

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.12.043

顶管管节渗漏处理施工控制措施

陈铭辉

(上海宏波工程咨询管理有限公司,上海市 201707)

摘 要: 针对白龙港南线输送干线 SST1.2 标过江段顶管方案调整后(从浦西向浦东顶进),管道顶进到 567.5 m 时,在第 20 节与第 21 节管缝(距离机头 50 m,距离 W1# 工作井 517.5 m)处发生漏水、漏砂现象,导致该段顶管无法继续顶进,针对出现的问题,提出采用气压法施工工艺对渗漏管道透水点进行处理,在气压状态下对管道进行检查修复作业,分析了管道施工的重难点,重点阐述了管道修复施工技术措施和手段。

关键词: 顶管;管节渗漏;气压法施工;管道修复

中图分类号: TU990.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)12-0164-06

1 工程概况

1.1 总体简介

上海市白龙港南线输送干线 SST1.2 标管道主要位于上海市徐浦大桥外环线外侧,自华泾路提升泵站穿越黄浦江,沿林浦路、S20 公路至济阳路交汇井,采用钢筋混凝土管顶管施工,总长 3 687 m,其中过江管管径为 $\phi 2\ 700\text{ mm}$,长为 1 087 m。黄浦江连接管管径为 $\phi 2\ 700\text{ mm}$,长为 2 600 m,包括顶管工作井 3 座,顶管接收井 4 座。采用沉井、钻孔灌注桩、旋喷桩等围护结构形式。顶管沿线穿越黄浦江、轨道交通 8 号线、S20 济阳路立交等重要河道和建(构)筑物。白龙港南线输送干线 SST1.2 标施工平面图如图 1 所示。

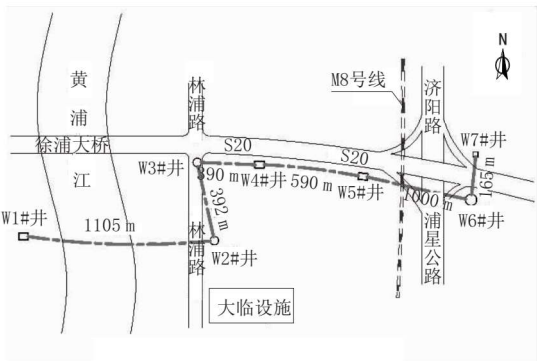


图 1 白龙港南线输送干线 SST1.2 标施工平面图

1.2 顶管方案调整

原施工筹划为从浦东 W2# 工作井向浦西 W1#

接收井进行越江顶进施工,W2#~W1# 段过江顶管在顶进 336 m 处,遭遇立新船厂厂区下桩基础障碍物,导致该段顶管无法继续顶进,由于船厂建筑物不能受损,因此考虑将已顶管道的部分管节拔出,将浦西 W1# 作为顶管工作井、浦东 W2# 作为接收井,调整管道轴线重新从浦西向浦东顶进,最后从浦东 W2# 井原洞口进洞的施工实施方案来实施拟建管道施工。

新建 W1#~W2# 过江段顶管为复合曲线长距离顶管,管道长度为 1 087 m、覆土深度为 7.4 ~ 26.4 m;该段管道位于黄浦江底最深处埋深标高为 -14.10 m。

W1#~W2# 段顶管由西至东从 W1# 原接井(浦西拟建华泾泵房内)始发→途经 169 m 长的陆域段(浦西)→穿越黄浦江西侧防汛墙、黄浦江及东侧防汛墙(穿越长度为 475 m)→穿越船体车间(立新船厂)下方桩基→到达 W2# 原工作井(位于林浦路东侧绿化带内)内。

2 顶管穿越土层地质情况

W1#~W2# 段地质剖面图如图 2 所示,W1#~W2# 段顶管主要位于⑤₂₋₂ 层灰色粉砂层、⑤₂₁ 层灰色粉质黏土夹黏质粉土、⑤₂₋₁ 层灰色砂质粉土夹粉质黏土、⑥层暗绿色粉质黏土,顶管穿越⑥层暗绿色粉质黏土层段长度约为 588 m。

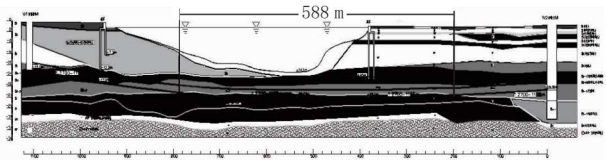


图 2 W1#~W2# 段地质剖面图

收稿日期: 2023-05-19

作者简介: 陈铭辉(1978—),男,学士,高级工程师,从事建设监理工作。

3 周边环境情况

3.1 地形地貌

拟建场地位于上海市林浦路东侧绿化带内、浦东新区三林镇外环线 S20 南侧,地势较为平坦,管道覆土为 14.05 ~ 21.4 m,地面标高为 +4.97 ~ +5 m。

3.2 管道与沿线建(构)筑物的关系

管道穿越沿线建(构)筑物情况见表 1。

表 1 管道穿越沿线建(构)筑物情况汇总表

建(构)筑物名称	离工作井距离 /m	管节编号	备注
民房	20	7	间距 21.5 m
民房	45	17	间距 21.8 m
民房	50	19	间距 22.1 m
民房	61	23	间距 22.2 m
民房	117	45	间距 22.5 m
立丰船厂厂房	334	133	间距 23.7 m
黄浦江东侧驳岸桩基	443	176	与桩底间距 4.6 m
黄浦江西侧驳岸桩基	929	370	与桩底间距 1.8 m

4 工程重点与难点

其中 W1#~W2# 过江段顶管需穿越黄浦江,为超长距离复合曲线顶管,管道覆土变化大、地下水压力大、穿越土层及周边环境特别复杂,管道顶进上下坡度达到 40‰,江底最高和最低点的落差为 16 m,在黄浦江底画了个“V”字,可以称之为上海历史上难度最大顶管工程之一。几乎涵盖了顶管在软土地层中顶进的所有问题,施工难度巨大。

4.1 长距离下纵坡顶管,减摩浆液注浆控制难度大

过江管从 W1# 工作井始发,始发段 157 m 的管道以 40‰的下坡进行顶进,过江管的最大高差达到 12.62 m。在管道顶进过程中,由于存在较大高差,顶管减摩浆液将会沿管道外壁流至管道低处,使管道外壁浆液压力处于不均匀状态,即管道高处的浆液压力过小甚至缺浆,管道低处的浆液压力过大,出现管道顶力过大的情况。

4.2 长距离曲线顶管测量、纠偏控制要求高

W1#~W2# 段顶管顶程为 1 087 m,本段全段为复合曲线顶管,曲率半径分别为 $R=9\ 000\text{ m}$ (上曲)、 $R=1\ 500\text{ m}$ (右曲)、 $R=11\ 000\text{ m}$ (上曲)管道内的水雾会影响测量精度,测量工作要求高、密度大,一定程度影响顶管顶进效率。施工技术难度高,风险大。

4.3 长距离顶管对管道内的通风要求高

随着管道向前的推进,距离随之越长,管道内空气稀薄,不利于管道内的空气的流通。

4.4 沿线需穿越建筑物和黄浦江驳岸桩基,对沉降控制要求高

W1#~W2# 段顶管施工中,需穿越浦东陆域段林浦路东侧沿线多座民房及黄浦江驳岸桩基,对沉降控制提出较高要求,管道顶进过程中,将扰动管道周围土体,使土体位移和强度产生变化,进而造成地面沉降,并波及管道上部的建(构)筑物。

4.5 顶管机进出洞难度大

进出洞是顶管施工的关键工序,针对本段顶管进出洞必须充分认识到施工风险,在顶管施工中,随着管道的不断向前延伸,顶管出洞口土体会不断的沉降。

4.6 黏性土层顶进难度大

本段顶管穿越⑥号暗绿色粉质黏土层距离约 614 m,该土层强度高、黏聚力大,对顶管机头进土造成困难,影响推进、顶力、纠偏、速度。

4.7 沉降控制要求高

退管施工过程中,再次扰动管道周围土体,使土体强度和位移进一步产生较大变化,从而造成地面进一步沉降,并进一步波及顶管管道上部的建(构)筑物。因此,在施工过程中控制沉降,减少对周边环境的影响,是本工程施工的重点及难点。

4.8 施工质量要求严格

本工程为上海市重点工程,工程的施工质量是上海市污水处理系统正常运转的保障。过程中需对每道工序施工质量严格把关。

5 气压法施工技术措施

5.1 管节渗漏水事件

本段管道累计顶进 567.5m 时,在第 20 节与第 21 节管缝(距离机头 50 m,距离 W1# 工作井 517.5 m)处出现漏砂、漏水情况,且渗漏量不断增大,历经 3 个多小时的封堵未果,立即开启应急预案后渗漏情况得到有效控制。根据地质报告显示,该处位于⑥号土层中,⑥号土层层厚 5.2 m,层顶标高为 -20.57 m,层底标高为 -25.77 m,管顶标高为 -21.7 m,管底标高为 -24.9 m。管道全断面基本处于⑥号土层中,管道底部距离⑦号土层约 0.87 m。管道渗水点距离 XZ77 号地质勘探孔位较近。

5.2 原因分析

渗漏泥砂颜色与地质报告所描述的⑦₁号土层

颜色相近,渗漏点底部的⑥号土层较薄可能破损,亦有可能管道底部已位于⑦₁承压水层,⑦₁号土层地下水补给速度快,管缝发生渗漏后随即伴随管节下沉和管缝开口量迅速加大。

渗漏位置下方土体可能存在地质突变,导致曲线顶管中相邻管节产生垂直位移,管缝发生开口情况使管接口损坏,张角过大使密封失效,发生管接口错位、渗漏,管缝张开和迅速下沉,造成过江管管节发生渗漏。

5.3 气压法施工方案概述

该次渗漏管道透水点处理措施采用气压法施工工艺,以高压气体平衡承压水土层水头,并置换管道内的水,使管道内部形成一个独立的气压工作面,气压保压性较好,创造无水作业条件,在气压状态下完成对管道检查修复作业。

5.4 气压法施工流程

气压法施工流程图如图3所示。

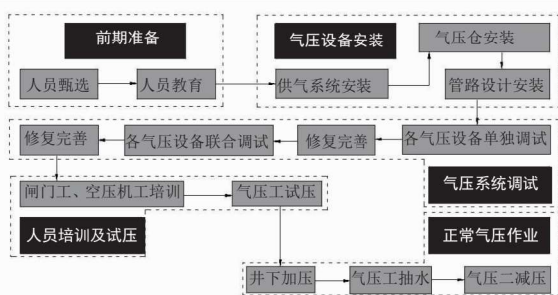


图3 气压法施工流程图

5.5 气压系统设计、加工、安装及水下工况

5.5.1 气压系统设计、加工

气压系统设计的目的是满足无水状态下完成检查、堵漏、清淤、管道修复的功能。气压舱设计原理是参照中继间接口形式,使隧道形成气压密闭空间。气压舱尺寸应根据工程实际情况满足井内安装条件,故气压舱长度设计为3 m;气压门尺寸应满足管道内作业、人员和物料的进出要求,闸门尺寸设计为1.8 m × 1.6 m。

5.5.2 透水水下工况

W1#工作井内径为9 m,实际工作空间为7 m,在向井内灌水前第87节与第86节露出洞口法兰,长2.9 m,顶铁厚0.4 m,油缸长3.67 mm(含油缸伸出部分0.97 m),需在水下吊出87节管节,满足气压舱的安装空间。

5.5.3 水下气压舱安装作业

将气压仓水下吊放在轨道基座上,主顶油缸泵站功率调至最低,4根油缸(油缸架中最上方2根和

最下方2根油缸)缓慢推进顶铁插入至气压舱尾部。

5.5.4 分阶段气压抽水清理施工

气压抽水清理分四个阶段进行施工,每阶段具体工作内容如下。

第一阶段,抽排管内积水,需抽排的水位标高为-9.3~-11.7 m,抽水量为302 m³,抽水工作时间约5 h,气压设定值为0.09~0.11 MPa。

第二阶段,抽排管道内积水,放置抽水泵,恢复照明,需抽排的水位标高为-11.7~-14.65 m,抽水量为443 m³,抽水工作时间约需5 h,气压设定值为0.11~0.14 MPa,

第三阶段,接清水管、清理泥浆、关闭螺旋机闸门,需抽排的水位标高为-14.5~-15.78 m,抽水量为125 m³,工作时间约12 h,气压设定值为0.14~0.15 MPa。

第四阶段,清理泥浆,将管道内积水抽干,需抽排的水位标高为-15.78~-17.46 m,抽水量为101 m³,工作时间约48 h,气压设定值为0.15~0.18 MPa。

5.6 管道线形调整技术控制措施

5.6.1 线形调整方案概述

过江管顶管施工过程中,在第20~21节管节接缝处出现渗漏情况,导致第15~25节管道(共27.5 m范围)出现沉降,沉降量最大为56.6 cm。管节接缝最大开口位于第20~21节,管缝开口最大为22 cm,由于管节之间产生过大折角,使管材产生不均匀受力情况,若管道继续顶进容易造成管节自身结构的严重破坏,目前的管道线形不具备继续顶进的线形条件,管道线示意图如图4所示。



图4 管道线形图

因此,本次线形调整施工的目的是将管道线形调整接近设计线形,使其具备顶管恢复顶进的线形条件。线形调整目标:将下沉量为56.6 cm的管道最低点位置抬升56.6 cm,使管缝进一步闭合并使管缝开口<5 cm。

线形调整原理:通过管道内安装的抬升装置形成的抬升预应力,将管道最低点处的管节进行抬升,同时,通过对沉降段管节下方利用打土工艺填充土体并使其土体体积膨胀,使沉降段管道周边土体形成上下压差,实现管道抬升的目的。

线形调整施工准备工作应遵循气压下进行管道

外土体直接接触的原则,利用气压稳定水土的原理保证施工作业人员的安全,气压下进行线形调整,并且在调整过程中,气压和常压状态可灵活转换,具备安全可靠的应急反应功能。调整过程示意图如图 5 至图 7 所示。

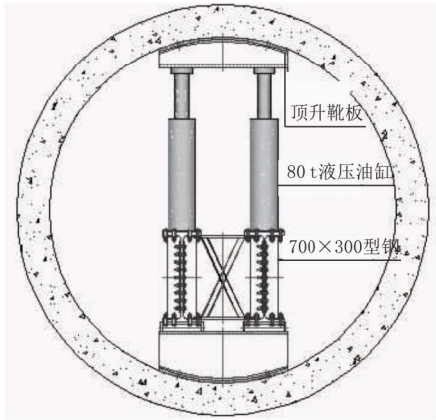


图 5 管道抬升装置管内布置立面图

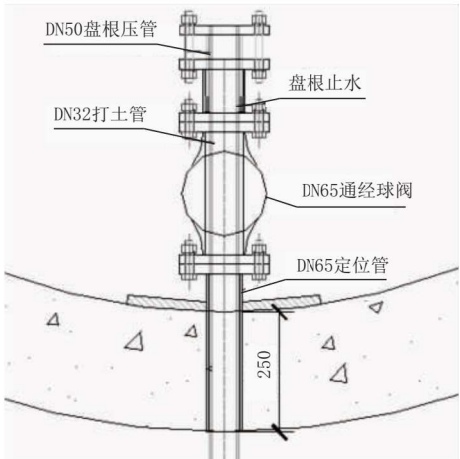


图 6 打土管布置立面图

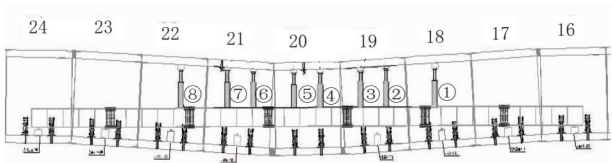


图 7 管道抬升装置管内布置立面图

5.6.2 线形调整工艺

本次线形调整施工主要采用管道底部打土及管道内部抬升两种工艺结合方式实现沉降段管道的抬升。抬升过程分别在 0.256 MPa 高压环境

和常压环境中进行,均取得良好效果。

过江段第 16~24 节管道线形调整分三个阶段进行,每阶段具体工作如下:

(1)第一阶段为常压下线形调整准备工作,主要包括线形调整施工准备和隧道加压施工准备,共需 19 d。

线形调整总体准备工作主要包括以下内容:第一、二个中继间修复完成,第 19~20 节管节 1.1 m 内

初板安装,3 台土砂泵修复就位,0 形止水圈加工完成,提升系统构件加工安装。

隧道加压施工准备工作主要包括以下内容:测量监测加压前准备工作(静力水准仪安装,激光测距仪安装,第 19~20 节管节处千分尺安装,设备仪表检查),垂直抬升加压前准备工作(80 t 液压油缸及液压泵站安装,顶升梁场地上预拼装及联动调试,顶升系统拆分及分次运送至管道内),打土系统加压前准备工作(打土材料运输进入管道及调整配比,1 台打土泵使用、1 大 1 小备用)。

(2)第二阶段为气压下线形调整、恢复至适合状态,共需 45 d。止水装置气压下更换主要工作包括:拆除第 19~20 节旧的止水环,安装第 19~20 节 0.4 m 内衬板,安装 19~20 节新止水环,更换盘根为 O 形圈。

气压下监测系统主要工作包括:在地面上实时监控管道的沉降变化情况,每班对管缝进行 3 次监测,每班对每只油缸压力进行 3 次监测,每班对第 19~20 节处安装的千分尺进行 3 次监测。

气压下垂直抬升主要工作流程包括:启动 8 根油缸使其合力达 120 t 进行抬升作业,油缸压力控制在 6 MPa,根据监测数据选择顶升压力和位置。

气压下辅助底部打土作业主要工作流程包括:第 20 节底部注土填充空洞,第 21 节底部注土抬升,第 19 节底部注土抬升,根据监测数据选择注土位置。

(3)第三阶段为常压下设备修复、恢复顶进,共需 33 d。隧道减压并恢复顶进前主要工作包括:对管道进行清理并对机头进行修复,恢复注浆测量系统,对场地及井下进场布置等。

5.6.3 线形调整主要系统

(1)注土系统

打土孔:在 15~26 节管节底部共安装 23 处注土孔,其中 15~25 节管节各 2 处、26 节 1 处。

土源:本次线形调整施工填充的土采用膨润土原土、水、高分子聚合物(聚丙烯酰胺),调配而成。

土砂泵:本次线形调整共在管道内布置 3 台土砂泵,其中 2 台布置在 27~30 节管节处,1 台布置在 9~10 节管节处。

打土孔及土砂泵位置如图 8 所示。

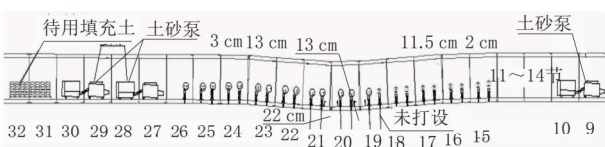


图 8 打土孔及土砂泵位置示意图

(2)注浆系统

注浆孔分部:在第20、21节管节顶部分别打设1个注浆孔,部分注浆环管节顶部设置2个注浆孔。

注浆原理:在管道顶部注入高分子聚合物(聚丙烯酰胺),软化管顶砂土,便于管节抬升。

注浆设备:在管道内第33节管节处布置1台螺杆泵用于顶部注浆。

注浆环管节(1#~2#中继间)为:10、12、13、15、17、18、22、26、28、30、32、34、38、42。

(3)顶升系统

顶升梁:本装置的桁架采用700×300H型钢,型钢总长21m,布置在第16~24节管节间。

顶升基座:桁架基座共有6只,设置在第16~18节、第22~24节管节处。

顶升油缸:共设16根80t油缸,分别布置在第18~22节、19~21节管节处,每节管节各布置4根油缸,18、22节管节各布置2根油缸。

5.6.4 线形调整处理措施

5.6.4.1 开口管缝处理

沉降段管节发生过管缝开口现象,其中16~17、19~20、20~21、23~24节均开口大于10cm,为防止线形调整过程中,4道管缝再次发生渗漏现象,对4道管缝处安装钢性止水环(气囊止水)。根据管道开口实际情况,在第20~21节管缝处安装1套宽30cm和2套宽15cm的内胀环。第23~24节、第19~20节及第16~17节管缝处分别安装1套宽25cm和2套宽15cm的内胀环。

5.6.4.2 受损管节处理

(1)根据管缝实际开口情况,对开缝>20cm的管缝采用1道气囊结合2道盘根的止水结构(以下简称“止水构件①”),对10cm<开缝<20cm的管缝采用1道气囊结合1道盘根的止水结构(以下简称“止水构件②”)。止水机构图(上口)如图9所示。

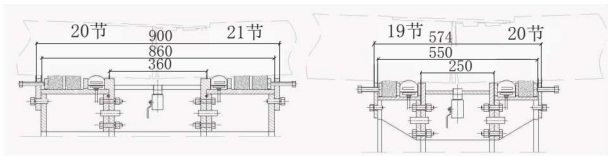


图9 充气式止水机构图(上口)

(2)第一次气压施工隧道清理时发现第19节管节顶部出现破裂(弧长1.5m、宽40cm、深度7cm),常压下对第19节顶部打设注浆孔(距离管缝60cm),注浆孔打入深度5cm时注浆孔出现渗漏现象,19节管节内部存在裂缝。

(3)第19节管节顶部存在破裂,线形调整过程中破裂管节存在较大风险,防止顶升过程中对管节结构造成二次破坏,对第19节管节安装钢内衬加强管节强度,因第19、20节管缝处需安装止水钢圈,对第20节管节同样安装钢内衬。

钢内衬采用δ20,Q235钢板,外径为2680mm,每节管节钢内衬总长度1.5m,分1.1m段和0.4m段,1.1m段为常压下安装,0.4m段需气压下拆除现有止水钢圈后安装。钢内衬与管节之间的1cm间隙采用环氧树脂填充,如图10所示。

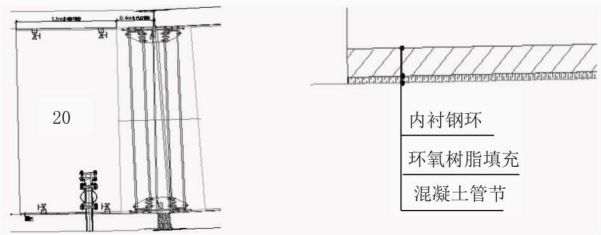


图10 第19、20节钢内衬示意图

5.6.5 线形调整效果

经过一系列调整,下沉管节抬升明显,达到预期效果,具体见表2。

表2 线性调整预期效果表			单位:mm
管节编号	下沉量	累计抬升量	差值
15	8.84	0.93	7.91
16	52.2	4.42	47.78
17	118.51	33.20	85.31
18	252.66	126.07	126.59
19	339.33	237.07	102.26
20	469.53	314.31	155.22
21	494.51	314.33	180.18
22	347.38	210.78	136.6
23	175.58	110.12	65.46
24	30.23	28.33	1.9
25	15.64	11.59	4.05

5.7 管道重启技术控制措施

5.7.1 管道启动顺序

本次恢复顶进总长度567.5m,由于管道停止顶进时间较长,管道外壁摩阻系数增大,加之管道线形复杂,每段管节所处土层不同,无法依靠主顶直接启动整段管线。因此,采取以下针对性措施:

- (1)沿顶力传力方向,单点循环注干浆(成套性好、失水率低、支护性好);
- (2)分区间逐步启动;

- (3)摇管过程中注入高分子浆液;
- (4)控制启动顶力,逐步提升顶力;
- (5)顶力保压,充分传递顶力;
- (6)对管缝木衬垫伸缩量监测。

各阶段单位摩阻力和区间段补浆量情况见表 3 和表 4,区间示意如图 11 所示。

表 3 各阶段单位摩阻力目标值 单位:kN/m²

阶段	单位摩阻力目标值
区间启动阶段	5
正常顶进阶段	<1.76

表 4 区间段补浆量情况表

区间段	补浆量 / m ³	注浆压力 / MPa
主顶 ~④# 中	32	0.2
④# 中 ~③# 中	30	0.22
③# 中 ~②# 中	30	0.23
②# 中 ~①# 中	18	0.25
④# 中 ~ 机头	4	0.25

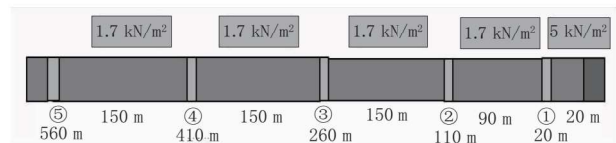


图 11 区间示意图

5.7.2 减摩措施及启动方法

对管道外壁进行注浆,注浆顺序沿顶力传递方向工作井→机头,采用单点循环先注膨润土再注浆聚丙烯酰胺的方法。

通过每个区段两端的主顶油缸和中继间液压动力系统往返推动该区间管节,并配合注浆降低管外壁摩阻力,逐步减小管道外壁摩阻力至 5 kN/m²。

5.8 施工技术措施与创新

5.8.1 施工技术措施

5.8.1.1 气压法抢修顶管管道应用

- (1)适应性强,在管道任何位置发生的渗漏,均可采用气压法;
- (2)可靠性强,压力平衡建立后,为人员提供长时间安全、可靠的工作环境;
- (3)气压舱与管道承插式连接,快速、技术简单、可操作性强;
- (4)短期内需招募大量气压工,对施工人员身体素质要求高。

5.8.1.2 管道原位线形调整技术应用

(1)恢复管节姿态及管道线型后,管道能够继续顶进,在贯通或未贯通的顶管管道中均可以应用;

- (2)可实现管道的 360°径向位移、调整;
- (3)适应在软土地基中使用。

5.8.2 技术创新

(1)开发了复杂地质条件下,大口径长距离钢筋混凝土顶管线形调整成套施工工艺,有效解决了大口径长距离钢筋混凝土顶管在复杂江底环境下穿越流砂层和淤泥层等软弱地层发生较大沉降变形的施工难题。在白龙港南线输送干线 SST1.2 标过江管段首次成功将最大沉降达 56.6 cm、最大管缝开口达 22 cm 的大直径钢筋混凝土顶管进行原位线形调整修复,最终达到设计允许偏差并继续完成顶进。

(2)在穿越复杂河床钢筋混凝土顶管施工中引入了全断面气压清障技术,有效解决了大口径长距离钢筋混凝土顶管在复杂江底环境下发生透水事故管线修复的施工难题。在白龙港南线输送干线 SST1.2 标过江管段首次成功实现透水管线的全断面气压清障和管线修复,最终实现管线的重启顶进条件。

(3)开发了复杂地质条件下,大口径长距离钢筋混凝土顶管重启顶进施工工艺,有效解决了大口径长距离钢筋混凝土顶管在复杂江底环境下因故长时间暂停施工后复顶的施工难题。在白龙港南线输送干线 SST1.2 标过江管段成功实现了复杂江底环境下大口径长距离钢筋混凝土顶管在不同工况下长时间暂停施工后的复顶施工。

6 结 语

本次管节修复采用气压法施工工艺,在具有独立气压工作面的管道内部安装管节抬升装置,抬升管道最低点处的管节,同时对沉降段管节下方土体进行填充并使其体积膨胀,实现气压下进行线形调整,达到抬升管道的效果;通过采取减摩措施、分区间逐步启动、逐步提升顶力等管道顶进重启技术,使得本工程管道重新顶进并最终顺利贯通,也为气压法管道修复施工提高了宝贵的经验。

参考文献:

[1] 温泉.层次分析法在过江管气压法线形调整施工前风险分析的应用[J].中国市政工程,2016(6):58-61.
[2] 吕品,张涛.大口径长距离混凝土顶管下坡顶进施工技术[J].城市道桥与防洪,2017(7):170-171.
[3] 马敬豹,苏现月.混凝土排水管道退管施工工艺[J].施工技术,2016,45(增刊):530-532.
[4] 盛兴尧.大直径混凝土顶管越江施工的管道与环境变形控制研究[D].上海:上海交通大学,2019.