

全方位高压喷射工法在杭州地铁盾构下穿既有线工程中的应用

蒋 力¹ 李 强²

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100071, 北京;

2. 杭州市地铁集团有限责任公司, 310003, 杭州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 以杭州地铁 5 号线滨康路站—青年路站区间盾构隧道近距离下穿既有地铁 1 号线工程为背景,对全方位高压喷射工法在盾构下穿既有线工程中的应用进行研究。通过分析现场试桩试验数据和实际施工过程监测数据,总结了采用全方位高压喷射加固后既有隧道的变形规律,并提出适用于杭州地区软土地层的施工参数及施工工序。研究结果表明:既有隧道的全方位高压喷射加固建议选择“半圆”加固方式;应合理延长相邻桩的施工间隔时间,优化施工工序;采用全方位高压喷射加固后,既有隧道结构变形得到了有效控制。

关键词 全方位高压喷射工法;软土地层;盾构下穿;现场实测

中图分类号 U455.48+2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.040

Application of Metro Jet System in Hangzhou Metro Shield Tunnel Under-passing Existing Line Project

JIANG Li, LI Qiang

Abstract Taking the project of interval shield tunnel of Hangzhou Metro Line 5 Binkang Road station to Qingnian Road station under-passing existing Metro Line 1 at close distance as research background, the application of MJS (metro jet system) in shield tunnel under-passing existing line is studied. Through analyzing field pile test data and monitoring data of actual construction process, the deformation pattern of the existing tunnel after being reinforced with MJS is summarized, and the construction parameters and procedures suitable for Hangzhou soft soil stratum are put forward. Research results show that: ‘semicircle’ reinforcement method is suggested for reinforcing existing tunnel with MJS; construction interval of adjacent piles should be reasonably extended, and the construction process to be optimized; with MJS reinforcement, structural deformation of the existing tunnel is effectively controlled.

Key words MJS technical method; soft soil stratum; shield under-passing; field measurement

First-author's address Beijing Urban Construction Design and Research Group Co., Ltd., 100071, Beijing

近年来,随着城市轨道交通建设的纵深发展,盾构穿越既有地铁线路的工程案例越来越多。高灵敏度软土地层中,盾构施工对土体产生的扰动,会造成较大的地层移动,引起既有隧道的不均匀沉降^[1]。因此,确保软土地层中既有隧道的结构安全和正常使用,成为盾构法隧道工程中亟需解决的难题。

为减少盾构近距离下穿施工对既有线的影响,常采取对既有隧道周围土体进行加固或隔离的措施,但地基加固本身对周围土体也有扰动作用^[2]。因此,选择对周边环境扰动较小且行之有效的地基处理方法显得十分重要。

MJS(全方位高压喷射)工法是在传统旋喷桩技术的基础上改进的,采用压力控制和回浆工艺,能更好地适用于环境控制要求高的场地^[3]。目前,文献[4-8]等对 MJS 工法在盾构穿越工程中的应用进行了研究;文献[9]采用数值计算和现场实测相结合的方法发现,采用 MJS 桩基施工预加固措施后,新建隧道盾构的侧穿掘进对地表及邻近建筑物的沉降影响大大减少;文献[10]采用数值模拟方法,研究结果表明,MJS 工法施工对周围土体的扰动和位移影响均较小,相较于传统旋喷桩优势更为明显。

在盾构近接工程中,采用 MJS 工法的预加固方案越来越普遍。本文依托杭州地铁 5 号线(以下简称为“5 号线”)滨康路站—青年路站区间(以下简称为“滨—青区间”)盾构隧道近距离下穿既有地铁 1 号线(以下简称为“1 号线”)工程,通过现场试桩试验和

实际施工过程的监测数据分析,分别研究 MJS 预加固阶段和盾构下穿施工阶段对既有地铁隧道扰动的影响,分析 MJS 工法在杭州软土地层中的应用效果,以期为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

滨—青区间下穿 1 号线滨康路站—湘湖站区间(以下简为“滨—湘区间”)。平面上这 2 条隧道以 58°斜交。1 号线滨—湘区间隧道埋深约为 8.8 m,5 号线滨—青区间隧道埋深约 18.3 m。在下穿段,5 号线隧道距离 1 号线隧道最小净距离为 3.258 m。5 号线和 1 号线的平面位置关系及地质纵剖面图分别如图 1 及图 2 所示。

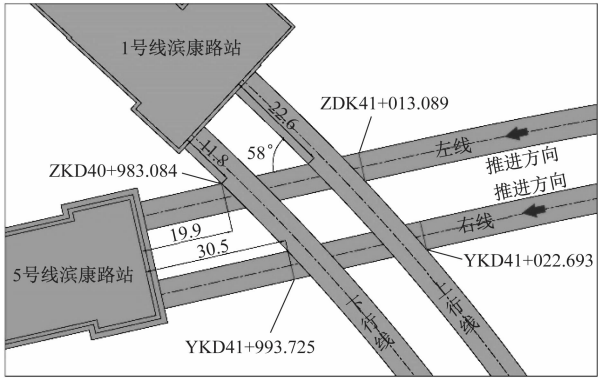
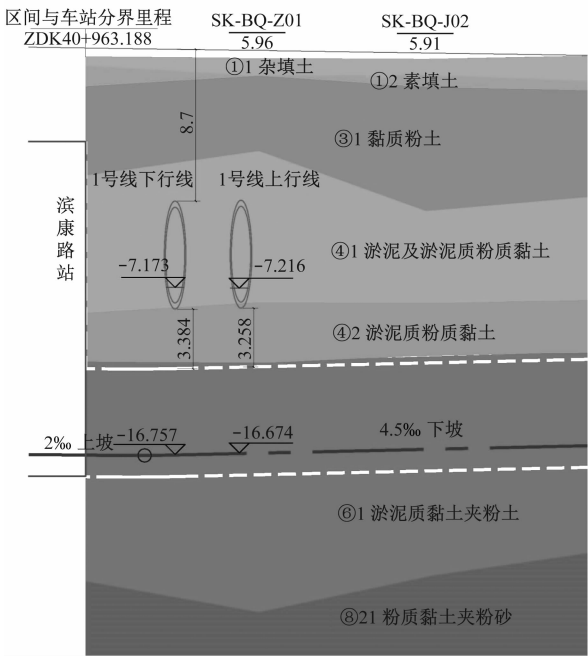


图 1 5 号线和 1 号线平面位置关系示意图(尺寸单位:m)



尺寸单位:m
图 2 下穿段地层分布图

在穿越区域,1 号线隧道主要位于④1 淤泥及淤泥质粉质黏土层,5 号线隧道主要位于⑥1 淤泥质黏土夹粉土层。④、⑥层淤泥质土层呈灰色,流塑状,富含有机质残骸,该层土具低强度、高压缩性,有较明显的蠕变、触变特性,为软土层。软土层的物理力学参数见表 1。

表 1 滨—青区间地层主要力学参数

土层	含水量/%	孔隙比	湿重度/ (kN/cm³)	塑性 指数	液性 指数	竖向渗透 系数/ (10 ⁻⁶ cm/s)	水平渗透 系数/ (10 ⁻⁶ cm/s)	标准贯入试 锤击数/ (击/30 cm)	静止侧压 力系数
④1	45.3	1.27	17.8	18.4	1.21	0.12	0.13	1.8	0.75
④2	39.5	1.12	17.5	12.6	1.6	0.10	0.19	1.6	0.70
⑥1	42.9	1.24	17.4	16.4	1.34	0.08	0.50	2.5	0.70

在盾构下穿前,既有滨—湘区间隧道已产生不少裂缝,且穿越段水平收敛值达到 27.34 mm,1 号线既有结构已处在部分损伤阶段。为了提高 1 号线隧道的抗扰动能力,采用 MJS 工法对 1 号线隧道做预加固处理。

2 MJS 工法现场试桩试验

2.1 MJS 工法施工参数

通过现场试桩试验获取杭州地区 MJS 工法主要技术参数,并与宁波地区软土地层^[11]和上海地区

软土地层^[12]中的 MJS 工法主要技术参数进行对比,如表 2 所示。在这些技术参数中,浆压力、空气压力和空气流量主要用于实现土体的切割和形成桩体,地内压力系数主要根据地区地应力测试结果进行控制。

由表 2 可以看出:杭州地区数据与上海地区数据非常接近,仅成桩垂直度误差要求更为严格;从 MJS 工法的空气压力、提升速度和浆液流量等 3 个参数来看,宁波地区取值要明显大于杭州地区和上海地区取值。

表 2 不同地区 MJS 工法的主要技术参数

参数	各地区软土地层的取值		
	杭州地区	宁波地区	上海地区
浆压力/MPa	40(±2)	≥38	≥38
空气压力	0.75~0.85	0.80~1.05	0.70
空气流量/(Nm ³ /min)	1.0~2.0	1.0~3.0	1.0~2.0
地内压力系数	1.3~1.6	1.4~1.6	1.3~1.8
成桩垂直度误差	≤1/200	≤1/100	≤1/100
提升速度/(min/m)	20~54	37.9~75.8	20~40
浆液流量/(L/min)	85~100	160~180	90~100

2.2 试桩试验工况

试验场地选择 5 号线青年路站西端头已建右线隧道处。在试桩位置处,5 号线隧道埋深约为 10.2 m,位于④1 淤泥及淤泥质粉质黏土层及④2 淤泥质粉质黏土层。试验加固地层与加固深度均与实际施工工况接近。

由于 MJS 工法具有可以“全方位”进行高压喷射注浆施工的特点,本研究在 5 号线隧道两侧分别采用半圆加固方式及半圆+全圆加固方式进行试验(如图 3 及图 4 所示),并进行比较。此外,为了避免相邻桩之间的影响,将试桩顺序调整为:N1→N3→N4→S1→S3→N2→S2→N6→N5。

2.3 试验结果分析

在试验过程中,对 5 号线隧道竖向位移、水平位移及水平收敛值进行监测。为了更直观地反映数

据的变化情况,选取距试桩位置最近的隧道监测断面绘制隧道结构累计沉降、本次试验沉降、累计水平位移及累计水平收敛的变化曲线图,如图 5~8 所示。

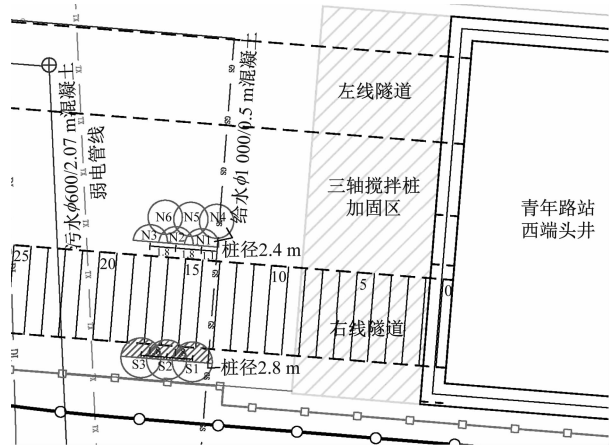
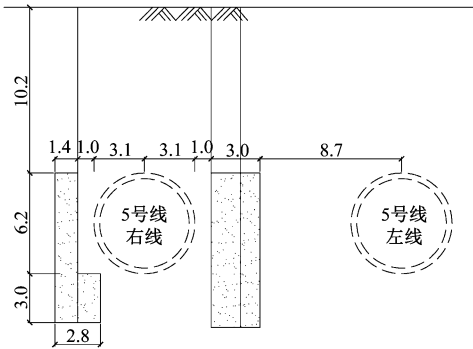


图 3 MJS 试桩平面示意图



尺寸单位:m

图 4 MJS 试桩剖面图

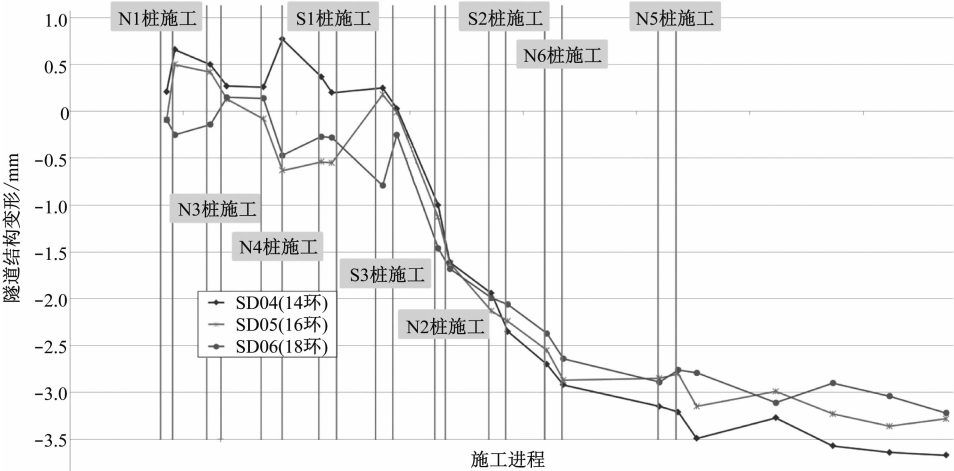


图 5 5 号线隧道结构变形与 MJS 施工关系图

由图 5 可知:在 N1、N2、N4、S1 及 S3 等 5 根桩施工过程中,5 号线隧道先后发生了隆起和沉降等

变化;累计隆起最大值为 0.77 mm,累计沉降最大值为 0.85 mm,隧道结构变形均能控制在 ±1 mm 以

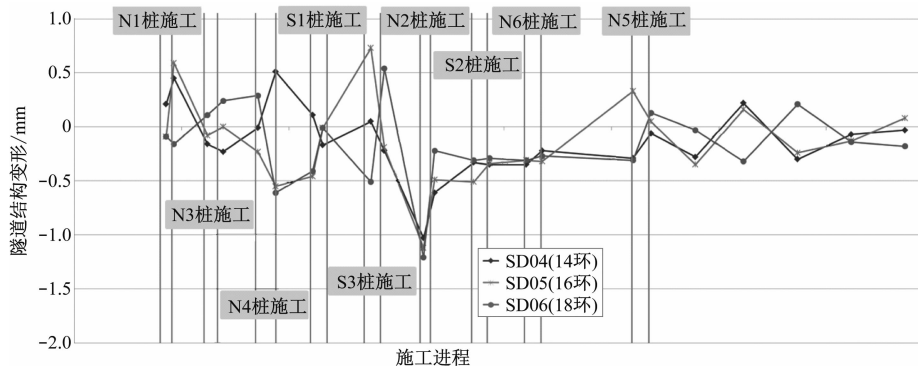


图 6 本次试验隧道结构变形与 MJS 施工关系图

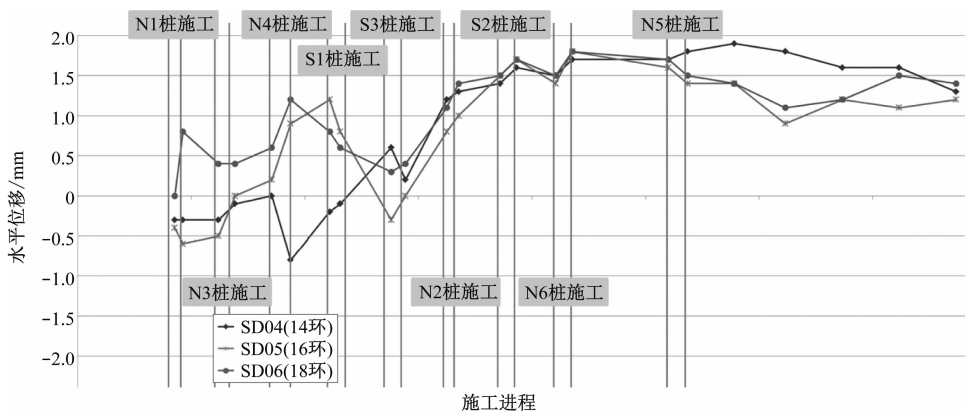


图 7 隧道结构累计水平位移与 MJS 施工关系图

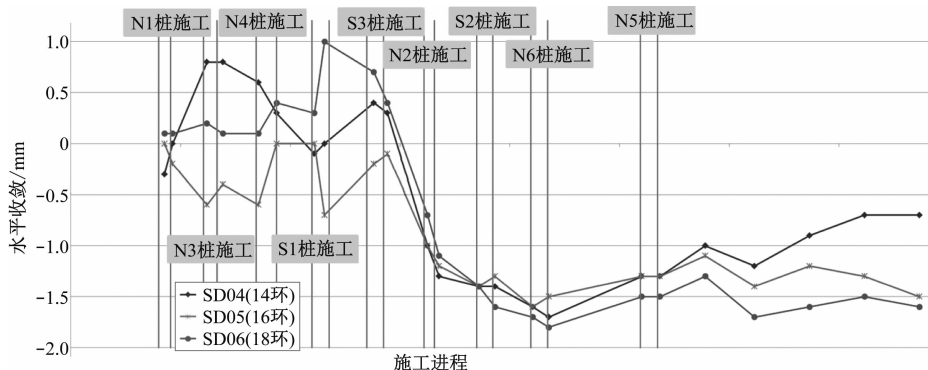


图 8 隧道结构累计水平收敛与 MJS 施工关系图

内;在 S3 桩完成后,隧道沉降急剧增加,累计沉降量增加约 2 mm。

由图 6 可知:在 MJS 单桩施工过程中,隧道结构可能发生沉降或隆起变化,但整体变形幅度均较小,变形基本能控制在 1 mm 以内。可见,MJS 单桩施工对隧道的扰动较小。当 N6 及 N5 最后 2 根桩施工完成后,隧道每日沉降变化最大仅为 0.25 mm。说明采用 MJS 加固后的隧道沉降稳定较快。此外,半圆加固方式与半圆 + 全圆加固方式对隧道沉降的影响程度均较小。因此,从经济性角度来看,建议选择半圆加固方式。

由图 7 及图 8 可知,隧道累计水平位移最大值为 -1.8 mm,累计水平收敛最大值为 1.9 mm,说明 MJS 施工对隧道有一定的挤压作用。

综合以上分析可得,在 MJS 单桩施工期间,隧道沉降变化较小,而桩基施工间隔期间,隧道沉降变化较大。这是由于本次试桩数量少,相邻桩施工的间隔时间短、距离近,导致 MJS 施工时对邻近已完成的桩体造成二次扰动,使得周围土体进一步发生沉降。因此,建议在实际加固时可采取“隔五打一”等方式来加长相邻桩的施工间隔时间。

3 盾构近距离下穿既有隧道的 MJS 加固方案

3.1 MJS 加固实施方案

根据 MJS 试桩试验结论,对既有隧道采取半圆加固方式,并优化 MJS 施工顺序。MJS 加固平面范围为滨一青区间隧道与既有 1 号线隧道穿越节点区外扩 6 m。沿既有 1 号线隧道设置 7 排 MJS 旋喷桩,桩径为 2 800 mm,桩心距为 2 000 mm,加固深度为从 1 号线隧道顶至隧道底以下 2.7 m(桩底距 5 号线隧道 0.5 m)。水泥掺量建议不宜小于 40%,28 d 无侧限抗压强度不小于 1.0 MPa。盾构穿越前要求加固土体强度不小于 0.5 MPa。

本工程 MJS 桩在既有线边施工,为减少对隧道扰动的影响,需对 MJS 施工顺序进行优化:施工宜采用跳桩施工,同条隧道一侧不同时施工,相邻桩施工间隔时间需控制不少于 3 d。

MJS 加固完成且加固体达到 0.5 MPa 后方可进行盾构穿越 1 号线施工。穿越期间,盾构推进速度不宜过快,应控制在 2~3 cm/min(6~8 环/d),尽量做到均衡、匀速施工,减少对周围土体的扰动。

3.2 既有隧道监测数据分析

3.2.1 MJS 加固施工阶段

图 9 为 MJS 加固期间 1 号线隧道累计变形的时程曲线图。在 MJS 加固施工期间,1 号线隧道道床沉降、隧道收敛及水平位移累计的最大值分别为 -2.32 mm、1.13 mm 及 0.74 mm。可以看出,MJS 加固施工过程对既有隧道影响较小。相比于试桩试验结果,隧道道床沉降、隧道收敛及水平位移累计的最大值分别减小了 35.6%、40.5% 及 58.9%。这说明延长相邻桩的施工间隔时间,优化 MJS 施工顺序可有效限制对既有隧道的扰动影响。

3.2.2 盾构下穿施工阶段

图 10 为盾构下穿既有线期间的 1 号线隧道道床沉降累计值时程曲线。由图 10 可见,1 号线隧道在盾构下穿阶段均产生了一定幅度的隆起,待盾构穿越完成后,1 号线隧道开始逐渐下沉。

表 3 为盾构下穿期间 1 号线隧道变形累计最大值统计表。由表 3 可见,相比于 MJS 加固阶段,在盾构下穿过程中,1 号线隧道道床沉降、隧道收敛及水平位移分别增大了 1.91 mm、1.91 mm 及 0.80 mm。

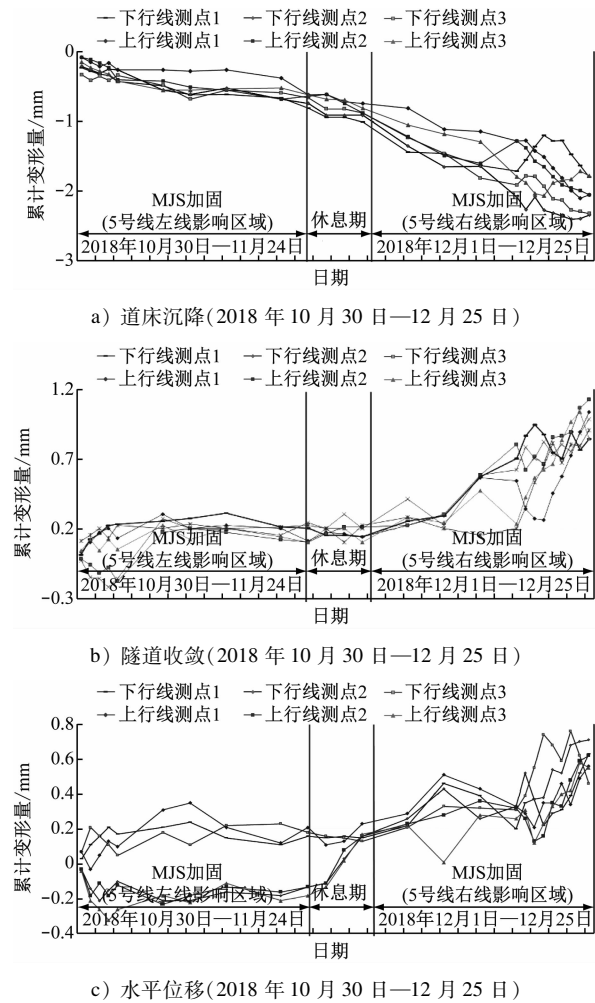


图 9 MJS 加固期间 1 号线隧道累计变形沿时间分布曲线图

表 3 盾构下穿期间 1 号线隧道变形累计最大值统计表

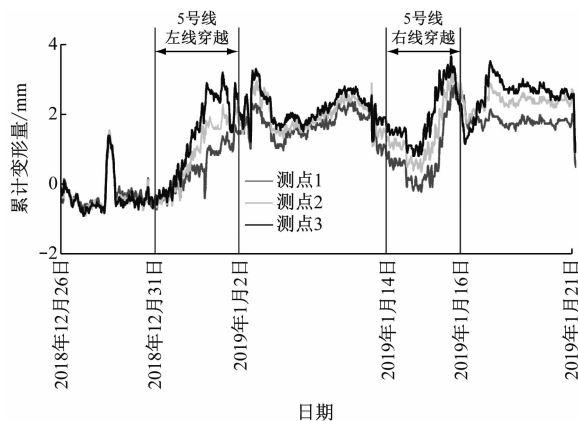
隧道	工后沉降/ mm	隧道收敛/ mm	水平位移/ mm
上行线	3.21	2.86	1.13
下行线	4.23	3.04	1.54

由上述实测数据分析可知:在合理的 MJS 施工参数及施工工序前提下,MJS 预加固措施的施工对既有隧道扰动较小;采取了 MJS 预加固保护措施后,既有隧道在盾构下穿过程中变形可控。因此,MJS 工法在杭州地区软土地层盾构下穿工程中能有效保护既有隧道,起到较明显的变形控制作用。

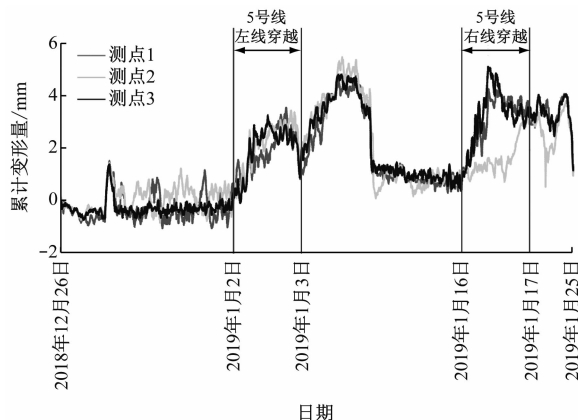
4 结论

1) “半圆”、“全圆+半圆”两种 MJS 加固方式对既有隧道扰动的影响均较小,从经济性角度建议选择“半圆”加固方式。

2) MJS 单桩施工对既有隧道的变形扰动基本



a) 上行线(2018年12月26日—2019年1月21日)



b) 下行线(2018年12月26日—2019年1月25日)

图10 盾构下穿期间1号线隧道道床沉降
累计值的时程曲线

可以控制在1 mm以内,但相邻桩施工间隔时间短会导致MJS施工时对邻近已完成的桩体造成二次扰动,因此建议实际加固时延长相邻桩的施工间隔时间,优化施工工序。

3) 既有隧道在盾构下穿阶段会产生一定幅度的隆起,待盾构穿越完成后,既有隧道开始逐渐下沉。MJS加固阶段和盾构下穿施工阶段,既有隧道道床沉降、隧道收敛、水平位移分别为-2.32 mm、1.13 mm、0.74 mm和-4.23 mm、3.04 mm、1.54

mm。

4) 在合理的施工参数及施工工序前提下,预先在既有隧道两侧进行MJS加固,可有效限制软土地层盾构下穿过程中对既有线的影响,为解决软土地层盾构下穿工程中既有隧道沉降量大的问题开辟了一条新的道路。

参考文献

- [1] 徐凌,黄宏伟,罗富荣.软土地层盾构隧道纵向沉降研究进展[J].城市轨道交通研究,2007(6):63.
- [2] 李新星,杨志豪.盾构近距离穿越高架桩基的施工影响与保护措施[J].岩土力学,2015(1):537.
- [3] 袁金秀,王道远,李栋.北京地铁6号线下穿既有4号线区间盾构隧道施工技术[J].城市轨道交通研究,2012(3):82.
- [4] 邵晶晶,李操,余立新.MJS工法和RJP工法在临近地铁车站的应用研究[J].施工技术,2016(45):84.
- [5] 周朋.MJS工法在砂卵石地层盾构近距离下穿运营地铁隧道的应用[J].都市轨道交通,2018(6):133.
- [6] 张文博,张康,陈卫军.MJS工法在富水砂层隧道密贴下穿既有车站工程中的应用[J].现代城市轨道交通,2018(10):40.
- [7] 陈仁朋,张品,刘湛,等.MJS水平桩加固在盾构下穿既有隧道中应用研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018(7):108.
- [8] 张志勇,李淑海,孙浩.MJS工法及其在上海某地铁工程超深地基加固中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012(7):41.
- [9] 吴昌将,张子新,丁文其,等.盾构侧穿邻近古建筑的施工影响分析及保护措施加固效果的研究[J].岩土工程学报,2012(1):158.
- [10] 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(5):1315.
- [11] 叶琪,王国权,杨兰迪,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(11):1379.
- [12] 洪成波.上海软土地层MJS工法施工及应用研究[D].杭州:浙江大学,2017.

(收稿日期:2020-01-12)

交通运输部发出紧急通知 部署做好城市轨道交通防汛工作

7月20日,郑州地铁因特大暴雨导致全网停运、一列车迫停隧道、造成人员伤亡。近日,我国多地迎来入汛以来最强降雨,为切实做好城市轨道交通防汛工作,确保城市轨道交通运行安全,交通运输部办公厅给各省、自治区、直辖市交通运输厅(局、委)发出了紧急通知。该通知的5部分标题分别为:

- 一、高度重视防汛工作
- 二、立即对风险隐患进行再排查再整治
- 三、及时调整完善应急预案
- 四、强化应急处置和抢险救灾
- 五、稳妥有序恢复运营

(摘自2021年7月21日交通运输部官网)