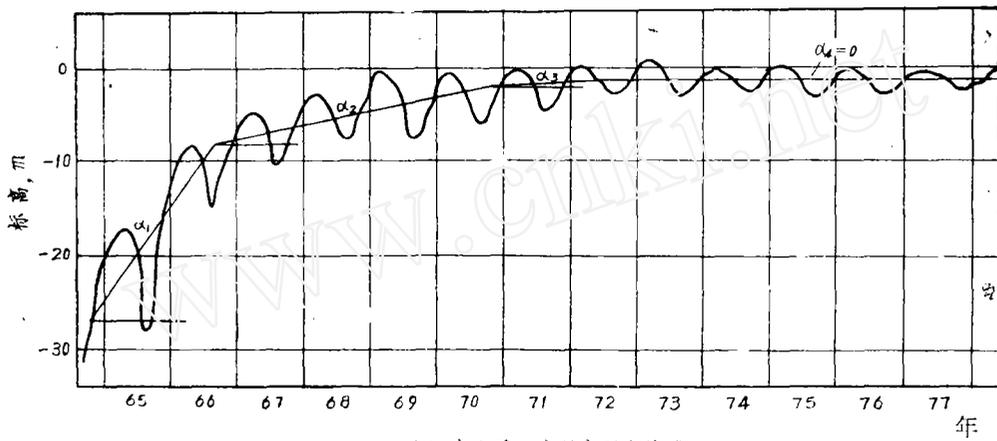


图3 一个典型的压缩-回弹周期



(a) 含水层 I 中的实测水位线



(b) 含水层 II 中的实测水位线

图 4 年度地下水位升降曲线

其中 h_2 ——下端边界水位的下降值，
 H ——土层厚度。

2. 中心水位线的线性上升

$$u_2(z, t) = \alpha \left[At - \frac{A(1-A^2)}{6D_s} + 2 \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{E_s}{B^2 D_s} \right] \quad (3)$$

式中 α ——线性变化的斜率，用单位时间的压力差值来表示。

3. 周期水位变化

在正弦周期变化 $P \sin \omega t$ 的条件下，忽略解的瞬态变化部分后，可得

$$u_3(z, t) = P \exp \left[-\sqrt{\frac{\omega}{2c_v}} (H-z) \right] \sin \left[\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2c_v}} (H-z) \right] \quad (4)$$

式中 P ——周期水压力峰值，
 ω ——周期变化的频率。

在实际情况下，周期水位变化是无规则的，最后的解可用频谱分析法求得。

(三) 初始条件

由于上海市多年前就已经开始下沉,在计算某一个中间年度以后的 u 和 s (变形)时,查明它的应力历史就成为先决条件。对亚粘土层来说,已经从实测资料中估算了1965年8月的等效抽水作用时间^[8]。在淤泥质粘土层中,1965年8月的初始孔隙压力分布曲线求出如下,并示于图5,

$$f(z) = u(z, 0) = 0.97 \exp[-0.25(20 - z)] \quad (5)$$

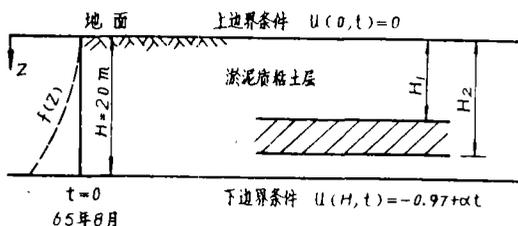


图5 淤泥质粘土层中超静水压力 u 的初始条件

从(1)式可推导出在 $f(z)$ 初始条件下的 $u(z,t)$ 表达式为

$$u_4(z, t) = \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \frac{2}{H} \int_0^H [f(z) \sin AB dz] E_c \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式,得

$$u_4(z, t) = 0.0965 \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \frac{\frac{B}{H}}{(0.25)^2 + (\frac{B}{H})^2} \cdot [(-1)^n - 0.0067] E_c \quad (7)$$

(四)变形分析

从图5, H_1 和 H_2 间土的变形 s 可以由下式求出^[5]:

$$s = m_v \int_{H_1}^{H_2} u dz \quad (8)$$

将(2)、(3)和(4)式代入(8)式并进行积分,可获得在不同边界水位条件下的变形表达式。

1. 定值下降部分产生的变形

设 $K = \frac{H_1}{H_2}$, $M = 1 - (\frac{H_1}{H_2})^2$, $D' = \frac{c_v}{H_2^2}$

和 $F = (\cos B - \cos KB) \exp(-B^2 D' t)$,

$$s_1 = -\frac{1}{2} m_{vc} r_w h_2 H_2 \left[M - 4 \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} (-1)^n \frac{F_c}{B^2} \right] \quad (9)$$

2. 线性上升部分产生的变形

$$s_2 = m_{vs} a H_2 \left[\frac{Mt}{2} - \frac{M^2}{24 D'_s} + 2 \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} (-1)^n \frac{F_s}{D'_s B^4} \right] \quad (10)$$

3. 初始超静水压力 $u(z, 0)$ 产生的变形

$$s_4 = \frac{0.0965m_{vc} \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} [(-1)^n - 0.0067] F_c}{(0.25)^2 + \left(\frac{B}{H_2}\right)^2} \quad (11)$$

压缩为“-”，回弹为“+”。

4. 周期变化部分产生的变形

从图 4，每一深度处的最大和最小超静水压力值(以一条中心基线为准)为

$$\left. \begin{array}{l} u_{max} \\ u_{min} \end{array} \right\} = \mp P \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2c_v}} \xi\right) \quad (12)$$

式中 ξ —— 从下端边界线到某一深度点的垂直距离，其值为 $\xi = H - z$ 。

一个周期后的净变形 s_3 为

$$s_3 = s_1 - s_2 = 2P \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2c_v}} \xi\right) m_{vc} \left(1 - \frac{m_{vs}}{m_{vc}}\right) \quad (13)$$

下式表示整个土层的净变形:

$$s_3 = 2P \sqrt{\frac{2c_v}{\omega}} m_{vc} \left(1 - \frac{m_{vs}}{m_{vc}}\right) \quad (14)$$

在重复加卸载条件下， m_{vc} 和 m_{vs} 逐渐接近。室内试验结果提示：20周末的 s_3 值约等于第一周末的 s_3 值的1/5。

六、土性参数

已经查明，实验室内取得的土性参数受加载比和加载条件的影响很大。为此，计算中必须重视选取土性参数 a_v 和 c_v 的适当数值。值得庆幸的是，长期现场观测资料可作为一个大型现场试验的结果。由此，获得了所需要的土性参数^[9]。在累积的现场资料不足的情况下，室内试验结果则可作为参考。本计算中所采用的土性参数列于表1。

表1 土性参数

参 数 土 类	固结系数 $c_{vc}(\text{m}^2/\text{s})$	回弹系数 $c_{vs}(\text{m}^2/\text{s})$	许多周期后的 平均固结系数 $c_v(\text{m}^2/\text{s})$	体积压缩系数 $m_{vc}(\text{kPa})^{-1}$	体积回弹系数 $m_{vs}(\text{kPa})^{-1}$
淤泥质粘土	1.5×10^{-7}	4.0×10^{-7}	4.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	6.0×10^{-6}
亚粘土	2.0×10^{-6}	6.0×10^{-6}	2.5×10^{-5}	4.0×10^{-6}	3.0×10^{-6}

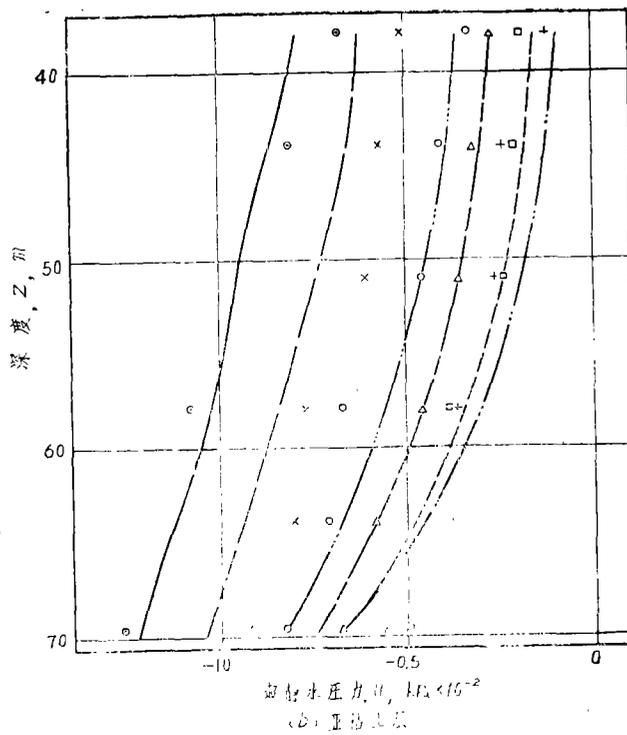
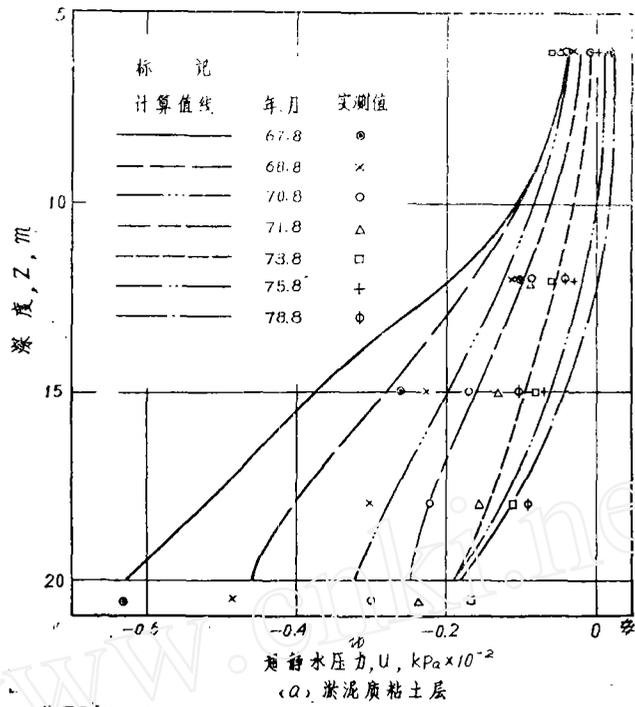
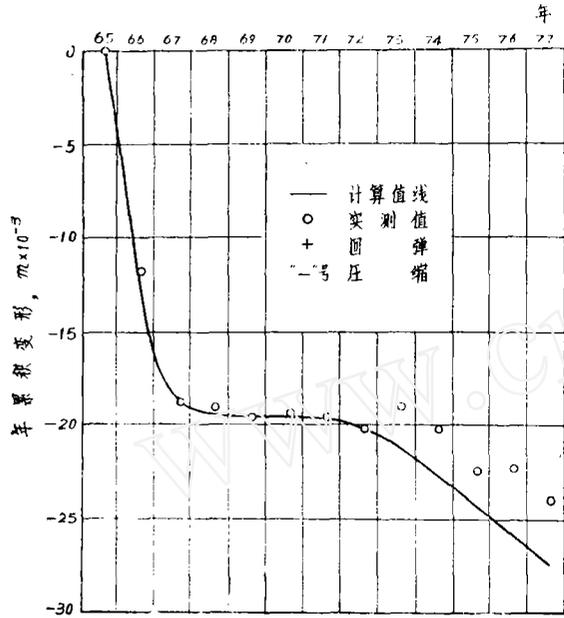


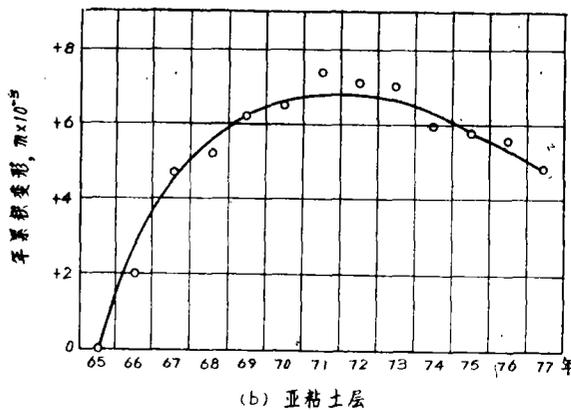
图6 超静水压力随深度的变化

七、计算结果

图 6、7 表示淤泥质粘土层和亚粘土层在 1965~1978 年间的每个 8 月份随深度变化的超静水压力和累积变形的计算值分布曲线。同图中也点出了实测值，以便对此分析方法的适用性进行评价。



(a) 淤泥质粘土层



(b) 亚粘土层

图 7 年度累积变形量

八、结 论

1. 本文分析指出，到目前为止，上海地面沉降现象用土层中因抽水作用而发生的应力重分布和由此导致的变形来解释是合理的。同时，分析也提供了选取有效控制措施的科学理论依据。室内试验和现场观测的结合是研究沉降机理和预估土性的一种有效手段。

2. 基于实验室试验所得到的论断和主要从现场资料获取的土性参数，对一个典型区域内的二个主要压缩土层进行了分析。1965~1978 年间孔隙水压力和变形的计算值与实测值相接近，证实了本分析方法是可取的。经历这样长的一个时期，采用了一组常量等效的土性参数引进了一些误差。

3. 如图中所示，1965~1978 年间，超静水压力每年都在不断地下降。由此可以证明，为了控制这个城市的地面沉降，在含水层中进行地下水回灌的措施是有效的。同时，到目前为止，基于主固结的计算方法也是可以接受的。然而，值得注意的是，回灌的效率在逐渐下降，在未来的一些年份内，微沉仍将是预料到的。为了提高效率，建议作水平回灌的现场试验研究。另外，由于次固结的作用将日趋重要，因此对此特性和相应的控制措施的研究也是很需要的。

本文所用的宝贵现场观测资料是由上海市地质处提供的。对此,作者们表示衷心的感谢。对本文所引用的文献的作者们也谨致谢意。在图表的最后绘制中,本所唐莘庚同志曾给予帮助,一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 钱寿易,上海市地面沉降研究总结报告,力学研究所报告,1968年。
- [2] Shi, L. X. and Bao, M. F., Case History on Subsidence in Shanghai, China, Shanghai Geological Department, Shanghai, China. (Submitted to the International Workshop on Land Subsidence, 1979).
- [3] 苏河源,抽、灌水作用下上海土层变形特征的探讨,岩土工程学报,创刊号,1979年12月,第24~35页。
- [4] 顾小芸,抽水引起土体压密的初步试验研究,力学研究所报告,1965年。
- [5] Terzaghi, K., Theoretical Soil Mechanics, Wiley, New York, 1943.
- [6] 付裕寿、娄禹卿,反复荷载作用下上海粘土的性质,力学研究所报告,1968年。
- [7] 付裕寿,抽水引起地面沉降的力学效应及其实验研究,力学研究所报告,1965年。
- [8] 钱寿易,用分析法计算劳动公园因抽水引起的地面沉降,力学研究所报告,1968年。
- [9] 顾小芸,用有限差分法计算劳动公园因抽水引起的地面沉降,力学研究所报告,1968年。

Computation of Land Subsidence in Shanghai

Qian Shou-yi and Gu Xiao-yun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing)

Abstract

Computations of land subsidence in Shanghai are carried out by employing the basic one-dimensional consolidation equation and the Laplace transformation. They are based on the inferences: (1) validity of the classical consolidation theory; (2) validity of superposition theorem of boundary water level conditions in aquifers; and (3) adaptability of bi-linear model under cyclic loading. Analysis shows that the phenomena of land subsidence can be well interpreted by stress redistribution and its consequent deformation occurred in the soil layer as a result of subterranean pumping. The comparisons from 1965~1978 between the computed and actually measured data on hydrostatic excess pressures and deformations are good. This analysis also provides a sound basis for suggesting groundwater recharging as an effective means to control the subsidence.