文章编号:1005-0523(2023)03-0010-07

高架桥桥基与地下车站深基坑近距离施工相互影响分析

周 超[1],丁春林[1],李桂颖[2],朱海星[1]

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804; 2. 中铁四局集团第四工程有限公司,安徽 合肥 230012)

摘要:基于某地下车站深基坑与高架桥桥基近距离施工难题,利用Midas GTS NX软件,土体采用修正摩尔库伦本构模型,对基坑开挖、桥基施工、支撑拆除以及车站主体结构回筑进行施工全过程数值模拟,分析施工全过程基坑和桥基的相互影响规律,并结合现场实测数据对数值模拟结果进行对比验证。研究发现,基坑开挖阶段,由于土体水平卸荷,基坑变形不断增大,基坑地表最大沉降发生在距基坑边缘约0.4倍基坑宽度处,地连墙最大侧移发生靠近基底处;桥基施工后,基坑地表沉降和地下连续墙侧向位移进一步增加,桥基本身也产生了一定沉降;基坑支撑拆除和车站主体结构回筑阶段,由于围护结构的作用,基坑和桥基的变形增长并不明显。

关键词:软土地层;高架桥桥基;地铁深基坑;近距离施工;相互影响;数值模拟

中图分类号:U452 **文献标志码**:A

Interaction Analysis of Adjacent Construction Between High-Speed Railway Bridge Foundation and Deep Underground Station Pit

Zhou Chao[1], Ding Chunlin[1], Li Guiying[2], Zhu Haixing[1]

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 2. The Fourth Engineering CO., LTD. of CTCE Group, Hefei, 230000, China)

Abstract: Based on the problem of adjacent construction of overpass bridge foundation and deep foundation pit of the underground station, this paper carried out a finite element numerical simulation of the whole construction process with Midas GTS NX where modified Mohr-Coulomb constitutive model was adapted on the soil, including foundation pit excavation, bridge foundation construction and braces demolition, to study the pattern of interaction between the bridge foundation and the underground station foundation pit. Having compared the numerical simulation results with on-site measured data, the results showed that, during the excavation stage of the foundation pit, the deformation of the foundation pit continued to increase due to the horizontal unloading of the soil. The maximum settlement occurred at about 0.4 times the width of the foundation pit from the edge of it, and the maximum displacement of diaphragm wall occurred near the bottom of foundation pit. After the construction of the overpass bridge foundation, the surface settlement of the foundation pit and the lateral displacement of the diaphragm wall further increased, and the overpass bridge itself also had a modicum settlement. Thanks to the protection of the enclosure structure, the impact of the braces demolition was neither obvious on the pit nor the overpass bridge foundation.

收稿日期:2022-11-06

基金项目:中铁四局集团第四工程有限公司科研项目(20210716)

Key words: soft soil layer;overpass bridge foundation;deep underground station pit;adjacent construction;interaction; numerical simulation

国内外许多学者开展了基坑下穿高架桥施工的研究。木林隆[1]提出了基坑开挖对邻近桩基竖向和水平向影响的两阶段分析方法。Zhang[2]基于 HS-Small 本构模型建立了地铁基坑紧邻既有桥桩开挖的有限元模型,结合现场实测数据证明了数值模拟结果的准确性。胡军[3]以深基坑邻近高速铁路桥基开挖为背景,发现深基坑开挖导致基坑底部隆起,围护结构向坑内发生移动,且桩基上部变形较大,下部变形较小。

可以发现,现有研究主要围绕既有桥基修建下穿基坑,通过对桥基周围土体加固来控制基坑和桥基之间的相互影响。本文则重点关注高架桥需要和深基坑同步施工,基于高铁高架桥桥基穿越在建台州某车站地铁深基坑施工技术,利用 Midas GTS NX 软件,对高铁桥基和地铁深基坑全生命周期施工过程进行数值模拟,通过有限元分析得出两者受力变形变化规律,为工程安全顺利进行提供理论依据。

1　工程概况

1.1　场地土条件与车站结构

台州某地下车站为市域铁路 S1 线与 S2 线的换乘站。根据地质勘察报告,该工程场地属冲海积平原区,地形平坦开阔,深厚层软土为该工程的主要特殊岩土,深度可达 70 m。软土地基的强度低、稳定性差和不均匀沉降及变形大等,是主要工程地质问题。勘探深度范围内的土层自上而下分为 8 个主要土层,特殊岩土主要包括淤泥、淤泥质黏土和黏土。地层主要物理力学参数如表 1 所示。

该车站为东西向布置的地下 3 层车站。主体长约 232 m,深度约 31.41 m。基坑围护结构采用地下连续墙和内支撑。地下连续墙厚度为 1 150~1 250 mm,深度为 67~71 m。基坑内部从上至下依次设有 4 道混凝土支撑,2 道钢支撑。混凝土支撑为 900 mm×1 200 mm 的矩形截面,支撑采用 C30 混凝土;钢支撑采用直径为 800 mm 的钢管,钢管壁厚为 16 mm。基坑底部为 C20 混凝土垫层,厚度为 20 cm。

表 1　地层物理力学参数表

Tab.1　Physical mechanical parameters of soil iayer

Stratigraphic sequence	Compression modulus E(MPa)	Unit weight γ_0(kN/m^3)	Poisson ratio μ	Cohesive force c/(kN/m^2)	Internal friction angle φ/(°)	Thickness h/m
① clay	3.24	18.4	0.35	16.70	8.72	1.80
② 2 muck	1.43	16.3	0.40	2.28	2.15	9.60
② 3 mucky clay	3.49	18.8	0.40	14.32	7.76	13.50
③ clay	5.47	19.2	0.35	28.58	12.86	3.80
④ clay	5.30	19.5	0.35	29.55	11.88	11.60
⑤ clay	6.04	19.7	0.30	32.65	12.59	17.60
⑥ clay	5.79	19.7	0.30	35.00	15.40	11.40
⑩ 2 strong weathered tuff	50.00	24.0	0.20	50.00	50.00	11.90

高架桥桥基第22~23跨穿越了S2线在建深基坑,桥梁承台距离基坑边缘仅0.6 m。高架桥桩基为泥浆护壁法施工的钻孔灌注桩，桩长77 m，直径1.25 m,桩间距为3.6 m,距离承台边缘1 m,采用梅花形布置;承台厚2.2 m,宽5.6 m,长7.7~30.8 m,为现浇施工。桥墩高11 m,桥梁待基坑和桥基施工完成后架设。高架桥桥基与S2线基坑断面如图1所示。

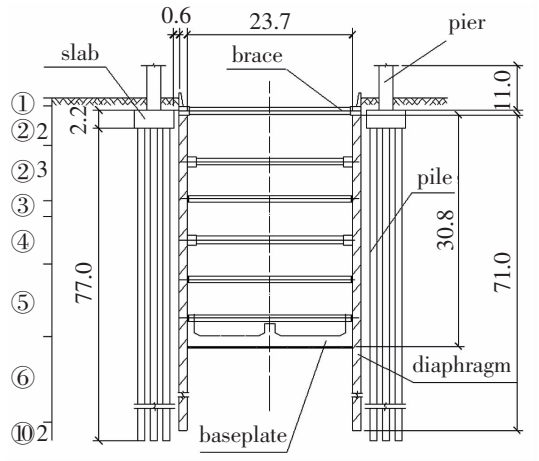


图1 高铁桥基与基坑断面示意图

Fig.1 Cross section of foundation pit and overpass bridge foundation

1.2 施工过程介绍

工程地质为深厚软土，为了保障开挖过程中基坑与高铁桥基的稳定性，在开挖过程中严格依照“时空效应”理论[4-6]。主要施工步骤分为以下三个阶段。

阶段1:基坑在纵向分为六层,每次开挖前都应该在对应位置及时设置支撑，待支撑达到设计强度85%以后,方可开挖基坑。基坑开挖过程中遵守“随挖随撑,严禁超挖”的原则,从上至下依次开挖。基坑开挖至基底后,应减少基底暴露时间,在清除完基底弃土后,尽早施作基坑底板,以保证基坑稳定性。

阶段2:待基坑开挖完成并施作底板后,进行高铁桥基施工。

阶段3:待高铁桥基施工完成后,进行基坑回筑与支撑的拆除工作。

2 施工数值模拟

2.1 计算理论

本文在施工模拟计算中,对深厚软土层采用了修正Mohr-Coulomb模型(MMC),该模型常用于淤泥软土或砂土的数值分析[7]。MMC模型中,土体的硬化可以分为两个部分:剪切硬化和压缩硬化。剪切硬化用于模拟主偏量加载产生的塑性应变,压缩硬化用于模拟各向同性加载中主压缩产生的塑性应变。

2.1.1 剪切硬化

MMC模型为双曲线模型，其屈服条件由剪切硬化和压缩硬化组成,其相应的剪切硬化屈服函数表达式如

$$f=\bar{f}-\gamma^{p} \tag{1}$$

式中$\bar{f}$是应力函数,表达式

$$\bar{f}=\frac{1}{E_{50}}\frac{q}{1-q/q_a}-\frac{2q}{E_{ur}} \tag{2}$$

式中:E_{50}为三轴压缩试验中的割线刚度;E_{ur}为卸载弹性模量;γ^{p}为塑性切应变函数,和式(2)相同,也由E_{50}和E_{ur}决定。

2.1.2 压缩硬化

上述剪切硬化不能解释土体在等向压缩过程中产生塑性体积应变这一现象,因此在剪切屈服面基础上引入压缩硬化椭圆屈服面来包围靠近水平轴向的弹性区域。压缩屈服函数(椭圆形)如

$$f^{c}=\frac{\bar{q}^{2}}{\alpha}-P^{2}-P_{p}^{2} \tag{3}$$

式中:α为相关的辅助参数,由正常固结下K_0决定;$\bar{q}$为偏应力的一种特殊应力测量，和土体的φ角有关;P为平均应力;P_p为先期固结压力,由切线刚度E_{oed}决定。

E_{50}、E_{ur}、E_{oed}由c、φ、m、E_{50}^{ref}、E_{ur}^{ref}、E_{oed}^{ref}决定，其中应力相关幂指数m软件中有推荐取值,本次计算中c、φ、E_S按场地土勘察地质资料取值,其他各模量按经验[8]取值如

$$E_{50}^{ref}=E_S,E_{oed}^{ref}=E_{50}^{ref},E_{ur}^{ref}=3E_{50}^{ref}$$

2.2 计算模型

本计算模型如图2示。模型结合了工程场地实际地质情况，土层采用修正摩尔库伦本构模型,土层参数按照地质勘测报告数据选取。用三维实体单元模拟土层,用板单元模拟地下连续墙,用结构单元模拟基坑桩基与支撑。

高架桥桥基施工模拟计算时,通过先后激活设置的桩基单元、承台单元和桥墩单元,根据其自重

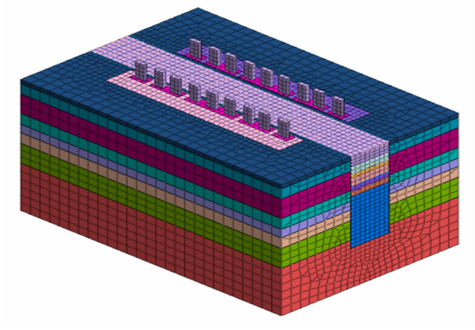


图 2　计算模型图

Fig.2　Calculation model

应力场变化来模拟高架桥整体桥基施工。

结合实际情况,边界条件的设置为:模型四周设置法向水平位移约束,底部设置 X、Y、Z 方向的位移约束,顶部边界为自由表面。

模型基坑宽为 23.7 m,深度为 30.8 m,土体选用实体单元进行模拟,计算模型沿 S2 基坑长度方向为 160 m,模型高度为 100 m,沿基坑宽度方向为 109.3 m。

2.3　计算工况模拟

数值模拟过程分为三个阶段,11 个工况。阶段 1 进行基坑开挖,共 7 个工况(S1~S7);阶段 2 进行高铁桥基,共 1 个工况(S8);阶段 3 进行基坑支撑拆除,共 3 个工况(S9~S11)。

工况 1(S1):施作第 1 道支撑,并开挖第 1 层土;

工况 2(S2):施作第 2 道支撑,并开挖第 2 层土;

工况 3(S3):施作第 3 道支撑,并开挖第 3 层土;

工况 4(S4):施作第 4 道支撑,并开挖第 4 层土;

工况 5(S5):施作第 5 道支撑,并开挖第 5 层土;

工况 6(S6):施作第 6 道支撑,并开挖第 6 层土;

工况 7(S7):施作基坑底板;

工况 8(S8):高铁桥基施工;

工况 9(S9):撤除第 5、第 6 两道内支撑,施做基坑中二板和第 3 层的内衬墙;

工况 10(S10):撤除第 4、第 3 两道内支撑,并施做第 2 层内衬墙以及中一板;

工况 11(S11):撤除第 2、第 1 两道内支撑,并施做第一层内衬墙以及基坑顶板。

3　计算结果分析

3.1　基坑开挖结果分析

3.1.1　基坑地表沉降变形

当基坑开挖完成后取垂直基坑纵向跨中截面处数值模拟结果,将采样点从工况 1 开挖至工况 7 地表沉降变化绘制成图 3 所示。

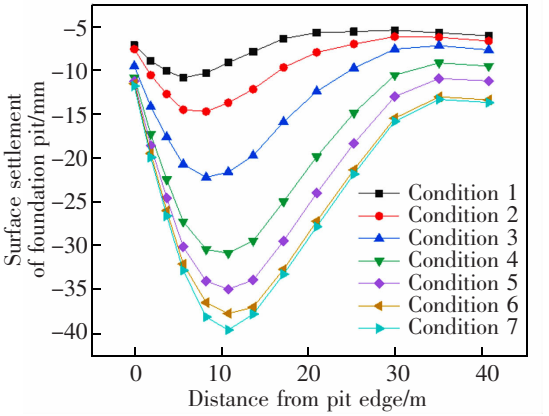


图 3　基坑跨中截面地表沉降图

Fig.3　Settlement of foundation-pit mid-span section

分析可知,基坑地表最大沉降出现在距离基坑大约 10 m 的位置。基坑开挖至坑底时,最大沉降为 37.65 mm。工况 2 沉降增幅为 50%,工况 3 增幅为 58%,工况 4 增幅为 43%,工况 5 增幅为 16%,工况 6 增幅为 3%,工况 7 增幅为 5%。当基坑开挖至工况 2~工况 4 区间时,地表沉降增加幅度较大,这是因为工况四之前土层主要为强度很低的淤泥,且土层性质变化较大,在施工时应注意监测。

3.1.2　地下连续墙侧向变形

取地连墙跨中断面为采样截面,按采样点结果将地下连续墙侧向变形绘制成图 4 所示。

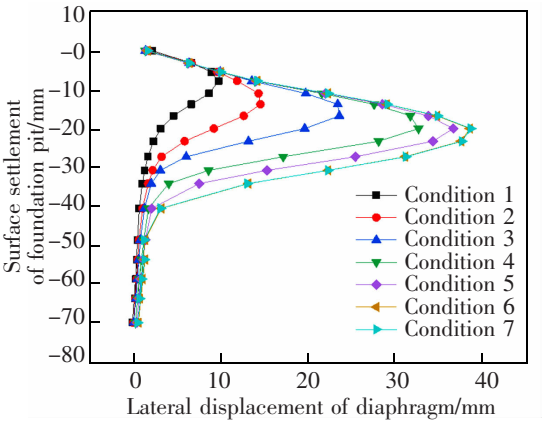


图 4　不同工况下地下连续墙侧向变形图

Fig.4　Graph of lateral deformation of diaphragm wall under different working conditions

分析可知,随着基坑开挖,地下连续墙的位移逐渐增大,且最大位移位置随基坑开挖深度增加而下移,最终最大位移大致出现深度为 25 m 处,距离

基坑底部约5.8 m,位移量为38.5 mm。说明超深基坑地下连续墙位移发生在基底以上一定距离处,与普通基坑地连墙最大位移发生在基底以下不同。这是因为上部土层性质要比基底以下土层性质差,已产生较大变形[9]。当基坑开挖至工况2~工况4区间时,地连墙侧向位移发展明显,在施工时应对相应位置做好加固措施,并定期监测。

3.2 高铁桥基施工影响分析

3.2.1 基坑地表沉降变形

基坑开挖完成并封底后,需要进行高铁桥基施工。高铁桥基施工前后基坑地表采样点位置处沉降数值模拟对比结果如图5所示。

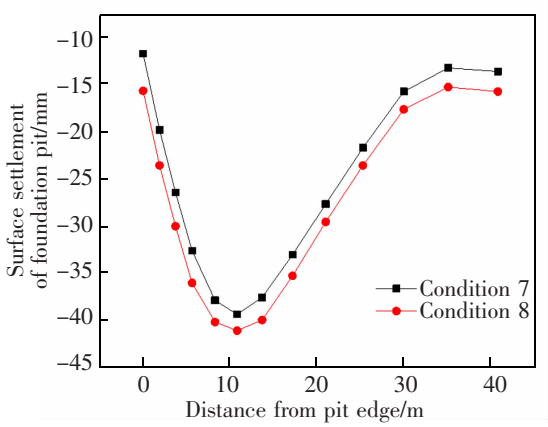


图5 桥基施工前后基坑地表沉降图

Fig.5 Surface settlement of foundation pit before and after bridge foundation construction

可以发现,基坑地表最大沉降为41.26 mm,距离基坑约10 m。相比高铁桥基施工之前,沉降增大3.61 mm,说明基坑围护结构效果较好。

3.2.2 地下连续墙侧向变形

桥基施工完成后,按采样点结果绘制地下连续墙位移如图6所示,发现桥基施工并未对地连墙侧移产生明显影响,峰值仅增大0.2 mm。

3.2.3 高铁桥墩变形

高铁桥基施工后,由图7所示的变形云图可知,承台外侧沉降比内侧大,这是因为深基坑开挖导致了周围土体的变形,使得距离基坑边缘10 m内,基坑地表沉降呈现出逐渐增大的趋势,10 m以外沉降开始减小。由于高铁桥基承台距离基坑边缘仅0.6 m,因此承台外侧距离基坑边缘距离较远,其沉降比承台内侧沉降大。在施工高铁桥基时,需注意周围土体变形,以减小承台的沉降差,同时需要注意土体沉降引起负摩擦力,从而加大桩身应力[10]。

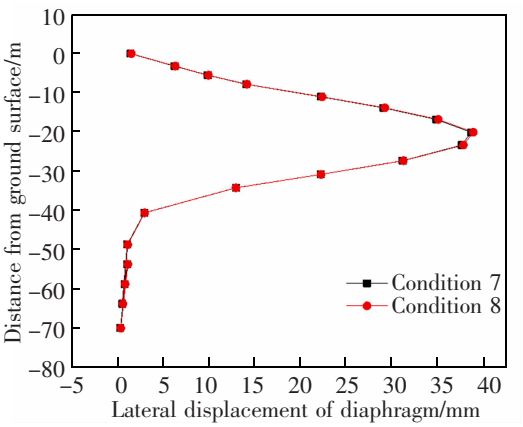


图6 桥基施工前后地连墙侧移图

Fig.6 Lateral deformation of diaphragm wall before and after bridge foundation construction

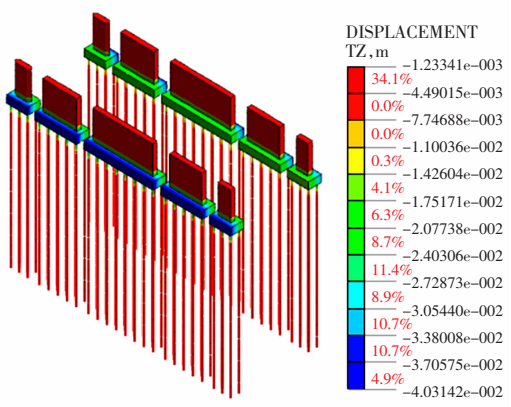


图7 高铁桥基竖向变形云图

Fig.7 Contour diagram of vertical deformation of high-speed railway bridge foundation

可以对桩基一定范围内土层,采用高压旋喷桩等措施进行加固,以减小桩基沉降[11]。

3.3 基坑支撑拆除变形分析

3.3.1 基坑变形

桥基施工完成后,基坑后期撤除内支撑,施做内衬墙和中隔板对基坑和高铁桥基变形也会产生影响。拆撑过程中的跨中截面基坑地表变形随施工推进变化趋势如图8所示。

由于地连墙的围护作用和边拆边回筑的车站中隔板的支撑作用,且数值模拟忽略了混凝土拆撑过程机械破除对结构的扰动,该阶段并未引起明显基坑变形。但现场混凝土支撑常需要绳锯切除和机械破除,有的支撑甚至需要爆破拆除,因此需要在支撑两端围檩靠近地下连续墙处设置好能量隔离孔,以减小爆破对地下连续墙的损害。

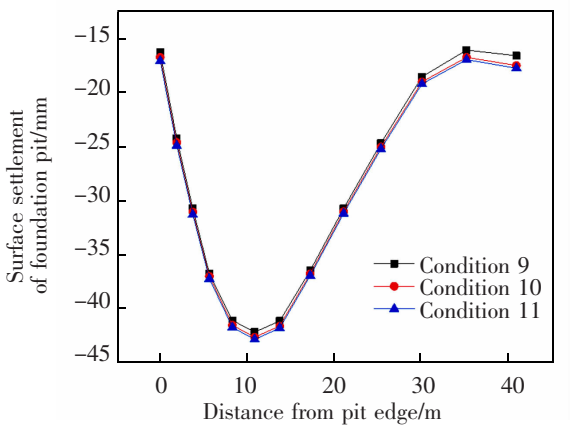


图 8　基坑拆撑回筑后基坑地表沉降

Fig.8　Surface settlement of the foundation pit after braces demolition of foundation pit

3.3.2　高铁桥墩变形

支撑拆除后高铁桥基变形云图如图 9 所示。承台外侧最大沉降为 4.1 mm。与拆撑之前相比,沉降有所增长。由拆撑完成后基坑地表变形和桥基承台沉降可知,拆撑和车站回筑会导致基坑和桥基沉降增加,但由于车站结构也具有一定支撑作用,变形增长主要是由于施工扰动引起,结构物整体变形量不明显,稳定性和安全性可以得到保证。

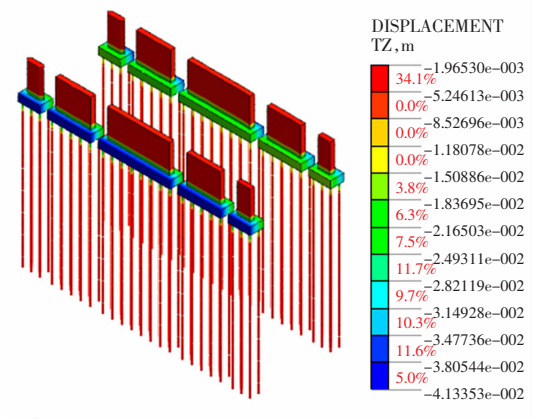


图 9　基坑拆撑回筑后高铁桥基沉降

Fig.9　Settlement of high-speed railway bridge foundation after braces demolition of foundation pit

4　现场实测结果分析

根据设计要求,现场测试断面在相应的位置用钻机钻孔,先开孔做钢管保护井(孔径 150 mm,深度 50 mm),再钻孔 130 mm,深 950 mm 的测孔,且必须破开结构性表层, 然后打入标准螺纹钢标志点,最后在测孔周边填满细砂石防止监测点左右摆动,并按照距离基坑 1,6,11,16,21 m 布置测点。

根据现场实测结果,整理得到基坑地表沉降现场实测与数值模拟结果对比如图 10 所示。

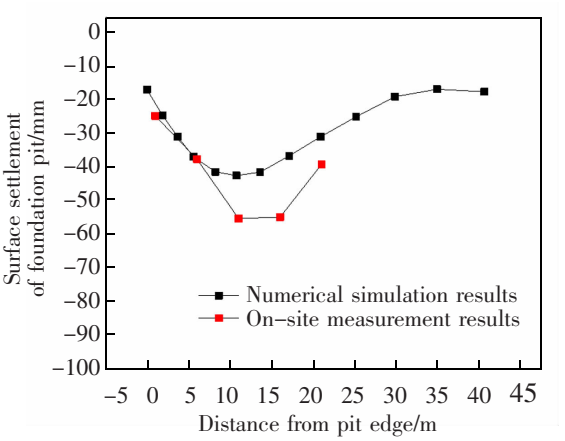


图 10　地表沉降与现场实测对比图

Fig.10　Comparison graph of surface settlement between on-site measurement and numerical calculation results

现场实测基坑地表最大沉降为 55.64 mm,相应数值模拟计算结果为 42.83 mm, 数值模拟结果比实测结果地表沉降小 23%左右,并且两者反映出相同的规律,即随着距基坑距离增大,地表沉降先增大后减小。实测结果略大是因为实际施工可能出现基坑超挖、基坑有一定暴露时间、支撑架设和开挖不是完全同步以及机具扰动等[12]。地表沉降最大处均发生在 10~15 m 内,说明了数值模拟的准确性。

地连墙的现场实测与数值模拟的对比结果如图 11 所示。在基坑开挖完成后, 地连墙最大侧移位于 25 m 深度左右。其中现场实测最大侧移 48.75 mm,数值模拟最大侧移为 39.4 mm,仅相差 19.1%。现场实测

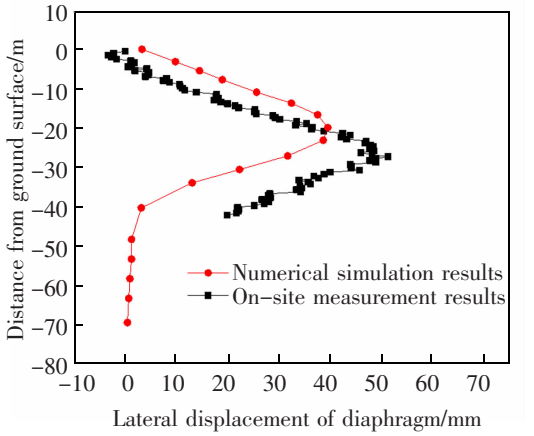


图 11　地连墙侧移现场实测与计算结果比图

Fig.11　Comparison graph of displacement for diaphragm wall lateral between on-site measurement and numerical calculation results

沉降比数值模拟结果更大,是实际施工过程中存在各种施工机具扰动导致。两者变化趋势与拐点深度接近,可见数值模型结果具有较强的真实性和准确性。

5 结论

1) 基坑开挖阶段, 基坑最大沉降发生在距离基坑边缘约0.4倍基坑宽度, 地表最大沉降为37.65 mm;地下连续墙最大位移出现在靠近基底上部,原因是基坑上部主要为黏土层,被动区土体性质很差,基坑内侧设有支撑,导致地下连续墙侧向位移峰值向下移动。

2) 在高架桥桥基施工后, 由于承台外侧基坑地表沉降处于发展阶段,导致其外侧沉降比承台内侧沉降大。为减小桥基和基坑施工之间的相互影响,可以对桥基周围土体进行加固,以减小邻近桥桩的内力。

3) 基坑回筑与支撑拆除阶段,基坑地表沉降和高铁桥基沉降影响很小。需制定好拆撑方案,边拆边回筑,减小基坑的暴露时间,避免支撑拆除导致相邻支撑轴力过大或损伤地下连续墙。

4) 基坑地表最大沉降计算值比实测值约小23%,地连墙侧移峰值计算值比实测值约小19.1%。这与实际开挖过程中基坑暴露时间、基坑排水以及机具扰动等因素有关; 两者反映出相同的变化规律,说明结果具有一定可靠性。

参考文献:

[1] 木林隆,黄茂松. 基于小应变特性的基坑开挖对邻近桩基影响分析方法[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):304-310.
MU L L,HUANG M S. Small-strain behavior-based method for effect of excavations on adjacent pile foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,36(S2):304-310.

[2] ZHANG X,XIAO J H,et al. Analysis of influenced zone of foundation pit excavation adjacent to bridge pile foundation using HS-Small constitutive model[J]. Rock and Soil Mechanics,2018(10):263-273.

[3] 胡军. 深基坑开挖对邻近既有高铁桩基影响研究[J]. 铁道工程,2017,34(6):12-17.
HU J. Research on the influence of excavation of deep foundation pit to adjacent existing high-speed railway bridge pile foundations stability[J]. Journal of Railway Engineering Society,2017,34(6):12-17.

[4] 刘燕,刘国彬,孙晓玲,等. 考虑时空效应的软土地区深基坑变形分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(z1):1433-1436.
LIU Y,LIU G B,SUN X L,et al. Analysis of deformation laws by using the rule of time-space effect in soft soil excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(S1):1433-1436.

[5] WANG R F,LUO L,PI J H. Study on time-space effect and earth berm of foundation pit[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2021,787(1).

[6] SUN L N,LIU Y,ZHANG M L. Analysis on Deformation of Foundation Excavation Considering of Time-Space Effect[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,2279 (291-294): 1135-1139.

[7] 宋广,宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取[J]. 工程力学,2014,31(5):86-94.
SONG G,SONG E X. Selection of soil constitutive models for numerical simulation of foundation pit excavation [J]. Engineerirg Mechanics,2014,31(5):86-94.

[8] 朱希祯. 有限土压力作用下的基坑悬臂桩支护结构性能分析[D]. 南昌:南昌大学,2019.
ZHU X Z. Analysis on performance of excavation cantilevel pile support struction under finite earth pressure [D]. Nanchang:Nanchang University,2019.

[9] 冯虎,刘国彬,张伟立. 上海地区超深基坑工程地下连续墙的变形特性[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(1): 151-156.
FENG H,LIU G B,ZHANG W L. Deformation properties of diaphragm walls associated with excavation of ultra-deep foundation pits in shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2010,6(1):151-156.

[10] 王翠,闫澍旺,张启斌. 深基坑开挖对邻近桥桩的影响机制及控制措施研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29 (Z1):2994-3000.
WANG C,YAN S W,ZHANG Q B. Study of influence of deep pit excavation on adjacent bridge foundation piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(Z1):2994-3000.

[11] 汪智慧. 深基坑开挖对既有混凝土桥梁桩基影响模拟分析[J]. 混凝土,2016(11):42-45.
WANG Z H. Analysis on concrete bridge piles due to adjacent excavation using finite element method[J]. Concrete, 2016(11):42-45.

[12] 叶俊能. 福明路站二期基坑动态开挖监测及数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(S1):1517-1526.
YE J N. Dynamic monitoring and numerical simulation of foundation excavation of second stage work for fuming road station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2012,8(S1):1517-1526.



第一作者:周超(1998—),男,硕士研究生, 研究方向为工程。E-mail:neonzhou@163.com。

(责任编辑:姜红贵)