

盾构超净距下穿既有10号线特级风险源微沉降控制技术研究

王秋生, 张 功, 王贺旺, 李 皓, 胡祖军, 杨 超
(北京住总集团有限责任公司轨道交通市政总承包部, 北京市 100029)

摘 要:为深入研究新建盾构隧道下穿既有运营地铁线路的合理技术措施,结合北京地铁12号线西坝河站~三元桥站盾构区间超净距(2.18 m)下穿既有10号线盾构区间工程,首先基于FLAC3D进行三维施工模拟分析获得穿越既有线路沉降变形,根据计算沉降对掘进各项技术措施进行优化,并依据穿越过程中实时监测数据反馈,快速进行多次补浆,成果实现了既有线路结构的微沉降控制,穿越完成后既有10号线的最终最大累计沉降变形为-0.54 mm、-1.23 mm,远小于既有结构沉降3 mm的控制标准,可为类似净距穿越施工提供施工经验及参考。

关键词:地铁;微沉降;现场试验;沉降变形;净距

中图分类号: TU94

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)09-0233-05

0 引 言

随着近年来轨道交通建设的高速发展,超大型城市如北京、上海、广州等地的轨道建设面临的施工风险越来越大,多次穿越地铁线路已经逐渐成为常态化的设计与施工。以北京为例,根据规划2050年前后北京市轨道交通建设线路中节点车站和区间穿越段数量高达118处。北京作为政治、文化中心,对地铁建设及运营的安全风险管控等级极高。由于新建隧道施工过程中对周围土体产生扰动引起外力及支撑条件改变,导致已有建筑(构)物发生沉降、变形及附加应力的增加,甚至出现坍塌事故。因此,对于盾构施工穿越既有线路结构等特、一级风险源,如何控制好新建线路对既有线路的影响,将既有线路隧道结构的隆起、沉降值精细化管控确保线路的正常运行安全,成为当前盾构施工研究的重点课题。

国内外学者对盾构穿越施工引起的沉降变形及控制措施进行了大量研究,主要以理论模型、数值分析、现场及模型试验研究为主并形成了大量的成果用于指导实践施工^[1-7]。汪洋等^[8]广州地铁3号线区间盾构隧道为课题背景,通过数值模型分析计算以及相似模拟试验手段,对隧道施工正交下穿既有线路期间引起的应力及变形进行研究,得到了正交下穿过程中既有隧道结构的变形规律。杨广武^[9]等以

北京地铁10号线下穿13号线芍药居站为例,通过采用FLAC3D模型进行模拟分析发现土压增大能够起到控制地表沉降的效果,但是压力过大也会造成土体地层负损失,地表发生隆起。翟和明^[10]等以地铁昌八联络线盾构施工下穿既有8号线工程案例,新建线路与既有线路净距为3.18 m,通过提出优化掘进参数,细化同步注浆配比、速度及二次补浆的压力、注浆量、凝结时间等措施,确保穿越既有8号线的安全。赵林^[11]针对深圳地铁7号线盾构下穿既有1号线,通过Midas软件模拟分析,洞内注浆加固可以有效减少既有隧道沉降变形,并预测了施工过程对既有线的变形影响。王立新^[12]等以西安5号线盾构下穿2号线为例,研究分析了黄土地质条件下隧道穿越施工对既有线的变形影响规律和沉降控制标准。金大龙^[13]等通过离心模型试验研究分析了深圳地铁7、9号线净距(2.78~2.97)下穿1号线时施工过程对既有隧道的影响规律。多条隧道穿越施工引起的群洞效应将加剧沉降变形,且沉降峰值出现在隧道中心位置,并通过离心模型试验得到验证。

盾构下穿既有线路隧道结构施工受地质水文条件及位置关系影响,尤其对于超净距穿越工程,精确控制施工引起的既有线路结构变形对于其运营安全至关重要。本文以北京地铁12号线西坝河站~三元桥站盾构区间超净距(2.18 m)下穿既有10号线盾构区间工程为背景,通过数值模拟分析及现场掘进参数优化研究穿越既有线路微沉降控制技术,通过合理的技术

收稿日期: 2021-11-24

作者简介: 王秋生(1981—),男,硕士,高级工程师,从事地下工程研究工作。

参数优化及实施确保盾构区间下穿既有线 10 号线的运营安全,为今后类似超净距下穿施工提供了宝贵的施工经验。

1 工程概况

1.1 盾构区间工程概况

地铁 12 号线西坝河站~三元桥站区间东起三元桥站,沿北三环东路向西北敷设,在三元桥东北先后下穿 10 号线、机场线区间,然后在机场高速路前左线以 $R=380\text{ m}$ 曲线、右线以 $R=400\text{ m}$ 曲线调整线路走向并扩大线间距,下穿三元桥匝道桥后沿三环方向向西,从三元西桥两侧绕行通过,到达西坝河站。

区间起始点里程为右 CSK116+631.637~右 CSK118+112.650,总长度 1481.013 m,区间线路线间距为 19.2 m~35 m~17.2m,采用盾构法施工,管片尺寸为外径 6 400 mm,管片厚度 300 mm,管片宽 1 200 mm。区间盾构隧道采用两台直径 6.4 m 土压平衡盾构施工。区间线路见图 1。

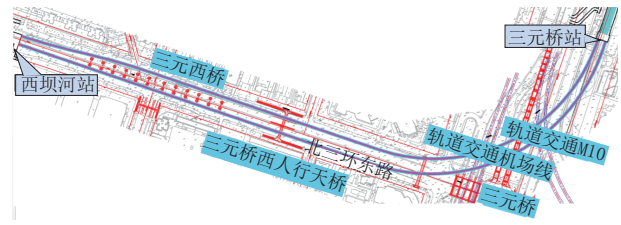


图 1 区间线路图

下穿既有线地铁 10 号线为盾构施工隧道,位置位于机场高速下,距离车站始发距离为:左线距离 206 m,右线距离 237 m。地铁 10 号线区间隧道为单洞单线隧道。穿越影响范围为:左 SSK117+867.000~左 SSK117+916.000;右 CSK117+839.000~右 CSK117+887.000。10 号线右线区间隧道距盾构区间距离为 4.499 m,10 号线左线区间距盾构区间 2.186 m。下穿地铁 10 号线区间隧道风险等级为特级。新建线路与既有 10 号线位置关系见图 2。

1.2 地质水文条件

本区间双线下穿地铁 10 号线区间隧道穿过的主要地层为中粗砂⑥₃层、粉细砂⑤₂层、粉质粘土④层。地下水潜水(二)水位标高 31.32~29.67 m,层间潜水(三)水位标高 18.66~17.82 m,层间潜水(四)水位标高 10~9.5 m,见图 3。

2 盾构下穿既有 10 号线三维模拟分析

2.1 模型建立

以 12 号线隧道为中心,建立数值模型,进行数

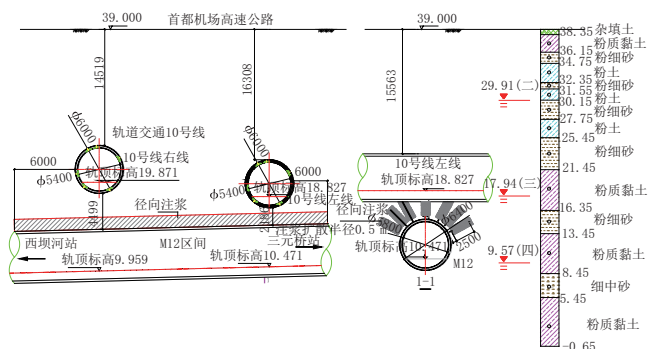


图 2 新建线路与既有 10 号线位置关系

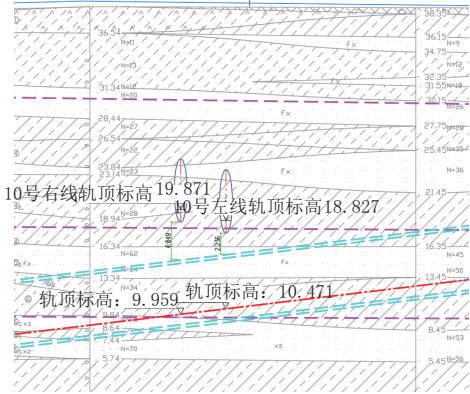


图 3 地质剖面图

值计算模型,计算范围长×宽×高=80 m×80 m×50 m,下穿隧道与既有线最小距离 2.18 m。该模型侧面限制水平移动,底部固定,模型上表面为应力边界,施加的荷载为 20 kPa 模拟路面荷载,见图 4。其中管片结构破坏符合材料弹性破坏准则,地质结构与注浆区域破坏符合 Mohr—Coulomb 强度准则,模拟中采用的物理力学参数见表 1。

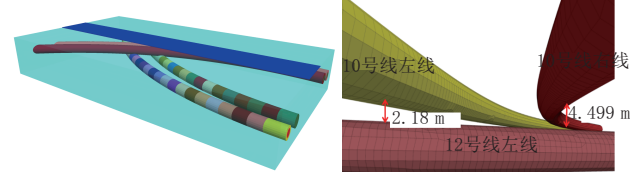


图 4 盾构穿越模型

表 1 模型参数

岩性	容重 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力 / MPa	抗拉强 度 /MPa	体积模 量 /GPa	剪切模 量 /GPa	内摩擦 角 /($^{\circ}$)
覆土	2 688	2.3	2.1	4.53	2.32	35
粉质粘土	2 550	5.5	2.3	5.20	2.74	32
粉细砂	2 450	0	1.3	2.50	1.12	27

穿越土层地质参数如下表所示。盾构掘进施工土压力取 0.2 MPa,注浆压力取 0.4 MPa,注浆量 5 $\text{m}^3/\text{环}$,盾构掘进速度 5 cm/min 。

2.2 穿越施工数值结果分析

分别对整个掘进过程中既有管片及上覆土体沉降进行监测,将整个穿越过程分为开始穿越、穿越

左线、穿越右线、穿越完成四个阶段,其中对12号线中心所在剖面位置进行位移场的监测,四个穿越阶段见图5。

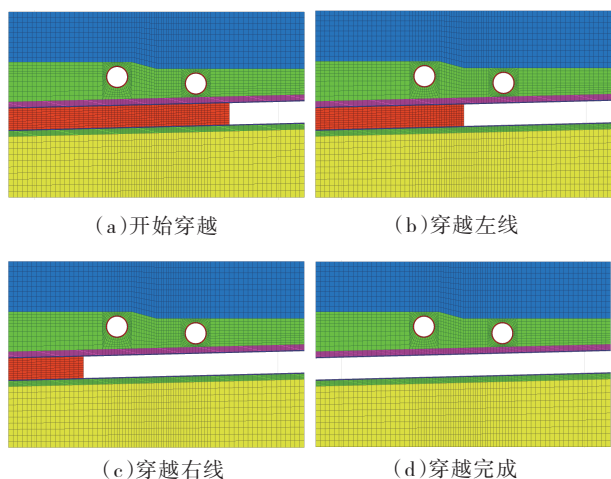


图5 监测步骤图

不同阶段垂直位移分布见图6。

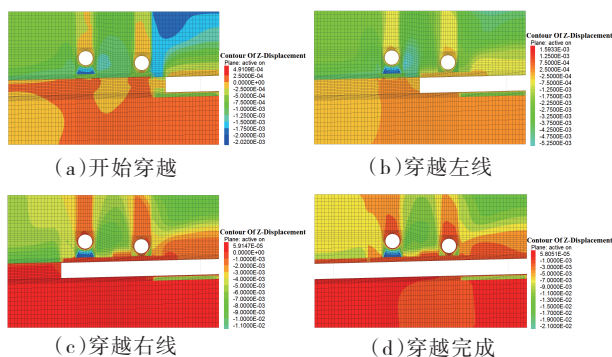


图6 既有结构垂直位移

从云图中可以看出,在盾构推进至既有线影响范围后,既有线及上覆土体由于受到施工扰动出现变形,但总体变形量不大,地表沉降值最大值出现在盾构推进区域,最大沉降值约为2 mm,而既有线管片沉降量小于0.2 mm。

随着推进过程的持续,盾构穿越既有线左线后,既有线左线管片及上覆土体开始发生明显变化,管片最大变形量0.55 mm,同时既有线正上方地表沉降达1.71 mm,而右线管片及地表沉降未发生明显变化,仍处于缓慢变形阶段。

随着进一步推进,盾构穿越既有线右线后,既有线左线管片变形持续,其变形增长速度与之前大致相同,最大处增加至0.82 mm,而上覆土体沉降量在一段时间的稳定后再次发生突变,增大至约3.3 mm后逐渐平缓;既有线右线管片变形增大,最大处增加至0.64 mm,上覆土体持续增大,且变化位置略滞后于管片变形增大处,变化量最大为2.11 mm。

随着整个穿越过程结束,此时既有线左线管片

及上覆土体变形已趋于稳定,而右线管片及上覆土体变形已呈现减缓趋势。最终地表沉降均在5 mm左右,左右线管片结构的最终累计沉降均在1 mm左右,说明该技术措施基本可满足穿越期间的沉降及变形需求。

3 盾构施工参数优化控制

为确保盾构穿越特级风险源的顺利通行,盾构机在进行适用性评估中采用全新中铁装备土压平衡盾构机,刀盘形式为辐条式,开口率60%,额定扭矩8 410 kN·m,脱困扭矩10 092 kN·m,总推力42 575 kN,最大推进速度为10 cm/min,满足本段盾构施工要求。

下穿既有10号线盾构区间特级风险源阶段,主要掘进参数控制如下:

3.1 下穿阶段盾构掘进参数控制

与理论计算相比,下穿段的掘进参数依据试验段数据及模拟数据进行优化,其各项掘进参数均大于理论值:

(1)下穿阶段的盾构参数控制:刀盘转速1~1.5 r/min,土压:1.6~2.0 bar,扭矩2 000~4 500 kN·m,掘进速度40~50 mm/min,推力15 000~20 000 kN,出土量43 m³,并严格控制出土量。

(2)同步注浆:同步注浆量采用预拌料,注浆压力0.3~0.5 MPa。

(3)克泥效:每环注入0.3 m³,利用膨润土泵及B液泵在盾体上方注入。配比:400 kg/m³,80袋/罐(7 m³),水玻璃1:1注水,克泥效与水玻璃20:1注入,(掘进速度40 mm时,膨润土泵10 L/min,B液泵0.5 L/min)。

(4)二次补浆:二次补浆采用双液注浆(见图7),在下穿影响区域内对脱出盾尾管片每环补浆,补浆点位选取在时钟点位11点及1点,提前将封顶快上的注浆孔打通并安装注浆头,管片脱出盾尾3环时(掘进环减5)进行,注入量0.3方,注入压力小于3.5 bar。配比:水灰比0.8:1,水玻璃波美度为35~40,水玻璃1:1注水,水泥浆1:1水玻璃溶液,双液浆凝结时间30~40 s。

(5)后续补浆:为确保既有隧道结构的微沉降效果,每2环再补浆一次,注浆量及配比与二次补浆相同,以压力控制为主,并根据实时反馈的沉降数据增加补浆次数。

3.2 既有线结构沉降分析

沉降控制标准及测点布置:



图7 二次补浆

既有10号线是北京的第二条环形地铁线路,由于10号线辐射效果并与其他线路形成换乘节点,10号线为全国客运量最大的客运线路,每日客流量达到200万左右。因此,作为北京最重要的交通枢纽设施,确保其运营安全是重中之重。结合10号线的敏感地位,其控制标准见表2。

表2 既有线结构沉降控制标准

结构	控制指标	预警值/mm	报警值/mm	控制值/mm
10号线三元桥站~亮马桥站区间	竖向上浮	1.4	1.6	2.0
	竖向沉降	2.1	2.4	3.0
	横向变形	0.7	0.8	1.0
管片错台增量		0.7	0.8	1.0
管片环、纵缝张开值		0.7	0.8	1.0
盾构隧道收敛值		0.7	0.8	1.0

(1)道床结构自动化沉降监测点:下穿部位以5 m间隔紧密布设,邻近下穿部位以10 m间隔布设;

(2)隧道结构、道床结构人工沉降监测点:下穿部位以5 m间隔紧密布设,邻近下穿部位以10 m间隔布设,其余部位以15 m左右间隔布设;

(3)几何形位监测点:测点位置与道床结构沉降监测点同监测断面;

(4)无缝线路钢轨位移监测点:在左右线两端布设;

(5)隧道结构横向变形监测点:与自动化沉降监测项目同断面;

(6)盾构区间收敛、管片错台、管片环纵缝张开值监测点:与自动化沉降监测项目同断面。

既有线结构测点布置见图8。

通过对既有线结构沉降数据监测分析,盾构机在到达既有10号线左线1 m时,沉降变形由于刀盘前方土压增大形成微隆起,最大隆起量0.07 mm,随着盾构掘进下穿10号线左线过程中,既有线结构产生了整体的沉降变形,最大沉降量达到1 mm。尽管在掘进期间通过增加土压(2.5~3 bar)、克泥效等措

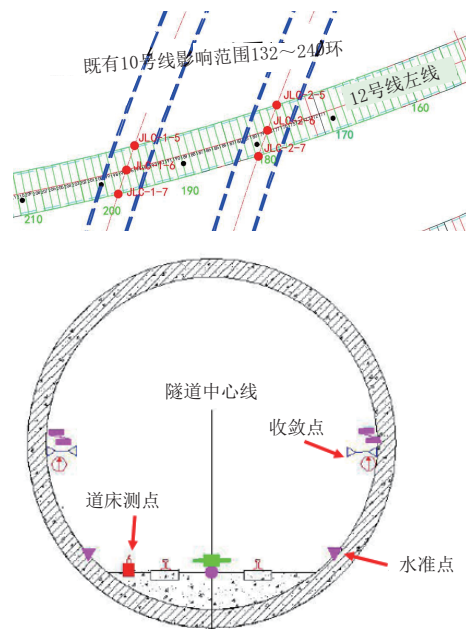


图8 既有线结构测点布置图

施,但对于控制穿越前三阶段沉降效果不明显。

随着管片脱出盾尾进行二次补浆,由于双液注浆的快速凝结有效减缓沉降变形,二次补浆共计进行3次,每次注浆完成后既有结构变形均有明显的微隆起,以穿越左线为例,其隆起量分别为0.5 mm,0.24 mm,0.11 mm。盾构穿越完成既有10号线左线结构的最终累计沉降为-0.35~-0.54 mm范围,盾构穿越既有10号线右线的最终累计沉降-0.7~-1.23 mm,均远小于控制沉降标准,成功实现微沉降控制效果,见图9。

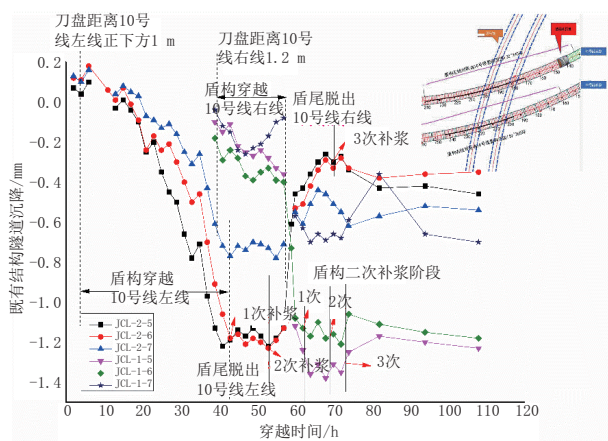


图9 既有线结构沉降变形

施工过程中,对既有10号线洞内道床结构进行监测,盾构穿越过程中道床呈现了明显的下沉变形过程,由于洞内人工监测受限,尽管监测数据偏少,但随着50 h以后二次补浆,道床的变形逐渐趋于稳定,最终左、右线沉降变形为-0.23 mm、-0.85 mm,均满足控制标准要求,见图10。

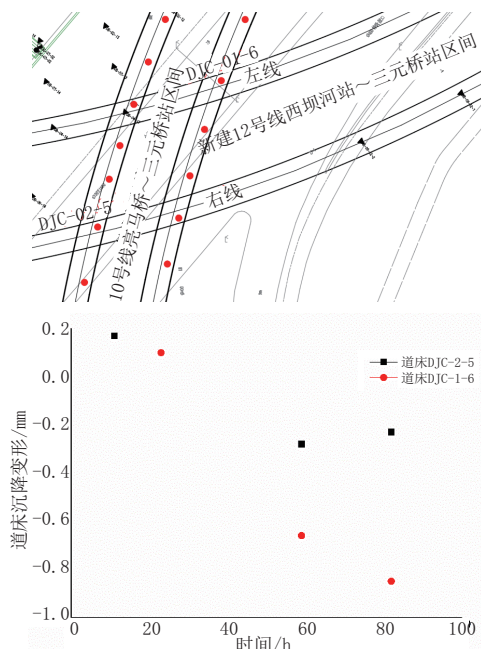


图 10 既有线结构道床沉降变形

4 结 语

(1)盾构下穿既有有线结构时,推力、扭矩、土压力等各项掘进参数均比理论计算拟定值大,下穿施工前,需根据地勘报告中的土层物理力学参数并结合试验段掘进施工参数及地表沉降情况,综合确定盾构下穿掘进参数。

(2)通过数值模拟研究分析,盾构穿越施工的各项技术措施能够保障顺利穿越,其左右线管片的结构沉降均可控制在 1 mm 左右,地表沉降控制在 5 mm 左右,均满足既有有线结构的沉降控制标准。

(3)盾构下穿既有有线结构施工过程中,其前三阶段的沉降主要通过调整土压进行控制,推进过程中使用的克泥效能够缓解三阶段的累积沉降,但作用有限。

(4)盾构管片脱出盾尾后其沉降变形控制主要依靠补浆完成,合理选用补浆材料及补浆参数,严格控制补浆凝结时间缩短沉降变形,多次补浆等措施能够有效控制沉降,既有线 10 号线左、右线的最大累计沉降分别为 -0.54 mm、-1.23 mm,满足 3 mm 沉降的控制标准,通过本技术能够实现超净距穿越的微沉降控制要求。

参考文献:

- [1] 刘志涛.地铁穿越工程中新建地铁对既有地铁安全运营的影响分析[D].北京:北京交通大学,2009.
- [2] 曾小清,张庆贺,曹志远.地铁工程双线盾构平行推进的相互作用[J].同济大学学报(自然科学版),1997,25(4):386-389.
- [3] 范垚垚.盾构超近距离穿越运营地铁的微扰动施工研究[D].上海:同济大学,2008.
- [4] 梁霄.盾构超近距离下穿既有地铁盾构区间工程监测实例研究[D].北京:中国地质大学,2015.
- [5] 陈仁朋,刘源,汤旅军,等.复杂地层土压平衡盾构推力和刀盘扭矩计算研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):26-32.
- [6] 刘亮,高书通,许凡.地铁正交、平行上穿盾构隧道近接施工数值分析[J].现代隧道技术,2018,55(S2):791-795.
- [7] 吴全立,王梦恕,殷明伦.基于网络分析法盾构下穿隧道风险分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(6):1881-1888.
- [8] 汪洋,何川,曾东洋,等.盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J].铁道学报,2010,32(2):79-85.
- [9] 杨广武,关龙,刘军,等.盾构法隧道下穿既有结构三维数值模拟分析[J].中国铁道科学,2009,30(6):54-60.
- [10] 翟和明,李冬瑾.盾构施工近距离下穿地铁线路沉降控制技术[J].铁道建筑,2013,27(5):90-91.
- [11] 张恒,陈寿根,邓稀肥.盾构掘进参数对地表沉降的影响分析[J].现代隧道技术,2010,47(5):48-53.
- [12] 王立新,汪珂,李储军,等.黄土地区地铁盾构隧道近距离下穿既有有线影响规律及控制标准研究[J].铁道标准设计,2019,63(10):124-130.
- [13] 金大龙,袁大军,韦家昕,等.小净距隧道群下穿既有运营隧道离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(8):1507-1514.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com