

# 软硬不均地层盾构姿态控制及管片防裂损技术

谭忠盛<sup>1</sup>, 洪开荣<sup>2</sup>, 万姜林<sup>2</sup>, 王梦恕<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 中铁隧道集团有限公司, 河南 洛阳 471009)

**[摘要]** 广州地铁二号线越一三盾构区间的地质软硬不均, 加之曲线多、坡度变化大, 盾构掘进技术难度大, 掘进方向与盾构姿态的控制困难, 防止管片开裂和局部破损以及错台具有一定的难度。为了有效地控制掘进方向和盾构姿态, 研究了盾构掘进方向发生偏差的原因, 并对越一三区间盾构掘进的偏差实测数据进行具体分析, 得出了偏差的原因和规律; 研究了盾构掘进姿态的控制方法。为了防止盾构管片的裂损, 采用数值模拟方法研究管片裂损的规律及其主要因素, 提出了有效控制管片裂损的主要方法。

**[关键词]** 软硬不均地层; 盾构; 姿态控制; 管片裂损; 管片错台

**[中图分类号]** U455.3<sup>+</sup>1; U455.43 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)12-0092-05

## 1 概述

地铁盾构掘进方向控制, 目标是根据区间隧道的设计线形, 通过对盾构推进油缸的行程及摆动与滚动的有效控制, 使盾构的空间位置和姿态趋近线形参数(DAT)数值, 并使其偏差达到最小。控制盾构掘进方向的主要因素是推进油缸的单侧行程, 其次是控制铰接油缸的单侧行程, 使盾构的运动轨迹和盾尾与管片的相互约束达到最优状态。

由于难以准确地建立盾构在推进过程中的数学模型, 传统的控制方法难以在盾构的姿态控制中得到应用。目前, 大多是依靠操作者的经验, 只有日本、法国、德国等盾构技术发达的国家对此课题有研究, 提出了用模糊自动控制理论、人工智能方法等进行掘进管理。在国内, 研究的还较少。

本文结合广州地铁二号线越秀公园一三元里区间盾构隧道, 研究盾构掘进方向的控制、隧道的线形控制、管片开裂、局部破损与拼装错台问题。

越一三区间隧道地层软硬不均, 其中强度较高稳定性好的中风化岩8号地层和微风化岩9号地

层约占70%, 岩石单轴抗压强度最高达到78.2 MPa。同时洞身还通过强风化岩7号地层、全风化岩6号地层(呈土状)、残积土层5号地层和断层破碎带等不稳定地层, 这些地层约占30%, 地层分界面起伏大, 软硬交错, 并且岩层中普遍含砾石, 对刀具磨损严重。

越一三区间线路多为曲线, 约占全长的51%(未计缓和曲线长度), 线路的最大下坡坡度为3%, 坡长370 m, 上坡坡度为2.691%, 坡长450 m, 其余坡度稍小。

在软硬不均地层, 加之曲线多、坡度变化大, 要保障盾构掘进顺利进行技术难度大, 掘进方向与盾构姿态的控制困难; 且在此地层中施工如何保护管片, 防止管片开裂和局部破损以及错台具有一定的难度。

## 2 掘进方向偏差的原因分析

### 2.1 掘进方向偏差的原因及控制

影响盾构掘进方向偏离线形参数的主要因素及其控制方法:

**[收稿日期]** 2006-03-06

**[作者简介]** 谭忠盛(1963-), 男, 广西蒙山县人, 北京交通大学教授, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作; 洪开荣(1965-), 男, 湖南茶陵县人, 中铁隧道集团教授级高工, 主要从事隧道施工和研究工作

1) 盾构自身的因素。盾构主机的质量分布可形象地描述为“头重脚轻”，只依赖掘进推力与工作面的摩擦力不足以维持盾构的姿态，因此往往盾构自身具有“低头”的倾向。可通过加大盾构下部推进力，维持盾构的平稳前行。

2) 地质因素。在施工过程中由于断面内岩层软硬不均，推力和扭矩变化较大，盾构主机有着向地层较软一侧偏移的惯性。应预先掌握掘进面的地层分布状况及其地层分界面的变化情况，制定初步的掘进参数计划。

3) 人员的操作水平。由于操作人员的技术水平和工作责任心的不同，往往会导致掘进方向发生较大的偏差，因此应制定严格的操作规程。

4) 盾构前体与盾尾通过铰接油缸连接的中折转角影响。通常要求盾尾与未脱离盾尾的管片环之间的空隙沿周边均匀，有利于掘进方向的控制，也有利于掘进方向的调整。中折有随动和固定两种，固定方式对管片选型有利，随动方式对掘进方向控制有利。

6) 导向系统的误差包括：控制点误差、设备系统误差和测量环境引起的误差。对于控制点的误差，主要是通过多级测量复核予以消除。

**2.2 越一三区间盾构掘进方向偏差分析**

根据上述偏差控制方法进行施工，得到三一火区间、火一越区间盾构施工偏差的统计如图 1、图 2 所示。

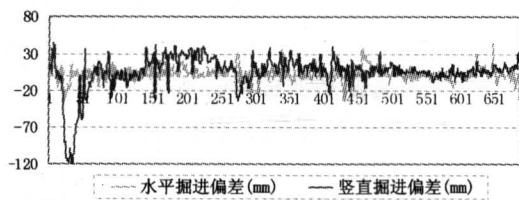


图 1 三一火区间隧道掘进方向偏差统计  
Fig.1 Excavation direction warp stat of San Yuanli-Railway station zone

根据偏差统计数据如下分析如下：

1) 由图 3 可以看出施工前期的掘进方向偏差较大，主要原因是前期对控制方向的限制标准和纠偏方法没有制定切实可行的规程，对盾构的机况和设备性能不很熟悉；地层软硬差异较大掘进时方向控制难度大，容易发生“蛇行”状。后期的盾构掘进方向偏差得到了有效的控制，基本上都控制在  $\pm 50$  mm 的范围内。

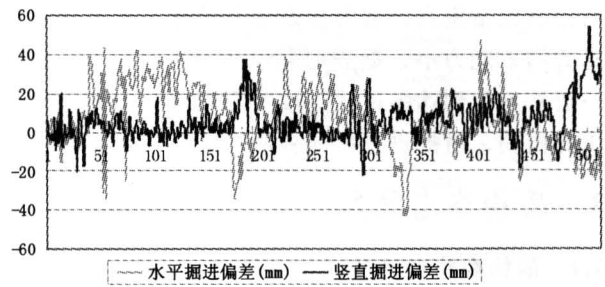


图 2 火一越区间隧道掘进方向偏差统计  
Fig.2 Excavation direction warp stat of Railway station-Yuexiu zone



图 3 激光指向与测量  
Fig.3 Laser direction and measure

2) 图 4 可以看出水平方向上偏差的绝对值比前一区间大一些，但相对波动范围较小，主要原因是发现了掘进方向在合理的偏差范围内缓慢纠偏，对管片隧道的成形有利，因此掘进方向不宜控制过严，也即要“顺变”。

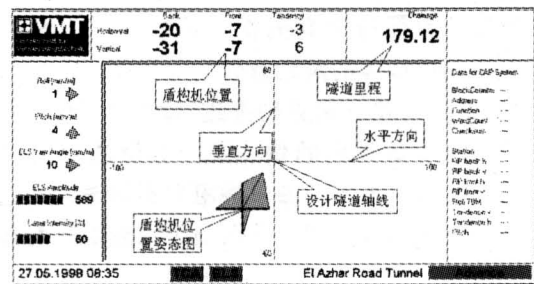


图 4 VMT 导向显示平台  
Fig.4 VMT display flat

3) 软硬交互地层中掘进方向水平偏差较垂直方向偏差易于控制，因为地层的软硬差异在垂直方向大于水平方向，且盾构自重对垂直方向的掘进控制也有一定的影响。

4) 在软弱地层中，盾构始发和到达阶段的方

向控制也是重点, 因为始发、到达施工时周边对盾构的约束能力小, 掘进时盾构易于“漂移”, 而且一般始发与到达掘进的速度相对较慢, 容易产生土压的波动, 对掘进方向的控制造成一定的难度。

### 3 盾构姿态控制

#### 3.1 盾构姿态自动监测

盾构配置用于掘进方向控制的主要硬件为激光导向系统 (VMT), 主要用于不间断地监控掘进方向及掘进方向的变化, VMT 的工作原理是由激光经纬仪发射出一束可见红色激光束, 激光束照射到 ELS 靶, 光束相对于 ELS 靶的位置已精确测定, 水平角是由激光经纬仪照射到 ELS 靶的入射角决定的。根据 ELS 靶的中心和盾构的主机轴线平面几何关系, 就可以确定盾构的轴线。再把隧道设计中心线 (DTA) 的坐标 (米/个) 输入隧道掘进软件, 就可以全天候的动态显示盾构主机和隧道设计中心线 (DTA) 的关系, 如图 3、图 4 所示。

#### 3.2 盾构姿态偏差的调整

1) 滚动偏差。开挖掌子面推进的支反力, 是由管片提供, 刀盘切削土体的扭矩主要由盾构壳体与洞壁之间形成的摩擦力矩来平衡。在稳定性好的岩层, 盾构掘进机壳体与洞壁之间只有部分摩擦力提供摩擦力矩。当摩擦力矩无法平衡刀盘切削土体产生的扭矩时将引起盾构体的滚动, 过大的滚动会影响管片的拼装, 也会引起隧道轴线的偏斜。因此, 在盾构支承环处增设了一对横向撑靴, 必要时可以使用撑靴提高盾构抵抗扭转的能力。特别是在硬岩地段, 为保持较高的掘进速度, 使用横向撑靴, 对限制盾构体的滚动有较大的作用。

2) 方向偏差。在盾构推进过程中, 不同部位推进千斤顶参数设定的偏差易引起掘进方向的偏差。盾构表面与地层间的摩擦阻力不均衡, 开挖掌子面上的土压力以及切口环切削欠挖地层所引起的阻力不均衡, 也会引起一定的偏差。

开挖掌子面岩层分界面起伏较大, 掌子面软硬不均, 也易引起方向偏差。即使在开挖掌子面土体的力学性质十分均衡的情况下, 受盾构刀盘自重的影响, 盾构也有低头的趋势。因此, 在掘进的过程中, 应对竖直方向的误差进行监测与控制。

3) 方向调整。根据操作规程调整掘进方向。

### 4 管片开裂及局部破损原因分析

#### 4.1 管片裂损及错台情况

从广州地铁一号线和二号线的情况分析, 管片裂缝主要出现在管片的环向接缝面附近, 而且这些裂缝会出现在相邻管片环的环纵交错处, 尽管裂缝是局部的不影响管片结构的使用, 但是会对隧道的防水造成影响, 如图 5 所示, 只有少数为贯通裂缝, 这些裂缝大多与隧道轴线方向基本平行。

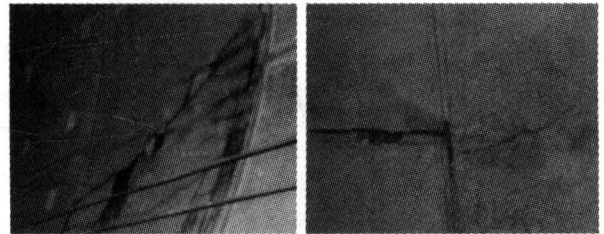


图 5 管片接缝处的裂缝

Fig.5 Crack at segment joint

管片拼装错台现象主要发生在环向连接缝处, 而且容易发生大的错台, 造成管片环缝处的管片破损; 纵缝处的错台出现较少且小, 破损也少。越一三区间管片环缝错台及纵缝错台统计汇总如表 1 所示。管片端部破损比例为 1.21%, 管片渗漏水比例为 0.83%。

表 1 管片错台统计汇总

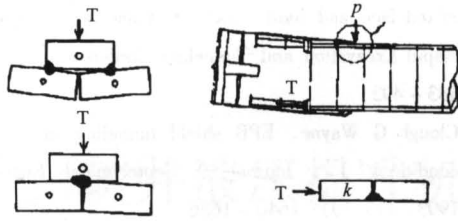
	Table 1 Dislocation Stat of segment %				
	0~5 mm	6~10 mm	11~15 mm	16~25 mm	>26 mm
环缝	78.4	16.9	3.3	1.2	0.1
纵缝	95.1	4.2	0.4	0.2	0.1

#### 4.2 管片的裂缝及局部破损的原因分析

引起管片裂缝的原因主要有三方面: a. 管片的设计质量, 主要与管片的配筋设计有关, 特别是管片接缝面的构造配筋; b. 管片制作过程中的施工质量, 主要环节有混凝土自身的品质、振捣工艺、蒸汽养护技术、管片脱模后的养护等; c. 现场施工造成的管片开裂或破损主要受管片拼装质量的影响。

管片在组装时如发生错缝或开缝, 那么组装中的管片和已组装好的管片的角部就可能呈点接触或线接触, 这些地方一旦承受千斤顶的压力就会发生残缺或开裂 (如图 6), 当盾构的方向与管片的方向产生差异时, 会发生盾构与管片争高低 (挤压) 的现象, 导致管片的损伤或变形, 管片宽度越大这种现象的发生率就越高。

#### 4.3 施工过程管片裂损力学分析



T: 油缸推力; p: 集中荷载; K: 管片

图 6 管片开裂和破损的主要原因示意图

Fig.6 Main cause display of segment crack

4.3.1 计算模型 国内外主要有四种设计计算方法：将管片环作为刚度均匀的环来考虑称为惯用法；将管片环考虑为弯曲刚度均匀的环称为修正惯用法；将管片接头作为铰结构来考虑，地基与管片环之间的相互作用用地基弹簧来表示，称为多铰环法；将管片主截面模拟成梁、将管片环向接头模拟成旋转弹簧，将环径向接头模拟成剪切弹簧，将地基与管片环之间的相互作用用地基弹簧来表示，称为梁-弹簧法。

采用第四种方法分析越一三区间隧道施工过程中管片的受力情况，取 10 环管片进行计算，考虑了轴向力、竖向力、周围土压力、注浆压力、重力、集中力等联合作用。

#### 4.3.2 有限元计算结果分析

1) 千斤顶推力变化时。为比较千斤顶推力大小的影响，工况组合中选取管片背后注浆压力为 0.2 MPa，千斤顶偏角为 2°。计算结果为：千斤顶推力为 8 000~18 000 kN 时，管片的最大等效拉应力为 6~5.8 MPa，出现在第五—七环管片内侧边缘。

2) 千斤顶角度变化时。为比较千斤顶角度大小的影响，工况组合中选取管片背后注浆压力为 0.2 MPa，千斤顶推力为 12 000 kN。计算结果为：千斤顶与掘进方向夹角为 0~3°时，管片的最大等效拉应力为 5.9~5.8 MPa，出现在第五—七环管片内侧边缘。

3) 注浆压力变化时。为比较管片背后注浆压力大小的影响，工况组合中选取千斤顶推力为 20 000 kN，千斤顶偏角为 2°。计算结果为：注浆压力从 0.2 MPa 到 0.4 MPa 变化时，管片的最大等效拉应力均为 5.8 MPa，出现在第五—七环管片内侧边缘，等效拉应力分布如图 7 所示。

4) 考虑盾尾作用于管片的集中力效应。在不考虑注浆压力、千斤顶推力的作用下，单独考虑集

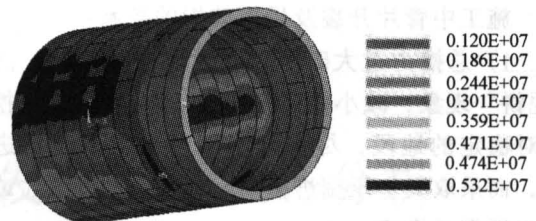


图 7 施工过程中盾构管片等效拉应力分布 (单位: Pa)

Fig.7 Equivalent pull stress distribution of shield tunnel segment in tunnel excavation

中力的作用，管片的最大等效拉应力为 7.3 MPa，出现在第五—七环管片内侧边缘。

由计算结果可以看出：衬砌管片在各种力联合作用下，会在第五环至第七环之间的管片内侧产生最大应力，为最不利位置，有可能在此部位发生管片局部碎裂，盾尾对管片作用的集中力是管片破坏的主要因素之一。越一三区间管片裂损的地方大多数也是发生在第五环管片附近。

## 5 管片裂缝及局部破损的控制

所采取的有效对策主要有下述几种：

- 1) 控制盾构的扭转，选择合理的推力。
- 2) 严格管片选型，确保盾尾间隙均匀。
- 3) 提高管片的安装精度。
- 4) 正确控制好转弯地段的盾构姿态，缓慢掘进，慎重纠偏。
- 5) 控制注浆压力，确保填充质量。

## 6 结语

盾构掘进方向及姿态的控制：

- 1) 盾构掘进方向的控制原则以适应设计线形为主，适时纠偏，切忌过急过猛。
- 2) 管片选型以适应盾尾间隙为主，兼顾设计线形。
- 3) 操作人员培训上岗，严格遵守盾构掘进方向及姿态的控制规程。
- 4) 多级测量复核消除导向系统的误差。
- 5) 盾构姿态纠偏时应注意：在切换刀盘转动方向时，应保留适当的时间间隔，切换速度不宜过快；根据掌子面地层情况及时调整掘进参数和调整掘进方向，避免引起更大的偏差；蛇行的修正应以长距离慢慢进行为原则，如修正得过急，蛇行反而更加明显。



施工中管片开裂及局部破损的控制:

1) 总推力过大时,在土舱内注入泡沫,防止“泥饼”现象,减小掘进扭矩和总推力;在开挖面相对稳定的地段,尽可能不采取土压平衡掘进模式,而采取欠土压掘进模式、或半开放模式、或辅助气压掘进模式。

2) 对于管片环面不平整和千斤顶撑靴重心偏位,要及时更换新的千斤顶的撑靴,并予以调整。

3) 盾构姿态控制与曲线段不匹配时,应正确控制好转弯地段的盾构姿态,宜缓慢掘进,慎重纠编,同时在过站时尽可能把损坏的密封刷全部更换。

#### 参考文献

- [1] 万姜林,洪开荣.采用复合式盾构修建混合地层隧道[J].施工技术,2002,31(6):7~9
- [2] 周振国,郭磊,郭卫社.盾构施工姿态控制和管片选型[J].西部探矿工程,2002,5(3):124~127
- [3] Maidl U. Geotechnical and mechanical interactions using the earth-pressure balanced shield technology in difficult mixed face and hard rock conditions [A]. Proceedings-Rapid Excavation and Tunneling Conference [C]. 2003. 483~493
- [4] Clough G Wayne. EPB shield tunneling in mixed face conditions [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(10): 1640~1656
- [5] 钟小春,朱伟,秦建设.盾构隧道衬砌管片通缝与错缝的比较分析[J].岩土工程学报,2003,1(1):109~112
- [6] 赵运臣.盾构隧道曲线段管片破损原因分析[J].西部探矿工程,2002,14(3):73~74
- [7] 黄昌富.盾构隧道通用装配式管片衬砌结构计算分析[J].岩土工程学报,2003,5(3):80~85
- [8] 李惠平,夏明耀.盾构姿态自动控制技术的应用与发展[J].地下空间,2003,1(1):75~78
- [9] 洪开荣.关于地铁盾构隧道几个问题的探讨[J].隧道建设,2003,23(1):4~6
- [10] 钟长平.广州地铁盾构隧道管片开裂原因分析[J].广东土木与建筑,2000,(4):93~95
- [11] 竺维彬,鞠世健.盾构隧道管片开裂的原因及相应对策[J].现代隧道技术,2003,2(1):21~25

## Shield Driven Tunneling in the Complex Layer: Direction Control of Shield and Preventing Segment Crack

Tan Zhongsheng<sup>1</sup>, Hong Kairong<sup>2</sup>, Wan Jianglin<sup>2</sup>, Wang Mengshu<sup>1</sup>

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Railway Tunnel Group, Luoyang, Henan 471009, China)

[Abstract] The ground layer of the No.2 Metro Line in Guangzhou has the characteristics of mixed ground conditions: more curves and big gradient variation. So it is difficult to excavate successfully and control the tunneling direction and shield tunneling attitude. Furthermore, it is also difficult to prevent segment crack and local failure and dislocation of segment. In order to control the tunneling direction and shield tunneling attitude more successfully, the reason of direction warp was studied and the actual measure data of Yue-San shield tunneling zone were analyzed. At last, the reason and the rule of direction warp were got and many methods to control shield tunneling attitude were tried. The main cause of segment crack and local failure of segment, were also studied with numerical simulation, and methods to control segment crack were brought forward.

[Key words] mixed ground; tunnel; attitude control; segment crack; segment dislocation