

北京地面沉降区土体变形特征

田 芳¹ 郭 萌² 罗 勇¹ 周 毅¹ 贾三满¹

(1. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195; 2. 北京市地质矿产勘查开发局, 北京 100195)

摘要:因过量开采地下水而引发的地面沉降问题已成为北京平原区最主要的地质灾害。北京地面沉降监测网络从 2002 年开始建设,到 2008 年底已经基本覆盖整个平原区。本文基于地面沉降分层标和地下水位监测资料,从土体变形与水位随时间的变化、土体变形和水位的关系出发,分析了不同岩性、不同深度土体在不同的水位变化模式下的压缩变形特征,最终将土体在水位变化下的变形特征概括为 5 类。结果表明:现阶段北京地面沉降区浅部土体压缩减缓,中深部土体和深部土体多以较快的速度持续压缩。砂层以弹性变形为主;不同埋深的粘性土体存在弹性变形、塑性变形和蠕变变形,具有显著的粘弹塑性。

关键词:地面沉降;压缩层;变形特征;北京

中图分类号:P642.26 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)01-0236-07

1 引言

地面沉降是一种全球性的灾害,全世界有 150 多个城市出现了因地下水过量开采而引发的严重的地面沉降问题^[1-2]。北京也是国际上为数不多的以地下水作为主要供水水源的大城市之一,十多年来,地下水一直占城市总供水量的 2/3 左右^[3]。与此同时,因地下水过量开采使北京平原区出现了地面沉降和地裂缝等环境地质问题。

北京地面沉降最早发现于 1935 年西单到东单一带。20 世纪 50—60 年代因工业发展大量开采地下水,形成了东郊地面沉降区,此后,北京地面沉降经历了发展(1973—1983 年)、扩展(1983—1999 年)和快速发展(1999—至今)几个阶段^[3]。截至 2010 年底,地面沉降量超过 50 mm 的区域面积已达 4 200 多 km²,约占整个平原区面积的 66%,最大累计沉降量达 1 233 mm。

北京市在 1990 年建成了第一个地面沉降监测站——八王坟地面沉降监测站,2002 年开始了地面

沉降监测网站预警预报系统(一期)工程建设,首批建成了 3 个地面沉降监测站,于 2004 年开始监测。二期工程也于 2008 年竣工。至此,北京已经初步形成了以高精度水准测量、GPS 测量、InSAR 测量和地面沉降监测站构成的地面沉降立体监测^[4-5],监测范围覆盖整个平原区。

国内上海、天津和苏锡常地区都有比较长序列的地面沉降监测数据,多位学者已经基于此,进行了大量土层变形特征的研究工作^[6-11]。本文即从北京地面沉降监测数据的综合分析入手,探讨地面沉降快速发展阶段下的压缩层变形特征,为进一步建立合理的地面沉降模型奠定基础。

2 水文地质工程地质条件

北京平原区第四系是在永定河、潮白河、温榆河、大石河、洳河等几大河流的冲、洪(湖)积作用下形成的,沉积环境复杂。顺着这几大河流的流向,从西北向东南,从山前向平原,第四系厚度逐渐增大,层次增多,沉积物颗粒变细。在西、北部的山前地带

收稿日期:2011-05-06;改回日期:2011-12-05

基金项目:中国地质调查局“华北平原(北京)地面沉降监测与防治综合研究”项目(121201084044)、北京市政府财政项目“北京市地面沉降监测运行”(国土京环[2004]75 号)、北京市地质矿产勘查开发局地面沉降专项研究项目(京地[2009]65 号)联合资助。

作者简介:田芳,女,1981 年生,硕士,工程师,主要从事地面沉降监测与研究;E-mail:TFh-001@163.com。

和河流冲洪积扇的中上部,第四系厚度一般为 20~40 m,为单一的砂、卵砾石层或砂、卵砾石顶部覆盖薄层粘性土。在冲洪积扇中下部、冲积平原地区,由于新构造运动的影响,使之接受了巨厚的沉积物,岩性也逐渐过渡为砂、砂砾石、粘性土层相互交错出现^[12-13]。

与上述第四系沉积特点相对应,北京平原区含水层存在单一层向多层转化的规律,在平面上可划分为单一结构区和多层结构区(图 1)。单一结构区地下水为潜水,主要分布在各冲洪积扇的中上部,多层结构区为承压水含水层分布区^[9]。

多层结构区中,埋深在 25~60 m 以浅为全新统和上更新统,地下水为潜水和微承压水,接受大气降水、农田灌溉入渗和河流入渗补给,与下部的含水层存在密切的水力联系,消耗以农业开采为主。埋深在 40~180 m 以浅的为中更新统,地下水为中深层承压水,在开采条件下可以得到上部含水层的越流补给,消耗以生活和工业用水为主。上述深度以下的为下更新统,地下水为深层承压水,接受侧向补给和越流补给,其中又以 260~300 m 为界,以浅的地下水开采程度越来越高,如朝阳区金盏—楼梓庄一带为满足生活用水需要,打井深度多在 200~300 m。目前,北京地区地下水的开采量主要来自单一结构区潜水、中更新统中深层承压水和下更新统深层承压水。

北京地面沉降区基本与地下水多层结构区的分布相吻合。将粉质粘土、粘土或粉土为主的间夹薄层粉砂或(和)粉细砂的地层概化为压缩层,两个或两个以上的压缩层组合称为压缩层组。根据第四纪地层形成时代、沉积环境及工程地质钻孔资料等,结合地面沉降研究的特点,将北京地面沉降区划分为 3

个压缩层组^[15],即第一压缩层组(Q₄+Q₃)、第二压缩层组(Q₂)和第三压缩层组(Q₁),后者又可分为两个亚层。

第一压缩层组广泛分布于北京平原区各冲洪积扇的中下部,岩性以全新统和上更新统冲积相、冲湖积相粉土、粘性土为主,为正常固结土或微超固结土,含水量较高,以可塑为主,Es 多小于 10 MPa,压缩性中等,在总的地面沉降中所占的比重有减小的趋势,局部地区个别年份出现回弹。第一压缩层组中可压缩层厚度大部分超过 40 m,局部地区最厚达 70 m。

第二压缩层组广泛分布于北京冲洪积平原中下部地区,岩性为中更新统冲洪积、冲湖积的粉土、粉质粘土、粘土层,正常固结土,可塑为主,Es=12~30 MPa,压缩性中等—低。第二压缩层组大部分的可压缩层厚度都超过 50 m,局部地区可达 70~100 m。本段内的地下水开采程度高,是北京平原区地面沉降贡献最大的一个层段。

第三压缩层组主要分布在几个第四系沉积中心,岩性为下更新统河湖相沉积的灰褐色、灰色粉质粘土、粘土层,以 260~300 m 为界,其上为正常固结土—超固结土,可塑—硬塑,Es=15~40 MPa,压缩性低,其下固结程度增大,结构致密,大部分呈坚硬状态,密实度高,Es 集中在 30~70 MPa,压缩性很低,对地面沉降影响较小。第三压缩层组上段的可压缩层厚度普遍大于 40 m,局部地区超过 100 m。目前随着深层地下水开采程度的提高,第三压缩层组压缩变形量在整个地面沉降中的比例有增大的趋势。

总体来看,北京平原区可压缩层总厚度以昌平

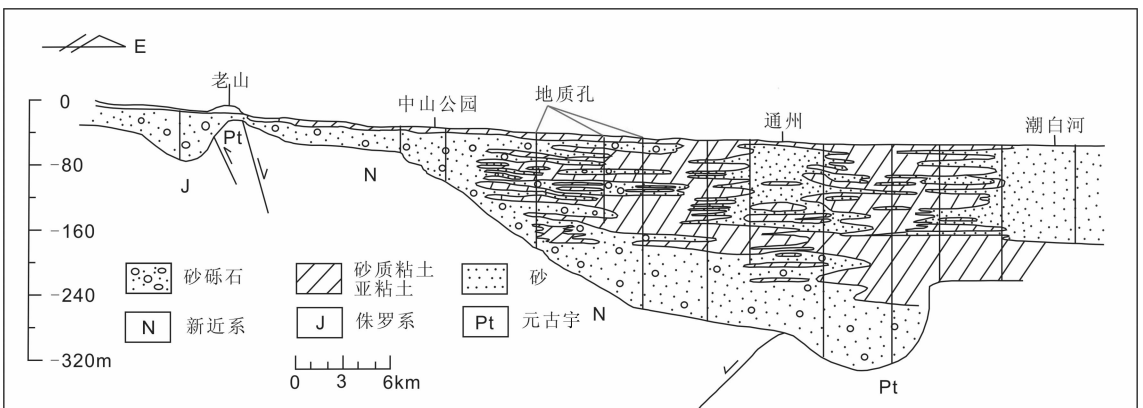


图 1 北京平原区永定河冲洪积扇地质剖面图(据文献[14]修订)

Fig.1 Geological section of Yongding River alluvial-proluvial fan in Beijing plain area

沙河—八仙庄—东小口、顺义李遂—平各庄、朝阳金盏—楼梓庄—管庄、通县张家湾—永乐店、大兴礼贤—安定一带厚度最大,一般大于 150 m,这些地区的累计地面沉降量一般在 400 mm 以上,都是北京平原区地面沉降发育比较严重的地方。

3 不同深度土体变形特征

F1、F2、F3 是北京市地面沉降监测网站预警预报系统工程首批建设的 3 个地面沉降监测站,站内均建有基岩标、分层标、地下水动态监测孔和孔隙水压力监测孔。这 3 个站都建在北京早期形成的东郊地面沉降区内。监测站内与每个分层标监测相对应的有该层位连续的水位观测资料。用分层标监测数

据与相应的水位变化做土体的应力-应变曲线,分析不同深度压缩层组土体的变形特征。

3.1 含水砂层

分层标 F3-8 监测层段 48.5~64.5 m 是以细砂和中粗砂为主的承压含水层。水位呈季节性波动,年均水位随时间呈小幅下降趋势,随着水位的周期性升降,该段含水层表现出基本同步的回弹压缩(图 2-a)。砂层在缓慢的循环荷载作用下,加载曲线和卸载曲线非常接近,主要表现出弹性变形特征(图 2-b),年残余变形量小于 0.5 mm。

3.2 第一压缩层组——浅部土体

分层标 F3-10 监测层段 2.4~35.4 m 以粉土为主,约占该段地层总厚度的 90%。如图 3-a 所示,潜

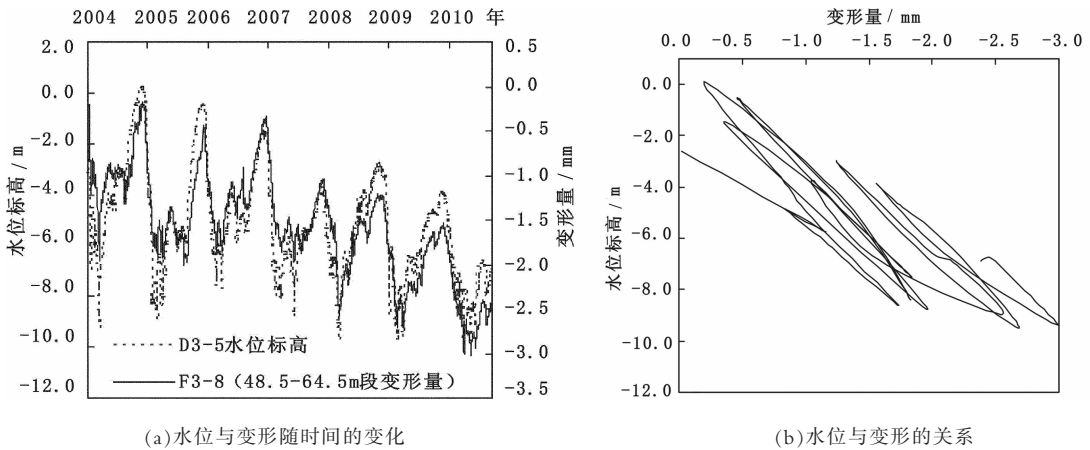


图 2 分层标 F3-8 处含水砂层变形与水位的关系

Fig.2 Deformation behavior of sand strata in relation to its corresponding groundwater level at F3-8 (a-Groundwater level and deformation over time;b-Groundwater level versus deformation)

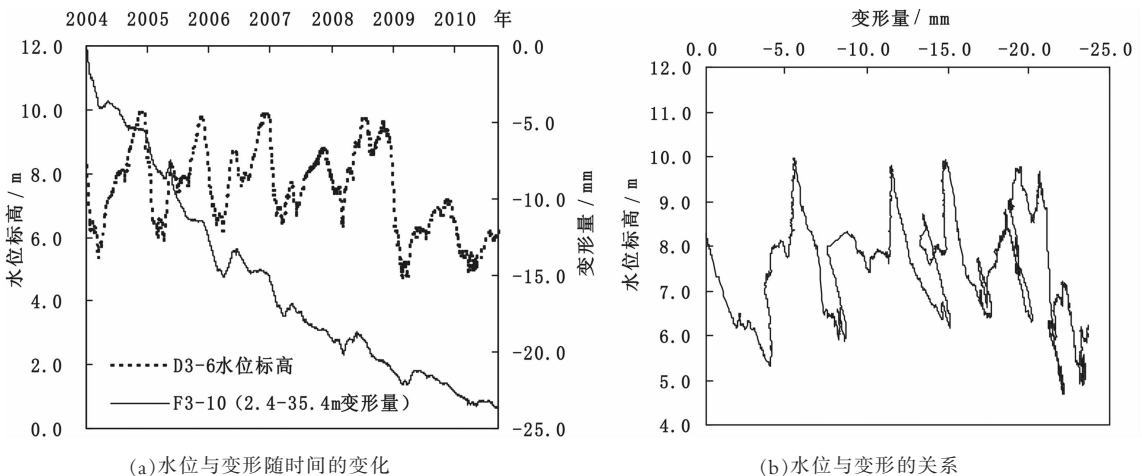


图 3 分层标 F3-10 处浅部土体变形与水位的关系

Fig.3 Deformation behavior of shallow soil mass in relation to its corresponding groundwater level at layered mark F3-10 (a-Groundwater level and deformation over time;b-Groundwater level versus deformation)

水水位随季节呈现周期性波动,2004—2008 年,地下水位在一个相对稳定的范围内反复升降,只是近两年有小幅下降。随着水位的变化,土体受到的有效应力也在一定的范围内反复增大、减小,相当于经受着反复加卸载的作用^[7]。土体变形的整体趋势表现为持续压缩,但可以发现曲线明显由陡变缓,说明变形速度趋于减缓,2007 年之前压缩速率约为 5.3 mm/a,近三年来的压缩速率减小到 1.7 mm/a 左右。图 3-b 显示了分层标 F3-10 监测层段变形量和水位的关系。由图可见,在潜水年均水位变幅不大的情况下,曲线始终向右方发展,压缩持续进行,说明该段土体不仅存在塑性变形,还有与时间有关的蠕变变形。在每一个水位变化周期内,水位回升时,土体多数情况下仍在继续压缩,但压缩速度减缓,也有微量回弹,特别是 2008 年后的曲线出现了回滞环,2010 年的加载和卸载曲线非常接近,表现出了一定的弹性变形特征。

3.3 第二压缩层组——中深部土体

分层标 F1-3 监测层段 66~94 m 为粘土层与砂层互层,层次较多,粘土层和砂层的累计厚度相当。如图 4-a 所示,水位呈周期性的往复升降,在每个周期中,水位下降幅度多大于上升幅度,因而总体呈下降趋势,相应的,土体也承受着加载和卸载的反复作用,每次增加的应力都大于卸载减小的应力,意味着总体上土体所受的有效应力持续增加。土体以 4.1 mm/a 左右的速率持续压缩。从图 4-b 可以看

出,当水位回升时,该段土体仍在压缩,仅是变形速度减缓,回弹量极小。在中深层承压含水层水位持续下降的条件下,分层标 F1-3 监测的中深部土体不仅有残余变形量较大的塑性变形,还包含随时间发展的蠕变变形,具有显著的粘弹塑性^[7]。

3.4 第三压缩层组——深部土体

分层标 F2-2 监测层段 99~133 m 上部为厚度很大的粘性土层,累计厚度为 25.6 m,约占该段地层总厚度的 75%,下部为以砂砾石和中粗砂为主的含水层,累计厚度为 8.4 m。由图 5-a 可见,自监测之日起至 2008 年 8 月,在每个周期变化中,水位下降幅度一般都大于上升幅度,总体为下降趋势,意味着土体所受的有效应力持续增加,土体以较快的速度持续压缩,压缩速率约为 10.0 mm/a,之后至 2010 年底,水位回升,压缩速度明显减缓,约为 5.7 mm/a,但仍继续压缩,明显滞后于水位的变化。从图 5-b 土体变形和水位的关系曲线可以看出,2008 年 8 月之前的水位下降期内,不管水位下降或上升,曲线始终向右方发展,意味着土体持续压缩,但存在明显的变形滞后,说明其变形不仅包含塑性变形,还存在蠕变变形;2008 年 8 月之后的水位回升期内,加载和卸载阶段的曲线斜率相比之前明显变大,意味着土体的压缩性减小。

分层标 F3-3 监测层段 148.9~218.9 m 段中部为巨厚的粉土和粉质粘土层,累计厚度达到 55.0 m,约占该段地层总厚度的 80%;顶部与底部是以细

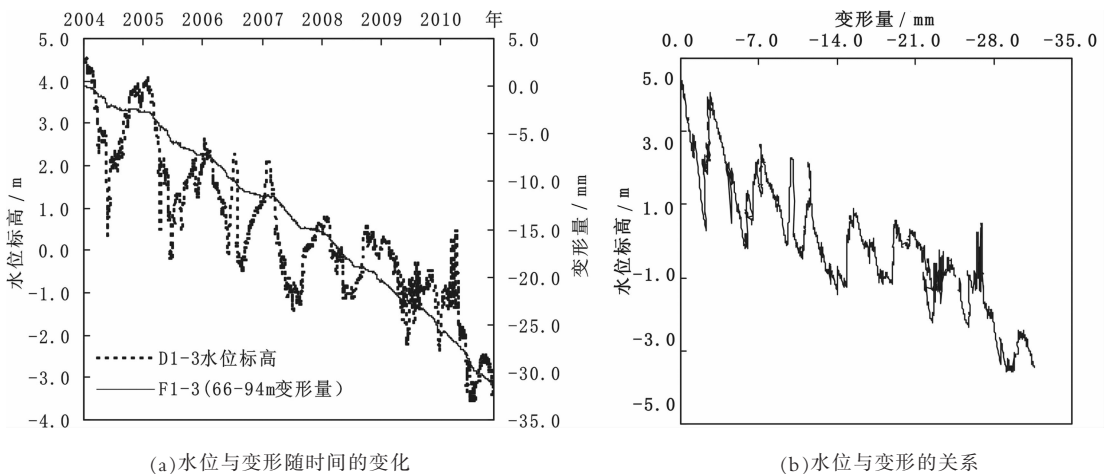


图 4 分层标 F1-3 处中深部土体变形与水位的关系

Fig.4 Deformation behavior of the mid-deep soil mass in relation to its corresponding groundwater level at layered mark F1-3 (a-Groundwater level and deformation over time;b-Groundwater level versus deformation)

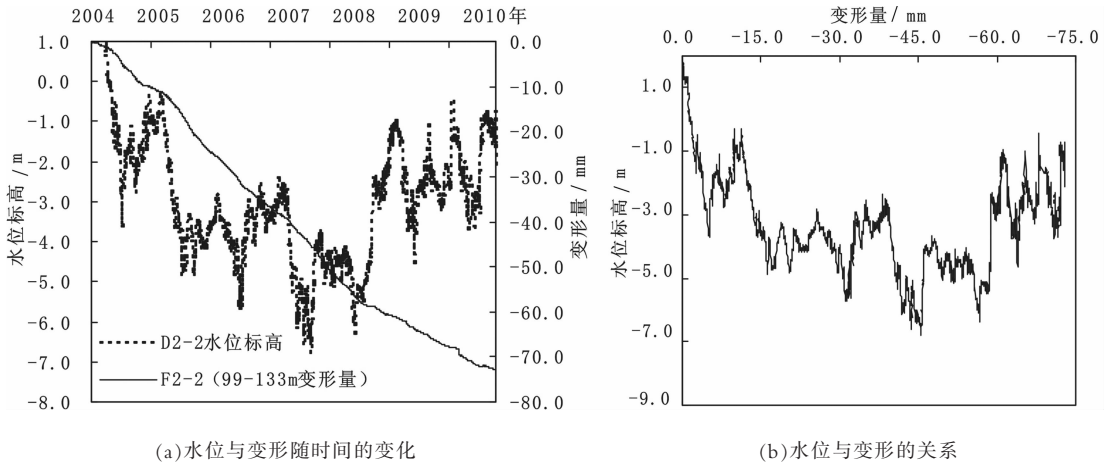


图5 分层标 F2-2 处深部土体变形与水位的关系

Fig.5 Deformation behavior of the deep soil mass in relation to its corresponding groundwater level at layered mark F2-2 (a-Groundwater level and deformation over time;b-Groundwater level versus deformation)

砂和含砾粗砂为主的含水层, 累计厚度为 15.0 m。由图 6-a 所示, 监测层水位整体上以较快的速度持续下降。2007 年 7 月之前, 土体在水位回升阶段先表现为持续压缩, 后又有小幅回弹, 压缩速率约为 2.6 mm/a。2007 年 7 月之后, 土体压缩速率变大, 约为 3.5 mm/a, 在每一个水位周期变化中的回升阶段, 土体只表现为持续压缩, 只是压缩速度变缓。从图 6-b 变形与水位的关系曲线可以看出, 2007 年 7 月之前, 曲线存在明显的回滞环, 该段土体的变形既有塑性变形, 又有弹性变形, 还包含蠕变变形, 具有显著的粘弹塑性性质; 2007 年 7 月之后, 水位回升时, 土体仍继续压缩, 存在明显的变形滞后, 包含塑性变形和蠕变变形。

以上是北京地面沉降区现阶段不同深度土体在

不同水位变化模式下变形的典型曲线。将地面沉降和地下水的分层监测反映出的北京地面沉降区土体变形特征总结如表 1。总体来看, 地下水水位动态以降水入渗—开采型为主, 潜水和浅层承压水水位相对稳定, 变化较小, 但中深层和深层承压水水位多表现为持续下降, 且降幅较大。从 3 个站的监测结果来看, 第一压缩层组浅部土体均表现为第②种变形类型, 第二压缩层组中深部土体具有第③种和第④种变形类型, 第三压缩层组深部土体具有第③种和第⑤种变形类型。

通过以上分析可以看出, 同一土体随着地下水位的变化表现出了不同的变形特征, 不同深度的土体在不同的水位变化模式下, 也表现出了不同的变形特征。土体的变形特征主要受地下水位变化、岩性

表 1 北京地面沉降区不同岩性在不同水位变化模式下的变形特征

Table 1 Deformation behaviors of various soil types at different groundwater levels in Beijing subsidence area

岩性	变形类型	水位变化模式	变形特征
含水砂层	①	年均水位小幅下降	以弹性变形为主, 残余变形量很小
粘性土 层间夹 薄层粉 砂或(和) 粉细砂 组成的 压缩层	②	年均水位基本稳定	前期以较快的速度压缩, 后期压缩速度渐缓, 包含塑性变形和蠕变变形
	③	年均水位一直以较快速度持续下降	以较快的速度持续压缩, 未见减缓, 包含塑性变形和蠕变变形
	④	年均水位先持续下降, 后回升	水位持续下降阶段, 以较快速度持续压缩, 水位回升期间, 压缩速度明显减缓, 包含塑性变形和蠕变变形
	⑤	年均水位一直持续下降, 但前期下降速度慢, 后期下降速度快	一直以较快的速度在持续压缩, 包含塑性变形和蠕变变形, 但前期有一定的弹性变形特征

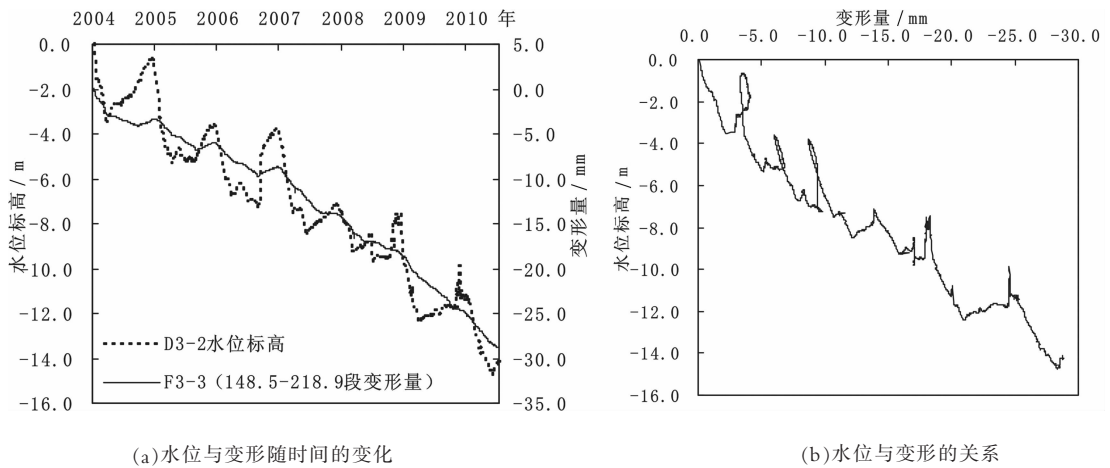


图 6 分层标 F3-3 处深部土体变形与水位的关系

Fig.6 Deformation of the deep soil mass in relation to its corresponding groundwater level at layered mark F3-3
(a-Groundwater level and deformation over time;b-Groundwater level versus deformation)

及其物理力学性质的影响。而土体的变形量受到可压缩层厚度、岩性与物理力学性质的共同影响。如 F2-2 监测层段压缩层厚度 25.6 m, 残余变形量达到 70 多 mm, 而 F3-3 监测层段压缩层厚度大于 55 m, 残余变形量仅为 25 mm。

目前,北京地区潜水和浅层承压水开采量较小,其水位相对稳定,浅部土体压缩趋缓。地面沉降的主要压缩部位集中在第二压缩层组中深部土体。随着近年来局部地区深层地下水开发程度提高,开采量增大,深层地下水位多呈现出持续下降的趋势,第三压缩层组深部土体的压缩变形量在整个地面沉降中比例有增大的趋势。

4 结论

(1)北京地面沉降区土体在不同地下水位变化模式下的变形特征可概括为 5 类。砂层以弹性变形为主。不同埋深的粘性土体存在弹性变形、塑性变形和蠕变变形,具有显著的粘弹塑性。

(2)现阶段北京地面沉降区浅部土体压缩减缓,中深部土体和深部土体多以较快的速度持续压缩,这与当前的地下水开采层次的变化密切相关。

(3)一定的水位变化模式下,土体的变形量受到可压缩层厚度、岩性与物理力学性质的共同影响。第一压缩层组浅部土体在总地面沉降量中所占的比例最小。第二压缩层组中深部土体和第三压缩层组深部土体是目前的主要压缩层位,且后者近年来在总的地面沉降量中所占比例有增大的趋势。

参考文献 (References):

- [1] Hu R L, Yue Z Q, Wang L C, et al. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China [J]. *Engineering Geology*, 2004, 76(1-2):65-77.
- [2] Tomás R, Herrera G, Delgado J, et al. A ground subsidence study based on DInSAR data: Calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain) [J]. *Engineering Geology*, 2010, 111:19-30.
- [3] 张安京, 叶超, 李宇, 等. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
Zhang Anjing, Ye Chao, Li Yu, et al. *Beijing Groundwater*. [M]. Beijing: China Land Press, 2008(in Chinese).
- [4] 温守钦, 李仁锋, 任群智, 等. GIS 技术在地质灾害区划中的应用 [J]. *中国地质*, 2005, 32(3):512-517.
Wen Shouqin, Li Renfeng, Ren Qunzhi, et al. Application of GIS technology in the regionalization of geological hazards [J]. *Geology in China*, 2005, 32(3):512-517 (in Chinese with English abstract).
- [5] 马小计, 杨自安, 邹林, 等. 抚顺市市区地质灾害遥感调查研究 [J]. *中国地质*, 2006, 33(5):1167-1173.
Ma Xiaoji, Yang Zian, Zou Lin, et al. Remote sensing survey of geological hazards in the urban district of Fushun City [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (5):1167-1173 (in Chinese with English abstract).
- [6] 魏子新. 上海市第四承压含水层应力-应变分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2002, 1(5):1-4.
Wei Zixin. Stress-strain analysis of the 4th confined aquifer in Shanghai City [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002, 1(5):1-4(in Chinese with English abstract).
- [7] 薛禹群, 张云, 叶淑君, 等. 我国地面沉降若干问题研究 [J]. *高校地质学报*, 2006, 12(2):153-160.
Xue Yuqun, Zhang Yun, Ye Shujun, et al. Research on the

- problems of land subsidence in China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(2):153-160 (in Chinese with English abstract).
- [8] 于军, 吴吉春, 叶淑君, 等. 苏锡常地区非线性地面沉降耦合模型研究[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(5):11-16.
Yu Jun, Wu Jichun, Ye Shujun, et al. Research on nonlinear coupled modeling of land subsidence in Suzhou, Wuxi and Changzhou areas, China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(5):11-16 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张云, 薛禹群, 叶淑君, 等. 地下水位变化模式下含水砂层变形特征及上海地面沉降特征分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(3):103-108.
Zhang Yun, Xue Yuqun, Ye Shujun, et al. Analysis of deformation of sand strata and land subsidence based on modes of groundwater level changes in Shanghai City [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17 (3):103-108 (in Chinese with English abstract).
- [10] 施小清, 薛禹群, 吴吉春, 等. 常州地区含水层系统土层压缩变形特征研究[J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(3):1-6.
Shi Xiaoqing, Xue Yuqun, Wu Jichun, et al. A study of soil deformation properties of the groundwater system in the Changzhou area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(3):1-6 (in Chinese with English abstract).
- [11] 白晋斌, 马锋, 李桂玲, 等. 军粮城地区地层应力-应变与地面沉降特征分析[J]. *城市地质*, 2006, (增刊):95-100.
Bai Jinbin, Ma Feng, Li Guiling, et al. The stress-strain and land subsidence characteristic in Junliang City, Tianjing [J]. *City Geology*, 2006, (supp.):95-100 (in Chinese with English abstract).
- [12] 蔡向民, 郭高轩, 栾英波, 等. 北京山前平原区第四系三维结构调查方法研究[J]. *地质学报*, 2009, 83(7):1047-1057
Cai Xiangmin, Guo Gaoxuan, Luan Yingbo, et al. Quaternary geological features of Beijing Piedmont Plain using 3-D structural method [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (7):1047-1057 (in Chinese with English abstract).
- [13] 卫万顺, 吕晓俭, 蔡向民, 等. 北京城市地质图集[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008:7-8
Wei Wanshun, Lv Xiaojian, Cai Xiangmin, et al. Atlas of Urban Geology in Beijing [M]. Beijing: China Land Press, 2008:7-8 (in Chinese).
- [14] 蔡向民, 栾英波, 郭高轩, 等. 北京平原第四系的三维结构[J]. *中国地质*, 2009, 36(5):1021-1029.
Cai Xiangmin, Luan Yingbo, Guo Gaoxuan, et al. 3D Quaternary geological structure of Beijing plain [J]. *Geology in China*, 2009, 36 (5):1021-1029 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘予, 叶超, 贾三满. 北京市平原地面沉降区含水岩组和可压缩层划分[J]. *城市地质*, 2007, 2(1):10-15.
Liu Yu, Ye Chao, Jia Sanman. Division of water-bearing zones and compressible layers in Beijing's land subsidence areas [J]. *City Geology*, 2007, 2(1):10-15 (in Chinese with English abstract).

The deformation behavior of soil mass in the subsidence area of Beijing

TIAN Fang¹, GUO Meng², LUO Yong¹, ZHOU Yi¹, JIA San-man¹

(1. *Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China;*

2. *Beijing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Beijing 100195, China)*

Abstract: Land subsidence induced by excessive groundwater withdrawal has constituted a major environmental geological problem in Beijing plain area. The construction of the monitoring network of land subsidence in Beijing began in 2002 and the network had covered the whole plain area by the end of 2008. Based on the data from layered marks and groundwater observation wells, the authors drew curves of variations over time in the aspects of both soil mass deformation and water level and relationship between soil mass deformation and water level, and carried out an analysis of deformation behaviors of soil mass with various lithologic characters at different depths depending on the corresponding water levels. As a result, the deformation behavior of soil mass is generalized into five categories. Some conclusions have been drawn: (i) the deformation rate of the shallow soil mass in the present is slowing down, and most of the mid-deep and deep soil masses are still in continuous compression at a faster speed; (ii) the sand strata are characterized by elastic deformation, and clay soil mass at different depths is usually characterized by elastic-plastic deformation and creep deformation and can be considered to be visco-elastoplastic materials.

Key words: land subsidence; compressive layers; deformation behaviors; Beijing