

DOI: 10.11779/CJGE2019S1011

邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析

徐中华^{1, 2}, 宗露丹^{1, 2}, 沈健^{1, 2}, 王卫东^{1, 2}

(1. 华东建筑设计研究院有限公司上海地下空间与工程设计研究院, 上海 200002; 2. 上海基坑工程环境安全控制工程技术研究中心, 上海 200002)

摘要: 上海外滩 596 地块超深基坑紧邻地铁 9 号线区间隧道及一系列管线和建筑物。为控制基坑施工对周边环境（尤其地铁隧道）的影响，本项目设计采取分坑顺作、两墙合一地下连续墙、钢支撑轴力补偿体系、被动区加固、抽条分块开挖等系列措施。实测结果表明，远离地铁侧的地下连续墙最大变形为 45.6 mm，邻近地铁侧地下连续墙最大变形为 17.2 mm，邻近地铁隧道的最大隆起量为 12.9 mm。所采用的设计方案满足了地铁的变形控制要求。

关键词: 基坑工程；地铁隧道；顺作法；分坑实施；实测分析

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0041-04

作者简介: 徐中华(1976—)，男，博士，教授级高级工程师，主要从事地下空间工程、深基坑工程的设计与研究工作。

E-mail: zhonghua_xu@arcplus.com.cn。

Deformation of a deep excavation adjacent to metro tunnels in soft soils

XU Zhong-hua^{1, 2}, ZONG Lu-dan^{1, 2}, SHEN Jian^{1, 2}, WANG Wei-dong^{1, 2}

(1. Shanghai Underground Space Engineering Design & Research Institute, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations, Shanghai 200002, China)

Abstract: The deep excavation of Shanghai Bund 596 Plot is adjacent to the metro tunnels of Line 9, pipelines and buildings. In order to control the impact of excavation construction on the metro tunnels, many measures are adopted in the design of the project. The deep excavation is divided into four small pits, and the block excavation method was adopted. Dual-purpose diaphragm walls are used as retaining walls. The steel struts with automatic axial force compensation system are adopted in the small pits just adjacent to the metro tunnels. The soils in the passive zone are reinforced by triaxial cement-soil mixing piles. The monitored results show that the maximum lateral displacement of the diaphragm walls far away from the tunnels and that just adjacent to the tunnels are 45.6 and 17.2 mm, respectively. The maximum upheaving of the tunnels is about 12.9 mm. The design scheme satisfies the requirements of deformation control of the adjacent tunnels.

Key words: excavation; metro tunnel; bottom-up method; sub-pitting; measurement analysis

0 引言

近年来，邻近既有运营地铁站及隧道的基坑工程活动日益频繁，为保证地铁隧道结构安全以及运营的舒适性，地铁隧道对基坑引起的变形要求极其严格。为此，正确评估软土地区基坑开挖对邻近地铁隧道影响，是岩土工程中一项亟待解决的任务。

现场监测能够综合体现各种因素的影响，实时反馈隧道的稳定与安全性，也是分析基坑工程变形规律的基本依据。目前，已有诸多学者对基坑开挖影响下的邻近地铁隧道变形特性进行研究。Burford^[1]最早分析了挖深 12 m 的基坑施工引起邻近隧道的隆起位移及工后隆起。况龙川^[2]、蒋洪胜等^[3]对距地铁隧道仅 4 m 的上海广场深基坑工程项目监测，发现基坑开挖导致隧道发生明显侧移及竖向收敛变形，且位移量与基

坑开挖范围相关。

本文以邻近地铁 9 号线隧道的上海外滩 596 地块超深基坑项目为依据，对基坑及邻近隧道监测数据进行分析，研究多种设计、施工措施下的隧道保护情况，为该类型基坑工程项目提供参考。

1 工程简介

1.1 工程概况

上海外滩 596 地块项目位于上海黄浦区，项目地面以上为 2 幢高度为 80 m 的办公塔楼 S1、S2，整体设置三层地下室。S1、S2 基坑面积分别约为 4626，

基金项目：上海市科学技术委员会科研计划项目（13231201006）

收稿日期：2019-04-30

3144 m², 基坑普遍区域挖深约为 17.0~17.15 m, S2 基坑降板区域挖深为 18.15 m。基坑地块中部下方为地铁 9 号线区间隧道, 9 号线隧道距基坑最近距离约 8 m。基坑平面如图 1 所示。

1.2 工程地质概况

本工程场地从地表至约 29 m 深主要以淤泥质黏土和粉质黏土为主, 且浅层分布较厚的杂填土和江滩土 (超过 10 m), 其下为砂质粉土和粉砂层。

场地浅部地下水属潜水类型, 水位埋深约 0.3~2.5 m。深部第⑦、第⑨层为承压含水层, 第⑦层承压水水位埋深约为 4.1~7.6 m, 且局部区域⑦层、⑨层相对连通, 水量补给丰富, 无法将承压水隔断, 因此基坑实施期间需采取降承压水措施。各层土参数如图 2 所示。

2 基坑支护设计

为确保满足基坑开挖工程中对 9 号线区间隧道的

保护, 596 地块基坑围护总体设计方案采取以下保护措施。基坑支护结构 A—A 剖面图如图 2 所示。

(1) 分坑顺作: 将 S1 基坑分为 S1-A 区、S1-B 区, S2 基坑分为 S2-A 区、S2-B 区, 先后分别实施, 具体分区如图 1 所示。

(2) 基坑周边采用“两墙合一”地下连续墙: S1-A、S2-A 区地连墙厚度为 0.8 m, S1-B、S2-B 区地连墙厚度为 1 m。S1-A 区、S2-A 区地墙深度为 49.65 m, S1-B 区、S2-B 区地墙深度为 53.65 m。

(3) 被动区加固: 采用三轴水泥土搅拌桩进行坑内被动区土体进行加固。S1-A 区、S2-A 区邻近地铁侧的加固宽度为 8.05 m, 加固深度自地表至基底以下 5 m。S1-B 区、S2-B 区及 S2-A 区邻近复兴东路侧的加固深度自地表至基底以下 10 m, 满堂布置。

(4) 支撑体系: S1-A 区和 S2-A 区竖向设置四道钢筋混凝土支撑, 同时对邻近 9 号线区间隧道侧土方“抽条、分块”开挖。S1-B 区和 S2-B 区竖向设置

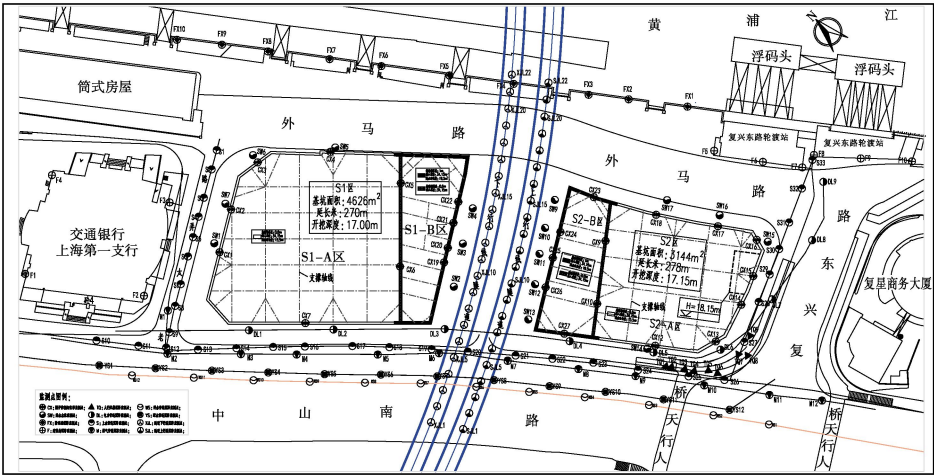


图 1 基坑平面及监测点布置图

Fig. 1 Plan view of excavation and layout of monitoring points

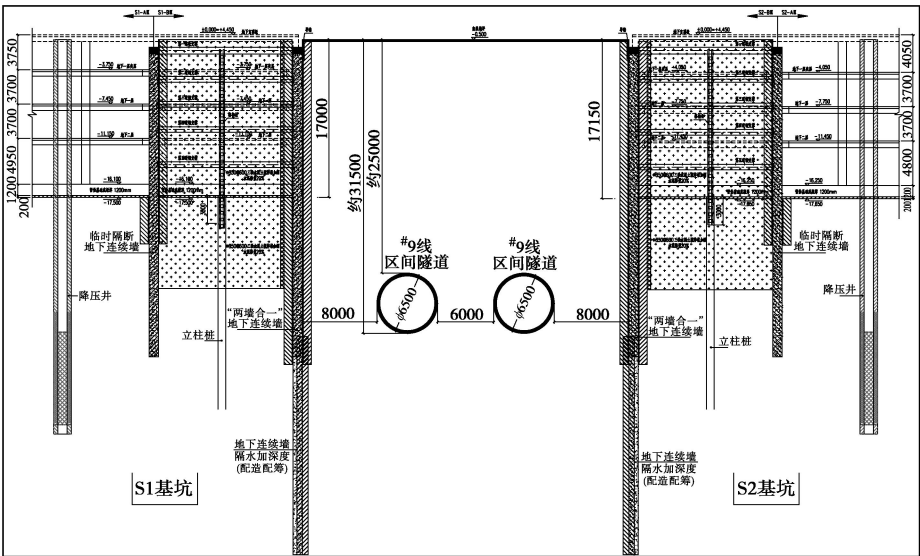


图 2 基坑支护体系剖面图

Fig. 2 Sectional view of supporting system

五道支撑, 第一道采用钢筋混凝土支撑, 第二至第五道采用钢管支撑, 钢支撑体系采用可自动施加轴力补偿的装置。

3 工程实施与监测

3.1 施工工况

本工程的施工流程为: 首先施工周边地下连续墙、内部临时隔断以及坑内加固, 接着施工面积较大、离地铁隧道较远的 S1-A (S2-A) 区, 待 S1-A (S2-A) 区地下结构完成后进行 S1-B (S2-B) 区基坑的施工。本工程根据实际施工步划分为 38 个工况, 如表 1 所示。

表 1 施工工况

Table 1 Construction stages

工况	施工内容	完成时间
步骤 0	地下连续墙、立柱与立柱桩、坑内加固施工;	2014.5.13
步骤 1	S2-A 区开挖至-1.7 m, 形成第一道支撑;	2014.6.16
步骤 2	S1-A 区开挖至-1.7 m, 形成第一道支撑;	2014.7.10
步骤 3	S2-A 区开挖至-6.0 m, 形成第二道支撑;	2014.7.12
步骤 4	S2-A 区开挖至-10.1 m, 形成第三道支撑;	2014.7.26
步骤 5	S1-A 区开挖至-5.9 m, 形成第二道支撑;	2014.8.5
步骤 6	S2-A 区开挖至-13.85 m, 形成第四道支撑;	2014.8.8
步骤 7	S1-A 区开挖至-9.9 m, 形成第三道支撑;	2014.8.20
步骤 8	S2-A 区开挖至坑底, 形成基础底板;	2014.9.2
步骤 9	S1-A 区开挖至-13.7 m, 形成第四道支撑;	2014.9.10
步骤 10~11	S2-A 区拆除第四、第三道钢筋混凝土支撑;	2014.10.5
步骤 12	S1-A 区开挖至坑底, 形成基础底板;	2014.10.11
步骤 13	S1-A 区拆除第四道支撑;	2014.10.12
步骤 14	S2-A 区拆除第二道支撑;	2014.10.26
步骤 15	S2-B 区开挖至-1.7 m, 形成第一道支撑;	2014.11.1
步骤 16	S2-B 区开挖至-4.8 m, 形成第二道支撑;	2014.11.3
步骤 17	S2-B 区开挖至-7.65 m, 形成第三道支撑;	2014.11.5
步骤 18	S2-B 区开挖至-10.5 m, 形成第四道支撑; S2-A 区拆除第一道支撑;	2014.11.9
步骤 19	S1-A 区拆除第三道支撑;	2014.11.10
步骤 20	S2-B 区开挖至-14.25 m, 形成第五道支撑;	2014.11.12
步骤 21	S2-B 区开挖至坑底, 形成基础底板;	2014.11.21
步骤 22	S2-B 区拆除第五道支撑;	2014.11.23
步骤 23	S1-A 区拆除第二道支撑;	2014.11.26
步骤 24	S1-B 区开挖至-1.7 m, 形成第一道支撑;	2014.11.29
步骤 25	S1-B 区开挖至-4.8 m, 形成第二道支撑;	2014.11.30
步骤 26	S1-B 区开挖至-7.5 m, 形成第三道支撑;	2014.12.1
步骤 27	S2-B 区拆除第四道支撑;	2014.12.4
步骤 28	S2-B 区拆除第三道支撑;	2014.12.5
步骤 29	S1-B 区开挖至-10.2 m, 形成第四道支撑;	2014.12.7
步骤 30	S1-B 区开挖至-14.0 m, 形成第五道支撑;	2014.12.10
步骤 31	S1-A、S2-B 区分别拆除第一道、第二道支撑;	2014.12.16
步骤 32	S1-B 区开挖至坑底, 形成基础底板;	2014.12.19
步骤 33	S2-B 区拆除第一道支撑;	2014.12.20
步骤 34~38	S1-B 区依次拆除第五至第一道支撑;	2015.1.28

3.2 现场监测

为了及时收集和反馈围护结构、周边土体及环境在施工中的变形信息, 基坑施工过程中对各分区设置了围护结构及周边环境监测项目, 各测点平面布置如图 1 所示。

4 实测变形分析

4.1 墙体侧移分析

图 3 为各分区的地连墙侧向位移监测点在第二皮土方开挖至开挖到基底的工况下的墙体侧向位移变化

情况。由图可知, 各测点的变形量均随着开挖深度增加而逐步增大, 且最大变形发生的位置逐渐下移, 变形整体形态为“纺锤型”。

(1) A 区墙体侧移分析

CX1~CX7 位于 S1-A 分区地连墙内 (图 1), CX9~CX18 位于 S2-A 分区地连墙内。从图 3 可看出, S1-A、S2-A 分区基坑最大侧向位移分别发生在测点 CX1 和 CX12, 最大侧移量分别为 45.7, 24.3 mm, 均发生在基坑开挖面附近, 最大侧移与开挖深度比值分别为 0.27%, 0.14%。尽管两个分区基坑挖深相近, 但 S1-A 分区开挖时间相对偏长, 且 S2-A 分区南侧靠近隧道处地墙厚度增厚且增加了坑内裙边加固, 因此 S1-A 分区最大变形量明显较 S2-A 分区的变形量大。

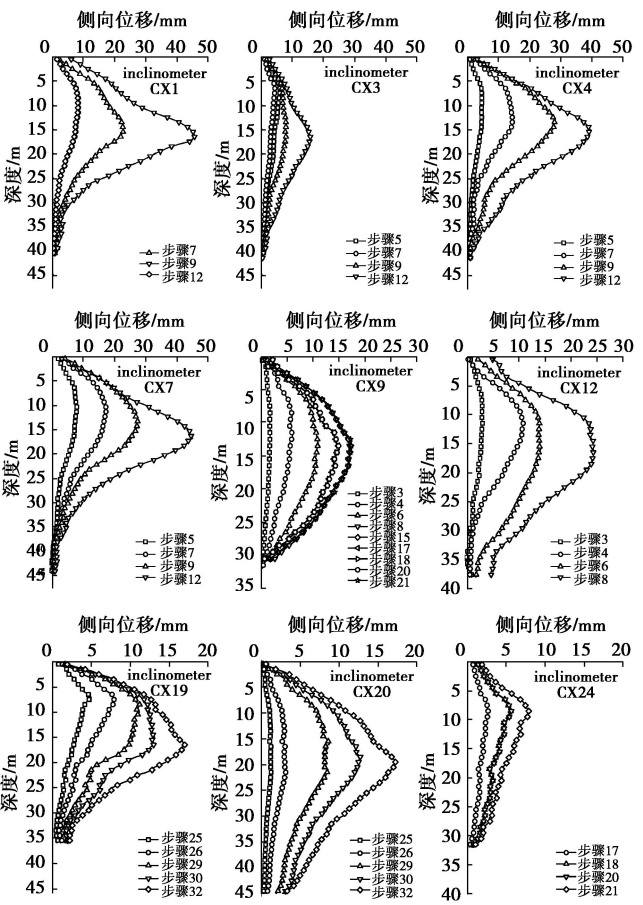


图 3 地下连续墙在各工况下的侧向变形

Fig. 3 Deformation of lateral wall at various stages

受基坑变形的空间效应影响, 位于各侧墙体角部测点的侧移普遍小于基坑中部的测点, 如 CX3 测点小于邻近 CX4 测点。此外, 基坑长边墙体中部测点变形量较短边侧移量偏大, 如 CX7 测点较测点 CX4 变形偏大。S1-A、S2-A 分区中坑内被动区加固区域较未加固区域变形量更小。邻近地铁 9 号线区间隧道的墙体最大侧移量位于测点 CX9, 侧移量为 17.2 mm, 与开挖深度的比值分别约为 0.1%, 表明邻近隧道侧变形量控制显著。

(2) B区墙体侧移分析

图3中S1-B区、S2-B区基坑最大侧向位移分别发生在测点CX20、CX24,最大侧移量分别为17.2 mm、11.6 mm,最大侧移与开挖深度比值分别为0.1%、0.07%。由于邻近隧道的S1-B区、S2-B区基坑规模较小,且S1-B区、S2-B区基坑各侧均采用1m厚地墙及坑内满堂加固措施,故S1-B区、S2-B区基坑地墙侧向变形量明显小于S1-A区、S2-A区基坑,对控制邻近9号线隧道变形提供有利作用。

对于中隔墙而言,在S1-A区、S2-A区开挖时其变形向S1-A区、S2-A区坑内逐渐增大,而在S1-B区、S2-B区开挖时,由于S1-B区、S2-B区的卸土逐步减小了中隔墙后的土压力,因此中隔墙的变形在此期间的增量为负值,即变形有向逆作区方向回复的趋势。以CX9测点为例,两者在步骤12至步骤16期间的位移量减小值分别为1.6 mm,减小了9%。

4.2 坑外潜水水位变化分析

图4是坑外地下水位随时间的变化情况。可以看出坑外地下水位变化很小,基坑最大水位变化值仅为1.1 m,说明地下连续墙的施工质量很好,对邻近地铁隧道变形影响也有很好的控制作用。

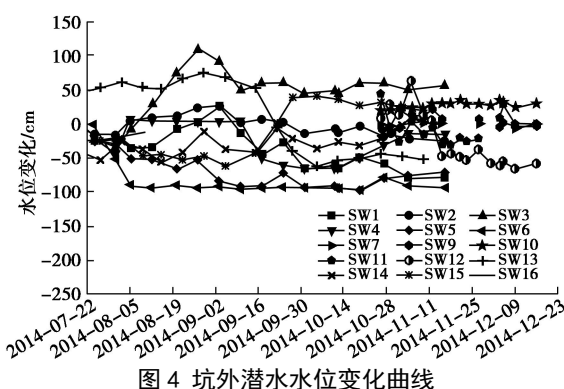


图4 坑外潜水水位变化曲线

Fig. 4 Curves of water level variation outside excavation

4.3 邻近建(构)筑物变形分析

距基坑最近的人行天桥在基坑开挖期间的沉降监测结果如图5所示,人行天桥路最大沉降量仅为5.8 mm,可见在基坑开挖期间,对邻近建(构)筑物的沉降影响均较小。

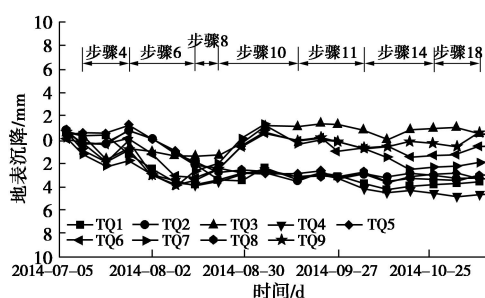


图5 邻近人行天桥历时沉降曲线

Fig. 5 Settlement curves of adjacent structures

4.4 邻近地铁隧道变形分析

图6是9号线隧道在各阶段的变形空间分布曲线,可看出靠近分区中部的竖向位移大于角部,体现出空间变形效应。由于隧道位于基坑底标高以下,受土体开挖卸荷的影响,隧道的竖向位移表现为隆起,最大隆起量为12.9 mm,表明基坑开挖对邻近9号线地铁隧道影响可控。

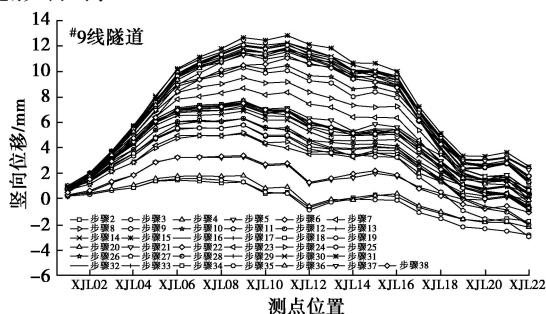


图6 9号线隧道各阶段的变形空间曲线

Fig. 6 Spatial distribution of settlement of metro tunnels

5 结 语

上海外滩596地块项目紧邻地铁9号线隧道,为减小基坑施工对地铁隧道的影响,采用“分坑顺作”方案,周边围护体采用“两墙合一”地下连续墙,邻近地铁侧的基坑分区采用可自动施加轴力补偿的钢支撑体系、满堂加固、采用“抽条、分块”开挖方式。据基坑工程监测结果可知,远离地铁侧的地下连续墙最大变形为45.6 mm,而邻近地铁侧地下连续墙最大变形仅为17.2 mm,有效控制了邻近地铁侧基坑围护体变形。受基坑开挖卸荷的影响,邻近的9号线地铁隧道的最大隆起量为12.9 mm。基坑外侧潜水水位变化很小,基坑四周建(构)筑物沉降量均较小,表明所采用的设计方案满足了苛刻的环境变形控制要求。

参考文献:

- [1] BURFORD D. Heave of tunnels beneath the shell centre[J]. Géotechnique, 1988, 38(1): 135 - 137.
- [2] 况龙川. 深基坑施工对地铁隧道的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, 3: 284 - 288. (KUANG Long-chuan. Influence of construction of deep foundation pit on tunnels of metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 3: 284 - 288. (in Chinese))
- [3] 蒋洪胜, 侯学渊. 基坑开挖对临近软土地铁隧道的影响[J]. 工业建筑, 2002, 5: 53 - 56. (JIANG Hong-sheng, HOU Xue-yuan. The influence of deep excavation on adjacent metro tunnel in soft ground[J]. Industrial Construction, 2002, 5: 53 - 56. (in Chinese))