

# 多排管局部冻结冻土壁温度场特性

肖朝昫<sup>1,2</sup>, 胡向东<sup>1,2</sup>, 张庆贺<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 上海地铁一区间隧道因施工联络通道发生工程事故导致隧道坍塌, 修复工程中部分采用四排局部垂直冻结形成冻土墙, 用于抵挡水土压力和嵌固完好隧道。针对冻结深度深以及冻结土层为扰动的粉质黏土、砂质粉土并承受较高承压水头这些特点, 工程中对冻结壁温度场发展进行实时监测。从冻结深度、厚度方向上分析多排局部冻结排内和排外温度发展特征, 并分析计算出积极冻结期排内冻土壁交圈时间、发展速度。鉴于目前计算冻土帷幕厚度公式并不适用于计算多排管冻结, 引入双排管计算公式, 并利用作图法推导出平均温度计算公式。利用这2个公式, 分析多排局部冻结冻土壁特征, 计算出积极冻结期结束时冻土壁厚度和平均温度, 以及整个冻结期排外冻土壁单侧发展厚度和发展速度。

**关键词:** 土力学; 多排冻结管; 局部冻结; 温度场; 双排管计算公式; 平均温度; 监测

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增1 - 2694 - 07

## CHARACTERS OF TEMPERATURE FIELD IN FROZEN SOIL WALL WITH MULTIROW FREEZE-TUBES AND LIMITED DEPTH FREEZING

XIAO Zhaoyun<sup>1,2</sup>, HU Xiangdong<sup>1,2</sup>, ZHANG Qinghe<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** An interval shield tunnel in Shanghai encountered tunnel lining collapse due to construction of the cross-passage. The limited depth freezing method with four rows of freeze-tubes placed in vertical holes drilled from the surface was applied as an aid to recover the collapse tunnel to form a frozen soil wall, which was used to resist the soil and water pressure and fix the undamaged tunnel lining between the undamaged tunnel and the collapsed tunnel. Due to the frozen soil containing disturbed sands and silts subjected to high groundwater pressures, the in-situ monitor of the development and changing features of the temperature field in the frozen soil wall was applied to supervise the construction. By analyzing the monitored data, the differences of the temperature fields inside and outside of the rows of the freeze-tubes are discussed in two ways, from vertical and horizontal directions, respectively. The time of frozen soil wall closure and the velocity of the growth are calculated during the primary freeze period. In view of the fact that the present formula to calculate the frozen curtain thickness and the average temperature are not applicable to calculate the multi-row freezing; the double-row formula is introduced, and an average temperature formula by graphing method is deduced for the first time. By these two formulas, the characters of the temperature field in the frozen soil wall are analyzed. The thickness and the average

**收稿日期:** 2006 - 07 - 24; **修回日期:** 2006 - 09 - 26

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50578120)

**作者简介:** 肖朝昫(1979 - ), 男, 2000年毕业于南昌大学土木工程系工业与民用建筑专业, 现为博士研究生, 主要从事盾构隧道特殊工法设计、施工方面技术等方面的研究工作。E-mail: 0410020051@smail.tongji.edu.cn

temperature of the frozen soil wall are calculated at the end of the primary freeze period. The single side thickness and the growth velocity of the frozen soil wall are also calculated during the freezing period.

**Key words:** soil mechanics; multirow freeze-tubes; limited depth freezing; temperature field; double-row formula; average temperature; monitor

## 1 引言

人工冻结技术把天然的岩土冻结形成较高强度、不透水的冻土帷幕, 作为临时支撑结构广泛应用矿山竖井、城市地下空间开发等工程中<sup>[1~7]</sup>。其中采用多排冻结孔直线形布置方法, 形成直墙式冻土壁, 则常应用于盾构进出洞<sup>[4]</sup>、深基坑支护<sup>[5, 6]</sup>工中。这些工程中, 冻土壁形成快慢, 决定了冻土壁厚度、平均温度。而这些指标是反映冻土壁强度和稳定性的重要参数, 直接关系到工程施工的速度与成败。由于多排冻结孔冻结下形成的冻土壁温度场不仅受到同排相邻冻结管的影响, 同时也受到邻排冻结管的影响, 使得冻土壁温度场十分复杂<sup>[8]</sup>, 因此对多排冻结管冻结冻土壁形状、发展速度、冻土壁厚度、平均温度等冻土壁温度场特征进行深入研究具有十分重要的现实意义。

本文针对上海地铁采用四排孔局部冻结修复工程, 对其冻土壁温度场变化规律进行全过程实测研究。根据实测数据, 从冻结深度方向上、厚度方向上分析群孔冻结排内和排外温度发展特征。分析积极冻结期排内冻土壁交圈时间、发展速度。对于如何计算多排冻结管冻土帷幕发展厚度及其平均温度, 国内尚无实用公式对其进行计算, 还一直沿用矿井建设中计算单圈冻结管温度场发展速度和平均温度计算公式<sup>[9, 10]</sup>。本文首次引入双排管计算冻土帷幕发展厚度公式<sup>[11]</sup>, 并利用作图法推导出简化平均温度计算公式, 计算出积极冻结期结束时冻土壁厚度和平均温度, 以及整个冻结期排外冻土壁单侧发展厚度和发展速度, 得出了一些有意义的结论。

## 2 工程和监测概况

### 2.1 工程概况

该工程发生事故后, 上、下行线两条隧道部分坍塌, 因此在修复工程中, 在隧道内充填砂浆, 隧

道内充填物和隧道外土体冻结后形成一道封水挡土冻土壁, 用以隔绝完好隧道与已破坏段隧道之间的联系。将来在完好隧道一侧清淤排水后, 在隧道内浇筑混凝土止水墙, 冻结停止。设计冻土壁厚度为 6 m, 冻结深度 14 m, 宽度 24.5 m。冻结的土体主要是上海⑥层暗绿色草黄色粉质黏土和⑦<sub>1</sub>层草黄色砂质粉土。采用局部冻结, 冻结管在冻土上边界用隔板隔开。共布置 4 排冻结孔, 排与排的间距 1.5 m, 排内冻结管间距由于现场施工条件限制, 间距为 0.4~1.3 m, 总冻结孔数 100 个。冻结深度为-26.2~-40.2 m, 积极冻结期盐水温度为-28 °C~-32 °C。由于该冻土壁设计冻结时间长, 距离将来明挖的深基坑较近, 因此, 在离第 1 排冻结孔 2.15 m 处设置 1 排热水循环孔, 在必要时开启热盐水循环以控制冻土发展到基坑地下连续墙处。冻结孔和测温孔平面布置见图 1。

### 2.2 监测概况

在盐水干管上和各组冻结管布置盐水去回路温度传感器, 在冻结范围内不同位置共布置 15 个测温孔, 每个测温孔布置 7~11 个传感器, 测孔内传感器具体位置见图 2。C2, C3, C5, C6, C7 为热水循环孔区测温孔。冻结区内共布置 10 个测孔, 4 排冻结孔内布置了 3 个测孔, 分别为 C9, C10, C14, 布置 2 排冻结孔之间。4 排孔外布置 7 个测孔, 分别为 C8, C11, C12, C13, C15, C17, C18。C8 测孔在地下连续墙一侧, 离第 1 排冻结孔轴线距离为 800 mm。C11, C15 测孔离第 4 排冻结孔轴线距离为 250 mm, 布置在上、下行线范围内, 最靠近将来排水清淤后浇注的混凝土止水墙一侧, 能反映出隧道内排水清淤和混凝土水化热对冻土帷幕温度的影响, 保障隧道内清淤排水时施工安全。C12, C13 测孔分布在南北两侧, C12 测孔离最近冻结孔 D1-1 距离为 1 300 mm, C13 测孔离最近一个冻结孔 D2-26 距离为 900 mm, 监测冻土帷幕朝南北两侧的发展情况。C17, C18 测孔在黄浦江一侧, 离第 4 排冻结孔轴线距离为 1 500 mm, 监测冻土帷幕朝黄浦江一侧发展, 并且与 C8 进行对比。

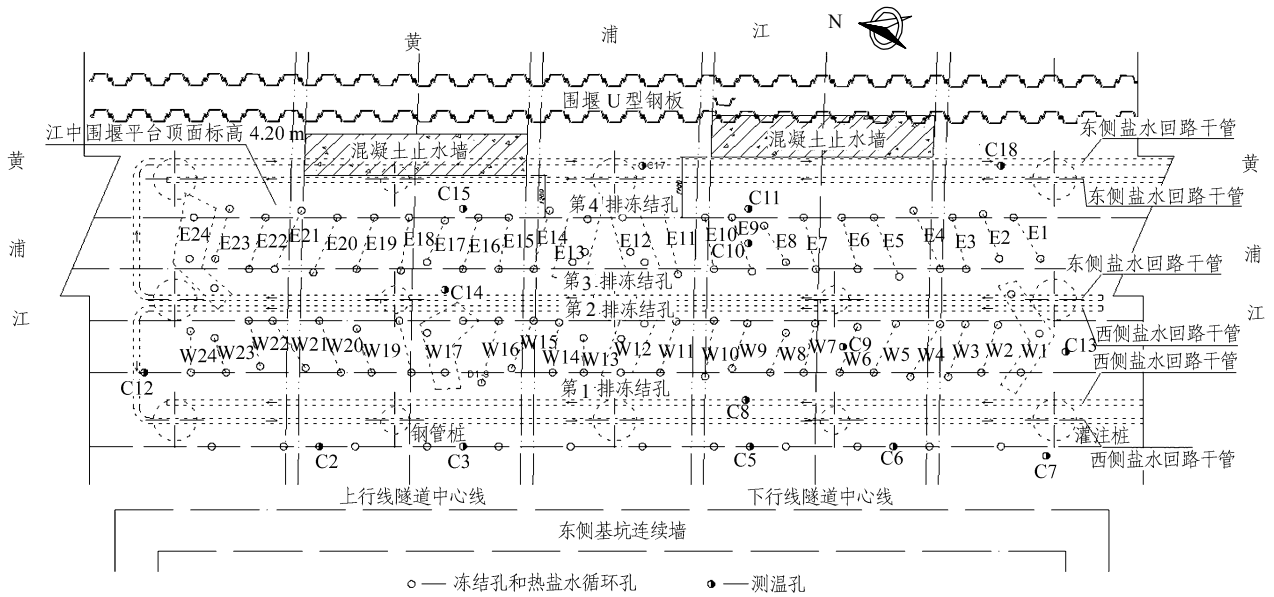


图 1 冻结孔和测温孔平面布置图

Fig.1 Plan layout of freeze-tubes and observation holes for measuring temperature

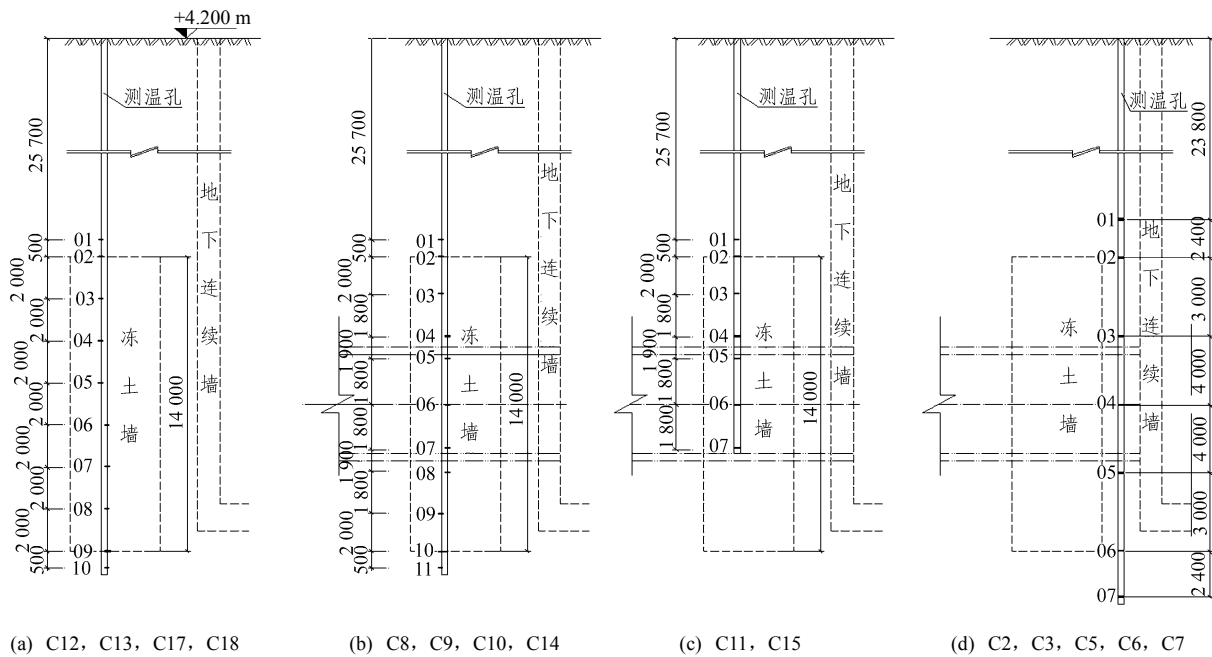


图 2 测孔内各测点布置图(单位: mm)

Fig.2 Layout of temperature sensors in the observation holes(unit: mm)

### 3 多排局部冻结现场监测分析

冻结工程从 2005 年 6 月 5 日开机冻结, 冻结时间 168 d。积极冻结期盐水温度快速下降, 冻结 4 d, 干管去路温度降至  $-22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。积极冻结期共持续 57 d, 干管温度进路平均维持在  $-30.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 平均温差为  $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。维护冻结期干管进路温度平均

维持在  $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 平均温差为  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本节从冻结深度方向上、厚度方向上分析多排冻结管局部冻结排内和排外温度发展特征。

#### 3.1 冻土壁冻结深度方向上温度随时间变化规律

局部冻结深度为 14 m, 在冻结深度方向上, 冻土壁中部 10 m 范围内温度下降趋势相同, 而在冻土壁上、下部各 2 m 范围内, 温度下降趋势差异明显。图 3 所示为 C9 测孔内各测点温度随时间变化

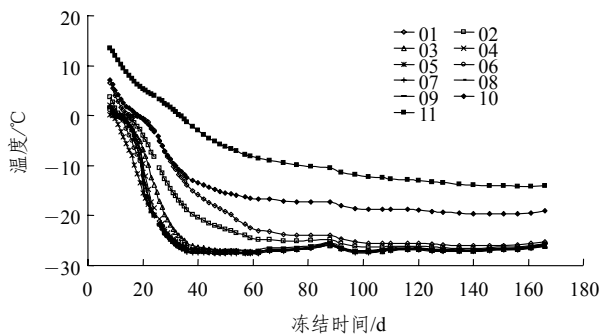


图 3 C9 测孔内各测点温度随冻结时间变化曲线  
Fig.3 Temperature vs. freeze time of observation hole C9

曲线, C10, C14 测孔情况类似。测孔内各测点深度位置见图 2(b)。分析测点 03~09 共计 10 m 范围内温度曲线。根据冻土试验报告<sup>[12]</sup>, 试验土层的冻结温度为  $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冻结 16 d 左右可以看到曲线上一明显的温度拐点。此时温度  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 在相变温度附近, 说明此时排与排冻土已交圈。冻土交圈后温度基本呈线性下降, 降温达  $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。冻结 34 d, 冻土壁温度不再下降, 温度接近  $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

在冻土壁上部测点 02, 03 范围内和下部测点 09, 10 范围内, 与中部测点比较差异明显, 其中上部和下部又有较大差异(见图 3), 测点 02, 10 温度随冻结时间变化曲线。测点 01 和 11 分别在设计冻土墙边界外, 距离上下边界 500 mm, 其温度曲线差异同样明显, 上部温度下降比下部快。这与冻结管局部冻结有关, 冻结管上部尽管有隔板隔开, 由于没有在冻结管空腔内采取隔热措施, 局部冻结范围以上冻结管进路和回路冷盐水经冻结管空腔内空气将冷源传递至土中, 根据后来埋设分层沉降孔钻孔发现, 在冻土上边界以上土体还存在较大范围冻土。因此, 在今后采用局部冻结的工程中, 空腔内需采取隔热措施, 减少设计范围外的冻土, 有利于控制融沉。

### 3.2 冻土壁冻结厚度方向上温度随时间变化规律

如节 3.1 所述, 多排管冻结的冻土墙中部特点是温度呈线性快速下降后, 直接进入稳定阶段, 冻土温度较低。设计冻土壁厚为 6 m, 4 排冻结孔排间距为 1.5 m, 冻土壁在厚度方向上冻结厚度在何时达到设计要求, 基本由冻土帷幕向两侧发展速度决定, 这也同时决定了积极冻结期结束时间。

图 4 选取 C5, C8, C9, C14, C10, C11, C17 测孔在冻土墙中部温度随冻结时间变化曲线, 图标中测孔后面括号内数值为各测孔离最近一排冻结管

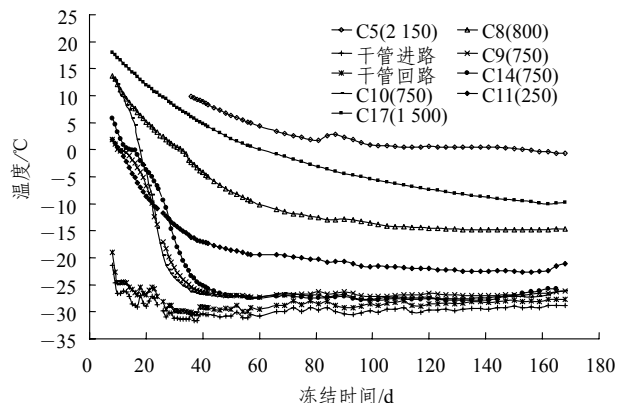


图 4 冻土墙中部各测点温度随冻结时间变化曲线  
Fig.4 Relationship between temperature and the freeze time in the middle of the frozen soil wall

距离(mm)。图 5 所示为上述测点温度值与 4 排冻结孔当天盐水温度连成的空间曲线。以第 1 排冻结孔为坐标原点, 各个测孔和各排冻结孔离第 1 排冻结孔距离为横坐标, 图中横线表示结冰温度。

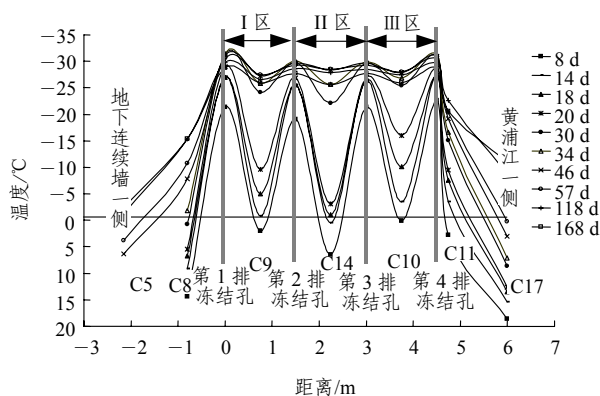


图 5 冻土壁中部温度场特征  
Fig.5 Temperature field characteristics in the middle of the frozen soil wall

冻土壁在冻结厚度方向上温度发展分排内和排外两种情况。由于 C9, C10, C14 测孔均布置在排与排冻结管之间, 只要这些测孔内测点温度降低至结冰温度, 即可判定这个区域内冻土壁交圈。如图 5 所示, 排内不同区域交圈时间不一致, 排内交圈最慢的区域位于 II 区, 冻结 18 d 左右, C14 周围的土体刚刚达到结冰温度, 此时 C9, C10 温度达  $-5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于 II 区第 2, 3 排冻结管均位于东、西 2 组盐水去回路的回路位置(见图 1), 盐水温度都比去路冻结管高, 因此 II 区土体降温比 I 区和 III 区慢。排内各区域不同部位冻土帷幕交圈时间和交圈前冻

土帷幕发展速度见表 1。由图 5 排内冻土温度曲线还可知，在冻结 34 d 以后，冻土壁中部温度曲线基本拉平，冻土温度接近盐水温度，土体温度与盐水去路温差在 4 °C 以内。

表 1 4 排孔内冻土帷幕交圈时间与发展速度表  
Table 1 Time of frozen soil wall closure and the growth velocity of the frozen soil inside the four rows of freeze tubes

所处截面位置	I 区		II 区		III 区	
	交圈时间/d	发展速度/(mm·d <sup>-1</sup> )	交圈时间/d	发展速度/(mm·d <sup>-1</sup> )	交圈时间/d	发展速度/(mm·d <sup>-1</sup> )
上部 2 m	19	39	23	32	22	34
中部 10 m	16	46	19	37	14	53
下部 2 m	23	32	25	30	22	34

分析比较图 4 排内和排外测孔温度曲线，曲线差异明显，排内温度下降迅速，排外冻土温度下降速度与距离成反比，距离冻结管越远，温度下降越缓慢。C8 测孔距离最近冻结管 800 mm，在经历温度缓慢下降后保持不变，积极冻结期 57 d 后，其温度值为 -10.75 °C，说明此时冻土壁厚度已经超过了 800 mm。C17 测孔距离最近冻结管 1 500 mm，在整个冻结期温度一直处于下降过程，并且越到后期，发展越缓慢。冻结结束，C17 测孔温度为 -9.8 °C，说明此时冻结壁单侧厚度大于 1 500 mm。由图 5 还可知，冻结 34 d，C8 测孔附近的土体温度已经接近土体结冰温度，冻土墙中部冻土帷幕已经发展到 C8 测孔附近，因此可判断此时冻土墙中部在厚度达到设计要求。但由表 1 数据可知，冻土墙上部和下部分别各 2 m 范围内土体温度下降速度比中部慢，根据计算(见节 4)，冻结 57 d 冻土墙上部和下部分别才达到设计厚度，此时冻土墙中部已超出设计要求。

### 4 多排局部冻结温度场特征分析

目前矿井建设中计算冻土帷幕向外扩展的速度常采用建井工程手册<sup>[10]</sup>上推荐的公式，但公式推导是先求一个冻结管所形成的冻结柱的温度场，再推广到冻结圆筒<sup>[9]</sup>。但如汪仁和和曹荣斌<sup>[8]</sup>分析，由于温度场的叠加效应，上述公式用来计算多排冻结其冻土壁发展速度等并不适用。本文首次采用前苏联双排管冻土帷幕厚度计算公式<sup>[11]</sup>，如图 6 所示，在冻土帷幕交圈后，只需要确定冻结管内盐水温度和

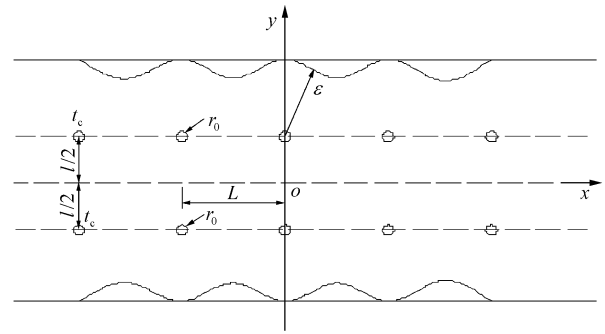


图 6 双排管公式示意图  
Fig.6 Schematic plan of double-row formula

测温孔内计算截面温度，利用双排管公式可计算出冻土帷幕向外发展的厚度。双排管公式简述如下：

$$\epsilon = \frac{L}{2\pi} \frac{\frac{\pi l}{L} t_c - t_c K - t_{xy} \ln \frac{L}{2\pi r_0}}{t_{xy} - t_c} \quad (1)$$

其中，

$$K = \frac{1}{2} \ln \left\{ 4 \left[ \operatorname{ch} \frac{2\pi \left( \frac{l}{2} - y \right)}{l} - \cos \frac{2\pi x}{L} \right] \left[ \operatorname{ch} \frac{2\pi \left( \frac{l}{2} + y \right)}{l} - \cos \frac{2\pi x}{L} \right] \right\}$$

式中：\$\epsilon\$ 为冻土帷幕发展厚度；\$L\$ 为孔间距；\$l\$ 为排间距；\$t\_{xy}\$ 为测温孔内计算截面附近传感器温度值线性插值；\$t\_c\$ 为测温孔最近 4 个冻结管内盐水温度；\$r\_0\$ 为冻结管半径；\$x, y\$ 为测温孔在图 6 坐标系下的坐标值。

冻土壁平均温度建井工程手册推荐成冰公式<sup>[10]</sup>。与前面所述原因一样，不适合计算多排管温度场计算。对于多排管冻结工程，本文采用作图法推导出平均温度简化公式。如图 5 所示，各计算截面冻土帷幕平均温度应为温度曲线包围图面积除以计算截面冻土帷幕厚度。如节 3.2 分析，积极冻结期结束时，排内温度曲线基本拉平，排外曲线可近似简化为直线，因此温度曲线包围图面积就可近似简化为梯形面积。冻土壁平均温度简化公式如下：

$$t_{cp} = \frac{(\epsilon + 3l) \bar{t}_{xy}}{2\epsilon + 3l} \quad (2)$$

式中：\$\bar{t}\_{xy}\$ 为排内测孔内温度的平均值。

本节利用式(1)，(2)，在设计冻土壁范围内取三

截面 A-A(上部 2 m 范围)、B-B(中部 10 m 范围)、C-C(下部 2 m 范围), 分析积极冻结期结束冻土壁特征, 以及在整个冻结期, 冻土帷幕向外发展状态。

### 4.1 积极冻结期结束冻土壁特征

由式(1)计算冻土帷幕向两侧发展的厚度。利用 C8 测孔监测数据计算地下连续墙一侧的厚度, 利用 C11, C15 测孔监测数据计算黄浦江一侧的厚度。根据厚度计算, 并利用式(2)计算冻土壁不同位置的平均温度。表 2 所示为积极冻结期结束时计算冻土壁各截面平均厚度和平均温度。在积极冻结期结束时, 冻土壁在深度方向上呈凸肚子形状, 中间大, 上部和下部小。造成冻土墙凸肚子主要原因是冻结为局部冻结, 冻土壁中部冻结强度比两头高, 上下两部分受边界效应影响较大。计算显示中部共计 10 m 范围内平均温度非常低, 其值为  $-22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据冻土试验研究报告<sup>[12]</sup>, 冻土的单轴抗压强度与温度的关系具有很好的线性规律, 随着冻土冻结温度的降低, 冻土强度增大, 冻土温度约下降  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 冻土单轴抗压强度约增长  $0.314\ 2\sim 0.342\ 8\ \text{MPa}$ 。冻土墙平均温度设计值定为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 可以依据  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时冻土强度来确定冻土壁设计厚度。因此可以考虑降低冻土壁平均温度设计值, 以减少冻土壁厚度。

表 2 积极冻结期冻土壁平均厚度和平均温度

Table 2 Average frozen soil wall thickness and temperature in the effective thickness of frozen soil wall throughout PFP

截面	平均厚度/m	平均温度/ $^{\circ}\text{C}$
A-A	6.10~6.55	-16.7
B-B	6.55~6.90	-22.8
C-C	6.30	-13.6

### 4.2 排外冻土壁在整个冻结期发展特征

排外冻土温度下降速度与距离成反比, 距离冻结管越远, 温度下降越缓慢。根据 C8, C11, C15 测孔所监测的数据, 采用式(1)计算整个冻结期排外冻土墙发展厚度, 并进行回归分析, 见图 7。正如节 3.2 分析, C17 距离最近冻结管  $1\ 500\ \text{mm}$ , 冻结结束, C17 温度为  $-9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 此时冻结壁单侧厚度大于  $1\ 500\ \text{mm}$ , 采用式(1)计算出来的冻土壁单侧厚度为  $1\ 740\ \text{mm}$ , 与实测数据比较吻合, 说明采用双排管公式, 能准确计算出冻土壁发展厚度。从图中可以看出排外冻土壁厚度随时间增长, 冻结初期发展

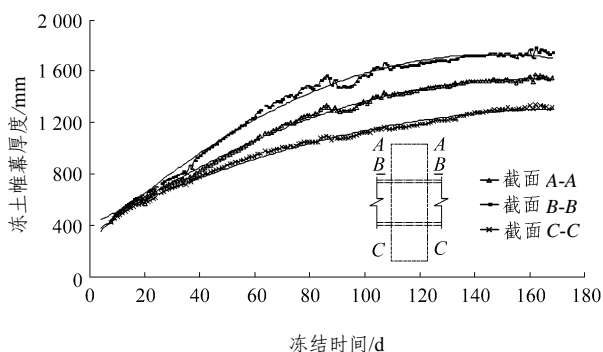


图 7 排外冻土帷幕厚度随冻结时间变化曲线

Fig.7 Relationship between frozen soil thickness outside of frozen soil wall and freezing time

迅速, 到了后期, 基本不发展, 各截面排外单侧发展厚度与冻结时间的回归关系式为

$$E = -0.046\ 9x^2 + 15.116x + 321.91$$

$$(R^2 = 0.996\ 8, \text{ 截面 A-A})$$

$$E = -0.067x^2 + 19.717x + 280.71$$

$$(R^2 = 0.992\ 5, \text{ 截面 B-B})$$

$$E = -0.0288x^2 + 10.199x + 406.14$$

$$(R^2 = 0.992\ 5, \text{ 截面 C-C})$$

图 8 所示为排外冻土帷幕发展速度随时间变化规律。由图 8 可知, 冻土帷幕排外发展速度随时间变化基本成线性下降趋势, 回归公式求导得出的发展速度也可得出这一规律。随着冻结厚度的增长, 越远处, 冻结强度越弱, 发展速度越慢。比较图 8 排外冻土帷幕发展速度和表 1 排内发展速度, 排内发展速度远大于排外发展速度, 排内冻土壁中部最低速度为  $37\ \text{mm/d}$ , 而排外冻土壁中部冻结初期也才  $15\sim 20\ \text{mm/d}$ 。

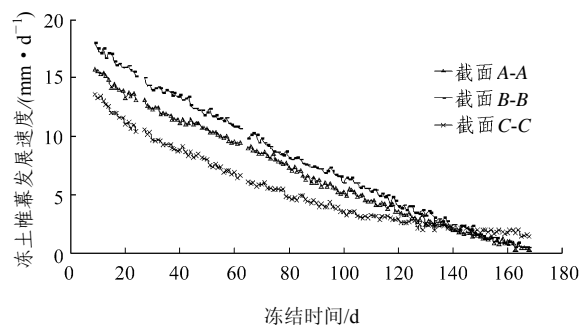


图 8 排外冻土帷幕发展速度随冻结时间变化曲线

Fig.8 Relationship between growth velocity outside of frozen soil wall and freezing time

冻土壁冻结壁厚度在何时达到设计要求, 基本由冻土帷幕向两侧发展速度决定, 这也同时决定了

积极冻结期结束时间。考虑到排内排外冻土帷幕发展速度差异,设计时可以充分利用排内发展速度快这一特点,在同样设计厚度的情况下,适当将冻结孔排与排之间的距离增大。这样在积极冻结过程中,排外冻土帷幕发展厚度可减少,冻土墙同样能满足厚度要求,从而减少积极冻结时间。

综合节 4.1 和 4.2 分析计算结果,采用多排冻结可形成较大的冻结壁厚度,局部冻结导致冻土壁在深度方向上呈凸肚子形状;排内和排外冻土帷幕发展速度差异较为显著;积极冻结期结束时,多排冻结使冻土壁的平均温度降得更低。

## 5 结 论

本文基于大量实测数据,从冻结深度方向、厚度方向上分析群孔冻结排内和排外温度发展特征;分析积极冻结期排内冻土壁交圈时间、发展速度;并利用公式计算出积极冻结期结束时冻土壁厚度和平均温度,及整个冻结期排外冻土壁单侧发展厚度和发展速度,得出多排局部冻结冻土壁温度场特征:

(1) 多排局部冻结在深度方向上各部位冻土壁发展速度不一样,中部比上部和下部发展速度快,排内发展速度远大于排外发展速度,排外冻土帷幕发展速度随着时间增长基本呈线性递减。

(2) 多排冻结有利于加强冻结效果,能够形成较大的冻土壁厚度,局部冻结导致冻土壁在深度方向上呈凸肚子形状。

(3) 多排冻结有利于形成较低平均温度的冻结壁。在本工程中,冻结壁大部分范围内平均温度达到 $-22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,排内冻土温度接近冻结管内盐水温度。可考虑降低冻土壁平均温度设计值,充分利用冻土在低温度下的高强度这一特点,来减少冻土壁设计厚度。

鉴于目前计算冻土帷幕厚度和发展速度公式并不适用于计算多排管冻结,本文首次引入双排管计算公式计算冻土帷幕厚度,并采用作图法推导出简化平均温度计算公式,计算结果与实测数据吻合较好。

## 参考文献(References):

- [1] 马 巍,常小晓,王大雁.人工冻结竖井中冻土墙强度与变形分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增2):2 871-2 874.(MA Wei, CHANG Xiaoxiao, WANG Dayan. Behaviors of strength and deformation of frozen soil wall in artificially frozen shaft[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.2): 2 871-2 874.(in Chinese))
- [2] 李大勇,吕爱钟,张庆贺,等.南京地铁旁通道冻结实测分析研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):334-338.(LI Dayong, LU Aizhong, ZHANG Qinghe, et al. Analysis of freezing method for construction of connected aisle in Nanjing metro tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 334-338. (in Chinese))
- [3] 乔京生,陶龙光,弭尚银.地铁隧道水平冻结施工地表变形特性的模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2 643-2 646.(QIAO Jingsheng, TAO Longguang, MI Shangyin. Simulation study on deformation characteristics of ground surface in horizontal freezing construction of metro tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 643-2 646.(in Chinese))
- [4] 王灵敏,王金星,刘松科.冻结法加固土层技术在盾构出洞中的应用[J].焦作工学院学报(自然科学版),2002,21(5):346-348.(WANG Lingmin, WANG Jinxing, LIU Songke. Application of soil stabilization method by freezing to shield tunneling[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology(Natural Science), 2002, 21(5): 346-348.(in Chinese))
- [5] 张 洁,徐 伟,钟建驰.润扬长江大桥南锚碇超深基坑维护冻结法施工温度场全过程的数值模拟[J].建筑施工,2005,26(1):15-17.(ZHANG Jie, XU Wei, ZHONG Jianchi. Numerical analysis of overall thermal field change in construction of south anchorage foundation pit support with ground freezing method for Runyang Yangtze bridge[J]. Building Construction, 2005, 26(1): 15-17.(in Chinese))
- [6] 金永军,杨维好.冻土直墙用于基坑支护的研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(13):2 280-2 285.(JIN Yongjun, YANG Weihao. Application of linear frozen soil wall to support of foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2 280-2 285.(in Chinese))
- [7] HARRIS J S. Ground freezing in practice[M]. London: Thomas, Telford Publishing, 1995: 155-164.
- [8] 汪仁和,曹荣斌.双排管冻结下冻结壁温度场形成特征的数值分析[J].冰川冻土,2002,24(2):181-185.(WANG Renhe, CAO Rongbin. Numerical analysis of the temperature field features in the frozen wall with double rows of freezing pipes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 181-185.(in Chinese))
- [9] 余 力,崔广心,翁家杰,等.特殊凿井[M].北京:煤炭工业出版社,1985:53-59.(YU Li, CUI Guangxin, WENG Jiajie, et al. Special sinking engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1985: 53-59.(in Chinese))
- [10] 沈季良,崔云龙,王介峰,等.建井工程手册第四卷[M].北京:煤炭工业出版社,1986:120-123.(SHENG Jiliang, CUI Yunlong, WANG Jiefeng, et al. Mining construction engineering handbook, Vol.4[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1986: 120-123.(in Chinese))
- [11] Бахолдин Б В. Выбор оптимального режима замораживания грунтов в строительных целях[M]. [S. l.]: Госст-ройиздат, 1963.
- [12] 胡向东,程 桦.上海轨道交通四号线冻土物理力学性能试验研究报告[R].上海:同济大学,2006.(HU Xiangdong, CHENG Hua. Experimental study on physical and mechanical properties of artificial frozen soil of Shanghai metro line No.4[R]. Shanghai: Tongji University, 2006.(in Chinese))