

# 复杂条件下基坑降水引起地面沉降预测方法

段其广

(中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 211800, 南京)

**摘要** [目的]为研究复杂条件下基坑降水引起的地面沉降变化规律,依托南京地铁5号线机场路站深基坑项目,对基坑降水引起的地面沉降进行预测。[方法]采用现场抽水试验和理论解析的方法对基坑降水引起的地面沉降规律进行分析。分别进行单井抽水试验和群井抽水试验,通过单井抽水试验获得单井抽水引起地面沉降规律和不同地层条件下的抽水影响半径;通过群井抽水试验,获得4个典型截面的降水漏斗形状,并结合沉降固结公式推导得到适用于本工程的地面降水沉降预测公式;根据地面降水沉降预测公式计算地面降水沉降理论值,并与现场监测数据进行对比,验证地面降水沉降预测公式的适用性。[结果及结论]单井抽水影响半径随着渗透系数和降水深度的增大而增大,对于本工程的低渗透性土层其抽水影响半径约为5 m,而对于高渗透性土层其抽水影响半径可达20 m;降水漏斗曲线形状呈指数函数形状;距离降水井越近,地面沉降变形越大,由降水引起的地面沉降值随着距离抽水井距离的增加而迅速减小。

**关键词** 地铁;地面沉降;基坑降水;降水影响半径;降水漏斗

中图分类号 P642.26

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.031

## Prediction Method for Land Subsidence Induced by Foundation Pit Dewatering under Complex Conditions

DUAN Qiguang

(China Railway 14th Bureau Group Large Shield Engineering Co., Ltd., 211800, Nanjing, China)

**Abstract** [Objective] To study the land subsidence variation patterns induced by foundation pit dewatering under complex conditions, the deep foundation pit project at Nanjing Metro Line 5 Airport Road Station is taken as a case study to predict the land subsidence caused by foundation pit dewatering. [Method] Field pumping tests and theoretical analysis are employed to analyze the land subsidence patterns induced by foundation pit dewatering. Single-well and multi-well pumping tests are conducted. The single-well pumping tests provide data on land subsidence patterns and dewatering influence radii for different soil conditions, while the multi-well pumping tests reveal the shapes of dewatering funnels across four typical cross-sections. A land precipitation subsidence prediction formula is derived using the subsidence consolidation equation tai-

lored to the project conditions. The theoretical land subsidence values predicted by this formula are compared with field-monitored data to verify its applicability. [Result & Conclusion] The influence radius of single-well pumping increases with permeability coefficient and dewatering depth, reaching about 5 meters in low-permeability soil and up to 20 meters in high-permeability soil in this project. The shape of the precipitation funnel follows an exponential curve, and land subsidence deformation is greater adjacent to the dewatering well. Land subsidence induced by dewatering rapidly decreases with distance increasing from the well.

**Key words** metro; land subsidence; foundation pit dewatering; dewatering influence radii; dewatering funnel

许多基坑工程都面临着降水这一问题。基坑降水会引起地下水位降低、有效应力增加,从而形成地面不均匀沉降;另一方面,基坑降水会形成降水漏斗,引起地下水的渗流,渗流力会对基坑的稳定性产生不利影响<sup>[1]</sup>。

通过文献调研发现,一些学者采用理论解析方法,如分层总和法<sup>[2]</sup>、随机介质理论<sup>[3]</sup>等,推导出了基坑降水引起地面沉降的计算公式;许多学者采用数值模拟方法,如有限单元法<sup>[4-5]</sup>和有限差分法<sup>[6-7]</sup>,研究基坑降水引起的地面沉降。但对于基坑现场降水试验方面的研究较少。

本文依托南京地铁5号线机场路站深基坑工程,设计了单井和群井抽水试验,以对基坑降水引起的地面沉降进行预测。根据单井抽水试验结果,获得了单井抽水引起地面沉降规律和该地层条件下的抽水影响半径;通过群井抽水试验,获得了4个典型截面的降水漏斗,并结合沉降固结理论推导出了适用于本工程的降水沉降预测公式,最后与监测数据进行了对比验证。

## 1 工程概况

### 1.1 地理位置及环境

南京地铁5号线机场路站总长为325.26 m,总

建筑面积为 25 459 m<sup>2</sup>。该车站采用明挖法施工,基坑的开挖深度范围为 15.20~24.60 m(局部区域为 25.80 m),为坑中坑的形式。基坑北侧为机场大道管廊以及盾构接收井,南侧为大校机场跑道(已列入南京市第二批历史建筑保护名录)。

### 1.2 场区地质勘测概况

根据勘察资料显示,本基坑开挖范围以粉土、粉质黏土和砂土为主,主要物理力学参数见表 1。

表 1 土体物理力学指标

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil

土层	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	压缩模量/ MPa	渗透系数/ (cm/s)	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	孔隙比
素填土	18.84	5.11	$2.77 \times 10^{-6}$	14.40	23.60	0.82
2-1c3 粉土夹粉质黏土	18.69	6.62	$3.33 \times 10^{-5}$	21.50	15.00	0.83
2-2c3 + b4 淤泥质粉质黏土夹粉土	17.98	5.32	$1.00 \times 10^{-4}$	16.34	15.20	0.99
2-2 d3 粉土~粉砂	18.44	8.97	$4.43 \times 10^{-4}$	6.10	31.13	0.85
3-2b2 + c3 粉质黏土	19.60	6.58	$2.87 \times 10^{-7}$	41.10	14.06	0.70
3-2b2 + c3 粉质黏土夹粉土粉砂	19.45	5.88	$2.91 \times 10^{-6}$	33.50	14.36	0.72

## 2 基坑降水诱发地面沉降机理

根据文献[8]可知,降水引起的地层沉降主要是由降水后引起有效应力增加产生的固结变形  $s$ , 计算公式为:

$$s = \sum_{i=1}^n s_i = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{s,i} \Delta h_i}{E_{s,i}} \quad (1)$$

式中:

$s_i$ ——第  $i$  层土的固结沉降量;

$\sigma_{s,i}$ ——第  $i$  层土的附加应力值;

$\Delta h_i$ ——第  $i$  层土中的水头损失;

$E_{s,i}$ ——第  $i$  层土的压缩模量;

$N$ ——土层数。

结合降水漏斗函数,可得:

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{(\gamma_i - \gamma'_i)(H_0 - f(H_0, H_w, l))^2}{E_{s,i}} \quad (2)$$

式中:

$\gamma_i$ ——第  $i$  层土的饱和重度;

$\gamma'_i$ ——第  $i$  层土的有效重度;

$H_0$ ——初始含水层厚度;

$H_w$ ——降水深度;

$l$ ——距抽水井的距离;

$f(H_0, H_w, l)$ ——抽水漏斗曲线函数。

地下水类型为潜水及承压水。潜水含水层水位埋深为 0.7~1.2 m,承压水头高度约为 17.0 m。通过地勘资料可以得出,本基坑施工范围内地下水丰富、地下水位高、以承压水为主,且部分位于强度较低的软土地层中,有流土和基底突涌的隐患,需在开挖前进行人工降水。本文根据预降水试验数据和理论解析方法对基坑降水引起的地面沉降进行预测。

## 3 抽水试验

### 3.1 井点平面布置

南京地铁 5 号线基坑降水井点平面布置如图 1 所示。华夏幸福基坑内部降水井呈梅花形分布。由于 5 号线基坑需要在华夏幸福基坑降水的基础上进行进一步降水,因此,沿着 5 号线基坑增补了 39 口降水井,编号为 B5-1—B5-39。降水井主要穿过粉质黏土夹粉土、粉砂,井底进入强风化岩 1 m。加密井主要布置在 D 区。为了获得降水漏斗函数,分选别取了 4 个典型截面(截面 1-1—4-4),记录抽水稳定后各观测井的水位。

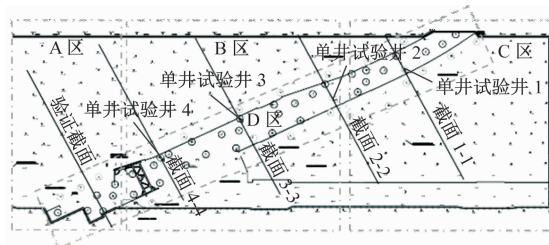


图 1 基坑降水井点布置图

Fig.1 Layout diagram of foundation pit dewatering well points

### 3.2 监测数据分析

单井抽水试验从上午 9:00 开始,分别选取了单井 1—4 进行水位观测,得到的地下水位累计变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知,单井 4 的水位下降最

为剧烈,大约经过 3 h 后水位基本稳定,随着抽水继续水位有所回升,最终稳定后水位约为 5.0 m,降深为 3.0 m,降水幅度达到了 38%。单井 2 最大降深达到了 6.1 m,降水幅度达到了 49%,抽水开始后前 3 h 水位降低较为剧烈,随着时间的推移,水位仍在下降但是下降速度逐渐变缓,第二天中午后水位基本稳定在 6.4 m。单井 1 和单井 3 水位下降较为平缓,降深也较小,稳定后水位分别稳定在 7.3 m 和 5.8 m,降水幅度分别为 32% 和 31%。结合地质资料发现,单井 4 和单井 2 主要位于高透水地层,渗透系数分别为 0.086 m/d 和 0.123 m/d,因此抽水时降水幅度较大;单井 1 和单井 3 所处地层透水性较差,渗透系数分别为 0.025 m/d 和 0.029 m/d,降水幅度较小。

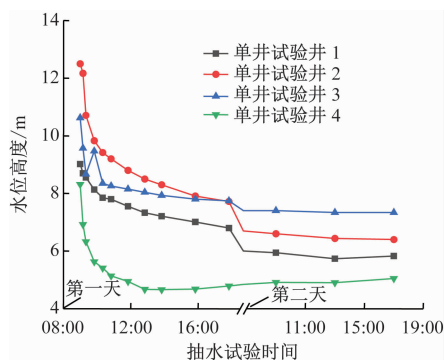


图2 抽水试验井地下水位累计变化曲线

Fig.2 Cumulative change curves of groundwater level in pumping test well

降水井周边地面沉降变化曲线如图 3 所示。由于降水井的摩擦效应,在一定范围内地面沉降随着距降水井距离的增大先增大,当超过一定范围后摩擦效应不再明显,随着距降水井距离的增大地面沉降逐渐减小,总体呈现随着距降水井的距离增大地面沉降量减小的趋势。由图 3 可知,截面 3 地面沉降最大,最大沉降值为 15.5 mm;截面 2 地面沉降最小,沉降值为 11.0 mm。通过地质资料可知,此截面基岩埋深较浅,压缩层较薄,因而导致地面沉降值最小;截面 4 和截面 3 的地面沉降值介于两者之间,分别为 12.5 mm 和 14.0 mm。4 个截面地表沉降规律基本一致。

### 3.3 单井抽水影响半径计算

降水影响半径是基坑降水设计中的一个重要参数,一般采用单孔或多孔抽水试验获得,并采用吉哈尔特经验公式近似计算。稳定渗流承压完整

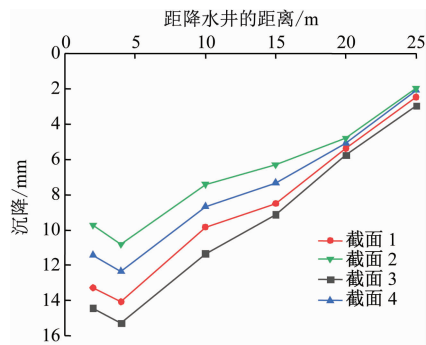


图3 降水井周边地面沉降曲线

Fig.3 Land subsidence curves of dewatering well surroundings

井的单井抽水影响半径  $R$  计算公式为:

$$R = 10H_w \sqrt{k} \quad (3)$$

式中:

$R$ ——单井抽水影响半径,单位 m;

$k$ ——渗透系数,单位 m/d;

$H_w$ ——降水深度,单位 m。

$$k = \frac{0.366Q}{H_0 H_w} \lg \frac{R}{r_0} \quad (4)$$

式中:

$r_0$ ——抽水井半径,单位 m;

$Q$ ——抽水井流量,单位  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

根据地质剖面图可以得出,含水层平均厚度  $H_0$  为 17 m,抽水井半径  $r_0$  为 0.4 m,将其分别代入式 (3) 和 (4) 可得到单井抽水影响半径  $R$  (见表 2)。由表 2 可知:渗透系数越大,抽水量越大,降水深度增大,单井抽水影响半径越大;本工程低渗透性地层单井抽水影响半径在 5 m 左右,高渗透性地层单井抽水影响半径可达 20 m。

表2 单井抽水影响半径

Tab.2 Dewatering influence radius of single-wells

井号	$Q/$ ( $\text{m}^3/\text{d}$ )	$k/$ (m/d)	$H_w/\text{m}$	单井抽水 影响半径 $R/\text{m}$
1	3.39	0.025	3.20	5.07
2	20.16	0.123	6.10	21.38
3	3.83	0.029	3.28	5.56
4	9.46	0.086	3.27	9.61

### 3.4 沉降漏斗曲线拟合

为了获得降水漏斗函数曲线,进行群井抽水试验。经过 2 d 抽水,待水位最终趋于稳定后,分别选取 4 个典型截面 1-1—4-4 的数据进行分析,结果如图 4 所示。截面 1-1 抽水漏斗最低水位为 5.9 m,距

离抽水井 13 m 位置处水位维持在 15.0 m 左右,随着距离的增加抽水的影响效果逐渐减弱,水位最终稳定在 17.0 m。截面 2-2 抽水漏斗最低水位为 7.1 m,距抽水井 14 m 位置处的水位保持在 16.0 m,其抽水影响范围外水位保持在 17.3 m。截面 3-3 抽水漏斗最低水位为 8.8 m,距抽水井 13 m 位置处的水位保持在 16.5 m,其抽水影响范围外水位保持在 18.0 m。截面 4-4 抽水漏斗最低水位为 5.1 m,距抽水井 13 m 位置处的水位保持在 12.0 m,其抽水影响范围外水位保持在 16.0 m。由图 4 可知:越靠近抽水井边沿降水漏斗的曲线越陡峭,水力坡降越大其渗流作用力越大;当距离抽水井超过 13 m 后,各截面的水位虽然会上升,但是上升较为缓慢。

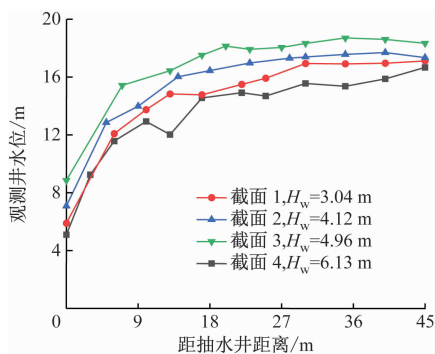


图4 不同截面的降水漏斗曲线

Fig. 4 Dewatering funnel curves of different cross-sections

### 3.5 基坑降水引起的地面沉降

根据相关文献研究,降水漏斗形状函数  $f$  为:

$$f = -H_w + (H_0 + H_w)(1 - a_1 e^{-l/b_1} - a_2 e^{-l/b_2}) \quad (5)$$

式中:

$f$ ——抽水漏斗形状函数;

$a_1, a_2, b_1, b_2$ ——回归系数。

根据地质剖面图,本基坑开挖部分主要处于承压含水层中,并且含水层的厚度较为均匀。通过勘察发现承压水头高度最大处约为 19 m,最小处约为 15 m,平均高度为 17 m。将截面 1-1—4-4 的观测数据进行拟合,得到:  $a_1 = 0.3, a_2 = 0.5, b_1 = 3, b_2 = 15$ ,拟合优度为 0.91。将拟合得到的系数代入式(5),得到本工程基坑的降水漏斗曲线函数  $f$ :

$$f = -H_w + (H_0 + H_w)(1 - 0.3e^{-l/3} - 0.5e^{-l/15}) \quad (6)$$

将式(6)代入式(2),得到本工程基坑降水引起地面沉降计算公式:

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{(\gamma_i - \gamma'_i)(H_0 + H_w)(0.3e^{-l/3} + 0.5e^{-l/15})^2}{E_{s,i}} \quad (7)$$

## 4 工程验证及应用

利用本工程的实测数据对地面沉降计算公式进行验证。将表 1 中的基坑土体力学参数代入式(7),得到地面沉降的理论值,将该理论值和实测值(图 1 中验证截面实测数据)进行对比,结果如图 5 所示。

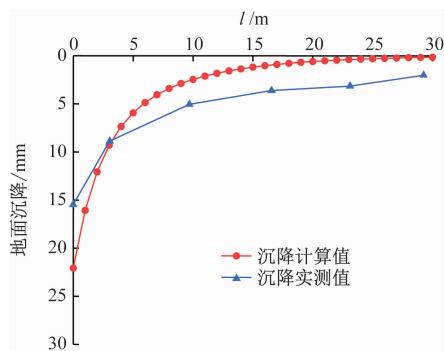


图5 地面沉降理论值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of land subsidence theoretical and field-measured values

由图 5 可知:地面沉降的理论值基本呈指数函数变化趋势,在抽水井位置处沉降值最大为 22 mm,随着距抽水井的距离增大沉降值迅速减小,距离抽水井 10 m 的位置处的沉降值仅为最大沉降值的 1/10;当距离超过 10 m 后,地面沉降值随着距抽水井距离的增加而缓慢减小;地面沉降的实测值随着距离抽水井距离的增加而减小,但相较于理论值变化较缓慢,在抽水井位置处实测沉降值达到最大值约为 15 mm。相较于单井抽水试验,群井抽水试验的摩擦效应不明显。

地面沉降理论值和实测值与距抽水井距离的变化规律呈现出较好的一致性:距离抽水井越近,其沉降变形越大。这也说明了降水时,降水漏斗中部是渗流力最大的地方,也是其降水深度最大的位置,降水漏斗两边是降水深度较小的位置。故在施工期间,应加大对降水井口附近的监测频率。

图 6 为降水深度对地面沉降理论值的影响。随着降水深度的增大,地面沉降值越来越大,其影响范围也逐渐变大。当降水深度为 2 m 时,造成的地面沉降最大值约为 10 mm,其影响范围大约在距离

降水井 5 m 范围内;当降水深度为 8 m 时,造成的地面沉降最大值约为 26 mm,其影响半径约为 12 m。

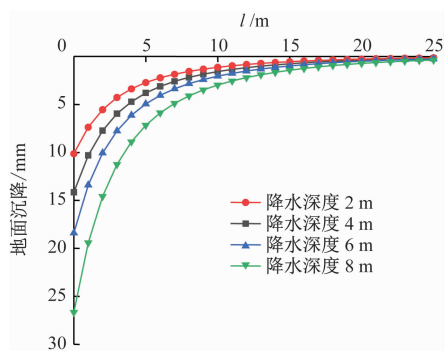


图6 不同降水深度下地面沉降理论计算值

Fig.6 Land subsidence calculation values of different dewatering depths

## 5 结语

通过对现场抽水试验数据进行拟合,得到了降水漏斗曲线函数,将其代入固结沉降公式,得到本工程的基坑降水引起地面沉降预测公式。通过该公式计算地面沉降的理论值,并与现场实测值进行对比,主要结论如下:

1) 抽水漏斗越靠近抽水井越陡峭,水力坡降越大,渗流力越大,相应的沉降越大,当超过影响半径后,降水的影响可以忽略不计;影响半径的大小与土体的渗透系数、抽水量有密切关系。对于本工程的低渗透性地层,其影响半径在 5 m 左右;而对于高渗透地层,其影响半径可达 20 m。

2) 通过群井抽水试验发现,抽水漏斗的形状大体呈指数函数的形状,并且影响半径随着降水深度、抽水量和渗透系数的增大而增大,通过抽水试验数据拟合得到了本工程抽水漏斗函数的基本系数。

3) 距离降水井越近,地面沉降越大,由降水引起的地面沉降值随着距离抽水井的距离的增加而迅速减小,这也说明了降水时,降水漏斗中部是渗流力应力最大的地方,也是其降水深度最大的位置,降水漏斗两边是降水深度较小的位置。故在施工期间,应加大对降水井口附近的监测频率。

## 参考文献

[1] 蔡小玲,俞莉,李继明. 西北地区地铁基坑降水对周围环境影响的计算方法[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(3): 140.

CAI Xiaoling, YU Li, LI Jiming. Study on calculation method of effect of subway foundation pit dewatering on surrounding environment in Northwest China[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2022, 48(3): 140.

[2] 张世民,景峰卫,黄英省,等. 基坑开挖及降水对抗外地表沉降的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(5): 43.

ZHANG Shimin, JING Fengwei, HUANG Yingsheng, et al. The influence of foundation pit excavation and dewatering to ground surface settlement[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2016, 38(5): 43.

[3] 何桥敏,胡卫国. 基于随机介质理论的基坑地表沉降计算方法研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1): 65.

HE Qiaomin, HU Weiguo. Research on the calculation method for surface settlements of the foundation pit based on random medium theory[J]. Modern Tunneling Technology, 2019, 56(1): 65.

[4] 喻伟,陈鑫磊,张学民. 深圳富水软弱地层深基坑施工对周边环境的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(9): 2251.

YU Wei, CHEN Xinlei, ZHANG Xuemin. Analysis on the influence of deep foundation pit construction in water-rich soft ground of Shenzhen on surrounding environment[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(9): 2251.

[5] 周勇,魏嵩琦,朱彦鹏. 兰州地铁车站深基坑开挖过程中降水对邻近地下管道的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 495.

ZHOU Yong, WEI Songqi, ZHU Yanpeng. Effects of dewatering on adjacent underground pipelines during excavation of deep foundation pit at a metro station in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 495.

[6] 赵帆. 合肥市轨道交通 1 号线大东门车站深基坑降水对于地面沉降的影响[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2015.

ZHAO Fan. Influence of dewatering in deep foundation pit of Dadongmen Station of Hefei Rail Transit Line 1 on land subsidence[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2015.

[7] 向贤华. 基于流固耦合作用的富水砂卵石地层深基坑变形特性分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(6): 80.

XIANG Xianhua. Analysis of deep foundation pit deformation based on fluid-structure interaction of water-abundant sand and cobble layer[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(6): 80.

[8] 李晓生. 富水深厚砂卵石地层深基坑降水引起的地层沉降预测[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 77.

LI Xiaosheng. Prediction of ground settlement caused by dewatering of deep foundation pit in water-rich deep sandy pebble stratum[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 44(1): 77.

· 收稿日期:2023-01-11 修回日期:2023-03-21 出版日期:2024-12-10

Received:2023-01-11 Revised:2023-03-21 Published:2024-12-10

· 通信作者:段其广,高级工程师,512770939@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license