

长距离下穿既有线盾构施工风险控制技术

文 / 刘龙展 中铁二十五局集团有限公司盾构工程分公司

摘要: 随着城市地下轨道交通的快速发展, 施工环境越来越复杂, 后建路线下穿既有线等情况也不可以避免。在保证既有线安全运行的前提下进行新隧道的施工, 对既有线在被下穿期间的变形规律分析具有较大的意义。笔者以深圳市16号线共建管廊为例, 提出长距离下穿既有线盾构施工过程中应采取的措施和注意事项, 经监测结果表明盾构在长距离下穿既有线满足规范要求, 为今后的此类施工提供了参考。

关键词: 长距离下穿既有线; 盾构施工; 风险控制技术

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2025. 04. 048

引言

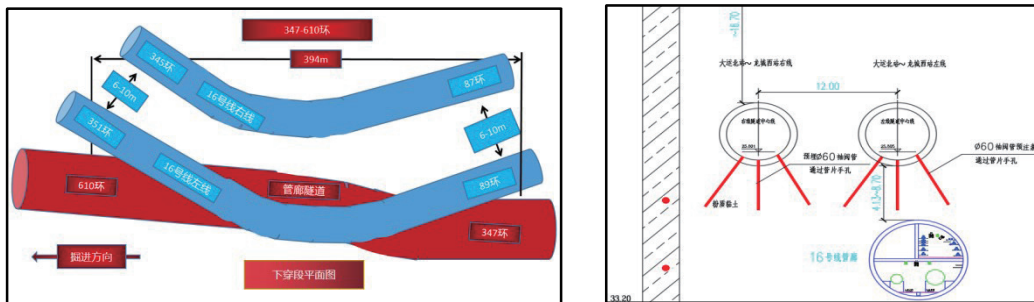
随着城市地铁的迅速发展, 城市地下空间的利用率大大提高, 在城市地铁工程建设过程中, 难免会遇到新线与既有线交叉的现象, 新线的建设需采取有效的设计保护措施以确保既有线结构稳定和运营安全, 尤其是存在高承压水干扰且地层条件较差的情况下。针对这一难题, 新建线的施工应采取有效的加固保护, 与既有线之间设置屏障隔离措施, 隔断施工造成的地层应力传递对既有线的附加变形, 控制既有线沉降是一项至关重要的管控措施, 根据既有线实际变形规律进行分析和总结,

采用可靠的预防措施。并加强沉降监测工作, 以确保既有隧道的稳定性。

一、工程概况

共建管廊盾构施工区间线路起于综合井2, 呈南北走向, 到接收井1。区间全长1178. 4m。沿线主要揭露地层为粉质黏土、中、强风化砂岩、中、微风化灰岩等。

被穿越线路为深圳地铁16号线(龙坪线), 区间已全线贯通, 主体结构全部完成, 目前属于铺接触网、热滑阶段。共建管廊区间约787m近接地铁既有线, 约394m下穿地铁既有线左线, 两者竖向最小净距为4. 13m。



管廊与16号线地铁位置关系平面及纵断面示意图

二、盾构机下穿地铁重叠段关键技术控制措施

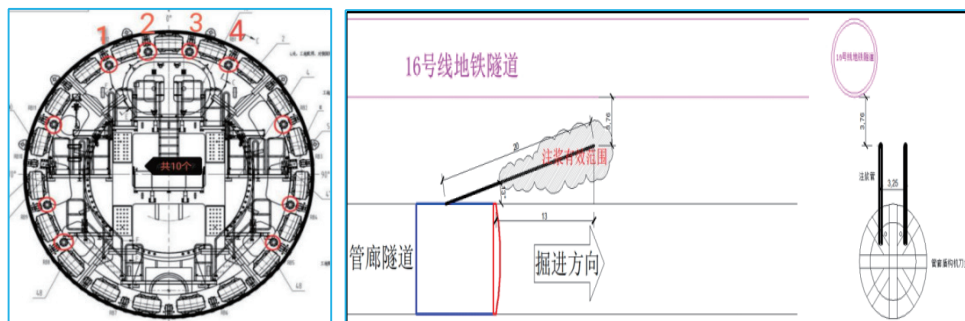
(一) HSP 法超前地质预报

下穿前在管廊隧道内每80米做一次HSP超前地质预报, 对该段地层、岩性、地质构造进行充分了解, 通过定期进行地质雷达扫描掌握地表以及洞内是否存在空洞或者土体松散情况, 及时注浆处理, 保障施工安全。同时根据结果与地勘报告配合使用, 更好的了解地层情况, 为后续掘进提供指导。

(二) 超前注浆及补充注浆

隧道内布置自动化监测设备, 自动化监测断面间距为5m。信息化施工, 分析监测数据, 辨析原因, 制定可行方案, 采取如调整掘进参数、掘进模式、土压力、注浆参数等有效措施。

根据详勘、超前地质预报、盾构机推进参数等综合分析前方地层自稳能力, 采用从盾体预留的10个超前钻孔(中部孔6个, 顶部孔4个)位置向刀盘前端的土层进



超前注浆孔位置和数量

超前注浆纵断面图

行钻孔注浆加固，每次可加固前部约12-15m距离的土体，提高刀盘前方土体稳定性，减少塌方。

自下穿段开始盾构共进行3次超前注浆作业，注浆2-4个孔，用时约3-4天，利用超前注浆工艺解决了上软下硬地层、黏土地层在下穿过程中出现的掘进参数异常。

对与既有线重叠段的管片下部，注浆施工必须以设计为基础并参考施工现场实际情况，合理安排，注浆效果检查合格后方可进行后续施工。临近与既有线重叠部分应遵循穿越前预加固和穿越后跟踪注浆的方式进行。

预加固注浆施工顺序：钻孔--注浆--注浆效果检测。注浆工艺流程一般按以下进行。

1. 60×4.5m袖阀管：钻有直径为6mm的泄浆孔的PVC管，袖阀管布置需避开建构筑物基础；

2. 套壳料：配合比为水泥：膨润土：水=1：1.5：2；

3. 注浆材料：水泥浆，水灰比1：1；

4. 注浆步距：0.6m；浆液扩散半径：0.8m；

5. 注浆压力：0.5-1.5MPa，注浆速度：35±5L/min，每次双塞管提升高度：40±510cm；

6. 经注浆加固后，加固土体渗透系数小于等于 10^{-6} /cm/s且无侧限抗压强度大于1.0MPa；

7. 注浆压力及速率应根据监测结果及时作出调整，严防加固强度过大导致对既有线产生不利影响。

注浆后必须用清水及时进行清孔，清除袖阀管内残留浆液，便于下次使用。

穿越后跟踪注浆采用二次注浆。

双液浆设计注浆参数：水泥-水玻璃双液浆水玻璃模数（2.3-3.4），水玻璃浓度（30-45Be'）；水灰比W:C（0.4:1-1:1），体积比C:S（1:1-1:0.3）。

（三）厚浆的应用

与水泥砂浆相比惰性厚浆具有保水性好、稠度大、收缩率小，流动性差且不会有较大的凝结强度等特点，通过盾体径向孔注入后可以快速对土体形成支撑，从而起到降低地面沉降的作用；当隧道处于下坡段时，如果注入水泥砂浆，将会浆液向前流窜包裹盾体，选择厚浆可以保证较好的填充饱满度同时避免出现浆液包裹盾体的情况发生，同样因为厚浆初凝时间长且强度较低，同步注浆采用厚浆时需要进行二次注浆来增加强度。

在强风化砂岩、碎裂岩及粉质黏土段宜从盾体上部径向孔注入浓稠浆液（厚浆），补充注浆量和注浆压力控制要求。

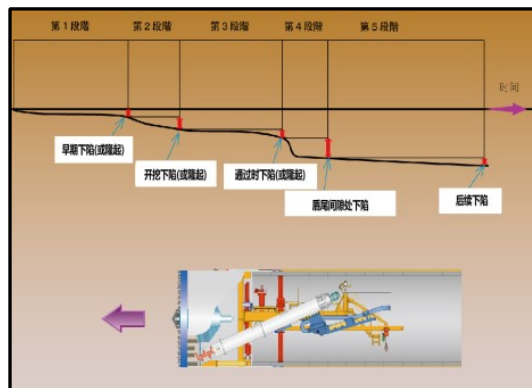
为了便于生产，采用干拌浆料时，现场加水拌制厚浆时在满足运输的条件下稠度控制在160-200mm的扩展度。运至搅拌罐后，将石灰按照确定的比例投放并进行二次搅拌，二次搅拌稠度控制扩展度在100~120mm。浆液质量要达到易于压送、不离析、不沉淀、无结块不堵管。

材料及配合比如下：

水：石灰：粉煤灰：砂：膨润土=32：7：38：87：7

通过注浆泵注通过盾体径向孔处，填充盾体与土体

之间间隙，快速对土体形成有效支撑，从而有效控制第三阶段沉降，辅助第四阶段沉降控制。



施工中沉降阶段图

（四）主要施工措施

1. 刀具更换

本区间下穿16号线，重叠区域394米，盾构施工穿越距离长，且下穿范围的地质条件存在上软下硬，微风化灰岩岩强度值80-120mpa，刀具磨损问题比较严重，施工难度极高，风险极大。为确保盾构顺利安全下穿16号线，过程中进行带压开仓检查更换刀具并清处泥饼。

针对不同地层带压开仓，选择不同形式的保压措施。对于砂岩、黏土等地层，可以采用通过土仓注入，分级往周边渗透的方式注入膨润土，该方式具有渗透效果好；相对经济；泵送效果好；盾体周围润滑，复推后参数较好等优点。但是对膨润土及质量施工过程把控要求高，如分级加压、膨润土制拌质量控制、剪切泵等且需提前膨化，耗时较长。而对于上软下硬、全断面硬岩采用厚浆，通过盾尾径向土仓的方式注入，该方法具有密闭性、止水性好，在盾体周围形成有效支撑且制拌简单，即拌即用。同样该填仓方式泵送困难、需安装挤压泵、复推后推力较大，有卡盾风险并且填仓方量大，经济性差。

2. 地表跟踪注浆、地铁隧道内注浆及管廊隧道内二次注浆

在盾构掘进施工时，对地表进行监测，若地表沉降速率或累计沉降量超限预警，则在地表实施跟踪注浆。注浆孔按沿隧道方向间距6米，梅花形布置2排，排间距2米，深度至大龙区间左线拱顶上方3米位置，注浆压力不超过0.5Mpa。

地铁16号线大龙区间左线隧道利用管片上预留二次注浆孔对左线管片壁后松散土体进行注浆加固。采用两台WSS注浆机同时对同一环管片的5点位和7点位进行充填注浆，本项目管片采用错缝拼装，对管片进行跳环注浆，注浆压力0.4~0.5Mpa。

对在建隧道内部进行二次补浆，在两线重叠段对管廊隧道顶部进行钢花管注浆已达到对既有线底部的加固效果。管廊隧道侧穿大龙区间左线，此段范围内采取在距离地铁隧道较近一端的1点或2点位管片注浆孔打设钢花管方式注入水泥-水玻璃双液浆；管廊隧道与16号线大龙区间隧道重叠段，采取在管廊隧道1点或2点、10点

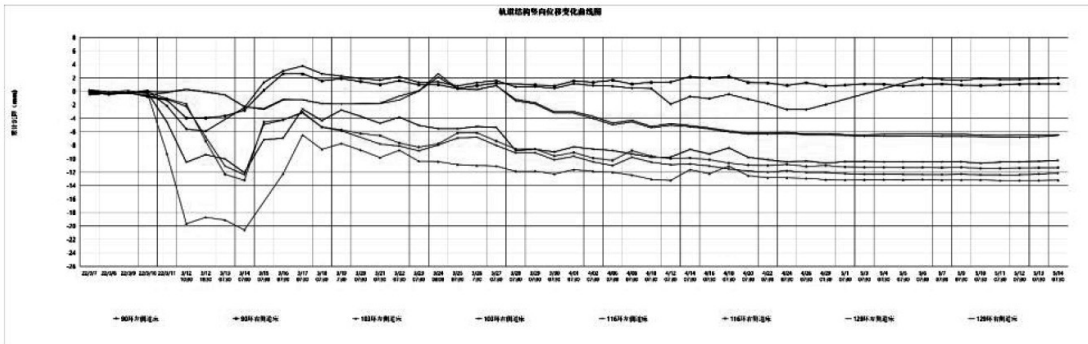
或11点位管片孔打设钢花管方式注入水泥-水玻璃双液浆，注浆压力不超过0.5Mpa。

3. 信息化管理

第三方监测单位和施工单位均在隧道内布置自动化监测设备，自动化监测断面间距由原设计的20m加密至5m。每小时第三方监测和施工单位交替发布监测结

果，信息化施工。参见各方设专人第一时间分析监测数据，辨析原因，制定可行方案，采取如调整掘进模式、掘进参数、土仓压力、注浆参数、注浆时机等有效措施。

根据监测，对已发成沉降段采取针对性的二次注浆，可适当缓抬沉降区。



4. 土压力

通过采集正式下穿前100米的试掘进的施工参数，取得各种数据，结合监测等资料进行分析，获得盾构施工过程在控制地面沉降、纠正轴线偏差等方面的特性。在正式推进时随即有线变形情况和渣土状态，动态调整土仓压力、推进速度、总推力出土量、刀盘转速和扭矩、注浆压力和注浆量等六个参数，其中土仓压力是主要的管理指标。

盾构施工是遵循“连续掘进、顺利通过”的原则，连续平稳的通过重叠段。通过气压辅助的方式控制土仓压力，掘进过程中确保掌子面稳定，仓位控制在2/3左右。根据试掘进施工经验，在盾构机通过后，由于砂浆的固结收缩会造成一定沉降。为有效的控制结构沉降，以主动土压模式掘进使结构产生2-3mm的预隆起来弥补后期的沉降。

利用保压系统，使土仓压力保持均匀性，使土压波动控制在0.1bar以内，防止忽高忽低，确保掌子面的稳定，要求盾构操作人员能精准控制掘进速度，螺旋转速，刀盘转速之间的关系。

5. 渣土改良及渣土管理

刀盘面板、螺旋机和土仓中加入的膨润土、分散剂以及水和切削下来的渣土进行搅拌，使渣土具有好的流塑性、合适的稠度、较低的透水性和较小的摩阻力等特点。保证不同掘进模式下都有理想的出渣效果。

(1) 泡沫剂使用：泡沫混合液的注入量为每环约7-8m³、泡沫的发泡率控制在7-10倍、原液配比2-3%。

(2) 膨润土使用：满仓掘进时膨润土有降低渣土高度、减小刀盘扭矩等作用，现场需配备膨化完成的膨润土。

(3) 水的使用：满仓掘进过程中刀盘中心冲洗必须常开，防止刀盘中心结泥饼，每环用量根据渣土现状增减。

主要是通过有效控制出渣量，通过对掘进速度与出渣量的动态控制，来保证土仓压力的稳定，严格控制出渣量，每环出土量偏差不超过1m³。

每环理论开挖量： $\pi/4 \times D^2 \times L \times K = 3.14 \times 8.84 \times 8.84 \times 1.5 / 4 \times 1.3 = 120\text{m}^3$

其中：本项目，盾构外径D取8.84m、管片宽度L取1.5m、渣土松散系数K取1.3。

出土量按照120m³/环控制。出土量根据掘进进尺控制，每进尺100mm进行一次估计（理论出土量8m³），每斗掘进进尺300mm（理论出土量24m³），结合门式起重机称重系统对同一地质情况出渣重量进行对比。

结束语

经过持续的对16号隧道道床结构进行监测，目前盾构已通过段道床监测数据正常波动，总体均平稳，道床结构稳定可靠。该变形量在允许变形控制值范围内，能够保证既有地铁安全运营。本项目的技术和研究，总结出一套适用于长距离下穿既有有线盾构施工技术成果，从HSP地质超前预报、超前注浆及补注浆、厚浆在施工中的应用，施工措施控制四方面重点分析了盾构技术应用中的控制要点，可以为长距离下穿既有线的盾构法施工提供经验借鉴。

参考文献

[1] 中铁第六勘察设计院集团有限公司. 东大桥站主体结构下穿既有地铁6号线区间工程专项设计[Z]. 北京: 2018.

[2] 王斌. 区间隧道下穿既有地铁车站的设计方案研究及施工技术分析[J]. 工程建设与设计, 2017(11): 99-101, 104.

[3] 张小伟, 张丽, 韩亚飞, 等. 大断面平顶地铁暗挖车站下穿既有建筑方案研究及变形控制: 以北京地铁8号线三期前门站工程为例[J]. 隧道建设, 2021, 41(6): 979-987.

[4] 李悦, 张启瑞, 谭建兵, 等. 管幕+CRD法隧道并行下穿对地表变形的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2023(2): 214-220.

[5] 陶连金, 张倍, 刘新建. 管幕法下穿既有地铁隧道微变形控制技术[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2018(5): 86-94.