

超大直径盾构穿越既有隧道的监护技术及运营组织

周 群

(上海地铁维护保障有限公司工务分公司, 200070, 上海//工程师)

摘 要 随着城市地下空间的利用率不断提高,新建隧道在穿越既有运营隧道时,对其产生的施工扰动不可避免,同时势必会增加地铁监护的难度。如何更好地从施工技术、保障方案、应对措施等角度,减小盾构穿越施工引起的运营隧道变形影响,对地下空间建设和运营有着重要意义。针对北横通道超大直径盾构下穿上海轨道交通 11 号线区间隧道的工程,结合穿越准备、穿越过程等节点,从风险分析、穿越方案、应对策略及控制标准等监护技术和运营组织出发,以控制既有运营隧道的结构变形以及确保地铁的运营安全。

关键词 超大直径盾构; 下穿; 运营隧道; 监护技术; 运营组织

中图分类号 U455

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.050

Monitoring Technique and Operation Organization for Super-diameter Shield Tunnel Crossing Operating Tunnel

ZHOU Qun

Abstract With the increasing utilization rate of urban underground space, shield tunnel excavation of new tunnel will inevitably cause disturbance and deformation to existing ones, which is bound to increase the difficulty of metro monitoring. It is of great significance for underground construction and operation to reduce the operating tunnel deformation caused by shield tunneling construction through construction techniques, protection schemes and countermeasures. Based on the project of super-diameter shield of Shanghai North Cross Passage undercrossing Metro Line 11 interval tunnel, combined with procedure nodes including crossing preparation and process, monitoring technique and operation organization such as risk analysis, crossing scheme, countermeasure strategy and control standards are considered to control the structure deformation of operating tunnel and to ensure the safety of metro operation.

Key words super-diameter shield; undercrossing; operating tunnel; monitoring technique; operation organization

Author's address Engineering Affairs Branch, Shanghai Rail Transit Maintenance Support Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

随着经济的发展,城市地下空间被不断开发^[1],交通网络化体系已逐渐形成,因此新建隧道不可避免地上下穿越既有隧道,在地下空间内形成多线叠交的工程现象与日俱增。目前,众多学者和工作对盾构掘进的施工技术^[2]以及施工引起的环境影响有了大量研究^[3-8],但是对于盾构穿越既有运营地铁隧道的技术和保障方案^[9-11],尤其是超大直径盾构下穿运营地铁隧道的监护技术和运营组织涉及较少。

鉴于此,本文以上海北横通道超大直径泥水平衡盾构下穿运营轨道交通 11 号线区间隧道的工程为背景,充分考虑穿越准备、穿越过程等重要节点,分析探讨风险难点、穿越方案、控制标准、监测方案以及应对保障等监护技术和运营组织,以控制既有运营地铁隧道的结构变形,减少隧道结构病害,确保地铁运营安全,同时也希望为今后的穿越和类似工程提供参考和借鉴。

1 工程概况

北横通道主线穿越轨道交通 11 号线位于上海市长宁区长宁路、江苏北路路口,项目临近轨交 11 号线“江苏路站—隆德路站”区间,工程主线盾构直径达 15.56 m,于第 382 环~402 环间先后下穿轨交 11 号线上、下行隧道。其中,盾构切削断面为⑦₁、⑦₂以及⑧₁₋₄层土,中间夹有⑥层土。两隧道最小净距仅 7.06 m,轴线夹角 68°,穿越影响范围约 42 m,两者相对位置如图 1 所示,相关土层物理参数如表 1 所示。

2 主要风险及难点

分析整个监护项目以及穿越特征,可以得出以下风险点和难点:

1) 截面比高。北横通道盾构直径达 15.56 m,横截面积大,与所穿越隧道的面积比为 6.29,风险极高。

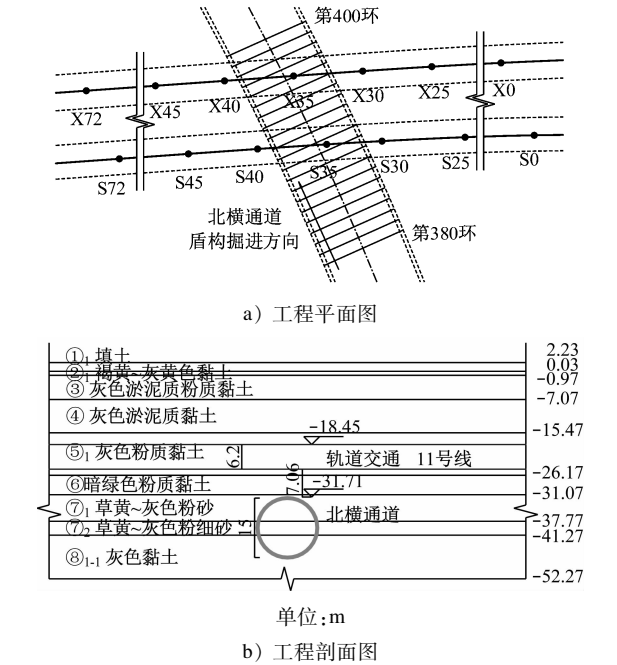


表 1 土层物理参数				
土层	重度/(kN/m³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa
⑤ ₁	17.8	15	15.4	14.2
⑥	19.6	48	15.9	9.3
⑦ ₁	18.9	2	31.4	34.5
⑦ ₂	18.7	1	32.8	34.5
⑧ ₁₋₁	18.0	19	15.0	12.3

表 2 穿越方案对比分析				
方案	定义	优点	缺点	综合判断
间断穿越	①白天地铁运营期间,北横通道盾构停推; ②夜晚地铁运营期间,北横通道盾构推进	对地铁运营的安全性和可靠性有一定保障	①地铁停运窗口期较短,若要满足 2 环/d 的速度,需调整地铁运营时间; ②穿越施工周期增加 1 倍以上,风险随之增加; ③盾构需反复停机与恢复,对地层的扰动不利,施工组织的复杂性增加	
连续穿越	北横通道盾构正常,匀速穿越	①穿越施工周期短; ②施工过程连续紧凑,有利于施工组织,减小扰动	地铁运营方需根据施工影响变形控制水平以评估穿越对地铁的影响程度,并采取相应的防治措施	✓

响,对于“地铁限速运行”组织进行列车振动试验。即:测试地铁列车在不同车速下对轨道、道床、管片及列车车厢的振动影响。试验结论为:在地铁列车速度 30 km/h 之内,隧道道床及管片的振动与行车速度成正比,呈现线性增长形态。最后根据试验结果确定,穿越期间采取列车限速 15 km/h 通过穿越影响段。

3.2 监测方案

此次穿越工程难度大,风险极高,不确定性因

2) 净距小。北横通道与轨道交通 11 号线竖向最小净距仅 7.06 m,施工难度大。

3) 耦合效应。盾构穿越对地铁正常运营的不确定性无法预估,且地铁列车振动对盾构开挖面的稳定性及泥膜形成的影响情况不明。

另外,根据前期对轨交 11 号线影响段隧道的全面调查可知,隧道结构存在不同程度的病害,且现场并不具备模拟穿越的条件。总体而言,盾构穿越施工风险不确定性大,给地铁运营带来的次生风险极高。

3 监护技术和运营组织

3.1 穿越方案

关于北横通道盾构穿越轨道交通 11 号线的总体指导性方案有两种可选,即间断穿越和连续穿越。针对这两种方案进行详细的综合对比和分析,如表 2 所示。

经过综合评价和论证,选择方案二(连续穿越)作为最终穿越方案,并以“地铁限速运行,盾构快速穿越”为总指导思想进行施工组织设计的编制与准备工作,再针对地铁列车临时中断、非停电抢修以及停电抢修等多种情况,制定详细的应对保障方案。

同时为保证地铁运营安全,降低穿越施工风险,减小地铁运行振动对盾构开挖面稳定性的影

素多。为实时监测轨道交通 11 号线隧道在穿越期间的结构变形,以便进行安全评估和综合分析,实现信息化施工,采取了自动化监测、人工监测、视频监控相结合的方案。其中,自动化监测以北横通道隧道与 11 号线区间隧道正投影区域为中心,上、下行隧道各布置 72 支 2.4 m 长电水平尺,构成总长为 172.8 m 的监测段,再辅以人工监测对隧道垂直位移、管径收敛以及水平位移进行监测。同时,在穿越影响范围内,上、下行隧道各安装 5 台高清摄像机

(镜头可伸缩、旋转),昼夜不间断监控 11 号线隧道结构状态,并及时传输至现场指挥部,为评估盾构穿越影响及 11 号线隧道状态提供依据。自动化监测点如图 1a)所示。

3.3 穿越时间

为了尽可能减小运营影响,经统计分析轨交 11 号线客流情况,得出双休日期间断面客流较工作日断面客流下降明显,部分区段下降约 60%。而根据实际施工进度预测,北横通道盾构掘进至穿越节点恰逢上海召开中国国际进口博览会,经过综合考虑,确定在进博会之后进行盾构穿越施工,并且充

分利用双休日客流较少的有利条件,尽可能地实现快速、均匀、平稳穿越,以减小施工影响。

最终确定于 2018 年 11 月 11 日北横通道盾构恢复推进,至 11 月 16 日周五 8:28,第 381 环管片拼装完成,此时切口位于第 386 环,处于 11 号线正投影区域临界位置;于 11 月 16 日周五 10 点整,北横通道盾构开始掘进第 382 环,此时切口位于第 387 环,正式进入 11 号线正投影区域,穿越开始;于 11 月 19 日周一 8:58,北横通道第 402 环管片拼装完成,盾尾完全离开 11 号线正投影区域,标志着盾构完成穿越。具体穿越施工节点如图 2 所示。

至11.16(周五)10:00切口进入投影面					至11.19(周一)8:58盾尾出投影面				
穿越节点	11.13	11.14	11.15		11.16	11.17	11.18	11.19	11.20
	周二	周三	周四		周五	周六	周日	周一	周二
环数	2.5 371~373	3.5 374~377	4 378~381	382	4 383~386	7.5 387~394	7.5 395~401	402	403
	穿越前环数				11号线隧道正投影区域			穿越后环数	
								403	403
									2.5 405~407

图 2 穿越节点

3.4 应对策略及控制标准

在方案论证环节中,通过对大量类似穿越施工的工程案例进行分析和总结,如上海西藏南路越江隧道下穿轨道交通 8 号线、杭州文一路地下快速路工程隧道下穿轨道交通 2 号线等。同时结合考虑列车振动条件下的数值模拟分析成果,参考北横通道盾构在前期掘进施工过程中的稳定性、地表沉降以及穿越房屋建筑时的综合表现,鉴于穿越位置处的地层条件相对比较有利,经过多次专题讨论,确定本次穿越的应对策略及控制标准。

1) 穿越前对影响范围内轨道交通的结构形式、当前结构状态、运营情况等进行全面调查,并对穿越正投影范围内的管片预留好注浆孔,以便应急抢险时进行隧道内微扰动注浆。

2) 完成停运应急预案、专项预案和现场处置方案。应急预案应明确指挥体系、行车组织、客运组织及安全管理等内容。

此外,通过对地铁隧道结构变形数值(以沉降变形为主)、变形速率、设施设备状况进行实时监测和分析,信息化指导施工,并决定在紧急情况下采取相应的应对策略,启动相应的运营调整预案。其中,设施设备状况主要通过视频监控和夜间隧道巡检的方式进行检查,若监测范围内出现新增病害,如管片破损、渗漏水、道床脱开、渗泥沙等严重结构病害或地铁设施设备出现异常,则立即上报指挥部进行决策是否停运。结构沉降变形、沉降速率的控制标准如表 3 所示。

表 3 变形控制标准

项目	变形范围	应对措施
沉降变形	0 ~ 10 mm	以观察为主
	10 ~ 20 mm	利用夜间正常停运时间进行隧道内微扰动注浆,其中变形达到 15 mm 应及时上报示警
	> 20 mm	考虑是否需要停运抢修
变形速率	12 h 内单向增长 6 mm	考虑是否需要停运抢修

3.5 联合值班制度

地铁监护人员牵头监测单位与建设单位、施工单位等共同于北横通道指挥部进行 24 h 联合值班,

全方位、多角度地保障盾构穿越顺利和地铁运营安全。值班期间,主要进行下列工作内容:

1) 实时记录每一环盾构推进过程中的参数,如

推进(拼装)时间、推进速度、正面泥水压力、总推力、刀盘扭矩、同步注浆量、同步注浆压力、地铁监测数据等,同时实时查看隧道结构状况。

2) 盾构穿越期间,每日定时以书面专报的形式将施工进度、设施设备状况、隧道监测数据、隧道结构状况等施工情况上报,确保施工信息的连续性,如遇监测数据突变等紧急情况,则立即反馈。

3) 每晚地铁停运后,监护值班负责人协同建设单位、施工单位、监理单位以及地铁抢险单位利用人工点下轨交 11 号线隧道区间进行结构检查,轨道专业人员负责轨道高度的检测和轨道状态检查,供电专业人员负责接触网的高度检测和工作状态检查,若发现问题及时上报并采取措施治理。

4) 每晚地铁停运后,监测单位利用人工点下隧道进行人工监测(隧道沉降、管径收敛、水平位移),并与自动化监测数据互校。

5) 北横通道盾构穿过轨交 11 号线隧道正投影区域后(11 月 19—25 日),监护值班人员继续观测、记录盾构后续推进情况及监测数据。

3.6 运营调整预案

为积极、有效应对盾构穿越施工期间可能出现的各种情况,通过对列车折返、客运调整、公交配套等方面的综合考虑与预演,确定运营调整预案:

1) 运营期间,如结构发生劣化,值守人员进入隧道进行结构确认,或经夜间停运后明确第二日运营穿越段停运,若不需停电进行抢修,行车调整按“江苏路站可折返抢修行车方案”执行,并启动公交短驳方案。

2) 运营期间,如结构发生突变,经判断需立即采取抢修措施,且需停电进行整治的,行车调整按“江苏路站不可折返抢修停运方案”执行,并启动公交短驳方案。

3) 经供电专业人员完成“隆德路站—江苏路站”下行线非绝缘锚段关节改造为绝缘锚段关节后,恢复江苏路站正常供电,在满足江苏路站停电施工的折返运营条件后,行车按“江苏路站可折返抢修停运方案”执行。

相应的运营策略如图 3 所示。

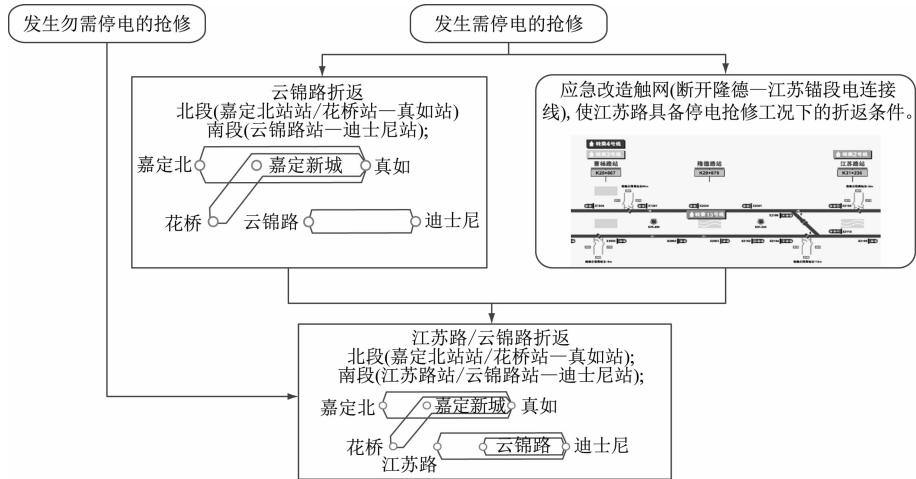


图 3 运营组织

4 实施效果

北横通道盾构穿越轨交 11 号线的施工参数如表 4 所示,穿越后地铁隧道变形情况如图 4 所示。

由图可知,北横通道盾构穿越施工导致轨交 11 号线出现以上抬为主的变形,上行隧道最大上抬 4.68 mm,下行隧道最大上抬 7.95 mm,均在变形控制范围内。且实际穿越时间比计划提前 2 d,同时过程中未发生微扰动注浆、地铁停运等应急情况,运

营影响降到了最低。

表 4 盾构施工参数

参数	数值
推进速度/(mm/min)	25~30
切口压力/kPa	500
推力/kN	120 000
刀盘扭矩/(MN·m)	4.0
同步注浆量/m ³	33.2
注浆压力/kPa	500~1 000

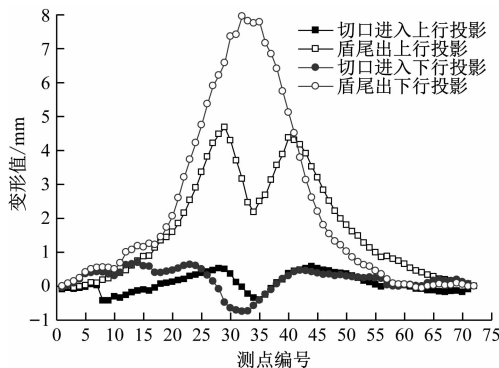


图4 隧道变形曲线

5 结论

1) 采取“连续快速”的穿越策略是正确的,并充分利用双休日的节点,最大限度地减小了盾构穿越施工对地铁运营的影响;

2) 采用自动化监测、人工监测、视频监控相结合的监测方案,实现了信息化施工,为有效分析和评估地铁隧道结构安全提供了重要保障;

3) 确定合理的变形控制标准,制定有针对性的应急方案和全方位的运营调整预案,形成有效的联合值班制度等一系列的监护措施,共同保障了盾构的成功穿越。

参考文献

- [1] 黄宏伟. 城市隧道与地下工程的发展与展望[J]. 地下空间, 2001(4):311.

- [2] 白廷辉, 尤旭东, 李文勇. 盾构超近距离穿越地铁运营隧道的保护技术[J]. 地下空间, 1999(4):311.
- [3] XU Q W, ZHU H H, DING W Q, et al. Laboratory model tests and field investigations of EPB shield machine tunnelling in soft ground in Shanghai [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2011, 26(1): 1.
- [4] CHAPMAN D N, AHN S K, HUNT D V. Investigating ground movements caused by the construction of multiple tunnels in soft ground using laboratory model tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(6): 631.
- [5] MARSHALL A M, KLAR A, MAIR R J. Tunneling beneath buried pipes: view of soil strain and its effect on pipeline behavior [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12):1664.
- [6] 邵华. 泥水盾构下穿运营地铁隧道的监护技术分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011(6):1196.
- [7] 王如路, 张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013(6):1092.
- [8] 李磊, 张孟喜, 吴惠明, 等. 近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014(6):1036.
- [9] 应慧刚. 长三角高速铁路旅客运输运营组织优化[J]. 铁路运输与经济, 2019(2):8.
- [10] 杨安安, 汪波, 陈艳艳, 等. 我国城市轨道交通多模式运营研究[J]. 都市轨道交通, 2017(6):993.
- [11] 黄树明. 城市轨道交通市域线速度目标值研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017(7):74.
- [12] 毛保华, 张政, 陈志杰, 等. 城市轨道交通网络化运营组织技术研究评述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017(6):155.

(收稿日期:2019-05-11)

(Continued from Commentary)

Commentary

Indispensable Role of Provincial Rail Transit Responsible Party

ZHOU Yimin

(Honorary Dean of Institute of Rail Transit of Tongji University, Deputy Chief Engineer of Former Ministry of Railway, Senior Engineer)

On 19th April 2021, the news spokesman of National Development and Reform Commission stated in the press conference that China will strengthen the guiding and constraining efforts towards railway planning and will formulate the planning of national medium- and long-term and five-year development, as well as regional railway development planning system, to regulate the intercity and suburban railway development.

Rail transit in China can be generally categorized into three networks: national trunk railway network, regional railway network and urban rail transit network; or to be further categorized into four networks from the perspective of current administrative framework and technical formats: national trunk railway network, regional railway network, both suburban railway network and urban rail transit network of big-cities. The difference between the two levels of analysis is whether it is further differentiated between suburban railway network and urban rail transit network inside big-cities; the former one is supplied by AC 25 kV, with designed operating