

摘要:介绍广州地铁三号线珠江新城站—客村站盾构区间盾构穿越珠江的施工技术。分析总结了区段地质的复杂性和盾构机状况的特殊性,导致盾构通过珠江的一系列问题和施工所采取的解决办法及技术措施,为今后类似施工提供了实践经验。

关键词:地铁 盾构 隧道 施工技术

### 1 工程概况

广州地铁三号线的珠江新城站—客村站区间(以下简称为珠—客区间)盾构工程,由总长 1 292.35 m 的珠江新城站—赤岗塔站隧道区间(以下简称为珠—赤区间)和总长 1 040.8 m 的赤岗塔站—客村站隧道区间(以下简称为赤—客区间)组成,隧道区间总长度为 2 333.15 m,隧道埋深 16~28 m。盾构区间圆形隧道外径为 6 m,内径为 5.4 m,管片宽度为 1.5 m,厚度为 300 mm;管片的分割数是“3+2+1”,即每环 3 个标准块 A1、A2、A3,2 个邻接块分别为 B、C 型,1 个封顶块为 K 型。采用 2 台德国海瑞克公司的 EPBΦ6 250 mm 盾构机一先一后在左右线分别进行隧道掘进施工,由珠江新城站始发,于赤岗塔站过站,到达客村站。其中,珠江新城站—赤岗塔站区间需要由北向南穿越包括海心沙岛在内总宽度为 640 m 的珠江航道。珠—客区间珠—赤段珠江航道被江中心海心沙岛分隔成为两条江面(即北面的珠江支流和南面的珠江主航道),其中北江面宽度 80 m,水深 4 m 左右;南江面宽度 318 m,水深 6~8 m 左右。施工时,需先穿过北面 80 m 宽的珠江支流到达海心沙岛,经过海心沙岛后,从衬砌管片的 610 环开始穿越 318 m 宽的珠江主航道到达赤岗塔站。珠江底部为 1~4 m 深的海陆交互相淤泥质砂或淤泥。江底至隧道顶平均厚度 10 m 左右。江中心海心沙岛沿线路方向宽 250 m。该区段隧道左右线地质纵剖面见图 1。盾构机穿越珠江区段地质情况见表 1。

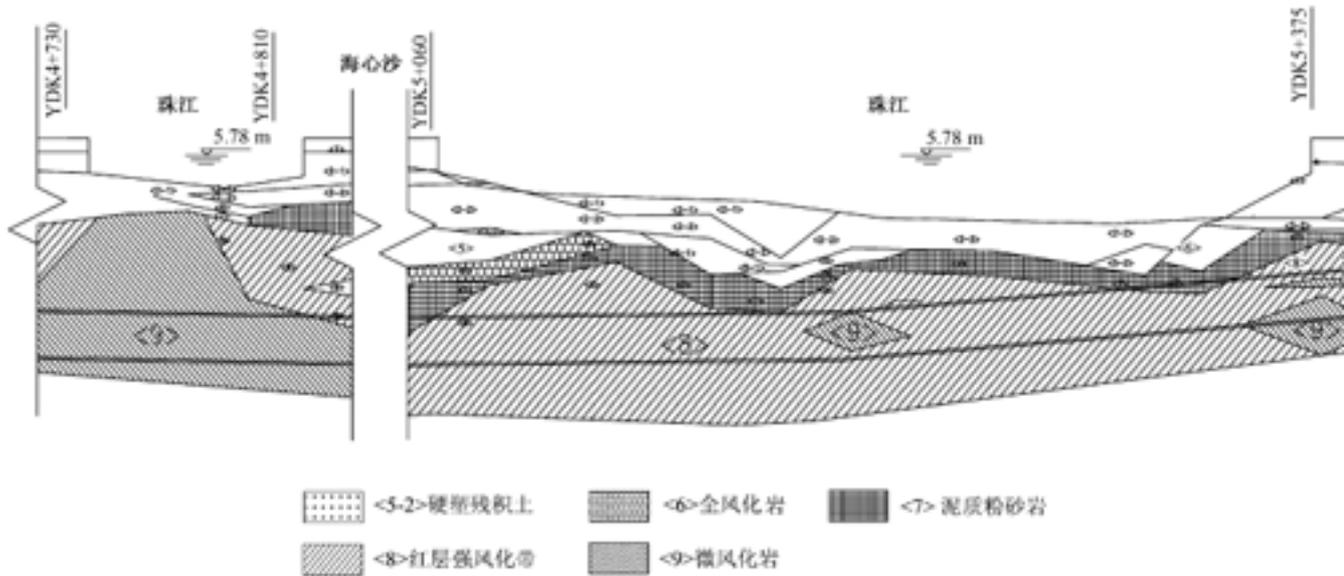


图 1 过江段地质纵剖面图

表 1 珠江江底地质情况一览表

地 段	洞身地质情况	洞顶岩层厚度及性质
YDK4+ 730~ YDK4+ 810 (北珠江段)	(8), (9)地层 $f_c = 15\sim 20\text{ MPa}$	平均 14 m, 洞顶覆盖层以(7)强风化泥质粉砂岩, (8)红层中风化岩为主。
YDK4+ 810~ YDK5+ 060 (海心沙)	(8)地层 $f_c = 6\sim 24\text{ MPa}$	12~ 14 m; 洞顶覆盖层以(7)泥质粉砂岩, (8)红层强风化带为主。
YDK5+ 060~ YDK5+ 375 (南珠江段)	(7), (8), (9)地层 $f_c = 5\sim 10\text{ MPa}$	最小 7 m(YDK5+ 310), 最大 17 m, YDK5+ 310 处前后 25 m 范围内岩层厚度 $\leq 3\text{ m}$ 。 洞顶覆盖层以(7)泥质粉砂岩, (8)红层强风化带为主。

注:  $f_c$  为岩石抗压强度。

## 2 过江段施工遇到的问题及解决办法

### 2.1 盾构机密封性能不良

两台德国海瑞克盾构机最大的问题是存在因盾尾密封刷损坏导致盾尾密封性能不良问题。在过江前的掘进中,由于盾尾密封性能不良,同步注浆的浆液和地下水大量渗漏到盾尾,给施工带来极大的不便,并影响到隧道的质量。在江底掘进时,如果江底地下水较大,大量地下水从破损的盾尾渗流到隧道内,后果将不堪设想。盾尾密封是保证盾构机与地下水隔离的一道非常重要的屏障,因此在过江前,必须解决盾尾密封问题。这是保证盾构江底施工安全的最重要的因素。

如果在地面或者在盾构机没有开始掘进之前进行盾尾密封更换,更换工作就比较容易操作。但是,在隧道内更换盾尾密封,则具有较大的技术难度。之前,广州地铁建设史上还没有进行过洞内盾尾密封更换的施工经验。经施工单位详细研究,最终确定了盾尾更换方法,并成功地完成了盾尾密封。在过江过程中盾尾密封性能良好。现将盾尾更换的关键技术总结如下。

1) 首先选择稳定的地质条件,尽量避免在软土地层中更换。

2) 对盾尾刷后部 2~5 环的管片进行管片壁后二次注浆(水泥—水玻璃双液浆),将管片与地层之间的流水通道完全封死,防止地下水通过盾尾进入盾构机内。

3) 将千斤顶推进至 1 200 mm 行程位置左右。此行程可将已经安装的贴着千斤顶撑靴的管环部分环片拆除,并将盾尾刷露出 1~2 道,既可保证更换的安全性,又具备操作性。

4) 先拆下 K 和 C 块(K 块或 B 块),放至隧道底部,更换该位置的盾尾刷。更换完毕后,马上在盾尾刷钢丝中和盾尾刷之间空隙使用盾尾密封油脂进行填充,并要保证填充饱满。

5) 再按照顺时针方向,依次拆除 B→A1→A2→A3 块。每拆除 1 块管片,更换该块管片位置的盾尾,并按照 4) 中要求填涂该块管片位置处油脂,但要注意,此时拆除的管片需顺时针安装在上次已经更换好尾刷的位置(如 B 块安装在原 K 块和 C 块位置,A1 块安装在原 B 块位置),最后安装 C 块和 K 块。

6) 注意事项:更换尾刷过程中,需要保证千斤顶推力  $\geq 4\ 000\text{ kN}$ ,以免盾构机低头或引起较大地表沉降;准备好充足的缓冲垫,对拆除管片过程中受到破坏的缓冲垫和橡胶止水条使用专用胶水及时进行黏贴;新更换的盾尾刷刚度较大,管片安装就位困难,此时需要使用管片安装器认真小心安装。

### 2.2 江底喷渣

1) 问题分析 江底掘进过程中在 620 环、654 环等位置时,由于掘进速度慢,隧道围岩渗水量大,同时夹有松散砂砾层,渣土的和易性不好,输送皮带不能及时带走渣土,造成土仓内土压过大,当压力  $>0.11\text{ MPa}$  时,打开螺栓机仓门时泥水就会从仓门喷出,发生喷渣。

2) 解决办法 在实际操作中,进行渣土改良,采取减少泡沫供应量(主要是减少水量)和暂停掘进的措施。同时逐渐从出土口放水降低土压至  $0.07\sim 0.08\text{ MPa}$  以后,再恢复正常掘进及出渣。为避免流向土仓的水量过大,把注浆管(上部 1#或 4#)拆下一根放水,以降低来自管片后部的水压,使土仓内的渣土不至于成泥水状,造成出土困难。但此时,泡沫系统不能关闭,液体流量可控制在  $30\text{ L/min}$  内,气体流量要保持  $250\sim 300\text{ L/min}$  左右,防止堵管现象发生。另外,喷渣现象发生时,应在刀盘扭矩允许的条件下,尽量提高掘进速度,以期多削土体吸收水分。采取以上措施后,较好地控制了喷渣,大大加快了施工进度。另外,在设备配备上,增加排水设备,加强隧道、盾尾排污能力,使喷渣、盾尾积水能迅速排到洞外,保证管片顺利安装。



### 2.3 防止江底坍塌

根据设计和地质勘探资料,YDK5+310 处前后 25m 范围内岩层厚度应 $\leq 3$  m,穿越时应严格控制江底沉降,防止盾构机推力过大破坏洞顶岩层,引起江底坍塌,造成江水灌入洞内。

控制江底沉降,首要的是尽量减小对江底地层的扰动。为此,施工时采用声纳法对江底沉降进行实时监测,同时结合盾构机及管片姿态监测,通过信息反馈及时调整相关施工参数。

## 3 掘进施工技术措施

### 3.1 推进参数的选择

根据该区段的地质情况分析,以〈8〉号地层为主,〈7〉、〈9〉号地层相对较少,岩质相对较硬,并根据两次实地开仓检查掌子面的土质观察,存在硬岩并夹有少量松散的砂砾层,故选择推力时一般应 $\leq 12\ 000$  kN。刀盘扭矩一般选择在 2 550~3 300 kN·m 之间,最大值 $\leq 3\ 375$  kN·m。根据推进 500 环距离的情况看,正常推进时,扭矩一般在 3 000 kN·m 左右波动,瞬间最大扭矩 $> 3\ 375$  kN·m。推进速度为 10~50 mm/min 之间,最大超过 76 mm/min,最小则在 10 mm/min 左右。具体参数见表 2。

表 2 过江区段掘进参数表

地层	推力/kN	扭矩/(kN·m)	速度/(mm/min)	土仓压力/MPa
〈8〉(为主),〈7〉,〈9〉	11 000~ 12 000	2 550~ 3 150	35~ 40	0.05~ 0.07
〈9〉(为主),〈8〉	12 000~ 15 000	2 850~ 3 375	10~ 20	0~ 0.02

### 3.2 推进模式的选择

根据地质勘查资料和实地开仓检查对掌子面地质情况的结果分析,认为土质有较好的稳定性,江底发生坍塌的几率不大。但由于过江区段地质裂隙发育,裂隙水比较多,且地层夹有松散砂砾层,有可能形成渗水通道。监测的结果亦表明了该区段的渗水量较大,其渗透系数  $k$  为 0.8~1.1 m/d,但因为砂质泥岩为不透水层,可以判断此水为裂隙水,它与珠江水不存在直接水力联系。经综合分析与伦证,从而决定对〈8〉为主的地层采用半敞开式掘进模式,对〈9〉地层为主的地层基本采取敞开式掘进,微留土压。实践证明掘进模式选择是正确的,达到了理想效果。

### 3.3 推进油缸的控制

推进油缸的行程原则上控制在 1 700~1 800 mm 之间,行程差控制在 0~50 mm。若行程过大,则盾尾刷容易露出,管片脱离盾尾较多,管片与盾尾之间的约束力较小,易导致管片姿态变化。而行程差过大,易造成盾体与盾尾之间夹角增大和铰接油缸行程差加大,致使盾构机推力增大,同时造成管片选型困难。铰接油缸行程为 40~80 mm,行程差为 0~30 mm。为防止铰接漏水,在江底掘进时,可将铰接油缸行程调整为 10~40 mm。

### 3.4 螺旋机的调整

螺旋机的转速应与掘进速度相适应。具体原则是与土仓压力相结合,以保证土仓压力,一般敞开式为 0~0.02 MPa,半敞开式为 0.05~0.07 MPa。同时,扭矩大小也反映了土仓内土质的干湿程度,一般在 24.5~35.0 kN·m 之间时,表明土体干湿合适;如果 $> 35$  kN·m,表明土体较干,需要多加泡沫并在土仓内加水,以改善土质,保证出土顺畅。在喷渣的情况下,可停止螺旋机,待从仓门排放出一定的泥水卸压后,再转动螺旋机排出块状土体。

## 4 管片姿态的控制及问题处理

### 4.1 管片姿态控制

管片姿态的控制主要有三个方面:①掘进时盾构机姿态的控制;②同步注浆量的控制;③二次注浆的效果控制。

1)根据这个区段地下水较大的情况,实际操作时,盾构机的姿态控制在:竖直方向-40~-60 mm 之间,水平方向 $\pm 20$  mm 之间,可基本满足成型管片的姿态精度要求。在渗水量大的地段,由于成型管片可能会有一定程度上浮,此时可适当加大盾构机下放量,一般取-60 mm,其它取-40 mm。对于水平姿态,主要根据不同的转弯条件控制,平面直线段 $\pm 20$  mm,左右转弯段分别取-30 mm 和+30 mm。为保证管片受力均匀,滚动角应控制在 $\pm 10$  mm/m 之间,超过时要及时调整,否则会造成管片轴向受力过大,脱离盾尾后会造管片姿态变化。

2)同步注浆量的控制。同步注浆量的多少,对管片的姿态影响极大,在硬岩地段(夹砂层)需保证 1.3~1.8 倍理论注浆量,即 5~7 m<sup>3</sup>/环;在软岩地段(黏土)需保证 1.0~1.4 倍理论注浆量,即 4.2~5.5 m<sup>3</sup>/环。注浆压力的设定根据隧道埋深和地下水压力而定,但不应超过 0.3 MPa。在含水量大的地段,浆液被稀释,黏滞力变小,初凝时间延长,更容易引起管片上浮(同时,



管片后部的水向土仓流动,造成上下部的压力差加大),此时也应加大注浆量。需要指出的是,盾尾漏浆时,应暂停注浆,并马上加注油脂,待漏浆停止后,才可继续注浆,直到达到要求为止。过江区段使用的同步注浆配合比见表3。

表3 过江区段同步注浆水泥砂浆配比表  $\text{kg/m}^3$

材料名称	水泥	粉煤灰	膨润土	细砂	水
重量	160	341	56	779	446

3)管片背后二次注浆。管片背后二次注浆主要有三个作用:①通过进一步补充浆液以填满管片后空隙,防止管片上浮;②浆液为掺加了速凝剂的纯水泥浆或水泥—水玻璃双液浆,可加快管片背后土体及流动体的凝结,使管片迅速稳定;③加速管片背后土体的凝结,阻塞水流通道,以形成止水环,防止地下水进入土仓及避免造成出土困难。管片背后注浆压力一般为0.3~0.5 MPa,注浆位置距盾尾以10~20环为宜。

#### 4.2 管片选型的原则

管片选型最基本的原则是使管片轴线与盾尾轴线重合。盾尾间隙允许范围40~90 mm,中值为65 mm。考虑管片椭圆度的影响,间隙达到100 mm时,管片极有可能被刮裂,而当间隙在60~80 mm时,管片轴线与盾尾轴线拟和较好,便于调整姿态。故在管片供应条件允许的情况下,应尽可能根据千斤顶的行程及盾尾间隙大小选择管片的类型。

一般情况下,考虑转弯型管片主要以盾尾间隙及千斤顶行程为依据,铰接供参考。如盾尾间隙一侧<40 mm时,应以盾尾间隙为主要依据,调整间隙达到60~80 mm后,再调整推进油缸的行程差,此时决不能以先调整推进油缸行程差为主。如盾尾间隙正常,而推进油缸行程差达到80~100 mm,则考虑转弯型管片调整,使其差值减小到50 mm以下。因每环管片的最大楔形量为38 mm,而在实际应用时最大值只能达到26 mm左右,故调整推进油缸的行程差一般需经2~4环后才能恢复到正常行程。在选型上,隧道上部应以管片K型块为主,便于安装管片。更重要的是,选型应根据实际情况而定,尤其是管片型号供应不及时的情况下不能强制选某种类型管片。

#### 4.3 管片存在的问题及处理方法

成型的管片主要存在以下几方面的问题:渗漏水;管片破损;吊装孔脱落及错台。

渗漏水是在拼装管片时,管片未对正即压紧管片,为使螺栓穿上而上下左右移动管片,造成止水条脱落或断裂、在角部挤成一堆,而相邻部位却压不紧,管片脱离盾尾后,逐渐卸力,在管片背后水压力的作用下引起漏水。解决的方法是:运输及吊装管片时,应防止损伤止水条;拼装管片时,相邻两管片对正后,才能顶紧管片;K型块的位置不能太小,如位置太小,则应先放松相邻千斤顶的压力,待K型块插入后,再全部顶紧。

管片破损有两个原因,其一是在运输及吊装时碰撞造成;其二是在拼装时动作过猛或千斤顶已经顶住管片时,调整管片挤压造成边角破损及吊装孔脱落。如果上一环管片相邻管片环未能处在同一平面,即某一管片环的一角突出,则下一环管片拼装困难,千斤顶施力后,很可能管片边角甚至径向破裂。原因是止水条部位有泥砂,主要是下部管片环。解决的办法是安装管片前必须清静盾尾及管片上的泥砂,对破损的止水条进行处理后,才能安装管片。

管片错台主要为拼装时造成,未能使管片与成型环完全对正,只要注意操作即可避免。另外,在掘进时,当滚动角较大时,管片受环向力作用,管片成型一段时间后逐渐卸掉应力,并受浮力的作用,导致管片环在最大受力方向错台。掘进时,随时应注意滚动角的变化,及时调整刀盘的转动方向,使管片错台的可能性减到最小。二次注浆压力过高或管片间螺栓未完全拧紧,也能引起错台,此时可通过调整注浆压力和复紧螺栓方法避免错台。

#### 5 结束语

广州地铁三号线珠江新城站—客村站盾构施工已于2004年8月3日顺利穿越了珠江。先利用10 d时间顺利穿越了江面宽度为80 m的珠江支流,在此经验基础上,仅用22 d时间就顺利穿越了江面宽度为318 m的珠江主航道,创下江底盾构施工日平均掘进14.5 m的国内地铁盾构施工的新纪录。本工程过江的成功实践经验有:

1)地铁盾构施工中,盾构机在江底等富水地质条件下的掘进速度对其施工安全有着重要影响,因此保证盾构机完好是保证顺利通过这些不良地层的关键。穿越江底等富水地层前应仔细检查大轴承、盾壳铰接和盾尾的密封状况,以保证完好



和提高过江安全性,同时提前更换损坏刀具,并保证配件供应和盾构机各系统始终处于正常工作状态,提高掘进速度,避免盾构机在江底作不必要的停留,以降低风险。

2)对地质勘察资料进行了充分的研究与分析,提前针对过江过程中存在的问题,制订了切实可行的施工方案,拟定有效的各项技术措施。

3)贯彻信息化施工,采取声纳法等河底监测方法,及时掌握江底的隆陷,反馈信息并调整施工参数,尽量降低盾构施工对江底地层的扰动。

实践证明,广州地铁三号线盾构穿越珠江工程所采用的施工方案和技术措施是可行的和成功的,无疑对今后类似工程的盾构施工具有较好参考价值。

#### 参考文献

[1]尹旅超,朱振宏,李玉珍,等译.日本隧道盾构新技术[M].湖北:华中理工大学出版社,1999.

[2]刘建航,侯学渊编著.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991.

[3]施仲衡编著.地下铁道设计与施工[M].西安:陕西科技出版社,1997.

[4]袁敏正,竺维彬.盾构技术在广州地铁的应用及发展[J].广东土木与建筑, 2004,(8):4-7.

