

超大直径盾构法隧道在浅覆土的大坡度施工关键技术

杜 磊

上海隧道工程有限公司盾构工程分公司 上海 200000

摘要: 银都路越江隧道新建工程采用15.43m超大直径盾构掘进施工双线总长约2350m。隧道管片外径为15m。本工程沿线地下水主要有赋存浅部土层中的潜水、赋存于④₂、⑤₂、⑤₃₂层中的微承压水及⑦₂层的承压水(⑤₃₂层与⑦₂层在浦东侧局部连通)。推进线路纵断面总体呈“V”字形,其中最大坡度达到5.99%。大坡度区段内埋深变化快,切口水压力须及时调整;同步注浆受重力影响会发生不均匀的现象;施工时施工设备存在滑动、溜车等风险。针对诸多风险,通过调整注浆量、切口压力,改制运输设备、盾构机内部工具等一系列施工技术研讨与设备改良,保障了整体施工的质量与安全。

关键词: 大坡度;盾构;同步浆

Key technology of large slope construction of super-large diameter shield tunnel in shallow covered soil

Lei Du

Shanghai Tunnel Engineering Co., LTD. Shield Engineering Branch Shanghai 200000

Abstract: The new project of yindu Road tunnel adopts 15.43m large diameter shield tunneling construction with a total length of about 2350m. The outer diameter of the tunnel segment is 15m. The groundwater along the project mainly includes diving in shallow soil layer, micro-confined water in layer ④₂, ⑤₂ and ⑤₃₂, and confined water in layer ⑦₂ (layer ⑤₃₂ and layer ⑦₂ are partially connected in Pudong side). The longitudinal section of the propulsion line is generally in the shape of “V”, with the maximum slope reaching 5.99%. The buried depth in the large slope section changes rapidly, and the cut water pressure must be adjusted in time; synchronous grouting affects uneven; the construction equipment risks sliding and sliding during construction. In view of many risks, by adjusting the grouting volume, incision pressure, a series of construction technology research and equipment improvement, including the restructuring of transportation equipment, shield machine internal tools, to ensure the overall construction quality and safety.

Keywords: large slope; shield tunneling; synchronous slurry

一、工程背景

1. 工程概况

银都路越江隧道新建工程是上海市南部近郊地区的东西向道路,是连通徐汇区、闵行区、浦东区的重要通道。隧道盾构段为双管双层盾构法圆隧道,双线总长约2350m。隧道管片外径为15m,管片厚度为650mm,环宽2m。区间隧道平面最小转弯半径为R1500m,最大纵坡5.99%,为直径大坡度盾构隧道施工。隧道顶覆土约8.5~27.1m。属于浅覆土始发施工。盾构总体路线线型如表1所示。

2. 工程地质

本工程盾构始发时位于④₁淤泥质黏土、④₂粉砂、⑤₁粉质黏土、⑤₂粉砂。其中④₂、⑤₂为微承压水层,渗透性较好。隧道断面地层为④₁淤泥质黏土、⑤₁⑤₃₁粉质黏土夹粉砂、④₂⑤₂粉砂层。盾构掘进过程中在一定动水压力下易产生流砂、突涌现象。本工程沿线地下水主要有赋存浅部土层中的潜水、赋存于④₂、⑤₂、⑤₃₂层中的微承压水及⑦₂层的承压水(⑤₃₂层与⑦₂层在浦东侧局部连通)。

二、超大直径大坡度盾构法隧道施工的关键技术

1. 盾构机改制

针对盾构机车架及物料运输系统进行保养及改制,

表1 盾构段隧道线路型统计表

		线型	长度	起止里程	
北线	平曲线	右曲 R1500m	36.531m	NK1+626.634	NK1+663.165
		直线	795.733m	NK1+663.165	NK2+458.898
		左曲 R2100m	263.204m	NK2+458.898	NK2+722.102
		左曲缓和	77.305m	NK2+722.102	NK2+799.407
	竖曲线	-5.99%	291.157m	NK1+626.634	NK1+917.791
		R1860m	172.794m	NK1+917.791	NK2+090.585
		+3.3%	708.822m	NK2+090.585	NK2+799.407
南线	平曲线	右曲 R2000m	375.006m	SK2+802.612	SK2+427.606
		直线	439.247m	SK2+427.606	SK1+988.359
		右曲 R9000m	363.178m	SK1+988.359	SK1+625.181
	竖曲线	-3.3%	711.828m	SK2+802.612	SK2+090.784
		R1860m	172.794m	SK2+090.784	SK1+917.990
		+5.99%	292.809m	SK1+917.990	SK1+625.181

复核各设备爬坡能力满足本工程5.99%大坡度工况。特别是双管片行车，对驱动、电控系统及紧急制动液动力站进行改制，运输设备和车架行走设备安装防滑装置。

(1) 管片运输

管片运输包含管片行车以及管片储运系统。可以吊运单管片至管片输送装置。银都路隧道盾构机保留改制单管片行车、双管片行车、接管行车及船底板行车。为适应最大坡度为5.99%，在改制时对盾构中各行车进行针对性改制及保养。同时注意避免因急启、急停导致的溜坡风险。设备改制参数如表2、表3所示。

单管片行车数量1台，吊具采用环链结构，配合旋转平台，实现管片吊运至管片输送装置上。此次改制时，对单管片行车的驱动和电控系统进行改造，其中驱动型号为：DRS 200 WUE 40DD B 14.6-50-3/59.9 ZBA 100 B 8/2 B020。管片行车已进行针对性改制，对应驱动已进行了各项升级。

双管片行车数量1台，改制时对驱动、电控系统及紧急制动液动力站进行改制，其中：驱动原电机改为B140带刹车，电控系统的4台变频器由kW22kW改为30kW。

在改制时更换新的减速箱、电机，原接管行车钢结构、葫芦小车变形严重。已经重新制作小车架和部分行车钢结构，并更换驱动和葫芦。对原使用后磨损严重或缺失的走轮、导轮、悬挂轮及支架重新制作并替换。

同时在管片旋转平台处焊接了防滑支撑平台，以确保管片下放至平台处时不会因为自身重量向外滑出。极大的提高管片运送时的安全性。

(2) 同步浆储备及注浆系统

本盾构机上同步注浆系统配置为3台KSP20，总泵送能力60m³/h；2个带搅拌器的浆桶，总容量32m³；六点均匀压注的注浆管路两套。根据银都路隧道项目工况，单环理论注浆量24.65m³（120%）。

在5.99%的大坡度工况条件下，同步浆储浆桶会呈现内部同步浆液位分布不均匀的现象。按照5.99%坡度理论值计算，单个浆桶最低液位时的总容积仅有14m³。该现象可能会导致浆桶高液位送泵口已达注浆量需求，而低液位浆量仍需补给。从而影响整体施工效率和进度。为防止该现象，采用“交叉式”同步注浆方法。由原本注浆量小的3号、4号注浆管路全部替换为1号、6号注浆管路，并把同步浆送泵口改至浆桶高液位处。确保盾构掘进中每一环注浆量能达到“六点注浆法”的标准，控制同步浆均匀分布在盾尾。

2. 后配套设备

口型件夹具。银都路盾构在改制过程中因为设计需求取消了口字件行车，将采用叉车进行口型件的运输安装工作。在大坡度及其他施工条件下，经过前期研讨及设计计算，选择了16t液压制动型叉车。同时设计了新型的口型件安装吊具，确保可以在斜面情况下准确、平稳的安放口型件。口型件夹具如图1所示。



图1 口型件夹具示意图

3. 施工过程参数控制

大坡度区间盾构掘进施工时, 由于轴线变化较快并且涉及始发、穿越防汛墙等工作。我们需要合理的调整各项施工参数, 减少对土体的扰动、确保盾构机切口的平稳、减小渗漏水的发生。确保整体成型隧道稳定性、安全性。

(1) 切口压力

盾构推进过程中, 切口压力是根据当前地层性质及地下水深度按照相应系数计算理论值。再通过沉降监测以及气泡仓液位进一步的调整。倘若切口压力过高, 可能会造成前方土体隆起甚至击穿。切口压力过低也会导致推进面的失稳甚至塌陷。大坡度推进施工中, 轴线变化较快, 切口压力数值需要及时调整, 确保推进过程中的环境平稳。

在陆域段(1~55环)期间, 切口压力由于轴线埋深变化较快, 频繁进行多次调整, 从0.13MPa提升至0.4MPa, 平均每环上升0.005MPa。当盾构穿越至水域段(56环)时, 由于加入水头压力变化, 切口压力逐渐增加至0.4MPa ~ 0.503MPa, 平均每环上升0.001MPa。

(2) 推力及推进速度

总推力对于隧道整体掘进施工非常重要, 特别体现在对切口土体的扰动。过高过低都有可能造成前方土体发生隆起或者沉降。通过对整个大坡度区间掘进施工时推力及推进速度的曲线分析, 我们为将来南线回推施工总结了大量参考标准。大坡度区间100环~148环, 整体推进速度最大值为39mm/min, 最小值为1mm/min, 平均推进速度为24.91mm/min。总推力最大值为108436kN, 最小值为27016.1kN, 平均总推力为86556.88kN。

(3) 同步浆注入量

同步浆可以填充土体与管片之间的间隙, 和周围土体形成更加密实的形态, 能够有效控制脱出盾尾的管片上浮量, 从而减小盾尾上方的地层扰动。根据银都路大坡度区间施工及始发推进情况, 总体注浆量在1~60环较大, 每环平均为33m³。60~100环, 每环平均为30m³。100~146环, 每环平均为32m³。整体注浆量达到理论值150%。结合监测(表4)情况可以发现, 在大坡度区间施工时, 同步注浆量比正常施工情况要高出20%~30%, 否则会引起比较明显的地层沉降。同时需要在在大坡度区间的同步浆配比中加入适当水泥。

三、大坡度区间监测及变形情况

大坡度掘进阶段分为陆域段和水域段, 地表沉降将主要以在陆域段(1~56环)附近的建构筑物以及地面

为主要监测点。隧道及管片变形数据将以1~100环的复测总结为主要依据。

1. 监测内容

(1) 地面人工监测

陆域段监测主要以始发井至黄浦江浦东防汛墙阶段为主要布点区域。盾构掘进正常段每6m布设一轴线点; 每12m布设一组小断面, 每个断面3点(含轴线点), 间距7m; 每48~50m设置一组大断面, 断面上布置13个监测点, 间距分别为3m、7.5m、12m、18m、24m、30m。地表点根据隧道埋深和现场情况进行调整。另外, 在盾构出洞时, 盾构掘进过程中对紧邻区域内相当敏感, 拟在长约50m范围内加密测点, 每4布设一组大断面, 间距同常规段大断面。

(2) 井下人工监测

主要针对管片脱出盾尾时的上浮测量以及成型隧道的整体变形测量。

2. 大坡度区间推进的地表沉降情况

从2022年9月7日盾构始发开始至2023年11月30日前盾构拼装+100环, 对盾构机刀盘前50mm、盾尾后50mm范围内的地表、建筑物、管线监测点进行持续观测, 监测频率为2次/1天, 盾尾后50m范围外的地表、建筑物、管线监测点进行持续观测, 监测频率为1次/7天, 隧道盾构架脱出, 具备监测条件开始, 对盾尾后50m范围内的隧道结构竖向位移、收敛监测点进行持续观测, 监测频率为1次/1天。

在推进至20环位置的时候, DB11~17地面监测点累计沉降量上升较快。此时我们及时调整了注浆方量并改良配比加入水泥, 并开始进行地面注浆措施, 成功及时控制住地表沉降。同时在后续推进中, 提前进行地面注浆的操作, 将后续地表沉降数值控制在稳定范围内。

3. 大坡度区间成型隧道的变形情况

(1) 隧道成型轴线:

平面和高程偏差每5环测一组数据, 共100组数据。

高程偏差: 平均偏差: +7.29mm, 最大偏差值: -49mm(满足±80mm要求);

平面偏差: 平均偏差: +3.92mm, 最大偏差值: -30mm(满足±80mm要求);

(2) 隧道成型管片:

管片横竖径每5环测一组数据, 共100组数据。

管片横径: 平均偏差: +3.7mm, 最大偏差: +24mm(满足±100mm要求);

管片竖径：平均偏差：-61.8mm，最大偏差：-85mm（满足 $\pm 100\text{mm}$ 要求）；

3.3.3最大椭圆度：7.13‰

四、结语

（1）应对措施，本次大坡度掘进施工改良了多项原有设备及配套设施。为银都路越江隧道新建工程北线推进工作提供了有力的技术保障。最大程度地减少了大坡度重难点带来的风险及危害。保证了整体隧道掘进施工的进度和质量。

（2）施工参数及控制。通过曲线分析得出推进速度平均为24.91mm/min，总推力平均为86556kN，同步浆注入量每环约为32m³，大坡度掘进过程中盾构机各项参数数值选取得当。出现沉降波动，也能够及时调整。使后续施工恢复正常平稳的状态。

（3）大坡度区间整体隧道的变形控制。通过整体

隧道变形监测数值显示，轴线平面偏差最大值-49mm；轴线高程最大偏差值为-30mm；管片平面最大偏差值+24mm；管片高程最大偏差值为-85mm；管片最大椭圆度为7.13‰。各项参数指标符合设计规范要求。

（4）南线回推。在南线回推过程中，也将遇到大坡度施工的状况。北线大坡度施工经验对将来南线推进工作具有极大的指导意义。

参考文献：

[1]陈健.超大直径泥水盾构隧道综合施工技术控制[J].都市轨道交通, 2008(06)

[2]郑宜枫, 丁志诚, 戴仕敏.超大直径盾构推进引起周围土体变形和土水压力变化分析[J].地下空间与工程学报, 2006(S2)

[3]郑敏杰.大直径泥水平衡盾构机设备适应性选型及应用[J].交通世界, 2021(11)