

岩土工程

北京市平原区建设用地地面沉降评估 ——以北京市外二环京哈高速公路—京密路段沉降区为例

杨健, 李智毅, 陈庆寿

(中国地质大学, 北京 100083)

[摘 要]北京市平原区埋藏着丰富的承压水资源,但是由于城市规模的日益扩大,人口剧增和经济快速发展,地下水长期处于超采状态,从而导致地面沉降大面积发生。目前地面沉降已经成为北京市的主要地质灾害之一。采用太沙基一维固结理论,先根据评估区的地层剖面建立预测地质模型,由已知的累计沉降量、承压水降低值等反算土层的压缩变形参数。然后按预估的水位降低值计算地面沉降量。

[关键词]地面沉降 地下水开采 地质模型

[中图分类号]P642.26;TU478 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2003)01-0086-05

1 地面沉降概述

1.1 引言

地面沉降是指地面水准点高程下降,一般是根据测量地面水准点高程变化来发现的。引起地面沉降的原因有以下几类:第一类是构造沉降,它是由近期仍在活动的构造带运动产生的沉降,这种沉降是大范围的,有时伴有差异性沉降。第二类是加荷沉降,由于上部进行工程建设,局部荷载增加,使地下土层在附加应力作用下产生一定量的压缩沉降,简称固结沉降,这种沉降是局部的,范围很小,且沉降有一定的限度,会逐渐趋于稳定。第三类是开采地下流体,如水、石油等产生的地面沉降,这种沉降是持续性的,范围取决于开采所涉及的区域,只要开采持续,沉降就不会停止。

1.2 国内外研究现状

因地下水资源开采导致的地面沉降已遍及世界各地,因此,各国对这一问题的重视程度愈来愈高。研究成果最多的国家是美国和日本。著名学者主要有 Poland J F、Helm D C、Leake S A、宫部直己、村山朔部、山本庄毅等。

Poland J F 早在 1956 年就论述了由于开采地下水引起的地面沉降。日本学者宫部直己在 1956 年

发表《论地面沉降》一文指出,地面沉降很难认为必然是由于自然原因引起的。日本资源调查会于 1964 年提出,地面沉降是由于强烈抽汲地下水引起的,完全是人为灾害。Poland J F 和 G H Davis 于 1969 年发表的论文《由于抽汲地下流体而引起地面沉降》已成为经典文献。Helm D C 在 1975 年指出,水文地质学家的一个重要课题是如何预测地面沉降。Poland J F 于 1984 年主编的《因抽汲地下水而引起地面沉降研究指南》一书,已成为指导性科技专著,1991 年 Leake S A 提出了模拟区域地下水水流模型的垂直压密新程序。

我国地面沉降研究是在 60 年代初从研究上海地面沉降开始的。1964 年提出过量开采地下水是引起地面沉降的主要原因,并在上海召开地面沉降的水文地质工程会议,审议了上海地面沉降研究所取得的成果;1980 年在上海举办了全国地面沉降学术讨论会;1990 年在天津召开的全国地质灾害地面变形学术讨论会上,国内学者就上海地面沉降、苏州无锡常州地面沉降、天津市地面沉降、西安市地面沉降、安徽阜阳市地面沉降、豫北安阳东部地面沉降等提出了各自的研究成果。我国的地面沉降研究学者参加了第三届和第四届地面沉降国际学术研究会,研究成果在国际上得到交流。

[收稿日期]2002-06-20;[修订日期]2002-10-30;[责任编辑]李石梦。

[第一作者简介]杨健(1969年-),男,1992年毕业于中国地质大学(北京),获硕士学位,在读博士生,主要从事地质灾害方面的研究。

2 地面沉降成因机理分析

抽汲地下水引起的地面沉降大多发生在大量开采第四系松散沉积物孔隙承压水的地区。其机制是:饱和土体的自重应力是由颗粒和孔隙水共同承担。当抽水引起承压水水位下降时,含水层本身及其上下隔水层中孔隙水压力也随之降低。根据土的固结理论可知,当总应力不变的条件下,饱和土体中孔隙压力减小必然会使土中有效应力等量增大。有效应力即土颗粒所承担的那部分应力,它的增大可导致土体中孔隙的压密而发生地面沉降。根据上海市区的监测资料,隔水层(粘性土)的压缩量可占整个地面沉降量的 80 % 以上,所以研究地面沉降主要是研究粘性土的压缩固结特征。

2.1 含水层的压缩

含水层孔隙水压力的降低为:

$$\Delta u = r_w \Delta H$$

式中: r_w — 水的视密度, $t \cdot m^{-3}$, ΔH — 水位降低值, m 。

由于含水层上部地层重力 P 不变,根据总应力原理,有效应力增值为 $r_w \Delta H$,即:

$$P = (u - \Delta u) + (\sigma' + \Delta u)$$
$$= (u - r_w \Delta H) + (\sigma' + r_w \Delta H)$$

式中: σ' — 土粒间有效应力, $kN \cdot m^{-2}$; u — 孔隙水压力, $kN \cdot m^{-2}$

粒间有效应力的增加,意味着含水层因压力增大而被压缩,在地表表现为地面沉降。

2.2 隔水层的压缩

含水层孔隙水压力降低了 $r_w \Delta H$,因而与上下隔水层之间产生压力差(隔水层压力大于含水层压力)。为了恢复平衡,致使隔水层中的水释放,导致隔水层中孔隙水压力降低,即 $\Delta u_{隔} = r_w \Delta H$ 。同样,在上覆土层重力不变的情况下,这部分压力要转嫁到

粘性土(隔水层)颗粒上,即

$$P_{隔} = (u_{隔} - \Delta u_{隔}) + (\sigma' + \Delta u_{隔})$$
$$= (u_{隔} - r_w \Delta H) + (\sigma' + r_w \Delta H)$$

式中: σ' — 土粒间有效应力, $kN \cdot m^{-2}$; $u_{隔}$ — 孔隙水压力, $kN \cdot m^{-2}$

因此,粘性土隔水层受到压缩而固结,导致地面沉降。

3 评估区地下水动态

3.1 浅层地下水季节性变化

评估区浅层承压水水位季节性变化明显,在一个水文年内,有高水位期和低水位期各一次。地下水水位季节性变化受到大气降水、侧向径流补给、土层渗透性以及开采量大小等诸多因素的影响。评估区北部和南部有较大差异。

北部地区(顺义地区)的上更新统冲—洪积地层粘性土厚度较大且延伸稳定,抽取的承压水不能获得及时补充,因此年内地下水水位(承压水头)变化幅度较大。表 1 即为该地区几处观测井多年的承压水水位变化幅度情况。可知在 1987 年以前,区内浅层承压水并未大量开采,水位基本上属于自然动态特征,年变化幅度较小。一般情况是每年 6~10 月份水位处于上升期,从 10 月至次年 6 月为下降期,一年内最高水位出现在 8~10 月,最低水位在 5~7 月。1987 年以后,由于大量开采浅层地下承压水,水位连年下降,完全改变了自然动态,年变化幅度明显增大,至 2000 年最大年变化幅度达 20 m 以上。由于集中开采地下水,在顺义卫星城至天竺一带形成了区域性降落漏斗,而且漏斗逐年在发展扩大,地下水水位埋深最大达 45 m 以上。此时最高、最低水位出现的月份也发生了变化,一般是每年开采量最小的 1~2 月份最高,开采量最大的 7~8 月份水位最低。

表 1 顺义地区几处观测井水位年变幅资料 h / m

观测井号	位置	1975 年	1980 年	1987 年	1990 年	1995 年	1997 年	2000 年
1022(后改为 34)	米各庄	2.75	1.79	12.94	6.09	13.76	13.80	20.29
1024(后改为 29)	天竺	5.40	5.85	2.29	1.54	6.43	10.16	11.84
1040(后改为 42)	北法信	3.50	2.96	4.90	8.20	15.20	12.50	17.31
47	军营			5.70	9.50	16.30	14.25	15.04

南部地区(通州地区)的上更新统和全新统地层以冲积成因为主,砂层较多,含水砂层间的粘性土较薄且延展不甚稳定。因此抽取的承压水能及时获得上部潜水的越流补给,年内承压水水位变化幅度相

对较小。表 2 所示即为该地区一些观测井多年的承压水水位年变化幅度情况。

3.2 浅层承压水年际变化

由于浅层承压水开采量日益增多,评估区地下

水水位年际变化的趋势是水位越来越低,图 1 是从 1975~2000 年不同年份的承压水水位等值线图,可以看出 25 年来承压水水位下降的一般情况,评估区的北部和南部同样有较大差异。

表 2 通州地区几处观测井水位年变化幅资料 h/m

观测井号	位置	1985 年	1987 年	1990 年	1995 年	1997 年	2000 年
3	北寺	3.10	3.05	4.29	6.88	4.00	6.40
6	疰里	2.27	1.31	3.30	8.05	3.62	2.63
50	前北营	1.41	0.83	1.57	1.88	1.42	1.10

在北部地区的李家桥 一米各庄 一军营 一北法信

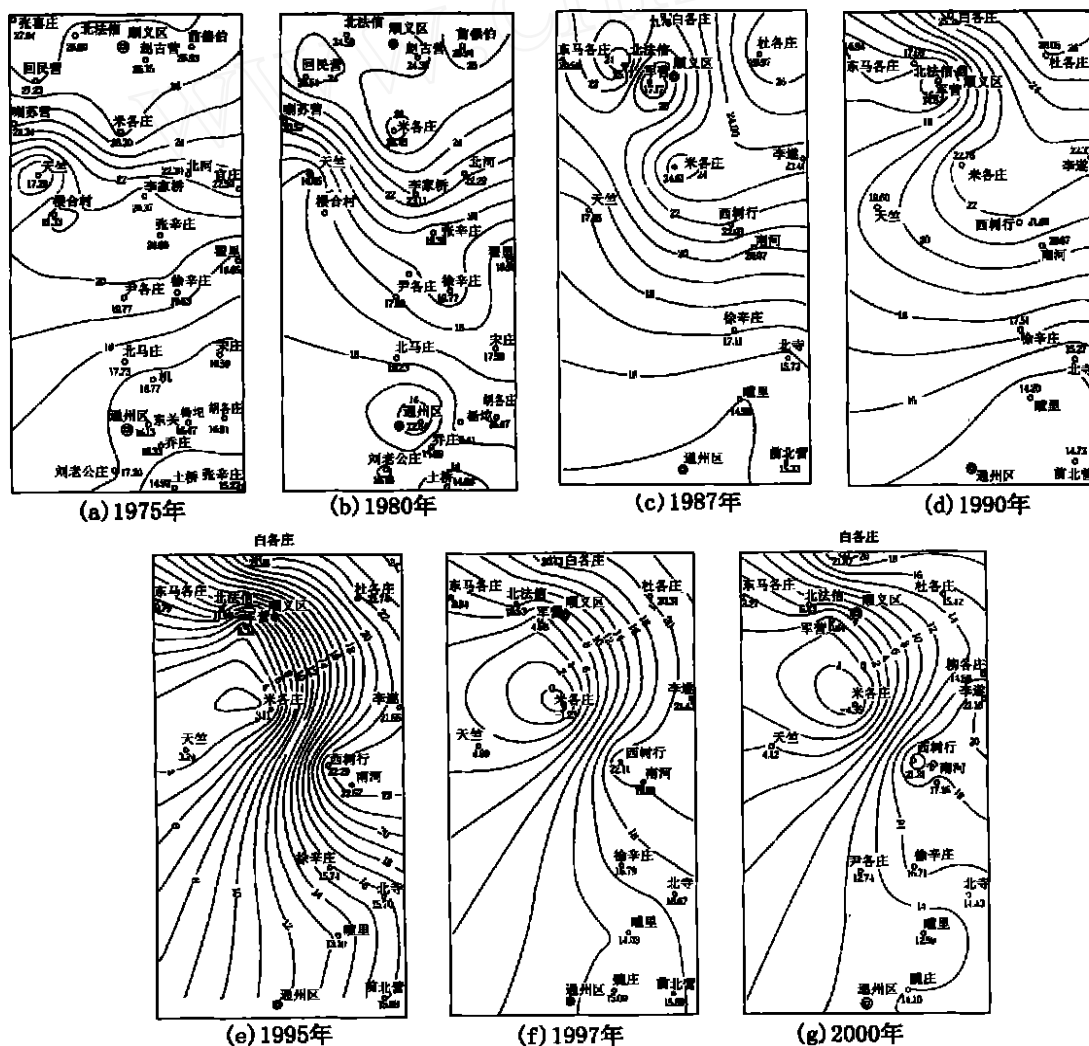


图 1 评估区不同年份浅层承压水水位等值线图/m

4 地面沉降的预测评估

4.1 预测模型的建立和参数的确定方法

地面沉降预测计算模型有水位模型和土力学模型两大类。水位模型是根据多年积累的地下水水位和开采水量资料,采用多元逐步回归分析方法得出

一线,水位下降了6~30 m不等,下降趋势是不均匀的,逐渐形成了以米各庄为中心的沉降漏斗。南部地区(徐辛庄以南),多年来工业和居民集中用水量,浅层承压水入不敷出,开凿深度大于150~200 m的深井大量抽取深层承压水,导致承压水水位大幅度下降,但一般地段由于潮白河故道展布范围广,河网密度大,消耗的地下水能及时获得补给,故承压水水位年际下降的幅度相对较小,没有形成明显的沉降漏斗。

两者之间的关系——回归方程式,即可预估今后一定采水量条件下承压水水位的变化值。上海的回归方程为:

$$S = B_0 + B_1 H + B_2 D + B_3 HD + B_4 H$$

式中: S — 变形; $B_0, \dots, B_4$ — 回归系数; H — 水位变幅; D — 水位作用天数。

这种方法完全是根据一系列随机数值来寻求沉降与各种因素的线性的关系。公式简捷明了,有一定的精度,但不能反映沉降的物理意义。线性寻找需要较多的资料,线性关系也不一定很好。

考虑到评估区内目前未获得多年积累的系统地下水水位和开采水量资料,所以采用土力学模型,根据太沙基一维固结理论,预测计算地面沉降量。该理论基础是有效应力原理,先根据评估区的地层剖面建立了预测地质模型,由已知的累计沉降量、承压

水水位降低值等反算土层的压缩变形参数。然后按预估的水位降低值计算地面沉降量。

评价区浅层承压水层系多层结构,开采地下水时各层间未相互止水,各层水头相互混合。为了便于预测数学模型的建立,将各个含水层和隔水层迭加在一起,表层为潜水含水层,其底板埋深最大为 15 m。根据抽水机井等地层剖面资料,不同地段的概化地质模型见图 2。

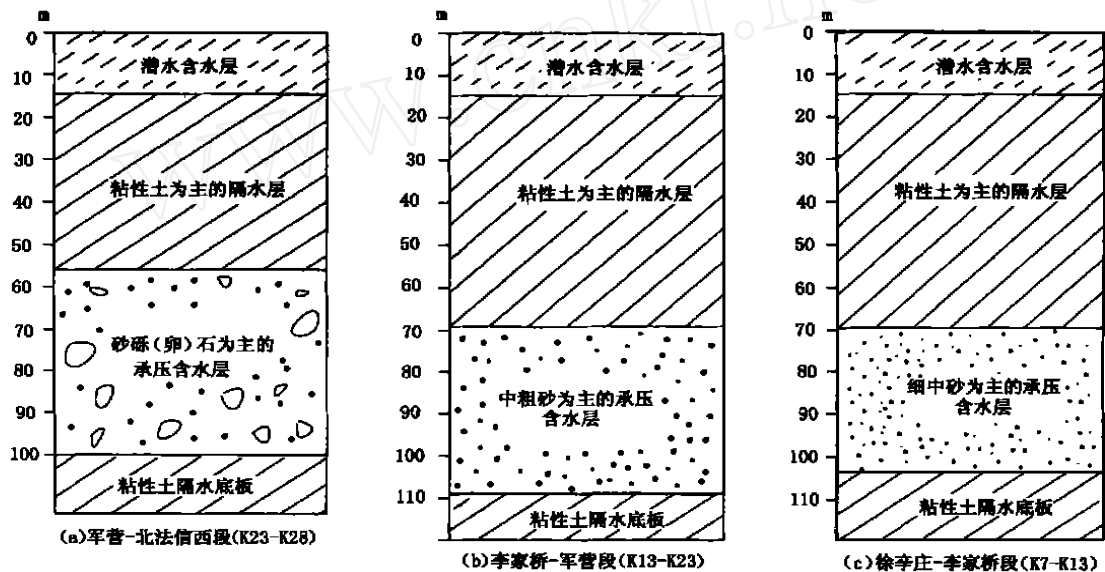


图 2 地面沉降预测概化地质模型

根据太沙基一维固结理论,含水层和隔水层的最终沉降量计算公式分别为:

$$S_{\text{含}} = \frac{\gamma_w \cdot \Delta h \cdot H_{\text{含}}}{E}$$

$$S_{\text{隔}} = \frac{a_v}{2(1 + e_0)} \cdot \gamma_w \cdot \Delta h \cdot H_{\text{隔}}$$

式中: $S_{\text{含}}$ 、 $S_{\text{隔}}$ 分别为含水层和隔水层的最终固结沉降量; Δh 为承压水头的降低值; $H_{\text{含}}$ 、 $H_{\text{隔}}$ 分别为含水层和隔水层的厚度; E 为含水层(砂砾)的弹性模量; a_v 、 e_0 为隔水层(粘性土)的压缩系数和初始孔隙比; γ_w 为水的容重。

含水层和隔水层二者的固结沉降量之和,即为地面沉降的总量。

以上计算公式中,土层的变形参数 E 、 a_v 至关重要,它直接影响计算结果的精确性。这两个参数可以通过已知的累计地面沉降量及相应的承压水头降低值等参数,由上述二式反求获取,即

$$E = \frac{\gamma_w \cdot \Delta h \cdot H_{\text{含}}}{S_{\text{含}}}$$

$$a_v = \frac{2 S_{\text{隔}} (1 + e_0)}{\gamma_w \cdot \Delta h \cdot H_{\text{隔}}}$$

根据上海等地的经验值并结合北京市平原区土层实际情况,含水层和隔水层占总沉降量比值分别为 30 %和 70 %。

4.2 预测步骤及计算

1) 根据 1987~1997 年累积地面沉降量反求土层的变化参数:选择北法信、军营、吴家营、米各庄、李家桥和徐辛庄 6 个地点进行计算(粘性土的初始孔隙比取 0.65)。计算结果列于表 3 中。

2) 计算 1997~2000 年累积地面沉降量

由所取的不同地点土层参数,根据 2000 年各点观测井的平均水位资料,利用以上公式计算求得的 1997~2000 年累积地面沉降量列于表 4 中。

这样,自 1987 年至 2000 年期间拟建公路沿线地面沉降量较大的各个点,其累计沉降量分别是:北法信 63mm;军营 130 mm ;吴家营 223 mm ;米各庄 217 mm ;李家桥 140 mm ;徐辛庄 88 mm 。

表 3 土层变形参数

地点	含水层厚度 $H_{\text{含}}/\text{m}$	隔水层厚度 $H_{\text{隔}}/\text{m}$	承压水头降低 值 $\Delta h/\text{m}$	累积沉降量/ mm			土层变形参数	
				S	$S_{\text{含}}$	$S_{\text{隔}}$	砂砾弹性模量 E/MPa	粘性土压缩系数 α_v/MPa^{-1}
北法信	45	40	15	50	15	35	450	0.019
军营	45	40	13	100	30	70	195	0.044
吴家营	40	55	21	200	60	140	140	0.040
米各庄	40	55	26	200	60	140	173	0.032
李家桥	40	55	2	100	30	70	27	0.21
徐辛庄	35	55	2	70	21	49	33	0.15

表 4 1997~2000 年累积地面沉降量

地 点	承压水头降 低值 $\Delta h/\text{m}$	含水层累积沉 降量 $S_{\text{含}}/\text{mm}$	隔水层沉降 量 $S_{\text{隔}}/\text{mm}$	总累积沉降 量 S/m
北法信	4.09	4	9	13
军营	3.84	9	21	30
吴家营	3.50	10	23	33
米各庄	3.12	7	17	24
李家桥	0.80	12	28	40
徐辛庄	0.50	5	13	18

表 5 S 计算结果

地 点	承压水头降 低值 $\Delta h/\text{m}$	含水层累积沉 降量 $S_{\text{含}}/\text{mm}$	隔水层沉降 量 $S_{\text{隔}}/\text{mm}$	总累积沉降 量 S/m
北法信	6	6	14	20
军营	8	18	43	61
吴家营	12	34	80	114
米各庄	12	28	64	92
李家桥	2	30	70	100
徐辛庄	1	10	26	36

3) 预测今后 10 年内累计地面沉降量
根据拟建公路沿线徐辛庄以北地段近 10 余年来浅层承压水水位降低而还未采取有效措施限制开采地下水的现状,假定水位降落中心地段吴家营、米各庄一带再降低 12 m,北法信、军营一带分别降低 6 m、8 m,南侧李家桥一带降低 2 m,计算累积地面沉降量 S_{10} 计算结果列于表 5 中。加上 2000 年以前的沉降量,则 1987~2010 年各地的累计沉降量分别是:北法信 83 mm;军营 191 mm;吴家营 347 mm;米各庄 309 mm;李家桥 238 mm;徐辛庄 123 mm。

利用上述方法,也可估算其他地段 1987~2010 年累积地面沉降量。编绘出了评估区 1987~2010 年累积地面沉降等值线图。为北京市平原区水资源的合理利用、工程建设及灾害治理提供依据。

[参考文献]

[1] 刘传正. 环境工程地质学导论[M]. 北京:地质出版社,1995.
[2] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
[3] 张 梁. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京:地质出版社,1999.
[4] 肖和平. 地质灾害与防御[M]. 北京:地震出版社,2000.
[5] 施雅凤. 中国自然灾害灾情分析与减灾对策[M]. 武汉:湖北人民出版社,1992.

LAND SUBSIDENCE EVALUATION FOR CONSTRUCTION LAND
IN THE PLAIN AREAS OF BEIJING

—by the example of subsidence areas at Jingha - Jingmi express way section

YANG Jian, LI Zhi - yi, CHEN Qing - shou
(China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract :There is a great amount of groundwater resources in store in the plain areas of Beijing. But with the progress of urbanization , the growth of population and the economic development , the groundwater has been excessively exploited , which has caused large - area land subsidence. At the present , land subsidence has been hampering the economic construction as one of the major geological hazards in Beijing area. This paper calculates land subsidence value using Terzaghi 's consolidation theory. A geological model is built according to the strata profile of the investigated area. Compressive deformation parameters of the soil are reversely calculated with known accumulated settlement and confined water depression value. Land subsidence value is calculated according to estimated water depression value.

Key words :land subsidence ,groundwater exploitation ,geological model