

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.250223

“大坡度、小半径”隧道盾构掘进轴线控制技术

李玉曲

(中铁十七局集团有限公司市政建设有限公司盾构项目部,江苏 无锡 214111)

摘 要: 盾构法隧道“大坡度、小半径”施工,难度最大的为隧道轴线控制,通过施工时土压设定和轴线控制技术,解决成型隧道满足线性要求,主要是采用盾构推进油缸、铰接油缸与土压相结合、勤测勤纠缓纠、合理控制盾构掘进各项参数等控制措施^[1]。
关键词: 轴线控制;隧道;纠偏;注浆;措施
中图分类号: U455.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2025)11-0249-04

Axis Control Technology of Shield Tunneling for “Large-gradient Small-radius” Tunnels

Li Yuqu

(Shield Project Department of China Railway 17th Bureau Group Municipal Construction Co., Ltd., Wuxi 214111, China)

Abstract: In shield tunneling construction with large gradients and small radii, the largest difficulty is the control of tunnel axis. By means of earth pressure setting and axis control technology during construction, the linear requirements of the formed tunnel can be met. The main control measures include the combination of shield propulsion cylinders, articulated cylinders and earth pressure, the frequent measurement and correction, and slow correction, as well as the reasonable control of various parameters of shield tunneling.
Keywords: axis control; tunnel; correction; grouting; measures

1 工程概况

南通轨道交通 1/2 号联络线盾构区间,线路线型在青年路以一段曲线 250 m 为小半径和坡度为 2.8 % 上坡,由西南向西北转向工农路青年路 1 号线盾构接收井,途经南通大饭店观景平台、下穿青年路站 5 号口最小距离 1.432 m、侧穿南通大饭店,区间起止里程 L1K0+078.833—LK0+282.162,区间全长 203.329 m,隧道顶部埋深 11.593 ~ 17.648 m,地层为③₂粉砂层、③₁层粉砂夹砂质粉土和④₁粉质黏土等土层,隧道掘进平、剖面图见图 1~2 所示。

2 曲线段盾构隧道掘进土压力分析

根据盾构机制造厂家提供的机械设备技术参数,本台 ZTE6410 型 DZ608 号土压平衡盾构机最小水平转弯半径为 200 m,最大纵向爬坡能力为 45%,从适用性和工况上能够满足本区间设计参数,为达到

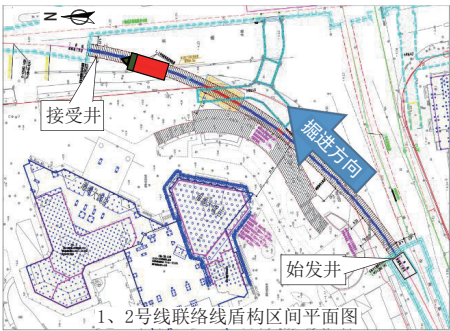


图 1 联络线区间平面图

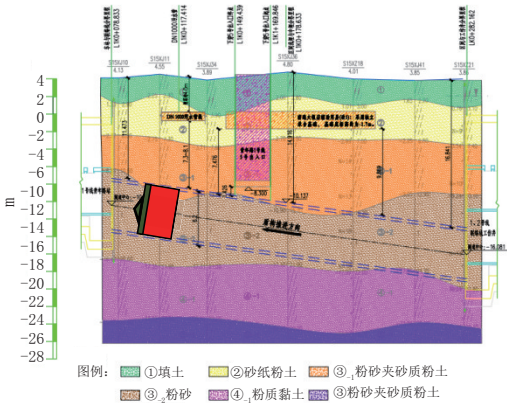


图 2 联络线区间剖面图

成型隧道轴线满足要求,重点在于土压平衡的控制。
根据设计线性,本条隧道为左拐弯上坡推进,因

收稿日期: 2025-03-03
基金项目: 中铁十七局集团有限公司重点项目(2018-30)
作者简介: 李玉曲(1986—), 男, 学士, 工程师, 从事土木工程管理工

此盾构掘进对刀盘顶部(靠左)和隧道内弧侧地层是一种挤压的受力状态,另外隧道外侧浆液还未凝固,隧道未稳固成型,本区间因为是全程均处在“大坡度小半径”曲线上,不论是始发还是正常掘进和接收阶段,作用在盾体和盾尾后成型管片上的土压力具有如下几个特点。

(1)盾构机前部,隧道外侧和底部土压偏小,对外侧和底部土层挤压现象较小。

(2)盾构机中后部,隧道内侧和底部土压较小,对外侧和底部土层挤压较明显。

(3)根据成型隧道管片监测,隧道内侧土压不明显,外弧面管片存在较大挤压反作用力。

左拐隧道地层中土压力分布如图 3 所示^[2]。

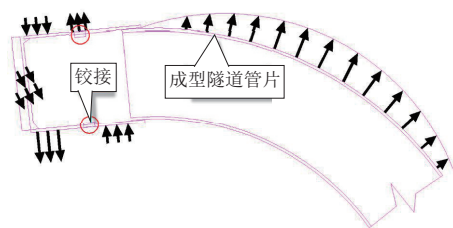


图3 小半径左拐地层土压分布图

本区间掘进地层为③₂粉砂层、③₁层粉砂夹砂质粉土和④₁粉质黏土等土层,为典型的软土地层,软土具有高压缩性,易引发地面沉降,将导致地铁结构长期处于沉降状态,进而导致结构损坏等恶性事故。

盾构在软土中穿越时,由于施工扰动再固结引发的沉降会影响周边建构筑物及地下管线的安全,外加本区间为 250 m 小半径掘进施工,存在严重的挤压超挖现象,曲线内侧和顶部土体、曲线外侧盾体和管片受挤压严重,因此在掘进过程中需要控制好土压、出土量、同步注浆等一系列掘进参数。

3 隧道轴线控制具体措施

3.1 盾构铰接

联络线区间盾构机,铰接系统为主动铰,活动铰接在切口环与支撑环(AB 环)之间,增加了盾构机调整姿态的灵敏度,本区间掘进时正左与正右行程差控制在 50 mm 以内^[3],且最大行程值不超过 120 mm,超挖刀开启的时机需要结合掘进时盾尾间隙、盾尾管片姿态、主掘进油缸力差行程差、推力、地表实时监测值等参数来综合考虑,切忌急开急收。

3.2 超挖量控制

本台盾构机刀盘上安装有 2 把仿形刀(180°对称

设置),设计行程为 100 mm。施工时为避免出现超挖而产生地面沉降等不利影响,超挖量的开启大小,根据隧道内沉降和收敛监测数据和地面监测情况适时进行调整,本区间采取双边 50 mm 超挖来控制,成型质量和地面监测数据效果均较佳。

3.3 出土量掌握

为了确保盾构机沿着设计轴线掘进,要严格控制盾构单侧超挖出渣量,每环出土方量与出土重量进行双控合理控制 and 对比分析。

本区间使用特定管片,管片环宽为 1.0 m,理论出渣量为 $\pi/4 \times d^2 \times L = \pi/4 \times 6.410 \times 1.0 = 32.25 \text{ m}^3$,盾构出土量控制在 98% ~ 101% 之间,则每环出土方量按照 31.61 ~ 32.57 m^3 来进行控制,本区间穿越地层渣土密度为 1.73 g/cm^3 ,则每环出土量重量按照 54.69 ~ 56.35 t 来进行控制。

3.4 注浆质量与注浆部位

3.4.1 注浆质量及要求

本区间设计轴线为 250 m 小半径圆滑曲线,而掘进轴线为一段段短折线组合而成,每环掘进时,应根据变形监测情况,适时调整注浆量和参数。设计要求粉细砂地层浆液注入量为“建筑间隙”的 180% ~ 220% 来控制,因此每延米建筑空隙体积为 $\pi \times (6.4102 - 6.2002) / 4 \times 1.0 = 2.08 \text{ m}^3$,计划注浆量为 3.7 ~ 4.6 m^3 ,同步浆液质量主控初凝时间和稠度,其中初凝时间 4 ~ 5 h,稠度在 80 ~ 130 mm 范围以内;本区间每掘进完成 5 环进行二次补注单液浆,水灰比按照 1:1 拌制,压力控制 $\geq 0.4 \text{ MPa}$ 为宜,注意观察成型管片的过程变化情况,注浆流量控制在 10 ~ 15 L/min,注浆速度不宜过快,单孔注浆量控制在 0.5 ~ 1 m^3 以内为宜,适时根据地面沉降监测和管片纵横缝变化情况动态调整注浆参数。

3.4.2 注浆部位

本区间主要在粉砂夹砂质粉土中急转弯上坡掘进,结合线型特性,在盾尾 10 m 处用于以管片外侧面为重点的管片二次补充注浆,隧道在左转弯时注浆方式及部位如图 4 所示^[4]。

3.5 管片拼装质量

(1)管片拼装要按照“居中拼装、定位拼装”的原则,让拼装好的管片处于较理想状态,不得出现“横鸭蛋、竖鸭蛋”等现象。

(2)本区间为左拐弯,因此隧道每环之间纵向轴力拉应力较大,导致外侧纵向螺栓会越来越紧固,内侧纵向螺栓会越来越松弛,所以管片拼装完成后,重

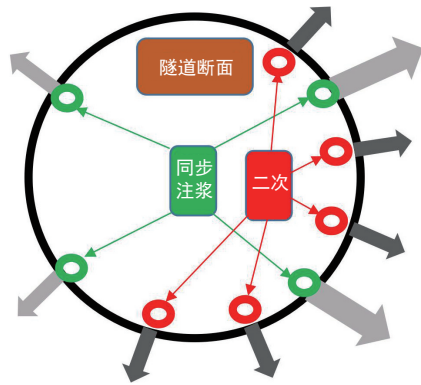


图4 小半径隧道左转弯时注浆方式及部位图

点复紧水平向左右侧成型管片螺栓。

(3)管片拼装时要考虑盾构机的盾尾间隙、法面以及盾构机轴线的发展趋势,提前做好管片选型工作,做好超前趋势。

3.6 设置加强肋

本区间在始发段、穿越建构筑物段、埋深较浅段、地层软硬交界变化段、接收段均设置 20 m 加强肋,加强肋采用 2 cm 厚钢板车床铣孔焊接加固成型,进场验收合格后在管片拼装时用螺栓将其与各环管片纵向连接,从而将隧道内弧面管片纵向紧固连接成型,以加强隧道纵向刚度,设置部位为时钟 2、4、8、10、12 点钟位置,安装位置见如图 5 所示。



图5 管片加强肋设置情况图示

3.7 轴线控制

为确保盾构机姿态在要求范围内,须加强测量,根据本隧道设计参数,始发段 20 环设置更换复核一次吊篮,掘进过程中 10 环设置更换复核一次吊篮,做到换手多次校核。本区间根据设计线型和以往施工经验,同时考虑盾构机所处的地理位置与埋深,施工过程中根据成型隧道实测轴线偏差值来适时调整,区间掘进过程中所设置向内偏量为 35 mm 左右,预偏量计划值如图 6、现场控制偏量值如图 7。

3.8 土压力值的设定

结合本区间埋深和所穿越地层情况,土压力值 $P=k_0\gamma h$,土仓内土压力计算式中, P 为平衡压力(水土压

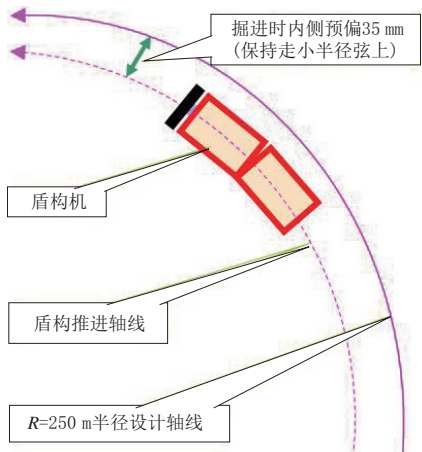


图6 隧道掘进轴线预偏量计划值

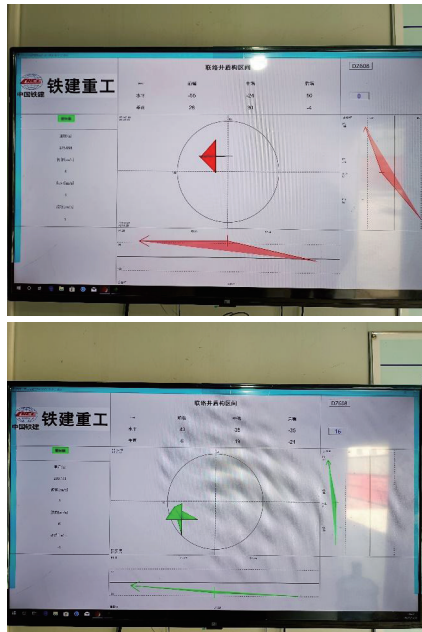


图7 现场控制偏量值

力), γ 为土体的平均容重值, h 为刀盘中心埋深, k_0 为静止土侧压力系数,通过理论计算与现场监测数据结合情况得出,本区间掘进时设置土压为 1.3 ~ 1.9 bar。

3.9 掘进速度

本区间正常段掘进时速度一般控制在 35 mm/min,速度相对较慢,一方面有效减少了成型管片的错台、渗漏和破损,另一方面减小盾构掘进时对周围土体的扰动过快过大,始发、穿越建构筑物、接收等特殊地段掘进速度控制在 20 mm/min 以内。

3.10 推力控制

联络线区间为左拐弯掘进,在掘进时左侧推力远远大于右侧,则后方水平向管片侧向位移值越大,要重点分析推力的来源和去处,避免出现无效推力,本条区间土压平衡模式时推力应控制在 1 200 ~ 1 600 t,在下穿、上跨重要建构筑物特殊地段需要控制推力时,推力可适当减小到 800 ~ 1 200 t,不宜大

推力控制掘进。

4 重要建构筑物监测情况

4.1 南通大饭店辅助用房

区间 82~112 环下穿南通大饭店辅助用房(混凝土一层结构,独立承台基础,基础底标高-1.7 m,距离隧道最小水平净距约 2 m)。

南通大饭店辅助用房共计布设建筑物沉降监测点 9 个(Jc2-1~Jc2-9)、建筑物倾斜监测点 4 个(Jq2-1~Jq2-4),截至隧道洞通后半年,监测数据统计见表 1。

表 1 南通大饭店辅助用房监测数据统计

沉降观测	测点编号	Jc2-1	Jc2-2	Jc2-3	Jc2-4	Jc2-5	Jc2-6	Jc2-7	Jc2-8	Jc2-9
	累计沉降量/mm	1.84	-0.87	0.18	-13.65	-14.97	-6.49	-1.54	-1.36	-0.67
倾斜观测	测点编号	Jq2-1	Jq2-2	Jq2-3	Jq2-4					
	累计倾斜量/‰	-0.22 5833 333	0.078 333 333	1.134 166 667	-0.412 5					

表 2 青年路站 5 号出入口监测数据统计

沉降观测	测点编号	Jc1-1	Jc1-2	Jc1-3	Jc1-4	Jc1-5	Jc1-6	Jc1-7
	累计沉降量/mm	-1.43	-0.8	-0.93	-0.11	1.92	0	-1.29
	测点编号	Jc1-8	Jc1-9	Jc1-10	Jc1-11	Jc1-12	Jc1-13	
	累计沉降量/mm	-1.77	1.04	0.85	-1.56	-1.01	-1.29	

青年路站 5 号口累计最大隆起量 1.92 mm,小于控制值 10 mm;累计最大下沉量-1.77 mm,小于控制值-20 mm。

4.3 监测情况小结

联络线盾构区间全程未发生监测预警情况,地表监测点最大沉降量 23.89 mm,5 号口底板最大沉降量仅为 1.77 mm,联络线区间盾构施工期间,各项监测数据稳定,现场无异常。

5 小半径隧道掘进重要注意事项

(1)在始发掘进出洞前,首先应检查铰接油缸的密封性和仿形刀伸缩开启功能完备性,防止过程中铰接千斤顶油缸漏油与仿形刀无法正常开启操作的风险。

(2)过程中要校核和分析每环每段土体超挖量,不得出现因开启双边超挖时多出土,导致隧道结构变形过大和致地面沉降过大,造成管片成型质量差和对周边建构筑物影响大,管片成型质量严格按照错台每环环间>15 mm,每环环内>10 mm、渗漏结构表面可有少量湿渍,总湿渍面积不应大于防水面积的 2/1 000,任意 100 m²防水面积上湿渍不超过 3 处,单个湿渍的最大面积不大于 0.2 m;任意 100 m²防水面积上的渗水量不大于 0.15 L/(m²·d)。

大饭店辅助用房累计最大沉降量-14.97 mm,小于控制值-20 mm,最大倾限量 0.113%,小于控制值±0.2%。

4.2 青年路站 5 号出入口

区间 116~138 环下穿青年路站 5 号出入口(地下一层箱型框架结构,青年路站 5 号出入口分段实施,出入口底面标高-8.3 m,与区间联络线竖向最小净距约 1.02 m)。

青年路站 5 号出入口底板共布设了 13 个建筑物沉降观测点(Jc1-1~Jc2-13),截至隧道洞通后半年,监测数据统计如表 2。

(3)盾构小曲线施工过程中,应采用双液浆或参加一定水泥用量的浆液使壁后注浆浆液较快达到一定强度的材料,控制隧道发生较大变形。

(4)盾构小半径曲线掘进,轴线控制与纠偏切勿过大过急,单环水平和垂直姿态调整量不得超过 5 mm,避免对管片产生集中荷载,使管片内力剧增,导致开裂破坏以及渗漏缺陷。

(5)大坡度小半径施工时,要根据盾尾间隙、盾构机和管片法面提前做好管片的选型,一般盾尾间隙不得小于 30 mm,管片法面一般左右差值不超过 40 mm,上下差值不超过 20 mm。

6 结 论

第一,“大坡度、小半径”区间盾构隧道,掘进时采用主动铰接,能有效降低成型管片的碎裂、错台、渗漏,同时有助于隧道轴线的控制与提高,垂直和水平姿态相对设计值均严格控制在±50 mm 偏差范围之内。

第二,盾构隧道施工过程中采取“勤测、勤纠、缓纠”的措施,外加加密吊篮设置和换手复测的各项制度,严格控制盾构姿态和掘进轴线在设计要求范围内,也是有助于隧道轴线控制与提高,勤测要做到始发段 20 环更换复核一次吊篮,掘进过程中 10 环更换

(下转第 269 页)