

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.07.050

盾构下穿施工参数控制影响分析

宋鹏飞,李超

(山东轨道交通勘察设计院有限公司,山东 济南 250000)

摘要: 轨交5号线在一个特定的地区,从秀灵路站出发到达明秀路站的区段中,采用了盾构机穿越正在运营的轨交2号线,其垂直净空最小高度范围在2.05~2.10 m。通过室内模拟试验对实际施工参数进行优化分析,对比研究不同推进速度下的盾构隧道位移变化规律、不同推力下的盾构隧道附加内力变化规律、不同泥水压力下的盾构隧道位移变化规律和不同刀盘转速下的盾构隧道位移变化规律。结合现场施工反馈的监测数据变化情况,研究表明:通过相似试验,采用控制变量法优化掘进参数,技术方面是可行的,为下穿既有线工程,合理选用盾构机推进速度、顶推力、泥水压力、刀盘转速,保证既有隧道的运营安全提供更多参考。

关键词: 盾构;相似实验;理论分析;盾构参数;工程风险;控制变量法

中图分类号: U455.43 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2024)07-0203-05

0 引言

随着城市发展进程的不断更迭,城市交通系统的不断完善,百姓出行条件更加便利,一、二线城市轨道交通线网规划不断加密,尤其是近几年城市轨道交通成为各大城市发展的重要交通基础设施,线网规划呈现立体交叉的发展趋势,规划线网近距离下穿运营线工程案例不断增多,随之引起的轨道交通施工难度不断增大。宋洋等^[1]通过相似实验,对超近接下穿既有地铁隧道掘进参数进行优化分析,提出了采取控制变量法对盾构掘进参数优化的可行性及折线楔形体模型。江杰等^[2]通过对下穿段盾构掘进参数的研究,分析了泥水压力、掘进速度、同步注浆压力及同步注浆量对既有线沉降的影响规律。尹波涛^[3]通过现场试验、工程类比、现场监测等多种研究手段,比选出最优掘进参数,并提出了相应施工控制措施。为此,依托秀灵路站—明秀路站区间下穿运营线区间隧道项目,结合试验数据、施工方案、监测数据等全过程数据资料,综合详细分析近距离穿越既有运营线,施工参数控制影响的重要因素和应对措施。

1 工程概况

该区间线路出秀灵路站后,沿明秀路敷设,近距

离侧穿崇左市公安局驻南宁办事处、武警南宁地方支队综合楼、格兰德富大酒店等建筑物后,下穿运营轨交2号线盾构区间,进入明秀路站。明秀路是南宁市的主要东西向通道,两旁鳞次栉比的是高楼大厦。这里有着双向六条车道,车辆的流量巨大,而且道路下方的管线如网如丝,使其周围环境更为复杂。本区间采用一台泥水平衡盾构机掘进施工。

该区间长度为680 m(双线),盾构直径为6.0 m,区间下穿轨交2号线隧道,穿越段长度约为45 m(双线),详见图1。2号线区间隧道覆土10.7 m。5号线区间覆土约18.8 m,最小垂直净距约2.1 m。外部作业影响等级为特级^[4],详见图2。

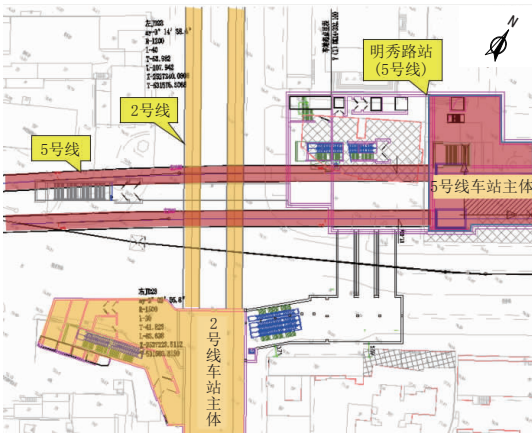


图1 区间总平面

2 工程地质及水文地质条件

深度勘查数据显示,横穿这片区域的地质层面,自上而下分别是:素填土、黏土、粉土、圆砾和泥

收稿日期: 2023-11-24
作者简介: 宋鹏飞(1989—),男,本科,工程师,从事城市轨道交通结构设计工作。

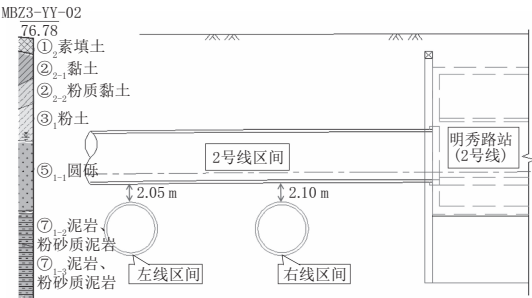


图 2 区间横剖面

岩。场区内稳定地下水位埋深约 7 m,地下水类型为松散岩类孔隙裂隙水,主要赋存于圆砾的孔隙中,与邕江河水有水力联系。具体岩土物理力学参数见表 1。

表 1 岩土主要物理力学参数

土层编号	土层名称	重力密度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	直剪		三轴 uu		压缩模量 $E_{S100-200}/\text{MPa}$	泊松比	水平基床系数 / $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	垂直基床系数 / $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
			内聚力 C_k/kPa	内摩擦角 $\varphi_k/(\text{^\circ})$	内聚力 C_{uk}/kPa	内摩擦角 $\varphi_{uk}/(\text{^\circ})$				
①	素填土	19.6	15.0	10.0	—	—	4.5	—	—	—
②	黏土	19.4	54.5	13.0	48.5	11.0	11	0.28	37	34
③	粉土	19.8	17.5	17.0	—	—	7.5	0.30	18	16
④	圆砾	20.1	0	37	0	37	14.3	0.33	75	70
⑤	泥岩	21.0	70	22	—	—	16	0.20	120	110

构隧道施工过程中,保持沉降量在设计许容范围内是这个项目的难题。因此,根据预先设定的标准严格控制泥浆仓的压力,对每个环节的泥浆参数进行测量,并加大监测频次。同时,要确保设备的保养和资源供应的充足,以确保盾构机能够持续运行。在盾构机施工期间,加强对现有 2 号线自动化监测和地面沉降的监控,采取同步注浆和二次注浆的方式来及时稳固地质,避免邻近已有线遭受水土流失和土体位移的影响。只有保持隧道变形在可控范围内,2 号线的运营才能得到保证^[1]。

(3)采用多孔管片。多孔管片设计包含了注浆孔的添加。在盾构行进中,将带有注浆孔的预制管片(每环 16 孔)进行安装。根据监测结果,必要时,在下穿区域利用洞内注浆,通过注浆孔将注浆管插入到周围的地质层,接着压入浆液以增强隧道顶部地层的强度。

(4)为将盾构下穿期间对轨交 2 号线的影响降到最低,对下穿区域内 2 号线既有隧道管片进行了拉紧加固。

4 研究思路及方法

(1)设计模型试验,通过相似定理确定相似比参

3 工程风险分析及应对措施

(1)地理状况颇为复杂。穿越 2 号线段部分的地层依序包括素填土、黏土、粉土、圆砾及泥岩。5 号线的隧道主要透过泥岩地层及部分上侧圆砾层,这样的地质结构用来施展盾构施工,容易对 2 号线下方的地层造成干扰,导致圆砾层崩塌到挖掘面,引发 2 号线的地陷。在这个过程中,泥岩地层的盾构刀盘结泥饼也是一个容易出现的问题。

(2)工程环境复杂,沉降控制严格。下穿段开挖刀盘距离既有隧道 2 号线仅仅有 1.75 ~ 1.8 m 的间距(刀盘开挖半径为 6.3 m,管片外径为 6.0 m)。在盾

数关系,相似试验需要对模型土体进行选配,并选择满足相似关系的相似材料,试验采用大比例泥水盾构室内模拟试验设备,开展试验研究。

(2)通过类似模拟试验(泥水盾构室内模拟装置)^[1],研究复合地层中泥水盾构关键掘进参数对既有区间隧道的影响规律,包括泥水压力、刀盘转速、掘进速度。同时结合试验段盾构施工现场监测数据对盾构掘进参数进行优化,为后续下穿风险区域,选取关键的掘进参数提供理论参考依据。

(3)采取控制变量法,在试验模型中沿隧道纵向布置 5~7 个监测断面,模拟并统计拟建隧道施工引起既有隧道沉降位移规律^[1]。

5 盾构施工参数(试验结果)影响分析

通过类似模拟试验,并选取典型试验数据进行分析,依据相似比例关系,将试验结果数据从模型值等效换算为原型值。

在模型试验中,依据风险程度,将轨交 2 号线施工的特定区域划分为过渡区、风险区及危险区(见图 3)。

(1)不同推进速度下的 2 号线位移变化规律。在

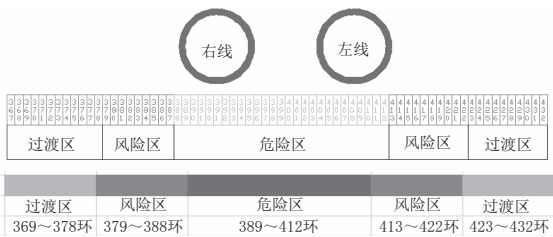


图3 风险分区示意图

其他参数一致的情况下,盾构推进速度分别取3、5、7、9 mm/min,刀盘开口率为34%,顶推力大小分别取0.4、0.55、0.7、0.9 MPa,切口泥水压力控制在0.15 MPa,穿越期间控制盾构模型姿态保持良好。既有线最大竖向位移量的变化规律是相同的(见图4、图5)。

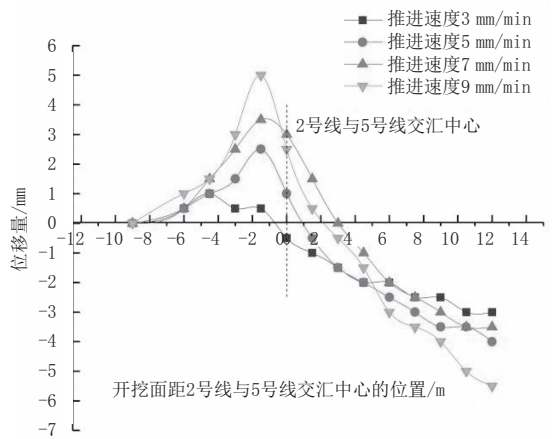


图4 不同推进速度,2号线拱顶的最大位移量

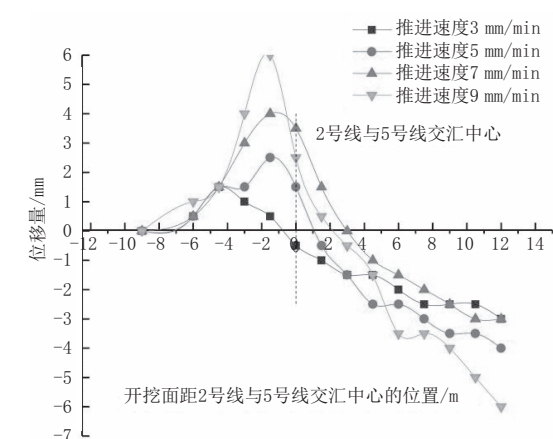


图5 不同推进速度,2号线拱底的最大位移量

盾构推进速度越大,2号线沉降越明显。随着施工速度的减小,2号线拱底、拱顶最大沉降值逐渐减小,最后趋于平缓^[1]。显而易见,当进行下穿工作时,只要不影响整体工程进度,就有必要调低施工速度,适度地放慢5号线的施工进度将有助于减少对2号线的干扰。由试验结果可知,各位移变化最大值均在允许范围之内,但是考虑到实际施工受多种因素影响,当5号线掌子面距离2号线大于10 m时,建议

推进速度7 mm/min;当5号线掌子面距离2号线小于10 m时,建议推进速度3 mm/min。

(2)不同顶推力下的2号线附加内力变化规律。在模拟实验装置中,为测量新建隧道掘进施工引起的既有隧道附加应力分布规律,沿既有隧道测量断面布设应变片。

由图6、图7可知,结构在受外力影响时,产生了较大的附加纵向弯矩和轴力,最大值都出现在已有隧道的中心位置。无论顶推力如何变化,附加纵向弯矩和附加轴力的分布和变化模式都在同一条已有隧道纵轴中心线上,并且会随着顶推力的增加逐步上升。以0.4 MPa顶推力掘进5号线将引起2号线产生320 kN·m的弯矩和1 300 kN的轴力,而以0.55 MPa顶推力掘进5号线将引起2号线产生380 kN·m的弯矩和1 600 kN的轴力。因此,可以得知,适度减弱顶推力可以有效地减轻2号线的额外内力。

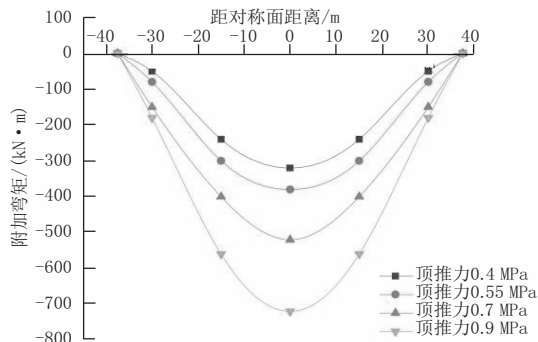


图6 2号线附加弯矩

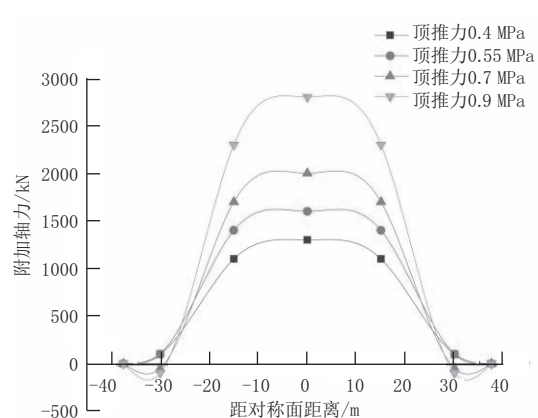


图7 2号线附加轴力

(3)不同刀盘转速下的2号线位移变化规律。刀盘转速分别取0.5、1、1.5、2、2.5、3 r/min,刀盘开口率为34%,盾构推进速度为3 mm/min,顶推力为0.4 MPa,切口泥水压力控制在0.16 MPa,穿越期间控制盾构模型姿态保持良好。

由图8可知,当刀盘的转速减小时,2号线会有

轻微隆起的现象,原因可能是刀盘的低转速导致挖掘效率减少,从而使得泥水仓的压力升高。当刀盘转速越快时,2 号线最大沉降值就越大,可能是因为刀盘转速越快,对地层扰动就越大。

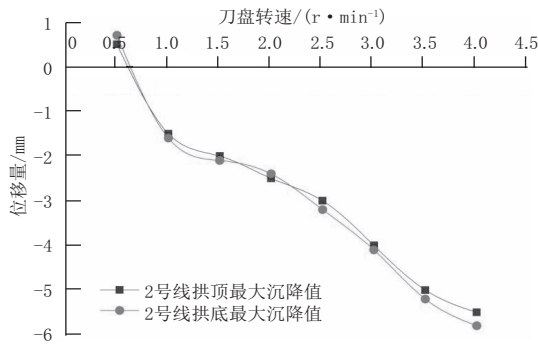


图 8 刀盘转速与位移量的关系

在刀盘转速从 1 r/min 增至 2 r/min 的过程中,2 号线的沉降程度变化曲线显示出逐步减缓的趋势。这表明在此阶段内刀盘转速的下降对于控制 2 号线的沉降作用不明显。然而,一旦刀盘转速超过 2.5 r/min,2 号线的沉降曲线出现较大幅度上升。这就清楚地说明了在刀盘转速超过 2.5 r/min 后,刀盘转速增加会显著影响 2 号线的位移。通过优化掘进参数,确定合理的盾构掘进参数:一是推进速度,5~9 mm/min;二是刀盘转速,1.0~1.2 r/min。

(4)不同泥水压力下的 2 号线位移变化规律。在盾构掘进过程中,泥水压力随时变化。泥水压力分别控制在 0.12、0.14、0.16、0.18、0.2、0.22 MPa,刀盘开口率为 34%,盾构推进速度为 5 mm/min,顶推力为 0.5 MPa,刀盘转速 2 r/min,穿越期间控制盾构模型姿态保持良好。

由图 9 可知,2 号线的沉降值会随着泥水压力的降低而提高,最大的位移变化发生在挖掘面的正上方。当泥水压力在 0.16 MPa 左右波动时,2 号线的位移变化速度有所降低。而当泥水压力下降至大约 0.14 MPa 时,2 号线的沉降会因泥水压力的减小而有显著增大^[1]。

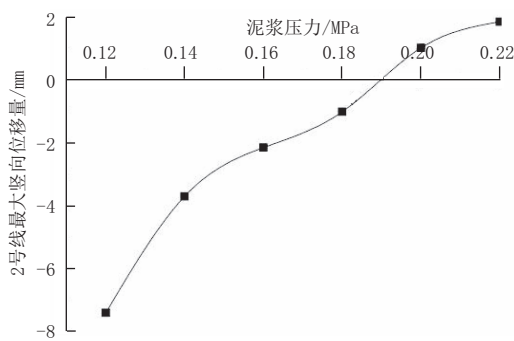


图 9 2 号线最大位移量与泥水压力关系曲线

随着泥水压力从 0.22 MPa 降至 0.18 MPa,2 号线的最大位移量有大约 3 mm 的变动。当泥水压力进一步下降至 0.14 MPa 时,2 号线的最大位移量再次改变了 2.5 mm。然而,泥水压力在降至 0.12 MPa 的过程中,2 号线的最大下沉值却增加了 4 mm。由此可以看出,泥水压力低于 0.14 MPa 的时候,2 号线的形变明显。要想控制 2 号线的变形,最关键的就是将盾构开挖面的泥水压力维持在这个区域以外。因此,建议将泥水压力控制在 0.14~0.18 MPa。

6 监测控制标准

根据《城市轨道交通工程监测技术规范》的规定,监测预警的控制标准主要是隧道结构的下沉总量、下沉速率和各区域下沉程度的差异性^[5](见表 2)。

表 2 监测控制值

序号	监测项目	累计控制值 / mm	变形速率控制值
1	结构竖向位移	+5/-10	
2	结构水平位移	5	
3	结构收敛	10	
4	道床竖向位移	+5/-10	单次监测数据 ± 5mm、沉降变化 速率达 1 mm/d
4	轨间距	-4/+6	
5	轨道横向水平	4	
6	道床差异沉降(10 m)	4	

7 施工监测数据分析

在盾构机穿越 2 号线的过程中,采用自动化监测和人工复测的方式进行监测,监测数据与设计的有限元分析数据存在微小差异。然而,实际监测数据的变动都控制在可接受的区间,并没有达到报警的标准(见表 3)。建议盾构掘进过程中,平稳匀速通过,保证各项参数稳定。

8 结 语

依托上述工程,考虑盾构掘进施工的主要影响因素,通过相似试验得出合理的泥水压力值,并对推进速度、刀盘转速掘进参数进行优化分析,为下穿危险区域掘进参数选取提供依据。最终得出如下结论:

- (1)采取控制变量法对掘进参数进行优化是可行的。
- (2)在挖掘过程中,选取试验段,划分风险区,需严格遵守设定的仓压、顶推力、掘进速度,严苛地管理同步注浆压力,并检测泥浆的性能参数。
- (3)采用增设注浆孔的多孔管片。通过在预制管

表 3 施工监测数据统计

阶段	监测项目	位置	累计值 /mm	阶段	监测项目	位置	累计值 /mm
下穿前	地表沉降	过渡区 362 环	-7.62	下穿后	地表沉降	危险区 404 环	-6.11
	管线沉降	过渡区 362 环	-7.62		管线沉降	危险区 400 环	-4.52
	自动化监测 (左线)	X 轴 K35+327.158	-1.2		自动化监测 (左线)	X 轴 K35+336.158	1.61
		Y 轴 K35+384.158	-1.28			Y 轴 K35+327.158	1.51
		Z 轴 K35+381.158	0.98			Z 轴 K35+366.158	-1.9
	自动化监测 (右线)	X 轴 K35+381.158	-1.78		自动化监测 (右线)	X 轴 K35+358.658	-1.93
		Y 轴 K35+381.158	1.5			Y 轴 K35+345.158	2.07
		Z 轴 K35+352.658	1.07			Z 轴 K35+366.158	-1.12
下穿中	地表沉降	危险区 392 环	-5.62				
	管线沉降	危险区 395 环	-4.98				
	自动化监测 (左线)	X 轴 K35+336.158	1.61				
		Y 轴 K35+327.158	1.51				
		Z 轴 K35+363.158	-2.07				
	自动化监测 (右线)	X 轴 K35+358.658	-1.93				
		Y 轴 K35+345.158	1.93				
		Z 轴 K35+381.158	-1.61				

片上设置注浆孔,插入注浆管,以压力注入浆液来加固隧道顶部的地层。

(4)其他类似工程中,有条件时,先行线施工时考虑预加固,降低后期下穿施工风险。

参考文献:

[1] 宋洋,王伟颐,杜春生.富水圆砾与泥岩复合地层泥水盾构超近接下穿既有地铁隧道掘进参数优化研究[J].现代隧道技术,2021,58(5):

85-95.
[2] 江杰,龙逸航,邢轩伟,等.富水圆砾地层盾构下穿既有地铁隧道掘进参数研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(7):1828-1836.
[3] 尹波涛.盾构隧道下穿既有地铁掘进参数及控制研究[J].山西建筑,2023,49(14):167-171.
[4] CJJ/T 202—2013,城市轨道交通结构安全保护技术规范[S].
[5] GB 50911—2013,城市轨道交通工程监测技术规范[S].

(上接第 185 页)

(2)桥梁结构变位检测结果显示,应急抢修过程中,桥台在 X 和 Y 方向(平面方向)结构变位较小;Z 方向(竖向)由于高填土自重作用,产生了轻微的沉降。桥墩立柱竖直度基本满足规范要求。

(3)静载试验结果表明,在正常使用极限状态下,该桥试验跨下部结构承载能力目前均能够满足原设计公路-I 级荷载的正常使用要求。

(4)对受洪水损伤后的桥梁进行现场病害调查时,需结合当地的气象、水文资料及洪水发生时的视频资料。除检查洪水对桥梁造成的影响外,应对桥梁重点部位进行应急抢修过程中的变位监测,避免抢通工作对桥梁造成二次损伤。

参考文献:

[1] 李文杰,赵君黎.发展中的中国桥梁——张喜刚谈中国桥梁的现状与展望[J].中国公路,2018(13):64-68.
[2] 肖月.中国桥梁创世界第一[J].现代班组,2018(12):16.
[3] MONTALVO C,COOK W,KEENEY T. Retrospective Analysis of Hydraulic Bridge Collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2020,34(1):1-8.
[4] 郑元勋,郭慧吉,谢宁.基于统计分析的桥梁塌陷事故原因剖析及预防措施研究[J].中外公路,2017,37(6):125-133.
[5] 秦泗凤.近期中国桥梁水毁事故回顾与分析[J].中外公路,2022(42):133-137.
[6] 史析宇,李强.2020 年洪水导致桥梁垮塌的调查[J].中国科技信息,2021(1):76-77.
[7] JTG F80/1—2017,公路工程质量检验评定标准[S].
[8] JTG/T J21-01—2015,公路桥梁荷载试验规程[S].
[9] JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力检测评定规程[S].