

文章编号:1671-6833(2026)01-0102-08

# 地铁明挖区间分期交界面涌水液氮冻结修复与实测

刘大勇<sup>1</sup>, 杨平<sup>1</sup>, 谷亚军<sup>2</sup>, 成建华<sup>2</sup>, 王加辉<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 苏州市轨道交通建设有限公司, 江苏 苏州 215004)

**摘要:** 苏州某地铁建设工程河道内分期明挖区间基坑水泥搅拌桩因先期开挖时变形过大, 导致止水帷幕失效, 且经双液注浆结合 MJS 加固处理后仍未能阻绝涌砂冒水。为此, 通过采取液氮人工冻结形成有效止水帷幕, 成功实现在大渗流条件下对失效止水帷幕的修复施工。对基坑止水帷幕失效进行分析, 提出液氮冻结修复施工方案, 采用现场实测的方法, 统计分析了液氮冻结止水修复施工过程中冻结壁温度、液氮用量与冻结壁发展速度的变化规律。结果表明: 水泥系改良土渗流处冻结壁发展速度为 67.3 mm/d, 是无渗流处冻结壁平均发展速度的 58.6%。渗流点冻结土体温度与非渗流处冻结土体温度相差达 40 °C 以上, 渗流条件对冻结壁的发展抑制作用明显。积极冻结期冻结每立方米土消耗液氮  $1.671 \times 10^3$  kg, 维护冻结期单组每日消耗液氮  $3.49 \times 10^3$  kg, 为经验预估值的 48.5%。

**关键词:** 突涌; 液氮冻结修复; 冻结壁发展速度; 液氮消耗量; 实测研究

中图分类号: TU445

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.04.011

液氮人工地层冻结法, 以其卓越的止水效果和灵活的应用方式, 已被成功应用于富水地层的盾构接收<sup>[1]</sup>、盾尾刷更换<sup>[2]</sup>、地下结构修复<sup>[3]</sup>以及盐水冻结难以实现的工程场景, 如含盐地层<sup>[4]</sup>和地下水流速较大的地层<sup>[5]</sup>。在基坑渗流处理领域, 液氮冻结法多适用于处治地下连续墙接头渗漏<sup>[6]</sup>。

液氮冻结技术的能量交换规律与传统的盐水冻结技术有所区别。黄建华等<sup>[7]</sup>深入研究了液氮冻结过程中的能量交换机制, 揭示了液氮在冻结管内沸腾对流换热规律。石荣剑等<sup>[8]</sup>通过现场冻结试验, 对液氮在冻结管内的沸腾状态进行了细致的分段研究, 指出供液管上开孔的范围是决定液氮沸腾段分布特征的关键因素。Nikolaev 等<sup>[9]</sup>进一步发展了液氮冻结技术, 建立了一个适用于高速渗流条件下的冻结传热非局部数学模型。孙立强等<sup>[10]</sup>利用 COMSOL 软件, 实现了温度与渗流场的耦合计算, 并提出了确定临界渗流速度和交圈时间的计算方法。虽然针对多种情况下的液氮冻结温度场研究已有较丰富的案例, 但在高渗流条件下水泥系改良土(以

下简称水泥土)中的液氮冻结, 特别是水泥土的冻结发展速度规律尚不清楚, 现有结论还不能满足工程需求。

本文以苏州某地铁明挖区间的涌水修复工程为例, 探讨了在地下水水头压力大、施工空间受限的条件下, 如何利用液氮冻结法成功实施止水帷幕修复。研究涵盖了原止水帷幕失效的原因分析、冻结止水帷幕方案的设计、液氮用量的控制、冻结壁温度的监测, 以及施工步骤与工艺的优化。本文旨在为类似工程提供工程实践参考和理论支持。

## 1 工程概况

### 1.1 基本情况

工程为苏州某地铁区间明挖基坑, 坑底埋深 9.8~17.2 m, 该段直线下穿娄江后在南岸对接进入盾构段。明挖段平面布置如图 1 所示。主体结构横截面为现浇钢筋混凝土单层箱形, 尺寸为 13 m × 6.5 m, 顶板覆土为 3.2~8.4 m。由于过江范围覆土小于一倍洞径要求, 且施工不能阻碍江面通航, 故

收稿日期: 2025-01-16; 修订日期: 2025-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178337, 42101127)

作者简介: 刘大勇(1997—), 男, 江西南昌人, 南京林业大学博士研究生, 主要从事城市地下工程方向研究, E-mail: Liudayong2020@163.com。

通信作者: 杨平(1964—), 男, 江西樟树人, 南京林业大学教授, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程方向研究, E-mail: yangping@njfu.edu.cn。

引用本文: 刘大勇, 杨平, 谷亚军, 等. 地铁明挖区间分期交界面涌水液氮冻结修复与实测[J]. 郑州大学学报(工学版), 2026, 47(1): 102-109. (LIU D Y, YANG P, GU Y J, et al. Field measurement study on liquid nitrogen freezing for controlling water seepage at tunnel open-cut excavation interfaces[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2026, 47(1): 102-109.)

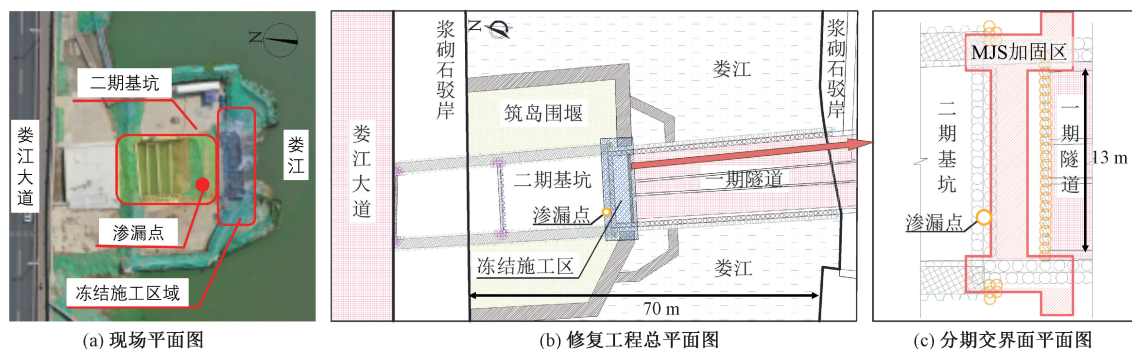


图 1 基坑施工平面图

Figure 1 Plan view of pit construction

下穿段采用了分期围堰筑岛明挖施工过河,将明挖段工程分为南北两期。一期工程施工过江隧道南部,在建成并恢复河道通航后再开工北部的二期隧道。两侧均采用围堰筑岛,在岛中开展明挖施工。明挖过江段南北总长 70 m,涌水发生在北部二期明挖基坑。

一、二期基坑分界处采用钻孔灌注桩加三轴搅拌桩联合止水,三轴搅拌桩在钻孔灌注桩的北侧,二期基坑开挖深度为 11.4~14.5 m,采用 21 m 长 SP-SX27 型双排拉森钢板桩加 3 道钢支撑作为支护结构。

### 1.2 工程地质与水文地质

施工范围内涉及土层的各层物理力学特性如表 1 所示。局部土层与下部的微承压水具水力联系,潜水水位标高 1.50~2.10 m。微承压水主要埋藏于 ③-3、④-2 层,该含水层富水性一般~中等,补给来源主要为周围河水网的侧向补给及上部潜水的垂直入渗。

## 2 基坑止水帷幕失效分析

在二期基坑南部下层土方开挖时,一、二期结构隔断桩北侧,二期基坑南端西侧靠近坑底隔断桩缝隙间发生涌砂冒水。通过对渗漏界面整体分析得出

结论,渗漏方向主要由东西两侧回填土和二期结构底板以下 ④-2 粉砂夹砂质粉土中流入,涌水出口为基坑西南侧标高 -10.05 m,距基坑底部约 0.4 m 处,地下水流速约为 20 m/d 且有扩大趋势,经回填反压后得到抑制。

失效原因判定为一、二期基坑交界面的钻孔灌注桩加三轴搅拌桩作为一期基坑围护结构时,外侧三轴搅拌桩发挥止水作用,内圈钻孔灌注桩承担荷载,限制三轴搅拌桩的水平变形。而当其作为二期基坑的围护结构时,靠外侧钻孔灌注桩无法为内侧三轴搅拌桩提供水平向位移约束。随着二期的基坑开挖,三轴搅拌桩失去二期基坑土体约束,向二期基坑侧发生水平向位移,使薄弱处张拉形成贯通的裂缝导致止水帷幕失效。

## 3 修复施工方案及参数

止水帷幕失效后,现场开展了双液注浆堵漏和 MJS 固化土层,但都没能完全阻绝涌砂冒水,随即认为地层中渗水通道分布广泛且渗流流速大,常规手段难以阻绝。

经方案比选后认为冻结法具有优异封水性,不受土中既有结构影响,钻孔施工对已建主体结构破坏小,冻结加固范围广,不影响结构施工,适合作为

表 1 土层物理力学性质指标

Table 1 Properties of the soils

层号	土层名称	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	压缩模量 $E_{s1-2}$ /MPa	静止侧 压力系 数 $K_0$	直剪固结快剪 $C_q$		渗透系数 $k$ / ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	透水性 分级	土层厚度 $h$ /m
					黏聚力 $c_{cq}$ /kPa	内摩擦角 $\varphi_{cq}$ /( $^\circ$ )			
①-2	淤泥	18.0		0.80	7.0	5.0	$(1.0\sim 3.0)\times 10^{-5}$	微透水	0~0.45
③-2	粉质黏土	19.2	5.97	0.51	26.0	16.2	$2.60\times 10^{-5}$	弱透水	0.30~2.90
③-3	砂质粉土夹粉砂	19.3	10.98	0.45	6.1	28.8	$1.00\times 10^{-3}$	中等透水	1.50~4.30
④-2	粉砂夹砂质粉土	19.4	14.21	0.43	4.5	31.6	$4.77\times 10^{-3}$	中等透水	4.80~10.50
⑤-1	粉质黏土	19.2	5.46	0.55	22.4	14.6	$3.60\times 10^{-6}$	微透水	3.00~4.50
⑥-1	黏土	20.1	7.11	0.45	58.8	14.4	$2.10\times 10^{-7}$	不透水	5.80~6.00
⑥-2	粉质黏土	19.2	5.98	0.48	26.0	15.3	$2.60\times 10^{-5}$	弱透水	5.00~5.50

本工程的止水修复方案。采用温度更低的液氮作为冷媒,冻结速度是盐水冻结速度的10~11倍<sup>[11]</sup>,适用于地下水存在渗流的情况。因周边紧邻河道,反压回填土含水率高,超低温冻结加固体强度更高,稳定性好<sup>[12]</sup>。液氮冻结冷媒温度低于 $-198\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冻结土体温度可低于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,封闭渗流速度快,对结构造成的冻胀压力小。作为对比,盐水冻结冷媒(一般为氯化钙溶液)温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,冻结土体温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,封闭流速较大的渗流通道往往需要较长时间,对于更大渗流可能无法封闭。

地下水流动、冻结管间距、冷媒温度是影响人工冻结温度场发展的主要因素<sup>[13]</sup>,其中最重要的是地下水流动<sup>[9]</sup>。高速的渗流会产生大量热交换,阻碍冻结壁的发展。一般认为在液氮冻结中,土体渗流不应大于 $12.73\text{ m/d}$ <sup>[13]</sup>。在有记录的施工案例中,冻结法辅以其他辅助方法处理过的最大渗流为 $72\text{ m/d}$ <sup>[11]</sup>。在处理高流速地下水的冻结工程中,常用的方案有在上游施工降水井降低地下水位、加大制冷能力、缩小冻结管开孔间距等。本工程采用双液注浆降低地下水流速辅助液氮冻结的方案,对一、二期分隔处土层进行加固止水,以保证二期基坑的安全开挖。

### 3.1 双液注浆

经注浆处理后的水泥土地层具有渗流速度小、冻胀小<sup>[14]</sup>等特点。在可能存在渗流通道的区域共布设26个注浆孔,充填注浆平面布置如图2所示。采取从中间向两侧的注浆顺序,从结构底板底部钻孔至⑥-1层,注浆孔顶标高 $-10.0\text{ m}$ ,孔底标高 $-18.0\text{ m}$ ,并在渗漏点附近加密注浆孔。通过注浆充填渗流路径,以减小渗流速度,给冻结施工提供有利条件。

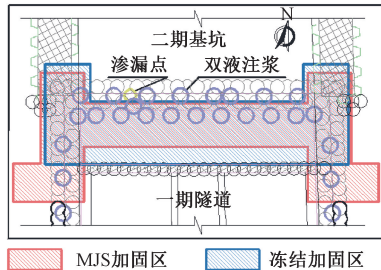


图2 充填注浆平面图

Figure 2 Plan view of the filling grouting

### 3.2 液氮冻结

#### 3.2.1 冻结孔及测温孔布置

冻结施工平面分为D、E、Z这3个区,如图3(a)所示。按梅花形交错布置总计44根冻结管,管间距 $800\sim 1060\text{ mm}$ ,管底深度均为 $20.8\text{ m}$ 。每2~3个冻结管交错串联为一个冻结回路,在二期漏水点

置适当加密,共计20组冻结回路,每组设置一根排气管排气,每日监测记录排气管口排出氮气温度。冻结管布置信息如表2所示。

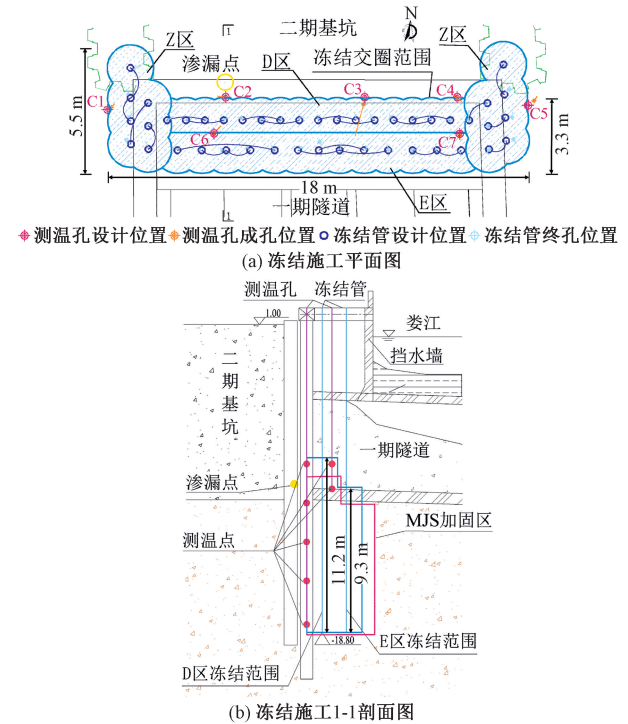


图3 冻结法施工图

Figure 3 Working drawing of freezing method construction

表2 冻结管布置信息

冻结区域	冻结孔数量	冻结高程/m	冻结起始时间
D区	17	$-18.8\sim -7.6$	7月31日
E区	13	$-18.8\sim -9.5$	8月5日
Z区	14	$-18.8\sim -2.0$	7月31日

D、E区采取局部冻结,主要针对底部封水,D区冻结管冻结的土质为MJS加固的水泥土和注浆充填的水泥土;E区冻结管冻结土体为一期结构内反压堵水的回填土和注浆充填的水泥土。Z区针对东西两侧封水,其内排土质为三轴搅拌桩加固的水泥土,外排下部为MJS加固水泥土,上部为人工填土,其性质较为松散。

MJS加固区单桩直径 $2.0\text{ m}$ ,间距 $1.5\text{ m}$ ,如图3(b)所示,桩顶标高 $-8.8\text{ m}$ (基底下 $1.7\text{ m}$ ),桩底标高 $-18.8\text{ m}$ (基底下 $8.3\text{ m}$ ,插入⑥-1黏土层约 $1.5\text{ m}$ ),桩长 $10\text{ m}$ ,点位距离结构北端头 $30\text{ cm}$ 。

冻结整体形成一个东西长 $18\text{ m}$ ,中部宽 $3.3\text{ m}$ ,两侧宽 $5.5\text{ m}$ ,最深处 $20.8\text{ m}$ 的加固体,并与两侧拉森钢板桩止水帷幕相互咬合后形成封闭的止水结构。

冻结区域内共布置7个测温孔(C1~C7),如图3

所示,总计 29 个测温点监测冻结壁发展情况,测温点信息如表 3 所示。远程自动监测频率为每 4 min 一次。

表 3 测温点信息

Table 3 Information on temperature sensing points

测温孔编号	监测区域	测点数量	测点布置深度/m
C1、C5	Z 区外侧	5	5.0,9.0,13.0,17.0,20.3
C2、C3、C4	D 区基坑侧	5	10.0,12.5,15.0, 17.5,20.3
C6、C7	D 区上部、 E 区上部	2	10.0,11.6

### 3.2.2 冻结参数

根据以往工程施工经验,液氮冻结的冻结壁发展平均速度约为 100~120 mm/d。冻结交圈时间预计 5 d,达到设计冻结壁厚度预计 10 d,冻结主要参数如表 4 所示。

表 4 冻结施工主要参数

Table 4 Main parameters of frozen construction

参数	数值	备注
冻结壁设计厚度	≥2 m	
冻结壁平均温度	≤-10 ℃	交界面平均温度 ≤-5 ℃
积极冻结时间	暂定 10 d	
维护冻结时间	暂定 20 d	
设计液氮罐出口氮气温度	≤-150 ℃	纯度 ≥99.999% (O <sub>2</sub> 纯度 ≤0.001%)
设计排气口氮气温度	-70~-80 ℃	维护冻结期间 -50~-60 ℃
设计液氮罐出口压力	0.10~0.15 MPa	
冻结管规格	Φ108 mm×6 mm	R304 不锈钢管
测温管规格	Φ108 mm×6 mm	R304 不锈钢管
回气管规格	Φ40 mm×3 mm	R304 不锈钢管
冻结孔数量	44 个	
测温孔数量	7 个	
冻结孔长度	915.20 m	
测温孔长度	124.70 m	
预计冻结发展速度	100 mm/d	向一侧发展

由于水化热导致地层初始温度高,又因为临近水体,土中渗流温度高,交圈时间延长,实际积极冻结为 15 d。

## 4 冻结实测分析

### 4.1 液氮用量

根据中国液氮冻结案例的统计<sup>[11]</sup>,当含水率为 28%时,冻结施工过程液氮消耗量为 1 600~1 950 kg/m<sup>3</sup>,当含水率在 2.5%~5.7%时,平均液氮消耗量为 726.3 kg/m<sup>3</sup>。在文献[15]的报道中,平均液氮消耗量为 700~1 000 kg/m<sup>3</sup>,一般液氮用量

随单位土体的含水率升高而增加<sup>[16]</sup>。本工程冻结区域含水率约为 23%。

对液氮消耗量进行预算,预计积极冻结期冻结每立方米土消耗液氮为 1.25×10<sup>3</sup> kg,冻结土体体积 950 m<sup>3</sup>,液氮消耗量为 1.19×10<sup>6</sup> kg;预计维护冻结期每天每组串联冻结孔的液氮消耗量为 7.2×10<sup>3</sup> kg,20 组 20 d 液氮消耗量总计为 2.88×10<sup>6</sup> kg。

实测液氮用量如图 4 所示。积极冻结期间,平均每立方米土液氮消耗量为 1.671×10<sup>3</sup> kg。由于夏季地层温度高且冻结前期地下水流动会产生大量热交换,实际液氮用量大于设计值。维护冻结期平均每组冻结孔每天液氮消耗量为 3.49×10<sup>3</sup> kg,为经验预估值的 48.5%。冻结壁维持低温状态所需液氮量较少。

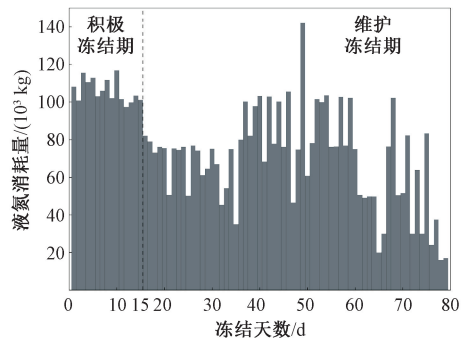


图 4 液氮用量统计

Figure 4 Statistic of liquid nitrogen consumption

### 4.2 实测温度分析

积极冻结期液氮总去平均温度为-173.9 ℃,如图 5 所示。温度采样处于-168~-178 ℃,维护冻结期总去温度略低于积极冻结期。

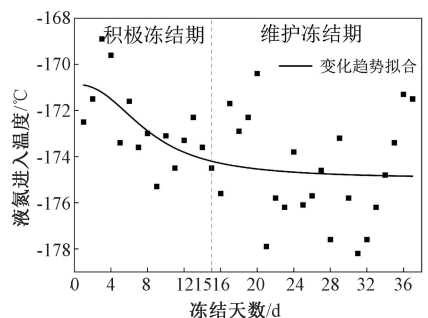


图 5 液氮进入温度

Figure 5 Liquid nitrogen inlet temperature

不同于盐水循环,液氮气化释放冷量后形成的氮气可直接排入大气。排气口温度可推算冻结回路释放的冷量。在液氮罐车换车时需关闭去路阀门,阀门的开闭会引起各回路压力值重新分布,导致排气口温度产生波动,其中 19 组排气口温度数据如图 6 所示。各排气口温度总体处于-50.84~-120.43 ℃。

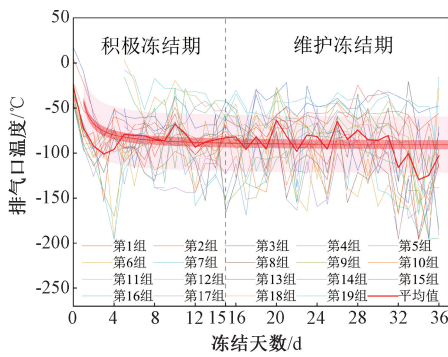


图6 排气口温度

Figure 6 Exhaust outlet temperature

测温孔温度记录如图7所示,可以看出,地层初始温度较高,平均地层温度达32.15℃,单点最高地温为41.8℃。地温过高是由于水泥土水化热释放<sup>[17]</sup>,这是冻结时间延长的原因之一,土体初始温度呈非均匀场分布。

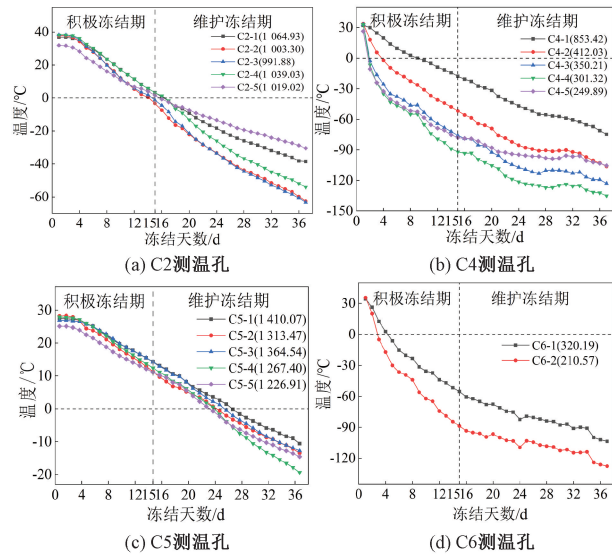


图7 测温孔温度随时间变化典型曲线

Figure 7 Typical temperature-time curves

现场实测温度结果表明,有渗漏附近(C2)比无渗漏附近(C4)的平均温度高66℃,渗流对冻结壁发展的抑制作用明显。冻结温度的影响因素中,渗流产生的影响最大,深度不同产生的影响次之,地层初始温度产生的影响最小。

### 4.3 冻结壁发展规律

#### 4.3.1 冻结速度

测温点与冻结管的距离和温度变化时间推算出的冻结壁发展速度可以反映冻结锋面推进情况。如图8所示,冻结壁总体发展速度为90.3 mm/d。将测温点按照有无渗漏和有无水泥土加固进行区分,冻结速度如表5所示。由表5可知,在无渗漏区水泥土加固使冻结发展速度提升了18.8%,在水泥土加固区

的有渗漏(C2)处冻结壁发展速度为无渗漏(C3、C4)处的58.6%。上游冻结壁受渗流抑制作用略大。

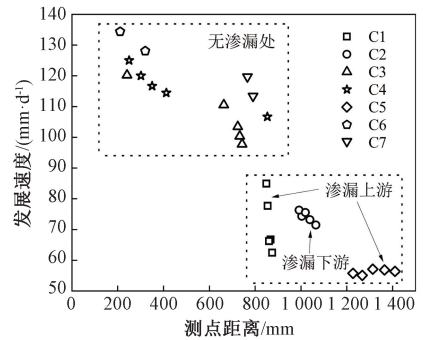


图8 渗漏对冻结壁发展速度影响

Figure 8 Impact of seepage on the growth rate of freezing wall

表5 冻结壁发展速度

Table 5 Growth rate of the freezing wall

有无渗透	发展速度/(mm·d <sup>-1</sup> )	
	有水泥土加固	无水泥土加固
无	121.4	102.2
有	67.3	

#### 4.3.2 冻结壁平均温度

根据成冰公式<sup>[18]</sup>计算出冻结壁平均温度发展规律如图9所示。其中,有渗流处(C1、C2、C5)冻结壁平均温度曲线下降速度明显慢于无渗流处(C3、C4、C6、C7)。无渗流处(C3、C4、C6、C7)温度曲线呈现先快后慢的趋势并逐渐趋于平稳。渗流上游(C1、C5)温度曲线降幅小于其余各处,上游受渗流抑制作用更明显<sup>[13]</sup>。渗流上游(C1、C5)在15 d 积极冻结结束后仍处于冻结帷幕范围外,受地下水影响,冻结管提供的冷量与地下水热交换逐渐使此处温度达到平衡状态,维持在-35℃,冻结壁不再向上游发展<sup>[10]</sup>。

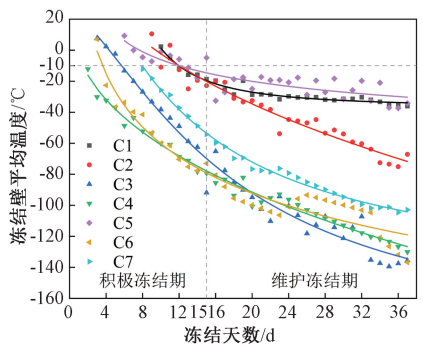


图9 冻结壁平均温度

Figure 9 Average temperature of the freezing wall

冻结15 d后渗流路径封闭,渗流下游(C2)平均温度低于-10℃后降温速度并未像上游一样减

缓。说明冻结壁发展已不受地下水影响,温度曲线斜率开始大于上游(C1、C5),接近无渗流(C3、C4)处。

### 4.3.3 土体温度发展

如图 10 所示,按 15 d 积极冻结期进行分组,土体与冻结管的距离对温度降幅有明显影响。统计结果表明,和冻结管距离小于 800 mm 处积极冻结期的土体日降温幅度比维护冻结期大 4.3 °C;而和冻结管距离大于 800 mm 后日降温幅度差仅为 0.6 °C。可认为 800 mm 半径范围为冻结壁的快速成型范围。

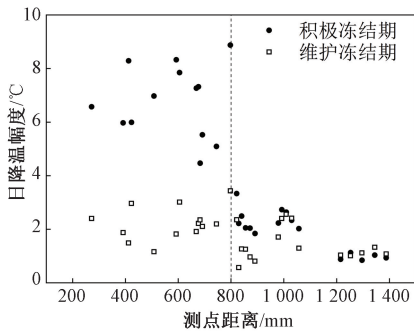


图 10 不同时期日降温幅度对比

Figure 10 Temperature decrease over different periods

不同时期土体温度随土体与冻结管的距离增长分布曲线如图 11 所示,实测土体第 5 天时温度分布曲线在 600 mm 处出现水平弯曲,降温区继续向远端扩散;15 d 开始曲线在 600 mm 和 1 000 mm 处出现两个反弯点,温度曲线形态基本稳定。冻结壁 10 d 左右发展至 800 mm,15 d 达到 1 000 mm,厚度增长 25%用时增加了 50%。理想的冻结管间距应该在冻结锋面推进速度减速时就使冻结壁完成交圈,冻结管打孔间距以 800~1 000 mm 为宜。

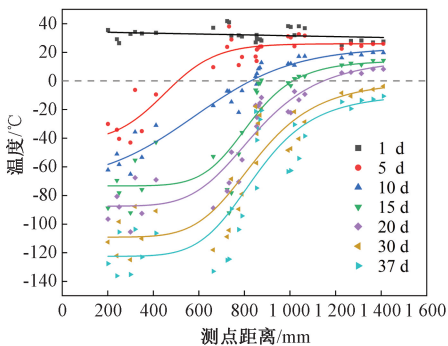


图 11 不同时期土体温度分布曲线

Figure 11 Soil temperature distribution curve in different periods

## 5 开挖与构筑

冻结壁平均温度及冻结壁厚度达到设计要求后,应先对基坑内进行抽排水施工,并在止水帷幕外

水位观测点观测地下水位是否有变化,在确认坑内外无水力联系后才可进行下一步施工。冻结修复施工流程如图 12 所示。

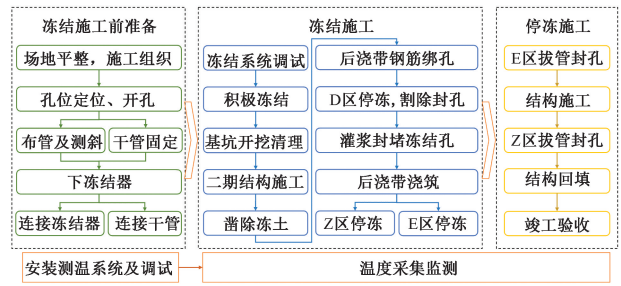


图 12 冻结修复施工流程

Figure 12 Construction process of frozen repairing

在确认具备开挖条件后,先进行回填土开挖清理,后进行基坑内二期结构施工;施工完成后开始凿除围护桩和结构范围内的冻土(冻土采用人工手持风镐凿除);凿除作业完成后进行剩余后浇带部分底板、侧墙钢筋绑扎,浇筑后浇带底板混凝土前开挖范围内 D 区冻结孔停止冻结(两侧及 E 区冻结孔继续维护冻结);混凝土浇捣前割除 D 区冻结孔,冻结孔内进行灌浆封堵。最后待顶板混凝土浇筑完成,两侧 Z 区冻结孔停止冻结,E 区冻结孔拔管后封堵,停一组割一组,待结构施工完成后,Z 区冻结孔进行拔管施工。温度监测应贯穿冻结施工。

## 6 效果评价

液氮冻结 15 d 后形成完整冻结止水结构,冻结半径 600 mm 内温度低于 -60 °C,半径 600~1 000 mm 内温度呈梯度升高至 0 °C。根据不利原则,对各测温点取温度高点进行计算,在冻结第 15 天时,选取 C2-4 计算所得冻结壁最小厚度大于 2.0 m,冻结壁平均温度计算值最大处为 -22.8 °C,满足设计要求,成功封水。

冻结壁不同部位表现出差异性的冻结速度,正常土中冻结壁发展速度为 102.2 mm/d,而在水泥土中冻结壁发展速度提高至 121.4 mm/d,渗流抑制效应使得水泥土中冻结壁发展速度降至 67.3 mm/d,延长了冻结施工的时间。

液氮冻结发展速度快,水分迁移少,冻结 38 d 土体冻胀最大处 28.5 mm。采用何浩松等<sup>[19]</sup>提出的 R 模型对土体冻胀进行判断得出 R 最大值为 0.944 mm/h<sup>0.5</sup>,属于中冻胀等级。其他观测点冻胀不大于 6 mm,对应 R 值小于 0.2 mm/h<sup>0.5</sup>,属于低冻胀等级。部分位置出现较高冻胀是由于渗径封闭时间较长,水分迁移更大。

当冻结施工的各项指标均达到设计要求后,开

始抽排坑内积水。通过对止水帷幕外的地下水位监测孔持续观测,未发现地下水位有明显下降,判断坑内外已无水力联系,止水效果良好,随即开展下一步构筑施工。

## 7 结论

本文在分析区间分期交界面渗漏原因的基础上,使用注浆充填渗流通道加液氮冻结法成功解决了基坑交界面止水帷幕失效的问题。通过实践得出以下结论。

(1)交界面渗漏原因为地层存在渗流含水层时,三轴搅拌桩和MJS加固难以确保止水帷幕的有效性。液氮冻结可快速有效止水,修复涌砂冒水点。

(2)实测不同时期地层温度随距离分布曲线在第5天时温度分布曲线在600 mm处出现水平弯曲,降温区继续向远端扩散;15 d开始曲线在600 mm和1 000 mm处出现两个反弯点,温度曲线形态基本稳定。

(3)冻结壁发展总平均速度为90.3 mm/d,液氮冻结水泥系改良土冻结壁发展速度为121.4 mm/d,比无水泥系改良土处冻结壁发展速度提升了18.8%,渗漏处冻结壁发展速度为67.3 mm/d,是无渗流处冻结壁平均发展速度的58.6%。

(4)积极冻结期每立方米消耗液氮为 $1.671 \times 10^3$  kg;维护冻结期每组冻结孔每天液氮消耗量为 $3.49 \times 10^3$  kg,为经验预估值的48.5%

## 参考文献:

- [1] 刁鹏程, 杨平. 液氮冻结二次加固在富水软弱地层小盾构接收中的应用与实测[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(6): 1044-1051.  
DIAO P C, YANG P. Application and measurement of secondary consolidation by liquid nitrogen freezing to small shield receiving in water-rich and soft-weak strata [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(6): 1044-1051.
- [2] YANG P, ZHAO J L, LI L. An artificial freezing technique to facilitate shield tail brush replacement under high pore-water pressure using liquid nitrogen [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(4): 1504-1514.
- [3] 曾涛. 应用液氮冻结技术修复软土地基中的地铁隧道[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(6): 41-43, 60.  
ZENG T. Application of liquid nitrogen ground freezing technology to repair subway tunnel in soft soil base [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(6): 41-43, 60.
- [4] 邓晓鹏. 浸盐地层液氮冻结温度场研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.  
DENG X P. Study on the liquid nitrogen freezing temper-

ature field in saline soil [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.

- [5] KANG Y S, HOU C C, LI K J, et al. Evolution of temperature field and frozen wall in sandy cobble stratum using LN<sub>2</sub> freezing method [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 185: 116334.
- [6] 王宁宁, 盛炎民, 史博, 等. 液氮冻结止水施工技术在地下连续墙中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(21): 76-80.  
WANG N N, SHENG Y M, SHI B, et al. Application of liquid nitrogen freezing water sealing construction technology in diaphragm wall [J]. Construction Technology, 2023, 52(21): 76-80.
- [7] 黄建华, 严耿明, 覃少杰. 液氮冻结加固冻结管内换热机制及对流换热系数研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2624-2633.  
HUANG J H, YAN G M, QIN S J. Heat transfer mechanism and convective heat transfer coefficient in freezing pipes for freezing reinforcement using liquid nitrogen [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(9): 2624-2633.
- [8] 石荣剑, 岳丰田, 张勇, 等. 液氮冻结管内沸腾段分布特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1143-1148.  
SHI R J, YUE F T, ZHANG Y, et al. Experimental study on the distribution of boiling sections in liquid nitrogen freezing pipe [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1143-1148.
- [9] NIKOLAEV P, JIVKOV A P, MARGETTS L, et al. Modelling artificial ground freezing subjected to high velocity seepage [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 221: 125084.
- [10] 孙立强, 商安策, 郎瑞卿, 等. 渗流地层人工冻结壁交圈时间计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊1): 3663-3673.  
SUN L Q, SHANG A C, LANG R Q, et al. Calculation method of artificial freezing wall closure time in seepage stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S1): 3663-3673.
- [11] 张胜利, 杨杰. 冻结法施工手册[M]. 北京: 应急管理出版社, 2021.  
ZHANG S L, YANG J. Construction handbook for ground freezing method [M]. Beijing: Emergency Management Press, 2021.
- [12] 张雅琴, 杨平, 江汪洋, 等. 含水率及应变速率对冻结粉质黏土强度特性影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(3): 79-84.  
ZHANG Y Q, YANG P, JIANG W Y, et al. Effect of water content and strain rate on the strength characteristics of frozen silty clay [J]. Journal of Zhengzhou Univer-

- sity (Engineering Science), 2020, 41(3): 79-84.
- [13] 荣传新, 王彬, 程桦, 等. 大流速渗透地层人工冻结壁形成机制室内模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3): 596-613.
- RONG C X, WANG B, CHENG H, et al. Laboratory model test study on formation mechanisms of artificial frozen walls in permeable strata with high seepage velocity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(3): 596-613.
- [14] 赵宇辉, 杨平, 王宁, 等. 下穿车站交叠区域 MJS+水平冻结加固解冻温度场研究[J]. 林业工程学报, 2021, 6(4): 159-166.
- ZHAO Y H, YANG P, WANG N, et al. Study on MJS+horizontal freezing reinforcement and thawing temperature field in the overlapped area of the underpass station[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(4): 159-166.
- [15] 王耀林. 国外井巷特殊施工技术[J]. 世界煤炭技术, 1994, 20(4): 11-17, 56.
- WANG Y L. Special construction technology of foreign wells and lanes[J]. China Coal, 1994, 20(4): 11-17, 56.
- [16] 冯敬辉. 液氮冻结中液氮消耗量的实验与理论计算[J]. 煤炭技术, 2021, 40(12): 55-58.
- FENG J H. Experiment and theoretical calculation of liquid nitrogen consumption in liquid nitrogen freezing[J]. Coal Technology, 2021, 40(12): 55-58.
- [17] 戴逸飞, 杨平, 王宁, 等. 交叠车站下穿段 MJS 加固温度场变化规律研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(1): 103-110.
- DAI Y F, YANG P, WANG N, et al. Study on temperature field variation law of MJS reinforcement for underpass section of overlapping station[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(1): 103-110.
- [18] 何挺秀, 胡向东. 冻土帷幕平均温度“成冰”公式的适应性研究[J]. 低温建筑技术, 2009, 31(5): 77-81.
- HE T X, HU X D. Study on adaptability of "Chengbing" formula for average temperature of frozen soil wall[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009, 31(5): 77-81.
- [19] 何浩松, 滕继东, 张升, 等. 基于冻胀量与时间平方根之比确定冻胀分级的探讨[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(12): 2519-2528.
- HE H S, TENG J D, ZHANG S, et al. Determining frost heave classification by using ratio of frost heave to square root of time [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(12): 2519-2528.

## Field Measurement Study on Liquid Nitrogen Freezing for Controlling Water Seepage at Tunnel Open-cut Excavation Interfaces

LIU Dayong<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>1</sup>, GU Yajun<sup>2</sup>, CHENG Jianhua<sup>2</sup>, WANG Jiahui<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Suzhou Rail Transit Construction Co., Ltd., Suzhou 215004, China)

**Abstract:** In a certain subway construction project in Suzhou, the cement soil mixed piles in the open-cut excavation area of the river channel experienced excessive deformation during the initial excavation, resulting in the failure of the waterproof curtain. Even after treatment with double-liquid grouting combined with MJS reinforcement, it remained ineffective in stopping the flow of sand and water. By using liquid nitrogen artificial ground freezing to form an effective waterproof curtain, the repair construction of the failed waterproof curtain on the condition of large seepage was successfully realized. An analysis of the failure of the foundation pit's waterproof curtain was conducted, and a construction plan for liquid nitrogen freezing repair was proposed. Using on-site measurements, the study statistically evaluated the temperature of the frozen wall, the consumption of liquid nitrogen, and the growth rate of the freezing wall during the repair construction process. The results showed that the growth rate of the freezing wall at the leakage site of the cement-based improved soil was 67.3 mm/d, which was 58.6% of the average expansion rate of the frozen wall at the non-seepage area, and the temperature difference between the frozen soil at the seepage point and the non-seepage area exceeded 40 °C, which showed a clearly inhibitory effect on the expansion of the frozen wall. During the active freezing period, each cubic meter of soil required  $1.671 \times 10^3$  kg of liquid nitrogen, and each set of freezing pipes consumed  $3.49 \times 10^3$  kg of liquid nitrogen daily during the maintenance freezing period, which was 48.5% of the empirical estimate.

**Keywords:** water inrush; liquid nitrogen freezing repair; growth rate of the freezing wall; liquid nitrogen consumption; field measurement study