

深基坑开挖对自身围护结构及邻近隧道的影响研究

高洪赞¹,徐天涵²,王志华^{2*},卢瑶²

(1.威海市交通运输事务服务中心,山东威海 264200;2.南京工业大学岩土工程研究所,江苏南京 211816)

摘要:随着城市建设不断推进,地下工程进入快速发展时期。在此过程中,基坑工程不可避免地会对周边环境产生影响,特别是对既有结构的影响不可忽略。该文以南京地铁5号线虹桥站基坑工程为依托,结合施工现场监测以及数值模拟分析,探究深基坑开挖对自身围护结构、周边地表及邻近既有市政隧道的影响规律。结果表明:基坑开挖致使周边地表发生较大沉降,最大沉降点大约位于距基坑0.35开挖深度处;地连墙水平位移随深度的增加先增大后减小,在深度15~16 m处达到峰值,而端头井处最大水平位移小于标准段处,但均未超过限值;当开挖至坑底时,第3道支撑轴力最大,与地连墙最大变形发生位置相近;靠近基坑侧的隧道结构北侧出现竖向隆起,水平向发生小幅度朝向坑内的位移。

关键词:基坑开挖;隧道结构;现场监测;地连墙;地表沉降;支撑轴力

中图分类号:U455.43

文献标志码:A

Influence of Deep Foundation Pit Excavation on Retaining Structure and Adjacent Tunnels

GAO Hongyun¹, XU Tianhan², WANG Zhihua^{2*}, LU Yao²

(1. Weihai Transportation Affairs Service Center, Weihai, Shandong 264200, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China)

Abstract: With the continuous advancement of urban construction, underground engineering has entered a period of rapid development. Foundation pit engineering will inevitably have an impact on the surrounding environment, especially on the existing structures. Based on the foundation pit engineering of Hongqiao Station of Nanjing Metro Line 5, this paper explored the influence of deep foundation pit excavation on its own retaining structure, surrounding ground surface, and adjacent existing municipal tunnels through on-site construction monitoring and numerical simulation. The results show that the excavation of the foundation pit results in a large settlement of the surrounding ground surface, and the maximum settlement position is about 0.35 the excavation depth from the foundation pit. The horizontal displacement of the diaphragm wall first increases and then decreases with the depth, reaching the peak value at the depth of 15 - 16 m. The maximum horizontal displacement at the end well is less than that at the standard section but does not exceed the limit value. When excavation proceeds to the pit bottom, the axial force of the third support is the largest, which is close to the location where the maximum deformation of the diaphragm wall occurs. The north side of the tunnel structure close to the foundation pit has a vertical uplift, and the horizontal direction has a small displacement towards the pit.

Keywords: foundation pit excavation; tunnel structure; on-site monitoring; diaphragm wall; ground surface settlement; axial force of support

0 引言

近年来,城市地下空间工程进入快速发展时期,

基坑工程朝着深、大方向发展,深基坑开挖对周边环境的影响是常见且复杂的工程难题^[1-5],特别是对既有隧道的影响,越来越多的学者们采用理论分析、现

收稿日期:2024-07-18(修改稿)

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究重大项目(编号:18KJA560002)

作者简介:高洪赞,男,工程师.E-mail:jackiluci@163.com

*通信作者:王志华,男,博士,教授.E-mail:wzhnjut@163.com

场实测以及数值模拟等方法对此进行了探索^[6-8]。

Zhang等^[9]提出一种简化方法计算基坑开挖卸荷导致邻近隧道变形,即先对开挖卸荷对邻近隧道产生的应力响应进行估算,再用Galerkin的计算方法将微分方程转为有限元方程,最后求出隧道的位移变化;Kojima等^[10]采用大量的隧道监测数据,分析土层开挖对邻近地铁隧道变形的影响,主要考虑隧道衬砌刚度、土性参数、土方开挖量以及开挖方式等因素;孔令荣等^[11]以某基坑工程为依托,基于现场实测结果,探讨基坑开挖对邻近隧道所产生变形的影响以及邻近隧道的整体变形规律;刘栋^[12]以北京国家金融信息大厦深基坑工程为背景,借助有限元软件建立三维数值模型,预测开挖所引起的隧道位移和基坑变形规律;杨昶^[13]、胡海英等^[14]基于有限元分析,将数值模拟计算值和隧道实测数据结合探究基坑开挖对邻近地铁隧道的影响;Liang等^[15]采用两段分析法对既有隧道响应进行分析,先通过Mindlin解计算作用在下伏隧道上由开挖引起的垂直卸载应力,忽略现有盾构隧道存在,再利用三维有限元和现场实测结果比较,验证了此法可靠性的同时也为评估开挖引起现有盾构隧道响应提供了一种快速有效方法;齐朋等^[16]采用通用Abaqus有限元软件对基坑开挖过程进行模拟,并将模拟结果与监测结果进行对比,总结了各因素对控制深基坑围护结构变形的影响程度。

采用常规工程设计理论和施工技术难以保证基坑周边环境稳定,而又因地质条件、周边环境等众多因素的影响,难以得到通用性的研究成果。本文依托南京地铁5号线工程,以邻近模范马路隧道的虹桥站深基坑为背景,采用现场实测与有限元计算相结合,研究基坑施工过程对既有隧道的影响,分析基坑开挖引起的周边地表沉降、地连墙变形以及支撑轴力的变化规律。

1 深基坑工程概况

1.1 车站深基坑概况及周边环境

虹桥地铁站坐落于中山北路与新模范马路十字路口北侧,沿中山北路修建。地下两层岛式地铁车站,站台宽度9 m,采用明挖顺作法(局部半盖挖法)施工,深基坑标准段宽度约18.5 m,端头井处净宽22.5 m,长约218.0 m,开挖深度为19.8 m。车站支护结构采用800 mm厚地下连续墙+内支撑结构的围护方案,地下连续墙嵌固深度标准段为19 m,首道混

凝土支撑(800 mm×1 000 mm),3道钢管支撑[$\phi 609$ mm, t (壁厚)=16 mm],角撑间距为2.25 m,对撑间距为2.5 m。

对于基坑西侧建筑物:鼓楼区虹桥社区医院,距离基坑最小距离为12.4 m;江苏省旅游局,距基坑边最小距离为23 m;南京饭店,主体结构距坑边最小距离为18.8 m;江苏省民政厅,距离基坑最小距离为19.7 m。基坑东侧建筑物:科技楼,距离基坑最小距离为22.0 m。对于车站南侧,新模范马路隧道,隧道为双向六车道,单箱双室折板拱形框架结构,隧道结构宽度28 m,隧道顶板埋深2.5 m,隧道距坑边最小水平距离为17.6 m。车站基坑周边环境如图1所示。

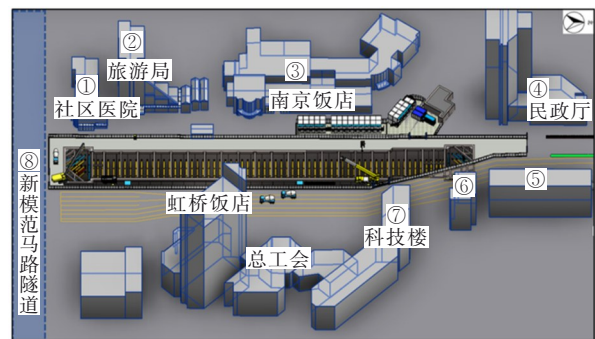


图1 基坑周边环境

Figure 1 Environment around foundation pit

1.2 基坑围护及支撑结构

基坑主体围护结构采用地下连续墙+内支撑形式。地下连续墙厚0.8 m,共84幅地下连续墙,均为工字钢接头,地连墙深度36.7~42.0 m(最深)。基坑标准段设置4道支撑,分别为第1道混凝土支撑和3道钢支撑,其中第3道钢支撑在结构回筑阶段不拆除。两端头井支撑形式为第1道混凝土支撑和4道钢支撑,部分支撑平面布置如图2所示。

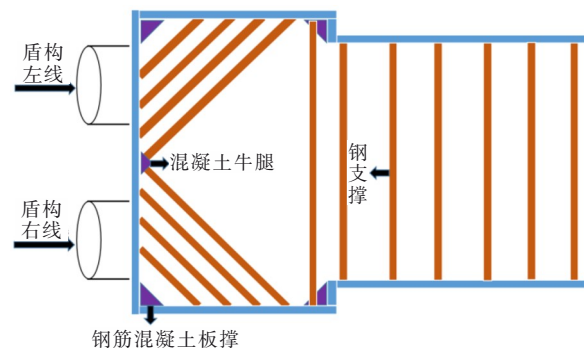


图2 南端头井附近基坑围护结构及支撑平面图

Figure 2 Plane diagram of retaining structure and support at southern end of foundation pit

2 基坑开挖现场监测分析

本节主要针对虹桥站基坑开挖对邻近周边地表沉降、基坑支撑轴力和地连墙位移以及新模范马路隧道位移的影响进行现场监测分析。监测点布置如图3、4所示,其中ZQT为围护结构的位移监测点, DB为地表竖向位移监测点,ZCL为支撑轴力监测点,SD为隧道结构位移监测点。监测点数据采集频率为1次/d。

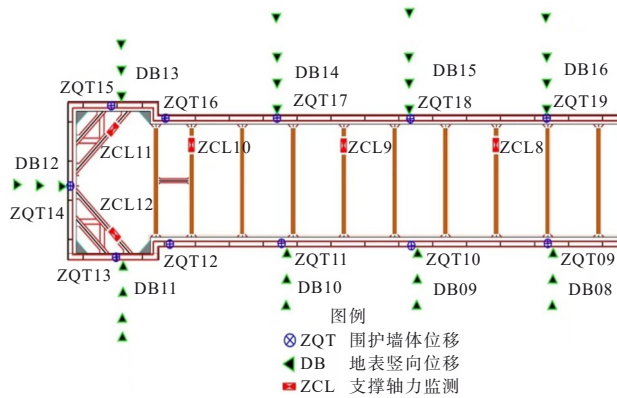


图3 基坑南侧监测点布置

Figure 3 Arrangement of monitoring points at southern end of foundation pit

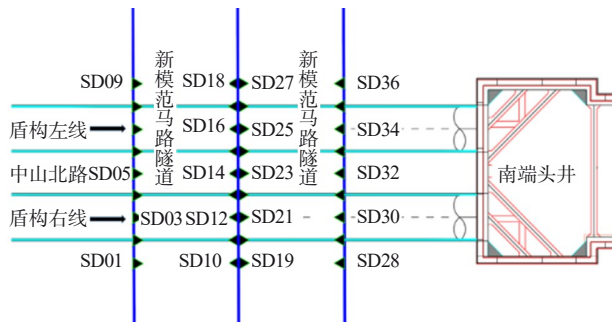


图4 隧道结构位移监测点布置

Figure 4 Arrangement of displacement monitoring points of tunnel structure

综合考虑虹桥站基坑开挖深度、山西路站一虹桥站区间盾构隧道与既有新模范马路隧道距离以及周边环境的复杂性,结合《江苏省城市轨道交通工程监测规程》(DGJ 32/J 195—2015)^[17]规定,确定此工程中基坑和盾构施工工程监测等级均为一级。现场监测项目及点位布置如表1所示。

2.1 基坑周边地表沉降

选取地表沉降监测点 DB09~DB12 共计4个断面实测数据进行分析,基坑开挖至坑底时地表沉降

情况如图5所示。可以看出:周边地表发生较大沉降,并且基坑周边各断面沉降随距基坑的距离呈现“勺”形,最大沉降位置在标准段 DB09 断面处,最大沉降为 20.23 mm,结合 DB11 与 DB12 断面数据可知,虽然端头井位置为基坑开挖最深处,但其并非基坑周边地表沉降最明显处。

表1 监测项目及点位布置

Table 1 Monitoring items and monitoring point arrangement

监测项目	测点位置及内容
基坑周边地表沉降	沿基坑外围垂直坑边向布设点位,监测断面间距约为20 m,断面内各测点间距3~4 m
地连墙水平位移	沿基坑地连墙布设,布设间距约20 m
墙顶水平位移	沿基坑地连墙顶端布设,布设间距约20 m
支撑轴力	混凝土支撑四角主筋焊接装置钢筋计,钢支撑端头位置装置轴力计
隧道上部地表沉降	于隧道上部地表布设点位,各监测断面间距5~10 m
隧道结构竖向位移	布设在隧道侧墙位置,距离隧道路面约50 cm,布设间距约3 m
隧道结构水平位移	布设在隧道侧墙位置,距离隧道路面50 cm,布设间距约3 m

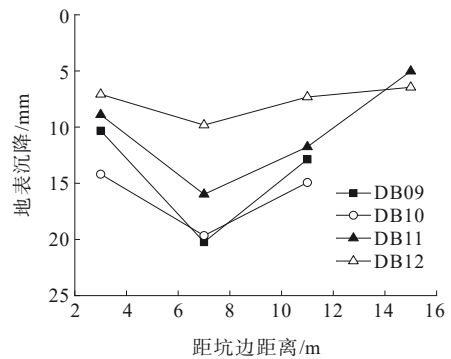


图5 基坑开挖至坑底时地表沉降

Figure 5 Ground surface settlement after excavation proceeding to pit bottom

进一步分析可知:基坑开挖至坑底时,紧邻基坑边一侧土体由于和地连墙存在一定摩擦,坑边土体沉降较小;坑边土体随着与坑边距离不断增加,地表沉降表现为先增大后减小的变化趋势,在距离坑边约7 m处沉降达到最大值,即距离基坑边基坑开挖深度的0.35处沉降最为明显;得益于基坑南端头井处强大的斜撑体系和阳角关系,靠近既有隧道的DB12断面的地表沉降远小于其他断面。此断面最大沉降

同样位于距离坑边 7 m 处,最大值为 9.82 mm。根据《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497—2019)^[18]规定,竖向位移应控制在 25~35 mm,据此判断,基坑周边地表沉降处于安全范围内。

2.2 基坑地连墙水平位移

基坑开挖至坑底时,ZQT09~ZQT12 测点处地连墙水平位移随埋深变化情况如图 6 所示。可以发现:基坑开挖至坑底后,基坑标准段与端头井位置地连墙发生最大水平位移位置有所不同。具体表现为:标准段地连墙朝向坑内的最大水平位移大于端头井部位,主要原因为基坑端头位置拥有良好斜撑体系作为支撑,使得端头位置地连墙受扰动较小;由于基坑端头井部位开挖深度大于标准段位置,因此端头位置的地连墙发生最大水平位移的深度相较于标准段更深,比标准段深 1.5~2.0 m;由于第 1 道为钢筋混凝土支撑,基坑开挖至坑底后,原有周边土体平衡破坏,地连墙深处受到土压力后产生向坑内的变形,而此时地连墙上半部分受到钢筋混凝土支撑的反作用力,因此从图 6 可见地连墙上端有向坑外移动现象。图中 4 个断面地连墙最大水平位移为 30.01 mm,而地连墙位移限值为 35 mm,可知围护结构处于安全稳定状态。

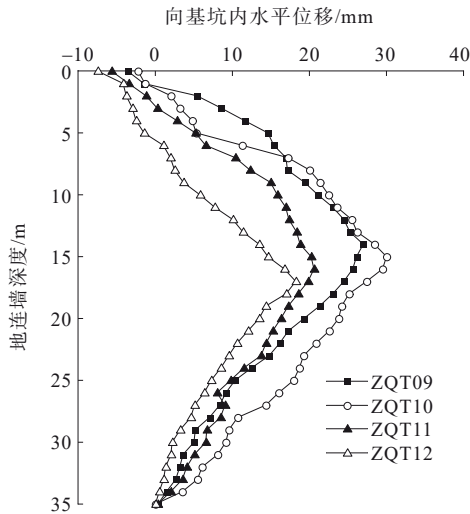


图 6 基坑开挖至坑底时地连墙水平位移随深度变化情况
Figure 6 Variation of horizontal displacement of diaphragm wall with depth after excavation proceeding to pit bottom

2.3 支撑轴力

基坑开挖至坑底时,标准段支撑轴力测点 ZCL09、ZCL10 以及端头井位置 ZCL11 处的轴力监测值如表 2 所示。

表 2 支撑轴力监测值

Table 2 Monitored axial force of support

支撑名称	支撑轴力/kN		
	ZCL09	ZCL10	ZCL11
第 1 道混凝土支撑	1 134.67	1 581.67	623.25
第 2 道钢支撑	1 348.19	1 477.34	814.62
第 3 道钢支撑	1 488.41	1 896.29	984.67
第 4 道钢支撑	1 254.35	1 300.00	886.64
第 5 道钢支撑	—	—	753.85

由表 2 可知:基坑开挖至坑底后,所有支撑都表现为受压的状况,最大受力达到 1 896.29 kN,最小受力则为端头井处第 1 道混凝土斜撑的 623.25 kN,均在控制值之内;不管是在标准段还是在端头井处,同一测点处最大支撑轴力均为第 3 道支撑。结合地连墙向坑内水平位移数据分析,可知钢支撑轴力最大位置即第 3 道支撑与地连墙最大位移处的深度相近。另外,标准段位置的支撑轴力大于端头井位置斜撑轴力,这是由于斜撑数量密集且与端头井边角构成稳定的三角形体系。值得注意的是,端头井与标准段交接位置深度不一,支撑轴力监测与地连墙水平位移监测均需适当实施高频监测。

2.4 既有隧道结构位移

根据基坑开挖开始至基坑底板浇筑完成的实测数据,发现隧道产生位移的部位主要是靠近基坑南端头井即隧道北侧(靠近基坑侧),而隧道南侧结构位移变化不明显。鉴于监测点位较多,以下结合隧道北侧墙上的 SD28、SD32 和 SD36 测点数据进行分析,隧道北侧墙竖向和水平向位移分别如图 7、8 所

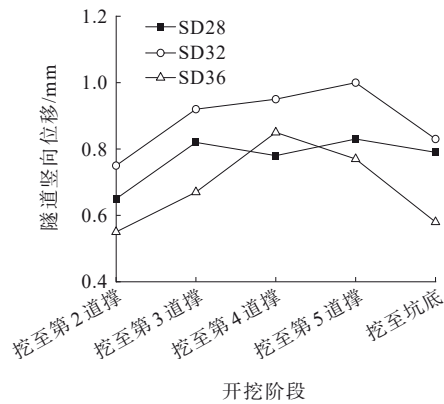


图 7 隧道北侧墙竖向位移

Figure 7 Vertical wall displacement at north tunnel

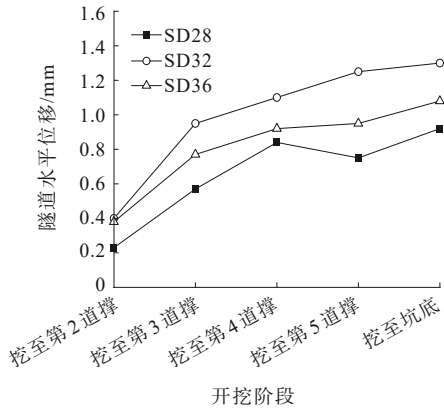


图 8 隧道北侧墙水平位移

Figure 8 Horizontal wall displacement at north tunnel

示,其中竖向位移正值代表隆起,水平位移正值表示向坑内移动。可以发现:隧道在基坑开挖过程中总体呈现隆起现象,但是开挖至坑底时,隧道结构隆起趋势逐渐减少,最终结构隆起量在 1 mm 之内;基坑南侧既有隧道结构总体发生小幅度朝向基坑方向的水平移动,直至基坑开挖至坑底仍有往坑内移动的趋势;基坑开挖对既有隧道变形有一定影响,但是隧道变形远未达到规范限值。隧道变形较小的原因主要是隧道距离基坑有一定的距离,而且端头井基坑的侧向位移控制良好。

3 深基坑开挖对邻近隧道影响的数值模拟分析

3.1 计算模型建立

按照现场基坑尺寸和新模范马路隧道实际情况建立三维数值模型,基坑开挖对邻近新模范马路隧道影响的施工范围取基坑南段 40 m,模型边界中基坑两侧尺寸(X向)取基坑开挖深度的 3 倍,模型纵向高度(Z向)取基坑开挖深度的 2.5 倍。综合考虑虹桥站基坑和新模范马路隧道的位置关系,建立的三维模型尺寸为 143 m×108 m×50 m(图 9),虹桥站基坑与既有隧道相对位置关系如图 10 所示。

3.2 模型参数

根据虹桥站及周边场地勘察报告,所建立模型中土层分为 7 层,由上而下各土层类型及物理力学参数见表 3。

胡建林等^[19]提出土体采用修正-摩尔库仑本构模型,需明确 3 个非线性刚度参数:主压密加载试验的切线刚度 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 、三轴试验割线刚度 E_{50}^{ref} 、卸载弹性模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 。根据实际工程经验并结合岩土试验得出:

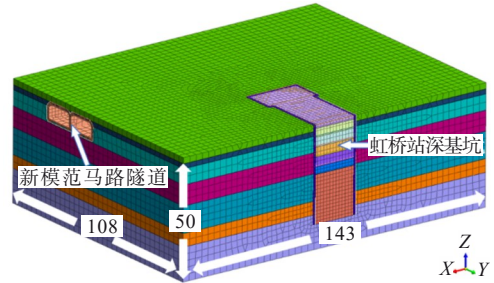


图 9 虹桥站深基坑三维模型(单位:m)

Figure 9 Three-dimensional model of deep foundation pit in Hongqiao Station(unit:m)

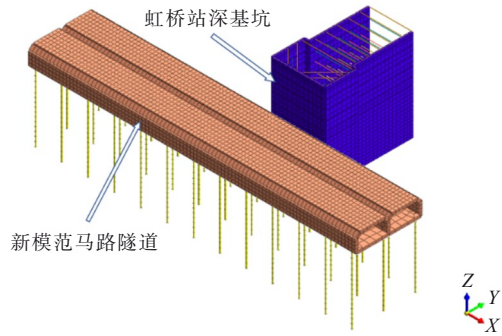


图 10 基坑与隧道位置关系

Figure 10 Relationship between foundation pit location and tunnel location

表 3 土层物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters for soil layer

土层名称	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	层厚/m
杂填土	0.33	25.0	5.0	22.0	4.5	2.5
素填土	0.38	10.0	10.0	18.5	5.0	2.0
粉砂	0.31	34.5	6.1	19.2	33.7	6.5
稍密性粉土	0.33	28.5	12.4	18.4	22.4	8.5
中密性粉土	0.30	25.1	16.6	18.2	18.3	11.0
淤泥质粉质黏土	0.38	22.3	15.3	17.4	12.9	5.5
粉质黏土	0.30	14.5	32.8	19.5	21.4	14.0

$E_{\text{oad}}^{\text{ref}} = E_{50}^{\text{ref}} = nE_s = 1/3E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 。根据地区经验,土体的弹性模量 E 取压缩模量 E_s 的 2.5~5.0 倍。基坑围护结构和隧道结构均采用弹性本构模型,模型参数见表 4。地下连续墙厚度 0.8 m,冠梁截面 0.8 m×0.8 m,钢支撑直径 0.6 m,围檩截面为工字钢,隧道抗拔桩直径 0.6 m。

3.3 边界及加载条件

基坑开挖对周边环境的影响区域具有局限性,即距离基坑较远处环境受基坑施工影响可忽略不

表 4 支护结构及隧道结构本构模型参数

Table 4 Constitutive model parameters of retaining structure and tunnel structure

结构名称	材料类型	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)	单元类型
地下连续墙	C35混凝土	31 500	0.2	25	2D板单元
冠梁	C35混凝土	31 500	0.2	25	1D梁单元
钢支撑	钢	210 000	0.3	78	1D梁单元
围檩	钢	210 000	0.3	78	1D梁单元
隧道结构	C35混凝土	31 500	0.2	25	2D板单元
隧道抗拔桩	C35混凝土	31 500	0.2	25	1D梁单元

计。模型四周边界(X和Y向)设置水平位移约束,模型底部设置为竖向位移约束(Z向),模型顶部则设边界约束即自由面。设置模型边界完成后需要施加荷载,本模型主要考虑基坑开挖对周边环境及邻近隧道结构影响,暂不考虑周边建筑和车辆荷载,在模型内所有单元施加自重,并在基坑开挖前将场地初始地应力进行平衡。

3.4 基坑开挖工序设定

虹桥站基坑现场采用分层、分段、放坡开挖方式由南向北进行施工,数值模型基坑开挖范围(基坑南部)采用分层开挖,建模施工过程按照实际情况随挖随撑。数值模拟开挖工序见表5。

表 5 基坑开挖工序

Table 5 Excavation process of foundation pit

施工步骤	建模内容
工序1	初始地应力计算,位移清零
工序2	地下连续墙施工
工序3	开挖至第1道支撑下0.5 m,做第1道混凝土支撑和冠梁
工序4	开挖至第2道支撑下0.5 m,做第2道钢支撑和围檩
工序5	开挖至第3道支撑下0.5 m,做第3道钢支撑和围檩
工序6	开挖至第4道支撑下0.5 m,做第4道钢支撑和围檩
工序7	开挖至第5道支撑下0.5 m,做第5道钢支撑和围檩
工序8	开挖至坑底,做结构底板

3.5 模拟结果分析

3.5.1 基坑周边地表沉降

开挖结束时基坑周边相同测点处地表沉降数值模拟与实测结果对比如图11所示。

由图11可以看出:数值模拟得到的地表沉降曲线与实测结果相似,都呈现一种“勺”形态。实测值与模拟值均在靠近基坑边缘约7.5 m处最小,随着距基坑距离的增大,地表沉降量变小,直至超过开挖影响范围,地表变形最终趋于稳定。数值计算结果表明:基坑标准段附近土体受扰动变形更加明显,导致

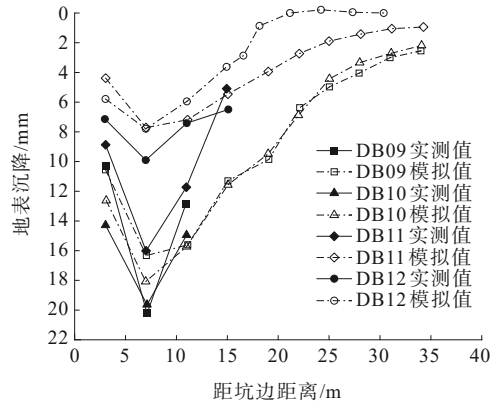


图 11 工序8地表沉降对比

Figure 11 Comparison of ground surface settlements in process 8

此位置的地表沉降量大于端头井附近的地表沉降。

3.5.2 基坑地连墙水平位移

图12对比了基坑开挖完成时地连墙水平位移现场实测值与数值模拟结果。对ZQT09~ZQT12共4个监测断面的测点数据进行对比,发现基坑开挖完成时墙体位移现场实测值与模拟计算值存在一定差异,但随基坑深度的变化规律是一致的。两者的差异主要体现在:① ZQT12位置处地连墙顶端水平位移相差较大。实测值中可见墙体上端朝坑外方向移动较大,其原因是此位置地连墙底端受土体挤压后,上部混凝土支撑反作用力施加在墙体上端导致地连墙发生如“翘板”似的弯曲,对比另外3个断面(ZQT09、ZQT10和ZQT11),这种现象同样存在;② 地连墙发生最大变形处的深度有所不同,实测值墙体变形最大位置普遍要深于模拟计算值。这一

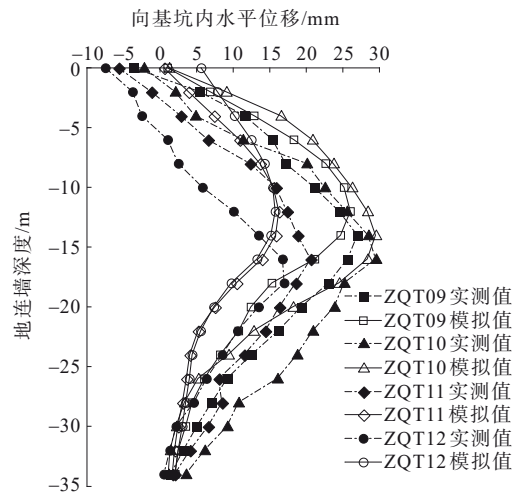


图 12 地连墙水平位移的实测与数值模拟结果对比

Figure 12 Comparison of measured and numerically simulated horizontal displacements of diaphragm wall

差异主要是由于在数值模拟中,开挖和支撑属于同步工序;而在实际施工过程中,支撑的架设时间存在一定滞后,坑内土体开挖后墙体便受到坑外土体产生的土压力影响而产生变形,从而导致实测墙体最大变形位置的深度相对更大。

3.5.3 支撑轴力

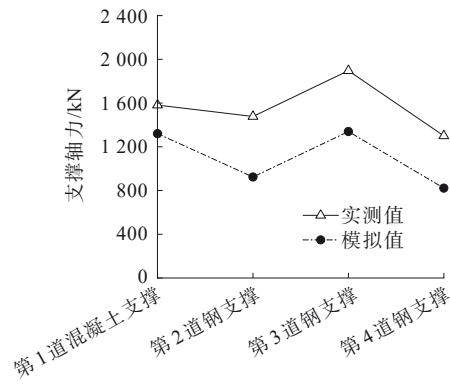
基坑开挖至坑底时 ZCL10(标准段)与 ZCL11(端头井)两个位置处不同道支撑的轴力对比如图 13 所示。

由图 13 可知:当基坑开挖至坑底时,实测与模拟的内支撑轴力最大位置都位于第 3 道支撑,与地连墙发生最大变形位置相近;现场实测支撑轴力大于数值模拟结果,可能是由于现场处于时刻变化中,而模拟计算施工则为瞬时步骤,且轴力监测受温度影响较大,因此二者在数值上存在一定差距。但是同一位置处的支撑轴力自上而下大小趋势基本一致,模拟得到的支撑轴力大小也在合理范围之内;模拟结果同样表明端头井位置处支撑轴力明显较小,也验证了此前分析的基坑端头井处结构更加稳定。

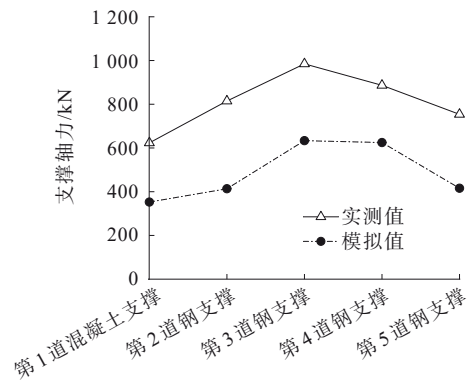
3.5.4 邻近既有隧道结构变形

在基坑开挖过程中,隧道结构总体发生隆起现象,并且越靠近基坑一侧的隧道结构变形越明显。图 14 给出了数值模拟基坑开挖过程对新模范马路隧

道结构产生的竖向位移云图。



(a) ZCL10



(b) ZCL11

图 13 支撑轴力对比图

Figure 13 Comparison of axial forces of support

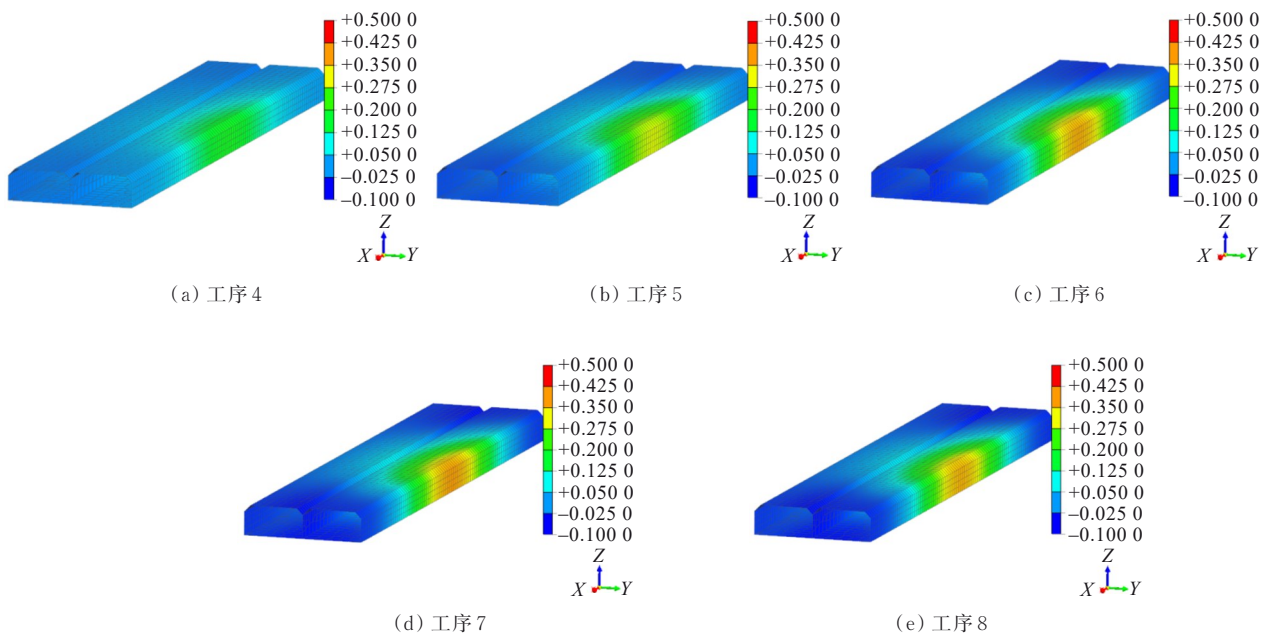


图 14 基坑开挖导致既有隧道产生的竖向位移云图(单位:mm)

Figure 14 Cloud map of vertical displacement of existing tunnel induced by foundation pit excavation (unit: mm)

由图 14 可以看出:基坑开挖至工序 4(开挖至第 2 道支撑)隧道结构开始产生变形;随着基坑继续向下开挖,隧道结构的向上位移量亦持续增加,当基坑开挖至工序 7(开挖至第 4 道支撑)隧道结构产生最大向上位移。继续开挖至坑底时(工序 8),隧道竖向位移相较于前一工序产生了少量下沉,开挖结束时隧道结构的最大向上位移量稳定在 0.39 mm。

为了直观表现隧道的竖向与水平变形,将模拟中隧道侧墙竖向与水平位移最大值与测点 SD32 实测数据进行对比,结果如图 15 所示。由图 15 可知:模拟值与实测数据变化趋势总体一致。基坑开挖开始至完成过程中,隧道隆起最大值发生于基坑开挖至第 5 道支撑,实测和模拟最大值分别为 1.02 mm 和 0.41 mm;隧道结构随基坑开挖进度不断向基坑方向移动,水平位移量随开挖进程增加速率变缓,当基坑开挖至坑底,隧道水平位移最大,实测值和模拟值分别为 1.30 mm 和 0.39 mm。由此可见,基坑开挖导致既有隧道的变形相对较小,除基坑与既有隧道有一定间距外,另一主要原因是隧道底部布设有抗拔桩。

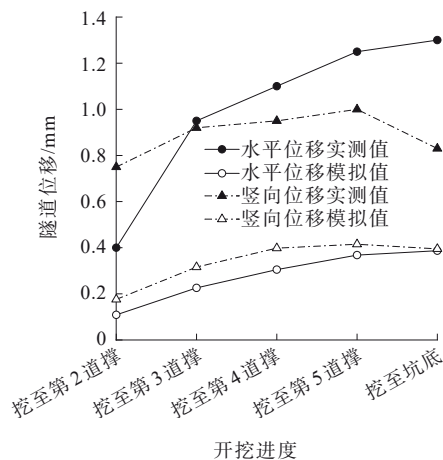


图 15 隧道北侧墙(SD32)位移对比图

Figure 15 Comparison of wall displacements at north tunnel (SD32)

4 结论

以南京地铁 5 号线虹桥站深基坑工程为依托,采用现场实测与数值模拟结合对比研究基坑开挖对既有隧道及周边环境的影响,主要结论如下:

(1) 虹桥站基坑开挖完成后坑边地表沉降、地连墙水平位移、支撑轴力以及既有隧道结构变形现场实测值与模拟计算值变形规律基本一致,数值模拟结果与实际工程情况吻合较好。

(2) 基坑周边地表发生较大沉降,各断面沉降呈“勺”形,端头井附近不是地表沉降最大处,最大沉降位置约在距基坑开挖深度的 0.35 处。

(3) 地连墙水平位移实测与模拟结果稍有差异,但变化规律一致;地连墙顶端向坑外发生少许水平位移,向坑内水平位移随深度增加先增加后减小,在深度 15~16 m 处到达峰值,端头井位置向坑内最大水平位移小于标准段位置,均未超过位移限值。

(4) 基坑开挖至坑底时,第 3 道支撑的轴力最大,与地连墙发生最大变形位置相近,端头井位置处支撑轴力明显小于标准段处,得益于端头井处的支撑道数加强。支撑轴力越大位置地连墙变形亦越明显,但须注意首道混凝土支撑对地连墙顶端的反作用,此处可能导致墙体朝坑外移动。

(5) 隧道结构产生位移部分主要是北侧靠近基坑侧,开挖过程中竖向发生隆起,开挖至最后一道支撑时达到峰值,开挖结束时隆起量减小至稳定值;水平向发生小幅度的朝向坑内的位移,开挖至坑底时达到最大值。

参考文献:

References:

- [1] YE S H, ZHAO Z F, WANG D. Deformation analysis and safety assessment of existing metro tunnels affected by excavation of a foundation pit[J]. *Underground Space*, 2021,6(4): 421-431.
- [2] 徐立武, 陈卓异, 邱力杰. 钢换撑支撑体系下狭长形基坑围护结构受力及变形分析[J]. *中外公路*, 2024,44(3): 193-201.
- [3] 钟翰虎, 李聪, 李雨林, 等. 偏压荷载下深基坑支护结构非对称变形与控制技术研究[J]. *中外公路*, 2022,42(1): 34-37.
- [4] ZHONG Hanhu, LI Cong, LI Yulin, et al. Research on asymmetric deformation and control technology of supporting structure of deep foundation pit under eccentric load[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2022,42(1): 34-37.
- [5] 李浩, 贺祖浩, 杨钊, 等. 软弱地层临近深基坑工程房屋沉降注浆控制研究[J]. *中外公路*, 2021,41(1): 26-30.
- [6] LI Hao, HE Zuhao, YANG Zhao, et al. Study on grouting control for settlement of neighboring buildings with deep foundation in soft ground layer[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2021,41(1): 26-30.
- [7] 戚科骏, 王旭东, 蒋刚, 等. 临近地铁隧道的深基坑开挖分

- 析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增刊2): 5485-5489.
QI Kejun, WANG Xudong, JIANG Gang, et al. Analysis of deep foundation pit excavation near subway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(sup 2): 5485-5489.
- [6] 谭程龙,龚天昊,刘鑫,等.墩承台施工对营业线的影响研究[J].中外公路,2023,43(6):153-158.
TAN Chenglong, GONG Tianhao, LIU Xin, et al. Research on influence of pier abutment construction on existing business line[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6):153-158.
- [7] 陈仁朋,王诚杰,鲁立,等.开挖对地铁盾构隧道影响及控制措施[J].工程力学,2017,34(12): 1-13.
CHEN Renpeng, WANG Chengjie, LU Li, et al. Influence of excavation on exist metro shield tunnel and control measures[J]. Engineering Mechanics, 2017,34(12):1-13.
- [8] 王灿,凌道盛,王恒宇.软土结构性对基坑开挖及邻近地铁隧道的影响[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(2): 264-274.
WANG Can, LING Daosheng, WANG Hengyu. Influence of soft clay structure on pit excavation and adjacent tunnels[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020,54(2): 264-274.
- [9] ZHANG Z G, HUANG M S, WANG W D. Evaluation of deformation response for adjacent tunnels due to soil unloading in excavation engineering[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013,38: 244-253.
- [10] KOJIMA Y, ASAKURA T, YOSHIKAWA K, et al. Tunnel deformation behavior due to ground surface excavation above the tunnel[J]. Journal of the Society of Materials Science Japan, 2003,52(8):958-965.
- [11] 孔令荣,崔永高,隋海波.基坑开挖对邻近地铁变形的影响分析[J].工程勘察,2010,38(6): 15-20.
KONG Lingrong, CUI Yonggao, SUI Haibo. The Influence of foundation pit excavation on adjacent metro deformation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010,38(6): 15-20.
- [12] 刘栋.超深大基坑开挖对紧邻既有地铁隧道的影响分析[D].北京:北京交通大学,2014.
LIU Dong. Analysis of the influence of the excavation of super deep and large foundation pit on adjacent existing metro tunnels[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [13] 杨昶.基坑开挖对邻近既有地铁隧道的影响研究[D].南京:东南大学,2017.
YANG Chang. Influence of deep excavation on the adjacent subway tunnel[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [14] 胡海英,张玉成,杨光华,等.基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J].岩土工程学报,2014,36(增刊2): 431-439.
HU Haiying, ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, et al. Measurement and numerical analysis of the influence of foundation pit excavation on existing subway tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,36(sup 2):431-439.
- [15] LIANG R Z, WU W B, YU F, et al. Simplified method for evaluating shield tunnel deformation due to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2018,71(1): 94-105.
- [16] 齐朋,张宇奇,王宁.深基坑围护结构横向位移监测和数值模拟分析[J].中外公路,2022,42(1): 38-42.
QI Peng, ZHANG Yuqi, WANG Ning. Lateral displacement monitoring and numerical simulation analysis for retaining system of deep foundation pit[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(1): 38-42.
- [17] 南京市轨道交通建设工程质量安全监督站,南京市测绘勘察研究院有限公司.江苏省城市轨道交通工程监测规程:DGJ 32 / J 195—2015[S].南京:江苏凤凰科学技术出版社,2016.
Quality and Safety Supervision Department of Nanjing Railway Transit Engineering, Nanjing Insitute of Surveying, Mapping & Geotechnical Investigation, Co., Ltd.. Technical specification for monitoring measurement of urban rail tranist engineering in Jiangsu Province: DGJ 32 / J 195—2015[S]. Nanjing: Phoenix Science Press, 2016.
- [18] 济南大学,莱西市建筑总公司,山东省工程建设标准造价协会.建筑基坑工程监测技术标准:GB 50497—2019[S].北京:中国计划出版社,2020.
University of Jinan, General Construction Company of Laixi, Shandong Engineering Construction Standard Costing Association. Technicai standard for monitoring of building excavation engineering: GB 50497—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2020.
- [19] 胡建林,孙利成,崔宏环,等.修正摩尔库伦模型下的深基坑变形数值分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(2): 134-140.
HU Jianlin, SUN Licheng, CUI Honghuan, et al. Numerical analysis of deep foundation pit deformation based on modified Mohr Coulomb model[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021, 40(2): 134-140.