

大型基坑开挖对邻近隧道的影响分析

饶勤波¹, 过锦², 俞建霖²

(1. 绿城乐居建设管理集团有限公司, 浙江 杭州 310012;

2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心 / 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 结合软土地基某邻近地铁盾构隧道大型基坑开挖的工程背景, 充分调研了邻近类似工程案例的围护结构设计方案及控制效果, 阐述了邻近地铁隧道大型基坑工程围护结构的设计方案, 并介绍了利用分坑开挖以减小开挖面积的开挖方式控制邻近盾构隧道的附加变形。采用 Plaxis 3D 进行建模分析, 验证了大型基坑工程围护结构方案的合理性, 并对各个开挖工况下坑外土体和隧道的变形进行分析, 结果表明, 基坑开挖范围的增加会扩大隧道附加变形的范围, 距离隧道较远的基坑开挖对隧道附加变形的影响较小, 数值模拟结果及实测数据均表明隧道附加变形控制在规范要求的合理范围之内。因此, 此基坑围护结构方案是合理可行的, 可供类似条件下的基坑工程借鉴参考。

关键词: 软土地基; 基坑开挖; 邻近隧道; 数值模拟; 分坑施工

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)05-0400-08

Analysis of influence of large-scale foundation pit excavation on adjacent tunnels

RAO Qin-bo¹, GUO Jin², YU Jian-lin²

(1. Greentown Leju Construction Management Group Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China;

2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University /

Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: Combined with the engineering background of the excavation of a large foundation pit near a subway shield tunnel on soft soil foundation, the design scheme and control effect of the retaining structure of the adjacent similar engineering cases were investigated. The design scheme of the retaining structure of the large-scale foundation pit project adjacent to the subway tunnel is expounded. The excavation method of using split pit excavation to reduce the excavation area to control the additional deformation of the adjacent shield tunnel is also introduced. Plaxis 3D was used for modeling and analysis, which verified the rationality of the retaining scheme of large-scale foundation pit engineering, and analyzed the deformation of soil and tunnel outside the pit under various excavation conditions. The results show that the increase of the excavation range of the foundation pit will expand the range of the additional deformation of the tunnel. The numerical simulation results and the measured data show that the additional deformation of the tunnel is controlled within a reasonable range required by the specification. Therefore the schematic design of the support forms is reasonable and feasible, and it can be used as a reference for foundation pit under similar conditions.

Key words: soft soil foundation; foundation pit excavation; adjacent tunnels; numerical simulation; sub-pit construction

0 引言

基坑开挖将引起坑外土体的附加位移, 打破其应力平衡, 导致土体应力重分布。在一些大型城市中, 地铁运营里程的快速增长不可避免地出现大量基坑工程邻近地铁隧道施工^[1-3], 引起邻近盾构隧道

的附加变形及内力。严重时将引起隧道环缝张开, 甚至渗水, 影响地铁隧道的正常运营和安全, 如何控制基坑开挖引起的隧道附加位移是工程上常常需要面对的问题。对于超大型基坑的开挖, 由于基坑开挖面积更大, 对周边环境的影响也更加显著, 因此需要更加重视对邻近隧道的保护, 控制基坑围

护结构的变形以减小对邻近隧道的影响。

基坑开挖存在显著的空间效应^[4-5], 俞建霖等^[6-7]借助有限元软件建立三维数值模型分析了基坑开挖的空间效应, 研究表明, 基坑围护结构的变形不仅与基坑开挖深度有关, 基坑长度及宽度对基坑的变形也存在较大影响。由此可见, 基坑围护结构的变形与基坑开挖面积密切相关, 从另一方面来说, 控制基坑的面积可以有效控制围护结构的变形。众多研究表明, 将基坑划分为多个小基坑, 以及分层分块开挖等方式能更有效地控制基坑变形。吴才德等^[8]基于三维数值软件得出了隧道最大位移随邻近基坑开挖面积的增加呈非线性递增并且分隔墙与隧道垂直的分坑措施能更好的控制隧道变形的结论。相应规范^[9] 也根据隧道与基坑的相对距离及基坑开挖深度规定了基坑开挖面积的大小, 以控制基坑开挖对邻近隧道的影响。基于此, 本文介绍了杭州某邻近地铁隧道大型基坑工程的围护结构设计方案、分坑措施及土方分区开挖顺序, 并取得了不错的控制效果, 可为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

杭州某大型基坑工程开挖面积约 82 000 m², 基坑周长约 1 160 m, 其中靠近地铁隧道一侧基坑长约 270 m, 除基坑南侧一层地下室开挖深度为 5.8 m 外, 其余地区开挖深度均为 9.6 m。基坑北侧为市政道路, 下卧地铁盾构隧道, 与基坑最小水平净距约 12.4 m; 基坑东侧及南侧为待建道路, 其中南侧道路外为现状空地; 基坑西侧为先建 01 地块基坑, 开

挖深度与 02 地块基坑相当, 待 02 地块基坑开挖时已完成土方开挖。邻近盾构隧道外径为 6.2 m, 隧道顶埋深约为 10.8~16.5 m, 距基坑底竖向净距约 1.2~6.9 m。图 1 为基坑及周边环境示意图。



图 1 基坑周边环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of surrounding environment of foundation pit

2 工程地质条件

基坑地势较为平缓, 主要土层分布从上到下依次为杂填土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土及粉质黏土, 各土层主要物理力学性质指标见表 1。场地内淤泥质粉质黏土较为深厚, 最厚处达 22.6 m, 隧道所在位置典型地质剖面图见图 2。场地地下水位埋深较浅, 约为 1.10~1.80 m, 对基坑开挖影响较大。

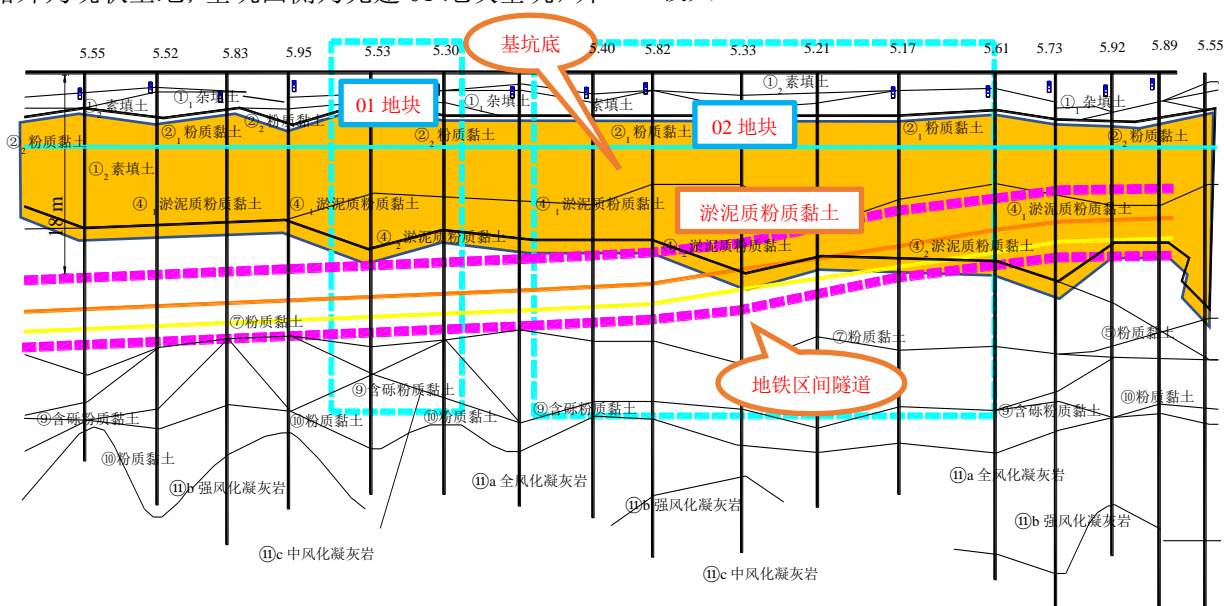


图 2 典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geological profile

表1 各土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

层号	土层名称	w/%	γ/(kN/m ³)	e	地基承载力特征值/ kPa	水平渗透系数/ (cm/s)	固结快剪	
							c/kPa	φ/(°)
①	杂填土	—	—	—	—	—	—	—
② ₋₁	粉质黏土	30.4	18.52	0.869	110	3.19×10 ⁻⁴	9.6	28.5
② ₋₂	粉质黏土	32.8	18.28	0.941	100	5.15×10 ⁻⁷	26.9	15.2
④	淤泥质粉质黏土	41.7	17.46	1.170	85	2.89×10 ⁻⁷	13.6	12.4
⑤	粉质黏土	28.6	18.84	0.825	190	—	39.8	18.6

3 围护设计方案及施工优化

3.1 工程类比分析

为确定本工程围护体系的设计方案以控制邻近隧道的附加变形，调研了杭州市及周边地区一些类似的工程案例，见表2。隧道距离基坑小于1.0H

(基坑开挖深度)的工程，针对地铁的保护方案一般采用地下连续墙+内支撑的支护体系，坑内被动区加固；隧道距离基坑1~2H的工程，则主要采取钻孔桩+内支撑支护体系。对于开挖面积较大的一些基坑，靠近隧道侧采用分坑的方式控制围护结构变形，并采用分区、分层开挖以进一步减小基坑开挖对隧道的影响。

表2 邻近地铁类似工程案例统计表

Table 2 Statistics of similar projects in adjacent existing tunnels

项目名称	基坑挖深/m	开挖面积/m ²	支护形式	距离/m	监测结果/mm			
					围护	水平	竖向	收敛
杭政储出15号地块	10.2~12.0	19 000	SWM+2 混凝土撑	30	14.2	3.8	3.5	3.3
杭政储出39号地块	14.1~15.1	35 000	连续墙+3 混凝土撑	16	19.3	3.6	5.1	4.4
萧政储出8号地块	7.3~11.8	24 000	钻孔桩+2 混凝土撑	16	—	4.8	2.7	5.0
杭政储出3号地块	8.5~9.5	27 000	钻孔桩+2 混凝土撑	10	—	2.9	3.9	3.5
钱江世纪城H-14	12.6~13.7	11 000	钻孔桩+2 混凝土撑	22	22.0	3.2	2.8	3.5
杭州地铁控制中心	12.6~13.1	19 000	连续墙+2 混凝土撑	8	—	1.3	2.5	2.5
婺江路公交枢纽站	8.95	5 400	钻孔桩+1 混凝土撑	25	—	2.4	1.8	—

3.2 围护体系设计方案

通过以上类似工程案例分析，由于基坑开挖面积较大，且隧道距离基坑较近，将基坑划分为3个小基坑，并对靠近隧道一侧的基坑作分坑处理，以控制基坑开挖对邻近隧道的影响，具体围护设计方案如下：整体采用Φ850@600mm三轴水泥搅拌桩套打作止水帷幕，基坑北侧采用Φ1000@1200mm钻孔灌注桩结合两道钢筋混凝土水平内支撑，并用高压旋喷桩作被动区加固；基坑东、西两侧及南侧二层地下室部分采用Φ800@1000/1100mm钻孔灌注桩结合一道钢筋混凝土水平内支撑；基坑南侧一层地下室部分采用Φ800mm双排桩作支护，典型基坑剖面图见图3。

北侧基坑各分坑控制开挖面积在1800~2033m²之间，北侧基坑各分坑分隔桩采用Φ800@1200mm通过硬分割的形式，增强基坑空间效应；其余基坑

间采取Φ800@1100mm进行分割，并增加三轴搅拌桩进行止水，基坑分坑示意图见图1。

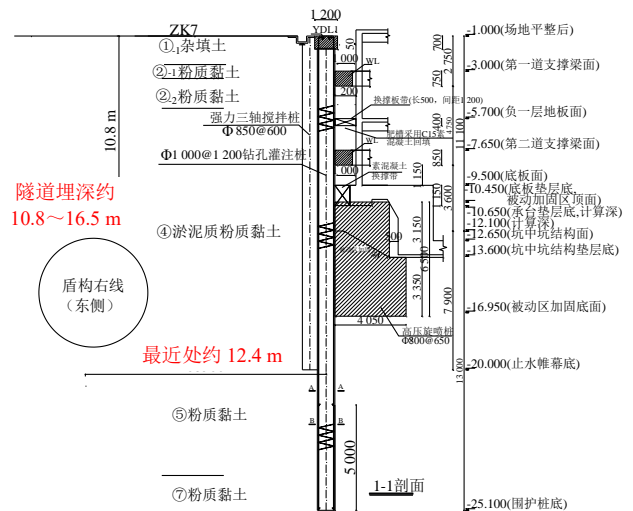


图3 典型基坑剖面图

Fig. 3 Typical foundation pit profile

邻近 01 地块基坑开挖深度约为 9.6 m, 主要采用 SMW 工法桩结合一道混凝土撑的支护体系, 在靠近地铁隧道一侧采用 $\Phi 1\ 000@1\ 200\ \text{mm}$ 钻孔灌注桩, 并在被动区进行坑底加固。

4 邻近隧道附加变形分析

4.1 有限元模拟分析

采用三维数值模拟软件 Plaxis 3D 对整个基坑开挖工况进行建模分析, 模型尺寸为: 540 m (平行于隧道方向) \times 420 m \times 40.6 m。图 4 为基坑与邻近隧道模型示意图。土体采用硬化土模型 (HS 模型), HS 模型在基坑开挖、盾构隧道推进等工程的安全性预估分析中应用较为广泛^[10], 主要包含以下土体参数: 三轴排水剪切试验割线模量 E_{50} , 固结试验的主加载切线模量 E_{oed} , 三轴固结排水卸载再加载试验的参考模量 E_{ur} 。基于既有文献对 HS 参数的研究结果^[11-12], 选用的土体基本参数见表 3。围护墙及隧道采用不透水的板单元模拟, 其中围护墙弹性模量为 30 GPa, 隧道弹性模量为 34.5 GPa, 由于隧道纵向上由螺栓连接组成, 按系数 0.8 对隧道刚度进行折减^[13]。选用梁单元模拟腰梁及支撑, 弹性模量为 30 GPa。结构单元尺寸根据实际工程设计尺寸选取, 混凝土泊松比均设为 0.2。

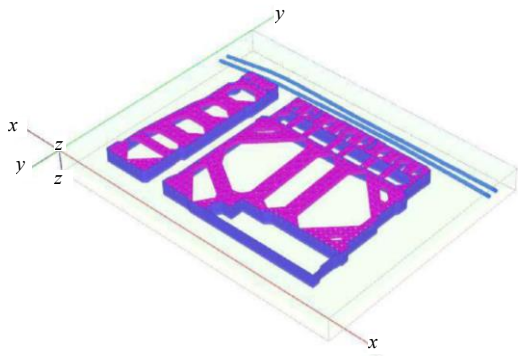


图 4 基坑与邻近隧道模型

Fig. 4 Model of foundation pit and adjacent tunnels

表 3 HS 模型中土体基本参数

Table 3 Parameters of soil in HS model

层序	土体名称	E_s/MPa	E_{50}/MPa	E_{oed}/MPa	E_{ur}/MPa
①	杂填土	4.0	4.0	4.0	20.0
②-1	粉质黏土	5.8	5.8	5.8	29.0
②-2	粉质黏土	4.5	4.5	4.5	22.5
④	淤泥质粉质黏土	2.7	2.7	2.7	13.5
⑤	粉质黏土	8.0	8.0	8.0	40.0
⑦	粉质黏土	9.5	9.5	9.5	47.5
⑨	含砾粉质黏土	10.0	10.0	10.0	50.0

数值模拟分析步骤如下:

- (1) 初始地应力平衡;
- (2) 地铁隧道激活;
- (3) 基坑围护墙施工 (位移清零);
- (4) 01 地块开挖并逐步施工完成;
- (5) 02 地块北侧及南侧基坑开挖到第一道支撑底;
- (6) 02 地块北侧及南侧基坑浇筑第一道支撑, 北侧基坑 1、3、5 分坑开挖到第二道支撑底;
- (7) 02 地块北侧基坑 1、3、5 分坑浇筑第二道支撑并开挖到基坑底;
- (8) 02 地块北侧基坑 1、3、5 分坑完成底板及楼板施工;
- (9) 02 地块北侧基坑 2、4 分坑开挖到第二道支撑底;
- (10) 02 地块北侧基坑 2、4 分坑浇筑第二道支撑并开挖到基坑底;
- (11) 02 地块北侧基坑 2、4 分坑完成底板及楼板施工;
- (12) 南侧基坑开挖到基坑底, 完成底板及楼板施工;
- (13) 南侧一层地下室开挖, 完成楼板施工;
- (14) 完成中部基坑的施工。

表 4 为两个地块相继开挖各工况下隧道附加变形最大值。

表 4 Plaxis 3D 计算结果

Table 4 Calculation results of Plaxis 3D

工况	最大变形/mm		
	隧道水平位移	隧道沉降	
01 地块	开挖到底	3.6	2.0
	北侧开挖到底	3.5	2.0
02 地块	南侧开挖到底	3.5	2.0
	中部开挖到底	3.5	2.2

由图 5~7 可知, 在 02 地块开挖前, 由于 01 地块开挖引起的坑外土体位移较小, 从而对隧道附加位移的影响也较小, 隧道附加水平位移约为 3.6 mm, 竖向位移约为 2.0 mm。隧道附加位移发生的位置与坑外土体附加位移场密切相关。

由图 8~10 可知, 02 地块北侧基坑开挖在其外侧引起的土体附加位移场的分布有较为显著的空间效应, 分坑开挖的措施有效地控制了坑外土体的附加位移, 最大位移小于 01 地块开挖引起的土体附加位移。隧道最大变形没有较为显著的变化, 但在 02 地块开挖范围内隧道变形有较为明显的变化,

变形范围逐渐扩大。

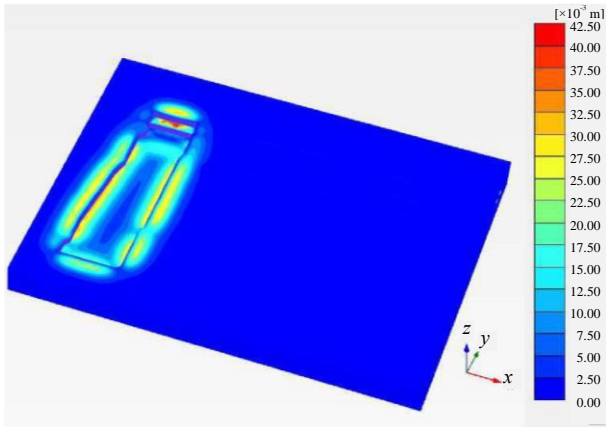


图 5 01 地块开挖到底周边土体水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of surrounding soil after excavation of block 01

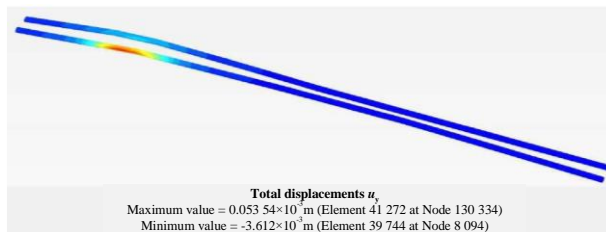


图 6 01 地块开挖到底隧道水平变形

Fig. 6 Horizontal deformation of the tunnel when excavated to the bottom of the block 01

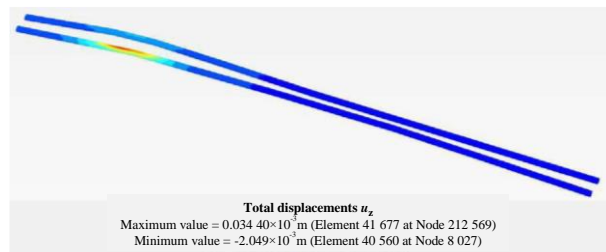


图 7 01 地块开挖到底隧道竖向变形

Fig. 7 Vertical deformation of the tunnel when excavated to the bottom of the block 01

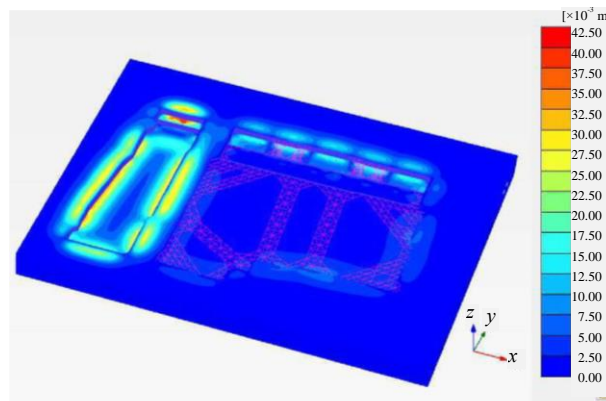


图 8 02 地块北侧开挖到底周边土体水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of surrounding soil after excavation on the north side of Lot 02

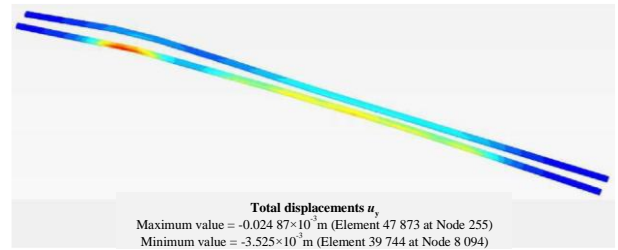


图 9 02 地块北侧开挖到底隧道水平变形

Fig. 9 Horizontal deformation of the tunnel when excavated to the bottom on the north side of block 02

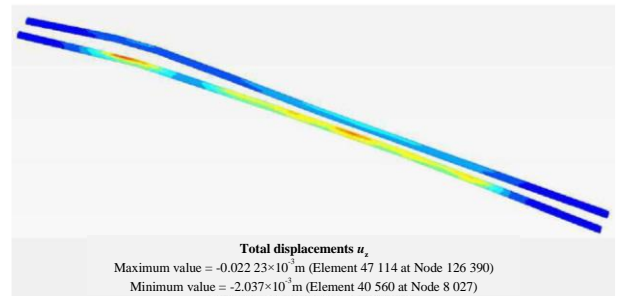


图 10 02 地块北侧开挖到底隧道竖向变形

Fig. 10 Vertical deformation of the tunnel when excavated on the north side of block 02

由图 11~13 可知, 02 地块南侧基坑开挖在东西两侧产生了较大的坑外土体位移, 但对北侧坑外土体位移影响相对较小。南侧基坑东西两侧围护长度小于北侧基坑围护的长度, 由于北侧基坑采取分坑施工的方式, 将较长的基坑边分割为几个较短的基坑边, 使得北侧基坑坑外土体水平位移控制效果要优于南侧基坑, 基坑北侧坑外土体水平位移最大值约为南侧基坑水平位移最大值的 1/3, 这说明对基坑进行分坑施工能较好地控制基坑开挖对周边环境的影响。隧道最大水平变形及竖向变形均未发生明显变化。

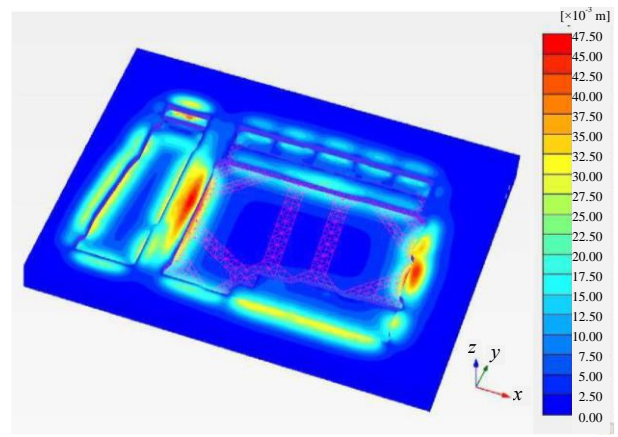


图 11 02 地块南侧开挖到底周边土体水平位移

Fig. 11 Horizontal displacement of surrounding soil after excavation on the south side of block 02

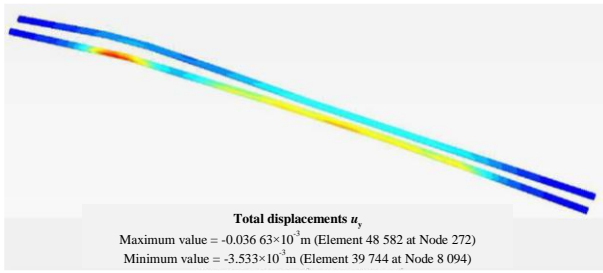


图 12 02 地块南侧开挖到底隧道水平变形

Fig. 12 Horizontal deformation of the tunnel when excavated to the bottom on the south side of block 02

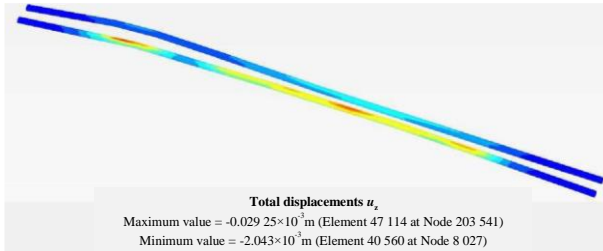


图 13 02 地块南侧开挖到底隧道竖向变形

Fig. 13 Vertical deformation of the tunnel when excavated to the bottom on the south side of block 02

由图 14~16 可知, 02 地块中部基坑开挖完成后 02 地块开挖范围内隧道变形进一步增加, 隧道最大竖向变形发生位置向 02 地块北侧中部位置转移。中部基坑的开挖引起了 02 地块范围内隧道附加变形较大的增长。

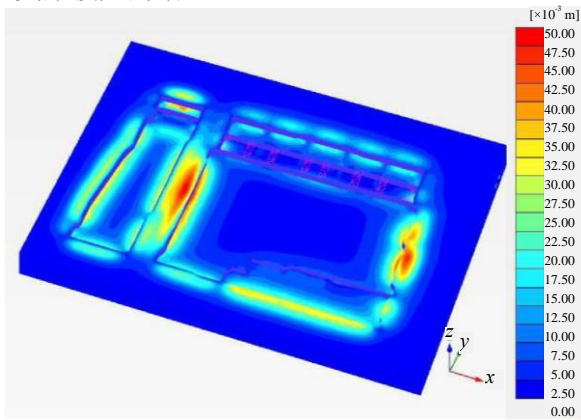


图 14 02 地块中部开挖到底周边土体水平位移

Fig. 14 Horizontal displacement of the surrounding soil after the middle of block 02 fully excavated

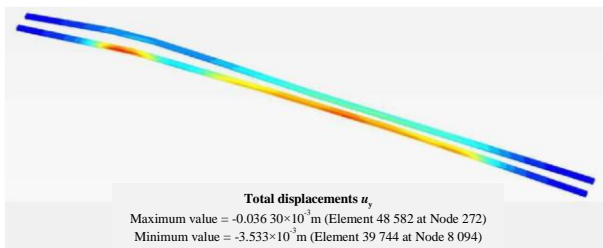


图 15 02 地块中部开挖到底隧道水平变形

Fig. 15 Horizontal deformation of the tunnel when the middle of block 02 fully excavated

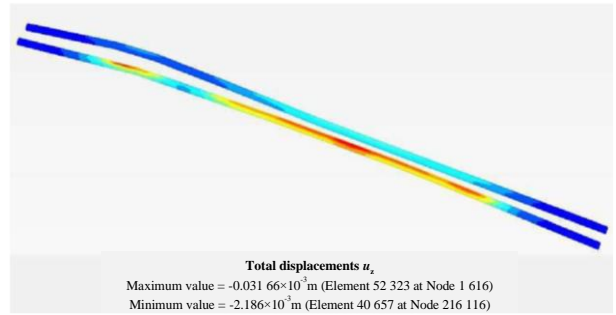


图 16 02 地块中部开挖到底隧道竖向变形

Fig. 16 Vertical deformation of the tunnel when the middle of block 02 fully excavated

从基坑各开挖工况对邻近隧道附加变形的影响中可以分析得出, 即使基坑开挖面积较大, 但是较远处土体开挖对隧道的影响较小, 可着重加强较近处围护结构的刚度以减小基坑开挖对周边环境的影响; 通过将长基坑分割为几个较小的基坑以减小基坑边长度的方式可以更好地控制围护结构的变形, 减小基坑开挖的环境影响。

4.2 实测数据分析

为及时发现问题, 有效控制隧道变形, 在基坑开挖过程中对隧道附加位移进行了实时监测, 监测点位布设见图 17。图 18~19 为 02 地块开挖期间基坑北侧中部附近 5 个连续的监测点位监测到的隧道附加变形随时间变化的曲线图。

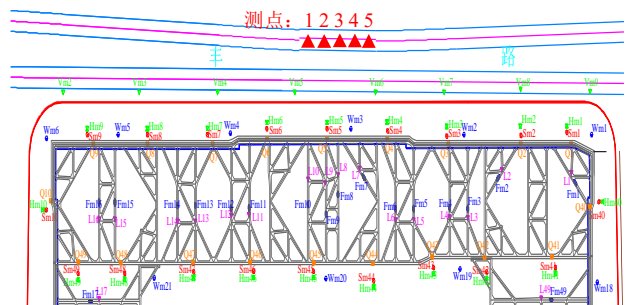


图 17 监测点位布设图

Fig. 17 Monitoring layout

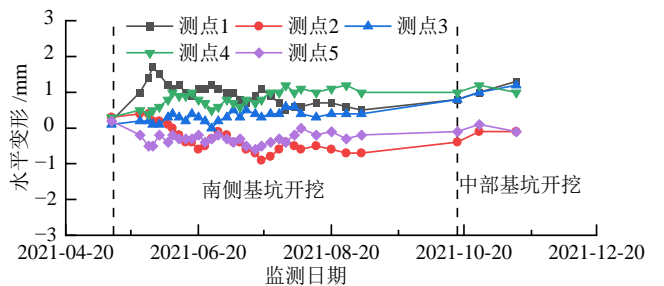


图 18 实测隧道水平位移曲线

Fig. 18 Measured horizontal displacement of tunnel

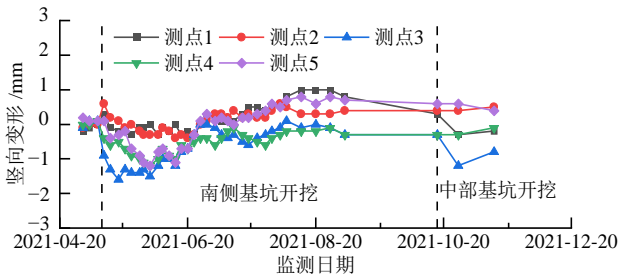


图 19 实测隧道竖向位移曲线

Fig. 19 Measured vertical displacement of tunnel

由图 18~19 可见, 北侧分坑开挖完成后, 隧道附加变形较小, 数值计算结果也表明北侧基坑施工完成后, 隧道未发生显著的变形, 较好地控制了基坑开挖对周边环境的影响。南侧基坑开挖完成后并未对隧道的水平变形产生较大的影响, 在整个开挖过程中隧道变形较为稳定, 这与有限元分析结果一致, 而竖向变形在南侧基坑开挖初期沉降增大, 随后由沉降逐渐转变成隆起, 这可能是由于新建隧道因其内部土体的开挖卸荷使得隧道逐渐产生隆起变形, 但有限元分析中未考虑到这一点, 使得两者最终计算结果存在略微差异。中部基坑的开挖进一步增加了隧道的附加变形, 数值计算结果同样体现了这一点, 由于中部基坑开挖引起的隧道水平变形增加最大值约 0.4 mm, 沉降增加最大值约为 0.6 mm。隧道水平变形最大值为 1.9 mm, 沉降最大值为 1.7 mm, 与数值模拟计算的结果较为一致, 验证了数值分析模型的合理性。

5 结论

介绍了杭州某邻近地铁隧道大型基坑的围护设计方案, 阐述了基坑分坑及分块开挖的方式, 主要有以下结论:

(1) 基坑分坑开挖的方式较好地控制了基坑开挖对邻近盾构隧道的影响。

(2) 建立有限元分析模型, 结果表明, 基坑开挖范围的扩大会增加邻近隧道附加变形的影响范围, 距离隧道较远的基坑开挖对隧道附加变形的影响较小。

(3) 邻近隧道变形监测数据与数值模拟结果较为一致, 验证了数值分析模型的合理性。

(4) 隧道实测变形均控制在变形控制要求范围内, 因此, 此基坑围护设计方案是合理可行的, 可供类似基坑工程借鉴参考。

参考文献

- [1] 于涛. 软土地区深基坑施工对邻近地铁隧道的影响[J]. 地基处理, 2021, 3(5): 427-432.
YU Tao. Influence of deep foundation pit construction on adjacent subway tunnels in soft soil[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(5): 427-432.
- [2] 姜叶翔, 赖小勇, 张宏建, 等. 深基坑开挖对邻近既有地铁隧道的影响分析[J]. 地基处理, 2020, 2(3): 231-235.
JIANG Ye-xiang, LAI Xiao-yong, ZHANG Hong-jian, et al. Impact of deep excavation on adjacent subway tunnels[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 231-235.
- [3] 虞革新, 金琳. 地铁旁侧深大基坑的支护及变形控制技术[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 221-226.
YU Ge-xin, JIN Lin. Supporting technology and deformation control technology of deep and large foundation pit beside subway[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 221-226.
- [4] 李涛, 杨依伟, 贾奥运, 等. 空间效应下狭长深基坑地表三维变形预测[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6): 1101-1110.
LI Tao, YANG Yi-wei, JIAO Ao-yun, et al. Prediction of three-dimensional seurface deformation of long and narrow deep foundation pit under saptial effect[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6): 1101-1110.
- [5] 姚宏波, 李冰河, 童磊, 等. 考虑空间效应的软土隧道上方卸荷变形分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2453-2460.
YAO Hong-bo, LI Bing-he, TONG Lei, et al. Analysis of metro tunnel deformation by upper excavation unloading considering spatial effect in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2453-2460.
- [6] 俞建霖, 龚晓南. 基坑工程变形性状研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 86-90.
YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Research on deformation of foundation-pit engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 86-90.
- [7] 俞建霖, 龚晓南. 深基坑工程的空间性状分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 24-28.
YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Spatial behavior analysis of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 24-28.
- [8] 吴才德, 曾婕, 成怡冲, 等. 深基坑开挖空间效应对周围土体及邻近隧道的影响研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(2): 91-95.
WU Cai-de, ZENG Jie, CHENG Yi-chong, et al. Influence

study of spatial effect of deep foundation pit excavation on around soil and adjacent tunnel[J]. *Building Structure*, 2016, 46(2): 91-95.

[9] 浙江省住房和城乡建设厅. 城市轨道交通结构安全保护技术规程: DB33/ T1139—2017[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2017.
Department of Housing and Urban Rural Development of Zhejiang Province. *Technical Code for Protection of Urban Rail Transit Structures: DB33/ T1139—2017[S]*. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2017.

[10] 黄鑫, 樊秀峰, 安亚洲. HS 模型在基坑工程数值模拟中的适用性分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(2): 115-120.
HUANG Xin, FAN Xiu-feng, AN Ya-zhou. Applicability analysis of HS model in numerical simulation of foundation pit[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(2): 115-120.

[11] 姜宝臣, 李现森. 复杂敏感环境下的深大基坑设计与实践[J]. *隧道建设*, 2017, 37(5): 600-608.
JIANG Bao-chen, LI Xian-sen. Design and practice of deep and large-scale foundation pit in complex and sensitive environment[J]. *Tunnel Construction*, 2017, 37(5): 600-608.

[12] 杨兰强, 周立波, 夏雯, 等. 宁波软土地区基坑数值计算中 HS 模型参数试验研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2018, 38(6): 954-962.
YANG Lan-qiang, ZHOU Li-bo, XIA Wen, et al. Experimental study of parameters of HS model for numerical analysis of foundation pits in ningbo soft soil area[J]. *Tunnel Construction*, 2018, 38(6): 954-962.

[13] 魏立新, 杨春山, 黄海滨, 等. 盾构隧道纵向刚度及影响因素模型试验研究[J]. *公路*, 2020, 65(1): 335-340.
WEI Li-xin, YANG Chun-shan, HUANG Hai-bin, et al. Model test research on longitudinal stiffness and influencing factors of shield tunnel[J]. *Highway*, 2020, 65(1): 335-340.



(上接第 393 页)

[23] WALZ B. An examination of some theories of earth pressure on shaft linings: Discussion[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15(3): 438-440.

[24] HERTEN M, PULSFORT M. Determination of spatial earth pressure on circular shaft constructions[J]. *Granular Matter*, 1999, 2(1): 1-7.

[25] CHENG Y M, HU Y Y. Active earth pressure on circular shaft lining obtained by simplified slip line solution with general tangential stress coefficient[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 1(27): 110-115.

[26] 周扬, 周国庆. 考虑治理荷载作用时井壁严格轴对称变形分析[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(7): 999-1004.
ZHOU Yang, ZHOU Guo-qing. Strict axisymmetric deformation analysis of shaft linings considering shaft-curing load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(7): 999-1004.

[27] MOGI K. Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone[J]. *Tectonophysics*, 1971, 11(11): 111-127.

[28] 吕彩忠. 基于 Mogi-Coulomb 强度准则的隧道围岩理想弹塑性解答[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(6): 54-59.
LV Cai-zhong. Elastic-perfectly plastic solution of tunnel surrounding rocks using Mogi-Coulomb strength criterion[J]. *Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2014, 36(6): 54-59.

[29] CHENG Y M, HU Y Y, WEI W B. General axisymmetric active earth pressure by method of characteristics-theory and numerical formulation[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2007, 7(1): 1-15.

[30] 关晓迪, 曹周阳, 朱勇锋, 等. 引入环向压应力系数的竖井井壁空间被动土压力新解[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(9): 3674-3681.
GUAN Xiao-di, CAO Zhou-yang, ZHU Yong-feng, et al. A new solution passive earth pressure in shaft wall space with circumferential compressive stress coefficient[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(9): 3674-3681.

[31] PRATER E G. An examination of some theories of earth pressure on shaft lining[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1977, 14(1): 91-106.

[32] 关晓迪. 基于联合强度理论的黄土竖井围岩空间土压力计算新解[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
GUAN Xiao-di. A new solution for calculating the spatial earth pressure of loess shaft surrounding rock based on joint strength theory[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.