

文章编号: 1000-7598(2010)01-0158-08

# 广州地铁超长水平冻结多参量监测分析

姜耀东<sup>1,2</sup>, 赵毅鑫<sup>1,2</sup>, 周 罡<sup>3</sup>, 孙 磊<sup>4</sup>, 秦 玮<sup>5</sup>

(1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 3. 广州市中心区交通项目领导小组办公室, 广州 510030; 4. 北京市建筑设计研究院, 北京 100045; 5. 山东电力工程咨询院, 济南 250013;)

**摘 要:** 广州地铁3号线天河客运站折返线工程是目前国内最长、开挖断面最大的水平冻结隧道工程。文中根据不同施工阶段中对盐水温度、土层温度、地表变形、冻土压力、隧道衬砌变形等多个参量的现场监测数据, 从时间和空间上分析了冻结帷幕演化过程、冻结帷幕发展速度等; 探讨了土层温度变化规律以及冻土压力与土体温度间的相互关系, 得出了在积极冻结期, 沿测温孔深度方向土体温度的变化梯度随冻结时间增加不断减小, 土体温度变化速率随时间增加而降低的特征; 对比研究了冻结阶段、隧道开挖阶段和融沉阶段地表变形特征, 并提出了缩短积极冻结期的建议和方法。

**关 键 词:** 水平冻结; 地铁; 监测; 冻胀; 冻结温度; 冻结壁

中图分类号: TU 472.9

文献标识码: A

## Multi-parameter monitoring of frozen soil structure with super-long freezing hole drilling in Guangzhou metro

JIANG Yao-dong<sup>1,2</sup>, ZHAO Yi-xin<sup>1,2</sup>, ZHOU Gang<sup>3</sup>, SUN Lei<sup>4</sup>, QIN Wei<sup>5</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. School of Mechanics, Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

3. Guangzhou City Center Transport Project Office, Guangzhou 510030, China; 4. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China;

5. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute, Jinan 250013, China)

**Abstract:** The Tianhe Station horizontal frozen construction in Guangzhou metro No.3 line is the longest and biggest artificial ground freezing (AGF) project of the national metro construction currently. In the different phases of the construction; several parameters such as brine temperature, ground temperature, surface settlement/heave, swelling pressure, tunnel liner convergence and so on, are monitored dynamically. According to the data obtained from about 400 days in-situ monitoring, the features of propagation speed of the frozen soil wall and the brine temperature variation are discussed. The characteristics of ground temperature and the swelling pressure of soil are analyzed. The relationship between the ground pressure and the soil temperature is also achieved. Results show that the temperature gradient variation and soil temperature variance ratio decrease with the increasing of freezing time in the active freezing phase. The safety of frozen earth wall is also evaluated by different monitored data. Moreover, the environmental influence of the project is evaluated based on the surface frost heave and settlement data monitored in the process of construction. It is found that the pre-freezing time is too long which induces large surface frost heave and increases the project capital cost. The analytical results show that the pre-freezing time should be reduced.

**Key words:** horizontal frozen; metro; monitor; frost heave; freezing temperature; frozen wall

## 1 引 言

人工冻结方法是一项成熟的土体固结稳定技术, 应用已 100 余年, 其实质是利用人工制冷技术临时改变岩土状态以固结土体, 保证工程顺利实

施。以往研究表明, 冻土强度较原土体明显增大, 而水渗透系数大幅降低, 所形成的冻土结构可充分抵御水土压力, 并起到隔水作用<sup>[1-3]</sup>。目前, 冻结施工技术已广泛应用于矿山井巷建设、城市地下空间开发等工程中<sup>[4-8]</sup>, 并在北京、上海、广州等地

收稿日期: 2008-06-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2010CB226801); 国家自然科学基金项目(No. 50704034); 北京市教育委员会共建项目建设计划; 煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主课题资助。

第一作者简介: 姜耀东, 男, 1958 年生, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事岩石力学与采矿工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangyud@cumt.edu.cn

铁建设中发挥了积极的作用,积累了许多成功经验。但在地铁隧道超长水平冻结施工及监测分析方面,尤其对于超浅埋、大断面、地质条件复杂等情况下的超长水平冻结工程,实践经验仍明显不足。

广州市轨道交通3号线天河客运站折返线隧道工程是广州地铁3号线建设中的关键工程,也是目前我国水平冻结最长、单孔冻结孔最深(71.9 m)的地铁隧道水平冻结工程。工程区域位于广州市天河区天河汽车客运站东北侧,斜穿广汕公路和沙河立交桥。该区域地表交通繁忙、建筑密集、地层管线纵横交错、地质条件差。在此条件下,采用水平冻结施工,一次性水平冻结长度达138.8 m,冻结断面 $86\text{ m}^2$ ,隧道最大开挖跨度为14.85 m,且冻结加固体距地表仅5.5 m,工程中不可预见因素较多,工程施工风险极大,因此施工过程中对地表变形、冻胀压力等多个参量进行实时监测是保证施工安全的重要措施,目前该隧道工程已顺利完成,已交付使用。

本文根据广州地铁3号线天河客运站折返线隧道冻结工程的3个阶段:积极冻结期、冻结维护期(隧道开挖期)和融沉期,在对不同阶段中冻结盐水温度、冻胀土压力、地表位移、土体温度等多个参量进行实时、动态监测的基础上,分析了冻结帷幕演化过程、冻土柱交圈时间、冻土发展速度等,探讨了冻土压力与土体温度间的相互关系,对比研究了冻结阶段和隧道开挖阶段地表变形和冻结温度场变化规律。

## 2 工程概况

广州市3号线天河客运站折返线施工区间隧道地质主要为强风化花岗岩残积层,平均层厚2.2 m,最厚6.5 m,隧道拱顶全部位于砂质黏性土(砂层5H-1),隧道底位于砂质黏性土(砂层5H-2),砂层密实性差,透水强,稳定性差,遇水软化,易崩解塌落,且地下水位高,平均约为1.7 m;隧道覆土埋深仅8~9 m。隧道北南北端标高差为0.631 m,纵向坡度为2‰,见图1。折返线设计长度为147.8 m,冻结长度为138.8 m,分南北两段施工,南、北段冻结长度均为71.9 m,末端搭接冻结范围约为5 m(图2)。双线隧道净断面为马蹄形,隧道净高9.246 m,净宽11.5 m。隧道临时支护为厚400 mm的C20网喷混凝土,内衬为C30厚450 mm的S8模筑钢筋混凝土。隧道施工采用全断面帷幕冻

结,浅埋暗挖法开挖。

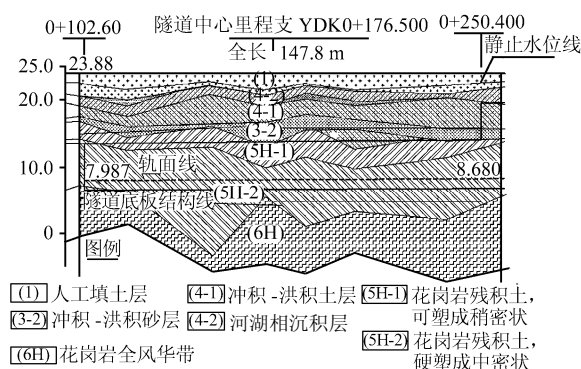


图1 天河客运站折返线隧道地质纵断面图

Fig.1 Geological section of turn-back part of Tianhe station on Guangzhou subway line 3

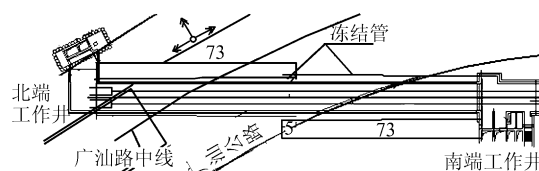


图2 折返线隧道冻结平面示意图

Fig.2 Sketch plane map of the turn-back section

## 3 超长水平冻结施工

折返线超长水平冻结施工分为以下阶段:钻孔施工期、积极冻结期、冻结维护期(隧道开挖期)和融沉期。

冻结钻孔采用跟管钻进并结合先进的钻孔纠偏技术。冻结管选用 $\phi 108\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的低碳钢无缝钢管,用丝扣连接,后用手电焊进行补焊。冻结孔开孔布置轴线距隧道开挖边沿设计为0.87 m。折返线南端布设冻结管46根,测温孔5个,水文孔4个。北端布设冻结管46根,测温孔4个,水文孔4个,冻胀压力测孔4个,见图3。南、北端面冻结孔错位布置。南、北两端于2005年7月10日开始实施冷冻。冻结壁设计有效厚度为2.5 m,具体冻结参数见表1。

2005年12月19日,工程进入维持冻结期。隧道从南端向北端单向开挖,采用CRD法施工;I、II区分别于2006年4月20日和4月26日贯通。2006年5月初开始构筑III、IV区,7月底全面贯通,贯通后拆除临时支撑,构筑二衬。2006年8月16日开始自然解冻阶段,地表融沉采用局部注浆控制。至2007年1月初地层沉降基本稳定,工程竣工,交付使用。

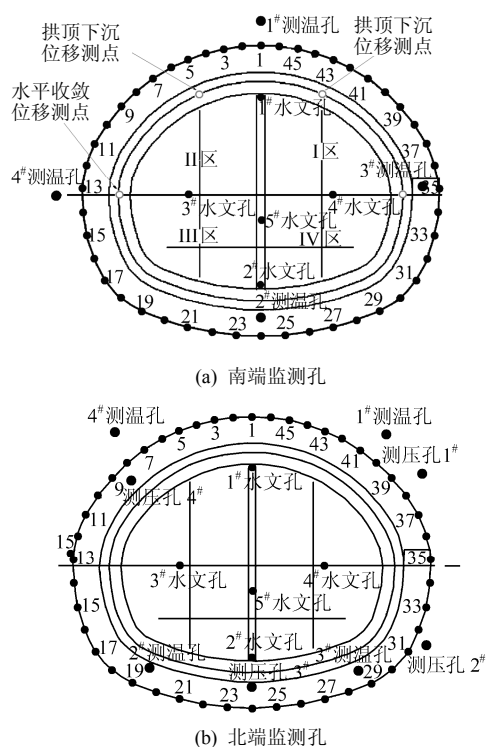


图3 南北两端各监测孔位置布置断面图 (单位: °C)

Fig.3 Monitoring holes positions in south and north sections (unit: °C)

表1 冻结施工基本参数表

Table 1 Breakdown of the freezing parameters

| 冻结参数                          | 具体说明                   |
|-------------------------------|------------------------|
| 冻结孔布置圈径/m                     | 3心拱布置, 最大半径5.35        |
| 冻结孔数/个                        | 南北两端各46个               |
| 孔间距/m                         | 顶板处0.7, 其他部位0.85~0.95  |
| 冷冻站设计制冷量/(kcal/h)             | $45 \times 10^4$ (最大值) |
| 冷冻站实际制冷量/(kcal/h)             | $75 \times 10^4$ (最大值) |
| 积极冻结期盐水温度/°C                  | -25~-30                |
| 维护冻结期盐水温度/°C                  | -20~-25                |
| 冻结孔单孔盐水流量/(m <sup>3</sup> /h) | 6~8                    |
| 冻结壁设计平均温度/°C                  | -8                     |
| 设计积极冻结期/d                     | 150                    |
| 设计维护冻结期/d                     | 120                    |

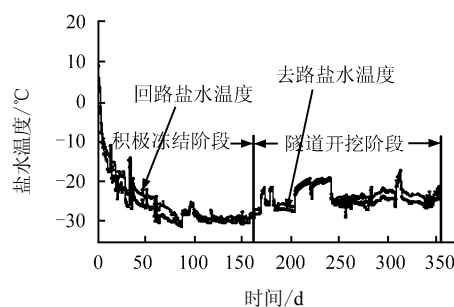
## 4 超长水平冻结现场监测结果分析

工程实际施工工期为: 113个钻孔施工工期为367d, 土体开挖前积极冻结期为162d, 维护冻结期为238d, 融沉观察期约为150d。

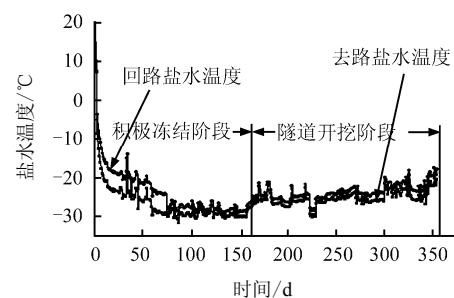
### 4.1 盐水温度监测分析

2005年7月10日开始冻结, 计划冻结5个月。7月15日盐水温度去、回路温度就已达到-10℃以下, 去路温度为-16.1℃, 回路温度为-11.0℃。冻结施工85d, 去路温度达到-30.0℃, 回路温度达到-28.8℃, 盐水温度下降的梯度比较快, 随时间发展, 盐水去路和回路温度差逐渐减小。北端去回路温差于开始冻结80d后减小到1℃左右(2005-07-10—

2006-06-30), 南端去回路温度温差于开始冻结100d后减小到1℃左右(2005年7月10日—2006年6月30日), 如图4所示。去回路盐水与冻结壁热交换达到相对的平衡, 说明冻结帷幕已基本形成。进入冻结维护期, 盐水温度控制在-25℃左右。北端由于未进行开挖施工, 在200d后温度调整在-20℃左右。



(a) 北端(上半圈)盐水温度变化图



(b) 南端(右半圈)盐水温度变化图

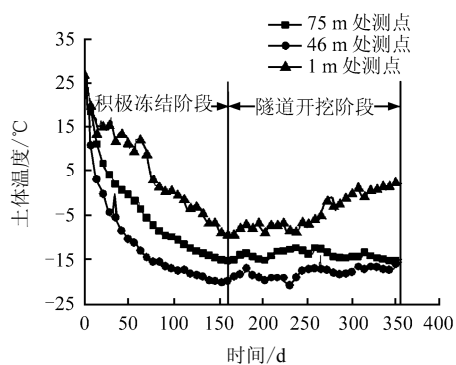
图4 南北两端冻结管盐水温度与时间关系

Fig.4 Daily variation of the brine temperature

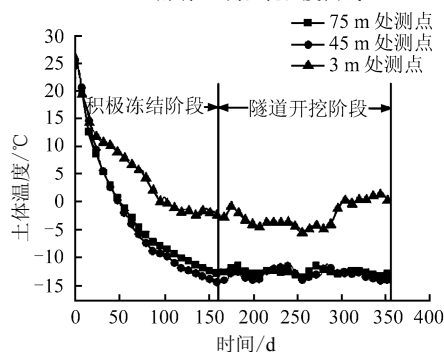
### 4.2 土体温度监测分析

折返线隧道南北两端共布置9个测温孔(南端5个、北端4个), 长度为30~75m, 各测温孔内每3m布置一个测温探头, 测点布置见图3。土体温度监测采用TZW-100型多路数字温度监测系统。以南端1#测温孔和北端1#测温孔内部分测点为例, 实测结果如图5所示。总体而言, 除最外缘测点外, 南北两端测温孔内各测点温度分别在冻结开始50d左右和75d左右全部低于0℃。土体温度变化分2个阶段: 1 积极冻结阶段, 土体温度快速下降, 南端1#测温孔全线平均温度降至-15℃左右, 北端1#测温孔全线平均温度降至-12℃左右。2 维持冻结阶段, 尽管隧道开挖造成温度小幅波动, 但冻土平均温度仍保持在-10℃以下, 保证了冻结壁的稳定。同时, 同一孔内各测点温度总体随测点深度增加而降低, 主要因为孔越浅, 距离外部环境越近, 热交

换就越大,如图6所示,北端1#测温孔内75 m测点温度较高,是因为该点处于南北两端冻结搭接区外,且距同断面的南端冻结管距离较远。计算发现:冻结开始50 d后,沿冻结孔深方向,温度变化梯度约为0.115 °C/m;冻结100 d后,温度变化梯度约为0.095 °C/m;冻结150 d后,温度变化梯度约为0.083 °C/m;进入冻结维护期后,温度变化梯度基本稳定在0.076 °C/m。因此,在积极冻结期,沿测温孔深度方向温度的变化梯度随冻结时间增加呈明显减小趋势;温度变化率也随时间增加而降低,说明土体中未冻水含量逐渐减少。



(a) 南端1#测温孔温度曲线



(b) 北端1#测温孔温度曲线

图5 南北端1#测温孔内部分测点温度与时间的关系  
Fig.5 Relationship between the ground temperature and time in the No.1 temperature monitoring holes in both of south and north working stations

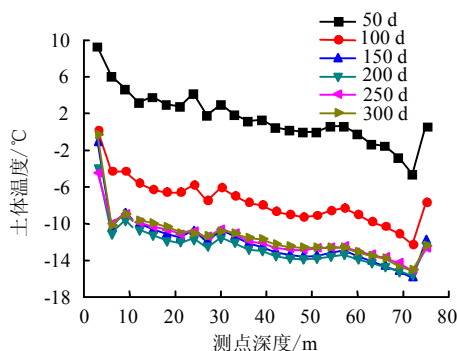


图6 北端1#测温孔沿孔深方向各测点温度变化曲线  
Fig.6 Variation of the temperature as the depth of the monitor points increasing in the No.1 temperature monitoring hole in north working station

以北端6 m深测点处为例,计算冻结帷幕发展速度,见表2。冻结帷幕向内发展速度取26.9 mm/d,162 d发展半径为4 358 mm,向外取16.7 mm/d,162 d发展半径为2 705 mm。由此推算冻结帷幕厚度为7 355 mm,有效厚度为3 575 mm;内外侧发展速度比约为1.61。

表2 根据各测温孔温度计算冻土扩展速度

Table 2 Freezing wall propagation speed calculation based on the temperature datum

| 方位 | 相对冻结主面位置 | 距冻结主 | 降温至   | 扩展   | 平均      | 冻结壁发    |
|----|----------|------|-------|------|---------|---------|
|    |          | 测温孔  | 面距离   | 0℃时间 | 速度      | 速度      |
|    |          |      | /m    | /d   | /(mm/d) | /(mm/d) |
| 北端 | 外侧       | 1#   | 1 200 | 72   | 16.7    | 18.5    |
|    |          | 4#   | 1 279 | 63   | 20.3    |         |
|    | 内侧       | 2#   | 895   | 35   | 25.6    | 26.9    |
|    |          | 3#   | 674   | 24   | 28.1    |         |

根据以往冻结工程经验公式<sup>[9]</sup>,计算冻结壁平均温度:

$$t = t_b \left( 1.135 - 0.352\sqrt{l} - 0.875 \frac{1}{\sqrt[3]{E}} + 0.266\sqrt{\frac{l}{E}} \right) - 0.466 \quad (1)$$

式中:  $t$  为冻土平均温度;  $t_b$  为盐水最低温度;  $l$  为孔间距;  $E$  为冻土厚度。

经计算,冻结壁平均温度约为-12.2 °C。由以上分析,尽冻结壁厚度超过设计的2.5 m,冻结壁平均温度也低于设计的-8 °C,达到了预期效果,但积极冻结期过长,成本较高。

#### 4.3 冻胀土压力监测分析

在隧道北端布置了4个冻胀压力测孔,孔内测点布置见图7,采用DX-1型数字式频率计监测。

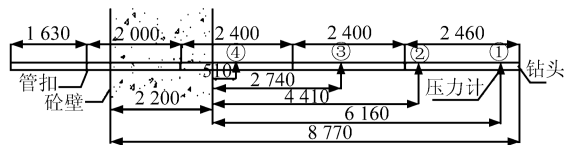


图7 冻胀压力测孔内测点布置示意图(单位: mm)  
Fig.7 Sketch map of the pressure monitor (unit: mm)

1#测压孔位于冻结管外侧,其深部测点在冻结90 d左右冻胀压力达到最大,约为0.7 MPa,说明距北端10 m深处冻结柱已交圈,冻结帷幕基本形成。而浅部测点冻胀受工作井内混凝土壁约束和水文孔泄压影响,压力变化较大。对比测温孔和现场水文孔数据发现,浅部测点初期压力主要为水头压力,而后期表现主要为冻胀压力。隧道开挖阶段,

1<sup>#</sup> 测压孔内各测点冻胀压力总体较为稳定,随着隧道开挖接近北端,各测点冻胀压力逐渐减小,如图 8(a)所示。3<sup>#</sup>孔位于冻结管内侧,隧道下部中心位置。在积极冻结期,除测点 4 外,其它测点在冻结 90 d 左右均表现出较稳定的冻胀压力,平均约为 0.6 MPa,说明对应位置冻结柱业已交圈,冻结帷幕初步形成。而测点 4 在冻结开始 50 d 左右压力约为 1.35 MPa,其主要为混凝土壁内侧附近的水土混合物所受的水头压力,说明积极冻结期浅部水分迁移仍未完成。隧道上部开挖后,因立刻架设中隔壁,将隧道拱顶的压力向下传递,使得 3<sup>#</sup>测压孔压力与其他测孔相反,出现明显增大。随着隧道下部开挖,压力略有减小,监测结果如图 8(b)所示。

根据 1<sup>#</sup> 测压孔内测点 1 处冻胀压力监测数据和临近位置温度数据分析得出:温度大于 0 °C 时,冻胀力近于为 0,压力主要为水土压力。温度降至 0 °C 后,冻胀力迅速增大,但增长梯度逐渐减小。温度降至 -8 °C 左右时,冻胀力增至最大值,约为 0.7 MPa。随温度继续下降,冻胀力反而减小, -10 °C 左右冻胀基本结束,冻胀力趋于稳定,如图 9 所示。该结果与试验所得冻胀力随温度变化趋势基本一致<sup>[10]</sup>。

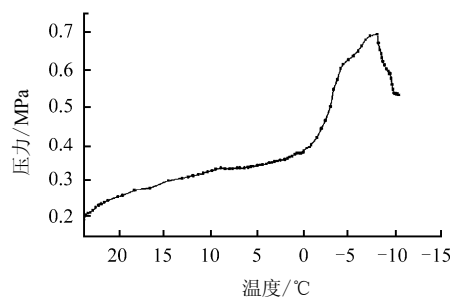


图 9 冻胀压力随温度变化趋势图  
Fig.9 Relationship between frost heave pressure and frozen soil temperature

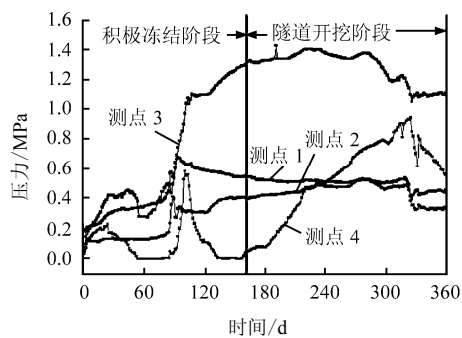
#### 4.4 地表变形监测分析

在工程区域共布置了 28 个地表变形测点,测点位置见图 10。在冻结孔施工阶段,南端地面沉降累计值最大为 -7 mm,平均为 -3.6 mm;北端累计沉降平均为  $\pm 1$  mm,该阶段地表变形主要由钻孔挖土造成。图 11 为沿隧道中心线布置的 10-1<sup>#</sup>、E<sup>#</sup>和 F<sup>#</sup> 三测点地表变形情况,分析发现地表变形主要分为 3 个阶段,即快速冻胀阶段、缓慢冻胀阶段和融沉阶段。在折返线中部,由于冻结管搭接,冻胀显现较早,冻胀速度最快,最大接近 4 mm/d,而其他位置冻胀显现相对略晚,但随距折返线中部越远,快速冻胀阶段冻胀速率越小。快速冻胀阶段后,冻土结构扩展速度变缓,进入缓慢冻胀阶段,冻胀平均速度降为 2.2 mm/d 左右;该转变过程与地下水迁移和冻土本身力学性质有关,与施工阶段无关。同时,隧道开挖未引起地表沉降,说明冻土帷幕有效地起到支撑作用,保证了施工安全。维护冻结期后,地表变形进入融沉阶段,地表快速沉降,融沉变形速率约为 2.5 mm/d,最大接近 4 mm/d,说明该区域地层热量传递较快、地下水迁移迅速;因此,在夏季针对该地层条件下采用冻结法施工是行之有效的。

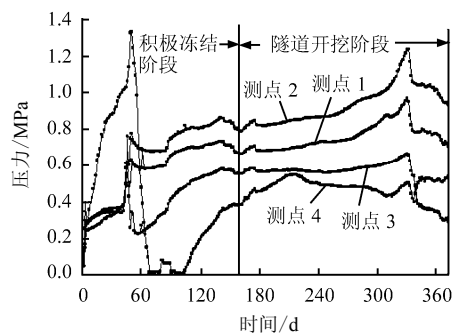
开挖接近结束时,各监测点位移如图 12,地表冻胀明显,折返线中部和沿隧道中心线处冻胀相对较大,主要因为隧道埋深浅和冻结管搭接造成,冻胀所导致的地表破损和地下管线破坏也主要集中在这些区域,如图 13 所示。

#### 4.5 衬期支护结构内力监测分析

通过在初期支护结构内仰拱钢筋隔栅中部焊接钢筋测力计测量初期支护结构内钢筋受力,进而可计算得出钢筋内应力。以距南端 20 m 和 45 m 处 3 个测力计监测数据为例进行分析。20 m 处 2 个测力计分别位于 I 区和 II 区仰拱中部。II 区的测力计



(a) 北端 1<sup>#</sup>测压孔压力曲线



(b) 北端 3<sup>#</sup>测压孔压力曲线

图 8 测压孔内各测点压力与时间的关系曲线  
Fig.8 Relationship between the elapsed time of freezing and frost heave pressure

安装比 I 区晚 10 d 左右, 45 m 处测力计位于 I 区仰拱中部。

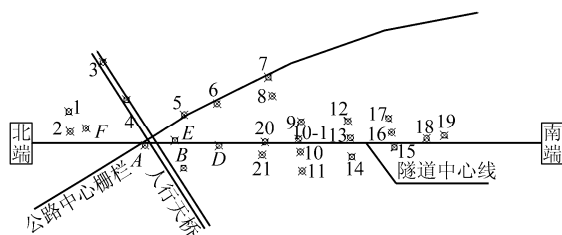


图 10 地表变形监测点布置图

Fig.10 Distribution of survey points on the ground surface

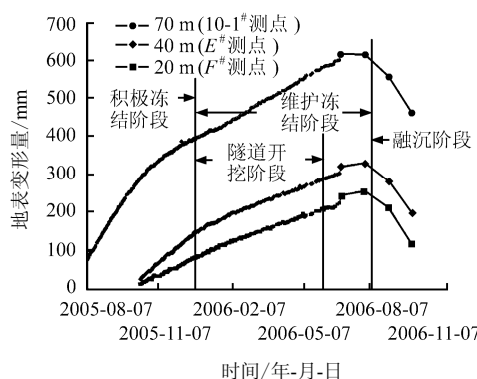


图 11 距南端不同位置处地表位移与时间关系曲线

Fig.11 Relationship between surface deformation and time according to variable distance from the south section

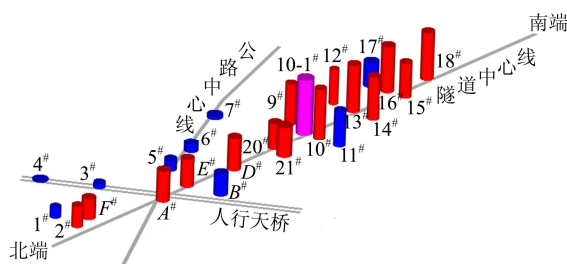


图 12 各监测点最大冻胀量示意图

Fig.12 Sketch map of the maximum frost heave in the field

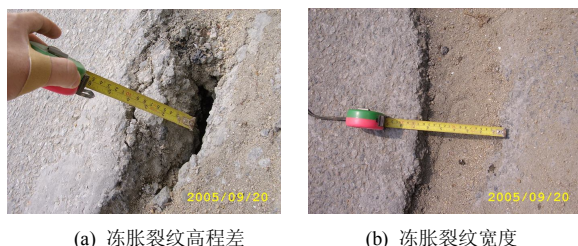


图 13 冻结施工造成地表破损情况

Fig.13 Surface damages caused by the freezing construction

仰拱钢筋隔栅安装后, 钢筋应力快速增加, 随后基本稳定。II 区钢筋受力明显高于 I 区对称位置受力, 最大值接近 60 MPa。沿隧道掘进方向, 45 m

处 I 区钢筋受力接近 20 m 处相同方位钢筋应力的 3 倍。后期受隧道下部 III、IV 区开挖影响, 各处钢筋应力均略有增加, 最终钢筋应力分别为 43.1、62.8 MPa 和 96 MPa, 远低于破坏强度, 见图 14。

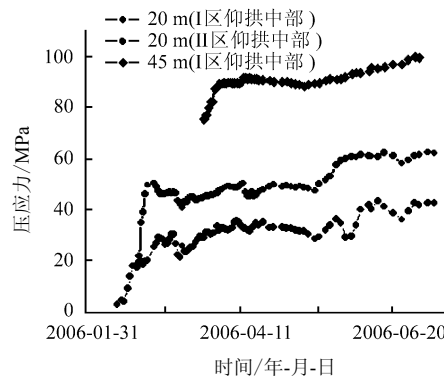


图 14 钢筋应力曲线

Fig.14 Stress-time curves of the reinforced bar in the liner

#### 4.6 隧道变形监测分析

隧道衬砌位移监测主要分拱顶沉降监测和水平收敛监测, 监测点布置位置见图 3(a)。

##### (1) 拱顶沉降监测

以距南端 14 m 处 II 区拱顶沉降监测情况为例, 分析发现, 拱顶沉降与施工进度密切相关, 总体呈先增后降的变化趋势, 如图 15 所示(负号表示沉降)。

隧道开挖至监测断面后沉降量急剧增加, 最大约 6.5 mm; 随后随着开挖的继续, 该断面拱顶沉降反而逐渐减小, 其主要因为随着隧道开挖空间逐渐加大, 隧道底部隆起现象初步显现, 由于竖向临时支撑的存在, 使得底部隆起所产生的应力传递至顶拱, 导致拱顶局部上移, 拱顶沉降减小。后期又因临时支撑的拆除, 沉降量再次增加, 但增加的数值相对开挖时较小。同时, 分析发现隧道上部开挖对拱顶沉降影响较大, 下部开挖的影响相对较小。

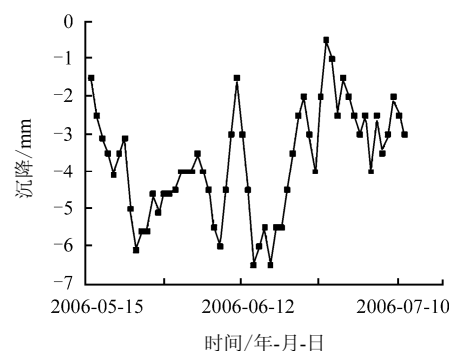


图 15 距南端 14 m 处 II 区拱顶沉降曲线

Fig.15 Vertical displacements of tunnel at the No.2 excavated phase near the 14 m far to the south working station

## (2) 水平收敛监测

隧道断面刚开挖后, 两侧壁向内迅速收敛, 距南端 35 m 范围内, 隧道水平收敛平均约为 8 mm, 最大为 14 mm。随后由于垂直应力场和水平临时刚性支撑的作用, 水平收敛量反而减小; 而临时支撑拆除后, 收敛值再次增大, 最终收敛值平均约为 3 mm。同拱顶沉降点相同, 由于防水的施工, 隧道开挖结束后, 监测结束。图 16 为距南端 20 m 处隧道水平收敛变形情况 (负号表示收敛)。

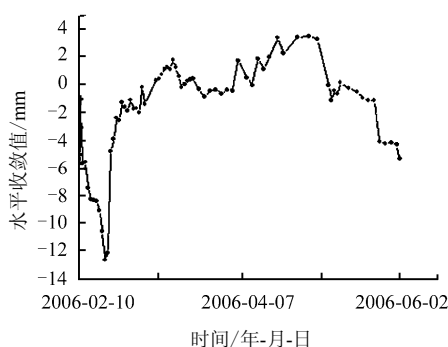


图 16 水平收敛曲线

Fig.16 Horizontal convergence of tunnel

## 5 结 论

(1) 根据对盐水温度、土层温度场、地表变形等参量的综合评价, 认为冻结帷幕达到了设计要求, 较好地保证了施工安全。但工程积极冻结时间长达 162 d, 导致南北两端冻结壁有效厚度均大大超过设计尺寸, 不但造成隧道开挖的困难和较大的地表变形, 而且增加了工程造价。根据监测数据, 可适当缩短积极冻结期; 同时, 由于隧道开挖对地表变形未造成影响, 因此可增大单步开挖进尺, 减少施工循环次数, 加快工程进度, 不仅利于缩短工期、降低工程造价, 且能够减小冻胀危害。

(2) 盐水温度监测表明, 冻结开始 100 d 左右去回路盐水温差减小到 1 °C 以内, 冻结壁热交换达到相对的平衡, 冻结帷幕基本形成。在积极冻结期, 沿测温孔深度方向土体温度的变化梯度随冻结时间增加不断减小; 土体温度变化速率也随时间增加而降低。

(3) 地表变形可分为 3 个阶段, 即快速冻胀阶段、缓慢冻胀阶段和融沉阶段。快速冻胀阶段冻胀变形速率平均约为 2.5 mm/d, 最大接近 4 mm/d。缓慢冻胀阶段, 冻胀平均速度降为 2.2 mm/d 左右。融沉阶段, 融沉变形速率约为 2.5 mm/d, 最大接近 4 mm/d, 说明该工程区域地层热量传递较快、地下水

迁移迅速; 在夏季针对该地层条件采用冻结法施工是正确的, 但应有针对性的设置泄压孔对冻胀进行有效控制。

(4) 初期支护结构内钢筋应力远低于材料强度, 拱顶沉降和隧道水平收敛变形较小, 说明 CRD 工法开挖是适用的, 也说明冻结帷幕很好地抵抗了外部荷载, 保证了初期支护结构的稳定。

**致谢:** 本课题研究过程中得到了翁家杰教授的诸多宝贵建议, 在此表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] TALAMUCCI F. Freezing processes in porous media: formation of ice lenses, swelling of the soil[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2003, 37: 595—602.
- [2] PING YANG, JIE-MING KE, WANG J G, et al. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2006, 33: 330—340.
- [3] WANG W S, WANG J P, JING S W, et al. Experimental study of temperature field in course of ground freezing[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2004, 33(4): 388—391.
- [4] 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 Da-yong, LV Ai-zhong, ZHANG Qing-he, 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.
- [5] SHUANGYANG LI, YUANMING LAI, MINGYI ZHANG, et al. Minimum ground pre-freezing time before excavation of Guangzhou subway tunnel[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 46: 181—191.
- [6] 周晓敏, 苏立凡, 贺长俊, 等. 北京地铁隧道水平冻结法施工[J]. *岩土工程学报*, 1999, 31(3): 319—322.  
ZHOU Xiao-min, SU Li-fan, HE Chang-jun, et al. Horizontal ground freezing method applied to tunneling of Beijing underground railway system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(3): 319—322.

- [7] WEI MA, CONG-HUI SHI, QING-BAI WU, et al. Monitoring study on technology of the cooling roadbed in permafrost region of Qinghai-Tibet plateau[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2006, 44: 1—11.
- [8] 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): 2643—2646.
- QIAO Jin-sheng, TAO Long-guang, MI Shang-yin. 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): 2643—2646.
- [9] 汤志斌. 冻结法施工[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 1—17.
- [10] 郑波, 张建明, 常小晓, 等. 广州地铁隧道冻结工程冻土力学特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 893—897.
- ZHENG Bo, ZHANG Jian-ming, CHANG Xiao-xiao, et al. Mechanical properties study of artificially frozen soil in tunnel engineering of Guangzhou metro[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(5): 893—897.