

复杂地铁保护工程中自动化加密监测方法 探讨及应用

赵少鹏, 刘 军, 王 怡

(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 地铁线路、地下市政道路、市政管廊等建设过程中的相互交叉, 会出现多种工况并存的施工影响, 比如深基坑开挖与盾构穿越、顶管穿越、注浆加固、打桩、结构整治等, 在施工过程中既要防范深基坑开挖对既有设施的影响, 又要防范局部施工导致的突变影响, 因此对传统的监测手段也提出了新的要求。本文通过工程实例阐述了在新建地铁深基坑施工和近距离盾构下穿工况并存情况下对既有地铁线路的自动化监测技术及加密监测技术的运用。通过监测数据对比分析, 表明该方法在复杂工况下能够实现实时监测、快速反馈监测结果、及时指导施工作业, 为项目的安全保驾护航。

关键词: 深基坑; 穿越隧道; 注浆; 加密监测; 数据分析

中图分类号: U231

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0138-07

Discussion and application of automatic encryption monitoring method in complex metro protection engineering

ZHAO Shao-peng, LIU Jun, WANG Yi

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

Abstract: The construction of subway lines, underground municipal roads, and municipal utility tunnels can result in multiple construction impacts due to their intersection, such as the coexistence of various work conditions including deep excavation of foundation pits crossing with shield tunneling, pipe jacking, grouting reinforcement, pile driving, structural repair, etc. During the construction process, it is necessary to not only prevent the impact of deep excavation of foundation pits on existing facilities but also to prevent the sudden impact caused by local construction. Therefore, new requirements have been proposed for traditional monitoring methods. This article uses engineering examples to illustrate the application of automated monitoring technology and encrypted monitoring technology on existing subway lines under the coexisting work conditions of new subway deep excavation and close-range shield tunneling. Through comparative analysis of monitoring data, it shows that this method can achieve real-time monitoring and rapid feedback of complex work conditions and provide timely guidance for construction operations. Therefore the safety of the project can be ensured.

Key words: deep excavation pit; cross tunneling; grouting; encryption monitoring; data analysis

0 引 言

随着我国经济建设的不断发展, 城镇化建设的加速, 城市人口不断增加, 城市基础设施建设取得了飞速发展。尤其是近些年来, 随着我国大中城市地下基础设施的不断建设和完善, 时常会出现地铁线路、地下市政道路、市政管廊等的相互交叉。以

杭州地铁为例, 截至 2022 年 9 月 23 日, 随着杭州地铁 19 号线、3 号线北延段、10 号线黄龙体育中心站的开通运营, 杭州地铁三期建设全网贯通, 线网运营里程达 516 km, 位居全国第五, 实现真正意义“轨道上的杭州”。因此, 在既有地铁线路保护区范围内同时有两个及以上邻近建设项目的共同影响时, 对保护区既有线路的监测工作提出新的要求。

1 工程概况

杭州地铁 6 号线二期工程火车东站项目位于杭州市江干区火车东站东侧, 东宁路和鸿泰路交叉口, 整体项目建设涉及两个标段: 杭州地铁 SG6-15 标段 (包括 A 区、B 区、C 区、附属结构) 和杭州地铁 SG6-14 标段 (6 号线元宝塘站—火车东站区间隧道)。新建项目与既有轨道交通线路 (杭州地铁 1 号线、4 号线) 的平面位置示意图如图 1 所示。

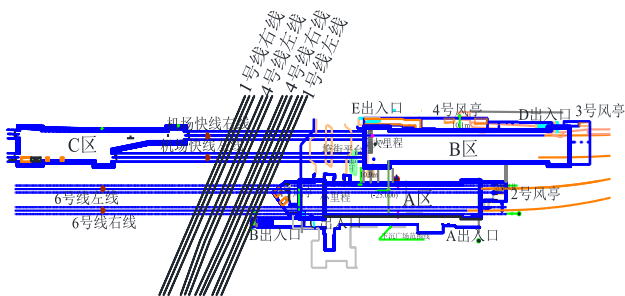


图 1 平面位置示意图

Fig. 1 Plan location

杭州地铁 SG6-15 标段 A 区距离 1、4 号线约 20 m, 为地下 4 层站, 顶板覆土 4.85~5.15 m, 底板垫层底埋深约 33.9 m。两端区间均采用盾构法施工, 大小里程端盾构工作井均为接收井。基坑标准段宽度为 22.5 m, 端头井宽度为 26.4 m、26.6 m, 车站长 147 m, 采用 1 200 mm 厚地连墙。A 区设 2 组风亭、3 个出入口及 1 通道。

杭州地铁 SG6-15 标段 B 区为地下 5 层站, 主体部分顶板覆土 3.12~3.46 m, 坑底埋深约 34.64~36.6 m。车站主体两端区间均采用盾构法施工, 大小里程端盾构工作井均为接收井。B 区标准段宽度为 22.5 m, 标准段主体围护结构采用 1 200 mm 厚连续墙, 端头井宽度为 26.9 m、27.85 m, 车站长 166.8 m, 端头井主体围护结构采用 1 500 mm 地连墙。B 区设 2 组风亭、2 个出入口。

杭州地铁 SG6-15 标段 C 区顶板覆土 2.54~3.22 m, 底板垫层底埋深约 37.20~38.06 m, 呈刀把型, C 区为配线, 未设站台。C 区南端为接收井、北端为始发井。C 区标准段宽度 23.1 m, 端头井宽度为 11.00~28.36 m, 车站长 136.2 m, 围护结构采用 1 500 mm 地连墙。

杭州地铁 SG6-14 标段 6 号线元宝塘站—火车东站区间隧道下穿既有地铁 1 号线和 4 号线火车东站—彭埠站区间隧道, 区间线间距约 12.0~16.2 m, 顶埋深约 26.5 m, 盾构隧道外径 6.2 m, 管片厚度

350 mm, 环宽 1.2 m, 与既有地铁最小净距约 3.1 m, 与既有地铁 1 号线和 4 号线间所夹土层为淤泥质粉质黏土。下穿段管片配筋选用超深埋类, 管片增设预埋注浆管, 可根据监测情况进行二次注浆, 注浆扩散半径约 2.0~3.0 m。6 号线与既有线路剖面相对位置关系如图 2 所示。

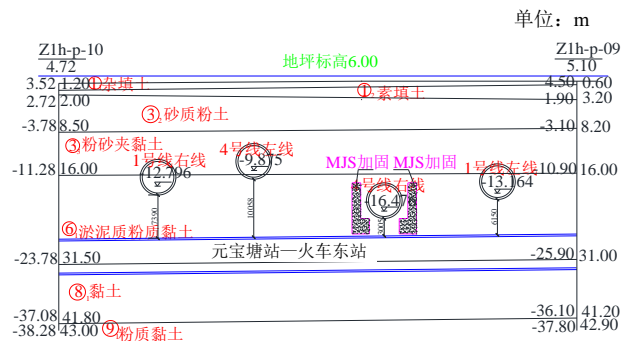


图 2 相对位置示意图

Fig. 2 Profile of relative position

既有地铁 1 号线彭埠站—火车东站区间隧道已于 2011 年开通运营, 目前运营情况稳定, 该区间盾构隧道采用错缝拼装混凝土管片, 外径 6.2 m, 管片厚度 350 mm, 环宽度 1.2 m, 所处的土层为粉砂夹砂质粉土、淤泥质粉质黏土层。本项目影响范围内既有地铁 1 号线的埋深约为 18.9~20.7 m, 新建 6 号线元宝塘站—火车东站区间隧道下穿既有 1 号线, 竖向最小净距约为 6.1 m, 涉及宽度约为 61.0 m。

既有地铁 4 号线彭埠站—火车东站区间隧道已于 2015 年开通运营, 目前运营情况稳定, 该区间盾构隧道采用错缝拼装混凝土管片, 外径 6.2 m, 管片厚度 350 mm, 环宽度 1.2 m, 所处地层为粉砂夹砂质粉土、淤泥质粉质黏土层。本项目影响范围内既有地铁 4 号线的埋深约 14.8~23.7 m, 新建 6 号线元宝塘站—火车东站区间隧道下穿既有 4 号线, 竖向最小净距约为 3.1 m, 涉及宽度约为 34.4 m。盾构隧道施工前, 先采用 MJS 工法桩对已运营 4 号线右线两侧进行加固, 规格 $\Phi 3\ 000@2\ 000$, 隧道底采用全圆喷浆, 隧道洞身范围采用半圆喷浆。

2 工程地质概况

依据该项目岩土工程勘察报告, 场地内主要土层及其物理力学性质指标见表 1。

本工程场地潜水主要赋存于浅 (中) 部填土层、粉土、黏性土及淤泥质土层中; 承压水主要分布于深部的 $(12)_4$ 圆砾、 $(14)_3$ 圆砾中, 水量较为丰富, 隔水层为上部的 $(6)_1$ 淤泥质粉质黏土和 $(8)_1$ 黏土层。

表1 土层物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil layer

层号	土层名称	土层厚度/m	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\phi/(\text{°})$
① ₁	杂填土	0.5~3.7	(18.0)	(15.0)	(18.0)
① ₂	素填土	0.9~8.4	19.3	(10.0)	(15.0)
③ ₁	砂质粉土	0.6~3.8	19.7	7.3	25.3
③ ₂	砂质粉土	1.3~6.5	20.2	6.6	28.2
③ ₃	粉砂砂质粉土	3.8~11.4	19.8	5.1	29.1
③ ₄	砂质粉土	2.0~2.4	(19.5)	6.3	27.4
⑥ ₁	淤泥质粉质黏土	9.8~17.4	17.8	14.8	10.3
⑧ ₁	黏土	5.9~15.4	17.8	21.2	10.1
⑨ ₁	粉质黏土	1.2~7.1	19.8	41.5	15.5
⑨ ₂	含砂粉质黏土	0.7~3.4	20.0	29.3	17.5
⑩ ₁	含砂粉质黏土	2.0~6.6	(20.5)	(25.0)	(15.0)
⑫ ₁	粉砂	0.5~2.0	20.2	6.8	31.6
⑫ ₄	圆砾	0.2~6.1	(19.0)	(3.0)	(35.0)
⑭ ₃	圆砾	1.4~7.2	(19.0)	(5.0)	(37.0)
⑳ _{d-1}	全风化凝灰岩	0.4~3.5	17.8	54.0	17.0
⑳ _{d-2}	强风化凝灰岩	0.5~8.7	(22.5)	(60.0)	(25.0)
⑳ _{d-3}	中风化凝灰岩	3.3~8.6	(24.0)	(200.0)	(35.0)

注: ()内为经验值。

3 监测要点和方法

在整个6号线火车东站项目SG6-15标段和SG6-14标段实施过程中的地铁保护监测都会涉及既有地铁1号线和4号线共计4条盾构隧道,按6号线推进方向既有区间隧道间的平面间距约为6.8m、8.6m及4.7m。按推进方向新建6号线与既有区间隧道间的竖向距离依次约为7.39m、10.02m、3.09m及6.15m。本项目SG6-15标段(包括A区、B区、C区、附属结构)的深基坑开挖的时空效应会导致既有运营地铁1号线和4号线设施的影响,SG6-14标段(6号线元宝塘站—火车东站区间和机场快线火车东站区间隧道)近距离下穿既有运营地铁1号线和4号线盾构隧道可能会导致突变发生,当两个标段同时施工时,会产生时空效应和可能发生突变,依靠传统的自动化监测手段就很难满足工程安全监测的要求。

基于本项目的特点,依据相关技术标准以及地铁管理文件的要求,且由于既有地铁线路运营时间长,监测人员能够进入内部进行作业的时间相对较短,因此,在SG6-15标段实施过程中对既有地铁线路的保护监测采用自动化系统。自动化监测系统具有监测频率高、观测精度高、不受运营时间限制、

速度快的特点^[1-4]。监测项目以竖向位移监测、水平位移监测、水平收敛监测为主^[5]。

经分析测算在杭州地铁SG6-15标段施工过程中单条盾构隧道的监测区域全长约126m(含往外延伸范围),自动化监测需布设一台全站仪进行观测,监测点按照每5环或者6m间距布设一个监测断面,每断面布设4个棱镜监测点,在盾构下穿的影响区按照每5环加密布设一个监测断面,在监测影响区外布设后视棱镜。既有运营地铁1号线和4号线共计4条区间隧道均按此布设。每条区间隧道有8个后视棱镜,31个监测断面,共计124个监测点,按照徕卡TM50测量机器人单次测量时间计算,完成一次系统性的完整监测需要约60min左右(不考虑行车导致的测点监测不齐全的情况),完成一个周期的报表提交大致需要70min左右。

而在杭州地铁SG6-15标段与SG6-14标段共同施工的过程中,由于SG6-14标段下穿过程中风险很高,受到了各方的高度重视,要求在下穿期间必须保证每15~20min提交一次监测报表,采用单台全站仪就不能满足时间上“实时”的要求。我方经过综合考虑,提出了在监测点加密区域新增一台全站仪(辅助机)的加密监测方法,辅助机仅负责单条新建6号线穿越时的强烈影响区的监测工作,依据盾构法外部作业的工程影响分区^[6],经计算主要

影响范围约 18 m 左右, 监测断面 8 个, 监测点 32 个, 大大缩减了工作量和观测时间, 同时为提高数据提取和分析的效率, 编制了个性化的快速数据处理软件和自动报表生成系统, 能保证单线主要影响区监测点每 15 min 提交一次监测报表, 4 条线路主要影响区监测点每 20 min 左右提交一次监测报表, 而原来的全站仪(主机)设置为每 2h 全范围观测周期。主机、辅助机监测断面布设示意图如图 3 所示。

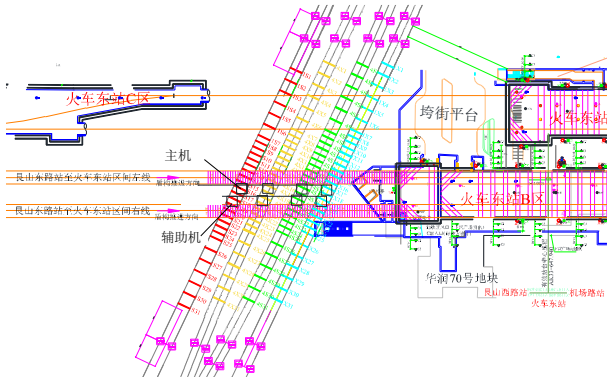


图 3 监测断面布设示意图

Fig. 3 Schematic diagram of monitoring section

为确保观测成果的一致性, 主机与辅助机均采用后方交会法, 共用后视棱镜, 所得成果互相校验。为确保本方法监测成果的可靠性, 在新建 6 号线穿越前, 对辅助机与主机监测数据进行了对比分析, 监测分析曲线见图 4~6 (图中辅助机实测数值与主机数值的差值大于零为正, 反之为负), 从主机与辅

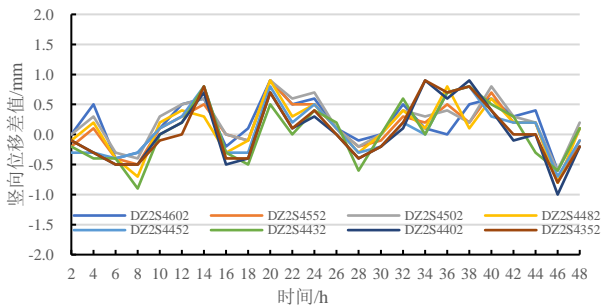


图 4 竖向位移差值变化图

Fig. 4 Variation diagram of vertical displacement difference

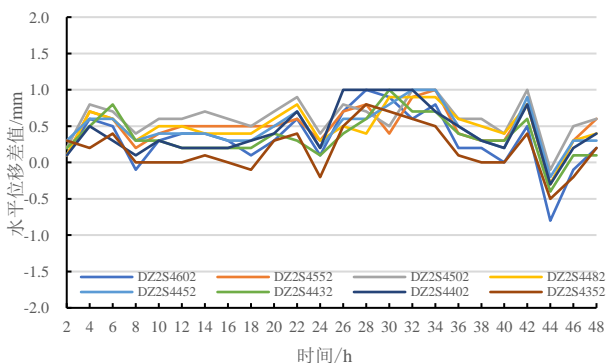


图 5 水平位移差值变化图

Fig. 5 Variation diagram of horizontal displacement difference

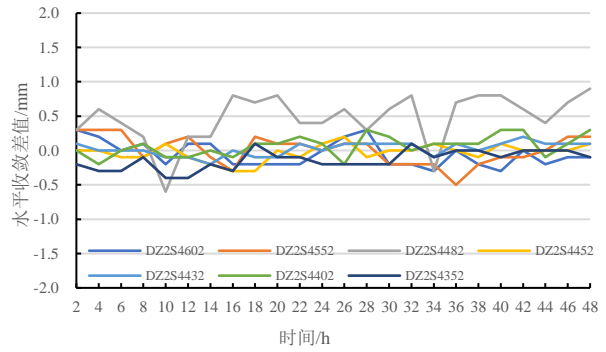


图 6 水平收敛差值变化图

Fig. 6 Variation diagram of horizontal convergence difference

4 监测过程及数据分析

综合本项目设计预评估报告、既有线路长期运营监测数据和运营数据, 该区间既有线路隧道的结构安全状况为“Ⅰ类”。综合预评估报告、专家意见、施工方案和现场情况, 新建地铁 6 号线下穿既有地铁设施过程中的变形控制值和预警值见表 2。

表 2 变形控制值和预警值

Table 2 Deformation control value and early warning value

既有线路	控制值/mm			预警值
	水平变形	竖向变形	相对收敛	
1 号线区间	+3~-3	+5~-5	±2.0	设日变量预警
4 号线区间	+3~-3	+5~-5	±2.0	±2.0 mm/d

依据杭州地铁 SG6-15 标段和 SG6-14 标段的整体施工进度, 地铁保护监测工作自 2018 年 12 月杭州地铁 SG6-15 标段 A 区槽壁加固开始, 由于本文篇幅所限, 仅对杭州地铁 SG6-15 标段与 SG6-14 标段共同施工期间, 新建地铁 6 号线左线下穿既有地铁 1 号线和 4 号线过程中加密监测期间的监测数据进行了汇总分析, 加密监测自 2021 年 1 月 2 日开始到 2021 年 1 月 9 日结束。

以下数据分析采用辅助机实测数据: 竖向位移以隆起为正, 下沉为负; 水平位移沿顶推方向为负, 反向为正; 水平收敛以直径扩大为正, 缩小为负。

杭州地铁 SG6-14 标段新建地铁 6 号线下穿既有 1 号线右线期间的竖向位移、水平位移和收敛变化详见图 7~9。新建地铁 6 号线与既有 1 号线右线的最小距离约 7.39 m, 由监测曲线可以看出, 在盾构机刀头刚进入 1 号线右线下方时, 由于掘进对周边土体产生扰动并造成部分土体损失, 1 号线右线

有 2 mm 左右的明显下沉，由于本段盾构掘进是按照一定的坡度爬升的，水平位移顺顶推方向轻微变化，管片水平直径变化较小。随着盾构机不断掘进和管片拼装，当盾尾逐渐进入 1 号线右线下方时，为安全考虑注浆量由前期的 4.5 m³ 调整到 5.5 m³，局部最大 5.8 m³，1 号线右线会随着注浆量的增大抬升明显，最大抬升量约 7 mm 左右，水平位移小幅变化，管片水平直径扩大；当盾尾逐步脱离 1 号线右线下方后，注浆量逐步调整至 4.5 m³，1 号线右线开始逐渐下沉，水平位移和水平直径变化较小。

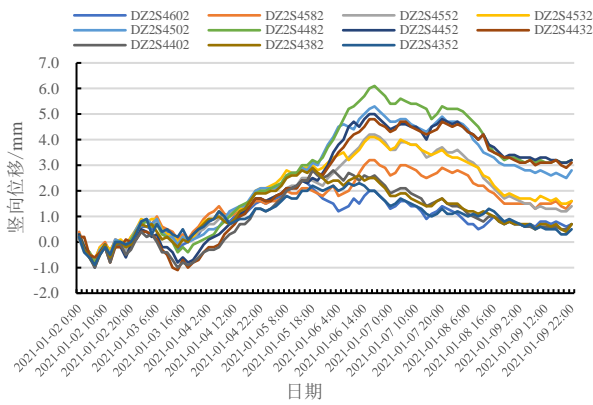


图 7 1 号线右线竖向位移变化时程曲线

Fig. 7 Vertical displacement change of right line of 1

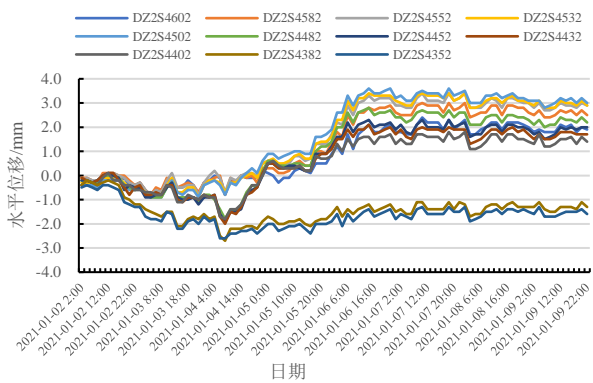


图 8 1 号线右线水平位移变化时程曲线

Fig. 8 Horizontal displacement change of right line of 1

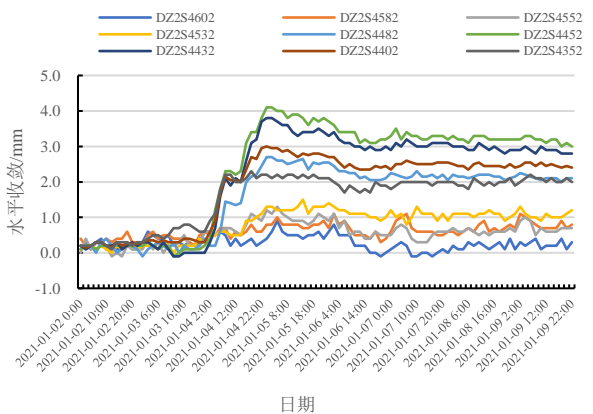


图 9 1 号线右线水平收敛变化时程曲线

Fig. 9 Horizontal convergence change of right line of 1

杭州地铁 SG6-14 标段新建地铁 6 号线下穿既有 4 号线左线期间的竖向位移、水平位移和收敛变化详见图 10~12。新建地铁 6 号线与既有 4 号线左线的最近距离约 10.02 m，由监测曲线可以看出，在盾构机刀头刚进入 4 号线左线下方时，有约 3 mm 左右的下沉，水平位移和收敛变化不明显。随着盾构机不断掘进和管片拼装，当盾尾逐渐进入 4 号线左线下方时，注浆量由过渡段的 4.5 m³ 调整到局部最大 5.8 m³，4 号线左线会随着注浆量的增大明显抬升，最大抬升量约 9 mm 左右，水平位移逐渐缓慢增大，管片水平直径扩大约 4 mm 左右。当盾尾逐步脱离 4 号线左线下方后，注浆量逐渐下调至 3.5 m³，4 号线左线开始逐渐缓慢下沉，水平位移和收敛缓慢变小。

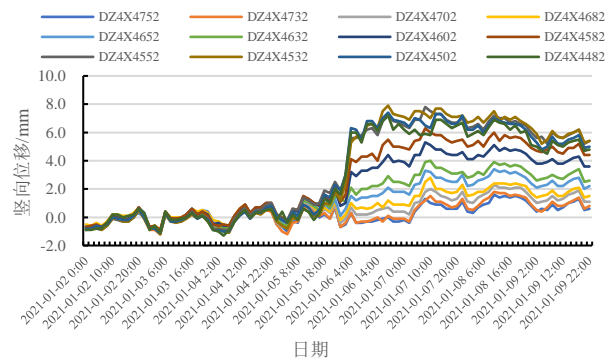


图 10 4 号线左线竖向位移变化时程曲线

Fig. 10 Vertical displacement change of left line of 4

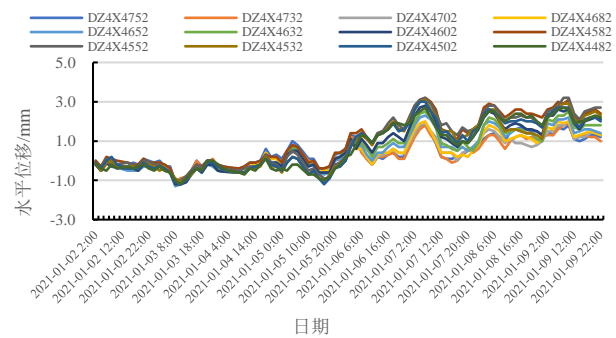


图 11 4 号线左线水平位移变化时程曲线

Fig. 11 Horizontal displacement change of left line of 4

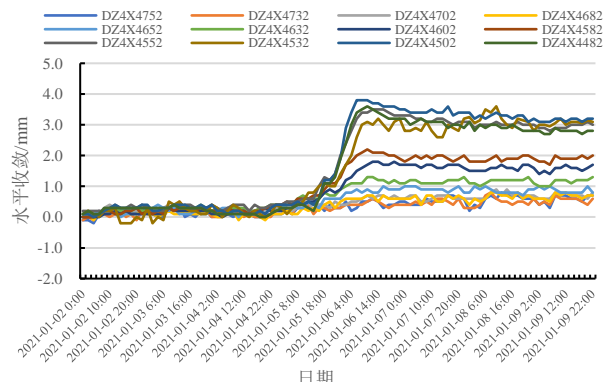


图 12 4 号线左线水平收敛变化时程曲线

Fig. 12 Horizontal convergence change of left line of 4

杭州地铁 SG6-14 标段新建地铁 6 号线下穿既有 4 号线右线期间的竖向位移、水平位移和收敛变化详见图 13~15。由于新建地铁 6 号线与既有 4 号线右线的最近距离约 3.09 m, 且已经采用了 MJS 工法桩加固处理 (见图 2), 由监测曲线可以看出, 在盾构机刀头刚进入 4 号线右线下方时, 未出现明显下沉, 但是在近距离爬坡的影响下水平位移和收敛变化明显, 最大水平位移沿顶推方向有 7 mm 左右, 水平直径缩小约 3 mm 左右。随着盾构机不断掘进和管片拼装, 当盾尾逐渐进入 4 号线右线下方时,

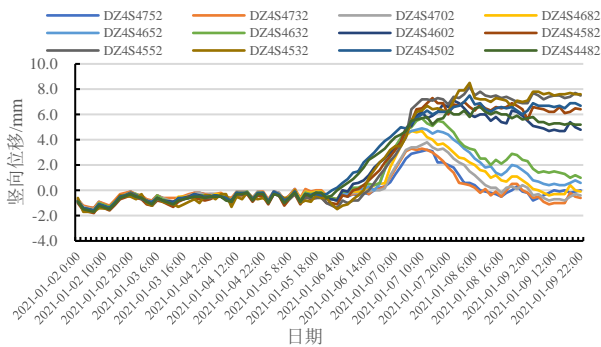


图 13 4 号线右线竖向位移变化时程曲线

Fig. 13 Vertical displacement change of right line of 4

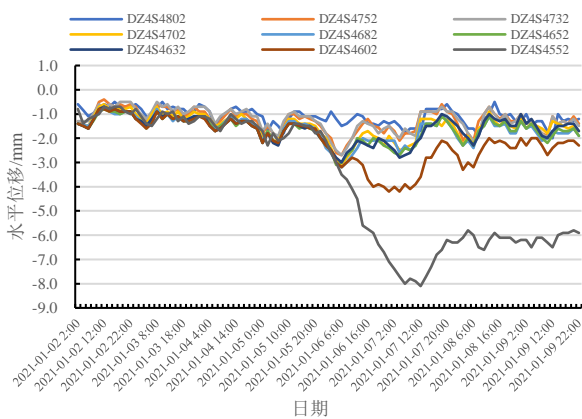


图 14 4 号线右线水平位移变化时程曲线

Fig. 14 Horizontal displacement change of right line of 4

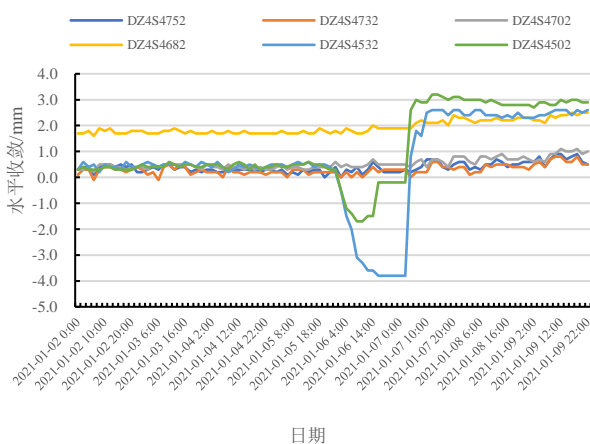


图 15 4 号线右线水平收敛变化时程曲线

Fig. 15 Horizontal convergence change of right line of 4

由于前期已采取了加固措施, 注浆量由 3.5 m³ 调整到局部最大 4.0 m³, 4 号线右线会随着注浆量的增大抬升非常明显, 最大抬升量约 11 mm 左右, 水平位移相对变化较小, 管片水平直径扩大明显, 最大约 8 mm 左右。当盾尾逐步脱离 4 号线右线下方后, 注浆量逐渐下调至 3.5 m³, 4 号线右线随时间下沉明显, 水平位移和收敛缓慢变小。

杭州地铁 SG6-14 标段新建地铁 6 号线下穿既有 1 号线左线期间的竖向位移、水平位移和收敛变化详见图 16~18。新建地铁 6 号线与既有 1 号线左线的最近距离约 6.15 m, 由于在盾构前接收井加固时注浆量较大, 导致 1 号线左线出现了一定的竖向抬升和水平位移, 由监测曲线可以看出, 在盾构到达前变形一直在减小, 所以在盾构机刀头刚进入 1 号线左线下方时, 出现了明显的下沉, 最大沉降约 5 mm 左右, 水平位移和收敛变化不明显。随着盾构机不断掘进和管片拼装, 由于前期已采取过了加固措施, 注浆量维持在 3.3 m³ 左右, 1 号线左线略有抬升, 最大抬升量约 2 mm 左右, 水平位移和管片水平收敛相对变化较小。当盾尾逐步脱离 1 号线左线下方时, 1 号线左线的沉降和收敛随时间缓慢变化, 水平位移变化明显。

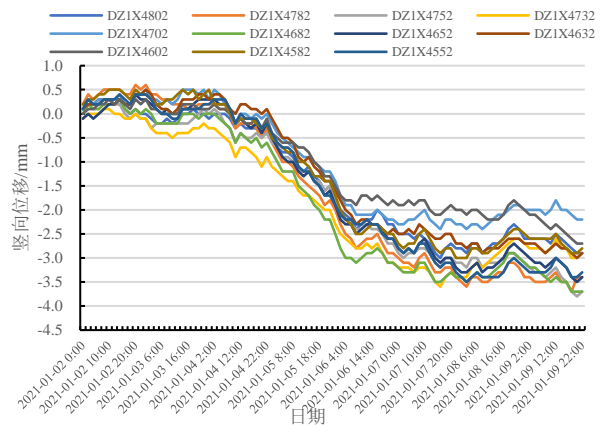


图 16 1 号线左线竖向位移变化时程曲线

Fig. 16 Vertical displacement change of left line of 1

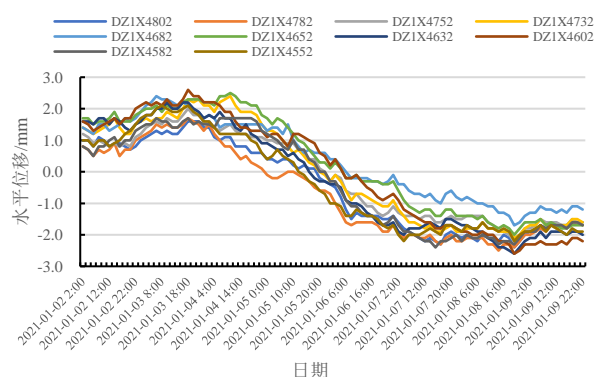


图 17 1 号线左线水平位移变化时程曲线

Fig. 17 Horizontal displacement change of left line of 1

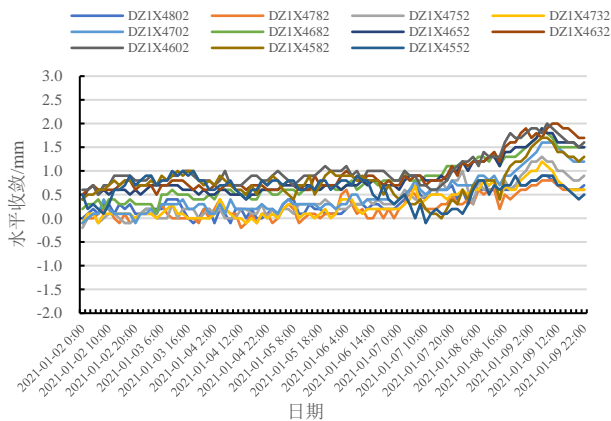


图 18 1 号线左线水平收敛变化时程曲线

Fig. 18 Horizontal convergence change of left line of 1

5 结论

根据杭州地铁 SG6-14 标段新建地铁 6 号线下穿既有 1 号线、4 号线期间加密监测数据情况分析, 可得如下结论:

(1) 由于下穿盾构掘进施工时, 不可避免地会产生地层损失, 造成其上方既有地铁隧道下沉, 易产生不均匀沉降。下穿过程中垂直距离相对较大时对隧道的水平位移影响相对小, 刀盘进入及注浆量的增加都会导致竖向位移和收敛发生变化。下穿过程中垂直距离较小时对隧道的水平位移影响大, 竖向位移和水平收敛变形敏感。

(2) MJS 工法桩加固后隧道周边土体的强度得到了改善, 对控制沉降较为有利, 但由于盾尾注浆时挤密空间有限, 隧道的水平收敛变形非常敏感, 同时水平位移也变形大, 穿越过程中容易造成隧道扭转。

(3) 自动化加密监测方法通过主机与辅助机结合的监测方式, 可以实现地铁保护区内基坑开挖与地铁近距离穿越施工条件下的“实时”监测, 能预防潜在的突发风险, 及时向各方提供监测数据, 确保既有线路的运营安全, 为复杂穿越项目顺利贯通保驾护航。

(4) 自动化加密监测方法后续在新建杭州地铁 3 号线下穿既有地铁 2 号线、杭州天目山路大盾构下穿既有地铁 2 号线, 杭州地铁 5 号线打铁关—宝善区间注浆加固及 MJS 工法桩整治等项目中成功得到了应用, 进一步证明了该技术方法的可行性。

参考文献

- [1] 邓世舜, 陆晓勇. 地铁结构保护智能监测系统的研究[J]. 福建建设科技, 2022(1): 84-88.
DENG Shi-shun, LU Xiao-yong. Research on the intelligent monitoring system of subway structure protection[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2022(1): 84-88.
- [2] 吴敏慧. 杭州某基坑施工地铁保护监测方案研究[J]. 城市道桥与防洪, 2021(6): 217-220.
WU Min-hui. Research on protection and monitoring scheme for subway in construction of foundation pit in Hangzhou[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021(6): 217-220.
- [3] 周文斌. 自动化监测技术在地铁盾构下穿铁塔中的应用[J]. 工程技术研究, 2021, 6(15): 34-36.
ZHOU Wen-bin. Application of automated monitoring technology in subway shield tunneling through iron towers[J]. Engineering and Technological Research, 2021, 6(15): 34-36.
- [4] 陈红, 刘明光. 自动化监测系统在昆明地铁 4 号线下穿既有地铁中的应用[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(6): 123-126.
CHEN Hong, LIU Ming-guang. Application of automatic monitoring in under-passing of the existing line for the construction of Kunming metro line 4[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(6): 123-126.
- [5] 赵磊. 地铁安全监测方法探讨[J]. 测绘标准化, 2022, 38(1): 44-48.
ZHAO Lei. Study on the method of subway safety monitoring[J]. Standardization of Surveying and Mapping, 2022, 38(1): 44-48.
- [6] 浙江省住房和城乡建设厅. 城市轨道交通结构安全保护技术规程: DB33/T1139—2017[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2017.
Zhejiang Provincial Department of Housing and Urban Rural Development. Technical Code for Protection of Urban Rail Transit Structures: DB33/T1139—2017[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2017.