



地铁施工对市政隧道的影响分析与保护

张晓功, 郑坚杰, 邵志坤

(上海隧道工程有限公司, 上海 200032)

摘要: 当今城市轨道交通工程建设常面临对既有市政隧道保护的情况, 需要在设计和施工阶段充分考虑对既有市政隧道的影响和保护。南京地铁5号线车站邻近模范马路隧道, 且区间盾构隧道近距离正交下穿该隧道, 文章对该工程深基坑开挖与区间盾构下穿施工进行介绍, 通过数值模拟计算分析变形规律, 提出了基坑支护体系、盾构推进参数和同步注浆等提出隧道保护措施; 并在施工开挖期间对支撑轴力、基坑和隧道位移, 下穿期间对土压力、盾构推力与速度、隧道位移进行跟踪与控制, 结果表明: 以上措施能有效控制既有市政隧道变形, 确保了车站开挖与盾构下穿过程中模范马路隧道的正常运营。内容可为类似轨道交通工程提供参考。

关键词: 地铁施工; 市政隧道; 深基坑; 盾构; 保护措施; 数值模拟

中图分类号: U231⁺.3; U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)02-0047-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.02.023

Impact analysis and protection of subway construction on municipal tunnel and protection measures

ZHANG Xiaogong, ZHENG Jianjie, SHAO Zhikun

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Nowadays, the protection of existing municipal tunnels is often faced in the construction of urban rail transit engineering, and the influence and protection of existing municipal tunnels should be fully considered in the design and construction stage. Nanjing Metro Line 5 station is near the model road tunnel, and the section shield tunnel passes through the tunnel in a close orthogonal distance. In this paper, the deep foundation pit excavation and section shield tunneling construction of the project are introduced, and such tunnel protection measures are proposed as foundation pit supporting system, shield propulsion parameters and synchronous grouting through numerical simulation and analysis of deformation rules. The supporting axial force, foundation pit and tunnel displacement are tracked and controlled during construction excavation, and the earth pressure, shield thrust and velocity, and tunnel displacement are tracked and controlled during underpassing period. The results show that the above measures can effectively control the deformation of existing municipal tunnels and ensure the normal operation of model road tunnels during station excavation and shield underpenetration. The content of this paper can provide references for similar rail transit projects.

Key words: subway construction; municipal tunnel; deep foundation pit; shield; protective measure; numerical simulation

随着城市轨道交通的蓬勃发展, 复杂环境下的深基坑和盾构工程日益增多, 常面临对运营中市政隧道保护的工况^[1-2]。深基坑开挖会改变土体应力, 使邻近隧道产生变形, 因此有必要对围护结构和隧道变形

进行分析预测^[3]。袁蒋鹏^[4]通过建立深大基坑对邻近隧道保护模型并验证合理性, 提出土体加固和分区施工保护对策。章红兵等^[5]揭示了深基坑开挖“时空效应”、土压力多次卸载、土体变形叠加效应、地下水对

收稿日期: 2023-07-12

基金项目: 上海隧道工程有限公司科研项目“南京复杂地层深基坑施工关键技术研究”(2018-SK-15)

作者简介: 张晓功(1990—), 男, 工程师, 从事地下工程施工技术工作。

邻近隧道的影响机理并提出对应保护措施。王坚^[6]研究了下穿隧道时盾构、土体、既有隧道的相互作用机理,得到了盾构穿越对既有隧道的变形规律。李昌斌等^[7-8]通过建立模型,分析和总结了基底有无加固及盾构不同穿越角度对隧道的影。夏金春等^[9-11]针对盾构下穿风险,提出前期预留、参数适应性优化、动态监测调控等施工技术。此外,杭州地铁 6 号线区间隧道实现了盾构在开挖见底深基坑段的下穿^[12]。

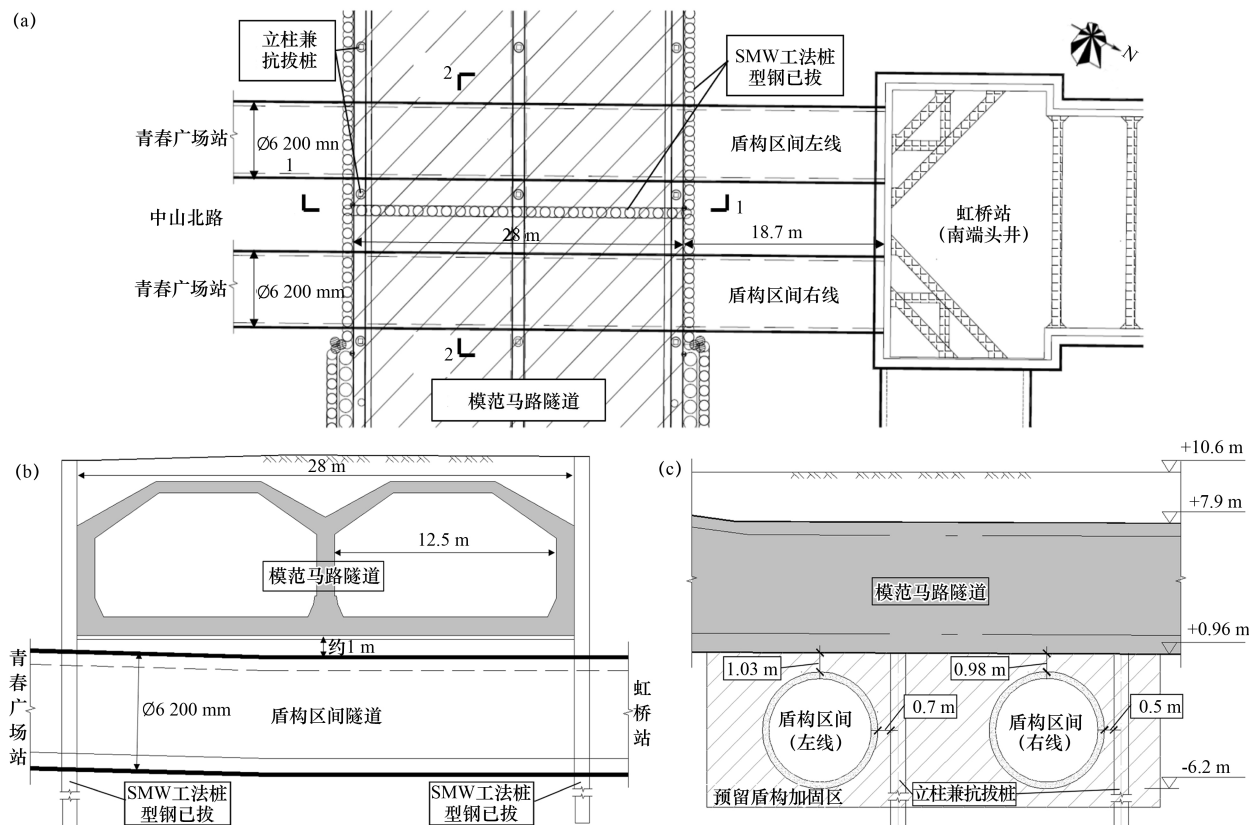
南京地铁 5 号线虹桥站深基坑和青春广场站~虹桥站盾构区间工程,对模范马路隧道产生叠加影响,通过对数值模拟计算和保护措施应用情况分析,总结地铁深基坑开挖和盾构区间下穿对运营中市政隧道的影响和保护技术,以期可为类似工程提供参考价值。

1 工程概况

模范马路隧道建设于 2008 年,为双向 6 车道,总长度为 1 443.473 m,其中暗埋段长度为 1 115 m、两侧敞开段长度为 328.473 m。地铁 5 号线下穿模范马路隧道位置为暗埋段,结构宽度约为 28 m,隧道标准横断面采用单箱双室折板式结构,结构净宽为 12.5 m ×

2 m;该段隧道基坑围护采用 SMW 工法支护桩挡土兼止水,并设置钻孔灌注桩作立柱兼抗拔桩,地铁下穿位置提前采用三轴搅拌桩进行加固,预留穿越条件。

南京地铁 5 号线虹桥站位于中山北路与模范马路交叉口北侧,为地下两层岛式车站,车站总长度为 219 m,标准段宽度为 18.5 m,南端头井开挖深度为 19.39 m,距离模范马路隧道 18.7 m;青春广场站~虹桥站盾构隧道沿中山北路方向,下穿模范马路隧道,区间盾构施工选用土压平衡盾构机,管片外径为 6 200 mm,盾构与模范马路隧道结构底净距约为 1 m,与隧道抗拔桩净距约为 0.5 m。地铁与模范马路隧道平面和剖面关系如图 1 所示。工程位于秦淮河漫滩区,砂土、粉土及软土发育,车站开挖范围主要为②1d3 稍密粉砂(夹粉土薄层,强度一般,中低压缩性,土性不纯,透水性中等)、②2c3 稍密粉土(夹有粉砂薄层,中压缩性,中低强度,渗透性弱)及②3c2-3 稍密-中密粉土(夹粉砂薄层,中等压缩性,强度一般,透水性弱),盾构隧道主要穿越②2b3-4 软-流塑状淤泥质粉质黏土(夹薄层粉土、粉砂,高等压缩性,强度较差,微透水性)及②2c3 稍密粉土(夹有粉



(a) 工程总平面; (b) 1-1 剖面; (b) 2-2 剖面

图 1 地铁与模范马路隧道平面和剖面关系

砂薄层, 中压缩性, 中低强度, 渗透性弱), 地下水埋深 0.8~2.7 m。

2 基坑开挖及盾构下穿数值模拟分析

为分析地铁车站基坑开挖及区间盾构下穿对模范马路隧道的影响, 施工前采用 MIDAS/GTS 对开挖和下穿两个工况分别进行数值模拟计算。

基坑开挖模型尺寸为 142.5 m×108 m×50 m, 计算边界条件为 x 、 y 方向施加水平位移约束, z 方向施加竖向位移约束。模型中土体采用三维实体单元模拟, 材料本构模型取用摩尔-库仑模型。隧道结构采用二维板单元模拟, 支撑及抗拔桩用梁单元模拟, 材料按线弹性考虑。整体模型及相对关系如图 2 所示。模拟车站开挖和结构回筑各阶段, 共设置 14 个步骤, 设置计算分析步骤如表 1 所示。

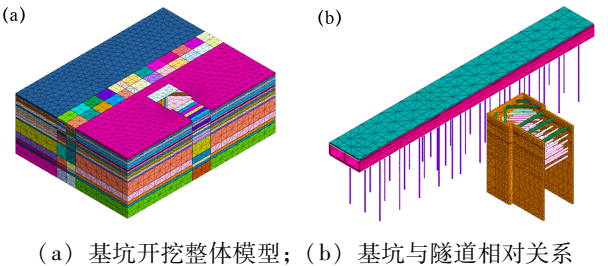


图 2 地铁基坑与模范马路隧道三维模型

5 号线虹桥站基坑施工对模范马路隧道竖向和水平向位移的影响如图 3 所示。邻近基坑处变形稍大, 往两侧渐小, 但在端头井附近注浆加固后, 总体上位移都较小。

盾构下穿模型尺寸为 60.5 m×42 m×50 m, 计算边界条件为 x 、 y 方向施加水平位移约束, z 方向施加竖向位移约束。模型中土体采用三维实体单元模拟, 材料本构模型取用摩尔-库仑模型。盾构衬砌结构采用二维板单元模拟, 抗拔桩用梁单元模拟, 材料

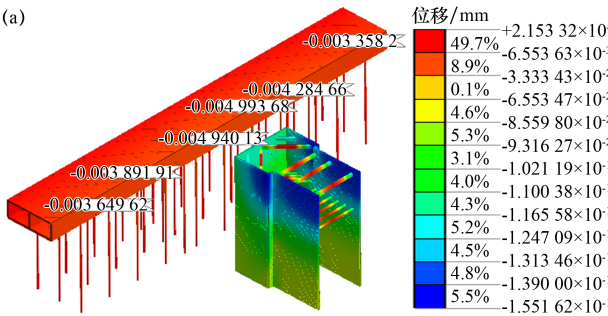
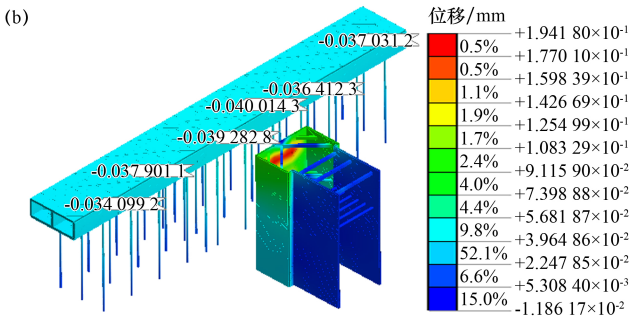


表 1 基坑施工计算分析步骤	
施工步骤	建模内容
0	初始地应力计算,端头井附近注浆加固,施加地面超载,位移清零
1	地下连续墙施工
2	开挖至地面下 2.1 m,混凝土支撑施工
3	开挖至地面下 6.3 m,第二道钢支撑施工
4	开挖至地面下 9.3 m,第三道钢支撑施工
5	开挖至地面下 13.4 m,第四道钢支撑施工
6	开挖至地面下 17.5 m,第五道钢支撑施工
7	开挖至基坑底,结构底板施工
8	第五道支撑拆除、负二层侧墙施工
9	钢换撑施工
10	第四道支撑拆除
11	结构中板施工
12	第三道支撑拆除
13	第二道支撑拆除
14	负一层侧墙和顶板施工

按线弹性考虑。模拟盾构下穿模范马路隧道, 首先计算地应力, 对盾构周围土体进行补强注浆, 施加地面超载, 位移清零, 随后模拟右线和左线盾构先后开挖及管片拼装施工。盾构下穿模型如图 4 所示。

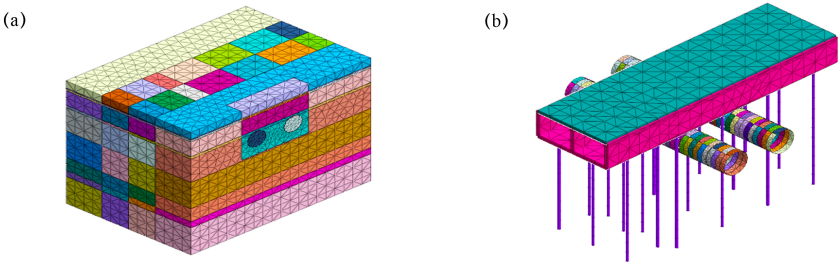
5 号线盾构下穿模范马路隧道的竖向和水平向位移的影响如图 5 所示。由图可以看出, 在模范马路隧道预留地铁穿越区域已进行注浆预加固后, 下穿产生的变形量小。

结合虹桥站基坑开挖和青春广场站~虹桥站盾构区间下穿两种工况对模范马路隧道的影响分析, 根据模范马路隧道现状监测资料得到现状的原始变形量, 结合开挖和穿越工况引起得到累计变形量如表 2 所示(变形最大值发生在右线盾构处), 隧道累计竖向位移小于 10 mm, 累计水平位移小于 5 mm, 满足规范及运营方要求。



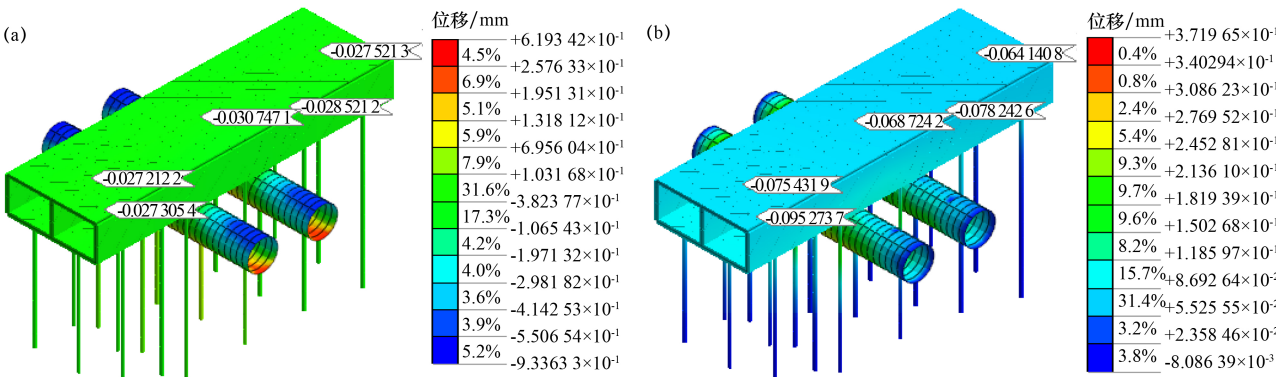
(a) 隧道竖向位移; (b) 隧道水平向位移

图 3 车站基坑施工模范马路隧道位移



(a) 盾构下穿整体模型；(b) 盾构与隧道相对关系

图 4 盾构与模范马路隧道三维模型



(a) 隧道竖向位移；(b) 隧道水平向位移

图 5 盾构下穿模范马路隧道位移

表 2 各工况计算结果

项目	原始变形	基坑开挖	盾构下穿	累计值
竖向变形	1.27	0.10	0.03	1.40 < 10
水平变形	—	0.40	0.10	0.50 < 5

数值模拟是基于理想的施工状态下，实际施工过程中难以达到。例如钢支撑在土方开挖到位 8 ~ 16 h 后才能架设到位，且轴力难以加到位；盾构推进的土压力和速度也受多种因素影响，无法保持恒定。所以施工过程中的保护措施尤为重要。

3 隧道保护施工技术

结合工程实际工况，除了提前实施盾构穿越和进出洞加固以外，还需在深基坑开挖期间做好支撑轴力与基坑变形控制、盾构推进期间参数动态调整，另外，施工期间密切监测、信息及时传递，做到精细化

管理也是确保施工期间隧道正常运营的关键。

3.1 车站深基坑钢支撑控制措施

车站南端头井内支撑体系为一道混凝土支撑 + 4 道钢支撑，近模范马路隧道侧为斜撑，为控制基坑开挖过程中地连墙变形，到达对运营中模范马路隧道保护目的，从加快钢支撑架设和保证钢支撑轴力两个方面着手。

(1) 钢支撑斜撑支座采用装配式牛腿，凹形预埋件先浇筑于地连墙内，待基坑开挖至支撑标高，凸形斜牛腿支座与凹形预埋件匹配并采用螺栓连接，随后钢支撑撑于牛腿支座上，较常规焊接牛腿施工效率高且受力更安全，有利于地连墙变形控制。

(2) 钢支撑采用伺服系统，预加轴力为设计值的 85%，结合监测数据动态调整钢支撑轴力，临近模范马路隧道的地连墙监测变形如图 7、8 所示，可

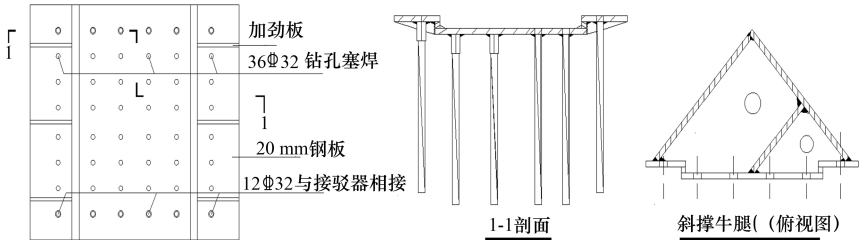
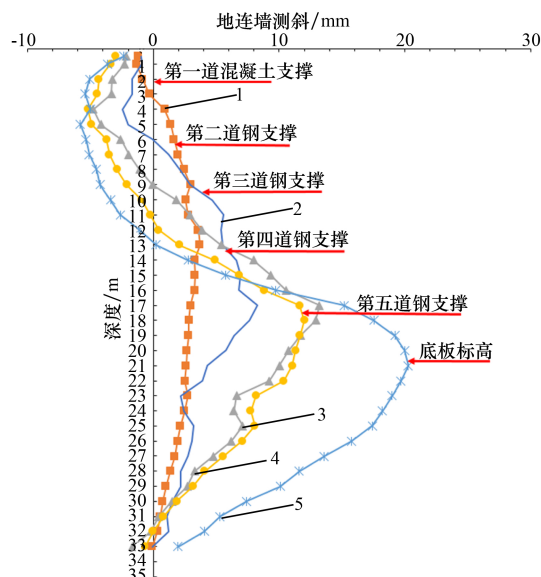


图 6 钢支撑斜撑装配式牛腿示意

以看出每一层土方开挖过程最大测斜变形在支撑以下,已完成伺服钢支撑架设的标高处,地连墙变形稳定,达到了开挖期间对模范马路隧道保护的效果。



1—第一层土方开挖完成; 2—第二层土方开挖完成;
3—第三层土方开挖完成; 4—第四层土方开挖完成;
5—第五层土方开挖完成。

图7 地连墙测斜曲线

3.2 盾构穿越控制措施

盾构穿越模范马路隧道参数设定是以控制土体损失(地表沉降),减少周边环境扰动为原则,确保在盾构穿越完成后,模范马路隧道及区间隧道稳定后的变形量控制在规范要求。

3.2.1 正面平衡压力设定

在盾构穿越模范马路隧道期间,正面平衡压力的设定计算公式:

$$P = k_0 \gamma h \quad (1)$$

式中: k_0 为土的侧向静止平衡压力系数,取 0.7; γ 为土体的平均重度,取 18.97 kN/m^3 ; h 为隧道埋深,取 13.7 m 。

$$P = 0.7 \times 18.97 \times 13.7 \times 0.001 = 0.182 \text{ MPa}$$

盾构在掘进施工中参照以上方法来取得平衡压力的设定值,穿越时再根据盾构埋深、所在位置的土层状况以及监测数据进行实时优化调整,每次调整的幅度宜为 0.005 MPa 。

3.2.2 出土量与掘进速度控制

根据盾构及管片之间的建筑间隙及各土层特性合理控制出土量,大约为开挖断面的 $98\% \sim 100\%$ 。并通过监测数据分析调整,寻找最合理的数值。

在穿越模范马路隧道施工过程中,盾构掘进速度控制在 2.0 cm/min 左右,尽量保持推进速度稳定,确保盾构均衡、匀速地穿越新模范马路隧道,减少对周边土体扰动,以免对其结构产生不利影响。

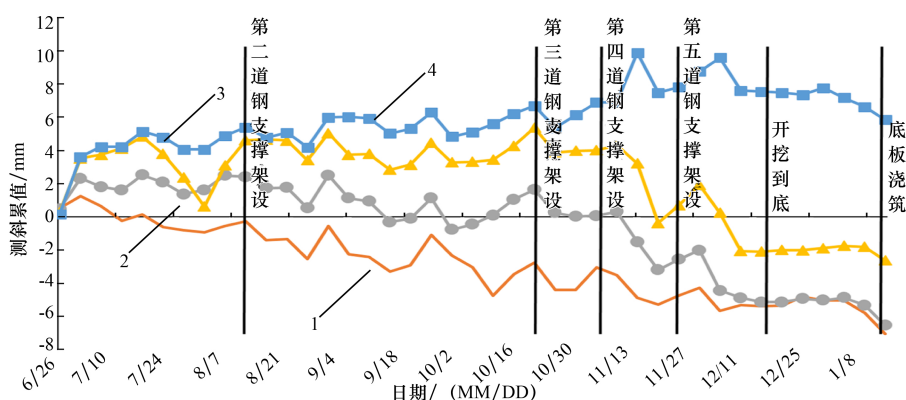
3.2.3 同步注浆和跟踪注浆

盾构穿越时通过同步注浆及时充填建筑空隙,减少施工过程中的土体变形。同步注浆量为建筑空隙的 $130\% \sim 150\%$,浆液采用大比重单液浆。注浆量和注浆孔位视注浆时的压力值和地层变形监测数据而定。特别是当盾构机推进速度较慢时,应严格控制浆液注的均匀性,避免注浆过于集中或间断。

在隧道穿越段范围内增开注浆孔,同时,盾构壳体备有应急注浆孔。穿越施工过程中应根据实际施工情况,采用在脱出盾尾隧道上方管片跟踪注浆方法,对隧道壁后土体进行加固。

3.2.4 盾构穿越施工效果分析

南京地铁5号线青春广场站~虹桥站盾构区



1—第二道钢支撑; 2—第三道钢支撑; 3—第四道钢支撑; 4—第五道钢支撑。

图8 地连墙测斜-时间位移曲线

间右线于 2021 年 7 月 6 日至 2021 年 7 月 12 日穿越模范马路隧道, 对应 373 环至 404 环; 左线于 2022 年 10 月 29 日至 2022 年 11 月 4 日穿越模范马路隧道, 对应 572 环至 604 环。

盾构下穿模范马路隧道土压力与推进速度如图 9 所示。在穿越过程中, 土压力先减小后增大, 说明盾构在穿越地下大尺寸隧道结构时, 由于上方空腔结构的存在, 土压力会较全覆土段小; 左线盾构土压力较右线普遍加大, 说明先穿越盾构对土体扰动后, 将造成后穿越盾构土压力增大。此外, 与该工程类似, 被穿越隧道若提前预留土体加固、抗拔桩等盾构穿越条件时, 可结合监测情况适当提高推进速度, 缩短穿越的影响时间。

盾构穿越期间, 土压力和推进速度平稳, 模范马路隧道正常通行, 未发生异常情况。

3.3 管理措施

为满足模范马路隧道的保护要求, 除基坑开挖及盾构穿越技术措施外, 还需清楚各施工阶段模范马路隧道的状态和监测变形数据, 动态指导施工。实施前, 与模范马路隧道产权单位对接, 调取竣工图纸、监测数据, 并结合现场踏勘, 确定隧道变形控制值; 实施过程中, 做好基坑、盾

构和模范马路隧道的监测与巡视, 并根据监测情况指导基坑开挖和盾构穿越施工; 施工完成后, 持续监测直至模范马路隧道变形稳定后停测。

4 实施效果及变形分析

虹桥站主体基坑开挖和区间盾构下穿模范马路隧道期间, 通过对模范马路隧道内部结构竖向变形和水平位移进行监测, 掌握施工期间对模范马路隧道的影响。模范马路隧道受基坑开挖和盾构穿越的影响较大的水平位移曲线如图 10 所示, 其中“+”表示基坑内方向, “-”表示基坑外方向, 从图中可看出: 基坑开挖期间隧道向基坑方向位移, 在车站结构回筑完成后, 水平位移有较明显恢复; 盾构穿越过程结构向基坑侧(与盾构推进方向一致)位移, 穿越后位移速率减小甚至回弹; 整个施工过程中, 靠近基坑侧水平位移较远离基坑侧普遍偏大。模范马路隧道结构竖向变形曲线如图 11 所示, 其中“+”上抬, “-”表示下沉, 从图中可看出: 在车站结构回筑期间, 钢支撑拆除造成隧道下沉最明显; 由于隧道结构存在抗拔桩, 盾构穿越期间竖向变形较小。

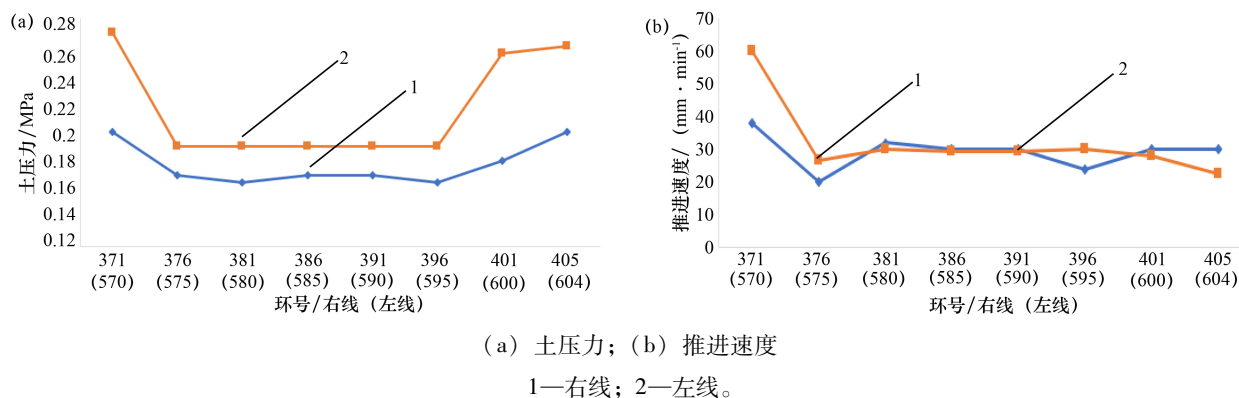


图 9 盾构穿越过程土压力与推进速度

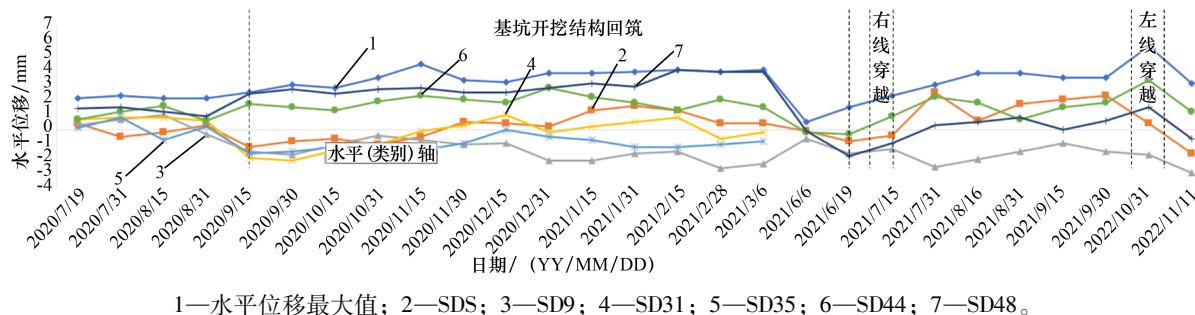


图 10 隧道水平位移曲线

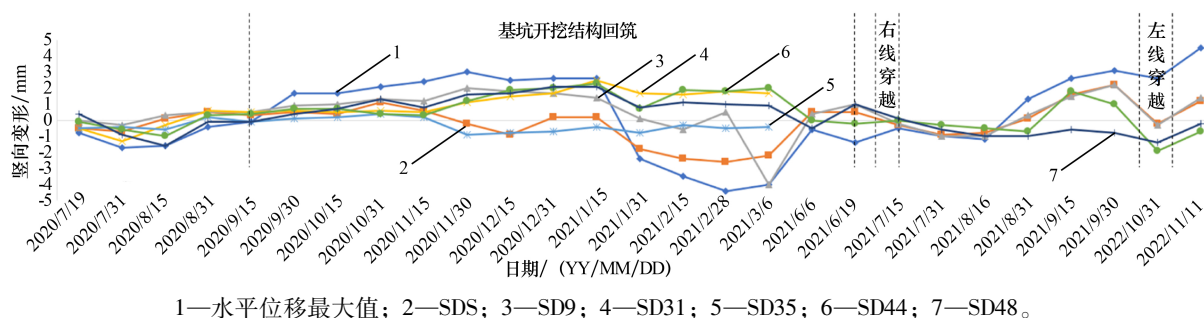


图11 隧道结构竖向变形曲线

从现场实施情况及监测数据可以看出,施工期间各项参数及变形均在控制范围内,达到了对运营中模范马路隧道的保护效果。

5 结论

南京地铁5号线车站邻近模范马路隧道,且区间盾构隧道近距离正交下穿该隧道,通过数值模拟计算和施工过程中隧道保护控制,确保了模范马路隧道正常运营。结合隧道保护施工控制技术和施工监测数据得出施工经验如下。

(1) 规划、筹划先行。模范马路隧道施工期间预留盾构穿越条件,虹桥站南端头盾构接收加固调整至基坑开挖前实施。通过施工前期的规划、筹划及加固措施,可最大程度减小盾构穿越和基坑开挖对运营中模范马路隧道的影响。

(2) 对临近重要构筑物的基坑,在开挖过程中,采用装配式钢支撑和伺服系统,确保钢支撑快速架设及轴力有效施加,有效控制围护变形进而保护临近建筑物;盾构穿越重要构筑物时,要根据穿越条件合理设定土压力并降低推进速度。

(3) 对于涉及既有运营隧道保护的工程,应做到精细化管理、数据共享,根据变形情况动态调整施工参数,确保隧道正常运营。

参考文献:

[1] 刘喆. 地铁盾构隧道与邻近深基坑开挖相互影响分

析[J]. 工程建设,2023,55(6):51-58.

[2] 孙海朋,汤友生,鲜少华,等. 基坑开挖对邻近多管道结构变形的影响[J]. 工程建设,2023,55(4):13-18.

[3] 刘伟,李志忠. 深基坑开挖与相邻浅埋公路隧道的相互影响[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(S2):1811-1816.

[4] 袁蒋鹏. 基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.

[5] 章红兵,范凡,胡昊. 基坑群施工对邻近隧道影响与隧道保护[J]. 上海交通大学学报,2016,50(5):803-809.

[6] 王坚. 常州地铁2号线盾构下穿既有隧道工程的影响[D]. 淮南:安徽理工大学,2019.

[7] 李昌斌. 兰州地铁1号线下穿既有地下通道的影响分析[J]. 铁道建筑,2017(2):53-56.

[8] 熊志浩. 双孔平行地铁盾构隧道下穿既有综合管廊对管廊沉降的影响分析[D]. 成都:西南交通大学,2018.

[9] 夏金春. 地铁盾构正交下穿隧道施工风险控制措施[J]. 隧道建设,2017,37(S1):111-115.

[10] 罗敬炬. 地铁盾构下穿既有公路隧道的变形影响及控制研究[D]. 广州:暨南大学,2020.

[11] 马西峰,周游,史剑,等. 地铁盾构穿越高速路桥施工控制与影响分析[J]. 施工技术,2019,48(23):84-87.

[12] 陈瑞文,周志浩,戴文俊,等. 杭州砂性富水地层盾构下穿公路隧道结构变形控制及综合接收施工技术[J]. 施工技术,2019,48(23):88-92.