

DOI: 10.15886/j.cnki.hdxzbk.2022.0050



引用格式: 林小淇, 胡俊, 任军昊, 等. 呼和浩特市地铁联络通道冻结施工监测与分析[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2022, 40(4): 426-433.

Citation: Lin Xiaoqi, Hu Jun, Ren Junhao, et al. Monitoring and analysis of freezing construction for contact passage of Hohhot Metro [J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2022, 40(4): 426-433.

## 呼和浩特市地铁联络通道冻结施工 监测与分析

林小淇<sup>1</sup>, 胡俊<sup>1</sup>, 任军昊<sup>1</sup>, 曾晖<sup>2</sup>, 王志鑫<sup>3</sup>, 黄兴强<sup>4</sup>

(1. 海南大学土木建筑工程学院, 海南海口 570228; 2. 五邑大学土木建筑学院, 广东江门 529020; 3. 海南省水文地质工程地质勘察院, 海南海口 570206; 4. 山东嘉御工程建设有限公司, 山东邹城 273500)

**摘要:** 内蒙古呼和浩特市地铁2号线1号联络通道采用冻结法施工, 冻土帷幕的发展情况是确保联络通道顺利开挖的关键。基于现场监测数据, 对该地区的温度场、泄压孔压力进行数据分析研究, 研究表明: 冻结场的温度在冻结前期变化较大, 在冻结后期逐渐平缓, 且温度均低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 通过对比, C2测温孔的降温速度大于C1测温孔的降温速度, 因此土体所在位置冻结管排布密度越大且越靠近冻土帷幕内侧, 土体温度降温速率越快; 泄压孔可以及时监测土体内冻土帷幕是否交圈, 泄压孔压力在冻结16 d后恒定在0.23 MPa, 此时冻土帷幕开始交圈; 通过公式计算得到冻土帷幕最小厚度2.358 m, 平均温度 $-11.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 均符合设计开挖要求。通过分析得出该地区的冻结管设计方案安全可靠, 以期对往后类似工程提供参考依据。

**关键词:** 呼和浩特市地铁; 联络通道; 冻结法; 数据分析; 施工

中图分类号: U455;

文献标志码: A

文章编号: 1004-1729(2022)04-0426-08

随着城市人口的不断扩大, 城乡一体化的快速推进, 使得城市交通压力越来越大, 城市化的问题逐渐突出。城市轨道交通具有绿色、环保的优点, 可以极大地缓解城市交通的压力<sup>[1-2]</sup>。联络通道及泵房作为隧道的重要组成部分, 在其开挖过程中需要保证自身结构的稳定性和整体安全。当联络通道所处地形为富水粘土层时, 施工的风险较大, 如何确保在富水环境下顺利开挖联络通道是工程施工需要解决的难题<sup>[3-4]</sup>。冻结法在联络通道施工时对土体进行有效的加固, 表现出极大的优越性, 因此运用在各大地下工程中<sup>[5]</sup>。

目前国内许多学者对联络通道冻结法施工进行了研究。向亮等<sup>[6]</sup>通过分析兰州轨道交通1号线实际工程数据, 得到了处在红砂岩地层中联络通道在冻结法施工过程中的温度场变化规律, 提出了单管温度场的计算公式对稳态温度场进行改进, 验证其公式的可靠性。孙立建等<sup>[7]</sup>以济南地铁6号线联络通道修建为依托, 对冻结法施工过程中的地表沉降以及冻胀融沉进行了分析, 经过分析需要对冻结加固进行强制解冻措施, 确保控制融沉现象。陈军浩等<sup>[8]</sup>以上海地铁15号线联络通道冻结法施工为工程背景, 对冻土帷幕厚度、温度场变化进行分析, 结果表明: 水泥浆的注入可以有效地抑制土层中水分迁移, 减小土体冻胀的影响; 冻结过程中温度变化由快逐渐减缓, 灰色粉土的冻结效果比粉质粘土夹粉土的冻结效果好。杨平等<sup>[9]</sup>以苏州地铁2号线联络通道冻结法施工为工程背景, 对冻结过程中土体温度变化与土体冻胀情况进行了全面的研究, 得出土体温度与冻胀位移随着深度的增加而增加, 联络通道拱顶的冻胀位移是地表冻

收稿日期: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51968019); 海南省自然科学基金创新研究团队项目(522CXTD511); 海南省重点研发计划项目(ZDYF2021GXJS020); 2021年度广东省普通高校特色创新类项目(2021KTSCX139)

作者简介: 林小淇(1997—), 女, 海南三亚人, 海南大学土木建筑工程学院2020级硕士研究生, E-mail: 2671023381@qq.com

通信作者: 胡俊(1983—), 男, 四川乐山人, 博士(后), 海南大学土木建筑工程学院教授, 博导, 研究方向: 海洋岩土与临海地下工程, E-mail: hj7140477@hainanu.edu.cn

胀位移的3.6倍.高志宏等<sup>[10]</sup>通过模型试验模拟富水卵砾石地层在冻结过程中温度场的变化,观测出离冻结管越远,土体的温度下降越慢,拱顶的冻胀位移最大.江杰等<sup>[11]</sup>结合南宁地铁3号线金琅区间联络通道进行冻结法施工的分析,得到冻结法在圆砾层的应用,并对施工中的问题提出了解决方案.同时,许多学者使用有限元分析软件,例如ABAQUS、ANSYS、ADINA等软件针对冻结法施工过程中温度场、位移场以及渗流场对温度场的影响进行了数值模拟<sup>[12-16]</sup>.

但是,关于呼和浩特市联络通道冻结加固技术方面的文献很少.本文以呼和浩特市地铁2号线1号联络通道实际工程为工程背景,对冻结施工过程进行了全信息化监测与数据分析,证明该冻结法在呼和浩特市地铁修建中的可行性及其优越性,以期为类似工程提供参考依据.

### 1 工程概况

呼和浩特市地铁2号线公主府站~内蒙古体育场站区间为左右单线并行区间,本区间隧道右线全长1490.226 m,左线全长1488.129 m,使用盾构法进行隧道施工.区间设置2座联络通道,其中1号联络通道及泵房拱顶覆土约17.05 m,集水坑底板埋深约22.70 m,结构土层分布自上而下依次是:①粉质黏土层(3-2),厚度2.1 m;②圆砾层(3-9),厚度1.3 m;③粉质砂土层(4-4),厚度2.7 m.结构初期支护采用喷射250 mm厚C25混凝土配合钢筋网和格栅钢进行支撑,二次衬砌使用钢筋混凝土铺设,联络通道开挖采用台阶法.联络通道结构剖面图和地质情况如图1所示.

区间联络通道及泵房所处地层情况复杂,经工程探测得知该地区地下水体属于潜水,常年水位在-8.5~-12.2 m,水位年变幅1.5~3.0 m.地下水位以下的土层为强透水区,赋水性强.

### 2 冻结方案设计

2.1 冻结管布设 1号联络通道及泵房冻结管布置图如图2所示,联络通道左右线剖面图如图3、图4所示.采用水平冻结管和倾斜冻结管结合的布设方式是冻结加固的有效方式之一,在各个城市都有成功的案例<sup>[17-18]</sup>,1号联络通道及泵房所处地形较为复杂,为了保证其施工的安全,采用在两条并行隧道分别布置冻结管的方法,按照3种角度[-90°~0°、0°、0°~90°]来布置.冻结管的型号选取Φ89 mm×8 mm,共布置59个冻结孔,冻结管的总长度为362 m.

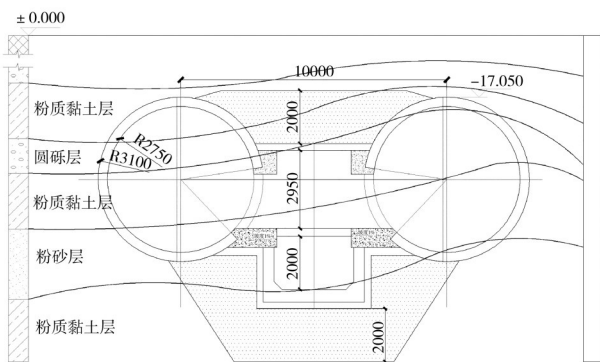


图1 联络通道结构剖面及地质情况图

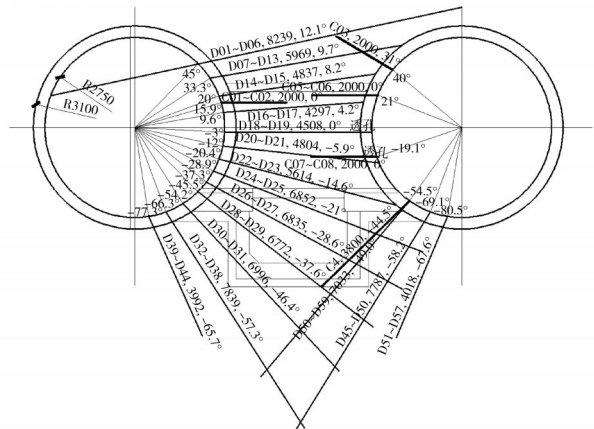


图2 联络通道平面布置图

2.2 测温孔及泄压孔布设 1号联络通道共打入8个测温孔,其中左线打入两个测温孔,右线打入6个测温孔.为了监测联络通道不同位置的冻结温度,C3、C4测温孔打入深度分别为3.0 m和3.8 m,其他的测温孔是水平打入,深度为2.0 m.为了了解冻土帷幕温度场变化,根据实际冻结情况实施相应的温度控制措施,在8个测温孔中分别布置3个测温点,一共24个测温点.测温孔平面位置以及分布如图2~4所示.

在左右两线布置共4个泄压孔,在完成泄压孔的布置后安装压力表,用来实时监测冻结帷幕的压力值.泄压孔可以根据实际测量数据对联络通道中冻结帷幕的形成情况作出准确判断.

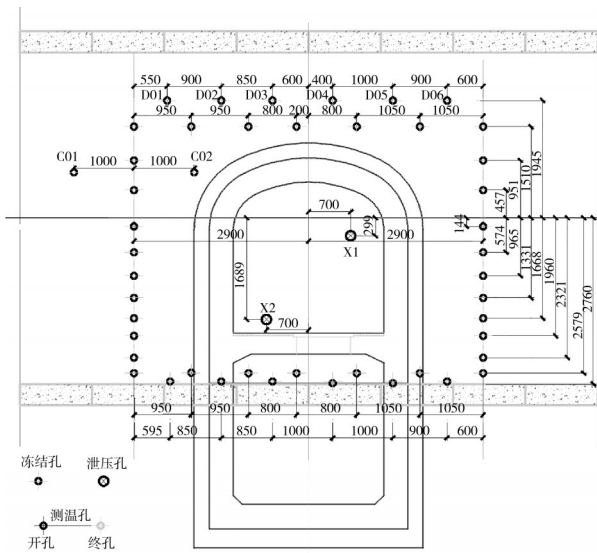


图3 隧道左线孔位图

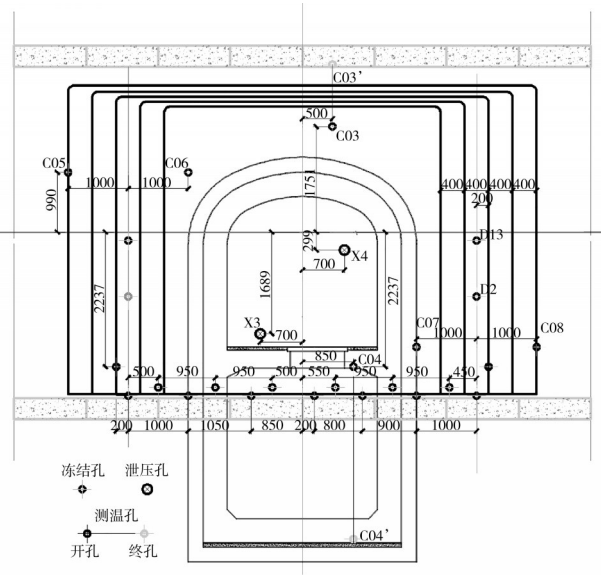


图4 隧道右线孔位图

### 3 冻结参数设计

区间联络通道兼泵房位于地下水水位以下,确保联络通道兼泵房的无水施工,是本工程的重点.需要对联络通道冻结工程进行初步设计.冻结主要设计参数详见表1.

### 4 制冷系统设计

4.1 制冷系统需冷量计算 制冷系统需冷量的计算公式:

$$Q = K \times \pi \times d \times n \times H \times q, \quad (1)$$

式中: $Q$ 为区间联络通道冻结孔所需要的制冷量(单位: $\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$ ); $K$ 为散热系数,惯例 $K=1.1 \sim 1.25$ ,本工程取 $K=1.2$ ;  $d$ 为冻结管直径(单位:m); $H$ 为冻结管总长(单位:m); $n$ 为冻结管总数量; $q$ 为土体向冻结管传递的热量,惯例 $q=0.26 \sim 0.29 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$ ,本文取 $q=0.29 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$ .

根据实际工程情况以及制冷要求,2个联络通道共同使用一套制冷系统.其中,联络通道冻结管直径取 $0.089 \text{ m}$ ,冻结管总长度为 $362 \text{ m}$ ,根据公式可以计算得到实际需冷量为: $70.88 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$

4.2 制冷系统的组成 (1) 根据计算得到的制冷量,选择3台型号JYSLGF300III冷冻机(标准制冷量 $8.75 \times 10^4 \text{ kcal} \cdot \text{h}^{-1}$ ),其中1台备用.

(2) 盐水循环由IS200-150-315型盐水循环泵提供,其中1台备用,单台盐水流量 $315 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,功率 $55 \text{ kW}$ ,扬程 $32 \text{ m}$ .

(3) 选用KYL150-315A型清水泵2台,其中1台备用,单台流量为 $187 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,功率 $22 \text{ kW}$ .

### 5 监测数据分析

联络通道施工整个过程中,联络通道周围土体的性质经历了剧烈的变化,对上部土体乃至整个环境产生了巨大的影响.现场监测的数据,是施工过程中土体变化的反馈,是安全施工的重要保障.通过全自动信息化对联络通道冻结施工进行动态监测,精准得到施工过程中冻结土体的变化信息,加以分析得到对工程有利的结论.冻结施工监测包括盐水去回路温度监测、循环盐水压力监测、泄孔压力监测.

表1 联络通道冻结主要设计参数

序号	参数名称	单位	参数
1	冻土帷幕设计厚度	m	2.0
2	冻土帷幕平均温度	$^{\circ}\text{C}$	$\leq -10$
3	冻土帷幕交圈时间	d	18 ~ 25
4	积极冻结时间	d	35 ~ 45
5	设计最低盐水温度	$^{\circ}\text{C}$	$\leq -28$
6	冻结管总长度	m	639
7	冻结孔成孔间距	m	1.2/1.5
8	冻结孔允许偏斜	mm	150
9	单孔盐水流量	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\geq 5$

**5.1 盐水温度监测及数据分析** 热力学第二定律揭示,热量是自发地从温度较高的物体向温度低的物体传递,冻结法降温则利用该原理.刚开始冻结时,土体温度高于冻结管温度,两者的热交换较快,土体温度下降速率较快,因此盐水去回路温差较大;在土体温度形成一定的冻土帷幕后,两者之间温差较小,热交换也逐渐缓慢,盐水去回路的温差逐渐平缓稳定.图5为盐水去回路的温度变化曲线.由图5可知,冻结初期盐水温度变化较大,冻结9 d后趋于平缓,盐水去回路温度均在 $-28\sim-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化,温差不超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,符合施工开挖要求.

**5.2 土体温度监测与数据分析** 测温孔的布置是为了准确、及时地了解冻土帷幕的温度变化情况,掌握温度场的变化可以确保联络通道开挖安全.呼和浩特市地铁2号线1号联络通道的测温孔是按照联络通道结构构造以及结合实际情况来布置.1号联络通道共打入8个测温孔,其中2个从隧道左线打入土体,剩下6个从隧道右线打入土体.每个测温孔布置三个测温点,图6为8个测温孔不同测温点监测到的实际温度,从a~h可以看出:(1)同一个测温孔中不同测点的降温趋势大致相同;(2)在冻结初期温度下降速率较快;(3)在降温至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下后,温度下降速率逐渐变得平缓.

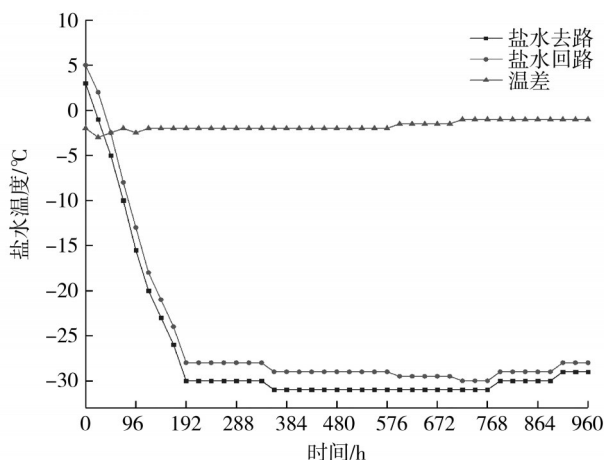


图5 盐水温度变化曲线

通过对比同一测温孔不同测点的降温曲线可知,在冻结初期,C1、C2、C5、C6、C8这5个测温孔的温度变化一致,并且测温孔上各测点间温差小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;在冻结后期,埋深 $0.5\text{ m}$ 的测点变化逐渐与其他两个测点不一致,且温差变大,最大温差超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .C3测温孔上埋深 $0.5\text{ m}$ 的测点在冻结初期就与其余两个测点差距较大,C4测温孔 $0.5\text{ m}$ 处的测点在冻结后期波动较大,C7测温孔较为特殊, $0.5\text{ m}$ 处的测温孔温度低于 $1.25\text{ m}$ 和 $2\text{ m}$ 的测温孔,且温差较大.产生这些现象的原因是 $0.5\text{ m}$ 的测温孔埋深较浅,容易受到外界环境的影响.

为了更好地得到冻土帷幕的形成情况,选择每个测温点的3号测温点进行对比分析,变化曲线如图7所示.C3-3测温点的温度变化最快,由位置详图可以知,C3测温孔位于联络通道上部,该位置打入两排冻结管,因此该测温点温度变化最快,在冻结4 d时已经降温到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且在维持积极冻结期间,最低温度接近 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

除此之外,C2上3号测温点,在冻结28 d后有大幅度的温度上升阶段.经查验,冻结27 d后开始进行大断面开挖,开挖破坏冻土帷幕的封闭性,导致C2测温点附近土体温度与外界进行大量的热交换,使得温度迅速上升.C1、C5、C8测温孔布设在冻土帷幕内侧,当冻土帷幕处在封闭状态且周围没有热量导向媒介时,在冻结后期土体温度逐渐趋于平缓没有太大的变化.同一深度的测温点在冻结33 d后维持温度在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,符合开挖标准.

为研究不同测温孔的温度发展规律,对不同测温孔的3号测温点进行温度平均变化速率计算,其变化速率计算公式为:

$$v = \frac{l}{t}, \quad (2)$$

其中, $v$ 为测温点的温度变化速率; $l$ 为该测点到最近冻结管的距离(表2中的最短距离); $t$ 为测点温度降至零下所需要的时间(表2中的冻结时间).数据见表2.按照常规冻结规律,距离冻结管越近,冻结时间越短,冻土帷幕的发展速率越快.通过对比表格和测温点变化曲线,部分测点符合该冻结规律,如C3-3、C7-3、C8-3.但是也有不符合该规律的测点,如C1-3、C2-3、C4-3、C5-3、C6-3,这是因为有些测点温度还会受到其他因素的影响,如:冻结管之间的距离(冻结管排布密度);测温孔所在位置,测温孔在冻结帷幕内侧和外侧降温速率不一样,冻结管向外侧土体导热效率比向内侧土体导热效率低.

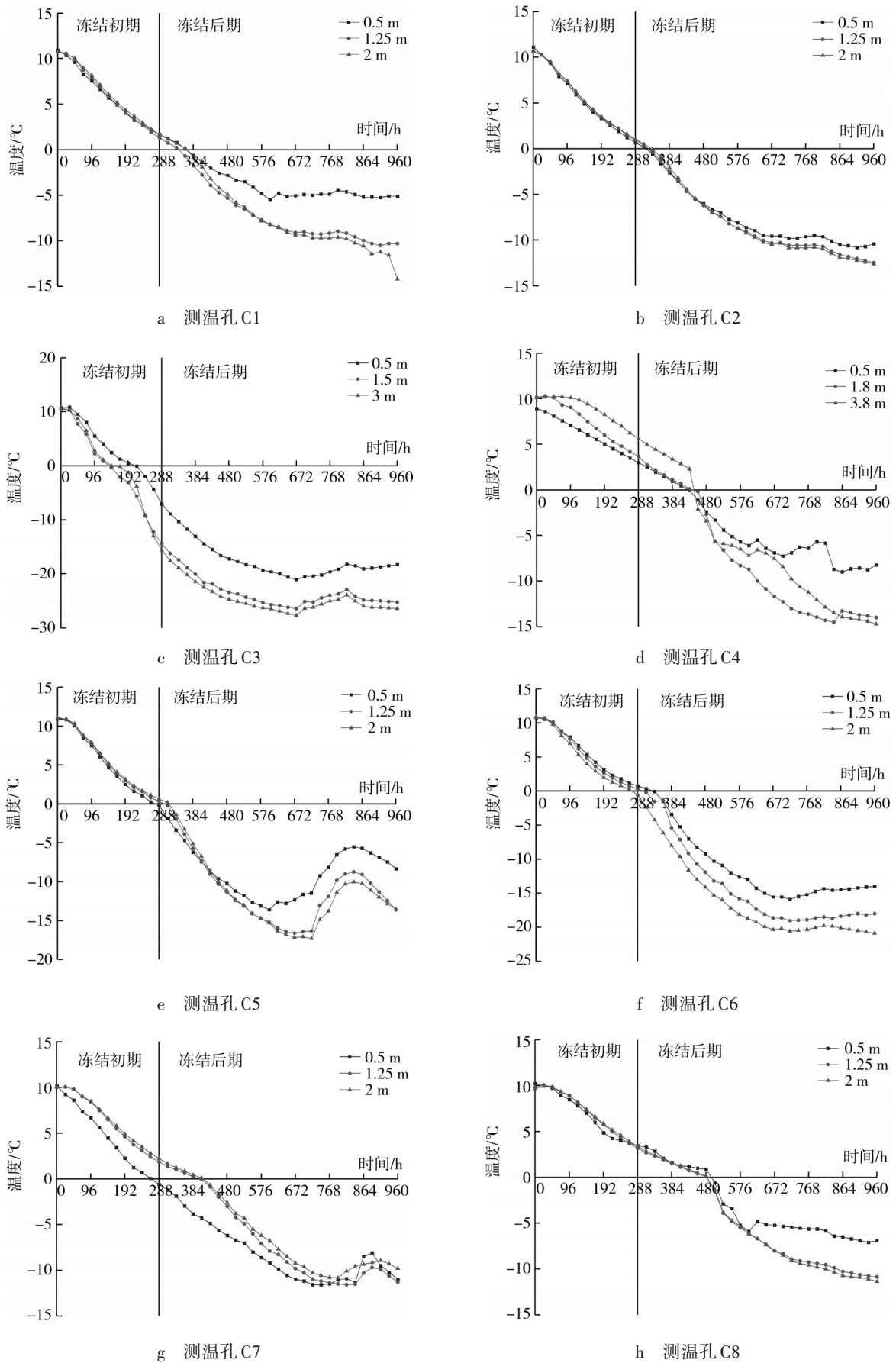


图6 不同测温点的温度变化图

综上所述,冻土帷幕的发展速率受到外界环境、冻结管排布密度以及土体所在的冻土帷幕内外侧位置共同影响,即越靠近冻土帷幕内侧且冻结管排布越密集的温度下降越快。

**5.3 泄压孔压力监测与数据分析** 为了深入了解冻结过程中压力变化过程,在联络通道开挖面分别布置2个泄压孔,共布置4个泄压孔。图8为4个泄压孔从冻结初期开始到冻结结束的压力变化图。

由图8可知,在积极冻结初期泄压孔内一般不产生压力,伴随着冻土帷幕的不断发展,冻土内水分子温度不断降低,当冻土帷幕交圈后形成一个围绕联络通道的封闭土体,泄压孔附近的土体压力得不到释放而逐渐增加。依据数据可以判断,在冻结第7天时,X2的压力由0 MPa增加0.09 MPa,此时该泄压孔周围的土体开始冻结,随着冻土帷幕的冻结范围不断扩大,X1泄压孔压力不断增大,在冻结19 d后压力有明显的增大且之后恒定在0.23 MPa,说明此时周围的冻土帷幕厚度已经达到设计值。X3和X4也在冻结18 d后泄压孔的孔压达到最大值并且稳定不变,此时冻土帷幕发展良好;经过不断的泄压,泄压孔压力表验收通过,泄压孔内基本无泥水流出,具备开挖条件。

**5.4 冻结壁厚度及冻结壁平均温度计算**

**(1) 冻结壁厚度计算** 依据前面算出冻土帷幕最

快发展速率为  $74.86 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,最慢发展速率为  $39.95 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,由此计算得最小冻土帷幕的厚度半径为  $r = 39.95 \times 30 = 1198.5 \text{ mm}$ 。依据石泉彬、梅源等<sup>[19-20]</sup>,可利用下列公式计算冻结圆柱半径:

$$\gamma_2 = \exp\left(\frac{t_1 \ln \gamma - t \ln \gamma_1}{t_1 - t}\right), \quad (3)$$

式中: $\gamma_2$ 为冻结管形成冻结范围半径(单位:mm); $\gamma_1$ 为冻结管半径(单位:mm); $\gamma$ 为测温孔与冻结管的最小距离(单位:mm); $t_1$ 为盐水回路温度(单位:°C); $t$ 为测温孔温度(单位:°C)。依据测温资料,根据最不利原则选取冻结30 d时温度最高的温度测点,选择C8-3测点,该测点在冻结30 d时温度为 $-8.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,将该测点温度代入公式(1)计算得到圆柱半径 $\gamma_2 = 2173 \text{ mm}$ ,最后选取最小圆柱半径 $r = 1198.5 \text{ mm}$ 画出冻土帷幕再冻结30 d时的交圈图,具体示意图如图9所示。经过图中测量得到冻结30 d时最小厚度为2358 mm,大于设计冻结厚度2.0 m,符合施工开挖要求。

**(2) 温度场平均温度计算** 参考《建井工程手册》中得成冰公式来计算温度场冻结壁的平均温度,公式如下:

$$t_c = t_{oc} + 0.25t_n, \quad (4)$$

$$t_{oc} = t_b(1.135 - 0.352\sqrt{l} - 0.875\frac{1}{\sqrt[3]{E}} + 0.226\sqrt{\frac{l}{E}}) - 0.466, \quad (5)$$

式中: $t_{oc}$ 为依据公式计算出冻结壁的平均温度(单位:°C); $t_c$ 为冻结壁平均温度(单位:°C); $t_b$ 为盐水去路温度(单位:°C); $l$ 为冻结孔平均距离(单位:mm); $E$ 为冻结壁厚度(单位:mm); $t_n$ 为测温孔测量的温度(单位:°C)。

同理依据最不利原则,选择C8-3测点温度 $-8.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 代入公式(5),计算得到 $t_{oc} = -8.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,代入公式(4)得到平均温度为 $-11.04 \text{ }^\circ\text{C}$ ,低于设计值 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,冻结管排布符合要求。

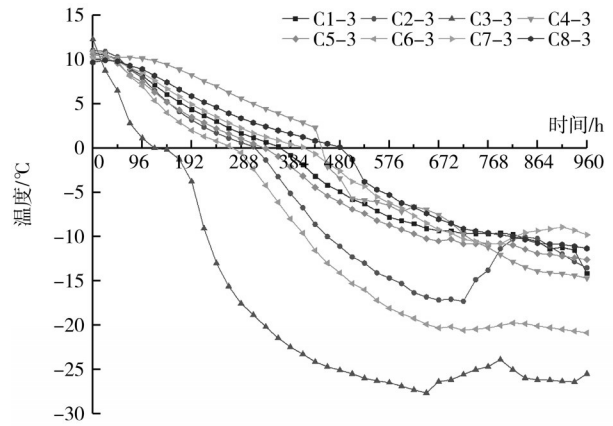


图7 测温孔上3号测温点的对比曲线

表2 各测点到最近冻结管距离

编号	最短距离	冻结时间	平均变化速率
	/mm	/d	/(mm·d <sup>-1</sup> )
C1-3	905	17	53.24
C2-3	905	15	60.33
C3-3	524	7	74.86
C4-3	1459	20	72.95
C5-3	973	15	64.87
C6-3	954	13	73.38
C7-3	877	19	46.16
C8-3	879	22	39.95

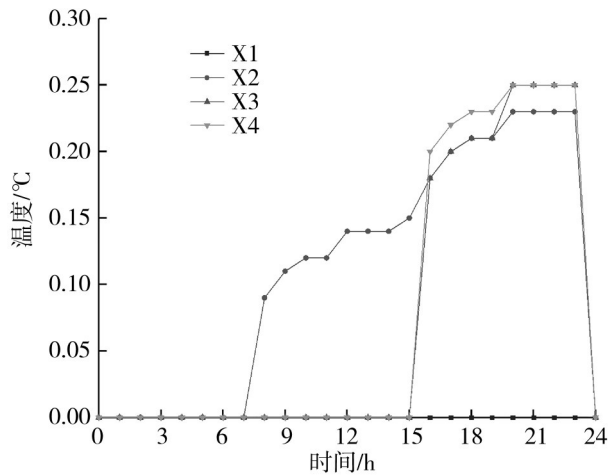


图8 泄压孔压力变化图

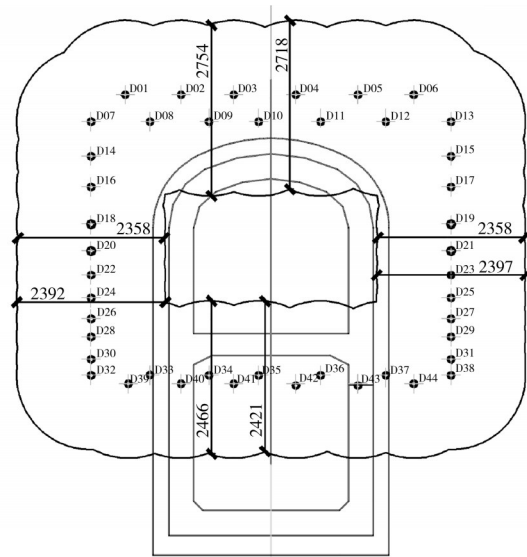


图9 冻结30 d时冻土帷幕交圈示意图

## 6 结论

本文以呼和浩特市地铁2号线1号联络通道冻结法施工为工程背景,对整个施工过程中冻结管布置、冻结帷幕的设计以及冻结数据的分析,得到以下结论:

a. 根据盐水去回路温度曲线,盐水去回路温差在冻结初期变化比较大,因为土体与冻结管之间的温度梯度越大热交换越快,随着土体温度不断降低,两者之间的热交换逐渐减缓,盐水去回路温差不超过 $2^{\circ}\text{C}$ 。

b. 同一测温孔中不同深度的测温点受到外界的影响不同,深度越浅越容易受到外界因素的影响,因此分析时选择打入深度最深的测温孔可以较为真实地反映温度场的变化。冻结场温度受土体开挖的影响,C2-3测温点温度大幅度上升,因此在进行联络通道开挖时需要注意测温孔中的温度,在温度大幅度上升时要增加制冷系统的制冷量,以维持土体的冻结温度,保证工程的安全。

c. 经过比对不同测温点的平均降温速率,可以知道冻结管排布越密集,周围土体降温越快;冻结管向外侧土体导热效率比向内侧土体导热效率低。

d. 由泄压孔压力曲线判断,在冻结第7天时,X2的泄压孔压力开始增加,此时土体开始冻结,随着冻土帷幕的不断扩大,X2泄压孔内的压力不断增大,在冻结16 d后泄压孔压力有明显的增大且之后恒定在 $0.23\text{ MPa}$ ,说明此时冻土帷幕厚度已经达到设计值,可以进行开挖。

e. 通过实际监测温度计算得到在冻结30 d时,最小冻土帷幕厚度为 $2.358\text{ m}$ ,大于设计厚度 $2.0\text{ m}$ ,符合施工设计要求;根据“成冰公式”计算平均温度为 $-11.04^{\circ}\text{C}$ ,小于设计最低温度 $-10^{\circ}\text{C}$ ,符合要求。

## 参考文献:

- [1] 吕剑薇. 呼和浩特市轨道交通组织研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.
- [2] 马俊,杨平,刘增光,等. 常州砂性地层联络通道解冻规律研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(1):167-180.
- [3] 张书旺. 软土地层联络通道冷冻施工技术研究与应[J]. 中国建材科技,2021,30(1):120-122.
- [4] 黄建华,杨鹿鸣,王蕴晨. 水泥改良对地层冻结温度场影响分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(27):11308-11314.
- [5] 武鹏. 联络通道冷冻法施工技术[J]. 城市住宅,2019,26(5):173-174.
- [6] 向亮,王飞,靳宝成,等. 红砂岩地层联络通道冻结法施工温度场分布研究[J]. 土木工程学报,2020,53(S1):306-311.
- [7] 孙立建,张德文,乔晓磊,等. 软弱地层地铁联络通道冻结加固与融沉注浆研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(S1):1002-1006.

- [8] 陈军浩,庄言,陈笔尖,等. 滨海软土冻结温度场发展规律[J]. 煤田地质与勘探,2020,48(4):174-182.
- [9] 杨平,陈瑾,张尚贵,等. 软弱地层联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(12):2226-2234.
- [10] 高志宏,胡双平,张晓峰,等. 联络通道富水卵砾石层冻结施工冻结壁温度及变形的模型试验[J]. 西安科技大学学报,2020,40(3):408-416.
- [11] 江杰,邱居涛,陈先枝,等. 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.
- [12] 胡小荣,饶志强,汪日堂. 南昌地铁联络通道冻结法模拟[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(S1):286-399.
- [13] 叶万军,郑超,刘新军,等. 考虑多地层相变的地铁联络通道三维冻结温度场数值模拟[J]. 水力发电,2020,46(3):36-98.
- [14] 崔亚男. 广州某地铁隧道人工冻结法施工冻结壁厚度及冻结周期计算[D]. 北京:北京交通大学,2008.
- [15] 吴雨薇. 南宁地铁东滨区间联络通道冻结法施工温度场演变规律研究[D]. 海口:海南大学,2019.
- [16] 夏江涛. 盾构出洞水平冻结加固杯型冻土壁温度场研究[D]. 南京:南京林业大学,2009.
- [17] 孙成伟,仇培云. 广州地铁隧道联络通道冻结法施工技术研究[J]. 现代隧道技术,2012,49(3):161-165+181.
- [18] 杨太华. 越江隧道工程联络通道冻结法施工风险分析[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(6):1201-1206.
- [19] 石泉彬,杨平,张婷,等. 软弱地层盾构始发端头的垂直冻结加固与实测[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(6):125-130.
- [20] 梅源,赵良杰,周东波,等. 冻结法在富水砂层暗挖施工中的应用[J]. 中国铁道科学,2020,41(4):1-10.

## Monitoring and Analysis of Freezing Construction for Contact Passage of Hohhot Metro

Lin Xiaoqi<sup>1</sup>, Hu Jun<sup>1</sup>, Ren Junhao<sup>1</sup>, Zeng Hui<sup>2</sup>, Wang Zhixin<sup>3</sup>, Huang Xingqiang<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen 529020, China; 3. Hainan Provincial Institute of Hydrogeology and Engineering Geological Survey, Haikou 570206, China; 4. Shandong Jiayu Engineering Construction Co. Ltd., Zoucheng 273500, China)

**Abstract:** The No. 1 contact channel of Hohhot Metro Line 2 in Inner Mongolia is constructed by freezing method. The development of frozen soil curtain is the key to ensure the smooth excavation of the contact channel. In the report, based on the field monitoring data, the temperature field and frost heaving force in the region were analyzed. The results showed that the temperature of the freezing field changes greatly in the early stage of freezing, and gradually flats in the late stage of freezing, and the temperature is lower than  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; the cooling rate of C2 temperature measurement hole is greater than that of C1 temperature measurement, therefore, the larger the arrangement density of freezing pipe in the soil is and the closer it is to the inside of frozen soil curtain, the faster the temperature cooling rate of soil is; the pressure relief hole can timely monitor the frost heaving force of soil, when the frost heaving force is constant at 0.23 MPa after 16 days of freezing, the frozen soil curtain begins to circle. Based on the formula calculation, the minimum thickness of frozen soil curtain is 2.358 m, and the average temperature is  $-11.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which meets the design and excavation requirements. The analysis results suggested that the design scheme of freezing pipe in this area is safe and reliable, and which can provide references for similar projects in the future.

**Keywords:** Hohhot subway; contact channel; freezing method; data analysis; construction