

上软下硬地层盾构近距离下穿机场线施工安全技术研究

刘建华

中国水利水电第四工程局有限公司

摘要：盾构小净距下穿既有地铁线对结构变形及沉降影响较大，尤其是在上软下硬等复杂地层掘进时，如何确保盾构安全掘进及有效控制对既有线的影响成为施工的关键。本文以华中某地铁区间盾构施工为例进行分析，通过试验段总结掘进参数、分阶段细化掘进参数、克泥效填充支护盾壳外部间隙、自动化实时动态监控、新型泡沫剂改良渣土、止水环封闭穿越段两端及动态优化注浆充填等措施有效控制既有地铁2号线沉降值控制在-1mm内，为今后类似盾构机穿越既有线施工积累经验。

关键词：上软下硬；盾构；施工安全

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.19.051

一、引言

随着我国各大城市轨道交通建设迅速发展，盾构施工不可避免出现双线甚至多线隧道下穿既有隧道或其他建（构）筑物等复杂工程情况。在上软下硬地层中的盾构施工隧道极易对上方既有线路受力和变形产生影响，也会造成周围土体的二次扰动，如何选取合理的盾构施工参数将隆起、沉降值精细化管理确保既有线路的正常运营安全，成为盾构施工研究的重点。近年来，就盾构隧道穿越施工引起的周围土体扰动问题，提出了盾构法施工中相应的施工控制措施。如何保证近距离叠交施工的安全稳定并减少对既有隧道的扰动影响，对城市地下轨道交通的开发利用具有重要的实践指导意义。

二、工程概况

（一）区间概况

某地铁区间右线全长2232.152m，左线全长2225.972m；区间线间距为10.64~16.69m，线路平面最

小曲线半径为500m，区间线路最大纵坡25%，结构覆土11.81m~26.54m。既有地铁线为已经通车运营的线路，盾构隧道从某大道下方穿过，该盾构区间与既有线接近90°垂直交叉下穿，下穿位置的既有线隧道直径6m，埋深9.92m，处于黏性土夹碎石中；新建隧道线直径6.2m，埋深18.62m，处于黏性土夹碎石和中风化白云岩地层中，两隧道最小净距约2.7m。

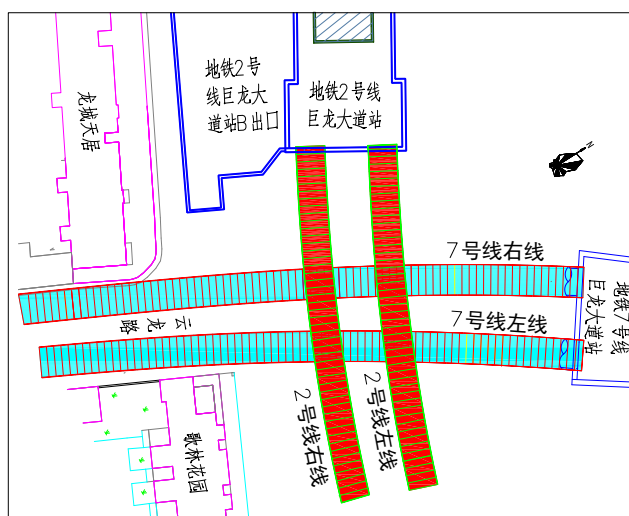


图1 盾构区间下穿既有线平面位置关系示意图

（二）工程地质及水文地质

下穿范围地质情况：上部主要是10-4黏性土夹碎石地层，该地层中存在孤石，孤石直径约30cm左右，强度约为80MPa，下部主要是中风化白云岩，为典型上软下硬地层。

表1 穿越地层基本物理力学参数表

层号	岩土名称	状态	天然重度 (kN/m ³)	饱和单轴抗压强度 (kPa)	黏聚力 (kPa)	摩擦角 (°)	隧道围岩分级	土石等级	土石类别
10-4	黏性土夹碎石	可塑	19.5	—	37	13	V	III	硬土
18a-2	中风化白云岩	破碎	26.5	R _c =74.2Mpa	等效内摩擦角 48°~50°		III	V	次坚石

区间地下水按赋存条件分为上层滞水、岩溶裂隙水两类，上层滞水水位埋深0.50~2.50m。

三、设备选型及刀具配置

针对盾构下穿区域为“上软下硬”地层，对刀具的破岩能力要求较高，因此在下穿前进行一次开仓换刀施工，将原配置的重型镶齿滚刀全部更换为光面滚刀，使盾构机更适应该地层的施工。

四、施工技术及控制措施

（一）分阶段组织施工措施

根据在建隧道与既有隧道的位置关系，将整个下穿区段分为五个施工阶段，通过加强控制盾构掘进参数、渣土改良、盾构纠偏、克泥效注入、同步注浆、二次注浆及改善盾尾密封性能等措施保证盾构机连续通过，其五个阶段如图2所示：

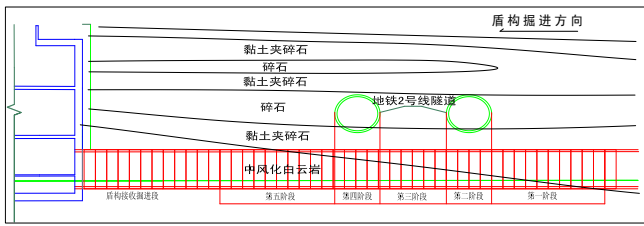


图2 下穿2号线掘进施工分阶段示意图

(1) 第一阶段：下穿既有右线前10环掘进

该阶段主要控制土仓压力及压力的波动性，减少地层扰动。掘进过程中向土仓内注入泡沫剂、膨润土等提高渣土的流动性和止水性，加强地层气密性，使土仓压力稳定在设定值。

(2) 第二阶段：下穿既有右线隧道时掘进

该阶段主要控制出土量、渣土改良及克泥效注浆参数，充填盾壳与地层间隙。根据监测数据，调整土仓内的气体保压压力值，若气体保压效果不佳，采用注入优质泡沫改良并满仓掘进。该阶段进入上软下硬地层，但岩土交界面岩石风化程度高，岩层界线位于隧道中下部，地层强度差异较小，盾构机姿态抬头趋势不明显，此时克泥效同时通过上下两个点位进行注入。

(3) 第三阶段：下穿既有右线后、左线前掘进

该阶段主要控制土仓压力及克泥效注浆及同步注浆参数，充填盾壳与地层间隙及管片壁后间隙。根据监测数据，通过盾壳上的径向注浆孔调整克泥效的注浆压力和注浆量，正常掘进时克泥效注浆压力为3~3.5bar，注浆量为为地层与盾壳间隙计算理论方量，在预警时提升注浆压力为3.5~4bar，增大克泥效注入量为理论方量的1.1~1.2倍。

该阶段盾尾通过既有右线，若发生沉降预警后在管片脱出盾尾后通过提高同步注浆压力及注浆量。同时在既有右线隧道前两环施做止水环，防止形成地下通道，导致浆液流失。

(4) 第四阶段：下穿既有左线隧道时掘进

该阶段主要控制出土量及渣土改良，克泥效注浆参数以及既有右线的同步补浆。

该阶段既有右线隧道下方的同步浆液已固结收缩，在脱出盾尾3环处在管片顶部开孔进行同步补浆，充填地层间隙。上软下硬地层的岩层界线位于隧道中上部，下部为强度较高的中风化白云岩，上部为黏性土夹碎石地层，地层强度差异大，盾构机出现明显姿态抬头趋势，此时克泥效仅通过顶部径向孔进行注入，控制盾构机抬头趋势。

(5) 第五阶段：下穿既有左线隧道后10环掘进

该阶段主要控制克泥效注浆参数，拖出盾尾3环后的补充注浆、二次注浆及止水环。根据隧道内实时监测数据，通过管片上预留的注浆孔进行双液注浆，注浆参数根据监测反馈数据调整。

(二) 渣土改良控制措施

(1) 黏性土夹碎石地层渣土改良

采用分散型泡沫剂加水进行渣土改良，遇到呈现较大的粘聚力的黏土时，可适当加入分散剂进行改良。压缩空气与泡沫溶液配比为：90~95%压缩空气和5~10%泡沫溶液；泡沫溶液的配比为：泡沫原液3%、水97%的比例进行配制。

(2) 上软下硬地层渣土改良

通过每环渣土取样进行分析，当地层中中风化白云岩占比较低时，仍采用泡沫剂加水进行改良；当中风化白云岩地层超过地层含量的50%时采用泡沫加膨润土进行改良，膨润土粘度控制在40~50s范围内，每环注入量根据中风化白云岩含量占比进行调整。

(三) 克泥效注浆控制措施

(1) 根据地层情况及线路走向选择不同的克泥效注入点位，通过调整注入点位及注入压力调整盾构机姿态及趋势，当在上软下硬地层中掘进时，地层强度差异大，盾构机抬头趋势明显，在顶部径向孔注入克泥效可有效控制盾构机抬头趋势。当地层强度较为均一时，在盾构机顶部和底部径向孔同时注入克泥效，防止出现栽头现象；

(2) 由盾构机前盾的径向孔向盾构机的盾体外注入克泥效，提前将前盾所有径向孔疏通并安装注浆管路及接头；

(3) 在下穿前15环，开始注入克泥效，下穿2号线结束后，克泥效继续注入10环；

(4) 每环克泥效注入量根据盾构机盾壳直径与开挖直径间隙计算，管道压力为0.6~0.8MPa，出口压力为0.3~0.4MPa，注入时以压力控制为主，同时根据自动化监测数据实时调整克泥效注入参数。

(四) 注浆充填控制措施

(1) 同步注浆

1) 采用初凝时间短，固结强度大的同步浆液，初凝时间控制在6~8小时，固结强度满足1天>0.1MPa，7天>0.5MPa。

2) 同步注浆量经验计算公式： $Q=q\lambda$ ，其中q—充填理论体积， λ —注浆系数。

3) 注浆压力主要取决于地层阻力，同时与浆液特性、土仓压力、设备性能、管片强度相关，施工中注浆压力为0.2~0.3MPa。

(2) 同步补浆

在已拼装管片顶部位置提前开孔并安装注浆头，通过分析自动化监测数据变化情况，若出现数据异常后正在管片脱出盾尾3环后通过同步注浆管路进行同步补液，将管片顶部充填密实。

(3) 二次注浆

盾构穿越期间在脱出盾尾8环处隧道上方管片补充压注浆液方法，采用单液注浆加固，水灰比为1:1，注浆时注浆压力控制在3~4bar，采用水泥浆+水玻璃双液浆封口，水泥浆液的水灰比为1:1，水玻璃波美度为40（水玻璃与水体积比1:1稀释），水泥浆与水玻璃体积比为2:1，注浆压力控制在4bar以内。

(4) 止水环施做

在穿越既有有线前2环、穿越完成后2环和穿越既有2号线两隧道中间处分别施做一道止水环，采用水泥浆+水玻璃双液浆进行全环注浆，水泥浆液的水灰比为1:1，水玻璃波美度为40（水玻璃与水体积比1:1稀释），水泥浆与水玻璃体积比为2:1，注浆压力控制在4bar以内。可有效隔绝后方来水及防止同步浆液沿管片壁后间隙窜入地层中，确保同步注浆及同步补浆的浆液质量与填充效果。

(五) 自动化监测控制措施

在既有有线左、右线内分别布设8个监测点，隧道断面内监测点布设在轨道两侧道床上，自动化监测设备位于既有有线结构腰部处；在左、右线下穿期间分别对两隧道相交处监测点进行加密监测，监测频率为2min/次，每1小时对后视点进行测量矫正一次；根据盾构机与监测点的位置关系分析判断沉降数据变化的原因，分别采取土仓保压、克泥效注入、同步注浆、二次注浆等措施控制沉降值。

五、既有有线结构沉降分析

(一) 盾构掘进对既有有线沉降影响分析

根据下穿期间实时自动化监测数据对各施工阶段对应的既有有线结构沉降值进行分析，选取区间右线JY-4.02和JY-4.03这两个位于同一段面监测点数据为例，分别对刀盘通过前、刀盘通过时、盾壳通过时及盾壳通过后这四个时段沉降值变化进行统计：

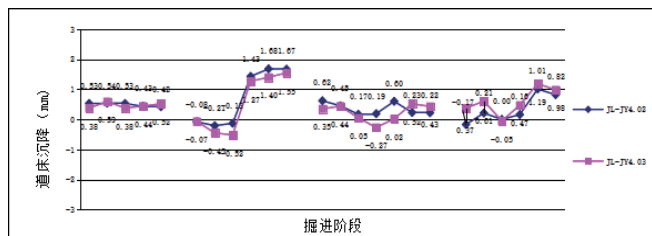


图4 盾构下穿既有有线结构沉降变化趋势示意图

(1) 刀盘通过前：根据地层埋深计算并设定合理土压，在刀盘通过监测点前时，维持土仓压力使地层处于微隆起状态，该阶段沉降数据表现为隆起0.5mm左右。

(2) 刀盘通过时：由于刀盘对地层的扰动造成掌子面及刀盘上方土体的松动，当地层由微隆起变化为沉降时立即增大土仓压力直至监测数据显示为微隆起状态。

(3) 盾构通过时：克泥效注入孔设在前盾径向孔，确保整个盾壳通过时克泥效能有效充填地层与盾壳间隙，根据监测数据调整克泥效注浆压力，使沉降值维持在0mm左右。

(4) 盾壳通过后：此时管片与地层之间形成一道空腔，地层失去支撑力后开始发生沉降，立即进行同步注浆充填管片与地层间隙并达到设定注浆压力，使该阶段沉降数据维持稳定。

(二) 注浆充填对既有有线沉降影响分析

通过自动化监测数据分析同步注浆、同步补浆及二次注浆对既有有线结构工后沉降变化趋势的影响：

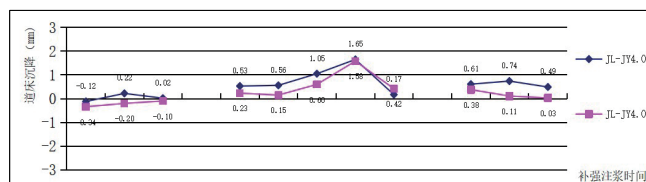


图5 注浆对既有有线结构沉降变化趋势示意图

(1) 同步注浆：地层在失去盾壳支撑后出现最大沉降量，通过同步注浆迅速充填管片壁后间隙，使沉降趋势得到控制。

(2) 同步补浆：由于同步注浆初凝使浆液开始固结收缩，与地层之间再次产生间隙，利用管片拼装间隙在管片顶部开孔注浆，此时注浆压力略大于同步注浆，且浆液迅速在管片顶部汇集，使地层出现隆起状态，待停止补浆后沉降值趋于稳定。

(3) 二次注浆：管片壁后浆液终凝后，地层已得到有效支撑，此时自动化监测数据已趋于稳定状态，通过二次注浆封闭地下通道确保后续掘进过程中同步注浆效果。

结论

针对新建地铁盾构隧道近距离穿越既有地铁隧道存在的风险，通过实时自动化监测方法，通过分析既有地铁隧道结构与上方地表的实测位移变化情况，得出以下针对盾构近距离下穿既有地铁隧道的沉降控制的结论：

(1) 适当增大推进土压，加强土体改良效果，并适当提升推进速度，尽量保持连续均匀的推进，可减少对土层的扰动，提高沉降控制效果。

(2) 在上下隧道结构之间净距较小，在穿越段设置前盾注入克泥效对既有线的沉降控制起到了十分积极的作用。

(3) 盾构隧道施工引起上方既有线路沉降主要是由于盾尾脱出后，盾壳支承的围岩朝着盾尾空隙变形而产生的应力释放，该部分沉降的大小主要受壁后注浆材料、注浆时间、注浆压力及注浆量等影响。因此，在下穿既有线路期间，应保证同步注浆及二次注浆的及时跟进，注意注浆压力的有效控制。

(4) 充分利用监测反馈数据，根据监测结果及时对施工方案进行调整，有助于对既有隧道结构及地表沉降的控制。

参考文献

[1] 肖铁贤. 盾构穿越上软下硬地层施工关键技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2012, (20).
 [2] 吕向红, 杨冬梅, 郑青. 全断面卵石地层盾构近距离下穿地铁区间隧道施工技术[J]. 现代隧道技术, 2013, (5).