

穿越钱塘江及两岸大堤施工技术浅谈

冯玉权

上海隧道工程有限公司 200030

【摘要】针对盾构在高水压、长距离条件下穿越钱塘江及两岸大堤的复杂工况，开展了关键技术与工程实践。该区间穿越段面临水文地质条件复杂、堤防沉降控制要求高等多重挑战。本文结合工程实例，系统阐述了盾构穿越钱塘江及两岸大堤的施工流程、控制要点及应对措施，总结了相关技术经验，可为同类跨江穿堤盾构工程提供参考与借鉴。

【关键词】钱塘江穿越；施工流程；控制要点；应对措施

A Brief Discussion on Construction Technologies for Crossing the Qiantang River and Its Banks

Feng Yuquan

Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd. 200030

【Abstract】 Targeting the complex conditions of shield tunneling under high water pressure and long-distance operations across the Qiantang River and its banks, this study conducted research on key technologies and implemented engineering practices. The tunnel section encountered multiple challenges, including complex hydrogeological conditions and stringent requirements for dike settlement control. Based on practical engineering examples, this paper systematically outlines the construction procedures, critical control points, and mitigation measures for shield tunneling across the Qiantang River and its banks, summarizing relevant technical experiences that can serve as a reference for similar river-crossing and dike-tunneling projects.

【Key words】 Qiantang River crossing; construction process; key control points; response measures

引言

随着城市轨道交通网络的不断延伸，地铁盾构隧道穿越江河、堤防等敏感水体及重要基础设施的工程实例日益增多。此类穿越施工往往面临高水压、复杂地层工况，对盾构掘进控制、堤防沉降保护、施工风险防控提出了极高要求。

杭州地铁5号线南星桥站—江南大道站区间是典型的跨江穿堤盾构工程。该区间穿越钱塘江及两岸大堤，穿越段地处钱塘江强潮汐河段，水文地质条件复杂，堤防结构对沉降变形极为敏感，施工风险等级高。如何在保障两岸大堤安全稳定的前提下，实现盾构安全、高效穿越，成为本工程施工技术研究的核心。

1. 工程概况

1.1 工程简介

区间左、右线盾构将四次穿越钱塘江大堤。左右线盾构从南星桥始发，先下穿钱塘江北岸大堤，后穿越钱塘江，最后穿越钱塘江南岸大堤，进入江南区域。

盾构穿越北岸大堤位置为之路与飞云江路。盾构推进施工推进环数为287环~317环，长33.6m。左、右线穿越钱塘江北岸大堤平面曲线为圆曲线，半径分别为800m、600m。穿越区域隧道轴线相对钱塘江南岸大堤夹角约80°。

钱塘江北岸大堤结构形式为重力式，根据实地和相关管理部门档案调查的情况，得到钱塘江北岸大堤的结构断面形式如下图1.1-2。



图 1.1-1 穿越段北岸大堤现场照片

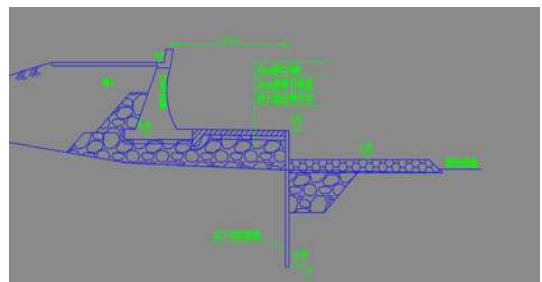


图 1.1-2 钱塘江北岸大堤结构断面图

穿越北岸大堤段隧道中心高程约-22.25m。大堤距下方隧道最小净距11.25m。穿越江堤处的地层为③4砂质粉土夹淤泥质粉质粘土、③5砂质粉土、③6粉砂。具体地质情况见下图4.1-2。

穿越北岸大堤段隧道中心高程约-22.25m。大堤距下方隧道最小净距11.25m。穿越江堤处的地层为③4砂质粉土夹淤泥质粉质粘土、③5砂质粉土、③6粉砂。具体地质情况见下图1.1-3。

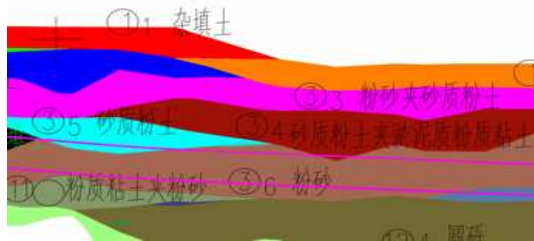


图 1.1-3 盾构穿越钱塘江北岸大堤地质剖面图
盾构穿越南岸大堤位置为闻涛路和长河路交界处。

盾构施工推进环数为 1280 环~1320 环,长度 48.1m。

左、右线穿越钱塘江南岸大堤平面曲线为直线。穿越区域隧道轴线相对钱塘江南岸大堤夹角约 80°。



图 1.1-4 穿越段南岸大堤现场照片

钱塘江南岸大堤结构形式为斜坡式断面结构形式。根据实地和相关管理部门档案调查的情况,得到钱塘江南岸大堤的结构断面形式如下图 4.2-1。

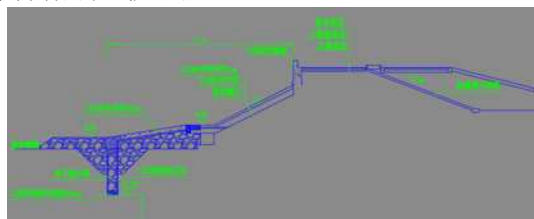


图 1.1-5 钱塘江南岸大堤结构断面图

穿越南岸大堤段隧道中心高程-32.42~-32.46m。江堤内侧 C20 砼预制块封底标高+2.30m,距下方隧道顶面约 25.14~25.18m。穿越江堤处的地层为⑧1 淤泥质粉质粘土、⑧3 粉砂夹粉质粘土、(12)1 粉砂。具体地质情况见下图 4.2-2。

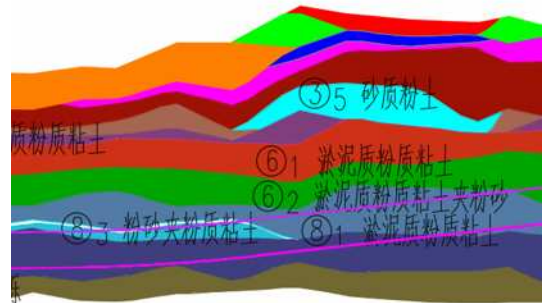


图 1.1-6 盾构穿越钱塘江南岸大堤地质剖面图
南星桥~江南大道站区间左右线在 318 环~1279 环穿越钱塘江。隧道中心高程:

-20.683~33.377m。主要穿越土层为③6 粉砂层、⑧1 淤泥质粉质粘土层、⑧2 粉质粘土层、⑧3 粉砂夹粉质粘土层、⑩1 粉砂层、⑫4 圆砾层。

盾构穿越钱塘江,最大水压可达 0.46Mpa,容易出现螺旋机突涌现象,因此施工时需采取相应措施防喷涌。



图 1.1-7 盾构穿越钱江地质剖面图

1.2 盾构穿越钱塘江及南北岸大堤信息汇总

表 1.2-1 工作量与工期对比表

穿越北岸大堤	左线	287 环 ~ 317	-20.39 ~ -20.40m	800	③4 砂质粉土夹淤泥质粉质粘土、③5 砂质粉土、③6 粉砂
	右线	287 环 ~ 317	-20.39 ~ -20.40m	600	
穿越钱塘江	左线	318 环 ~ 1319 环	-20.683~33.377m	直线	③6 粉砂层、⑧1 淤泥质粉质粘土层、⑧2 粉质粘土层、⑧3 粉砂夹粉质粘土层、⑩1 粉砂层、⑫4 圆砾
	右线	318 环 ~ 1319 环	-20.683~33.377m	直线	
穿越南岸大堤	左线	1280 环 ~ 1320	-30.56 ~ -30.60m	直线	⑧1 淤泥质粉质粘土、⑧3 粉砂夹粉质粘土、(12)1 粉砂
	右线	1280 环 ~ 1320	-30.56 ~ -30.60m	直线	

1.3 水文情况

1) 孔隙潜水

孔隙潜水主要赋存于表层填土、③层砂质粉土、粉砂中。地下水位一般为 1.10~3.80m,相应高程 3.75~6.28m。

2) 孔隙承压水

孔隙承压水分布于深部的(12)1层粉砂、(12)4层圆砾、(14)圆砾层中,水量丰富。承压水水位埋深约 7.85m,相应高程为 1.64m。

2 工程难点分析

盾构穿越钱塘江,最大水压可达 0.46Mpa,容易出现螺旋机突涌现象,因此施工时需采取相应措施防喷涌;

盾构隧道穿越两岸江堤,对于隧道的轴线以及江堤沉降的控制要求较高,给施工带来一定的困难。施工中需采取一定措施确保江堤安全。

3 盾构穿越施工技术

3.1 准备工作

1) 穿越前多次复核测量盾构里程,实测大堤各部位坐标,确认盾构与大堤的实际相对位置关系,同时明确盾构穿越时每环盾构与大堤的准确位置,以便采取相应的技术措施。

2) 对穿越区域的地面及钱塘江南北岸大堤进行监测点布设,测得初始值。在大堤前绿化带处设置 3 个深层沉降

监测点,深度到隧道上方3m。深层沉降点可以明显感知土体沉降变化,为推进参数设置提供重要参考,以减少穿越段沉降。

3) 应急物资就位。穿越段螺旋机喷涌、盾尾渗漏风险极高,因此车架上备足应急物资,针对性做好螺旋机喷涌、盾尾渗漏应急演练。

3.2 盾构机针对性设计

1) 刀盘和刀具

刀盘是盾构机掘进的关键部件,刀盘开口率45%。区间总长约为2571m,掘进距离较长,且盾构需要掘进粉砂层与圆砾层,因此对刀盘刀具进行了针对性的设计,具体如下:

(1) 刀盘的圆周面、正面加焊耐磨网格。

(2) 刀具配备为:4x中心双刃齿刀、32x单刃齿刀、32x刮刀、8x铲刀、1x超挖刀、12把保径刀,始发前新增12把边缘刀与12把中心刀。

(3) 刀具可更换。

(4) 刀盘上某些极易磨损的部分安装了特殊的耐磨保护。



图 3.2-1 刀盘正面图

2) 盾尾密封

盾构施工理论上有“护头护尾”之说。而护尾就是指盾尾的防渗防漏。特别是在长距离江河底下及含承压水的砂性土层段施工时,盾尾密封的好坏至关重要。

本工程盾构机盾尾密封设计为4道盾尾密封,呈钝角形。采用焊接式钢丝密封刷三道和钢板刷一道,钢板刷的设置是提高刚性,使密封刷不易折断,更好的保证密封性能。过江段区间隧道盾尾油脂采用优质进口材料。

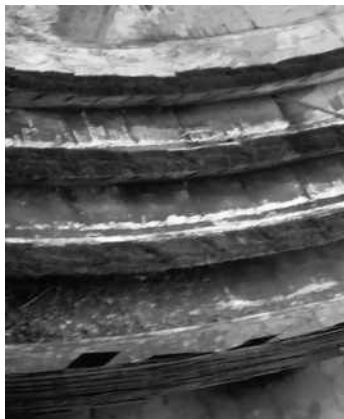


图 3.2-2 盾构盾尾密封图

3) 螺旋机

螺旋机作为渣土的主要出口,也是承压水和沼气喷涌这两风险控制的关键所在。故螺旋机设计是本工程施工的一个重要组成部分,也是较为关键、重要的一个部分。

本工程螺旋机设计如下:

(1) 采用双螺旋螺旋机。

(2) 设置2道液压控制闸门,在发生喷涌现象时,可起到关闭螺旋机,截断水气土等喷涌通道。

(3) 出料闸门靠液压油缸操纵,具备在停电时自动关闭的紧急功能;停机维护期间,螺旋机出料口可用滑动闸门关闭。

(4) 由于本工程隧道较长(单线长约2671m),且需长距离穿越复杂地层,故本工程盾构机螺旋机内部采用高强度耐磨材料处理。

(4) 螺旋机桶体设置应急注浆孔,可以对螺旋机进行应急注浆。

4) 加泥加水口

在刀盘正面设置了8个加泥加水口,以改良刀盘正面渣土和土仓内的渣土。刀盘正面加泡沫剂等,除改良渣土外,还能起到一定的保护刀盘、刀具作用。

5) 应急注浆孔的设置

在前盾与中盾设置2道应急注浆孔(每道8个孔,共16个孔)。在发生施工风险,需盾构前端紧急注浆时(如盾尾渗漏严重、气压换刀时气从盾构外向后漏气、盾构机姿态不好时等),均可进行应急注浆。

3.2 穿越控制

1) 参数设置

穿越钱塘江大堤全程控制推进速度为2cm/min左右。主要控制参数为土压,由于穿越大堤分为绿化带上坡,大堤穿越及大堤穿越完成后覆土深度极剧变化过江段,因此土压需精确控制。

刀盘进入大堤坡脚,土压设定为3.2bar,保持该土压推进至切口进入绿化带,之后土压每环均匀增加,至切口进入大堤下方土压设定为3.7bar,保持该土压至刀盘靠近大堤防汛墙,之后土层逐渐降低。

同步注浆方量逐步增加,同步注浆量设定为160%即6方/环。

4 主要风险辨识及应急措施

4.1 主要风险辨识

1) 承压水

由于江中段掘进,盾构所处承压水影响区域,且承压水水头较大,在施工中易发生螺旋机喷涌及盾尾渗漏的施工风险。

应对措施:

1、盾构选用双螺旋,可以较为有效减少螺旋机喷涌,同时盾构螺旋机出口处设置闸门,作为承压水层施工时防喷涌的预防设备。在螺旋机出口口加装液压驱动闸门,在断电情况下可以进行螺旋机闸门关闭工作。

2、盾尾设置4道盾构刷,始发前进行盾尾油脂填充;

3、按盾尾油脂压注程序,定期、定量、均匀地压注盾尾油脂;

4、同步注浆。合理掌握注浆压力,使注浆量、注浆流量与掘进速度等施工参数形成最佳参数匹配;

5、管片做到居中拼装,以防盾构与管片之间的建筑空隙过分增大,降低盾尾密封效果。

2) 沼气

根据隧道埋深、盾构穿越地层，及沼气生成条件分析。盾构推进施工前虽进行沼气排放施工，但区间段内仍不排除有毒有害气体零星囊状重新聚集起来存在。在施工中若不注意，易引起突发爆炸风险。

应对措施：

1、根据勘察结果，预先对沼气存在区域进行沼气释放工作；

2、隧道内进行通风，且通风设备保持 24 小时开启；

3、施工过程中加强对明火使用的管理，进入隧道严禁带明火（包括打火机和香烟）。隧道内禁止吸烟；

4、加强过程中的安全管理，特别是工作面的明火使用和监测管理；动用明火必须经项目部审批同意，并隧道内沼气含量小于 0.25% 以下方可进行；

5、盾构机螺旋出入口与车架上各配备一台沼气监测仪，当沼气含量超标时会进行报警。同时，盾构操作室配备手持式沼气监测仪。盾构司机每 2 小时监测一次并记录。

6、隧道内工作面、车架等区域配备灭火器。

7、对放气量较大的沼气释放孔进行排查。

3)地质勘察孔。

盾构隧道周边存在较多沼气释放孔与地质勘察孔。由于江中钻探条件所致，一般地质钻探孔定位和封孔效果都不甚理想。极易使钻探孔侵入隧道断面，致使盾构掘进该处时出现螺旋机喷涌、切口处江面冒顶等现象。

应对措施：

对后续勘察孔孔位进行排查，在距隧道较近勘察孔位附近推进时采取暂停泡沫使用或减少泡沫压力等方式规避风险，并加大同步注浆与盾尾油脂注入量。

表 4-1 部分勘察孔位置统计表

孔号	里程	距离轴线距离 (m)	对应环号	切口环号
SK-FJ-D16	右 CK34+038.41	11.66	581	586
CK-FJ-Z04	右 CK34+102.81	6.89	635	640
SK-FJ-D19	右 CK34+186.16	10.89	705	710
76	右 CK34+268.35	6.13	773	778
SK-FJ-D23	右 CK34+335.27	10.02	829	834
SK-FJ-Z24	右 CK34+409.14	11.59	890	895
CK-FJ-Z06	右 CK34+471.01	13.43	942	947
SK-FJ-D32	右 CK34+502.81	12.41	968	973
SK-FJ-Z27	右 CK34+548.41	10.76	1006	1011
SK-FJ-D29	右 CK34+621.08	11.61	1067	1072
SK-FJ-D30	右 CK34+691.65	10.88	1125	1130
SK-FJ-Z33	右 CK34+758.36	9.88	1181	1186
SK-FJ-D34	右 CK34+822.84	11.09	1235	1240
SK-FJ-Z35	右 CK34+860.61	9.47	1266	1271

4.2 应急措施

(1) 螺旋机喷涌

盾构螺旋机出口处设置闸门，作为承压水层施工时防喷涌的预防设备。一旦产生喷涌时，及时关闭闸门，如果土压不稳，可以进行一段距离闷推，形成土塞效应，预防喷涌影响施工。

如果此时发生断电或其它无法自动关闭螺旋机闸门情况，应立即对螺旋机出入口处闸门进行手动关闭。

(2) 盾尾渗漏

1、发生渗漏后进行盾构油脂注入；

2、在盾尾与管片之间垫放海绵用以止水，封堵管片与盾构间的间隙。

3、在海绵放置完成后用弧形钢板进行盾构封堵并用千斤顶压实。

(3) 检测到沼气

1) 沼气浓度达到 0.4 警戒值时，应立即通知作业班长，同时汇报项目部，并作好相关记录。同时，每上升 0.1% 向项目部汇报一次并作好相关记录；

2) 沼气浓度达到 0.9 警戒值时，如正在推进或拼装，则迅速完成当环施工。并检查以下情况并做好相关记录。

①推进停止，检查各泵体是否关闭；

②检查泡沫系统、盾构油脂注入系统、同步注浆系统是否完全关闭；

③检查千斤顶是否顶进到位；

3) 沼气浓度达到 1%警戒值时，停止所有施工，关闭所有非防爆施工电器设备；启动应急照明；准备疏散工作人员；同时汇报项目部；并作好相关记录；

4) 沼气浓度达到 1.4%警戒值时，除防爆照明开启外，其他所有设备全部关闭，施工人员（包括沼气监测人员）全部撤离隧道；

5) 待通风一段时间后，监测人员佩戴防毒面具，由隧道外部逐步向内监测，若隧道内沼气浓度达到或超过 1.4%，监测人员不得继续深入。待确定隧道内沼气浓度小于 0.25% 含量时，方可允许其他施工人员进隧道，恢复施工。

5 施工效果

盾构穿越过程中日变化量小于 0.5mm/d，穿越 1 周内最大变化量小于 3mm。持续测量 4 个月后大堤沉降稳定，沉降速率小于 0.04mm/d，6 个月后沉降速率保持在 0.04mm/d 后监测进行停测。

6 结论

在面对高水压、长距离条件下穿越钱塘江及两岸大堤的复杂工况下，通过盾构选型，刀盘刀具、螺旋机、盾尾刷等特殊设计，加上精细化参数控制，穿越过程中风险与沉降均可控。

参考文献

[1]周正晟. 南京轨交 5 号线盾构下穿机场高速桥梁施工技术研究.上海建设科技,2019
 [2]苏稚寅. 地铁盾构下穿钱塘江大堤施工技术研究.居舍,2018
 [3]赵春斌. 富含沼气地层盾构隧道施工安全综合防控技术.中国标准化,2019