

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2024.10.048

超大直径盾构穿越运营地铁隧道风险分析与微扰动控制措施

尹富秋

(上海沪申高速公路建设发展有限公司, 上海市 200042)

摘要: 伴随着城市轨道交通及地下道路的快速发展,新建盾构法道路隧道穿越既有轨道交通隧道的概率更高,面临的穿越施工情况或将更加复杂、难度更高,穿越施工对既有地铁隧道的影响等风险增加,社会关注度高,微扰动控制需求迫切。以上海市北横通道新建工程穿越既有地铁 4 号线为例,分析了穿越工程典型风险,从结构优化、注浆及施工参数控制等方面提出了微扰动控制方法,保障盾构顺利穿越。

关键词: 盾构法隧道;超大直径;盾构下穿;风险控制

中图分类号: U455.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0214-03

0 引言

盾构穿越施工环境影响机理复杂,穿过过程将对既有隧道周边土体造成了扰动,如施工措施不当,引起较大的二次扰动,导致既有轨道交通隧道出现结构破坏或沉降变形过大,继而影响既有轨道交通行车安全,产生严重的社会不良影响。但隧道近距离穿越既有设施影响机理复杂、控制因素多。从既有相关研究来看,魏纲等^[1]开展了盾构不同穿越形式引起既有盾构隧道变形机理分析,对穿越引起的地层变形发生机理做了深入研究;张宝刚、黄昕等^[2]分析了盾构上穿下既有双线隧道相互作用机制;在控制措施上,蒋磊等^[3]结合地铁隧道近距离穿越既有老旧隧道案例,给出了穿越环境影响机理和相应控制措施;谢雄耀^[4]结合不同的穿越工程,阐述了开展壁后注浆精细化控制及自动化监测对于微扰动控制的效果。但在上海北横通道建设过程中,涉及中心城区软土地层大直径盾构密集穿越,施工穿越面临盾构姿态控制、成像隧道结构质量管控、环境影响控制等多重目标,控制难度大。为此,本文以北横通道 15 m 直径穿越既有地铁 4 号线为例,通过穿越前结构设计优化、穿越时微扰动控制及穿越后及时补注浆相结合的形式,有效实现了微扰动施工,通过实际

监测发现,地铁变形小于 8 mm,为国内类似工程提供了有力及支撑。

1 概述

1.1 工程概况

上海市北横通道新建工程Ⅷ标是上海市中工程规模大、综合性强、技术难度复杂、风险程度高的特大型市政工程项目。北横通道Ⅷ标杨树浦港—安国路工作井区间盾构在里程 K15+256.2—K15+214.2(1 030 ~ 1 050 环),下穿在运营的轨道交通 4 号线隧道,4 号线隧道外径 6.2 m,管片厚 0.35 m,环宽 1.2 m。两隧道轴线夹角 47°,最小净距为 5.62 m。

盾构穿越轨道交通前后将穿越保民新村等房屋建筑,地面环境较为复杂,穿越轨道交通 4 号线平面图如图 1 所示。

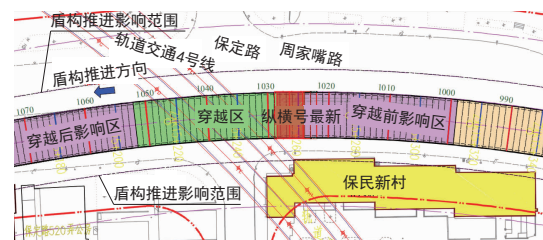


图 1 穿越轨道交通 4 号线平面图

1.2 地质情况

穿越段隧道底中心标高 -37.96 ~ -37.13 m,隧道断面地层为⑤₁黏土、⑤₃₋₁灰色粉质黏土,上覆地层自上而下为①₁填土、②₁粉质黏土、③淤泥质粉质黏

收稿日期: 2024-01-19

作者简介: 尹富秋(1982—),男,学士,高级工程师,从事重大工程建设管理工作。

土、③, 粉土夹淤泥质粉质黏土、④淤泥质黏土、⑤, 黏土。剖面位置关系如图 2 所示。

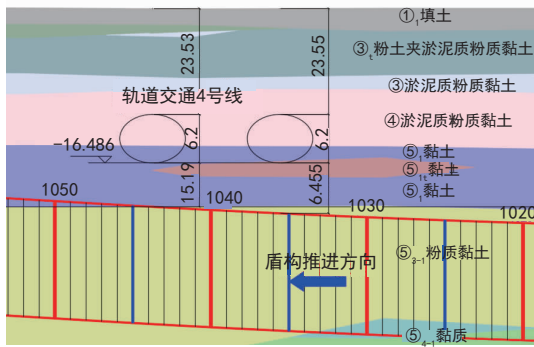


图 2 穿越轨道交通 4 号线剖面图

交通 4 号线隧道结构沉降稳定的目的。剪力销放置在每两环管片接缝位置,共设置 38 个/环(见图 4)。

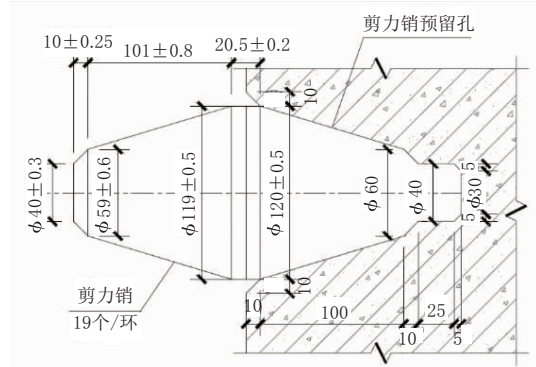


图 4 剪力销示意图

1.3 施工风险分析

北横通道新建工程新建隧道与运营轨道交通 4 号线隧道最小净距仅 5.62 m, 新建隧道与运营轨道交通 4 号线隧道夹角 47°, 穿越影响区水平投影距离长, 易引发地层扰动, 或造成轨行区结构沉降过大或水平位移过多, 及易影响轨道交通运行安全。同时, 如盾构姿态控制不当还将导致既有隧道管片错台, 甚至造成主体结构碎裂、错台等情况, 直接导致渗漏水情况的发生。此外, 穿越轨道交通 4 号线时侧穿保民新村, 房屋距离盾构边线 5.5 m, 房屋保护要求高, 施工控制不当极易造成房屋沉降异常, 影响周边居民住房安全。

2 施工控制措施

2.1 穿越前控制措施

2.1.1 管片增设注浆孔

加强盾构穿越轨道交通段后的二次注浆和应急处理能力, 在穿越段的管片设计增设注浆孔, 每块管片增开 2 个注浆孔, 封顶块除外, 增设注浆孔管片共 28 个应急注浆孔, 如图 3 所示。

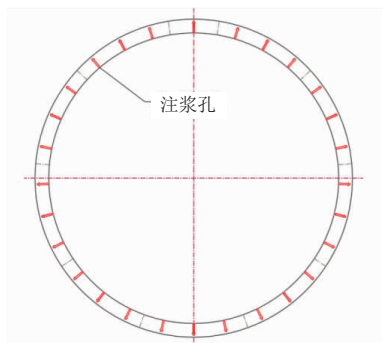


图 3 增开注浆孔示意图

2.1.2 增强隧道整体受力设计

隧道穿越段管片采用剪力销, 增加隧道连接刚度, 通过减小施工隧道管片自身变形, 达到控制轨道

2.2 穿越时控制措施

2.2.1 盾构掘进正面泥水平衡压力控制

由于施工的穿越区处于软土地层, 所以穿越施工必定会扰动土层而使隧道盾构周围土体一定的区域内产生变形(或局部的短时间隆起), 从而影响地铁隧道的结构和线路(轨道)的稳定状态(即影响前后高低和左右水平), 在一定程度上可能影响行车安全。盾构穿越 4 号线时, 由于两隧道最小净距为 5.62 m, 两隧道之间间距过小, 对土层微扰动要求高, 对于泥水压力控制精度高, 需做到随土层、埋深等变化泥水压力做出对应的变化。

推进过程中调整气泡舱压力按照 0.002 MPa 作为调整基数, 结合实际地铁自动化监测情况通过调整后舱液位高低进行气泡舱压力微调, 控制盾构穿越过程中切口压力来达到控制轨道交通隧道结构沉降稳定的目的。

2.2.2 同步注浆

由于盾构穿越轨道交通 4 号线时, 盾构处于 R500 的左曲线及 5.99% 的上坡, 对穿越段同步注浆注浆量与盾构机注浆各点位的注浆比例系数精度要求高, 且同步浆液的坍落度进行严格控制。

理论上管片与盾尾的建筑空隙理论空隙为:

$$V = \pi/4(15.56^2 - 15^2) \times 2 = 26.89 \text{ m}^2$$

平曲线偏差带来的建筑空隙: $V_1 = 0.431 \text{ 59 m}^3$;

综上所述每环理论建筑空隙为 27.321 59 m^3 。

充填系数考虑为 110% ~ 120%, 即 30.05 ~ 32.79 m^3 , 考虑转弯半径影响左右侧开挖量, 故注浆量为 31.5 m^3 /环, 施工用盾构机采用 10 点注浆, 注浆比例为推进方向左侧按照 14%、11.9%、10.7%、9.4%、3.2% 进行分配, 推进方向右侧按照 14.4%、12.3%、11.1%、9.6%、3.4% 进行分配, 压浆量和压浆

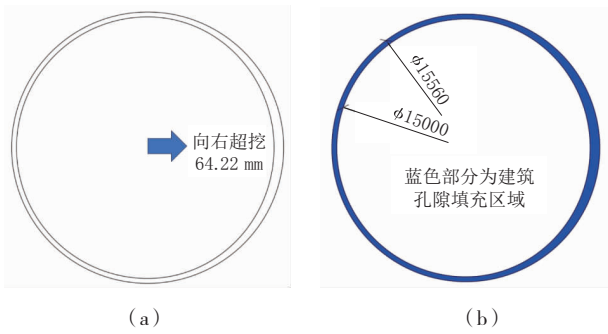


图5 同步注浆考虑盾构曲线推进带来开挖面增大的影响

点在压浆时的根据压力值和地层变形监测数据进行调整。

2.2.3 壳体注浆

为了保证盾构机能够顺利、安全穿越,必须有效控制土体扰动及土层损失率。根据同类工程的经验,盾构穿越的过程中有部分沉降是盾构机锥度引起的,为此,在盾构机壳体上预留注浆孔,在需要的情况下可以从壳体进行注浆。壳体注浆能够提前填充盾构施工建筑空隙,进一步托住盾构机本体,降低盾构机对土体的扰动,减少地层损失率,并有效的控制隧道上浮及隧道收敛。壳体注浆孔如图6所示。

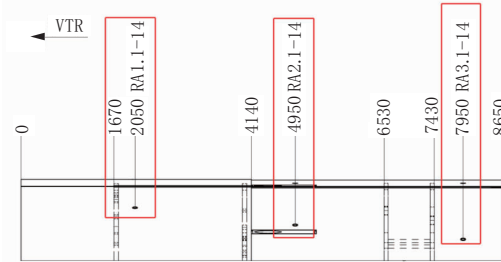


图6 壳体注浆孔示意图

2.3 穿越后控制措施

盾构推进时同步注浆的浆液在填补建筑空隙时可能会存在一定间隙,且浆液的收缩变形也存在地面沉降的隐患,因此为控制土体后期沉降量,后期沉降若超过监测报警值,对管片进行壁后注浆,防止隧道上浮及地面固结沉降,压注范围为隧道上部180°范围,二次注浆材料为:双液浆,水灰比1:1。管片二次注浆范围如图7所示。

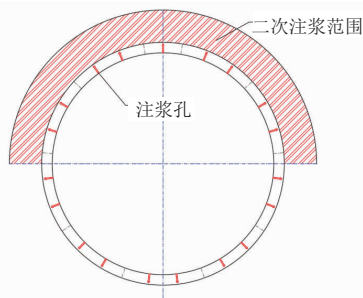


图7 管片二次注浆范围图

注浆压力的控制:一般情况下二次注浆压力比静止水压及土压力之和大0.3~0.5 MPa,根据实际情况,若止水效果不好可适当增加压力,考虑压力较大造成4号线轨道上浮,故最大不超过0.6 MPa,实际注浆压力根据现场注浆后地铁隧道沉降情况进行调整。

盾体穿越阶段在中道壳体注浆孔每点压注0.5 m³克泥效,注浆压力控制在0.4~0.6 MPa,压注点位为顶部3点,具体压注量及压注点位根据实际穿越过程沉降量进行调整。本次施工中,整体沉降可控,未压注克泥效。

3 实时监测及效果验证

在穿越过程中,通过采用电子水平尺进行实时监测,并与人工监测进行复核。结果表明,盾构近距离穿越运营轨交隧道沉降合格率达到100%。穿越完成后下行线沉降控制在±6.11 mm以内,上行线控制在±7.01 mm以内,在如此近距离、急曲线,大坡度等复杂工况下实现大盾构顺利穿越运营中的轨道交通4号线,沉降量符合要求。穿越完成后监测数据分别如图8、图9所示。

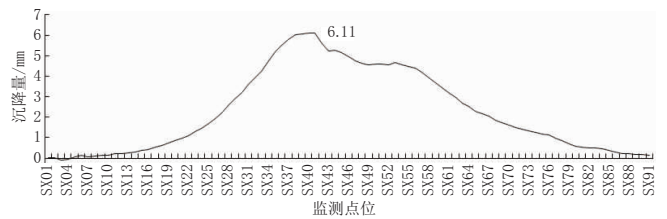


图8 下行线穿越完成后电水平尺监测数据

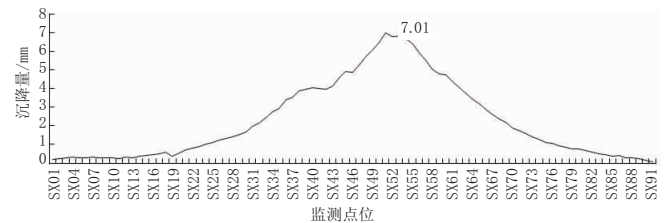


图9 上行线穿越完成后电水平尺监测数据

4 结语

本文针对软土地区中心城区大直径盾构穿越既有运营地铁隧道微扰动控制难题,结合事前、事中和事后控制措施,解决了超大盾构小净距、大夹角、大坡度穿越难题,有效控制了地层扰动,并得到如下主要结论:

(1)穿越过程应严格把控施工参数,设定正确的盾构掘进正面泥水平衡压力,利用后舱液位的高低有效控制小精度的气泡舱进行压力调整,推进速度

(下转第248页)

较少,未对车型、障碍物类型进行考察等。未来应当增加更多实验变量,并招募更多样的参与者进行实验,验证实验得出结论的可靠性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部综合规划司. 2022年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL] 2023, Ministry of Transport of the People's Republic of China. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html.
- [2] Wang S, Huang X. Analysis of Methods on Evaluating the "Black Hole Effect" in Tunnel Entrance Zones[C]. CICTP 2015, F, 2015.
- [3] Hu J, Gao X. Mechanism of the "White Hole" Phenomenon and Relative Security Technology in the Tunnel[C]. International Conference on Transportation and Development 2018, F, American Society of Civil Engineers Reston, VA, 2018.
- [4] 张生瑞,马壮林,石强.高速公路隧道群交通事故分布特点及预防对策[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(1): 63-66.
- [5] 张璇,唐进君,黄合来,等.山区高速公路隧道路段与开放路段的事故影响因素分析[J].交通信息与安全,2022,40(3): 10-18.
- [6] Ma Z-l, Shao C-f, Zhang S-r. Characteristics of traffic accidents in Chinese freeway tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(3): 350-355.
- [7] Amundsen F H, Engebretsen A. Studies on Norwegian road tunnels II: An analysis on traffic accidents in road tunnels 2001-2006[J]. 2009:
- [8] 张玉春,何川,方勇,等.高速公路隧道群交通事故风险致因分析[J].中国安全科学学报,2009,19(9): 120-124.
- [9] 梅家林,杜志刚,郑号染,等.不同时段特长隧道入口区域视觉负荷研究[J].中国安全科学学报,2021,31(6): 176.
- [10] 罗杰,陆百川,徐进,等.山地城市隧道照度与速度对驾驶负荷的影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(6): 13-23,58.
- [11] 胡江碧,马文倩.基于驾驶视认需求的隧道入口段光环境研究[J].上海交通大学学报,2015,49(4): 464-469.
- [12] Du Z-g, Huang F-m, Yan X-p, et al. Light and dark adaption times Based on pupil area variation at entrance and exit areas of highway tunnels[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2014, 8(1): 73-77.
- [13] Feng Z, Yang M, Zhang W, et al. Effect of longitudinal slope of urban underpass tunnels on drivers' heart rate and speed: A study based on a real vehicle experiment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018(81): 525-533.
- [14] Yang Y, Feng Y, Easa S M, et al. Evaluation of mental load of drivers in long highway tunnel based on electroencephalograph[J]. Frontiers in Psychology, 2021(12): 646406.
- [15] Yang Y, Feng Y, Easa S M, et al. Sound effects on physiological state and behavior of drivers in a highway tunnel[J]. Frontiers in psychology, 2021(12): 693005.
- [16] 陈丰,张婷,黄雅迪,等.越江越海隧道入口段追尾事故风险预测模型研究[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(6): 167.
- [17] 潘福全,梁雪,王琳,等.基于驾驶仿真的海底隧道出入口段视觉减速标线有效性[J].科学技术与工程,2022,22(21): 9372-9380.
- [18] 王首硕,杜志刚,冯守中,等.高速公路隧道入口区域视线诱导系统有效性研究[J].交通运输工程学报,2021,21(2): 267-277.
- [19] 赵炜华,刘浩学,刘玮,等.高速公路隧道群出、入口段驾驶人视觉特征[J].交通科学与工程,2011,27(3): 75-81.
- [20] 胡江碧,李然,马勇.高速公路隧道入口段照明安全阈值评价方法[J].中国公路学报,2014,27(3): 92-99.
- [21] 陈云,杜志刚,焦方通,等.小半径公路短隧道入口段不同车型视觉负荷研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(4): 708-711.
- [22] 尚婷,唐伯明,段萌萌.基于驾驶员瞳孔面积变化率的公路视错觉减速标线横向宽度研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(1): 111-116.
- [23] 文竞舟,王朝,杜志刚,等.山区小半径光学长隧道注视点分布及转移研究[J].交通信息与安全,2019,37(6): 40-47.
- [24] 陈鹏,潘晓东,付志斌,等.城市隧道出入口视觉适应性研究[J].交通标准化,2014,42(19): 1-6.
- [25] Mehri A, Hajizadeh R, Dehghan S F, et al. Safety evaluation of the lighting at the entrance of a very long road tunnel: a case study in Ilam [J]. Safety and Health at Work, 2017, 8(2): 151-155.
- [26] Cohen J. Eta-squared and partial eta-squared in fixed factor ANOVA designs[J]. Educational and Psychological Measurement, 1973, 33(1): 107-112.

(上接第 216 页)

应保持 25 mm/min 匀速推进;

(2) 由于盾构大坡度、小曲率半径的穿越轨道交通隧道时,应两侧设定不同比例的同步浆液压力,确保盾尾间隙的有效填充。

参考文献:

- [1] 魏纲,杨波,俞国驷.盾构不同穿越形式引起既有盾构隧道变形机理分析[J].现代隧道技术,2018,55(增刊2):1020-1027.
- [2] 张宝刚,谢家冲,黄昕.盾构上穿下既有双线隧道相互作用机制的三维数值分析[J].中外公路,2023,43(6):247-252.
- [3] 蒋磊,陈立,陈松.地铁隧道近距离穿越既有老旧隧道方案设计[J].土工基础,2024,38(1):24-28.
- [4] 谢雄耀,张永来,周彪,等.盾构隧道下穿老旧建筑物群微沉降控制技术[J].岩土工程学报,2019,41(10):1781-1789.
- [5] 刘凤洲,谢雄耀,王强,等.盾构施工沉降多源数据实时交互平台开发[J].隧道建设(中英文),2020,40(增刊1):82-89.