

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.07.005

长江漫滩地区深大基坑开挖工程半逆作半顺作法研究

肖国清, 李瑞雪

(西南石油大学 土木工程与建筑学院, 成都 610500)

摘要:针对长江漫滩高承压水地基,以南京市某工字型地下 6 层地铁换乘站基坑为依托工程,采用 FLAC3D 三维有限差分软件,分别对半顺作半逆作开挖法和明挖顺作法进行数值模拟,分析了基坑开挖及降水的应力渗流耦合作用对周围地表沉降、连续墙侧移和支撑轴力的影响。结果表明:1)长江漫滩高承压水地基深基坑开挖工程,地表沉降值和连续墙变形值均较大;2)工字型深基坑开挖工程,地表沉降、连续墙侧移最大值出现在上下横边中点处;3)半顺作半逆作法的地表沉降、连续墙侧移、横向支撑轴力值均小于明挖顺作法,更有利于控制基坑侧壁变形,降低基坑开挖风险。

关键词:长江漫滩;工字型基坑;半顺作半逆作法;墙体侧移;地表沉降

中图分类号:TU745

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2022)07-045-08

A study on the semi-inverse and semi-normal practice of deep and large foundation pit excavation in Yangtze River floodplain area

XIAO Guoqing, LI Ruixue

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University,
Chengdu 610500, P. R. China)

Abstract: To study the deep foundation pit excavation of the high confined water foundation in the Yangtze River floodplain area, a Nanjing I-shaped 6 floor underground metro transfer station foundation pit excavation was selected as research object. Using finite difference software FLAC3D, numerical simulation on semi-normal and semi-reversed construction method and the cut and follow method was carried out separately, and the effects of the coupling action of the foundation pit excavation and stress seepage of precipitation on the surrounding surface settlement, lateral displacement of diaphragm wall and supporting axial force were analyzed. The findings show that: 1) in the deep foundation pit excavation project of high confined water foundation of the Yangtze River floodplain, both the surface settlement value and the continuous wall deformation value are large; 2) in the excavation of I-shaped deep foundation pit, the maximum value of surface settlement and continuous lateral displacement of wall occurs at the midpoint of the upper and lower transverse edges; 3) the surface settlement, lateral displacement of continuous wall and axial force value of transverse support in the semi-normal and semi-reversed construction method are all lower than that in the cut and follow method, conducive to controlling the lateral wall deformation of

收稿日期:2021-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874255)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51874255).

作者简介:肖国清(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事城市地下工程、城市地下建筑物火灾控制研究,(E-mail) 705825913@qq.com。

foundation pit and reducing the risk of foundation pit excavation.

Keywords: Yangtze River floodplain area; I-shaped foundation pit; semi-normal and semi-reversed construction method; lateral displacement of wall; surface settlement

随着我国地下空间的不断开发利用,基坑开挖越来越深,深基坑的开挖会造成周围岩土较大的变形,严重影响基坑的稳定性,深基坑开挖引起的变形已成为热点研究问题。开挖过程往往需要降水,地下水位的变化会造成岩土和支护结构的受力变化,进而引起变形。基坑开挖是应力场和基坑降水渗流场二者的耦合作用。传统研究方法是将二者分开,独立考虑其作用影响^[1-3],结果与实际有一定差距,因此,研究渗流场和应力场的耦合作用十分必要。研究异型深基坑开挖与降水的应力渗流耦合作用对实际工程施工具有重要的指导意义^[4-8]。

目前,一些学者探讨了深基坑开挖对周围地表的影响。侯学渊等^[9]在运用地层损失法分析基坑开挖变形机理的基础上,根据上海市的一些工程资料,提出了估算地表沉降的经验公式;郑杰明等^[10]通过有限差分软件 FLAC3D 对深基坑开挖支护结构水平变形和地表沉降进行了数值模拟并与实测值进行对比分析,基坑开挖对墙后地表沉降的主要影响区在 d/H 为 0~1 的区域,次要影响区在 d/H 为 1~1.5 的区域,沉降最大值出现在 d/H 为 0.5 的区域;陈兴贤等^[11]采用有限元数值分析方法对深基坑降水三维变参数非稳定渗流与太沙基一维固结理论的底面沉降耦合模型进行求解,建立了模拟预测南京地区深基坑降水引起的地下水场变化理论模型;王建秀等^[12]采用顶板逆回弹系数对分层总和法进行修正,在合理确定顶板逆回弹系数后,对地面沉降产生的量值进行计算。前人对基坑降低水位引起地面沉降的基本原理、预测方法、基坑监测以及降低水位对地表沉降的影响均有一定的研究^[13-16],但是关于地铁深基坑降低水位渗流分析的研究较少。这些研究^[17-18]均指出不同工况、围护结构及地质条件下,基坑具有不同的承载机理及变形机制,而关于长江漫滩“工”字型深基坑在降水作用下承载机理及变形机制的研究尚少。文中针对长江漫滩高承压水地基,以南京某“工”字型地下六层换乘站基坑为依托工程,通过基坑开挖过程中的数值模拟,对比分析了采用半顺作半逆作开挖法和传统明挖开挖法在墙顶水平位移、墙体深层侧向位移、地表沉降、支撑轴力等方面随基坑开挖及时间的变化规律。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

工程为南京市某“工”字型地下六层三线换乘车站。车站周围较为空旷,为待开发的商业地块。车站工程场地属长江漫滩地貌单元,地形较平坦,地面高程为 5.62~5.85 m。中心里程处基坑开挖深度为 44.8 m,车站周边场地较开阔,无重大建(构)筑物。根据建筑布置和使用功能的要求,本站为地下六层标准侧式站台(9.2~11.75 m)车站,车站标准段宽 34.2/38.2 m,标准柱距 9 m,车站采用六层三柱四跨矩形框架结构。基坑具有面积大、开挖深的特点。因车站建设与周边地块开发存在时序交叉的可能性,基于场地地质条件及水文地质条件较差等特点,车站主体结构采用同步建设方案,竖向挡土构件为 1 500 mm 地下连续墙,采用半顺作半逆作法施工。负一层~负三层采用顺作法施工,同时负四层~负六层采用逆作法施工,有利于控制基坑侧壁变形,降低基坑开挖风险。采用刚度较大的地连墙作为围护结构。地连墙入中风化岩 3 m,地墙两侧采用防塌加固,保证地连墙的承载力。基坑施工时,地墙入岩隔断承压水,采用坑内疏干降水,坑外设置回灌井的地下水处理方式。

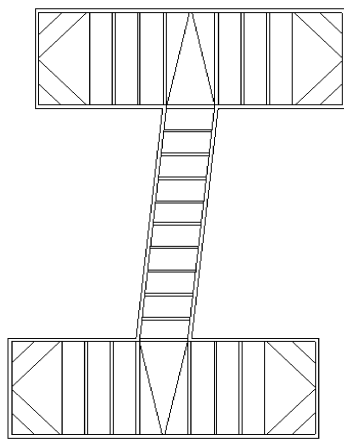


图 1 支护结构平面图

Fig. 1 Plan view of supporting structure

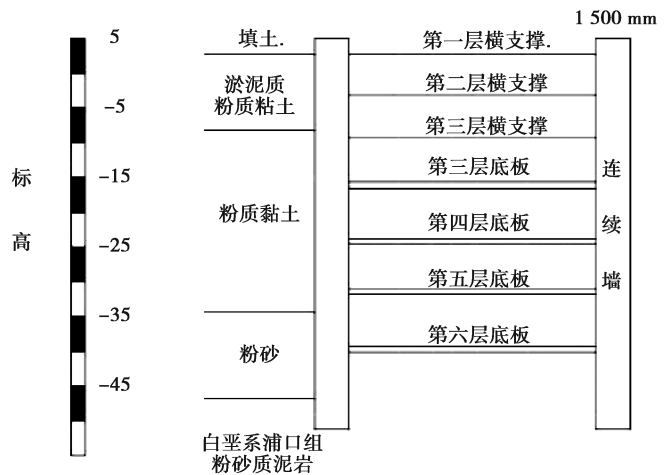


图 2 支护结构剖面图

Fig. 2 Sectional view of supporting structure

1.2 地质条件

1.2.1 工程地质

场地地貌单元属长江漫滩,场地内地势平坦低洼,地面高程为 7.00~8.00 m,除地表约 0.5~5.0 m 厚的人工填土外,组成物基本为第四系全新的淤泥质粉质粘土~粉质粘土、粉质粘土、粉砂等;下卧基岩岩性为白垩系浦口组粉砂质泥岩~泥质粉砂岩。各土层设计选用的力学参数如表 1 所示。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and Mechanical Parameters of Soil Layer

层号	名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	粘聚力/ kPa	含水率/ %	孔隙比
1	填土	19.3	11.2	36.6	32.6	0.87
2	淤泥质粉质粘土	17.9	12	5.2	41.9	1.173
3	粉质黏土	19.3	18	25	26.5	0.748
4	粉砂	19.4	20.9	16.5	25.3	0.735
5	白垩系浦口组粉砂质泥岩	28.0	—	—	15.7	21.4

1.2.2 水文地质

场地地下水类型为松散岩类孔隙水(孔隙潜水、微承压水)和基岩裂隙水。

2 三维数值模拟

2.1 计算模型

根据地铁站基坑工程的平、剖面关系建立三维 1:1 计算模型。模型尺寸为 363 m×421 m×70 m。土体、地下连续墙、内墙、立柱、底板均采用实体单元模拟,采用摩尔-库伦模型计算;基坑横向支护采用结构梁单元模拟。同时,模型设置流体算法,通过设置含水率、孔隙率、水密度及渗透系数建立流场,模拟每层开挖后降水的渗流作用,考虑渗流场和应力场的耦合作用。计算模型如图 3 所示。

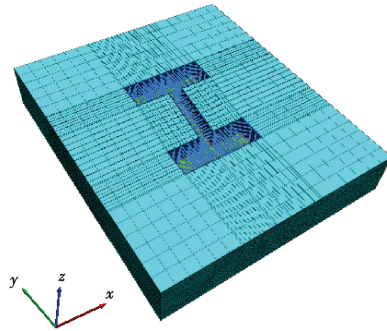


图 3 三维有限差分模型

Fig. 3 Three-dimensional finite element model

2.2 模型结果

通过 FLAC3D 模拟计算,得到开挖结束后连续墙侧向位移情况。图 4(a)为连续墙 x 方向位移,连续墙 x 方向上的最大位移在竖边中点处,变形量为 55.7 mm,图 4(b)为连续墙 y 方向位移,连续墙 y 方向上的最大位移在横边中点处,变形量为 96.4 mm。工字型基坑开挖连续墙最大位移位于上下横边中点处。

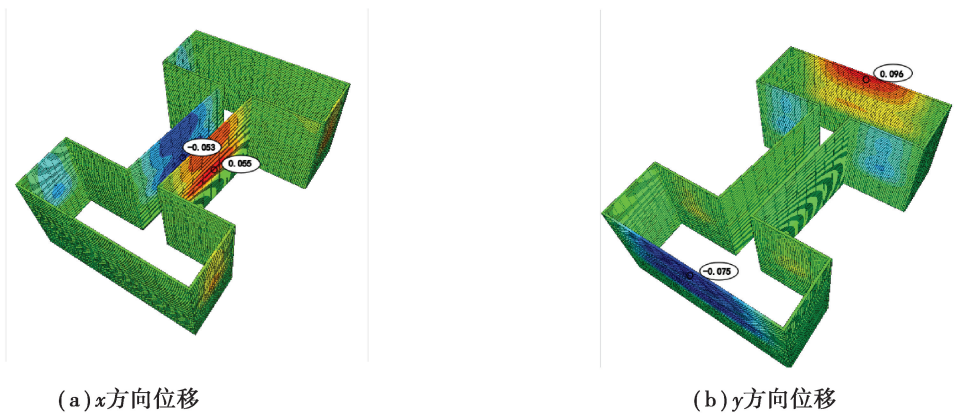


图 4 连续墙侧向位移

Fig. 4 lateral displacement of continuous wall

许树生等^[19]依托天津地铁 6 号线金钟街站深基坑工程,验证了采用 FLAC3D 模拟分布开挖连续墙侧向位移和最大值位置与实测值的差均在允许范围内,连续墙变形均为内凸型。图 5 为工字型基坑上横边中点截面连续墙侧移随深度变化情况,前 3 层采用明挖顺作法进行开挖,连续墙变形均为内凸型,随着开挖深度增加,连续墙侧向位移增大,侧向位移-深度曲线与文献[19]模拟得出的曲线相似。

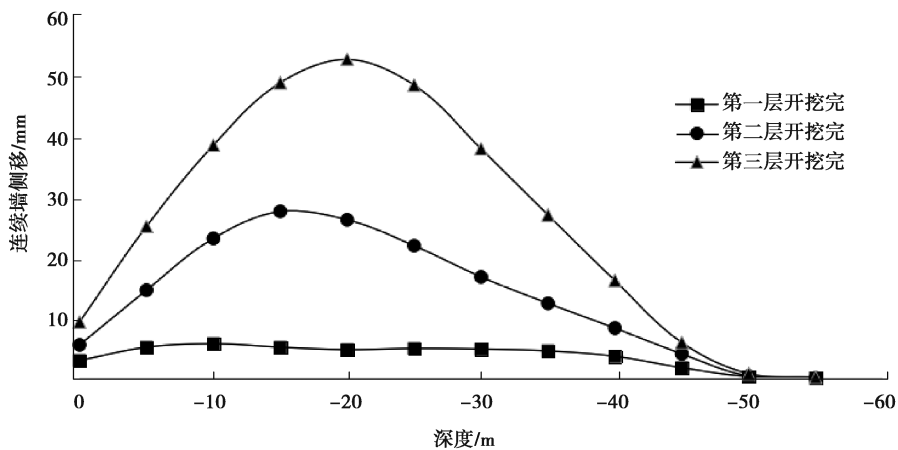


图 5 连续墙侧向位移随开挖深度的变化

Fig. 5 lateral displacement of diaphragm wall varies with excavation depth

图 6 为开挖结束后地表沉降情况,地表最大沉降值出现在下横边中点距连续墙一定距离处,周围地表沉降最大值为 126 mm。开挖、地下水侧向压力和水渗流相互耦合作用,地表沉降值较大,符合南京长江漫滩地区基坑地表沉降开挖监测普遍较大的情况,超出监测报警值范围。图 7 为开挖结束后横向支撑轴力情况,横向支撑最大轴力值出现在第一层横向支撑竖边中点处,轴力最大值为 936 MPa。

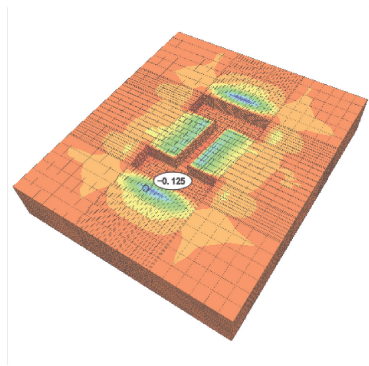


图 6 周围地表沉降

Fig. 6 Surface Subsidence Around

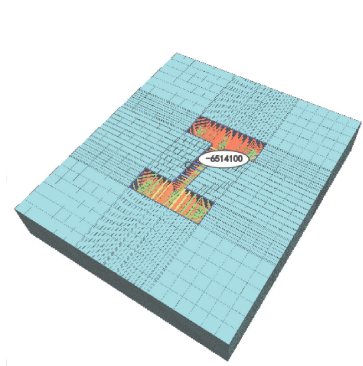


图 7 横向支撑轴力图

Fig. 7 Transverse support shaft diagram

2.3 明挖顺作法

2.3.1 周围地表沉降规律分析

采用 FLAC3D 软件对地下 6 层换乘站开挖工程采用明挖顺作法进行模拟,地下 4~6 层开挖采用钢支撑进行支护,逐层进行开挖。图 8 为上横边中点处地表沉降值随距连续墙距离变化,地表沉降最大值在距离连续墙一段距离处,分别为 171 mm(明挖顺作法)和 120 mm(半顺作半逆作法)。相比于明挖顺作法,半顺作半逆作法产生的地表沉降要小很多。图 9 为地表最大沉降处(距连续墙 20 m 处),地表沉降值随开挖工序的变化,逐渐增大。相比于明挖顺作法,半顺作半逆作法在前三层明挖顺作时地表沉降值与明挖顺作法相同,但是当第三层底板修筑好后,地表沉降值明显小于明挖顺作法。半顺作半逆作法比明挖顺作法更能控制地表沉降值,施工更加安全。

图 10 为连续墙侧移(上横边中点处)随深度变化,半顺作半逆作法的连续墙侧移最大值位于 -7 m 处,最大值为 78 mm,明挖顺作法的连续墙最大值位于 -24 m 处,最大值为 121 mm。半顺作半逆作法由于底三层为暗挖法,位移相对较小,最大位移出现在上部,且比明挖顺作法产生的最大位移小很多,半顺作半逆作法比明挖顺作法更能控制连续墙侧移,施工更加安全。图 11 为连续墙侧移(上横边中点处顶端)随开挖工序的变化,对于连续墙顶端侧向位移,半逆作半顺作法比明挖顺作法的位移值大。

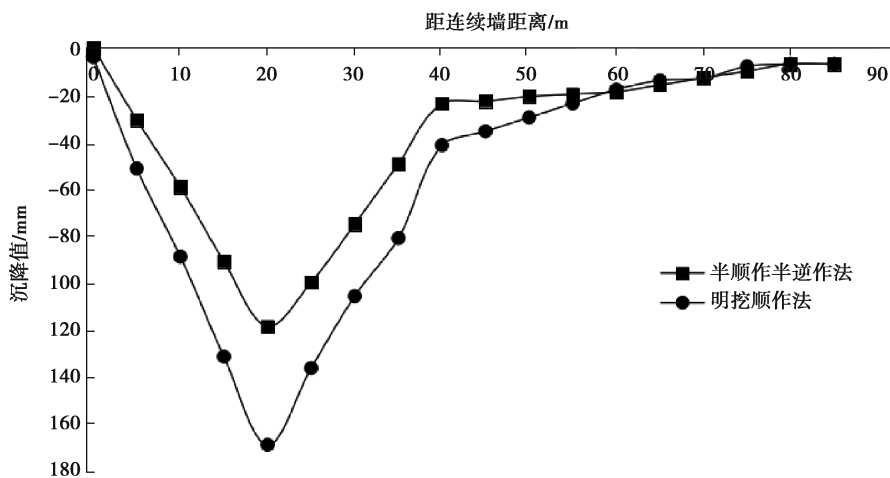


图 8 地表沉降值随距连续墙距离变化

Fig. 8 variation of surface settlement value with distance from continuous wall

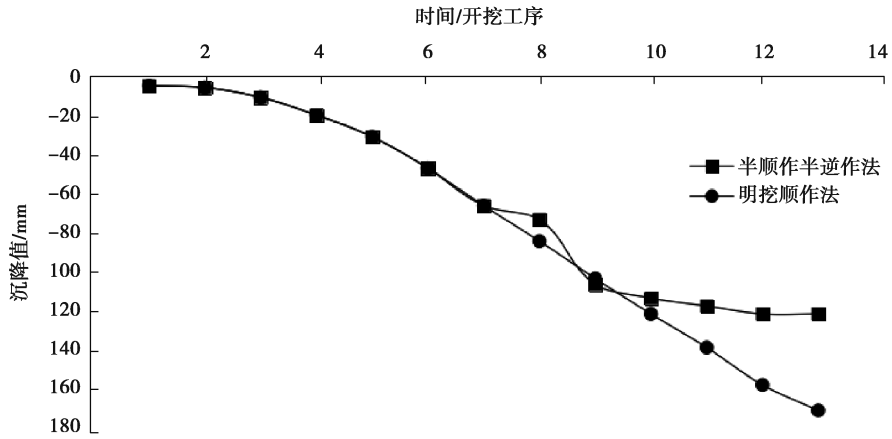


图 9 地表沉降值随开挖工序的变化

Fig. 9 variation of surface settlement value with excavation process

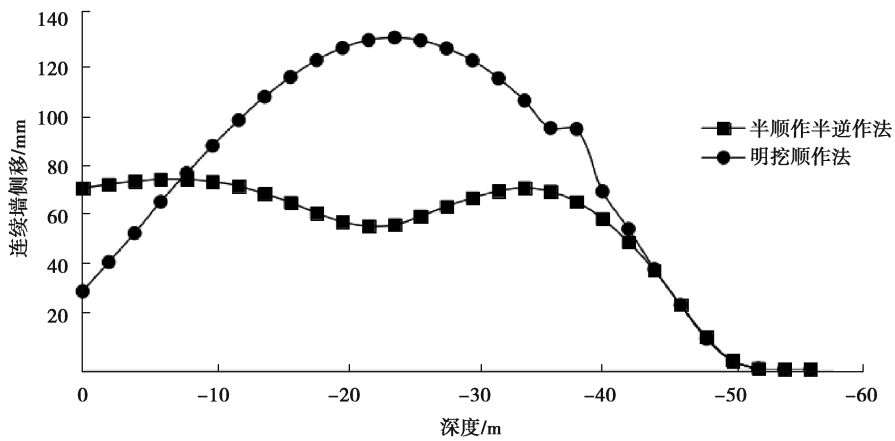


图 10 连续墙侧移随深度变化图

Fig. 10 Variation of lateral movement of continuous wall with depth

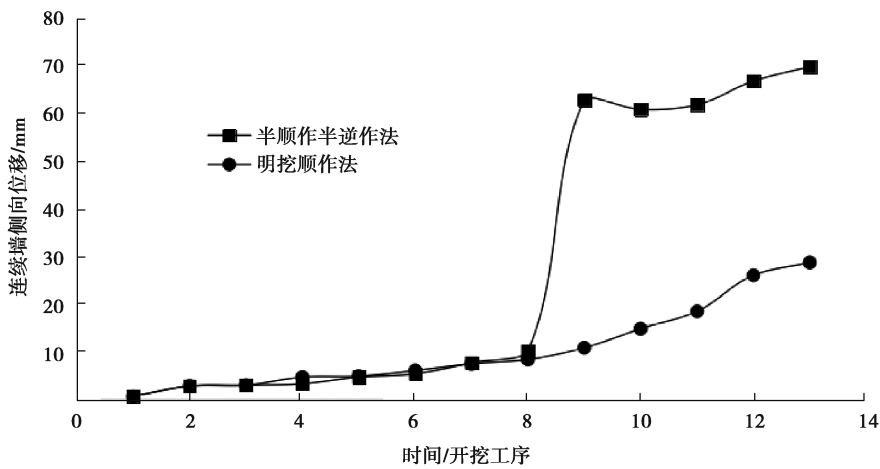


图 11 连续墙侧移随开挖工序的变化

Fig. 11 Variation of lateral movement of continuous wall with excavation process

3 结 论

1)长江漫滩高承压水地基深基坑开挖工程,考虑开挖及降水的应力渗流耦合作用,地表沉降值和连续墙变形值均较大。

2)工字型深基坑开挖工程,连续墙侧移最大值出现在上下横边中点处。连续墙墙体深层水平位移随深度增加,均呈“胀肚型”的变化趋势,半逆作半顺作法最大侧移发生在上部区域,明挖顺作法最大侧移发生在中部区域,且半逆作半顺作法产生的最大侧移较明挖顺作法产生的最大侧移小。

3)工字型深基坑开挖工程,地表沉降最大值出现在上下横边中点处,沉降最大值并不在连续墙边缘处,而是在距连续墙一段距离处。半逆作半顺作法的地表沉降、连续墙侧移、横向支撑最大轴力均小于明挖顺作法。半逆作半顺作法有利于控制基坑侧壁变形,降低基坑开挖风险。

参考文献:

- [1] 孙长军,张顶立,刘井学,等.北京地铁车站地连墙支护结构受力变形特性研究[J].岩土工程学报,2015,37(S1):78-83.
Sun C J, Zhang D L, Liu J X, et al. Mechanical and deformation characteristics of diaphragm wall system of Beijing metro station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 78-83.(in Chinese)
- [2] 廖少明,魏仕锋,谭勇,等.苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析[J].岩土工程学报,2015,37(3):458-469.
Liao S M, Wei S F, Tan Y, et al. Field performance of large-scale deep excavations in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 458-469.(in Chinese)
- [3] Ding Z, Jin J K, Han T C. Analysis of the zoning excavation monitoring data of a narrow and deep foundation pit in a soft soil area[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15(4): 1231-1241.
- [4] Ding Z, Zhang X, Jieke J K, et al. Measurement analysis on whole excavation of foundation pit and deformation of adjacent metro tunnel[J]. Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 415-423.
- [5] Huang K, Yang W, Ma Q, et al. Influence of foundation excavation pit on adjacent metro tunnel using fluid-solid mechanics theory[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(1): 198-205.
- [6] Wang J X, Huang T R, Hu J, et al. Field experiments and numerical simulations of whirlpool foundation pit dewatering[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(7): 3245-3257.
- [7] 朱彦鹏,任永忠,周勇.张掖某深基坑在降水条件下支护结构的性能分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(1):259-265.
Zhu Y P, Ren Y Z, Zhou Y. Performance analysis of supporting structure under dewatering conditions for a deep foundation pit in Zhangye City [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1): 259-265.(in Chinese)
- [8] 冯怀平,张伏光,岳祖润.考虑流固耦合作用的深基坑有限元分析[J].地下空间与工程学报,2012,8(2):286-291,333.
Feng H P, Zhang F G, Yue Z R. Numerical analysis of excavation considering the coupling of seepage field and stress field[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(2): 286-291, 333.(in Chinese)
- [9] 侯学渊,陈永福.深基坑开挖引起周围地基土沉陷的计算[J].岩土工程师,1989,1(1):1-13.
Hou X Y, Chen Y F. Calculation of subsidence caused by excavation of deep foundation pit[J]. Iwaki engineer, 1989, 1(1): 1-13.(in Chinese)
- [10] 郑杰明,谢玖琪,杨平,等.深基坑开挖支护结构水平变形对地表沉降影响的数值模拟[J].现代隧道技术,2013,50(2):102-108.
Zheng J M, Xie J Q, Yang P, et al. Numerical simulation of the effects of horizontal deformation of the supporting structure on surface settlement in deep foundation pits [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(2): 102-108.(in Chinese)
- [11] 陈兴贤,骆祖江,安晓宇,等.深基坑降水三维变参数非稳定渗流与地面沉降耦合模型[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(5):1572-1578.
Chen X X, Luo Z J, An X Y, et al. Coupling model of groundwater three dimensional variable-parametric non-steady

- seepage and land-subsidence[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(5): 1572-1578.(in Chinese)
- [12] 王建秀, 吴林高, 朱雁飞, 等. 地铁车站深基坑降水诱发沉降机制及计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1010-1019.
- Wang J X, Wu L G, Zhu Y F, et al. Mechanism of dewatering-induced ground subsidence in deep subway station pit and calculation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1010-1019.(in Chinese)
- [13] Xu X L, Sun Z W, Jia L. Monitoring study of guang'anmen hospital outpatient building foundation pit excavation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 501/502/503/504: 88-91.
- [14] Zhang C S. Structural design and monitoring analysis of foundation pit support in Yiwu Huishang tiandi[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 81: 012159.
- [15] 吴九江, 程谦恭, 文华, 等. 软土地基格栅式地下连续墙与群桩桥梁基础竖向承载性状对比模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1733-1744.
- Wu J J, Cheng Q G, Wen H, et al. Vertical bearing behaviors of lattice shaped diaphragm walls and group piles as bridge foundations in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1733-1744.(in Chinese)
- [16] 赵康, 宁富金, 张俊萍, 等. 一种新型基坑支护结构的力学性能分析[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(9): 48-56.
- Zhao K, Ning F J, Zhang J P, et al. Analysis of mechanical properties of a new type of foundation pit supporting structures[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(9): 48-56.(in Chinese)
- [17] Li J W, Li X, Xiong M X. Deformation monitoring and numerical simulation of retaining structure in subway station deep foundation pit[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 21: 2331-2340.
- [18] Sun H X, Zhang K, Chen S L. Monitoring and analysis on the supporting structure for deep foundation pit[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 580/581/582/583: 787-790.
- [19] 许树生, 侯艳娟, 刘美麟. 天津地铁 6 号线车站深基坑开挖下围护结构及墙后地表变形特性分析[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(1): 25-33.
- Xu S S, Hou Y J, Liu M L. Analysis of ground surface deformation and retaining wall deflection characteristics under excavation of deep foundation pit of station in Tianjin subway line 6[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(1): 25-33.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)