

潘涛. 盾构超近距离上穿诱发既有隧道纵向与水平变形研究[J]. 华南地震, 2021, 41(3): 33-39. [PAN Tao. Research on Longitudinal and Horizontal Deformation of Existing Tunnel Induced by Shield Tunneling in Extra Close Distance[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(3): 33-39]

盾构超近距离上穿诱发既有隧道纵向与 水平变形研究

潘 涛

(上海隧道工程有限公司, 上海 200000)

摘要: 盾构超近距离上穿既有运营隧道时, 由于施工引起的土体扰动较大, 控制地层沉降和扰动变形的难度也随之增大。基于宁波轨道交通5号线上穿运营的宁波轨道交通2号线区间隧道建立Flac^{3D}模型, 研究了掘进过程中既有隧道的变形规律, 并探究了不同推进速度对隧道变形的影响。结果表明, 当隧道开挖时, 在掌子面还未达到既有隧道范围、位于既有隧道中心附近、超出既有隧道范围的过程中, 既有隧道的纵向沉降与水平位移均出现明显的上升与回落现象; 隧道超近距离上穿既有隧道将诱发双线隧道上行线和下行线相似的竖向沉降以及不同的水平变形规律, 且水平变形数值沿盾构掘进方向有所增大; 在保障隧道施工过程稳定性的前提下, 考虑工程特点与施工效率, 试验段推进12环/d, 穿越段推进10环/d为该工程的最佳推进速度。

关键词: 盾构隧道; 隧道上穿; 竖向沉降; 水平位移; 推进速度

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)02-0033-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.03.05

Research on Longitudinal and Horizontal Deformation of Existing Tunnel Induced by Shield Tunneling in Extra Close Distance

PAN Tao

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: When the shield passes through the existing operating tunnel from above with extra close distance, the soil disturbance caused by construction is large, so it is difficult to control the ground settlement and the structure disturbance deformation. Based on the section tunnel of Ningbo Metro Line 5 passing through the existing operating Ningbo Metro Line 2 from above, this paper established a three-dimensional finite element numerical analysis model, studied the deformation law of the existing tunnel in the tunneling process, and analyzed the influence of different propulsion speed on tunnel deformation. The results showed that the longitudinal settlement and horizontal displacement of the existing tunnel rose and fell obviously due to the excavation disturbance in the process of the

收稿日期: 2020-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678352)

作者简介: 潘涛(1985-), 男, 工程师, 主要从事地下工程施工技术研究。

E-mail: 278342875@qq.com

face not reaching the scope of the existing tunnel, near the center of the existing tunnel and beyond the scope of the existing tunnel. The similar vertical settlement and different horizontal displacement of the uplink and downlink would be induced when the shield passing through the existing tunnel from above with extra close distance, and the horizontal displacement value would increase along the direction of shield tunneling. On the premise of ensuring the stability of the tunneling process, considering the engineering characteristics and construction efficiency, the best advancing speed of the project was 12 rings per day for the test section and 10 rings per day for the crossing section

Keywords: Shield tunnel; Tunnel overpass; Vertical settlement; Horizontal displacement; Propulsion speed

0 引言

随着城市规模不断扩大,城市轨道交通快速发展,在密集的地铁网络建设中不可避免的存在新建盾构穿越既有隧道施工的巨大风险。而盾构法因其对周围环境影响小、机械化程度高等优势被广泛使用^[1]。盾构法在城市施工的工程情况极为复杂,许多学者对不同的穿越情况以及不同的影响因素进行了研究。

刘辉等^[2]提出了上软下硬浅覆土条件下土压平衡盾构下穿密集建筑群的施工技术;许维青等^[3]通过对盾构下穿时的沉降变形进行模拟分析,在盾构穿越过程中,以全程自动化监测为导向实时进行地面跟踪补充注浆成功地将机场快轨路基最大沉降值控制在0.68 mm以内;魏纲^[4]等研究了新建隧道下穿既有隧道时产生的响应,提出一种能准确预测既有隧道位移的计算方法;甘晓露^[5]等基于两阶段分析法提出考虑新建盾构隧道上浮影响的隧道下穿引发既有隧道纵向变形计算模型,并发现控制新建隧道上浮量或减小新建隧道直径可有效减小由于上浮效应造成的既有隧道隆起变形;刘新军^[6]等研究了盾构隧道下穿时土舱压力和注浆压力对既有隧道位移的影响,并发现土舱压力在0.19 MPa以内变动时对隧道控制效果最显著,且在实际施工过程中,注浆压力不宜过大,以防水泥浆液劈裂土体造成土体破坏;杨芝璐等^[7]采用数值模拟与现场实测相结合的方法研究了超大直径隧道不同角度下穿既有隧道对其变形的影响,并发现了叠交角度是影响既有隧道变形的重要因素,角度越小,既有隧道变形越大。在上述研究中,大多针对隧道上穿既有隧道进行了研究,而实际工程中,往往还有并行、交叠、上穿等情况。

为了应对不同的工程情况,Ng等^[8]建立了一系列3D有限元模型来模拟硬黏土中双线平行NATM

隧道的相互影响,并发现了双隧道掌子面的滞后距离对单个隧道水平位移的影响大于对隧道竖向位移的影响,而滞后隧道对超前隧道有荷载传递效应;骆瑞萍等^[9]研究了淤泥层中盾构上穿近接既有地铁线路的影响规律及控制效果,结合数值模拟和自动化监测数据结果,分析了淤泥地层中盾构上穿近接既有地铁线施工稳定性控制效果,并给出了盾构掘进参数的建议值;张孟喜等^[10]针对全风化花岗岩地层致密、渗透系数小及双层四线叠交穿越复杂地层等特点,通过现场监测与三维动态有限元数值模拟手段,研究了实际工程中注浆压力合理取值与既有隧道变形控制。

在研究盾构隧道时,施工参数的选取尤为重要,因此,许多学者在各种工程条件下研究了不同参数对盾构穿越的影响。周群等^[11]研究了超大直径盾构下穿运营隧道的变形特征和规律,发现了运营地铁隧道的沉降变形主要集中于3倍投影区域范围内,盾构穿越施工扰动与掘进速度、同步注浆量、拼装时间等参数有关;宋洋等^[12]采用控制变量法,利用自制的模拟泥水盾构掘进系统,比选泥浆外加剂,分析了外加剂掺入量和地层复合比对出浆相对密度的影响规律以及不同地层复合比、膨水比和渣土用量下,泥浆的渗透规律及动、静态泥膜成膜规律;徐征杰等^[13]以渣土塌落度、渗透系数和改良成本为响应值,研究了膨润土泥浆浓度、掺入比和盾构推进速度对渣土的改良效果,且发现了各因素之间存在显著交互作用。

从以上的研究中可以发现,针对盾构超近距离上穿诱发既有隧道变形情况的分析研究较为匮乏。基于此,本文依托于宁波轨道交通5号线上穿运营的宁波轨道交通2号线区间隧道,建立Flac^{3D}模型,对盾构掘进过程中既有隧道的变形规律进行研究,并对不同的盾构推进速度进行了模拟,探究其对隧道变形的影响,为工程实践提供参考。

1 工程概况

宁波轨道交通5号线同德路站—石碶站区间采用单圆盾构法施工,在鄞县大道与雅戈尔大道交叉口上穿运营的宁波轨道交通2号线鄞州大道站—石碶站区间隧道,呈约76°角斜交状态。其中,盾构隧道外径为6200 mm,管片宽度为1200 mm,管片厚度为350 mm。盾构区间上行线、下行线隧道中心线间距为16 m。

沿掘进方向按提前50 m为影响范围去考虑^[14],5号线上行线约904~985环为穿越影响区,此处隧道顶覆土埋深约10.7 m,穿越时5号线隧道底部距离2号线下行线隧道顶部1.239 m,距离2号线上行线隧道顶部1.167 m。5号线下行线约917~995环为穿越影响区,穿越时5号线隧道底部距离2号线下行线隧道顶部1.233 m,距离2号线上行线隧道顶部1.170 m。对应2号线的影响范围是上行线743~818环,下行线747~822环。本工程的穿越净距远小于盾构机直径,属于超近距离。上穿区域平面

示意图如图1所示。穿越区间的土层及物理力学指标如表1所示。本区间盾构穿越土层主要为5-1a粘土,勘察期间测得的地下水稳定水位埋深为0.3~2.9 m。

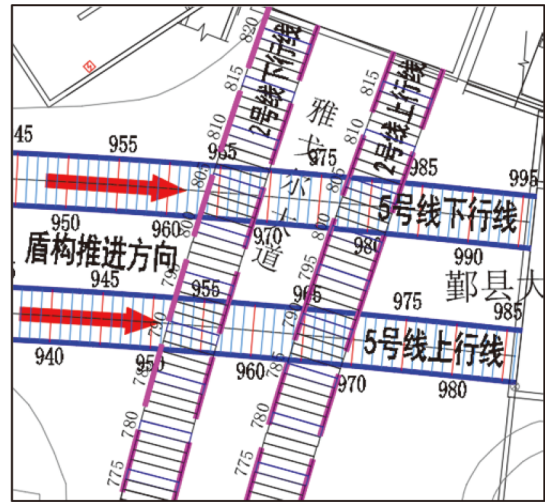


图1 隧道上穿区域平面示意图

Fig.1 Plan view of the tunnel passing through the existing tunnel from above area

表1 土层及物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil

土层	厚度/m	泊松比	压缩模量/MPa	内摩擦角 ϕ /($^{\circ}$)	粘聚力/kPa	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1-1 填土	2.67	0.25	3	15	8	2
1-3b 淤泥质粘土	3.5	0.42	2.3	11.2	11.2	1.74
2b 淤泥质粘土	2	0.42	2	8.6	9.2	1.73
2a 淤泥	3	0.42	2.2	10.5	11	1.73
5-1a 粘土	8.2	0.35	6.2	14.3	37.4	1.93
5-1b 粉质粘土	8.4	0.35	6	13.4	29.3	1.93
5-4a 粘土	9.7	0.35	5.1	11.4	22.9	1.93
6-1 粘土	10.63	0.35	6.4	14.3	42.6	1.93

考虑到穿越地铁2号线的重要性,盾构到达穿越区域段逐渐降低推进速度,由常规推进速度的12环/d,调整到试验段推进10环/d,穿越段推进8环/d。

根据5号线与2号线的相对位置关系,5号线上跨2号线施工时,2号线本体监测采用全自动化监测及人工监测,监测范围是5号线同德路站—石碶站在2号线石碶站—鄞州大道站区间上的投影并向两侧各延伸50 m监测范围(共122 m)。盾构开挖之前,将5号线盾构隧道在2号线投影并向两侧各外延6.2 m的区域作为重点区域,每2环布设了1

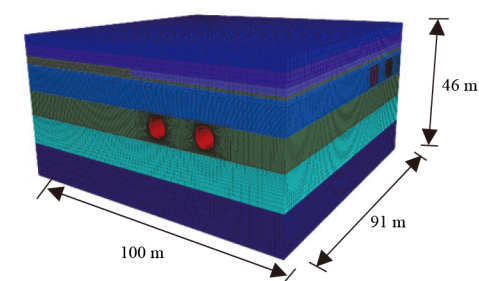
个监测断面,其它区域5环布设了1个监测断面,每个监测断面都包含了结构沉降监测点和水平位移监测点。

2 数值分析

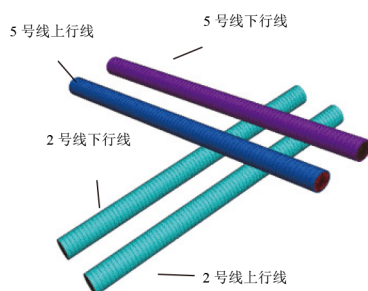
2.1 数值模型的建立

为进一步分析上述影响因素对上穿既有隧道施工的影响,建立有限元数值分析模型。为减少其他因素的影响,仅对5号线上穿2号线进行模

拟,采用Flac^{3D}软件进行计算。为简化计算,假定盾构推进方向为直线,选取盾构纵断面每延米作为计算单元,采用摩尔库伦模型进行盾构隧道掘进施工的数值模拟。根据规范^[14]选取模型边界,此处模型尺寸为100×91×46 m³,具体模型如图2所示。



(a) 整体模型



(b) 隧道模型

图2 数值分析模型

Fig.2 Numerical analysis model

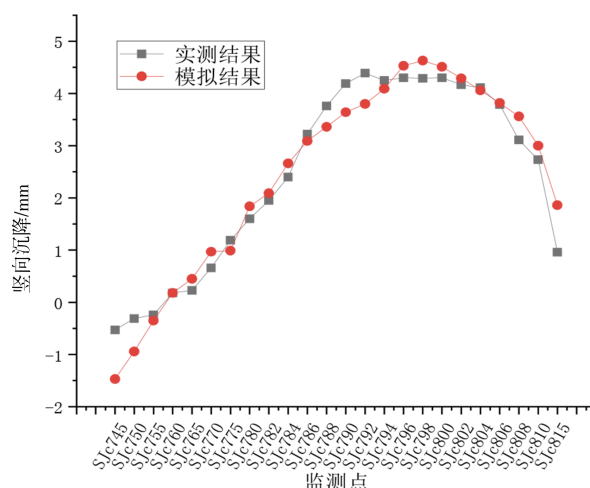
2.2 模型验证

利用上穿区域中的结构沉降监测点和水平位移监测点与数值模拟开挖结果进行对比,以验证模型的正确性。

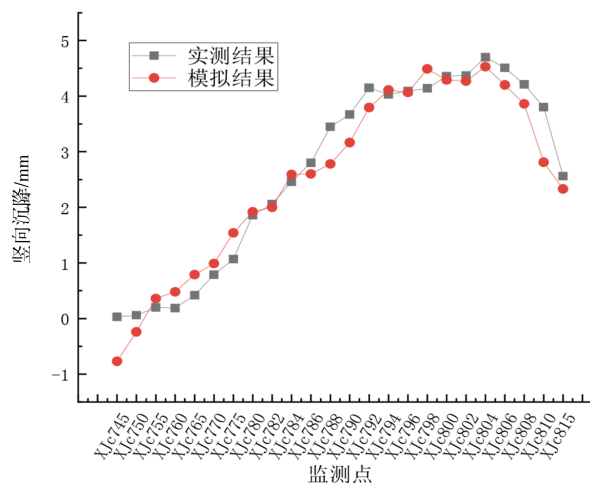
图3为隧道施工引起的结构沉降对比结果。可以发现,沿2号线纵向的沉降值并不相同,均表现出两端隆起小、穿越区隆起大的特点,即出现了明显的向上挠曲变形。

图4为隧道施工引起的结构水平位移对比结果。可以发现,沿2号线上行线纵向的水平位移,表现出两端小、中间大的特点,而沿2号线下行线纵向的水平位移,则未表现这一特点,且数值较2号线上行线偏小。

由图3和图4可以看出,数值模拟和实测结果的最终沉降值和水平位移值较为接近,验证了计算模型的正确性。但边界处有一定差异,这与实际工程中2号线站台的连接情况有关。



(a) 2号线上行线



(b) 2号线下行线

图3 隧道施工引起的2号线结构竖向沉降

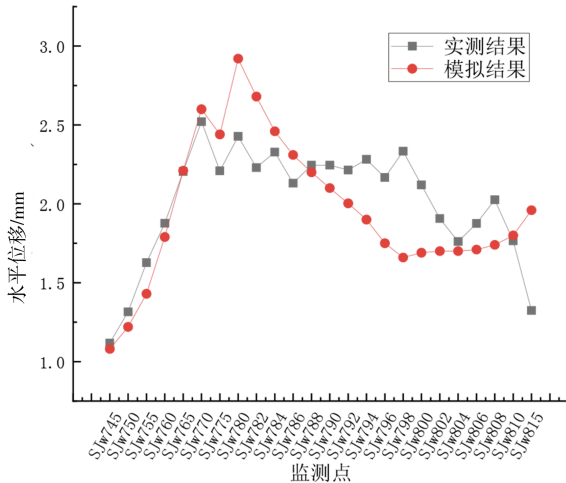
Fig.3 Vertical settlement of Metro Line 2 caused by tunnel construction

3 不同工况下数值模拟结果分析

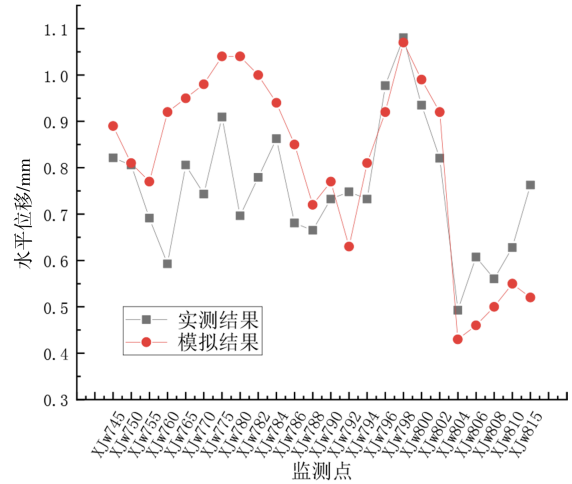
3.1 掘进过程中隧道变形情况分析

盾构掘进过程中,土体应力不断进行重分布,既有隧道也因此产生变形。为分析既有隧道在盾构掘进过程中的变形情况,根据实测数据,选取了最终位移最大的点,进行了分段开挖过程中隧道变形情况的分析。

盾构掘进过程中,既有隧道2号线的竖向沉降如图5,水平位移如图6,图中横坐标为开挖分段标号,SD为5号线上行线开挖段,XD为5号线下行线开挖段,SJc792为2号线上行线第792环底部竖向沉降监测点,XJc804为2号线下行线第804环



(a) 2号线上行线



(b) 2号线下行线

图4 隧道施工引起的2号线结构水平位移

Fig.4 Horizontal displacement of Metro Line 2 caused by tunnel construction

底部竖向沉降监测点, SJw770为2号线上行线第770环右侧水平位移监测点, XJw798为2号线上行线第798环右侧水平位移监测点。

从图中可以看出, 在5号线上行线开挖时, 当掌子面还未到达2号线范围时, 由于开挖扰动, 2号线出现了微小隆起, 并向盾构推进方向发生了水平位移; 当掌子面位于2号线中心附近时, 2号线出现了明显隆起, 水平位移也明显增大; 当开

挖超出2号线范围时, 2号线纵向沉降值和水平位移出现了明显回落。在5号线下行线开挖时, 2号线纵向沉降与水平位移的变化规律与5号线上行线开挖时基本一致, 但在数值上有一定增加, 并且在开挖第五段时达到了峰值。在整个开挖过程中, 2号线的纵向沉降与水平位移均小于控制值(1 cm)。

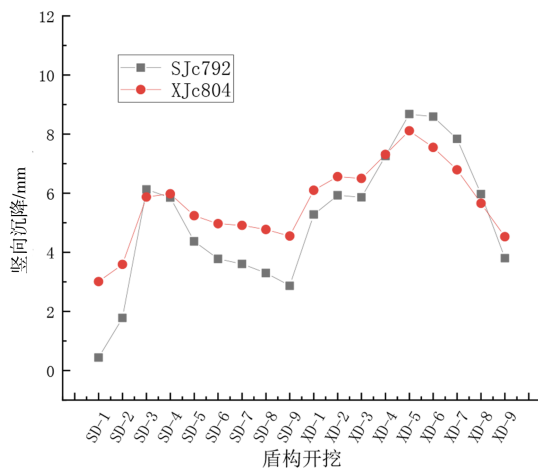


图5 SJc792与XJc804监测点沉降值

Fig.5 Vertical settlement of SJc792 and XJc804

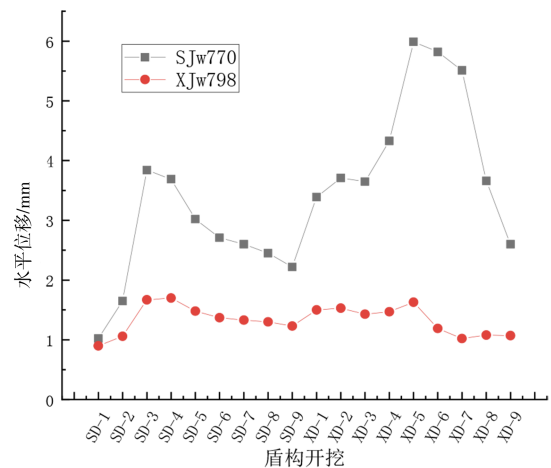


图6 SJw770与XJw798监测点水平位移值

Fig.6 Horizontal displacement of SJw770 and XJw798

3.2 推进速度对既有隧道竖向沉降的影响

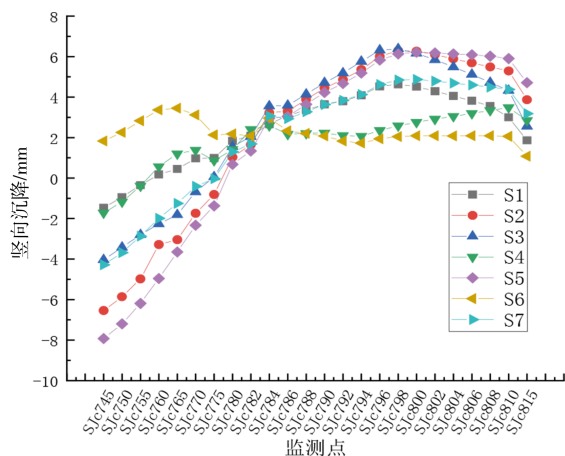
盾构到达穿越区域段时, 逐渐降低推进速度, 由常规推进速度的12环/d, 调整到试验段推进10

环/天, 穿越段推进8环/d。为分析推进速度对既有运营隧道整体结构位移的影响, 分别选取了不同的试验段和穿越段推进速度进行数值模拟, 具体计算工况如表2所示, 其中S1为实际推进工况。

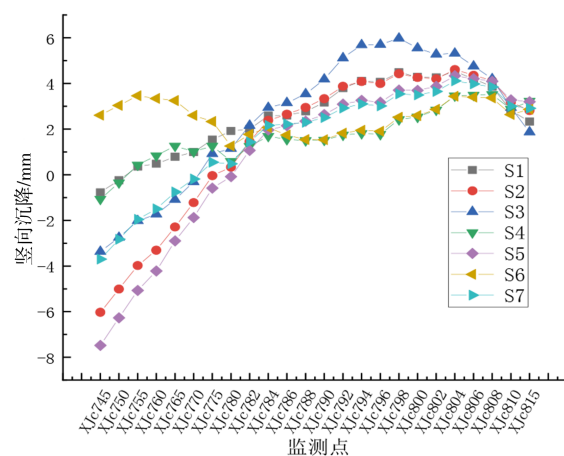
表2 计算工况
Table 2 Calculation condition

工况	推进速度	
	试验段	穿越段
S1	10	8
S2	10	6
S3	10	10
S4	12	6
S5	12	8
S6	12	10
S7	12	12

在不同推进速度下,隧道主体结构竖向沉降情况如图7所示。从图7(a)可知,各工况下,SJc784



(a) 2号线上行线



(b) 2号线下行线

图7 S1-S7工况下隧道主体结构竖向沉降情况

Fig.7 Vertical settlement of main structure of tunnel under S1-S7 condition

3.3 推进速度对既有隧道水平位移的影响

在不同推进速度下,隧道主体结构水平位移情况如图8所示。从图8(a)可知,各工况下,2号线上行线结构水平位移在SJw745-SJw765区间均逐渐增大,在SJw765-SJw775区间稍有回落后继续增大,且在SJw780处达到峰值,其后监测点水平位移明显减小,并且从SJw798处开始趋于稳定。从图8(b)可知,各工况下,2号线下行线结构水平位移在XJw745-XJw796区间波动,并且在XJw798处达到最小值,其后监测点的水平位移值有明显回落,在XJw804后趋于稳定。整体上看,除S4与S6工况外其余工况下的2号线上行线结构水平位移情

况的竖向沉降值基本相同;在SJc745-SJc782区间,S4工况与实际工况的监测点沉降值基本一致,S2、S3、S5、S7工况下,各监测点沉降值均有明显的上升;在SJc78-SJ815区间,S2、S3、S5、S7工况下,各监测点沉降值与实际工况下相似,略有上升后就出现下降趋势,而S4与S6工况下,各监测点沉降值则趋于稳定。整体上看,S6工况下各监测点沉降值最为稳定,但在SJc745-SJc782区间隆起明显。而图7(b)可知,各工况下,2号线下行线的沉降情况与2号线上行线相似。因此,为了平衡主体结构的竖向沉降值绝对大小与相对大小的关系,采取试验段推进12环/d,穿越段推进10环/d的推进速度为最佳。

况与实际工况相似,但S4和S6工况下各监测点沉降值最小,且数值大小与变化趋势都相近,考虑施工速度后,采取试验段推进12环/d,穿越段推进10环/d的推进速度为最佳。

4 结论

本文利用Flac^{3D}软件建立了宁波轨道交通5号线上穿既有运营隧道2号线的三维数值模型,在实测数据的基础上,对盾构掘进过程中的2号线主体结构变形情况进行了分析研究,并对不同推进速度下隧道开挖诱发的隧道主体结构的竖向沉降以及水平位移进行了对比分析,主要结论如下:

(1)在隧道超近距离上穿既有隧道时,将诱发双线隧道上行线和下行线相似的竖向沉降以及不同

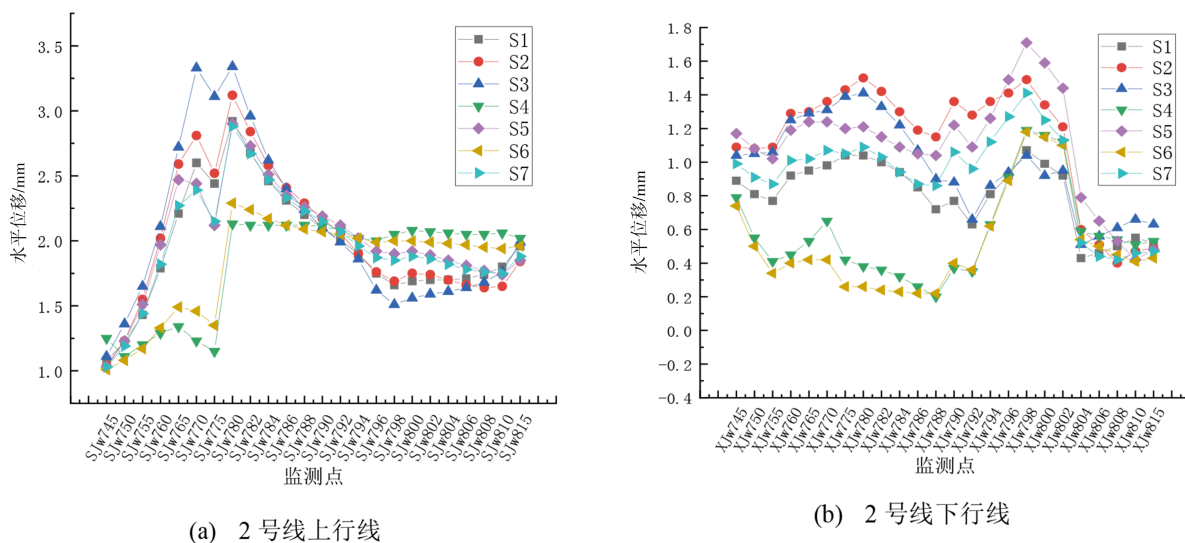


图8 S1-S7工况下隧道主体结构水平位移情况

Fig.8 Horizontal displacement of main structure of tunnel under S1-S7 condition

的水平变形规律,且水平变形数值沿盾构掘进方向有所增大。

(2)当隧道开挖时,在掌子面还未达到既有隧道范围、位于既有隧道中心附近、超出既有隧道范围的过程中,由于开挖扰动,既有隧道的纵向沉降与水平位移均出现明显的上升与回落现象。

(3)通过对不同推进速度下隧道开挖诱发的隧道主体结构的竖向沉降以及水平位移的综合分析可知,在保障隧道施工过程稳定性的前提下,考虑工程特点与施工效率,得出试验段推进12环/d,穿越段推进10环/d为最佳推进速度。

参考文献

- [1] 魏新江,张默爆,丁智,等.盾构穿越对既有地铁隧道影响研究现状与展望[J].岩土力学,2020(S2):1-20.
- [2] 刘辉,李彦青.上软下硬浅覆土条件下土压平衡盾构下穿密集建筑群施工技术研究[J].现代隧道技术,2020,57(06):186-192.
- [3] 许维青,翟志国.大直径泥水盾构微扰动下穿首都机场快轨施工技术研究[J].现代隧道技术,2020,57(S1):913-927.
- [4] 魏纲,杨波,吴华君,等.盾构穿越引起的既有盾构隧道纵向变形研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(06):1754-1762+1808.
- [5] 甘晓露,俞建霖,龚晓南,等.考虑上浮效应的盾构下穿对既有隧道影响研究[J].土木工程学报,2020,53(S1):87-92.
- [6] 刘新军,田俊峰,叶万军,等.南京地铁软流塑地层盾构下穿既有隧道处理加固技术[J].科学技术与工程,2021,21(01):366-373.
- [7] 杨芝璐,张孟喜,肖晓春,等.超大直径盾构不同角度下穿对既有地铁隧道的影响分析[J].铁道标准设计,2021,65(03):112-118.
- [8] Ng Charles W. W., Boonyarak Thayanan, Mařín David. Three-dimensional centrifuge and numerical modeling of the interaction between perpendicularly crossing tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(9):935-946.
- [9] 骆瑞萍,陈保国,闫腾飞,等.淤泥地层中盾构上穿近接地铁线施工稳定性研究[J].铁道标准设计,2020,64(10):88-93.
- [10] 张孟喜,张靖,吴应明,等.全风化岩层中双线盾构上穿近邻地铁隧道影响分析[J].土木工程学报,2019,52(09):100-108.
- [11] 周群,李家平,王如路.超大直径盾构下穿施工对运营隧道的影响分析[J].现代隧道技术,2020,57(S1):835-842.
- [12] 宋洋,李昂,王伟颐,等.泥岩圆砾复合地层泥水平衡盾构泥浆配比优化研究与应用[J].岩土力学,2020,41(12):4054-4062+4072.
- [13] 徐征杰,郭晓阳.基于响应面法的盾构施工膨润土改良参数优化[J].岩土工程学报,2021,43(01):194-200.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.盾构法隧道施工及验收规范:GB50446-2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.