

上海区域地面沉降模型中土层变形特征研究

Study on the deformation characteristics of soil layers in regional land subsidence model of Shanghai

叶淑君¹, 薛禹群¹, 张云¹, 李勤奋², 王寒梅²

(1. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 上海市地质调查研究院, 上海 200072)

摘要: 根据上海大量地面沉降和水位观测资料, 结合室内实验, 首次系统分析了上海过量开采地下水引起地面沉降过程中各土层的变形特征及地面沉降在空间、时间上的分布规律, 发现上海各土层变形特征差异很大, 同一土层在不同地点不同时期变形特征差异也很大。地面沉降受多种因素影响呈现出空间分布的复杂性, 土层压缩量的垂向分布, 从 20 世纪 90 年代之前以浅部土层压缩为主转变为 90 年代之后以深部和浅部土层压缩为主。这些研究成果将为上海区域地面沉降模型中各土层沉降模型的合理选择提供依据。

关键词: 区域地面沉降模型; 变形特征; 弹性变形; 塑性变形; 蠕变; 滞后

中图分类号: P 642.26

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)02-0140-08

作者简介: 叶淑君 (1974-), 女, 湖北浠水人, 讲师, 博士, 主要从事水文地质、环境地质教学与科研工作。

YE Shu-iun¹. XUE Yu-qun¹. ZHANG Yun¹. LI Qin-fen². WANG Han-mei²

(1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Shanghai Institute of Geology Survey, Shanghai 200072, China)

Abstract: A large number of observation data of land subsidence and underground water level and some results of laboratory soil test are used to analyze the deformation characteristics of soil layers in Shanghai. It's the first time to comprehensively analyze the deformation characteristics of all soil layers and the spatial and time distribution of land subsidence caused by excessive pumping of groundwater. It is found that the deformation characteristics of soil layers are rather different from each other, and the deformation characteristic of some soil layer is different at different time and in different place. Land subsidence is influenced by many factors, so that its spatial distribution is complex. The subsidence mainly occurred in shallow soil layers before nineties of the last century, but mainly occurred in deep and shallow soil layers since nineties of the last century. The subsidence model of every soil layer can be properly developed according to these results.

Key words: regional land subsidence model; deformation characteristic; elastic deformation; plastic deformation; creep; delay

0 引言

上海地面沉降发现于 1921 年。20 世纪 60 年代以前, 上海地面沉降速度很大, 1963 年开始先后采取多种措施控制地面沉降以来, 沉降速率明显减小, 所以 1921~1965 年为地面沉降快速发展时期, 其中 1957~1961 年最为剧烈, 年均沉降 98.6 mm, 到 1965 年最大累计沉降达到 2.63 m (西藏路北京路口)。1966 年至今为缓慢沉降时期, 其中 1966 年~1971 年期间出现微量回弹, 随后出现微量沉降, 但在约 1990 年后沉降速度又开始加快。

前人^[1-7]根据地面沉降及水位观测资料对上海土层变形特征进行过一些研究, 但这些研究或限于某些土层, 或限于某个局部地区, 或限于资料时间, 未能反映上海全区所有土层的总体变形特征, 以及深部土层随时间延续在近 20 年出现的新的变形特征。

本文根据上海大量地面沉降和水位观测资料, 结合室内实验, 首次系统分析了上海过量开采地下水引

起地面沉降过程中各土层的变形特征及地面沉降在空间、时间上的分布规律, 发现了一些前人未曾发现的现象和一些与传统观念不同的特征。20 世纪 80 年代中期以来, 潜水含水层、第一、二、三、五承压含水层和第三、五、六弱透水层土层变形特征类似, 变形以弹性变形为主; 第一、二弱透水层变形特征类似, 变形以塑性变形为主, 存在蠕变和变形滞后现象。这些土层的变形特征在不同地点基本一致。第四弱透水层和第四承压含水层在第四承压含水层区域降落漏斗边缘, 变形基本为弹性变形, 塑性变形量小, 变形滞后不明显, 但在第四承压含水层区域降落漏斗中部, 变形特征在约 1991 年前与漏斗边缘处类似, 在约 1991 年后则以塑性变形为主, 弹性变形量小, 存在蠕变和变形滞后现象。这两层土变形特征的空间变异与地下水降落漏斗之间的关系, 以及第四承压含水层在降落

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40172082); 国家自然科学基金重点项目 (4033045); 博士点基金 (20010284002)

收稿日期: 2004-01-15

漏斗中部压缩量很大等都是前人未曾发现的出现于上世纪 90 年代以来的新现象。第四承压含水层的砂土有较大的塑性变形并且存在明显蠕变也是新发现的与传统观念不同的特征。

到目前为止, 上海先后建立了多个地面沉降模型[8~11]。这些模型在前一阶段的地面沉降预测预报中起了很大作用, 但部分模型[8~10]对所有土层统一采用线弹性模型无法完整刻画土层的变形特征, 部分模型[11]考虑了土的流变特性, 但受资料限制未能对上海所有土层建立模型。只有针对各土层变形特征建立各自适合的沉降模型, 而不是对所有土层采用同一种模型, 才能保证地面沉降模型模拟的可靠性和准确性。本文旨在全面系统分析上海超采地下水引起的地面沉降过程中各土层变形特征及其随空间和时间的变化, 为区域地面沉降模型中沉降模型的合理选择提供依据。

1 上海土层

上海地下水含水系统由一套第四系松散沉积物组成, 除局部地区因基岩裸露而缺失外, 厚度约 200~350m, 下伏不同时代的基岩。全区第四系厚度从西南向东北方向逐渐增大。第四系松散沉积物由粘土、亚粘土和砂交替组成, 根据岩性不同, 划分为含水层和弱透水层。由于历史的原因上海市地质部门有两个分类系统, 如第四承压含水层(水文地质分类)在工程地质分类中成了第五砂层, 给研究工作带来了很多不便。故将它们统一划分, 从上到下依次为潜水含水层(A0), 第一弱透水层(B1)(根据粘土性质不同又分为第一软土层、第二软土层和第二硬土层, 此外第一弱透水层局部含微承压夹层), 第一承压含水层(A1), 第二弱透水层(B2), 第二承压含水层(A2), 第三弱透水层(B3), 第三承压含水层(A3), 第四弱透水层(B4), 第四承压含水层(A4), 第五弱透水层(B5), 第五承压含水层(A5), 第六弱透水层(B6)(图 1)。上述含水层、弱透水层在局部地区缺失。

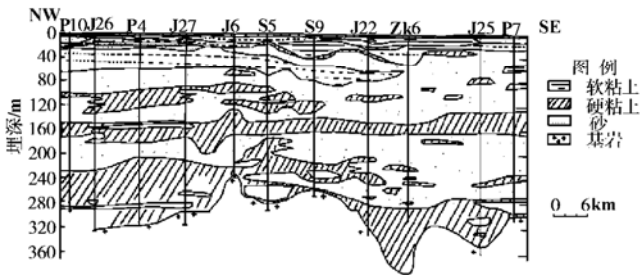


图 1 上海水文地质剖面图
Fig. 1 Hydrogeologic cross section of Shanghai

2 地下水开采与地面沉降概况

过量开采地下水是上海地面沉降的主要原因[12]。

2.1 地下水开采与回灌

上海地区潜水含水层、微承压含水层和第一承压含水层的水质差, 除少量民井开采外, 基本未开发利用。上海地区自 1860 年开凿第一口深井以来, 深井数量及地下水开采量逐年增加, 至 1963 年全市地下水开采量达 2.03 亿 m^3 , 且集中在中心城区及郊区的第二、三承压含水层开采, 从而在中心城区形成水位降落漏斗, 引起严重的地面沉降。自 1966 年开始在中心城区进行地下水回灌, 逐渐压缩第二、三承压含水层开采量, 并调整开采层次, 增加第四、五承压含水层开采量, 使其逐渐过渡为上海的主要开采层。目前第四、五承压含水层开采量分别占上海总开采量的约 70% 和 15%[6]。第四、五承压含水层开采量自 70 年代起不断增加, 地下水位持续下降; 到 90 年代开采量更是急剧增加, 水位大幅下降, 引起深部土层严重压缩变形。图 2, 3 为 1961~2000 年各承压含水层年开采、回灌变化情况。图 4 为 1986 年, 1998 年第四承压含水层等水位线图。

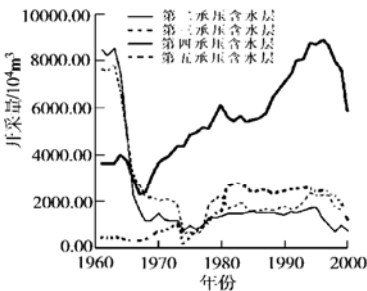


图 2 各承压层年开采量历时曲线
Fig. 2 Discharge per year vs time for each confined aquifer

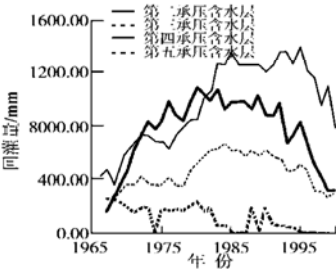


图 3 各承压层年回灌量历时曲线
Fig. 3 Recharge per year vs time for each confined aquifer

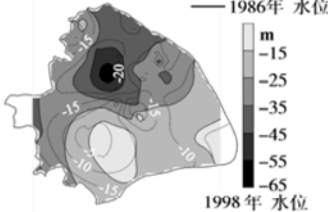


图 4 第四承压含水层等水位线图
Fig. 4 The contour of the water level of the fourth confined aquifer

2.2 上海地面标高的变化

上海市自 1921 年至 1999 年中心城区平均累计沉降量达到 1.9 m ^[13], 而当地的地面高程低, 一般为 $2.2\sim 4.8\text{ m}$ (吴淞基准面), 所以地面沉降带来的危害非常深远。图 5 为水准点测出的市区不同年份地面标高等值线图, 其中图 5(a), (b), (c) 分别对应 1986 年, 1992 年, 1998 年等值线, 均以上海国际饭店为坐标原点。从图中不难看出标高为 3, 4 m 的等值线圈闭面积不断增大, 表明市区地面标高在不断下降。

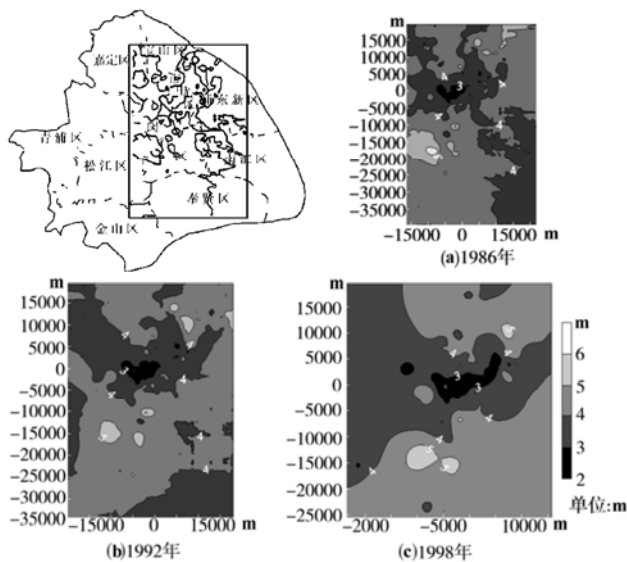


图 5 市区地面标高等值线图

Fig. 5 The contour of land surface elevation

3 土层的变形特征

研究区过量抽取地下水引起含水层尤其是第二、第四承压含水层水位持续下降, 导致各土层有效应力增加, 出现不同程度的压缩。各土层由于岩性、厚度、附加应力、应力历史等不同, 变形特征各异。下面将分别描述各土层自 20 世纪 80 年代中期以来的变形特征, 特征相似的土层归纳到一起。

上海地区地下水采灌具季节性特征, 开采集中于 7~9 月, 回灌集中于 12~4 月, 所以地下水水位呈现出冬升夏降的周期性变化规律, 通常在每年的 3~4 月份水位最高, 8~9 月份水位最低。各土层随地下水水位波动而发生相应的变形。

3.1 潜水含水层, 第一、二、三承压含水层和第三弱透水层

潜水含水层, 第一、二、三承压含水层和第三弱透水层的变形特征相似。20 世纪 80 年代中期以来, 由于这些土层的水位较 60 年代以前总体抬升了, 有效应力一般不超过其前期最大固结压力, 土层压缩性小, 变形以弹性变形为主, 土层随水位升降而膨胀、压缩, 残余的塑性变形很小, 变形和水位变化基本同步。图

6 为分层标 F10-5 监测的第三弱透水层 (厚 13.05 m) 变形与相应的第三承压含水层水位。变形负值表示压缩, 正值表示回弹。

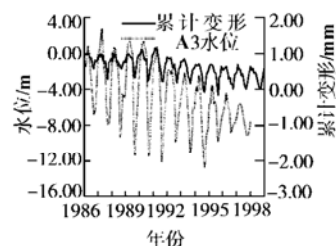


图 6 分层标 F10-5 处 B3 的变形与水位

Fig. 6 The deformation vs water level of B3 at F10-5

3.2 第一、二弱透水层

第一弱透水层主要由第一和第二软土层组成, 有些地区在第二软土层下还有一层硬土层 (压缩性低)。第一软土层为第一弱透水层上段, 主要由淤泥质粘土组成, 属高压缩性土层。第二软土层为第一弱透水层下段, 主要由粉质粘土组成, 有较高的压缩性。第二弱透水层又称第三软土层, 岩性为粉质粘土夹薄层粉砂, 有较高的压缩性。这 3 个软土层是上海的主要压缩层, 它们的变形直接受下伏承压含水层水位变化影响。图 7 是 F4-5-2 分层标监测的第一软土层 (埋深 $11\sim 20\text{ m}$) 的应力 (用第一承压含水层水位表示) 与 1986 年以来累计变形间的关系曲线, 文中所有应力-变形曲线的横坐标为累计变形量, 正值表示回弹, 负值表示压缩, 纵坐标为水位。从图中可以看出, 1991~1992 年土层随水位变化出现周期性的压缩、回弹, 回弹量远小于压缩量, 有较大的塑性变形; 1991~1997 年的应力-变形曲线在水位上升阶段均出现土层的压缩, 尤其是 1993~1997 年, 整个水位上升阶段土层几乎持续压缩, 只是压缩速率相对水位下降阶段减小了, 这一方面说明软土层超孔隙水压力消散慢导致变形滞后于含水层水位的变化^[14,15], 另一方面也与软土层的蠕变有关。顾小芸^[16]、门福录^[17,18]曾通过固结试验证实了上海地区软土层蠕变的存在。第二、三软土层与第一软土层特征相似, 因此第一、二弱透水层变形具有以塑性变形为主, 弹性变形量小, 存在蠕变, 变形明显滞后于下伏承压含水层水位变化等特征。

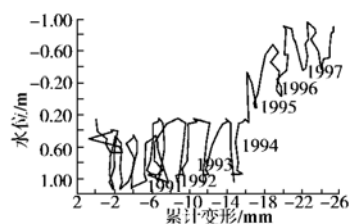


图 7 F4-5-2 分层标监测第一软土层应力-变形曲线

Fig. 7 The stress deformation curve of the first soft soil layer at F4-5-2

3.3 第四弱透水层

第四弱透水层主要由粘土、亚粘土夹粉砂组成, 变形直接受第四承压含水层水位变化影响。图 8 为分层标 F3 - 2 处第四弱透水层(厚 29.26 m)应力 - 变形曲线, 应力用第四承压含水层水位表示, F3 - 2 分层标位于第四承压含水层区域降落漏斗中部, 水位从 1986 年的 -10 m 下降到 1995 年的 -36.85 m, 下降了 26.85 m, 第四弱透水层累计压缩了 32.2 mm。从图 8 可以看出 1991 年以前此处土层基本为弹性变形, 塑性变形量很小; 但 1991 年后塑性变形很大, 土层在水位上升阶段回弹量小, 甚至没有回弹而是持续压缩, 存在滞后现象, 这一方面与土层超孔隙水压力消散明显滞后于下伏含水层水位变化有关, 另外还可能和蠕变有关。图 9 为分层标 F17 - 3 处第四弱透水层(厚 16.28 m)应力 - 变形曲线, F17 - 3 分层标现位于第四承压含水层区域降落漏斗的边缘, 水位从 1986 年的 -23.8 m 下降到 1995 年的 -29.61 m, 下降了 5.8 m, 第四弱透水层累计压缩了 1.8 mm。从图 9 可以看出此处土层基本为弹性变形, 塑性变形量很小。F3 - 2 和 F17 - 3 分层标处第四弱透水层的压缩量差别较大, 这一方面与两处土层的应力历史、水位变化不同有关, 另一方面也与两处土层厚度及压缩性不同有关。图 10 为 F3 - 2 和 F17 - 3 分层标处第四弱透水层的压缩系数的对比, 可见 F3 - 2 分层标处第四弱透水层的压缩性比 F17 - 3 分层标处大得多。第四弱透水层在不同地点变形特征不同, 同一地点不同时期变形特征也不同。

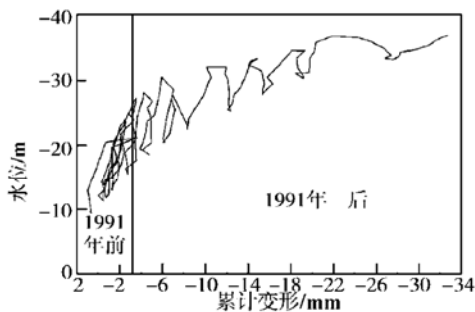


图 8 F3-2 处 B4 应力-变形曲线
Fig.8 The stress - deformation curve of B4 at F3 - 2

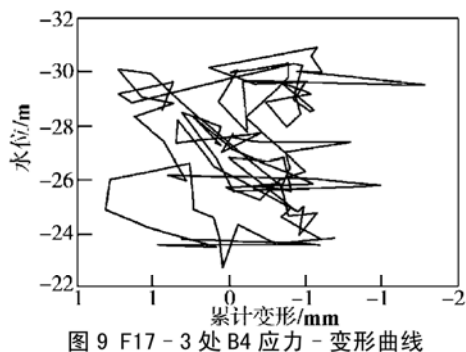


图 9 F17 - 3 处 B4 应力 - 变形曲线
Fig.9 The stress - deformation curve of B4 at F17 - 3

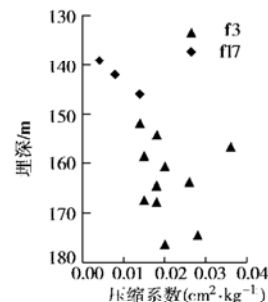


图 10 B4 土层的压缩系数
Fig. 10 Coefficients of compressibility of soil in B4

3.4 第四承压含水层

第四承压含水层主要由细砂、中粗砂组成。F3 - 1 监测了第四承压含水层的变形, 位于第四承压含水层区域降落漏斗中部, 水位从 1986 年的 -10 m 下降到 1995 年的 -36.85 m, 下降了 26.85 m, 这里第四承压含水层厚度为 63.87 m, 累计压缩了 211.9 mm, 应力 - 变形曲线如图 11 所示。从图中可以看出 1991 年以前此处土层基本为弹性变形, 塑性变形量很小; 但 1991 年后塑性变形很大, 土层在水位上升阶段回弹量小, 甚至没有回弹而是持续压缩, 变形存在着滞后效应, 这一方面可能与土层的蠕变有关, 另一方面可能与超孔隙水压力消散慢有关。

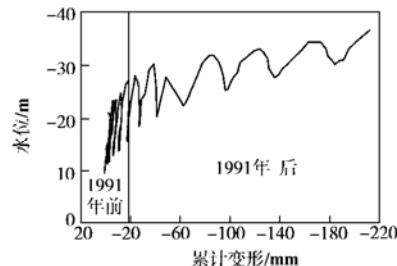


图 11 F3 - 1 分层标处 A4 应力 - 变形曲线
Fig. 11 The stress-deformation curve of A4 at F3 - 1

我们取第四承压含水层砂土样作室内压缩试验, 证实了蠕变的存在。实验土样的渗透系数为 $(4.8\sim33.5)\times10^{-4}$ cm/s, 在单向压缩时孔隙水压力可立即消散, 随时间增长的变形为蠕变变形。实验结果表明在分级加载条件下, 土样变形随时间延长而增大, 且随着加载时荷载水平的提高, 其蠕变变形量增大, 达到稳定的时间也增加(图 12)。另外根据 J4 钻孔资料, 组成第四承压含水层的砂层中含有较多的粘粒(图 13), 所以第四承压含水层砂土在压缩试验中表现出明显的蠕变。我们取上海第四承压含水层的砂土进行了单向固结试验。图 14 是第四承压含水层的砂土的室内单向压缩的分级反复荷载试验曲线。从图中可以看出在一定的荷载范围内反复加卸荷, 经过 2, 3 次的循环后加载压缩和卸载回弹的变形非常接近, 即表现为弹性特征; 但一次加卸载试验时砂土的回弹模量和压缩模量相差很大, 两者的比值达到 5~7, 也就是说, 其

回弹变形要比压缩变形小得多,反映了砂土变形的塑性特征;因此如果水位持续下降,使有效应力大于其前期最大固结应力时,砂土变形主要为不可恢复的塑性变形。这与通常认为的砂土变形主要为弹性变形的特征不同。

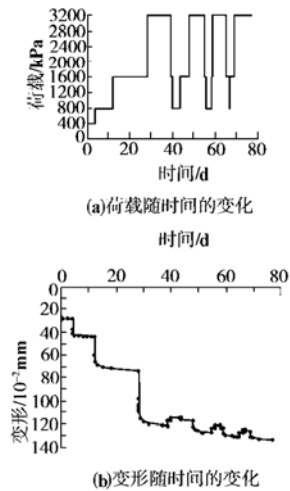


图 12 单向压缩条件下第四承压含水层砂土的变形特性

Fig. 12 The deformation of sand in the fourth confined aquifer under the condition of uniaxial compression

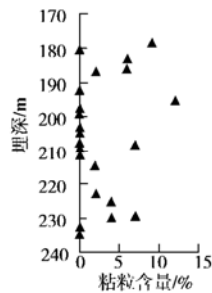


图 13 J4 钻孔 A4 内砂土中粘粒含量

Fig. 13 The clay content of sand soil in A4 at borehole J4

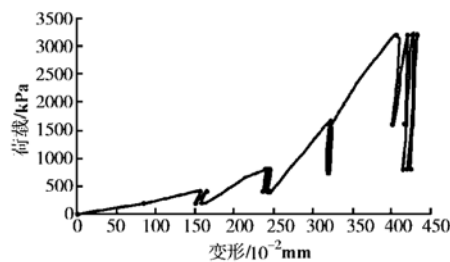


图 14 A4 土样分级反复加卸载试验曲线

Fig. 14 The deformation of sand in A4 in cycles of loading and unloading

第四承压含水层变形表现出弹性变形、塑性变形和蠕变,并以塑性变形为主,除与组成第四承压含水层的砂土具有这种变形特性有关外,还与粘土夹层的弹性变形、塑性变形和蠕变有关。根据 F3 分层标处 J4 钻孔资料,虽然第四承压含水层主要由细砂和中粗

砂组成,但在埋深 215.8~220 m 和 235.47~240.56 m 处各存在一段亚粘土夹层,共 9.29 m。F3 分层标处第四承压含水层变形的滞后应该与这两段粘土层的滞后排水有关。第四承压含水层变形存在滞后效应是粘土夹层滞后排水和砂土及粘土夹层蠕变共同作用的结果。但并非整个上海地区的第四承压含水层都表现出上述复杂的变形特性,在有些地点由于水位变化幅度较小,再加上应力历史有所不同,变形以弹性变形为主。如位于第四承压含水层区域降落漏斗边缘的 F17-2 分层标处,水位从 1986 年的 -23.8 m 下降到 1995 年的 -29.61 m,下降了 5.8 m,第四承压含水层厚度为 52.7 m,累计压缩了 1.0 mm,变形表现出较为简单的弹性变形特征(图 15)。

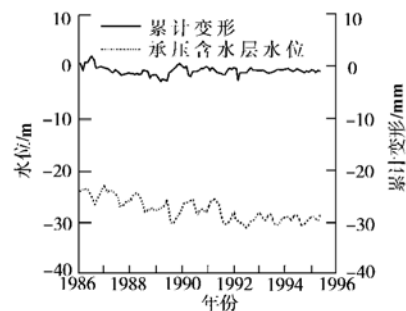


图 15 F17-2 分层标处 A4 变形及相应水位

Fig. 15 The accumulated deformation vs water level of A4 at F17-2

3.5 第五弱透水层、第五承压含水层和第六弱透水层

第五弱透水层、第五承压含水层、第六弱透水层没有单独监测。F10-1 分层标监测了这 3 层总的变形,从中我们可以了解它们的变形特征。图 16 为 F10-1 分层标监测的上述 3 层(厚 84.05 m)的变形和相应的第五含水层水位,可见这 3 层土层变形基本为弹性变形,塑性变形量小,变形滞后不明显。

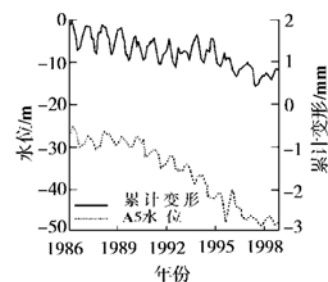


图 16 F10-1 分层标处 B5-B6 累积变形及相应水位

Fig. 16 The accumulated deformation vs water level of B5-B6 at F10-1

4 地面沉降的空间分布特征

上海地区不同地点地面沉降量不同,同一地点不同深度土层的变形量也不同。

4.1 地面沉降的平面分布特征

如前所述, 过量开采地下水导致地下水位下降, 土层有效应力增加, 产生固结压缩。图 17 (a) 为研究区 1998 年 12 月第四承压含水层水位分布, 图 17(b) 为 1986~1998 年累计沉降量分布图, 可见地面沉降中心与地下水位降落漏斗中心比较靠近。由于沉降量大小与可压缩层尤其是粘土层的厚度有关, 即在其它条件相同时可压缩层厚度越大则沉降量越大。图 18 为研究区粘土层总厚度空间分布, 对比图 17 (b) 不难发现市区地面沉降中心与该区粘土层厚度中心靠近。F14 分层标组位于水位降落漏斗和粘土层厚度等值线中心, 位置如图 17, 18 所示。第四承压含水层在这一点的水位标高从 1986 年 1 月 30 日的 -31.23 m 下降到 1998 年 12 月 30 日的 -66.08 m, 该点处粘土层总厚度为 208.73 m, 1986~1998 年地面累计沉降了 310.66 mm。另外一组分层标 F17 则位于水位降落漏斗和粘土层厚度等值线边缘, 位置如图 17, 18 所示, 第四承压含水层在这一点的水位标高从 1986 年 1 月 30 日的 -23.8 m 下降到 1998 年 12 月 30 日的 -29.4 m, 该点处粘土层总厚度为 115.03 m, 1986~1998 年地面累计沉降量仅 141.72 mm。另外 3.3 和 3.4 节曾提到第四弱透水层和第四承压含水层在 1986 年~1995 年间的累计变形量在位于区域降落漏斗中部的 F3 分层标处比位于漏斗边缘的 F17 分层标处大得多。区域降落漏斗的中心、边缘以及中部位置其实从一定程度上代表着区域地面沉降的后期、早期和中期等不同发展阶段, 同一土层处于降落漏斗不同位置则有着不同的应力历史、不同的应力变化, 因而变形特征各异。

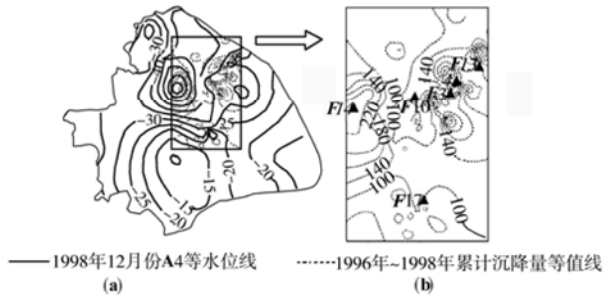


图 17 水位降深与沉降量关系

Fig. 17 Water level vs land subsidence



图 18 粘土层厚度等值线图

Fig. 18 The contour of the thickness of clay

地面沉降分布与地下水位及粘土层厚度分布有密切关系, 但并非完全一致, 表明除此之外还有许多其他因素影响地面沉降, 比如粘土层压缩性的差异, 如上文提到第四弱透水层的压缩性在分层标 F3-2 处就比分层标 F17-3 处大; 具有不同压缩性的土层厚度的差异; 含水层的压缩, 如第四承压含水层的压缩; 以及城市建设等非抽水作用导致的地面沉降等等。多种因素的综合影响使得上海地面沉降的分布比较复杂。

1990 年以后, 大规模的城市建设成为地面沉降的影响因素之一, 在局部地区城市建设导致的浅部软土层的沉降在总沉降量中占有相当可观的比例, 如上海市陆家嘴 3 幢高楼建成后, 2000 年 4 月到 2001 年 4 月 1a 时间使周围 100 m 范围内地面分别平均沉降了 23.1, 26.4 和 63.3 mm^[19]。

第四承压含水层水位持续大幅下降, 导致大多数基岩标记记录的地面沉降速率大致在 1992 年(不同地点年份有所不同)前后迅速增加, 这种速率的增加是连续和渐变的。但城市建设导致的地面沉降速率的增加是短期而且是突变的。

4.2 土层变形量的垂向分布特征

上海地区地下水开采量的变化以及开采层次的调整, 使垂向上各土层的变形速率发生变化, 总的压缩量在各土层中的分布比例也相应改变了。这里将研究区土层在垂向上大致划分为 3 段: 潜水含水层到第二弱透水层为第一段; 第二承压含水层到第四弱透水层为第二段; 第四承压含水层到第六弱透水层为第三段。以 1986 年 1 月~1998 年 12 月分层标数据为例计算了上述 3 段土层 1986 年以来累计压缩量在总沉降量中所占比例。计算结果表明在约 1992 年以前压缩变形主要发生在浅部的第 III 段土层 (54%), 但在约 1992 年以后则主要在深部的第 III 段土层 (59%) (表 1)。表 1 给出的只是所有分层标组的平均值, 单个分层标组的数据和表 1 不同, 但有着相似的变化规律。表 2 以 F4 分层标组为例给出这里垂向各土层的详细数据。若以单位厚度土层的压缩量大小表示土层压缩性, 由表 2 可知不同土层的压缩性差异很大, 如第一弱透水层中的第一软土层单位厚度土层的压缩量为 0.74 mm/m(1992 年前)或 1.08 mm/m(1992 年后)就比其它土层大得多; 但需要注意的是某一土层总的压缩量除了和土层压缩性大小有关外, 还与土层厚度有很大关系, 压缩性小的土层如果厚度很大, 总的压缩量也会很大, 如第一段土层压缩性比第 I 段土层小得多, 两段土层单位厚度压缩量在 1992 年后分别为 0.28 mm/m 和 0.48 mm/m, 但由于第 III 段土层厚度为 159.2 m 远大于第 I 段土层的 88.4 m, 所以 1992~1998 年间累计压缩量第

总之,根据大量地面沉降和地下水位观测资料,并结合室内实验结果,本文全面系统分析了上海 20 世纪 80 年代中期以来各土层的变形特征及地面沉降在时间、空间上的分布规律,发现了一些新的现象和一些与传统观点不同的特征,这些成果为沉降模型的合理选择提供了依据。上海各土层的变形特征非常复杂,建立区域地面沉降模型时,必须全面考虑沉降过程中各土层的变形特征及其随空间和时间的变化,根据各土层不同时期、不同位置变形特征相应地建立不同的弹性、弹塑性或弹塑粘性等沉降模型,而不能对全区所有土层在所有时段均采用同一种模型。

致谢: 本文所有数据均为上海市地质调查研究院提供,特此致谢!

参考文献:

- [1] 钱寿易,顾小芸. 上海地面沉降计算[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(3):1-9.
- [2] Gu X Y, Gong S L, Huang H C, Liu Y. Quantitative study of land subsidence in Shanghai[A]. Proc VI International Congress of IAEG[C]. 1990.
- [3] Gu X Y, Tsien S I. Analysis of Shanghai Land Subsidence[A]. Proc III International Symposium on Land subsidence[C]. IAHS, 1991.
- [4] Gu X Y, Deng W, Xu D N, Liu Y. Computation of land subsidence in Shanghai with secondary consolidation effect[A]. Proc of International conference on soft soil engineering[C]. 1993.
- [5] 佘磊,杨健. 上海浦东地面沉降分析中土层变形面沉降参数分析[J]. 长春地质学院学报, 1997, 27(4): 429-434.
- [6] 魏子新. 上海第四承压含水层应力-应变分析[J]. 水文地质工程地质, 2002, 1: 1-4.
- [7] 顾小芸,冉启全. 上海市浅部土层变形预测与防治措施研究[R]. 中国科学院力学研究所, 1998.
- [8] 比利时列日大学工程地质、水文地质、地球物理勘探实验室,比利时地质调查所,上海经济区地质中心.长江三角洲上海地球第四纪地质、水文地质、工程地质及地面沉降的数学模型研究[R].1989.
- [9] 朱锡冰,佘磊,奚建国,等. 上海浦东新区“地下水水量-水文-沉降联合数学模型”应用[R].1995.
- [10] 李勤奋,方正,王寒梅. 上海市地下水可开采量模型计算及预测[J]. 上海地质, 2000, 74: 36-43.
- [11] Xiaoyun Gu, Qiquan Ran. A 3-D coupled model with consideration of rheological properties, Land subsidence[A]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence[C].Ravenna, 2000, II 355-365.
- [12] 上海市地质地质处. 上海市地面沉降勘察研究报告(1962-1976年)[R]. 1979.
- [13] 上海市地质调查研究院. 上海市区域水文地质调查报告[R].1999: 34.
- [14] Donald C. Helm. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California 1.Constant parameters[J]. Water Resources Research, 1975, 11(3): 465-478.
- [15] Poland J F, et al. Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal[M]. Unesco, 1984. 45-49.
- [16] Xiaoyun Gu, Daneng Xu, Wei Deng. A computing model based on cyclic consolidation test[A]. Land subsidence, Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence[C]. IAHS, 1995, 234: 295-303.
- [17] 门福录. 上海粘土流变性质及地面沉降问题初步研究(一)[J]. 自然灾害学报, 1999, 8(3): 117-126.
- [18] 门福录. 上海粘土流变性质及地面沉降问题初步研究(二)[J]. 自然灾害学报, 1999, 8(4): 123-132.
- [19] 张阿根,魏子新. 上海地面沉降的过去、现在和未来[J]. 水文地质工程地质, 2002, 5: 72-75.