

# 水泥改良土地层人工冻结温度场的特性

黄建华<sup>1,2</sup>, 杨鹿鸣<sup>1</sup>, 王蕴晨<sup>1</sup>

(1.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2.地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;)

**摘要:** 基于福州地铁2号线某联络通道水泥改良土地层二次冻结加固工程, 对该工程积极冻结期与维护冻结期的去回路冷冻盐水温度及冻结主要影响范围内的土体温度进行现场实测, 通过分析监测数据, 得到了冻结过程中冷冻盐水与土体的降温规律, 探究了两者在各降温阶段的热交换过程, 总结了不同位置处土体的降温规律差异; 通过计算冻结壁的交圈时间、有效厚度和平均温度对该工程冻结效果做出评价, 验证了在水泥改良土地层中采用人工冻结法的可行性, 以为类似工程提供参考。

**关键词:** 联络通道; 水泥改良土; 人工冻结法; 现场实测; 温度场

中图分类号: U231.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)04-0307-07

## Characteristics of artificial freezing temperature field in cement-soil layer

HUANG Jianhua<sup>1,2</sup>, YANG Luming<sup>1</sup>, WANG Yunchen<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2.Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** This study was based on the secondary freezing reinforcement project of cement soil layer of a connected aisle of Fuzhou Metro Line 2. Field measurement was conducted of the temperature of the frozen saline and the soil temperature within the main influence scope of freezing during the active freezing period and maintenance freezing period. Through the analysis of monitoring data, the cooling law of frozen saline and soil body in the freezing process was obtained; the heat exchange process in each cooling stage was explored; the differences of cooling law of soil in different positions were summarized. The freezing effect is evaluated by calculating the intersection time, effective thickness and average temperature of the freezing wall. The feasibility of using artificial freezing method in cement soil layer is verified, which can provide reference for similar projects.

**Keywords:** connected aisles; cement soil; artificial freezing method; field test; temperature field

## 引言

人工冻结法是目前常用于地铁联络通道工程中的地层加固方法。其原理是利用人工制冷的方式, 将低温冷媒通过冻结管输入地层中, 使地层中的水冷却结冰, 从而提高地层的强度和弹性模量, 并通过冻结形成的杯型冻结帷幕将地下水与待开挖土体隔绝, 起到支护和止水的双重作用<sup>[1]</sup>。在

冻结施工过程中, 为了对冻结效果做出评价, 需对冷冻盐水及冻结影响范围内的土体温度进行监测, 通过分析监测数据获得冻结温度场的发展与分布规律, 推算出冻结壁的发展情况。

由于地下工程交叠以及地层加固工法交叉使用情况的日益普遍, 在水泥改良土地层中采用人工冻结法进行二次加固的情况已并不罕见<sup>[2]</sup>。部分工程采用冻结法加固的土体已非原状土, 而

收稿日期: 2020-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678153); 福州市科技计划项目(2018-G-42); 校企合作开发基金项目(GY-Z17145)

第一作者简介: 黄建华(1969—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士, 研究方向: 岩土与地下工程。

是临近地下工程预加固过的水泥改良土;部分工程为抑制土体的冻胀变形,在采用冻结法加固地层前,预先使用水泥搅拌桩对地层土质加以改良<sup>[3]</sup>。由于水泥改良提高了土体的初始温度,降低了土体的含水率,并改变了其矿物组成和热物理参数,因此水泥改良土地层和原状土地层中冻结温度场的发展与分布规律存在着明显差异。

目前中国对于冻结温度场的研究主要针对原状土地层<sup>[4-9]</sup>,部分学者对水泥改良土地层中的冻结特性进行了研究。王杰<sup>[10]</sup>利用数值模拟分析了盾构端头水泥改良土地层冻结温度场对各项土体参数变化的敏感性特征;胡俊等<sup>[11]</sup>介绍了水泥搅拌桩法与冻结法相结合的工法,并对该工法冻结过程土体温度场特性进行数值分析;王效宾等<sup>[12]</sup>运用 ADINA 软件模拟水泥改良土地层冻结壁的解冻过程,分析其解冻过程温度变化规律。可见目前水泥改良土地层冻结温度场研究多采用数值模拟的方式,现场实测分析较为少见。本文以福州地铁 2 号线某联络通道冻结工程为背景,通过对该工程的冷冻盐水温度及土体温度监测数据进行分析,总结了水泥改良土地层冻结温度场

的发展与分布规律,为类似工程提供参考和借鉴。

## 1 工程概况

### 1.1 工程与地质概况

福州地铁 2 号线某联络通道位于某主干道下方,通道埋深 20.0 m,总长 40.2 m。其左线位置上方为某机动车检测公司地块,右线位置上方为福州环城高速辅道边部,均为交通繁忙地段,对施工产生的地表及周边建筑变形控制要求严格。

联络通道所处地层自上而下的分布情况为:杂填土、淤泥、黏土、淤泥质土夹薄层砂(泥质)中砂和强风化花岗岩。各地层主要物理力学参数如表 1 所示。联络通道主体大部分位于淤泥质土夹薄层砂中,该地层透水性较弱但含水率较高,强度较低且压缩性较高,在此地层进行联络通道开挖易发生失稳、塌方等事故,且容易引起较大的地表和周边建筑变形;联络通道下部部分位于(泥质)中砂中,该地层透水性强且水压高,易出现流砂和突、涌水现象。因此在联络通道开挖前,需对其开挖断面周边一定范围内的土体进行加固,以保证工程的安全进行。

表 1 地层主要物理力学参数表

Tab.1 Main physical and mechanical parameters of the strata

地层	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	压缩模量/ MPa	渗透系数/ ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )	结冰温度/ $^{\circ}\text{C}$
杂填土	18.5	6.0	18.0	7.00	8.64	1.18	-1.1
黏土	18.5	37.0	15.0	4.67	0.05	1.45	-1.6
淤泥	16.0	10.5	5.5	1.88	$2.67 \times 10^{-2}$	1.56	-1.8
(泥质)中砂	19.0	3.0	32.0	9.00	10.00	1.08	-0.9
淤泥质土夹薄层砂	17.1	19.7	11.5	3.01	0.20	1.32	-1.3
强风化花岗岩	21.5	30.0	30.0	22.00	0.80	0.92	-0.6

### 1.2 地层加固方案

本工程在初期采用水泥搅拌桩法加固地层,搅拌桩桩径 850 mm,桩间距 660 mm;加固范围为纵向至盾构管片外 1 m,横向至联络通道结构外 3 m,竖向自联络通道上 3 m 至泵房下 2 m。由于福州地区位于滨海软粘土地层,地下水量丰富且处于流动状态,喷入土体中的水泥易被地下水带走,导致水泥搅拌桩的成桩效果受到影响。在对水泥搅拌桩加固效果进行探孔监测时,出现了出水出

砂现象,说明该加固未达预期效果,无法满足工程的稳定性和止水性要求,遂改用人工冻结法进行二次加固。

由于该联络通道长度较大,拟采用隧道内水平双向冻结的方式加固待开挖土体,即分别在左右线盾构隧道中安设冻结管,将联络通道外围土体冻结形成具有一定强度、稳定性和止水性的冻结壁。工程设计积极冻结期为 65 d,要求冻结壁的交圈时间不大于 35 d,积极冻结期末冻结壁厚

度在喇叭口处不小于 1.8 m,在通道正常段及泵站处不小于 2.1 m,冻结壁平均温度不低于  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为使积极冻结期末冻结壁的各项参数满足设计要求,在左右线隧道中近似对称布设 178 个冻结孔,总开孔深度达 2 510 m。

## 2 冻结温度场监测方案

冻结温度场是一个随时间变化的动态温度场,其发展受到各种环境及施工条件的影响,在工程中需通过实时监测以了解冻结温度场的发展情况。冷冻盐水温度和冻结影响范围内的土体温度是冻结工程的两个重要监测指标,从中可获得盐水管路的循环状况和冻结壁的发展情况,对冻结施工作出及时的评价与调整。

### 2.1 冷冻盐水温度监测方案

在冻结过程中,为确保冷冻盐水按冻结计划降温,各管路盐水循环顺畅,未发生堵塞、漏液、空泡等现象,待盐水管路铺设完成后,在去、回路盐水干管及各组串联冻结管上安设热电偶传感器,测量干管去、回路盐水温度及各组串联冻结管回路盐水温度。盐水温度数据由系统自动测量,自动记录。

### 2.2 土体温度监测方案

为及时掌握冻结壁的发展状况,在冻结壁发展范围内部及周边布设测温孔对土体温度进行监测,并根据监测结果推算出冻结壁的发展情况。本工程于左右线隧道中近似对称布置 22 个测温孔,其中右线测温孔布置如图 1 所示。各测温孔入土深度均为 20 m 左右,为获得冻结温度场的空间分布规律,在测温孔入土 0.5、5.0、12.0、20.0 m 处分别设置一个温度测点,温度测点编号根据入土深度由浅至深编为  $W_{i-1} \sim W_{i-4}$  号。

## 3 冷冻盐水温度监测结果分析

工程于水泥搅拌桩加固地层 8 个月后正式开机冻结,积极冻结 66 d 后进行开挖作业,开挖过程中保持维护冻结,联络通道开挖及支护完成后 10 d 停止冻结,历时 105 d。

从图 2、3 可见,冷冻盐水的降温过程大致可以分为 4 个阶段:

(1) 第 1 阶段为开机冻结前 7 d,去路盐水温度从  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  快速下降至  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降温速率约为  $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ,去回路盐水温差稳定在  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。

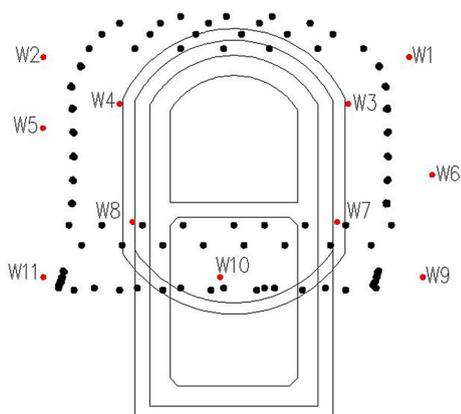


图 1 右线测温孔布置图

Fig.1 Layout of thermometric holes in the right line

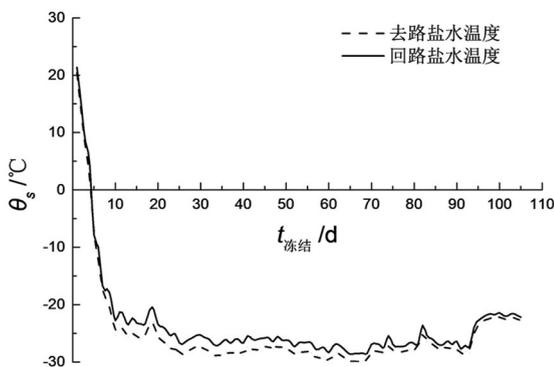


图 2 干管去回路盐水温度图

Fig.2 Temperature of saline water in the main pipe

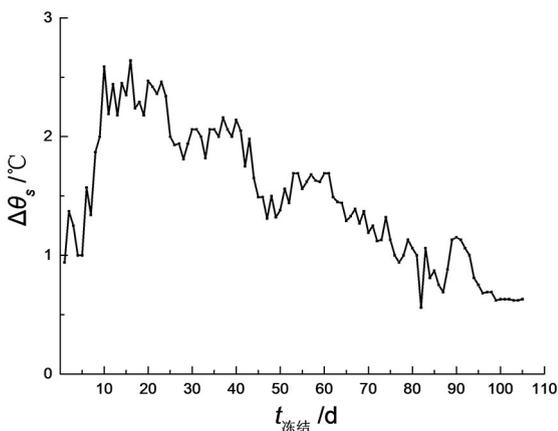


图 3 干管去回路盐水温差

Fig.3 Temperature difference of saline water in the main pipe

(2) 第 2 阶段为开机 8~25 d,去路盐水温度从  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  降至  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降温速率明显减缓。这是由于此阶段盐水温度较低,继续降温所需的能量

增大,但冷冻机组仍保持恒定功率。去回路盐水温差升至  $2\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这是因为此时冻结管周围土体逐渐冻结,土中水在相变阶段释放潜热,使冷冻盐水的吸热量提高。此阶段末,冻结管周一定范围内的土体已经冻结,相邻冻结管周的冻结柱逐渐开始交圈。

(3)第 3 阶段为开机 26~45 d,去路盐水温度和去回路盐水温差分别稳定在  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。此时各冻结管周冻结壁的交圈范围不断扩大,已初步形成具有一定支护和止水能力的冻结壁。

(4)第 4 阶段为开机 45 d 至停止冻结,去路盐水温度依然保持在  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右(开挖及支护完成后升至  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。去回路盐水温差不断下降,至积极冻结期末,去回路盐水温差已降至  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,满足开挖前去回路盐水温差小于  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  的设计要求;维护冻结期间,去回路盐水温差最终稳定在  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。此阶段冻结壁继续吸收冷冻盐水的冷量,厚度不断增大,均匀性不断提高,具有一定厚度和均匀性的冻结壁阻碍了冷冻盐水与外围未冻土体间的热量交换,使冷冻盐水的吸热量逐渐减小,因此该阶段去回路盐水温差不断减小并最终趋于稳定。

## 4 土体温度监测结果分析

由于该工程左右线冻结管和测温孔近似对称布置,根据对称性选取右线位于联络通道断面右侧的 W1、W3、W6、W7 测温孔进行分析,以得到土体冻结温度场的时间变化规律和空间分布规律。由于在施工过程中遭到破坏,部分测温孔中的 4 号测点未获得测温数据。各测温孔测点温度随时间变化如图 4 所示。

### 4.1 土体冻结温度场时间变化规律

由图 4 可见,各测温孔测点温度随时间变化大致可分为 4 个阶段:

(1)第 1 阶段为冻结初期土体温度快速下降阶段。由于本工程采用水泥搅拌桩法预加固地层,水泥在水化过程中释放大量热量,使冻结前的初始地温较高,各测点处土体初始温度最高接近  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在冻结初期,冷冻盐水温度从  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  迅速降至负温,冻结管与测点处土体间的温差巨大,热交换剧烈,测点处土体从冻结管吸收大量冷量,温度迅速下降。

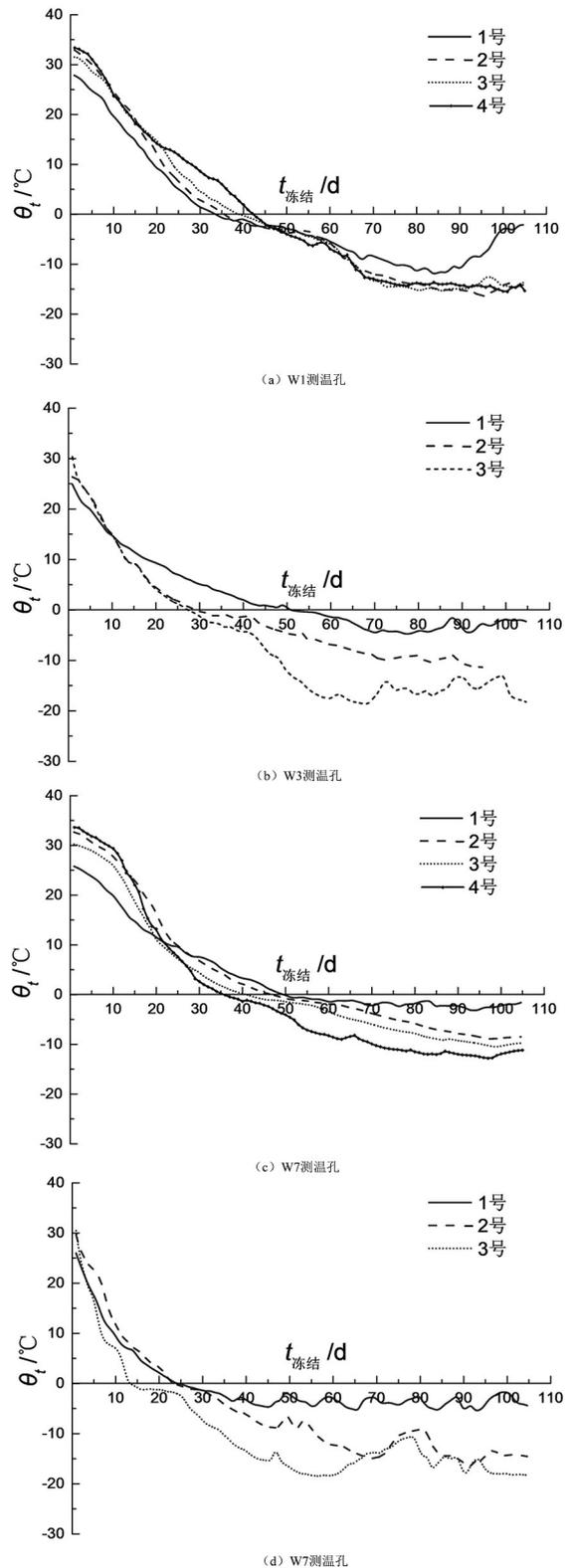


图 4 测温孔测点温度曲线图

Fig.4 Temperature of measuring points of thermometric holes

(2)第2阶段为相变阶段。此阶段持续时间较短,测点温度变化曲线较为平缓,土体降温速度明显减小,进入降温平台期。这是由于此阶段测点处土体的温度已降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,逐渐进入相变阶段。测点周围的土中水在相变过程中释放大量的潜热,抵消了土体从冻结管吸收的部分冷量,减缓了土体的降温过程。此阶段末,冻结壁已发展至测点所在位置,可通过测点与最近冻结管的水平距离对冻结壁发展情况作出判断。

(3)第3阶段为冻土负温迅速下降阶段。此阶段测点处土体已经冻结,冻结管周围已形成具有一定厚度的冻结壁,但此时冻结壁的平均温度较高,测点处的冻土与冻结管间的温差仍然较大,热量交换依然剧烈,测点处冻土继续吸收冻结管所提供的冷量,温度不断降低;冻结管周的冻结壁也继续向外发展,厚度不断增大,平均温度不断降低。

(4)第4阶段为土体降温趋势趋于平稳阶段。此阶段测点温度已无明显下降。这是由于此阶段冻结壁的平均温度较低、厚度较大,冻结管所提供的冷量已无法使冻结壁继续发展,冻结管、冻结壁有效厚度范围内的冻土以及冻结壁有效厚度外的未冻土三者间的热量交换达到平衡状态,使测点处土体的降温趋势减缓并趋于平稳。由图4(b)、(d)可见,部分测点的温度在此阶段出现了一定幅度的波动,这是因为此阶段进行联络通道的开挖与支护,开挖时对土体的扰动、联络通道内空气与周围土体的对流换热以及支护过程中混凝土产生的水化热均会对冻结温度场产生影响。

综上所述,由于各测温孔测点的位置、周围冻结管排列密度和与冻结管间距离均存在一定差异,导致不同测点各降温阶段的持续时间、降温幅度和速度不尽相同。但总体而言,土体降温阶段的划分及各阶段的降温特点均可与上文冷冻盐水降温的4个阶段相对应,说明冷冻盐水的质量对冻结效果的影响十分显著,在工程中应严格保证冷冻盐水的降温速度和最终温度满足设计要求。

#### 4.2 土体冻结温度场空间分布规律

冻结温度场是一个包含移动边界的动态温度场,不但会随时间变化,空间中不同位置处冻结温度场的发展与分布情况也存在着差异。为获得冻结温度场的空间分布规律,对不同钻孔位置及不同入土深度的测温孔测点温度数据进行对比

分析。

选取与最近冻结管距离相近的W1、W3测温孔进行分析。对比图4(a)、(b)可得,与位于冻结管布置圈外侧的W1测温孔相比,位于冻结管布置圈内侧的W3测温孔在积极冻结阶段降温速度更快,相变过程持续时间更短,整体温度变化梯度更大,积极冻结期末所达到的温度更低,即冻结管布置圈内侧土体的冻结效果要优于冻结管布置圈外侧;但在维护冻结阶段,其温度曲线的波动也更为明显。这主要是由于冻结管布置圈外侧的未冻土体范围要远大于内侧,在冻结过程中,冻结管布置圈外侧广阔的未冻土体将消耗大量冷量,造成能量损失,降低了外侧测温孔的降温速度和积极冻结期末的温度绝对值,延长了相变过程的持续时间。此外,由于冻结管布置圈内侧的测温孔离联络通道外轮廓线更近,且维护冻结阶段是联络通道的开挖与支护阶段,在开挖及支护过程中产生的土体扰动、空气与土体对流换热以及混凝土水化热对其温度产生的影响更为显著,因此其温度在维护冻结阶段的波动更为明显。

对比图4中各测温孔不同入土深度测点的温度曲线可见,各测温孔入土深度较浅的1号测点的初始温度要低于2、3、4号测点;在冻结初期,各测点降温速度较为接近,但随着冻结时间的推移,1号测点的降温速度逐渐减慢,在维护冻结阶段,其温度要明显高于2、3、4号测点,且温度波动更为明显。这是由于本工程初期采用水泥搅拌桩法加固地层,水泥水化热的释放使加固区内部土体的初始温度达到 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;此时主隧道内空气温度约为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,1号测点入土深度较浅,距离隧道管片较近,其与隧道内空气的热交换将其初始温度降至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。在冻结初期,1号测点温度仍高于隧道内空气温度,隧道内空气与冻结管共同吸收其热量,对1号测点的初期冻结效果起到促进作用。而随着冻结时间的推移,1号测点温度逐渐低于隧道内空气温度,两者间的热交换将消耗冻结管提供的冷量,使1号测点的降温速度减慢,导致其维护冻结阶段温度明显高于2、3、4号测点。因此,有必要在冻结管钻孔管片及其两侧一定范围内的隧道管片上设置保温措施,以减小土体与隧道内空气热交换对冻结效果的影响。此外,由于测温孔的倾斜布置,与2、3、4号测点相比,1号测点距联络通道外轮廓更近,其温度更容

易受到联络通道开挖及支护的影响,因此在维护冻结阶段其温度波动较 2~4 号测点更为明显。

## 5 冻结壁发展情况计算分析

### 5.1 冻结壁发展速度与交圈时间计算

冻结壁发展速度和交圈时间是判断初期冻结质量的重要参数。根据传热不利原则,选择冻结管布置圈外侧 W1、W6 测温孔的 1、2 号测点作为喇叭口段及正常段分析点。其中 W6-1 号测点距最近冻结管 910 mm,冻结 56 d 时温度降至  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可推算冻结壁平均发展速度为  $16.3\text{ mm/d}$ ;此处相邻冻结管间距为 480 mm,以相邻冻结管间距除以两倍冻结壁平均发展速度,推算冻结壁交圈时间为 15 d。各分析点的计算结果如表 2 所示,可见各分析点的计算结果较小,各处冻结壁交圈时间均满足不大于 35 d 的设计要求,说明在冻结初期冻结壁的发展较为均匀,初期冻结效果良好。

表 2 冻结壁发展速度与交圈时间计算表

Tab.2 Development speed and intersection time of freezing wall

测点编号	测点位置	冻结壁发展速度/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	冻结壁交圈时间/d
W1-1	喇叭口	17.2	14
W6-1	喇叭口	16.3	15
W1-2	正常段	18.1	15
W6-2	正常段	17.9	14

### 5.2 冻结壁有效厚度计算

冻结壁需达到一定厚度,方可满足工程对于冻结支护的稳定性和止水性要求。选取与上节相同分析点,利用单管冻结柱半径公式计算单管冻结圆柱半径<sup>[13]</sup>,并依此推算出冻结壁的有效厚度。各分析点计算结果如表 3 所示,可见至积极冻结期末,冻结壁有效厚度在喇叭口处达到 2.47 m,在正常段达到 2.63 m,均满足设计要求(喇叭口处 1.90 m;正常段 2.10 m)。相同测温孔中不同入土深度测点处及不同测温孔中入土深度相同测点处的冻结壁有效厚度均较为相近,可见冻结壁在冻结管径向和轴向上的分布较为均匀,冻结效果良好。

表 3 积极冻结期末冻结壁有效厚度计算表

Tab.3 Effective thickness of frozen wall at the end of the active freezing period

测点编号	测点位置	冻结柱半径/m	冻结壁有效厚度/m
W1-1	喇叭口	1.38	2.62
W6-1	喇叭口	1.31	2.47
W1-2	正常段	1.42	2.69
W6-2	正常段	1.39	2.63

### 5.2 冻结壁平均温度计算

土体的各项力学参数会随着土体温度而变化,工程中常通过冻土的平均温度判断其强度,因此冻结壁有效厚度内的平均温度是评判冻结效果的重要指标。选取温度下降较慢的 W6-1 号测点,运用直线排管冻结壁平均温度计算公式进行计算<sup>[14]</sup>,可得积极冻结期末冻结壁有效厚度内平均温度达  $-12.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,已满足  $\leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  的设计要求。

## 6 结论

通过对福州地铁二号线某联络通道冻结工程进行实测研究,得到了冻结过程中冷冻盐水与土体的降温规律,分析了不同钻孔位置及不同入土深度测点处的冻结温度场发展与分布规律差异,并通过计算冻结壁交圈时间、厚度和平均温度对该工程的冻结效果做出了评价。得到主要结论如下:

1) 冷冻盐水的降温过程可分为 4 个阶段。冻结初期,盐水温度快速下降,但去回路盐水温差较小;相变阶段,由于土中水相变潜热的释放,去回路盐水温差发生突增;相变完成后,去回路盐水温差开始回落;维护冻结阶段,由于形成冻结壁的质量良好,隔断了未冻土体与冻结管间的热交换路径,去回路盐水温差十分微小。

2) 受水泥水化热影响,土体的初始温度较高,各测点初始温度最高可达  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;冻结初期,由于土体与冷冻盐水温差巨大,土体温度下降迅速;当土体温度下降至  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下时,降温速度发生突减,出现了明显的相变阶段;相变完成后,土体温度继续快速下降;维护冻结阶段,由于联络通道主体开挖及支护的影响,部分测点温度出现了较为

明显的波动。

3) 土体降温阶段的划分及各阶段降温特点可与冷冻盐水的降温阶段一一对应,说明冷冻盐水质量对土体冻结效果的影响较为显著,在工程中应严格保证冷冻盐水的降温速度和最终温度满足设计要求。

4) 与冻结管布置圈外侧土体相比,内侧土体的降温速度更快,积极冻结期末所述温度更低;但在维护冻结期间,其温度受联络通道施工的影响更为显著,温度波动更为明显。

5) 水泥水化热使土体的初始温度高于主隧

道内空气温度,由于与隧道内空气进行对流换热,入土深度较浅的1号测点的初始温度较低;当其温度下降至15℃左右时,其降温速度开始减慢;维护冻结阶段,其温度明显高于同一测温孔中的其它测点。

6) 由各分析点处参数计算所得的冻结壁交圈时间、有效厚度和平均温度均满足设计要求,各分析点处的冻结壁交圈时间和有效厚度均较为相近,说明冻结壁的发展较为均匀,整体冻结效果良好。

## 参考文献:

- [1] 陈湘生. 地层冻结法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 1.
- [2] 王杰. 盾构进出洞水泥土加固后水平冻结温度场研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [3] 谭丽华. 水泥改良土冻胀融沉特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [4] 王鹏, 林斌, 侯海杰, 等. 某矿副井冻结壁温度场发展规律研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(8): 214-217.
- [5] 李栋伟, 周艳, 靳鹏伟, 等. 深部高承压水地层裂隙岩体冻结温度场实测研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 140-144.
- [6] 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): 167-173, 180.
- [7] 宗翔. 多圈管分期冻结施工法温度场现场实测与分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1179-1183.
- [8] 任建喜, 孙杰龙, 张琨, 等. 富水砂层斜井冻结壁力学特性及温度场研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1405-1412.
- [9] 陈军浩, 汪仁和. 多圈管冻结下冻结壁温度场融化特性的实测研究[J]. 中国煤炭, 2009, 35(12): 48-50.
- [10] 王杰, 杨平, 张翔宇, 等. 水平冻结水泥土加固盾构洞门温度场敏感性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 145-151.
- [11] 胡俊, 刘勇, 李玉萍. 冻结水泥土搅拌桩温度场数值分析[J]. 森林工程, 2015, 31(5): 118-123.
- [12] 王效宾, 胡俊, 居俊. 水泥改良土杯型冻土壁融化温度场三维数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 102-106, 111.
- [13] 胡向东, 白楠, 余锋. 单排管冻结温度场 ТРУПАК 和 БАХОЛДИН 公式的适用性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 906-910.
- [14] 胡向东, 郭晓东. 直线排管冻结冻土帷幕平均温度通用公式[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 850-857.
- [15] ALZOUBI M A, MADISEH A, HASSANI F P, et al. Heat transfer analysis in artificial ground freezing under high seepage: validation and heatlines visualization[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 139(2): 232-245.

(责任编辑: 方素华)