

# 多基坑深层承压水降水引起地表沉降规律研究

杨 潇<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 基于上海某地铁换乘枢纽工程, 借助 GeoStudio2007 数值分析软件, 针对上海地区第二层承压水降水及其引起地层沉降进行数值模拟. 考虑了两种多基坑排布形式, 两个独立基坑和坑中坑; 设置了两个控制变量, 承压含水层厚度  $M$  和基坑间距  $D$ . 研究表明, 对于两个独立基坑, 在降水井影响区域内, 地表沉降量随着承压含水层厚度的增加而先增加后减小, 在影响区域外, 地表沉降量随着承压含水层厚度的增加而增加; 随着基坑间距的增大, 目标基坑和相邻基坑内部的地表沉降均减小. 对于坑中坑, 在降水井影响区域内, 地表沉降量随着承压含水层厚度的增加而减小, 在影响区域外, 地表沉降量随着承压含水层厚度的增加而增大; 随着外侧地下连续墙与深坑距离的增加, 深坑内部的地表沉降量呈现先增大后减小的现象.

**关键词:** 多基坑; 深层承压水降水; 地层沉降; 承压含水层厚度; 基坑间距

**中图分类号:** TU46+3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)01-0066-05

## Study on the law of formations settlement induced by dewatering in deep confined aquifer in multiple excavations

YANG Xiao<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering of Education Ministry, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A numerical simulation is carried out on dewatering in the second confined aquifer and the formations subsidence based on the underground complex engineering of a Shanghai metro junction hub. By utilizing the element numerical software GeoStudio2007, two array modes of multiple excavations are considered, with two control parameters, thickness of confined layer and distance of excavations. It shows that in the case of two independent pits, as the thickness of confined aquifer turns larger, the surface settlement increases first and declines later within the affected area of dewatering well, but raises monotonically outside the area. With the distance of excavations extending, the settlement declines both in the target pit and neighboring pit. As to the case of pit small in pit larger, the surface settlement shows a decrease and increase respectively within and without the affected area of dewatering well. Furthermore, there exists a feature of raise and down for the settlement in the center pit with a prolongation of the distance between the outside diagram wall and the center pit. The achievements of this paper will provide certain aids and references for engineering problems in soft areas as dewatering in deep confined water in multiple excavations.

**Key words:** multiple excavations; dewatering in deep confined aquifer; formations settlement; thickness of confined layer; distance of excavations

我国城镇化水平的提高带动了城市地下工程的发展, 城市基坑工程从浅型单一基坑逐渐发展成深型多基坑. 以多基坑为特征的地下工程, 对施工环境和施工条件提出了更高的要求. 地下承压水, 因具有较高的水位, 对于基坑工程的危害可以归结为两类: 一是基坑坑底接近承压含水层顶板时, 承压水水头压力过高导致的坑底突涌破坏; 二是基坑开挖穿过了承压含水层时, 由于基坑围护结构的渗漏导致的流砂管涌<sup>[1]</sup>. 因此, 有必要对影响基坑施工的承压水实施降水. 基坑工程对承压水实施降水, 会造成大面积的地层沉降. 原因在于, 降水一方面导致基坑四周水位降低, 土中孔隙水压力消散, 有效应力增加; 另一方面在水位降落漏斗范围内的水力梯度增大, 作用在土体上的渗透力增大<sup>[2]</sup>.

1923 年, Meinzer 首次在地下水的研究中提出了地面沉降的概念. 1925 年, 美籍奥地利土力学家 Karl Terzaghi 根据有效应力原理率先提出了饱和土一维固结理论. 基于饱和土有效应力原理和 Terzaghi 一维固结理论, 国内外学者对基坑工程中降水引起的地层沉降问题作了较为广泛的研究.

顾小芸<sup>[3]</sup>回顾 30 年来由抽水引起的地面沉降计算, 对计算参数进行了讨论. 璩继立等<sup>[4]</sup>从某地铁站降水实际出发, 对上海地区降水引起的水头分布范围及其与地层沉降之间的一般规律做了研究. 骆冠勇等<sup>[5]</sup>研究了在深厚弱透水层下卧强透水承压层的复杂地质条件下, 下卧承压水层减压引起的土中应力变化及周围地表沉降的计算方法. S. L. Shen 等<sup>[6]</sup>使用有限元模型对未开挖基坑承压水降压

收稿日期: 2014-08-11

修改稿日期: 2015-01-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划) (2011CB013800)

作者简介: 杨潇(1990-), 男, 博士生, 主要从事隧道及地下工程等领域研究工作. E-mail: tongji1410256@126.com

进行了模拟，并与实测数据做了对比分析。李文广<sup>[7]</sup>针对浅层承压含水层基坑降水，以粘弹性理论和随机介质理论为基础，推导了一种新的基坑降水引起地面沉降的计算方法。孙振岳等<sup>[8]</sup>通过离心机模型试验研究抽水引起的地基变形，探讨了渗透作用对地面沉降发展规律的影响。叶为民等<sup>[9]</sup>以某修复工程深基坑减压降水实例，基于Biot固结理论和Hardening-Soil本构模型，探讨了深基坑承压水降水对周边地面沉降的影响因素、范围和程度。杨天亮<sup>[10]</sup>根据某地铁车站深基坑工程减压降水和地质环境监测结果，分析了深基坑工程的地面沉降效应，为工程性地面沉降防治提供一定的科学依据和实践指导。

综上，目前对于基坑承压水降水及地层沉降的研究多是集中于单一基坑浅层承压水的降水实践或是从理论上推算深层承压水降水引起土层变形。然而，当基坑工程，特别是多个基坑遭遇深层承压水的特殊工况，实际施工所面临的风险是极大的。一方面对深层承压水降压引起的土体变形，其影响区域较大，会对各个基坑的个体稳定产生复杂的影响；另一方面，多个基坑的存在对于土层沉降有一定的控制作用，进而影响周边环境的变形规律。本文基于太沙基一维固结理论，着眼于多基坑深层承压水降水，即上海地区第二承压含水层的降水，在地下综合体工程背景下，研究承压水降水及其周边土层变形问题，通过数值模拟手段研究多种基坑布置形式下的地层沉降情况，具有一定的理论价值和工程指导意义。

1 工程背景及有限元模拟

1.1 工程背景

研究背景是上海汉中路地铁车站换乘枢纽工程，见图 1。基坑开挖最深处达 32.88 m，围护结构地下连续墙隔断了第一承压含水层，并对其实施坑内疏干降水；对于第二承压含水层，按需减压降水。由于该含水层未被围护结构隔断，采取坑内降水一会有坑外水源补给，二不利于坑内地下结构施工，因此最终采取坑外减压降水，属于第二类基坑工程降水<sup>[11]</sup>。此外，两层承压含水层之间没有水力联系。由于第一承压含水层坑内降水不会引起坑外土体沉降，因而本文针对第二层承压水作降水研究。

1.2 计算条件

利用 GeoStudio2007 有限元数值分析软件，对第二承压含水层做降水模拟。根据现场工程地质条

件，将土体计算模型总结为 5 层：潜水含水层 I、第一隔水层 II、第一承压含水层 III、第二隔水层 IV、第二承压含水层 V。各土层的特性参数见表 1。

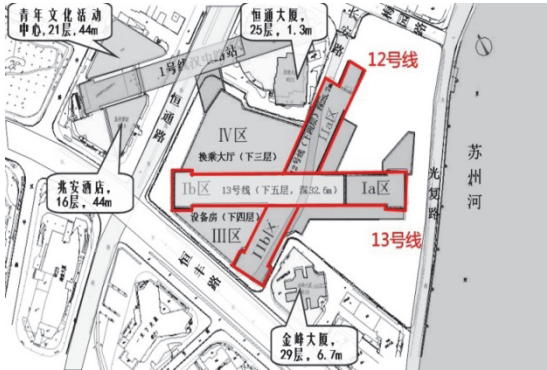


图 1 总工程平面图

Fig.1 The general engineering planar graph

表 1 土层的计算参数

Tab.1 Computing parameters of soil layers

土层	层厚 /m	重度 /kN·m <sup>-3</sup>	弹性模量 E/MPa	泊松 比/μ	渗透系数 (10 <sup>-6</sup> m/s)	
					水平 方向	竖直 方向
I	20	18.5	65.00	0.285	2.10	4.53
II	15	18.01	31.99	0.330	0.02	0.034
III	15	18.82	94.52	0.302	28.84	31.95
IV	30	18.30	42.76	0.326	0.024	0.095
V	30	19.20	85.96	0.302	24.10	63.09

2 有限元计算结果分析

研究多个基坑承压水降水，结合工程背景，选取典型断面进行分析。分析工况包括：两个独立基坑降压和坑中坑局部降压。研究控制变量为承压含水层厚度  $M$  和基坑间距  $D$ 。第二承压含水层初始水位埋深 6 m，统一水位降深 10 m，降压井插入第二承压含水层深度 3 m。

2.1 两个独立基坑降压

2.1.1 承压含水层厚度  $M$  的影响

基坑间距  $D$  为 50 m，承压含水层厚度  $M$  取值 10 m、15 m、20 m、25 m、30 m。降压井布设在目标基坑隔水帷幕外侧 5 m 处。计算模型如图 2，降压目标基坑位置对应  $x=525\sim550$  m，相邻基坑位置对应  $x=450\sim475$  m，降压井位置对应  $x=520$  m 及  $x=555$  m。

(1) 降水结果分析

降压后目标基坑处第二承压含水层顶部水位如图 3。不同承压含水层厚度的降压水位曲线基本重合，目标基坑处水位基本不变。因为水位降落仅受到水位降深影响，而与承压含水层厚度  $M$  无关。

(2) 地表沉降结果分析

降压后基坑周边地表沉降如图 4。如图围护结

构对于地表沉降有隔断作用,即围护结构两侧地表沉降值出现了跳跃突变.当处于降压井外侧约33 m之间的区域( $x=487\sim 588$  m),地表沉降 $s$ 随承压层厚度 $M$ 增加呈现先增加后减小的特点;当处于此区域之外时,地表沉降 $s$ 随承压层厚度 $M$ 增加而增加.对 $x=487\sim 588$  m区域内地表沉降出现后期减小的现象,原因在于该区域处于降压井抽水点附近影响区域,随着承压层厚度 $M$ 后期逐渐增加,降压井插入深度有限,使得抽水的地质变形受到了限制,而出现了后期地表沉降减小的特点.

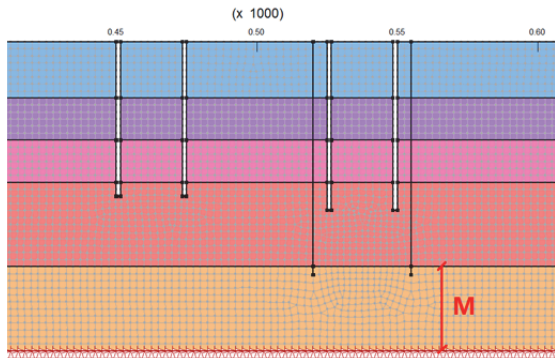


图2 不同承压层厚度的双坑降压计算模型

Fig.2 The computing model of two independent pits with various thickness of confined aquifer

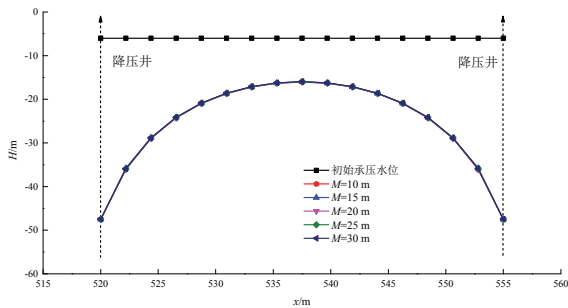


图3 不同承压层厚度的双坑降压水位

Fig.3 Curve of dewatering of two independent pits with various thickness of confined aquifer

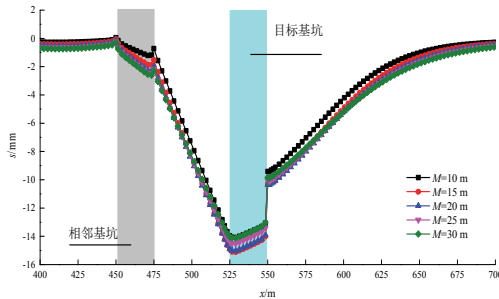


图4 不同承压层厚度的双坑降压后周边地表沉降

Fig.4 Curve of surface settlement of two independent pits with various thickness of confined aquifer

### 2.1.2 基坑间距 $D$ 的影响

计算模型如图5所示.

### (1) 降水结果分析

降压后目标基坑内第二承压含水层水位如图6. 水位降落曲线不受基坑间距 $D$ 的影响,表现为统一水位降深下各水位降落曲线重合.

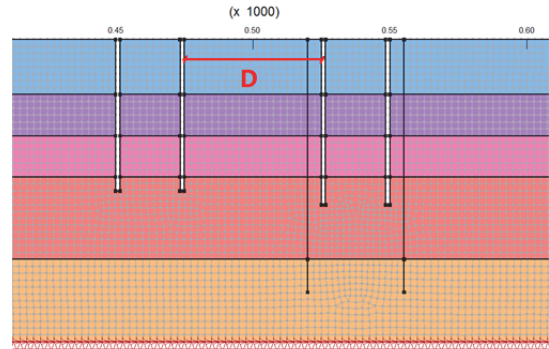


图5 不同基坑间距的双坑降压计算模型

Fig.5 The computing model of two independent pits with various distances of excavations

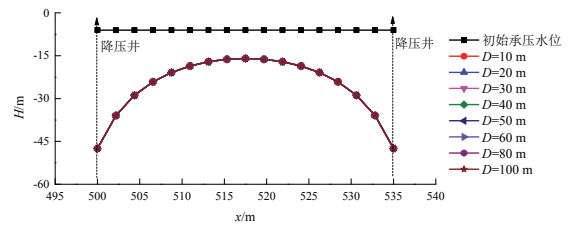


图6 不同基坑间距的目标基坑降压水位

Fig.6 Curve of dewatering of two independent pits with various distances of excavations

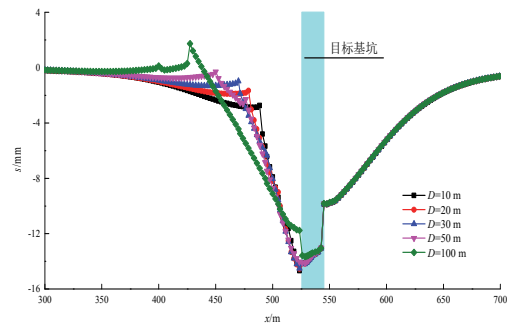


图7 不同基坑间距的双坑地表沉降

Fig.7 Curve of surface settlement of two independent pits with various distances of excavations

### (2) 地表沉降结果分析

降压后的地表沉降如图7所示. 围护结构对地表沉降有隔断作用;随着基坑间距 $D$ 的增加,目标基坑内部地表沉降逐渐减小,其外侧地表沉降基本相同;随着基坑间距 $D$ 的增加,相邻基坑内部地表沉降减小,其外侧地表沉降衰减速率加快.

### 2.2 坑中坑局部降压

#### 2.2.1 承压含水层厚度 $M$ 的影响

计算模型如图8,大基坑位置对应 $x=405\sim 595$  m,局部深坑位置对应 $x=485\sim 515$  m,降压井布设位置对应 $x=480$  m、500 m、520 m.



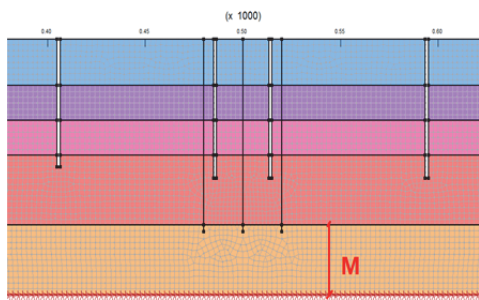


图 8 不同承压层厚度的坑中坑降压计算模型  
Fig.8 The computing model of pit in pit with various thickness of confined aquifer

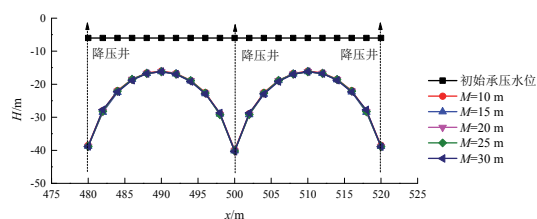


图 9 不同承压层厚度的坑中坑降水水位  
Fig.9 Curve of dewatering of pit in pit with various thickness of confined aquifer

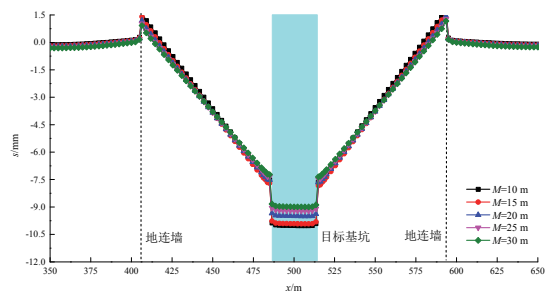


图 10 坑中深坑的周边地表沉降(不同承压层厚度)  
Fig.10 Curve of surface settlement of pit in pit with various thickness of confined aquifer

### (1) 降水结果分析

在不同承压层厚度下, 坑中深坑在降水后的承压层水位如图 9, 规律同前。

### (2) 地表沉降结果分析

坑中深坑工况下的地表沉降如图 10 所示。在  $x=450\sim 550$  m 范围以外, 随着承压层厚度增加, 地表沉降逐渐增大; 在该范围内, 随着承压层厚度增加, 地表沉降逐渐减小, 这与前述地表沉降规律有所不同, 原因在于前述各工况采用的是在目标基坑两侧进行双井降压, 而坑中深坑采用的是对目标深坑内外三井降压, 后者的降水曲线要高于前者(如图 11), 表明同一降深下, 三井降压对  $x=460\sim 540$  m 范围内土层的孔隙水压力消减程度要弱于双井降压, 因此没有表现出地表沉降随承压层厚度增加而首先增大的情况, 只呈现出了地表沉降随承压层厚度增加而减小的特点。

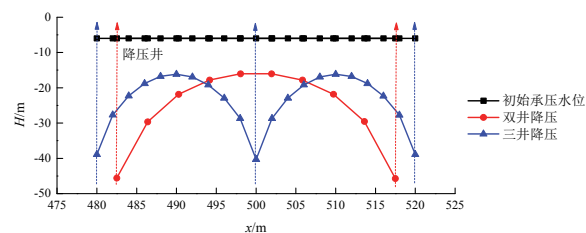


图 11 同一降深下双井降压和三井降水水位曲线  
Fig.11 Curve of dewatering under two wells and three wells

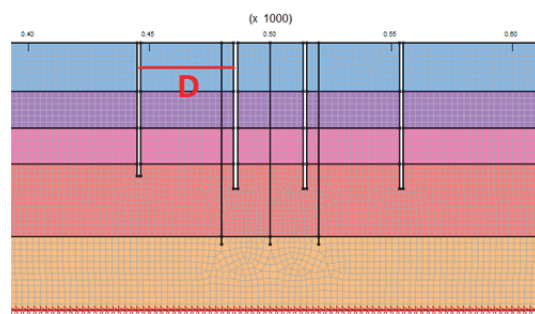


图 12 不同基坑间距的坑中坑降压计算模型  
Fig.12 The computing model of pit in pit with various distances of excavations

### 2.2.2 基坑间距 $D$ 的影响

这里研究的基坑间距  $D$ , 是指深坑边缘到大基坑边缘的距离。计算模型如图 12 所示, 局部深坑位置对应  $x=485\sim 515$  m, 降水井布设位置对应  $x=480$  m、500 m、520 m。

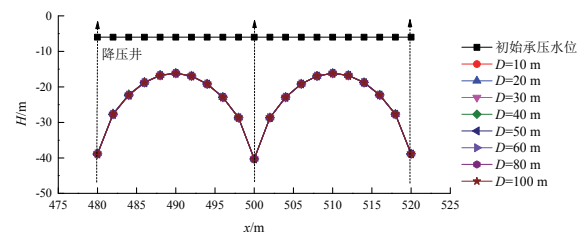


图 13 不同基坑间距的坑中坑降水水位  
Fig.13 Curve of dewatering of pit in pit with various distances of excavations

### (1) 降水结果分析

降水后水位曲线如图 13, 规律同前。

### (2) 地表沉降结果分析

不同基坑间距的地表沉降结果如图 14。

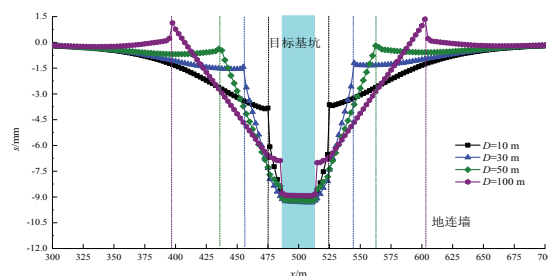


图 14 不同间距的坑中坑周边地表沉降  
Fig.14 Curve of surface settlement of pit in pit with various distances of excavations

随着基坑间距  $D$  的增加, 外侧地下连续墙对地表沉降的收敛作用愈加明显。然而, 在研究深坑中心处第二隔水层及上覆土层垂直沉降时发现, 随着基坑间距  $D$  的增加, 土层沉降出现先增大后减小的现象, 以  $D=30\text{ m}$  为分界点, 如图 15。这是因为围护结构对于地表沉降的隔断作用, 隔断效果越明显, 深坑内部土体沉降值越大。于是, 当基坑间距很小时, 围护结构对降压区域附近地表沉降隔断作用未充分发挥, 深坑中心土层沉降值偏小; 当基坑间距达一定数值时, 隔断作用才充分发挥, 深坑中心土层沉降值增加到最大; 而当基坑间距继续变大时, 隔断作用逐渐减弱, 深坑中心土层沉降值逐渐减小。

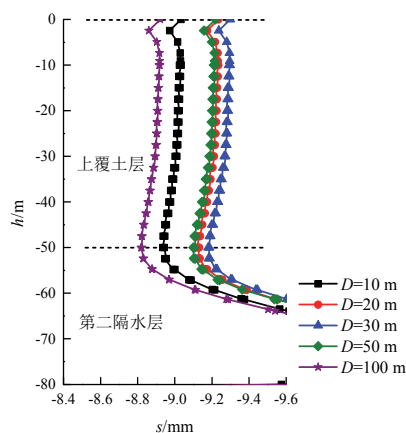


图 15 坑中坑中心处第二承压含水层以上各土层垂直沉降  
Fig.15 Settlement of vertical section at the center point of pit in pit

### 3 结论

(1) 两个独立基坑实施承压水降水, 在降压井形成的一定影响区域内, 地表沉降量随着承压含水层厚度  $M$  增加而先增加后减小; 在影响区域外, 地表沉降量  $s$  随着承压含水层厚度  $M$  增加而增加。

(2) 两个独立基坑实施承压水降水, 随着基坑间距  $D$  增加, 两个基坑内部的地表沉降均逐渐减小。

(3) 坑中坑实施承压水降水, 在降压井形成的一定影响区域内, 地表沉降随着承压含水层厚度  $M$  的增加而逐渐减小, 在影响区域外, 地表沉降随着承压含水层厚度  $M$  的增加而逐渐增大。

(4) 坑中坑实施承压水降水, 随着基坑间距  $D$  的增加, 深坑内部的地表沉降先增大后减小。

### 参考文献 References

- [1] 秦夏强. 超深基坑工程承压水控制实践与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.  
QIN Xiaqiang. Practice and research on the control of confined water in the ultradeep foundation pit projects[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [2] 周载阳. 地下水开采引起地面沉降的机理研究[J]. 工

程勘察, 2012(3): 22-26.

ZHOU Zaiyang. Mechanism research of land subsidence caused by groundwater extraction[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012(3): 22-26.

- [3] 顾小芸. 地面沉降计算的回顾与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 81-85.

GU Xiaoyun. Review and prospects of land subsidence computation[J]. The Chinese Journal of geotechnical hazard and control, 1998, 9(2): 81-85.

- [4] 璩继立, 刘国彬, 张建峰. 东昌路地铁车站承压水引起地面沉降的研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(5): 93-98.

QU Jili, Liu Guobin, Zhang Jianfeng. Study on the settlement induced by pumping confined water in subway station on Dongchang Road in Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(5): 93-98.

- [5] 骆冠勇, 潘泓, 曹洪, 等. 承压水减压引起的沉降分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(Supp.2): 196-199.

LUO Guanyong, PAN Hong, CAO Hong, et al. Analysis of settlements caused by decompression of confined water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp. 2): 196-199.

- [6] SHEN S. L, TANG C. P, BAI Y, et al. Analysis of Settlement Due to Withdrawal of Groundwater Around an Unexcavated Foundation Pit [A]. Underground Construction and Ground Movement GeoShanghai 2006[C]/United States: American Society of Civil Engineers, 2006. 377-384.

- [7] 李文广, 胡长明. 深基坑降水引起的地面沉降预测[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 181-184.

LI Wenguang, HU Changmin. Surface Subsidence Caused by Dewatering in Deep Foundation Pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(1): 181-184.

- [8] 孙振岳, 张嘎, 张建民等. 水井抽水引起地基沉降的离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(4): 67-71.

SUN Zhenyue, ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, et al. Centrifuge modeling of ground settlement due to groundwater pumping[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4): 67-71.

- [9] 叶为民, 万敏, 陈宝, 等. 深基坑承压含水层降水对地面沉降的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(Supp.2): 1799-1805.

YE Weimin, WAN Min, CHEN Bao, et al. Influence of dewatering of confined aquifers on land subsidence during deep excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(Supp.2): 1799-1805.

- [10] 杨天亮. 深基坑减压降水引发的地面沉降效应分析[J]. 上海国土资源, 2012(3): 41-44.

YANG Tianliang. Analysis of the land subsidence impact of dewatering of deep foundation pits[J]. Shanghai Land & Resources, 2012(3):41-44.

- [11] 吴林高, 李国, 方兆昌, 等. 基坑工程降水案例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

WU Lingao, LI Guo, FANG Zhaochang, et al. Dewatering Case History for Excavation[M]. Beijing: China Communications Press, 2009.

(本文编辑 吴海西)