

复杂环境超浅埋大直径 TBM 始发 施工技术研究

姚毅^{1,2}, 李小勇^{1,2*}, 温元平^{1,2}, 王博^{1,2}

(1. 中电建铁路建设投资集团有限公司, 北京 100070; 2. 中电建铁路建设投资集团重庆有限公司, 重庆 401100)

摘要: 目前国内城市隧道尤其是 3 km 以上的大断面隧道施工中, TBM (全断面硬岩隧道掘进机) 掘进法已经得到广泛应用, 而随着城市轨道交通和城镇化的不断发展, TBM 始发场地越来越受制约, 因此 TBM 在浅埋地层条件下始发会越来越频繁。根据国内外盾构施工经验, 大直径 TBM 始发端的隧道覆土埋深通常设计为 3/5~4/5 倍隧道直径, 并采用水下始发、增加洞门长度等措施以规避 TBM 始发期间的施工风险, 目前国内针对周边复杂环境条件下、始发埋深小于 0.5 倍隧道直径的大直径 TBM 始发案例较少。本文以重庆市轨道交通 27 号线西永站—磁器口区间小里程 TBM 区间为背景, 介绍了大直径 TBM 在周边复杂环境下超浅埋始发的施工技术; 通过对地表深层注浆、超前大管棚、超浅埋段反压回填等端头加固技术研究, 并结合大纵坡控制、始发过程中姿态控制技术和信息化监测研究, 得出超大直径 TBM 在覆土深度均小于 0.5 倍隧道洞径工况下顺利始发的技术参数及加固手段, 对同类型工况条件下的 TBM 始发具有一定借鉴意义。

关键词: 超浅埋; 复杂周边环境; 大直径 TBM; 始发控制; 信息化

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)02-0193-08

Construction technology for ultra shallow buried large diameter TBM starting drilling in complex environments

YAO Yi^{1,2}, LI Xiao-yong^{1,2*}, WEN Yuan-ping^{1,2}, WANG Bo^{1,2}

(1. Power China Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. Power China Railway Construction Investment Group Chongqing Co., Ltd., Chongqing 401100, China)

Abstract: At present, TBM (Full Face Hard Rock Tunnel Boring Machine) has been widely used in the construction of urban tunnels, particularly for tunneling distance exceeding 3 km in China. However, with the continuous development of urban rail transit and urbanization, the starting site of TBM is becoming more and more restricted. Consequently, starting drilling under shallow burial conditions is becoming more frequent. Based on domestic and international shield tunneling experiences, the burial depth of the tunnel cover at the start of large-diameter TBM is usually designed to be 3/5-4/5 times of the tunnel diameter. Measures such as underwater starting and increasing the tunnel portal length are implemented to mitigate construction risks during the TBM starting drilling phase. However, currently there are relatively few cases of large-diameter TBM starting drilling in China under complex surrounding environmental conditions with an initial burial depth less than 0.5 times the tunnel diameter. This article took the small-mileage TBM section from Xiyong Station to Ciqikou on Chongqing Metro Line 27 as the background, and presented the construction technology for large-diameter TBM starting drilling from ultra-shallow burial in complex environments. Reinforcement technologies including deep surface grouting, advanced large pipe sheds, and ultra-shallow buried section backpressure backfilling, along with implementing extensive longitudinal slope control and attitude control technology during the initiation process, and information monitoring were investigated. The technical parameters and reinforcement methods necessary for the starting of ultra-large diameter TBM was presented, which can provide particular reference significance for TBM starting drilling under similar operational conditions.

收稿日期: 2023-09-10

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项面上项目 (CSTB2022TIAD-GPX0046)。

作者简介: 姚毅 (1982—), 男, 四川南充人, 本科, 主要从事轨道交通、桥梁隧道工程方面的研究。E-mail: 224151019@qq.com。

*通信作者: 李小勇 (1990—), 男, 山西宁武人, 硕士研究生, 主要从事轨道交通、桥梁隧道工程方面的研究。E-mail: 910627464@qq.com。

Key words: ultra-shallow burial; complex surrounding environment; large-diameter TBM; initiation control; informatization

0 引言

TBM 全断面岩石掘进机是目前最先进的隧道掘进设备, 和传统钻爆法相比, 具有安全环保、经济、节约工期等优点。其中最显著的特点是节约工期, TBM 一般会比传统钻爆法节约工期 70%。

目前国内外大断面隧道施工中, 尤其是 3 km 以上的长距离大断面隧道掘进, TBM 已经得到广泛应用。在城市复杂环境下, 新建隧道多处于穿越既有道路、管线、建(构)筑物等地段, 考虑到爆破施工对地表居民、建(构)筑物的影响, 为确保隧道周边环境安全和社会稳定, TBM 施工应用越来越广泛^[1-3]。TBM 工法主要分为始发、掘进和到达接收, 而随着城市轨道交通和城镇化的不断发展, 始发场地越来越受制约, 因此浅埋地层始发逐渐会越来越频繁, 根据国内外盾构施工经验^[4-10], 在大直径盾构或者 TBM 隧道工程中通常将始发和接收段的隧道覆土埋深设计为 3/5~4/5 倍隧道直径, 并采用水下始发接收、增加洞门长度等措施以规避盾构或者 TBM 始发和接收期间的施工风险, 但是目前国内针对周边复杂环境条件、始发埋深小于 0.5 倍隧道直径的大直径 TBM 始发案例成功经验较少。

重庆市轨道交通 27 号线西永站—磁器口站区间小里程 TBM 区间从明挖段始发正穿成渝环线高速西永互通立交的匝道和路基后, 向西北方向偏转, 继续沿西永大道向西北方向敷设, 先后下穿襄渝铁路及梁滩河后沿西永大道下方向东敷设先后侧穿青英公寓、侧穿西永大桥达到西永站。

西永站—磁器口站区间小里程 TBM 区间始发段属于超浅埋隧道, 左线埋深为 4.2 m, 右线埋深为 3.3 m。通过明挖端头井进行始发, 始发端紧靠成渝环线高速西永互通立交、无名河流、厚成线, 始发段竖向位于 3.5% 大下坡段, 长度约为 1 260 m, 而 TBM 隧道外径为 8.5 m, 受到上述因素的影响, 本工程盾构始发段覆土为 4.2 m, 形成了超浅埋大直

径 TBM 复杂周边环境始发工况。

1 工程地质概况

西永站—磁器口站区间小里程段 TBM 区间(西永站—小里程段明挖 TBM 区间), 起点里程 YDK13+128.291, 终点里程 YDK15+219.000, 全长 2 090.709 m。线路始于西永大道和西城大道交叉口的西永站, 线路沿西永大道下方向东敷设, 西永大道两侧房屋林立, 交通繁忙, 左右双线隧道侧穿西永大桥、正穿上下行兴路线及梁滩河后, 继续沿西永大道向西南方向敷设, 在靠近西永互通立交时, 线路向东北方向偏转, 正穿西永互通立交路基, 后进入中梁山西侧明挖段。本 TBM 段为两条平行的单洞单线圆形隧道, 右线长度 2 090 m, 平面曲线半径最小为 1 100 m。左线隧道长度 2 102 m, 平面曲线半径最小为 1 100 m。区间纵断面按照“V”字形坡设计, 最小平面曲线半径为 1 100 m, 最大坡度 3.5%, 小里程段 TBM 区间包含 1~3 号共 3 座联络通道。

本段位于中梁山以西丘陵区, 地貌属侵蚀剥蚀型浅丘地貌, 地面高程 275~302 m, 地形地貌变化较大, 坡角一般为 5°~35°, 相对高差最大达到 15 m, 局部地势较陡。挡墙、边坡等人工地貌坡角可达 50°~90°。地表大面积分布人工填土及残坡积层, 厚度差异较大, 其中回填土下伏基岩为侏罗系中统沙溪庙组地层, 岩性以泥质岩类为主, 约占 80%, 粉砂岩、砂岩占 20%, 节理裂隙较发育—不发育, 层理发育, 层间结合差。水文地质条件简单, 地下水类型为红层裂隙水, 地下水整体较贫乏, 松散层及河岸地段赋存少量地下水。中风化岩层为微—弱透水岩体, 储存有孔隙裂隙水, 主要赋存于基岩裂隙及薄层砂岩孔隙中, 具体土层和岩层的物理力学参数详见表 1~2。

西磁小里程 TBM 区间平面示意图如图 1 所示。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层	重度/(kN/m ³)	地基承载力特征值/MPa	压缩模量/MPa	c'/kPa	φ'/(°)
素填土(既有道路填土)	21.0	180	18	6	28
素填土(松散填土)	20.5	—	10	5	24
杂填土(松散)	21.0	—	8	0	24

表 2 岩层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rocks

土层	重度/(kN/m ³)	单轴饱和极限抗压强度/MPa	压缩模量/MPa	c'/kPa	φ'/(°)
泥岩 (Ms)	25.5	7.31	1 629	588	32.2
砂岩 (Ss)	24.9	26.05	6 268	1 554	35.8



图 1 西磁小里程 TBM 区间平面示意图

Fig. 1 Plan of Xi Ci small-mileage TBM section

2 始发方案的确定

本 TBM 段为两条平行的单洞单线圆形隧道, 内径 7.7 m, 外径 8.5 m, 盾构刀盘开挖直径为 8.8 m, 隧道管片每环由 7 块组成, 错缝拼装。

2.1 始发条件

本 TBM 从西永站—磁器口站区间小里程明挖段进行始发进洞, 共 180 m。始发端左线埋深为 4.2 m, 右线埋深为 3.3 m。进洞后 140 m 处有较深的冲沟, TBM 隧道顶部埋深不足 3 m, 并有出露风险。覆土厚度最深约 14 m, 位于成渝高速公路西永立交正下方。TBM 隧道浅埋覆土段所处地层主要有回填土、泥岩及部分断层, 且覆土深度均小于 0.5 倍隧道洞径。地面沿线始发暨下穿成渝高速公路西永立交, 交通状况复杂, 过往行车较多, TBM 掘进过程中非常有可能出现地面塌陷、沉降等风险, 从而造成成渝高速交通瘫痪、周边的建(构)筑物发生破坏等现象。

2.2 浅覆土控制技术

TBM 全断面岩石掘进机在覆土埋深较浅始发掘进施工时, 容易出现掌子面土压力不稳定, 从而导致掌子面塌方、地面塌陷等现象, 所以始发阶段必须对始发范围内覆土做好加固控制。

根据地勘报告和设计文件, 西永站—磁器口站区间小里程 TBM 区间始发范围内上部地质为回填

土, 中下部地质为泥岩土。

始发端隧道顶上覆土深度仅为 3.3 m, 且覆土为素填土。为了保证 TBM 始发的顺利进行, 在工程始发端范围内采用地表深层注浆和超前大管棚进行土体加固, 见图 2~3。

单位: mm

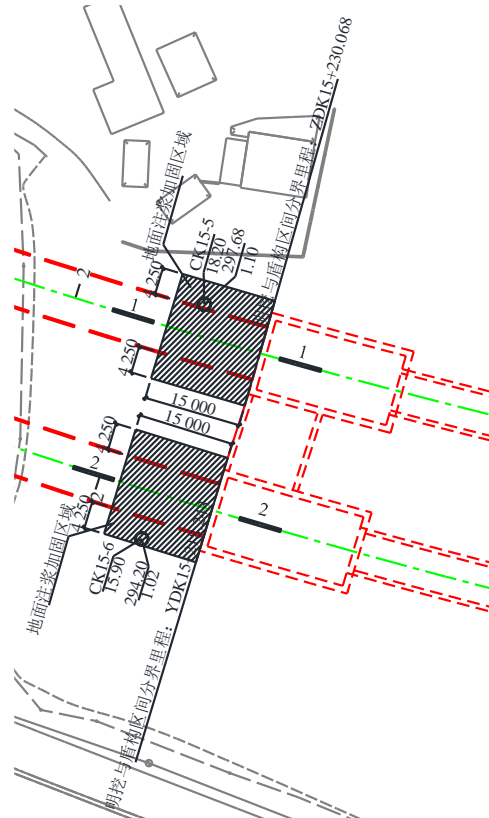
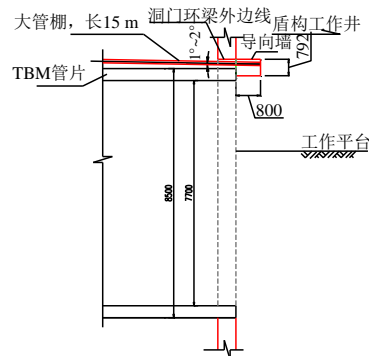


图 2 端头加固平面示意图

Fig. 2 Plan of the end reinforcement

单位: mm



管棚横断面图(示意)

适用于左线, 不适用右线

图 3 加固横断面管棚示意图

Fig. 3 Pipe shed of the reinforced cross-section

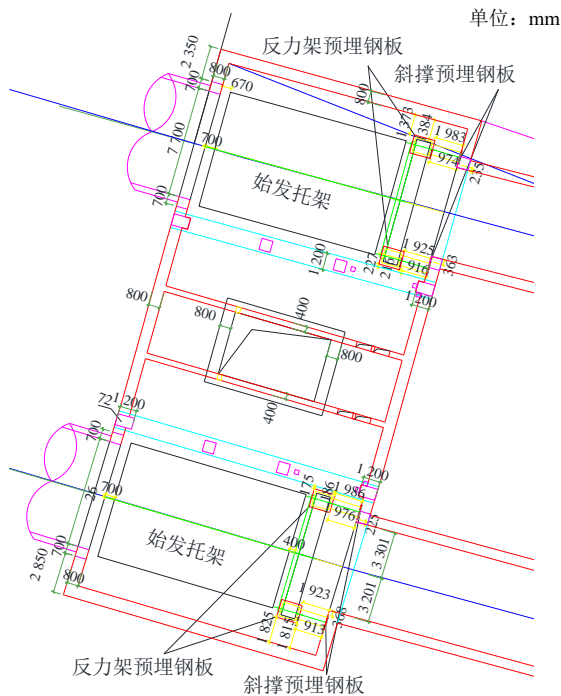


图 5 TBM 始发水平向示意图

Fig. 5 Diagram of TBM in horizontal direction during the initiation process

为防止 TBM 始发过程中初始线路与设计线路发生较大偏差, 发生区间侵限和盾尾间隙变小, 从而造成区间局部管片受力破坏, 引起周边围岩整体性破坏和地表沉降, 因此 TBM 始发过程中采用抬头始发施工, 防止机头脱离始发台时栽头, 始发采用抬头始发施工, 并且在 TBM 施工中采取有效措施控制掘进方向, 及时有效纠正掘进偏差。

3.1 TBM 始发姿态控制

掘进中对线路中线平面位置和高程的控制十分重要, 确保 TBM 沿着设计线路掘进是 TBM 区间施工的重要目标, 因此一般线路中线平面位置和高程允许偏差控制在 5 cm 以内。

(1) 始发中采用自动化导向系统并辅助人工测量实时对 TBM 姿态进行监测, 该系统采用信息化手段确保可以在信息化控制室 24 h 实时监控 TBM 位置和设计轴线的实时偏差及趋势, 根据结果及时调整 TBM 掘进姿态和方向, 确保掘进线路满足设计和规范要求。

随着 TBM 始发掘进, 为了确保监测的精确性, 必须通过人工及时前移测量的基准点, 为确保基准点的精确度和可靠度, 每天安排专业测量人员进行测量, 以实时校核自动化导向系统中显示的 TBM 的姿态、平面位置和高程。

针对始发端下穿线路, TBM 掘进前先根据线路中心线和始发条件设计拟合控制系统和 TBM 掘进姿态, 掘进过程中采用分区操控推力和主动铰接行

程差控制 TBM 掘进姿态, 并实时结合围岩情况调整具体数字大小。具体操作原则如下:

a) 针对出现 TBM 滚角过大情况, 通过反转刀盘来减小滚角值;

b) 针对出现 TBM 水平向右偏的情况, 则减小左侧铰接的行程、提高右侧主动铰接的行程或者提高右侧分区的千斤顶压力。反之, 则减小右侧铰接的行程、提高左侧主动铰接的行程或者提高左侧分区的千斤顶压力。针对盾构机竖直下偏的情况, 则减小上部铰接的行程、提高下部主动铰接的行程或者提高下部千斤顶压力, 反之亦然。

(2) TBM 始发过程中竖直姿态控制

a) TBM 掘进过程中竖向偏差控制范围允许在 -3 cm 以内, 倾角一般可控制在 $\pm 0.5\text{ cm/m}$ 以内, 特殊情况不超过 $\pm 1\text{ cm/m}$, 防止 TBM 掘进时转弯半径过小造成盾尾间隙过小和管片局部受力不均发生破裂和错台等现象。

b) 针对始发端围岩上部为回填土、下部为砂岩的情况, TBM 始发掘进采用低头防止 TBM 机头抬头情况出现。

c) TBM 掘进过程中严格控制上下千斤顶的行程差, 杜绝出现相差过大现象, 相差不能超过 $\pm 4\text{ cm}$, 特殊情况最大不超过 $\pm 6\text{ cm}$ 。

(3) TBM 始发过程中水平姿态的控制

a) TBM 在直线段掘进过程中严格控制水平轴线, 不允许超过 $\pm 2\text{ cm}$, 水平偏角不允许超过 $\pm 0.3\text{ cm/m}$, 防止 TBM 掘进时转弯半径过小造成盾尾间隙过小和管片局部受力不均发生破裂和错台等现象。

b) TBM 在圆曲线段掘进过程中严格控制水平偏差, 不允许超过 $\pm 3\text{ cm}$, 水平偏角不允许超过 $\pm 0.3\text{ cm/m}$, 从而严格控制曲线半径。

c) TBM 在圆曲线段掘进过程中碰到围岩软硬不均匀时, 及时降低掘进速度, 调整各区的油缸推力, 并调整主动铰接行程差使得 TBM 掘进线路保持一定的夹角来贴合线路。

(4) TBM 脱离始发台前的姿态控制

TBM 始发前通过始发架来确保始发时方向的直行性, 因此重点关注刀盘旋转和各区油缸的推力。

3.2 TBM 始发掘进过程姿态控制

(1) 针对 TBM 掘进过程中换刀盘转动方向的情况, 放慢切换速度并预留一定的间隔时间, 防止出现管片局部受力不均发生破裂和错台等现象。

(2) TBM 掘进过程中及时研判掌子面围岩情况后调整掘进参数, 并同时设置掘进的偏差范围和限制数据, 若掘进姿态到达预警值, 及时启动纠偏措施。

在纠偏过程中防止出现蛇形纠偏，要微纠偏、勤纠偏，防止过急纠偏从而使蛇形现象更加严重。

蛇行修正及纠偏时缓慢进行，如修正过程过急，蛇行反而更加明显。在直线推进的情况下，选取盾构当前所在位置点与设计线上远方的一点作直线，然后再以这条线为新的基准进行线形管理。在曲线推进的情况下，使盾构当前所在位置点与远方点的连线同设计曲线相切。

(3) 推进油缸油压的调整不宜过快、过大，否则可能造成管片局部破损甚至开裂。

(4) 正确选择管片封顶块的拼装位置，确保拼装质量与精度，以使管片端面尽可能与计划的掘进方向垂直。

(5) 做好施工记录

通过浅覆土控制、大纵坡控制、TBM 始发和过程中姿态的控制技术，TBM 区间左右线始发段横向偏差和竖向偏差最大值均小于 50 mm，均满足设计和规范要求，详见图 6~7。

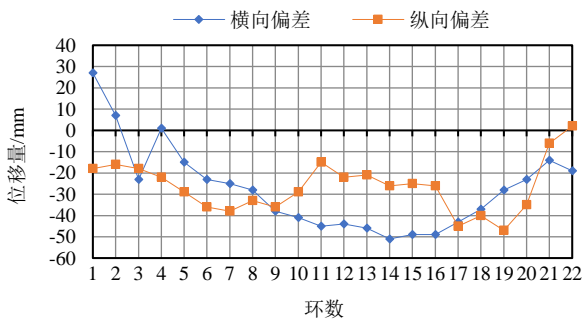


图 6 TBM 始发左线掘进姿态图

Fig. 6 Left line excavation posture of TBM initiation

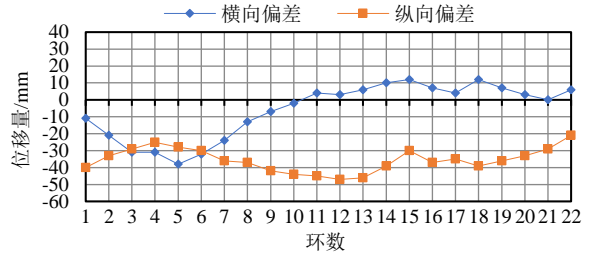


图 7 TBM 始发右线掘进姿态图

Fig. 7 Right line excavation posture of TBM initiation

4 信息化施工

4.1 高程控制网的布设

为取得基准数据，各观测点在施工前随施工进度及时设置，并及时测得初始值，观测次数不少于 3 次，直至稳定后作为动态观测的初始测值。

测量基准点在施工前埋设，经观测确定其已稳定时方才投入使用。稳定标准为间隔一周的 2 次观测值不超过 2 倍观测点精度。基准点不少于 3 个，并设在施工影响范围外。监测期间定期联测以检验其稳定性，并采用有效保护措施，保证其在整个监测期间的正常使用。

4.2 监测点布设

在盾构隧道始发端、接收端分别加密布设 2 个监测断面，且断面监测点数量不少于 7 个，其余区段隧道轴线每 10 m 布设 1 个监测点，每 100 m 布设一横向断面，且监测点数量不少于 7 个，横断面方向测点区域以隧道底板中线 45°向上扩散到地表面，TBM 始发监测布置如图 8 所示。

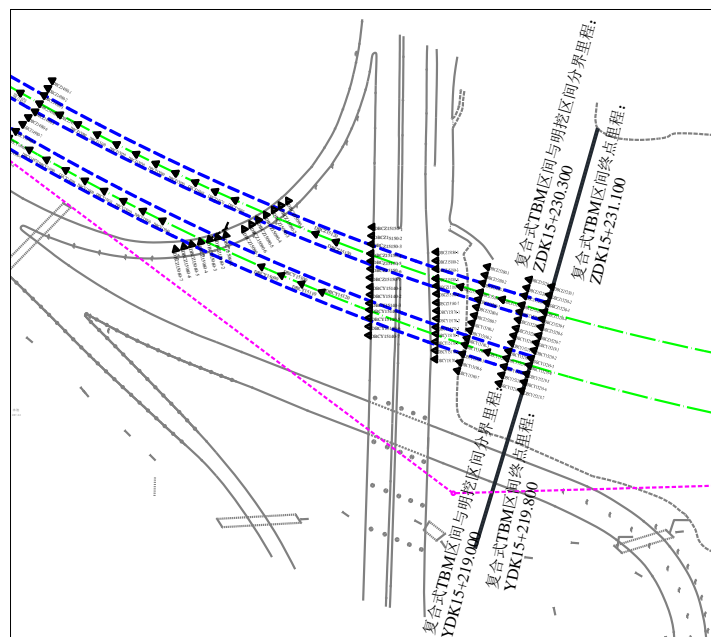


图 8 TBM 始发监测布置示意图

Fig. 8 Monitoring arrangement of TBM initiation

通过信息化监测,发现在始发过程中 TBM 区间的左线地表沉降最大为 15 mm,右线地表沉降最大为 2 mm,均小于规范设计 30 mm 要求;左线水平收敛最大为 0.9 mm,右线水平收敛最大为 1.2 mm,均小于规范设计 20 mm 要求,且 1 个月完成始发阶段后变形均趋于稳定,也验证了复杂周边环境超浅埋大直径 TBM 始发技术的应用成功,详见图 9~12。

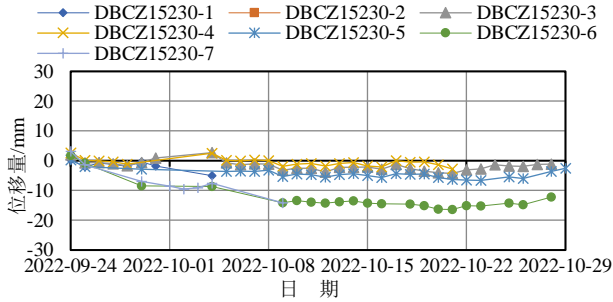


图 9 左线地表沉降累计曲线图

Fig. 9 Accumulated curves of left line surface settlement

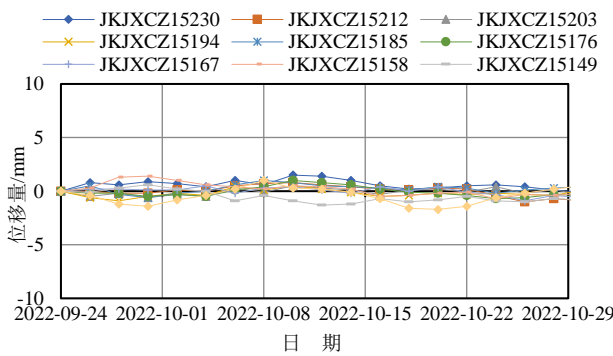


图 10 左线净空收敛累计曲线图

Fig. 10 Accumulated curves of left line convergence

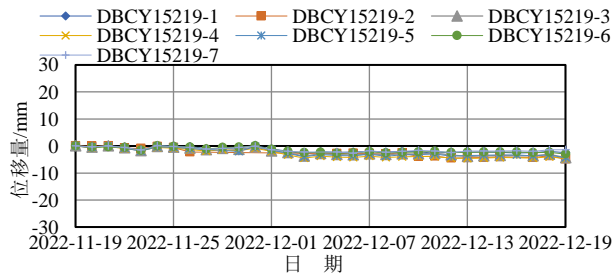


图 11 右线地表沉降累计曲线图

Fig. 11 Accumulated curves of right line surface settlement

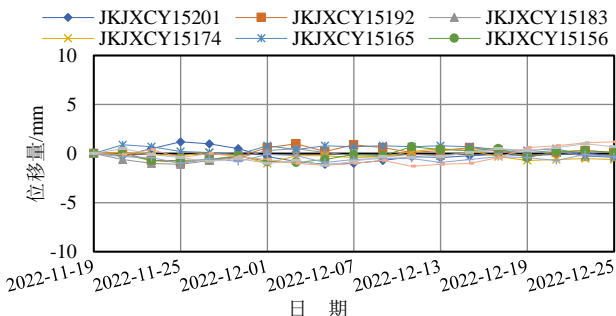


图 12 右线净空收敛累计曲线图

Fig. 12 Accumulated curves of right line convergence

5 结 论

通过对重庆市轨道交通 27 号线西永站一磁器口站区间小里程 TBM 区间始发段施工的重难点研究,提出了端头加固、始发纵坡控制、始发段注浆、盾构始发姿态控制、沉降监测等施工技术措施,实现了盾构轴线的精确控制,使超浅埋大直径 TBM 在复杂环境下得以顺利安全始发,对同类型工况条件下的 TBM 始发具有一定的借鉴意义。经本文研究,得出如下结论:

(1) 施工过程中应根据现场实际情况,通过地表深层注浆、超前大管棚及部分超浅埋段落反压回填,确保超大直径 TBM 在覆土深度均小于 0.5 倍隧道洞径工况下顺利完成始发。

(2) 施工过程中通过大纵坡控制、TBM 始发和过程中姿态的控制技术,TBM 区间左右线始发段横向偏差和竖向偏差最大值均小于 50 mm,满足设计和规范要求。

(3) 通过自动化导向系统并辅助人工测量信息化监测手段实时对 TBM 姿态进行监测,发现在始发过程中 TBM 区间的左右线地表沉降最大为 15 mm,左右线净空收敛最大为 2 mm,均小于规范设计的 30 mm 要求,且 1 个月完成始发阶段后变形均趋于稳定,也验证了复杂周边环境超浅埋大直径 TBM 始发技术的应用成功。

参考文献

[1] 翟志国. 城市大直径泥水盾构始发技术浅谈[J]. 科技资讯, 2009, 7(4): 122, 124.
 ZHAI Zhi-guo. Initial technology of large diameter slurry shield in city[J]. Science & Technology Information, 2009, 7(4): 122, 124.

[2] 黄学军, 翟志国. 城市大直径泥水盾构始发关键技术[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(4): 151-154.
 HUANG Xue-jun, ZHAI Zhi-guo. Key technology of launching large-diameter slurry shield in city[J]. West-China Exploration Engineering, 2011, 23(4): 151-154.

[3] 李振武. 大直径泥水盾构始发技术[J]. 铁路技术创新, 2012(3): 23-25.
 LI Zhen-wu. Origination technology of large diameter slurry shield[J]. Railway Technical Innovation, 2012(3): 23-25.

- [4] 张楠. 浅埋复合地层小净距大盾构隧道始发掘进技术研究[J]. 公路, 2022, 67(1): 383-387.
ZHANG Nan. Study on starting excavation technology of small clear distance and large shield tunnel in shallow composite stratum[J]. Highway, 2022, 67(1): 383-387.
- [5] 王贤福, 周霄. 浅谈大直径盾构超浅埋软土地层始发的施工技术研究[J]. 地基处理, 2020, 2(4): 322-329.
WANG Xian-fu, ZHOU Xiao. Construction technology of large diameter shield launching in super shallow soft soil layer[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(4): 322-329.
- [6] 崔学忠, 陈强. 小半径、大纵坡、浅覆土立交盾构隧道的施工对策[J]. 四川建筑, 2008, 28(1): 198-199, 202.
CUI Xue-zhong, CHEN Qiang. Construction countermeasures of shield tunnel with small radius, large longitudinal slope and shallow covering soil interchange[J]. Sichuan Architecture, 2008, 28(1): 198-199, 202.
- [7] WANG L W, LIANG Q L. Performance analysis of cooperative multicell precoding with global CSI and local individual CSI in the large dimensional regime[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(4): 3229-3238.
- [8] 沈碧辉, 侯永茂, 马元, 等. 软土地层浅覆土大直径盾构施工参数分析[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 91-94.
SHEN Bi-hui, HOU Yong-mao, MA Yuan, et al. Analysis on construction parameters of large diameter shield under shallow overburden condition in soft clay[J]. Chinese Ground Improvement, 2019, 1(1): 91-94.
- [9] 韩文忠. 复杂地质条件下土压平衡盾构掘进控制技术[J]. 石家庄铁道学院学报, 2004, 17(增刊 1): 12-14.
HAN Wen-zhong. The digging-control technology with the equilibrium shield under complex ground conditions[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2004, 17(S1): 12-14.
- [10] 杜建华, 沈红云. 广州地铁复杂地质条件下的土压平衡盾构掘进技术研究[J]. 隧道建设, 2006, 26(4): 68-71.
DU Jian-hua, SHEN Hong-yun. Study on EPB shield machine construction technology under complex geological conditions achieved in Guangzhou metro[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(4): 68-71.