文章编号:1005-0523(2023)04-0048-08

不同开挖顺序对基坑围护结构变形影响分析

徐 松[1,2],童立红[1,2],丁海滨[1,2],徐长节[1,2],吴智龙[3]

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室,江西 南昌 330013;2. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013;3. 深圳市工勘岩土集团有限公司,广东 深圳 518063)

摘要:基坑开挖顺序对围护结构的变形影响较为明显。结合杭州某地铁车站基坑工程项目,基于考虑土体小应变特性的硬化模型,采用三维有限元软件(PLAXIS 3D)进行了数值模拟,详细分析了施工过程中不同基坑开挖工况对围护结构变形、支撑轴力、地表沉降等变化的影响。结果表明:同一基坑的围护结构左右两侧变形差异显著,分析时不能简单将土层视为水平均布土层,需对变形较大的一侧土体减少基坑堆载,尽可能将荷载分布在围护结构变形较小一侧;地连墙水平位移、地表沉降均随基坑开挖及车站的建造逐渐增大;地连墙变形受基坑开挖顺序的影响较为显著,从中间往两侧开挖对地连墙的变形影响最小,仅为18.35 mm,相较于原工况减少约25%,对工程产生最有利的影响。

关键词:基坑;开挖顺序;小应变硬化模型;围护结构

中图分类号:[U25];TU121 **文献标志码**:A

本文引用格式:徐松,童立红,丁海滨,等. 不同开挖顺序对基坑围护结构变形影响分析[J]. 华东交通大学学报,2023,40(4):48-55.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20230213.001

Analysis on the Impact of Different Excavation Sequences on the Deformation of Retaining Structure of Foundation Pit

Xu Song[1,2], Tong Lihong[1,2], Ding Haibin[1,2], Xu Changjie[1,2], Wu Zhilong[3]

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Shenzhen GongKan Geotechnical Group Co., Ltd., Shenzhen 518063, China)

Abstract: The foundation pit excavation has a significant impact on the deformation of retaining structure. PLAXIS 3D is utilized for numerical simulation in this paper based on the hardening model considering the small strain characteristics of the soil, combining the foundation pit project of a subway station in Hangzhou. The influences of different excavation conditions on the deformation, axial force and surface settlement during construction are analyzed in details. Results show that there is a significant deformation difference between the left and right sides of the retaining structure of the same foundation pit. The soil layer cannot be simply regarded as horizontally distributed soil layer during the process of analysis. The pile load of the soil on the side with large deformation should be reduced, as well as the load should be distributed on the side with small deformation of the retaining structure as far as possible. Meanwhile, the horizontal displacement, surface settlement, and deformation increase gradually with the foundation pit excavation and station construction. In addition, the deformation of the diaphragm wall is significantly affected by the excavation sequence of the foundation pit. The excava-

收稿日期:2022-12-06

基金项目:国家自然科学基金-高铁联合基金项目(U1934208);国家自然科学基金项目(52238009, 52278350, 52168049, 52208344);江西省自然科学基金项目(20224BAB214068)

tion from the middle to both sides has the smallest influence on the deformation of the retaining structure, only 18.35 mm, which is about 25% less than the original condition, and has the most favorable influence on the project.

Key words: foundation pit; excavation sequence; HSS model; retaining structure

Citation format: XU S, TONG L H, DING H B, et al. Analysis on the impact of different excavation sequences on the deformation of retaining structure of foundation pit[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(4): 48–55.

伴随城市化的不断推进，城市用地日益紧张，大力开发利用地下空间[1-5]及建造轨道交通[6-12]成为城市可持续发展的必然趋势。然而，诸多理论研究及工程实践发现，城市中的基坑作业对周边建筑物及城市地下管线带来十分不利影响。郑刚[13]从基坑施工全过程控制的视角，分析了基坑施工全过程各阶段的变形特征、机理以及对环境的影响。刘波等[14]针对隧道位于基坑外侧和下方两种方位，分别从基坑开挖对既有隧道的影响机制、基坑开挖引起隧道变形的影响区、隧道受基坑开挖影响变形预测方法以及基坑开挖对隧道影响控制方法 4 个方面总结了当前最新研究成果。郭延辉等[15-17]通过研究基坑开挖对周边既有隧道及管线的影响，发现基坑开挖对周边环境的影响较为显著。朱国权等[18]利用 PLAXIS 数值软件分析了基坑分坑、分块开挖顺序对隧道变形的影响。结果表明：邻近轨道交通的基坑开挖时，应先远坑后近坑，先小坑后大坑，并采取跳挖的施工顺序。时春震等[19]分析了临近地铁深基坑开挖的特点及难点，并根据自身特点提出了相应的解决措施，最终利用一种“分区分层分段限时对称均衡”的开挖顺序解决了临近地铁的深基坑开挖的难题。鲁泰山等[20]采用有限元模拟方法研究了不同开挖深度下坑底中心土体扰动度分布规律及强扰动区深度，结果表明，扰动会显著增加地基沉降量，考虑土体扰动的地基沉降量与不考虑土体扰动的地基沉降量比值将从 1.43 增加至 2.24。

以上研究均为对基坑的分区、分段开挖顺序进行研究，而对基坑的不同开挖方向和开挖量对围护结构的影响研究较少。传统的基坑数值分析分层一次性开挖，忽略了不同开挖方向和开挖量的影响，不能得到基坑的整体工作性状。

本文以杭州某地铁车站基坑工程项目为依托，采用三维有限元软件(PLAXIS 3D)，数值模拟并分析基坑开挖时的地连墙水平位移、地表沉降的变化，进而得出对应的结论。并在前人研究的基础上，通过对基坑开挖顺序进行研究：从左往右开挖、从中间往两侧开挖及从两侧往中间开挖，分析不同开挖顺序对围护结构的变形影响，可为工程设计及施工提供参考。

1　工程概况

拟建车站为地下两层岛式车站，其中地下一层为站厅层，地下二层为站台层，站台宽度为 12.6 m。标准段基坑宽度为 21.7 m，深度约 17.9 m，小里程端头井宽 25.8 m，深度约 19.4 m，大里程端头井宽 25.8 m，深度约 18.3 m。车站主体围护墙厚达 800 mm，地连墙墙趾进入中风化岩层，平均嵌岩厚度接近 2.0 m，深度范围 24.5~35 m。立柱桩径为 0.9 m，混凝土支撑截面尺寸为 800 mm×800 mm，第 2、3 道钢支撑采用 ø800×16 mm，第四道钢支撑采用 ø609×16 mm。车站支护横断面图如图 1 所示。

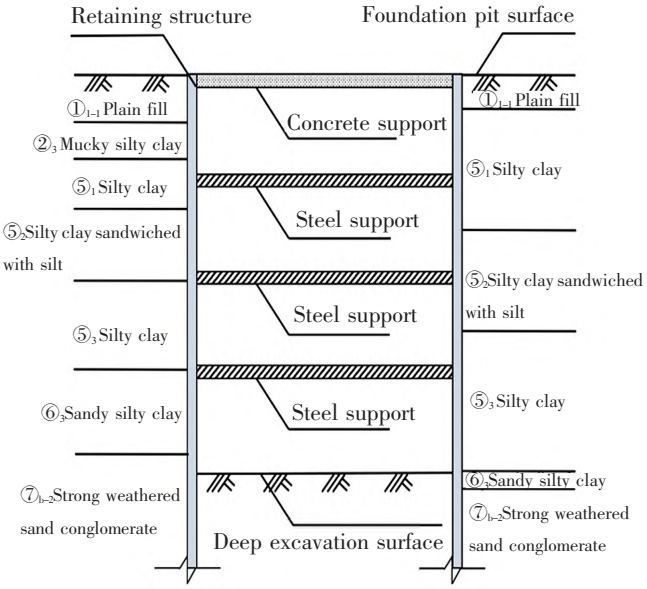

图 1　车站断面及地层分布示意图

Fig.1　Station section and stratum distribution diagram

拟建车站地貌单元属于冲洪积和冲海积平原,地貌形态较简单,车站场地范围内无河流、湖泊、水塘分布,地表水不发育。拟建场地水文地质单元属平原区水文地质单元,地下水位约在地表以下 1.5~2.5 m 处。

2 模型参数选取

采用三维有限元软件(PLAXIS 3D)建立数值计算模型分析该地铁车站标准段(42~54 轴)施工过程中围护结构变形、支撑轴力、地表沉降变形等的变化。

在实际数值模拟过程中,立柱桩选取嵌入式梁单元,地连墙选择板单元,混凝土支撑则选用梁单元,钢支撑选取点对点锚杆单元,结构与土体接触选择界面单元。综合工程场地因素,并考虑基坑开挖影响范围(约 2~3 倍的基坑开挖深度),为消除边界条件影响,模型尺寸取 117 m×130 m×84.6 m(x×y×z,x、y、z 分别代表地铁车站平行、横向垂直及竖向垂直行车方向)。同时,空间四面体 10 节点单元被选来划分模型网格,数值模拟图具体如图 2 所示。土体应力-应变的本构理论采用考虑土体小应变特性的硬化模型(HS-Small Model)进行模拟,其余部件(如地连墙、立柱桩、支撑等)采用线弹性本构模型进行模拟。表 1 为本构模型参数选取结果,表 2 为不同有限元分析工况。

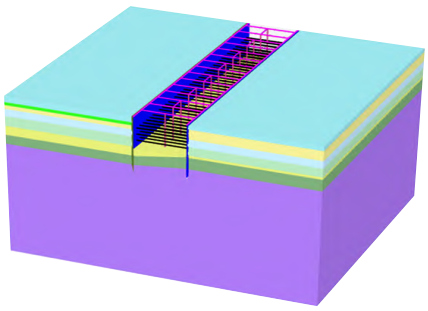

图 2 有限元模型图

Fig.2 Finite element model diagram

表 1 土体本构模型参数

Tab.1 Soil constitutive model parameters

Soil layer	γ/(kN/m^3)	c'/kPa	φ'/(°)	E_{50}/MPa	E_{oed}/MPa	E_{ur}/MPa	G_0/MPa
①$_{1\text{-}1}$ Plain fill	17.5	8	15.1	7.0	7.0	28.0	56.0
②$_3$ Mucky silty clay	17.8	6	13.7	4.1	4.1	41.5	83.1
⑤$_1$ Silty clay	19.5	5	10.5	7.9	7.9	55.6	111.2
⑤$_2$ Silty clay sandwiched with silt	19.1	8	14.3	6.0	6.0	30.1	60.3
⑤$_3$ Silty clay	19.5	10	17.8	8.2	8.2	57.4	114.7
⑥$_3$ Sandy silty clay	19.4	8	16.4	6.5	6.5	38.7	77.5
⑦$_{b\text{-}2}$ Strong weathered sand conglomerate	21.0	90	25.0	40.0	40.0	120.0	240.0

表 2 有限元分析工况

Tab.2 Finite element analysis of working conditions

Working conditions	Notes
Phase 0	Equilibrium ground stress field
Phase 1	Ground wall and column pile construction
Phase 2	The first support construction (displacement zeroing)
Phase 3	Excavate to the bottom of the second support
Phase 4	The second support construction
Phase 5	Excavate to the bottom of the third support
Phase 6	The third support construction
Phase 7	Excavate to the bottom of the fourth support
Phase 8	The fourth support construction
Phase 9	Excavate to the bottom of the foundation pit
Phase 10	Construction of bottom plate
Phase 11	Remove the third and fourth supports
Phase 12	Construction of side wall and middle plate
Phase 13	Remove the second support
Phase 14	Roof construction
Phase 15	Remove the first support
Phase 16	Return to fill soil

3　模型验证

通过对实测数据进行分析发现,基坑开挖至坑底时,由于时效性、空间效应以及下部岩层约束等因素,土体变形发展缓慢,导致地连墙变形未完全发展,而当第 3、4 道支撑拆除后,该区域的坑外土体应力得到了释放,使得地连墙变形得到了快速且完全的发展。由于有限元计算中土体应力的释放没有滞后性,使得每一工况下地连墙的变形均为完全发展后的变形,因此选取 Phase 11 拆除第 3、4 道支撑工况作为本次计算结果与实测结果对比的工况。图 3 为 ZQT 17 与 ZQT 31 测点墙体测斜计算值与实测值对比图,由图可知,计算得到的东西两侧地连墙的变形模式与实测的地连墙变形模式相同,均为内凸型的围护结构变形模式;此外,东西两侧地连墙水平位移变形结果和实测结果一致,同时包括最大水平变形对应的深度。通过计算与实测的对比,证明了本次所采用的有限元计算模型的可靠性,因此后续可根据该有限元计算模型对地铁车站不同施工工况下的受力及变形进行分析。

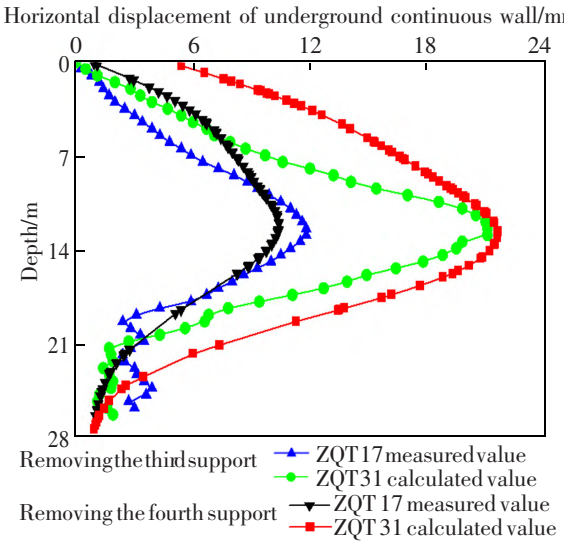

图 3　实测值与计算值对比

Fig.3　Comparison of measured and calculated values

4　结果分析

4.1　地连墙水平位移分析

伴随地铁车站作业的进行,地连墙水平变形时刻变化。其中,开挖工况以及拆撑工况主要表现为地连墙水平位移的逐渐增大,左侧地连墙最大值为 24.1 mm,右侧地连墙最大值为 12.5 mm;而钢支撑施工工况下,由于钢支撑施工时均需施加一定的预应力,对地连墙表现为反向加载从而导致地连墙水平位移有一定的减小,但减小幅度不大。地连墙水平位移见图 4 所示。对比图 4 东西两侧(分别对应基坑左右两侧)地连墙水平位移图可以发现(最大变形为绿色的是西侧地连墙,最大变形为蓝色的是东侧地连墙),东侧地连墙的水平位移明显大于西侧地连墙的,这主要有 3 点原因:

1) 东侧地连墙深度范围内存在②$_3$ 淤泥质,粉质黏层,该土层的性质较差(变形模量仅为3.78 MPa),而西侧地连墙深度范围没有这一层土;

2) 坑底附近存在⑥$_3$ 含砂粉质黏土层,该土层的性质也相对较差,而东侧坑底附近该层土的厚度明显大于西侧的;

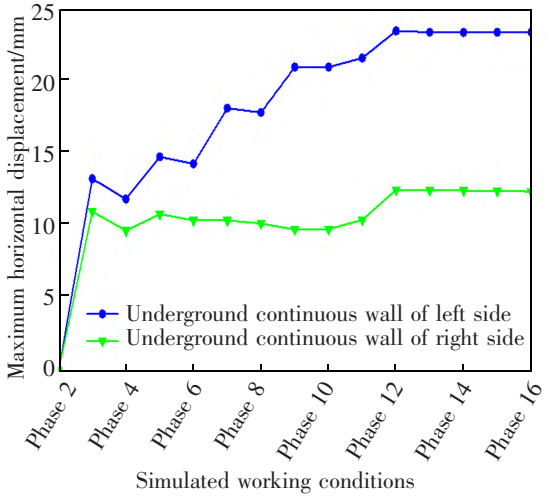

图 4　不同工况下地连墙水平位移最大值

Fig.4　Maximum horizontal displacement of underground continuous wall under different working conditions

3) 东侧基岩埋深明显大于西侧的。

4.2　地表沉降分析

土体开挖第 1 层导致坑外地表沉降变形增量最为显著,左侧坑外地表沉降变形最大值增量达到了 -9.45 mm,右侧坑外地表沉降变形最大值增量达到了-7.82 mm;左侧坑外地表沉降变形在开挖阶段均有一定幅度的增长,同时在后序拆除及车站结构施工过程中,坑外地表沉降变形也有一定的增长,但当车站中板施工完成,坑外地表沉降变形变化幅度十分微小;右侧坑外地表沉降变形在第 1 层开挖完成后就没有发生太大幅度的变化,仅在前期开挖第 2 层以及后续拆除第 3、4 道支撑与车站中板施工过程中,墙体最大水平位移发生了一定幅度的增大,同时,与左侧坑外地表沉降变形相同,当车站中板施工完成,坑外地表沉降变形变化幅度十分微小。从图 5 可以看出,左侧地表的沉降峰值达22.9 mm,右侧则接近 12.8 mm。

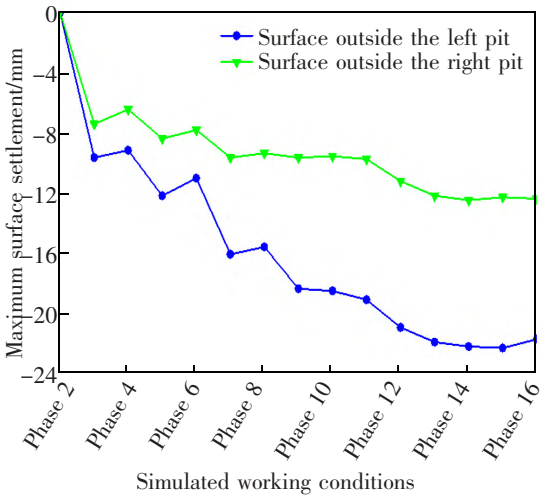

图 5 不同工况下地表沉降最大值

Fig.5 Maximum surface settlement under different working conditions

4.3 不同开挖工况影响分析

4.3.1 从左往右开挖

本次研究依据上节有限元模型进行研究分析，通过设置不同的开挖工况对围护结构水平位移、地表沉降变形进行研究分析。开挖工况示意图见图 6 所示。

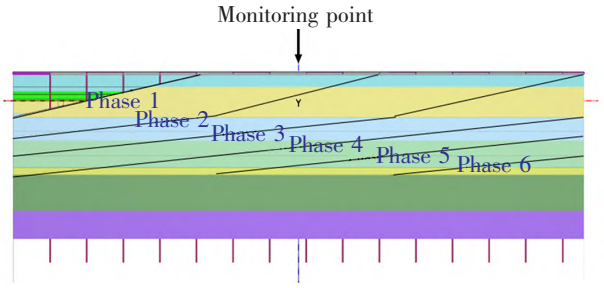

图 6 开挖工况图

Fig.6 Excavation working condition diagram

以左侧地连墙为分析对象，不同工况下的地连墙水平位移和地表竖向位移如图 7 和图 8 所示。由图 7 可知，开挖一时由于未开挖到关注点，此时中部的地连墙的水平位移接近为 0。随后地连墙的水平位移随着土体的卸载逐渐增大，最大值在开挖 6 工况为 18.0 mm，其最值相较于同时开挖工况减少约 5.9 mm。地表沉降与地连墙的变化规律类似，最大值为 13.64 mm，其最值相较于同时开挖工况减少约 8.2 mm。地连墙开挖 6 位移云图如图 9 所示，其最大值出现在最先开挖处，最大值为 23.21 mm，主要是因为刚开挖时加撑不及时，导致最先开挖处位移最大。

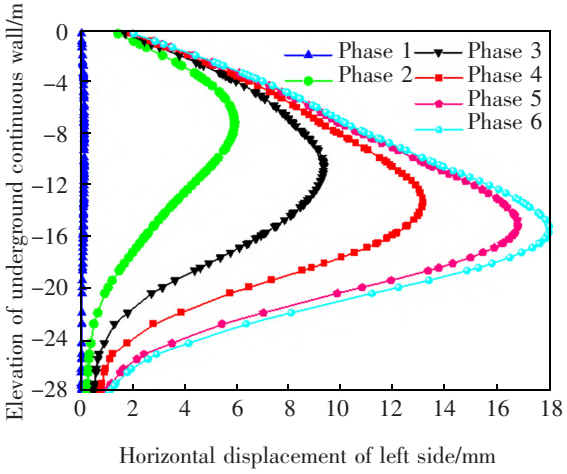

图 7 左侧地连墙水平位移

Fig.7 Horizontal displacement of left underground continuous wall

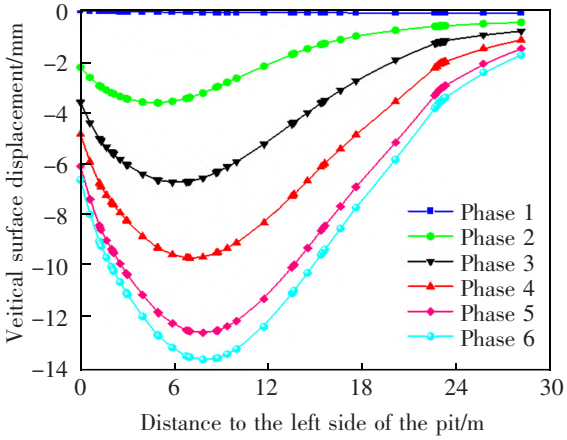

图 8 左侧地表竖向位移

Fig.8 Vertical surface displacement of the left side

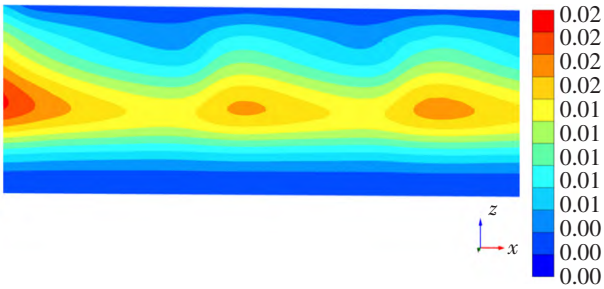

图 9 左侧地连墙开挖 6 位移云图(单位:m)

Fig.9 Displacement nephogram of the left underground continuous wall for Phase 6(Unit:m)

4.3.2 从中间往两侧开挖

从中间往两侧开挖工况示意图见图 10 所示。同样以左侧地连墙为分析对象，不同工况下的地连墙水平位移和地表竖向位移如图 11 和图 12 所示。由图 11 可知，地连墙的水平位移随着土体的卸载

逐渐增大,最大值在开挖 6 工况为 13.76 mm,其最值相较于同时开挖工况减少约 10.34 mm。地表沉降与地连墙的变化规律类似,最大值为 9.08 mm,其最值相较于同时开挖工况减少约 12.76 mm。地连墙开挖 4 位移云图如图 13 所示，其最大值出现在刚开挖处的两侧处,最大值为 18.35 mm,主要是由于开挖处两侧未及时支撑,导致两侧的地连墙水平位移比中间的大。

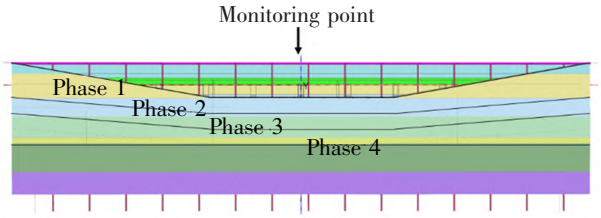

图 10　开挖工况图

Fig.10　Excavation working condition diagram

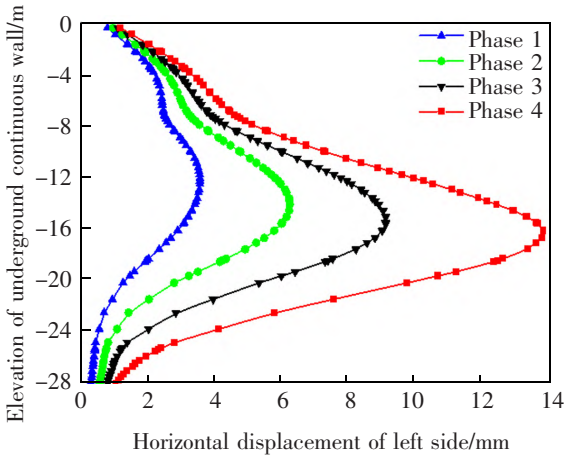

图 11　左侧地连墙水平位移

Fig.11　Horizontal displacement of left underground continuous wall

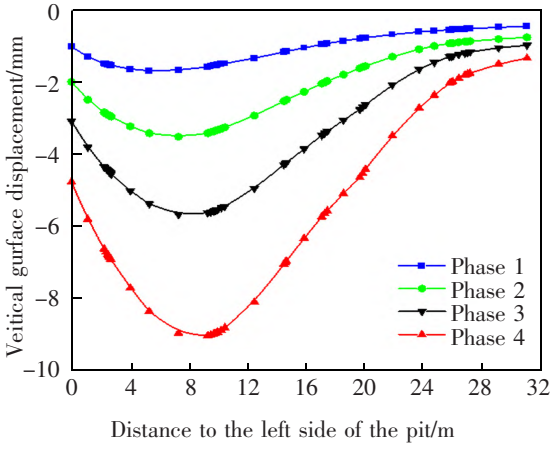

图 12　左侧地表竖向位移

Fig.12　Vertical surface displacement of the left side

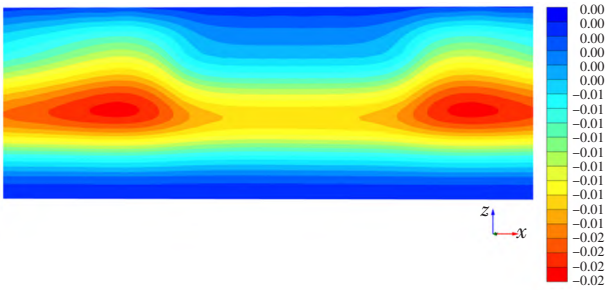

图 13　左侧地连墙开挖 4 位移云图(单位:m)

Fig.13　Displacement nephogram of the left underground continuous wall for Phase 4(Unit:m)

4.3.3　从两侧往中间开挖

从两侧往中间开挖工况示意图见图 14 所示。仍以左侧地连墙为分析对象,不同工况下的地连墙水平位移和地表竖向位移如图 15 和图 16 所示。由图 15 可知，地连墙的水平位移随着土体的卸载逐渐增大,最大值在开挖 5 工况为 13.91 mm,其最值相较于同时开挖工况减少约 10.19 mm。地表沉降与地连墙的变化规律类似,最大值为 9.03 mm,其最值相较于同时开挖工况减少约 12.81 mm。地连墙开挖 5 位移云图如图 17 所示,其最大值出现在刚开挖处

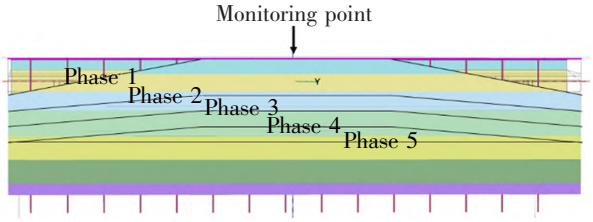

图 14　开挖工况图

Fig.14　Excavation working condition diagram

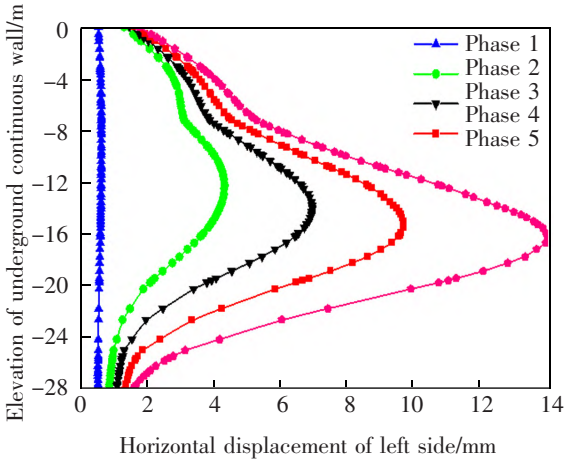

图 15　左侧地连墙水平位移

Fig.15　Horizontal displacement of left underground continuous wall

的两侧处,最大值为23.13 mm,主要是由于开挖处未及时支撑,导致两侧的地连墙水平位移比中间偏大。

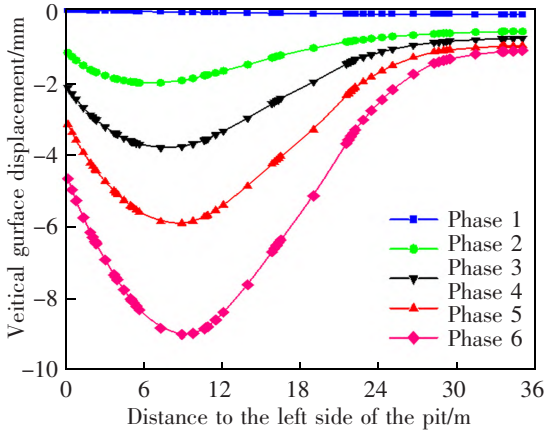

图16 左侧地表竖向位移

Fig.16 Vertical surface displacement of the left side

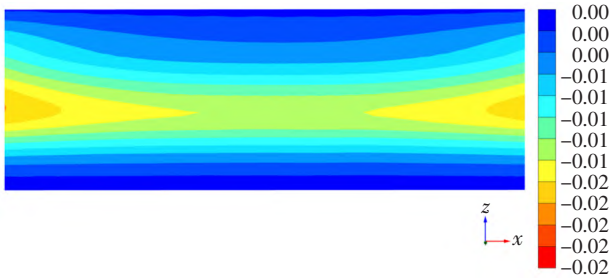

图17 左侧地连墙开挖5位移云图(单位:m)

Fig.17 Displacement nephogram of the left underground continuous wall for Phase 5(Unit:m)

5 结论

1)同一基坑的围护结构左右两侧变形差异显著,不能将土层看作是水平均布土层进行分析,需要对变形大侧土体减少基坑的堆载,尽量将荷载分布在围护结构变形小的一侧。

2)地连墙水平位移、地表沉降及车站主体结构的变形均随着基坑的开挖及车站的建造逐渐增大,水平变形峰值达24.1 mm,地表沉降峰值接近22.9 mm。

3)开挖工况的不同明显影响地连墙的位移变形,从中间往两侧开挖对地连墙的变形影响最小,仅为18.35 mm,相较于原工况减少约25%,对工程产生最有利的影响。

参考文献:

[1] 金乐文,王琛,梁发云. 城市滨海软土地区深层地下空间开发现状及工程问题[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):178-183.
JING L W,WANG C,LIANG F Y. Status and engineering problems of utilization of deep underground space in urban coastal soft soil areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(S2):178-183.

[2] 钱七虎. 利用地下空间助力发展绿色建筑与绿色城市[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(11):1737-1747.
QIAN Q H. Underground space utilization helps develop green buildings and green cities[J]. Tunnel Construction,2019,39(11):1737-1747.

[3] 黄强兵,彭建兵,王飞永,等. 特殊地质城市地下空间开发利用面临的问题与挑战[J]. 地学前缘,2019,26(3):85-94.
HUANG Q B,PENG J B,WANG F Y,et al. Issues and challenges in the development of urban underground space in adverse geological environment[J]. Earth Science Frontiers,2019,26(3):85-94.

[4] 余苑航,阎波. 我国超大城市地下空间开发现状及其发展趋势[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(S1):1-7.
YU Y H,YAN B. Present situation and development trend of underground space in megacity in China[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2021,17(S1):1-7.

[5] 刘向阳. 城市轨道交通枢纽治理:理论框架与运作模式[J]. 中国铁道科学,2022,43(5):188-198.
LIU X Y. Governance of urban rail transit hub: theoretical framework and operational mode[J]. China Railway Science,2022,43(5):188-198.

[6] ZHANG D M,XIE X C,LI Z L,et al. Simplified analysis method for predicting the influence of deep excavation on existing tunnels[J]. Computers and Geotechnics,2020,121:103477.

[7] 王立峰,庞晋,徐云福,等. 基坑开挖对近邻运营地铁隧道影响规律研究[J]. 岩土力学,2016,37(7): 2004-2010.
WANG L F,PANG J,XU Y F,et al. Influence of foundation pit excavation on adjacent metro tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(7):2004-2010.

[8] SUN H,WANG L,CHEN S,et al. A precise prediction of tunnel deformation caused by circular foundation pit excavation[J]. Applied Sciences,2019,9(11):2275.

[9] 许四法,周奇辉,郑文豪,等. 基坑施工对邻近运营隧道变形影响全过程实测分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(5):804-812.
XU S F,ZHOU Q H,ZHENG W H,et al. Influences of construction of foundation pits on deformation of adjacent operating tunnels in whole process based on monitoring data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(5):804-812.

[10] NAEIMIFAR I，YASROBI S，GOLSHANI A A，et al. Damage estimation in masonry buildings based on excavation-induced ground movements[J]. Geotechnical and Geological Engineering，2021，39(6)：4265-4285.

[11] 徐长节，金飚，孙凤明，等. 桩基施工及基坑开挖对邻近建筑物联合影响研究[J]. 岩土工程学报，2013，35(S2)：809-813.
XU C J，JIN B，SUN F M，et al. Influence of pile construction and excavation on adjacent buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2013，35(S2)：809-813.

[12] SHI J，NG C W W，CHEN Y. Three-dimensional numerical parametric study of the influence of basement excavation on existing tunnel[J]. Computers and Geotechnics，2015，63：146-158.

[13] 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J]. 岩土工程学报，2022，44(1)：1-36.
ZHENG G. Method and application of deformation control of excavations in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2022，44(1)：1-36.

[14] 刘波，范雪辉，王园园，等. 基坑开挖对临近既有地铁隧道的影响研究进展[J]. 岩土工程学报，2021，43(S2)：253-258.
LIU B，FAN X H，WANG Y Y，et al. Influences of excavation on adjacent existing metro tunnels: a review[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2021，43(S2)：253-258.

[15] 郭延辉，严明，宋琴，等. 深基坑开挖对临近既有高压天然气管道的影响[J]. 地下空间与工程学报，2021，17(S2)：840-847.
GUO Y H，YAN M，SONG Q，et al. The influence of deep foundation pit excavation on the adjacent existing high pressure natural gas pipeline[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2021，17(S2)：840-847.

[16] 冯国辉，徐兴，侯世磊，等. 基于 Kerr 地基模型的基坑开挖引起下卧既有隧道受力变形[J]. 上海交通大学学报，2022，56(4)：474.
FENG G H，XU X，HOU S L，et al. Deflections of adjacent underground tunnel induced by excavation based on Kerr fundation model[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University，2022，56(4)：474.

[17] 郑刚，杜一鸣，刁钰，等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报，2016，38(4)：599-612.
ZHENG G，DU Y M，DIAO Y，et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2016，38(4)：599-612.

[18] 朱国权，陆幸，司壹恒，等. 邻近基坑开挖顺序对既有隧道的变形影响分析[J]. 宁波大学学报(理工版)，2021，34(5)：89-94.
ZHU G Q，LU X，SI Y H，et al. The influence of construction sequence of adjacent foundation pit on the deformation of existing tunnel [J]. Journal of Ningbo University (NSEE)，2021，34(5)：89-94.

[19] 时春震，刘拓，乐健，等. 一侧临近地铁侧基坑开挖方式比选与分析[C]//北京：2020 年全国土木工程施工技术交流会论文集(中册)，2020.
SHI C Z，LIU T，LE J，et al. Comparison and analysis of excavation methods of side foundation excavation on one side close to subway[C]//Beijing：Proceedings of 2020 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference(Volume 2)，2020.

[20] 鲁泰山，刘松玉，蔡国军，等. 软土地层基坑开挖扰动及土体再压缩变形研究[J]. 岩土力学，2021，42(2)：565-573.
LU T S，LIU S Y，CAI G J，et al. Study on the disturbance and recompression settlement of soft soil induced by foundation excavation[J]. Rock and Soil Mechanics，2021，42(2)：565-573.

通信作者：徐长节(1972—)，男，二级教授，博士生导师。教育部“长江学者”特聘教授，国家杰出青年基金获得者，“万人计划”科技领军人才，国务院特殊津贴获得者。研究方向为深基坑开挖变形控制理论、盾构隧道、饱和土动力学理论及工程应用。E-mail：xucj@zju.edu.cn。

(责任编辑：吴海燕)