

超大直径盾构下穿运营地铁区间隧道分析与保护措施

李福锋

(上海城建市政工程(集团)有限公司,上海 200032)

摘要:为减小北横通道新建工程下穿运营地铁10号线区间隧道的施工影响,确保穿越期间地铁结构安全和正常运营,文章通过数值模拟计算并结合类似穿越工程施工经验,确定地铁区间隧道结构变形控制标准为 ± 20 mm;将穿越过程中的下穿范围分为模拟段、穿越一区、穿越二区和穿越三区,并分别提出了控制要点;设置下穿施工期间的盾构切口压力、推进速度、泥水保持、纠偏要求、管片拼装和同步注浆参数;采用二次注浆和信息化施工进一步加强对运营地铁区间隧道的变形控制。穿越完成后,统计分析了穿越期间实际施工参数与沉降变形数据,研究表明:20 mm变形控制标准能满足下穿施工与地铁运营安全要求,压注污泥效能有效控制沉降;此外,当盾构切口中心压力过大将导致地铁隧道隆起,盾构切口泥浆压力的设置宜结合隧道注浆及工后沉降统筹考虑。

关键词:超大直径盾构;下穿;运营地铁;保护措施;数值模拟

中图分类号:U455.43;U231.3

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)06-0075-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.06.078

Analysis of the influence of subway construction on municipal tunnel and protection measures

LI Fufeng

(Shanghai Urban Construction and Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In order to reduce the construction impact of the new construction project of the North Transverse Channel passing under the section tunnel of the operational metro Line 10, and to ensure the safety of the metro structure and normal operation during the crossing, through numerical simulation calculation and combined with the construction experience of similar crossing projects, this article determines that the structural deformation control standard of the metro section tunnel is ± 20 mm. The underpass range during the crossing process is divided into the simulation section, crossing Zone One, crossing zone Two and crossing zone three, and the control points are respectively proposed; Set the parameters of shield cutting pressure, advancement speed, slurry retention, deviation correction requirements, segment assembly and synchronous grouting during the underpass construction; The deformation control of the operational metro section tunnels is further strengthened by adopting secondary grouting and information-based construction. After the crossing was completed, the actual construction parameters and settlement deformation data during the crossing were statistically analyzed. The research shows that the 20 mm deformation control standard can meet the safety requirements of underpass construction and metro operation, and the efficiency of pressure injection of mud effectively controls settlement. In addition, when the pressure at the center of the shield cut is too high, it will cause the metro tunnel to bulge. The setting of the slurry pressure at the shield cut should be considered comprehensively in combination with the tunnel grouting and post-construction settlement.

Key words: super-large diameter shield; under pass; operating the subway; protective measure; numerical simulation

随着城市地下空间的开发建设,超大直径盾构下穿运营地铁区间隧道的工况日益增多^[1]。该

收稿日期:2024-07-17

作者简介:李福锋(1977—),男,工程师,从事地下工程施工技术工作。

类工程施工风险极大,需采取恰当措施确保工程顺利实施和期间地铁正常运营^[2]。王旭声等^[3]通过采用 Midas 软件计算和分析盾构下穿期间既有线的变形大小和规律,建立地层-结构模型;蒋茂林等^[4]结合武汉 12 号线下穿 21 号线案例,采用有限元计算,得出 MJS 加固能有效减小盾构下穿导致运营地铁区间的位移;翟晓慧^[5]分析了盾构下穿运营地铁区间风险,提出地面、超前、既有线和先行线四方面的综合注浆技术;杨建烽等^[6]建议下穿期间维持较高水平土舱压力以保持水土,并研究了同步注浆和二次注浆对既有结构变形的影响;张海超^[7]以上海机场联络线下穿某地铁为背景,分析了运营隧道的变形特征和规律,唐汐和涂智溢等^[8-9]也对盾构下穿运营地铁区间的保护措施和实施效果进行了研究分析。

本文结合北横通道下穿运营地铁 10 号线区间隧道工程,通过数值模拟计算超大盾构下穿对运营地铁区间隧道的影响,提出下穿期间的施工参数和保护措施,并对下穿期间监测数据进行分析,对类似工程具有参考价值。

1 工程概况

北横通道新建工程福建北路井(始发)~梧州路井(接收)盾构区间起止里程 SK12+034~SK13+572,全长为 1 538 m,区间隧道埋深为 8.0~29.3 m(虹口港桥一轨交 10 号线节点处),最大坡度为 55‰,最小平曲线 $R=500$ m。隧道为单管双层双向 4 车道,采用直径 15.56 m 德国海瑞克复合泥水平衡盾构施工,隧道采用通用型管片,错缝拼装,管片外径为 15 m,内径为 13.7 m,厚度为 650 mm,环宽度为 2 m,楔形量为 40 mm(80 mm),管片混凝土强度等级为 C60,抗渗等级 \geq P12。

上海地铁 10 号线于 2010 年开始运营,隧道外径为 6.2 m,管片厚度为 0.35 m,环宽度为 1.2 m,北横通道穿越段为天潼路站~四川北路站区间,距四川北路站 410 m,距离天潼路站 330 m,区间上行线与下行线管片最远段距离为 18.13 m,最近段距离为 5.27 m。

北横通道盾构机在(K12+313.82 河南北路附近)距福建北路始发井约 270 m 处穿越地铁 10 号

线,10 号线投影面对应北横通道新建工程该区间段的 140~153 环,掘进过程中盾构机切口进入第 140 环时到达 10 号线投影面下方,在盾构机切口进入第 159 环时盾尾离开投影面范围,直接影响共计 19 环,长 38 m,平面位置关系如图 1 所示。下穿越处拟建隧道与地铁 10 号线隧道呈 77°斜交,隧道与地铁下行线垂直距离最小仅为 7.5 m,上行线垂直距离最小仅为 8.1 m。

拟建场地地基土在 80.25 m 深度范围内均为第四纪松散沉积物,属第四系滨海平原地基土沉积层,主要由饱和黏性土和粉土组成,一般具有成层分布特点。下穿 10 号线段北横隧道所处土层上部为⑤₁ 灰色黏土,下部⑦₂ 草黄~灰色粉细砂,北横隧道主要位于⑤₃₁,⑤₄,黏土层和⑦₁ 粉土层,已建 10 号线上部为①₁ 人工填土,下部⑤₁ 灰色黏土,主要位于②₃ 砂质粉土层。

2 盾构下穿施工技术

2.1 盾构下穿数值模拟分析

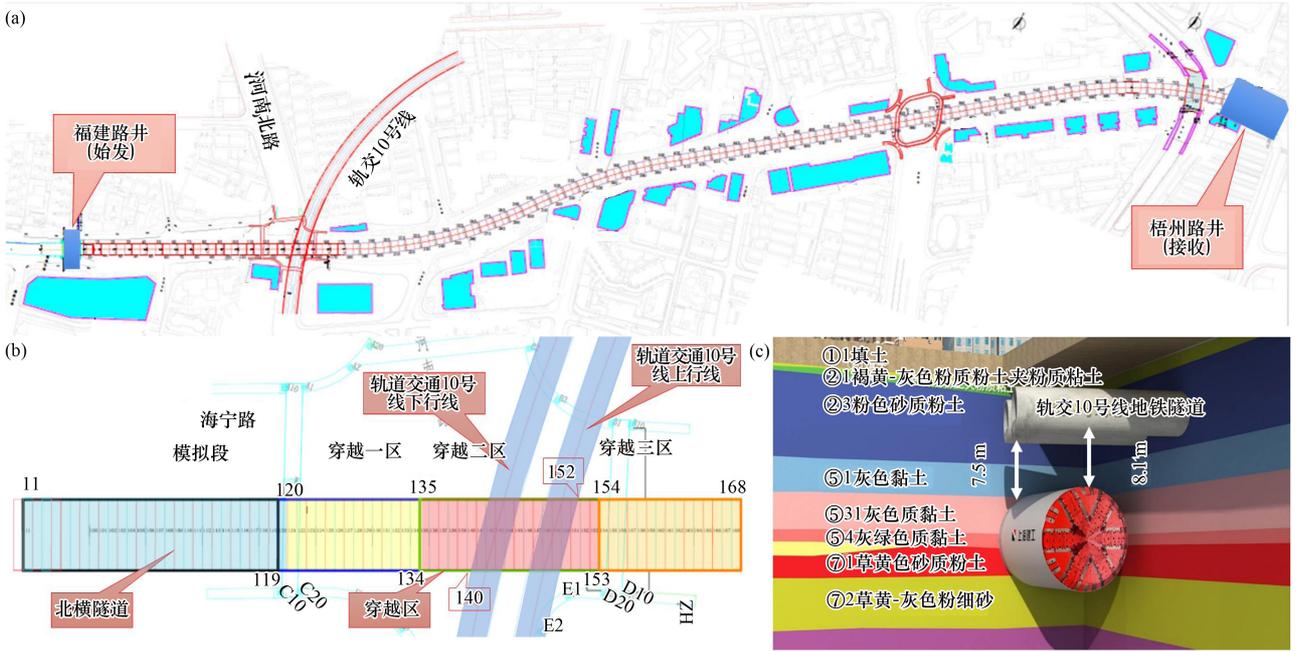
采用有限元软件,模拟计算北横通道新建工程福建北路井~梧州路井区间盾构下穿对运营地铁 10 号线区间的影响。其中隧道结构和土体采用平面应变单元来模拟,土层材料的本构模型采用强化土模型,隧道结构按照线弹性考虑;隧道衬砌采用梁单元模拟,材料按线弹性考虑,按盾构掘进时地层损失率为 1‰考虑,盾构穿越运营轨交 10 号线区间隧道时,盾构上方 10 号线区间隧道产生的最大沉降量为 7.5 mm。按地层损失率 2‰时,运营轨交 10 号线区间隧道竖向位移约为 15.2 mm。结合北横通道西段盾构穿越经验,下穿地铁 10 号线控制标准为隧道衬砌结构变形 ± 20 mm。

2.2 下穿分区及控制要点

如图 1(b)所示,将盾构下穿划分为模拟段、穿越一区、穿越二区和穿越三区,具体环号如表 1 所示,各区段控制要点如下。

表 1 盾构穿越施工区域划分

项目	模拟段	一区	二区	三区
拼装环号	11~119	120~134	135~153	154~168
切口环号	16~124	125~139	140~158	159~173



(a) 工程总平面图；(b) 下穿 10 号线节点平面；(c) 地质剖面

图 1 北横通道新建工程与 10 号线平面和剖面关系

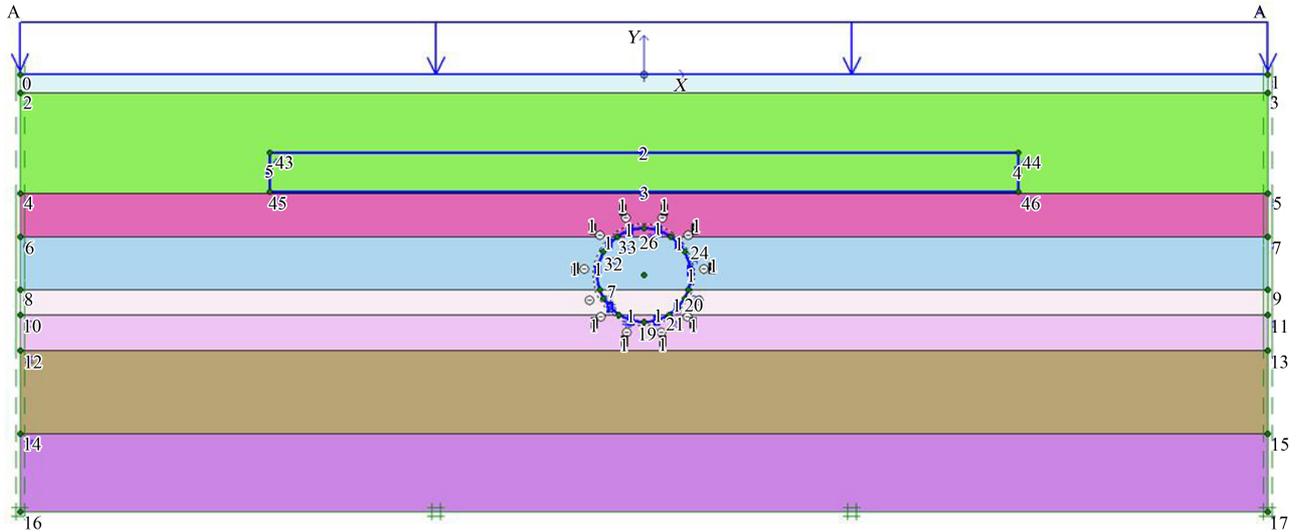
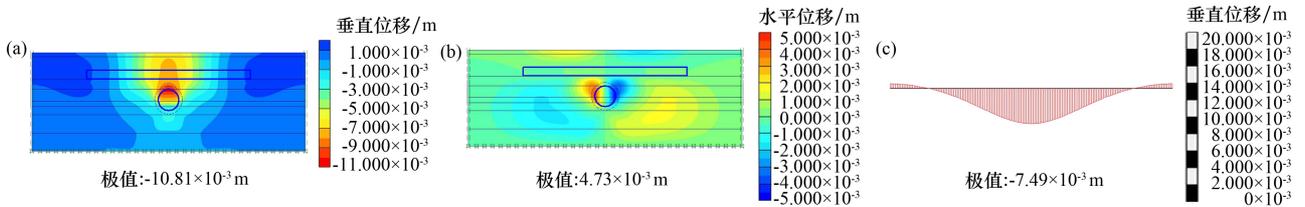


图 2 计算模型



(a) 地层整体竖向位移；(b) 地层整体水平位移；(c) 运营地铁 10 号线区间隧道竖向位移

图 3 模拟计算位移

2.2.1 模拟段控制要点

模拟段掘进施工时，应根据事先拟定的盾构

掘进速度、泥水压力设定值、进排泥流量及密度、同步注浆量、二次注浆量、注浆压力等施工参数

进行设定,并采取 PDCA 循环不断地对掘进参数进行优化。

2.2.2 穿越前控制段一区控制要点

穿越前控制段一区施工时主要控制推进速度由正常推进速度逐步减小为 20 mm/min 并保持不变,受下穿地铁 10 号线下行线的影响,切口水压值增加缓慢,以保证 10 号线隧道隆起 2~3 mm。

2.2.3 穿越中控制段二区控制要点

穿越中控制段二区的特点是盾构机进入已运营地铁隧道结构正下方。此段施工时控制推进速度在 20 mm/min,盾构穿越下行线时竖向曲线处于 5.5% 的下坡阶段,切口水压逐渐增加,盾构下穿上行线时竖向曲线处于 $R=2\ 500$ 的缓和曲线下坡阶段,切口水压较下行线增加缓慢,施工过程中使切口出地铁 10 号线隧道保持隆起 2~3 mm。

2.2.4 穿越后控制段三区控制要点

穿越后控制段三区施工时推进速度由 20 mm/min 提升至正常模式推进速度,可根据监测数据显示关闭径向注浆。

2.3 下穿控制措施

2.3.1 模拟段控制措施

模拟段推进的同时根据地面监测数据以检查盾构掘进参数设置的有效性,并结合监测数据对掘进参数进行调整。通过监测数据的分析对调整后的施工参数的效果进行检查,直到找出对地层扰动最小的掘进参数。

2.3.2 穿越前控制段一区控制措施

推进时加强注浆工序的管理,根据监测反馈的情况实时调整注浆量和注浆压力,注浆应充足,使盾尾后部地表发生微小的隆起。当壳体上方沉降超过 5 mm 时,需开启盾构径向注浆孔进行克泥效注浆,通过径向注浆验证克泥效注浆的有效性并通过一区施工摸索出合理注浆方量及注浆压力;另外,利用克泥效注浆在开挖断面形成泥膜,有效减少同步注浆的浆液向土层中渗透量,保证控制区的同步注浆质量。

2.3.3 穿越中控制段二区控制措施

当推进 141 环时,同步注浆对先穿越隧道已有一定影响,需严格控制同步注浆量、注浆压力和浆液质量。当壳体进入 10 号线投影下方、10 号

线结构沉降超过 5 mm 时,根据具体沉降位置开启相应位置的径向注浆孔进行克泥效注浆。

2.3.4 穿越后控制段三区控制措施

穿越后控制段三区施工时重点控制注浆工序,根据地铁运营线隧道的沉降变化情况调整同步注浆压力及方量,保持地铁 10 号线隧道隆起 2~3 mm。同时,需根据隧道内电水平监测数据显示根据具体数据开启二次注浆施工。

2.4 盾构掘进参数控制

2.4.1 切口压力

根据理论计算,盾构下穿掘进切口压力如表 2 所示,实际切口压力设定值根据沉降数据值进行微调。

表 2 穿越控制区切口压力设置

区域	设置压力/MPa
一区	0.461~0.463
二区	0.463~0.491
三区	0.491~0.511

2.4.2 掘进速度

盾构穿越时应控制合理的推进速度,本工程穿越区施工过程中,盾构掘进速度控制在 20~30 mm/min,尽量保持推进速度稳定,确保盾构均衡、匀速地穿越 10 号线,以减少对周边土体的扰动影响,以免对其结构产生不利影响。

2.4.3 泥浆指标

采用泥水平衡盾构进行下穿施工,控制建筑物沉降关键在于泥浆性能的稳定,为确保下穿 10 号线过程中泥浆性能可靠,在模拟段施工过程中需将泥浆性能指标调整至最优并保持在下穿全过程,其中泥浆比重需控制在 1.20~1.30,黏度在 22~25 pa·s。

2.4.4 纠偏与姿态

在穿越 10 号线控制区,北横盾构处于 55‰ 纵坡、平曲线为直线段向前推进,线型较复杂。在确保盾构正面沉降控制良好的情况下,尽可能使盾构匀速、微纠通过,减少盾构纠偏量和纠偏次数,推进时不急纠、不猛纠,按照“勤测勤纠、小角度纠偏”的原则进行纠偏控制,将盾构切口和盾尾的偏差控制在 ± 20 mm 以内,通过模拟段将盾构机切口竖向偏差控制在“0”位,盾尾竖向偏差控制在 -50 mm 之间,并在下穿段保持此姿态。

2.4.5 管片拼装

在盾构进行拼装的状态下，由于千斤顶的收缩，必然会引起盾构机的后退，因此在盾构推进结束之后不要立即拼装，等待2~3 min之后，到周围土体与盾构机间固结在一起后再进行千斤顶的回缩，回缩的千斤顶应尽可能的少，满足管片拼装即可，拼装过程中，盾构司机应注意切口水压力的控制。

2.4.6 同步注浆

同步注浆是充填土体与管片圆环间的建筑间隙和减少后期变形的最主要手段，保证每环注浆总量要到，充盈盾构机通过后形成的建筑间隙，本工程同步注浆分配方式如图，注浆压力根据经验可取为1.1~1.2倍的静止土压力。

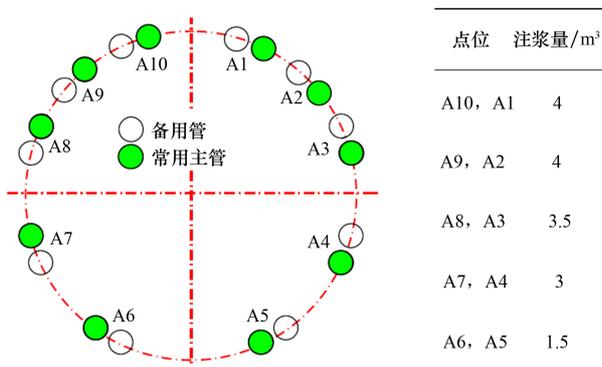


图4 同步注浆分配方式

2.5 穿越后隧道沉降控制

盾构通过后，由于应力松弛影响，地层还会发生固结沉降，针对工后沉降控制问题，根据后期10号线隧道内信息化数据反馈情况，当累计沉降超出10 mm或单次沉降超过5 mm即根据监测显示位置开启二次注浆。

盾构穿越10号线区上下行线控制一区、三区 and 穿越二区共设置48环特殊管片，用于对隧道壁后的扰动土体进行固结注浆。管片上增设18个注浆孔，每环管片共计27个注浆孔，除封顶块外每块管片设3孔。通过管片上预留的注浆孔对扰动的土体进行固结注浆加固，防止出现固结沉降，根据设计要求，加固范围为隧道上半环，加固厚度为2 m，加固材料采用双液浆。

2.6 信息化施工

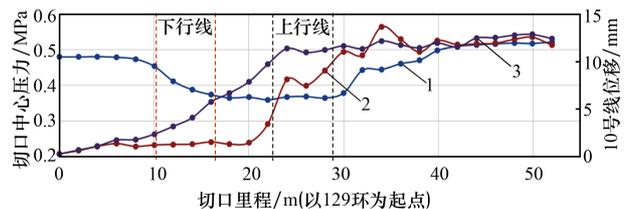
由于穿越区处于软土地层，施工必定会扰动土层而使隧道盾构周围土体一定的区域内产生变

形，从而影响地铁隧道的结构和线路的稳定状态，在一定程度上可能影响行车。

为保证轨道交通10号线安全运营，盾构穿越期间，在轨道交通10号线隧道穿越影响区段内布设自动化监测系统，将监测数据及时传输到监控室，对轨道交通10号线进行实时、精确监测。对地铁隧道稳定性监测包括：线路沉降监测、线路水平位移监测、收敛监测。

3 实施效果及变形分析

本工程下穿10号线运营地铁期间，切口压力和注浆量统计如表3所示。如图5所示，对比切口压力与运营地铁区间变形数据(其中XU36点位拟建隧道轴线与下行线相交的测点，XU42点位于XU36南侧，间距为12 m)，可以得出穿越10号线过程中，下行线隆起量显著大于上行线，导致盾构机参数调整主要以稳定上行线变形为原则，造成穿越期间同步注浆量小于理论值和减速推进等工况。因此，选取下行线变形数据与盾构机控制参数的对应关系，分析下行线隆起过大的原因如下。



1—切口中心泥浆压力；2—XU36；3—XU42。

图5 切口中心压力与下行线位移

(1) 切口中心压力下调过晚。监测数据显示，盾构推进至129环后，无论XU36还是XU42均呈现明显的增大趋势，说明此阶段下行线已开始隆起。但盾构机切口中心压力在132环以后才开始下调，导致切口中心压力下调前，10号线已积累了较大的隆起量和隆起趋势。

(2) 切口中心压力下调偏慢。盾构机切口中心压力自132环开始下调，至138环盾构机切口离开下行线投影面，XU42的累计位移从1.76 mm迅速增大至6.7 mm，说明切口中心压力下调速度(0.479 MPa→0.365 MPa)不够快，该阶段的压力值仍处于时下行线隆起的水平。

表 3 穿越期间切口压力和注浆量统计

拼装环号	切口压力/MPa	注浆量/m ³	切口位置	盾尾位置
129	0.48	29.00		
130	0.48	29.46		
131	0.481	29.48	接近 10 号线下行线	未接近 10 号线
132	0.479	29.69		
133	0.474	29.49		
134	0.454	30.52		
135	0.412	29.51		
136	0.388	29.46	下行线下方	
137	0.374	29.76		
138	0.365	29.74		
139	0.367	29.53	下、上行线之间	接近 10 号线下行线
140	0.36	29.49		
141	0.368	28.06		
142	0.369	27.46	上行线下方	
143	0.365	27.75		下行线下方
144	0.379	27.08		
145	0.443	24.23		
146	0.445	26.46		下、上行线之间
147	0.461	24.15		
148	0.471	26.25		
149	0.498	24.27	离开 10 号线投影范围	上行线下方
150	0.51	26.99		
151	0.514	27.69		
152	0.517	23.07		
153	0.519	28.45		离开 10 号线投影范围
154	0.518	27.68		
155	0.522	28.58		

(3) 压注克泥效可显著抬升上方隧道。穿越 10 号线过程中, 只有 139、140 环压注了克泥效, 此阶段盾构机刚好位于下行线投影面内, XU36 点的累计位移从 1.48 mm 猛增至 8.12 mm, 增幅远大于其他推进阶段, 说明压注克泥效可显著抬升拟建隧道上方的土体和结构物, 尤其对正上方区域最有效。

穿越推进过程中, 主要对盾构机的 3 个位置参数进行控制。切口: 泥水压力; 盾体: 克泥效压注与姿态控制; 盾尾: 同步注浆量。本次穿越过程中, 切口穿越期间以控制下行线“微隆起不沉降”为原则, 但由于泥浆压力控制不佳, 导致

最终下行线隆起量过大, 造成盾体和盾尾穿越期间参数控制困难, 尤其是同步注浆量小于理论值的工况直接提高了 10 号线下行线工后沉降的控制难度。考虑到盾体和盾尾穿越期间, 盾构机具备显著抬升上方土体和结构物的性能, 切口穿越时, 建议将泥浆压力调整成以控制上方隧道“不隆起微沉降”为原则, 以保证后期盾尾通过时同步注浆量足够, 有利于控制上部隧道的工后沉降。

4 结 论

北横通道新建工程下穿运营地铁 10 号线区间
(下转第 88 页)

日常管理方便。

出水水质的 COD、TN、NH₃-N、SS、TP 平均浓度均优于设计出水水质,运行稳定,消除了对园区周围环境的污染,实现了经济、社会、生态效益的共赢。

参考文献:

- [1] 张骅. 某工业园污水处理厂扩建及提标改造工程设计[J]. 工程建设,2022,54(8):26-31.
- [2] 辛涛,郑临奥,夏超,等. 广东省某污水厂提标改造工程设计[J]. 净水技术,2019,38(10):34-38;50.

- [3] 刘青,范修波,何晓锋. 某化工污水厂改扩建工程实例[J]. 工程建设,2023,55(10):40-46.
- [4] 徐富,邵金兰,张彩吉,等. Fenton 流化床工艺在印染废水深度处理中的工程应用[J]. 给水排水,2020,46(3):112-116.
- [5] 陈倩伶,李坤,刘熹. 上流式多相氧化 Fenton 技术应用于废水提标改造工程[J]. 工业水处理,2023,43(8):172-178.
- [6] 伍波,叶昌明. 江西某工业园区废水的深度处理[J]. 中国给水排水,2019,35(2):97-99.

(上接第 80 页)

隧道,通过数值模拟、盾构参数控制和信息化施工,累计变形在可控范围,确保了地铁 10 号线的正常运营,结合盾构下穿施工控制技术和监测数据得出以下施工经验:

(1)本工程通过数值模拟计算,结合其他工程施工经验,确定 20 mm 变形控制标准能满足下穿施工与地铁运营安全要求。

(2)切口中心压力过大将导致盾构推进过程中运营地铁区间隆起过大,应密切关注监测数据并及时调整。

(3)压注克泥效可显著抬升拟建隧道上方的土体和结构物,用以控制沉降。

(4)盾构切口泥浆压力的设置宜结合隧道注浆及工后沉降统筹考虑。

参考文献:

- [1] 宋兴宝. 超大直径泥水平衡盾构机近距离下穿运营轨道交通区间隧道施工技术[J]. 隧道与轨道交通,2019(4):29-34.
- [2] 张明远,刘庭金. 广州某盾构超近距离下穿已运营地

铁隧道的工程概述[C]. 地下交通工程与工程安全:第五届中国国际隧道工程研讨会文集[C]. 上海:中国土木工程学会//2011:502-507.

- [3] 王旭声,闫路恒,钱行. 盾构区间下穿既有地铁区间隧道影响分析[J]. 河南科技,2020(7):106-108.
- [4] 蒋茂林,高成杰,彭浪. 以武汉某区间为例分析 MJS 加固情况下盾构下穿对既有区间的影响[J]. 科学技术创新,2023(6):89-92.
- [5] 翟晓慧. 盾构下穿运营地铁区间综合注浆施工技术研究[J]. 铁道建筑技术,2021(12):130-134.
- [6] 杨建烽,郑余朝,陈强,等. 盾构下穿既有地铁区间隧道沉降控制研究[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(增刊2):385-392.
- [7] 张海超. 大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术[J]. 现代隧道技术,2022,59(增刊1):934-940.
- [8] 唐汐. 地铁双区间下穿既有盾构隧道结构变形控制措施及效果分析[J]. 建筑结构,2023,53(8):148-153.
- [9] 涂智溢,郭洪雨,孙飞,等. 闹市区复杂环境下大直径盾构小净距下穿运营地铁隧道的应对措施及分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2021,3(4):75-84.