

北京典型地面沉降区土体压缩特征研究

杨 艳^{1,2}, 王 荣², 罗 勇^{2,3}

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195;
3. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 北京平原区地面沉降目前处于快速发展阶段, 影响因素十分复杂, 其中粘性土体的存在是其赖以形成的物质基础。以北京昌平八仙庄典型地面沉降区为研究对象, 采取逐级加荷、逐级卸荷以及反复加卸荷, 分析 100 m 以浅粘性土体在不同加卸载方式下的固结特征。实验结果表明: 荷载从 25 kPa 分级加荷到 1 600 kPa, 粘土变形量大于粉土, 分别为 2.822 mm、1.000 mm; 荷载从 400 kPa 分级卸除到 50 kPa, 粘土的回弹量大于粉土, 分别为 0.277 mm、0.121 mm; 反复加卸荷条件下粉质粘土及粉土较之粘土更容易达到固结状态, 蠕变时间效应为粘土 > 粉质粘土 > 粉土。建议在制定地面沉降灾害防治措施方案时, 应充分考虑沉降区地层土体特征影响。

关键词: 地面沉降; 粘性土; 固结试验; 压缩特征

中图分类号: P642.2; P694 文献标志码: A 文章编号: 1000-8527(2016)03-0716-07

A Study on Soil Compression Characteristics in Land Subsidence Areas within Beijing

YANG Yan^{1,2}, WANG Rong², LUO Yong^{2,3}

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;
2. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China;
3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Numerous factors are attributed to the rapid development of subsidence in the plain area of Beijing. The existence of cohesive soils in this area provides the material foundation for subsidence, and therefore, this study focuses on the consolidation characteristics of cohesive soils with depth less than 100 m under different loading condition such as progressive loading, progressive unloading, and repeated loading and unloading in a typical subsidence area in Baxianzhuang within the Changping District of Beijing. According to the test results, the deformation of cohesive soils under progressive loading from 25 kPa to 1,600 kPa is greater than that of silt, which is 2.822 mm and 1.000 mm, respectively. The rebound of cohesive soils under progressive unloading from 400 kPa to 50 kPa is also greater than that of silt, which is 0.277 mm and 0.121 mm, respectively; and under repeated loading and unloading condition, silty clay and silt attain a state of consolidation faster than clay; the creep-time effect is sorted as clay > silty clay > silt. It is therefore recommended that a full consideration should be given to the effects of soil characteristics in subsidence areas when compiling land subsidence disaster prevention and control plans.

Key words: land subsidence; cohesive soil; consolidation test; compression characteristic

地面沉降是一种不可补偿的环境和资源损失, 并诱发一系列地质环境灾害, 形成灾害链, 受到是地质环境系统被破坏所导致的区域地质灾害, 国内外专家学者和政府管理部门的广泛关注^[1-3]。

收稿日期: 2015-04-10; 改回日期: 2016-04-26; 责任编辑: 潘令枝。
基金项目: 北京市优秀人才培养资助项目(2014400617931G217); 北京市科技计划课题(Z131100005613022)。
作者简介: 杨 艳, 女, 硕士, 工程师, 1982 年出生, 土工环境地质专业, 主要从事地面沉降、地裂缝等监测、研究及综合防治工作。Email: wildhorse898@126.com。

北京地区地面沉降影响因素十分复杂，地面沉降影响范围和发展速率在不同时间、空间上有较大的差异。从驱动力条件来看，地下水位周期性波动特征下的持续下降是诱发地面沉降的主要原因^[4-5]。从区域水文地质条件来看，可压缩层的存在是形成地面沉降的客观地质条件，而粘性土固结压缩特征决定了土体变形的特征。国内上海、天津和苏锡常地区都利用地面沉降监测数据进行了土层变形特征研究^[6-7]，并进行了粘性土固结特征的研究^[8-10]。本文将以北京昌平八仙庄地面沉降区为例，开展地层土体压缩特征研究。

1 典型沉降区的选取

北京自1935年西单至东单一带发现地面沉降以来，先后经历形成阶段、发展阶段、扩展阶段和快速发展阶段，其快速发展已经对城市建设及安全造成了一定影响^[11-12]。截至2013年，北京平原区发育有昌平区八仙庄、沙河，朝阳区金盏、三间房，大兴区小马坊、赵村以及通州城区等多个沉降中心。其中八仙庄沉降中心累计沉降量达1.5 m，最大年沉降速率超过110 mm/a，沉降发展受地下水超量开采^[13]、粘性土层变形与压缩影

响明显，因沉降灾害导致的市政工程破坏、轨道交通工程受损、诱发和加剧地裂缝等现象明显，是北京最典型的地面沉降区域之一^[14]。

八仙庄沉降区位于昌平区东北部温榆河冲洪积扇上游地区(图1)，第三系地层岩性为亮黄棕、灰黄棕、浊红棕-灰红棕色粉质粘土，含砾石粗砂卵石层、凝灰质砂砾岩，以河湖相沉积为主。第四系底界埋深约400 m，岩性以黄棕、浊黄棕、浊棕色粉质粘土以及粉砂质亚粘土为主，夹杂灰黄、黄棕、灰黄棕色粉、细、中砂及含砾粗砂，粘性土普遍含砂质，多具水平层理，赋水性较好，以河流相沉积为主^[15-16]。

本文选取八仙庄地面沉降监测站邻近的西王路村100 m以浅地层为研究对象，采用Φ130 mm外肋骨双套合金钻具取心、Φ108 mm薄壁取样器取样，对所取原状样土体及时蜡封，并进行固结压缩试验，分析粘土压缩变形特征。研究范围及实验场地位置如图1所示，土样采集深度及主要岩性如表1所示。

2 土体压缩变形特征

自2004年以来，北京平原区先后建立了7座

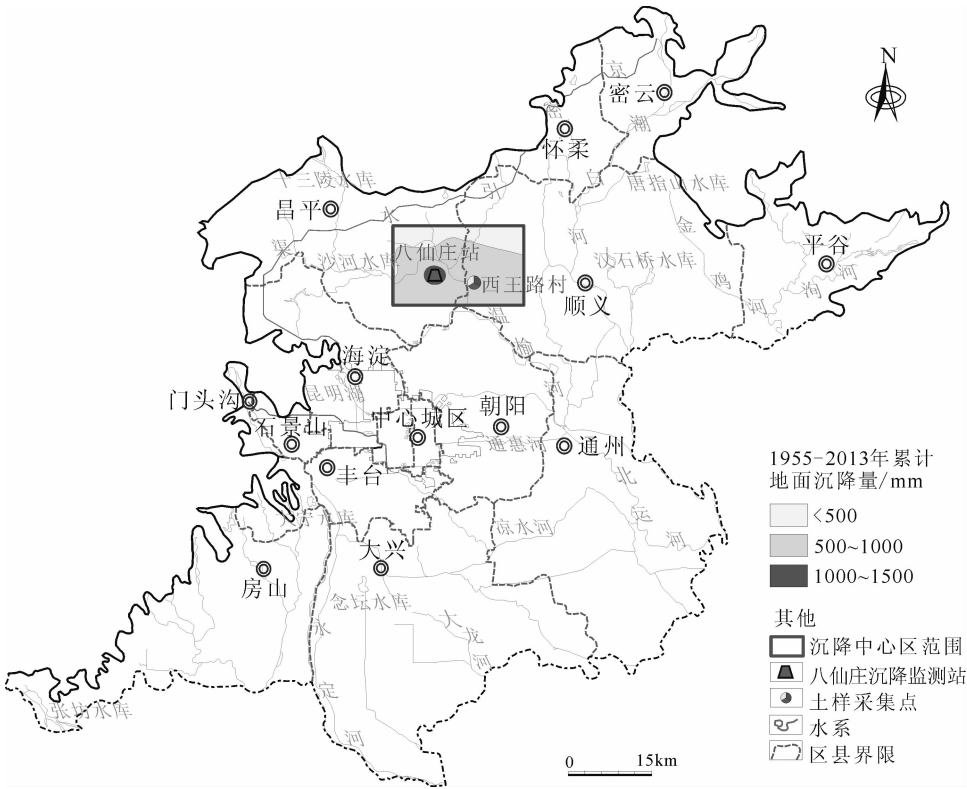


图1 研究区范围及取样点位置图

Fig. 1 Map of the study area and location of sampling points

表 1 土样采集及岩性特征

Table 1 Soil samples and their lithological features

土样编号	取样深度/m	类型名称
4	22.00 ~ 22.20	粘土
6	36.00 ~ 36.20	粘土
7	43.00 ~ 43.20	粘土
9	51.00 ~ 51.20	粉土
13	56.50 ~ 56.70	粉土
16	66.50 ~ 66.70	粉质粘土
21	73.00 ~ 73.20	粉土

分层标监测站,用于获取不同地区分层压缩量及水位动态信息。分层标和地下水水位监测井可以提供含水层系统压缩、孔隙水压力变化等信息,了解不同埋深水文地质单元水文、力学特性。其中,八仙庄监测站埋设分层标 10 座,最深观测深度达到 304.00 m,地面标埋设深度为 2.00 m,2008 年 6 月 25 日开始运行,截至 2013 年 12 月 25 日 F4-10(地面标)沉降量为 81.73 mm;布设地下水水位观测井 6 眼,采用分层观测,最深观测层位为 304.81 ~ 333.00 m,最浅观测层位为 13.49 ~ 23.00 m,观测层位包括潜水、浅层承压水和中深层承压水。在八仙庄地面沉降地下水、分层标监测基础上,利用应力-应变图解法分析不同埋深地层土体变形特征。结果表明,不同埋深地层压缩量不同,其土体变形特性差异较大,总体上呈弹性、弹塑性特征。

2.1 弹性变形

八仙庄监测站分层监测资料显示,该地区 24 m 以浅地层压缩量非常小。由图 2 可以看出,该段地下水水位总体上处于上升趋势,自 2009 年至 2013 年底该段地层的变形量均在 -1 ~ 1 mm 间变化。可以说,由于该段水位始终处于缓慢上升的趋势,所以该段地层基本没有压缩现象发生,无明显的变形特征。

2.2 弹塑性变形

中深部地层(24 ~ 235 m)是研究区地下水开采的主要层位,该段地层含水层组水位总体上呈下降趋势,水位季节性波动明显,波动幅度最大达 4 m。同时,该段地层也是地表形变的主要贡献层,其压缩量占总压缩量的 95% 以上。自 2009 年以来,该段水位呈周期性的往复升降,在每个周期中,水位下降幅度大于上升幅度,水位总体呈下降趋势,意味着土体所受的有效应力持续增加,土体持续压缩(图 3(a))。每当水位回升时,土体

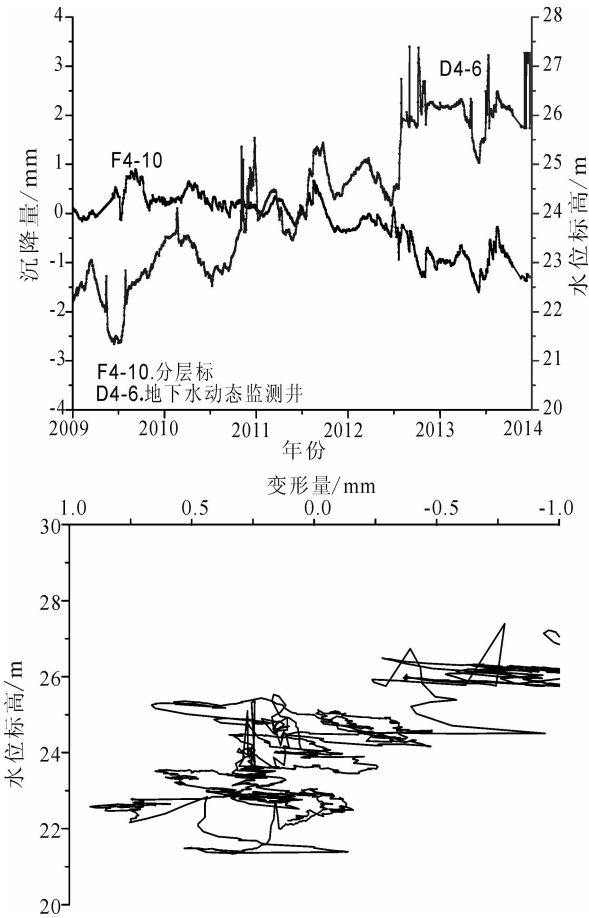


图 2 分层标 F4-10 处土体变形与水位的关系(“D”表示地下水监测曲线,“F”表示地面沉降分层监测变化曲线)

Fig. 2 Soil deformation and water level of F4-10

的压缩变形减缓,可知其残余压缩量大于由于水位变化而产生的回弹量,总体上呈持续压缩状态。应力-应变分析结果(图 3(b))表明,水位在动态变化中总体上持续下降,但仍高于该土层最低水位。土层变形与水位变化几乎同步,蠕变变形较小。应力循环加、卸载过程中有明显的残余变形,呈现出一定的塑性,呈弹塑性变形。八仙庄地面沉降监测站内 24 ~ 235 m 地层范围内共有分层标 6 个,通过分层沉降和对应水位监测可知,该层段具有基本相同的应力-应变特征,以塑形为主的弹塑性变形。

此外,随着水位的波动,粘性土体的变形呈现一定的滞后效应。以地面沉降发育较为严重的 2010 年为例:水位快速下降发生于 3 月 2 日,而 59 ~ 83 m 以粉质粘土为主的地层的快速压缩发生于 3 月 8 日,24 ~ 59 m 以粘土为主的地层的快速压缩始于 3 月 22 日,即土体压缩分别滞后了 6 天和 20 天,粘土的滞后时间长于粉质粘土的滞后时

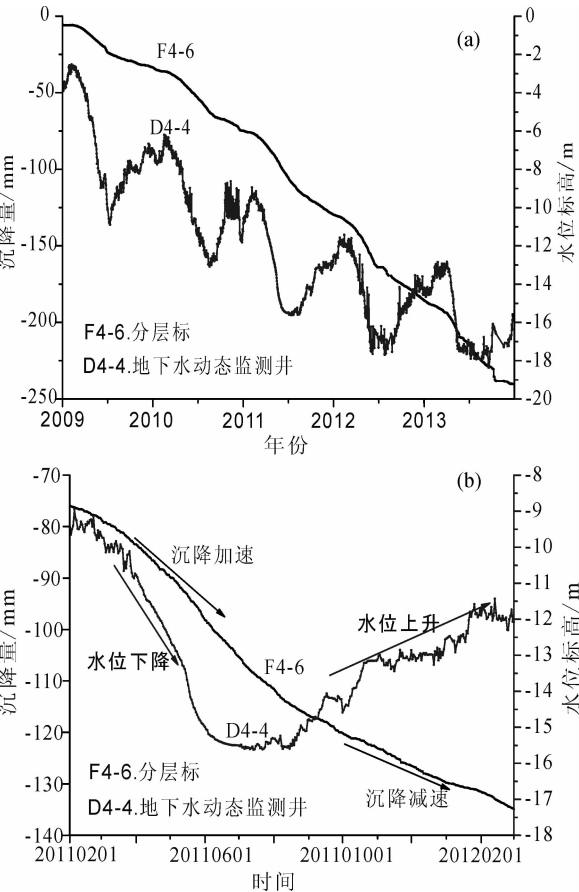


图3 分层标 F4-6 处土体变形与水位的关系
Fig.3 Soil deformation and water level of F4-6

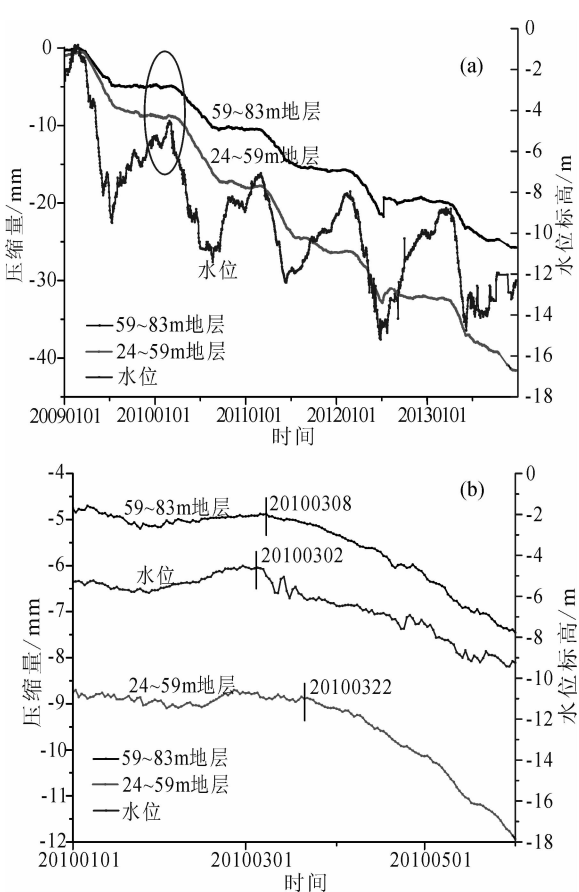


图4 八仙庄地面沉降区土体压缩曲线图
Fig.4 Soil compression curves of the Baxianzhuang subsidence area

间。其土体压缩变化曲线如图 4 所示。

3 土体固结压缩实验

3.1 实验概况

本次研究在西王路地区选取典型钻孔进行原状土取样，利用单向固结仪进行土体固结压缩实验。实验分为三组，分别为逐级加载、逐级卸载及反复加卸载，模拟地下水位持续下降、地下水位逐渐上升和地下水在往复升降中持续下降三种情况，每组实验取粘土及粉土做对比，其中反复加卸载还取了粉质粘土做对比，用于粘土、粉质粘土、粉土的固结特征的分析比较和研究。通过三种方案获得的变形数据，绘制出荷载－变形的关系曲线、变形－时间的关系曲线，进一步分析不同岩性土样在不同加卸载方式下的塑性变形和蠕变特征。

3.2 逐级加荷

实验内容及步骤如下：

(1) 荷载从 25 kPa 分级施加到 1 600 kPa，加载比为 1，即 25 kPa，50 kPa，100 kPa，200 kPa，

400 kPa，800 kPa，1 600 kPa。第一级压力的大小可根据土的软硬程度，采用 50 kPa 作为初始加压；最后一级压力应大于土层的自重应力和附加应力之和，或大于上覆土层的计算压力 100 ~ 200 kPa，但最大压力值不应小于 400 kPa。

(2) 每级荷载都瞬时施加，各级荷载下变形都观测到稳定状态并以变形小于 0.005 mm/h 作为稳定标准。

实验结果见表 2、表 3 和图 5。

对 7 号粘土样及 9 号粉土样做了加载试验，分析两种不同类型土样在逐级加载条件下压缩曲线的变化特征，具体如图 5 所示：(1) 整体上粘土样变形量要大于粉土样，而且随着压力的增加，变形量的差异也越大；(2) 每级压力加载后，变形在经历 120 分钟后基本趋于稳定。

其中，粘土样总变形量为 2.822 mm，而粉土样则为 1.0 mm，而且在加载压力达到 400 kPa 时，两者累计变形量均达或超过总变形量的 50%。各试样在不同加载压力下的稳定变形量的统计如表 3 所示。

表 2 土体逐级加荷试验土样参数
Table 2 Parameters of soil samples in progressive soil loading test

试验 内容	土样 编号	取样深 度/m	土体 分类	常规指标			力学指标(压缩指标)				
				含水量 /%	湿密度/ (g/cm ³)	比重	初始孔 隙比	压缩模量 /MPa	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩回弹 指数	先期固结 压力/kPa
加载	7	43.00~43.20	粘土	22.257	2.007	2.74	0.669	4.356	0.372	0.124	1 223
	9	51.00~51.20	粉土	22.167	2.016	2.69	0.631	10 454	0.153	0.051	1 276

表 3 不同类型土不同加载压力稳定变形量统计
Table 3 Statistical results of stable deformation of different types of soils under different loading pressures

压力/kPa	25	50	100	200	400	800	1600
7 号粘土试样	累计稳定变形量/0.01 mm	14.9	26.5	53.5	95.9	151.1	213.9
	百分比/%	5.3	9.4	19.0	34.0	53.5	75.8
9 号粉土试样	累计稳定变形量/0.01 mm	3.3	27.0	37.9	55.4	86.9	126.4
	百分比/%	1.9	15.4	21.7	31.7	49.7	72.2

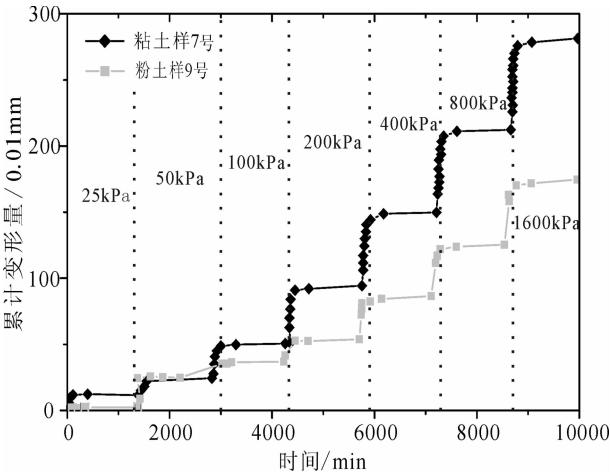


图 5 粘土与粉土逐级加载时的压缩累计变形历时曲线
Fig. 5 Accumulative compressive deformation curves of clay and silt under progressive loading

3.2 逐级卸荷

分别选取 4 号粘土试样和 13 号粉土试样开展逐级卸荷实验, 关键实验内容及步骤如下:

(1)加第 1 级荷载至 400 kPa。土样在第 1 级荷载下达到变形稳定后再分级卸载至 50 kPa, 即按 400 kPa→300 kPa→200 kPa→150 kPa→100 kPa→50 kPa 进行卸载。

(2)每级荷载都瞬时卸除, 各级荷载下回弹变形观测到稳定状态, 并以变形小于 0.005 mm/h 作为稳定标准。

实验结果见图 6、表 4 和表 5。

通过对 4 号粘土样及 13 号粉土样做卸载实验, 来分析比对两种不同类型的土样在逐级卸载条件下回弹曲线的变化特征, 结果如图 6 所示。

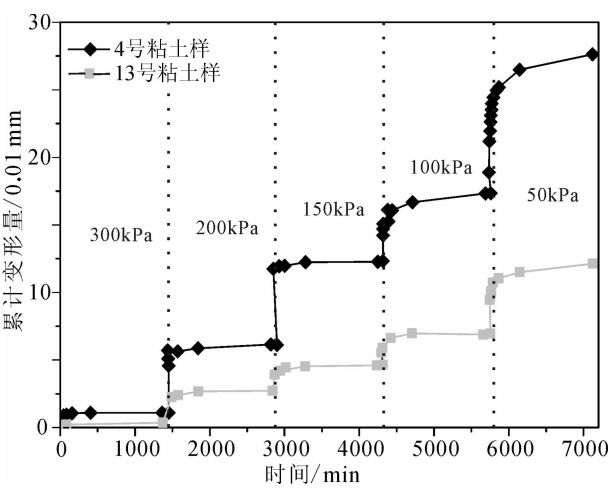


图 6 粘土与粉土自 400 kPa 稳定后逐级卸载累计回弹曲线
Fig. 6 Accumulative rebound curves of clay and silt under progressive unloading after stabilization at 400 kPa

从图 6 中可以看出: (1)加载 400 kPa 且达到变形稳定后, 随着卸载压力的增加, 粘土孔隙度大于粉土的, 因此相同荷载下粘土的回弹量明显大于粉土; (2)由于卸载为瞬时完成, 故每一级卸载压力后的瞬时回弹非常明显, 且随着实验的进行, 当有效应力逐渐接近土体所承受的荷载后, 回弹量也就逐渐减小且趋于稳定值; (3)卸载压力越小, 完成回弹量所需时间越长, 回弹量也小, 即达到稳定状态需要更多的时间。如粉土卸载到 300 kPa 时, 回弹量极小, 仅为 0.005 mm, 而粘土则为 0.012 mm; 而卸载到 50 kPa 时, 回弹量均达到最大, 分别为 0.121 mm 和 0.277 mm。这与粉土颗粒粒度大、受压后易被破坏有关, 故卸载后也不易回弹。

表4 土体逐级卸荷试验成果

Table 4 Parameters of soil samples in progressive unloading test

试验内容	土样编号	取样深度/m	土体类型	常规指标			力学指标(压缩指标)				
				含水量/%	湿密度/(g/cm ³)	比重	初始孔隙比	压缩模量/MPa	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩回弹指数	先期固结压力/kPa
卸载	4	22.0~22.2	粘土	37.340	1.763	2.74	1.134	2.291	0.900	0.150	1 217
	13	56.6~56.8	粉土	17.870	1.799	2.69	0.487	18.573	0.078	0.013	1 128

表5 不同类型土不同卸载压力稳定变形量统计

Table 5 Statistics of stable deformation for different soil types under different unloading pressures

卸载压力(初始为400 kPa)/kPa		300	200	150	100	50
4号粘土试样	累计回弹变形量/0.01 mm	1.2	6.2	12.3	17.3	27.7
	百分比/%	4.3	22.4	44.4	62.5	100.0
13号粉土试样	累计回弹变形量/0.01 mm	0.5	2.9	4.7	7.1	12.1
	百分比/%	4.1	24.0	38.8	58.7	100.0

各试样在土样加载400 kPa且达到稳定后开始逐级卸压的累积回弹变形量的统计如表5所示，粘土样总回弹量为0.277 mm，而粉土样则为0.121 mm。同时，卸载到300 kPa时，两种土样的回弹量均只在4%左右，而当卸载到100 kPa时，回弹量达到总回弹量的约60%。

3.3 反复加卸荷

实验内容及步骤如下：

(1) 按照100 kPa→200 kPa→400 kPa→800 kPa→1 600 kPa的顺序逐级反复加卸载。每一相邻荷载之间要经历加荷→卸荷→加荷→卸荷的循环。第1次加卸荷循环为：100 kPa→200 kPa→100 kPa→200 kPa→100 kPa。第2次加卸荷循环从第一次循环结束变形稳定后开始加载，即从100 kPa→400 kPa→200 kPa→400 kPa→200 kPa。第3次加卸荷循环从第2次循环结束变形稳定后开始加载，即从200 kPa→800 kPa→400 kPa→800 kPa→400 kPa。依此类推，第4次加卸荷循环以上一次循环结束变形稳定后开始加载，即从400 kPa→1 600 kPa→800 kPa→1 600 kPa→800 kPa。

(2) 每级荷载都瞬时卸除，各级荷载下回弹变形观测到稳定状态，并以变形小于0.005 mm/h作为稳定标准。

通过对6号粘性土、16号粉质粘土及21号粉土进行反复加卸载实验，分析不同类型土在不同加卸载模式下的变形特征及蠕变的时间效应，以模拟在地下水往复升降过程中对土层变形沉降的影响，实验结果如图7至图9所示。

实验结果分析如下：

(1) 粘土在第1次加卸载循环中，其变形大于

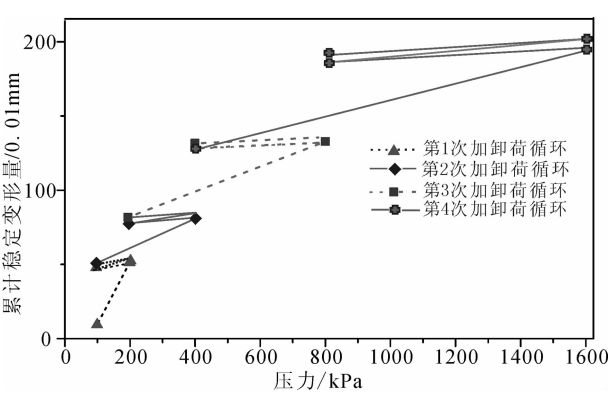


图7 6号粘土试样分级反复加卸荷各级压力累积稳定变形曲线

Fig. 7 Accumulative stable deformation curves of clay sample #6 under repeated progressive loading and unloading

第2次循环，此后两次加卸载循环变形逐渐增大且均大于第1次加卸载循环。分析其原因，可能是由于粘土孔隙度较大，第1次加卸载循环时，土样受压排水，相对容易压缩，发生较大变形；而第2次加卸载循环时由于荷载还较小且前面已经经历了1次加卸载循环，土样蠕变增强，变形较小；第3、4次循环其荷载均较大，土样蠕变越来越大，直至土样被破坏，其变形也越来越大。

(2) 粉质粘土及粉土每次加卸载循环的变形均大于上次循环。分析其原因，可能是由于土粒的孔隙度减小后，土样不容易被压缩，很容易达到固结状态，蠕变较小。最大荷载逐渐增大，变形也就逐渐增大。

(3) 蠕变的时间效应为粘土>粉质粘土>粉土，即土体孔隙度越大越容易发生蠕变变形。

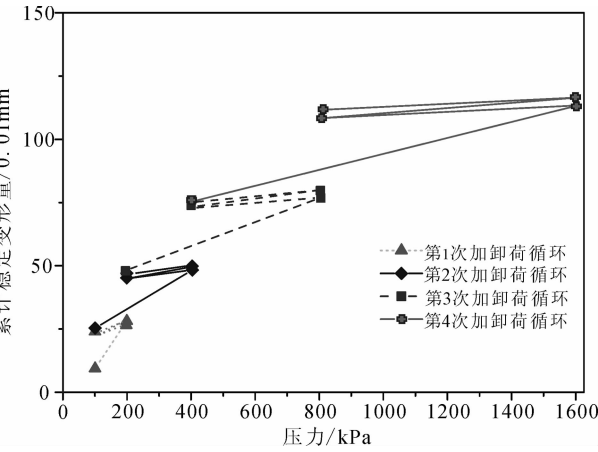


图8 试样16号粉质粘土分级反复加卸荷各级压力累积稳定变形曲线

Fig. 8 Accumulative stable deformation curves of silty clay sample #16 under repeated progressive loading and unloading

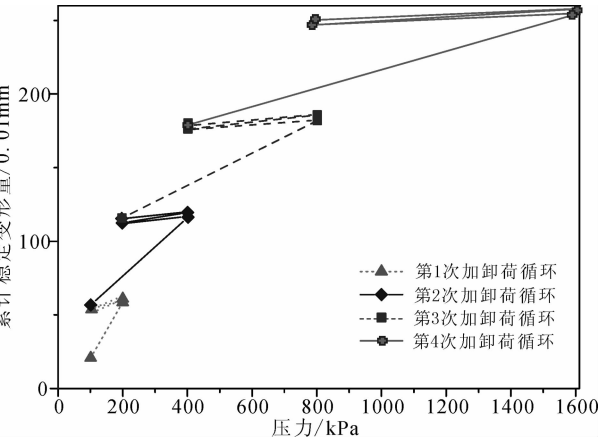


图9 21号粉土试样分级反复加卸荷各级压力累积稳定变形曲线

Fig. 9 Accumulative stable deformation curves of silt sample #21 under repeated progressive loading and unloading

4 结 论

- (1)在逐级加载条件下,粘土变形量大于粉土,且随着压力的增加,变形量的差异越大;
- (2)在逐级卸载条件下,粘土的回弹量大于粉土,且回弹量逐渐减小直至趋于稳定值;
- (3)在反复加卸荷条件下,粉质粘土及粉土较之粘土更容易达到固结状态,蠕变较小,三者的蠕变时间效应为粘土>粉质粘土>粉土,即孔隙度越大越容易发生蠕变变形。

(4)在制定地面沉降灾害防治措施方案时,应充分考虑地层土体特征影响,尤其是粘性土体的变形和压缩特征影响。

参考文献:

[1] 薛禹群,张云,叶淑君,等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 585-593.

[2] 吕敦玉,余楚,侯宏冰,等. 国外城市地质工作进展与趋势及其对我国的启示 [J]. 现代地质, 2015, 29(2): 373-379.

[3] 陈蓓蓓,宫辉力,李小娟,等. 北京地下水系统演化与地面沉降过程 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊): 373-379.

[4] 杨勇,郑凡东,刘立才,等. 北京平原区地下水水位与地面沉降关系研究 [J]. 工程勘察, 2013(8): 44-48.

[5] 王静,唐仲华,邓青军,等. 地下水开采导致总应力变化对地面沉降的影响 [J]. 工程勘察, 2012(5): 34-37.

[6] 吴建中,王寒梅,杨天亮. 浅层地下水人工回灌应用于上海市工程性地面沉降防治的试验研究 [J]. 现代地质, 2009, 23(6): 1194-1200.

[7] 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.

[8] 郭海朋,丁国平,朱菊艳,等. 沧州地面沉降区粘土压缩变形和渗透特征研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2014, 41(5): 111-117.

[9] 闫永生,何江涛,郑凡东,等. 潮白河受水区再生水入渗盐污染模拟柱试验 [J]. 现代地质, 2009, 23(6): 1180-1184.

[10] 陈戈,阎世骏,李铁锋. 天津市深层粘性土对地面沉降的影响及其沉降量计算 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 804-809.

[11] 杨艳,贾三满,王海刚. 北京平原区地面沉降现状及发展趋势分析 [J]. 上海地质, 2010, 31(4): 23-28.

[12] 杨艳,贾三满,王海刚,等. 北京规划新城地面沉降影响分析 [J]. 城市规划, 2013, 37(11): 67-71.

[13] 姜媛,田芳,罗勇,等. 北京典型地区分层地面沉降与地下水位变化关系 [J]. 南水北调与水利科技, 2015(1): 95-99.

[14] 杨艳,杨红军,王荣,等. 区域沉降对京津城际高铁北京段线路坡度影响分析 [J]. 上海国土资源, 2014(2): 13-16.

[15] 张磊,白凌燕,蔡向民,等. 北京南口—孙河断裂北西段综合物探剖面定位及其活动性研究 [J]. 现代地质, 2014, 28(1): 234-242.

[16] 栾英波,卫万顺,于湓,等. 北京平原区地源热泵换热能力现场测试研究 [J]. 现代地质, 2014, 28(5): 1046-1052.