

软土场地上跨既有地铁隧道基坑施工控制与监测

徐敏, 王敬敬, 刘立飞

(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 近年来, 随着城市地下空间的不断开发利用, 基坑工程上跨地铁盾构隧道的情况越来越多。基坑工程的开挖会引起周围土层的应力场及位移场发生变化, 从而使得地铁盾构隧道产生附加内力和变形, 极大地影响了地铁的安全运营。本文以杭州某软土地区上跨地铁隧道的基坑作为研究对象, 采用了分区、分块开挖、土体预加固、隧道两侧施工抗拔桩、钢锭压重、钢筋混凝土叠合底板等地铁保护措施。地铁监测数据表明: 工程采取的地铁保护措施是可行的, 地铁变形在控制范围之内。场地整平期间, 由于下方土体未加固, 上下行均有较大的隆起, 且变化速率快。桩基施工阶段, 通过试桩发现隧道两边三轴水泥搅拌桩施工时, 隧道总体先上浮后下沉。非核心区土方开挖期间, 盾构上下行均有少量上浮, 水平收敛无明显变化; 核心区开挖期间, 盾构上下行有一定的上浮及缩径, 地铁上方基坑分区作用明显。

关键词: 软土; 运营地铁; 基坑开挖; 上跨; 施工控制; 地铁监测; 隧道变形

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0118-08

Construction controlling and monitoring of excavation overcrossing operating tunnel in soft ground

XU Min, WANG Jing-jing, LIU Li-fei

(Hangzhou Geotechnical Engineering and Surveying Research Institute with Limited Liability, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: With the recent large-scale development and utilization of urban underground space, an increasing number of foundation pits have been located above the existing subway tunnel. The construction and excavation of foundation pit would change the stress and displacement fields of the surrounding soil, resulting in additional internal forces and deformations in the underlying subway tunnels. Moreover, it may affect the operation safety of the subway system. This paper investigates the foundation pit of an overcrossing subway tunnel located in the soft soil area of Hangzhou. Several subway protection measures were implemented, which including subdivision excavation, soil pre-reinforcement, uplift pile construction on both sides of the tunnel, reinforced concrete superimposed bottom plate, and steel ingot weighing. The monitoring data for the subway demonstrated the feasibility of the protective measures and confirmed that subway deformation was effectively controlled. During the site leveling process, significant uplift with rapid speed occurred in the upward and downward due to the lack of soil reinforcement. During the pile foundation construction stage, it was observed that the tunnels generally experienced floating before sinking during the three-axis cement mixing pile construction on both sides of the operating tunnels. Excavation in the non-core area resulted in slight floating of the operating tunnels, while horizontal convergence remained relatively unchanged. In the core area, the operating tunnels exhibited noticeable floating and contraction, demonstrating the significant impact of partition and block excavation on the overcrossing operating tunnels.

Key words: soft ground; operating tunnels; excavation; overcrossing; construction controlling; subway monitoring; tunnel deformation

收稿日期: 2023-05-16

作者简介: 徐敏 (1974—), 男, 浙江金华人, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通保护监测、隧道监测及基坑监测工作。E-mail: 1728231322@qq.com。

0 引言

近年来,城市轨道交通日益发展,地铁周边的建设工程越来越多,尤其是邻近地铁开挖的基坑引起周边土体变形,极大地影响轨道交通隧道结构的稳定,进而影响到城市地铁的正常运营^[1]。因此,结合隧道变形监测提出相应预防和保护措施变得尤为重要。

已有学者就邻近地铁的基坑开挖施工对地铁隧道的影响开展了理论与工程控制实践研究^[2-5]。李志高等^[6]对工程监测数据进行分析,得到了开挖卸土造成下方隧道纵向变形的总体规律及时空效应规律。张治国等^[7]通过有限元分析方法结果与工程实测数据对比分析确认有限元方法可以为实际工程的设计施工提供一定的理论和计算依据。肖同刚^[8]结合隧道变形监测数据及严格的地铁隧道变形保护措施对基坑开挖施工全过程进行有效监控。尹铁锋等^[9]提出了地铁保护须优先考虑水平净距、隧道埋深及基坑挖深等因素。王翀^[10]开展了上跨地铁深基坑风险评估研究。

本文以上跨既有地铁隧道基坑开挖为出发点,结合地铁保护施工措施,以地铁保护监测为手段,分析软土地基坑上跨既有地铁隧道施工引起的变形。

1 工程概况

项目位于杭州市,规划九沙河河道西起备塘河,东至运河二通道,具有防洪、配水、景观等功能,全长约为 5 875 m,河道宽度为 30 m,规划河道底板底高程为-0.35 m。其中部分河道(桩号 K4+860~K5+180)横跨杭州运营地铁 1 号线,河道与地铁隧道斜交角度为 71°,隧道已经运行。地铁隧道结构顶面标高为-3.352 m(左线)和-3.382 m(右线),基坑坑底与隧道结构顶面的最小距离仅 3.0 m。

根据勘察报告,河道基坑及地铁隧道所在区域自上而下岩土层依次为:①₂杂填土(层厚 0.70~4.30 m)、②₁砂质粉土(层厚 0.70~5.10 m)、②₂砂质粉土(层厚 1.90~4.40 m)、②₃砂质粉土夹粉砂(层厚 2.00~8.00 m)、②₄粉砂(层厚 1.40~6.60 m)、②₅黏质粉土夹砂质粉土(层厚 2.00~9.80 m)、⑤₁淤泥质粉质黏土夹粉土(最大层厚 10.10 m)。地下水位埋深为地表下 0.90~7.40 m。

为了开展地铁保护,九沙河河道分二期施工,首

先施工地铁 1 号线两侧外的河道(即非核心区区域:K4+860~K4+890、K4+936~K5+180),第二期实施地铁 1 号线正上方部位九沙河河道(即核心区区域:K4+890~K4+936)。基坑与地铁位置关系见图 1。

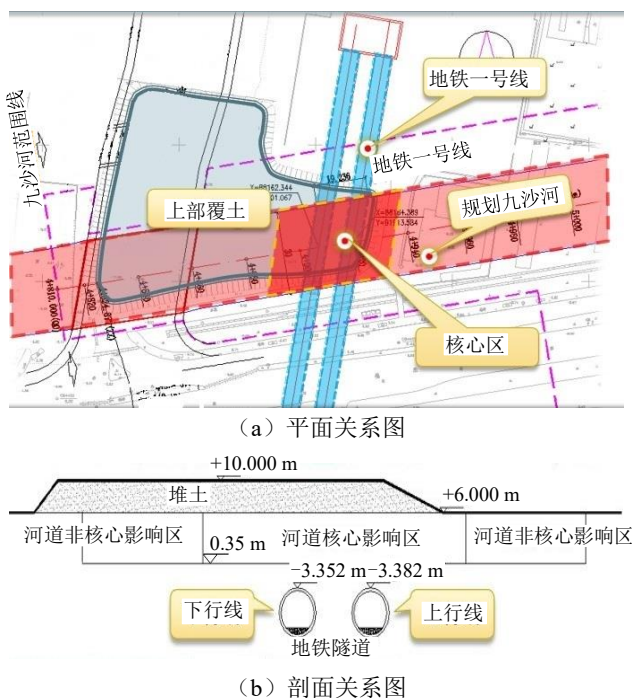


图 1 基坑与地铁位置关系图

Fig. 1 Location between the excavation and operating tunnel

核心区区域基坑周边地面高程约+6.0 m(基坑位置有一片平均高程+10.0 m的堆土),河道底板底高程-0.35 m(河底标高 0.5 m,河道底板厚 750 mm,素混凝土垫层厚 100 mm),基坑开挖深度约 6.35 m。

非核心区区域(K4+860~K4+890)基坑周边地面场平高程 5.60 m,河道挡墙底高程为 0.4 m,河道基坑开挖深度约 5.2 m;非核心区区域(K4+936~K5+180)段基坑周边地面场平高程 5.60~6.30 m,河道挡墙底高程为 0.4 m,河道基坑开挖深度约 5.2~5.9 m。

2 基坑施工难点

(1) 基坑位于隧道正上方,且坑底与隧道净空距离约 3 m。基坑卸载量大,卸载量约为地铁上方覆土荷载的 3 倍,极易导致隧道变形过大。

(2) 场地存在较厚的粉土层,渗透系数大,地下水对本项目影响较大,上跨地铁基坑必须做好止水措施。

(3) 地铁隧道底为淤泥质土,影响整体稳定和变形控制。

(4) 隧道上方覆土整平至 8 m 时,下方土体未

进行加固处理，产生坑底隆起过程中，隧道结构易上浮，导致变形。

(5)三轴水泥搅拌桩加固及工程桩施工时，桩位在水平与垂直方位均与隧道距离很近，土体扰动极易导致隧道变形。

3 基坑施工方案与控制措施

3.1 围护方案

(1)核心区区域基坑

基坑南侧有德胜路采用水泥土墙方案；基坑北侧地下为隧道盾构，为了减小开挖对隧道的影响，采用直立式水泥土挡墙方案；东西侧具有放坡条件，采用放坡开挖方案。

(2)非核心区区域基坑

基坑北侧采用放坡+降水；基坑南侧放坡+降水，同时在坡顶设置止水帷幕。

3.2 施工顺序

为了保护地铁，充分利用空间效应，分块分层、

对称均衡开挖，基坑分区如图2所示。



图2 基坑分区

Fig. 2 Foundation pit division

3.3 地铁保护措施

(1)隧道上方及两侧土体预加固：采用三轴水泥搅拌桩加固，主要是加固隧道两侧顶部土质，加强土质强度及整体性，同时起到止水帷幕的作用。隧道两侧土体加固时为减轻单侧土体软化与扰动对隧道的不利影响，三轴水泥搅拌桩施工时每隔五幅跳打一幅，严格控制施工速度，密切关注监测数据。核心区加固剖面图见图3。

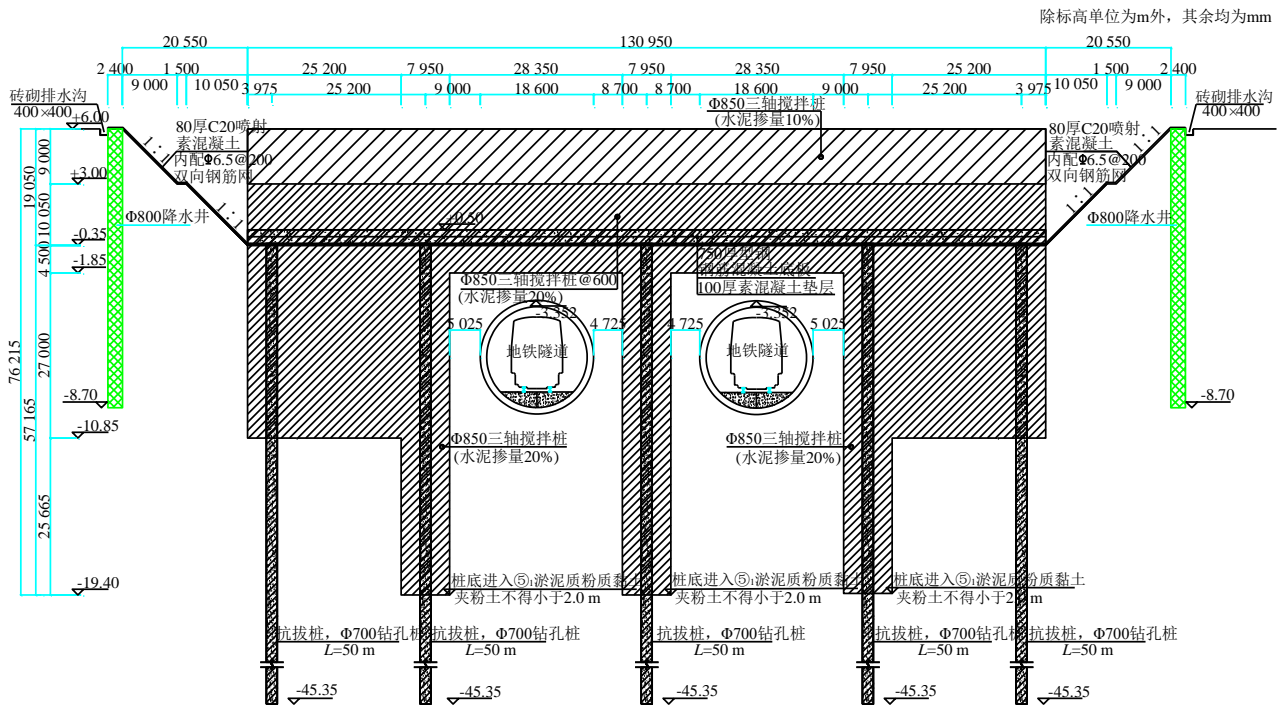


图3 核心区围护结构剖面图

Fig. 3 Profile of bracing structure in core zone

(2)隧道两侧抗拔桩施工：在平面布置上按控制顺序进行编码，按照平衡、对称和减少土体损失为原则进行前后施工顺序划分，从距盾构稍远的第1排、第5排抗拔桩先实施，其次实施南北两侧的围护桩，接着实施第2排、第4排抗拔桩，最后施工中间第3排抗拔桩与围护桩，各排间桩基采取东西对称施工，同排内桩基采取间隔3根跳打1根。

桩位施工顺序图见图4(图中数字即为施工顺序编号)。

(3)河道型钢钢筋混凝土叠合底板：河道底部设计采用了型钢钢筋混凝土叠合底板，受基坑土方分块开挖影响，河道底板也采用分块浇筑，区块之间钢筋采用机械连接，型钢采用等强度螺栓连接，达到快速封闭基坑效果，控制隧道上浮。

(4) 减少基坑暴露时间: 为保证基坑及地铁运营的安全, 尽量减少基坑暴露的时间。

(5) 增加监测频率: 1 号线隧道内采用徕卡测量机器人进行地铁自动化监测, 试桩过程中加密至 1 次/15 min, 核心区分块开挖期间, 加密至 1 次/

30 min, 并立即出具监测报告, 及时掌握变形情况。

(6) 联合巡查: 组织会同结构、供电、轨道、施工等定期开展联合巡查, 准备好应急材料和设备, 及时对隧道内滴漏点进行堵漏, 控制住了隧道病害发展。

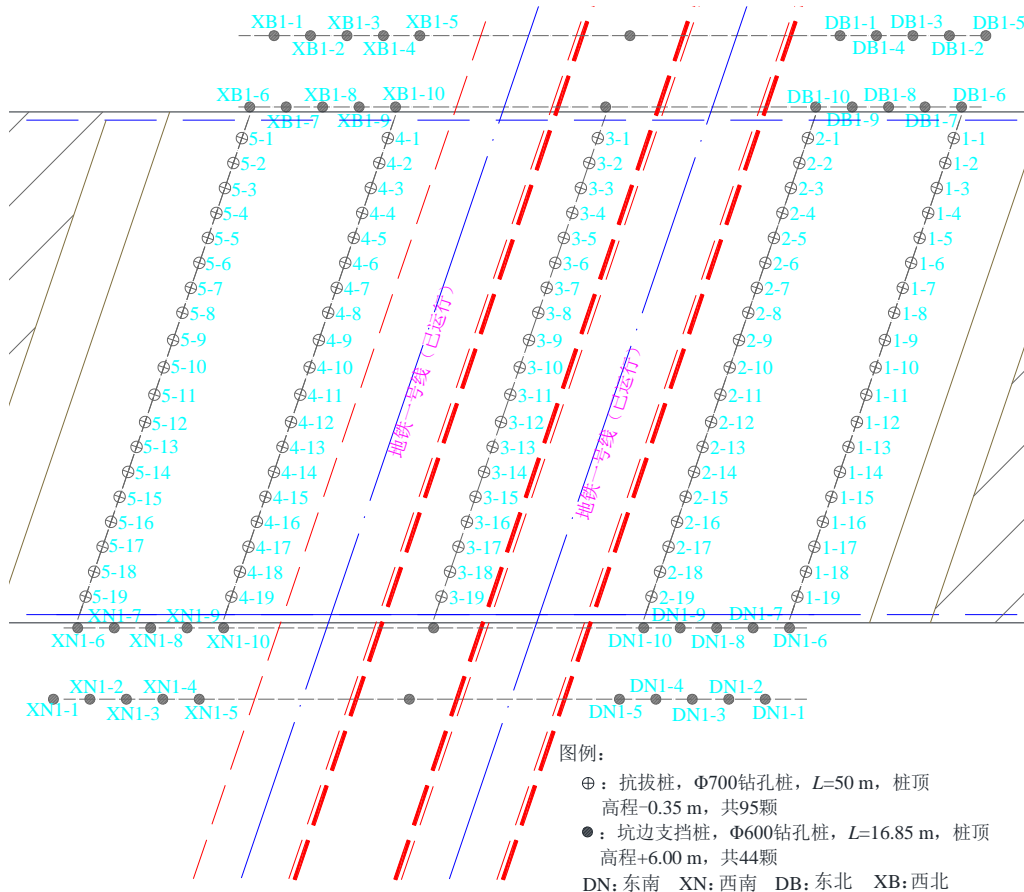


图 4 桩位顺序图
Fig. 4 Pile sequence

4 地铁保护监测方案

地铁监测按照要求对本施工项目核心区区域 (K4+890~K4+936) 正下方地铁 50 m 范围内, 按照《杭州市城市轨道交通运营管理办法》控制保护区、特别保护区的定义确定监测范围, 两侧各外延 50 m, 其中距离施工项目较近位置加密监测点, 并采用了最新型的测量机器人徕卡 TM50。

地铁隧道自动化监测点安装在隧道顶、道床和侧壁上, 项目核心施工区域下方沿隧道每 1 环布设一个监测断面, 核心区域以外 50 m 范围沿隧道每 5 环布设一个监测断面。地铁 1 号线自动化监测项目包括: 道床沉降 (DCCJ), 隧道水平位移 (SP), 管片水平收敛 (SL)。监测断面命名形式上、下行线以字母代号“S (上行线)”、“X (下行线)”来区分, 再加该区间管片环号及断面编号。例如: 上行线第 29 个监测

断面位于地铁 69 环, 道床沉降编号即为“SDCCJ69 (29)”。地铁保护监测点布设示意图见图 5。

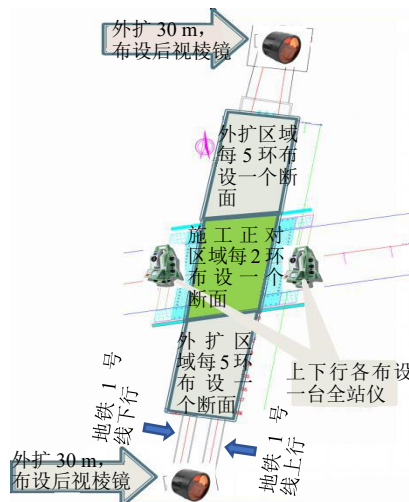


图 5 地铁保护监测点布设原则示意图
Fig. 5 Schematic diagram of tunnel protection monitoring

5 三轴水泥搅拌桩试桩期间道床沉降监测数据分析

2 台桩基同时在下行隧道左右两侧进行三轴水泥搅拌桩试桩,主要影响到的监测断面为下行 25 断面和上行 26 断面。试桩影响断面道床沉降时程曲线

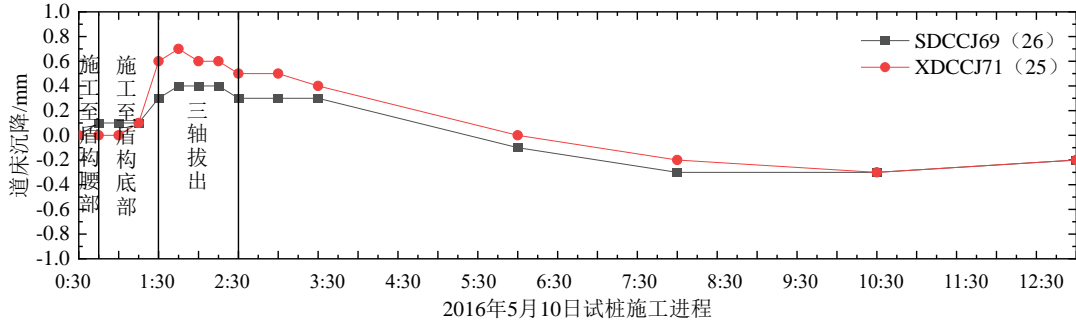


图 6 试桩影响断面道床沉降时程曲线图

Fig. 6 Settlement caused by test pile

6 地铁保护监测数据分析

1 号线上下行线各布置 38 个监测断面,分别监测道床沉降、水平位移、管片收敛、差异沉降变化情况。

6.1 施工简况

本项目施工简况见表 1。

表 1 施工简况

Table 1 Construction information

时间	工况
2016-04-26—2016-05-10	场地整平至标高+8.0 m (下行线上方土方部分清运到上行线上方,后场地整平)
2016-05-11—2016-07-20	三轴水泥搅拌桩及钻孔桩施工
2016-07-21—2016-09-13	停工,场地整平至标高+6.0 m
2016-09-14—2016-11-10	1-5 区块分块开挖至底板完成,放置重块
2016-11-11—2016-12-13	6-12 区块分块开挖至底板完成,放置重块
2016-12-14—2016-12-24	1-5 区块全部卸载完成
2016-12-25—2017-01-14	6-12 区块全部卸载完成,河道注水至标高+2.5 m
2017-01-15—2017-03-28	春节停工,抽水清理河床底后注水
2017-03-28—2017-07-31	工后

线图见图 6。

试桩影响区域整体先上浮后下沉,最终隧道略有下沉,且变形数据均较小。

桩基施工的影响反应迅速,最终影响可控,三轴水泥搅拌桩施工方案可行,此种施工工艺导致的隧道结构变形量在一定程度上是可控的。

6.2 道床沉降

典型断面的道床沉降时程曲线见图 7、图 8,累计量沿环号(里程)分布曲线见图 9、图 10。如图所示,道床沉降变化存在以下特征:(1)土方清运期间,隧道整体表现为上浮,上行最大隆起量 1.9 mm,下行最大隆起量 3.6 mm,且下行线核心区变化速率较快,速率≥2 mm/24 h;(2)三轴水泥搅拌桩及钻孔桩施工阶段,隧道整体表现为下沉;(3)非核心区 1-5 区块开挖完成后,基坑由于分块开挖面积小,盾构上下行均有少量上浮;(4)核心区 6-12 区块开挖土体位于隧道正上方,盾构上下行有 3 mm 左右的上浮;(5)1-12 区块卸配重过程中,隧道表现为明显上浮;(6)工后,隧道略微上浮,但速率较小且平稳。

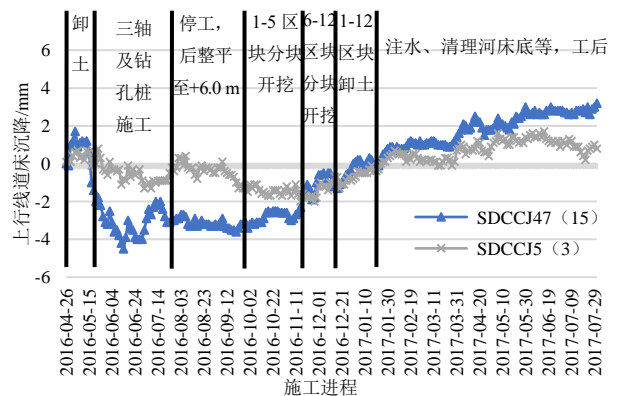


图 7 上行线道床沉降典型断面时程曲线图

Fig. 7 Settlement of upbound track bed in typical cross-section with time

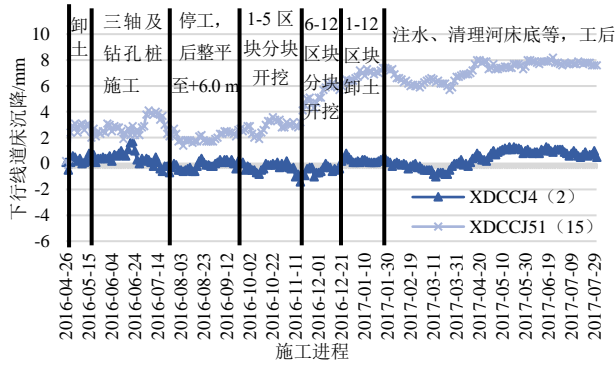


图 8 下行线道床沉降典型断面时程曲线图

Fig. 8 Settlement of downbound track bed in typical cross-section with time

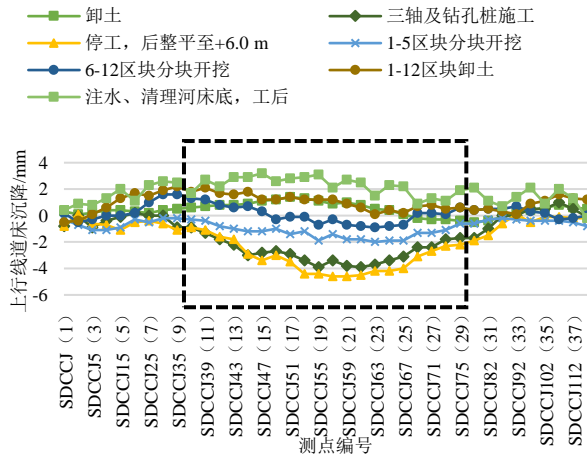


图 9 上行线道床沉降累计值分布图

Fig. 9 Distribution of cumulative settlement of the upbound track bed

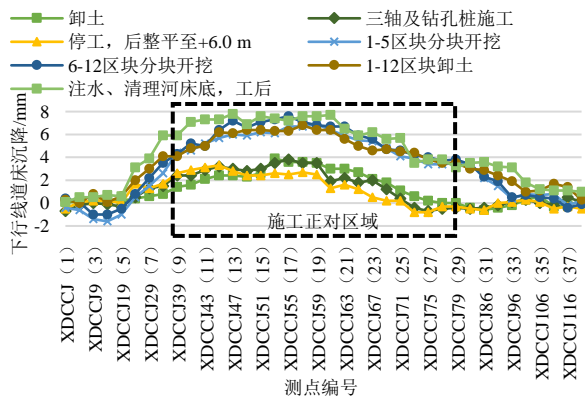


图 10 下行线道床沉降累计值分布图

Fig. 10 Distribution of cumulative settlement of the downbound track bed

6.3 水平位移

典型断面的水平位移时程曲线见图 11、图 12, 累计量沿环号(里程)分布曲线见图 13、图 14。如图所示, 水平位移变化存在以下特征: (1) 土方清运期间, 隧道水平位移变化较小, 基本无影响; (2) 三轴水泥搅拌桩及钻孔桩施工阶段, 隧道整体表现向右侧偏移; (3) 1-12 区块土方卸配重过程中, 下

行隧道向右侧偏移, 上行线向西侧偏移(核心区块分东侧和西侧两次施工, 隧道整体偏移方向不一致); (4) 工后, 隧道水平位移无明显变化。

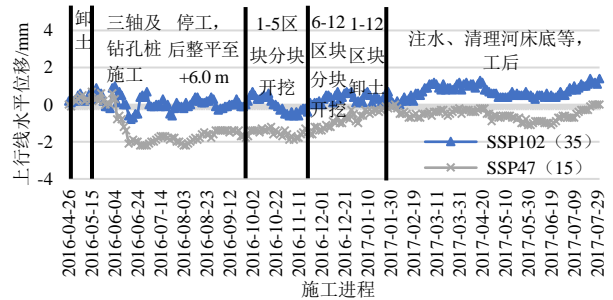


图 11 上行线水平位移典型断面时程曲线图

Fig. 11 Horizontal displacement of upbound in typical cross-section with time

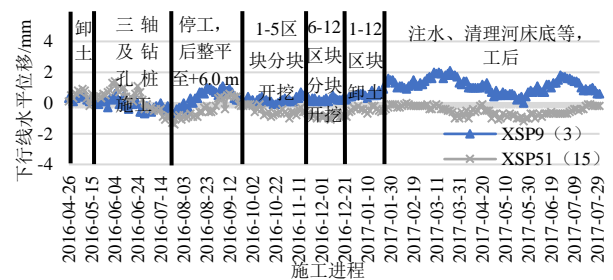


图 12 下行线水平位移典型断面时程曲线图

Fig. 12 Horizontal displacement of downbound in typical cross-section with time

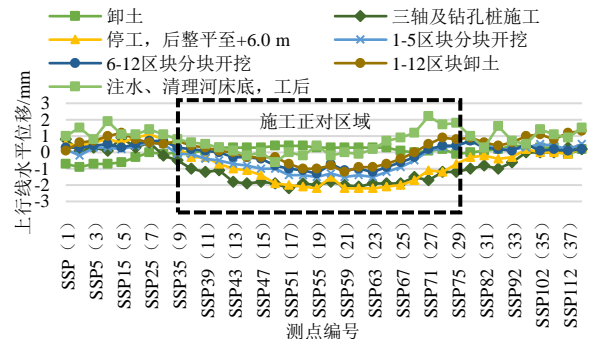


图 13 上行线水平位移累计值分布图

Fig. 13 Distribution of cumulative horizontal displacement of upbound

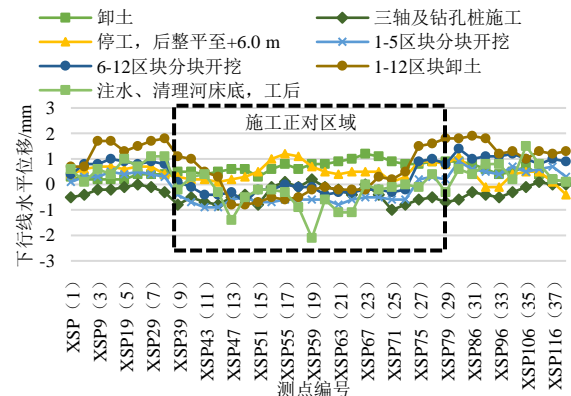


图 14 下行线水平位移累计值分布图

Fig. 14 Distribution of cumulative horizontal displacement of downbound

6.4 管片收敛

典型断面的管片收敛时程曲线见图 15、图 16，累计量沿环号（里程）分布曲线见图 17、图 18。如图所示，管片收敛变化存在以下特征：（1）土方清运期间，隧道整体缩径；（2）三轴水泥搅拌桩及钻孔桩施工阶段，隧道整体表现为扩径；（3）1-12 区块土方卸配重过程中，隧道表现为缩径，开挖 6-12 区块时缩径趋势尤为明显，缩径量 2~3 mm；（4）工后，隧道逐渐扩径，隧道扩径速率较小且平稳。

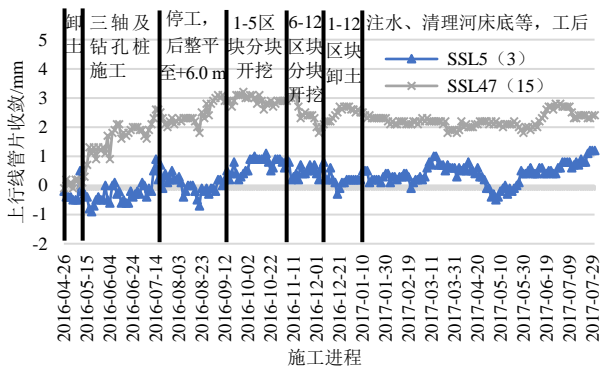


图 15 上行线管片收敛典型断面时程曲线图

Fig. 15 Segment convergence of upbound in typical cross-section with time

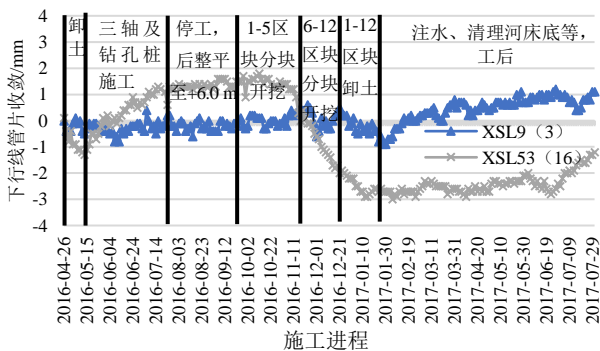


图 16 下行线管片收敛典型断面时程曲线图

Fig. 16 Segment convergence of downbound in typical cross-section with time

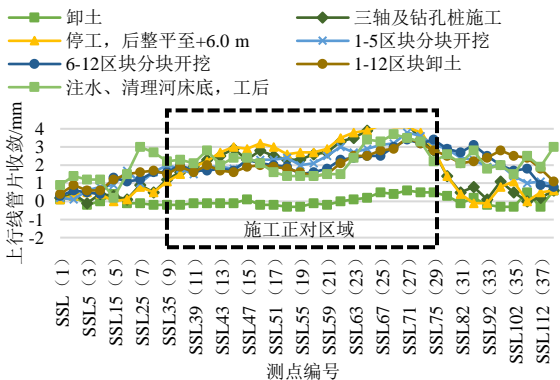


图 17 上行线管片收敛累计值分布图

Fig. 17 Distribution of cumulative segment convergence of upbound

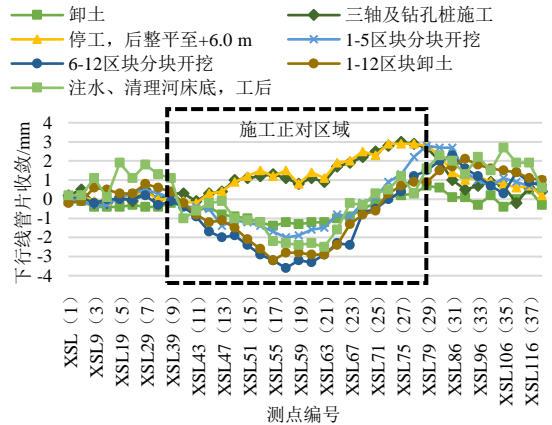


图 18 下行线管片收敛累计值分布图

Fig. 18 Distribution of cumulative segment convergence of downbound

6.5 地铁变形控制效果

河道基坑开挖施工期间，道床沉降、水平位移、管片收敛最大测值分别为 7.8 mm、2.2 mm、3.7 mm，满足控制要求。隧道变形控制标准详见表 2。

表 2 隧道变形控制标准

Table 2 Controlling standards of tunnel deformation

序号	监测项目	控制值（绝对值）	
		累计值/mm	
1	隧道道床沉降	10	
2	隧道水平位移	5	
3	隧道管片收敛	10	

7 结论

（1）在分区分块开挖施工的基础上，提出了土体预加固、隧道两侧施工抗拔桩、钢筋混凝土叠合底板、钢锭压重等地铁保护措施，根据监测结果显示，下穿基坑的地铁隧道变形得到很好的控制。

（2）场地整平期间，由于下方土体未加固，上下行均有较大的隆起，且变化速率快。桩基施工阶段，通过试桩发现隧道两边三轴水泥搅拌桩施工时，隧道总体先上浮后下沉。非核心区土方开挖期间，盾构上下行均有少量上浮，水平收敛无明显变化，核心区开挖期间，盾构上下行有一定的上浮及缩径，地铁上方基坑分区作用明显。

（3）充分利用空间效应，分块分层、对称均衡开挖，先开挖两侧后开挖正上方；在开挖分块 1~5 过程中，因开挖范围很小，对隧道变形的影响较小；在开挖分块 6~11 过程中，隧道变形相对较大，后续相关项目施工可考虑进一步减小分块范围、单坑卸荷比、沿轨道交通结构纵向长度。

参考文献

- [1] 李宇升, 喻卫华. 深基坑施工对紧邻地铁区间隧道结构影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 352-358.
LI Yu-sheng, YU Wei-hua. Analysis on influence of deep pit construction on neighboring metro tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 352-358.
- [2] 周丁恒, 周春锋, 李凤岭, 等. 软土地区临近地铁深基坑施工控制及监测[J]. 铁道建筑技术, 2019(4): 103-108, 132.
ZHOU Ding-heng, ZHOU Chun-feng, LI Feng-ling, et al. Controlling and monitoring on constructing soft-soil deep foundation pit adjacent to metro line[J]. Railway Construction Technology, 2019(4): 103-108, 132.
- [3] 李校峰. 大型深基坑开挖对紧连既有地铁隧道及周围地层的影响研究[J]. 铁道建筑技术, 2017(12): 78-82, 103.
LI Xiao-feng. Influence study on adjacent existing subway tunnel and its surrounding strata while excavation a large deep foundation pit[J]. Railway Construction Technology, 2017(12): 78-82, 103.
- [4] 王振平, 徐宏增, 赵基金. 运营地铁正上方河道基坑开挖的控制措施[J]. 地基处理, 2017, 28(4): 27-36.
WANG Zhen-ping, XU Hong-zeng, ZHAO Jin-jin. Control measures for excavation of river foundation pit directly above the operating subway[J]. Ground Improvement, 2017, 28(4): 27-36.
- [5] 潘丽东. 基坑开挖卸载对下卧已建盾构隧道变形影响及控制方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
PAN Li-dong. Study on the influence of foundation pit excavation unloading on deformation of underlying shield tunnel and control methods[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [6] 李志高, 刘浩, 刘国彬, 等. 基坑开挖引起下卧隧道位移的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 619-623.
LI Zhi-gao, LIU Hao, LIU Guo-bin, et al. Influence analysis of deep-dip excavation on down tunnel based on the measured displacement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 619-623.
- [7] 张治国, 张谢东, 王卫东. 临近基坑施工对地铁隧道影响的数值模拟分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(11): 93-97.
ZHANG Zhi-guo, ZHANG Xie-dong, WANG Wei-dong. Numerical modeling analysis on deformation effect of metro tunnels due to adjacent excavation of foundation pit[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(11): 93-97.
- [8] 肖同刚. 基坑开挖施工监控对临近地铁隧道影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 1013-1017.
XIAO Tong-gang. Analysis on effect of deep-pit excavation and monitoring on neighboring metro tunnel in soft ground[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(5): 1013-1017.
- [9] 尹铁锋, 顾其波, 高京生, 等. 基坑施工对地铁隧道影响的模拟分析[J]. 水道港口, 2017, 38(3): 291-298.
YIN Tie-feng, GU Qi-bo, GAO Jing-sheng, et al. Numerical modeling analysis of influence on metro tunnels due to excavation of foundation pit[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2017, 38(3): 291-298.
- [10] 王翀. 上跨地铁深基坑风险评估研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
WANG Chong. Study on the risk assessment of deep foundation above the tunnel[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018.