

大直径泥水盾构下穿上软下硬地层技术研究

李桢

中铁十五局集团城市轨道交通工程有限公司

摘要：针对大直径泥水盾构下穿上软下硬底层技术难题，依据广州地铁十八号线横沥站~HP1盾构井区间施工经验，结合广州地区地质条件，阐述在施工中遇到的重难点问题。并从多方面阐述具体的施工技术措施，包括刀具更换、参数设定、泥饼处理、防沉降等。通过上述技术措施的应用，规范施工操作行为，有利于解决施工难点，保证泥水盾构在上软下硬及硬岩地层中掘进效率及安全。

关键词：泥水盾构；复合地层；上软下硬；花岗岩

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.09.030

引言

广州地区地质构造十分复杂，再加上水文条件因素的影响，给地铁施工带来很大的难度，施工中会遇到各类地质问题，应在施工前进行科学细致的勘察工作。在本项目施工中，盾构需穿上软下硬地层，在掘进期间要注意泥水盾构施工操作的科学性和规范性，防止出现更多的问题。本项目所经过的地层十分复杂，各类岩石风化程度不同，岩层与软土层交错，形成了复杂的上软下硬的地质条件，需制定科学的掘进施工方案，保证施工顺利进行。

一、工程概况

横沥站~HP1盾构井区间左线长2601.475m，右线长2610.788m，区间隧道埋深19.95m~35.02m，主要穿过<2-1B>淤泥质土、<4N-2>粉质黏土、<2-2>淤泥质粉细砂、<2-4>粉质黏土、<3-1>粉细砂、<3-2>中粗砂、<5H-1>可塑状砂质黏性土、<5H-2>硬塑状砂质黏性土、<6H>全风化花岗岩、<7H>强风化花岗岩、<8H>中风化花岗岩、<9H>微风化花岗岩层。区间左线443环~475环（占总环数的2.1%）刀盘上部为<5N-2>、<6H>、<7H>地层，下部为<8H>、<9H>岩层，是典型的上软下硬地层；区间右线457环~500环（占总环数的2.7%）刀盘掌子面主要为<7H>、<9H>为上软下硬及全断面硬岩地层。岩层的最大单轴抗压强度在45MPa左右，<5N-2>黏土层渗透系数达到0.2m/d。

根据勘察资料，本场地位于海陆交互冲积平原地貌，地下水水位埋藏浅，钻孔初见水位埋深0.00~3.20m（高程3.65~6.37m），稳定水位埋深0.00~3.50m（高程3.46~6.17m）。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。

二、盾构机掘进模式

根据泥水盾构的构造和泥浆压力控制形式，将泥水盾构氛围直接控制型与间接控制型。其中，直接控制型的原理：新鲜泥浆注入泥水舱后，与开挖的泥土充分搅拌

混合形成施工所需泥浆。经过泥浆泵输送至处理后，再排出其中存在的土碴，这一过程可以过滤到泥浆中存在的大粒径材料，经过处理后将泥浆输送至调浆池，按照泥浆配比及规格调整其密度和浓度，进行循环使用。

间接控制型泥水盾构的控制原理：其泥水系统由泥浆和压缩空气双重回路组成。盾构刀盘后设置两道隔板，前隔板前充满泥浆，前隔板和后隔板之间上部充以压缩空气，形成空气缓冲层。调节空气压力，就可以控制开挖面上相应的泥浆支护压力。

横沥站~HP1盾构井区间两台海瑞克改装盾构机均为间接控制型盾构机，两种泥水盾构比较而言，间接控制型泥水盾构的气压具有缓冲作用，泥水压力的波动小，所以，其整体的支护效果和稳定性也相对更好。

三、施工重难点及应对措施

（一）施工重难点

本区间穿越上软下硬，上部为砂质黏性土<5N-2>、花岗岩全风化<6H>、花岗岩强风化<7H>，下部为花岗岩中风化<8H>和花岗岩微风化<9H>，洞身局部为中、微风化花岗岩及硬岩凸起，盾构掘进容易造成刀具、刀盘损坏，导致掘进困难，在花岗岩残积土及全、强风化地层换刀可能会发生掌子面坍塌事故。

上软下硬地层复杂，处理难度大，在开挖操作时围岩的整体效果较差，一旦出现破裂就会导致岩块崩落，并进入土仓内，这就造成堵塞排泥口、排泥管的弯管处，影响泥浆的循环使用，也会影响整体的施工进度。

由于岩层存在软硬不均匀的情况，导致盾构机刀具在切削过程中受到很大的冲击，影响刀具的使用，降低了盾构掘进效率和施工质量，还会导致刀盘损坏。盾构姿态受到岩层的影响，也会出现偏移情况。此外，掘进期间产生的振动也会加剧对周边地层的扰动，从而产生沉降现象。

（二）应对措施

（1）刀具更换

复合型刀盘破岩原理为：滚刀切入岩层，使岩层由于挤压产生裂隙，相邻滚刀刀环间岩石碎片被刮刀刮落。根据相关经验，一般正面刀磨损量更换标准为15mm，边缘刀磨损量更换标准为10mm，此时磨损刀圈的刀刃变宽，其冲击压碎和切削岩石的能力降低，盾构掘进时的推力和扭矩就会增大，增加了盾构机的符合，影响掘进施工。在施工前，应检查刀具磨损情况，应及时更换刀具，防止损坏的刀具影响相邻刀具使用，给盾构机造成更严重的危害。

根据详勘地质资料，横沥站~HP1盾构井区间左线443环~475环为上软下硬地段，横沥站~HP1盾构井区间右线465环~500环为上软下硬及硬岩地段。在进入上软下硬及硬岩地层前我们对磨损量较大的刀具进行了拆除更换，左线盾构共计进仓39次，累计更换刀具40把。

右线盾构分别在459环、470环及485环进行了三次带压开仓检查及更换刀具工作，累计更换中心滚刀2把，双刃滚刀4把，单刃滚刀6把，刮刀6把。

(2) 掘进参数设定

在掘进至上软下硬前2~3环，我们首先将刀盘转速从1.5r/min降至1.2r/min，推进速度从30mm/min~50mm/min降至10mm/min~25mm/min，掘进过程中安排专人频繁进行取样，左线436环掘进过程中，渣样开始出现中风化花岗岩及微风化花岗岩且比率逐渐增多，此时刀盘扭矩增大至3600kN.m，且有继续增大的迹象。根据施工经验我们判断刀盘开始进入上软下硬地层，且隧道断面岩层比例注浆增大，随即将刀盘转速提升至1.2r/min，推进速度不变，贯入度降低，降低扭矩。这时在同等土压力及推进速度下，观察刀盘扭矩上下波动范围及导向系统所采集的刀盘滚动角的波动大小，不断调整掘进参数，最终确定推进速度控制在5~15mm/min，推力2600~3600t，刀盘扭矩1800~3000kN.m，刀盘转速1.2r/min能够适应在该地层中正常掘进。

(3) 泥饼处理措施

横沥站~HP1盾构井区间左线上软下硬地层中隧道断面主要以<5H-2>砂质黏性土、<7H>强风化、<8H>中风化、<9H>微风化地层为主。450环掘进过程中，盾构机掘进速度由5~15mm/min下降至0~8mm/min，推力从2800t渐增至3000t，刀盘扭矩从2700kN.m降至2000kN.m，进而刀盘油温过高使盾构无法掘进，取得渣样中有黏性土出现。针对此种情况，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，合理控制掘进速度，掘进过程中每30cm清洗一次开挖仓，最终盾构机恢复正常掘进。

(4) 防止地面沉降措施

横沥站~HP1盾构井区间左线443环~475环地面环境为明珠湾区施工场地，掘进过程中为防止地面沉降，在严格控制掘进参数的同时，我们加大了同步注浆及二次注浆量，每掘进5环停机采用水泥-水玻璃双液浆进行管片背部注浆做止水环，在上次止水环和当次止水环之间注入砂浆进行封堵，彻底封堵在掘进过程中同步注浆遗留涌水通道，保证开挖面的稳定，保证盾构正常掘进。掘进过程中派专人进行24小时巡视，当地面出现异常及时进行处理。

(5) 管片上浮控制措施

在掘进中，将盾构姿态慢慢下调，以抵消管片上浮造成的轴线偏位。

同时加大管片上部同步注浆量，对同步注浆所用的砂浆配比进行控制，加快浆液初凝时间，尽量控制在6h以内，浆液应具有良好的黏度，注浆过程中尽量降低注浆压力，加强二次补浆，二次补浆以双液浆为主。

加强管片螺栓的紧固工作，气动扳手用以螺栓紧固

必须达到该螺栓要求的紧固力，同时加强对螺栓的复紧工作。

(6) 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。

四、隧道质量情况

(一) 结构缺陷统计

(1) 管片错台情况

横沥站~HP1盾构井区间上软下硬地层段(443~475环)管片拼装33环，错台共计3处，其中环间错台2处，环内错台1处。

横沥站~HP1盾构井区间上软下硬地层及硬岩段(457~500环)管片拼装44环，错台共计4处，环间错台3处，环内错台1处。

表1 横沥站~HP1盾构井区间错台情况统计表

部位	环号	点位	错台量/mr	错台类型
横沥站-HP1 盾构井左线(443~475环)	445/446	5	18	环间错台
	450/451	9	16	环间错台
	453/454	5	17	环内错台
横沥站-HP1 盾构井右线(457~500环)	466/467	4	17	环间错台
	471/472	5	16	环内错台
	480/481	9	18	环间错台
	481/482	9	16	环间错台

注：衬砌环内错台允许偏差10mm；衬砌环间错台允许偏差15mm；

(2) 管片破损情况

横沥站~HP1盾构井区间上软下硬地层段(443~475环)管片拼装33环，管片破损共计2处，其中定位孔破损1处，管片崩角1处，已全部修补完成。

横沥站~HP1盾构井区间上软下硬地层及硬岩段(457~500环)管片拼装44环，管片破损共计3处，其中定位孔破损2处，管片崩角1处，已全部修补完成。

表2 横沥站~HP1盾构井区间破损情况统计表

部位	环号	点位	缺陷类型	整改情况
横沥站-HP1 盾构井左线(443~475环)	450	5	定位孔破损	已整改
横沥站-HP1 盾构井右线(457~500环)	462	9	管片崩角	已整改
	458	4	定位孔破损	已整改
横沥站-HP1 盾构井右线(457~500环)	476	5	定位孔破损	已整改
	479	9	管片崩角	已整改

(3) 管片渗漏水情况

横沥站~HP1盾构井区间上软下硬地层段(443~475环)管片无渗漏水情况。

横沥站~HP1盾构井区间上软下硬地层及硬岩段(457~500环)管片渗水1处，已修补完成。

表3 横沥站~HP1盾构井区间渗漏水情况统计表

部位	环号	点位	渗漏水类型	整改情况
横沥站-HP1 盾构井右线 (457~500环)	467/468	4	环缝渗水	已整改

(二) 测量与监测

施工过程中严格按照设计图纸施工，并按时、按频率对地面沉降等进行监测，监测频率为 1 次/7d，持续 1 个月，之后评估点位稳定情况再决定是否调整监测频率，当变化量小于±1mm/30d 时调整监测频率为 1 次/30d，变化量仍小于±1mm/30d，数据稳定后方可停测，横沥站~HP1盾构井区间上软下硬及硬岩段监测数据统计如下表所示。

表4 横沥站-HP1盾构井左线（443~475环）监测数据统计

监测项目	点号	累计变化量 (mm)	对应里程(环号)
地表竖向位移	ZDK977 8-3	-22.64	ZDK977(444环)
管片结构竖向位移	GGJ9787	-8.3	ZDK9787(450环)
管片结构净空收敛	GGJ9794	+7.2	ZDK9794(454环)

表5 横沥站-HP1盾构井右线（457~500环）监测数据统计

监测项目	点号	最大累计变化量 (mm)	对应里程(环号)
地表竖向位移	YDK9813-2	-23.33	YDK9813(466环)
管片结构竖向位移	GGJ9823	-8.1	YDK9823(472环)
管片结构净空收敛	GGJ9837	-7.3	YDK9837(481环)

盾构隧道主体完工后，2020年8月、9月、10月、11月分别对左线、右线上软下硬及硬岩地层段进行隧道轴线平面位置和高程偏差测量，测量结果如下表所示。

表6 横沥站-HP1盾构井区间隧道左线（443~475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	-78	456 环
隧道轴线高程	±150	-62	458 环

表7 横沥站-HP1盾构井区间隧道右线（457~500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	86	462 环
隧道轴线高程	±150	77	481 环

五、小结

通过广州地铁十八号线横沥站~HP1盾构井区间在上软下硬及硬岩地层中施工的经验可以得出如下结论：

(1) 盾构在穿越上软下硬及硬岩地层时，选择复合式刀盘，23%左右的刀盘开口率基本能满足掘进的需要。在穿越上软下硬地层时，采用合理的滚刀与刮刀组

合是极其重要的，一般情况下，外圈应布置滚刀，中内圈布置刮刀。横沥站~HP1盾构井区间盾构机成功穿越124米的上软下硬地层及硬岩地层，证明了刀具配置的合理性。若上软下硬地层较长时，应考虑在外圈同一轨迹线上布置一把滚刀和一把刮刀，且刮刀应稍高于滚刀。上软下硬地层与硬岩地层相比，上软下硬地层中所需的刀盘扭矩相对较大。

(2) 上软下硬地层刀盘转速一般低于硬岩地层，主要由扭矩大小及掌子面的超欠挖等因素综合确定，且随着刀盘进入硬岩部分的增多，刀盘转速逐步降低，其原因随着刀盘进入硬岩部分的增多，所需刀盘扭矩增大，需降低转速来获得更大的扭矩。进入全断面硬岩地层后，刀盘扭矩急剧增大，需提高转速来适当降低扭矩。

(3) 在上软下硬地层掘进时，应更加关注切口压力的波动，严防由于块状岩石堵塞排浆口，循环泥浆不畅通，而造成压力波动量较大，出现地面沉降等现象。应综合考虑刀盘转速、扭矩大小、扭矩曲线等因素，确定合理的刀盘转速，一般情况下，刀盘转速应控制在1.0~1.5rpm。

(4) 在上软下硬地层中，管片的姿态应适应于盾构姿态，姿态控制的重点是两者的相对位置关系，不是管片或盾构偏离设计轴线的绝对值大小，其位置关系直接决定管片是否发生开裂、变形、渗水等质量问题。盾构掘进施工复杂，期间存在诸多风险因素，盾构姿态存在突变的情况，因此应将科学选择管片点位，要保证轴线的位置关系满足设计要求。因此，管片的姿态与盾构姿态位置是同等重要。

盾构在上软下硬及全断面硬岩段掘进施工时，对刀盘、刀具的磨损严重，对施工质量、安全的要求高，通过分析总结，提高了盾构在上软下硬及全断面硬岩段的施工质量，通过定期合理的检查刀具和换刀作业，确保盾构在上软下硬及全断面硬岩段施工的连续性，大大提高了施工效率，增强了施工人员对盾构在上软下硬及全断面硬岩段施工的基本认识，提高了盾构掘进施工水平。

参考文献

[1]朱建峰, 陈立军, 郑宏, 等. 泥水平衡盾构机施工技术 在岩溶地区的应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 4147-4157.

[2]陈佳翼, 熊旭东, 马亚洲. 泥水平衡盾构机施工技术 研究综述[J]. 工程建设与设计, 2019, 39(8): 13-19.

[3]李增华, 李天鹏, 吕靖凯, 等. 泥水平衡盾构穿越 松软地层的控制技术[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(1): 53-57.

[4]郭鑫, 张建国, 王卫红. 泥水平衡盾构施工中地 质环境对施工影响的研究[J]. 建筑施工, 2021, 41(2): 65-68.

[5]李国强, 魏志刚, 肖峰, 等. 泥水平衡盾构机在 大口径隧洞软土地质条件下的应用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S2): 16-21.