

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2018.S.015

杭州市望江路过江隧道 大直径盾构施工风险控制

陆鸿飞, 李春军

(上海市市政工程管理咨询有限公司, 上海 200093)

摘要: 随着人们出行方式的变化, 交通建设也在日益发展, 城市内的大直径盾构隧道建设迎来蓬勃的发展机遇。盾构法施工具有不影响地面交通、对附近居民的噪声影响小、施工不受天气影响等优点, 能够较经济、有效地完成施工, 但盾构要穿越江河湖海和地表构筑物, 其施工安全风险的管控十分重要。以杭州市望江路过江隧道项目为例, 通过对施工过程中盾构选型、盾构始发、穿越钱塘江、盾构掘进、盾构姿态、盾构接收等风险的分析, 提前做好相应的准备工作, 确保盾构顺利掘进, 也为今后的大直径盾构施工积累宝贵的经验。

关键词: 大直径盾构施工; 过江隧道; 风险控制

中图分类号: U231.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2018)S-0076-04

Risk Control of Large-diameter Shield Construction of Wangjiang Road Crossing River Tunnel

LU Hongfei, LI Chunjun

(Shanghai Municipal Engineering Management Consulting Co., LTD., Shanghai 200093)

Abstract: With the improvement of public travel ways, traffic construction is also increasingly growing. A large-diameter shield tunnel in the city also ushered in booming development opportunities; a shield method construction has some advantages such as not affecting ground traffic, reducing the noise impact on nearby residents; the construction is not affected by the weather, is more economical and effective, but can cross rivers, lakes, and the sea and surface structures. Shield tunnel construction risk control is very important. Hangzhou Wangjiang Road River-crossing Tunnel project is used as an example to analyze the selection of the shield construction process, shield originating, crossing-river shielding, launching, positioning and receiving of tunneling. Risk analysis is made and some preparations are also made to ensure smooth large-diameter shield construction and to offer valuable experience for similar projects in the future.

Keywords: large-diameter shield construction; crossing river tunnel; risk control

杭州市望江路过江隧道位于西兴大桥(三桥)与复兴大桥(四桥)之间, 两岸分别连接上城区的望江东路和滨江区的江晖路, 是一条沟通钱江两岸江北主城区与江南副城区的城市主干道区间隧道。该工程包含 2 个盾构隧道, 均为单洞双车道隧道, 左线长度为 1 837 m, 右线隧道长度为 1 830 m。左右线从江南盾构工作井先后始发, 向北掘进下穿钱塘江后, 到达江

北盾构工作井拆卸吊出。盾构隧道采用管片拼装式单层衬砌, 管片外径 11 300 mm, 内径 10 300 mm, 厚 500 mm, 环宽 2 000 mm; 采用 8 块“7+1”分块形式, 楔型量为 40 mm, 管片采用强度等级为 C50、防水等级为 P12 的高强防水钢筋砼。管片采用错缝拼装, 管片纵缝设置凹凸榫槽, 采用斜螺栓连接。

下面以杭州市望江路过江隧道项目为例, 通过对施工过程中盾构选型、盾构始发、穿越钱塘江、盾构掘进、盾构姿态、盾构接收等风险的分析, 提前做好相应的准备工作, 确保盾构顺利掘进, 也为今后大直径盾构施工积累宝贵的经验。

收稿日期: 2018-04-25 修回日期: 2018-07-05

第一作者: 陆鸿飞, 男, 大学本科, 管理学学士, 专业监理工程师, 从事大直径盾构隧道的施工监理工作, 864741393@qq.com

1 盾构机选型风险及控制

望江路过江隧道穿越的地层有砂质粉土、粉砂、圆砾等，地质条件复杂，穿越过程中可能遇沼气、孤石、圆砾等特殊的水文地质条件；穿越沼气时需要防爆，遇孤石时需要破碎，遭圆砾时需要防“堵管”。同时，该盾构埋深较深，所以正面刀盘密封、盾尾密封等措施就显得尤为重要；工程中需要考虑特殊情况下人员出仓的处置，还要注意埋深较深带来的盾尾变形问题^[1]。

望江路过江隧道结合招标文件、工程勘察报告、隧道设计、相关标准和规范，针对工程特点及难点、隧道设计参数、盾构施工工艺、进度要求、工程水文地质、周边工况条件等组织专家评审，选用泥水平衡盾构。由于在江底施工水压较高，须考虑盾构结构件的强度以及止水部位的耐压性；由于施工距离长的原因，应充分考虑盾构刀盘壳体的钢板厚度、刀具的耐磨性和更换性，盾构机出厂前对其关键技术要求及功能进行验收，符合要求后予以出厂验收。现场组装后应进行单系统调试、综合调试，试车运转后方可始发。

2 盾构始发风险及控制

盾构始发风险包括盾构基座变形、反力架位移或变形、破除洞门时涌水涌砂涌土及洞门密封失效或漏水等。

盾构始发地基加固属承压含水层条件下的砂性土中的地基加固，采用三轴搅拌桩端头加固来保证端头土层强度，在地下连续墙与三轴搅拌桩之间采取冻结加固方法，保证达到止水的目的。在地基加固实施前，须对盾构始发、接收位置或附近的管线状况及基坑开挖过程中的渗漏、变形等事宜进行排摸、观察、梳理，要考虑管线渗漏等流动水对加固效果的影响。在加固过程中，监理严格按设定的参数控制施工，保证加固质量，加强对周边建筑物、地表环境及地下管线的监测，要求施工单位对监测数据进行分析，有异常应分析原因，并及时进行调整，以防意外情况发生^[2]。

始发阶段由于洞圈渗漏，建立初始泥水平衡有一定难度，若处置不当，出洞段易形成空洞，甚至会造成坍塌；在始发洞圈位置安装反向盾尾，始发过程中通过在反向盾尾中压注盾尾油脂，起到动态密封作用。根据以往盾构施工经验，盾尾密封油脂的压注应控制两个关键指标：一是单腔注入压力，二是加注油脂量，实际与理论用量应接近或相同。密封油脂质量也很重要，一般选用进口油脂，用量宜控制在15~20 kg/环，确保盾尾密封效果。加强始发段的监测，始发段的监测点要形成几个断面，点宜布设至原状土，以反映土体的实际变形。

盾构端头采用三轴搅拌桩加固，加固体强度较高，正面土体稳定性较好，其主要的风险点在于加固体与车站围护结构的外侧表面结合不好，以及加固体之间的密实度未达到施工要求，如果出现上述情况，则洞门破除时很容易产生土体失稳现象。对洞门区域进行取芯试验来检测盾构端头的加固效果，观察正面土体的含水量及土体加固强度；洞门破除前，准备好注浆泵及相关的应急抢险物资，一旦发现洞门涌水、涌砂、涌土或塌陷，就立即注浆进行封堵^[3]。

地下连续墙与三轴搅拌桩土体加固区之间采取盐水循环冻结加固法，始发端土体已进行了加固，荷载主要由搅拌桩加固体承担。冻结加固的作用是保证加固体与槽壁间的密封，防止地下水渗漏。工程始发端冻结管规格为 $\phi 127 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的无缝钢管，冻结孔间距为80 cm，排距80 cm，实测盐水温度最低为-28~-32℃，冻结土层的平均温度为-10℃，最低温度-12℃，冻结壁有效厚度 $\geq 200 \text{ cm}$ 。通过该工程施工总结，群孔冻结内部冻土的平均发展速度为35 mm/d以上，外部(向外)冻土平均发展速度不小于25 mm/d，冻土墙交圈时间约30 d，冻土墙与槽壁完全胶结时间约40 d，冻结效果符合方案要求，满足盾构始发施工要求。

为避免洞门密封失效或漏水，需严格按照设计文件进行洞门钢环的制作、安装，保证施工精度满足要求；加强盾构始发时的姿态控制，避免盾构姿态不好造成洞门密封的局部失效；盾构始发时，派专人对洞门密封情况进行观察，尤其是洞门下方渗漏的检查，发现问题要及时处理。

3 盾构掘进风险及控制

3.1 钱塘江江堤

在盾构掘进过程中，盾构从岸边堤防结构下穿越，必定会因地层移动而引起堤防工程结构产生不同程度的沉降变形，堤防工程产生的超载压力会引起管片结构较大的变形，这些均会导致堤防被破坏。堤防的安全与否将直接关系到国家和人民群众的财产和生命安全，尤其是在汛期，更是要求堤防完好无损和万无一失，这就要求盾构推进施工中必须采取足够的安全保证措施。

确保堤防结构的安全，需要施工单位在堤防处隧道轴线上布置沉降测点，并布置横向监测点，施工过程中根据监测结果及时优化调整各类施工参数；在盾构穿越期间，应对堤防进行沉降监测，及时观察结构的变形情况；监测数据应及时、准确地反馈给中央控制室，使中央控制室能够根据地面所反映的情况进行

正确判断,及时通知各子系统调整施工参数^[4]。

在盾构穿越期间,施工单位要严格保持开挖面的泥水和土压力平衡,减少对土体的扰动,不得超挖或欠挖,防止过大的纠偏,关注检查切口水压、泥水质量指标、推进速度、偏差流量;加强盾尾同步注浆和壁后二次注浆等参数的控制,注浆原则是及时、多点、少量、对称、均衡,注浆量经验用量为:黏土为理论用量的100%~140%,砂土为理论用量的200%左右。根据防洪堤监测数据及时调整施工参数,如调整注浆量等;地表隆起时应适量减少注浆量,地表沉降时应适量增加注浆量;一般在始发前100m试验总结确定,以地表零沉降、零变形为控制标准^[5]。

3.2 抛石区

由于拦洪筑堤、围垦筑田等原因,在钱塘江北岸的上部粉土、砂土地层中存在抛石,直径10~30cm不等。根据地勘报告,江北右线YK1+055~YK1+070.8地下障碍物为抛石或其他孤立异常体,障碍物标高约为-9.7m;YK1+162.5~YK1+174.4段地下障碍物主要为抛石和其他孤立异常体,障碍物标高在-5.5m左右;障碍物埋深最大处的底板标高均落入隧道盾构施工位置,抛石沿隧道纵向分布长度总共约30m。对于此类风险,在盾构掘进的过程中对可能发生段进行划定,加强盾构线路前方的地质勘探工作,及时发现、及时处理,如地下爆破处理;盾构机自身就有破碎石块的功能,在刀盘后方装有液压式破碎机,能破碎粒径小于100cm的孤石,施工过程中泥水舱内注入优质泥浆或其他泥水添加剂,以减小抛石对刀盘、刀具的磨损;在推进过程中,采取土仓压力变动、顶推力变化等盾构措施,也能起到一定的作用^[6]。

3.3 沼气层

根据地质详勘报告,隧道范围内江中与江南段存在浅层沼气,主要赋存于YK2+100以南线路,南北陆域段未发现沼气溢出;沼气主要在钱塘江主航道附近勘探点零星外溢,个别有短暂井喷现象,压力一般为0.05~0.17MPa。

沼气的贮气层分布在标高为-16~-30m的③₂层流塑淤泥质粉质黏土底部与③₁淤泥质粉质黏土夹粉砂层中,该层为含气层与气源层共存,其上部的淤泥质粉质黏土层构成了气盖层。该区域的沼气属自闭型沼气,气源层与含气层相互交错,由于淤泥质黏性土本身的自封闭作用,其赋存特点是含气层连通性差、贮气空间较小。

盾构区间沼气处理以放气为主,加强盾构区间监测措施(配备瓦斯报警仪)、通风措施(加大现场通风)、

报警及应急处置,如有较大规模的储气区域,应事先采取放气措施。气压大于0.2MPa时排气孔间距小于20m,小于0.2MPa时排气孔间距20~30m;放气过程中必须缓慢均衡放气,不帶出泥沙、泥水。盾构机自带沼气监测装置,当沼气聚集到一定浓度后,设备自动报警,并启动通风设备,降低沼气浓度,确保作业人员安全。

3.4 小净间距隧道

在接近江北工作井隧道施工,该段隧道覆土约10.42m,隧道线间距17.5m,隧道净距6.48m。盾构段先施工左线隧道,贯通后再掘进右线隧道,必须考虑后施工隧道盾构的推进对先行隧道的挤压和扰动、后施工隧道盾构的盾尾通过时对先行隧道的扰动、后施工隧道的壁后注浆对先行隧道的挤压、先行隧道周围土体的松弛对后施工隧道盾构引起的偏移等^[7]。

施工单位及时做好纵、环向螺栓的连接工作,加强先行隧道衬砌管片的应力和收敛量测,并根据监测情况及时调整盾构推进速度、同步注浆量及注浆压力,稳定隧道间侧向压力,尽量减少隧道产生的偏压^[8]。

3.5 暗塘段

隧道明挖段、明挖暗埋段和陆域盾构段早期为钱塘江河口冲海积形成滩地,后期人工围垦成鱼塘,且面积较大,现均已回填。局部在回填时未清淤,形成暗塘,力学性质极差,勘察显示在江南YK2+650附近有面积较大的暗塘,其余地点呈零星分布状。

在盾构施工前,对江南YK2+650附近的盾构隧道进行地质补勘,加密探孔间距至10m,详细调查暗塘大小、与隧道位置关系及其强度等情况。根据勘察情况详细计算切口水土压力,结合试验段参数优化调整掘进参数。严格控制切口压力,避免切口压力波动过大,并向泥水舱内注入优质泥浆,在掌子面上形成有效的泥膜保护,维持掌子面的稳定,确保盾构稳定顺利地进行掘进施工。严格控制同步注浆和浆液质量,通过同步注浆及时填充建筑空隙,减少施工过程中土体的变形。选择符合土体条件及盾构形式的注浆材料,保证压注后强度上升快并且凝固收缩小。为保证施工隧道的安全,加强施工控制措施,优先选用优质泥浆,提高泥膜形成质量,以维持掌子面稳定,减小刀盘所受扭矩,同时降低总推力,匀速掘进^[9]。

4 盾构接收风险及控制

盾构接收风险包括盾构机姿态控制、破除洞门时涌水涌砂涌土、洞门密封失效或漏水、相邻位置接收之间的干扰等。

盾构接收时, 盾构后靠支撑体系在受盾构推进顶力的作用后, 发生支撑体系的局部变形、断裂或位移过大。存在的风险有管片碎裂、轴线超标、十字错缝、渗漏水、管片环缝、高差、千斤顶行程差较大, 有时会造成帘布橡胶板外翻、洞口土体流失等, 导致接收段路面沉降, 危及周边管线和建筑物安全。在发现问题时, 要及时安排注浆、封板等堵漏措施, 封堵加固体与隧道间的渗漏通道, 减少土体流失。洞门密封圈安装要准确, 在盾构推进的过程中要注意观察, 防止盾构刀盘的周边刀割伤橡胶密封圈, 密封圈可涂油脂增加润滑性; 洞门的扇形钢板要及时调整, 改善密封圈的受力状况^[10]。

盾构姿态控制决定盾构施工的好坏, 若盾构姿态控制不佳、盾构轴线偏离洞门轴线, 将导致盾构无法从预定的洞门接收。接收前, 检查后靠支撑体系, 确保牢固; 选用正确的千斤顶编组, 防止盾构上浮; 调整整个盾构姿态, 使盾构底标高略高于基底标高, 但盾构下落到基底的距离不超过盾尾与管片的间隙。接收时, 井内管片拼装尽量利用盾壳与管片的间隙做适当的轴线纠偏, 以改善隧道轴线。

5 结语

由于前期对大直径盾构施工中存在的风险进行充分的分析, 完善了应急预案, 保证了盾构施工有条不紊地进行。盾构始发时采取了在地下连续墙外土体冻结加固及三轴搅拌桩土层加固的双重措施, 有效地控制了洞门破除时涌水、涌砂、涌土及洞门密封失效或漏水等风险。充分分析盾构掘进过程中存在的各类风险, 做好相应的应急预案; 考虑到杭州地下复杂的土质情况, 严格复核勘察单位的地质勘察报告, 严格控制掘进速度、推力、刀盘扭矩、刀盘转速、泥浆性能、气保仓压力, 同步注浆压力、注浆量等参数; 加强施工过程中的监测, 发现问题及时按照应急措施解决; 以 10 环为一个分析单元, 调整后续掘进参数, 保证了盾构施工的安全和质量。

盾构掘进穿越钱塘江南岸大堤时, 根据土层厚度、土质、地下水压力, 调整盾构机的各项掘进参数, 如气保仓压力、掘进速度、同步注浆量及注浆压力。为了更精准地控制大堤的隆起或沉降, 几乎每 2 环就调整掘进参数。通过监测数据分析, 发现盾构掘进时对地层扰动最大, 位于切口处的地层沉降变形量也最大, 日沉降量为 2~5 mm, 最大值 7 mm; 管片拼装脱离盾尾后有一定上浮, 同步注浆后地层处于微量隆起状态, 一般隆起量为 3 mm, 最大值 5 mm; 掘进完成 2 个月后大堤地层趋于稳定, 实测累计最大沉降量为

14 mm, 满足钱塘江管理局设定的沉降 ≤ 20 mm、隆起 ≤ 10 mm 的设计要求, 确保了钱塘江南岸大堤的稳定。

盾构掘进穿越沼气层时, 采取设备自动监测和人工检测的双保险措施。在设备制造时, 盾构机上安装 8 个沼气自动监测仪, 分布于刀盘、管片拼装机、盾尾、控制室等不同部位, 实时监测有害气体含量。同时, 通过手持式有害气体检测仪定时检测, 安排专人每 6 h 检测记录 1 次, 确保有害气体浓度不超标。隧道内采用风管压入式通风, 风管直径 2 000 mm, 风量为 1 695~3 300 m³/min, 风压 930~5 920 Pa, 电机功率 132 kW $\times 2$, 转速 1 480 r/min, 满足隧道通风需要。工程沼气段长度为 400 m, 采用德国海瑞克生产的混合式泥水平衡盾构机, 盾壳、气保仓、盾尾密封严密, 有害气体没有泄漏到隧道内, 自动监测和人工检测结果显示, 有害气体浓度为零, 氧气浓度保持在 20%~22%, 满足安全作业的需要。

参考文献

- [1] 许永兵, 朱方正. 城市过江通道的建设和发展分析[J]. 公路与汽运, 2010(2): 39-41.
- [2] 赵运臣. 盾构始发与到达方法综述[J]. 现代隧道技术, 2008(S1): 86-90.
- [3] 陈立. 黏土层中泥水盾构掘进施工技术探讨[C]//第二届隧道掘进机(盾构、TBM)专业委员会第一次学术研讨会暨中铁隧道集团城市盾构项目管理、施工技术、设备维保交流会论文集. 北京, 2011: 134-135.
- [4] 张旭辉, 蒋周耘, 李雪, 等. 大直径泥水盾构斜穿大堤施工参数及地层沉降分析[C]//2014 中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十八届年会论文集. 杭州, 2014: 62-64.
- [5] 吴世明, 林存刚, 张忠苗, 等. 泥水盾构下穿堤防的风险分析及控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1034-1042.
- [6] XIA Bian, ZHEN Shun, HONG Jian, et al. Evaluating the effect of soil structure on the ground response during shield tunnelling in Shanghai soft clay[J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2010(4): 38-39.
- [7] 韩昌瑞, 贺光宗, 王贵宾. 双线并行隧道施工中影响地表沉降的因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 484-488.
- [8] 陶连金, 孙斌, 李晓霖. 超近距离双孔并行盾构施工的相互影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1856-1862. TAO Lianjin, SUN Bin, LI Xiaolin. Interaction analysis of double holes extremely close approaching parallel shield tunnels construction[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(9): 1856-1862.
- [10] 刘军, 马云新, 章良兵, 等. 盾构地下主动接收施工关键技术研究[J]. 施工技术, 2017, 46(19): 93-96.

(编辑: 郝京红)