

上软下硬地层区段新建地铁线路盾构法下穿既有地铁运营线路关键施工技术

章邦超

(中铁华南建设有限公司,511458,广州//高级工程师)

摘 要 近年来,新建地铁线路盾构法下穿既有地铁运营线路的情况越来越多。针对广州地区常见的上软下硬地层,以广州地铁 22 号线盾构法下穿既有 3 号线工程为例分析关键施工技术。将水平定向钻施工、超前预支护、预加固等传统方法与盾构法施工相结合,形成了地面水平定向钻孔注浆、盾构机超前注浆孔注浆、洞内深孔跟踪注浆等加固方法,并结合工程经验和理论计算设定了最优施工参数和自动化监测方案。工程实践表明,所采用的加固方法严格控制了既有线路变形和位移,确保了既有线路的运营安全,也降低了新建线路施工安全风险。

关键词 地铁;盾构法;上软下硬地层;沉降控制;注浆加固

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.09.028

Key Construction Techniques for Metro Lines with Shield Tunneling Method under-crossing existing Lines in Upper-Soft Lower-Hard Stratum

ZHANG Bangchao

Abstract In recent years, there are more and more cases of newly built metro lines with shield tunneling method under-crossing existing lines. For the common upper-soft lower-hard stratum in Guangzhou area, construction of Guangzhou Metro Line 22 under-crossing the existing Line 3 project by shield tunneling method is taken as an example to analyze the key construction techniques. Combining traditional construction methods such as horizontal directional drilling, advanced pre-supporting and pre-reinforcement, with shield construction, reinforcement techniques such as ground horizontal directional drilling, shield machine advanced grouting hole grouting, and deep cave hole tracking grouting are formed. With engineering experience and theoretical calculations, optimal construction parameters and automatic monitoring plan are set. Engineering practice shows that the adopted reinforcement method strictly controls the deformation and displacement of lines, ensuring

operational safety of the existing line and construction safety of the new line.

Key words metro; shield tunneling method; upper-soft lower-hard stratum; settlement control; grouting reinforcement

Author's address China Railway Construction South China Construction Co., Ltd., 511458, Guangzhou, China

随着地铁建设规模的不断扩大,新建线路下穿既有运营线路的情况将会越来越多。珠三角区域的地层特点为上软下硬,施工难度高和安全风险大,因此对该区域盾构法下穿既有运营线路施工关键技术研究十分重要。

目前国内有关盾构法下穿既有运营线路的研究主要集中在对具体工程实践案例的总结。文献[1]介绍了长沙地铁 3 号线盾构法施工下穿武广高铁浏阳河隧道工程中的安全控制标准;文献[2]针对深圳地铁 9 号线下穿既有 4 号线工程,通过数值模拟分析并结合地表和既有线路的监测数据的拟合分析,指出盾构刀盘到达下穿断面至盾尾脱出既有线路期间,既有线路和地表沉降速率和沉降量最大;文献[3]利用 ABAQUS 有限元软件建立了轨道-路基-下穿隧道有限元模型,分析了盾构法施工对既有线路轨道结构的影响。此外,文献[4-5]和文献[6]分别总结了广州地铁 1 号线和上海地铁 4 号线盾构法近距离下穿既有线路工程的经验。

国外也有一些在建工程下穿既有线路的工程案例,例如:文献[7]中,日本京都地铁两条运营线路 Keishin 线和 Tozai 线的车站前方,两条新建地铁线路与既有线路交汇,对工程监测数据进行了详细分析,指出了盾构隧道近距离施工时既有线路地表沉降、隧道结构变形位移等的变化规律;文献[8]研究了伦敦地铁 Jubilee 延长线下穿 5 号地铁线路施工过程中邻近多条隧道的实测数据,指出既有运营线路的埋深对新建隧道与既有线路隧道结构的相互

作用影响较大,且 20%~50%的沉降是在开挖面到达既有隧道正下方过程中完成的。

上述文献鲜有研究如珠三角地区这种上软下硬地层的工程案例。因此,目前缺乏针对该类地层的盾构法施工下穿既有运营线路工程的系统成熟的安全控制标准和施工方法,为此需要结合该类地层的实际工程进行理论和施工方法的研究。

1 工程概况

1.1 区间概况

广州地铁 22 号线番祈中间风井—番祈 2[#]盾构井区间位于番禺区市桥东环路,区间长 2.51 km,采用 ϕ 8.8 m 土压平衡盾构机施工,管片采用 6+1 形式,管片外径 8.5 m、环宽 1.6 m。该盾构区间在光明北路与东环路十字路口下穿既有运营地铁 3 号线(隧道处于 5Z-2 和 6Z 地层中,为盾构法隧道,管片外径 6.0 m、环宽 1.5 m)汉溪长隆站—市桥站区间。下穿段对应 3 号线区间左线里程 ZDK24+009.94~ZDK24+034.77,右线里程 YDK24+004.099~YDK24+028.92;下穿段对应 22 号线左线里程 ZDK38+542.909~ZDK38+523.709(297 环—309 环),右线里程 YDK38+564.327~YDK38+545.127(291 环—303 环),盾构下穿长度 19.2~20.8 m,先下穿 3 号线右线,再下穿 3 号线左线。

1.2 地质情况

穿越段地层自地表至盾构区间底部的地层依次为<1-2>素填土、<4N-2>粉质黏土、<3-2>中粗砂、<5Z-2>砂质黏性土、<6Z>全风化花岗岩、<7Z>强风化花岗岩、<8Z>中风化花岗岩、<9Z>微风化花岗岩。

3 号线地层主要位于<5Z-2>砂质黏性土、<6Z>全风化花岗岩。围岩不均一,自稳性差;<6Z>全风化花岗岩遇水会软化崩解。

22 号线隧道盾构施工主要穿越<7Z>强风化花岗岩、<8Z>中风化花岗岩。7Z 地层风化含砂量较高,含砂量达 90%,含泥量 10%,手拧易碎,自稳性差;8Z 地层饱和抗压强度最小 65.1 MPa、最大 138.1 MPa。隧道下部较硬,RQD(岩石质量指标)值为 6%~12%,裂隙比较发育,属于广州地区典型的“上软下硬”地层。

1.3 周边环境与管线情况

施工周边环境复杂,地表为交通繁忙的光明北路与东环路,交通流量大。根据区间管线调查报告及现场实地摸排,影响区域内管线主要为燃气管、

自来水主管、高压电力管、雨水管、通信管等。管线错综复杂,且多为主干管线,涉及产权管理单位多,对地表及管线保护要求较高,因此,施工前,需要做好管线坑探和现场标志,并制定加固保护方案;施工过程中,需安排专人检查,加强监控量测等措施,把对周边环境的影响降到最低。

1.4 三维位置关系

22 号线隧顶距既有 3 号线隧底净距约 5.5 m,22 号线隧顶埋深 26.5 m,3 号线隧顶埋深 15.1 m。采用可视化建筑信息模型(BIM)技术建立 3 号线、22 号线区间模型及三维地质模型(见图 1),通过合模及断面剖切分析,能够可视化查看任意位置隧道拱顶地层信息,能够辅助分析穿越过程中的风险。

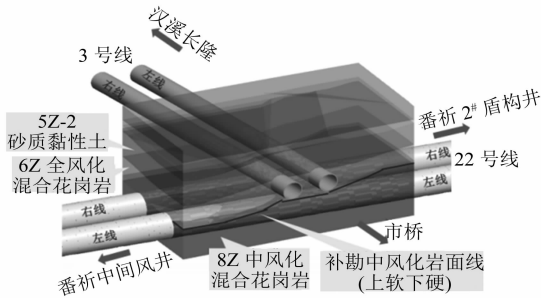


图 1 广州地铁 22 号线盾构区间下穿既有 3 号线三维模型图

2 既有线运营控制参数要求

3 号线为正在运营的隧道,所处地层易受扰动变形。3 号线运营参数控制要求:确保列车的正常运行,即保证既有线的轨道平顺度,轨向偏差和高低差需满足规范要求;保证将 3 号线隧道结构安全、沉降、变形、收敛、裂缝等控制在允许范围内,预警值为上述各参数最大值的 80%。

根据广东省《城市轨道交通既有线结构技术规范》,既有线控制标准如表 1 所示。

表 1 广东省城市轨道交通既有线结构安全控制值

安全控制指标	控制值	安全控制指标	控制值
隧道水平位移/mm	<15	轨道横向高差/mm	<4
隧道竖向位移/mm	<15	轨向高差(矢度值)/mm	<4
隧道径向收敛/mm	<15	轨间距/mm	>-4~<+6
隧道变形曲线半径/m	>15 000	道床脱空量/mm	≤5
隧道变形相对曲率	<1/2 500	振动速度/(cm/s)	≤2.0
盾构管片接缝张开量/mm	<2	盾构管片裂缝宽度/mm	<0.2
隧道外壁附加荷载/kPa	≤20	其他混凝土裂缝构件宽度/mm	<0.3

注:表中数值未考虑城市轨道交通既有结构发生变形或病害情况下的安全控制值。如果既有结构已发生变形或病害,则应根据现状评估取值。

3 工程难点分析

该工程属于广州地区 $\phi 8.8\text{ m}$ 土压盾构首次在上软地层中下穿既有运营地铁隧道。由于下穿段为典型的上软下硬地层,掘进过程中容易出现诸如刀具异常损坏、刀盘扭矩大、螺旋机喷涌、糊刀盘等现象。该工程的主要难点如下:

1) 盾构法在上软下硬地层中主要采用气压辅助模式掘进,气压稳定是关键,若出现漏气现象则会造成盾构机失压,引起地层塌方。因此如何控制勘察孔、监测孔、地层漏气、3号线洞内管片接缝漏气是难点。

2) 盾构近距离(最小垂直距离 5.5 m)在上软下硬地层推进时,刀盘振动明显,推进速度慢,刀盘转动对上部的软弱地层扰动大,再加以列车通过时振动影响,容易出现隧道上部土体超挖。因此如何保证市政道路路面、重要管线,以及既有3号线隧道沉降、变形、位移等各项指标控制在允许值范围内是难点;如何控制同步注浆、二次注浆、洞内超前注浆、水平定向钻注浆引起的既有运营隧道、管线隆起也是难点。

3) 盾构法在上软下硬地层掘进,如何控制渣土改良不当、刀具异常损坏、糊刀盘、卡螺旋机、螺旋机喷涌等现象发生是难点。

4) 盾构下穿过程中,3号线仍处于运营状态,无法进行人工监测,只能依靠自动化监测设备。隧道内潮湿、多尘、振动等因素会造成自动化监测设备失灵,因此如何保证自动化监测设备处于有效工作状态是难点。

4 盾构下穿过程中采用的关键技术

4.1 地面水平定向钻孔注浆加固技术

采用地面水平定向钻孔,设计钻孔13孔,钻孔水平间距 2 m ,水平段(3号线下方)垂深应为 25.0 m (第一顺位7孔)和 24.5 m (第二顺位6孔,备用孔),区间左线水平定向钻加固平、纵断面示意图如图2~3所示。区间左线加固平面范围为3号线边线外扩 5.0 m (设计加固长度 28.0 m),22号线边线外扩 2 m (设计加固宽度 12.5 m),水平段钻孔高程在22号线隧道上方 1.5 m ,主要加固地层是全、强风化混合花岗岩。

4.2 盾构机超前注浆孔注浆加固技术

区间左线从274环开始进行第一次超前注

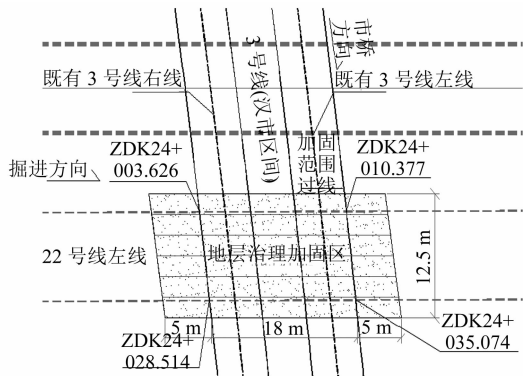


图2 广州地铁22号线盾构法下穿既有3号线左线区间水平定向钻加固平面示意图

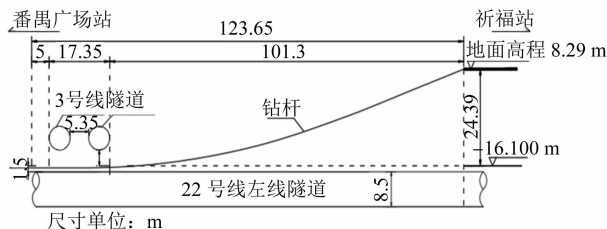
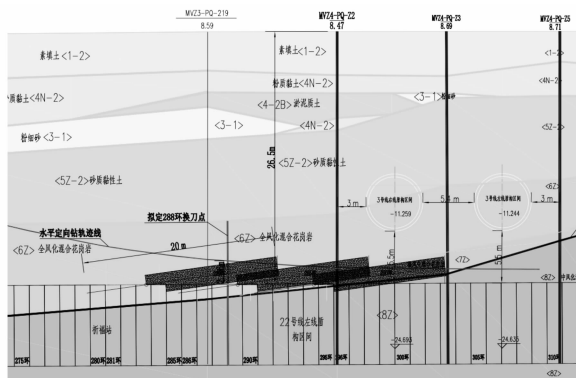


图3 广州地铁22号线盾构法下穿既有3号线左线区间水平定向钻加固纵断面示意图

浆,每掘进6环(9.6 m)后进行下一次注浆,注浆杆总长按 20 m 设计,其中有效注浆范围为刀盘前方 11.5 m ,相邻两次注浆范围搭接长度约 1.9 m ,加固最高高度为隧道上方 1.94 m 。注浆环号分别是:第1次注浆为274环,第2次注浆为280环,第3次注浆为286,第4次注浆为292环,注浆出口为304环管片位置。注浆出口位置为7Z与8Z地层交接面。图4为左线下穿3号线超前注浆示意图。右线下穿参考左线施工方案进行,可根据施工经验适当调整方案。



标高单位: m

图4 广州地铁22号线盾构法下穿既有3号线左线区间超前注浆示意图

4.3 洞内深孔跟踪补偿注浆

洞内深孔跟踪补偿注浆方案为盾构跟进式注

浆,当管片脱开盾尾且具备注浆条件时应尽快开启该方案。深孔跟踪补偿注浆为对隧道拱部 150°(时钟 10:00—2:00 位置)、拱顶以上 4 m、拱肩进入中风化地层 1 m 的区域进行注浆。深孔跟踪补偿注浆设计方案为:φ 42 mm 袖阀钢管,普通硅酸盐 42.5 级水泥,注浆压力按 0.1~0.5 MPa 控制,先外后内,少量多次。盾构掘进注浆期间应结合既有线自动化监测密切监测结构变形和道床沉降情况,与 3 号线洞内自动化监测设备联动。注浆时控制压力,防止 3 号线出现隧道隆起、变形、漏浆等情况发生。盾构通过后,根据监测信息反馈、累计沉降及不均匀沉降情况,经分析确认得到有效控制的情况下可以结束注浆。图 5 为洞内深孔跟踪补偿注浆示意图。

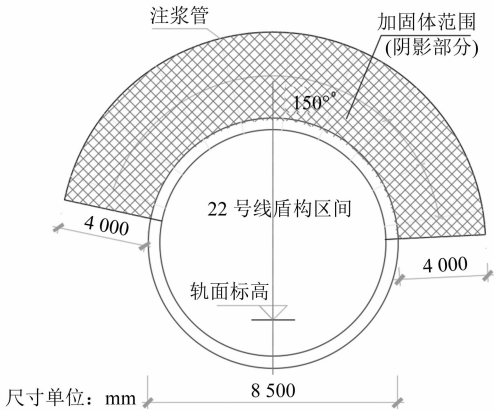


图 5 洞内深孔跟踪补偿注浆示意图

4.4 既有 3 号线洞内道床注浆加固

在 3 号线道床与水沟进行环氧树脂注浆:处理范围为 3 号线右线对应区间下穿段及前后 30 m,总长共 80 m。道床与盾构仰拱面的注浆加固辅助处理如图 6 所示。

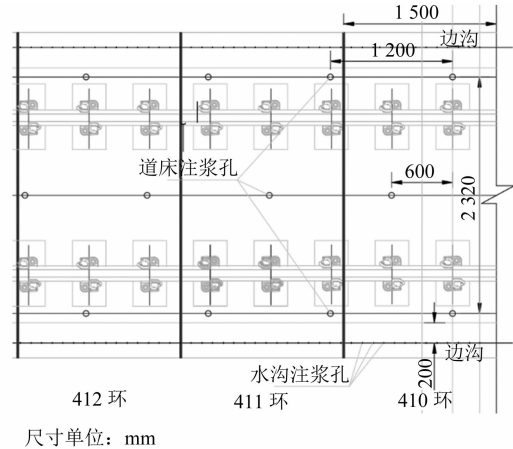


图 6 既有 3 号线道床注浆加固辅助处理

1) 在道床两侧水沟边布 2 排注浆孔,平均间距

42 cm,孔径 φ 10 mm,孔深至道床管片仰拱面。采用 EAA(乙烯丙烯酸)环氧浆封闭,注浆压力 0.3~0.4 MPa。

2) 在道床面布 3 排注浆孔,按梅花形布孔,间距 1.2 m,孔深至仰拱管片面。

3) 对 34 条道床裂缝进行注浆处理。目前已完成对 3 号线右线道床及水沟的治理,共使用 EAA 环氧浆 154 kg。

4.5 掘进参数设置

由于下穿段地质为上软下硬地层(上部 7Z,下部 8Z)和全断面硬岩地层,至全断面中风化混合花岗岩<8Z>渐变,如在掘进时采用纯土压模式,则难以掘进,将出现结泥饼、刀盘扭矩大、速度慢、刀具异常损坏等情况。同时,为了避免在下穿风险源时出现地层突变塌方,经综合考虑,采用土压+气压辅助模式,将土仓渣位控制在 1/2~3/2 仓高度。该方案在改善掘进参数的同时能尽快建立实土压力,防止掌子面出现较大的塌方。

主要掘进参数:试验段和下穿段地层埋深在 26.5 m,稳定地下水位埋深 3.4~4.1 mm;土仓上部(1#传感器)压力设定在 0.26~0.28 MPa,土仓下部(6#传感器)压力稳定在 0.30~0.32 MPa,压差约 0.4 MPa;刀盘转速 1.3~1.5 r/min,掘进速度 10~25 mm/min,扭矩 5 000~8 000 kN·m,推力 30 000~40 000 kN;每环出渣量控制在 6 斗(混合方量 150 m³)以内;注浆量不低于 12 m³/环,二次注浆(双液浆)和深孔注浆及时跟进。

4.6 施工监测

1) 变形监测点布设:对于每个断面,在轨道附近的道床上布设 2 个沉降监测点,在中腰位置布设 2 个水平位移监测点,在隧道拱顶布设 2 个拱顶沉降监测点,即在每个监测断面布设 6 个监测点。

2) 施工监测:地表施工监测频率如图 7 所示。其中,距离穿越范围中点 30~50 m 范围内的监测频率为 1 次/d;随着开挖面逐步靠近,距离穿越范围中点 2 倍洞径至 3 倍洞径(约 30 m)时,将提高监测频

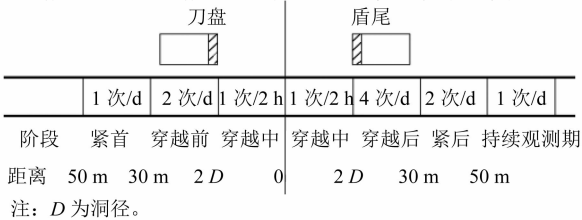


图 7 地表施工监测频率图

率至2次/d;在该穿越范围中点前后2倍洞径处,将监测频率加密至1次/2h;在盾尾脱出距离穿越范围中点2倍洞径后,将监测频率逐步降低至4次/d、2次/d及1次/d。

3) 洞内自动化监测:3号线洞内自动化监测频率如图8所示。与地表施工监测频率相比,主要时提高了盾构通过该穿越范围时的监测频率,每隔1h监测1次轨面沉降、管片水平位移、拱顶沉降。

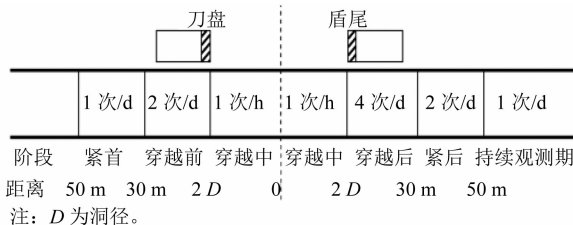


图8 洞内施工监测频率图

4) 监测断面的布置:根据隧道下穿对3号线的影响强弱情况布设监测断面,位于下穿位置1倍洞径范围内约45m强烈影响区域,每5m布设1个,共布设7个监测断面;1倍洞径范围外至3倍洞径范围内约30m的影响区域,每10m一个,共布设6个监测断面;单线共计布设13个监测断面。

5 3号线沉降、上抬情况分析

通过上述辅助工法处理后,对左线盾构下穿3号线前后的沉降数据进行整理分析。盾构下穿前,3号线隧道对应盾构刀盘位置前方1~2m处(自动化监测点)呈整体抬升趋势,上抬量为0.8~2.2mm;3号隧道待脱出盾尾后2~5m处(自动化监测点)呈整体下沉趋势,下沉量为0.3mm~4.5mm;盾构成功下穿地铁3号线后,3号线右线道床主要影响区变化值(正值为上抬、负值为下沉)为-0.5~-6.3mm,平均变化值为-3.3mm,竖向位移监测点YDM07-2处的累计变化值最大,为+12.83mm;3号线左线道床主要影响区变化值为-3.4~+1.9mm,平均变化值为+0.1mm,竖向位移监测点ZDM07-4处的为累计变化值最大,为+14.22mm。

从监测结果数据分析:竖向位移最大值均在7号自动化监测断面,7号自动化监测断面位于22号线盾构隧道左、右线之间,施工扰动叠加效应最大符合沉降规律;竖向位移沉降值以7号自动化监测断面为中心向两边递减,其中1、13自动化监测断面

影响最小;盾构隧道掘进的扰动范围及二次扰动监测数据与3号线隧道X、Y轴水平位移、收敛、轨道横向高差等成正比例关系,但其中不乏无规律数据值;经过加固后的上软下硬地层的沉降规律与硬岩段地层的基本相符。

6 结语

上述盾构辅助措施的实施,保证了盾构下穿施工过程连续顺利,确保了3号线隧道的结构和运营安全。作为广州市 $\phi 8.8$ m土压平衡盾构首次在上软下硬地层中下穿既有运营地铁隧道工程,为今后类似工程提供了宝贵的经验。在确保盾构机及相关设备经过仔细检修的前提下,控制好盾构机掘进模式、掘进姿态、推力、刀盘扭矩、螺旋机扭矩、出土控制、注浆量、注浆压力等参数,采用水平定向钻注浆、洞内超前注浆、洞内深孔跟踪注浆、既有3号线洞内道床注浆等加固方法,合理布置监测点、选择监测频率并进行动态化监测,这些都是确保在上软下硬地层中近距离下穿运营线路的关键。

参考文献

- [1] 林志军. 地铁盾构隧道下穿既有高铁隧道施工影响及控制技术[D]. 长沙:中南大学,2013.
- [2] 沈刚. 盾构近距离下穿既有地铁隧道相互影响机理研究[D]. 深圳:深圳大学,2016.
- [3] 蔡向辉. 盾构下穿引起的既有线路轨道变形与列车运营作用研究[J]. 铁道标准设计,2016(7): 30.
- [4] 叶建兴,王世君. 盾构过地铁一号线控制指标[R]. 广州:广州市地下铁道设计院,2000.
- [5] 张凯,贺婷. 盾构近距离下穿地铁运营隧道施工技术[J]. 隧道建设,2008(4): 483.
- [6] 杨俊龙. 盾构机近距离穿越运营中地铁隧道施工技术研究[J]. 现代隧道技术,2004(增刊): 76.
- [7] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1998,13(3): 289.
- [8] BURLAND J B, STANDING J R, JARDINE F M. Building response to tunnelling: Case studies from construction of the Jubilee Line Extension, London[M]. London: Thomas Telford Publishing, 2001.

(收稿日期:2020-08-17)