

大坡度并小半径曲线段盾构操作与纠偏施工控制研究

张成龙

(中铁十八局集团第四工程有限公司,天津 300222)

摘要:以天津地铁三号线水上北路站—吴家窑站盾构区间左线施工为背景,针对盾构施工区间遇到的大坡度并小半径曲线的综合难题,利用施工过程中积累的各种数据,采用受力分析和数理统计的方法,分析了盾构推进过程中各项参数对掘进的影响,探讨了盾构掘进过程中的操作与纠偏技术,得出了正确分析所采用推力的大小和方向、铰接的使用以及在特殊曲线段设置纠偏曲线是大坡度并小半径曲线段盾构操作与纠偏的重点。

关键词:地铁隧道;盾构;推力;铰接;小半径;大坡度;纠偏

中图分类号:U455.42 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)09-0080-05

Shield Operation in the Large Slope and Small Radius Curve Segment and the Research on Rectification Construction Control/ZHANG Cheng-long (China Railway Eighteen Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: According to the comprehensive problem of large slope and small radius curve in the construction of a shield interval of Tianjin metro line 3, by the use of variety of data accumulated in the construction process, with the stress analysis and mathematical statistics, the analysis is made on the influence of the variety of data to shield tunneling, and the discussion is made on the shield tunneling operation and rectification technology. It is realized that the correct analysis on the thrust force and direction, the articulated structure and correction curve setting in the special curve segment is the focus for shield operation and rectification in large slope and small radius curve segment.

Key words: subway tunnel; shield; thrust force; articulated structure; small radius; large slope; rectification

城市的发展,带动了轨道交通建设的发展,在轨道交通线路的选择上,由于受规划及建、构筑物的制约,使得轨道交通的线形越来越复杂。小半径曲线和大坡度隧道线形虽不属良好,但在应用上将会越来越多。本文就以天津地铁三号线水上北路站—吴家窑站盾构区间的 30‰ 的坡度和 305 m 半径转弯为例,分析了大坡度推进和小半径转弯盾构操作与纠偏的方法。

1 工程概述

天津地铁三号线水上北路站—吴家窑站盾构区间左线线路平面呈双 S 形,全长 878.827 m,最小曲线半径为 305 m,最大曲线半径为 1000 m;隧道纵断面呈 V 形,最小坡度为 2‰,最大坡度为 30‰,隧道覆土深度 9~22 m。沿线主要穿越天塔湖、卫津河和气象里、平山里、德才里等 8 幢建(构)筑物。从 DK9+060.321~533.177,盾构隧道处于半径为 305 m 的曲线和 30‰ 下坡向 30‰ 上坡过渡段以及 30‰ 的上坡上,且上层有气象里、平山里等 4 幢建筑物,其中建筑物间距最大 34.620 m,最小 13.636 m,建

筑物为 20 世纪 70 年代修盖,多为连体楼,以条形、筏片基础为主,对沉降比较敏感。该地段为河床~河漫滩人工填土层,地质为易液化淤泥质粉质粘土层、粉质粘土层、粉砂层,可塑性较差。

2 大坡度并小半径曲线段盾构操作与纠偏

在大坡度并小半径曲线段,盾体沿着曲线前进时的轨迹并不是完全与设计线路拟合的,而是呈现近似弧线的多段线的组合,为不规则曲线,且盾首与盾尾在不同的轨迹线上。盾构的姿态为不规则曲线,这是与盾构操作及纠偏分不开的,通过受力分析和研究盾构的构造可以得出这是由推力、铰接、推进速度及刀盘转速、扭矩等众多推进参数决定的,因此,将这些参数结合实践通过数字和理论分析科学地统一起来,即可保证盾构顺利通过大坡度与小半径曲线。

2.1 盾构推进参数对掘进的影响

2.1.1 推力对掘进的影响

在小半径平曲线和大坡度竖曲线段分别确定左右与上下两侧油缸的推力差,合理确定总推力,提前

收稿日期:2013-04-16

作者简介:张成龙(1984-),男(汉族),天津人,中铁十八局集团第四工程有限公司南京地铁项目部副总工程师兼盾构总工程师,测绘工程专业,从事地铁施工技术工作,天津市津南区中铁十八局大院东区 9-3-202 号,31349824@qq.com。

设计纠偏曲线,采用勤纠缓纠、慢速急转的方法来达到盾构转弯的要求,并且合理的确定推进速度,不宜过快,这样可以保证推进的连续性,禁止出现推三(分钟)停一(分钟)的情况发生,同时合理使用超挖刀和泡沫剂等土壤改良剂,避免刀盘被卡死或结泥饼。在小转弯半径掘进时,推力越大侧向分力也越大,管片侧向位移越大,给纠偏造成一定的困难,所以要充分挖掘盾构有效推力,避免不必要的推力损失。下面将抽取实际施工过程中 305 ~ 400 环推力与姿态关系数据(表 1),由于推进过程中盾首姿态变化要比盾尾姿态变化更明显,故表 1 选取的为盾首姿态。

表 1 推力与姿态实际关系统计表

环号	推力/kN	盾首平偏/mm	盾首垂偏/mm
305	10100	-10	-1
310	9360	4	2
315	11010	11	4
320	11540	14	6
325	13900	-15	5
330	12780	-22	3
335	14040	7	7
340	15040	-18	9
345	15320	-25	13
350	15120	-30	11
355	15890	-27	18
360	16880	-39	19
365	16110	-45	22
370	18910	-52	36
375	17770	-43	44
380	19320	-50	39
385	18780	-42	45
390	17670	-38	50
395	17130	-40	44
400	17540	-44	48

这是因为在小半径曲线段或大坡度变坡段掘进时,在推进油缸靴撑与管片之间产生一个微小的侧向滑移量或侧向滑移的趋势,导致对盾体产生一个横向侧分力。这种侧向滑移趋势随着推力的增大而逐步加大,如图 1 所示。由图 1 可知,在左向转弯 $R=305\text{ m}$ 曲线上掘进时,盾构总是要保持一个向左的夹角(约 0.50°)向前推进,推进 1 环(1.2 m)对盾体的横向侧分力 $f=F\cos 0.50^\circ$,推力越大,掘进半径越小,则横向侧分力 f 越大,相应姿态变化则越大。

从表 1 中数据可以看出,盾构在水吴区间这种⑥、⑦淤泥质粉质粘土地层推进时,推力应控制在 $13000\sim 19000\text{ kN}$,在特殊地段需要严格控制推力时,推力可减小到 $9000\sim 13000\text{ kN}$ 。

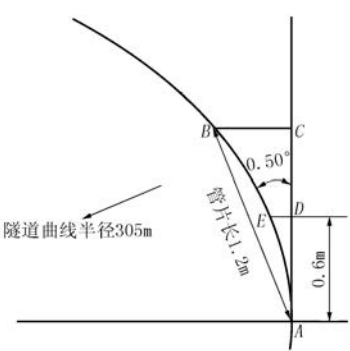


图 1 盾构推进一环分力变化示意图

2.1.2 铰接对掘进的影响

盾构铰接分为主动铰接和被动铰接 2 种,海瑞克盾构使用的为被动式铰接,位于中盾和盾尾结合处,这就说明在转弯或变坡时,前盾、中盾和盾尾在铰接的调整下分别位于两段直线上,形成一定的夹角,这样就可以使盾体实现达到最大转弯和变坡的角度,确保顺利推进。因此,铰接拉长或缩短与纠偏息息相关,在小半径曲线段纠偏过程中一侧的被动铰接一旦拉得过长,会使盾构姿态发生较大的变化,收铰接会使盾尾间隙变小,管片与盾尾处的摩擦力增大,卡住盾尾,达不到纠偏的目的,还会使姿态恶化。所以,在分析盾构受力和盾尾间隙的数据后,根据实际情况再确定铰接的长度,收、放铰接时间不可太长,压力不可过高(不超过 300 kPa),尽量把盾构姿态变化的趋势从正值纠到负值(或负值到正值),并使之过 2 个趋势点再收铰接,这样会将姿态调整到有利的一面后,此时收铰接才达到姿态纠偏的目的^[1]。

掘进时确保楔形环面尽量始终处于曲率半径的径向竖直面内,另外在实际推进过程中,小半径曲线段掘进过程中铰接的伸长量达到了 158 mm ,已经超过了铰接的最大限度(150 mm),将会造成拉断铰接、盾尾与中盾分离的严重后果。故在操作中铰接的伸长量严格控制在 145 mm 以内。

2.1.3 速度对掘进的影响

在通过含水丰富地层时,比如水吴区间盾构穿越卫津河与天塔湖时,要全速前进,在保证出土量和注浆充盈系数的前提下,尽可能提高掘进速度,快速通过含水层,避免在富含水层的地层中出现喷涌事故。同样在通过建筑物时,要快速前进,在出土量、注浆量和注浆压力有保证的前提下,尽可能提高掘进速度,这样做可以避免对土体造成过大的扰动,有效地控制了建筑物的沉降。但是为了利于盾构的操作与纠偏,盾构在过大坡度和小半径曲线时要慢行,

掘进速度严格控制在 20 mm/min 左右,太快和太慢都会对盾构姿态和地面沉降造成影响。

2.1.4 刀盘转速及扭矩对掘进的影响

设定刀盘的转速,首先要考虑地质,确保刀具能与掌子面的充分切削,同时注意推力的调整,以提高或降低刀具对土体的贯入度。提高泡沫剂的比例和发泡率来调整刀盘扭矩,使刀盘扭矩 $\geq 3500 \text{ kN} \cdot \text{m}$,扭矩过大时,还要通过降低推进速度和刀盘转速的措施来调整,确保刀具不被严重磨损。

为保证较好的盾构姿态和地面沉降,施工中统计的数据显示,刀盘转速在 0.7 r/min 左右、扭矩 $< 3500 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 下过大坡度和小半径曲线最有利,不仅能保证速度的稳定性,也可以比较容易控制纠偏的尺度。

2.1.5 土压力对掘进的影响

施工中可以根据经验公式对正面平衡压力进行计算:

$$P = k_0 \gamma h$$

式中: P ——平衡压力(包括地下水); γ ——土体的平均重度, kN/m^3 ; k_0 ——土的侧向静止平衡压力系数,一般取 0.6~0.8; h ——隧道埋深。

由上式可以得出土仓压力主要是与土体的平均重度和隧道埋深有关。在淤泥质粉质粘土层且连续穿越建筑物这种地层中,此时的土仓压力要比盾构在别的地层中穿越时复杂;由于土体的流塑性大,土仓不仅受到正上方的压力,并且由于土体流动侧方及下方土体的压力也增大了许多,地面建筑物的自重又增大了正上方的压力,隧道为深埋隧道,造成施工中土仓压力比正常段施工时增大许多,较大的土仓压力又会减低盾构掘进速度。

施工中统计的数据表明,在深埋段、淤泥质粉质粘土层、穿越建筑物、大坡度与急转弯这种施工条件下,土仓压力保持在 0.3~0.33 MPa 时,可以保证较好的盾构姿态和地面沉降,但是此时油缸总推力会达到 20000 kN 以上。

2.1.6 掘进参数之间的相互联系

盾构推进各参数之间是互相关联、相互影响的,与盾构推进姿态的控制息息相关。如各千斤顶的顶力及总推力、盾构土仓土压力设定值、刀盘转速及扭矩、盾构推进速度、出土量等,每一个参数都可以通过建模计算出理论值,但理论值只能起到参考的作用,只有在施工过程中,不断积累施工参数,总结各参数的变化规律,利用科学的方法,归纳总结出各参数之间的关联,归结出一套操作与控制法则,来指导

盾构推进及纠偏^[2],所以在施工过程中应遵循以下几点:

- (1) 根据埋深和土质,合理设置土压力;
- (2) 准确计量各环出土量,防止超挖和欠挖;
- (3) 严格控制刀盘速度和刀盘扭矩;
- (4) 根据量测的盾尾间隙数据,合理收放铰接长度;
- (5) 根据姿态变化曲线,合理调整各千斤顶的顶力及总推力。

盾构是一个刚体,且体积巨大,一旦姿态产生偏差,纠偏是比较困难的,因此在调整盾构推进参数时,要注意“微调”和“及时”,不可操之过急,确保顺利推进。

3 下坡向上坡过渡与小半径转弯同时出现时盾构的操作与纠偏

盾构从 30‰下坡向 30‰上坡过渡时,同时还处于小半径左转曲线上,整个过程中,以盾首为例,需要在垂直的方向上,在有限的距离之内,保证盾首从之前低于盾尾 3 cm/m 要转变成为高于盾尾 3 cm/m,即盾首的纠偏在这一段上达到 6 cm/m,同时盾首还需向左纠偏 1.2 cm/m。

3.1 这样的条件下的危害

(1) 位于盾构右下的铰接极有可能因为纠偏幅度过大而拉开,造成铰接处透水、漏沙事故,施工证明,此时右下处的铰接伸长量可达 158 mm,超过了设计长度 150 mm;

(2) 由于盾首与盾尾的交角过大,在变坡点处推力的作用会被分散导致没有足够的推力而使盾构抛锚,无法继续掘进;

(3) 纠偏量过大需要有更大的推力,从而会使管片破损和上浮加重;

(4) 纠偏过急会导致管片的纠偏速度跟不上盾构的纠偏速度,从而造成管片与盾尾的卡壳,使得盾构无法继续掘进;

(5) 会造成土体超挖严重,并且曲线外侧的超挖量大于内侧的超挖量,在土压的作用下使得内侧土体向外侧移动,造成地面沉降,施工实践证明,此时地面建筑物的沉降 -1.8 mm/天。

3.2 针对以上问题实行的措施

(1) 盾构掘进时分别在设计竖曲线上方、设计平曲线内侧(靠圆心侧)设计出一条纠偏曲线,形成反向预偏移,用于指导施工,可以减少每次掘进时的纠偏量。施工实践证明,竖曲线的纠偏曲线高于设

计轴线 30~40 mm,平曲线的纠偏曲线向内 40~50 mm 可达到最好效果,见图 2。

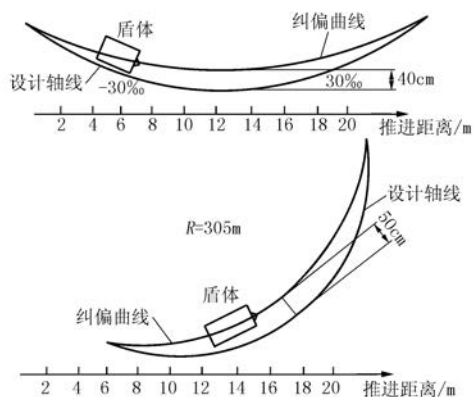


图2 纠偏曲线示意图

(2)在设计曲线变化前 15 m 处提前进行盾构姿态的纠偏,也可以减少每次掘进时的纠偏量。

(3)在变坡开始前 15 环处,根据实际情况可连续使用转弯环提前纠偏管片,使得下方管片的楔形量大于上方管片约 10 cm,可以大大缩短盾构下方的铰接伸长量,从而达到保护铰接的目的。实践证明,施工时在科学的推算出合理的管片拼装点位后,最多可连续使用 3 环转弯环用于纠偏。

(4)施工时在下坡段适当的减少同步注浆量,防止盾体被浆液包住而无法前进。在曲线外侧增大注浆量,阻止由于超挖引起的土体位移。

(5)在盾构通过这一区域后,马上组织进行二次双液浆补浆。

在实施了以上措施后,使得盾构右下铰接伸长量缩至 145 mm;减少了管片破损与上浮现象;保证了掘进速度;控制了地面建筑物的沉降,使得沉降值减至 -0.5 mm/天。

4 盾构纠偏影响因素及纠偏方法

4.1 影响盾构纠偏的因素

(1)盾尾间隙。间隙过小,将会增大管片对盾尾的作用力,影响纠偏,应通过设置盾构参数和合理的管片选型,调整盾尾间隙。

(2)管片选型。合理的管片选型可以调整千斤顶的行程差,保证盾构姿态。

(3)千斤顶的行程差。千斤顶的行程差是调整盾构姿态的关键。

(4)铰接的收放量。主要用来调整盾构姿态的趋势。

(5)纠偏曲线的设计。即设置盾构提前转弯或变坡的提前量。

(6)推进速度。合理设置推进速度,做到勤纠缓纠。

4.2 盾构纠偏的解决方法

4.2.1 主要纠偏方式

在施工纠偏中,水平纠偏与垂直纠偏经常同时出现,处理好二者的关系很重要,实际中垂直纠偏要比水平纠偏困难,因为天津地铁施工使用的管片主要是针对水平纠偏的,对于垂直纠偏只能是对管片拼装点位的改正从而达到纠偏的目的。所以,先把垂直姿态稳住,进行水平纠偏后再进行垂直纠偏。同时纠偏效果不是很好,有的时候还会出现推进压差不够的情况。但是在纠偏趋势都相同的特殊情况下,也可同时纠偏。例如施工时盾构姿态偏右,需向左纠偏,同时偏下,需向上纠偏,此时可把管片楔形量最大部位拼装至右下即 5 点位,同时增大右侧与下侧油缸行程,就可以同时达到水平与垂直纠偏的目的^[4]。

下面讨论 2 种纠偏方式。

(1)盾首缓纠、盾尾大纠。盾构的姿态变化轨迹是以盾首为基准点,盾尾进行扇形展开,主要步骤是调整千斤顶油缸压力使千斤顶产生行程差,同时拉伸铰接,用来调整盾尾姿态。

(2)盾尾大纠、盾首缓纠。盾构的姿态变化轨迹是以盾尾为基准点,首先通过调整千斤顶油缸压力使千斤顶产生行程差,使盾构姿态纠偏达到转向的趋势,从而调整盾构姿态。

4.2.2 同步注浆及二次注浆

在淤泥质粉质粘土层中大坡度急转弯掘进时,确保注浆质量,合理调整浆液量、浆液稠度、注浆压力和注浆方法,必要时增加快凝剂和膨胀剂,可以尽早地固定管片,改善管片的受力状态,防止推力产生各种侧向负面的分力。盾构于大坡度和转弯时注浆方式主要如图 3 所示。

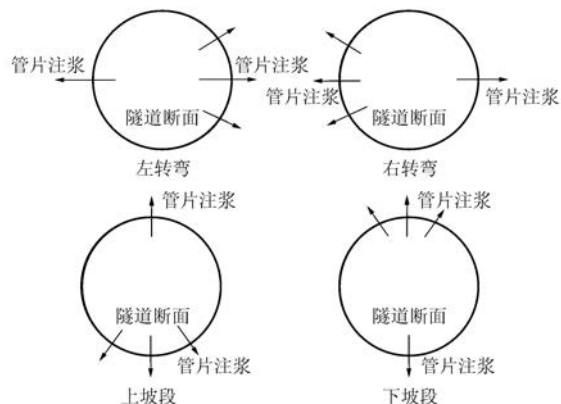


图3 隧道在大坡度和左、右转弯时注浆方式

4.2.3 跟踪监测

在急转弯地段施工时加大人工复测频率,统计管片上浮或左右偏移量,同时增加检核施工控制点精度,减少移站后出现的方位偏差,并且将信息及时反映给盾构操作人员,以便调整掘进参数。

开启盾构铰接装置,根据设计曲线半径及盾构直径计算铰接角度,使得前盾与盾尾张角与曲线吻合,预先推出弧形趋势,为管片提供良好的拼装空间。随着盾构进入缓和曲线,逐步减小水平张角,直至直线段处,张角完全闭合,进入直线段掘进。在掘进 $R=305\text{ m}$ 曲线段时,实际中水平张角为 0.5° 。

盾构在通过平曲线和竖曲线时,应对盾构千斤顶的推进油缸进行分区控制,以便使盾构按预定的方向偏转^[5]。

4.2.4 做好管片选型

小半径曲线转弯的管片选型主要依据是线路轴线,以区间的 305 m 半径曲线段为例,可计算出转弯时的管片排版如图4所示。

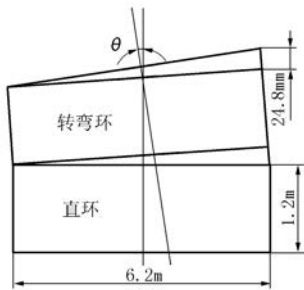


图4 直环、转弯环关系图

转弯环偏转角的计算公式:

$$\theta = 2\gamma = 2\arctg(\delta/D) \quad (1)$$

式中: θ ——转弯环的偏转角; δ ——转弯环的最大楔形量的一半,取 24.8 mm ; D ——管片直径,取 6.2 m 。

将数据代入式(1)计算得出 $\theta = 0.458272^\circ$ 。

根据圆心角的计算公式:

$$\alpha = 180L/(\pi R) \quad (2)$$

式中: L ——段线路中心线的长度; R ——曲线半径,取 305 m 。

而 $\theta = \alpha$, 将数据代入式(2), 得出 $L = 2.4395\text{ m}$ 。

式(2)表明,在 305 m 的圆曲线上,每隔 2.4 m 要用一环转弯环。天津地铁采用的管片长度为 1.2 m ,即在 305 m 的圆曲线上,加上纠偏管片拼装点位变化,直环与转弯环的拼装关系为:2环直环+1环转弯环。

为满足急转弯施工要求,管片环宽 1.2 m ,转弯环楔形量为 49.6 mm ,施工过程中要严格管片选型程序,保证管片拼装质量。本段施工时,采用2个直环与1个左转弯环配合,同时注意盾尾间隙的变化进行适当调整。盾尾间隙标准值为 45 mm ,在圆曲线段掘进时盾尾间隙变化较大,一般将盾尾间隙保持在 $45 \pm 25\text{ mm}$ 范围内,一旦超过规定范围值即需要使用转弯环进行调整。

以上管片选型只是针对于小半径曲线时设定,当盾构在 30‰ 的纵坡上垂直姿态不好时,也需要适当加用转弯环,所以必须根据实际情况实际分析,最后达到盾构纠偏的目的。

5 结语

根据不同的地质情况,合理的选择掘进参数是发挥掘进机快速、高效特点的重要手段。盾构作为隧道机械化施工的先进设备,其操作仍离不开丰富的经验,盾构司机需在实际操作中不断积累经验,根据地层的变化情况,随机应变,作出合理的参数选择,不断提高驾驭掘进机的水平。

参考文献:

- [1] 胡军凯. 浅析盾构过小半径曲线段施工技术[J]. 隧道与地下工程, 2010, 3(5): 106-108.
- [2] 董宇. 浅析盾构机过小半径曲线段的操作与纠偏[J]. 交通科学与工程, 2010, 2(6).
- [3] 胡新朋, 孙谋, 王俊兰. 盾构隧道穿越既有建筑物施工应对技术[J]. 现代隧道技术, 2006, (6): 60-64.
- [4] 吴波, 阳军生. 岩土隧道全断面掘进机施工技术[M]. 安徽合肥: 安徽科学技术出版社, 2008. 137-140.
- [5] 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. 312-315.