

基坑施工对邻近盾构隧道的影响分析

许旭平¹, 冯洪良²

(1. 政通建设管理有限公司, 浙江 杭州 311106; 2. 杭州峥嵘建设有限公司, 浙江 杭州 311103)

摘要: 结合软土地基邻近地铁盾构隧道基坑施工的背景, 在分析了类似工程案例后, 阐述了某邻近地铁基坑工程围护结构的设计方案, 并采用了分坑施工的方式以控制基坑开挖引起邻近盾构隧道的附加变形。为验证基坑工程围护结构方案的合理性, 利用 Plaxis 3D 数值分析软件, 通过建模对各个开挖工况下基坑和隧道的变形进行分析, 并与实测结果进行对比。结果表明, 基坑的围护结构及隧道附加变形均控制在设计和规范要求的合理范围之内, 说明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; 基坑开挖; 邻近隧道; 数值模拟; 分坑施工; 变形控制

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)02-0153-08

Analysis of foundation pit construction effects on adjacent tunnels

XU Xu-ping¹, FENG Hong-liang²

(1. Zhengtong Construction Management Co., Ltd., Hangzhou 311106, Zhejiang, China;

2. Hangzhou Zhengrong Construction Co., Ltd., Hangzhou 311103, Zhejiang, China)

Abstract: With the background of foundation pit construction in soft soils adjacent to metro shield tunnels, the design scheme of the retaining structure for the excavation adjacent to tunnels was described in this study. Sub-pit construction was used to reduce the deformation of the adjacent tunnels. To verify the rationality of the support scheme, the software Plaxis 3D was used to analyze the deformation of foundation pit and tunnel under various excavation conditions. The results of the FEM were compared with the monitoring data. It is shown that the additional deformation of the retaining structure of foundation pit and adjacent tunnels is controlled within the reasonable range required by the design and specifications. Thus, the design scheme of the retaining structure is reasonable and feasible, and it can be used as a reference for similar cases.

Key words: soft soil; foundation pit excavation; adjacent tunnels; FEM; sub-pit construction; deformation control

0 引言

经济快速发展推动城市化进程的同时, 也带来了一系列问题: 城市人口不断增加、交通日益拥堵、土地资源紧缺等。城市地铁网络系统的不断发展及完善极大地缓解了这一问题, 各大城市地铁运营里程不断增长。仅在 2020 年, 杭州新增地铁运营线路长度超 160 km, 增幅居全国首位, 达到了 130%。然而土地资源的紧缺, 不可避免地出现大量基坑工程邻近地铁隧道施工^[1-2], 例如基坑开挖及降水、地表堆载等, 造成已运营隧道的附加变形。基坑开挖卸载会引起隧道应力重分布, 导致隧道产生附加变形, 甚至引发隧道接缝张开、螺栓失效等现象, 严

重影响地铁隧道的安全运营。因基坑开挖引起隧道较大变形甚至损坏的案例已有不少^[3-4], 宁波地铁 1 号线受邻近基坑大面积开挖的影响, 地铁盾构隧道发生了较大的位移, 导致局部管片渗水。但是通过对围护体系的优化及对周边土体的加固, 能有效的控制隧道的附加变形, 很多案例^[5-7]取得了较好的变形控制。因此, 有必要采用合适的围护体系及开挖顺序以减小围护结构的变形, 从而减小邻近隧道的附加变形, 在基坑开挖前利用数值模拟软件进行分析, 结合分析结果进一步优化围护体系, 将隧道附加变形控制在合理范围之内。基于此, 本文分析了某基坑工程的围护设计方案以及此围护设计方案对邻近地铁隧道的控制效果。

1 工程案例概况

杭州某基坑工程开挖面积约 19 031 m², 开挖深度 9.9 m, 靠近地铁隧道一侧基坑长 255 m。基坑东面距离盾构隧道最小水平净距约 8.0 m, 距离道路最近约 30 m; 基坑南面及西面均为待建空地; 基坑北面 17.1 m 外有市政污水管线。邻近盾构隧道外径为 6.2 m, 隧道顶埋深约 16.8~17.8 m, 距基坑底竖向净距约 6.9~7.9 m。图 1 为基坑及周边环境示意图。



图 1 基坑及周边环境示意图

Fig. 1 Layout of foundation pit and surrounding environment

2 土层分布及水文地质

基坑开挖深度影响范围内各土层主要物理力

学性质指标见表 1。典型地质剖面如图 2 所示。

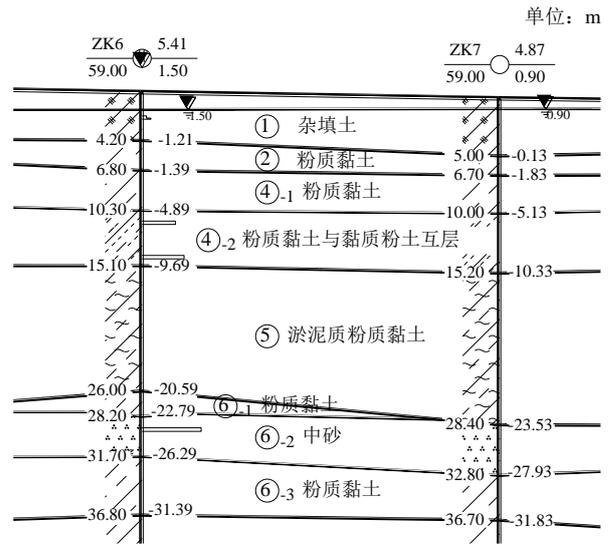


图 2 典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geological profile

由图 2 可见地基土层上部以粉质黏土为主, 15 m 下有深厚淤泥质土层分布, 邻近盾构隧道位于软弱土层中。

孔隙潜水的稳定水位埋深为 0.50~2.70 m, 地下水 and 地表水系联系密切, 水位变化不大, 一般年变化幅度为 1.0~2.0 m。第⑥₂层中砂赋存承压水呈中-强透水性, 承压水受气候影响不明显, 主要补给来源上覆含水层垂直渗入补给及上游侧向径流补给。根据地区经验, 该承压水含水层渗透性一般, 水量较小。

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/%	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e	地基承载力特	水平渗透系数/	固结快剪	
					征值/kPa	(cm/s)	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
①	杂填土	31.4	18.20	0.937	—	6.3×10^{-6}	23.7	7.8
②	粉质黏土	27.3	19.02	0.792	120	6.5×10^{-6}	36.3	12.7
③	淤泥质黏土	51.3	16.73	1.445	70	5.1×10^{-7}	10.8	2.7
④-1	粉质黏土	26.9	19.12	0.776	140	5.9×10^{-6}	42.5	13.8
④-2	粉质黏土与黏质粉土互层	29.2	18.75	0.837	150	8.0×10^{-6}	21.4	11.3
⑤	淤泥质粉质黏土	39.1	17.79	1.093	80	5.7×10^{-7}	17.7	2.8
⑥-3	粉质黏土	26.1	19.17	0.763	170	—	47.7	14.8

3 围护设计方案及施工优化

3.1 地铁隧道变形控制要求

为保证邻近地铁隧道的运营安全, 相关规范对邻近施工引起的隧道附加变形有着严格的控制要求。根据浙江省《城市轨道交通结构安全保护技术

规程》(DB33/T 1139—2017) 规定, 本项目影响范围内轨道交通设施的结构安全状况为“II类”, 保护等级为“A级”, 盾构隧道的水平、竖向和收敛位移控制值均为 5 mm。

3.2 工程类比分析

类似工程案例围护体系的类比分析可为优化

基坑共划分为9个小基坑,邻近隧道边的分坑1~8共8个小基坑的面积在938~1732 m²之间,并采用Φ800@1200钻孔灌注隔开。对东侧基坑坑底采用高压旋喷桩满堂加固以减小对邻近盾构隧道的影响。

3.4 施工方案优化

基坑工程有着明显的空间效应^[8],不少研究及案例^[9-10]均表明利用时空效应开挖土体能较好地控制围护结构的变形,甚至能减小30%以上,从而减小对周边环境的影响。

遵循“大基坑,小开挖”的原则,结合后浇带情况对基坑进行分坑施工。基坑分坑方案如图4所示,先开挖分坑1/3/5/7内土体,待地下室主体结构完成并达到强度后,开挖分坑2/4/6/8内土体,地下室主体完成并达到一定强度后再开挖分坑9。

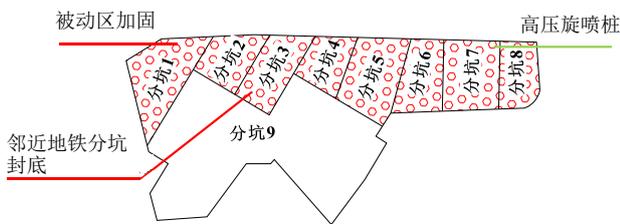


图4 基坑分坑施工示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sub-pit construction

4 邻近隧道附加变形分析

4.1 有限元模拟分析

采用Plaxis 3D数值模拟软件进行建模分析,模型尺寸为:350 m(平行于隧道方向)×220 m×60 m。基坑及邻近隧道模型如图5所示。土体采用小应变硬化土(HSS)本构模型,该本构模型不仅考虑了土体的剪切硬化、压缩硬化和小应变刚度特性,还考虑了剪切模量的衰减行为。采用MC破坏准则,适合于多种土体类型的破坏和变形行为的描述,也可用于对敏感环境下基坑开挖对周围环境的影响分析。结构单元中围护墙、隧道、底板及楼板均采用板单元模拟,腰梁及支撑均采用梁单元模拟,结构单元尺寸均按实际选取。除隧道弹性模量取34.5 GPa外,其余结构单元弹性模量均为30 GPa,泊松比统一为0.15。HSS模型包含以下土体参数: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} , G_0^{ref} 为小应变刚度试验的参考初始模量, $\gamma_{0.7}$ 为割线剪切模量衰减到初始剪切模量70%时所对应的剪应变, m 为刚度应力水平相关幂指数。土体基本参数见表3,其取值依据参考文献[11]。数值模拟分析步骤如下:

- (1) 初始地应力平衡;
- (2) 既有地铁隧道激活;
- (3) 基坑围护墙施工(位移清零);
- (4) 一期(分坑1/3/5/7)开挖表层土;
- (5) 一期第一道支撑架设、开挖一期到第二道支撑标高;
- (6) 一期第二道支撑架设、开挖至基坑底;
- (7) 一期底板及换撑结构施工;
- (8) 一期第二道支撑拆除;
- (9) 一期地下室楼板施工;
- (10) 一期第一道支撑拆除;
- (11) 二期(分坑2/4/6/8)及三期(分坑9)重复(4)~(10)的施工工序。

表4为各工况下隧道侧围护结构及隧道附加变形最大值。

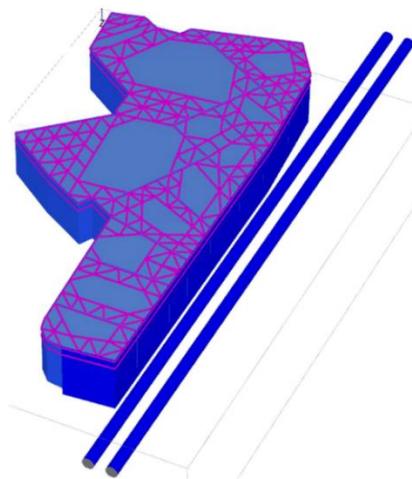


图5 基坑与邻近隧道模型

Fig. 5 Model of foundation pit and adjacent tunnels

由图6~8可知,一期地下室主体结构完成后,隧道侧围护结构最大变形为16.7 mm;隧道水平变形规律同围护墙变形规律,在土体开挖处变形较大,最大变形为2.6 mm;隧道竖向变形主要表现为沉降,沉降最大值为2.0 mm;隧道收敛变形最大值为2.6 mm。距离基坑较近的隧道受到基坑开挖影响的程度更大,但两条隧道附加变形的范围大致相同,与隧道侧围护结构变形范围较为一致。

表 3 土体基本参数
Table 3 Parameters of soil in HSS

层序	土体名称	E_s /MPa	E_{50} /MPa	E_{ocd} /MPa	E_{ur} /MPa	m	$\gamma_{0.7}$	G_0^{ref}	R_{inter}
①	杂填土	3.0	3.0	3.0	12.0	0.80	2×10^{-4}	20	0.7
②	粉质黏土	4.0	4.0	4.0	16.0	0.75	2×10^{-4}	27	0.7
④-1	粉质黏土	7.0	7.0	7.0	28.0	0.75	2×10^{-4}	47	0.7
④-2	粉质黏土与黏质粉土互层	8.0	8.0	8.0	32.0	0.80	2×10^{-4}	53	0.7
⑤	淤泥质粉质黏土	3.8	4.6	3.8	32.0	0.90	2×10^{-4}	93	0.7
⑥-2	中砂	16.0	16.0	16.0	64.0	0.60	2×10^{-4}	107	0.7
⑥-3	粉质黏土	10.0	10.0	10.0	40.0	0.75	2×10^{-4}	67	0.7
⑦	中砂	22.0	22.0	22.0	88.0	0.60	2×10^{-4}	147	0.7
⑧	粉质黏土	8.0	8.0	8.0	32.0	0.75	2×10^{-4}	53	0.7
⑨-2	圆砾	30.0	30.0	30.0	90.0	0.60	2×10^{-4}	113	0.7
⑩-1	全风化粉质泥砂岩	8.9	8.9	8.9	35.6	0.70	2×10^{-4}	59	0.7
⑩-2	强风化粉质泥砂岩	35.0	35.0	35.0	105.0	0.60	2×10^{-4}	131	0.7
⑩-3	中风化粉质泥砂岩	100.0	100.0	100.0	300.0	0.60	2×10^{-4}	375	0.7

表 4 Plaxis 3D 计算结果
Table 4 Calculation results of FEM

工 况	最大变形/mm					
	一期基坑		二期基坑		三期基坑	
	开挖到底	换拆撑后	开挖到底	换拆撑后	开挖到底	换拆撑后
围护结构水平位移 (隧道侧)	16.7	16.9	23.5	23.9	27.4	27.6
隧道水平位移	2.6	2.7	3.3	3.2	4.8	4.8
隧道沉降	2.0	2.0	2.9	2.9	3.7	3.8
隧道收敛变形	2.5	2.6	3.4	3.4	4.7	4.7

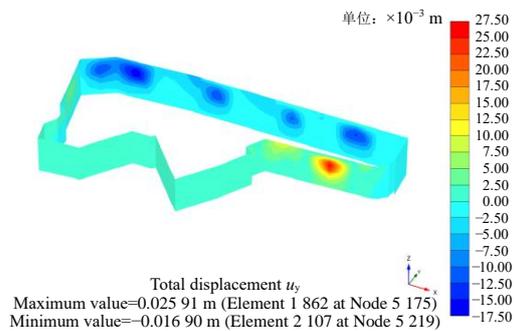


图 6 一期围护结构变形云图

Fig. 6 Cloud diagram of retaining structure deformation at phase I

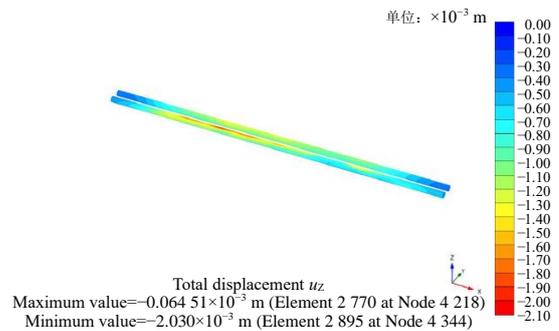


图 8 一期隧道竖向变形云图

Fig. 8 Cloud diagram of vertical deformation of tunnels at phase I

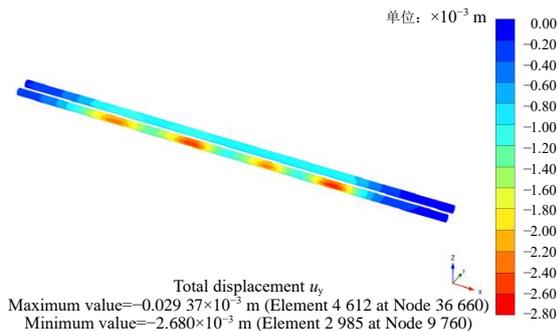


图 7 一期隧道水平变形云图

Fig. 7 Cloud diagram of horizontal deformation of tunnels at phase I

如图 9~11 所示,二期地下室主体结构完成后,隧道侧围护结构变形有所增大,但得益于一期主体结构的完成,有效控制了二期土体开挖围护墙变形的增长,围护墙最大变形仅仅增加了 7 mm。二期拆换撑后,相较于一期拆换撑后隧道附加位移有所增长,但二期开挖造成的隧道附加位移均控制在 1 mm 之内。由于二期土体的开挖,基坑开挖对隧道附加变形的影响范围也随之扩大。

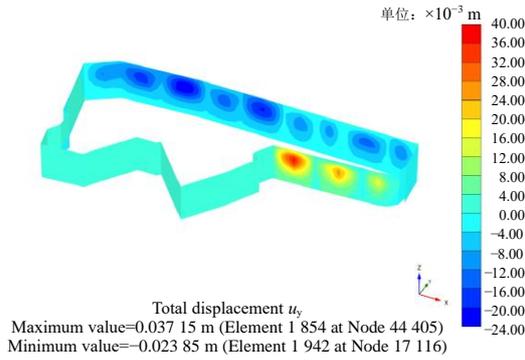


图9 二期围护结构变形云图

Fig. 9 Cloud diagram of retaining structure deformation at phase II

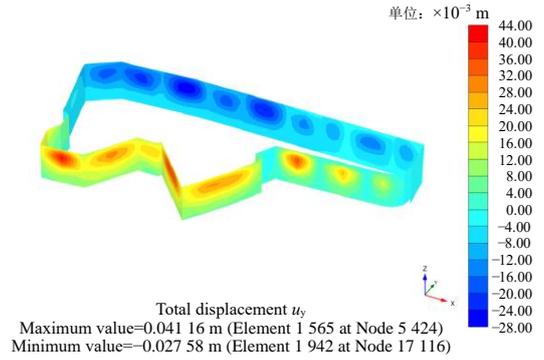


图12 三期围护结构变形云图

Fig. 12 Cloud diagram of retaining structure deformation at phase III

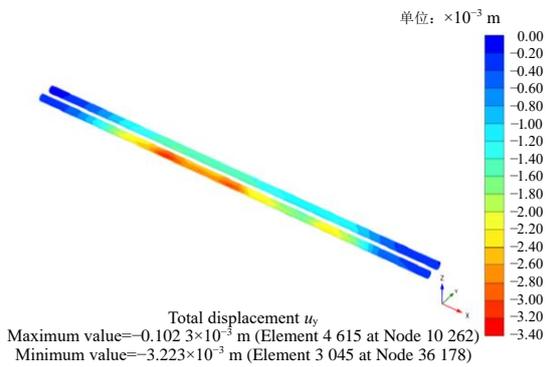


图10 二期隧道水平变形云图

Fig. 10 Cloud diagram of horizontal deformation of tunnels at phase II

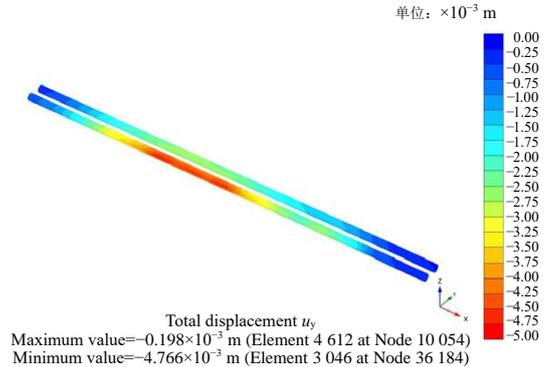


图13 三期隧道水平变形云图

Fig. 13 Cloud diagram of horizontal deformation of tunnels at phase III

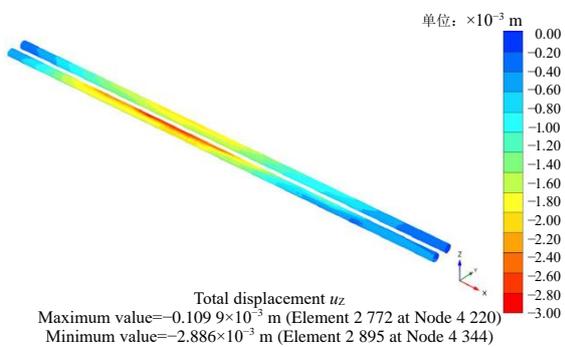


图11 二期隧道竖向变形云图

Fig. 11 Cloud diagram of vertical deformation of tunnels at phase II

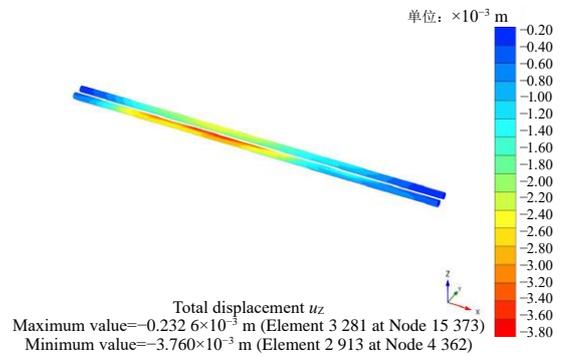


图14 三期隧道竖向变形云图

Fig. 14 Cloud diagram of vertical deformation of tunnels at phase III

由图12~14可知,当坑内土体全部开挖完后,隧道侧围护结构变形显著小于基坑西侧围护结构变形,隧道侧围护结构变形最大值仅为27.6 mm,另一侧却达到了41.2 mm,而且三期基坑开挖引起围护结构的变形较二期仅增加了4 mm,表明基坑东侧坑内土体加固及分坑施工的措施有效控制了围护结构的变形,从而降低了对邻近隧道的影响。且由于分坑9土体的开挖,基坑西侧围护结构变形逐渐向基坑中部发展。

4.2 实测数据分析

基坑开挖过程中,对隧道位移进行了监测,监测点位布设见图15。

隧道最大变形发生于基坑中部附近,图16~18分别展示了邻近下行线隧道X610环~X735环范围内的水平位移、竖向位移及水平收敛变形随时间变化的曲线,此时基坑已基本完成开挖。由图可知,隧道水平位移实测最大值为7.8 mm,最终变形约为6.5 mm,数值模拟结果为4.8 mm,较实测数据偏

小; 隧道沉降实测最大值为 2.7 mm, 最终变形约为 2.1 mm, 数值模拟结果为 3.8 mm, 二者最大值仅相差 1.1 mm; 隧道水平收敛实测最大值为 6.0 mm, 最终变形也为 6.0 mm, 数值模拟结果为 4.7 mm, 结果较为一致。另外, 由于短期内的连续降水抬高了地下水位, 使得隧道沉降有所减小, 但随后竖向变形逐渐恢复。通过实测数据和数值模拟结果的对比可知: 除水平位移数值模拟结果较实测数据偏小以外, 隧道沉降及水平收敛都较为一致, 验证了模型的准确性。

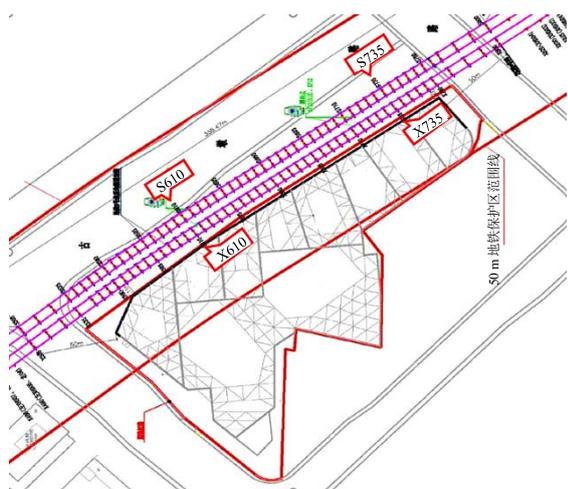


图 15 隧道位移监测点位图

Fig. 15 Layout of monitoring points of tunnels

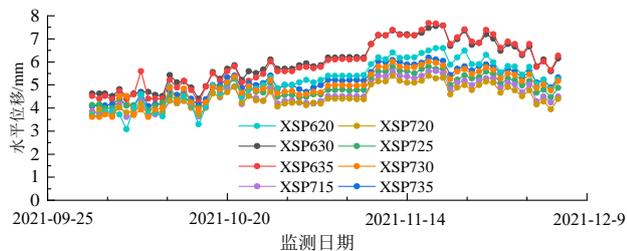


图 16 实测隧道水平位移曲线

Fig. 16 Monitoring data of horizontal displacement of adjacent tunnels

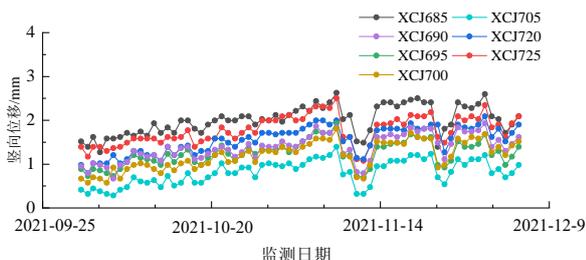


图 17 实测隧道竖向位移曲线

Fig. 17 Monitoring data of vertical displacement of adjacent tunnels

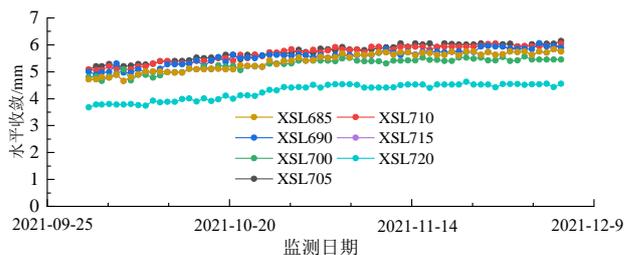


图 18 实测隧道水平收敛曲线

Fig. 18 Monitoring data of horizontal convergence of adjacent tunnels

另外, 由盾构隧道实测变形可见, 隧道的水平位移略大于控制值, 而沉降和水平收敛均小于控制值。由此说明本基坑围护设计方案和技术措施是合理可行的, 可基本满足盾构隧道的变形控制要求。

5 结 论

以杭州某邻近地铁隧道的软土基坑为研究对象, 阐述了其围护设计方案, 结合有限元模拟结果及实测数据的分析, 得出结论如下:

(1) 分坑施工的方式可以较好地控制基坑围护结构的变形, 从而减小基坑开挖对邻近盾构隧道的影 响。

(2) 数值模拟结果表明: 一期地下室主体结构的完成, 有效控制了二期和三期土体开挖引起的围护结构变形。

(3) 邻近隧道变形实测结果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) 地铁隧道实测水平位移、竖向位移及水平收敛位移最大值分别为 7.8 mm, 2.7 mm, 6.0 mm, 基本满足了变形控制要求, 可以认为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] CHANG C T, SUN C W, DUANN S W, et al. Response of a Taipei rapid transit system (TRTS) tunnel to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 151-158.
- [4] CHEN R, MENG F, LI Z, et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 224-235.
- [5] 高广运, 高盟, 杨成斌, 等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 453-459.
- GAO Guang-yun, GAO Meng, YANG Cheng-bin, et al. Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 453-459.
- [6] 李进军, 王卫东. 紧邻地铁区间隧道深基坑工程的设计和实践[J]. 铁道工程学报, 2011, 158(11): 104-111.
- LI Jin-jun, WANG Wei-dong. Design and construction of deep excavation engineering adjacent to the subway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 158(11): 104-111.
- [7] 袁静, 刘兴旺, 陈卫林. 杭州粉砂土地基深基坑施工对邻近地铁隧道、车站的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊1): 398-403.
- YUAN Jing, LIU Xing-wang, CHEN Wei-lin. Effect of construction of deep excavation in Hangzhou silty sand on adjacent metro tunnels and stations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 398-403.
- [8] 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.
- [9] 张鸿儒, 侯永峰. 深基坑逆作开挖的三维效应数值分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊 1): 1325-1327.
- ZHANG Hong-ru, HOU Yong-feng. Numerical analysis of 3D effect of a deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1325-1327.
- [10] 侯永茂, 王建华, 陈锦剑. 超大型深基坑开挖过程三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊 1): 1374-1377.
- HOU Yong-mao, WANG Jian-hua, CHEN Jin-jian. 3D FEM analysis of over size & deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1374-1377.
- [11] 周恩平. 考虑小应变的硬化土本构模型在基坑变形分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- ZHOU En-ping. Application of hardening soil model with small-strain in deformation analysis for foundation pit[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.