

富水软弱地层基坑开挖中的土体变形与渗流特性

任 壮¹ 丁春林¹ 吴 烁² 吴 超¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 211800, 南京//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 针对深基坑降水开挖引起坑周水土演变的研究不足,以无锡地铁旺庄路车站深基坑工程为案例,通过现场监测基坑地下水位、孔隙水压力以及降水井流量,分析了基坑降水随时间和空间的变化规律;通过分析土体沉降和围护结构水平变形的实测结果,研究了基坑降水开挖引起的变形与渗流特性规律。研究结果表明:基坑降水过程中,深地层孔隙水压力降低幅度大于埋深较浅的地层;承压井单井出水量初期明显大于疏干井,随后承压井出水量基本稳定,疏干井出水量随着时间的推移逐步下降;基坑降水开挖时,一开始距离基坑较远的地方沉降较大,随着降水开挖的进行,距离基坑较远处的沉降逐步增加;降水开挖过程中,基坑水平位移沿深度呈先增大后减小的趋势,最大水平位移出现在地下连续墙中间部位。

关键词 深基坑开挖;富水软弱地层;基坑土体变形;渗流

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.024

Soil Deformation and Seepage Characteristics of Foundation Pit Excavation Engineering in Water-rich Soft Stratum

REN Zhuang, DING Chunlin, WU Shuo, WU Chao

Abstract Water and soil changes caused by deep foundation pit excavation engineering and dewatering lack research. Taking the deep foundation pit project of Wangzhuang Road Station of Wuxi Metro as an example, the variation law of dewatering over time and space is analyzed by detecting foundation pit underground water level, pore water pressure and flow volume of dewatering well on site. By detecting soil settlement and horizontal displacement of enclosure structure, the deformation and seepage characteristics caused by foundation pit dewatering are studied. Research results show that during the process of foundation pit dewatering, the reduction of deep stratum pore water pressure is larger than that of shallow stratum pore water pressure. The water flow volume of single well of confined well is obviously larger than that of drainage well at the beginning, then the water flow volume of confined well is gradually stable. The drainage well water flow volume gradual-

ly decreases as time passes. In the process of foundation pit dewatering, the soil settlement close to the pit is larger at the beginning, and the soil settlement far away from the pit increases gradually over time. In the process of foundation pit dewatering excavation, the horizontal displacement of foundation pit shows trend of increasing first then decreasing along the buried depth of soil. The maximum displacement occurs in the middle of diaphragm wall.

Key words deep foundation pit excavation; water-rich soft stratum; foundation pit soil deformation; seepage

First-author's address Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China

随着城市轨道交通的快速发展,地铁车站深基坑大量出现在城市闹市区和交通繁忙的道路交叉口^[1-2]。由于地铁深基坑需要开挖至地下水位以下,因此在开挖前需要先降低地下水位。然而,降低地下水位会导致基坑周边土体有效应力增大,使土体发生固结不均匀沉降。这种不均匀沉降可能损坏周边的建筑物,导致房屋和路面开裂,埋藏管线受到破坏等问题。因此,基坑周边水土演变已成为深基坑工程的研究热点^[3-4]。

目前,诸多学者对基坑周边水土演变规律进行了研究,如通过基坑变形机理开展对基坑宽度、降水深度、降水时间等因素的研究,或研究考虑降水因素影响下的土体沉降的计算方式^[5-8]。然而,对基坑周边水土演变规律的研究较多,而对软土富水深基坑水土演变研究深度不足,有待进一步深入研究。

对此,本文依托无锡富水软土地区的地铁3号线旺庄路路站深基坑工程,通过现场实测地下水位、孔隙水压力、降水井流量等,分析降水对基坑土体变形特性的影响,以获得降水前后深基坑周边变形特性规律。

1 工程背景

旺庄路站位于无锡新吴区长江路与旺庄路的交叉路口,为地下二层岛式车站,其周边交通繁忙。旺庄路站周边建筑物众多,且其场地两侧分布了大量市政管线,因此施工过程中必须严格控制基坑周边的土体变形。

旺庄路站有效站台中心处基坑深度为 15.83 m,北端盾构井基坑最深处为 17.80 m,南端盾构井基坑最深处为 19.10 m。该车站基坑变形控制等级为一级,车站基坑外地面最大沉降量、围护结构最大水平位移均不得超过 $0.001\ 5\ H$ (H 为基坑开挖深度)。

旺庄路站的地层条件如图 1 所示。该工程场地地层主要为黏质粉土、黏土和粉质黏土层。

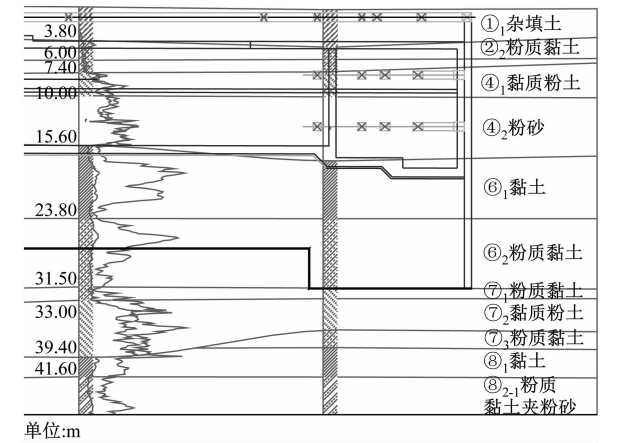


图 1 旺庄路站地层条件示意图

Fig. 1 Diagram of Wangzhuang Road station stratum condition

基坑区域地下水类型为松散岩类孔隙水,包括潜水、微承压水和第 I 层承压水。其中,潜水稳定水位标高为 1.42 ~ 1.80 m 左右;微承压水水位埋深为 2.31 ~ 2.81 m,水位标高为 1.61 ~ 1.63 m 左右;第 I 承压水水位埋深一般为 5.83 ~ 6.37 m 左右,水位标高为 -1.34 ~ -1.88 m 左右。

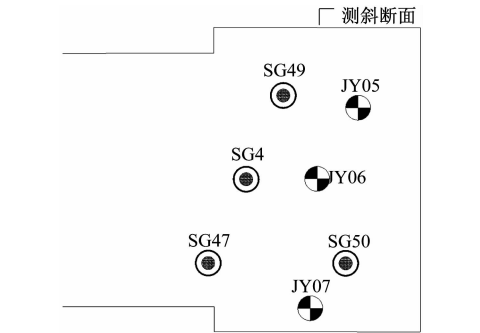
基坑潜水降水共持续 60 d,其中承压水降水从第 40 日开始。降水井及观测井平面位置示意图如图 2 所示。

2 基坑降水的实地观测

2.1 地下水位现场观测结果

基坑开始降水后,利用 SWJ-90 型钢尺水位计测量 SG48 的地下水位埋深及 JY06 的水头降深。

观测结果如图 3 所示。



注:SG 为疏干井,JY 为承压井;数字为观测井编号。

图 2 基坑内降水井及观测井平面位置示意图

Fig. 2 Planar layout diagram of dewatering well and observation well in foundation pit

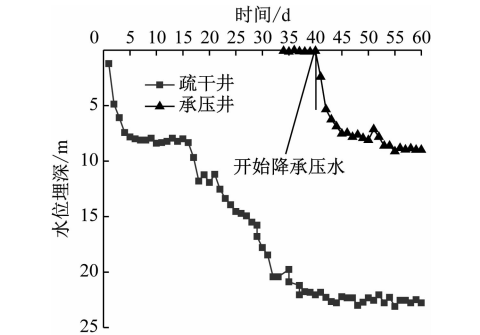


图 3 水位埋深观测值

Fig. 3 Observation value of water level buried depth

由图 3 可见:SG48 的水位变化时程曲线并不是呈线性降低的趋势,其斜率有低有高,曲线有明显的拐点。这表明:该水位并不是随时间均匀降低的,水位降低过程呈现出明显的多梯次分段下降变化特征。经分析,坑内疏干土体存在空间上的变异性,不同土层的渗透系数及各向异性具有一定的差异;在渗透性低的土层中,观测井水位下降缓慢;在渗透性高的土层中,观测井水位下降相对较快。

由图 3 还可看出:JY06 在未降水之前承压含水层水头降深几乎无变化。经分析,疏干井滤管未插入承压含水层,因其上覆弱透水层的隔水作用,基坑内疏干降水几乎不会影响到承压含水层。随着承压井抽水的不断进行,坑内的承压含水层的水头高度逐渐降低。与疏干观测井不同,坑内承压观测井水头降深时程变化曲线的斜率不断减小,表明其水头降低速度在逐渐减慢,其水头降深变化过程按照变化速率大致可以分为快速降低期、缓慢降低期及逐渐稳定期。其中,缓慢降低期的承压含水层水头降深在缓慢地增长,逐渐稳定期的承压含水层水头降深已基本稳定。

2.2 孔隙水压力监测

在基坑南端头井布置 1 个孔隙水压力监测断面,共设 3 个监测孔,每个监测孔内埋设 4 个孔隙水压计。孔隙水压计的埋深分别为 6 m、14 m、26 m 及 36 m。监测布点埋深示意图如图 4 所示。

编号	土层	层厚/m	土层剖面	孔隙水压力计
① ₁	杂填土	3.49		
③ ₂	粉质黏土	3.51		■埋深6 m
④ ₁	黏质粉土	4.53		
④ ₂	粉砂	6.48		■埋深14 m
⑥ ₁	黏土	7.01		
⑥ ₂	粉质黏土	8.13		■埋深26 m
⑦ ₂	黏质粉土	8.00		■埋深36m
⑧ ₁	黏土	6.04		

图 4 孔隙水压力计埋深布置示意图

Fig. 4 Diagram of buried depth layout plan of pore water pressure monitor

运用钢弦式孔隙水压力计,用数显频率仪测读并记录孔隙水压力计频率。有:

μ = K(f_i^2 - f_0^2) (1)

式中:

- μ——孔隙水压力;
- K——标定系数;
- f_i——测试频率;
- f₀——初始频率。

位于端头井外 1 m 处的 1 号监测孔内,各测点的孔隙水压力随时间的变化曲线如图 5 所示。

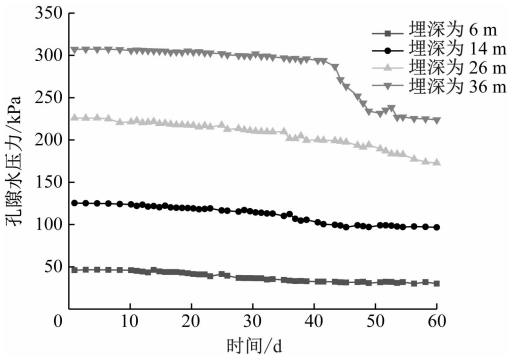


图 5 1 号监测孔内的孔隙水压力变化曲线

Fig. 5 Change curve of pore water pressure at No. 1 monitoring point

其他监测孔的孔隙水压力变化规律与图 5 类似。进一步分析发现:在基坑降水开挖前,由于地

质情况类似,各相同埋深测点的孔隙水压力初始值较为接近;随着基坑降水开挖过程的进行,在同一测点中,浅层孔隙水压力减小幅度较小,深层孔隙水压力减小幅度比浅层孔隙水压力减小幅度要大。分析其原因,当基坑内进行降水开挖时,在围护结构隔水的情况下,坑外水需从地连墙底端绕流进入坑内,由于相对隔水层的渗透系数较小,故深层地下水的水头损失大于浅层地下水的水头损失。

2.3 降水井流量现场监测结果分析

现场降水施工时,在疏干井及降水井上安装了流量计。本文以疏干井 SG49 及承压井 JY05 抽水量为例,分析富水软弱地层基坑降水过程中疏干井和承压井抽水流量的变化特征。图 6 和图 7 分别为 SG49 及 JY05 的抽水流量-时间变化曲线。其他疏干井及承压井的抽水流量变化规律类似。

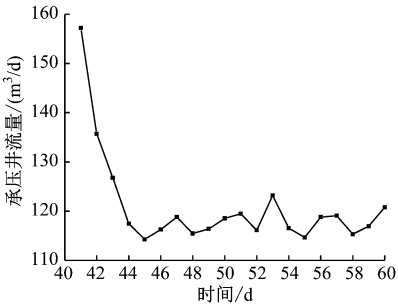


图 6 SG49 的抽水流量-时间变化曲线

Fig. 6 Time history curve of SG49 pumping flow

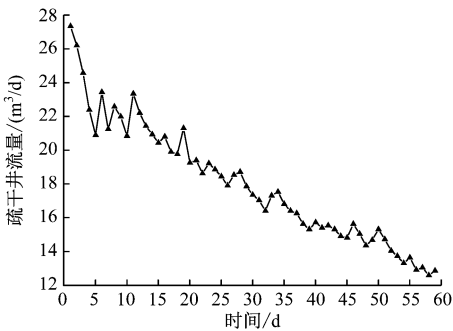


图 7 JY05 的抽水流量-时间变化曲线

Fig. 7 Time history curve of JY05 pumping flow

由图 6 和图 7 明显可以看出,疏干井和承压井的抽水流量呈现出不同的特征。

对于疏干井而言,群井疏干抽水时,其单井出水量逐渐衰减,由刚开始的 27.3 m³/d 逐渐降到 13.0 m³/d 左右。在观测期间发现:投入使用初期,疏干井动水位均在较短时间内迅速降至抽水泵位置,降幅较大;随后,会出现掉泵现象,水泵会间断

出水;随着疏干井抽水时间不断增加,由于地下连续墙插入了弱透水层中,较大程度地阻隔了基坑内外潜水含水层的水力联系,坑内潜水水位不断降低,于是疏干井在 1 d 内的出水时间会变得越来越长,出水量也会相应减小。

对于承压井而言,其单井出水量明显比疏干井出水量大。最初出水流量为 $157.1 \text{ m}^3/\text{d}$,抽水 3~4 d 后便降至约 $117.0 \text{ m}^3/\text{d}$,随后出水流量基本稳定。这是因为承压含水层未被地下连续墙隔断,且承压含水层渗透系数较大,水源补给比较充足、迅速,故在一定时间内承压井水泵抽水状态就会相对稳定。

3 基坑降水开挖对周围土体变形影响的实测结果

3.1 基坑周边的土体沉降

在基坑开挖过程中,应力场与渗流场同时发生变化,两者相互作用、相互影响。这种作用模式称为渗流-应力耦合作用^[9]。在基坑降水开挖过程中,基坑四周土体会发生不同程度的沉降变形。图 8 为端头井断面地表沉降随时间变化的曲线。

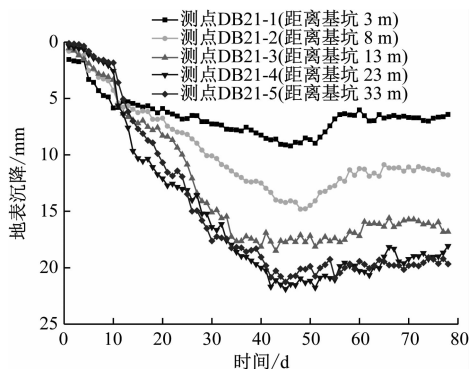


图 8 端头井断面地表沉降随时间变化图

Fig. 8 Diagram of ground surface settlement of end well section

由图 8 可知:在端头井段基坑开始施工阶段,测点 DB21-1、DB21-2、DB23-3、DB24-4 及 DB24-5 的沉降值分别为 5.84 mm、4.28 mm、3.35 mm、2.56 mm、1.84 mm,距离基坑较近处测点的沉降值稍大;随着基坑降水开挖的进行,各测点沉降值出现不同程度的增加,其中距离基坑较远处的测点 DB23-3、DB24-4 及 DB24-5 的沉降增加较大,且沉降最大值为 21.88 mm。由监测数据还发现,基坑降水开挖完成后,各测点的沉降都发生了一定的回弹,距基坑较近处的地面回弹值较大,距基坑较远处的地面回

弹值较小。

3.2 基坑围护结构的水平变形

基坑围护结构的水平变形不仅取决于围护结构的类型,还会受到围护结构插入比及刚度等的影响。围护结构产生较大变形不仅使自身结构存在安全隐患,而且会导致墙外侧的土体产生不均匀沉降,损坏基坑周边的建筑和道路。因此,在施工过程中必须严密监测围护结构变形,保证安全施工。

如图 2 所示,选取南部端头井段的测斜断面的监测数据进行分析。端头井段断面地下连续墙的水平位移 s 沿连续墙深度 H_p 变化曲线如图 9 所示。

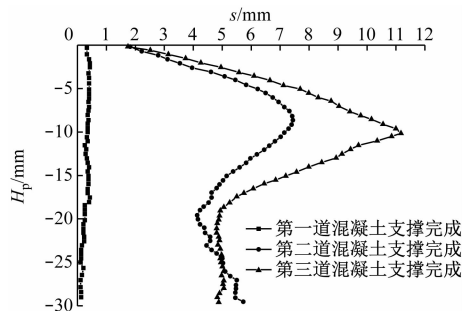


图 9 端头井段地下连续墙水平位移沿深度变化曲线

Fig. 9 Curve of horizontal displacement changing along depth of diaphragm wall in end well section

由图 9 可知:端头井段基坑开控制作第一道混凝土支撑完成时, s 最大值为 0.41 mm,出现在地下连续墙上半部分,地下连续墙底端 s 几乎为 0;随着 H_p 的增加, s 逐渐增大, s 最大值出现在地下连续墙的中间位置, s 随 H_p 增大呈先增大后减小的趋势,但地下连续墙底部也出现了一定的水平位移;第三道支撑完成时, s 最大值为 11.10 mm。由于端头井段的基坑较深,从地下连续墙的变形曲线可以看出,其开挖面以下的墙体出现了整体的水平位移。

经过严格的降水控制和监测分析,旺庄路站基坑变形控制良好,地面最大沉降不超过 22 mm,地下连续墙水平位移不超过 12 mm,达到了预期的效果,保证了工程的安全施工,可以为类似工程案例提供借鉴。

4 结论

1) 随着基坑降水开挖的进行,在同一测点中,深层孔隙水压力降幅较大,浅层孔隙水降幅较小。

2) 在基坑内疏干井的水位现场实测中,观测井水位变化时程曲线并不是呈线性降低的趋势,斜率

有变化,曲线有明显拐点,其水位降低过程明显呈现出多梯次分段下降的变化特征。

3) 距离基坑较近处的地面沉降稍大。随着基坑降水开挖的进行,各测点沉降值出现不同程度的增大,此时距离基坑较远处地面沉降增大较多。基坑降水开挖完成后,各测点的地面沉降有所回弹,其中距离基坑较远处地面沉降回弹比较小,距离基坑较近处地面回弹较大。

4) 随着基坑开挖越来越深,地下连续墙的水平位移也逐渐增大,最大值出现在地下连续墙中部位置,地下连续墙水平位移沿深度呈先增大后减小的趋势,但连续墙底部也出现了水平位移。

参考文献

- [1] 方焘,刘春,郭俊,等. 土体宽度非对称基坑变形特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2019(6): 99.
FANG Tao, LIU Chun, GUO Jun, et al. Analysis on deformation characteristics of foundation pit with asymmetric soil width[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019(6): 99.
- [2] 何超,陈沛,周顺华. 软土基坑宽度效应对坑底隆起的影响[J]. 华东交通大学学报, 2015(6): 82.
HE Chao, CHEN Pei, ZHOU Shunhua. Influence of width effect of soft soil excavation on basal heave[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015(6): 82.
- [3] 郑刚,赵悦嫔,程雪松,等. 复杂地层中基坑降水引发的水位及沉降分析与控制对策[J]. 土木工程学报, 2019(增刊1): 135.
ZHENG Gang, ZHAO Yuebin, CHENG Xuesong, et al. Strategy and analysis of the settlement and deformation caused by dewatering under complicated geological condition[J]. China Civil Engineering Journal, 2019(S1): 135.
- [4] 王洋浩瀚. 广州某工程基坑降水引起的地面沉降分析[D]. 广州:广东工业大学, 2018.
WANG Yanghaohan. Analysis of land subsidence caused by dewatering of a project in Guangzhou[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [5] 薛秀丽,曾超峰,郑刚. 开挖前降水引发基坑变形特性及控制方法[J]. 地下空间与工程学报, 2019(增刊1): 492.
XUE Xiuli, ZENG Chaofeng, ZHENG Gang. Characteristics of foundation pit deformation induced by pre-excavation dewatering and the countermeasures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019(S1): 492.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑深基坑工程施工安全技术规范: JGJ 311—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for construction safety of deep building foundation excavations: JGJ 311—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [7] 吴意谦,朱彦鹏. 考虑疏干带非饱和土影响下基坑降水引起地面沉降的计算[J]. 工程力学, 2016(3): 179.
WU Yiqian, ZHU Yanpeng. Calculation of settlement considering unsaturated soil influence on the dewatering of foundation pits[J]. Engineering Mechanics, 2016(3): 179.
- [8] 杨清源,赵伯明. 潜水层基坑降水引起地表沉降试验与理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018(6): 1506.
YANG Qingyuan, ZHAO Boming. Experimental and theoretical study on the surface subsidence by dewatering of foundation pit in phreatic aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018(6): 1506.
- [9] 朱志鹏. 基于渗流-应力耦合分析的基坑开挖数值计算及变形的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
ZHU Zhipeng. Study on numerical calculation and deformation of foundation pit excavation based on seepage-stress coupling analysis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [10] 梁发云,贾亚杰,邓航,等. 深基坑降水沉降计算土体弹性参数取值方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2017(增刊2): 29.
LIANG Fayun, JIA Yajie, DENG Hang, et al. Discussions on elastic parameters of soil for land subsidence caused by decompression of confined aquifer in deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017(S2): 29.

(收稿日期:2020-06-16)

(上接第106页)

- ZHANG Shuchao, HE Shaohui, ZHU Zipeng, et al. Research on soil conditioning for earth pressure balance shield tunneling in Lanzhou sandy pebble strata with rich water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017(S2): 279.
- [7] 杨益,朱文骏,李兴高,等. 老黏土地层土压盾构刀盘堵塞渣土改良效果评价方法[J]. 北京交通大学学报, 2019(6): 43.
YANG Yi, ZHU Wenjun, LI Xinggao, et al. Evaluation method for muck conditioning of hardclay to prevent clogging in EPB tunneling[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019(6): 43.
- [8] 程池浩,廖少明,陈立生,等. 富水石英砂砾层盾构施工的土体改良试验[J]. 上海交通大学学报, 2018(11): 1492.
CHENG Chihao, LIAO Shaoming, CHEN Lisheng, et al. Experiments of soil conditioning for shield tunneling in watery quartz sand-gravel ground[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018(11): 1492.
- [9] 贺斯进. 黄土盾构隧道膨润土泥浆渣土改良技术研究[J]. 隧道建设, 2012(4): 448.
HE Sijin. Study on grounding conditioning by bentonite slurry in shield tunneling in loess strata[J]. Tunnel Construction, 2012(4): 448.
- [10] 易鹏程,陈志敏,张常书. 粉质黏土层土压平衡盾构施工中的渣土改良技术[J]. 城市轨道交通研究, 2021(12): 177.
YI Pengcheng, CHEN Zhimin, ZHANG Changshu. Residue improvement technology for EPB shield construction in silty clay soil[J]. Urban Mass Transit, 2021(12): 177.

(收稿日期:2020-06-21)