

垂直冻结法在大断面矩形顶管始发中的应用研究

杨 武

上海隧道工程有限公司, 上海

收稿日期: 2023年9月27日; 录用日期: 2023年11月8日; 发布日期: 2023年11月20日

摘 要

本文针对上海某大断面矩形顶管隧道始发端紧邻市政综合管廊、高架桥且隧道底距微承压水层较近, 复杂工况下仅水泥系加固无法有效控制洞门渗漏风险的难题, 提出了采用垂直盐水冻结技术作为辅助止水措施, 确保了顶管顺利始发。工程实践表明, 结合强制解冻措施并合理规划局部垂直冻结范围及顶管始发流程, 能够有效保证始发加固质量并规避顶管始发阶段刀盘及壳体被冻风险。局部冻结在既有水泥系加固中实施后呈现出后期冻胀融沉小的规律, 表明垂直冻结辅助止水法为地质条件差、周边环境保护要求高的地下大断面顶管工程提供了一种新的解决途径。

关键词

大断面矩形顶管, 顶管始发, 局部垂直冻结, 强制解冻, 冻结融沉

Research on the Application of Vertical Freezing Method in Large-Scale Rectangle Jacking Pipe Launching

Wu Yang

Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: Sep. 27th, 2023; accepted: Nov. 8th, 2023; published: Nov. 20th, 2023

Abstract

The paper indicates that shaft leakage risk cannot be controlled by slurry reinforcement in complex

conditions, which exist in a large-scale rectangle jacking pipe launching in Shanghai that launched near the municipal utility tunnel and viaduct, even the tunnel bottom is very near to micro confined water layer. In this condition, the successful launching of the jacking pipe is ensured by finally adopting the vertical brine freezing technique as an auxiliary water stop measure. After practical exploration and verification, launching reinforcement quality can be ensured by properly planning partial vertical freezing and jacking pipe launching process, combined with forced thawing measures. Furthermore, it can reduce the risk of cutter head and shell freezing in the launching process. After partial freezing is implemented in the existing cement system, the law of frost heave and thawing subsidence in the later stage is small, indicating that the vertical freezing auxiliary method provides a new solution to large-scale underground pipe jacking with poor geological conditions and high protection requirement to the surrounding environment.

Keywords

Large-Scale Rectangle Jacking Pipe, Jacking Pipe Launching, Partial Vertical Freezing, Forced Thawing, Frost Heave and Thawing Subsidence

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市建设的高速发展，地下空间的开发越来越受到重视，矩形顶管法隧道因其断面适应性强、利用率高已成为城市地下空间开发的一种新技术。而随着地下空间的开发，大断面矩形顶管面临的施工环境也越来越恶劣，主要体现在隧道埋深增大、地层愈加复杂等[1] [2] [3] [4]。单一水泥系加固无法有效保障洞门破除安全，顶管始发接收风险显著增高，合适可靠的止水措施往往成为顶管始发接收成败的关键因素[5] [6] [7] [8]。近年来，垂直冻结法使用逐渐增多，一般分为地面垂直冻结及工作面水平孔冻结两种基本方式，该法难度小、安全可靠，可有效地形成冻结帷幕，阻挡侧向水土压力。刘东军等结合佛山地铁2号线某区间的隧道修复工程，通过数值模拟与监测数据对比，证明了垂直冻结法隔绝水力联系的有效性；温汉宏以天津地铁某车站端头为例，总结了冻结法施工中存在的风险，提出了保障盾构机的顺利始发和接收的安全措施。因此，垂直冻结法中测温孔、冻结孔的布置形式，管路的链接方式及冻结管的起拔技术等都关系着工程的成败，对于大断面矩形顶管将显得更为重要[9] [10] [11]。

2. 工程概况

上海某地铁车站与既有车站采用地下换乘通道连接，其中下穿卢浦大桥部分采用顶管法施工，顶管通道断面尺寸为 $9.5\text{ m} \times 4.88\text{ m}$ 。顶管通道始发井位于卢浦大桥西侧(原上钢厂房拆迁区)，工作井地面标高 $+4.255\text{ m}$ ，顶管始发洞门中心标高 -9.95 m ，如图1所示。顶管始发端上覆地层主要以灰色淤泥质黏土为主，底部距微承压水层⑤ 2-1 灰色砂质粉土约 0.7 m ，微承压水层水头标高 $0.41\sim 2.11\text{ m}$ ，且⑤ 2-1 层与底部⑦层承压水层相连通，始发洞门破除阶段存在承压水沿地墙缝隙上涌可能性。顶管端始发地基加固采用水泥系三轴搅拌桩 + 高压旋喷桩加固，加固长度为 5 m ，加固范围为洞圈四周各 5 m ，单一水泥系加固无法有效保障大断面矩形顶管洞门破除安全，根据现场情况增加局部垂直冻结加固进行封闭止水。

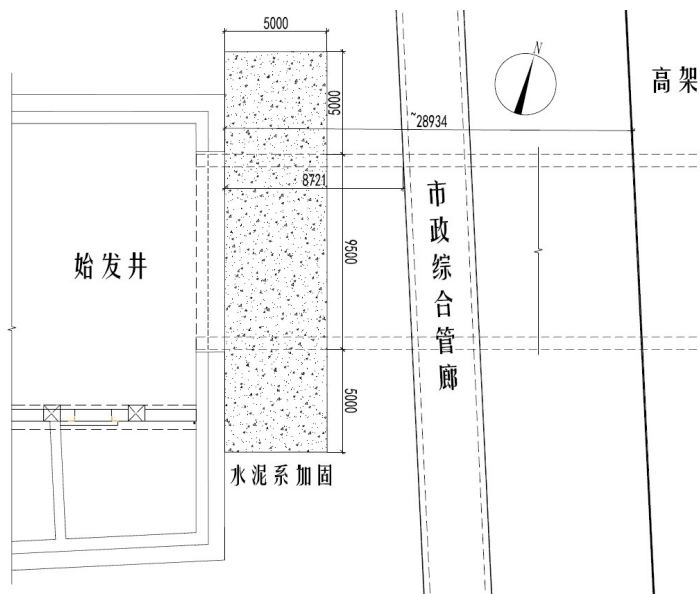


Figure 1. Plan arrangement of background project
图 1. 背景工程平面图

3. 垂直冻结加固设计

冻结加固主要目的是对水泥系加固补强，确保始发洞门凿除及顶管始发阶段有效止水[12] [13] [14] [15]。结合始发端地层特性及顶管施工工艺流程，主要施工难点有二：一是冻结交圈封闭底部⑤ 2-1 微承压水渗漏通道；二是复核顶管始发流程合理设计冻结壁厚度，避免顶管机刀盘和壳体在冻结区内停机被冻。

针对上述难点，本文通过始发流程模拟设计，确定采取双排垂直直盐冻结加固方案如图 2 和图 3 所示。冻结壁按 I 类冻结壁设计，厚度为 1.8 m，冻结孔深度为 19.28 m，冻结范围为洞圈上下 2.5 m、左右 2 m。考虑冻结周期及经济合理性，共布置 2 排共 34 个垂直冻结孔，第一排冻结孔距地连墙 0.4 m，冻结孔排间距 0.9 m，每 2~3 个冻结孔为一组，一共分 12 组，见表 1。

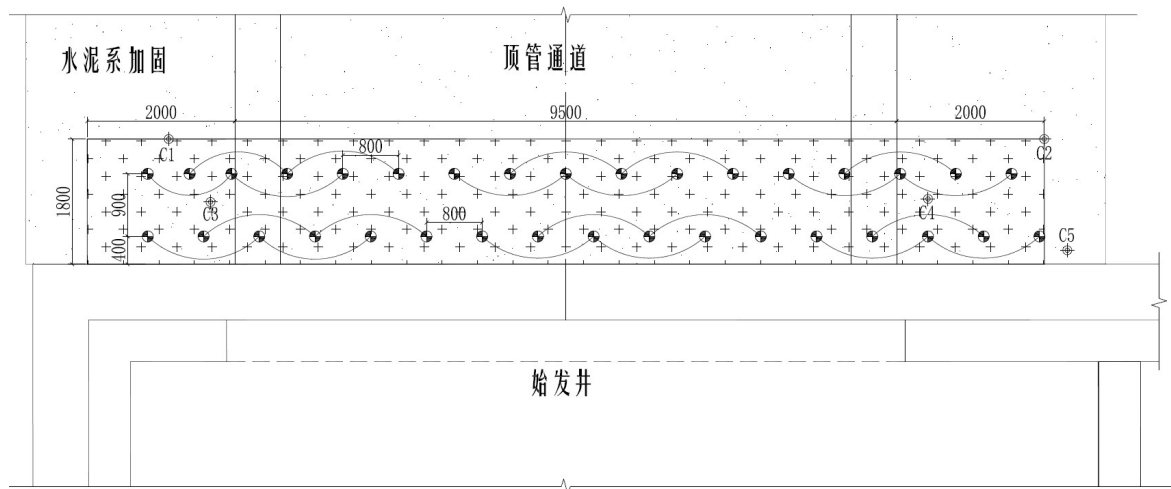


Figure 2. Layout of freezing holes at the tunnel portal
图 2. 洞门冻结孔布置图

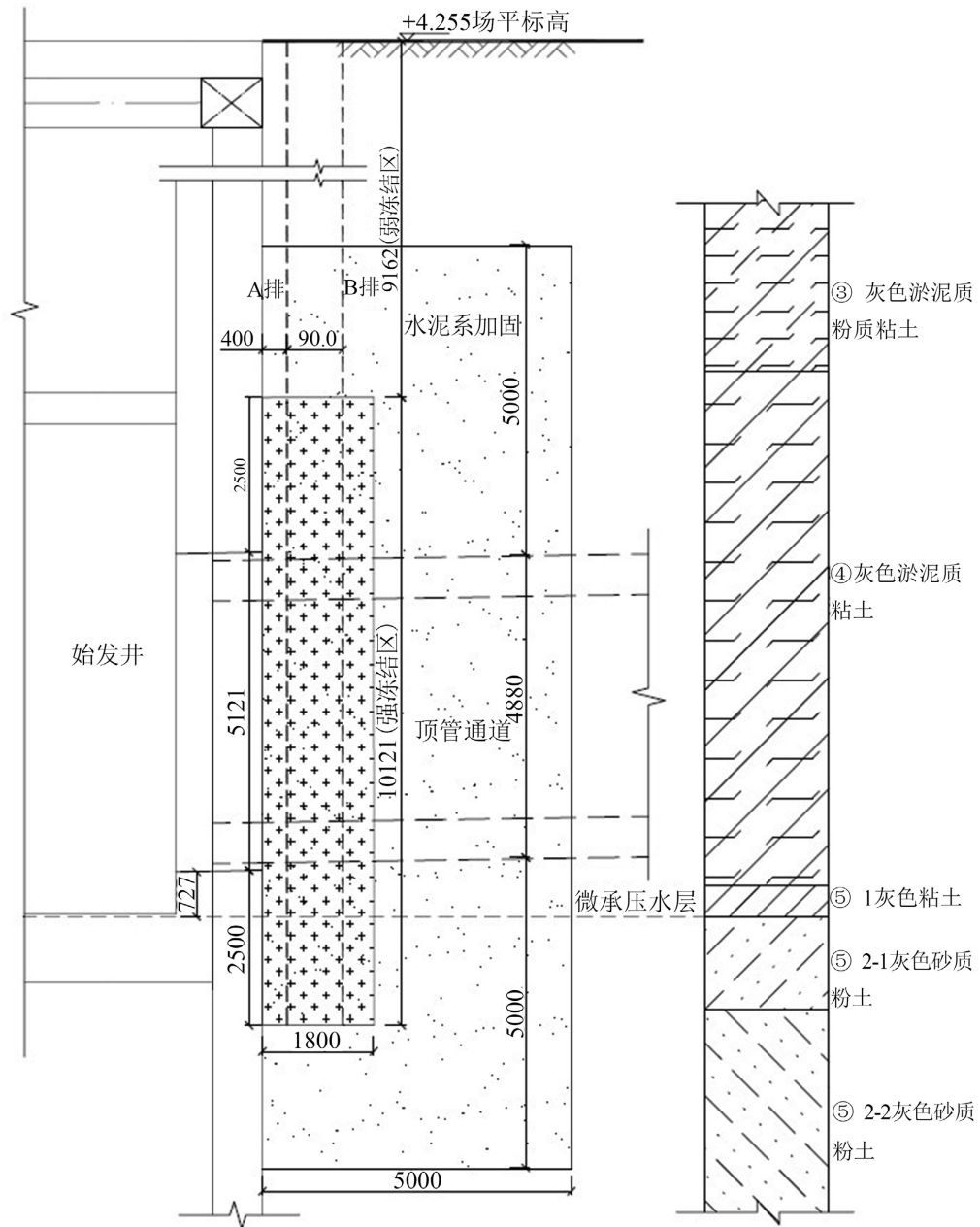


Figure 3. Vertical frozen profile of tunnel portal
图 3. 洞门垂直冻结剖面图

Table 1. Design parameters for freezing of tunnel portal
表 1. 洞门冻结设计参数表

序号	参数名称	单位	数量
1	冻结壁设计厚度	m	1.8
2	冻结壁平均温度	°C	≤-10
3	盐水最低温度	°C	≤-28
4	积极冻结时间	天	30
5	冻结壁交圈时间	天	18~22

Continued

6	冻结孔个数	个	34
7	冻结孔允许偏斜	mm	150
8	设计最低盐水温度	°C	-28~-30
9	单孔盐水流量	m ³ /h	≥5
10	冻结管规格	mm	Φ127×5
11	测温孔个数	个	5
12	单个冻结管长度	m	19.283
13	冻土预计发展速度	mm/d	26
14	冻结总需冷量	104 Kcal/h	5.872

4. 大断面顶管垂直冻结过程

4.1. 始发洞门凿除

始发洞门凿除前在洞圈内打设水平探孔，探孔进入冻结壁观测温度，现场探孔内均无明水流出，且探孔温度在-5.3~-15.1℃。根据测温孔温度及探孔情况分析，冻结壁厚度与强度已达到冻结设计要求，满足洞门凿除条件。因此，洞门凿除采用人工分层凿除方式，在破除迎土面钢筋保护层期间特别加强进尺管控，防止风镐作业破坏冷冻管。

4.2. 顶管机上靠

洞门凿除后，为减少洞门暴露时间，顶管机第一时间上靠，此阶段垂直冻结管尚未停冻拔除，顶管机刀盘不应直接靠上加固土，避免冻结管受力变形影响冻结管拔管。同时，应考虑停冻拔管期间顶管机在始发洞圈能够有效止水，本次顶管始发采用了“钢丝刷+帘布橡胶板+插板+油脂斜管”洞门密封止水装置，顶管机壳体进入洞圈后即能保压止水。顶管机刀盘上靠后向土仓内加入拌制好的填料(每方掺入：黄泥 72 kg：膨润土 72 kg)进行提前填仓，回填料采用 9% 浓度盐水拌制降低冰点防止被冻，如图 4 所示。

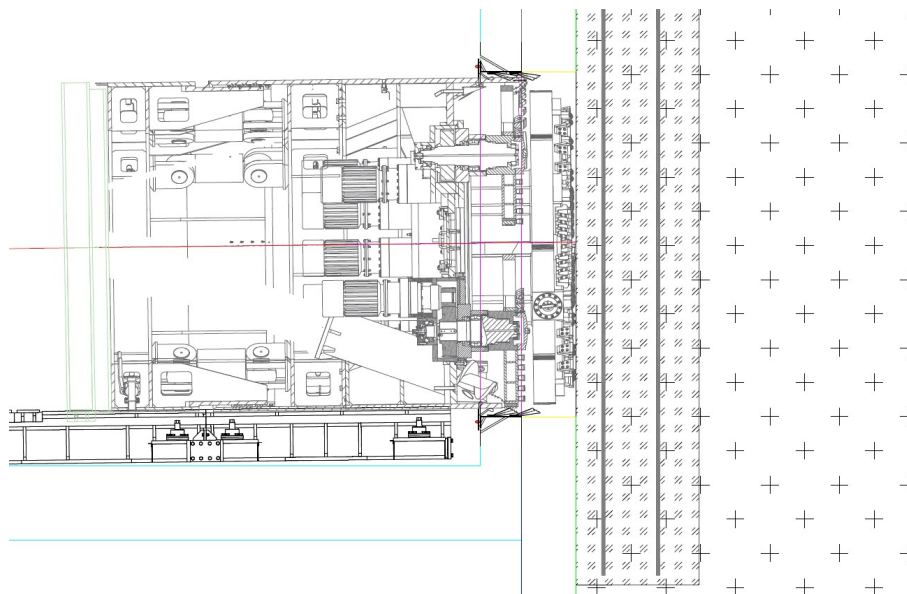


Figure 4. Location of reinforcement area on pipe jacking machine
图 4. 顶管机上靠加固区位置图

4.3. 冻结区强制解冻及拔管

顶管机上靠完成后,洞圈位置形成有效密封止水后即开始冷冻管拔除作业,冻结管拔除兼冻结区强制解冻,即拔管前在冷冻管内进行热盐水循环。循环解冻盐水温度控制在 $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 左右,盐水循环压力为 0.3 MPa ,流量为 $30 \text{ m}^3/\text{h}$,并通过测温孔测温数据反馈解冻效果。冻结区循环解冻 8 天后,测温孔测温数据显示温度 $> -5^{\circ}\text{C}$,开始冷冻管拔除作业。

4.4. 顶管机穿越冻结区

冻结管拔除后顶管机恢复顶进,按常规顶管施工工艺流程,顶管机在安装管节时需要断电,断电阶段顶管机无法正常旋转刀盘。为防止顶管机在冻结区被冻,选择一次性穿越冻结区,千斤顶行程不足时利用 609 钢支撑传力顶进,管节安装在刀盘过冻结区后二次安装。穿越冻结区推进速度控制在 $10 \text{ mm}/\text{min}$ 左右,同时刀盘正面加入盐水拌制的膨润土浆液(盐水浓度 9%,凝固点温度 -5°C)进行土体改良,降低土体冻结冰点温度并提高仓内土体和易性,确保切削的冻土有效排出不在土仓内淤积。

基于监测数据结果,按设计的冻结参数动态调整后,顶管始发期间,设备运转正常、洞门位置无渗漏水险情、周边地表及结构无明显变形。

后阶段顶管推进,针对冻结融沉区域加强了管节壁后厚泥浆压注,顶管贯通后及时进行浆液固化,经监测,至冻结停冻后 3 个月冻结区最大沉降值仅 -17.31 mm ,如图 5 所示。

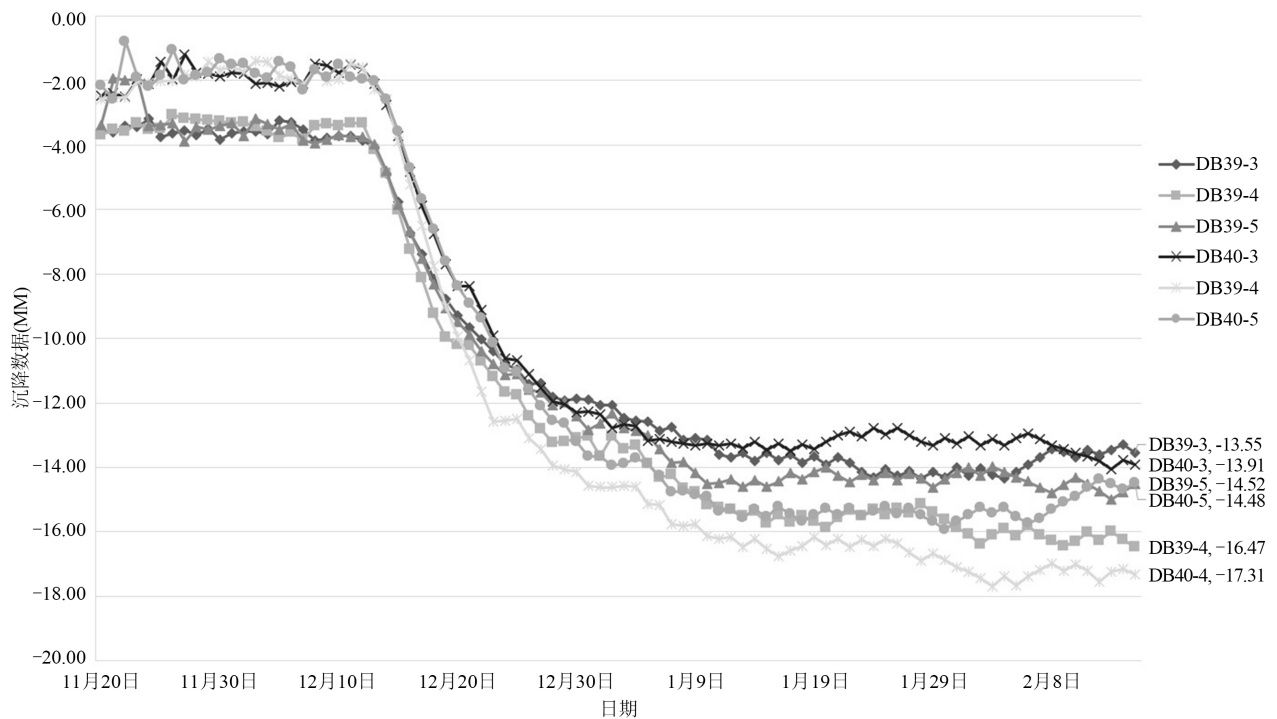


Figure 5. Settlement data change curve in frozen zone

图 5. 冻结区沉降数据变化曲线

5. 垂直冻结施工实例分析

5.1. 冻结施工过程

本洞门垂直冻结通过计算需冷量约 $5.872 \text{ 万 kcal}/\text{h}$,冷冻机组选用 2 台 YS16MCMSA 型冷冻机(12.5

万 kcal/h)，一用一备。垂直冻结于 2022 年 9 月 27 日开机运转，至 10 月 26 日积极冻结 30 天，在积极冻结期间，冷冻设备及冻结系统运转正常。盐水温度 7 天降至 -20.7°C ，30 天盐水温度在 -30.0°C 左右，实测盐水循环系统去回路温差为 $1.3^{\circ}\text{C} < 2^{\circ}\text{C}$ ，盐水总流量 $90\text{ m}^3/\text{h}$ ，单组盐水流量达到 $7.5\text{ m}^3/\text{h}$ ，满足单孔流量 $5\sim 8\text{ m}^3/\text{h}$ 的要求。

5.2. 冻结加固效果分析

冻结区域布设有 5 个测温孔，测温孔在冻结段布置 4 个测点，根据测温孔温度变化情况分析计算冻土扩展速率、冻结壁形成厚度及平均温度，见表 2。

Table 2. Temperature measurement hole data in frozen zone

表 2. 冻结区测温孔数据

孔号	最近距离(mm)	到达 0°C 天数	平均发展速度(mm)
C1	383	12	32
C2	705	26	27
C3	416	8	52
C4	506	11	46
C5	493	18	27

冻结壁有效区最大孔间距为 1060 mm ，按最低发展速度 27 mm/d 计算，冻结壁交圈时间为 20 天。根据冻结孔实际偏斜，按最低速度 27 mm/d 做交圈图分析，冻结至 10 月 26 日第 30 天时，冻结壁最小有效厚度为 1867 mm ，达到设计 1800 mm 要求。根据冻结壁平均温度的解析测算方法计算，冻结 30 天时，平均温度为 -16.7°C ，达到设计 $T \leq -10^{\circ}\text{C}$ 要求，如图 6 和图 7 所示。

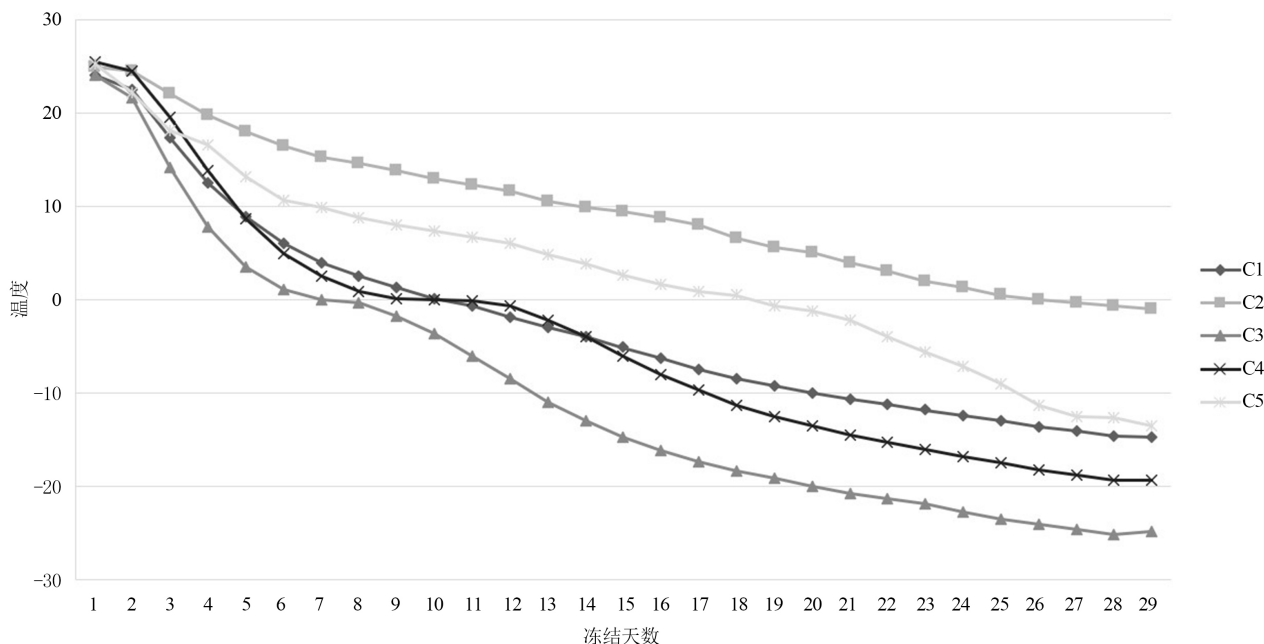


Figure 6. Temperature variation curve of freezing temperature measurement hole

图 6. 冻结测温孔温度变化曲线图

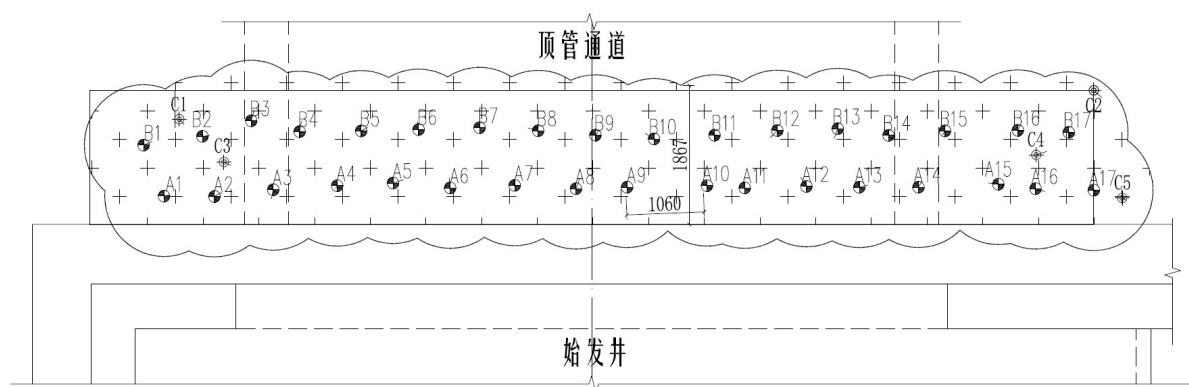


Figure 7. Freezing wall intersection diagram
图 7. 冻结壁交圈图

顶管始发垂直冻结施工过程中因在水泥系加固体内钻孔施工，在钻孔过程中出现了局部塌孔情况，基于图 6 和图 7 的冻结变化关系和交圈情况，垂直冻结优化后采用高粘度膨润土浆液作为护壁泥浆，并优化成孔工艺，确保了冻结孔成孔及冻结管顺利下放，冻结效果良好。

6. 结论

垂直局部冻结技术在上海大断面矩形顶管项目的首次成功应用，打破了常规顶管始发工艺无法运用冻结技术的壁垒，为类似工程提供了新的方案思路及经验。

1) 局部冻结技术措施能够有效补强复杂工况下水泥系加固止水的可靠性，冻结孔的布置形式、降温程度和保温等参数对于垂直冻结效果起到重要作用。还需要降低洞门渗漏风险，才能保障大断面矩形顶管始发的安全。

2) 合理规划局部垂直冻结范围及顶管始发流程对垂直冻结效果影响很大，尤其是强制解冻、顶管施工阶段盐水拌制膨润土改良等措施，可有效规避顶管始发阶段刀盘和壳体被冻风险。

3) 实例分析表明，在既有水泥系加固区内实施冻结工艺，并通过顶管壁后厚泥浆压注、顶管贯通后及时浆液固化等措施，能够有效控制冻结融沉对周边环境的影响。

参考文献

- [1] 刘东军, 刘维佳, 许超, 高如超, 赵婧璇. 垂直冻结技术在佛山地铁 2 号线抢险修复工程中的应用研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 212-216. <https://doi.org/10.13807/j.cnki.mtt.2021.01.028>
- [2] 祁卫华, 李国良, 赵录学, 张全亮, 马强. 垂直冻结技术在大理深山岭铁路隧道中的应用[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(6): 176-182. <https://doi.org/10.13807/j.cnki.mtt.2018.06.024>
- [3] 林伯华. 冻结加固技术在复杂地质条件盾构始发井中的应用[J]. 福建建设科技, 2018(3): 13-16.
- [4] 魏龙海, 李东升, 史世波. 冻结法在大直径越江盾构始发中的应用研究[C]//首届水下隧道建设与管理技术交流会. 首届水下隧道建设与管理技术交流会论文集. 南京: 人民交通出版社, 2013: 137-144.
- [5] 王晖. 软土地层地铁盾构隧道联络通道冻结法施工控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(3): 17-21.
- [6] 肖朝昀. 人工地层冻结冻土帷幕形成与解冻规律研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [7] 张红晓. 特厚冲积层冻结壁变形及冻结压力的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [8] 沈世伟, 夏才初, 黎岩, 等. 喷射混凝土对多年冻土区公路隧道围岩冻融圈的影响规律研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 82-88.
- [9] 凌宇峰, 王吉云. 人工地层冻结技术在上海长江隧道工程的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 184-188.
- [10] 江杰, 邱居涛, 陈先枝, 欧孝夺. 人工冻结法在圆砾地层地铁联络通道施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2020,

57(2): 192-197.

- [11] 周晓敏, 苏立凡, 贺长俊, 等. 北京地铁隧道水平冻结法施工[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 319-322.
- [12] 魏国俊. 程儿山隧道第三系砂岩施工地质问题研究[J]. 铁道标准设计, 2013(7): 87-90.
- [13] 胡俊, 韩宏超. 盾构隧道端头井垂直冻结加固不同冻结管间距温度场数值分析[J]. 隧道建设, 2014, 34(z1): 105-110.
- [14] 胡俊, 曾晖, 刘勇. 盾构隧道端头垂直冻结板冻结加固结构[P]. 中国专利, 2018203705347. 2018-03-19.
- [15] 周隽, 胡俊, 卫宏, 等. 盾构隧道端头垂直杯型冻结壁温度场数值分析[J]. 森林工程, 2017, 33(3): 75-79.