

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.02.24

天津滨海新区抽水引起地面沉降现场试验研究

主 灿¹, 张 云¹, 何国峰¹, 孙 铁²

- (1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;
2. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 在天津滨海新区中新生态城服务中心开展了承压含水层抽水引起地面沉降的现场试验, 采用振弦式孔隙水压力传感器和一孔多标数据采集器实时监测孔隙水压力和分层标的变化, 分析了土体的变形性质和分层沉降的规律。试验结果表明, 黏土层变形明显滞后于承压含水层水位的变化, 以塑性变形为主且存在蠕变现象, 而砂层既存在弹性变形, 也存在一定的塑性变形和蠕变性。短期抽取地下水会使抽水井附近承压含水层上覆土体出现上小下大的沉降规律, 且最大沉降出现在有明显孔隙水压力变化的土层顶板位置。

关键词: 地面沉降; 一孔多标数据采集器; 孔隙水压力; 蠕变变形; 分层沉降

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0159-06

In-situ tests of land subsidence caused by pumping in the Tianjin Binhai New Area

ZHU Can¹, ZHANG Yun¹, HE Guofeng¹, SUN Tie²

- (1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;
2. China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying Co. Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In-situ test of land subsidence caused by pumping in an confined aquifer was carried out at the new eco-city service center in the Tianjin Binhai New Area. The vibrating wire type pore water pressure sensor and multi-marks data taker system in one hole were used to monitor the changes in pore water pressure and subsidence in real time. The deformation properties of soil and the law of stratified settlement were analyzed. The test results show that the deformation of the clay layer obviously lags behind the change in water level in the confined aquifer, which has mainly the plastic deformation and creep phenomenon. The sand layer has not only elastic deformation, but also some plastic deformation and creep. The short-term extraction of groundwater will make the settlement of soils overly the confined aquifer and gradually increase from top to bottom near the pumping well, and the maximum settlement occurs at the top of the soil layer which has an obvious change in pore water pressure.

Keywords: land subsidence; multi-marks data taker system in one hole; pore water pressure; creep deformation; stratified settlement

天津地面沉降最初发现于1923年,到2000年沉降中心最大累计沉降量为3.14 m,目前已形成了市
区、海河下游地区及塘沽、汉沽等几个沉降中心^[1],地面沉降问题相当严重。造成地面沉降的原因有很多,

收稿日期: 2017-06-10; 修订日期: 2017-08-04

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAJ09B04); 国家自然科学基金面上项目(41572250)

第一作者: 主灿(1992-),男,硕士研究生,主要从事地下水开采引起的地面沉降研究。E-mail: zhucan1617@163.com

通讯作者: 张云(1965-),女,教授,博士生导师,主要从事地下水开采引起的地面沉降和地裂缝研究。

E-mail: zhangyun@nju.edu.cn

例如新构造活动引起的构造沉降、欠固结地层的固结压密、地下水和油气的开采、地热利用以及工程建设引起的土体变形等^[2],其中过量开采地下水是引起天津地区地面沉降的主要原因^[3]。抽取地下水会导致土层中孔隙水压力减小、有效应力增加,原先由孔隙水承担的部分荷载转移由土骨架承担,使土层压缩变形,从而导致地面沉降的发生^[4]。天津市从 1986 年开始采取减少地下水开采量、调整开采层次、人工回灌等措施以控制地下水开采引起的区域性地面沉降,取得了很好的效果^[5]。

国内外学者对开采地下水引起的地面沉降开展了大量研究,并取得了很多成果。例如,张云等采用室内单向压缩试验研究上海砂土的蠕变变形规律,证明上海砂土具有明显的非线性蠕变特征^[6]。Helm 用有限差分法对 Pixley 地区含水层进行一维模拟,发现软土层变形滞后于含水层水位的变化^[7]。徐海洋等使用改进的室内试验装置模拟释水引起的地面沉降,发现含水砂层与黏土层的沉降变形均滞后于承压含水层水位的变化^[8]。Shi 等改进了 Merchant 模型,使其可以很好地模拟土层的黏弹塑性变形并将其应用于苏州地区的地面沉降模拟^[9]。龚晓南等在 Mindlin 解的基础上推导了承压水降压下的地面沉降计算公式,认为顶板隔水良好的深层承压水短期开采引起的的地面沉降可以不予考虑^[10]。贾亚杰等基于层间位移协调条件分析土层变形特征,发现抽水井附近承压含水层沉降大于地表沉降,超过一定距离后承压含水层与地表沉降大致相等^[11]。对于地下水开采引起地面沉降的研究,前人主要侧重于深层地下水开采引起区域性地面沉降以及基坑工程减压降水引起地面沉降的研究,对浅层承压含水层抽水引起土体沉降规律的研究还相对较少。

本文选取天津滨海新区中新生态城服务中心为试验场地,在服务中心院内开展了承压含水层抽水引起地面沉降的现场试验。采用振弦式孔隙水压力传感器和一孔多标数据采集器实时监测孔隙水压力和分层标的变化,通过试验数据分析了孔隙水压力的变化规律、土体的变形性质以及分层沉降的规律,为进一步研究浅层承压含水层抽水引起土体沉降的规律和机理提供现场实测资料和理论依据。

1 试验概况

试验场地位于滨海新区中新生态城服务中心院内,根据工程勘察资料,地表下约 100 m 深度范围内的

浅部土层主要由粉质黏土、粉土和粉砂组成。由于土层渗透能力的差异,渗透系数小的黏性土弱透水层将 100 m 范围内的第一含水组划分为一个潜水含水层和一个承压含水层,潜水含水层主要由粉质黏土和粉土组成,承压含水层厚度为 55.2 m,主要由粉土和粉砂组成。从上到下各土层分布及物理力学参数见表 1。

表 1 土层分布及物理力学参数

Table 1 Distribution of layers and physical-mechanical parameters of soils

土层名称	底板埋深/m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比	压缩模量 /MPa	渗透系数 /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
素填土	1.4	—	—	—	—
粉质黏土-粉土	9.7	19.3	0.84	5.1	—
粉质黏土	18.7	19.07	0.91	3.96	7.31×10^{-8}
粉土-粉质黏土	25.1	20.15	0.65	8.23	8.93×10^{-7}
粉质黏土	41.4	19.28	0.83	5.15	1.99×10^{-8}
粉砂	47.5	20.6	0.52	16.1	8.90×10^{-6}
粉质黏土	53.4	19.8	0.73	5.53	1.28×10^{-8}
粉土-粉砂	71.1	20.33	0.57	10.62	—
粉质黏土	72.3	20.4	0.59	6.7	—
粉砂	92.8	19.88	0.61	13.89	—
粉质黏土-粉砂	100	20.27	0.63	11.37	—

本次试验对承压含水层开展单井定流量抽水试验,试验区的抽水井、观测井、孔隙水压力和分层沉降的观测点平面布置见图 1,其中 J1、J2 分别为抽水井和观测井,两井之间的距离为 75 m,两井深为 100 m,采用电流表人工监测井水位变化,在抽水井井口安装流量计以监测抽水量的变化,抽水井的滤水管位置为 57.5~96.6 m;K 为一孔多点埋设的振弦式孔隙水压力传感器,距抽水井水平距离为 5 m,埋置深度分别为 28 m、32 m、48.5 m、71 m,用以研究水位下降和恢复过程中孔隙水压力的变化规律;F 为一孔多标埋设的分层标,距抽水井水平距离为 7 m,埋置深度分别为 17.5 m、28 m、32 m、38 m、48.5 m,使用新型一孔多标数据采集器以监测各分层标处土层的沉降和回弹变化。

在正式试验前的试抽阶段发现,从开始抽水到第 60 min 时,抽水井水位降深达到了 7.73 m,而此时水位降深的变化速率为 0.1 cm/min,且随时间的延长降深变化速率越来越小,并很快达到稳定降深,因此可将抽水 60 min 后的情况看作似稳定状态。根据试抽结果及前期在滨海新区海河大桥试验区的研究成果^[12],结合生态城的水文地质条件及场地条件,确定本次试验的具体方案为:抽水流量为 $8.5 \text{ m}^3/\text{h}$,抽水时间为 4 h,同步观测井水位、孔隙水压力和分层标的

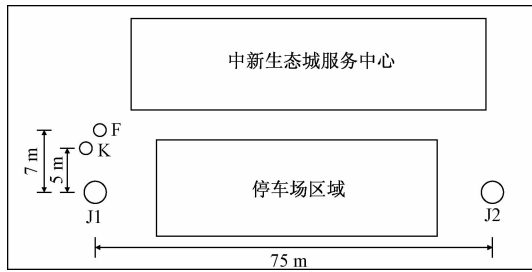


图 1 试验场平面布置图

Fig. 1 Layout of the test site

变化。抽水井和观测井的水位变化按照抽水开始后的第 1、2、3、4、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120 min 进行观测,以后每隔 30 min 观测一次;孔压计按照 1、2、3、4、5、7、9、11、13、15、20、25、30、35、40、50、60、70、80 min 进行观测,以后每隔 10 min 观测一次;分层标由一孔多标数据采集器每隔 30 min 读取记录一次。停止抽水后继续观测水位、孔隙水压力、分层标的变化及恢复情况,直至达到基本稳定。

2 试验结果分析

2.1 井水位监测数据分析

监测期间抽水井和观测井的水位埋深变化如图 2 所示,抽水期间抽水井水位变化明显,观测井的水位变化滞后抽水井约 6 min,抽水井处最大水位降深为 8.18 m,观测井处最大水位降深也达到了 1.03 m,停止抽水后抽水井处的水位迅速恢复且基本能恢复到初始水位。

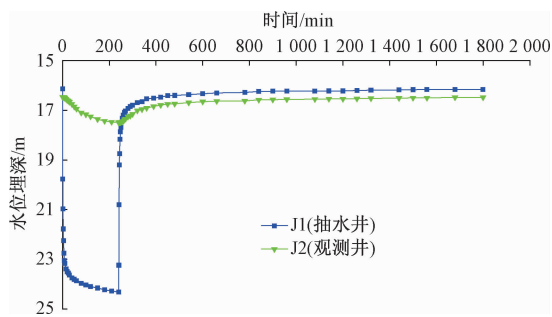


图 2 井水位历时曲线

Fig. 2 Groundwater level duration curve in the wells

根据试验数据和具体水文地质条件,采用配线法求承压含水层水文地质参数^[13],得到承压含水层的导水系数为 30.96 m²/d,渗透系数为 1.15 m/d,贮水系数为 8.15 × 10⁻⁵。

根据 Theis 公式导出的近似式计算抽水的影响半径,Theis 公式可改写为^[13]:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1.5 \left(\frac{Tt}{S} \right)^{1/2}}{r} \quad (1)$$

影响半径(即水位降深为 0 的位置)为:

$$R = 1.5 \left(\frac{Tt}{S} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: s ——任一点计算时刻的水位降深;

Q ——抽水井流量;

T ——承压含水层的导水系数;

t ——自抽水开始到计算时刻的时间;

S ——承压含水层的贮水系数;

r ——计算点到抽水井的径向距离;

R ——影响半径。

根据式(2)计算可知,本次试验抽水的影响范围约为 378 m。

2.2 孔隙水压力监测数据分析

试验过程中黏土层孔隙水压力的变化情况见表 2,承压含水层抽水不仅使承压水位下降,也引起上覆黏土层中孔隙水压力发生变化,说明潜水层与承压含水层之间有水力联系,抽水过程中承压含水层水头降低,与上覆土层的水头差增大,潜水层中的水通过弱透水层越流补给承压含水层。停止抽水后承压含水层水位逐渐恢复,黏土层的孔隙水压力也随之逐渐恢复至稳定。

表 2 黏土层孔隙水压力值的变化

Table 2 Changes in pore water pressure of the clay layer

编号	埋置深度/m	初始孔压/kPa	停止抽水孔压/kPa	恢复稳定孔压/kPa
K1	28	225.52	225.19	226.57
K2	32	274.81	274.43	275.66
K3	48.5	314.93	307.16	314.82
K4	71	512.27	503.13	512.41

抽水期间,不同深度黏土层孔隙水压力的变化量见图 3,71 m、48.5 m、32 m、28 m 处的孔隙水压力分别减小了 9.14 kPa、7.77 kPa、0.38 kPa、0.33 kPa。由此可知,抽水过程中黏土层中孔隙水压力的变化量随土层深度的增加而增大。

不同深度黏土层孔隙水压力历时曲线见图 4,与井水位变化曲线相比较,可以看出二者的变化规律大致相同,说明黏土层孔隙水压力的变化取决于承压含水层水位的变化。由图 4b 可以看出,抽水初期不同深度黏土层的孔隙水压力先上升再下降,停抽初期孔隙水压力先下降再上升。主要是因为渗透系数小的黏土层超孔隙水压力消散慢,导致孔隙水压力的变化滞后

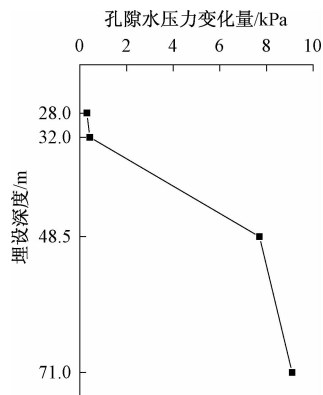


图3 抽水期间黏土层孔隙水压力的变化量

Fig.3 Variation in pore water pressure in the clay layer during pumping

于承压含水层水位的变化。

抽水初期各深度黏土层的孔隙水压力不是消散,而是上升并超过初始孔隙水压力,这是由于孔隙水压力传感器埋设深度处的外围土体释水后产生收缩,引起孔压计周围土体总应力增大,而由于黏土层的渗透系数较小,导致孔压计周围土体来不及释水,土骨架承担的有效应力不变,总应力的增大只能作用在水体上,就表现为孔隙水压力上升的曼德尔效应。停止抽水后也有表现为孔隙水压力继续消散的现象,这也是曼德尔效应,只不过作用相反。

抽水初期,71 m、48.5 m、32 m 以及 28 m 处孔隙水压力分别持续上升了 2 min、4 min、30 min 和 40 min;停止抽水后,71 m、48.5 m、32 m 以及 28 m 处孔隙水压力分别持续消散了 3 min、6 min、120 min 和 150 min。由此可知,孔隙水压力上升和消散的时间(即曼德尔效应的作用时间)随距承压含水层距离的增加而增加,随土的渗透系数的增大而减小。停止抽水后,71 m 和 48.5 m 处孔隙水压力迅速上升,分别在 2 600 min 和 5 500 min 后基本恢复稳定;32 m 和 28 m 处孔隙水压力缓慢上升,分别在 10 980 min 和 11 400 min 后基本恢复稳定。这表明停止抽水后黏土层孔隙水压力恢复至稳定所需要的时间随土层深度的增加而减小。

2.3 沉降监测数据分析

(1) 土体的变形性质

监测期间不同深度土体的累计沉降量见图5。在抽水过程中,承压含水层水位下降,各深度黏土层孔隙水压力减小、有效应力相应增加,土体发生了明显的压缩变形。停止抽水后,承压含水层水位迅速恢复,而黏土层仍然在持续压缩。这是由于黏土的渗透系数小,

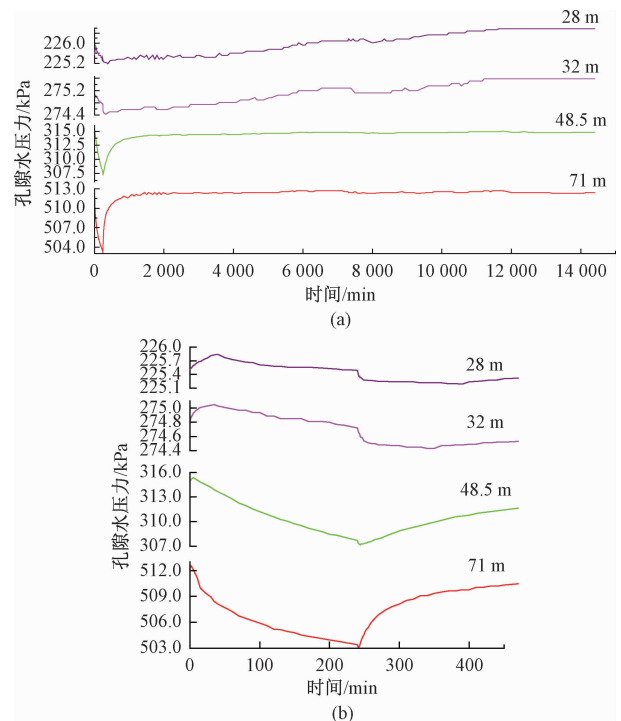


图4 孔隙水压力历时曲线((b)图为(a)图的局部放大)

Fig.4 Pore water pressure duration curve

超孔隙水压力消散慢,导致黏土层变形明显滞后于下伏承压含水层水位的变化。监测后期,17.5 m、28 m 土体未出现回弹趋势而是持续压缩,说明黏土层变形以塑性变形为主,且存在蠕变现象。

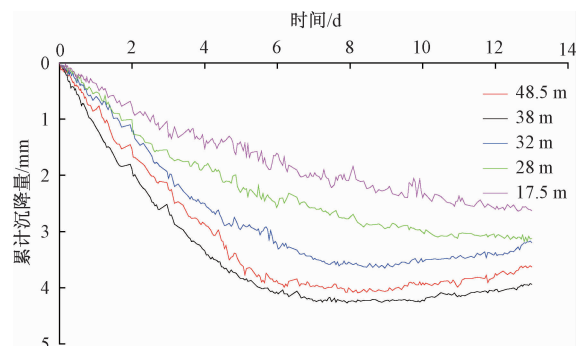


图5 累计沉降量历时曲线

Fig.5 Cumulative settlement duration curve

监测后期,32 m、38 m、48.5 m 土体的变形特征与 17.5 m、28 m 土体不同,出现了明显的回弹现象。这是由于 32 m 处土层为砂黏交互层且夹有粉土,土层既有弹性变形,也有塑性变形;而 38 m 和 48.5 m 土体下伏土层为粉砂层,两处土体的变形主要是随砂层的变形而变化。抽水过程中,砂层的压缩变形随时间迅速增加,停止抽水后砂层仍然在持续压缩,但压缩变形速率逐渐减小,表现出砂层变形明显滞后于承压含水层

水位的变化。抽水引起土层中有效应力的变化比上部荷载引起的变化要慢得多,砂层变形表现出明显与时间有关的蠕变性。土层的回弹比压缩变形小,且为蠕变抵消,因此砂层总体上反映持续的压缩变形。当蠕变趋于稳定,回弹变形量大于压缩变形量时,砂层表现为回弹变形。

上述现象表明含水砂层既存在弹性变形,也存在一定的塑性变形和蠕变性,这与以往认为砂土的压缩变形是随有效应力变化而瞬时发生的弹性变形规律不同。引起砂土蠕变的原因:(1)荷载作用下砂土颗粒沿粒间接触面产生错动滑移;(2)荷载作用下部分砂土颗粒破碎,颗粒进行重新排列;(3)砂层中夹有薄层黏土,砂层表现出黏性土的一些特征。这些因素使砂层在宏观上表现出变形随时间逐渐增加的蠕变现象。

(2) 土体分层沉降规律

一般上部荷载引起的地面沉降采用分层总和法计算,土体的沉降量由深到浅越来越大,但根据分层标实测数据分析可知,承压含水层短期抽水引起的土体沉降与上部堆载引起地面沉降的规律并不相同,土体最大沉降位置并非地表。

承压含水层抽水引起的水位降深打破了各含水层之间的水力平衡,由孔隙水压力监测数据可知潜水含水层与承压含水层之间有水力联系,所以承压含水层、弱透水层以及潜水含水层的孔隙水压力都有减小,并发生固结沉降。然而潜水层的孔隙水压力变化很小,潜水渗流引起的固结沉降可以忽略不计,潜水层主要随下伏土层的沉降而沉降,且沉降量等于或略大于下伏有明显孔隙水压力变化的土层顶板位置处的沉降量。但由图6可以看出,抽水井附近38 m以下土层沉降呈上大下小的规律,而38 m以上土层随着埋深的减小,沉降量有显著降低,土层沉降呈上小下大的规律,且最大沉降位置出现在38 m处。

承压含水层抽水引起水位降深在平面上分布不均,在抽水井处形成降落漏斗。漏斗中心土体沉降大,离中心远的土体沉降小,从而引起承压含水层出现不均匀沉降并向上传递,上覆土体出现附加拉应力。由于弱透水层及承压含水层的水位迅速下降,孔隙水压力降幅大,导致该层有效应力的增大值大于向上的附加拉应力,因此总的附加应力仍为压力,相当于在弱透水层与上覆土层的界面处(38 m处)施加一个向下的附加作用力,使弱透水层与承压含水层迅速发生压缩变形,并由下至上逐层累加,从而使抽水井附近弱透水层至下伏承压含水层总体呈现上大下小的沉降规律。

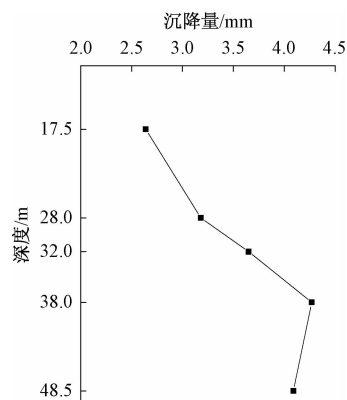


图6 不同深度处土体的最大沉降量

Fig. 6 Maximum settlement of soil at different depths

而弱透水层的上覆土层没有明显的孔隙水压力变化,不会发生明显的压缩变形,承压含水层抽水产生的不均匀沉降向上传递至此处土层的附加拉应力大于有效应力的增大值,相当于在弱透水层与上覆土层的界面处施加一个向上的附加作用力,使相应位置处的土体出现拉张变形,从而使抽水井附近弱透水层顶板以上土层总体呈现上小下大的沉降规律,且最大沉降出现在有明显孔隙水压力变化的弱透水层顶板位置。

3 结论

本文通过承压含水层抽水引起地面沉降的现场试验研究,分析了孔隙水压力的变化规律、土体的变形性质以及分层沉降的规律,得到如下结论:

(1)抽水过程中黏土层中孔隙水压力的变化量随土层深度的增加而增大,停止抽水后孔隙水压力恢复至稳定所需要的时间随土层深度的增加而减小。黏土层中孔隙水压力的变化滞后于承压含水层水位的变化,而且存在明显的曼德尔效应。曼德尔效应的作用时间随距承压含水层距离的增加而增加,随土体渗透系数的增大而减小。

(2)渗透系数小的黏土层超孔隙水压力消散慢,黏土层变形明显滞后于承压含水层水位的变化,以塑性变形为主且存在蠕变现象;砂层既存在弹性变形,也存在一定的塑性变形和蠕变性。

(3)抽水引起的土体沉降与一般上部堆载引起的地面沉降规律不同,短期抽取地下水会使承压含水层上覆土体出现不均匀沉降并产生附加拉应力,导致土体分层沉降呈现出不同的特点。孔隙水压力降幅大的土层呈现上大下小的沉降规律,孔隙水压力降幅小的土层呈现上小下大的沉降规律,且最大沉降出现在有明显孔隙水压力变化的土层顶板位置。

参考文献:

- [1] 王家兵,李平. 天津平原地面沉降条件下的深层地下水资源组成[J]. 水文地质工程地质,2004,31(5):35-37. [WANG J B, LI P. Composition of groundwater resources in deep-seated aquifers under the condition of land subsidence in Tianjin Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(5): 35-37. (in Chinese)]
- [2] 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 Y Q, ZHANG Y, YE S J, *et al.* Research on the problems of land subsidence in China[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(2): 153-160. (in Chinese)]
- [3] 吴铁钧,崔小东,牛修俊,等. 天津市地面沉降研究及综合治理[J]. 水文地质工程地质,1998,25(5):17-22. [WU T J, CUI X D, NIU X J, *et al.* Study and comprehensive treatment of land subsidence in Tianjin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1998, 25(5): 17-22. (in Chinese)]
- [4] Ortega- Guerrero A, Rudolph D L, Cherry J A. Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: field investigations and predictive modeling[J]. Water Resources Research, 1999, 35(11): 3327-3341.
- [5] 马锋,杨发俊,陈润桥,等. 天津市地下水开采对地面沉降影响的多元回归分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008(2):63-66. [MA F, YANG F J, CHEN R Q, *et al.* Effect of groundwater exploitation on land subsidence in Tianjin using multiple regression analysis method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008(2): 63-66. (in Chinese)]
- [6] 张云,薛禹群,吴吉春,等. 上海砂土蠕变变形特征的试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(5):1226-1230. [ZHANG Y, XUE Y Q, WU J C, *et al.* Experimental research on creep of Shanghai sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1226-1230. (in Chinese)]
- [7] Helm D C. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California; 1. Constant parameters[J]. Water Resource Research, 1975, 11(3): 465-478.
- [8] 徐海洋,周志芳,高宗旗. 释水条件下地面沉降的滞后效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(增刊2):3595-3601. [XU H Y, ZHOU Z F, GAO Z Q. Experimental research of hysteresis effect of land subsidence caused by water releasing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Sup2): 3595-3601. (in Chinese)]
- [9] SHI X Q, FANG R, WU J C, *et al.* Sustainable development and utilization of groundwater resources considering land subsidence in Suzhou, China [J]. Engineering Geology, 2012, 124(1): 77-89.
- [10] 龚晓南,张杰. 承压水降压引起的上覆土层沉降分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(1):145-149. [GONG X N, ZHANG J. Settlement of overlaying soil caused by decompression of confined water [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 145-149. (in Chinese)]
- [11] 贾亚杰,梁发云,崔振东,等. 基于层间位移协调的承压水降压引起土层变形分析[J]. 岩土力学,2016(增刊1):42-48. [JIA Y J, LIANG F Y, CUI Z D, *et al.* Analysis of soil deformation caused by decompression of confined water based on displacement coordination condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(Sup1): 42-48. (in Chinese)]
- [12] 何国峰,张云,孙铁,等. 周期性开采和回灌条件下浅层地下水位变化特征研究——以天津滨海新区为例[J]. 水文地质工程地质,2016,43(6):27-34. [HE G F, ZHANG Y, SUN T, *et al.* Variation characteristics of shallow groundwater levels under periodic pumping and recharge test: exemplified by Tianjin Binhai New Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43 (6): 27-34. (in Chinese)]
- [13] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 3版. 北京:地质出版社,2010:104-110. [XUE Y Q. Groundwater dynamics[M]. 3rd ed. Beijing:Geology Press, 2010: 104-110. (in Chinese)]

责任编辑:张若琳