

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.02.017

冻结法在顶管工作井外围土体加固封水中的应用

贾 平

(无锡市给排水工程有限责任公司, 江苏 无锡 214073)

摘 要: 目前,国内超深沉井加固井壁土体一般都采用钻孔灌注桩与多层高压旋喷桩组合的施工方式。在面对土质软弱、孔隙比大以及含水量高等特殊复杂地质条件时,其旋喷桩质量无法保证。当单一的止水帷幕封水效果差时,采用冻结法将沉井井壁周围土体冻结,从而形成复合止水帷幕,确保沉井施工区域内地下水与周边外界的完全隔离,有望解决顶管沉井排水下沉过程中出现的流沙涌水问题。以粉土夹粉砂承压水地层为例,采用冻结法对顶管工作井外围土体进行加固封水,介绍了方案设计、冻结施工以及冻胀融沉控制等方面的技术。该沉井施工中应用冻结法的实例,对今后类似沉井工程采用排水法施工控制地下水和加固土层具有一定的参考意义。

关键词: 超深沉井; 冻结法; 止水帷幕

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)02-0094-05

Application of Freezing Method in the Consolidation of Soil Surrounding the Pipe Jacking Well

JIA Ping

(Wuxi Water Supply and Drainage Engineering Co. Ltd., Wuxi 214073, China)

Abstract: At present, the combination of bored pile and multi-layer high-pressure jet grouting pile is generally used to consolidate the soil of ultra-deep caisson wall in China. In the face of special and complex geological conditions such as weak soil, large pore ratio and high water content, the quality of jet grouting pile cannot be guaranteed. When the sealing effect of single ring curtain wall de-watering is poor, the freezing method is used to freeze the soil surrounding the open caisson wall to form a composite ring curtain wall de-watering, which ensures the complete isolation of the groundwater in the open caisson construction area from the surrounding outside, and is expected to solve the problem of quicksand gushing during the process of pipe jacking caisson drainage sinking. Taking silty silt confined water formation as an example, the freezing method is used to consolidate and seal the soil surrounding pipe jacking working well, and the technologies of scheme design, freezing construction and frost heaving and thawing settlement control are introduced. The application of freezing method in caisson construction has certain reference significance to control groundwater and consolidate soil layer by drainage method in similar open caisson projects in the future.

Key words: ultra-deep caisson; freezing method; ring curtain wall de-watering

1 工程概况

无锡市运河西路 DN2 400 给水管道工程过双河、橡胶河段采用非开挖顶管法施工。由于该区段地下障碍物较多且需穿越现有厂房基础,设计管道

顶管中心标高距地面 26.1 m,南侧沉井位于热电厂(黄巷电厂)厂区内,北侧沉井位于大通实业总公司船舶修理厂厂区内。

根据地质资料,沉井施工所处地层自上而下依

次为:①杂填土、②-1粉质黏土、③-1粉土夹粉质黏土、③-2淤泥质粉质黏土、④-1粉砂夹粉土、④-2粉质黏土、⑤粉质黏土夹黏土、⑥淤泥质粉质黏土、⑦粉土夹粉砂、⑧粉质黏土夹黏土。由于所处地层具高含水量、大孔隙比、高压缩性、低强度的性质,为不良工程地质层。

勘察测得地下水位埋深一般为0.60~1.00 m,稳定水位标高一般为1.15~1.70 m。孔隙潜水赋存于③-1层粉土夹粉质黏土、④-1层粉砂夹粉土中,水量较大,厚度较大,且该土层中地下水运动情况不详;微承压水主要赋存于⑦层粉土夹粉砂中,水量较大,且该层土中地下水运动情况不详,其水头压力不详。

工作井采用圆形钢筋混凝土结构,其内径 $\varnothing 13.0$ m、外径 $\varnothing 15.4$ m、刃脚处外径 $\varnothing 15.8$ m、结构厚度1.2 m、刃脚深度33.3 m(设计变更加深5 m),为了保护周边厂房及构筑物,对顶管工作井距离2.8 m周边,采用 $\varnothing 800$ mm钻孔灌注桩加3层 $\varnothing 800$ mm高压旋喷桩加固井壁土体,其深度为37 m。

工作井下沉前,先对沉井周边地层进行钻孔灌注桩加固井壁土体及3层高压旋喷桩止水施工。该工程距离运河最近处只有10 m,其沉井地块曾是船舶修理厂河道回填区域,地质情况比较复杂。由于土层孔隙较大且距河道较近,造成原高压旋喷桩有漏浆现象,没有起到止水帷幕作用,从而在沉井排水下沉过程中出现了流沙涌水事故,容易产生突沉、偏移、反涌、超沉不止及施工过程难以控制等问题。

为了更加有效地阻隔地下水确保施工安全,决定在沉井外侧再采用垂直冻结加固封水施工方案,使原有灌注桩、旋喷桩和现有封闭冻土形成复合加固止水帷幕,沉井下沉过程可控。

2 方案设计

2.1 施工布置

根据工程地质条件及开挖中出现的流沙、涌水等情况,确定采用全深垂直冻结止水帷幕的施工方

案,其施工工艺流程见图1。在顶管工作井搅拌加固桩内侧与钻孔灌注桩外侧利用垂直冻结孔冻结加固地层,从而使沉井钻孔灌注桩之间以及外围的土体冻结,进而起到封水的作用。

为保证冻结效果,钻孔进入到⑧粉质黏土夹黏土内5 m。

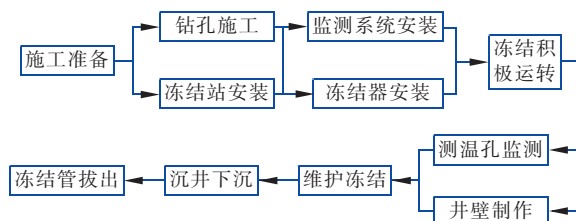


图1 施工工艺流程

Fig.1 Flow chart of construction process

2.2 冻结帷幕设计

采用拉麦公式计算:

$$E = R_1 \left(\sqrt{\frac{K_1}{K_1 - 2P}} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: E 为冻结壁计算厚度,m; R_1 为井筒掘进半径,10.6 m; K_1 为冻土允许抗压强度,3.5 MPa; P 为冲积层最大侧压力,0.52 MPa。

经计算,沉井冻结帷幕厚度 $E = 2.04$ m,取2.0 m,设计冻结帷幕平均温度为 -10°C ^[1],其沉井外侧土体加固帷幕见图2。

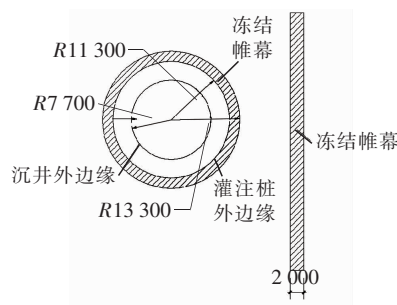


图2 沉井外侧土体加固帷幕

Fig.2 Reinforcement curtain of soil outside caisson

2.3 冻结孔及测温孔的布置

冻结孔及测温孔平面布置见图3。

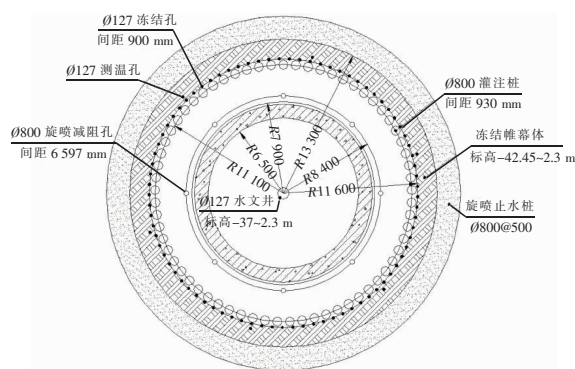


图3 冻结孔及测温孔平面布置

Fig.3 Layout plane of freezing hole and temperature measuring hole

冻结孔沿沉井四周布置,采用单排环形冻结孔。冻结孔圈线距钻孔灌注桩外边线 0.8 m,孔间距 0.9 m,底部进入⑧粉质黏土夹黏土层不少于 5 m。冻结孔共 81 个,单个冻结孔长度为 44.6 m。

测温孔布置的具体位置由垂直钻孔的偏斜情况来决定。根据冻结帷幕不同部位的温度变化发展情况,采用相应的综合控制措施,从而确保达到设计冻结效果。根据现场施工情况,本工程冻结加固区共布置 5 个测温孔,深度与垂直冻结孔相同。其中每个测温孔内设置 6~11 个测温点,测点深度分别为 8.6、14.9、26.3、33.3、41.3、45 m 不等。

2.4 制冷设计

2.4.1 冻结参数确定

垂直冻结孔终孔偏斜值 ≤ 150 mm;盐水冻结 7 d 后温度降至 ≤ -18 °C;积极冻结期控制盐水温度在 $-30 \sim -28$ °C;设计冻结帷幕厚度 2.0 m 的时间为 40 d,具体冻结时间需根据测温孔温度变化情况作相应的调整;维护冻结期控制盐水温度为 $-28 \sim -25$ °C。

2.4.2 需冷量和冷冻机选型

冻结需冷量(Q)计算如下:

$$Q = 1.2 \times \pi \times D \times K \times H \quad (2)$$

式中: D 为冻结管直径,0.127 m; K 为冻结管散热系数,1 050 kJ/(h·m²); H 为冻结总长度,3 612.6 m。

将上述参数代入式(2),得: $Q = 1\ 816\ 116.12$ kJ/h。

根据上述需冷量设计,选用 2 套 W-YSLGF600 II 型螺杆冷冻机,其中单台冷冻机制冷量为 966 000 kJ/h。为保证有足够的制冷量需配备备用制冷机组,再选用 1 套制冷量为 462 000 kJ/h 的螺杆机组备用,其型号为 W-YSLGF300 II。

3 冻结施工

3.1 钻孔

考虑到顶管工作井外围土体曾采用搅拌加固,钻孔难度较大,故选用 XY-2 型钻机施工冻结孔。钻孔垂直度测量一般先使用灯光经纬仪测斜,如发现偏差较大则再采用 JDT-5 型陀螺测斜仪测斜。为保证冻结孔施工质量,主要采用以下钻、测、纠相互配合的综合技术措施:

① 采用全站仪进行钻机精准定位,确保钻孔孔位误差 ≤ 20 mm。

② 采取减压慢转的平稳匀速钻孔方式,保持立轴稳定不晃动。

③ 每钻进 10 m 测斜一次,如发现有偏斜,用斜向纠斜槽及时纠偏,钻孔平均偏斜率 ≤ 150 mm,终孔间距不大于设计值。

④ 根据地层及深度情况,合理控制转速、压力及冲洗量,终孔时应复核钻具长度。

⑤ 发现钻孔漏浆,必须迅速对钻孔实施注浆填充,从而减少泥浆的漏失。

3.2 冻结管道及冻结站安装

冻结管钻进时,钻机应按冻结孔垂直方向固定导轨,采用经纬仪校核冻结管方位,保证冻结管同心度。冻结管及测温孔管均采用 $\varnothing 127$ mm \times 4.5 mm 的 20 号低碳钢无缝钢管;供液管道采用 $\varnothing 63$ mm \times 5 mm 的 PE 管;盐水干管采用 $\varnothing 150$ mm \times 6 mm 的 20 号低碳无缝钢管;冷却水管采用 $\varnothing 127$ mm \times 4.5 mm 的 20 号低碳无缝钢管。冻结管安装就位后,应进行水压漏失试验。初试压力为 0.8 MPa,经过 30 min 后,观察压力下降值满足 ≤ 0.05 MPa,再继续观察其压力能保持恒定为合格。冻结管安装全部完成后,采用堵漏材料密封冻结管与钻孔管口的间隙。

根据现场施工条件,冻结站 3 台螺杆冷冻机采用并联安装,布置在沉井一侧可相互备用,其占地面积约为 200 m²。冷冻站施工完毕后,按要求认真做好系统试压和真空密封性能试验,试验合格后再进行系统清理排污工作。

3.3 冻结阶段

做好冻结设备系统调试和试运转。根据盐水温度、流量和冻结发展情况,随时调节系统压力、温度等运行参数,采用单点温度检测系统测定冻结器的纵向温度分布,据此判断冻结器的工作运行状态,从而分析垂直地层中冻结发展状况,促使机组运行工况满足工艺规程和设备的技术要求。

积极冻结期盐水温度控制在 $-30 \sim -28$ °C。在冻结运转期间,加强对制冷系统、盐水系统、清水系统运行参数的监控,确保系统制冷率处于较高状态。同时降温应采取渐进的方式,避免冻结管因温度应力而造成开裂。

经过积极冻结期后,通过测温孔观测温度变化,计算冻结帷幕交圈、垂直冻土墙是否已达到设计厚度及强度,确定具备沉井作业的条件,等沉井结构封底后,最后才将冻结管拔除。

3.4 冻胀融沉及其控制

产生土层冻胀的原因主要是地下孔隙水结冰,其冻胀量的大小与所处土层的力学性能、含水量、冻结速度、外来迁移水分以及周边约束条件等因素有关。一般含水丰富的砂土和外来迁移水冻胀量较大,其中土的水分迁移是造成冻胀的主要原因,只要采取有效措施,降低冻土的渗透性,限制外来水分迁移,就能把冻胀和融沉降到最低限度^[2]。冻胀与融沉关系密切,控制好冻胀就能减少融沉。

本工程主要控制措施如下:选用制冷量较大的螺杆冷冻机,尽量缩短盐水温度降到设计值的时间,加快冻结壁的发展,从而减少冻胀和融沉量;通过测温孔观测温度的变化,及时调整盐水温度和流量,必要时也可采取间歇式冻结,控制好冻土发展量,从而降低冻胀和融沉量;对冻结区土体空隙较大的部位,采取注浆、旋喷等方式充填空隙,阻断水力通道,防止水分迁移冻胀,从而消除构成土体冻胀的主要危害;冻结管拔除后及时预埋注浆管进行回填注浆,避免冻土墙解冻后土体的融沉。

3.5 沉井施工的条件

沉井施工之前,必须具备如下条件:冻土墙设计厚度 ≥ 2 m;冻土平均温度 ≤ -10 °C;各探孔温度 ≤ -5 °C;盐水温度为 $-30 \sim -28$ °C;盐水去回路温度差 ≤ 2 °C。

3.6 冻结管拔除

在顶管工作井施工完成后,采用热盐水融化强制解冻的方式,将所有位于顶进推进轮廓内的冻结管拔除,一般在 48 h 即可全部完成。拔管步骤如下:

① 盐水加热

准备一只容积为 1 m^3 左右的加热盐水箱,采用 24 组 15 kW 的电热丝对盐水箱储存的盐水集中加热至 $40 \sim 50$ °C。

② 盐水循环

利用盐水泵在冻结器里循环热盐水,待热盐水循环约 10 min 后,使冻结管周围的冻土融化超过 50 mm 以上时,即可边循环边试拔。

③ 冻结管起拔

用吊车挂钩垂直冻结管进行试拔,拔管时要边拔边转动冻结管,如能拔起 0.5 m 左右时,便可停止热盐水的循环,利用空压机将管内盐水排出,然后使用吊车快速拔出冻结管。如冻结管拔不动时,需要继续循环热盐水融化解冻,直至能完全拔起为止。

4 冻结效果

为了保证工作井抽水下沉施工正常,在冻结第 38 天对靠近回水管的冻结孔(1#、2#、71#、72#、74#、75#、80#、81#)测温。盐水停止循环 10 min 后,每隔 3 m 测量一次冻结孔内的盐水温度,结果显示温度基本达到设计要求,其冻结孔测温排查如表 1 所示。

表 1 冻结孔测温排查

Tab. 1 Check of freezing hole temperature measurement

测点深度/m	冻结孔温度/°C							
	1#	2#	71#	72#	74#	75#	80#	81#
3	-21.0	-20.8	-20.9	-20.7	-21.0	-20.3	-20.2	-21.3
6	-21.2	-20.8	-20.9	-20.7	-21.2	-20.3	-20.2	-21.2
9	-21.2	-21.0	-20.9	-20.8	-21.2	-20.3	-20.4	-21.2
12	-21.2	-21.0	-20.9	-20.8	-21.2	-20.5	-20.5	-21.2
15	-21.2	-21.0	-20.9	-21.0	-21.3	-20.5	-20.9	-21.4
18	-21.2	-21.0	-21.0	-21.0	-21.3	-20.5	-21.0	-21.4
21	-21.0	-21.0	-21.0	-20.9	-21.4	-20.5	-21.0	-21.5
24	-21.0	-21.0	-21.0	-20.9	-21.4	-20.8	-21.0	-21.5
27	-21.2	-21.1	-21.0	-20.9	-21.4	-20.8	-20.9	-21.6
30	-21.2	-21.1	-21.0	-20.9	-21.4	-20.8	-20.9	-21.6
33	-21.2	-21.1	-21.0	-20.9	-21.4	-20.8	-20.9	-21.6
36	-21.3	-21.1	-21.0	-20.9	-21.4	-20.8	-21.0	-21.6
39	-21.3	-21.1	-21.0	-21.0	-21.3	-21.0	-21.0	-21.6
42	-21.2	-21.1	-21.0	-21.1	-21.4	-21.0	-21.0	-21.6
45	-21.2	-21.1	-21.0	-21.0	-21.2	-21.0	-21.0	-21.6

根据不同地层冻敏性程度的情况,通过对测温数据的分析,初步判断冻结已经全部交圈,基本达到

止水帷幕效果。顶管工作井也按计划时间开挖,在开挖下沉过程中,未出现流沙、突涌及土体垮塌现象。

同时采取了一系列行之有效的措施,防止冻胀融沉的危害,对周边建(构)筑物进行了有效的监测和安全保护,其工作井周边地面也未产生沉降等次生危害,从而圆满地完成了冻结止水施工任务,应用冻结法使沉井安全下沉到位。

5 结论

工程实践证明,对于外部环境复杂、含水量高以及深厚流沙层等特殊复杂地质条件,如采用常规的止水帷幕可能无法保证其效果时,采用将灌注桩、旋喷桩和冻结法三者有机结合的复合加固止水帷幕,不仅能保证沉井施工区域内地下水与外围土体的完全隔离,而且为沉井排水法开挖提供了更加安全可靠的施工作业环境。

该复合加固止水帷幕工法,适应范围广、防水效果好、安全可靠,对解决特殊施工环境条件下的难题也十分有效,可供今后类似沉井工程施工参考。

参考文献:

[1] 中国煤炭建设协会. 煤矿冻结法开凿立井工程技术规

范:MT/T 1124—2011[S]. 北京:煤炭工业出版社,2011.

China Coal Construction Association. Coal Mine Technical Specification for Vertical Shaft Sinking by Freezing Method:MT/T 1124 - 2011[S]. Beijing:China Coal Industry Publishing House,2011(in Chinese).

[2] 陈湘生. 冻结法几个关键问题及在地下空间近接工程中最新应用[J]. 隧道建设,2016,35(12):1243 - 1251.

CHEN Xiangsheng. Several key points of artificial ground freezing method and its latest application in China[J]. Tunnel Construction, 2016, 35 (12): 1243 - 1251 (in Chinese).

作者简介:贾平(1962 -),男,江苏无锡人,大学本科,高级工程师,主要从事市政给排水工程的设计与施工技术管理工作。

E-mail:wxjps@163.com

收稿日期:2020-06-01

修回日期:2020-07-09

(编辑:衣春敏)

(上接第93页)

[J]. 绿色科技,2012(7):207 - 208.

CHEN Zhenkun. Environmental impact analysis of waste plastic recycling process[J]. Journal of Green Science and Technology,2012(7):207 - 208(in Chinese).

[3] 朱乐辉,杨涛,朱衷榜,等. 混凝沉淀/曝气生物滤池处理废旧塑料加工废水[J]. 中国给水排水,2007,23(8):67 - 70.

ZHU Lehui, YANG Tao, ZHU Zhongbang, et al. Coagulating sedimentation/BAF process for treatment of waste plastics processing wastewater[J]. China Water & Wastewater,2007,23(8):67 - 70(in Chinese).

[4] 刘勃,庄会栋,季华东,等. Fenton 氧化—电解—水解酸化—固定化微生物工艺处理塑料助剂废水的工程应用[J]. 水处理技术,2011,37(4):133 - 135.

LIU Bo, ZHUANG Huidong, JI Huadong, et al. Application of Fenton oxidation-electrolysis-hydrolysis-

immobilized microorganisms progress on treatment of plastics additives wastewater[J]. Technology of Water Treatment,2011,37(4):133 - 135(in Chinese).

[5] 刘洋,刘勃,庄会栋,等. 塑料助剂废水的处理研究[J]. 中国给水排水,2010,26(17):73 - 75.

LIU Yang, LIU Bo, ZHUANG Huidong, et al. Research on treatment of plastics additives wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26 (17): 73 - 75 (in Chinese).

作者简介:马晓伟(1992 -),男,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为水处理技术。

E-mail:1670370491@qq.com

收稿日期:2019-12-18

修回日期:2020-02-23

(编辑:衣春敏)