

深浅式渐变间距地铁隧道双基坑变形特征研究*

Study on Deformation Characteristics of Deep and Shallow Gradual Distance Double Subway Foundation Pits

张发财¹, 邵 双², 卢 军¹, 赵 凯¹, 易明祥¹

(1. 北京市政路桥股份有限公司, 北京 100068;
2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了研究相邻地铁基坑开挖的变形特征, 以北京地铁 3 号线基坑工程为研究对象, 利用 Rocscience phase²有限元软件对基坑开挖及支护过程进行模拟, 并将模拟结果与现场监测数据进行对比分析, 探究开挖过程中不同基坑间距对地连墙水平位移、坑外及坑间地表沉降、坑底隆起的影响。研究结果表明: 地连墙水平位移近似为“凸肚”形和“弓”字形, 随着基坑间距的增大, 相邻基坑外侧地连墙水平位移逐渐减小, 内侧地连墙水平位移逐渐增大; 地表沉降整体呈“凹槽”形, 坑间地表沉降值随基坑间距的增大而减小, 受相邻基坑开挖叠加效应的影响, 坑间地表最大沉降值约为两侧的 1.2~1.5 倍; 坑底隆起表现为中间大、两边小的“帽”形, 且受基坑间距变化的影响较小。

关键词: 相邻基坑; 基坑间距; 变形特性; 数值模拟

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0051-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.010

ZHANG Facai¹, SHAO Shuang², LU Jun¹, ZHAO Kai¹, YI Mingxiang¹

(1. Beijing Municipal Road Bridge Holding (Group) Co., Ltd., Beijing 100068, China;
2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the deformation characteristics of the excavation of adjacent subway foundation pits, based on the foundation pit project of Beijing Metro Line 3, the study uses Rocscience phase² finite element software to simulate the excavation and support process of the foundation pit, compares simulation results with on-site monitoring dates and explores the effects of different foundation pit distance on horizontal displacements of the ground wall, the surface settlements outside and between the pits and the uplift of the pit bottom. The results show that the horizontal displacement of the ground connecting wall is approximately "convex belly type" and "bow type". With the increase of the pit spacing, the horizontal displacement of the lateral ground connecting wall decreases gradually, and the horizontal displacement of the inner ground connecting wall increases gradually. The overall surface settlement is "groove type", and the surface settlement value between pits decreases with the increase of pit spacing. Affected by the superposition effect of adjacent pit excavation, the maximum surface settlement value between pits is about 1.2~1.5 times that of both sides. The uplift of pit bottom is a "cap shape" with large center and small sides, and is less affected by the change of pit spacing.

Keywords: adjacent foundation pits; pit spacing; deformation characteristics; numerical simulation

* 基金项目: 北京市自然科学基金面上项目 (8202033)。

作者简介: 张发财 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 城市地下工程施工及研究。

通信作者: 邵双 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩土工程。

收稿日期: 2023-07-29

0 引言

随着我国城市化进程的飞速发展，城市地下空间的开发利用不断加快，基坑工程也越来越趋向于复杂化，有时甚至会出现两个甚至多个基坑同时施工的情况。相邻基坑土体开挖卸荷，对基坑支护结构位移、周围土体变形和坑底隆起都会产生很大影响。

然而，现有研究大多是针对单基坑的施工情况，对相邻基坑施工引起变形特征的研究并不多见。陈东杰^[1]对上海典型软土条件下相邻基坑同时开挖时的变形特征展开研究，得出相邻基坑距离的远近对围护结构变形的影响为“近大远小”的结论；郭力群等^[2]使用 Z-Soil 软件对不同间距的相邻基坑进行数值分析，提出当基坑间距小于等于 4 倍基坑开挖深度时，相邻基坑与支护结构的变形受彼此的影响较为明显；丁智等^[3]对杭州排桩加内支撑支护形式的相邻基坑进行了实测分析，发现深层土体水平位移总体呈现出“中间大、两端小”的变化趋势；张睿华^[4]认为相邻基坑先后开挖时，后开挖基坑会向先开挖基坑有一个整体运动的趋势，对于远离已开挖基坑的边坡，其土体与支护结构的位移会增加；吴国荣^[5]对广州某相邻基坑工程监测数据进行分析，得到了支护体系及基坑变形的特点；王卫东等^[6]结合工程实例，分析了相邻基坑的开挖顺序和基坑间距对基坑支护结构变位特征的影响。

文章阐述以北京地铁 3 号线基坑为例，建立考虑硬化土模型的有限元模型，研究相邻基坑开挖时地连墙水平位移、基坑周边土体沉降和坑底隆起的变化规律，为类似工程提供理论支撑和施工指导。

1 工程概况

1.1 工程背景

北京地铁 3 号线分为双线段和四线段两部分，其中双线段长 811 m，四线段长 608 m，总长 1419 m。四线段由双基坑组成，分为 A 基坑和 B 基坑，两基坑最远间距为 25 m，均采用明挖法施工。A 基坑宽 26~40 m、深 15.2~23.6 m，地连墙厚 800 mm，基坑竖向设 3 道钢支撑，直径为 800 mm，钢管壁厚为 20 mm，坑内设 1 排格构柱，格构柱基础采用钻孔灌注桩，直径为 1000 mm，长 8 m，格构柱插入深度 3 m；B 基坑宽 6.3 m、深 11.8~12.6 m，地连墙厚

600 mm，基坑竖向设 2 道钢支撑，直径为 609 mm，钢管壁厚为 16 mm。图 1 为 A、B 基坑典型剖面图。

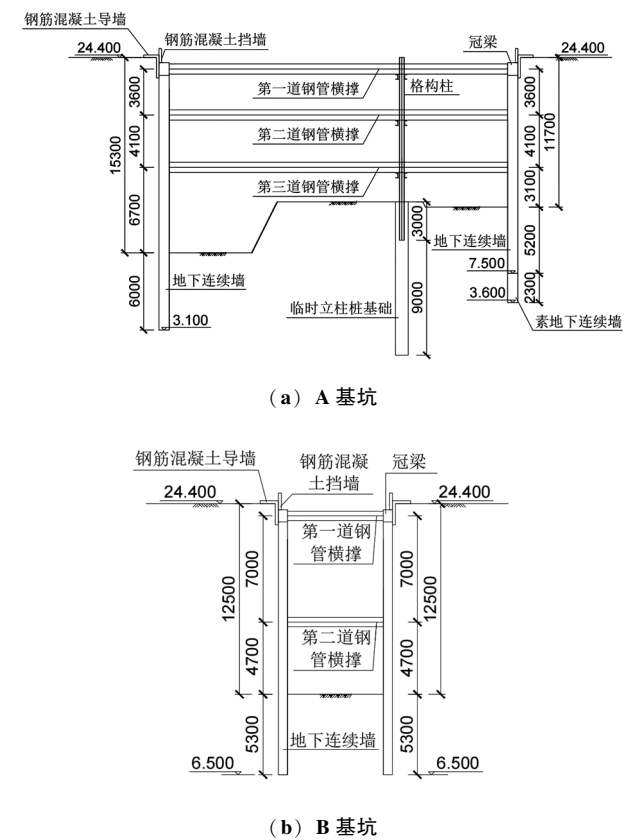


图 1 基坑典型剖面图
Fig. 1 Typical cross-sectional view of the foundation pit

1.2 工程地质条件

工程位于北京平原区，第四纪覆盖层厚度约 400 m，主要为黏性土、粉土与砂土、卵砾石交互的沉积层。基坑开挖范围内的土层主要包括素填土、粉质黏土、砂质粉土、黏质粉土和细砂，其中③层和⑤层以粉质黏土为主夹杂砂质粉土和黏质粉土，土层压缩模量小，压缩性大，属于中~高压缩性土；④层以细砂为主夹杂粉砂和中砂，土性良好，土层密实，属于低压缩性土。土层主要物理力学参数见表 1。

表 1 场地土层物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers in the site

土层编号	土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 E_s/MPa
① ₁	素填土	19.8	10	10.0	15.6
③	粉质黏土	19.5	28	9.3	27.4
③ ₁	砂质粉土	19.5	20	25.1	18.3
④	细砂	20.0	0	30.0	32.4
⑤ ₁	黏质粉土	20.7	19	26.6	33.1

2 基坑监测布置

为了进一步了解相邻基坑施工的相互影响，设置地连墙水平位移监测 ZQT、地表沉降监测 DBC 等。典型基坑断面监测点布置情况如图 2 所示。

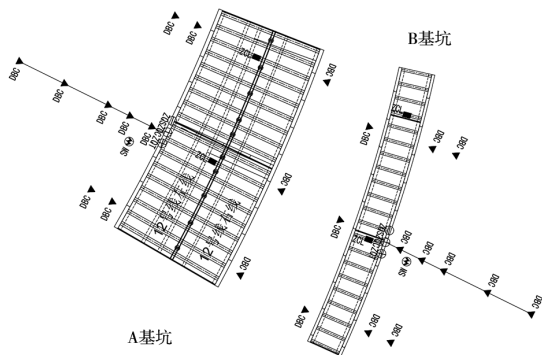


图 2 监测点平面布置图
Fig. 2 Floor plan of the monitoring points

3 数值模拟

采用 Rocscience phase²有限元分析软件建立基坑典型二维断面数值模型，如图 3 所示。根据基坑开挖影响区域的划分^[7-8]，为减小模型边界对计算结果的影响，在平面上取基坑边缘到模型边界的 4 倍距离开挖边界；在深度上取基坑坑底到模型底部的超过 3 倍距离为开挖深度。模型长 160 m，宽 70 m，相邻基坑间距为 0~25 m。模型两侧边界均为法向约束，底部为全约束（法向和切向约束），上部为自由边界。

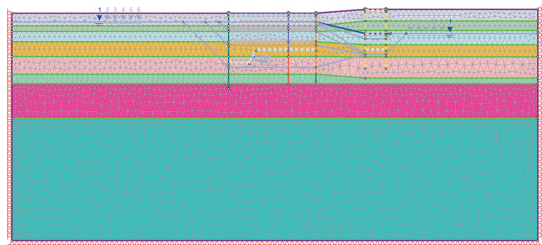


图 3 基坑典型剖面数值模型
Fig. 3 Numerical model of typical profile of the foundation pit

基坑地下连续墙和钢管支撑采用梁单元模拟，锚杆采用锚杆单元模拟，锚杆位于 A 基坑坑底斜坡三分点处。地下连续墙弹性模量为 30 GPa，钢管支撑弹性模量为 206 GPa，锚杆弹性模量为 30 GPa，均为线弹性材料。模型采用 Mohr-Coulomb 本构模型进行计算分析。模拟计算工序与现场施工工序一致，采用先小后大的施工顺序，计算工况见表 2。

表 2 开挖工况
Table 2 Excavation conditions

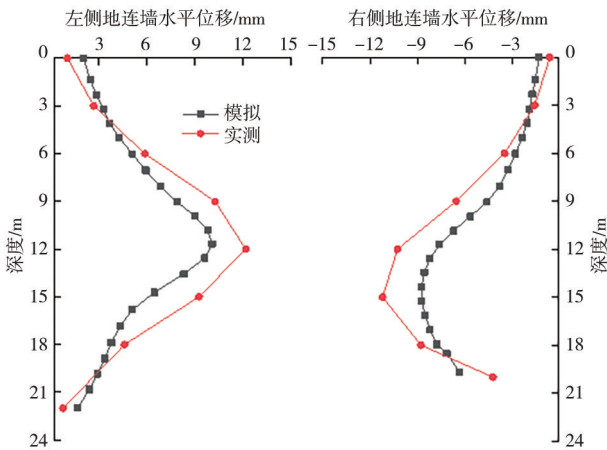
工况	内容	开挖深度/m
1	施作基坑排水措施及导墙、地连墙和格构柱	
2	B 基坑开挖至第一道支撑下 0.5 m，架设第一道钢支撑	1.3
3	B 基坑开挖至第二道支撑下 0.5 m，架设第二道钢支撑	8.3
4	B 基坑开挖至基坑底	12.6
5	A 基坑开挖至第一道支撑下 0.5 m，架设第一道钢支撑	1.4
6	A 基坑开挖至第二道支撑下 0.5 m，架设第二道钢支撑	5.0
7	A 基坑开挖至第三道支撑下 0.5 m，架设第三道钢支撑	9.1
8	A 基坑开挖至基坑底	15.3

4 数值模拟结果与现场实测值对比

以基坑间距 15 m 为例，对地连墙水平位移和基坑地表沉降的模拟结果与实测值进行对比分析。

4.1 地连墙水平位移分析

图 4 为地连墙水平位移模拟结果与实测值的对比，从图中可以看出模拟结果与实测值较为吻合，两者趋势基本相同，符合多道支护下地连墙水平变化规律。A 基坑地连墙最终位移形态为“凸肚”形，实测值比模拟结果稍大一些，左右两侧地连墙最大水平位移模拟结果与实测值分别相差 2.3 和 2.4 mm。B 基坑地连墙最终位移形态为弓字形，模拟结果稍小于实测值，整体相差大约 1.5 mm 左右。造成实测结果大于模拟值的主要原因是现场施工具有滞后性，基坑内土方开挖完成后钢支撑的架设无法第一时间完成，在施工过程中地连墙会有少量位移产生。



(a) A 基坑

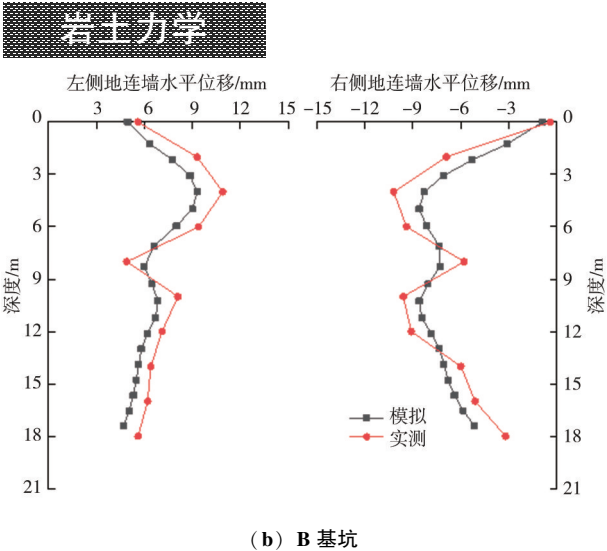


图 4 地连墙水平位移模拟结果与实测值
Fig. 4 Simulation results and measured values of horizontal displacement of ground-connected walls

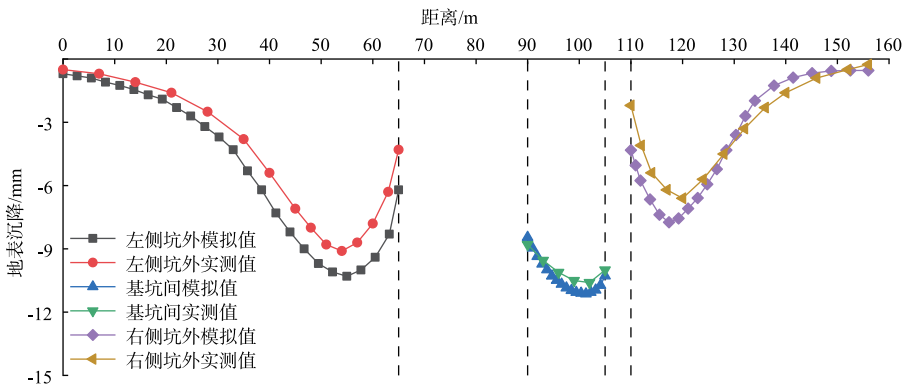


图 5 相邻基坑地表沉降模拟结果与实测值
Fig. 5 Simulation results and measured values of surface settlement of adjacent foundation pits

5 相邻基坑不同间距开挖性状分析

相邻基坑开挖，对地连墙水平位移、基坑间土体沉降、坑底隆起均产生较大影响，基坑间距大小将决定影响的强弱。分别取基坑间距为 5、10、15、20 和 25 m 研究基坑间距对开挖性状的影响。

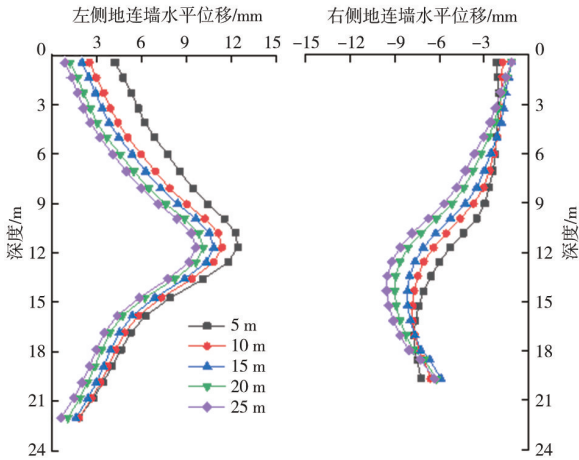
5.1 对地连墙水平位移的影响

图 6 为不同间距地连墙水平位移曲线，图中可以看出在不同基坑间距下开挖对相邻基坑的影响有着显著差异。随着基坑间距的增大，A 基坑左侧地连墙整体水平位移在逐渐减小，右侧地连墙顶端和底端水平位移在逐渐减小，而中间在逐渐增大，两侧地连墙最大水平位移出现在 $0.9H \sim 1.0H$ 处 (H 为基坑开挖深度)，墙顶和墙底水平位移相对较小，整体呈现“凸肚”形。B 基坑两侧地连墙水平位移随基坑

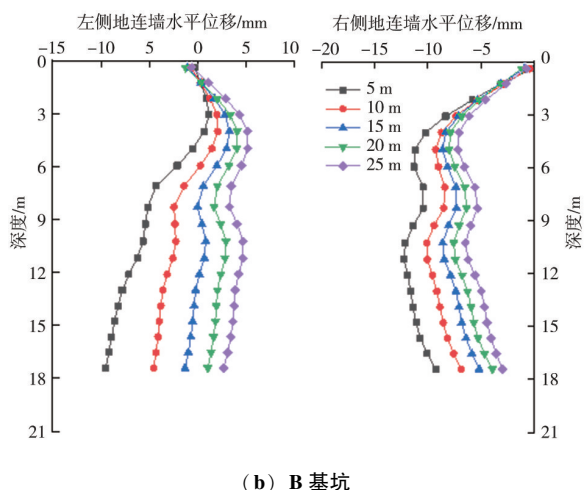
4.2 地表沉降分析

图 5 为 A 基坑左侧地表、基坑间地表和 B 基坑右侧地表沉降模拟与实测曲线。由图中可知，模拟结果与实测值整体趋势基本一致，实测值要比模拟结果稍小一些。左侧地表实测最大沉降为 9.1 mm，比模拟结果 10.3 mm 小 1.2 mm；基坑间地表实测最大沉降为 10.6 mm，比模拟结果 11.1 mm 小 0.5 mm；右侧地表实测最大沉降为 6.6 mm，比模拟结果 7.8 mm 小 1.1 mm。地表沉降整体呈凹槽形，基坑间地表最大沉降值约为 A 基坑左侧地表最大沉降值的 1.2 倍，约为 B 基坑右侧地表最大沉降值的 1.5 倍，这主要是由于相邻基坑开挖时会对基坑间土体沉降产生叠加影响，导致基坑间地表的沉降大于基坑两侧地面沉降。

间距的增大而减小，左侧地连墙逐渐由向坑外的水平位移转为向坑内，两侧地连墙水平位移均有两个



(a) A 基坑

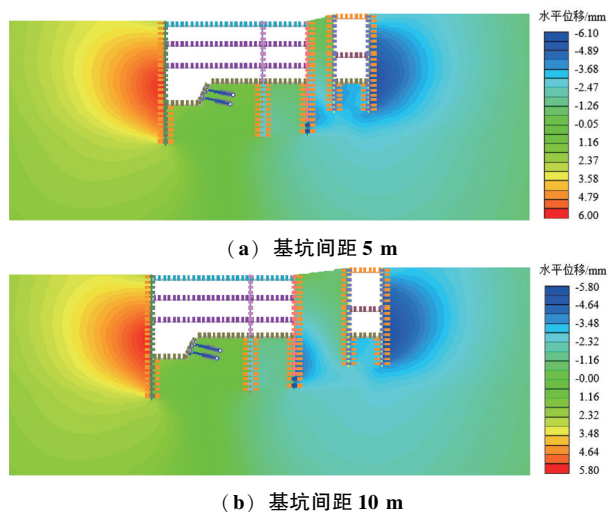


(b) B 基坑
图 6 不同间距地连墙水平位移曲线
Fig. 6 Horizontal displacement curve of connected walls at different distance

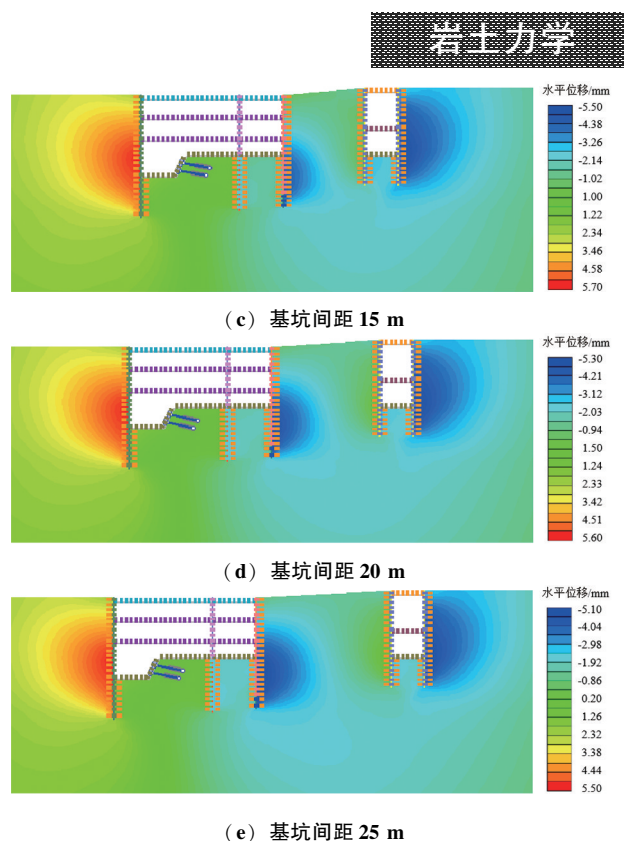
峰值, 顶端、中间和底端水平位移相对较小, 整体呈现“弓”字形。此外, 地连墙顶端水平位移变化幅度远小于底端, 顶端水平位移几乎不随基坑间距的变化而变化, 而底端水平位移在逐渐减小。

5.2 对基坑土体水平位移的影响

图 7 为不同间距基坑水平位移云图, 图中可以看出随着基坑间距的增大, A 基坑右侧地连墙和 B 基坑左侧地连墙逐渐受到基坑间土体的挤压, 开始向坑内移动, 且水平位移主要集中在地连墙中下部。同时, 基坑土体最大水平位移主要集中在相邻基坑的外侧, 这是因为坑内土方开挖卸荷, 坑外土体在主动土压力的作用下逐渐向坑内移动, 不断挤压地连墙造成的。此外, 受到基坑间土体位移的影响, 基坑右侧深层土体水平位移范围也在逐步扩大。



(a) 基坑间距 5 m
(b) 基坑间距 10 m



(c) 基坑间距 15 m
(d) 基坑间距 20 m
(e) 基坑间距 25 m

图 7 不同间距基坑土体水平位移云图
Fig. 7 Horizontal displacement cloud diagram of soil in different distance foundation pits

5.3 对基坑间地表沉降的影响

图 8 为不同间距基坑间地表沉降曲线, 将基坑间距进行归一化处理。由图可知基坑间地表沉降随基坑间距的增大而减小, 最大沉降位置逐渐右移: 间距为 5 m 时, 最大沉降位置位于 0.67 倍基坑间距处; 间距为 15 m 时, 最大沉降位置位于 0.75 倍基坑间距处; 间距为 25 m 时, 最大沉降位置位于 0.78 倍基坑间距处。由此可以得出, 基坑间距增大, 相邻基坑叠加影响减小, 最大沉降将移向宽度较小的基坑。

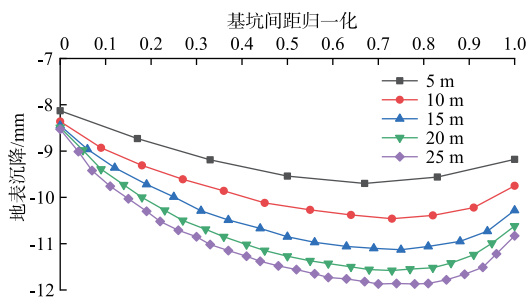
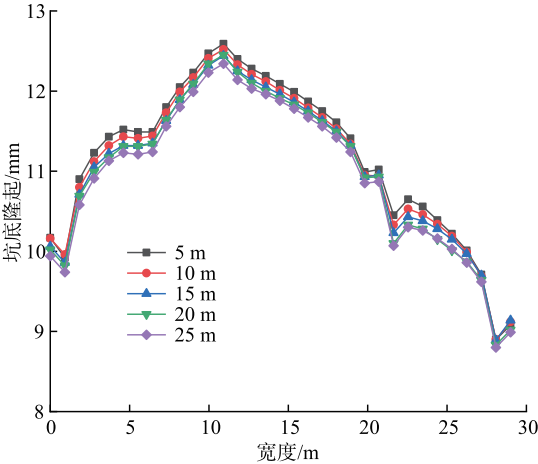


图 8 不同间距基坑间地表沉降曲线
Fig. 8 Surface settlement curves between foundation pits with different distance

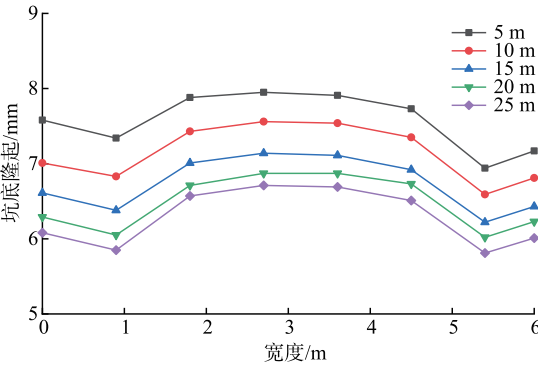
岩土力学

5.4 对坑底隆起的影响

图 9 为不同间距坑底隆起曲线。由图可以看出，坑底隆起随基坑间距的增大而减小，基坑间距的变化对相邻两基坑的影响非常小，坑底隆起幅度几乎没有太大变化，A 基坑隆起形状呈山峦形，有两小一大三个峰值，最大峰值出现在中间偏左的位置，为 12.6 mm；B 基坑隆起呈帽形，最大隆起在中间位置，为 8.0 mm。



(a) A 基坑



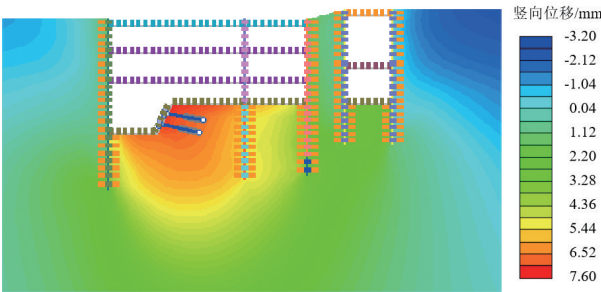
(b) B 基坑

图 9 不同间距坑底隆起曲线
Fig. 9 Bottom uplift curve of pits with different distance

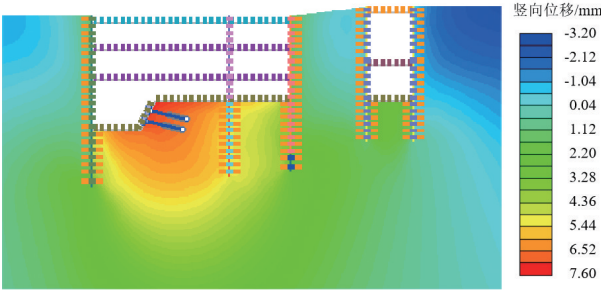
5.5 对基坑土体竖向位移的影响

图 10 为双基坑典型剖面竖向位移云图。由图可以看出，随着基坑间距的增大，相邻基坑间土体沉降在逐渐变大，最大沉降出现在中间偏右靠近 B 基坑的位置，这主要是因为先开挖基坑会向后开挖基坑有一个整体运动的趋势，基坑间距的增大会使得这种趋势越发明显。此外，基坑最大竖向位移主

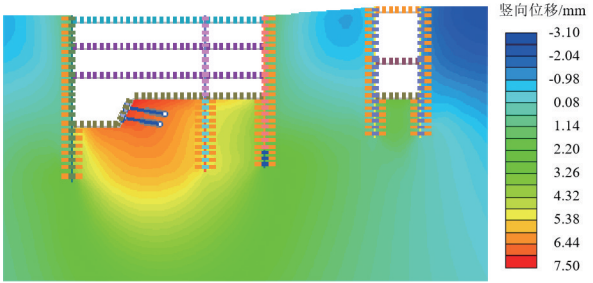
要集中在 A 基坑底部阶梯状顶端，这是由于坑内土体开挖卸荷，坑外土体在主动土压力下不断挤压坑内土体，而基坑底部的整体刚度又相对较小，在土压力作用下呈现出隆起的趋势。



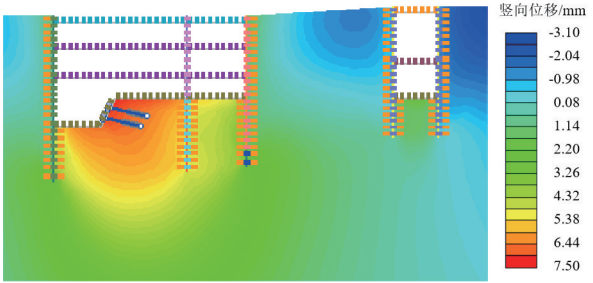
(a) 基坑间距 5 m



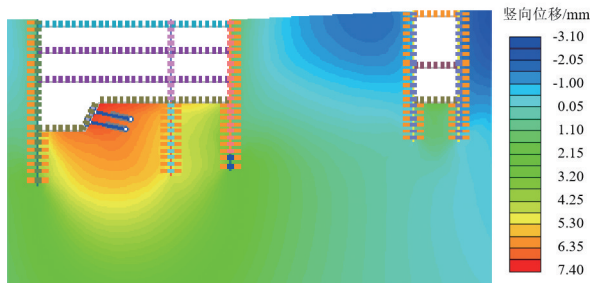
(b) 基坑间距 10 m



(c) 基坑间距 15 m



(d) 基坑间距 20 m



(e) 基坑间距 25 m

图 10 不同间距基坑竖向位移云图

Fig. 10 Vertical displacement cloud diagram of different distance foundation pits

6 结论

以北京地铁 3 号线八字线段基坑工程为依托, 对不同间距下相邻基坑的开挖情况进行数值模拟, 并结合模拟结果与现场监测数据进行探讨分析, 得出以下结论与建议:

(1) 在相邻基坑开挖过程中, 地连墙水平位移近似为“凸肚”形和“弓”字形。随着基坑间距的增大, 相邻基坑外侧地连墙水平位移逐渐减小, 内侧地连墙水平位移逐渐增大。

(2) 相邻基坑开挖, 基坑两侧地表沉降呈“凹槽”形, 坑间地表沉降受叠加效应的影响, 沉降量大于基坑两侧, 最大沉降值约为两侧的 1.2~1.5 倍, 且最大沉降位置随着基坑间距的增大由中间向宽度较小的基坑一侧移动。

(3) 坑底隆起整体表现为中间大、两边小的“帽”形, 且基坑间距的变化对坑底隆起的影响相对较小。

(4) 基坑两侧土体随着坑内土方的开挖卸荷, 稳定性不断降低, 在主动土压力的作用下, 逐渐出现向基坑内移动的趋势, 在一定程度上加大了坑外

地表沉降和坑底隆起。

参 考 文 献

- [1] 陈东杰. 上海铁路南站相邻基坑施工技术研究 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [2] 郭力群, 程玉果, 陈亚军. 不同间距下相邻基坑相互影响数值分析 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2014, 35 (1): 92-96.
- [3] 丁智, 王金艳, 周勇, 等. 邻近基坑同步施工相互影响实测分析 [J]. 土木工程学报, 2015, 48 (增刊 2): 124-130.
- [4] 张睿华. 深大基坑内相邻基坑施工时的相互影响分析 [J]. 建筑施工, 2008 (10): 869-871.
- [5] 吴国荣. 相邻基坑开挖对基坑变形影响的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2010.
- [6] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (11): 1659-1666.
- [7] YONG T, BIN W. Observed behaviors of a long and deep excavation constructed by cut-and-cover technique in shanghai soft clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138 (1): 69-88.
- [8] 叶建峰, 林海, 颜桂云. 相邻双基坑开挖相互影响二维性状分析 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2017, 45 (2): 190-198.
- [9] 李方明, 陈国兴, 刘雪珠. 悬挂式帷幕地铁深基坑变形特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (12): 2182-2190.
- [10] 林楠, 刘发前. 填海区邻近基坑开挖施工相互影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15 (增刊 1): 278-285.
- [11] 戴斌, 胡耘, 王惠生. 上海地区相邻基坑同步开挖影响分析与实践 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (增刊 2): 129-132.
- [12] 李航, 廖少明, 汤永净, 等. 软土地层中分隔型基坑变形特性及应力路径 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (8): 1116-1127.