

文章编号:1671-6833(2010)02-0027-04

## 盾构出洞水平冻结加固杯形冻土壁温度场监测分析

夏江涛<sup>1,2</sup>, 杨平<sup>2</sup>

(1. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘 要:** 依托于某地铁车站盾构出洞水平冻结加固工程, 通过实时监测对杯型冻土壁温度场, 分析了盐水温度、冻结区不同区域土体温度的发展特征, 并计算了冻结区不同区域冻土壁交圈时间和发展速度。监测结果表明, 同一测温孔内埋深较深的测点与埋深较浅的测点相比, 板状加固区的冻土交圈时间较长, 发展速度较慢, 而圆柱体加固区的冻土交圈时间与发展速度变化并不明显; 冻土与地下连续墙间界面处, 板状加固区的冻土平均发展速度明显比圆柱体加固区快, 圆柱体加固区冻土壁交圈时间为31 d, 其平均发展速度为20.9 mm/d, 而板状加固区不同区域冻土壁平均发展速度差异明显, 最快发展速度为60.5 mm/d, 最慢发展速度为35.3 mm/d。

**关键词:** 盾构出洞; 水平冻结; 杯型冻土壁; 温度场

**中图分类号:** U452 **文献标识码:** A

### 0 引言

近年来人工冻结法广泛应用于软土地层的地铁隧道施工支护, 或两隧道间的联络通道施工支护等工程中<sup>[1-4]</sup>。其中, 冻结孔采用水平方向环形布置, 形成杯型冻土壁的加固法, 常应用于盾构进出洞等工程中<sup>[5]</sup>。由于环形冻结孔下形成的冻土壁温度场不仅受到同一圈中相邻冻结管的影响, 同时也受到临圈冻结管的影响, 因而杯型冻土壁温度场的形成十分复杂<sup>[6]</sup>。国内外对盾构出洞水平冻结加固杯形冻土壁温度场的研究甚少, 研究其温度场的发展规律和特征具有重要现实意义。

笔者依托南京地铁二号线一期工程逸仙桥站盾构出洞水平冻结加固工程, 对其冻土壁温度场发展规律进行全过程实测研究。根据实测数据, 分析了冻结盐水温度、冻结区不同区域土体温度的发展规律, 以及冻结区不同区域冻土壁交圈时间和发展速度的特征。

### 1 工程和监测概况

#### 1.1 工程概况

南京地铁二号线一期逸仙桥站~大行宫路区间隧道, 盾构从逸仙桥站西端井出洞, 盾构出洞时需对洞口的土体进行可靠加固。本工程的加固

施工区地面为龙蟠中路和中山东路的交叉口, 龙蟠中路为地下立交过道, 过道上面为逸仙桥。由于受地面交通环境限制, 无法从地上进行土体加固施工, 故采用地下水平冻结法加固土体, 以确保盾构的顺利出洞。盾构出洞处的地面标高为9.94 m, 洞门中心标高为-8.701 m, 中心埋深为18.641 m。

地层主要为: -2c3粉土、粉质黏土层与-2b4粉质黏土。设计杯底厚度为2.8 m, 杯体厚度为1.2 m, 如图1所示。

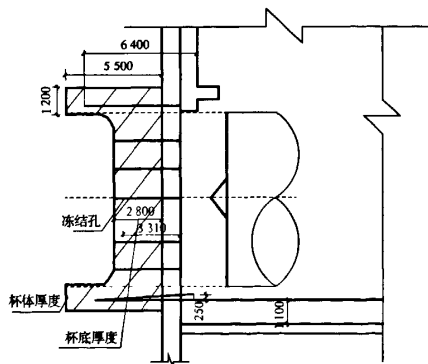


图1 圆柱体水平冻结孔图

Fig.1 Horizontal freezing holes of cylinder

根据冻结帷幕设计, 冻结孔按水平角度布置,

收稿日期:2009-10-14; 修订日期:2010-01-13

基金项目: 苏州市科技局苏州轨道交通专项课题(zxj0802)

作者简介: 夏江涛(1975-), 男, 江西九江人, 淮阴工学院讲师, 硕士, 主要从事力学及岩土与地下工程的教学与研究  
工作, E-mail: xjthyit@163.com.

冻结孔数 53 个。圆柱体冻结孔沿开洞口  $\phi 7.5\text{ m}$  圆形布置,开孔间距为  $0.76\text{ m}$  (弧长),冻结孔数 31 个,长度为  $6.7\text{ m}$ 。靠近底板位置的冻结孔钻进空间不够需调整。板块冻结孔沿开洞口  $\phi 5.1\text{ m}$ 、 $\phi 2.7\text{ m}$  圆形布置,开孔间距为  $1.14\sim 1.21\text{ m}$  (弧长),冻结孔数 21 个,开洞口中心布置 1 个冻结孔,冻结孔长度均为  $3.6\text{ m}$ ,冻结孔布置见图 2。

冻结一般分为积极冻结期和维护冻结期。积极冻结期盐水温度为  $-28\sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,维护冻结期盐水温度为  $-28\sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为确保安全,确定冻结时间  $40\text{ d}$ 。

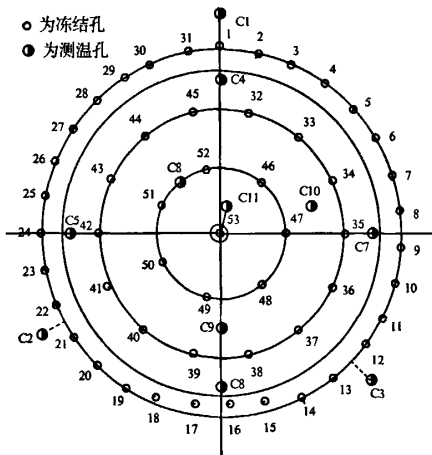


图 2 冻结孔和测温孔平面布置图  
Fig.2 Plan layout of freeze - tubes and observation holes for measuring temperature

1.2 冻结监测方案

盐水干管用法兰盘连接,在盐水管路和冷却水循环管路上设置阀门和温度测点,每 3~4 个冻结管串联为一组,每组串联回路设一个测温点。

冻结区内共布置 11 个测温孔,平面位置见图 2。在圆柱体加固区即外圈朝外方向布置 3 个测温孔(C1、C2、C3),为外圈测温孔;在板块加固区布置 8 个,在外圈冻结管与中圈冻结管之间布置 4 个测温孔(C4、C5、C6、C7),为中圈测温孔;测温孔(C8、C9、C10、C11)为内圈测温孔,其中 C9、C10 布置在中圈冻结管与内圈冻结管之间,C8 布置在内圈的圈内冻结管之间,C11 布置在洞口中心附近。每个测温孔内布置 2~3 个测点。测温孔各测点深度如表 1 所示。

2 多圈局部冻结监测分析

出洞口水平冻结加固工程分为左右两个杯型加固区,由于右行线冻结温度场与左行线的情况基本一致,所不同的是,右行线施工时周围环境温

度比左行线略低。故笔者只分析左行线。左行线冻结工程历时  $40\text{ d}$ 。积极冻结期盐水温度快速下降,冻结  $6\text{ d}$  后去路温度降至  $-24.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。积极冻结期共持续  $28\text{ d}$ ,盐水去路平均维持在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,平均温差为  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;维护冻结期去路温度平均维持在  $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,平均温差在  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。

表 1 左行线测温孔测点的深度(进入土体深度)

Tab.1 Depth of temperature sensors in the observation holes( Depth into the soil) m

| 测温孔号 | $h_2$ | $h_3$ | 测温孔号 | $h_2$ | $h_3$ |
|------|-------|-------|------|-------|-------|
| C 1  | 1.80  | —     | C 7  | 0.40  | —     |
| C 2  | 1.65  | 3.75  | C 8  | 1.70  | 2.82  |
| C 3  | 0.75  | —     | C 9  | 1.20  | 2.60  |
| C 4  | 0.50  | —     | C 10 | 0.60  | —     |
| C 5  | 0.57  | —     | C 11 | 0.61  | —     |
| C 6  | 1.46  | —     |      |       |       |

注:1#测点深度均为  $0.07\text{ m}$ ;  $h_2$  表示 2#测点深度;  $h_3$  表示 3#测点深度。

2.1 盐水去回路温度监测分析

图 3 为整个冻结期间干管进路、回路盐水温度变化曲线。左线冷冻开机后温度迅速下降,冻结  $3\text{ d}$  盐水去、回路温度就已达到  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下,冻结  $16\text{ d}$  盐水去路温度达到  $-28.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,超过设计值  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冻结  $18\text{ d}$  去路温度达到  $-28.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,回路温度达到  $-28.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,已超过设计温度。从冻结  $18\text{ d}$  开始,干管去路温度平均维持在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。积极冻结期盐水去回路平均温差为  $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,维护冻结平均温差为  $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。说明冻结开始时热交换量大,以后逐渐减少,进入维护冻结后,热交换达到稳定。

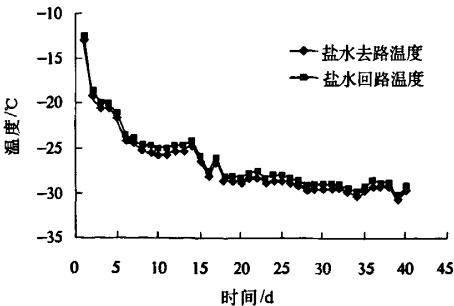


图 3 盐水干管去路、回路盐水温度与时间关系曲线  
Fig.3 Inlet and outlet temperatures of salt - water changing with time

2.2 冻土与地下连续墙间界面处温度变化特征

测温孔埋深为  $0.07\text{ m}$  处实际为冻土与地下连续墙间的界面,是水平冻结很重要的参数。因为其反映了冻结帷幕与混凝土墙的胶结情况。图 4

选取测温孔 C2 (外圈朝外)、C5 (外、中圈管之间)、C9 (中、内圈管之间)、C11 (内圈管圈内冻结管之间)埋深为 0.07 m 处的 1#测点温度与冻结时间的变化曲线。需要说明的是板块区各测点因破槽壁冻结 28 d 后均停测;各测点深度均为进入土体的深度,即不含槽壁的厚度,以下同。

由图 4 可知,在整个积极冻结施工期间,任意时间都是中圈测温孔的温度最低,内圈测温孔的温度稍高,外圈测温孔的温度最高。造成这一现象的主要原因是冻结能量的损失。冻结开始后,外圈冻结孔由于与加固区外围土体相接触,二者之间温差较大,外圈冻结孔冻结能量不断向外侧土体和内侧土体流失,能量损失较中圈、内圈要多得多,故外圈测温孔温度最高;而中圈则受到外圈和内圈冻结能量扩散的影响,故其温度最低。

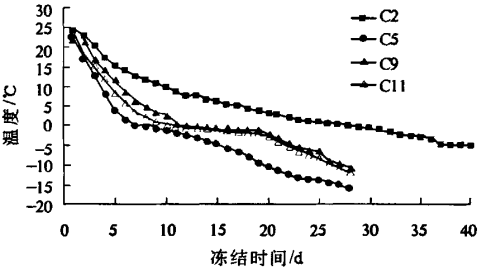


图 4 1#测点温度与冻结时间关系曲线  
Fig.4 Relation of temperature and freezing time of observation holes in the depth of 0.07 m

图 5 为测点温度值与当天盐水去路温度连成的空间曲线。以洞口中心为坐标原点,各个测温孔的 1#测点和各圈冻结孔离洞口中心的距离为横坐标,温度为纵坐标。

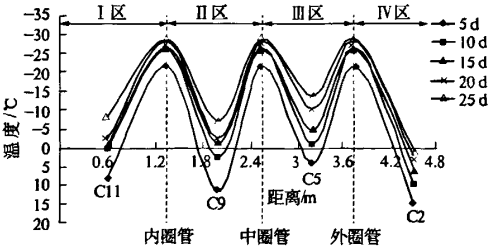


图 5 冻土壁的温度场特征  
Fig.5 Temperature field characteristics in the frozen soil wall

冻土壁的温度发展分圈内和圈外两种情况。由于 C5、C9、C11 测孔均布置在圈与圈冻结管之间,因此只要这些测孔内测点温度降低至结冰温度,即可判定此区域内冻土壁交圈。由图 5 可知,圈内不同区域交圈时间不一致,圈内交圈最快的

是位于中圈管与外圈管之间的区域,即Ⅲ区。冻结 10 d,C5 周围的土体达到结冰温度  $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此时 C9、C11 温度为  $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而测温孔 C2 的温度才达到  $9.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

冻结交圈时间是反映冻结过程的一个特征值。为了描述冻土与地下连续墙间界面处不同部位冻土帷幕交圈时间和交圈前冻土帷幕发展速度,取有代表性的 C2、C5、C8、C9、C11 等 5 个测温孔的 1#测点进行分析。同部位冻土帷幕交圈时间和交圈前冻土帷幕平均发展速度见表 2。

表 2 同一埋深处冻土交圈时间和平均发展速度  
Tab.2 Time of frozen soil wall closure and average velocity of the growth in the same depth

| 类别                                    | I 区<br>(C11) | II 区<br>(C9) | III 区<br>(C5) | IV 区<br>(C2) | 内圈管圈内冻<br>结管之间(C8) |
|---------------------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------------|
| 测温孔离冻结孔<br>最近距离/mm                    | 600          | 764          | 605           | 650          | 597                |
| 交圈时间/d                                | 17           | 15           | 10            | 31           | 13                 |
| 发展速度/ $(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$ | 35.3         | 50.9         | 60.5          | 20.9         | 45.9               |

I 区、II 区和 III 区为板块加固体区,IV 区为圆柱加固体区。由表 2 可知,冻土与地下连续墙间界面处,板块加固区的冻土发展速度明显比圆柱体加固区的冻土发展速度快。其中板块加固区交圈最早的为 III 区,其发展速度为  $60.5\text{ mm/d}$ ,II 区次之,其发展速度为  $50.9\text{ mm/d}$ ,交圈最慢的为 I 区,其速度为  $35.3\text{ mm/d}$ ;而圆柱体加固区即 IV 区的冻土壁发展速度仅为  $20.9\text{ mm/d}$ 。测温孔 C8 表明内圈管圈内冻结管交圈只要 13 d,其发展速度为  $45.9\text{ mm/d}$ 。

2.3 冻土壁不同埋深处温度变化特征

各区域不同埋深冻土帷幕交圈时间和交圈前冻土帷幕发展速度见表 3。由表 3 可知:同一测温孔内埋深较深的测点与埋深较浅的测点相比,在板块加固体区 (I 区、II 区和 III 区),冻土交圈时间较长,发展速度较慢;在圆柱加固体区 (IV 区),冻土交圈时间与发展速度变化并不明显。

杯型冻土壁的杯底厚度和杯体厚度何时达到设计要求,基本由冻土帷幕的发展速度决定,这也同时决定了冻结期结束时间。由表 3 可知,圆柱加固体区冻土最慢发展速度为  $19.3\text{ mm/d}$ ,板块加固体区最慢发展速度为  $29.4\text{ mm/d}$ ,取冻土的最慢发展速度为保守取值,到冻结 40 d 圆柱加固体区冻土发展半径  $r=772\text{ mm}$ ,板块加固体区冻土发展半径  $r=1\text{ }176\text{ mm}$ 。左线冻结孔最大间距为  $1\text{ }210\text{ mm}$ ,按冻结发展半径外为  $772\text{ mm}$ 、内为  $1\text{ }176\text{ mm}$ 推算,冻结 40 d 后冻结帷幕厚度满足设计要求。在盾构出洞过程中,没有出现任何异常情

况,冻结法施工取得了成功.

表 3 不同埋深处冻土交圈时间和平均发展速度

| Tab.3 Time of frozen soil wall closure and average velocity of the growth in different depth |            |                                |            |                                |            |                                |            |                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|--------------------------------|
| 测点号                                                                                          | I 区(C11)   |                                | II 区(C9)   |                                | III 区(C5)  |                                | IV 区(C2)   |                                |
|                                                                                              | 交圈时间<br>/d | 发展速度/<br>(mm·d <sup>-1</sup> ) | 交圈时间<br>/d | 发展速度/<br>(mm·d <sup>-1</sup> ) | 交圈时间<br>/d | 发展速度/<br>(mm·d <sup>-1</sup> ) | 交圈时间<br>/d | 发展速度/<br>(mm·d <sup>-1</sup> ) |
| 1#测点                                                                                         | 17(0.07 m) | 35.3                           | 15(0.07 m) | 50.9                           | 10(0.07 m) | 60.5                           | 31(0.07 m) | 20.9                           |
| 2#测点                                                                                         | 21(0.61 m) | 28.6                           | 17(1.20 m) | 44.9                           | 15(0.57 m) | 40.3                           | 33(1.65 m) | 19.7                           |
| 3#测点                                                                                         | —          | —                              | 26(2.60 m) | 29.4                           | —          | —                              | 34(3.75 m) | 19.3                           |

注:括号内数值为测点埋深.

3 结论

(1)在整个冻结施工期间,任意时间都是中圈测温孔的温度最低,内圈测温孔的温度次之,外圈测温孔的温度最高.

(2)冻土与地下连续墙间界面处,板块加固区的冻土发展速度明显比圆柱体加固区的冻土发展速度快.其中板块加固区交圈最早的为III区,其发展速度为60.5 mm/d;II区次之,其发展速度为50.9 mm/d;交圈最慢的为I区,其速度为35.3 mm/d;而圆柱体加固区冻土壁发展速度仅为20.9 mm/d.

(3)同一测温孔内埋深较深的测点与埋深较浅的测点相比,在板块加固体区,其冻土交圈时间较长,平均发展速度较慢,在圆柱加固体区,冻土交圈时间与发展速度变化并不明显.

参考文献:

[1] 李大用,王晖,张庆贺.南京地铁联络通道冻结法施工措施分析[J].岩土力学,2003,24(增刊):365-368.  
[2] LI S Y, LAI Y M, ZHANG M Y, et al. Minimum ground pre-freezing time before excavation of Guangzhou subway tunnel[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 46(1): 181-191.  
[3] 余占奎,黄宏伟,王如路,等.人工冻结技术在上海地铁施工中的应用[J].冰川冻土,2005,27(4):550-556.  
[4] 周晓敏,王梦恕,张顶立,等.地层冻结技术在北京地铁施工中的应用分析[J].岩土工程界,2002,5(3):61-64.  
[5] 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.  
[6] 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.

Survey Analysis of Temperature Field in Cup-shaped Frozen Soil Wall of Horizontal Freezing Reinforcement for Shield Tunnelling

XIA Jiang-tao<sup>1,2</sup>, YANG ping<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, China; 2. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Based on horizontal freezing reinforcement project for a subway station, a study on the development of temperature field in cup-shaped frozen soil wall was carried out by site monitoring. The development characteristics of salt-water temperature and soil temperature in freezing zone were analyzed. And the time of frozen soil wall closure and the velocity of the growth were calculated during the primary freeze period. According to site monitoring analysis, compared with temperature sensor of the shallower depth in the same observation hole, time of frozen soil wall closure of temperature sensor of the deeper depth was longer and its velocity was slower in plate reinforced zone, while time of frozen soil wall closure and average velocity of the growth did not change significantly in cylinder reinforced zone; Average velocity of the growth of frozen soil in plate reinforced zone was faster than that of cylinder reinforced zone in the interface between frozen soil and underground continuous wall obviously. Time of frozen soil wall closure was 31d and average velocity of the growth was 20.9 mm/d in cylinder reinforced zone. Growth velocity displayed a marked difference in plate reinforced zone, the fast velocity was 60.5mm/d and the slowest one was 35.3mm/d.

**Key words:** shield tunnelling; horizontal freezing; cup-shaped frozen soil wall; temperature field