

MJS 联合微扰动注浆在地铁隧道收敛变形整治中的应用研究

陈 璞¹, 吴 勇², 杨 康^{3,4}, 张 霄^{4,5}, 丁 智^{4,5}

(1. 杭州萧山城市基础设施建设有限公司, 杭州 311203; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 3. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 杭州 310014; 4. 浙江省城市盾构隧道安全建造与智能养护重点实验室, 杭州 310015; 5. 浙大城市学院 土木工程系, 杭州 310015)

摘 要: 为进一步提升运营地铁隧道收敛变形的综合整治效果, 提出 MJS 联合微扰动注浆整治技术, 并应用于杭州某运营地铁隧道收敛变形整治施工工程。通过分析整治施工前后隧道变形动态跟踪的监测数据与隧道断面扫描成果, 探讨联合整治对于隧道变形的整治效果, 总结微扰动注浆施工引起隧道收敛的变形规律。研究结果表明: MJS 联合微扰动注浆施工对于地铁隧道收敛变形整治效果显著, 有效解决注浆结束后隧道收敛二次反弹及注浆期间隧道产生附加变形的问题; 微扰动注浆施工应重点保证前两次注浆的施工质量, 并控制同一注浆孔位间隔时间。

关键词: 地铁隧道; 收敛变形; 联合整治; 整治效果; 变形规律; 全方位高压喷射工法; 微扰动注浆

中图分类号: U231+3, U457

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)04-0086-07

Application of MJS Combined with Micro-disturbance Grouting in Renovation of Convergence Deformation of Subway Tunnel

CHEN Pu¹, WU Yong², YANG Kang^{3,4}, ZHANG Xiao^{4,5}, DING Zhi^{4,5}

(1. Hangzhou Xiaoshan Urban Infrastructure Construction Co., Ltd., Hangzhou 311203;

2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122;

3. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014;

4. Key Laboratory of Safe Construction and Intelligent Maintenance for Urban Shield Tunnels of Zhejiang Province, Hangzhou 310015;

5. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015)

Abstract: This study proposes a renovation technology, combining Metro Jet System (MJS) and micro-perturbation grouting, aimed at improving the renovation effect of the convergence deformation in operating subway tunnels. This technique was applied to a renovation project addressing convergence deformation in an active subway tunnel in Hangzhou. The effectiveness of this combined renovation on operating tunnels was examined by analyzing the measured data of tunnel deformation both pre- and post-renovation. In addition, the tunnel deformation patterns resulting from micro-perturbation grouting were summarized. Results revealed that the combined MJS and micro-disturbance grouting renovation technique significantly improved the convergence deformation of the subway tunnel. It effectively addressed the issues of secondary rebound of tunnel convergence after grouting

收稿日期: 2022-05-06 修回日期: 2022-08-12

第一作者: 陈璞, 男, 硕士, 高级工程师, 从事市政设计及其管理工作, 183671106@qq.com

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2020C01102)

引用格式: 陈璞, 吴勇, 杨康, 等. MJS 联合微扰动注浆在地铁隧道收敛变形整治中的应用研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(4): 86-92.

CHEN Pu, WU Yong, YANG Kang, et al. Application of MJS combined with micro-disturbance grouting in renovation of convergence deformation of subway tunnel[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 86-92.

2.2 联合整治施工

本工程地铁隧道整治区段于 2020 年 7 月 18 日—2020 年 11 月 20 日期间完成现场 MJS 工法桩施工。MJS 工法桩采用 42.5R 普通硅酸盐水泥，桩径为 2 400 mm，桩位中心距离隧道边线不小于 1.5 m。施工前根据前期试桩情况以确定水灰比、浆压力、水泥掺量等施工参数。2021 年 1 月 23 日—2021 年 8 月 9 日期间完成地面微扰动注浆施工。微扰动注浆深度范围为隧道顶部至隧道中心线以下 4.6 m，注浆孔位置与隧道边线距离 $L \geq 1.2$ m，注浆过程中由下而上均匀拔管，注浆管每 30 s 拔 5 cm，形成均匀的加固体。整治施工过程中优先对变形量较小的位置进行注浆，取得相应参数后，再对变形量较大区域进行施工，实际施工期间应结合跟踪监测数据反馈，动态调整参数，现场 MJS 施工与微扰动注浆施工主要技术参数分别如表 1、表 2 所示。

表 1 MJS 工法主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of MJS

项目	施工参数
水泥掺量	50%~55%
水灰比	1:1
桩径/mm	2 400
浆压力/MPa	40(±2)
空气压力/MPa	0.5~1.0
空气流量/(Nm ³ /min)	1.0~1.2
地内压力系数	1.3~1.6
成桩垂直度误差	≤1/200
提升速度/(cm/min)	2.5(全圆)、5(半圆)
浆液流量/(L/min)	85~100

表 2 微扰动注浆工法主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of micro-disturbance grouting

项目	施工参数
水灰比	0.7:1.0
管径/mm	Φ32
注浆孔孔距/mm	1 200
注浆压力/MPa	0.3~0.5
水泥浆(A 液)流量/(L/min)	14~16
水玻璃(B 液)流量/(L/min)	5~10
双液浆体积比(A:B)	(2~3):1

3 监测数据分析

本项目整治施工期间对地铁隧道变形进行了自动

化动态跟踪监测，监测范围包括地铁隧道上行线 S1 137~S1 172 环、下行线 X160~X195 环，每 5 环布置 2 个监测断面，共布设 30 个监测断面。注浆施工期间实时提供隧道水平收敛、沉降、水平位移等变形数据，注浆施工结束后，持续对隧道水平收敛进行监测，并采用移动式三维激光扫描方法对隧道断面进行检测，以检验联合整治的效果。跟踪监测数据分析从 2021 年 1 月 23 日(微扰动注浆开始)至 2021 年 10 月 10 日(微扰动注浆结束后 2 个月)。

3.1 隧道变形整治效果

为研究联合整治施工对于隧道变形的整治效果，分别选取隧道整治区段在微扰动注浆开始、注浆结束、注浆结束后 2 个月(跟踪期)的隧道收敛和附加竖向位移累计值，得到其分布曲线如图 2~3 所示，监测结果统计见表 3。表中隧道收敛变化量正值代表横向直径变大，负值代表横向直径变小；隧道附加竖向位移正值代表隆起，负值代表下沉。

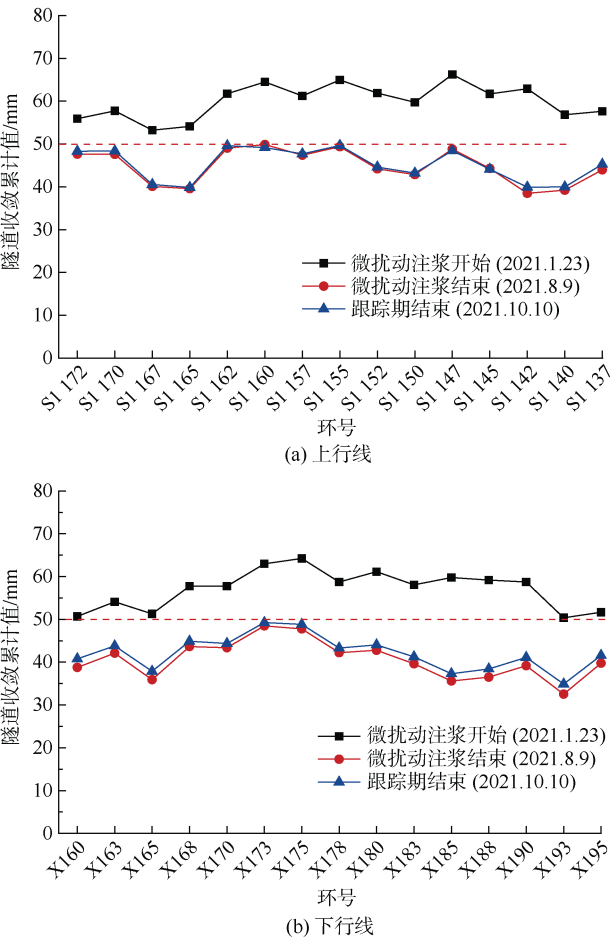


图 2 隧道收敛变形累计值分布曲线
Figure 2 Distribution curve of tunnel convergence deformation cumulative value

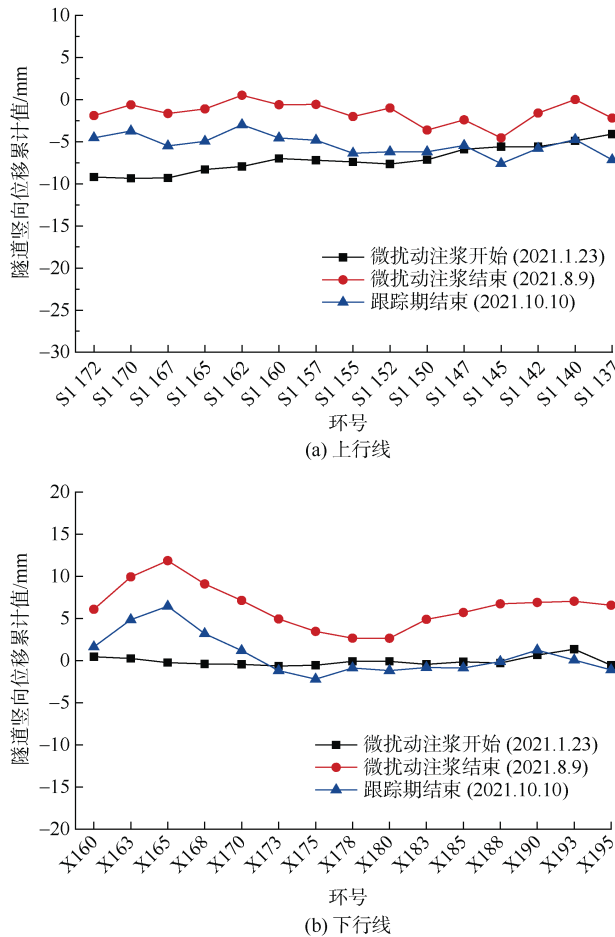


图3 隧道附加竖向位移累计值分布曲线
Figure 3 Distribution curve of tunnel vertical displacement cumulative value

表3 隧道变形监测数据统计

Table 3 Statistics of tunnel deformation monitoring data

序号	注浆环号/环	注浆期间收敛变化量/mm	注浆后收敛变化量/mm	附加竖向位移/mm
1	S1 137~S1 172	-24.4~-8.3	-0.7~+1.4	-3.1~5.6
2	X160~X195	-24.2~-11.9	+0.8~+2.4	-1.7~6.7

由图2、图3和表3分析如下。

1) 微扰动注浆施工期间整治区段隧道收敛均出现明显回缩,其中上行线收敛变化量为-24.4~-8.3 mm,下行线收敛变化量为-24.2~-11.9 mm,微扰动注浆对于隧道收敛变形整治效果显著。

2) 微扰动注浆结束后2个月内整治区段隧道收敛均出现一定回弹,但回弹量很小,其中上行线收敛变化量为-0.7~+1.4 mm,下行线收敛变化量为+0.8~+2.4 mm,表明MJS工法桩的“隔离”作用能够有效克服微扰动注浆施工后引起的收敛二次回弹。

3) 微扰动注浆施工期间整治区段上、下行线隧道竖向位移均表现为隆起,而注浆后隧道则出现一定下沉,截至注浆跟踪期结束,上行线附加竖向位移为-3.1~5.6 mm,下行线附加竖向位移为-1.7~6.7 mm,与注浆前相比,隧道竖向位移整体变化量不大,表明整治施工引起的隧道附加竖向变形处于可控范围内。

现场整治区段微扰动注浆实际施工顺序为:下行线第1轮注浆→上行线第1轮注浆→上行线第2轮注浆→下行线第2轮注浆→第3轮部分注浆。图4为不同注浆轮次施工过程中整治区段隧道收敛变化量分布曲线,可以看出,上行线收敛回缩主要发生在上行线注浆孔注浆施工过程中,而在下行线微扰动注浆施工期间上行线收敛变化量很小,最大变化量仅为1.4 mm,反之亦然。这表明,先期完成MJS工法桩的“隔离”作用极大减弱了单线注浆施工过程中对于另一条线隧道产生的附加影响。

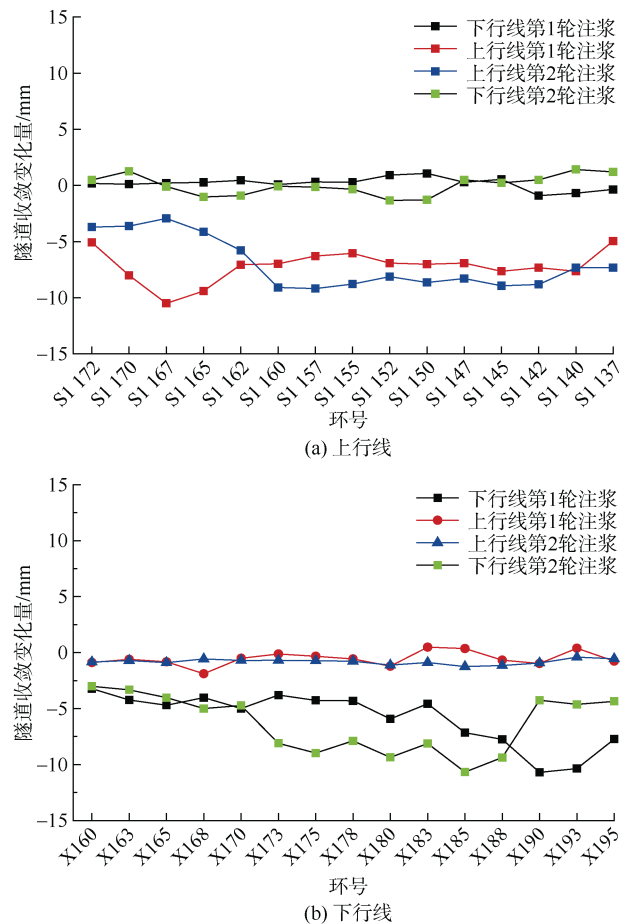


图4 隧道收敛变化量曲线

Figure 4 Variation curve of tunnel convergence

为了对比验证自动化跟踪监测数据,并弥补断面监测不完善的缺点,本工程定期采用移动三维激光扫描技术对整治区间进行断面扫描。移动三维激光扫描系统是通过沿运营轨道匀速移动三维扫描仪,提取地铁隧道管片和轨道的三维点云数据,再对点云数据的切片、去噪、曲线进行拟合处理,获取与断面点云最贴合的拟合椭圆,根据拟合后的水平直径与隧道设计值作差比较直径差异量,分析隧道管片的收敛变化状态^[11]。该方法不仅可以实现运营地铁隧道收敛的快速全面监测,而且获取的海量点云数据可进一步深度挖掘,为地铁隧道的安全监测提供保障。图5为微扰动注浆整治前后隧道三维激光扫描直径差异量成果曲线,可以看出,在微扰动注浆施工期间整治区段隧道直径差异量均明显减小,上行线隧道直径差异量变化值为8.2~19.6 mm,下行线隧道直径差异量变化值为4.8~17.1 mm,与

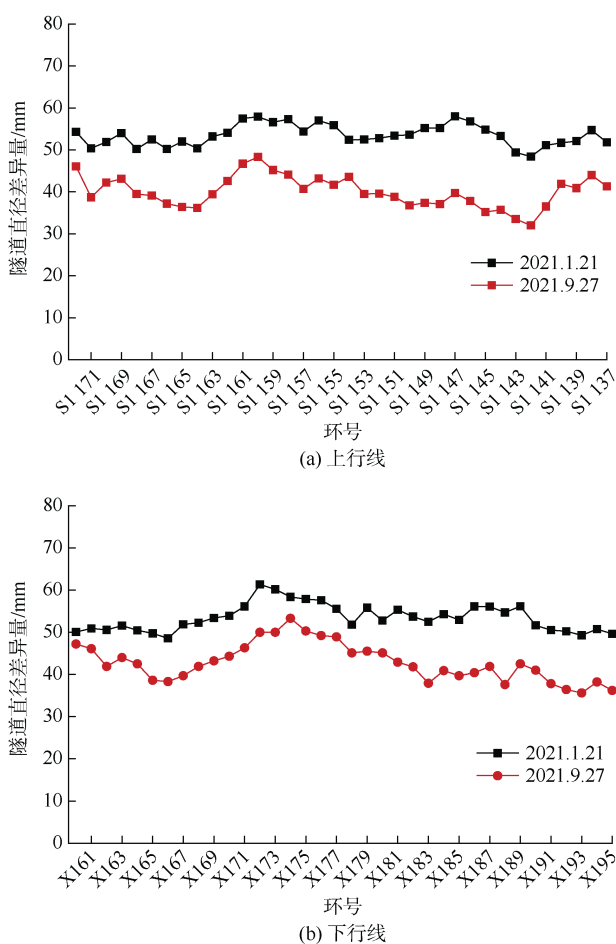


图5 隧道直径差异量曲线

Figure 5 Distribution curve of tunnel diameter difference

自动化跟踪监测收敛值变化趋势一致,进一步验证了联合整治施工对于隧道横向收敛变形的显著改善效果。

3.2 隧道收敛变形规律

根据微扰动注浆孔位布设(见图6),各选取整治前上、下行线隧道收敛累计值超过60 mm的两环管片作为典型断面,分别为上行S1 162环、S1 160环(对应注浆孔位:D525~D528, D625~D628),下行X173环、X175环(对应注浆孔位:D726~D729, D832~D835),重点分析隧道收敛变形随微扰动注浆施工进程的变化规律,得到其收敛变形累计值随微扰动注浆施工进程的曲线如图7所示,隧道典型断面微扰动注浆情况监测数据统计见表4~5。

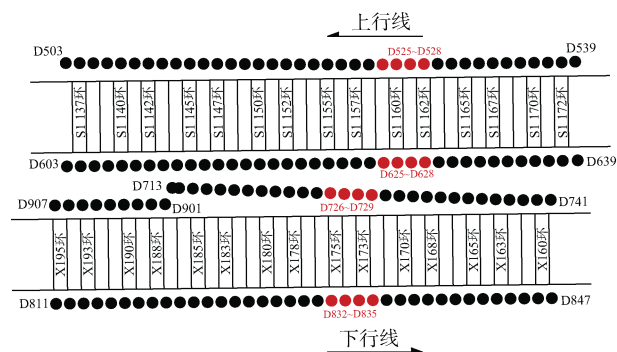


图6 微扰动注浆孔位布设示意

Figure 6 Layout of micro-disturbance grouting holes

由图7分析可知,注浆整治施工完成后的2个月隧道收敛变形数据已趋于稳定。隧道典型断面在对应注浆孔进行注浆施工期间,隧道收敛处于明显回缩趋势;在对应注浆孔注浆结束后其收敛变形能够快速趋于稳定,表明隧道收敛整治效果显著的同时,先期完成的MJS工法桩能够有效隔离注浆浆液的扩散,土体受到扰动后能够快速稳定。隧道收敛的回缩主要发生在对应注浆孔位前两次注浆,第3次注浆对于收敛变形影响较小,说明前两次注浆浆液已经使周边土体强度形成,后续注浆效果不明显。

表4~5数据显示,对应注浆孔注浆施工间隔时间越短,隧道收敛变形变化速率越快,为保证隧道收敛变化的稳定性,建议微扰动注浆施工控制同一孔位注浆间隔时间。

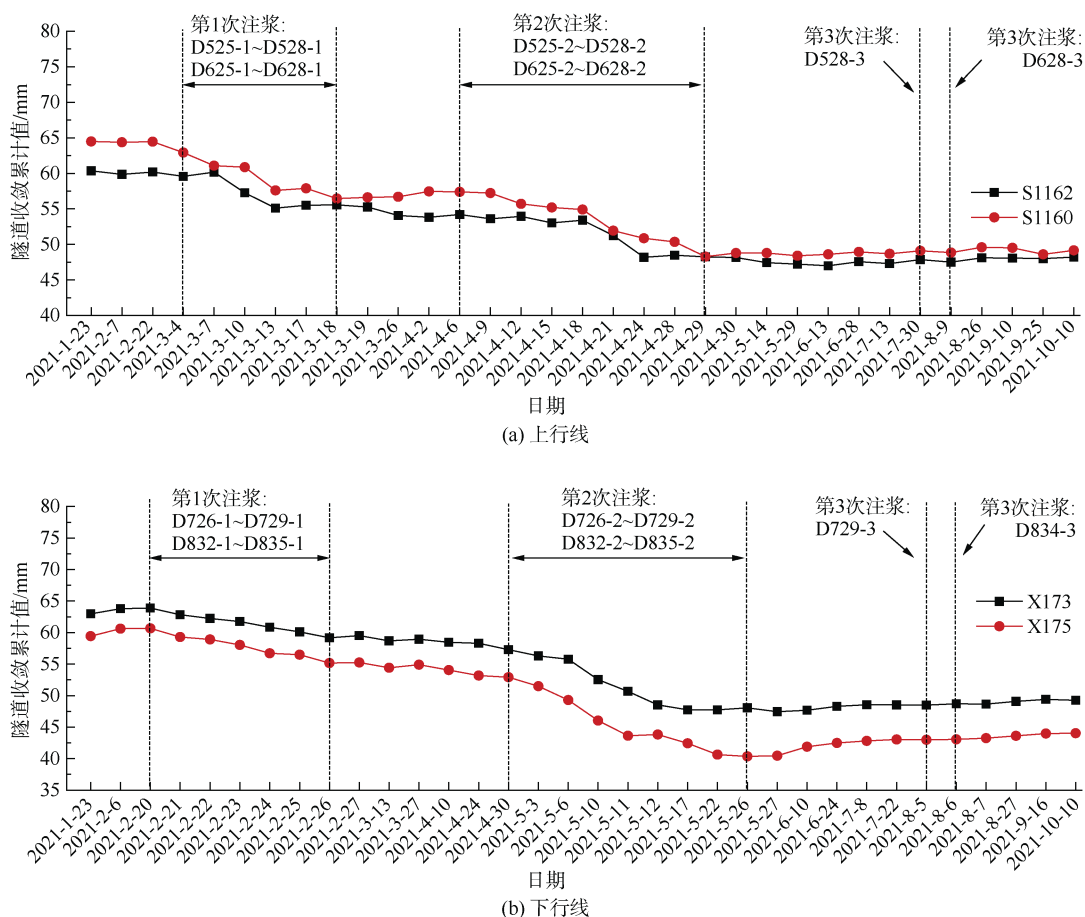


图7 隧道典型断面收敛变形历时曲线

Figure 7 Convergence deformation duration curve of typical tunnel sections

表4 上行隧道典型断面监测数据统计

Table 4 Monitoring data statistics of typical upline sections sections

注浆环号	第1次注浆 (2021.3.4—2021.3.18)		第2次注浆 (2021.4.6—2021.4.29)	
	变化值/ mm	变化速率/ (mm/d)	变化值/ mm	变化速率/ (mm/d)
S1162	-4.0	-0.29	-6.0	-0.26
S1160	-6.5	-0.46	-9.1	-0.40

注：表中负号代表隧道横向直径变小。

表5 下行隧道典型断面情况监测数据统计

Table 5 Monitoring data statistics of typical downline

注浆环号	第1次注浆 (2021.2.20—2021.2.26)		第2次注浆 (2021.4.30—2021.5.26)	
	变化值/ mm	变化速率/ (mm/d)	变化值/ mm	变化速率/ (mm/d)
X173	-4.7	-0.78	-9.2	-0.36
X175	-5.5	-0.92	-12.5	-0.52

注：表中负号代表隧道横向直径变小。

4 结语

为解决单一微扰动注浆整治施工存在的问题，提出 MJS 联合微扰动注浆整治施工技术，并成功应用于杭州某运营地铁隧道整治施工工程。结合现场微扰动注浆施工前后地铁隧道的自动化跟踪监测数据与断面三维激光扫描成果，分析得出以下结论。

1) 整治施工期间隧道收敛回缩明显，完成预期整治目标，隧道收敛变形整治效果显著。

2) 先施工的 MJS 工法桩能够有效解决微扰动注浆后收敛回弹的不利现象，同时能够有效抑制整治施工过程中隧道产生的附加变形。

3) 整治区段隧道在对应注浆孔注浆施工期间，隧道收敛处于明显回缩趋势，在对应注浆孔注浆施工后隧道收敛能够快速趋于稳定。

4) 微扰动注浆施工应重点保证前两次注浆的施工质量，后续注浆次数须结合现场实测数据进行综合考虑；注浆施工期间为保证隧道收敛变化速率的稳定，宜控制同一注浆孔位注浆间隔时间。

参考文献

- [1] 林楠, 李攀, 谢雄耀. 盾构隧道结构病害及其机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊 2): 802-809.
LIN Nan, LI Pan, XIE Xiongyao. Research on evolution mechanism of shield tunnel disease based on segment performance analysis[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(S2): 802-809.
- [2] 闫静雅, 王如路. 上海软土地铁隧道沉降及横向收敛变形的原因分析及典型特征[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 178-187.
YAN Jingya, WANG Rulu. Cause analysis and typical characteristics of settlement and transverse convergence deformation of metro tunnel in soft ground in Shanghai[J]. Journal of natural disasters, 2018, 27(4): 178-187.
- [3] DING Z, ZHANG Xiao, YIN X, et al. Analysis of the influence of soft soil grouting on the metro tunnel based on field measurement[J]. Engineering Computations, 2019, 36(5): 1522-1541.
- [4] 张金红, 李瑛, 刘兴旺, 等. 基于水平收敛变形的软黏土盾构隧道病害统计分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 124-130.
ZHANG Jinhong, LI Ying, LIU Xingwang, et al. Statistical analysis of shield tunnel disease based on horizontal convergence in soft clay[J]. China civil engineering journal, 2020, 53(S1): 124-130.
- [5] 邓指军. 双液微扰动加固注浆试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(S1): 1344-1346.
DENG Zhijun. Experimental study of two-shot micro-disturbance reinforced grouting[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2011, 7(S1): 1344-1346.
- [6] 翟超, 陈涛, 张培贺. 微扰动注浆对地铁隧道收敛变化的研究[J]. 勘察科学技术, 2018(5): 5-8.
ZHAI Chao, CHEN Tao, ZHANG Peihe. Research on change of metro tunnel convergence caused by microperturbation grouting[J]. Site investigation science and technology, 2018(5): 5-8.
- [7] 蔡乾广, 贺磊. 双液微扰动注浆在治理盾构错缝管片收敛中的应用[J]. 城市勘测, 2019(1): 193-195.
CAI Qianguang, HE Lei. Application of double-liquid micro-perturbation grouting in the convergence treatment of staggered shield segments[J]. Urban geotechnical investigation & surveying, 2019(1): 193-195.
- [8] 王群敏, 吴勇, 王烨晟, 等. 运营期地铁盾构隧道管片收敛整治过程变形特征分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(12): 131-134.
WANG Qunmin, WU Yong, WANG Yesheng, et al. Deformation features analysis in the renovation process of subway tunnel segment convergence[J]. Urban mass transit, 2018, 21(12): 131-134.
- [9] 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 Qi, WANG Guoquan, YANG Lanqiang, 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.
- [10] 朱合华, 丁文其, 乔亚飞, 等. 盾构隧道微扰动施工控制技术体系及其应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 1983-1993.
ZHU Hehua, DING Wenqi, QIAO Yafei, et al. Micro-disturbed construction control technology system for shield driven tunnels and its application[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(11): 1983-1993.
- [11] 吴勇, 张默爆, 王立峰, 等. 盾构隧道结构三维扫描检测技术及应用研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 1304-1312.
WU Yong, ZHANG Mobao, WANG Lifeng, et al. Research on 3D scanning technology and its application to the shield tunnel structure detection[J]. Modern tunnelling technology, 2018, 55(S2): 1304-1312.

(编辑: 傅依萱)