

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2012.06.024

小半径圆曲线隧道 盾构施工技术研究与运用

周 舟

(广州轨道交通建设监理有限公司 广州 510010)

摘 要 讨论城市轨道交通工程建设中出现的问题:虽然盾构法隧道施工技术得以普及运用,但由于小半径曲线隧道盾构施工技术的特殊性和复杂性,将直接影响工程项目的成本、安全、质量与进度。通过分析小半径曲线地铁隧道盾构法施工易出现的问题,结合某盾构区间的小半径曲线隧道工程实例,阐述曲线隧道盾构施工技术的运用,为今后类似工程的施工提供一定的参考与借鉴作用。

关键词 城市轨道交通;盾构法;地铁隧道;小半径曲线;施工技术

中图分类号 U455 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2012)06-0092-04

随着城市轨道交通工程建设进程的加快,盾构法隧道施工技术得以普及运用,在线路的选择上,由于受规划、建(构)筑物等制约,轨道交通线形越来越复杂。小半径曲线的隧道线形虽不属于良好,但在运用上将不可避免。小半径曲线隧道的盾构法施工技术 with 常规盾构法施工技术相比,具有一定的特殊性和复杂性,研究小半径曲线隧道的盾构法施工技术,相信对以后类似工程施工具有一定的借鉴作用。

1 小半径曲线隧道盾构施工难点分析

1.1 小半径曲线隧道线形较难控制

由于盾构机本身为直线形刚体,圆曲线段掘进只能形成一段段连续的折线来拟合圆曲线。为了使盾构隧道轴线与设计轴线相吻合,掘进过程中需要进行连续纠偏。圆曲线半径越小,拟合难度越大,掘进单位距

离的纠偏量也越大,纠偏精确度越低,隧道轴线因此较难控制。

1.2 管片出现破损、开裂、错台等质量问题

在小半径圆曲线段隧道掘进时,需要使用不等的推进千斤顶分区油压来实现盾构机沿设计轴线掘进。盾构推进千斤顶各分区的压力差导致管片受力不均,管片会往推力大的一侧(圆曲线外侧)偏移,千斤顶对盾构管片会产生往圆曲线外侧的反作用力,使管片承受三向(纵向、横向和环向)的不均匀作用力,出现破损、开裂、错台等质量问题。

1.3 对土体扰动的增加易发生较大沉降量

小半径曲线隧道的施工与直线段施工相比,除直线段隧道施工原有的地层变形因素外,还将增加3个因素的影响。

1) 由于沿小半径曲线掘进,盾构机处于纠偏状态,实际掘进面为一椭圆形,实际挖掘量超出理论挖掘量。

2) 在采用适当技术和正常施工条件下,小半径曲线掘进将增加地层损失,地层损失达 $0.5\% \sim 1\%$ $8L2\pi R/(R+RC)$ (L 为盾构长度, R 盾构外半径, RC 盾构掘进曲线半径)。

3) 纠偏量较大,对土体的扰动亦大,容易造成较长时间的后期沉降。

1.4 测量工作难度大

由于隧道转弯半径小,圆曲线段测量通视范围缩小,使得自动导向系统移站频率加快,次数增加。硬岩中掘进同步注浆质量难以保证,二次补注浆前管片背后空隙率较高,盾构机连续纠偏,管片受振动容易发生移位,且在纵向不均力作用下管片会在一定推进距离内产生较大水平偏移,这都将导致自动测量系统测站坐标发生变化而出现测量偏差,误导掘进。

收稿日期:2012-02-12 修回日期:2012-03-14

作者简介:周舟,男,硕士,工程师,从事轨道交通建设技术管理工作,
zhouzhou81922@sina.com

2 工程实例

2.1 工程概况

广州地铁某项目隧道工程由3段盾构区间组成,左右线隧道总长3.898 km,采用两台 $\phi 6\,340$ 三菱土压平衡盾构机施工。整个工程左右线共包含12段曲线段隧道,其中圆曲线半径 $R\leq 300\text{ m}$ 的共9段,最小半径 $R=250\text{ m}$ 。

隧道采用预制装配式钢筋混凝土管片,管片内、外直径分别为5.5 m和6.2 m,管片厚度350 mm,混凝土设计强度C50,隧道管片采用错缝方式拼装。

2.2 工程地质及地面情况

本工程所有圆曲线段隧道埋深均在15.8~24.6 m之间,隧道洞身穿越的地层大部分为泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,局部穿越泥质粉砂岩强风化带。

本工程隧道沿线地面建筑物大部分为年代久远的中低层房屋,圆曲线段隧道上方亦多为路面及中低层楼房。需要注意的是,需进行桩基托换施工的B110、B112和A118也位于圆曲线段隧道上方, $R=250\text{ m}$ 圆曲线段隧道从高架桥66#~68#桥墩间穿过。各小半径圆曲线隧道的具体参数见表1。

表1 各小半径圆曲线隧道的具体参数

线路	曲线段	转弯半径/m	曲线长度/m	纵向坡度	穿越地层	地面情况
右线	I段	$R=300$ 右转	187.95	27.954‰上坡	砂砾岩,泥质粉砂岩	路面,低层建筑
	II段	$R=300$ 右转	412.534	2‰上坡→40‰下坡→13‰下坡	泥质粉砂岩	B110,B112,路面,低层建筑
	III段	$R=250$ 左转	201.408	2‰上坡→4‰下坡	泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	A118,路面,中低层建筑
	IV段	$R=250$ 右转	233.102	4‰下坡	泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	高架桥,路面
	V段	$R=280$ 左转	142.856	4‰下坡→10.569‰上坡	粉砂质泥岩	路面
左线	I段	$R=300$ 右转	187.95	27.922‰上坡	砂砾岩,泥质粉砂岩	路面,低层建筑
	II段	$R=250$ 左转	214.136	14.84‰上坡→2‰上坡	泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	地层建筑,路面
	III段	$R=250$ 右转	245.971	4‰下坡	泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	高架桥,路面,中低建筑
	IV段	$R=280$ 左转	124.519	4‰下坡→10.569‰上坡	粉砂质泥岩	路面

2.3 主要施工技术措施

2.3.1 解决轴线难控制的技术措施

为了控制好小半径曲线隧道的施工轴线,需要提高盾构机的纠偏灵敏度,而要提高盾构机的灵敏度,最有效的措施是缩短盾构机头的长度。在盾构机的中部增加铰接装置,可以使得盾构机的前筒、后筒与曲线趋于吻合,预先推出弧线态势,为管片提供良好的拼装空间。

图1所示为盾构机掘进形态的两种模式。进行曲线施工时,弯道内侧如要充分超挖,在几何学上以对象曲线的中心为 O (曲线中心,图中未显示)的情况下, $OA>\text{Max}(OG,OH,OD)$ 的关系如能得到满足,盾构机便可以掘进。这相当于模式a见图1(a)。这种情况,属于铰接角度 θ 不足,土体超挖量 δ 过多,盾构机后端的外侧点 D 和土体之间有缝隙,超挖量一旦增大,就会有盾构机位置不稳定的倾向。

模式b(见图1(b)), $OA=\text{Max}(OG,OH,OD)$ 的情况下,最适合铰接状态中的刀盘前部外端(A 点)和前筒后端(G 点)、后筒后端(D 点),其中任意一点在同一圆弧上,其余二点在此圆弧之内。此时的铰接角度称为界限铰接角度 θ_{cr} ,如果能给出曲线半径和盾构机的尺寸,便可计算出 θ_{cr} 。作为盾构机的构造,全部用此 θ_{cr} 值进行铰接的话,是最为理想的。此时,盾构机的外侧全体都接触到土体,施工上最为稳定,并且超挖量 δ 为最小值。

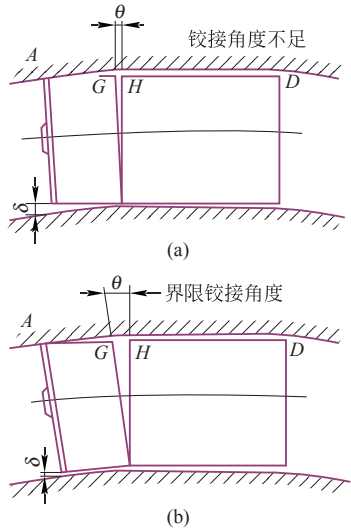


图1 曲线段盾构机掘进模式

在本工程中选用了带有铰接装置的三菱土压平衡式盾构机,该机头部长度约为8 625 mm,铰接处离刀盘端面的长度为4 900 mm,水平张角 $\pm 1.5^\circ$,垂直张角 $\pm 0.5^\circ$ 。该机设计定位的隧道最小半径为200 m,但利用盾构的铰接装置,辅以仿形刀的使用,能够完成出洞处缓和曲线

段最小半径为 178 m 的隧道施工任务。

2.3.2 解决盾构机推力不等、管片水平姿态容易超限的技术措施

2.3.2.1 控制盾构机推进千斤顶分区压力差及行程差

为了减少由于盾构机推力不均造成管片轴线及质量问题,在施工过程中,严格控制盾构机左右千斤顶压力差,使之不得超过 2 MPa,上下千斤顶压力差不得超过 5 MPa,行程差不超过 30 mm。

2.3.2.2 选用小管片,减小总推力

小半径曲线隧道中掘进,管片端面与该处轴线的法线方向在平面上将产生一定的角度 θ (见图 2),在千斤顶的推力下产生一个侧向分力。管片出盾尾后,由于受到侧向分力的影响,管片也会向圆弧外侧偏移。

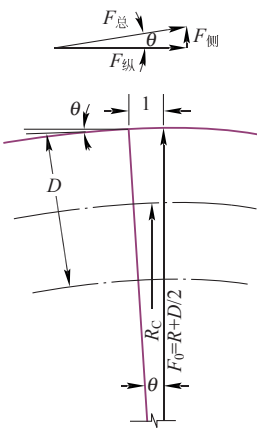


图 2 侧向分力示意图

侧向分力计算:

$$F_{侧} = F_{总} \sin \theta$$

$$\theta = \arctan \frac{L}{R_D} = \arctan \frac{L}{R_C + D/2}$$

式中: $F_{总}$ 为盾构千斤顶作用力; $F_{纵}$ 为垂直于管片环面的反作用力; $F_{侧}$ 为平行于管片环面的侧向反作用力; R_C 为圆曲线半径; D 为管片外径; L 为管片宽度。

由此可以看出,当 R_C 和 D 一定时, L 越小、 $F_{总}$ 越小,则 $F_{侧}$ 越小。因此本工程中,直线段采用 1.5 m 管片,而在 $R \leq 320$ m 的圆曲线段及其附近缓和曲线段均采用 1.2 m 管片,曲线段掘进时总推力控制在 5 000 ~ 6 000 kN。同时,为了保证工程质量,在特殊情况下,可采用最大转弯效果的 3、9 点位通缝拼装(但不允许超过三环连续通缝)。

2.3.2.3 曲线段盾构机走向预偏

为了控制隧道轴线最终偏差在规范要求的范围内,盾构掘进时,考虑给隧道预留一定的偏移量。使盾构沿曲线的割线方向掘进,管片拼装时轴线位于弧线的内侧,使管片出盾尾后受侧向分力向弧线外侧偏移时留有预偏量,而预偏量的确定往往需依据理论计算和施工实践经验的综合分析得出,同时需考虑掘进区域所处的地层情况。

本工程中,从曲线段前 20 环开始,至进入缓和曲线前,将盾构机水平姿态逐渐调至 + 30 mm;在缓和曲

线段,至进入圆曲线前,将盾构机水平姿态逐渐调至 + 50 mm;在圆曲线段,盾构机水平姿态保持 + 50 mm 掘进;过了圆曲线,进入缓和曲线段,盾构机水平姿态开始由 + 50 mm 逐渐回调至 + 30 mm;过了缓和曲线,盾构机进入正常直线段掘进,盾构机姿态要逐渐调回 - 20 mm ~ + 20 mm 的正常范围。

2.3.3 解决易发生较大沉降的技术措施

由难点分析可知,在小半径曲线掘进中,由于盾构纠偏量大,造成土体超挖和扰动,易引起后期较大沉降。相应的解决对策为进行动态管理和信息化施工,控制好同步注浆的注浆时间及注浆量,视具体情况,必要时进行二次补浆。

2.3.3.1 盾尾同步注浆

在施工期间,随着盾构掘进,脱出盾尾的管片与土体间出现建筑空隙,可通过设在盾尾的压浆管予以同步充填浆液。

同步注浆压注需结合施工情况、地质情况对压浆数量和压浆压力做到二者兼顾。一般情况下,每环压入量控制在建筑空隙的 130% ~ 180% (要注意小半径曲线隧道的注浆量要大于直线隧道注浆量),注浆压力约为 0.3 ~ 0.5 MPa。为约束管片往外偏移的趋势,注浆位置通常选择在路线转弯圆曲线外侧,圆曲线内侧可暂不注浆,但为了防止浆液回流堵塞注浆管,不注浆一侧的注浆管也必须及时清洗。压浆速度应与盾构掘进保持同步,即在盾构掘进的同时进行注浆,掘进停止后,注浆也相应停止。施工时,加强对盾构尾部地面的沉降监测,通过信息化施工,及时调整同步注浆量,确保地面不下沉。同步注浆浆液选用的配比见表 2。

表 2 同步注浆的浆液配比 kg

水泥	粉煤灰	膨润土	砂	减水剂	水
300	100	80	600	2	350

注:以上数据为每槽 0.75 m³ 的用量,单位为 kg。

2.3.3.2 二次补充注浆

为减少地面后期沉降,解决硬岩中管片上浮等问题,在管片脱出盾尾 5 ~ 6 环后,通过管片注浆孔向管片外周进行二次注浆。

二次补充注浆方法为:每间隔 5 环管片,进行 2 环管片整环双液注浆,以形成封闭止水环,再在两道止水环之间取中间一环进行补充注砂浆,采用同步注浆用的水泥砂浆,注上部左右两侧各一个孔位。

双液注浆配合比为:水泥浆液水灰比 = 0.8 : 1 (质量比);水玻璃溶液配比为水玻璃:水 = 1 : 3 或 1 : 1 (体积比),可根据施工实际调整;水泥浆液:水玻璃溶液 = 1 : 1 (体积比)。

注浆孔位置及顺序为:若盾构机姿态较好,无出现管片上浮现象,双液注浆先注圆曲线外侧孔位(如 9 点位),再顺时针注其余孔位形成密封止水环;若盾构机竖直姿态往上偏离较多,且管片出现上浮现象,则从 11 点位置开始注浆,再顺时针注其余孔位形成密封止水环;补充注砂浆先注圆曲线外侧孔位,再注圆曲线内侧孔位。

2.3.4 解决测量工作难的措施

小半径圆曲线隧道掘进对测量工作的要求更加精确和细致,必须做到勤测量、勤分析,为隧道掘进提供准确的数据,切实做好盾构机的“眼睛”。

1) 由于本圆曲线段隧道将使用 1.2 m 环宽的管片,管片由 1.5 m 环宽变为 1.2 m 环宽,自动导向系统的变化要研究清楚,并及时调整准确。

2) 根据以往施工经验并结合区间线路特点,在小半径圆曲线隧道掘进过程中,每 15 ~ 20 环自动导向系统移站一次。每掘进 10 环,对后视棱镜、测站和盾构机姿态进行人工复测。

3) 为及时了解二次补充注砂浆对管片姿态的影响,在二次补浆后对补浆环片进行及时监测。

3 实施效果

在采取了前述的施工措施后,本盾构隧道区间的整条隧道轴线均控制在 - 50 ~ 50 mm 范围之内,地表沉降控制在 - 18 ~ 6 mm 范围内,各项指标都达到了优良的工程标准。

4 结语

1) 在小半径圆曲线隧道盾构法施工中,既有和一

般隧道掘进相同的一面,又有其特殊性,因此要着重研究和控制有差异的一面。

2) 小半径曲线隧道盾构法施工中具有曲率大、半径小、难控制的特点,要选择好盾构机,在更小更严的幅度中进行各种参数优化。

参考文献

[1] 张凤祥. 盾构隧道[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
[2] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
[3] 孔凡强. 长距离小半径曲线盾构法地铁隧道施工关键技术[J]. 价值工程,2008(S1):86-90.
[4] 陈强. 小半径曲线地铁隧道盾构施工技术[J]. 隧道建设,2009(8):446-450.
[5] 陈大因,郑学峰. 小曲率半径隧道盾构推进的轴线控制[J]. 城市道桥与防洪,2009(5):132-134.
[6] 张颖,李铭军,何肖健. 小半径曲线盾构隧道设计及施工新技术[J]. 都市快轨交通,2010,23(10):75-79.

(编辑:郝京红)

Shield Boring Technology for Metro Tunnels on Curves with Small Radius

Zhou Zhou

(Guangzhou Mass Transit Rail Engineering Supervision Co., Ltd., Guangzhou 510010)

Abstract: Along with the development of metro tunnels, shield tunneling is increasing. Shield tunneling on curves with small radius involves complexities and difficulties, which directly affects the safety, quality and progress. This article analyzes the problems that usually occur under such condition. Based on the shield tunneling in a running tunnel on a small - radius curve, it introduces the tunneling technologies, which can be served as guidance to similar projects.

Key words: urban rail transit; shield tunneling; metro tunnel; curve with small radius; construction technology

(上接第 78 页)

Impact of Relevant Professions on the Maximum Train Speed of Metro Signal System

Du Shiyong Zhou Linming

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031)

Abstract: A variety of definitions on speed of signal system is encountered in cooperating with traffic fields, civil engineering fields, vehicle fields and so on during design of metro. Considering the characteristics of signal system together with engineering examples, the paper analyzs the impact of relevant fields on maximum operating train speeds for signal system to help the relevant fields to understand the concept of speed of signal system and to avoid non-desired low train speeds.

Key words: metro; signal system; maximum train speed; metro speed definition