

# 地面沉降预测和防治措施研究

顾小芸 冉启全

(中国科学院力学研究所, 北京, 100081)

**提要** 通过各种地面沉降计算方法可以预测沉降发展趋势。国内外在地面沉降计算模型研究方面均有很大发展。文中简述了我国在这这方面的发展情况。防治措施是建立在地面沉降预测基础上的。有关防治措施方面的报导却并不太多。上海自60年代就采取了压缩用水量和回灌地下水的措施, 继而采用了调整地下水开采层次的措施, 在减缓地面沉降方面有显著的成效。但是, 经济发展的需求使我们不能过多减少用水量。这种情况下能否用沉降预测和科学实验来指导防治措施? 沉降计算模型的发展和防治措施有没有必然的联系? 文中根据对现场资料的分析和室内试验的启示, 用三维渗流固结耦合沉降模型进行了计算, 并提出了防治措施方面的建设性意见。由此表明, 必须把地面沉降研究和防治措施更紧密地结合起来。

**关键词** 地面沉降 防治措施 地下水

## 一、前言

由抽水引起的地面沉降历来已久, 在国际国内都受到了人们极大的关注。自1969年以来, 国际上召开过5届国际地面沉降会议和数次范围略小的专题讨论会, 1984年联合国教科文组织还专门出版了“抽水引起地面沉降的研究指南”。国内从60年代初开始了上海地区的地面沉降研究, 现已发展到许多大中城市和经济发展地区。

预测沉降发展趋势的要求促进了地面沉降的计算模型和方法的发展。自1991年的第4届国际地面沉降会议以来, “理论和模型”已成为一大专题, 有关方面的文章占了会议全部论文的1/5。为了减少沉降, 各国又都采取了控制地面沉降的措施。本文将对国内已有的计算模型和方法进行简单的介绍, 并通过一些算例将计算结果直接和防治措施的研究结合起来, 从而说明沉降预测计算和防治措施间的有机联系。

## 二、沉降计算模型

我国因为抽水引起的地面沉降研究始于60年代。随着预测和控制地面沉降的需求, 多种计算模型和方法得到了发展。按其特点可以分成两大类, 每一类下又有不同的模型和方法(见表1)。

\* 第一作者: 顾小芸, 62岁, 中国科学院力学研究所研究员, 从事环境土力学和海洋土力学的研究。

表 1 沉降计算方法分类

Tab. 1 Classification of computation methods

类 型	特 点	模 型 和 方 法	参 考 文 献
一维沉降计算	计算水位-沉降的关系	基于太沙基固结理论的解析方法	[1]
		考虑次固结的数值计算方法	[2] [3]
地下水渗流和土层变形的联合计算	计算水量-水位-沉降的关系	准三维渗流-维沉降的有限元计算	[4] [5]
		考虑流变特性的三维渗流固结耦合模型	[6]

选择何种计算方法, 应根据不同地区的实际情况而定。而掌握好各种方法的特点则是正确选择的前提。为此, 作者认为有必要对上述方法作一简要的说明。

### 1. 一维沉降计算

在具有地下水位和分层标的地点, 一维沉降计算比较简单方便, 且易得到较精确的结果。

#### 解析方法

如果地下水的中心水位变化比较明显, 孔隙水压力变化应是引起沉降的主导因素, 则可以采用基于太沙基固结理论的解析方法, 该方法的优点是机理比较明显。

有必要指出, 该计算方法与常规加载条件的计算有两大不同特点。其一为边界条件由含水层水位给定。若假定浅层土的上边界水位不变, 即  $z=0$ , 孔隙水压力  $u(0, t) = 0$  的条件下, 把压缩土层下伏含水层变化的水位作为下边界。第二个特点是由于含水层水位发生年周期的升降, 反复荷载是必须考虑的重要因素。计算中将下边界水位分解为 3 个组成部分: 中心水位线的定值下降、线性上升和周期变化。对 3 部分解得超静水压力后, 叠加而得总的孔隙水压力值, 并从而计算沉降量。

#### 考虑次固结因素的计算

当地下水位中心线已在相当长一些年份内基本持平, 孔隙水压力值 (在有实测数据时) 基本不变, 而土层的流变特性又比较明显, 则有必要考虑次固结因素的计算。这时, 太沙基假定中的应力-应变关系  $\frac{\partial e}{\partial \sigma} = a_v \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma}$  由下式代替:

$$\frac{\partial e}{\partial \sigma} = \frac{\partial e}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial \sigma} + \left[ \frac{\partial e}{\partial \sigma} \right]_c$$

式中,  $e$ - 孔隙比,  $t$ - 时间,  $p$ - 有效应力,  $a_v$ - 压缩系数,  $\frac{\partial e}{\partial \sigma}$  表示压缩性,  $\left[ \frac{\partial e}{\partial \sigma} \right]_c$  为蠕变速率。这里, 同样要考虑反复荷载的作用, 即表征压缩性的土性参数包括体积压缩系数  $m_{vc}$  和体积回弹系数  $m_{ve}$ 。根据室内试验结果,  $m_{ve}$  为常数,  $m_{vc}$  和反复次数呈幂函数关系。蠕变速率则由次固结系数决定。由于土性参数的非线性, 加上土层的不均匀性、边界水位的不规则性以及初始条件的不完全统一等因素, 采用差分方法进行数值计算比较方便。

### 2. 渗流和变形的联合计算

该类方法的最大优点是能计算水量-水位-沉降的关系。

#### 准三维渗流一维沉降模型

由 80 年代后期中国-比利时合作项目开始, 于 90 年代初地矿部自编程序完成的拟三维计算中, 将含水层作为平面二维渗流, 粘土层作为垂直一维渗流, 而含水层和粘土层间的水量交换通过越流量来处理, 土层变形量则由一维渗透固结模型 (即太沙基模型) 计算。对于具有很大三维空间的研究区域, 采用准三维方法无疑是减少计算工作量的一个途径。由于对上海地区的计算是通过和长期积累的资料进行拟合来完成的, 其结果是能令人满意的。但该模型仅考虑渗流对变形的影响, 而没有考虑变形对渗流的影响, 即没有真正考虑流固耦合的力学效应。虽然在中比项目报告中提到了流固耦合的问题, 但真正在计算中实现是 Dassagues 在 1995 年进行的<sup>[7]</sup>, 已不属于国内计算方法的范畴。

#### 考虑流变特性的三维渗流固结耦合模型

该模型把包含粘土层和含水层的多层土体作为一个三维整体考虑, 既考虑了软粘土层的流变特性, 又考虑了地下水渗流和土层变形间相互的耦合作用, 在力学机制上应该是较为全面的。由于将土体视为一个三维整体, 即粘土层和含水层在三维空间中只是具有数值不同的土性参数的单元, 数值计算变得相对地简单, 可以用隐式差分法求解。由三维渗流微分方程, 考虑主次固结变形的应力应变方程, 和反映渗透系数和孔隙比间关系的耦合本构方程组成该模型的基本方程, 在给定边界条件和初始条件下求解孔隙水压力、孔隙比和渗透系数, 再根据孔隙比计算变形量。

#### 计算参数

在岩土工程的计算中, 土性参数的获取是极其重要的一环。由于地质情况的复杂, 确定参数时往往有一些不确定性。在大面积的地面沉降计算中, 这种不确定性更为严重。

在上述两大类计算中, 一维沉降计算比较重视参数选取的正确性。为此, 需要进行与实际应力状态相符合的土力学试验, 而不是采用现有生产性试验室中的常规土性参数。多年计算的表明, 当模型与实际情况越接近, 参数取得和实际应力状态越符合, 计算结果与实测资料也越接近。

渗流和变形联合计算时, 计算空间的范围很大, 要选取足够的参数有一定的难度, 因此往往靠多次调整参数以使计算结果接近实测水位和沉降资料, 成为一种拟反分析方法。对于尚没有积累许多现场资料的地区, 进行这样的计算是不现实的, 但是, 当采用比较符合力学机制的三维流固耦合模型时, 计算参数尽可能取得合理, 则调整参数的工作量相对地要少得多。这表明, 即使在没有长期积累资料的地区, 如果能够事先用优化方法确定水位观测孔和工程地质钻孔的地点, 以获得水位和土性参数的资料, 用三维渗流固结耦合模型也能预测水位和沉降的发展趋势。

### 三、防治措施研究

研究地面沉降的目的是为了防治。我国上海自 60 年代就采取了压缩用水量和回灌地下水的措施, 后来又采取了调整地下水开采层次的措施, 在减缓地面沉降方面有显著的成效。在采取这些防治措施的过程中, 地面沉降预测计算是制定压缩用水量和采灌水量的依据。根据上海的经验, 在其它产生地面沉降的地区, 人们也往往采用压缩用水量来抑制地面沉降

的发展。但一味地压缩用水和地区经济发展需求存在着矛盾。因此，能不能用沉降预测和科学实验来指导防治措施？

日本在数值模拟技术与优化理论耦合的基础上，提出了抽取水量的地区分配、井深和位置，以及抽水井运转方面的优化<sup>[8]</sup>。荷兰也根据沉降计算调整了抽水井的位置<sup>[9]</sup>。但是，总的来说，关于防治措施的报导还是较少。

1991年我们曾提出应该确定一个最有效的采灌方案，其中包括采灌时间、深度、周期和强度，都应予以认真考虑<sup>[10]</sup>。近期，我们用三维流固耦合模型对一研究区域进行了相对于原方案维持总用水量不变情况的3种不同方案的计算：

### 1. 调整地区分配

对开采量过于集中的地区减少开采量，将这部分的开采量挪到其它地区。计算结果表明，根据实际需要调整开采量的分配，可以减少局部地区的沉降量。这和 [8]，[9] 的措施是一致的。

### 2. 调整水位周期

根据周期荷载下的固结试验结果，缩短周期会使变形量减少，因此进行了改变水位周期的预测计算。在一年总用水量不变的情况下调整月采灌量的分配以达到水位周期的改变。水位历时曲线如图 1 所示。1a 的曲线由原来的单峰/a 变成了双峰/a，1b 的曲线则变成了多峰/a。对于 1a，地面年变形量相对于原方案减小了 0.1~0.4 mm；对于 1b，年变形量减小 0.1~0.5 mm。按原方案计算，该地区的年变形量为 1~3 mm。计算结果表明，增加水位周期数可以适当降低地面的变形量。当然，是否可以实现这类方案，要视当地的地下水用途而定。比如说，作为饮用水，就可以适当增加水位周期数。

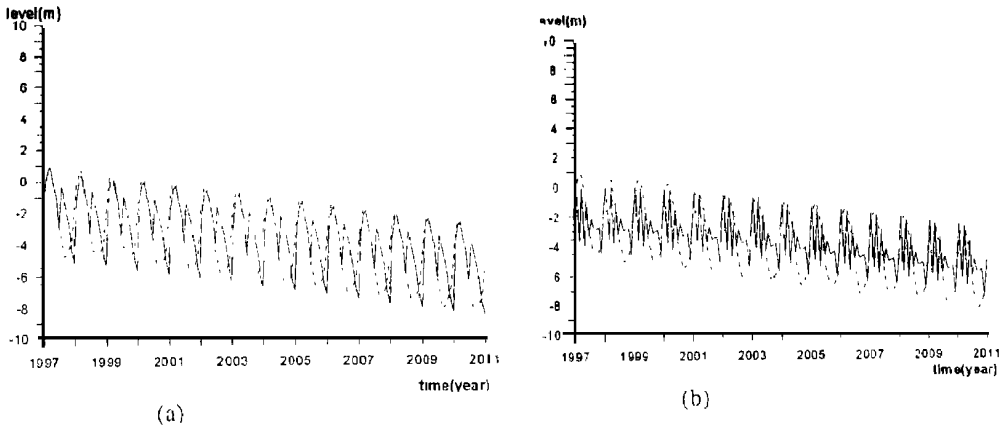


图 1 水位历时曲线图

Fig. 1 Water level change

### 3. 回灌浅部含水层

分层表明，浅层软粘土层（见图 2）由于其压缩性大，土层的变形量在总沉降量中占的比重很大，而对第二含水层回灌地下水后，软粘土层中的孔隙水压力变化不大，回弹量

也不明显。能否对第一含水层进行回灌以增加软粘土层的回弹量？因此进行了以下 2 种方案的试算：

总回灌量不变，回灌量在第一、二含水层中平均分配

图 3 和图 4 为一含水层和二含水层的水位计算历时曲线。二含水层由于回灌量减少，尽管有一含水层的水量补给，但补给量不及回灌量的减少，所以二含水层水位比原方案降低。虽然一含水层在进行回灌，但由于二含水层水位的大幅度降低，导致一含水层水位总体上也是降低的。所以，这一方案的实施，对控制地面沉降不利。

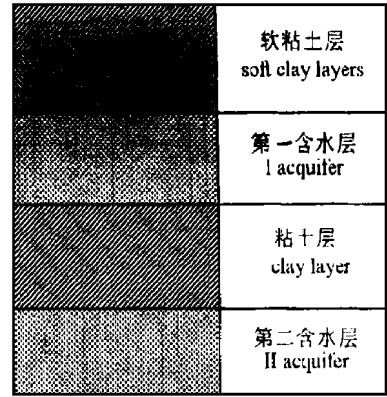


图 2 土层剖面图

Fig. 2 Scheme of the soil layer profile

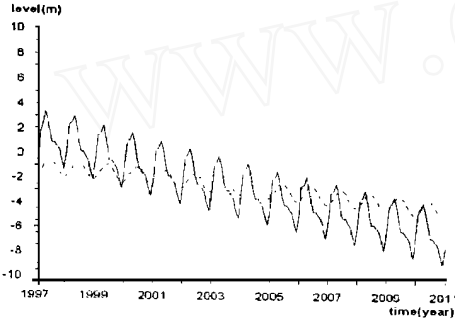


图 3 第一含水层水位历时曲线图

Fig. 3 Water level of the first aquifer

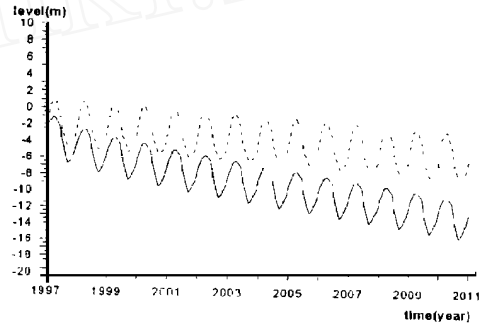
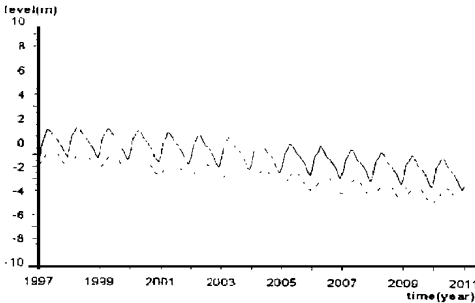


图 4 第二含水层水位历时曲线图

Fig. 4 Water level of the second aquifer



(以上各图中的虚线为原方案的水位曲线)

图 5 第一含水层水位历时曲线图

Fig. 5 Water level of the first aquifer

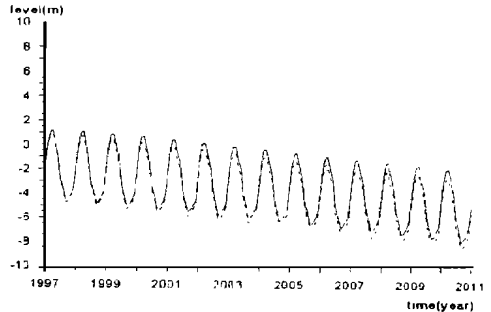


图 6 第二含水层水位历时曲线图

Fig. 6 Water level of the second aquifer

### 增加第一含水层的回灌

二含水层仍按原来的采灌水量进行, 而在一含水层进行适当的回灌, 回灌量为二含水层回灌量的 1/5。

图 5.6 为计算的水位历时曲线。由于回灌, 一含水层水位波动幅度较大, 水位升高。二含水层的水位中心线也有所升高。水位的升高导致变形量的减小。

上述试算表明, 由于各含水层间的水位联系, 回灌浅部含水层是否有效, 要看回灌量在第一和第二含水层的具体分配情况。

此外, 反复荷载下的固结试验<sup>[1]</sup>还告诉我们, 加载段中变形随时间逐渐发展, 卸载段中变形一般较快稳定。如果控制采灌量使水位下降的延续时间较短, 水位上升的延续时间较长, 有可能减少沉降量。当然, 在计算沉降量时应适当改变压缩系数。

在我国沿海地区, 具有流变特性的淤泥质软粘土分布比较广泛。由于流变变形不是随有效应力变化而发展的, 在孔隙水压力已保持稳定, 即接近静水压力时, 流变变形还能持续发展, 年均流变量可达 1 至数 mm。通常认为, 对于流变变形, 只能听之任之。由于次固结量与时间的对数呈直线关系, 流变速率会随年代的推移而逐渐减少的。但是, 流变量的长期积累也不是一个小数目。室内试验表明, 土样在超固结状态下经受反复荷载, 会产生少量回弹, 且具有较小的次固结系数。如果在一定的时期内多回灌些水, 使水位中心线抬高, 造成土层的超压密状态, 之后再抽地下水, 有可能减少土层的流变变形量。当然, 为使这种设想付诸实施, 还需要在现有的试验和计算方法基础上做进一步的研究。

由上述试算和设想, 我们认为, 可以根据对现场资料的分析 and 室内试验的结果, 用适当的模型进行计算, 以达到防治措施的目的。

## 四、 结语

1. 我国预测地面沉降的计算方法大体上可分为 2 大类 4 大种。应根据不同方法的特点决定对不同地区采用何种方法。
2. 土性参数的正确获取仍是沉降计算中的重要一环。
3. 在维持总用水量不变的情况下, 用三维渗流固结耦合模型对几种采灌方案进行的试算表明, 采灌地区、周期和层次的改变对减少地面沉降是有作用的。
4. 沉降研究的根本目的在于防治。应该和可以根据对现场资料的分析 and 室内土工试验的结果, 采用适当的模型进行预测计算, 使防治措施的研究得到发展。

### 参考文献

- [1] 钱寿易, 顾小芸. 上海地面沉降计算. 岩土工程学报, 1981, V. 3, No. 3
- [2] Gu X. Y., Deng W., Xu D. N. & Liu Y., Computation of Land Subsidence in Shanghai with Secondary Consolidation Effect. In: Recent Advances in Soft Soil Engineering (Proc. ICSSSE), 1993, Science Press, Beijing
- [3] Gu X. Y., Xu D. N. & Deng W., A computing Model Based on Cyclic Consolidation Tests, In: Land Subsidence (Proc. of V ISOLS), 1995, IAHS Publ., No. 234
- [4] 地矿部岩溶地质研究所. 上海地区含水层系统开发管理研究. 1995

- [5] 长江三角洲上海地区第四纪地质水文地质、工程地质及地面沉降数学模型研究. 中国-比利时联合研究报告. 1989
- [6] 冉启全、顾小芸. 考虑流变特性的流固耦合地面沉降模型及其数值模拟. 全国地面沉降学术会议论文集. 1998
- [7] Dassagues A., On the Necessity to consider Varying Parameters in Land and Subsidence Computations. In: Land and Subsidence (Proc. of V ISOLS), 1995, IAHS Publ., No. 234
- [8] Nieuwenhuis H. S., Preparing An Anticipatory Policy on Land and Subsidence Induced Changes in Surface and Groundwater Systems in Friesland. In: Land Subsidence, Natural Causes, Measuring Technique, The Groningen Gasfields., Ed. by Barends F.B.J. et al, 1995
- [9] Kuniaki Sato & Nguyen Van Hoang, Recent Countermeasures for Land and Subsidence and Groundwater Resources in Japan. In: Land Subsidence (Proc. of V ISOLS), 1995, IAHS Publ., No. 234
- [10] Gu X. Y., Tsien S. I, Huang H. C. & Liu Y., A nalysis of Shanghai Land and Subsidence, In: Land Subsidence (Proc. of IV ISOLS), 1991, IAHS Publ. No. 200
- [11] Gu X. Y. & Xu D. N., Consolidation Behavior of Shanghai Clay under Cyclic Loading, Proc. of XIV ICSMFE, 1997, V. 1

## Land Subsidence Prediction and Countermeasures

Gu Xiaoyun      Ran Qiquan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100081)

**Abstract** The tendency of land subsidence can be predicted by different kinds of computation methods, thus the study on computation models for land subsidence has worldwidely been developed. The development of the computation models in China is briefly described in this paper. The countermeasures are based on the prediction of land subsidence. But there are a few reports on countermeasures. In Shanghai, countermeasures such as restriction of pumping groundwater and artificially recharging groundwater into the deeper aquifers have been adopted since the 1960s, and later on pumping some part of groundwater from the deeper aquifers have decided. All these countermeasures have obvious effect on descending land subsidence. However, restricting much usage of groundwater will conflict with the necessity of high economic development. Therefore, the following questions are raised: can we use the land subsidence prediction and scientific experiments to direct the countermeasures? Is there any certain relation between the development of computation models and countermeasures? According to some inspiration from the field data and laboratory test results, in this paper the land subsidence computation is conducted by using the 3-D seepage-consolidation coupled model, and some constructive suggestions of countermeasures are made.

**Key words** land subsidence countermeasures 3-D seepage-consolidation coupled model groundwater