

地下车库改造对邻近运营地铁隧道的影响

沈浩然

哥伦比亚大学工程和应用科学学院, 美国 纽约

收稿日期: 2022年9月24日; 录用日期: 2022年10月14日; 发布日期: 2022年10月26日

摘要

邻近运营地铁隧道的新建或改造地下工程,除了要注意基坑安全,区间隧道的变形也是需要关注的重点。本文以杭州市某邻近地铁隧道的地下车库改造工程为例,采用“分坑施工”的设计方案,结合施工期间对地铁隧道的全过程监测,研究地下车库改造对邻近运营区间隧道的影响。本文施工经验表明:分坑施工的设计方案有利于控制基坑变形和邻近区间隧道的变形;已有地下室的清障方案需考虑施工进度,应避免因清障而耽误基坑支护结构施工;地下车库改造期间邻近区间隧道会随着土体向基坑侧水平位移,并伴随有道床沉降和水平收敛,并进一步引发隧道漏水和裂缝,因此对基坑和区间隧道的实时监测尤为重要。

关键词

地下车库改造,深基坑,运营地铁隧道

The Impact of the Underground Garage Improvements on the Adjacent Operational Metro Tunnel

Haoran Shen

The Fu Foundation School of Engineering and Applied Science, Columbia University, New York, USA

Received: Sep. 24th, 2022; accepted: Oct. 14th, 2022; published: Oct. 26th, 2022

Abstract

For new or rebuilt underground projects close to operational metro tunnels, the deformation of the tunnel is also a key concern in addition to the safety of the foundation pit. This paper takes an underground garage renovation project near the underground tunnel in Hangzhou as an example, adopts a “split-pit construction” design scheme, combines the whole process monitoring of the

underground tunnel during construction, and studies the impact of the underground garage renovation on the adjacent operational tunnel. The construction experience in this paper shows that the “split-pit” design solution facilitates controlling deformations in the pit and in the adjacent tunnel; The clearance plan for existing basements needs to take into account the construction schedule, and the construction of foundation support structures should avoid being delayed by clearance; During the renovation of the underground garage, the adjacent tunnel will move horizontally with the soil to the foundation side, accompanied with settlement and horizontal convergence, and will further cause tunnel leakage and cracks, so real-time monitoring of the foundation and tunnel is particularly important.

Keywords

Underground Garage Renovation, Deep Foundation Pit, Operational Metro Tunnel

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国经济建设的迅速发展,城市化进程不断加快,在东部发达城市中,地下空间资源日益稀缺,并伴随着日益增加的地下空间改造工程。近年来,越来越多的地下空间改造工程毗邻运营地铁隧道。地铁隧道多为盾构法施工的柔性结构,对周边土体变形极为敏感,过大的变形会导致管片连接张开,引发漏水,甚至发生大变形损坏,严重威胁地铁安全运营。因此,控制运营地铁隧道形变是地下空间改造工程的重中之重。

目前关于深基坑施工对运营地铁的影响较大。况龙川(2002) [1]较早研究深基坑施工对邻近运营地铁隧道的变形,发现在地铁隧道旁侧开挖深基坑将引起隧道向基坑方向产生较明显侧移并使隧道断面呈横椭圆形状的变形,直接影响到隧道的使用功能和安全性。郑刚等(2016) [2]总结了大量工程案例,实测数据表明基坑围护结构对于控制邻近地铁隧道变形有着重要作用,并进一步指出围护结构悬臂型变形模式对控制隧道位移最有利,围护结构踢脚型变形模式则最不利。魏纲等(2018) [3]针对杭州地铁2号线旁边某深基坑开挖工程,提出采取“分块开挖、随挖随撑、分层浇筑”的方式,并减小靠近隧道侧的基坑开挖暴露宽度。陈辉(2020) [4]以郑州地区某邻近地铁隧道的超大深基坑为例,采用坑中坑顺逆结合的设计方案,结合施工全周期的各项监测数据,研究顺逆结合超大深基坑对称开挖对既有运营地铁区间隧道的影响。

总的来看,目前关于深基坑对邻近地铁隧道的研究集中在新建深基坑施工和围护结构等方面的研究 [5] [6] [7] [8],较少有报道地下空间工程改造对邻近地铁隧道影响的研究。本文以杭州市某地下车库改造工程为例,对隧道变形进行特征分析,并结合现场实测结果,对地下车库改造引起的隧道水平位移、道床沉降和水平收敛进行了实测分析,以期为类似工程提供参考。

2. 工程概况

2.1. 项目概况

该项目位于杭州市拱墅区莫干山路与环城北路交叉口的东北角,场地内分布有一层老地下室,本工程场地大范围为市府原地下车库,为地下一层,采用筏板基础,底板底埋深为6.05 m。原场地内分布有一层老地下室,改造完成后新地下室车库为纯地下二层,基础形式为桩筏基础,采用钻孔灌注桩。基坑

面积约 8100 m²，周边延长约 370 m，基坑开挖深度为 11.90 m，属深基坑项目。

基坑西侧为地铁 2 号线武林门站至沈塘桥站路区间，受影响里程桩号为右线和左线 SDK24 + 970~SDK25 + 135，地铁 2 号线轨道已经完成并投入运营。由图 1 可见，本工程基坑地下室边线距离 2 号线右线隧道最近处约 15.7 m，地下室边线距离 2 号线左线隧道最近处约 28.0 m，汽车坡道基坑边线距离 2 号线右线隧道最近处约 7.4 m。2 号线区间隧道顶埋深约 11.4 m，隧道底位于 3_b 淤泥质粉质粘土层中。该区间隧道管片采用装配式钢筋混凝土管片，混凝土强度等级为 C50，管片外径 6200 mm，盾构隧道内径为 5500 mm，厚 350 mm，宽 1200 mm，环向分 6 块，采用 5.8 级螺栓连接，错缝拼装。区间已于 2017 年 6 月开通运营，运营情况稳定。结构设计使用年限为 100 年，结构的安全等级为一级。

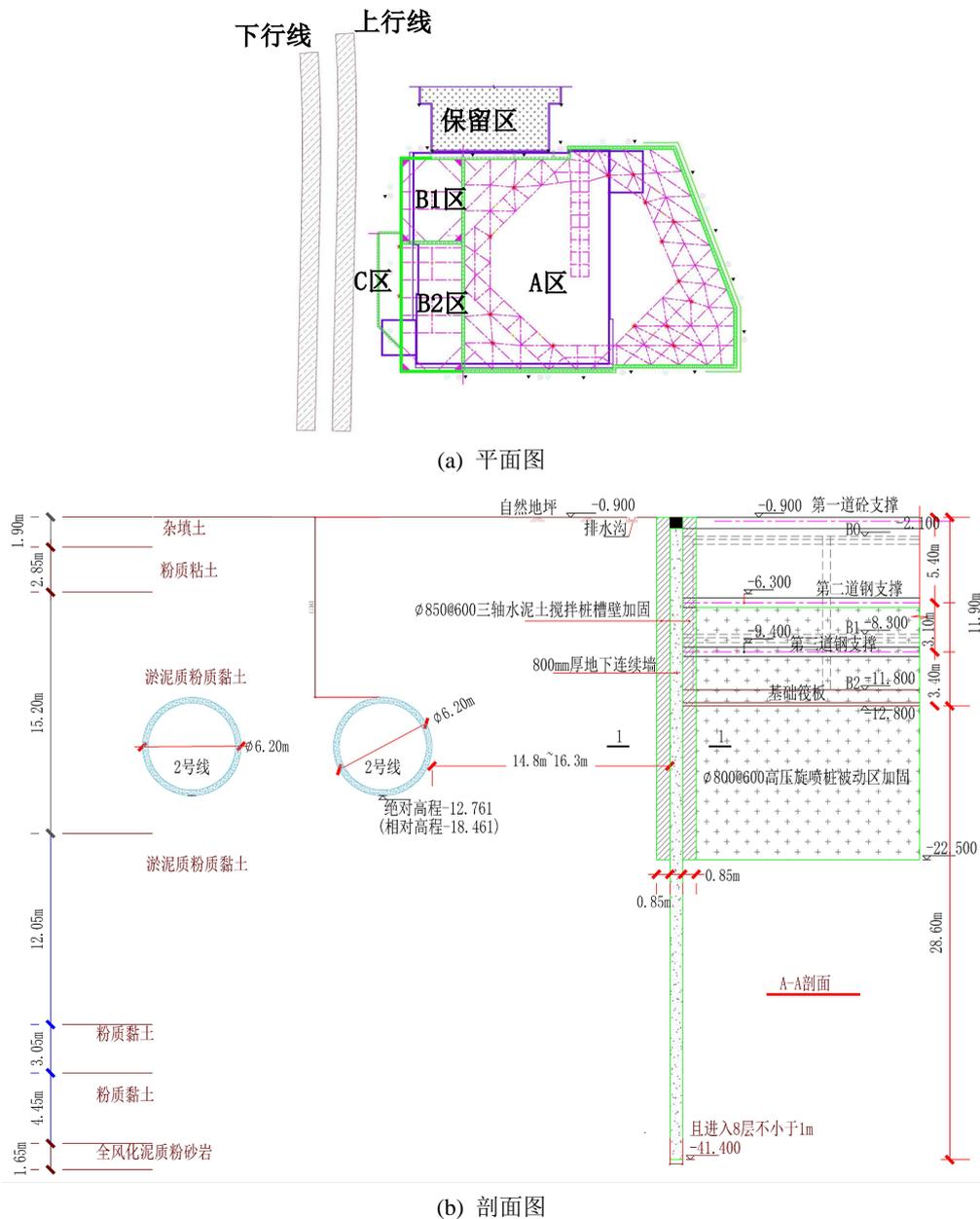


Figure 1. Relative position of the metro tunnel to the foundation pit. (a) Plan drawing; (b) Sectional drawing
图 1. 地铁隧道与基坑的相对关系。(a) 平面图; (b) 剖面图

2.2. 工程地质与水文地质

根据浙江大地岩土勘察有限责任公司提供的《岩土工程勘察报告》，基坑开挖深度内各土层的特征如下：

① 层：杂填土

色杂，松散，顶部 20 cm 左右为砟地面，其下为碎石、块石、碎砖及砂垫层为主，碎石粒径多小于 10 cm，块石粒径多大于 10 cm，最大可大于 60 cm 以上，再下主要为灰 - 灰黑色黏性土夹碎石、碎砖及少量建筑生活垃圾等组成，水平向和垂直向都不均。层顶标高为 5.32~4.44 m，层厚 1.50~7.20 m。

② 层：粉质黏土

灰 - 灰黄色，软可塑，厚层状，个别混铁锰质氧化斑点，稍有光滑，韧性中等，干强度中等。层顶标高为 2.94~2.94 m，层厚为 1.05 m。

③ a 层：粉质黏土

灰色，软塑，厚层状，混青灰色斑纹，局部夹粉土团块，稍有光泽，韧性中等，干强度中等。层顶标高为 2.30~1.62 m，层厚 1.70~1.80 m。

③ b 层：淤泥质粉质黏土

灰色，软 - 流塑，厚层状，混腐殖质植物根、茎，局部有机质富集而成灰黑色，局部夹粉质黏土，偶夹粉土团块，该层高压缩性，性质较差。层顶标高为 1.60~-1.93 m，层厚 13.60~18.10 m。

其余详见地质勘察报告(表 1)。

Table 1. Bearing capacity indicators for each geotechnical layer and recommended parameters for pile foundation

表 1. 各岩土层承载力指标及桩基础参数建议值

层号	岩性名称	地基土参数		桩基参数			
		压缩模量 Es	承载力特 征值 fak	钻孔灌注桩		预应力管桩	
				桩侧摩阻力 特征值 q _{sia}	桩端阻力特 征值 q _{pa}	桩侧摩阻力 特征值 q _{sia}	桩端阻力 特征值 q _{pa}
MPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa		
②	粉质黏土	4.5	100	14		15	
③a	粉质黏土	4.0	80	10		11	
③b	淤泥质粉质黏土	2.4	70	7		8	
③c	淤泥质粉质黏土	2.7	60	7		8	
④	粉质黏土	5.5	125	26		30	
⑤	含黏性土砾砂	10.0	180	40		45	
⑥a	粉质黏土	6.8	160	28	400	32	800
⑥b	粉质黏土	4.8	130	24	300	28	600
⑧a	全风化凝灰质粉砂岩	7.0	190	40	900	50	1200
⑧b	强风化凝灰质粉砂岩		280	60	1600	80	2500
⑧c	中风化凝灰质粉砂岩		600	90	2500		4000

场地勘探深度以浅的地下水类型按其含水介质、水动力特征及其赋存条件，主要分为第四系松散岩类孔隙潜水、第四系松散岩类孔隙承压水及基岩裂隙水。综合分析基坑形状、面积、开挖深度、地质条件及周围环境，本工程特点如下：

1) 基坑开挖深度影响范围内土质较差。场地内分布有深厚软弱土层, 基坑开挖面上下为③c 层淤泥质粉质粘土, 且开挖面下方将近 20 米范围均为淤泥质土, 对基坑的变形及稳定性控制较为不利。

2) 基坑普遍开挖深达 11.9 米, 属深基坑工程。深基坑工程实施过程中受到基坑开挖、大气降水以及施工动载等许多不确定因素的影响, 因此在软土地基中开挖深基坑工程存在着一定的风险性。

3) 基坑场地内部现状条件复杂, 除局部机械停车库和自行车库埋深较浅, 开挖范围内大面积为老地下室结构, 埋深超过 6 米, 清障难度较大。因此在本基坑工程正式实施前, 应制定合理的清障方案, 确保后续新地下室周边围护体和工程桩的顺利施工。

4) 基坑周边环境较为复杂, 保护要求较高。尤其是西侧莫干山路下方为 2 号线区间隧道, 距离西侧地下室外地连墙最近处为 14.8 米, 是本工程基坑开挖过程中的重点保护对象, 应针对地铁采取有效的保护措施。因而围护方案在保证基坑安全性的同时, 应严格控制基坑的变形, 尽量减小基坑开挖对周边环境的影响。

5) 本工程基坑面积不大, 四周距离红线较近及保留建筑, 用地条件较为紧张, 因此围护方案须考虑充分利用场地, 有利于施工方便以保证基坑安全顺利实施。

因此, 总的来看, 本基坑开挖影响范围内土层主要为杂填土、粉质黏土、粘质粉土、淤泥质粉质黏土, 土性差, 且基坑西侧距离地铁 2 号线区间隧道较近, 基坑开挖需破除原地下室结构并清障, 工序复杂, 需在保护地铁的安全的前提下施工是本工程基础土方开挖的难点, 基坑土方开挖的施工部署等的合理性、科学、规范, 会直接影响基坑围护体系及工程施工的安全与质量。施工方编制了合理的土方开挖方案和施工顺序, 采取分层、均匀、对称开挖土方, 控制土方开挖高差, 防止土方滑坡, 避免由不合理施工引起或造成围护体系的不稳定, 控制围护体系不利影响及工程桩的偏倾、断裂是本工程土方开挖的施工重点。

2.3. 地铁安全保护施工方案

2.3.1. 地铁隧道维护设计

本工程场地西侧邻近 2 号线区间, 地下室外墙距离盾构边线最近处约 15 m。盾构隧道顶标高接近基坑开挖面, 为控制基坑施工期间对盾构隧道的不利影响, 主要采取以下围护设计和施工保护措施:

1) 分坑实施

大基坑中部设置分隔墙, 分为 A 区、B 区(如图 1(a)所示), 其中 B 区中部亦设置分隔墙划分为 B1、B2 两个区块, 将基坑工程划大为小, 充分实现基坑的空间效应。邻近盾构隧道侧的 B 区基坑面积较小, 施工进度较快, 提高基坑的空间效应和实效性, 有利于基坑围护结构的变形控制。整体施工顺序为: 先行施工 A 区, 待其地下室结构施工完成后再进行 B2 区的土方开挖, B2 区地下室结构施工完成后再进行 B1 区基坑的土方开挖。整个大地下室施工完成后, 再进行 C 区块的开挖。

2) 严格控制邻近盾构侧围护结构的变形

包括以下支护方案: 邻近盾构的 B 区周边围护结构普遍采用地下连续墙, 加大整体刚度; B 区第一道支撑采用钢筋混凝土支撑, 第二道、第三道支撑采用钢支撑, 并采取轴力自动补偿系统, 确保支撑安全可靠; B 区坑内采用高压旋喷桩进行被动区加固, 加固宽度为 B 区基坑宽度, 加固深度超越盾构底标高, 从而减小围护结构坑底位置的土体变形; B 区基础底板垫层设置配筋垫层, 利用时间效应可在坑底位置短期形成有效的支撑, 进一步控制软土蠕变, 减小变形。水泥搅拌桩、高压旋喷桩、钻孔灌注桩、地下连续墙均采用跳打方式施工, 跳打的间隔根据监测结果调整。

3) 控制支撑拆除时发生的变形

B 区基坑内混凝土支撑拆除应采用静力切割技术, 在底板位置设置斜向换撑, 进一步控制围护结构

总位移，减小基坑施工对隧道的变形影响。

4) 控制施工荷载

严格控制基坑西侧周边的施工荷载，严禁挖土、运输机械等动荷载行驶。基坑外周边 10 m 范围内施工静荷载不得超过 15 KN/m^2 ，10 m 范围以外施工静荷载不得超过 5 KN/m^2 。

2.3.2. 地铁保护清障方案

该地下车库改造工程不同于新基坑的开挖，原有的地下室需要拆除，清障过程必然会对邻近区间隧道产生影响，为控制影响，本项目在实施过程中采用了如下的清障方案：

- 1) 设置砼肋墙，对原地下室外墙进行加固。
- 2) 拆除 C 区块顶板，底板咬合桩位置进行静力切割开槽，开槽完成后及时进行回填土并压实。
- 3) 施工南侧钻孔灌注桩及水泥搅拌桩，施工完成后，采用静力切割，拆除老地下室顶板及夹层。
- 4) B 区拟施工地下连续墙及高压旋喷桩位置，对老地下室底板进行开槽破除。
- 5) 上述底板破除完成，且中部分隔桩及上部挡土墙施工完成后，B 区相应范围进行回填。

2.3.3. 基坑降排水对地铁的保护措施

由于基坑开挖范围内以渗透性差的淤泥质粉质黏土为主，故坑内外不设置降水井，在基坑外四周设 300×400 的砖砌排水沟，以排(截)除地表水及基坑内抽取的水。基坑外四周每隔 30 米，设一个集水井，排水沟的水经集水井统一排入沉淀池，经沉淀后排向市政污水管网，本工程场地东南角及西北角均有市政污水管井，现场按要求在东南角及西北角设置两个沉淀池。严禁直接排到地下，防止回灌基坑。基坑内根据实际施工情况设置盲沟和集水井，基坑底排水沟离坡脚 4 m 以上。施工挖土期间应确保坑内土体处于较干燥状态，并防止坑外明水流入坑内。

2.3.4. 地铁监测项目

地铁监测主要包括隧道道床沉降，隧道水平位移，隧道水平收敛，采用人工监测与自动化监测相结合的方式。采用的仪器包括天宝 DINI03 水准仪、钢钢条码尺、徕卡 D3a 型激光测距仪等。根据浙江省工程建设标准《城市轨道交通结构安全保护技术规程》(DB33/T 1139-2017)，本项目确定基坑正对地铁隧道投影范围内每 6 m (5 环) 布设 1 个断面，两端外扩区域每 12 m (10 环) 布设 1 个断面。自动监测系统从安装调试运行开始，进行全天 24 小时连续监测，系统将后期监测数据与初始值进行对比，计算出每个测点的位移变量。自动化监测系统组成示意如图 2(a) 所示，测量基准点布设如图 2(b) 所示。



(a)

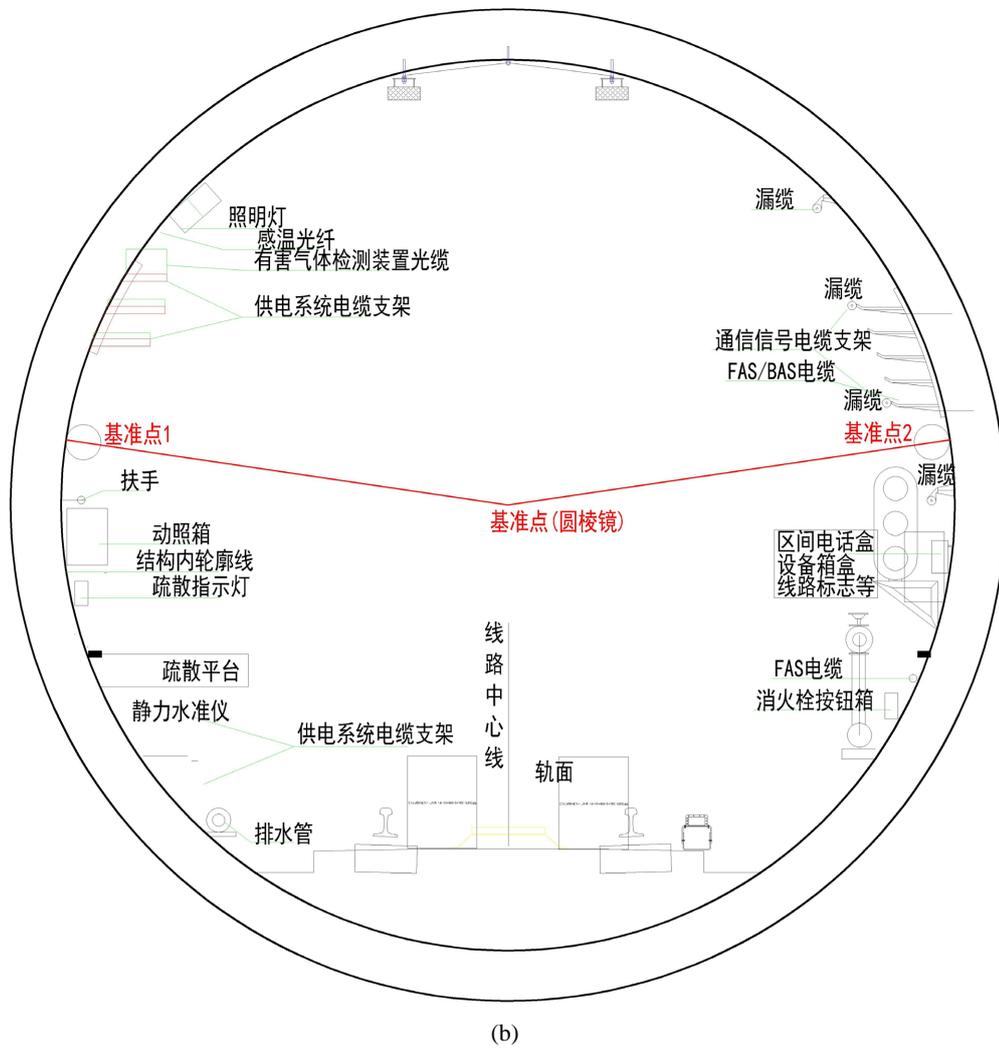


Figure 2. (a) Schematic diagram of the automated monitoring system; (b) reference point layout
 图 2. (a) 自动化监测系统组成示意图; (b) 基准点布设断面图

上下行各 20 个断面，共 40 个断面。各监测项目同一断面布设，测点数量详见下表 2。

Table 2. Statistical table of the monitoring points
 表 2. 地铁监测点统计表

序号	监测项目	线路	测点数量	总数量
1	隧道道床沉降	2 号线上行线	20	40
2		2 号线下行线	20	
3	隧道水平位移	2 号线上行线	20	40
4		2 号线下行线	20	
5	隧道水平收敛	2 号线上行线	20	40
6		2 号线下行线	20	
7	巡视检查	工程本身及地铁隧道环境、结构		

此外，邻近地铁侧基坑监测还包括：深层土体水平位移监测、地下水位监测、支撑轴力监测、地表沉降监测、立柱沉降监测、围护结构顶部位移监测。

3. 地铁监测结果

区间隧道上下行线道床沉降、水平位移与水平收敛，如下图 3~8 所示，其中的典型断面为邻近基坑中部的区间隧道断面。自动化监测时间为 2018 年 03 月 22 日至 2020 年 01 月 19 日，后续监测方式为人工监测，频率 1 次/1 月。图 4、图 6、图 8 为 2020 年 1 月 2 号的道床沉降、水平位移和水平收敛沿环号的分布，其中上行线环号为 SWY215 至 SWY350 的 20 环，下行线为 XWY540 至 XWY675 的 20 环，为方便表示，图中均用相对位置表示，图中均用相对位置表示。

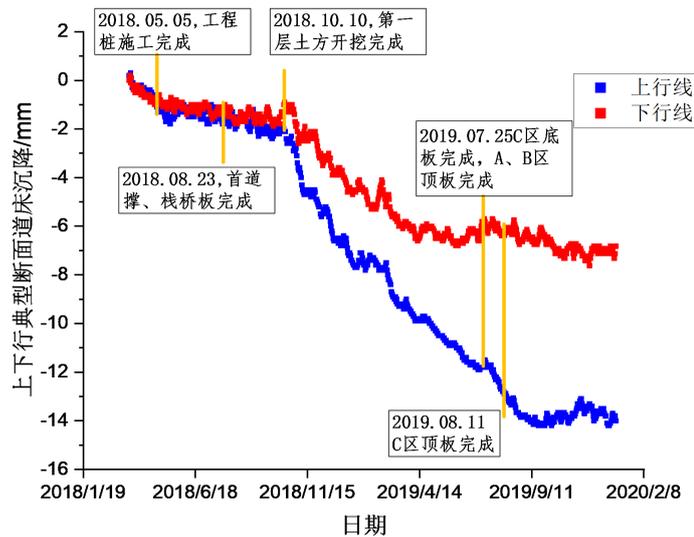


Figure 3. Settlement statistics for the typical section of track bed
图 3. 上下行典型断面道床沉降统计图

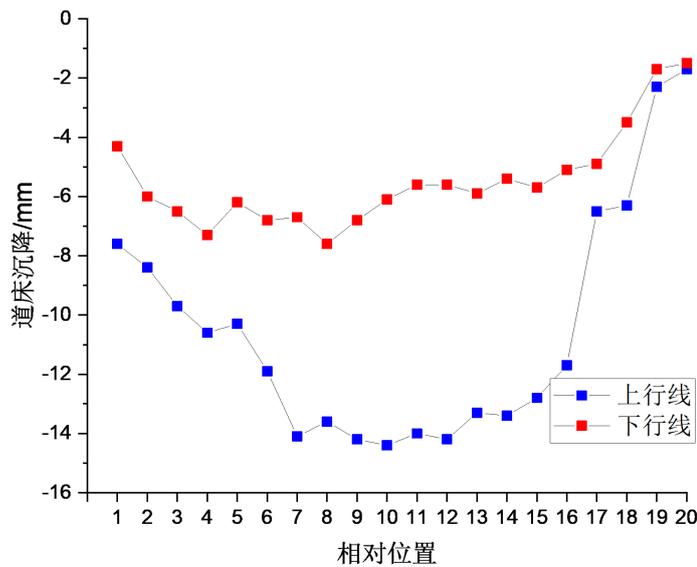


Figure 4. Distribution curve of track bed settlement along the ring number
图 4. 道床沉降沿环号分布曲线

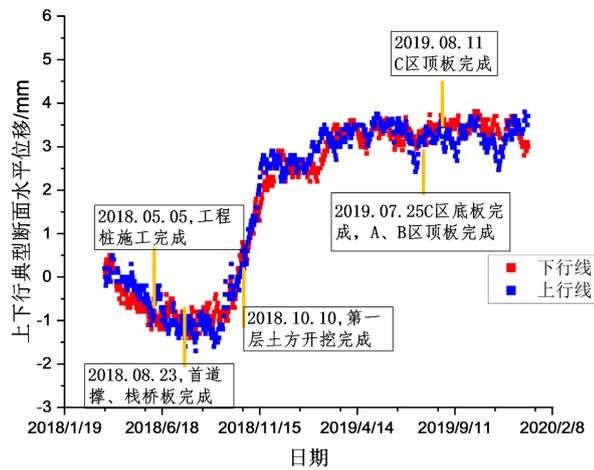


Figure 5. Horizontal displacement statistics for the typical cross-section
 图 5. 上下行典型断面水平位移统计图

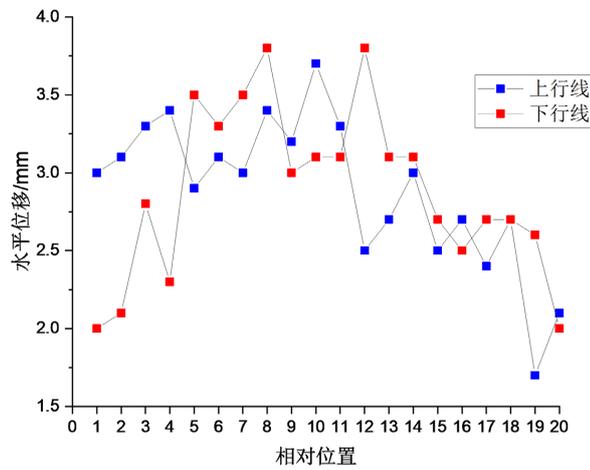


Figure 6. Horizontal displacement distribution curve along the ring number
 图 6. 水平位移沿环号分布曲线

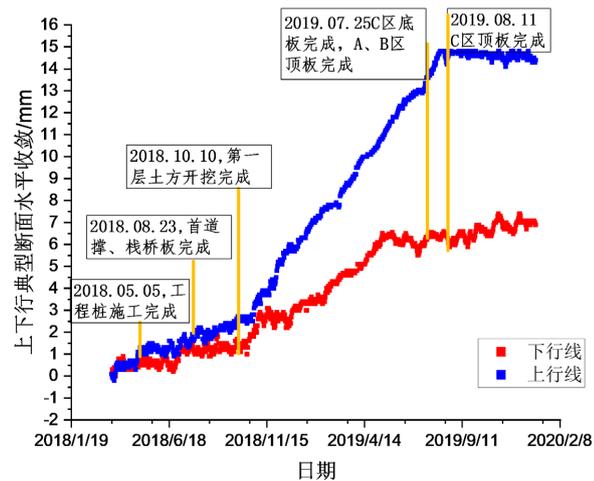


Figure 7. Horizontal convergence statistics for the typical section
 图 7. 上下行典型断面水平收敛统计图

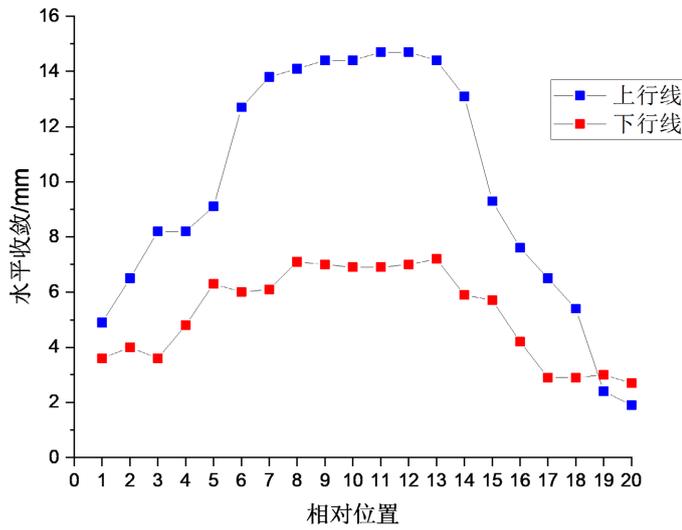


Figure 8. Horizontal convergence distribution curve along the ring number
图 8. 水平收敛沿环号分布曲线

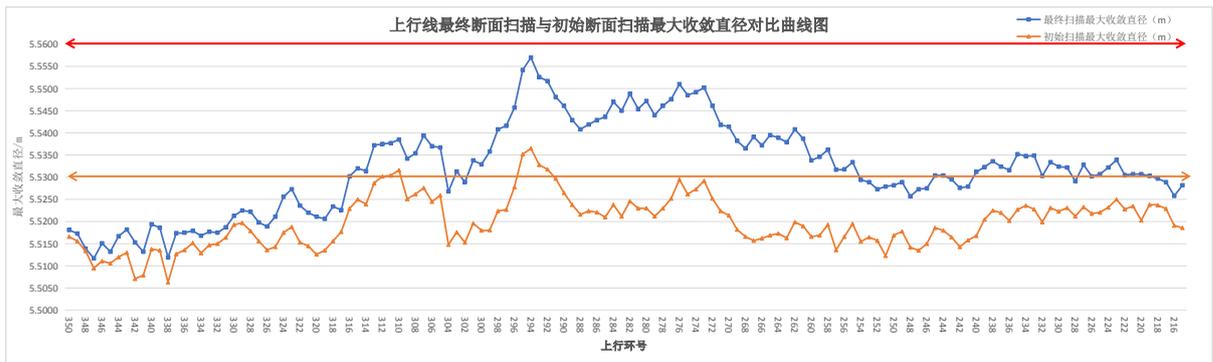


Figure 9. Distribution curve of maximum clearance convergence along the ring number for the upstream line
图 9. 上行线最大净空收敛沿环号分布曲线

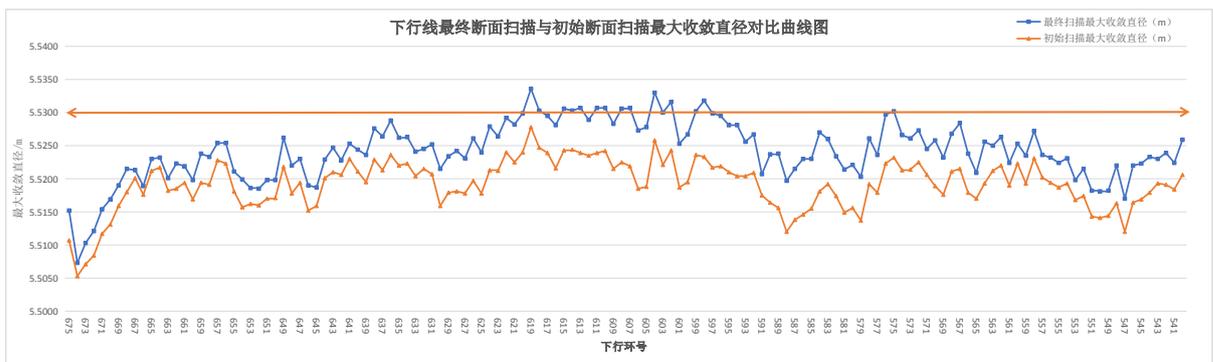


Figure 10. Distribution curve of maximum clearance convergence along the ring number for the downstream line
图 10. 下行线最大净空收敛沿环号分布曲线

总结以上监测数据，可以得到以下结论：

1) 根据图 3 & 图 4 可知，桩基施工期间，上下行隧道均略有下沉，上行线典型断面道床沉降最大，约为 14 mm；下行线典型断面道床沉降较小，约为 7 mm，这是由于上行线距离基坑较近，受基坑卸荷影

响较大。顶板全部完成后,道床沉降逐渐趋于稳定。道床沉降表现为中间大,两边小的分布情况,这是因为邻近基坑的中间位置土体变形最为严重。

2) 由图 5 & 图 6 可知,基坑施工期间,上下线均背向基坑偏移,并且最终施工结束后的水平位移均为 3 mm 左右,上下行线的水平位移差距不显著。图表明,区间隧道的水平位移也表现为中间大,两边小的分区规律。

3) 由图 7 & 图 8 可知,基坑施工期间,上行线扩径速率明显高于下行线。随着顶板施工完成,隧道扩径速率大大降低,上行线最终扩径约为 15 mm,下行线扩径约 6 mm。图表明,区间隧道的扩径也表现为中间大,两边小的分布规律。

4) 结合图 9 与图 10 可知,隧道的净空收敛整体上表现为中间高,两边低的趋势;上行线的扩径幅值明显高于下行线,并且上行线的扩径值沿环号分布差异更大。

结合工程地质和施工过程,发生上述现象的原因分析如下:该区间隧道位于淤泥质粉质黏土中,土质条件较差,基坑开挖施工对地铁隧道有一定的影响;B 区障碍物多,清障过程对隧道有一定影响,同时耽搁地连墙施工进度,围护结构未完全闭合(A 区施工时,B 区地连墙及第一道支撑未施工);现场土方外运受限,施工进度缓慢,围护结构和周边环境长时间持续变形。

4. 总结

根据对地铁隧道的监测结果,可以发现地下室改造工程开挖对邻近运营地铁隧道的影响显著,上下行线隧道呈现明显的下沉,同时向基坑侧偏移,并伴随有扩径趋势,距离基坑近的上行线扩径更为明显,区间隧道变形同时表现为“中间大,两边小”的分布规律。本文结合实际工程案例指出,邻近地铁隧道的地下室改造工程尤其应注意清障安排,不合理的清障安排会耽误基坑支护结构施工过程,无法充分利用基坑的空间效应,而引起邻近隧道的较大变形。

因此,针对邻近地铁隧道的地下空间改造工程,本文提出以下几点施工建议:

1) 充分利用基坑的空间效应,采用分坑作业的方案,控制邻近地铁侧的基坑面积,采取分层、均匀、对称的土方开挖方案。

2) 严格控制邻近盾构侧围护结构的变形,可采用地下连续墙、高压旋喷桩以及多道支撑体系,尽量减少邻近地铁侧的基坑变形。

3) 优化原地下室的清障方案,清障结束应及时对基坑做好支护,应进一步研发新型地下室改造工艺,避免清障过程对邻近地铁隧道的影响。

4) 邻近区间隧道的地下室改造工程或深基坑工程,除了要关注隧道的竖向沉降,还要关注其水平位移和水平收敛,并及时排查区间隧道的漏水情况和裂缝,避免发生较大事故。

参考文献

- [1] 况龙川. 深基坑施工对地铁隧道的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 284-288.
- [2] 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.
- [3] 魏纲, 厉京, 宣海力, 董力政, 徐咏咏, 张世民. 大型深基坑开挖对旁边地铁盾构隧道影响的实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 718-726. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.2018.03.023>
- [4] 陈辉. 超大深基坑开挖对临近地铁隧道影响分析[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(10): 90-95.
- [5] 吕高乐, 易领兵, 杜明芳, 等. 软土地区双侧深基坑施工对邻近地铁车站及盾构隧道变形影响的分析[J]. 地质力学学报, 2018, 24(5): 682-691.
- [6] 李成巍, 李伟, 梁志荣. 软土地区隧道两侧深基坑同步施工设计与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018(S1): 193-199.

- [7] 周新雨, 苑佳. 深基坑施工对临近地铁隧道的变形影响分析[J]. 土工基础, 2021, 35(2): 175-178.
- [8] 戚科骏, 王旭东, 蒋刚, 常银生, 陈亚东. 临近地铁隧道的深基坑开挖分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(S2): 5485-5489.