

复杂场地中盾构出洞水平冻结法现场试验

郜新军¹, 李铭远^{1,2}, 张景伟¹, 宋建学¹

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450004)

摘要 目的 研究复杂场地地下盾构出洞水平冻结法冻结特性及对周围环境的影响, 为今后类似工程提供指导。**方法** 结合郑州地铁17号线双鹤湖站南端头盾构出洞水平环形冻结工程, 基于现场试验, 对冻结温度场及位移场进行系统研究。**结果** 降温期间盾构推进注浆会造成测温孔测点温度小幅上升; 邻近基坑降水导致左线各个测温孔降至0℃以下所用天数总体比右线多6d; 在平均含水率相差不大的前提下, 粉砂在到达冰点后仍可继续以较快的速度降温; 左、右线距离冻结管较远试验孔所测得的发展速度分别是较近试验孔的2.40倍、6.03倍; 离冻结区越近, 冻胀位移越大, 冻结区最大冻胀量约是非冻结区的1.70倍。**结论** 土质本身比平均含水率对冻结的影响更大; 冻结壁向外扩展速度随着与冻结管距离的增加而变慢; 盾构推进注浆对冻结效果影响较小, 然而地下水的流动对降温以及地表竖向位移会有较大的影响, 显著影响冻结加固效果。

关键词 盾构出洞; 水平冻结法; 现场试验; 温度场; 位移场

中图分类号 TU443

文献标志码 A

Field Test of Horizontal Freezing Method for Shield Tunneling in Complex Sites

GAO Xinjun¹, LI Mingyuan^{1,2}, ZHANG Jingwei¹, SONG Jianxue¹

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. China Construction Seventh Engineering Division Co. Ltd., Zhengzhou, China, 450004)

Abstract: In order to study the freezing characteristics and the influence on the surrounding environment of the horizontal freezing method of shield tunneling under the condition of complex site, combined with the horizontal annular type freezing engineering of the south end shield tunneling of Shuanghehu station of Zhengzhou metro line 17, the temperature field and the frost heave displacement field of the horizontal annular type freezing are systematically studied through the field measurement method. The results show that during the cooling period, the temperature of the measuring point will rise slightly. Due to the dewatering near the foundation pit, the number of

收稿日期: 2020-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078469, 41602297); 河南省科技攻关项目(182102310009)

作者简介: 郜新军(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事地下工程方面研究。

days taken for each temperature measuring hole on the left line to drop below $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ is 6 days more than that on the right line. The soil itself has a greater influence on freezing than the average moisture content of the soil layer. On the premise that the average moisture content is similar, the silt can continue to cool down at a faster speed after reaching the freezing point. The development speed measured by the test hole far away from the freezing pipe on the left line and the right line is 2.40 times and 6.03 times of that measured by the test hole near the freezing pipe, respectively. And the closer to the frozen zone, the greater the frost heave displacement. The maximum frost heave in the frozen zone is about 1.70 times of that in the non frozen zone. To sum up, the soil itself has more influence on freezing than the average moisture content. With the increase of the distance from the freezing pipe, the expansion speed of the freezing wall becomes slower. Shield synchronous grouting has little influence on freezing effect, but groundwater flow has great influence on cooling and surface vertical displacement, which significantly affects freezing reinforcement effect.

Key words: shield tunneling; horizontal freezing method; field test; temperature field; displacement field

盾构出洞时遇到的场地条件和地质条件越来越复杂,冻结法以其特有优势在盾构始发与接收施工中展现了广阔的应用与发展前景^[1]。目前,国内外学者针对该工法采用现场实测^[2-3]、室内试验^[4-6]、理论分析^[7-8]和数值分析^[9-10]等方法进行了全面研究。蔡海兵等^[11]利用随机介质理论建立起冻胀所引起地表隆起和水平位移的预测方法,改进了冻结外锋面半径和冻胀区域外半径的确定方法。晏启祥等^[12]介绍了冻结法在广州地铁的应用实例,测得了盐水温度和土体温度,并在实测的基础上模拟了冻结锋面的扩展过程,同时计算了冻结壁的厚度和平均温度,验证了人工冻结法的实际应用效果。M. Vitel^[13]和 A. Mauro^[14]分别建立各自的传热模型,研究不同地质条件下的传热过程并可对温度场进行预测。A. Marwan^[15]等将多相流模型与蚁群算法(ACO)相结合,在考虑渗流的情况下寻找冻结管的最佳位置,优化隧道冻结,缩短了冻结时间并降低了能耗。

综上所述,尽管国内外学者通过不同方法,对冻结法应用在地铁盾构隧道工程进行了大量分析与研究,但大多数研究都是针对联络通道且所加固土体规则的情况,对于盾构进出洞时冻结加固土体形状不规则且加固

土体周围有近接既有地下构筑物时的研究较少。而地铁盾构进出洞土体采用冻结法施工不可避免地会引起周围土体的应力变化及土体的变形,进而诱发周围土体中既有地下构筑物的变形,若不采取一定的措施,变形过大将引起地下构筑物的损坏,造成巨大的经济损失及社会影响。基于上述分析,笔者基于郑州地铁17号线双鹤湖站南端头盾构出洞所采用的环形水平冻结法端头加固盾构接收工艺,对复杂场地条件下盾构出洞水平冻结法冻结特性及对周围环境的影响进行研究,得出富水粉砂粉质黏土地层冻结温度场、地表变形及邻近既有地下商场位移变化规律,旨在为今后类似设计优化及相关工程提供参考。

1 工程概况

1.1 工程环境与水文地质条件

图1为双鹤湖南端、加固区与地下商场位置关系。由图1(a)可知,双鹤湖站南端头盾构出洞处受18号线基坑开挖和地下商场结构影响,地面不具备土体加固条件。为保证盾构成功接收,需采用水平冻结法进行地层加固。出洞前,盾构近距下穿双鹤湖地下商场,冻结位置所在土体为由地下商场及车站围护结构组成的不规则场地,其中最外侧

冻结壁距离既有地下商场水平距离约 3.41 m,竖向距离约 6.89 m,具体位置关系见图 1(b)。

双鹤湖站地下水位标高为 +104.70 m,水平冻结影响的土层主要为③_{21D} 细砂、

③₂₂粉质黏土、③_{22C}粉砂和③₂₃粉质黏土,具体地质分布见图 1(b)。土体的物理特性指标见表 1。盾构中心埋深约为 22.10m。管片外径 Φ6.200 m,洞门直径 Φ6.700 m。

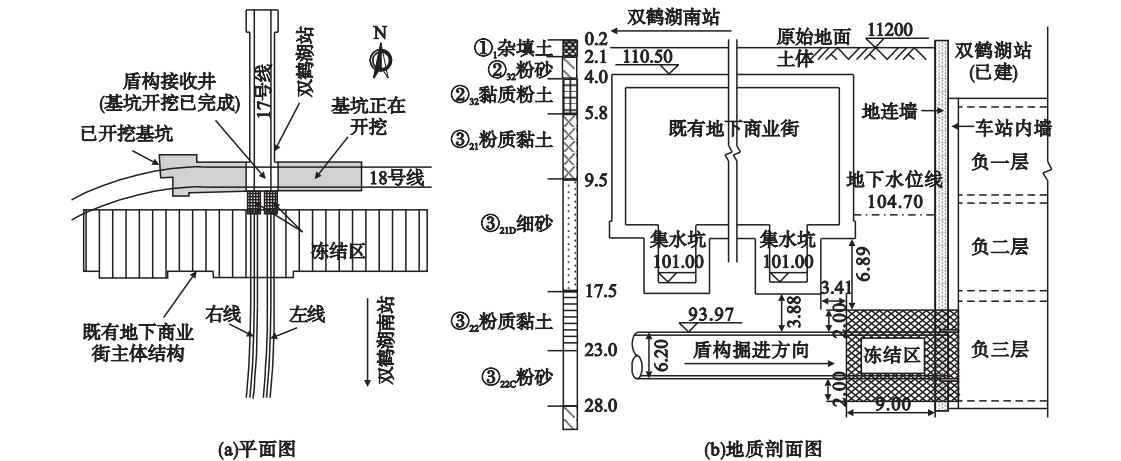


图1 双鹤湖南端、加固区域与地下商业街位置关系图与地质剖面图

Fig. 1 Location relation map and geological section map of south end, reinforcement area and underground commercial street of Shuanghehu station

表1 现场实测各土层物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of each soil layer measured on site

地层代号	岩土名称	天然重力密度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
① ₁	杂填土	18.0	—	6.0	15.0
② ₃₂	黏质粉土	18.2	0.62	11.0	21.0
② _{32C}	粉砂	18.5	0.77	0	24.0
③ ₂₁	粉质黏土	18.5	0.73	23.0	16.5
③ _{21D}	细砂	20.0	—	0	30.0
③ ₂₂	粉质黏土	18.6	0.67	26.4	17.0
③ _{22C}	粉砂	20.0	0.77	0	30.0
③ ₂₃	粉质黏土	18.7	0.66	27.8	17.8

1.2 冻结加固方案及参数设计

该冻结法采用环形水平冻结法,冻结孔沿着水平方向布置。盾构接收洞门处左、右线圆柱体冻结孔沿开洞口 Φ7.8 m 圆形布置,冻结孔数 32 个(单洞),有效冻结长度为 10.9 m。冻结管规格为 Φ89 × 8,长度为 10.9 m,见图 2。冻结壁设计厚度为 2.00 m,

设计最低盐水温度为 -28 ~ -30 ℃,冻结壁交圈时间为 20 ~ 23 d,冻结时间不宜超过 45 d,维护期间冻结盐水温度 ≤ -25 ℃。冻土强度的设计指标取值:单轴抗压强度 4.0 MPa,抗弯强度 2.0 MPa,抗剪强度 1.8 MPa(-10 ℃)。设计要求冻结壁平均温度为 -8 ~ -10 ℃,冻结壁与地连墙界面平均温度 ≤ -5 ℃。

2 现场试验方案

2.1 测温孔布置

在每个洞口冻结管外侧布置 4 个测温孔(C1、C2、C3 和 C4)和 3 个试验孔(SY1、SY2 和 SY3),测温孔和试验孔规格均为 Φ32 × 3,孔深 11 m。测温孔圆心距离最近冻结孔圆心 0.957 m;试验孔 SY1 ~ SY3 距离最近冻结孔距离依次是 0.685 m、0.950 m、1.230 m。其中左线的 C4 和左线 SY2,右线的 C3 和右线的 SY2 分别共用一个孔。单个测温孔设 6 个测点,分别位于土体中 0.6 m、

2.6 m、4.6 m、6.6 m、7.6 m、8.6 m处。单个试验孔设4个测点,分别位于土体中1.6 m、3.6 m、5.6 m、8.6 m处。各个冻结管与测温孔位置见图2,现场布设见图3。

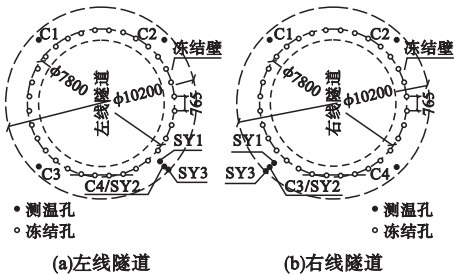


图2 隧道水平冻结孔与测温孔分布图

Fig. 2 Location of horizontal freezing hole and temperature measuring hole in tunnel

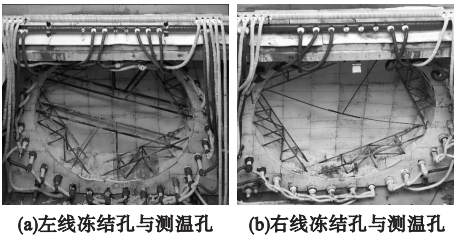


图3 隧道水平冻结孔与测温孔现场监测图

Fig. 3 Field diagram of freezing hole and temperature measuring hole in tunnel

2.2 位移监测点布置

施工中对上方土体位移及地下商业街的竖向位移分别进行监测。D-01 ~ D-09 是位于基坑顶部地下连续墙外侧3 m处的地表位移监测点,J-01 ~ J-14 是地下商业街底板的监测点,其位置见图4所示。

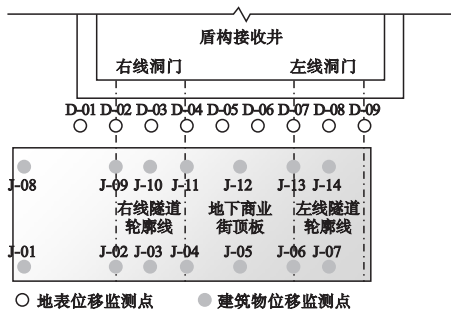


图4 地表位移和建筑物位移监测点位置示意图

Fig. 4 Location diagram of monitoring points for surface settlement and building settlement

3 现场试验结果分析

3.1 温度场试验结果分析

右线隧道与左线隧道在冻结期间共用一个冻结系统,其中,右线于2019年6月2日开始冻结,历时90天;左线于2019年6月16日开始冻结,历时105 d。

3.1.1 去回路盐水温度分析

冻结期间盐水去回路温度变化如图5所示。盐水温度变化可划分为5个阶段:①快速降温期。冻结前7天,平均降温速率为2.38℃/d。盐水去回路温差最大为1.69℃,差值较大。②二次降温期。左线于第17天开始冻结,去路盐水温度于第16天回升至-18.12℃,随后恢复正常。在第24天下降至设计盐水温度-28.09℃,去回路温差也逐步增大至第20天的1.43℃,而后缓慢降至第24天的1.18℃。③帷幕形成期。左右线均正式开始冻结后温度稳定在-29℃左右,而在此阶段温差稳步下降至0.85℃,这说明发生热量交换,冻结壁正在形成。④稳定降温期。此阶段温度稳定在设计温度-28~-30℃,温差趋于稳定趋势,但在第51天右线盾构出洞后,温差均值由之前的0.83℃小幅上升并稳定在0.88℃左右。⑤冻结维护期。冻结81 d后左右线贯通,但在冻结第83天洞门割除多余半环管片施工时操作不当从而碰裂冻结管,导致该温度小幅上升,此后盐水恢复正常。

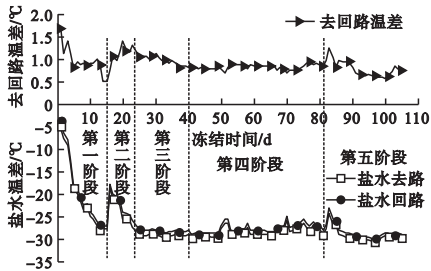


图5 盐水干管去回路盐水温度与冻结时间关系曲线

Fig. 5 Inlet and outlet temperature curves of salt-water changing with freezing time

3.1.2 冻结温度监测分析

(1) 右、左线测温孔温度监测分析

右、左线测温孔温度变化如图 6 所示。由图 6 可知,冻结刚开始时,盐水与地层温差较大,热交换剧烈,测温孔降温较快,接近于线性分布。随着温度降低,降温速率在逐渐变小。在温度接近 0℃ 时,地下水发生相变,释放潜热,导致测温孔各测点温度下降变缓。由于冻结系统持续给土体提供冷量,冻结单柱逐渐交圈形成冻结帷幕,此后帷幕继续以较快速度扩展,厚度增大,测温孔温度又开始

逐步下降。在冻结 48 天后,冻结帷幕接近设计厚度,发展速度逐渐变慢,测温孔测点温度趋于稳定。在冻结壁厚度和平均温度达到设计安全要求后,盾构进入冻结区随后安全出洞。冻结第 51 天,右线隧道盾构处于冻结区,盾构推进进行同步注浆。测温孔 C1 在冻结第 52 天各个测点温度均分别小幅骤升了 1.28、1.69、1.63、1.55、1.29、0.93℃,随后又恢复正常趋势,对冻结效果并未产生明显影响。测温孔 C3、C4 回温较慢,测点最大回温速率测为 0.14、0.12℃/d。

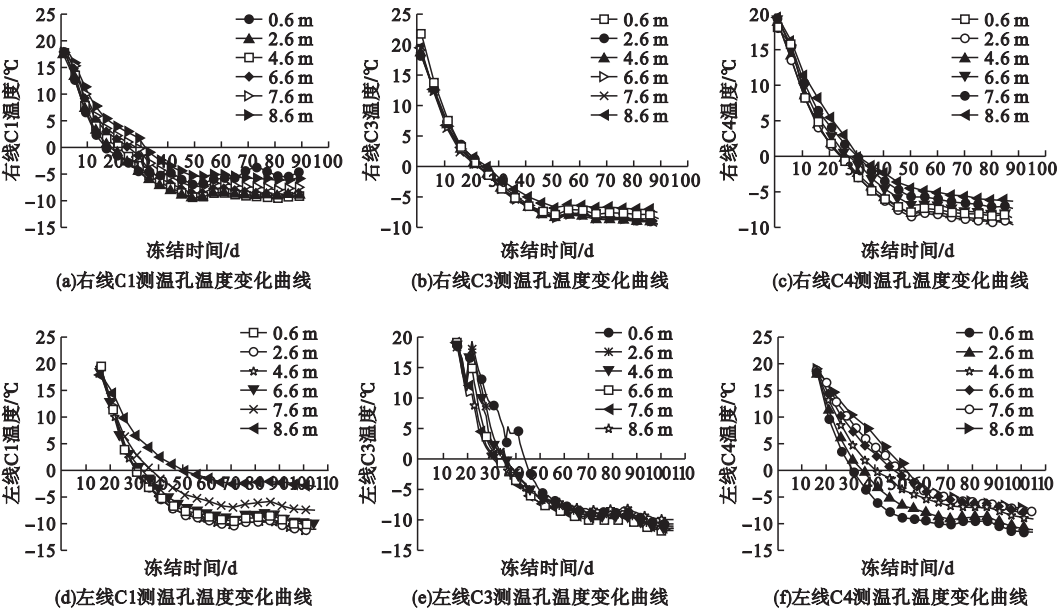


图 6 右线、左线测温孔温度变化曲线

Fig. 6 Temperature variation curves of measuring holes on the right and left lines

由图 6 可知,左线 C3 测温孔分别于第 20 天、36 天各个测点温度出现骤升,这是由于东侧邻近基坑的施工单位两次进行开挖降水,由于冻结产生冻胀力,地下水产生流动,带走了冻结区大量冻结冷量。由折线图可以看出,降水对冻结法施工的影响较大,且对测温孔温度的影响从外侧测点到内侧测点依次减小。冻结第 42 天,在左线 C3 测温孔旁布置一个伸入土体 0.7 m 的注浆孔,注入水泥浆后温度正常下降。左线隧道盾构于冻结第 71 天进入冻结区。C4 测温孔仅 0.6、2.6 m

处测点出现回温,其回温速率为 0.15、0.10℃/d。左线未出现骤升,左线温度受盾构推进同步注浆的影响较右线小,上部测温孔受同步注浆影响回温较下部快。其次,选取位于不同土层的测温孔在同一入土深度的测点温度,对其进行分析。C1 处于③₂₂粉质黏土,C3 处于③_{22c}粉砂,其平均含水量分别为 20.1%、18.9%,相差不大。右线 C1、C3 在 0.6 m 处和 6.6 m 处测点温度变化曲线如图 7 所示。

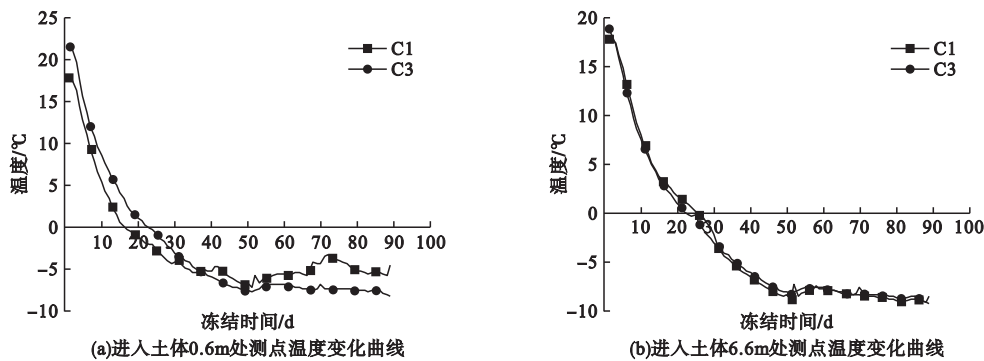


图 7 右线 C1、C3 在 0.6 m 处和 6.6 m 处测点温度变化曲线

Fig. 7 Temperature variation curves of measuring points C₁, C₃ on the right line at 0.6 m and 6.6 m

由图 7 可知,当入土深度相同、土质不同时,冻结降温均是由开始时接近于线性分布的快速降温逐渐趋于稳定。当温度在 0℃左右时,粉质黏土发生相变释放潜热所需时间比粉砂所需时间较长,下降速度较慢。在其平均含水率相差不大的前提下,粉砂到达冰点后仍以较快的速度降温,从而得出其原因

是由粉砂的土质所决定的,而并非含水率。
(2)右、左线试验孔温度监测分析
为了研究冻结锋面的扩展速度与扩展规律,对右、左线试验孔温度变化曲线(见图 8)进行分析研究。SY1、SY2、SY3 分别为距离冻结孔所形成圆环 550 mm、850 mm、1 150 mm 的试验孔。

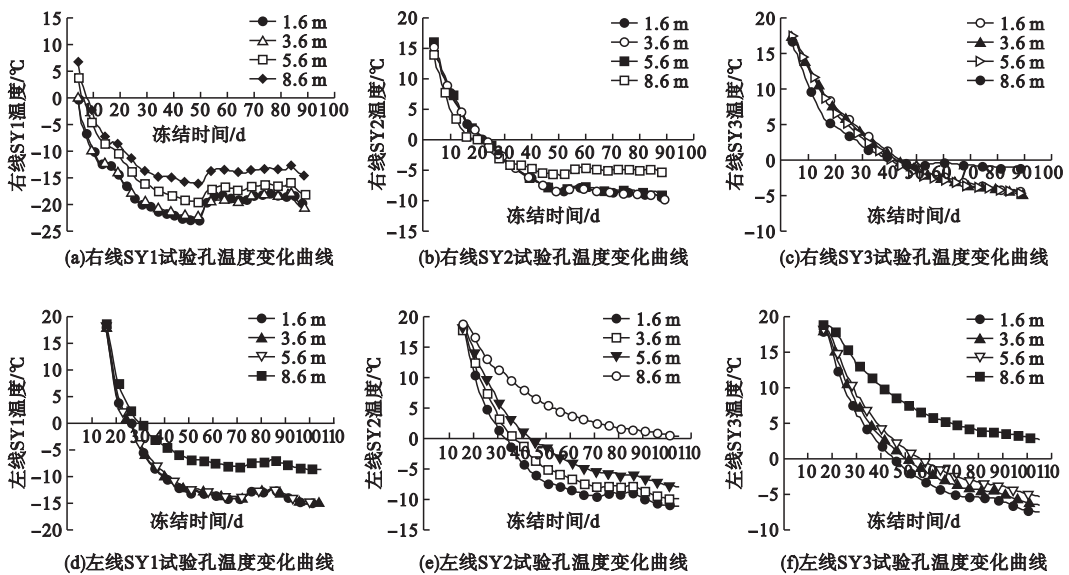


图 8 右线、左线试验孔温度变化曲线

Fig. 8 Temperature variation curves of test holes on the right and left lines

由图 8 可知,右线盾构于第 49 天进入冻结区,受到盾构推进同步注浆产生水化热影响,SY1 出现持续 7 天的升温,由外到内各个测点分别上升了 4.76、3.42、3.00、2.82℃;SY2 各测点升温持续 5 天,由外到内各个测点分别上升了 0.57、0.61、0.75、1.22℃;

SY3 仅出现 2 天小幅升温的现象,由外到内各个测点分别上升了 0.75、0.63、0.83、0.31℃。由此可知,距离冻结管越远,温度上升现象持续天数越短,且各个测点温度整体上升越少。

3.2 位移场现场实测分析

3.2.1 地表位移监测分析

洞口地表 D-01 ~ D-09 监测点的地表变形如图 9 所示。由图可知,各个地表监测点竖向位移变化趋势大致相同,且地表监测点竖向位移整体呈现先上升后下降的趋势。

由图 9(a)知,地表竖向位移变化可大致分为四个阶段:①缓慢冻胀期。随着右线开始冻结,地表发生小幅冻胀。但在第 19 天,由于左线洞门内存在空鼓,地下水流出,致使地表有所沉降。随着左线洞门堵漏完毕且左线开始冻结,地表继续出现小幅隆起。②迅速冻胀期。此阶段各个测温孔温度均已下降至 0℃ 以下,冻土单柱交圈形成冻结帷幕,导

致地表竖向位移迅速上升。右线盾构于第 51 天出洞导致土体应力释放,当地地表出现极小下沉。出洞后由于盾构推进同步注浆,监测点出现上抬趋势。监测点 D-01、D-02、D-03 的最大冻胀量于第 58 天出现,分别为 1.79、2.87、2.66 mm。③小幅沉降期。左、右线盾构均顺利出洞,进入维护冻结期,地表冻胀量逐渐减少直至下沉。④二次沉降期。由于冻结停机后进行注浆,导致地表竖向位移出现短暂上升。此后冻结土体逐步融化,体积变小,土体在自重的作用下发生融沉。D-01、D-02、D-03 最大融沉量分别为 -4.31、-5.18、-9.69 mm。

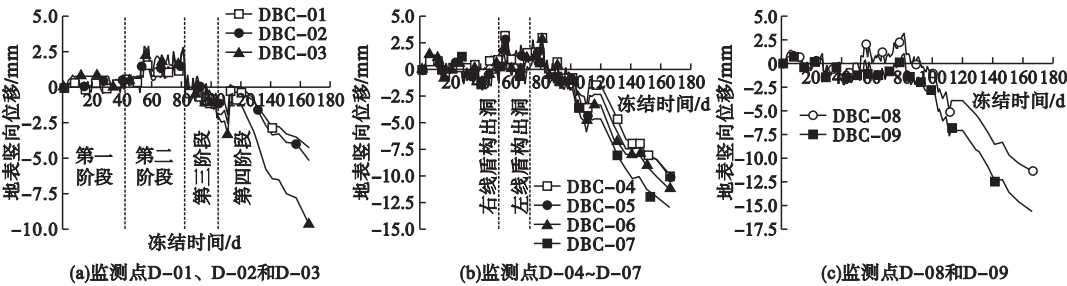


图 9 地表监测点竖向位移变化曲线

Fig. 9 Vertical displacement curves of surface monitoring points

由图 9(b)知,在整个冻融过程中,监测点 D-04、D-05、D-06、D-07 最大冻胀量、最大融沉量分别是 3.28、2.89、2.78、2.09 mm; -9.91、-10.07、-11.29、-13.05 mm。结果表明,距离东侧邻近基坑越近,地表冻胀量越小,地表工后融沉量越大。

由图 9(c)知,监测点 D-08、D-09 最大冻胀量、最大融沉量分别为 3.21 mm、1.06 mm; -11.36 mm、-15.77 mm。由于邻近基坑降水导致地下水流失,监测点 D-09 受到较为明显的影响。

右、左线盾构先后于冻结第 51 天、71 天进入冻结区,于冻结第 52 天、72 天出洞。地表监测点 D-01 ~ D-09 在该时间的竖向位移情况如表 3 所示。

表 3 左、右线地表监测点竖向位移

Table 3 Vertical displacement of surface monitoring points on the left and right lines

冻结 时间/ d	地表监测点竖向位移(D-0i)/mm								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
51	0.22	0.81	0.79	0.98	0.24	0.58	0	0.06	-1.12
52	-0.32	-0.04	-0.36	-0.16	-1.13	-0.73	-1.26	0.86	-1.83
71	1.09	2.30	1.44	1.64	1.02	1.11	0.26	1.03	-0.77
72	0.94	1.58	1.39	1.44	0.71	0.83	0.02	0.68	-1.04

由表 3 可看出,盾构推进同步注浆导致地表小幅隆起,出洞后竖向位移减小,甚至下沉。且邻近东侧开挖基坑的监测点的竖向位移均小于远离该基坑监测点的竖向位移。左线隧道上方监测点 D-07、D-08、D-09 的竖向位移也均小于右线隧道上方监测点 D-02、

D-03、D-04。

根据规程^[16]要求,地表沉降累计报警值为+10~-30 mm。以上土体的变形结果满足规范的要求。

3.2.2 地下商业街位移监测分析

地下商业街位移的监测如图 10 所示。建筑物竖向位移值随施工进行一直处于增大趋势,各测点上升趋势大致相同,且随着冻结时间的延长,特别是在盾构出洞后各测点冻胀程度的差别逐渐增大,各测点竖向位移的累计变化量也趋于平稳。其中冻结期间竖向

位移变化最大的是 J-04 监测点,最大位移为 14.11 mm;冻结结束后,竖向位移变化最大的是 J-13 监测点,最大位移为 17.75 mm。从图 10 中也可以看出,冻结期间距离洞口远的一排的监测点的抬升量总体比近的一排监测点的抬升量大;冻结结束后距离洞口近的一排的监测点的抬升量总体比远的一排监测点的抬升量大。总体来说,和规程^[16]要求的邻近建(构)筑物累计垂直位移不能超过 30 mm相比,该变形在可控范围内。

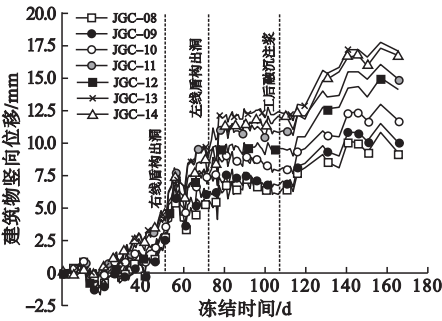
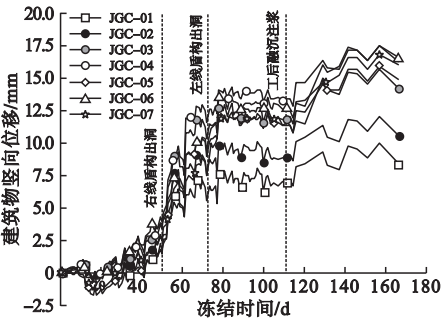


图 10 建筑物位移监测点位移量随时间变化曲线

Fig. 10 Settlement variation curves of building settlement monitoring points

4 结 论

(1)在整个冻结期间,同一测温孔、不同深度的测温点降温趋势大致相同。但在降温过程中,盾构推进注浆会造成离开挖圆环较近的试验孔出现温度暂时小幅上升现象,随后温度趋于平稳,在此期间并未对冻结产生明显不利影响。

(2)土质本身对冻结的影响比土层平均含水率更大,且在平均含水率相差不大的前提下,粉砂在到达冰点后仍可保持较快的降温速率。

(3)在冻结管圆环外圈,冻结帷幕扩展速度随与冻结管距离的变远而变缓。左、右线较远试验孔测得的扩展速度分别是近侧孔的 2.40 倍、6.03 倍。

(4)冻结法施工期间,地表位移变化趋势大致相同,可分为 4 个阶段。距离冻结区

域越近,冻胀位移就越大,冻结区域最大冻胀量约是非冻结区的 1.7 倍。工后注浆期间,东侧邻近基坑开挖降水致使地下水系导通,冻结区域的融沉量较大。

(5)邻近基坑降水导致左线各个测温孔下降至 0℃以下所用天数总体上比右线多 6d。在地表监测排点中,D-09 的最大冻胀量最小,最大融沉量最大。由此可看出,地下水的流动对冻结温度以及地表竖向位移会有较大影响,从而明显影响冻结加固效果。

(6)该工法的成功应用说明本工程中的冻结参数可为今后类似工程提供参考,本工程的实测结果分析可为今后类似工程施工提供安全措施依据。

参考文献

[1] 陈湘生. 地层冻结法[M]. 北京:人民交通出版社,2014.
(CHEN Xiangsheng. Ground freezing method

- [M]. Beijing: China Communication Press, 2014.)
- [2] 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. (SHI Quanbin, YANG Ping, ZHANG Ting, et al. Vertical freezing reinforcement and monitoring in site for tunnel shield-launching end in soft soil stratum [J]. Journal of Nanjing forestry university (natural sciences edition), 2015, 39(6): 125-130.)
- [3] 冯浩, 闫格. 曲线盾构隧道施工地表沉降分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(6): 971-980. (FENG Hao, YAN Ge. Analysis and calculation of surface settlement in curved tunneling section [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(6): 971-980.)
- [4] LAI Y M, LI J B, LI Q Z. Study on damage statistical constitutive model and stochastic simulation for warm ice-rich frozen silt [J]. Cold regions science and technology, 2012, 71(2): 102-110.
- [5] 李方政, 丁航, 张绪忠. 渗流作用下富水砂层双排管冻结壁形成规律模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 386-395. (LI Fangzheng, DING Hang, ZHANG Xuzhong. Model test research of formation law of double-row-pipe freezing wall in water rich sand layer under seepage [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2019, 38(2): 386-395.)
- [6] 魏新江, 庄家煌, 丁智, 等. 地铁循环荷载作用下冻融土滞回曲线及阻尼比特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2092-2102. (WEI Xinjiang, ZHUANG Jiahuang, DING Zhi, et al. Research on the characteristics of hysteretic curves and damping ratio of frozen-thawed soils under cyclic subway loading [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2019, 38(10): 2092-2102.)
- [7] 胡向东, 陈锦, 汪洋, 等. 环形单圈管冻结稳态温度场解析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 874-880. (HU Xiangdong, CHEN Jin, WANG Yang, et al. Analytical solution to steady-state temperature field of single-circle-pipe freezing [J]. Rock and soil mechanics, 2013, 34(4): 874-880.)
- [8] 曹雪叶, 赵均海, 张常光. 基于统一强度理论的冻结壁弹塑性应力分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 769-774. (CAO Xueye, ZHAO Junhai, ZHANG Changguang. Elastoplastic stress analysis of frozen soil wall based on unified strength theory [J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(3): 769-774.)
- [9] 郑立夫, 高永涛, 周喻, 等. 浅埋隧道冻结法施工地表冻胀融沉规律及冻结壁厚度优化研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1-11. (ZHENG Lifu, GAO Yongtao, ZHOU Yu, et al. Research on surface frost heave and thaw settlement law and optimization of frozen wall thickness in shallow buried tunnel using freezing method [J]. Rock and soil mechanics, 2020, 41(6): 1-11.)
- [10] HU Jun, LIU Yong, WEI Hong, et al. Finite element analysis of heat transfer of horizontal ground-freezing method in shield-driven tunneling [J]. International journal of geomechanics, 2017, 17(10): 04017080.
- [11] CAI Haibing, LIU Zheng, LI Sheng, et al. Improved analytical prediction of ground frost heave during tunnel construction using artificial ground freezing technique [J]. Tunnelling and underground space technology, 2019, 92: 103050. 1-103050. 9.
- [12] YAN Qixiang, WU Wang, ZHANG Chuan, et al. Monitoring and evaluation of artificial ground freezing in metro tunnel construction-a case study [J]. KSCE journal of civil engineering, 2019, 23(5): 2359-2370.
- [13] VITEL M, ROUABHI A, TIJANI M, et al. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities [J]. Computers & geotechnics, 2015, 63(1): 99-111.
- [14] MAURO A, NORMINO G, CAVUOTO F, et al. Modeling artificial ground freezing for construction of two tunnels of a metro station in Napoli (Italy) [J]. Energies, 2020, 13(5): 1272.
- [15] MARWAN A, ZHOU M M, ABDELREHIM M Z, et al. Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow [J]. Computers & geotechnics, 2016, 75(5): 112-125.
- [16] 河南省住房和城乡建设厅. 河南省城市轨道交通联络通道冻结法施工技术规范: DBJ41/T175—2017 [S]. 郑州: 郑州大学出版社, 2017. (Housing and Urban Rural Construction Department of He'nan Province. The technical code for freezing method in urban rail transit subway cross passage: DBJ41/T175—2017 [S]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2017.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)