

文章编号:1673-2049(2019)06-0095-09

深基坑水下开挖变形特性及坑底分仓优化

李 博¹, 王贵和¹, 吕高峰², 王运超³

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 2. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100068;
3. 河南省建筑设计研究院有限公司, 河南 郑州 450014)

摘要:依托北京地铁8号线永定门外站深基坑工程,介绍了适用于水位高、厚度大、透水性强的富水砂卵石地层深基坑水下开挖工法。采用数值模拟方法构建基坑水下开挖数值模型,结合实测数据对模型进行了验证,并利用该模型分析了深基坑水下开挖过程中坑外地表沉降、墙体水平位移变形的特性。结果表明:对于富水砂卵石地层的基坑工程,采用水下开挖及坑底分仓工艺能够较好地控制基坑变形;坑外地表沉降主要发生在干开挖及疏干开挖阶段,水下开挖阶段引起的地表沉降量只占总变形量的7%左右;分仓墙的设置可有效限制坑底隆起及基坑中下部变形;墙体变形在上部支撑及下部分仓墙作用下呈“弓”字形分布,墙体变形大多发生在干开挖及疏干开挖阶段,水下开挖引起的墙体变形只占总变形量的10%左右;分仓数量及仓位布置形式影响墙体中下部变形,仓位增加至一定数量(20仓)后可明显控制墙体变形;在满足抗浮要求的情况下,仓位可减少至12仓;分仓数量一定的情况下,横向布置较纵向布置形式更有利于控制墙体变形。

关键词:深基坑;水下开挖;数值模拟;墙体变形;分仓墙;布置形式

中图分类号:TU470

文献标志码:A

Deformation Characteristics of Underwater Excavation of Deep Foundation Pit and Optimization of Sub-warehouse at Foundation Pit Bottom

LI Bo¹, WANG Gui-he¹, LYU Gao-feng², WANG Yun-chao³

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Beijing Metro Construction Administration Corporation Ltd., Beijing 100068, China; 3. The Architectural Design and Research Institute of Henan Province Co., Ltd., Zhengzhou 450014, Henan, China)

Abstract: Based on the deep foundation pit project of Yongding Gate Outside Station of Beijing Metro Line 8, the underwater excavation method of deep foundation pit in water-rich sandy pebble stratum with high water level, large thickness and strong permeability was introduced. By means of numerical simulation, the numerical model of underwater excavation of deep foundation pit was constructed. The model was validated by the measured data. Based on the model, the characteristics of surface settlement outside the pit, horizontal displacement and deformation of the wall in the process of underwater excavation of deep foundation pit were analyzed. The results show that for foundation pit engineering in water-rich sandy cobble stratum, the underwater excavation and sub-warehouse technology at the bottom of pit can effectively control the deformation of foundation pit. The surface settlement outside the pit mainly occurs in the

收稿日期:2018-12-09

基金项目:住房和城乡建设部科学技术计划项目(2016-K4-056)

作者简介:李 博(1990-),男,河北张家口人,工学博士研究生,E-mail:357428609@qq.com。

stage of dry excavation and dredging excavation, and the surface settlement caused by underwater excavation only accounts for about 7% of the total deformation. The setting of sub-warehouse wall can effectively limit the uplift of the bottom of pit and the deformation of the middle and lower part of the foundation pit. The wall deformation is bow-shaped under the action of the upper support and the lower part of the sub-warehouse wall. Most of the wall deformation occurs in the stage of dry excavation and dredging excavation. The wall deformation caused by underwater excavation only accounts for about 10% of the total deformation. The number of warehouses and the layout of warehouses affect the deformation of the middle and lower part of the wall. When the number of warehouse increases to a certain number (20 warehouses), the wall deformation can be controlled obviously. The warehouse can be reduced to 12 warehouses when the requirements of anti-floating are satisfied. When the number of warehouses is fixed, the transverse layout is more advantageous to control the wall deformation than the longitudinal layout.

Key words: deep foundation pit; underwater excavation; numerical simulation; wall deformation; sub-warehouse wall; layout form

0 引言

紧张的城市用地及复杂的地质条件导致越来越多的地铁站基坑面临“大型”、“深埋”、“富水”的工程难点,为了解决这一问题,近些年中国出现了一种新型基坑开挖施工工法——基坑水下开挖。相对于传统的抽排疏干开挖方式,此工法能更好地保护地下水资源,其工程应用越来越广^[1-4],因此研究水下开挖过程中基坑的变形响应规律并且优化水下开挖施工工艺已成为一项新的课题^[5]。

水下开挖工法起初主要应用于水工工程和沉管隧道工程中。孙智勇^[6]总结了水下开挖方法在南京梅子洲风井工程和福州地铁2号线风井工程中的应用。胡云华^[7]分析了梅子洲风井工程的支护结构、开挖方式、施工工序,提出利用坑内水压力平衡坑外水压力及被动土压力。李耀良等^[8]介绍了中国同类工程之最——中船上海长兴岛造船基地一期工程港池的陆上和水上相结合的土方开挖施工方案。李华^[9]依托引嫩扩建渠首枢纽泄洪闸工程的水下基坑工程,成功解决了水下大面积开挖难题。李学武^[10]介绍了垂直升降式升船平台船坞工程的水下开挖施工技术。张健^[11]采用灌水后再开挖的水下逆作施工技术,确保了竖井开挖安全和质量。Zhou等^[12]对上海地铁9号线宜山路站深基坑进行现场抽水和补给试验,结合三维有限差分软件(FDM)提出了3种控制基坑渗流的方法。瞿成松等^[13-14]以上海盛大国际金融中心深基坑降水为例,探讨基坑降水地下水回灌控制地面沉降的作用机理及地面沉降规律。

武永霞等^[15]以基坑回灌试验为依据,运用数值方法模拟了不同回灌条件下坑外承压水位的变化。黄应超等^[16]对深基坑降水与回灌过程进行三维数值模拟,研究了不同回灌方法的回灌效果。段宝德等^[17]在葛洲坝水利工程中,利用实时差分GPS建立了一套监控系统,实现了水下开挖的24 h实时监控。魏战宇^[18]描述了基于WSN的嵌入式水下施工监测系统设计与实现。总之,中国相关学者已对水下开挖工法积累了从工艺到监控的一整套施工方法,但国外岩土工程界对其研究少之又少,且现有文献大都停留在对水下开挖施工工序、开挖机具、工程效果等施工技术层面上的总结,并没有深入研究水下开挖过程中的基坑变形特性及结构力学响应规律,缺乏对同类工程理论性指导和安全性评价。

本文以北京地铁8号线永定门外站深基坑工程为背景,构建了针对富水砂卵石地层的深基坑水下开挖模型;研究了水下开挖过程中,地表沉降、墙体水平位移变形特性;提出了坑底分仓布置对基坑变形的影响,力求为富水卵石地层水下开挖施工提供技术储备和工程示范,并希望对类似地层的地下工程建设提供技术支撑和经验参考。

1 工程概况

1.1 基坑概况

基坑总长为139.2 m,宽度为24.7 m,施工深度为36.5 m,地下水位标高为-19.0 m。基坑施工深度大,地层复杂,地下水含量丰富且存在承压水,难以直接抽排降水,故而采用“连续墙帷幕+水下混

凝土封底”的止水方案。支护结构剖面、地层剖面及主要参数如图 1 所示。采用 1.2 m 厚的地连墙作为止水帷幕,坑底设置 1 m 厚分仓墙,将基坑分成 16 仓;标准段水下开挖土体的深度为 15.9 m,盾构段为 17.5 m;第 1~3 道支撑为干开挖架设,第 3 道支撑至封底混凝土底标高约 16 m 的范围内无支撑架设,仅靠坑内水压来平衡基坑外侧的水土压力。水

下开挖完成后,进行 4 m 厚的水下混凝土封底。水位线以上土层主要为粉土及粉砂层,采用常规开挖方式;水位线以下厚度较大的卵石层及少量粉砂、粉质黏土层采用水下开挖方式施工。

1.2 水下开挖情况

北京永定门外地铁 8 号线深基坑开挖开始于 2016 年 4 月,地下连续墙施工完成后,成槽施工 16

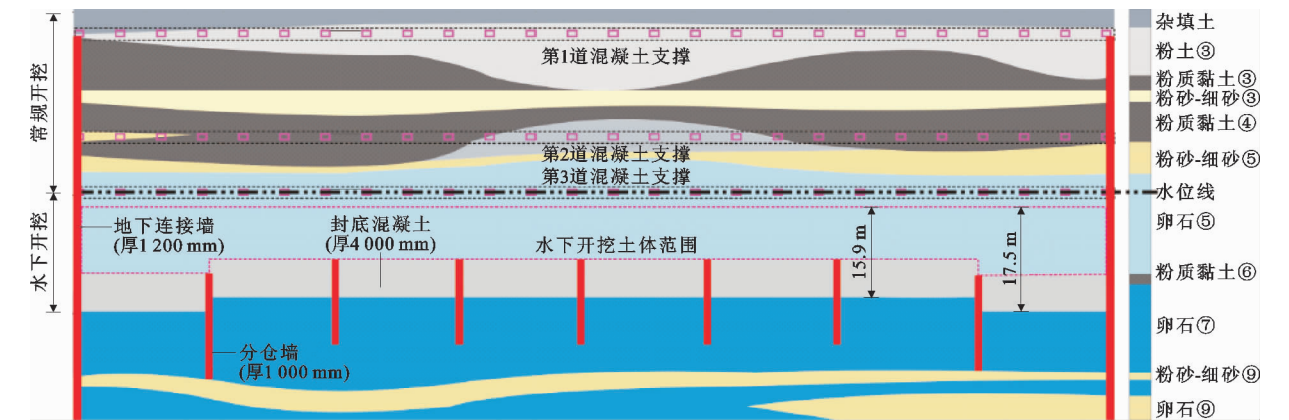


图 1 基坑支护、地层、开挖情况

Fig. 1 Foundation Pit Support, Stratum and Excavation

道分仓墙。常规土方开挖至第 3 道混凝土支撑位置,完成水位线以上的干开挖后,利用粉质黏土 3 的弱透水性,进行疏干降水开挖,试探性开挖至-28 m 处,随后将坑内水位回灌至原地下水位,采用反循环钻机配合抓斗进行水下土方开挖。2017 年 2 月完成水下土方开挖及坑内抽排工作。

由于本工程施工复杂,工况繁多,为了科学分析监测数据的变化,特将开挖过程分为以下 8 种工况(图 2):工况 1,开挖至-3.4 m,完成第 1 道支撑;工况 2,开挖至-13.7 m,完成第 2 道支撑;工况 3,开挖至-22 m,完成第 3 道支撑;工况 4,疏干开完至-28 m;工况 5,坑内水位回灌至-19 m;工况 6,开挖至坑底-36.5 m,完成水下开挖;工况 7,完成水下混凝土封底;工况 8,抽排坑内水。

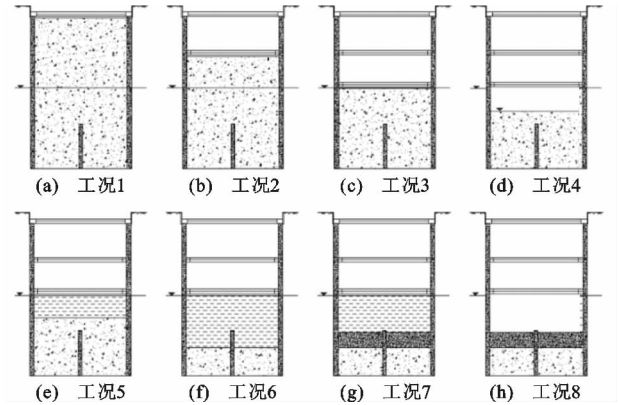


图 2 施工工况

Fig. 2 Construction Conditions

2 数值模拟与结果分析

2.1 模型建立

对本工程进行 1 : 1 模拟。根据建模经验^[19],设置模型长 380 m,宽 270 m,厚 84 m(图 3),89 166 个单元,83 545 个节点。设计 20 kPa 的地面荷载。支护结构采用线弹性本构,具体参数见表 1。根据土层厚度及参数相似性对坑底以下土层进行合并,参数见表 2。基坑水下开挖阶段坑内外水位相同,因此不需考虑渗流的影响,将地下水对支护结构的

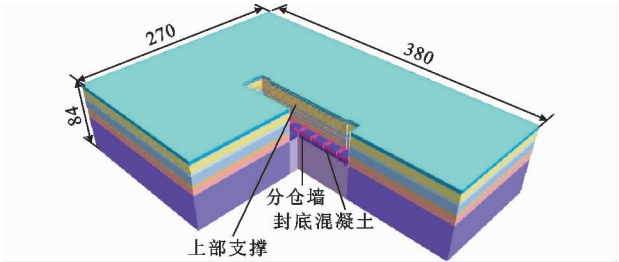


图 3 数值模型(单位:m)

Fig. 3 Numerical Model (Unit:m)

作用等效为三角形荷载。水下混凝土浇筑用替换土体属性来实现。

2.2 地表沉降分析

剖切模型,提取 8 个施工阶段的土体竖向位移

表 1 支护结构材料参数

Tab. 1 Material Parameters of Support Structure

结构	构件	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
地连墙	板	25	31 500	0.20
内支撑	梁	25	30 000	0.20
分仓墙	板	15	30 000	0.20
封底混凝土	实体	25	31 500	0.25

表 2 土层材料物理参数

Tab. 2 Physical Parameters of Soil Layer Materials

土层	弹性模量 E/MPa	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	侧压力系数 K_0
粉土③	32	20.1	0.3	14	23.0	0.43
粉细砂③	45	19.8	0.3	0	30.0	0.41
粉质黏土④	35	19.6	0.2	27	11.3	0.38
粉砂-细砂⑤	50	19.6	0.3	16	23.5	0.34
卵石⑤	200	20.2	0.3	0	45.0	0.25
粉质黏土⑥	40	19.6	0.2	30	15.0	0.39
卵石⑦,⑨	250	20.5	0.3	0	50.0	0.23

云图(图 4)。结果显示:随着土方开挖,土体沉降量

和沉降范围逐渐增大。沉降增大主要发生在水下开挖之前,在水下开挖阶段地表沉降增大缓慢。

疏干开挖的 6 m(−28~−22 m)范围内,沉降云图增大最为明显。此区域基坑处于无支护状态,由于卵石的强渗透性,坑底会发生渗流现象,导致地表沉降的增大。水位回灌后,渗流停止,沉降主要由墙体的变形造成;同时,坑底隆起随开挖不断变大,但在水下封底后,混凝土自身配重及分仓墙给坑底以下土体提供抗拔力,分散到每片墙上形成整体抗隆起效应,使得坑底隆起得到有效控制。

提取距模型长边中点不同距离处的数据,绘制沉降曲线(图 5)。结果显示:沉降大部分发生在干开挖阶段(坑内回灌前),此区间开挖深度 −28 m,地表累计变形 12.49 mm,占总变形量的 87.28%,水下开挖阶段开挖深度 −8.5 m,变形累计增加 1.01 mm,只占总变形量的 7%。由此可见,在开挖深度减小到近 1/3 的情况下,其变形增加量减小到近 1/12。

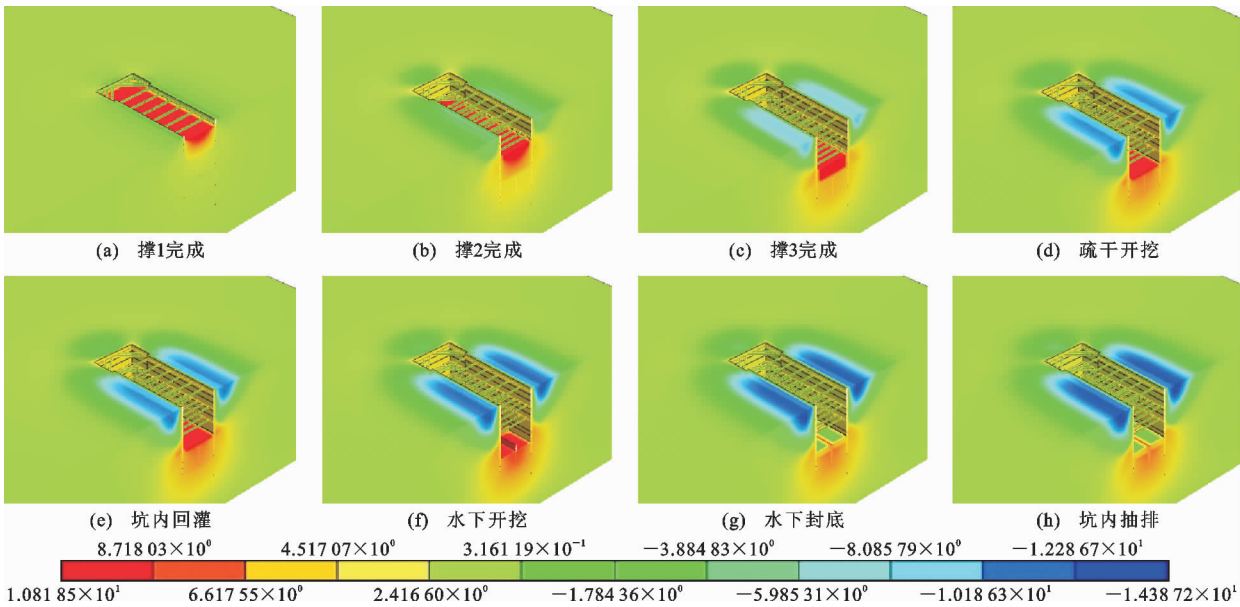


图 4 不同施工阶段基坑沉降云图(单位:mm)

Fig. 4 Nephograms of Foundation Pit Settlement in Different Construction Stages (Unit:mm)

图 6 为同位置实测变形,变形趋势呈“勺”状分布,类似于数值模拟结果;干开挖阶段累计变形 11.74 mm,占总变形量的 72.87%,水下开挖阶段变形 3.48 mm,占总变形量的 21.6%。实际施工中水位变化和开挖动载等因素使得实测变形占比较大。

本工程实测地表最大沉降量为 16.12 mm,小于基坑沉降控制值(30 mm);最大沉降量约为开挖深度的 0.044%,小于北京地区平均值^[20],说明对于富水砂卵石地层基坑开挖,采取水下开挖工艺能够

较好限制开挖过程对周围地层的扰动。

2.3 墙体水平位移分析

图 7 为 8 个施工阶段结束时的墙体变形云图。结果表明:墙体变形随土方开挖不断增加,最大位移位置随开挖不断下移,但当最大位移位置发展到分仓墙墙顶时,变形突然停止;在水下开挖过程中,墙体变形只在 2 片分仓墙之间略有增大,分仓墙以下部分墙体变形很小,在平面上呈波浪形分布,说明分仓墙对限制墙体底部变形有很大作用。作用机理

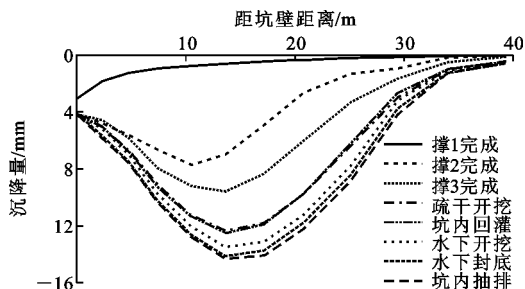


图 5 模拟地表沉降曲线

Fig. 5 Simulated Surface Subsidence Curves

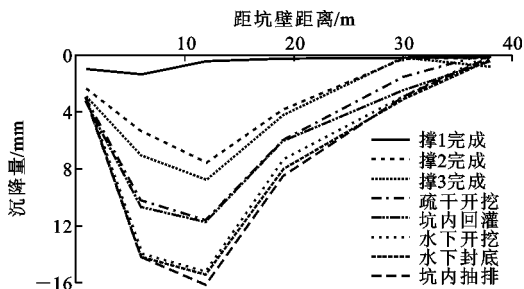


图 6 实测地表沉降曲线

Fig. 6 Measured Surface Subsidence Curves

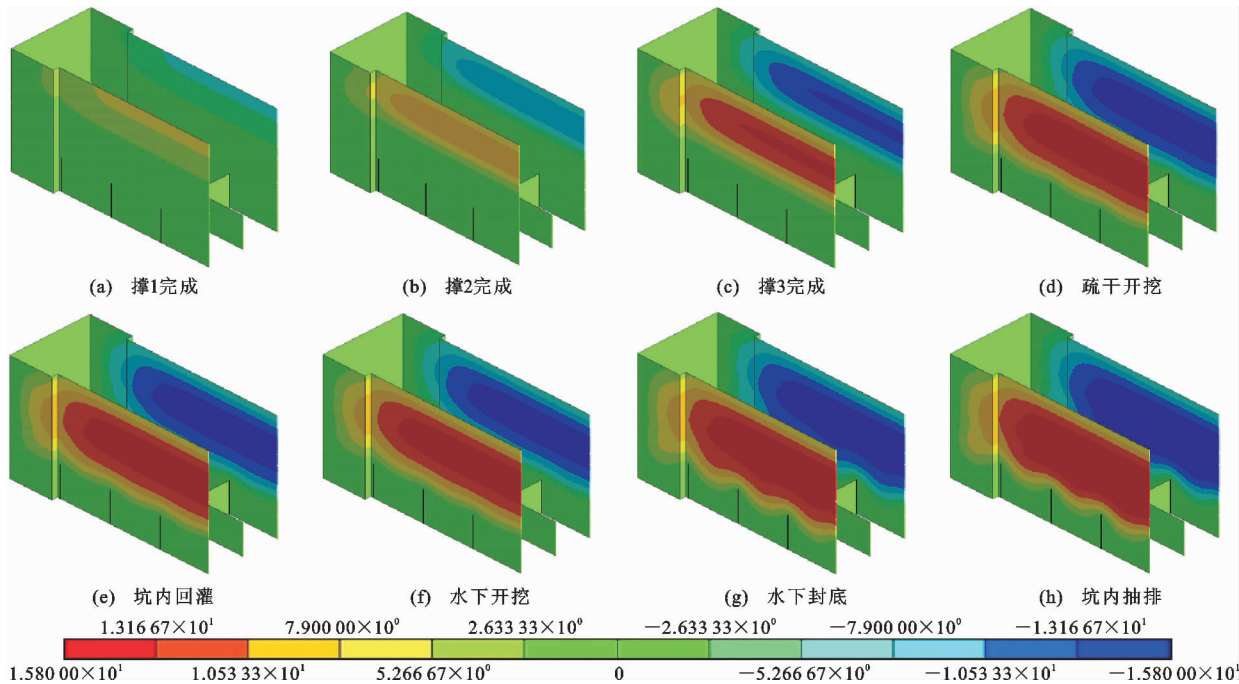


图 7 墙体变形云图(单位:mm)

Fig. 7 Nephograms of Wall Deformation (Unit:mm)

为:分仓墙较上部支撑能在地连墙深度方向形成连续的横向支撑区域,其提供的支撑力远远高于支撑体系,分仓墙的加入使地连墙从简单的筒体结构变成了稳定性极高的束筒体系,墙体下部抵抗外部水平向荷载引起变形的能力大幅提高;另外,坑底群墙造成了挤土效应,增大了周围土体的抗剪强度,能更好地抵抗坑外土压力,有效约束基坑下部土体的变形。

提取长边中轴线上的位移数据,绘制变形曲线(图 8)。结果表明:墙体位移在水下开挖前已完成大部分变形,在疏干开挖完成时已达 14.27 mm,而最终变形量为 15.87 mm,水下开挖阶段墙体变形只占总变形量的 10%左右;另外,墙体中下部-22 m 处变形情况显示,在疏干开挖的 6 m 范围内,墙体变形共增加 7.15 mm,在水下开挖 8.5 m 范围内,墙体变形共增加 2.25 mm。可见水下开挖阶段

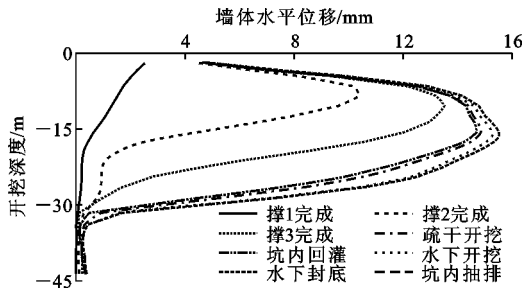


图 8 模拟墙体变形曲线

Fig. 8 Simulated Wall Deformation Curves

释放 8.5 m 水土压力,其引起的地连墙变形小于疏干开挖阶段释放的 6 m 水土压力引起的变形。这是由于水下开挖将基坑水土压力在一段高度上进行分阶段释放,待一部分荷载释放引起的变形稳定后再释放另一部分荷载,使墙体内侧应力释放速率远小于疏干开挖阶段释放速率,从而防止应力发生

突变。

图 9 为实测墙体变形曲线。可以看出在开挖过程中,墙体顶部位移较小,中部较大,底部快速减小,最终呈现“弓”字形变化,模拟变形量与监测数据吻合良好。墙体在撑 3 以下位置处明显增大,其原因是由于在实际施工中,不能在第一时间进行坑内水位回灌;撑 3 以下墙体邻空面处于较长时间的无支护状态,墙体变形因此有所增大,但随着坑内水压力及坑底分仓墙的支撑作用,墙体变形快速减小。可见,及时进行坑内水位回灌,减小墙体下部无支护时间,是保证基坑稳定性的必要手段。

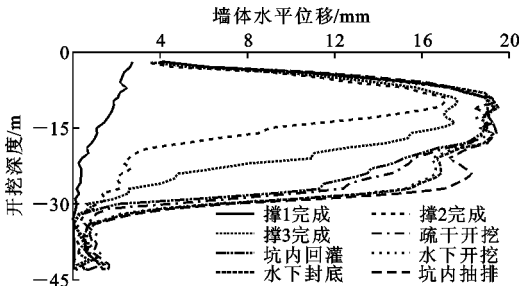


图 9 实测墙体变形曲线

Fig. 9 Measured Wall Deformation Curves

3 分仓墙布置形式优化

上述研究表明分仓墙的加入对限制土体及支护结构变形有重要作用。本节研究水下分仓开挖工法中分仓墙的几何设计参数对基坑变形的具体影响,以对此类工程的设计施工提供经验。

3.1 分仓数量

不改变模型其他设计参数,只改变分仓数量,分别为 20,16,12,8 仓(图 10)。研究地连墙在不同分仓数量情况下的变形情况,确定分仓墙的最优布置形式。墙体中线变形结果见图 11。

结果表明:分仓数量不影响墙体的上部变形,在 -25 m 处,4 种仓位下的墙体变形分别为 11,13.58,14,14.17 mm,可见到达基坑中下部后,分仓数量开始影响墙体变形;仓位由 20 仓减小到 16 仓过程中,墙体位移明显增大,继续减小仓位至 8 仓的过程中,墙体位移增大有限。说明在一定范围内,增加仓位

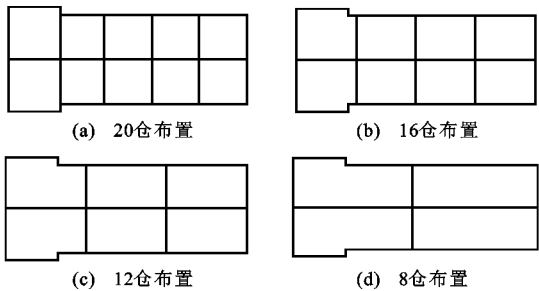


图 10 分仓数量

Fig. 10 Number of Warehouses

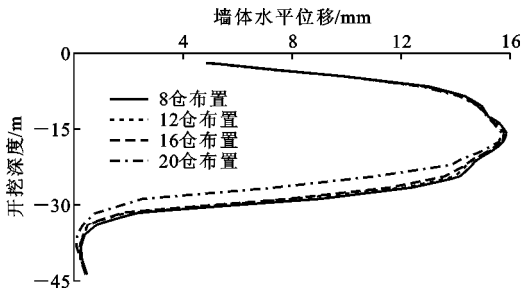


图 11 不同仓位下的墙体变形

Fig. 11 Wall Deformations in Different Warehouses

可有效控制墙体下部位移。

另外,分仓数量还取决于抗浮要求^[21-23],当采用 16 仓时,混凝土分仓尺寸为 17.5 m×11.95 m,计算时地下水位标高取 -19 m,标准段基坑底标高取 -8.27 m(坑内外水位高差 $h=15.22$ m)。水重度取 $10\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,混凝土重度取 $23\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,分仓墙重度取 $15\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,高度为 11.5 m。考虑墙体刚度差异,地连墙取 1.2 m,分仓墙取 0.5 m。分仓墙穿越卵石⑦、粉细砂⑨、卵石⑨层,其侧摩阻力计算见表 3。由此可知,水浮力 $F_1=31\ 837\text{ kN}$,封底混凝土重力 $F_2=1\ 923\text{ kN}$,分仓墙重力 $F_3=5\ 080\text{ kN}$,侧摩阻力 $F_4=15\ 529\text{ kN}$, $(F_2+F_3+F_4)/F_1=1.25$,大于设计规范抗浮安全系数 1.15^[24]。当采用 12 仓时,分仓尺寸为 28 m×11.95 m,同理可计算出抗浮安全系数为 1.153,大于 1.15;当采用 8 仓时,分仓尺寸为 35.8 m×11.95 m,此时抗浮安全系数为 0.92,小于 1.15,不满足抗浮要求。因此,当坑底仓位从 16 仓减小到 12 仓时,仍满足抗浮要求,但

表 3 分仓墙侧摩阻力计算结果

Tab. 3 Calculation Results of Side Friction Resistance of Warehouse Wall

土层	厚度/m	长度/m	抗拔系数 λ	极限侧摩阻力 q_{sik}/kPa	横向根数	沿线桩距/m	抗拔力/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
卵石⑦	3.88	1.0	0.5	150	1	1	291.00
粉细砂⑨	0.90	1.0	0.5	70	1	1	30.80
卵石⑨	2.74	1.0	0.5	150	1	1	205.50

注: q_{sik} 为第 i 层土的极限侧摩阻力。

继续减少至 8 仓后,不利于基坑整体稳定。结合墙体中下部变形情况,将坑底混凝土分为 12 仓最为合理。

3.2 分仓布置形式

在分仓数量确定的情况下,设计横向 8 仓(平行于墙长方向)和纵向 8 仓(垂直于墙长方向)的仓位布置形式,以研究不同几何布置形式是否影响墙体变形。图 12 和图 13 分别为 2 种分仓墙布置形式及开挖完成时的墙体变形云图。

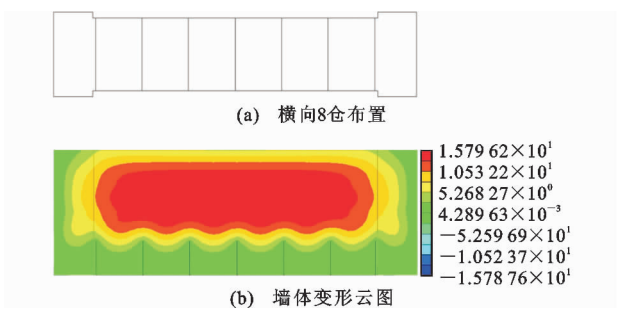


图 12 横向 8 仓布置形式和墙体变形(单位:mm)

Fig. 12 Layout Form and Wall Deformation of Transverse 8 Warehouses (Unit:mm)

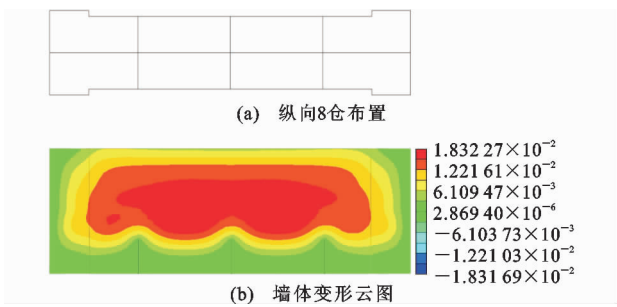


图 13 纵向 8 仓布置形式和墙体变形(单位:mm)

Fig. 13 Layout Form and Wall Deformation of Longitudinal 8 Warehouses (Unit:mm)

结果表明:仓位横向布置情况下,墙体最大变形为 15.78 mm,纵向布置情况下,最大变形为 18.31 mm,而且纵向 8 仓的位移明显向下发展更深;云图显示由分仓墙引起的位移增大主要在 2 个分仓墙之间,而实际监测点和地连墙中间剖面刚好穿过分仓墙。为了更好地分析分仓墙的变更对分仓墙间地连墙位移的影响,取模型中 2 片分仓墙中间剖面的地连墙位移数据再次进行分析,结果见图 14。

纵向 8 仓布置时地连墙中下部侧移量明显增大,在 -26 m 处,纵向布置墙体位移达到最大值 18.43 mm,而同位置横向布置墙体变形为 11.50 mm,变形减小约 37%。因此,垂直于地连墙布置的分仓墙对限制地连墙底部侧移有显著的效果,在保

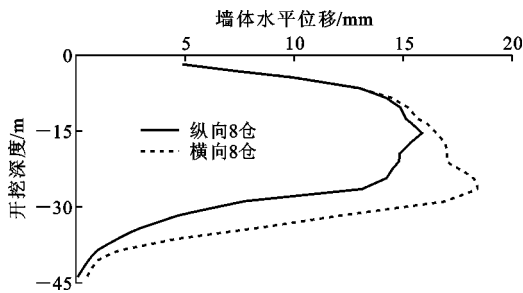


图 14 不同分仓墙布置形式下的墙体变形

Fig. 14 Wall Deformations Under Different Layout Forms of Warehouse Wall

证混凝土浇筑和水下开挖施工方便的同时,可以适当减少工程的分仓墙设置。在减少分仓墙时,尽量减少平行于地连墙长边的分仓墙,保证垂直于地连墙的仓位设置;分仓面积相同时,应尽量采用横向分仓布置形式。

4 结 语

(1)在地下水位高、含水量大,且地层为强渗透性地层中,采用“回灌开挖+混凝土封底”的水下开挖方式能较好控制地表沉降、坑底隆起及支护结构失稳变形。

(2)坑外地表沉降主要发生在水位回灌之前;水下开挖过程中,地表沉降增大缓慢;分仓墙能有效限制坑底隆起,保证基坑整体稳定性。

(3)地连墙在疏干开挖阶段前的变形远远大于水下开挖阶段的变形,最终呈“弓”字形变化;当变形发展到分仓墙墙顶处时,墙体位移大幅减小。

(4)分仓墙布置形式对墙体变形特别是下部变形有显著影响;不同的分仓数量影响墙体变形;工程允许范围内,增加仓位至一定数量后可有效控制墙体下部位移;相对于横向布设仓位,纵向布设仓位会引起墙体中下部更大的变形,因此垂直于地连墙布置的分仓墙能够更好地限制墙体变形。

参考文献:

References:

[1] WANG J X, FENG B, YU H P, et al. Numerical Study of Dewatering in a Large Deep Foundation Pit[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(3): 863-872.

[2] 周念清, 高逸群, 黄钟晖, 等. 采用改进区间层次分析法评估地铁工程地下水风险[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(6): 21-27.

ZHOU Nian-qing, GAO Yi-qun, HUANG Zhong-hui, et al. Groundwater Risk Assessment by Interval-based Improvement of Analytic Hierarchy Process in

- Subway Project[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(6): 21-27.
- [3] ZHANG C X. Study on the Post-processing System of Groundwater Produced by High-rise Building Foundation Pit Construction [C]//SHAHHOSSEINI A M. Proceedings of the 2015 International Conference on Mechanics and Mechatronics (ICMM2015). London: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2015: 1193-1198.
- [4] LI H P. Research of the Underground Water Level Prediction Model in Deep Foundation Pit Engineering [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 675-677: 901-904.
- [5] 王洪光, 郑婉莹. 水下开挖法在市政工程深基坑施工中的应用探微[J]. 建材发展导向, 2017, 15(11): 41-42.
- WANG Hong-guang, ZHENG Wan-ying. Application of Underwater Excavation Method in Deep Foundation Pit Construction of Municipal Engineering [J]. Development Guide to Building Materials, 2017, 15(11): 41-42.
- [6] 孙智勇. 水下开挖法在市政工程深基坑施工中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2016(3): 114-118, 137.
- SUN Zhi-yong. Application of Underwater Excavation Method in Municipal Excavation Engineering [J]. Urban Mass Transit, 2016(3): 114-118, 137.
- [7] 胡云华. 临江高承压水超深基坑开挖抗突涌分析与对策——以南京纬三路长江隧道梅子洲风井基坑为例[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1194-1201.
- HU Yun-hua. Analysis on and Countermeasures for Water Inrush in Construction of Ultra-deep Foundation Pit at Riverside Under High Confined Water: Case Study on Deep Foundation Pit of Meizizhou Ventilation Shaft of Weisanlu River-crossing Tunnel in Nanjing [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(11): 1194-1201.
- [8] 李耀良, 王理想, 余振栋, 等. 超大面积港池基坑的陆上和水下开挖施工技术[J]. 建筑施工, 2008, 30(10): 848-850.
- LI Yao-liang, WANG Li-xiang, YU Zhen-dong, et al. Excavation Technology Under Water and on Land for Ultra Large Foundation Pit of Harbor Basin [J]. Building Construction, 2008, 30(10): 848-850.
- [9] 李 华. 基于大面积水下基坑开挖的特点分析与对策[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(3): 207-208.
- LI Hua. Characteristics Analysis and Countermeasures Based on Large-scale Underwater Foundation Pit Excavation [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2012, 40(3): 207-208.
- [10] 李学武. 船坞工程水下开挖施工技术[J]. 广东水利水电, 2003(增2): 30-31.
- LI Xue-wu. Underwater Excavation Construction Technology of Dock Project [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2003(S2): 30-31.
- [11] 张 健. 超深竖井水下开挖施工关键技术[J]. 公路与汽运, 2011(2): 174-177.
- ZHANG Jian. Key Technology of Underwater Excavation of Ultra-deep Shaft [J]. Highways & Automotive Applications, 2011(2): 174-177.
- [12] ZHOU N, VERMEER P A, LOU R, et al. Numerical Simulation of Deep Foundation Pit Dewatering and Optimization of Controlling Land Subsidence [J]. Engineering Geology, 2010, 114(3/4): 251-260.
- [13] 瞿成松, 徐 丹. 地下水回灌在地铁边基坑降水中的应用[J]. 岩土工程技术, 2012, 26(5): 238-241.
- QU Cheng-song, XU Dan. Groundwater Recharge of Pit Dewatering Close to the Metro [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2012, 26(5): 238-241.
- [14] 瞿成松, 陈 蔚, 黄 雨. 人工回灌控制基坑工程地面沉降的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(6): 87-92, 108.
- QU Cheng-song, CHEN Wei, HUANG Yu. Numerical Simulation for Subsidence of Deep Foundation Pits Controlled by Artificial Groundwater Recharge [J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(6): 87-92, 108.
- [15] 武永霞, 张 楠, 陆建生. 地下水回灌技术在浅层承压含水层中的实践与探讨[J]. 岩土工程技术, 2010, 24(3): 156-160.
- WU Yong-xia, ZHANG Nan, LU Jian-sheng. Practice and Research of Groundwater Recharge in Shallow Confined Aquifer [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2010, 24(3): 156-160.
- [16] 黄应超, 徐杨青. 深基坑降水与回灌过程的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2): 299-303.
- HUANG Ying-chao, XU Yang-qing. Numerical Simulation Analysis of Dewatering and Recharge Process of Deep Foundation Pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 299-303.
- [17] 段宝德, 石满菊, 王 剑. 水下开挖施工监控系统[J]. 现代测绘, 2007, 30(6): 25-27.
- DUAN Bao-de, SHI Man-ju, WANG Jian. The Construction Monitoring System of Underwater Digging [J]. Modern Surveying and Mapping, 2007, 30(6): 25-27.
- [18] 魏战宇. 基于 WSN 嵌入式水下监测系统的设计与实

- 现[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- WEI Zhan-yu. Design and Implementation of Embedded Underwater Detection System Based on WSN [D]. Dalian:Dalian University of Technology,2009.
- [19] 杨 卓,吴剑波,赵一臻,等. 地铁深基坑开挖对紧邻建筑影响的有限元模拟与监测研究[J]. 建筑科学与工程学报,2016,33(2):121-126.
- YANG Zhuo, WU Jian-bo, ZHAO Yi-zhen, et al. Research on Finite Element Simulation and Monitoring of Influence Subway Deep Foundation Pit Excavation on Adjacent Building[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(2): 121-126.
- [20] 刘俊岩.《建筑基坑工程监测技术规范》GB 50497—2009 研究与编制[J]. 施工技术,2009,38(5):1-4.
- LIU Jun-yan. Research and Compilation of *Technical Code for Monitoring of Building Excavation Engineering* GB 50497—2009[J]. Construction Technology, 2009, 38(5): 1-4.
- [21] 付文光,柳建国,杨志银. 抗浮锚杆及锚杆抗浮体系稳定性验算公式研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(11): 1971-1982.
- FU Wen-guang, LIU Jian-guo, YANG Zhi-yin. Formulae for Calculating Stability of Anti-floating Anchor and Anchor Anti-floating System [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 1971-1982.
- [22] 吴 竞. 地下结构抗浮设计中抗拔桩的应用研究 [D]. 南昌:南昌大学,2010.
- WU Jing. Underground Structure Anti-uplift Design Uplift Piles of Applied Research[D]. Nanchang:Nanchang University,2010.
- [23] 罗耀武,胡 琦,陈云敏,等. 基坑开挖对抗拔桩极限承载力影响的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011,33(3):427-432.
- LUO Yao-wu, HU Qi, CHEN Yun-min, et al. Model Tests on Ultimate Uplift Capacity of Piles Under Excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 427-432.
- [24] 沈世杰.《给水排水工程构筑物结构设计规范》GB 50069—2002、《给水排水工程管道结构设计规范》GB 50332—2002 简介[J]. 特种结构,2003,20(4):20-27.
- SHEN Shi-jie. Brief Introduction of *Structural Design Code for Special Structures of Water Supply and Waste Water Engineering* GB 50069—2002, *Structural Design Code for Pipelines of Water Supply and Waste Engineering* GB 50332—2002 [J]. Special Structures, 2003, 20(4): 20-27.