

无地面预加固工况的软弱地层中急曲线盾构施工技术研究

沈 蔚

(上海城投水务项目管理有限公司, 上海 201100)

摘 要 针对城市地下管网建设中为避让既有设施而形成的急曲线线形施工难题, 以上海桃浦雨水调蓄工程为背景, 系统研究了无地面预加固工况的软弱地层中急曲线盾构施工关键技术。通过研发专用盾构装备、创新管片结构设计以及优化沉降控制工艺, 形成了一套完整的急曲线盾构施工技术体系。研究表明: 采用针对性研发的球型铰接系统和仿形刀超挖技术的专用盾构机可满足急曲线施工 ($R=150\text{ m}/R=190\text{ m}$) 要求; 采用小环宽、大楔形量的复合管片结构能有效适应急曲线线形; 创新引用克泥效工艺与围岩注浆相结合的综合控制措施可将地表沉降控制在 1 cm 以内。该技术成功解决了软弱地层无预加固条件下急曲线施工的技术难题, 可为类似工程提供参考。

关键词 软弱地层; 急曲线盾构; 球铰接系统; 复合管片; 沉降控制

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.021

0 引言

根据《盾构法隧道施工及验收规范》(GB 50446-2017), 急曲线盾构段是指平面曲线半径小于 300 m , 或平面曲线半径小于 40 倍盾构直径的特殊地段^[1]。自 20 世纪 60 年代起, 日本、法国等国家在急曲线盾构技术领域取得了显著进展。例如: 日本在排水隧道中实现了 $R=8\text{ m}$ 的特急曲线施工, 展现了其在微型盾构与精准控制方面的技术领先性^[2]。此外, 法国 Ru de Marivel 工程 ($R=90\text{ m}$)、新加坡电力隧道 ($R=100\text{ m}$) 等项目的成功实施也为急曲线技术积累了丰富的经验。近年来, 国内急曲线盾构技术逐步发展。上海桃浦雨水调蓄工程在软弱淤泥质土中成功完成了 $R=115$ 的急曲线掘进, 为类似地质条件下的施工提供了宝贵案例^[3]。此外, 乌鲁木齐电缆隧道 ($R=80\text{ m}$)、长沙万家丽电力隧道 ($R=150\text{ m}$) 等项目的顺利实施, 也标志着我国在该领域取得了重要突破。然而, 现有成功案例多集中于较硬土层或经过预加固处理的软土地层, 在无地面预加固的软弱地层中实施急曲线盾构施工尚无先例。

随着城市地下空间开发日益密集, 新建地下管网常为避让既有建(构)筑物和地下基础设施, 不得已设计为复杂的急曲线线形。尤其在软弱土层中, 传统的盾构施工技术需克服侧向反力不足、轴线控制困难及地层扰动控制等难点。本文基于上海桃浦雨水调蓄工程的实践, 系统研究了无预加固软弱地层中急曲线盾构

施工的关键技术, 形成了一套完整且可行的施工工法。

1 工程概况

1.1 工程急曲线概况

上海市桃浦雨水调蓄工程 DG14 ~ DG11 隧道区间全长 $1\,332.6\text{ m}$, 隧道外径 $5\,200\text{ mm}$, 内径 $4\,500\text{ mm}$, 管片厚度 350 mm , 环宽 $1\,200\text{ mm}$, 采用 $\text{Ø}5400\text{ mm}$ 土压平衡盾构机施工。由于 DG13# 井及 DG12# 井周边管线密集且存在既有建筑, 周边道路交通繁忙, 实施难度极大, 经技术经济比较, 决定取消该井位, 将原设计三段 DG14 ~ DG13、DG13 ~ DG12、DG12 ~ DG11 盾构区间整合为一段 DG14 ~ DG11 盾构区间, 在原井位区域形成一段“S”型急曲线盾构隧道, 转弯半径 $R=150\text{ m}$ 和 $R=190\text{ m}$, 总长度 354 m 。具体分段为: $R150$ 段长度 153 m 、中间直线段长度 25 m 、 $R190$ 段长度 176 m ; 其中急曲线段 ($R150$ 与 $R190$) 采用复合管片, 中间直线段采用常规混凝土管片。这一优化既解决了中心城区落井困难问题, 又显著降低了对周边环境的影响, 减少了社会维稳压力。

1.2 工程地质情况

工程场地属于典型的滨海平原相地质环境, 隧道主要穿越④1 灰色淤泥质粘土、⑤1 灰色粘土。这些土层具有强度低、渗透性差、含水量高、压缩性高、灵敏度高工程特性, 并表现出明显地触变性和流变

作者简介: 沈蔚 (1979-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理和工程造价。

性。④ 1 灰色淤泥质粘土：标准贯入 N 击为 1.4，无侧限抗压强度 38 kPa，地基承载力特征值 55 kPa。⑤ 1 灰色粘土软弱土层：标准贯入 N 击为 3.7，无侧限抗压强度 70 kPa，地基承载力特征值 70 kPa。

此类土层为典型的软弱淤泥质地层，且急曲线区间位于市属河道及交通繁忙的道路下方，地面预加固措施极难实施。故而在无预土体加固情况下的急曲线盾构施工带来了三大主要挑战：（1）土体自稳性极差，对开挖面压力控制精度要求极高；（2）地层侧向承载力低，急曲线段盾构转向所需的反力难以保证；（3）土体扰动极为敏感，施工不当易导致过大沉降。针对无地面预加固工况下的软弱淤泥地层急曲线施工，通过在设备、设计与施工三个方面进行联合技术攻关。

2 盾构机针对性设计

2.1 刀盘与超挖系统

为使盾构机在软弱地层中具有更好的稳定性和适应性，采用高开口率刀盘设计（开口率 48%）及双仿形刀配置。该设计不仅能防止黏土附着，显著提升渣土摄入效率，还能实现精准超挖。此设计理念与日本清濑市雨水干线工程中为硬度砾石与粘土夹层而采用 65% 高开口率的策略不谋而合^[4]。在刀具系统方面，优化了原有 16 把刀的布局，新增 15 把贝壳刀，进一步提升刀盘清障与切削能力。此外，配置了一备一用双仿形刀系统，最大超挖量达 50 mm，该双套冗余设计显著提高了系统可靠性，有效避免因仿形刀失效导致的施工中断。

2.2 盾体铰接系统

该设计创新性地引入了前盾与尾盾两节式盾体结构，并采用先进的球铰技术。通过将铰接油缸作用力分布于中心转轴两侧，主机可实现更小半径的转弯能力，具备转弯灵活、姿态控制精准、转弯半径小等显著优势，最大可满足 R80 m 急曲线施工需求。在推进过程中，通过油缸推力分区控制，可将推力降至常规值的 80%，同时推进速度可控制在 15 ~ 20 mm/min，确保了精准、平稳的转向效果。

2.3 螺旋输送机与出渣系统

螺旋输送机前端支承同样采用球铰设计，有效解决急转弯时的空间干涉问题。皮带机支架设置调节杆进行调向，通过灵活调节托辊位置以适应弯曲段的渣土输送需求。

3 管片结构优化设计

3.1 急曲线段管片选型设计

急曲线段采用环宽 1 000 mm、单面楔形量 26 mm 的“混凝土—圆弧端面钢环板”复合管片结构，并应

用通用双面楔形衬砌环设计。该设计通过减小轴线环宽与增大楔形量相结合，实现了对小半径曲线的线路精准拟合。其技术优势主要体现在以下方面：（1）管片环具有良好的转向灵活性，能够有效契合急曲线施工的线形要求；（2）圆弧端面设置的钢环板显著增强了管片的结构强度，在急转弯受力过程中有效防止了边角压损；（3）相较于全钢管片方案，该复合结构在满足同等力学性能的前提下，实现了约 56% 的成本节约。

3.2 管片拼装质量控制

采用了管片真圆度自动测量系统，对管片拼装状态进行实时监测。通过传感器连续测量管片拼装的关键参数，严格控制管片接缝的压缩量，确保了密封材料达到预期的止水效果。实践表明，管片拼装前后的隧道形状测量对成环精度的提高极为有效，通过自动测量获取的管片拼装状态数据，能够及时反馈并应用于盾构机掘进管理及后续管片的拼装管理调整中。

3.3 管片拼装工艺优化与质量控制

通过优化拼装流程，采用“先下后上、左右交错、封顶块纵向插入”的顺序，有效降低了拼装过程中的不均匀受力。拼装时严格控制盾构推进油缸的收回顺序与压力，避免对已拼装管片产生过大偏压。同时，为应对软弱地层管片易发生位移的特点，在每环管片拼装完成后立即采用临时限位装置进行径向约束，直至注浆体达到一定强度。这一系列精细化拼装措施，确保了管片环间错台控制在 3 mm 以内，接缝张开量小于 1 mm，满足了急曲线隧道对管片成环质量的高标准要求。

4 沉降及轴线位移控制技术

4.1 克泥效工艺应用

通过定制的专用台车（长 5.3 m，宽 0.7 m）实施克泥效注浆。该工法的应用符合《特殊地段盾构施工技术规范》（T/DGGC 017-2022）中关于在变形控制严格地段应采取有效措施及时填充盾尾间隙的规定^[5]。

经多次配比试验，确定最佳配比为克泥效粉：水：水玻璃=420:839:50（质量比），R150 段注浆量为 1.28 m³/m，R190 段为 1.2 m³/m，按超挖理论间隙 200% 填充，有效控制盾尾空隙处的土体应力释放及地面沉降。

4.2 围岩注浆加固

盾构脱离 10 环后进行围岩注浆，《软硬不均与极软地层盾构处理技术》一书指出，在极软地层中，双液浆能快速凝固，有效抑制管片上浮和地层后期沉降^[6]。本工程采用 P.042.5 普通硅酸盐水泥与水玻璃双液浆，水灰比 1:1，水泥浆与水玻璃注入比 1:1。每环布置 6 个孔，每孔注浆量约 3 m³，注浆范围覆盖隧道外侧 3 m

区域,注浆压力根据地层深度分级控制。参考相关软土地层盾构隧道无沉降施工技术,通过信息化监测数据及时调整盾构掘进参数,并依据计算沉降值预留隆起量,通过注浆措施维持隆起量以抵消后续的滞后固结沉降。

4.3 囊袋注浆技术

在围岩注浆同时,辅以囊袋注浆,进一步加强隧道稳固性。注浆点布置在隧道上方和下方各两个孔,单孔注浆量约为 0.07 m^3 。注浆后形成的囊袋直径约为 $70 \sim 80 \text{ cm}$,厚度为 $8 \sim 12 \text{ cm}$ 。该技术有效弥补了传统注浆的不足,在软弱地层中形成了局部的微型固定桩,增强隧道结构的整体稳定性,抵抗盾构急转弯时的侧向反力。在急曲线掘进期间,隧道最大水平位移始终保持控制在 1 cm 以内。

4.4 信息化施工与动态调控体系

为了精确掌控急曲线施工全过程,本项目搭建了基于数据的智能化施工管控平台。平台集成了地质预报、盾构姿态、注浆与土仓压力、地表沉降、管片内力等多源监测信息,依托算法模型实现实时分析、动态预警。例如:平台能根据历史掘进数据和实时地质条件,自动推荐较优掘进参数;一旦监测到沉降速率异常,系统即时提示调整克泥效注浆量或推进速度。同时,结合 BIM 技术,实现了施工进度与地质模型的三维可视化,支持对急曲线段施工的直观监测与模拟推演。该平台的应用,既提高了施工决策的科学性与时效性,也为后续同类工程沉淀了可复用的数字资产。

5 工程监测与效果评价

5.1 隧道轴线控制精度

隧道轴线采用自动导向系统、盾尾空隙测量系统与管片真圆度监测系统,实现了对掘进过程的精准控制。在此基础上,通过增加隧道内测量迁站频次、加密隧道控制点复测等措施,进一步提升了轴线控制精度。在急曲线掘进期间,将隧道最大轴线偏差成功控制在 4 cm 以内。

5.2 地层沉降监测结果

通过监测数据显示,隧道沿线地表最大沉降量被控制在 1 cm 以内,达到了毫米级微扰动施工的控制标准,这得益于克泥效工艺、精准的土压平衡控制以及合理的注浆参数等综合技术的应用,最大限度地减少了施工对周边土体扰动。

5.3 管片受力监测分析

传感器监测数据显示,管片连接螺栓承受地最大轴力为 100 kN ,管片承受的最大土压力为 0.32 MPa 。

所有监测数据均符合设计及相关规范要求,表明管片结构在整个顶进及转弯阶段均处于安全受控状态。

6 结论

1. 针对软弱地层急曲线施工中的设备适应性难题,通过研发采用球型铰接系统、仿形刀超挖等创新技术的专用盾构装备,实现了技术突破。高开口率刀盘与针对性刀具系统的应用,进一步提升了设备在恶劣地层中的性能与耐久性。

2. 在管片结构设计方面,创新采用了小环宽、大楔形量复合管片,兼顾了急曲线拟合精度与经济性要求。基于盾构隧道管片与线路的几何关系,优化了通用楔形环管片的楔形量与环宽参数选取方法。

3. 在无地面预加固工况的急曲线施工过程控制方面,构建了涵盖克泥效工艺与围岩注浆等综合措施的微扰动控制技术体系,实现了毫米级沉降控制。该体系借鉴软土地层无沉降施工技术,结合理论计算与试验段数据分析,科学制定了全过程控制隆沉的施工方案。

4. 为实现施工过程的精细化管控,建立了贯穿全程的信息化监控系统。依托盾构管控中心,对推力、姿态、注浆量等关键参数进行集中监控,并实时动态调整施工工艺,有力保障了急曲线施工的安全与精度。

该工程实践表明,在无地面预加固工况的软弱地层中实施急曲线盾构施工,技术上可行、经济上合理。所形成的关键技术体系,为国内外类似地质条件下的隧道工程建设提供了重要的技术借鉴与成功范例。未来的研究可进一步结合数值模拟与模拟试验,深入分析急曲线掘进对周围土体的扰动机理,实现更精准的预测与控制。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 盾构法隧道施工及验收规范(GB 50446-2017)[S].2017-07-01.
- [2] 陈仙宇,李杰.浅覆土软弱地层盾构近距离上跨地铁运营隧道施工控制技术研究[J].福建建设科技,2025(01):74-77.
- [3] 罗云峰,李吉勇,刘桂荣.淤泥质软土地层急曲线盾构隧道施工关键技术研究及应用[J].建筑施工,2024,46(08):1207-1211.
- [4] 同[2].
- [5] 北京盾构工程协会.特殊地段盾构施工技术规范(T/DGGC 017-2022)[S].2022-09-17.
- [6] 陈馈,王旭阳,李宏安.软硬不均与极软地层盾构处理技术[M].上海:上海科学技术出版社,2019.