

论地面沉降及其防治措施

左 建 孔庆瑞

(沈阳农业大学)

提要: 本文在综合近年来国内外地面沉降研究的基础上[1], 分析了由于抽汲地下水而导致的地面沉降的机理、成因、以及防治措施。

关键词: 地面沉降, 粘土释水, 防治措施

地面沉降是指地壳表层局部性整体的向下变位及其结果, 其特点是以地壳表层一定范围内的地表铅直向下变位为主, 间有少量水平位移。地面沉降可在自然营力作用下, 又可在人类的活动中形成, 随着工业的迅速发展, 人类对天然资源的需要量越来越大, 从地下开采出大量地下水、油、气等矿产。根据水准测量, 一些国家, 尤其人口集中的大城市及其邻近地区, 如美国加利福尼亚州, 日本新潟, 意大利的威尼斯以及中国上海、常州等, 相继发生了地面沉降, 并严重地危害了人们生活, 目前世界上地面沉降现象非常普遍, 危害严重, (表1), 经过三十多年研究认为, 引起地面沉降的主要原因是大量开采地下水、石油、天然气, 由于水位下降导致粘性土层及砂质含水层均被压紧的结果。[2]

1 地面沉降形成机理的研究

半个世纪以来, 国内外有关人员对地面沉降的形成原因和机理进行了深入的探讨和研究。研究表明, 大量抽取地下水、油、气是地面沉降的主要原因, 地下水开采, 地下水位的变化与地面沉降速率明显相关。[2] 大量资料表明, 地下水开采与地面沉降在时间, 地域以及地下岩土体的层次和分布上有直接关系。

关于地面沉降形成机理, 国内外学者如美国的波伦 (Poland J.F), 洛夫格伦 (Logre B.E), 日本的村山朔郎、奥村辰郎以及我国上海地质处, 中国科学院等普遍认为, 土的经典固结理论适用于地面沉降的机理分析。

土的经典固结理论是1925年由太沙基提出来的, 他认为由饱和土构成的地层, 其覆盖层引起的总压力 P_0 被孔隙水压力 P_u 和有效应力 P_s 共同承担, $P_0 = P_u + P_s$, 土层中水量减少, 孔隙水压力减小。假定 P_0 不变, 则粒间压力 P_s 增加, 使具有一定孔隙度的土体中颗粒重新排列, 发生压密。砂类土排水后的压密变形是迅速的, 粘性土, 其排水固结压缩量较大, 且相对于水位下降, 其固结压密有一定的滞后性。有关材料计算示例表明,

本文1987年5月11日收到

20米厚的地基粘性土层，在相同荷载作用下，其正常固结与超固结状态下的沉降量之比为25.8:7，这说明了超固结土的低压缩性。

关于常州市地面沉降的研究，常州地区北临长江，地势北高南低，基底地貌为一倾向北，轴向东北的断陷凹地。

表1

世界上地面沉降区简表

国家	美 国		日 本			意 大 利		墨 西 哥	中 国		
地 区	圣金华流域	长滩市	东 京	大 阪	新 泻	波河三角洲	威尼斯市	墨西哥市	上海市	天津市	台北市
累计沉降量 (m)	9.0	9.5	4.6	2.88	2.65	3.2	0.15	9.0	2.63	2.13	2.0
最大沉降率 mm/年	366	710	200	163	530			420	150	150	

新生代以来，在凹地内沉积了二百米左右的松散沉积物（表2）。岩性在垂向上的变化，可将沉积物分为上、中、下三段：其中1—6层粘性土，累计厚度为125m，占总厚度65~70%左右；第四系粘土层的累计厚度，占全部粘性土层厚度的55%以上。所有粘性土层除亚砂土层外，均粉土质亚粘土或粉土质粘土，成因类型以湖积为主，本区自早更新世以来，各世几乎都以下降运动开始，而以上升运动结束。

区内含水层有潜水含水层及第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、承压含水层（简称Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、承压）。潜水与Ⅰ承压之间有明显的水力联系，民井、浅井均汲取这两层地下水，Ⅰ承压厚度变化较大，由南向北递增，主要由细、中砂组成，并直接与长江连通，接受长江水的补给（图1）。为本区主要开采层，已形成区域性水位降漏斗，Ⅱ承压由中、粗砂组成南

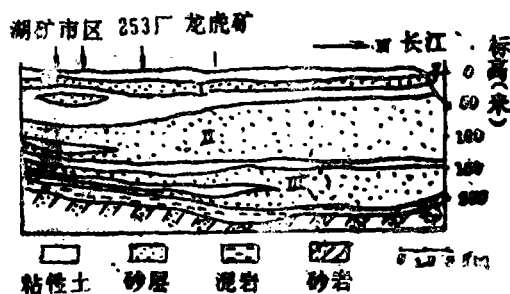


图1 承压含水层示意图

表 2 地层层序表

分段	时代	底深 (m)	层 号	沉 积 相	岩 性
上 段	Q ₄	20		湖 相	
			1	泛 滥 相	粉质亚砂土
			潜 水		
中 段	Q ₃	54	I 承 压	湖 沼 相	粉 细 砂
	Q ₂	84	3 2	湖 相	粉质亚粘土
			4	河 湖 相	泥质亚粘土
	Q ₁	110	5		
			I 承 压		
下 段	N	129	6	湖 相	粉质粘土
		186	II 承 压		中 粗 砂
	E				泥岩及砂岩

薄北厚，目前虽少量开采，但已形成水位降落漏斗。^[4]

该区主要开采 I 承压含水层的水，该层含水层的天然径流条件较差，经用断面法估计长江水的补给量仅约 0.2 亿立方米/年，为目前年开采量 18% 左右，所以从 1957 年开采 I 承压水以来，水位降幅逐年增大，地下水位埋深由接近地表 3 m 降至目前 60 m 左右，地面沉降亦随之发生发展（表 3），沉降漏斗波及全市范围，面积达 200 km² 左右。

粘性土释水压密程度决定于它的压缩性，对粘性土压缩性的评价，这里是按沉降压缩系数 (aP_0) 区分的，所谓 (aP_0)，乃是在压缩曲线上相当于土层自重压力 P_0 那一点切线的斜率，这与通常用压缩系数 (a_v) 来评价土的压缩性是不同的，它考虑了由水位降在土层内引起有效应力增量所造成土层的释水压密，与由土层自重压力的固结作用之间的关系，按 aP_0 的大小，将该区全部粘性土层的压缩性分为三类：^[6] 2 层淤泥质亚

表 3

地面沉降表

年 份	开 采 量 (亿方/年)	漏斗中心 水位埋深 (m)	年平均下 降 幅 度 (m)	地 面 降 迹 象
1957—1964	0.174	12.80	1.6	64年开始形成水位降落漏斗
1965—1970	0.406	26.60	2.3	67年发现井管上升
1971—1975	0.631	41.21	3.12	78—79年水准测量沉降
1976—1978	0.923	58	4.2	最大达89mm/年全市形成沉降漏斗
1979—1980	1.011	61	4.42	79—80年沉降漏斗达137mm/年
1980—1981	1.095	66	5.8	沉降为90.08mm/年

粘土和5层亚砂土为〔I〕类土, 属于中压缩性土, $aP_0 = 0.03 \text{ cm}^3/\text{kg}^\pm$; 1、3、4层亚粘土为〔II〕类土, 属亚低压缩性土, $aP_0 < 0.005 \text{ cm}^3/\text{kg}$; 6层粘土及C承压水中的三层粘土夹层为〔III〕类土, 属低压缩性土, $aP_0 < 0.005 \text{ cm}^3/\text{kg}$, 各类土的物理力学性质(表4)。

表 4

各类土的物理学性质

层 号	岩 性	含 水 量 (%)	容 重 g/cm^3	比 重	孔 隙 比	容 限 (%)	塑 性 (%)	液 性 指 数 IL	压 缩 系 数 (cm^2/kg)	固 结 系 数 $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Sec}$
1	粉质亚粘土	24.3	2.01	2.71	0.67	38.1	19.7	0.246	0.009	5.54
2	泥质亚粘土	32.0	1.95	2.71	0.80	35.1	21.1	0.612	0.009	2.82
3	粉质亚粘土	24.3	2.04	2.74	0.68	36.0	20.3	0.281	0.065	3.18
4	粉质亚粘土	25.1	2.02	2.71	0.68	38.1	21.1	0.247	0.0089	4.44
5	粉质亚粘土	29.5	2.00	2.74	0.70	32.2	21.2	0.780	0.0080	17.10
6	粉质粘土	21.8	2.05	2.70	0.60	47.1	21.0	0.160	0.0039	2.25

从室内一些试验资料表明本区粘土层的释水压密特性有以下情况。

第五层泥质亚砂土层,属中压缩性的固结土,厚度一般在5—10m以上,受压后释水很快完成,反映出基本上为主固结特性。它位于Ⅰ承压顶板,在Ⅰ承压水位降作用下,所受的附加应力增量大于它之上的其它土层,故在主固阶段它的释水压密亦较之其上的其他土层为大,释出的水又直接排入Ⅰ承压,因而对Ⅰ承压的水质有一定影响。在压缩试验还表明,荷载小于自重压力时,该土层的释水量少、压缩变形量亦小,当逐级加荷至大于 P_0 后,释水迅速且量大,压缩变形量增加很快,以后又随压力的增加,释水和压密量相对逐渐减小,压至 15.07 kg/cm^2 共历200小时,释水量占总压密体积的8.0% (图2)。

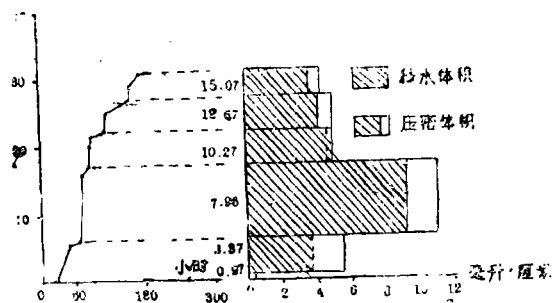


图2 载荷历时 释水量及压密体积

砂层的压缩变形要视砂的矿物成分,磨圆分选性和粘粒含量多少等因素而定。一般而言,若砂的成分粗砂和砾石,则压缩量很小,且主要是弹性变形,又是可缩的;如为含有泥质,粘粒的砂层,则压缩量增大,非弹性变形分量亦大,并以基本上没有或小的时间滞后效应区别于粘土的释水压密特性。

该区的三层承压含水砂层除含有多量泥质外,其矿物成分等情况如表所示。就Ⅰ承压

表5

各层矿物成分百分比

含水层	代表深度(m)	矿物成份百分比含量(%)				备 注
		石 英	长 石	暗色矿物	岩 屑	
Ⅰ 承压	25.2	48	47	5		
Ⅱ 承压	87.6	48	48	2	5	长石大部分高岭土化 暗色矿物 绿泥石化
		45	30	10		
		60	40	15		
Ⅲ 承压	167.1	40	55	1		
		45	55	1		

而言,开采后所加的附加压力最大,它本身还含有粘性土的透镜体。为此,估计其具有一定的非弹性变形。

2 地面沉降计算和预测的理论研究

国内外目前对地面沉降的预测,多数采用一维固结模型,即主要考虑由孔隙水压的增减决定土层沉降量,但由于某些土层具有流变性质,因而计算结果不甚理想。墨西哥巴迪劳(Badillo E.J.)试图将非线性一元理论应用于抽水压密计算中,但现在仍于室内试验与理论性探讨中。另外,从1975年起,上海地质处在中国科学院武汉岩土力学所协助下,亦研究土体流变特性的有限单元计算。地面沉降计算中考虑土的流变特性及其研究,是一个非常重要的研究方向。

目前国内外常用的计算方法有以下几种:

2.1 实测参数法

这种方法是应用固结理论推导公式,土性参数根据大量的实测资料(水位,沉降资料)来反算。1969年赖利(Riley F.S.)提出了以现场实测的水位,沉降资料,通过应力(水位)一应变(变形)作图分析,反算现场土层的贮水系数(S_s),进而应用于地面沉降(贮水系数 S_s :指水头每次变化所引起的土层变形量)。当反算得出 S_s 值后,根据公式: $S_{\infty} = \Delta P \cdot S_s \cdot H$ 计算土层最终沉降量。^[6]上海市地面沉降计算中,土性参数也基本上根据现场地面沉降,水头变化实测值反算而求得,并采用了单位变形量法;应力一应变关系法预测地面沉降,因而收到了较好的效果。对于用仅设地面水准点和某一含水层或若干混合开采的含水层的水头来观测地面沉降区时,以上述方法进行尝试是有很大大意义的。

2.2 数学法和经验法

地面沉降如果被看成是一个随机现象,就可以用随机数学的方法来研究,并预测地面沉降。另外,把地面沉降量与地下水开采量、水头变化之间的关系视为模糊关系,也可以应用模糊数学研究地面沉降量、地下水位变化时间之间的关系,同时也应考虑土层的地质条件。

日本佐藤等人从数学统计观点出发,利用水位与实际沉降量资料,提出了一种估算地面沉降的时间系列法。此方法应用于大阪等地区的地面沉降预测,效果良好。

另外普罗柯波维奇(Prokopyevich N.P.)在计算加州最终残余沉降时,利用了经验指数函数方法预测地面沉降,其公式如下:

$$Z - Y = Ae^{-Bt}$$

式中:Z—最终沉降量;Y—某时刻沉降量;A、B—待定系数。这个方法只在沉降速率稳定时才宜使用。

日本福岗正三利用了太沙基与弗劳里许所建议的图解法,同时又考虑二次固结,由总沉降量和固结时间关系,做出了预估沉降—时间关系曲线,与实际值接近。

以上可见数值方法应用于地面沉降的计算预测,能够获得一定的效果。对于地面沉降的防治有一定的实际意义。

3 地面沉降防治措施的研究

抽取地下水所导致的地面沉降,给工农业生产、人民生活和城市建设带来了许多严重的危害和损失。国内外对此都采用了一些防治措施,并取得了一些明显效果,但也随之而出现了新的问题。目前,国内外一般采用以下几种防治措施:

3.1 合理控制地下水的开采或以地表水代替地下水

从60年代起,美国、日本等工业发达国家就由政府部门制定各种政策、法令,限制地下水的开采,甚至使用地表水代替地下水。日本东京市从利根川取水,大阪市则由淀川取水,使地面沉降大为缓和。我国上海市从1963年开始,首先采取了以地表水代替地下水,一水多用,综合利用等,收到了明显效果。

3.2 人工补给地下水

国内外一些严重的地面沉降区均用人工的方法向被开采的含水层中灌水或压水,使含水层的水位保持稳定。我国上海市采取了限制地下水开采及人工回灌等措施之后,地面沉降基本上得到了控制,有些地面沉降较大的地区甚至出现了一定的回弹。1963—1974年间,上海市沉降量最大的地区,还累计回弹了35毫米。但随着人工回灌,也出现了注水层堵塞和损坏以及注水水源的水质恶化等问题。

3.3 对地面沉降采取其它治理措施

除上述预防措施外,对地面沉降严重区还采取了如下的治理措施:

3.3.1 在沿海地面沉降地带,修筑挡潮堤,防洪堤,人工填高地面。

3.3.2 调整城市给、排水系统。

3.3.3 调整地下水开采层位。

地面沉降是一个复杂的水文工程地质问题,近些年来,国内外对地面沉降的研究,已取得了很大进展,但是,随着工农业的迅速发展,生产、生活用水的日益增加,地下水开采也必然加大,许多城市和地区地面沉降日趋严重,因此,对于地面沉降有待于进一步深入研究,并对其进行预防和治理。

参 考 文 献

- 〔1〕 上海市地质处编选,1978年,国外地面沉降论文选译,地质出版社。
- 〔2〕 钱寿易等,1981年,上海地面沉降计算,岩土工程学报第三期。
- 〔3〕 苏河源 1979年,抽灌作用下上海土层变形特征的探讨,工程学报第二期。

- [4] 庞丙乾, 1981年利用同位素组分研究常州地下水资源的初步尝试, 江苏地质, 第四期。
[5] 武汉地质学院 1980年, 工程地质学上册。
[6] P.BAttewell, etl, PRINCIPLES OF ENGINEER ING GEOLOGY, Chapman and hall, london 1976.

THE VIEW OF EARTH SUBSIDENCE AND ITS PREVENTION METHOD

Zuo Jian Kong Qingrui

(Shengyang Agricultural College)

Abstract: Basing on a combination of investigation data obtained athome audabroad in recent years, this paper analgsed the mechanism , the origin and the treatment measures of the land Subsidence Caused b Pumping groundwater. It is now recognized that the soil mass deformation is surely due to the decline of groundwater level.

keywords: Surface subsidence, Control