

文章编号: 1007-2993(2025)01-0042-07

复杂地下通道施工对地铁隧道影响全过程分析

于峰泉¹ 吴伟² 安然³ 成怡冲³

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江宁波 315100; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司运营分公司, 浙江宁波 315100; 3. 浙江华展研究设计院股份有限公司, 浙江宁波 315012)

【摘要】 基于宁波某紧邻隧道的地下通道基坑及顶管工程, 结合监测数据, 分析施工全过程对地铁隧道影响。监测数据表明, 全圆 MJS 工法、水泥搅拌桩和高压旋喷桩施工对隧道产生较大影响, 引起隧道产生较大隆起、远离施工方向的水平位移和缩径; 未限时浇筑底板、两道支撑连续拆除、顶板较长时间未完全封闭, 均导致隧道水平位移和收敛较大增长。顶管施工期间, 平行隧道和下卧隧道变形包括初始沉降、隆起增加和后期下沉阶段。紧邻地铁的复杂地下工程, 需重视全过程变形控制, 以实现隧道变形控制目标。

【关键词】 地铁; 变形; 基坑; 顶管; 地下通道; 桩基施工

【中图分类号】 U456; TU470

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2023-0699

Whole process analysis of the impact of complex underground passage construction on subway tunnel

Yu Fengquan¹ Wu Wei² An Ran³ Cheng Yichong³

(1. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315100, Zhejiang, China; 2. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Operation Branch, Ningbo 315100, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Huazhan Institute of Engineering Research and Design, Ningbo 315012, Zhejiang, China)

【Abstract】 Based on the foundation pit and pipe jacking project of an underground passage near a tunnel in Ningbo, combined with incorporating monitoring data, an analysis was conducted on the impact of the whole construction process on the adjacent subway tunnel. Monitoring data indicate that full-circle MJS, cement mixing piles, and high-pressure jet grouting piles significantly influenced the tunnel, causing substantial uplift, horizontal displacement away from the construction area, and diameter reduction. Additionally, untimely pouring of the base slab, consecutive removal of two supports, and prolonged incomplete closure of the top slab resulted in significant increases in tunnel horizontal displacement and convergence. During the pipe jacking, deformations in parallel and underpass tunnels included initial settlement, increased uplift, and later subsidence. For complex underground projects near subways, emphasis on comprehensive deformation control is essential to achieve tunnel deformation management.

【Key words】 subway; deformation; foundation pit; pipe jacking; underground passage; pile foundation construction

0 引言

城市地铁线网日趋密集, 邻近运营地铁隧道建设地下通道不可避免。城市地下通道工程涉及桩墙施工、明挖及暗挖等多个环节, 并会对邻近隧道产生一定影响。

陈仁朋等^[1]结合现场实测数据及数值模拟结果, 分析了地下通道开挖引起的下卧地铁隧道上浮规律。王贺敏等^[2]以郑州某地下通道顶管工程为背景, 建立有限元模型, 研究了顶管施工引起的地表沉降变化规律。叶俊能等^[3]基于工程实例分析了钻孔灌注桩施

工对周边土体位移影响规律, 并提出了钻孔灌注桩施工引起的周边土体位移计算方法。成怡冲等^[4]结合实测数据探讨了地连墙施工引起的周边土体及建筑物变形规律, 并在此基础上提出地连墙混凝土灌注引起土体位移的简化边界元法。刘建国等^[5]基于苏州某基坑工程, 研究了减小对紧邻隧道影响的搅拌桩施工工艺和控制技术。当紧邻已运营隧道时, 为减少桩墙施工对隧道的影响, 常采用全方位高压旋喷注浆 MJS 工法、TRD 渠式切割水泥土地下连续墙等微扰动桩墙施工技术。赵香山等^[6]建立有限元模型分析

作者简介: 于峰泉, 男, 1980 年生, 大学本科, 高级工程师, 主要从事轨道交通方面的设计与研究。E-mail: 374875404@qq.com

通信作者: 安然, 女, 1988 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的设计与研究。E-mail: 564455134@qq.com

MJS 与旋喷桩施工对周围环境影响,并研究了 MJS 施工的环境效应作用机理。姜叶翔等^[7]分析了 TRD、MJS 桩和水泥搅拌桩等对周边环境变形的影响规律。叶琪等^[8]基于宁波首例 MJS 应用实例,分析 MJS 施工期间邻近建筑物沉降和倾斜、周边土体位移变化规律。

吴才德等^[9]建立三维数值模型,研究了基坑开挖空间效应对邻近隧道的影响。王立峰等^[10]结合某邻近隧道的基坑工程,分析隧道变形规律,并研究了基坑支护体系特征和时空效应对隧道的影响。王沛等^[11-12]提出软土基坑施工引起邻近地铁隧道位移的预测方法,并对多种措施的控制效果进行了研究。

叶耀东^[13]基于某顶管工程,采用数值模拟等手段进行方案比选。刘波等^[14]基于南京某地下通道顶管工程,根据三维数值模型提出控制措施,并基于监测数据分析隧道及地表变形规律。申文明等^[15]结合宁波某顶管工程,分析顶管近距离上穿已运营隧道风险源及施工控制措施。

本文依托某紧邻地铁隧道的复杂地下通道基坑及顶管工程,深入研究旁侧基坑、平行顶管及上穿顶管施工对已运营隧道的影响,可为紧邻地铁隧道的类似工程提供参考。

1 工程概况

宁波某地下通道工程包括两段地下通道及两个出入口,出入口采用明挖施工,地下通道采用顶管法施工。拟建地下通道南侧为已运营的宁波轨道交通 4 号线兴宁桥车站一白鹤站盾构区间及盾构工作井。

单个出入口基坑开挖面积 35~55 m²,开挖深度为 10~11 m。1 号出入口基坑南侧采用 $\phi 3600@3000$ MJS 作为隔离柱,顶管区域为全圆 MJS,其余区段为半圆 MJS,全圆 MJS 与隧道净距约 2.0 m,桩底位于隧道底以下 2.0 m。出入口基坑南侧均采用 $\phi 1000@1600$ 全套管硬咬合桩+3 道支撑(1 砼+2 钢)支护形式;其余侧采用 TRD 工法桩+3 道支撑。地基加固采用高压旋喷桩,桩长为坑底以下 6.5 m。

东西向顶管长 43.5 m,覆土厚 3.95~4.4 m;南北向顶管长 16.5 m,覆土厚度 4.3 m。管节内部净尺寸为 6.0 m \times 3.0 m,壁厚为 450 mm,单片管节长度为 1.5 m,采用土压平衡顶管机,东西向顶管自 2 号出入口向 1 号出入口顶进,南北向顶管自 1 号出入口向盾构工作井顶进。

1、2 号出入口基坑与下行线圆形隧道最近距离 6.7 m,东西向顶管与隧道水平净距为 8.7 m,南北向顶管与隧道竖向净距为 2.35 m。圆形隧道顶埋深

10.5 m,外径为 $\phi 6200$ mm,管片厚度为 350 mm。总平面图见图 1,1 号出入口与轨道交通结构剖面关系见图 2。

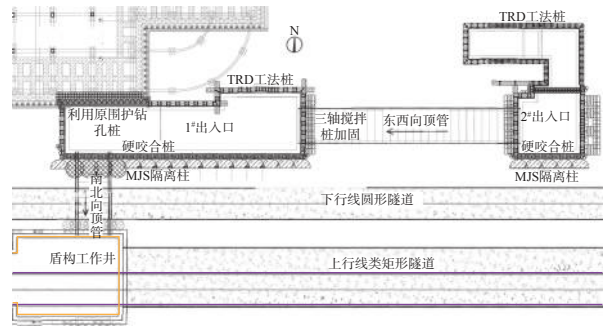


图 1 本工程总平面图

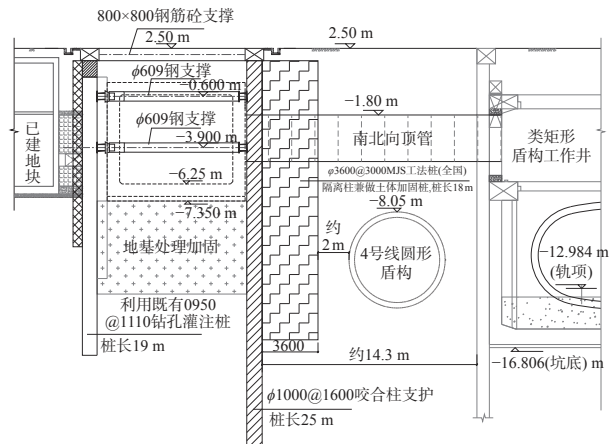


图 2 1 号出入口与轨道交通结构剖面关系图(单位:mm)

基坑底位于 $\textcircled{2}_3$ 层淤泥层,围护桩桩底位于 $\textcircled{5}$ 层粉质黏土层,顶管位于 $\textcircled{2}_2$ 层黏土层和 $\textcircled{2}_3$ 层淤泥层,盾构隧道位于 $\textcircled{2}_3$ 层淤泥及 $\textcircled{2}_4$ 层淤泥质粉质黏土层,土体主要物理力学参数见表 1。

表 1 土体主要物理力学参数

土层名称	层厚 /m	E_s /MPa	γ /(kN \cdot m ⁻³)	c /kPa	ϕ /(°)	含水率 /%
①,黏土	0.6~1.4	4.02	18.4	23.5	11.3	35.7
②,淤泥质黏土	0.6~3.2	2.06	17.0	12.0	7.8	51.0
②,黏土	0.7~1.2	3.44	18.0	21.4	11.2	40.7
②,淤泥	7.2~8.4	2.03	16.8	12.6	7.9	53.1
②,淤泥质粉质黏土	1.1~3.4	2.70	18.1	13.4	10.2	37.5
③粉质黏土	1.7~3.7	3.64	18.7	14.5	11.1	32.9
④淤泥质黏土	1.1~4.6	2.07	17.6	14.9	9.1	44.3
⑤粉质黏土	8.7~16.1	5.61	19.0	33.0	17.0	31.0

根据宁波市轨道交通结构保护相关要求,隧道结构的水平位移、竖向位移和径向收敛报警值均为 7 mm,控制值均为 10 mm。为研究地下通道施工对邻近地铁隧道的影响,对 2021 年 11 月 13 日至 2022

年11月19日的监测数据进行了分析,其中6—14号监测点位于1号出入口南侧,6—8号监测点位于全圆MJS南侧,21—23号监测点位于2号出入口南侧。道床沉降及结构沉降以沉降为“-”,隆起为“+”;水平位移以朝向基坑为“+”,远离基坑为“-”;水平收敛以扩径为“+”,缩径为“-”。

2 竖向围护与加固施工对地铁隧道影响实测分析

1号出入口围护桩与旋喷桩地基加固施工期间,南侧下行线隧道8—10号监测点位移累计分布曲线见图3。

下行线隧道在MJS、咬合桩及高压旋喷桩施工期间,均出现位移报警;MJS施工期间为结构沉降(8.01 mm)和水平收敛(-8.10 mm)报警,咬合桩和旋喷桩施工期间出现水平位移报警,最大值分别为-8.10 mm、-8.90 mm。围护桩与旋喷桩施工导致隧道隆起、远离基坑开挖方向的水平位移和缩径。MJS施工对隧道影响最大,高压旋喷桩次之,咬合桩施工有一定影响,TRD施工影响最小。

1号出入口MJS自西向东施工,于11月5日—12日完成12根半圆MJS,11月13日—16日完成3根全圆MJS。根据自动化监测结果,11月16日水平收敛最大值为-8.10 mm,11月18日结构沉降最大值为8.01 mm,已超过报警值,均位于全圆MJS南侧。全圆MJS南侧隧道区段呈现显著的隆起、远离基坑方向的位移和缩径,隧道呈“竖鸭蛋”变形,显然MJS施工对其产生较大挤推作用。

全圆MJS与隧道平面净距仅2.0 m,MJS桩底位于隧道底板下2.0 m,若其主动排泥和孔内压力监测等核心技术应用欠佳,可能对周边环境产生不利影响,因此需重视对其施工设备的选择及施工工艺的监控。

后续将未施工的全圆MJS改为双半圆MJS,双半圆均为背离隧道方向喷浆;两个双半圆间隔施工,并适当调整MJS工艺参数,以减小对地铁隧道的影响。MJS施工完成后,下行线隧道位移有所减小,特别是隆起、水平位移和水平收敛减小幅度较大;由于全圆MJS施工产生的超静孔压水逐渐消散,全圆MJS南侧隧道区段位移有所下降。MJS施工完成后的位移分布曲线见图4(a)。

TRD施工对下行线隧道影响相对较小,各项位移增量为-1.60~0.80 mm,这是由于1号出入口基坑TRD支护区位于基坑东、西、北三侧,东、西两侧与隧道走向垂直,北侧TRD支护距离下行线隧道较远,南侧MJS一定程度起到隔离作用。

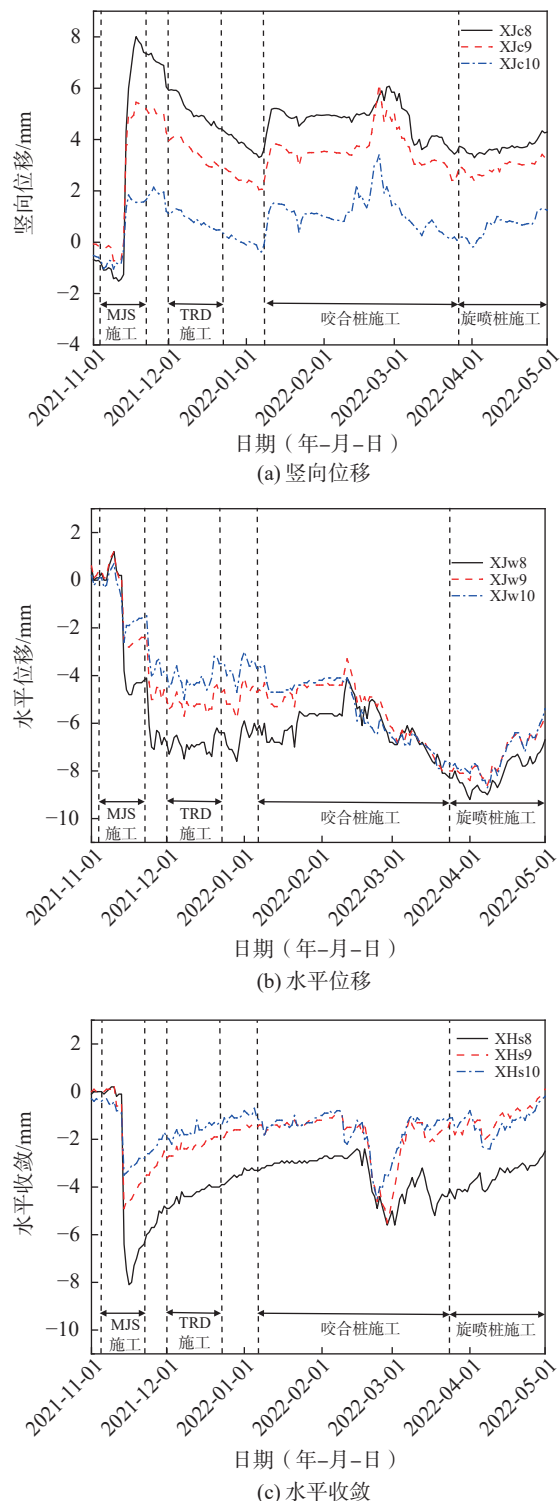
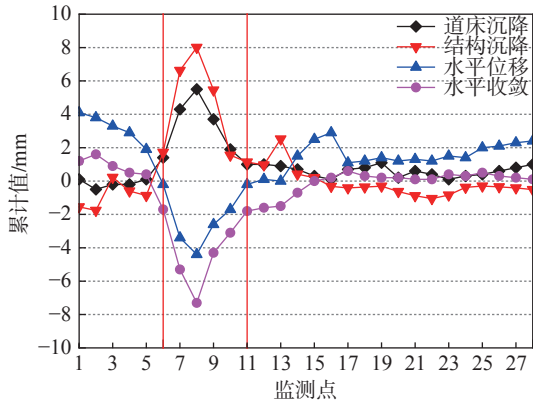


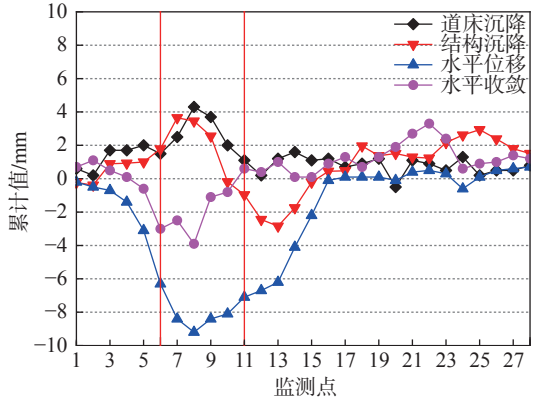
图3 1号出入口南侧下行线隧道位移累计分布曲线(竖向围护加固施工阶段)

咬合桩施工对隧道有一定的影响,隆起最大增量为3.30 mm,水平位移最大增量为-4.20 mm,水平收敛最大增量为-1.60 mm,其中水平位移的增幅较为明显,最大增幅位置对应于基坑中部,MJS隔离作用并不明显。

高压旋喷桩施工完成后的位移分布曲线见



(a) 1号口MJS施工完成



(b) 1号口高压旋喷桩施工完成

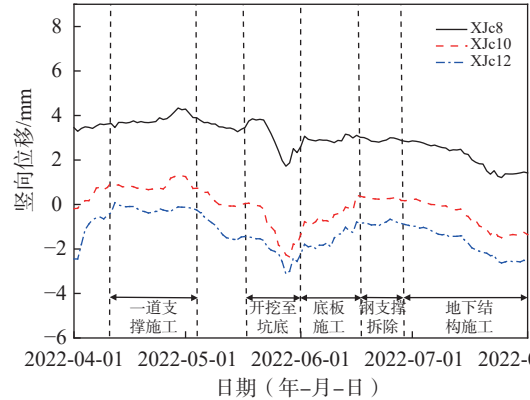
图4 下行线隧道位移分布曲线(竖向围护加固施工阶段)

图4(b)。其施工对隧道影响较大,并与咬合桩存在交叉施工。高压旋喷桩施工期间,下行线隧道隆起增加,远离基坑方向的水平位移和缩径增加;高压旋喷桩施工完成时水平位移最大值为-8.90 mm,已超报警值。施工过程中,高压喷射流冲击土体,会在土体内部形成很大的动压作用,导致桩周土体产生远离桩孔方向的位移,同时地表土体产生向上隆起。当邻近盾构隧道时,围护桩对高压旋喷桩的隔离作用有限,应慎用高压旋喷桩加固土体。交叉施工可能对隧道产生不利影响,当临近地铁隧道时,应避免交叉施工。

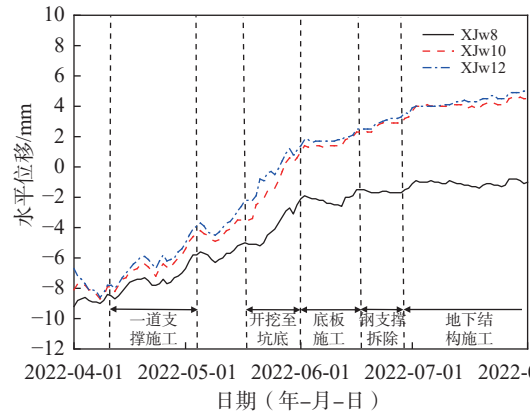
3 基坑施工对地铁隧道影响实测分析

1号出入口基坑施工期间,南侧下行线隧道8、10、12号监测点位移累计分布曲线见图5。基坑开挖阶段,坑内卸荷导致隧道产生与桩基施工阶段反向的位移,隧道位移表现为隆起减小、远离基坑方向位移减小和缩径减小,对应基坑中部区段隧道产生轻微沉降、朝向基坑方向的位移减小和扩径;至垫层浇筑完成时,水平收敛变形由缩径变为扩径;至底板完成时,水平位移由远离基坑方向变为朝向基坑方向。支撑拆除和地下结构施工阶段,沉降、朝向基坑方向的

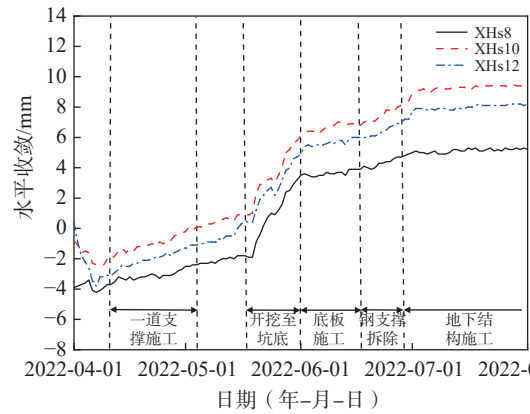
水平位移和扩径进一步增加。地下结构施工完成时(预留洞口除外),水平收敛最大值为9.20 mm,超过报警值。



(a) 竖向位移



(b) 水平位移



(c) 水平收敛

图5 1号出入口南侧下行线隧道位移累计分布曲线(开挖阶段)

基坑完成时的最大沉降对应于基坑中部,最大水平位移和收敛位于基坑中部与顶管段之间,最大位移增量位置均对应于基坑中部,表明基坑变形具有空间效应。

根据位移累计分布曲线,基坑开挖阶段,隧道结构明显下沉,底板施工期间位移回落;水平位移和水平收敛在整个基坑施工阶段持续增长,特别在第1

道支撑完成至坑底土方开挖期间增幅明显,日变化量分别约为 0.30 mm/d 和 0.35 mm/d。

基坑施工阶段,结构沉降、道床沉降、水平位移和水平收敛最大增量分别为 -1.75, -3.80, 13.50, 11.70 mm, 水平位移和水平收敛增幅明显。水平位移在第 1 道支撑施工、土方开挖、底板施工、支撑拆除及地下结构施工四个阶段增量占比分别为 32%, 38%, 12%, 17%; 水平收敛在四个阶段的增量占比分别为 27%, 45%, 10%, 18%, 基坑开挖对下行线隧道影响最大,支撑拆除次之,底板浇筑期间仍有影响。

开挖至坑底后,隧道仍表现出明显的变形,其主要的原因为:①未限时浇筑底板,无底板暴露时间约长达 15 d;②第 2、3 道钢支撑在 3 日内相继拆除完成,每道支撑未实施分段拆撑,底板与首道支撑间的间距过大;③首道砼支撑拆除期间,作为换撑的顶板开洞范围较大但未采取加强措施。临近盾构隧道的基坑工程,对土方开挖、支撑施工、垫层及底板浇筑、支撑拆除等应严格实施时空效应控制。当顶板预留洞口面积较大且留洞时间较长时,建议增设可靠的换撑措施,并保留首道砼支撑。

4 顶管施工对地铁隧道影响实测分析

4.1 东西向顶管施工影响实测分析

东西向顶管南侧 15—19 号监测点在顶进期间随时间变化曲线见图 6。顶进初期,竖向位移明显增加;顶进过程中,呈现出轻微隆起增加或沉降减小;顶进结束后,表现为隆起增加或沉降减小,顶进前后的总变化量为 -0.50 ~ 0.60 mm。顶进过程中,沉降增加量为 -1.20 ~ -0.10 mm;朝向顶管方向的水平位移增加量为 0.50 ~ 1.00 mm;扩径增加量为 0.40 ~ 0.60 mm。总体来看,东西向顶管施工引起隧道产生一定位移,但其变化量相对不大。

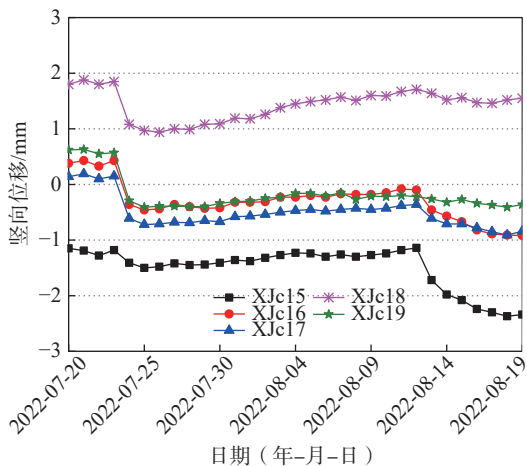


图 6 15—19 号监测点下行线竖向位移随时间变化曲线

4.2 南北向顶管施工影响实测分析

南北向顶管施工期间,为减小对隧道影响,采取顶管内部压重、刀盘正面土体改良、加强监测并控制顶进参数等措施。隧道结构沉降、道床沉降、水平位移及水平收敛最大变化量分别为 0.56, 0.70, 0.80, 1.30 mm。顶管施工引起隧道隆起增加、朝向基坑方向的水平位移增加、扩径增加。水平位移和水平收敛最大值分别为 8.50(超过报警值), 11.30 mm(超过控制值)。水平位移和水平收敛有一定增长,可能是结构顶板预留洞口未封闭所致。

顶管正上方 6—8 号监测点在顶管施工期间随时间变化曲线见图 7。顶管顶进至隧道上方之前,竖向位移为沉降增加,变化量为 0.80 ~ 0.90 mm;顶进至隧道上方时,呈现出明显隆起增加,变化量约 1.50 ~ 2.70 mm;顶进结束后,又呈现出下沉现象,变化量约 1.00 ~ 2.10 mm,顶进前、后总体表现为下沉 0.50 ~ 1.00 mm。顶进初期因管片供应不及时导致施工中断、机头下沉,并引发隧道沉降。

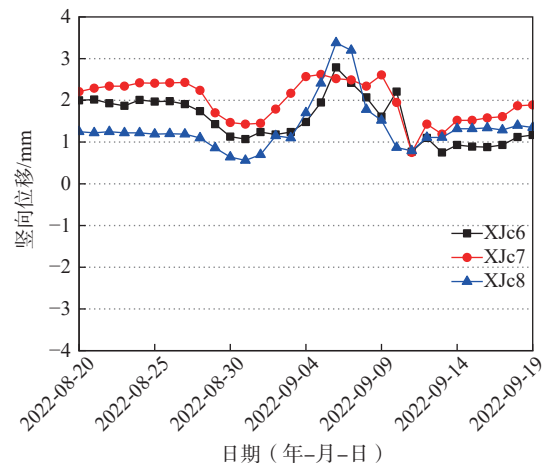


图 7 6—8 号监测点下行线竖向位移随时间变化曲线

根据 2022 年 11 月 19 日监测数据,下行线隧道结构沉降、道床沉降、水平位移及水平收敛最大值分别为 -4.11, -4.70, 8.30(超过报警值), 12.90 mm(超过控制值)。竖向围护与加固施工对隧道产生较大挤推作用,加之未严格按照“时空效应”控制基坑开挖施工,是隧道变形超过控制值的重要原因。

5 基坑及顶管施工对地铁隧道影响数值分析

利用有限元分析软件建立三维有限元模型(见图 8),分析基坑开挖及顶管施工对地铁隧道的影响。土体采用 HS 模型,根据地勘资料和工程经验,选取适合的土体参数。通过施加一定荷载,模拟竖向围护加固施工的影响,在数值模拟的隧道位移与实测接近的前提下,模拟后续基坑开挖及顶管施工对隧道的

影响。

将隧道实测数据和数值模拟结果进行反分析对比,顶管施工完成后的下行线隧道位移结果见图9。对比实测数据与数值模拟结果可知,隧道位移数值模拟的总体趋势基本一致,数值模拟水平位移和竖向位移最大值分别为6.90, -4.00 mm,与实测值8.30, -4.10 mm较为接近,表明数值模拟结果具有一定指导意义。

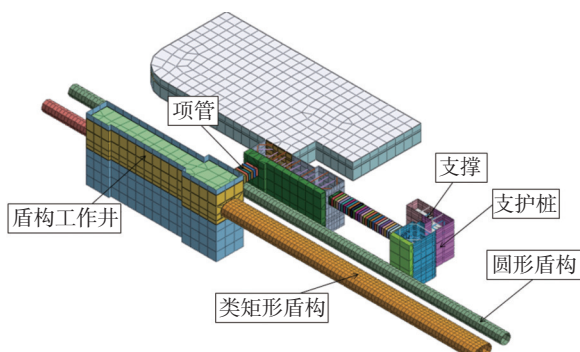


图8 基坑、顶管和轨道交通结构放大图

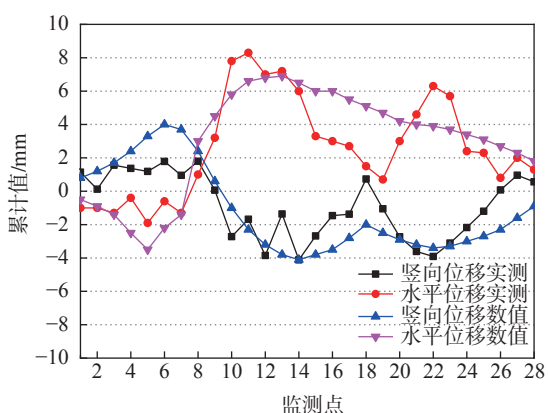


图9 隧道位移反分析结果

6 结论

基于监测数据及数值模拟,对宁波某地下通道基坑及顶管工程施工全过程对邻近隧道的影响进行分析,得到如下结论:

(1)全圆MJS隔离柱施工对隧道产生较大挤推作用,相比之下,半圆MJS隔离柱施工对隧道影响较小。施工过程中需重视施工工艺控制以及施工设备和喷浆方向的选择。

(2)地基加固搅拌桩和高压旋喷桩施工对邻近隧道影响明显,引起隧道隆起及远离施工方向的位移,隧道呈“竖鸭蛋”变形。施工完成后,随着超静孔水压消散,隧道位移回落。

(3)基坑变形具有明显的时空效应,为有效控制基坑变形,应采取限时浇筑底板、分时分段拆撑、加

强预留洞口换撑等措施。

(4)平行顶管及上穿顶管施工期间,既有隧道竖向位移经历了初始沉降、隆起增加和后期下沉阶段。顶管施工需加强对顶推力的控制并确保匀速推进。

(5)紧邻地铁的复杂地下工程,需重视全过程变形控制,建议制定分阶段变形控制标准,以实现隧道变形控制目标。

参考文献

- [1] 陈仁朋,叶跃鸿,王诚杰,等.大型地下通道开挖对下卧地铁隧道上浮影响[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(7):1269-1277. (CHEN R P, YE Y H, WANG C J, et al. Influence of open-cut tunneling on uplift behavior of underlying metro tunnel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(7): 1269-1277. (in Chinese))
- [2] 王贺敏,肖尊群,汤东桑,等.郑州地铁4号线商都路站1号地下通道矩形顶管施工过程数值模拟与现场监测[J].隧道建设(中英文),2019,39(S2):110-119. (WANG H M, XIAO Z Q, TANG D S, et al. Numerical simulation and field monitoring of construction process of rectangular pipe jacking in No. 1 underground passage of Shangdu Road Station on Zhengzhou Metro Line 4[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S2): 110-119. (in Chinese))
- [3] 叶俊能,曹信江,成怡冲,等.钻孔灌注桩施工引起的邻近深层土体位移分析[J].现代隧道技术,2019,56(S2):332-339. (YE J N, CAO X J, CHENG Y C, et al. Analysis of soil displacement adjacent to cast-in-place bored piles under construction[J]. Modern Tunneling Technology, 2019, 56(S2): 332-339. (in Chinese))
- [4] 成怡冲,龚迪快,汤继新,等.地连墙施工环境效应与预测方法研究[J].建筑结构,2020,50(17):138-143. (CHENG Y C, GONG D K, TANG J X, et al. Research on environmental effects of diaphragm wall construction and prediction methods[J]. Building Structure, 2020, 50(17): 138-143. (in Chinese))
- [5] 刘建国,李恒,童立元,等.紧邻地铁隧道的搅拌桩加固施工控制技术试验研究[J].城市轨道交通研究,2019,22(11):41-46. (LIU J G, LI H, TONG L Y, et al. Experiment of mixed pile reinforcement construction control technology adjacent to metro tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(11): 41-46. (in Chinese))
- [6] 赵香山,李春涛,王建华.软土中MJS工法桩施工环境效应的数值分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(5):1315-1319. (ZHAO X S, LI C T, WANG J H. Numerical analysis on the installation effect of MJS pile in soft clay[J]. Chinese Journal of Underground Space

- and Engineering, 2016, 12(5): 1315-1319. (in Chinese))
- [7] 姜叶翔, 李 瑛, 顾 翀. 不同地基加固工艺对周边环境变形影响分析 [J]. 地基处理, 2020, 2(4): 335-339. (JIANG Y X, LI Y, GU C. Analysis of soil disturbance for different ground improvement methods[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(4): 335-339. (in Chinese))
- [8] 叶 琪, 王国权, 杨兰强, 等. 宁波软土地区 MJS 工法桩施工对临近既有建筑物的影响分析 [J]. 隧道建设 (中英文), 2017, 37(11): 1379-1386. (YE Q, WANG G Q, YANG L Q, et al. Analysis of influence of MJS (metro jet system) pile construction on adjacent existing buildings in soft soil area in Ningbo[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(11): 1379-1386. (in Chinese))
- [9] 吴才德, 曾 婕, 成怡冲, 等. 深基坑开挖空间效应对周围土体及邻近隧道的影响研究 [J]. 建筑结构, 2016, 46(2): 91-95. (WU C D, ZENG J, CHENG Y C, et al. Influence study of spatial effect of deep foundation pit excavation on around soil and adjacent tunnel[J]. Building Structure, 2016, 46(2): 91-95. (in Chinese))
- [10] 王立峰, 庞 晋, 徐云福, 等. 基坑开挖对近邻运营地铁隧道影响规律研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2004-2010. (WANG L F, PANG J, XU Y F, et al. Influence of foundation pit excavation on adjacent metro tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 2004-2010. (in Chinese))
- [11] 王 沛, 翟杰群. 软土基坑施工引起邻近既有地铁隧道位移的预测方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 138-142. (WANG P, ZHAI J Q. Prediction method of metro tunnel displacement caused by adjacent foundation pit excavation in soft soil[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(8): 138-142. (in Chinese))
- [12] 王 沛, 任 洁, 翟杰群. 上海软土地区基坑侧向隧道位移控制措施研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 466-471. (WANG P, REN J, ZHAI J Q. Research on the lateral displacement control measures of the tunnels adjacent to foundation pits in Shanghai soft clay area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(S1): 466-471. (in Chinese))
- [13] 叶耀东. 大断面矩形顶管近距离上穿地铁隧道变形控制探讨 [J]. 城市道桥与防洪, 2015(7): 203-205. (YE Y D. Discussions on deformation control of subway tunnel by large section rectangular pipe jacking crossing in close distance[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2015(7): 203-205. (in Chinese))
- [14] 刘 波, 章定文, 刘松玉, 等. 大断面顶管通道近接穿越下覆既有地铁隧道数值模拟与现场试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2850-2860. (LIU B, ZHANG D W, LIU S Y, et al. Numerical simulation and field monitoring on a large cross-section pipe-jacking underpass traversing existing metro tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11): 2850-2860. (in Chinese))
- [15] 申文明, 朱侠达, 王小刚, 等. 新建顶管近距离上跨运营隧道控制技术研究 [J]. 地基处理, 2020, 2(5): 419-423. (SHEN W M, ZHU X D, WANG X G, et al. Control technology of newly-built pipe jacking closely over crossing operating tunnel[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(5): 419-423. (in Chinese))

收稿日期: 2023-08-15