

过江长距离小口径钢顶管施工案例

戴维生¹, 徐海峰², 刘世忠², 周微²

(1. 绍兴市公用事业集团有限公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴市自来水有限公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 以袍江段穿越曹娥江顶管施工为例,介绍了小口径、长距离、大深度钢顶管施工全过程管控,阐述了顶管施工沉井下沉、钢管焊接、注浆工艺、顶管初始顶进、顶管姿态控制等施工要点,剖析了顶管施工过程中碰到的问题及相应解决方法,积累的施工经验可供类似顶管施工参考。

关键词: 钢顶管; 过程管控; 顶管姿态

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)24-0118-05

Case Study of Small Diameter and Long Distance Steel Pipe Jacking Construction Crossing River

DAI Wei-sheng¹, XU Hai-feng², LIU Shi-zhong², ZHOU Wei²

(1. Shaoxing Public Utility Group Co. Ltd., Shaoxing 312000, China; 2. Shaoxing Water Co. Ltd., Shaoxing 312000, China)

Abstract: Taking the construction project of the pipe-jacking across Cao'e River in Paojiang section as an example, this paper introduced the whole construction process control of steel pipe jacking with small caliber, and long distance and large depth. This paper expounded the main points of construction such as caisson sinking, pipe welding, grouting technology, initial jacking of top pipe and attitude control of pipe jacking. The problems encountered in pipe jacking construction and the corresponding solutions were analyzed as well. The accumulated construction experience could provide reference for similar pipe jacking project.

Key words: steel pipe jacking construction; process control; top pipe posture

为解决绍兴滨海印染产业集聚区和绍兴滨海新城用水紧缺问题,进一步提升绍兴北部区域供水保障能力,绍兴市、柯桥区水务集团共建绍兴城市北部区域供水保障工程。项目设计规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,总投资为2.1亿元,共建设DN800~DN1600供水管20.5 km。项目实施重点、难点为过曹娥江顶管,其顶管距离长、口径小、埋深大。通过细化顶管设计,强化过程管控,顶管成功穿越曹娥江。

1 工程概况

袍江段穿曹娥江顶管长度为1177 m,管中心标高为-17 m,采用D1600 mm×18 mm钢管。采用泥水平衡顶管工艺,穿越地质主要为淤泥质粉质黏

土、砂质粉土。顶管工作井、接收井均采用圆形沉井施工。其中,工作井E2为永久井,外径 $\varnothing 15.5 \text{ m}$,壁厚为1 m,开挖深度为28.5 m;接收井E1为临时井,外径 $\varnothing 12 \text{ m}$,壁厚为1 m,开挖深度为32.6 m。顶管沿袍江大桥西侧自北向南顶进,由位于曹娥江北侧的工作井E2始发→途经曹娥江北岸陆域段($L=264 \text{ m}$)→穿越曹娥江南北两侧江堤($L=563 \text{ m}$)→途经曹娥江南岸陆域段($L=350 \text{ m}$)→到达曹娥江南侧接收井E1。

2 顶管施工难点

① 顶管距离长、口径小,长细比(顶管长度/管径)为7356。根据有限元分析计算,顶管轴向稳

定系数与长细比成反比,长细比越大,稳定系数越低,顶进过程中轴线控制难度越大^[1]。

② 由于顶管位于曹娥江袍江大桥下游,河道局部冲刷深度达13 m。根据曹娥江管理部门意见及考虑后续管道运行安全,管中心标高取-17 m,顶管工作井、接收井平均开挖深度达30.55 m,下沉过程中沉井垂直度和稳定性控制难度大。

③ 顶管周边情况复杂,需2次穿越曹娥江大堤、1次穿越DN600高压燃气管(工作压力为4.2 MPa),且工作井旁18 m处有DN400中石化输油气管(工作压力为0.95 MPa)和DN600高压燃气管(工作压力为4.2 MPa),对沉井下沉及顶管施工周边沉降控制要求高。

3 顶管施工过程管控

3.1 编制专项施工方案

顶管施工前,施工单位根据现场情况,结合施工实际,编制顶管施工专项方案和沉井施工专项方案,组织专家对方案进行评审,并根据专家意见,进一步细化完善。完善后的施工方案,按规定程序审批,施工过程中严格执行。

3.2 成立顶管专家咨询指导组

鉴于该顶管施工难度大,可借鉴经验少,建设单位邀请顶管经验丰富的3名专家组成专家咨询指导组,在顶管施工方案评审、沉井下沉及封底、顶进施工等关键节点提供技术支持和现场指导。

3.3 顶管施工关键节点措施

3.3.1 沉井施工

① 沉井制作

沉井(包括工作井、接收井)均为混凝土井,采用五次制作、两次下沉。为保护工作井旁输油气管、高压燃气管,沉井周边采用 $\varnothing 850 @ 600$ 三轴水泥土搅拌桩加固土体及止水,并在管道沿线施打入12 m长IV型拉森钢板桩,以隔断沉井下沉对管道及其周边土体影响。为避免沉井制作时产生突沉或不均匀沉降,确保接高稳定性,根据沉井质量和地基承载力,在沉井刃脚下铺设砂垫层(宽度为3 m、厚度为1 m)和混凝土垫层(宽度为1.2 m、厚度为0.2 m),扩大沉井受力面积。沉井接高过程中,沉井接高轴线与沉井中轴线重合,使沉井刃脚受力均匀,防止因荷载不均引起沉井偏斜。为确保井壁施工质量,井壁模板采用定制钢模板,用拉杆螺栓对销栓定(拉杆两端可拆卸)。拉杆中间加焊60 mm \times 60 mm钢板

止水片,防止渗漏。

② 沉井下沉

沉井下沉采用初期排水下沉与后期不排水下沉相结合施工工艺。根据地质情况并结合施工经验,下沉系数取1.10~1.25。下沉取土遵从均匀、对称原则,先刃脚后中心,中心适量取土,形成“反锅底”,每层开挖深度<30 cm。初期排水下沉,用小型机械井内挖土,保持沉井平面位置与垂直度在允许范围内,避免发生倾斜。后期不排水下沉,用高压水枪射流冲碎土层,用水力吸泥机吸至地面沉淀池。吸泥过程中吸泥口离泥面高度一般为15~20 cm,水枪压力 ≥ 2.0 MPa,并不间断移动吸泥口位置,以提高泥浆浓度。由于空气吸泥机排水量大,吸泥过程中用水泵向井内不间断补水,以保证井内水位平衡。一般井内水位略高于井外地下水位。沉井下沉速度根据井内水位控制,降低井内水位则下沉速度加快,升高井内水位下沉速度减慢。沉井距设计标高2 m时,应加强观察,严格控制下沉速度、井内水位、出土量等参数。

③ 沉井下沉施工监测

a. 沉井高程控制。待沉井混凝土强度达到设计强度的70%,在沉井外围对称四角弹出标尺刻度,设立观测点,用全站仪对沉井四角高差进行跟踪监测,初期每班观测一次,中期每班观测三次,终沉阶段每小时观测一次。

b. 沉井位置控制。沉井下沉前,在井外地面设置纵横十字控制桩、水准基点,在井内壁纵横四等分标出垂直轴线,各吊一个垂球,对准下部标板。挖土时随时观测垂直度,当垂球离墨线边达5 cm时,及时纠正。初期每班观测两次,中期每班观测三次,终沉阶段每小时测量一次。

沉井下沉高程、位置纠偏应根据监测数据,随偏随纠,做到勤测、勤纠、缓纠。另外,沉井下沉前,对燃气管、输油气管及周边构筑物等布置沉降观测点,施工过程中根据监测数据及监测报警值要求,及时调整沉井下沉速度并采取相关应急措施。

④ 沉井封底

当沉井下沉接近至设计标高,且8 h内自沉累计不超过10 mm时,进行水下封底。封底前清除井壁表面淤泥,布置2个泄水孔,抛入碎石压淤造底。经潜水员摸底检查合格后,浇筑水下混凝土封底。封底混凝土面应比设计高0.15 m(水下混凝土灌入

时会有少量淤泥、废渣带上来),高出部分待井内水抽干后凿除。经抗浮验算达标、封底混凝土达到设计强度,进行泄水孔封堵和钢筋混凝土底板施工。

3.3.2 顶管施工

① 顶进设备选型

经计算,管道总顶力为22 226 kN。工作井设计顶力为500 kN,需设置中继间。根据计算及分析,中继间取5个,分布在40、190、390、640、890 m处。

根据设计要求,结合顶管穿越土质,选用大刀盘泥水平衡顶管掘进机,主顶进系统采用6口2 000 kN双冲程等推力油缸,总推力为12 000 kN。主顶系统由PLC可编程控制器控制,采用变频调速器,实现流量无级调速。

② 管道焊接

管道焊接质量控制是长距离顶管施工的一个重要环节。根据焊接工艺评定,管道采用CO₂气体保护焊,单面焊接双面成型。管道坡口型式采用V型鸳鸯坡口(上部180°为外开口V型,下部180°为内开口V型)。焊接完毕后,进行外观质量检查,再由具有资质第三方进行100%超声波检测,焊接质量须满足《承压设备无损检测 第3部分:超声检测》(NB/T 47013.3—2015)Ⅱ级标准。其中,顶管首道焊缝还应按《承压设备无损检测 第2部分:射线检测》(NB/T 47013.2—2015)Ⅲ级标准进行X射线探伤检验。施工过程严格控制焊接质量,焊缝不合格严禁顶进。

③ 顶管注浆

a. 注浆孔设置。为确保注浆充分,形成良好泥浆套,在顶管工具管、钢管及中继间断面设置注浆孔,每个断面布置3个注浆孔。其中顶管机头后10节钢管每节设置2个注浆断面,即断面间距为4 m,其余断面间距为8 m。注浆管与注浆孔连接处设置单向阀,防止压浆停止时管外泥砂流入注浆管。另外,由于顶进距离长,一次压浆无法到位,在管道内设置3座泥浆接力站,平均间隔约300 m。

b. 注浆质量控制。严格控制膨润土质量、泥浆配比,提高浆液与土体、管壁粘结力,降低浆液流动性,减小浆液沿管外壁向下渗趋势。施工前根据现场土质进行配合比试验,施工过程中根据穿越地质变化,及时调整。

c. 注浆量及注浆压力。根据顶管机头与钢管外径之差,单节钢管理论注浆量为2.07 m³。实际注

浆量为理论值的1.5~3.0倍。根据地质情况、顶管长度及泥浆接力站设置,注浆压力控制在0.3~0.4 MPa。为避免管外壁浆液压力不均(管道低处压力过大,管道高处压力过小,甚至缺浆),每隔50 m设置一个注浆压力检测点,根据覆土深度的被动土压力+20 kPa,实时调整注浆压力。同时,根据顶力及压力检测点数据,及时采取在管道低处放浆、高处补浆措施,使管道外壁浆液压力保持动态平衡,避免浆液局部聚集,造成顶力过大现象。

d. 注浆方式。注浆必须坚持“先压后顶、随顶随压、及时补浆”的原则。由于顶管周边环境复杂,顶管距离长,对地面沉降控制要求高,施工采用同步注浆方式,尽可能减小管道顶进阻力。同时,施工过程中采取二次补浆,弥补同步注浆可能产生的缺陷。

e. 置换泥浆。管道顶进结束后,为防止出现滞后沉降,利用原注浆系统对顶进过程中触变泥浆进行置换。置换泥浆采用纯水泥浆,从第一节管依次向后进行置换。置换前一节管泥浆时,应将后续管节压浆孔开启,使原有管路泥浆在水泥浆压力下,从后续管节压浆孔溢出,直至后续注浆孔冒出水泥浆,并达到一定压力后停止,确保触变泥浆全部置换。

④ 顶进施工

顶管进洞前须做好顶管机组组装、就位、调试,验收合格后,方可进洞。由于进出洞口土层含水量丰富,地下水补给快,洞口采用单道橡胶板结合牛油盘根止水方式。

a. 初始顶进。初始顶进是顶管施工关键环节之一,为后续施工提供一个良好导向。顶管前200 m作为顶进试验段,根据施工地质、地下水位、管道埋深等,掌握顶管机推进各项参数及调节控制方法,确定合理土压力、排土量及顶进速度等参数,熟练掌握注浆工艺,测试地表隆陷、地中位移等,分析不同地层、各种推进参数条件下的地层位移规律,以及施工对地面环境影响,并及时反馈调整施工参数,确保顶管安全顺利施工。

b. 顶进过程线形控制。线形控制主要是通过控制顶管姿态,使顶管轨迹位于偏离设计中心线允许误差范围内,通过顶进控制测量和方向控制来实现。控制测量是使顶管机沿设计轴线顶进,保证顶进方向精确度的前提和基础。为确保测量精度,配备激光导向系统、接收激光束的光靶传感器及数据处理系统,组成了顶进姿态自动测量控制系统。同时,顶

进过程中,采用全站仪对顶进轴线进行测量复核。施工测量严格执行作业队、项目经理部、监理三级复核制度,确保顶管按设计方向顶进。

根据测量结果,指导顶管方向控制。方向控制包括滚动方向、竖直方向、水平方向。由于刀盘正反向均可出土,通过反转刀盘,纠正滚动偏差。一般滚动偏差 $\leq 1.5^\circ$,超过该值时顶管机自动控制系统报警,工作人员及时切换刀盘旋转方向,进行滚动纠偏。控制顶进竖直、水平方向,通过改变单侧千斤顶顶力来实现。竖直方向控制过程中,当顶管机出现下俯时,可加大下侧千斤顶顶力;当顶管机出现上仰时,可加大上侧千斤顶顶力。水平方向控制与竖直方向纠偏原理一样,左偏时加大左侧千斤顶顶力,右偏时加大右侧千斤顶顶力。

顶管过程中,根据开挖面地层情况,及时调整顶进参数,修正顶进方向,避免偏差越来越大。切换刀盘转动方向时,待刀盘停止转动稍作停顿后,再改变转动方向,以保持开挖面稳定。同时,顶进中尽量减少地层扰动,故应根据不同土质、覆土厚度等实际情况,结合监测信息反馈,及时调整泥水平衡值,控制纠偏量,做好注浆补浆,保持相对平稳,减少对土体扰动。

c. 顶管出洞。顶管机出洞前,检查洞圈外部土体加固效果,确认达到预期效果后,方可出洞。顶管机出洞时,顶进速度宜缓慢,由于顶管机与地层间摩擦力逐渐变小,顶管机易旋转、上飘,采用刀盘正反转措施,及时调整顶管机转角,确保安全出洞。

d. 施工过程管理。顶管顶进前,确定各项报警值及应急处理机制。顶进过程中采用图表化管理,实时记录顶力、轴线偏差及纠偏动作、穿越地层性质、注浆量、管道位置、管道焊接时间等,按时编制每班日报表,及时报送建设单位和监理单位。顶进过程中,建设单位、监理单位及施工单位实行24 h值班制度,遇到问题及时分析解决,确保顺利顶进。

⑤ 沉降观测

顶进过程中,在曹娥江江堤、输油气、天然气管线上按要求设置观测点,严密监控顶进过程及滞后沉降、位移变化,确保江堤、管线等构筑物安全。

⑥ 其他

顶管施工中确定中继间的数量、结构图及闭合流程图,需经设计单位确认后,方可实施。另外,为解决长距离顶管供电电压降及安全用电问题,施工

中加大电缆容量,并安装一套自动增压装置,以便降压过大时起稳压作用,保证顶进设备正常运作。

4 施工中碰到问题及解决措施

4.1 突然涌水

工作井E2下沉至标高 -20.6 m 时,井内突然涌水,立即从河道抽水回灌至井内,当井内水位至标高 -15.6 m 时,涌水涌砂情况得到有效控制。结合顶管东侧袍江大桥地勘报告,分析认为其原因为地面 42 m 以下承压水剪切冲破不透水层涌入。为保证施工安全,后续水下取土过程中,保持稳定高度水位(控制水位标高为 $-13.6\sim -11.6\text{ m}$),确保沉井不因取土发生突沉、偏斜。

4.2 沉井下沉困难

工作井E2下沉至标高 -12.4 m 后,下沉缓慢。经分析,因沉井周边部分水泥土搅拌桩,在下沉过程中涌入沉井刃角下方,导致井体下沉阻力增大,后采取井内外不平衡开挖、井上载重、井外壁四周注浆减阻等措施,下沉至标高 -22.1 m 。考虑沉井已接近设计标高(-23.1 m),不宜采取快速沉降措施,且沉井自沉也满足封底要求,经专家论证及设计变更,进行封底施工。

4.3 通风

本次施工采取强制通风方式。在地面设置进气量为 $3\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 的轴流风机通过管内通风管道,直接输送到顶管头部,采取从里往外换气方式,确保管内空气质量。钢管焊接时,在作业面内侧悬挂帘布,避免电焊作业产生的烟雾进入管道内部。由于工作井较深,井内空气自然流通性差,顶管后期又增设一台大功率工业用鼓风机,以提高井内空气质量。

4.4 管内运输

由于顶管内布置注浆、通风、进水、排泥、供电等管路后,管内空间狭小,管内运输及人员进出难度大。工程人员根据管内有限空间,开发定制了无级变速轨道电动车,作为管内运输交通工具,有效解决了人员、设备材料进出问题,提高了施工效率,保障了顶管施工安全。

4.5 顶管出洞透水

在滨海段顶管中,出现顶管出洞时透水,致使顶管机头无法正常出洞。为此,采用了对土体进行液氮冻结的加固方案,即在原土体高压旋喷桩已加固的出洞口区域,利用垂直冻结孔注入液氮,使出洞口外围土体冻结成强度高和不透水的板块,为顶管机

头出洞提供条件。采取该项措施后,机头顺利出洞。

5 结语

通过对顶管施工的精细化管理,加强对顶管沉井下陷、顶进注浆、管道焊接、顶进姿态控制,以及邀请经验丰富专家的现场咨询指导,及时解决了施工过程中碰到的沉井涌水、沉井下陷困难以及长距离顶管通风、材料设备运输难等问题,圆满完成了埋深大、口径小、距离长的钢顶管施工,为类似钢顶管施工积累了宝贵经验。

参考文献:

- [1] 邵光辉,蒋志刚. 大直径钢顶管施工屈曲分析与稳定系数研究[J]. 给水排水,2018,44(2):94-98.
Shao Guanghui, Jiang Zhigang. Discussion on buckling analysis and stability coefficient of large diameter steel pipe jacking construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(2):94-98 (in Chinese).



作者简介:戴维生(1980-),男,安徽庐江人,本科,高级工程师,公司工程管理部副经理,主要从事供排水管道规划、设计、施工及排污泵站除臭技术应用、GIS地理信息系统应用等工作。

E-mail:328514650@qq.com

收稿日期:2019-04-22

(上接第117页)

4.5 预应力筋实际伸长值超过规范要求

① 铺设安装不当使预应力筋护套破损,导致混凝土浇筑时水泥浆流入套管内,引起预应力筋与混凝土间摩擦阻力过大。应对方法:将控制应力提高到原来的1.05倍,但不能大于预应力筋强度标准值的0.8倍,并持荷2 min。

② 预应力筋在计算伸长值时,对摩擦损失估算偏大。应对方法:重新对摩擦影响系数进行取值,重新计算伸长值并进行校对,以指导施工。

5 结语

工程实践表明,将无粘结预应力技术应用到圆形水池中,与普通混凝土池壁结构相比,可减少混凝土用量约40%,减少钢材用量30%以上,经济效益显著;并且通过预应力作用,提高了池壁混凝土的抗裂和防渗性能,在一定程度上解决了普通混凝土池壁容易出现裂缝导致渗漏的问题。

参考文献:

- [1] 江正荣. 建筑施工计算手册[M]. 2版. 北京:中国建筑

工业出版社,2007.

Jiang Zhengrong. Handbook of Building Construction Computing[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007 (in Chinese).



作者简介:柯海鹏(1975-),男,浙江缙云人,本科,高级工程师,从事市政环境工程管理工作。

E-mail:172583140@qq.com

收稿日期:2019-05-11