

# 大直径泥水盾构下穿河道技术研究

李新龙

中铁十五局集团城市轨道交通工程有限公司

**摘要:** 针对盾构隧道下穿河流的工程问题,从盾构隧道下穿河流的实际工程案例出发,结合相关理论和实践经验,系统分析大直径盾构隧道下穿河流的特征,探讨影响盾构隧道下穿河流沉降的主要因素,并提出相应的技术措施和建议。本研究对于盾构隧道下穿河流工程的安全性和可靠性的提高具有重要的科研意义。

**关键词:** 泥水盾构; 复合地层; 长距离下穿河道

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.07.034

## 一、工程概况

横沥站~HP1盾构井盾构区右线在498~838环处下穿上横沥水道;左线在507~879环处下穿上横沥水道,河宽400m,平均水深8~10m,与线路斜交,盾构穿越长度达到600m。横沥站~HP1盾构井区间下穿上横沥河道,河床底距隧道顶仅12.2m,河床底以下至隧道顶地层依次为<2-1A>淤泥、<2-1B>淤泥质土、<3-1>粉细砂、<3-2>中粗砂,隧道处于<3-1>粉细砂、<3-2>中粗砂、<4N-2>粉质黏土、<4N-3>硬塑状粉质黏土、<5H-2>砂质黏性土。

根据勘察资料,线路沿线海陆交互冲积平原地貌区地下水水位埋藏浅。工程地质稳定地下水一般埋深0.5~6.0m。地下水位的变化与地下水的赋存、补给及排泄关系密切,每年5~10月为雨季,大气降雨充沛,水位会明显上升,而在冬季因降水减少,地下水位随之下降,水位年变化幅度为1.0~1.5m。盾构下穿上横沥河道处地表较为空旷,主要建构筑物为上横沥河道两岸河堤,规划标准为200年一遇防洪(潮)标准,为复式堤岸,堤顶设防浪墙,堤防背水侧采用坡比1:3草皮护坡。

## 二、盾构下穿上横沥河道

### (一) 掘进参数理论计算

掘进选定五个施工管理指标来进行掘进控制管理:

a、泥水平衡压力; b、推进速度; c、掘削量; d、泥水指标; e、注浆压力和注浆量。

#### 1) 泥水平衡压力

根据地质及水文情况,盾构掘进土压力参数采用“朗肯土压力理论”计算,根据朗肯土压力中静止土压力为计算依据,计算方法如下:

#### ①水土合算——静止土压力

作用着竖向的土自重应力和侧压力,这个侧压力的反作用力就是静止土压力。根据半无限弹性体在无侧移的条件下侧压力与竖向应力之间关系,该处的静止土压力强度可按下式计算:

$$P_0 = K_0 \gamma Z$$

式中  $K_0$ —静止土压力系数;

$\gamma$ —土体重度,  $\text{kN/m}^3$ , 泥水合算采用饱和重度

#### ②静止土压力系数的确定方法:

通过侧限条件下的试验测定——较可靠  
采用经验公式:  $K_0 = 1 - \sin \phi'$ ——较适合于砂土  
采用经验值,系数取1.1~1.3

#### 2) 掘进速度

下穿上横沥时,根据地层情况(砾砂、圆砾地层速度可稍微调慢)掘进速度一般不低于35mm/min,尽量快速通过。

盾构掘进速度设定时,注意以下几点:

①盾构启动时,盾构司机需检查千斤顶是否顶实,开始推进和结束推进之前速度不宜过快。每环掘进开始时,应逐步提高掘进速度,防止启动速度过大冲击扰动地层。

②每环正常掘进过程中,掘进速度值应尽量保持恒定,减少波动,以保证切口水压稳定和送、排泥管的畅通。在调整掘进速度时,应逐步调整,避免速度突变对地层造成冲击扰动和造成切口水压摆动过大。

③推进速度的快慢必须满足每环掘进注浆量的要求,保证同步注浆系统始终处于良好工作状态。

④掘进速度选取时,必须注意与地质条件匹配,避免速度选择不合适对盾构机刀盘、刀具造成非正常损坏和造成隧道周边土体扰动过大。

#### 3) 掘削量的控制

盾构掘进实际掘削量 $V_R$ 可由下式计算得到:

$$V_R = (Q_1 - Q_0) t$$

式中  $V_R$ —实际掘削量 ( $\text{m}^3/\text{Ring}$ );

$Q_1$ —排泥流量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ );

$Q_0$ —送泥流量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ );

$t$ —掘削时间 (min)。

当发现掘削量过大时,应立即检查泥水密度、黏度和切口水压。在查明原因后应及时调整有关参数,确保开挖面稳定。

#### 4) 泥水指标控制

①密度  $\rho = 1.15 \sim 1.30 \text{g/cm}^3$ ;

②漏斗黏度  $v = 25 \sim 35 \text{s}$ ;

③析水率  $XS < 5\%$ ;

④pH值: 8~9;

⑤API失水量  $< 30 \text{cc}/30 \text{min}$ 。

#### 5) 同步注浆

##### ①注浆压力

注浆压力设定为3.5~5bar,管片注浆口的实测注浆压力为3~4.5bar。

##### ②注浆量

理论注浆量:

$$V = (3.14 \times 4.42^2 - 3.14 \times 4.25^2) \times 1.6 \times 1.5 = 11.1 \text{m}^3/\text{环}$$

## 三、施工重难点及应对措施

### (一) 施工重难点

盾构穿越时，从河堤到河道存在高差突变，盾构在穿越河段时，如切口压力和注浆压力控制不当，极易引起河底冒顶、河堤沉降、裂缝、坍塌，造成隧道被淹等严重后果。

由于覆土较浅施工阶段抗浮稳定系数更小；穿越过程中有可能引起盾构和管片在地下水和浆液的作用下产生上浮，管片上浮不仅会导致盾构轴线难以控制，还会引起隧道局部开裂、渗水，对隧道内部结构施工造成不良影响。

隧道下穿河流段地层较差，覆土浅，易引起冒浆、冒泡沫，舱内失衡塌方的风险。

根据地质勘察资料，河流段存在有全断面黏土层，掘进黏土层是泥水盾构机的一大短板，管路堵管、刀盘结泥饼、气垫仓压力突变等现象常有发生。从泥水盾构机的设计原理上，在技术操作上很难解决这一重难点。

## (二) 应对措施

### (1) 河堤保护措施

①对上横沥河道南北岸河堤布置深层监测孔，监测孔按照5m一个中线点、10m一个小断面、20m一个大断面布置，共布设9个孔，深度1.5m，堤坝上布设6个监测点。一旦有沉降空洞，马上进行注浆。

②盾构下穿时，河堤上安排人员进行24小时巡视。

③严格控制盾构掘进参数，保持出土和同步注浆正常，必要跟踪二次补浆。

④根据地质、潮汐水位和覆土厚度的变化，我们首先确认河堤下每一环的掘进参数，并对一线操作人员进行详细交底。

表1 下穿河堤盾构掘进参数

序号	项目	左 498 环	左 838 环	右 507 环	右 878 环
1	推力 t	2400-2800	2800-3200	2200-2600	2800-3200
2	转速 r/min	1.2-1.6	1.2-1.6	1.2-1.6	1.2-1.6
3	扭矩 KN.M	3500-4200	3500-4200	3500-4200	3500-4200
4	注浆压力 bar	3.5-5	3.5-5	3.5-5	3.5-5
5	速度 mm/min	30-40	30-40	30-40	30-40
6	贯入度 mm/r	25-35	25-35	25-35	25-35
7	上部土压	2.2-2.5bar	2.2-2.5bar	2.2-2.5bar	2.2-2.5bar
8	采取措施	1、每隔5环止水；2、配置跟踪注浆机			
9	备注	现场掘进参数控制根据埋深和地面沉降监测及时调整			

### (2) 防止隧道上浮

管片的上浮在盾构掘进中是比较普遍的现象，针对下穿上横沥河道的情况主要有：同步浆液的配合比、注浆量、盾构机姿态几个方面原因，针对这几个原因，我们制定了相应的控制措施，并取得了一定效果。

①盾构推进中，尽量控制好盾构机的姿态，纠偏时逐步纠正，不得过急过猛地纠正偏差，控制油压差不宜过大。也可根据管片拼装后上浮经验值，将盾构机推进轴线高程降至设计轴线下一数值，以此来抵消管片衬砌后期的上浮量，但此方法能控制管片姿态，对管片上浮起到的作用不大。

②最初采用的同步注浆配合比初凝时间大于12h，在此时间内未初凝的浆液无法对管片提供填充约束作用，随着后续浆液的不断注入必然会产生管片上浮，对

此种情况我们对配合比进行调整，将浆液的初凝时间缩短到小于10小时，并针对土层的变化增减注浆量。

③当发现隧道上浮量较大，且波及范围较远时，立即采取对已建隧道进行补压浆措施，以割断泥水继续流失路径；

④在同步注浆的基础上，结合双液浆二次注浆在隧道周围形成止水环，每隔5环做一道止水环，使隧道纵向形成间断的止水隔离带，以减缓、制约隧道上浮，从而控制隧道变形；

⑤加强隧道纵向变形的监测，并根据监测的结果进行针对性的注浆纠正。如调整注浆部位及注浆量，配制快凝及提高早期强度的浆液。

### (3) 泥饼处理措施

横沥站~HP1盾构井区间右线盾构机下穿上横沥河道掘进至630~670环时掘进速度降低，推力增大，通过取得渣样中有黏性土出现，我们判断盾构机刀盘中有泥饼生成，首先向刀盘内注入分散剂，待分散剂发挥作用后及时采用低比重优质泥浆置换土仓内黏土，防止黏土在土仓内堆积，以保证刀盘开口处畅通，盾构机试掘进，严格控制监测盾构机的各种参数、泥浆处理设备的出土温度及土仓隔板温度进行跟踪监测，将掘进速度控制在10~20mm/min，掘进过程中每30cm清洗一次开挖仓。

#### 防止河底土层沉降及冒泡措施

按设计值设定切口水压，并根据推进时刻的水位变化情况进行相应调整，严格控制泥水压力的波动值，防止切口水压偏低无法支撑开挖面土体，造成土体坍塌；防止切口水压较高，对土体扰动过大，造成土体坍塌。

加强河底段泥浆质量控制、送排泥监控，适当提高泥浆密度并控制其黏度，保证泥膜质量，加强送排泥监控，提前计算掘进速度与进排泥的关系，发现排泥异常，及时调整参数，防止超挖造成塌陷。

#### 管片错台及破损控制措施

针对管片错台及破损问题，我们首先根据盾构机实时姿态及管片与盾尾间隙再次对管片进行了合理的选型，利用管片楔形量及时调整盾构千斤顶的行程差及盾尾间隙，确保管片受力均匀。其次严格把控了管片的拼装质量，加强管片拼装错台量及真园度管理。最后当管片拼装完成开始掘进下一环时，及时对本环管片进行再次复紧，同时对前几环管片螺栓进行再次紧固，避免油缸压力变化导致管片破损变形情况发生。

#### 防漏措施：

提高同步注浆质量，每环推进前，需对注浆浆液进行取样试验，严格控制其初凝时间和浆液稠度，根据实际注浆效果，优化浆液配比，确保浆液质量，在注浆过程中、合理掌握注浆压力，使注浆量、注浆速度与盾构掘进速度相匹配；

保持切口水压稳定，并使其略低于注浆压力，谨防浆液大量前窜影响注浆效果；在管片外弧面粘贴止水海绵，以便盾尾漏浆时吸水膨胀封堵；

盾尾油脂压注采用自动和手动模式相结合，适当加大盾尾油脂的压注量，初步定为每环120~200kg，盾尾

局部漏浆时，及时采用手动模式在漏浆部位补注油脂；控制好管片姿态，居中拼装，施工时将盾尾间隙差值控制在20mm以内，防止盾尾间隙不均匀降低盾尾密封效果（过大时形成透水通道，过小时损坏盾尾刷）。

#### 四、掘进效果评价

##### （一）工作效率

（1）横沥站~HP1盾构井区间左线2019年08月08日开始进入上横沥河道南岸河堤，2019年10月13日顺利到达上横沥河道北岸，累计掘进544米，共计历时65天，日均掘进5.2环。

（2）横沥站~HP1盾构井区间右线2019年12月09日开始进入上横沥河道南岸河堤，2020年04月02日顺利到达上横沥河道北岸，累计掘进594米，共计历时113天（春节影响停工），日均掘进3.2环。

##### （二）隧道质量情况

##### 1. 结构缺陷统计

###### （1）管片错台情况

横沥站~HP1盾构井区间左线下穿上横沥河道段（498~838环）管片拼装340环，错台共计4处，其中环间错台3处，环内错台1处，错台率1.2%。横沥站~HP1盾构井区间右线下穿上横沥河道段（507~878环）管片拼装371环，错台共计6处，环间错台5处，环内错台1处，错台率1.6%。

###### （2）管片破损情况

横沥站~HP1盾构井区间左线下穿上横沥河道段（498~838环）管片拼装340环，管片破损共计5处。其中定位孔破损2处，管片崩角3处，破损率1.5%。横沥站~HP1盾构井区间右线下穿上横沥河道段（507~878环）管片拼装371环，管片破损共计6处，其中定位孔破损2处，管片崩角4处，破损率1.6%。

###### （3）管片渗漏水情况

横沥站~HP1盾构井区间左线下穿上横沥河道段（498~838环）管片渗水4处，渗水率1.2%。横沥站~HP1盾构井区间右线下穿上横沥河道段（507~878环）管片渗水6处，渗水率1.6%。

##### 2. 测量与监测

盾构下穿河道测量分为两部分，第一部分为盾构进入河道前和出河道后对地面及河堤沉降等检测，第二部分为盾构在河道内时因无法埋设监测点对河道内采用航拍及巡查措施监测河道内是否存在冒泡、冒浆情况进行监测。

对河堤布置深层监测孔，监测孔按照5m一个中线点、10m一个小断面、20m一个大断面布置，共布设9个孔，深度1.5m，堤坝上布设6个监测点。

盾构机位于河道内时由于无法埋设测点，故对河道内的监测采用无人机航拍+河道南侧安装高清摄像头实时监测河道情况。河道内的航拍监测频率按照2次/天的频率进行监测，如出现河道内冒泡、冒浆情况时加密为4次/天。

横沥站~HP1盾构井区间左右线盾构机下穿上横沥河道，河堤地表竖向位移最大累计沉降量18.23mm，未超过最大累计变化量30mm，监测情况正常。

对左线、右线上横沥河道段进行隧道轴线平面位置和高程偏差测量，测量结果如下表2、3所示。

表2 横沥站-HP1盾构井区间隧道左线（443~838环）轴线平面位置和高程偏差

项目	允许偏差 (mm)	最大实测偏差 (mm)	偏差位置
隧道轴线平面位置	±150	-106	676环
隧道轴线高程	±150	-92	712环

表3 横沥站-HP1盾构井区间隧道右线（507~878环）轴线平面位置和高程偏差

项目	允许偏差 (mm)	最大实测偏差 (mm)	偏差位置
隧道轴线平面位置	±150	-112	579环
隧道轴线高程	±150	-89	607环

#### 五、结论

通过广州地铁十八号线横沥站~HP1盾构井区间盾构下穿上横沥河道施工经验可以得到以下结论：

（1）盾构掘进穿过长距离河道时，应严格控制盾构姿态、匀速掘进、降低刀盘转速，维持在1.0rpm~1.3rpm左右，适当提高泥浆比重黏度，时刻专注泥水分离设备出渣情况，防止超挖。泥水盾构在砂层掘进，推进速度较快，应在保证同步注浆量的前提下掘进。

（2）在掘进黏土层时，应不断切换泥水循环冲洗系统，并关注泥水泵流量和切口压力，若实际情况允许，应降低泥浆比重和黏度，甚至采用清水循环出渣，能有效提高盾构掘进速度和刀盘结泥饼等情况。刀盘可视情况采用大转速搅拌出渣或者低转速通畅出渣。

（3）根据广州地铁十八号线下穿河道的施工的经验，合理的泥浆比重应为1.22~1.27g/cm。泥浆比重过高，刀盘扭矩和盾构推力增加，掘进速度降低，影响掘进效率，因此，应控制好泥浆比重。泥浆比重增加来源于地层中的粉细黏土及砂，而这些细微颗粒无法通过振动筛完全过滤，对砂的最好处理方法是增加沉淀池容量，定期清理沉淀池。对粉细黏土的最好处理方法是使用压滤机，横沥站~HP1盾构井区间使用4台压滤机处理泥浆，根据目前使用效果来看还是很好的，但使用压滤机也有一些缺点，在泥浆密度降至一定程度后就不能再降低了，主要是因为随着密度的降低，压滤机的处理效率也在降低。

（4）下穿河道之前，应对盾构机设备进行全面检修，对刀盘刀具进行检查，及时更换磨损较为严重的刀具，避免河底停机风险。

#### 参考文献

[1] 张俊峰, 王国忠. 大直径盾构隧道穿越大河施工技术及管理. 建筑施工, (2020). (11), 10-14.  
 [2] 魏艳, 黄卫平. 大直径盾构隧道穿越河流施工技术研究. 现代隧道技术, (2019). (3), 49-54.  
 [3] 李国珍, 王志军. 大直径盾构隧道在水下河道穿越中的施工管理. 隧道建设, (2018). (5), 39-43.