

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.016

浅埋富含水砂层盾构下穿敏感性建筑水平冻结+短钢箱接收技术*

马俊¹, 杨平¹, 刘增光², 陈亮²

(1. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 常州市轨道交通有限公司, 江苏 常州 213022)

摘要: 盾构始发与接收是盾构法隧道施工的关键风险点, 以常州地铁1号线一期工程博爱路站-常州火车站区间下行线盾构接收工程为例, 隧道下穿常州火车站站厅, 隧道顶部距地下大厅结构底板仅3.75 m, 受地面条件限制采用水平冻结加固方式。通过对冻结温度场、卸压孔压力及车站底板隆起进行跟踪监测与分析, 结果表明: 受地下水影响温度下降缓慢, 车站底板因冻胀隆起较大, 最大隆起处位于隧道端头中心线处约为46 mm, 且底板隆起值与测点温度的变化密切相关; 为防止温度低引起冻胀过大造成上部结构破坏, 采取在冻结壁外围适度卸水进行卸压措施; 在冻结壁交圈但厚度尚未完全达到冻结设计要求情况下, 提出加装短钢箱装置进行盾构接收。实践表明, 适度卸压水平冻结+加装短钢箱接收方式密封止水效果良好, 安全可靠, 可为今后类似工程提供可行技术。

关键词: 水平冻结; 冻结温度场; 隆起监测; 加装短钢箱; 盾构接收

中图分类号: U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0260-08

Horizontal Freezing and Short Steel Box Receiving Technology for Shield Beneath Sensitive Building under Shallow Buried Water-rich Sand Layer

MA Jun¹, YANG Ping¹, LIU Zengguang², CHEN Liang²

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Changzhou Urban Rail Transit Construction Ltd, Changzhou 213022, China)

Abstract: Shield launching and receiving is the key risk point in shield tunnel construction. This paper took the shield receiving project in the downlink line of Changzhou Metro Line 1 of Boai Road station to Changzhou Railway Station as an example. The tunnel is underneath the Changzhou Railway Station and the top of the tunnel is only 3.75 m from the structure floor of the underground hall. Restricted by ground conditions, horizontal freezing method was adopted for the shield receiving construction. The freezing temperature field, the pressure in pressure relief holes and the uplift of the station floor were monitored and analyzed. The results show that the temperature drops slowly and the floor heave is closely related to the change of the temperature at the measuring point. The uplift of the station floor is larger with frost heave. The maximum uplift value is about 46 mm which is located at the center line

* 收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478226)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)、常州市轨道交通科研项目(DG-DC-16006)资助

作者简介: 马俊(1994-), 男, 硕士研究生。主要从事城市地下工程的研究。Email: 875940892@qq.com

通讯作者: 杨平(1964-), 男, 教授, 博导。主要从事岩土与地下工程的教学与研究。Email: yangping@njfu.edu.cn

of tunnel entrance. In order to prevent the overlarge frost heave caused by the low temperature and the damage of the superstructure, a pressure relief measure was adopted by appropriate water discharge around the frozen wall. The short steel box device was installed to receive the shield when the connected freezing wall has not fully met the requirements of the freezing design. The practice shows that the sealing effect of moderate pressure relief horizontal freezing reinforcement and installation short steel box is good. The engineering is safe and reliable. The presented method will provide a feasible technology for similar projects in the future.

Keywords: horizontal freezing; freezing temperature field; settlement monitoring; short steel box; shield receiving

引言

盾构进出洞施工是盾构法隧道施工过程中最易发生工程事故的关键性节点,风险系数值相对较高^[1-2]。开凿洞门时土体自立性差、强度不够等极易引发坍塌、涌砂冒水等事故^[3-5]。端头土体的加固处理直接关系到盾构能否安全始发与接收^[6-7]。因此,采用合理的加固和接收方式是保障盾构接收与始发顺利完成的关键一环。目前,端头土体加固方法主要有:高压旋喷桩加固、注浆加固、SMW工法桩加固和人工冻结法加固等。

人工冻结法因其强度高、止水性好等优点在盾构进出洞施工过程中具有良好的发展前景^[8]。但在施工中易出现冻胀融沉效应^[9-14],在冻结过程中,其体积与强度均发生剧烈变化,轻则延长工期和提高造价,重则引起工程构筑物的破坏,目前冻胀控制仍未得到很好解决^[15-17]。岳丰田等^[18]结合工程实践,提出工作面释放水和压力释放孔等措施可有效地减小冻胀的影响。另外,采用冻结法若冻结效果不佳直接开挖常造成严重后果。因地下动水带走冷量导致冻结帷幕厚度不满足设计要求,圣彼得堡地铁1号线发生流砂、地面塌陷工程事故^[19-20]。平煤一矿采用冻结法施工过程中发生管涌事故,分析原因为裂隙承压水压力大等^[21]。

常州轨道交通1号线博爱路站-常州火车站下行线盾构接收端头在火车站地下大厅下方,受地面条件限制无法采用地面直接加固方式,因此选用水平冻结法加固方式。该工程接收过程中,温度下降缓慢,车站底板隆起大。冻结历时58 d时(设计冻结天数30 d)冻结壁厚度仍未完全达到设计要求,最大隆起值已达41.48 mm。考虑到上部结构底板隆起值与测点温度之间存在相关性,若继续加强冻

结,在冻胀力作用下可能造成车站底板开裂^[22];若冻结效果不佳(测点C1-2温度最高为 -1.16°C)强行开挖易发生涌砂冒水等工程事故。提出加装短钢箱装置密封止水进行盾构接收,水平冻结+短钢箱接收技术目前应用较少,具有实践意义,以期为今后类似工程提供可行技术。

1 工程概述

常州市轨道交通1号线博爱路站-常州火车站区间沿和平北路设置,设计里程CK22+411.903~CK22+947.693,下行左线长度为539.892 m,埋深范围9.9~15.8 m。隧道南端头下穿常州火车站南广场出站口大楼,其平面位置如图1所示。火车站地下大厅结构底板距离隧道结构垂直高差仅3.75 m,如图2所示。

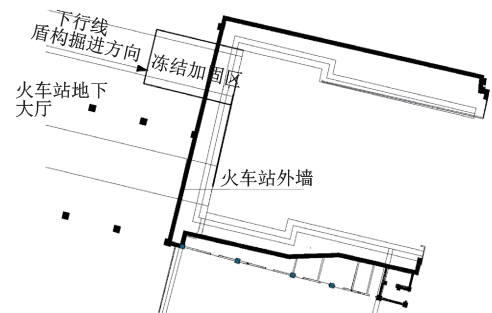


图1 洞门端头平面位置

Fig.1 Plane position of portal end

本区间盾构接收段所在地层从上至下依次为⑤1砂质粉土夹粉砂、⑤2粉砂、⑥3黏土、⑥4粉质黏土等。该区域地下水系发达,其中⑤1砂质粉土夹粉砂和⑤2粉砂为承压含水层。本工程地下承压水含量大,隧道上方覆土层薄,且下穿火车站地下站厅。在水平冻结法施工过程中易产生较大冻胀

量,造成上部火车站结构底板开裂。盾构接收过程中若施工不当极易发生涌砂冒水、坍塌等工程事故。

2 冻结加固方案和冻结参数设置

2.1 冻结加固方案

常州火车站于2009年建造时对地基土已采用水泥搅拌桩和高压旋喷桩方式进行加固。为安全考虑,增加水平冻结法进行端头加固,保证盾构接收、破除端头围护结构时隧道端头土体的自稳和防水要求,为破洞门提供条件。

考虑到盾构接收处土质的特殊情况及地面建筑物的位置和结构,接收端洞门中心冻土板块有效厚度设计为2.5 m,洞门圈外冻结帷幕长度设计为12.8 m,外圈冻土帷幕有效厚度设计为1.6 m,以便刀盘未击穿加固体前盾尾已进入结构墙内,确保盾尾后方形成有效的隔水环境。冻结帷幕平均温度设计要求为 $\leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$,管片与冻土界面处平均温度设计要求为 $\leq -5\text{ }^{\circ}\text{C}$,设计积极冻结天数为30 d。要求加固后的地基,具有较高的强度和良好的止水性。

根据冻结帷幕设计,常州火车站南端头井盾构出洞布置水平冻结孔为57个。盾构接收冻结孔按水平角度布置,共布置3圈冻结孔和洞门正中1个冻结孔。外圈冻结孔沿直径8 m的圆周平均布置32个孔,开孔间距为0.784 m,深度为13.8 m。中圈冻结孔沿直径5.4 m的圆周平均布置16个冻结孔,开孔间距为1.053 m,深度为2.8 m。内圈冻结孔沿直径2.7 m的圆周平均布置8个孔,开孔间距为1.033 m,深度为2.8 m。洞门正中心设置1个冻结孔,深度为2.8 m。冻结孔共57个,总长度为511.6 m。

2.2 测温孔布置

为准确掌握冻结温度场变化情况,在冻结区域共布置8个测温孔。C1~C5测温孔孔深为13.0 m,分别在孔深2.5、5.8、8.8、11.8和13.0 m深度处布置5个测点,为加强对槽壁与冻土界面处土体温度监测分析,C1~C4于11月21日在1.8 m孔深位置增加一测点;C6~C8测温孔孔深为2.5 m,分别在孔深1.0、1.8和2.5 m深度处布置3个测温点。对应编号依次为 C_{i-1} 、 C_{i-2} 、 C_{i-3} 、……($i=1,2,3,\dots,6$)。

为保护地下空间既有结构,在其底板下布置一排卸压孔(兼做注浆孔),在施工不同阶段通过卸压或注浆减小冻结施工对既有结构的影响。卸压孔单排布置11个,单根长5.8 m,高度距隧道中心6 m。管材规格同冻结管,为 $\phi 89 \times 8$ 低碳无缝钢管。测温孔及卸压孔具体布置如图2所示。C1~C8测温孔距冻结孔距离分别为0.72、0.75、0.75、0.73、0.33、0.45、0.65和0.65 m。

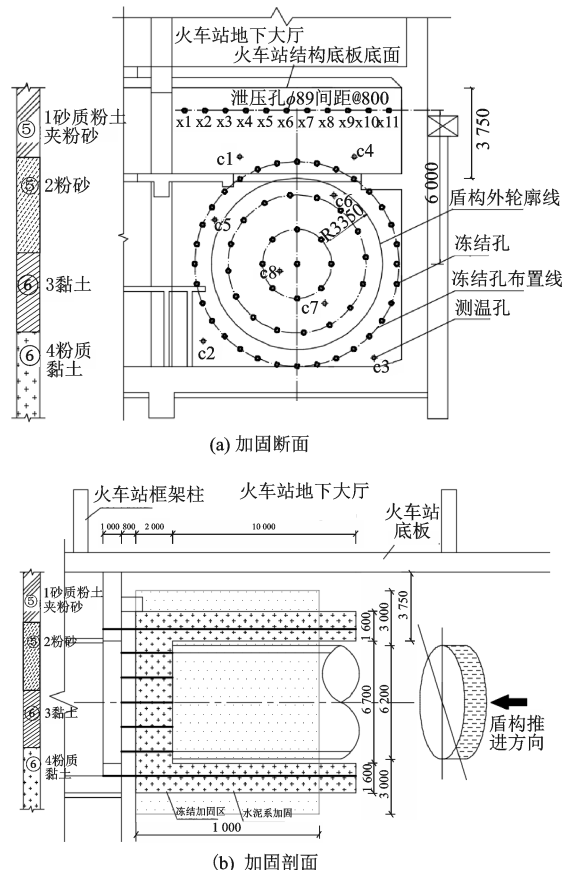


图2 水平冻结孔及测温孔布置示意

Fig.2 Layout of horizontal freezing holes and temperature measurement holes

3 冻结温度与隆起监测分析

3.1 冻结温度监测分析

本洞门冻结加固工程自2017年10月17日开机冻结,于2017年12月31日停止冻结,总冻结周期为76 d。其中内圈测温孔C6~C8因12月13日拔出冻结管时被破坏,温度监测于当日停止。

C1、C2和C3测温孔位于外圈冻结孔外侧,其温度随时间变化曲线如图3所示。图3(c)为无异常

情况下测孔内测点温度下降趋势。由图可知,不同入土深度的测点温度变化规律不同,各测点温度下降趋势整体呈现先快后慢的发展规律。由图3可见,同一测温孔内各测点温度大致随测孔深度增加而降低,这是由于靠近槽壁处与外界热量交换大,而较深处土体与外界热量交换少,冷量损失少。

由图3(a)、(b)可见,C1、C2测温孔部分测点(C1-1、C1-2、C2-1、C2-2)温度下降缓慢,其它测点温度下降较快。这是由于靠近槽壁附近土体局部承压水含量大或者界面处存在流动水。由于冻结期间地下大厅底板隆起较大,当卸压孔压强超过

0.4 MPa时,仅对压强超过0.4 MPa卸压孔进行排水卸压,当卸压孔压力下降后或者地表沉降日变量达到-2 mm时,立即停止卸压。避免单次卸压过量,造成地面过大沉降。在冻结14~24 d频繁卸压排水,使得冷量损失较大,导致靠近槽壁测点温度下降较慢甚至略有回升。当停止卸压排水后,温度有所下降。未卸压排水前,如X4和X10卸压孔压强分别为0.48和0.21 MPa,卸压排水后,压强有所下降,当停止卸压后,压力又逐渐恢复至初始值。冻结38 d时打设探孔T1~T4,穿过结构层及灌注桩,深度约2 m,探孔位置如图4所示,仅T1探孔有较多清水流出,并带有一定的水压力。当天测温孔C1中C1-2温度最高为7.41 °C,由此断定土体冻结效果不佳,无法满足设计要求。采取堵漏措施,在测温孔C1上方打设4个堵漏孔,深度约为2 m,注入聚氨酯,堵漏孔位置如图4所示。因此C1-1、C1-2在历时40 d后,温度下降速率明显加快;同理,由于C2测温孔温度下降较慢,故冻结50 d时在其上方打设4个探孔T5~T8,深度约为2 m,其中仅T5、T6有清水流出,结合T1~T4探孔情况可推断外圈冻结管内侧范围内冻结效果良好,已基本满足要求,但外侧冻结效果尚不满足要求,说明冻结壁已交圈,但由于外圈外侧承压水及流水的影响,使得外侧土体冻结温度下降缓慢。在T5、T6探孔处立即注入聚氨酯进行堵漏,因此C2-1、C2-2在此后温度下降速率也明显加快。

选取不同位置同一深度处(2.5 m)测点温度进行分析,如图5所示为温度随时间的变化曲线,C6~C8于12月13日拔出冻结管时已被破坏。在整个冻结期间,所有测点温度下降速率均是先快后慢最后趋于稳定。同一时间不同位置处温度也不尽相同,为:外侧>外圈>中圈>内圈,温差最大达13 °C。这是由于内圈与外界热交换少,冷量损失少,所以温度下降较快,冻土体交圈较早,而外侧受外界环境影响较大,越往外侧冻土体交圈速度越慢。

3.2 隆起监测分析

3.2.1 测点布置

距盾构端头边界5 m起始,在车站地下大厅每隔35 m布置一个监测大断面,每个大断面布置10个测点,测点间距为3.5 m,其中测点D1-3、D2-3位于左线隧道中心线处;每两个大断面之间等间距布

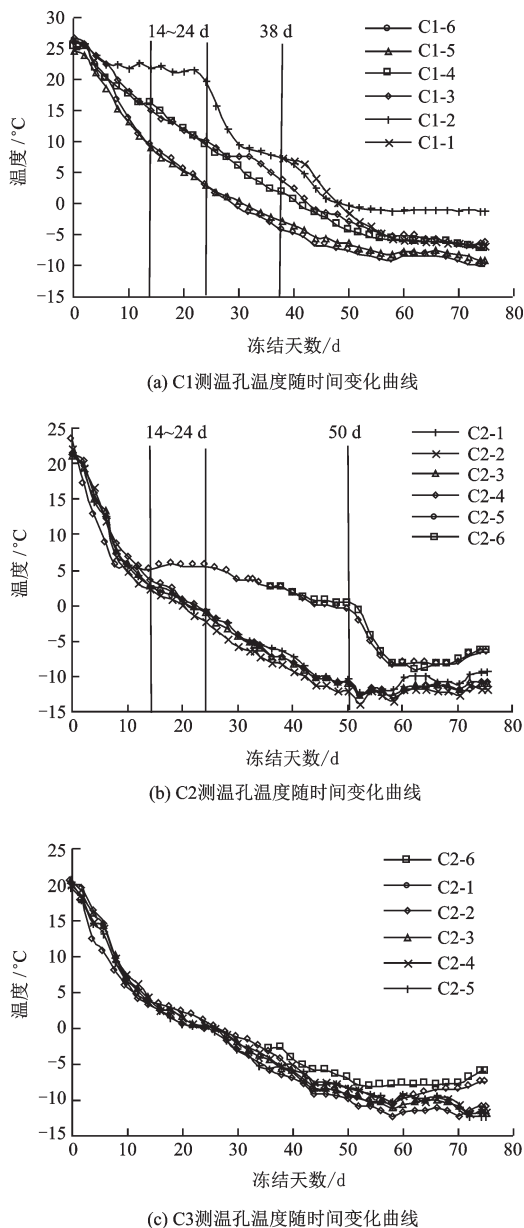


图3 各测温孔温度随时间变化曲线

Fig.3 Variation of temperature with time in temperature measurement holes

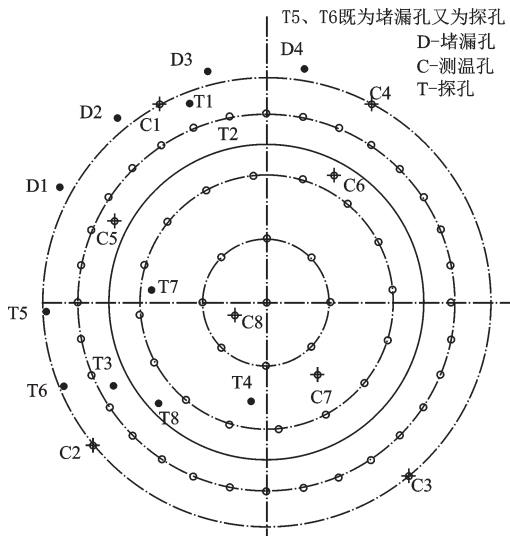


图4 堵漏孔布置示意

Fig.4 Layout of leak plugging

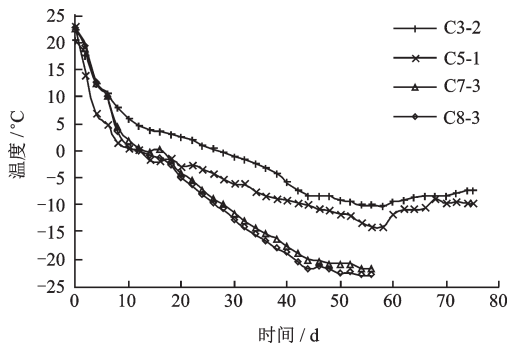


图5 C3-2、C5-1、C7-3和C8-3测点温度随时间变化曲线

Fig.5 Temperature variation curves at C3-2, C5-1, C7-3 and C8-3

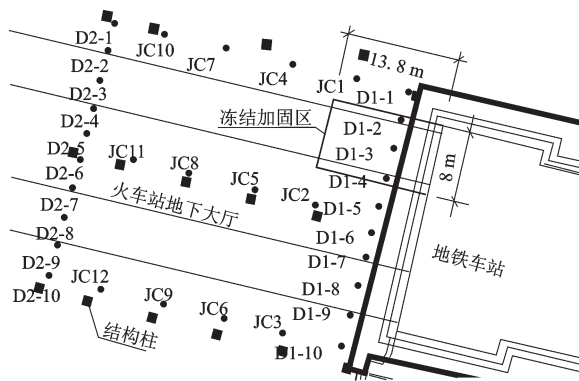


图6 地表及建筑物隆起监测平面

Fig.6 Settlement monitoring plane graph of ground surface and buildings

置4个监测小断面,小断面间距为7 m,每个小断面布置3个测点,测点间距为15 m,如图6所示。

3.2.2 监测结果分析

积极冻结期间常州火车站地下大厅隧道端头

处各测点的累计竖向位移曲线如图7所示(正值表示冻胀),由图可知,积极冻结期间常州火车站地下大厅底板总体隆起值较大,最大隆起值约为46 mm,无沉降。分析原因为采用人工冻结法加固土体时,未对土体进行预处理。且该区域以砂性地层为主,含水量大,冻胀率相对较大,加之该冻结区域范围内覆土厚度仅为3.75 m,造成冻结期间车站底板隆起较大。冻结14~24 d期间底板隆起值波动较大,这是由于在此期间频繁卸压排水,导致车站底板隆起值增加较小甚至有所沉降,停止卸压排水后车站底板隆起值又逐渐增加。冻结38 d打设探孔时T1探孔水体流失较多,造成各隆起测点有少量沉降,此现象说明卸压排水对抑制冻胀发展有积极作用。图8为冻结76 d隧道端头各测点累计竖向位移曲线,由图可知隧道中心线处隆起量最大,随着距中心线距离增加,车站底板隆起量逐渐减小。

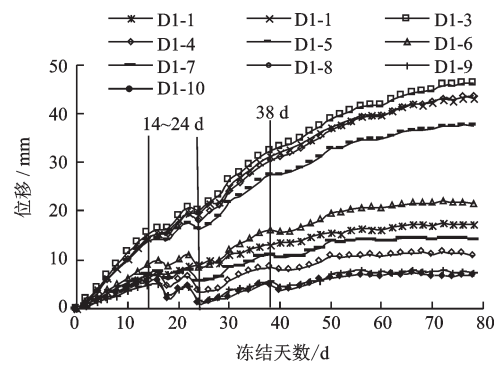


图7 隧道端头横断面处各测点累计竖向位移

Fig.7 Cumulative vertical displacement at measuring point at the cross section of the tunnel end

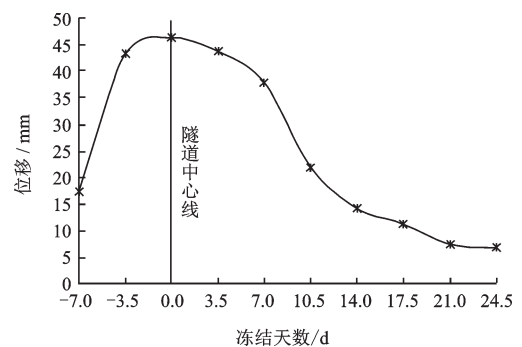


图8 冻结76天D1断面隆起曲线

Fig.8 Settlement curve of D1 section after 76 days freeze

图9为隧道端头纵断面处各测点累计竖向位移曲线。JC2、JC5、JC8、JC11距隧道端头距离依次增加。由此可见,距洞门端头距离越近,其冻胀造成

的隆起量越大;随着距端头距离增大,其隆起值逐渐减小,JC8、JC11已超出当超出冻结管所在平面范围,其隆起量明显较小。冻结14~24 d期间,测点JC2隆起值变化最大,JC11变化最小。说明距端头越近,卸压排水对隆起值造成的影响越大。

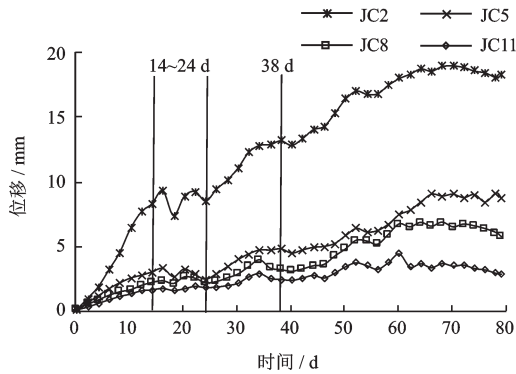


图9 隧道端头纵断面处各测点累计竖向位移

Fig.9 Cumulative vertical displacement at measuring points along the longitudinal section of the tunnel end

由测点温度与隆起监测综合分析可以发现测点温度与结构底板隆起值的变化存在相关性。在测点温度快速下降阶段,冻结壁迅速发展,造成冻土体体积膨胀,由于上层覆土较薄,结构底板隆起值快速增加。在冻结14~24 d期间频繁排水卸压,测点温度下降速度缓慢甚至略有上升,说明在该时间段内,冻结壁发展减缓,加之卸压排水造成水土流失,反映在结构底板隆起上即为隆起值增加较少甚至略有减小。之后停止卸压排水,测点温度继续下降,结构底板隆起值也相应增大。在冻结38 d时打设探孔造成地下水流失量较大,温度下降缓慢,底板隆起值增加较少亦是此理。

3.3 洞门破除及密封

考虑到该区域局部承压水含量较大,且结构底板隆起较大,若继续长时间冻结可能对结构底板造成损伤,因此,在尚未达到设计要求的情况下提前开挖(测温点C1-2温度为 -1.16°C ,得出最小冻结壁厚度为1.41 m,根据成冰公式计算得出平均温度为 -8.5°C)。为防止接收过程中产生涌砂冒水甚至塌方等不良影响,需合理安排洞门破除,确保洞门密封效果良好。

本工程洞门密封采用加装短钢箱方式。在接收洞门外侧增加一环形短钢箱,钢箱长度仅为450 mm,板厚为20 mm,分四块拼装,焊接于洞门钢环

之上,图10(a)为短钢箱平面示意。短钢箱内安装内外双层止水帘布和折页压板,如图10(b)所示;短钢箱和橡胶帘布板委托加工厂进行加工,现场组装安装。在洞门钢环内增加两圈加长型盾尾刷,并在结构墙设置盾尾油脂压入孔。其实物如图11所示。

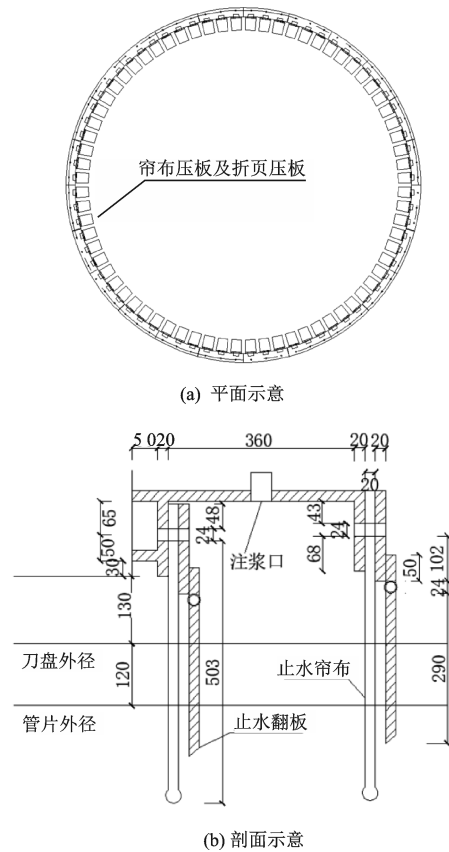


图10 短钢箱结构

Fig.10 Structural diagram of Short steel box

在盾构接收过程中向短钢箱内同步注入惰性浆液以起到密封止水作用。外侧翻板上焊接螺母,中间用钢丝绳串联,在端墙两侧用手拉葫芦固定,在盾体、管片通过时通过手拉葫芦拉紧翻板,使得橡胶帘布板与盾体、管片紧密贴合,并通过短钢箱上注浆口向短钢箱内注入惰性浆液进行填充,起到止水环箍的效果。当出现漏水涌砂时可注入化学浆液(WSS),快速凝固堵漏。并且通过在结构墙上设置的盾尾油脂压入孔向洞门钢环内盾尾刷之间压注盾尾油脂,起到密封止水的作用。

3.4 融沉注浆

融沉注浆自2017年12月31日停止冻结后正式开始,利用卸压孔(兼做注浆孔)以及隧道内管片预留注浆孔并配合测温孔测温及地面监测数据进行。

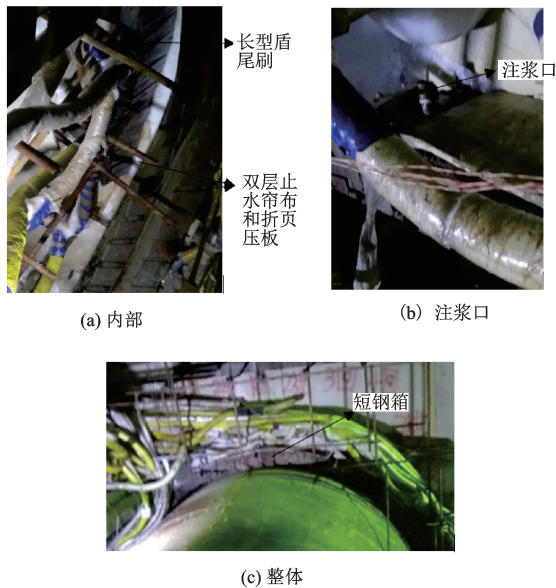


图 11 短钢箱实物照片

Fig.11 Short steel box picture

隧道内注浆的顺序为隧道底板→隧道两侧→隧道顶板,卸压孔注浆采用跳孔方式循环补注浆,注浆压力不大于0.5 MPa。注浆材料为水泥单液浆和水泥—水玻璃双液浆,可根据注浆压力情况进行调整,注浆范围为整个冻结区。若地面融沉过大,需在地面对管线进行直接注浆加固,到达控制变形的目的。融沉注浆遵循少量多次的原则,每天一次,注浆量约0.5~1 m³/d。注浆过程中地表出现上抬时则减小注浆压力,采取间歇注浆的方法。4月3日完成融沉注浆施工。总注浆量共计47 m³。

工程实践表明采用加装短钢箱接收方式具有较好的密封止水效果,施工工艺合理可行,安全可靠。本工程得以顺利进行,可为今后类似工程提供可行技术。

4 结 论

(1)靠近槽壁附近区域局部承压水含量较大,C1、C2测温孔部分测点温度下降缓慢,加之冻结14~24 d期间频繁卸压排水,温度甚至略有回升。由于地下水影响较大,采取打孔堵漏措施,在C1、C2测温孔上方分别打设4个和2个堵漏孔并注入聚氨酯后,C1-1、C1-2、C2-1和C2-2温度下降速率明显加快。

(2)积极冻结期间,常州火车站地下大厅隧道端头处总体隆起量较大,最大隆起值达46 mm,无沉降。隧道中心线处隆起值最大,随距中心线距离增加,隆起值逐渐减小。在频繁卸压排水期间地表

有所沉降。隆起值随着距端头距离增大而逐渐减小,当超出冻结管所在范围后,隆起值明显较小。

(3)测点温度与结构底板隆起值的变化存在相关性。在测点温度快速下降阶段,冻结壁迅速发展,由于上层覆土较薄,结构底板隆起值也快速增加。在冻结14~24 d期间频繁排水卸压,冻结壁发展缓慢,反映在结构底板隆起上即为隆起值增加较少甚至略有减小。在冻结38 d时温度下降缓慢,底板隆起值增加较少亦是此理。

(4)采用水平冻结+加装短钢箱接收方式,在盾构接收过程中通过注浆口向短钢箱内同步注入惰性浆液以起到止水环箍的效果,密封止水性较好。实践表明采用短钢箱接收方式具有较好的密封止水效果。

参考文献:

- [1] 刘健鹏,杨平,何文龙,等.盾构下穿敏感性建筑的管棚+水平冻结接收技术[J].铁道科学与工程学报,2017,14(10):2194-2202.
Liu J P, Yang P, He W L, et al. Shield receiving technology of pipe-roof grouting and horizontal freezing entrancing beneath sensitive buildings [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14 (10) : 2194-2202. (in Chinese)
- [2] 王文灿.冻结法和水平注浆在天津地铁盾构接收中的组合应用[J].现代隧道技术,2013,50(3):183-190.
Wang W C. Application of the freezing and horizontal grouting methods to the shield arrival for the Tianjin metro [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50 (3) : 183-190. (in Chinese)
- [3] 樊文虎,杨平,姚梦威.盾构始发端头水平冻结加固方案设计研究[J].铁道建筑,2015,(8):39-43.
Fan W H, Yang P, Yao M W. Research on horizontal freezing reinforcement and scheme design of shield launching end wall [J]. Railway Engineering, 2015(8) : 39-43. (in Chinese)
- [4] 胡俊,杨平.大直径杯型冻土壁温度场数值分析[J].岩土力学,2015,36(2):523-531.
Hu J, Yang P. Numerical analysis of temperature field within large-diameter cup-shaped frozen soil wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (2) : 523-531. (in Chinese)
- [5] 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 Q B, Yang P, Zhang T, et al. Vertical freezing reinforcement and monitoring in site for tunnel shield-launching end in soft soil stratum[J]. Journal of Nanjing Forestry (Natural Science Edition), 2015, 39(6): 125-130. (in Chinese)
- [6] 苗立新, 齐修东, 邹超. 冻结法在盾构接收端头土体加固中的应用[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(9): 105-109.
Miao L X, Qi X D, Zou Ch. Application of freezing method in reinforcing soil on shield ends[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(9): 105-109.
- [7] 李大勇, 王晖, 王腾. 盾构机始发与到达端头土体加固分析[J]. 铁道工程学报, 2006(1): 87-90. (in Chinese)
Li D Y, Wang H, Wang T. Analysis of soil reinforcement for the starting and arriving of shield machine in metro construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(1): 87-90. (in Chinese)
- [8] 鲍永亮, 郑七振, 唐建忠. 地铁隧道旁通道冻结法施工监测分析[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(3): 93-95, 109.
Bao Y L, Zheng Q Zh, Tang J Zh. Monitoring analysis of construction for connecting aisle in metro tunnel with freezing method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(3): 93-95, 109. (in Chinese)
- [9] Yu L L, Xu X Y, Ma C. Combination effect of seasonal freezing and artificial freezing on frost heave of silty clay[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(1): 163-168.
- [10] Chen Y L, Azzam R, Wang M, et al. The uniaxial compressive and tensile tests of frozen saturated clay in Shanghai area[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(1): 29-36.
- [11] 蔡海兵, 彭立敏, 郑腾龙. 隧道水平冻结施工期地表融沉的历时预测模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 504-510.
Cai H B, Peng L M, Zheng T L. Aduration prediction model of surface thawing settlement in construction period of tunnel with horizontal freezing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 504-510. (in Chinese)
- [12] 李岩, 刘波, 张建新. 竖向直排冻结条件水平冻胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3 199-3 206.
Li Y, Liu B, Zhang J X. Experimental research on horizontal frost heaving force of vertical straight freezing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3 199-3 206. (in Chinese)
- [13] Wang S F, Yang Z H, Yang P. Structural and volumetric shrinkage of clay due to freeze-thaw by 3D X-ray computed tomography [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 138: 108-116.
- [14] 刘贯荣, 杨平, 张婷, 等. 人工冻土融沉特性及融土微观结构研究综述[J]. 森林工程, 2014, 30(5): 118-121.
Liu G R, Yang P, Zhang T, et al. Literature review on thawing settlement characteristics of artificial frozen soil and microstructure of thawed soil[J]. Forest Engineering, 2014, 30(5): 118-121. (in Chinese)
- [15] 刘振亚, 刘建坤, 李旭, 等. 毛细粘聚与冰胶结作用对非饱和粉质黏土冻结强度及变形特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 37(6): 1551-1559.
Liu Zh Y, Liu J K, Li X, et al. Experimental study on capillary cohesion and ice cementation influence on strength and deformation of frozen soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2018, 37(6): 1551-1559. (in Chinese)
- [16] 石刚强, 赵世运, 李先明, 等. 严寒地区高速铁路路基冻胀变形监测分析[J]. 冰川冻土, 2014, 6(2): 360-368.
Shi G Q, Zhao Sh Y, Li X M, et al. The frost heaving deformation of high-speed railway subgrades in cold regions: monitoring and analyzing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 6(2): 360-368. (in Chinese)
- [17] 蔡海兵, 程桦, 姚直书, 等. 基于冻土正交各向异性冻胀变形的隧道冻结期地层位移数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1 667-1 676.
Cai H B, Cheng H, Yao Zh Sh, et al. Numerical analysis of ground displacement due to orthotropic frost heave of frozen soil freezing period of tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1 667-1 676. (in Chinese)
- [18] 岳丰田, 张水宾, 李文勇, 等. 地铁联络通道冻结加固融沉注浆研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2 283-2 286.
Yue F T, Zhang Sh B, Li W Y, et al. Study on thaw settlement grouting applied to connected aisle construction with artificial ground freezing method in metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2 283-2 286. (in Chinese)
- [19] 胡向东, 白楠, 李鸿博. 圣彼得堡地铁1号线区间隧道事故分析[J]. 隧道建设, 2008, (4): 418-422.
Hu X D, Bai N, Li H B. Analysis on tunnel accident on line 1 of Saint Petersburg metro[J]. Tunnel Construction, 2008, (4): 418-422. (in Chinese)
- [20] Ryumin A N. On hydrogeomechanical causes of accident in the subway of Saint Petersburg[J]. Journal of Mining Science, 2004, 40(1): 11-23.
- [21] 杨健辉, 汤秀锋, 张劲松, 等. 深部矿井回风井冻结施工过程中管涌事故分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 26-32.

(下转第308页)