

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2024.07.052

软土地层中水平冻结施工对上方运营地铁车站 影响监测分析

袁钊

[上海勘察设计研究院(集团)股份有限公司,上海市 200438]

摘要:为研究近接隧道水平冻结对上部运营车站冻胀变形的规律,以上海市18号线国权路站在建隧道下穿10号线上部运营车站冻结法施工为工程背景,通过监测数据分析研究冻结温度和车站沉降变形规律。分析结果表明:土体温度随着冻结天数增加,先急后缓地下降,并于50 d后低于 -10°C ,在隧道周围形成2 m厚的冻结壁。随着冻结程度的增强,冻结中心区域冻胀变形显著,其中侧墙初始沉降为2 mm,后持续增加到5 mm,并保持稳定;车站道床初始隆起为3 mm,后增加到10 mm,并达到稳定状态;车站立柱初始隆起为5 mm,后显著增加到23 mm,后期保持稳定。

关键词:冻结法;软土地层;近接隧道;监测

中图分类号: TU94

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)07-0213-06

0 引言

近年来,城市轨道交通建设发展迅猛,地下空间的工程应用促进了城市化的发展,但同时也产生了很多的问题。尤其是繁荣城市地区,由于需要疏散许多人口,改善通往市区和周边地区的通道,因此需要在人口稠密的道路交叉口修建近接换乘隧道。在这种情况下,需要在已有上部运营车站的基础上再次建立下穿越盾构隧道。人工冻结技术的地层支护和止水效果显著,被广泛用于富水软土层中进行地铁隧道冻结法施工。然而施工过程仍存在以下几个难点:(1)隧道管片顶部与上部运营车站底板的距离很小,变形控制要求高。(2)地层埋深浅,土层较软,冻胀率较大,冻胀和融沉对既有运营车站的影响较大。(3)拟建隧道开挖直径与断面较大,造成开挖难度较大。(4)冻结施工时间较长,温度控制要求高。

为此,国内外学者也做了大量的科学研究。赵鹏^[1]对呼和浩特市地新建暗挖隧道进行了实例分析,该隧道需要上穿现有的2号线盾构隧道。为此,赵鹏设计了一套针对施工变形的监测方案,利用现场施工监测的数据进行评估验证。朱国斌^[2]依托云南软土环境下的隧道项目,通过构建理论分析模型,研究了近

接区段施工队隧道结构稳定性的影响,并提出相应对策以有效预防和控制隧道变形。张珣^[3]研究了北京新机场线的盾构隧道施工阶段,该隧道需穿过已有的高压气管和桥梁桩基。通过FLAC3D软件所建立的三维分析模型,并结合工地监测数值,张珣采用高斯方法拟合分析,得出了沉槽宽度系数。

刘士波^[4]依托某地铁车站区间隧道及其附属停车场站出入线工程开展研究,分析盾构邻近既有暗挖隧道施工影响及其加固控制技术。王婷^[5]在武汉市某新建地下通道的项目中,针对该工程上穿地铁4号线在该区域的盾构管片变形监测,利用数值模拟进行了稳定性分析,同时考察地层移动、现有隧道的应力和变形情况,并以此来评价加固方案的有效性。余双池^[6]选取新风中路明挖工程与现行地铁5号线左线、环线右线及环线左线隧道的紧邻施工项目为研究案例,运用理论分析、数值仿真和实地监测等内容来探究明挖隧道施工对现行地铁隧道的影响,并对可能的形变进行控制措施方面的探讨。尚明源^[7]通过建立三维有限差分模型,模拟靠近铁路隧道安全范围内的施工步骤,对隧道的位移和安全系数指标进行分析,从而评估其稳定性,并据此指导施工过程以确保铁路的安全运行。鲁茜茜^[8]针对复杂地层条件下深圳地铁7号线下穿越既有1号线及上方行人通道,建立三维仿真模型,分析盾构下穿工程对既有线路及其附属设施

收稿日期:2023-11-17

作者简介:袁钊(1983—),男,硕士,高级工程师,从事轨道交通结构安全监测与评估工作。

结构的影响。李方政等^[9]则依托上海某处接近既有车站的盾构隧道冻结加固工程,依照模型试验的相似准则,搭建了冻土与车站结构相结合的实验平台,模拟了隧道水平冻结的过程,并研究了调整冻结溶液温度和泄压方法对隧道冻胀的影响。王磊等^[10]则针对上海地铁18号线利用冻结技术在10号线国权路站下方施工的案例,运用样本试验和模型仿真相结合的方法,分析了在 -18°C 和 -28°C 的工况下,冻结土壤所引起的温度和应力分布情况。龙道选^[11]则研究了在饱和粉砂地层中进行冻结法施工,对土层盐水流失和温度下降速度的影响,利用新研制的多物理场监测设备,发现了在多物理场下冻结速率会显著降低,从而造成施工时间延长。

本文依托上海地铁18号线国权路盾构隧道下穿10号线上部运营车站项目为工程背景,冻结施工过程中下穿隧道上方车站始终保持运营状态。由于新建下穿盾构隧道穿越富水软土地层,软土地层变形对近接工程施工极为敏感,且下穿盾构隧道与上部运营车站距离仅为 2.209 m ,导致下部在建隧道对上部运营车站的变形控制要求较高。所以基于现场监测数据来重点分析温度场和位移场的冻胀变形规律。

1 工程概况

1.1 工程简介

在建的上海轨交18号线,其抚顺路至国权路这一段需在已有的10号线车站下方修建一条长约 40 m 的双轨隧道。国权路站为18号线工程中间站,车站中心里程 $\text{SK}30+717.27$ 。主体位于四平路以东的国权路路下,沿国权路东西向敷设,车站呈东西向布置,西邻四平路。该地铁站建于地下三层,为岛式站台,通过既有10号线通道换乘。站点的暗挖隧道中心线的设计标高为 -19.011 m ,地面的平均标高则为 $+3.2\text{ m}$ 。结构形式为双柱三跨的现浇箱型钢筋混凝土,站台有效面宽为 13.06 m 。整体站场尺寸为 $168.7\text{ m}\times 20.4\text{ m}$,底版的深度大约在 25.69 m 。站点的具体地理位置详见图1。

在建隧道顶部距离上部运营车站最小距离约为 2.209 m ,隧道直径约为 7.9 m 。近接隧道下穿土层主要为富水软土地层。设计冻结壁厚度为 2 m ,开挖断面内部设计十字形冻结壁作为开挖支撑。国权路在建隧道与上部运营车站的位置关系如图2所示。

1.2 工程地质条件

在规划的抚顺路站至国权路站区段,预定施工



图1 工程地理位置

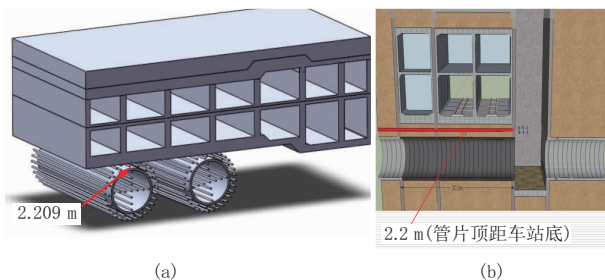


图2 国权路在建隧道与上部运营车站的位置

的地下 75.30 m 范围内,土层主要由黏土、细砂土和沙土构成,并普遍呈现分层排布的特性。

根据沉积年代、成因类型及其物理力学性质上的差异,即将开展建设的地基土可被细分为8种主要的土层。分布具体情况如下:第①₁层填土、第②₁层粉质黏土、第②₂层黏质粉土、第④层淤泥质黏土、第⑤₁层灰色黏土、第⑤₂层粉质黏土、第⑤₃层粉质黏土夹砂质粉土、第⑥层粉质黏土、第⑦₁层砂质粉土、第⑧₁层灰色粉质黏土夹粉性土、第⑨₁层粉砂。

抚顺路站—国权路站区间隧道穿越土层为:第④层淤泥质黏土、第⑤₁层灰色黏土、第⑤₂层粉质黏土。由于下穿在建隧道与上部运营车站的最小净距主要集中于第⑤₁层富水软土地层,所以基于该层土样,重点研究在建隧道水平冻胀对上部运营车站的影响,富水软土地层如图3所示。

1.3 土体冻胀机理

富水土体属于多孔渗水介质,即使温度降到低冰点以下,依然存在部分未冻水。在温度场的作用下,未冻水和固态水维持动态平衡的过程即为土体冻结过程^[12]。冻胀作用源于土层中的水分迁移,薄膜理论指出引起冻胀变形的冰透体的生长,需要土颗粒外不对称的未冻水膜形成的渗透压来提供水分^[13]。

在采用冻结法进行工程建设时,盐水、液氮等冷却介质会在土壤中循环流动,带走热量,导致土层逐



图3 富水软土土样

步冷却。这个过程中,土壤内的水分逐渐凝固成冰,形成冰透镜层和冰间层,土壤体积因而扩张并引起冻胀。当冷冻工程结束,停止冷冻系统后,土壤开始解冻,地温慢慢恢复,冰逐渐融化为水,随着水分的排出土壤体积缩小,导致地面出现沉降^[4]。

2 监测方案

基于近接隧道水平冻结对运营车站冻胀变形影响主要体现在位移幅值与温度幅值,为了能在冻结过程中及时掌握土体温度变化,采用测温计与电子水平尺、静力水准等精密仪器展开冻结过程冻结温度与地铁车站变形的监测工作。

2.1 温度监测点位布置

以待建盾构隧道断面为中心对称布置相应的测温管 C1~C11,测温管选用 $\phi 89 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的低碳无缝钢管。下行线共有 11 根测温管,每根测温管的长度约为 41 m,每根测温管上布置 20 个测温孔,下行线冻结设计温度约 -10°C 。上行线共有 12 根测温管,每根测温管的长度约为 41 m,每根测温管上布置 43 个测温孔,上行线冻结设计温度约 -10°C 。隧道的稳固设计中,冷冻壁的平均温度应保持在 -10°C ,其厚度需达到 2.0 m。采取“内圈孔+外圈孔+加强孔”的构思进行隧道的冻结加固工作,温度监测孔位安排如图 4 所示。

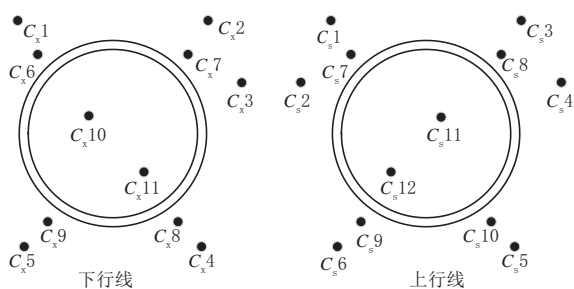


图4 下穿隧道温度监测点位

2.2 位移监测内容

基于近接隧道水平冻结会对运营地铁车站产生道床沉降、侧墙沉降、立柱沉降等多种变形,且水平冻结产生的冻胀力与冻胀变形会对上部运营车站产生影响,所以对软土地层中运营地铁车站及相关结构的沉降变形进行监测。依据相应设计规范规定对上部运营车站产生的影响不得超过 50 mm,对下穿隧道顶部与上部运营车站中设置相关沉降变形监测点位,位移监测点位布置如图 5 所示。其中,XX1+ 数字表示道床沉降点,LZ0+ 数字表示立柱测点,CZ0+ 数字表示侧墙沉降点。

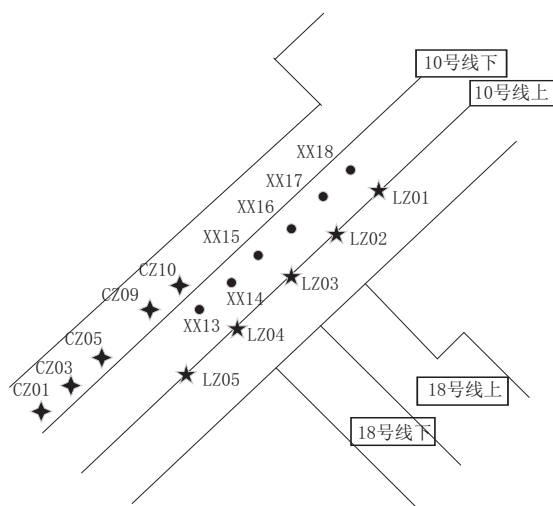


图5 下穿隧道位移监测点位

下穿隧道因其深埋、高水位地下水、较差的地质及表层管线与建筑众多等因素变得复杂难以施工,故选用水平冻结技术以强化土层,因其具有阻水能力好和冻结土强度高优点。然而,在复杂的地层环境下,有时这种方法局部冻结不尽人意,或由于冻胀力过强而对附近的环境造成不利影响,这可能会埋下工程事故的风险隐患。因此,必须在施工过程中实施对于上方运营车站道床、侧墙、立柱等结构采取全面自动化的信息化监测方式。在进行冻结工序期间,使用先进监测技术装备,实时追踪深层土壤冰冻温度及地面沉降等动态数据,从而确保冻结作业具备持续的监测信息支持。再将监测所得数据进行比较研究,校验数据的准确性。

3 监测结果分析

近接隧道下行线于 2019 年 1 月 28 日开机冻结,积极冻结了 50 d,维护冻结了 30 d,于 2019 年 11 月 26 日主要施工结束。上行线于 2019 年 7 月 1 日开机冻结,积极冻结了 50 d,于 2020 年 1 月 2 日

主要施工结束。下行线比上行线早5个月开始冻结,由于冻结温度与沉降位移数据较多,考虑到近接隧道水平冻结对上部运营车站产生微扰动变形的影响,着重分析第一次积极冻结阶段温度场与位移场变化规律。

3.1 温度场监测结果

选取下行线对称分布的外圈工程测温管 Cx2 与 Cx4 测得的温度数值,由于下行线相较于上行线早冻结5个月,所以选取具有代表性的第一次积极冻结阶段的温度变化曲线进行分析。

选取下行线中对称布置的 Cx2 与 Cx4 中的 5 号、10 号和 15 号测温孔的温度监测数据,如图 6 所示。由图可知:观察各个测温管上测温孔记录的温度数据,不难发现它们逐渐降低,这一现象与冻结法下温度的变化趋势相吻合。同一测温管内部,受探测点不同位置影响,记录到的温度走势呈现出一定的不同。图中所示的 Cx2 和 Cx4 两个探温点起始时刻的冻结温度约为 17.5℃,在进行了 30 d 的冻结工作之后,各个探测点的温度值都已经下降至 0℃ 以下,水分凝结成冰晶,形成冻结壁。对称布置的测温孔 Cx2 与 Cx4 温差约为 5℃,温度变化规律较为相同。

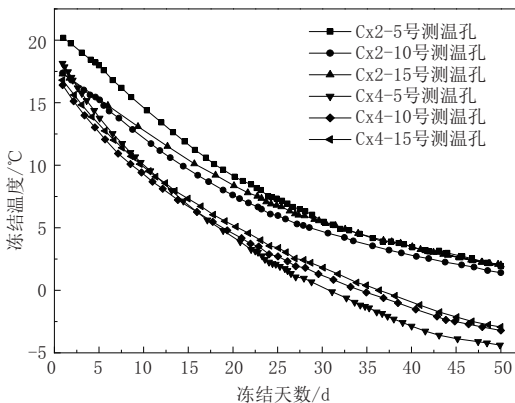


图 6 Cx2 和 Cx4 测温孔温度曲线

提取下行线中内圈对称布置的 Cx6 与 Cx9 中的 5 号、10 号和 15 号测温孔的温度监测数据,如图 7 所示。由图可知:各个测温孔的温度衰减趋势契合冻结法下的温度变化趋势。同一测温管内部,受探测点不同位置影响,记录到的温度走势呈现出一定的不同。由于 Cx6 与 Cx9 工程测温管安置位置靠近工程冻结管,所以初始温度较外围测温孔较低,约为 12.5℃。冻结前期(0~10 d),温度下降较快,冻结管在 10 d 左右温度已经下降至 0℃,在建隧道形成冻结壁。冻结中期(10~40 d),温度下降速率变缓,部分冻结管的温度已经降至 -10℃,初步满足开挖要求。冻结后期(40~50 d),温度继续下降速度减缓,此时

冻结温度基本维持在 -12.5℃。且从监测数据可以看出,冻结管前半段在冻结中期发生急剧变化,温度下降幅度较大。考量因温度下降到零度以下,水份结晶为冰,导致土壤的冻胀作用迅速增强。此外,冻胀力会影响不同位置测孔的温度波动情况,5 号测温孔的温度相较于 10 号与 15 号测温孔,温度波动较大。

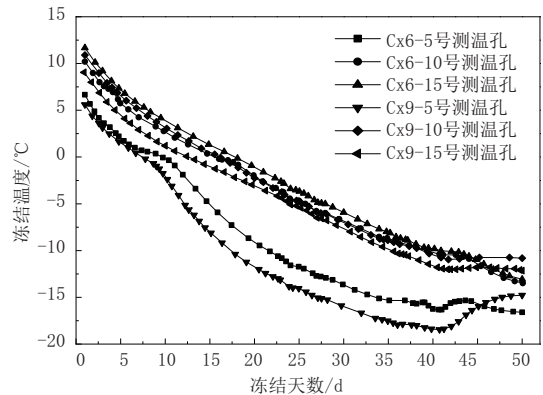


图 7 Cx6 与 Cx9 测温孔温度曲线

提取下行线中内圈对称排列的 Cx7 与 Cx8 中的 5 号、10 号和 15 号测温孔所记录的温度监测数据,如图 8 所示。由图可知:各测温管的前端初始温度偏低,在经过大约 10 d 的冻结作用后,这些部位的温度会下降至 0℃。后端温度在冻结 20 d 左右,温度降至 0℃,温度曲线出现一小段平稳期。冻结 20 d,在建隧道开始产生冻结壁。冻结至 30 d,冻结温度下降速率减缓。冻结至 50 d,冻结温度基本保持稳定,前端温度可以降至 -15℃ 以下,后端温度仅降至 -5℃ 以下。

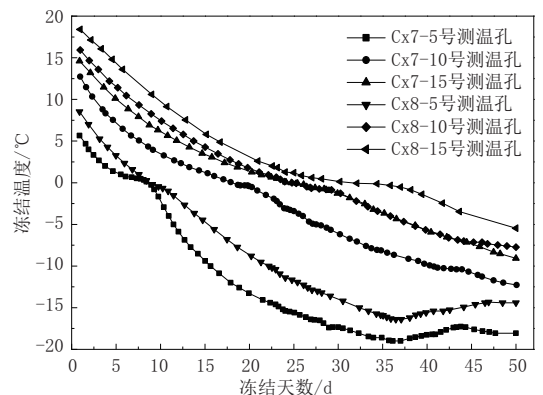


图 8 Cx7 与 Cx8 测温孔温度曲线

3.2 位移场监测结果

10 号线国权路站在建隧道设置了多种沉降位移变形监测点位,其中重点研究侧墙沉降,道床沉降与立柱沉降三种沉降位移变化曲线。

3.2.1 侧墙沉降

提取 10 号线国权路站下行线结构墙侧向变形监测点位 CZ01-CZ10 的监测数据,如图 9 所示。由

图可以看出:在0~15 d内,虽然富水软土地层冻结温度下降较为明显,但是大部分测温管的温度并未降至0℃,地层开始产生小范围的侧墙沉降,沉降值约为2 mm。随着冻结时间继续增加至30 d,降温速率较之前有所降低,但降温范围进一步扩大,大部分测温管的温度降至0℃,盾构隧道周围开始产生冻结壁。侧墙开始产生明显变形沉降,此时位移冻结中心区域的侧墙产生5 mm的沉降变形。积极冻结至50 d时,降温速度与降温数值无明显变化,土体变形沉降保持稳定。此时侧墙沉降始终保持5 mm左右的沉降变形幅度,满足设计施工规范。且维持冻结至80 d,冻结壁厚度已达到2 m,满足设计开挖要求。

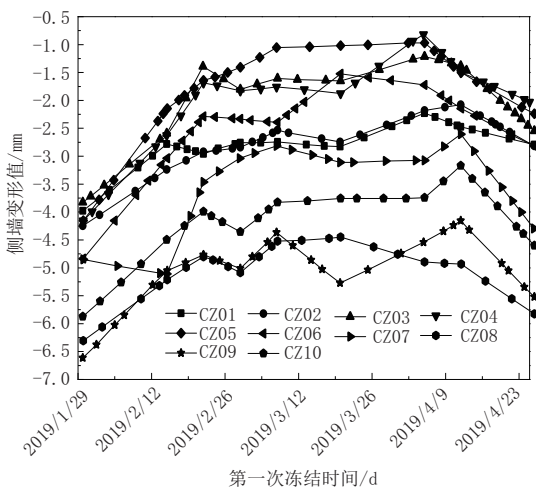


图9 侧墙沉降

3.2.2 道床沉降

提取10号线国权路站下行线道床垂直位移监测点位XX05、XX15和XX25的监测数据,如图10所示。由图可知:在0~10 d内,冻结温度下降较为明显,但是软土地层刚开始并未产生较大沉降。且XX15位于冻结中心区域,地层波动较大,初始道床沉降值均在3 mm以内。积极冻结至30 d,中心区域降温较为明显,此时大部分测温管的温度降至0℃,土体发生冻胀现象,产生较大的冻胀力。地面开始产生较为明显的变形沉降,其中冻结中心区域的道床沉降较为明显,沉降值达到10 mm。继续冻结至50 d时,此时降温速率基本保持不变,地面变形沉降保持稳定。

由于冻结中心区域冻胀较为明显,所以提取中心沉降监测点位XX13~XX17的监测数据,如图11所示。冻结中心区域的冻胀变形规律与其他监测点位的沉降规律保持一致,冻胀引起的变形更为突出,位于盾构隧道两端待开挖土体的冻胀位移较小。总体冻胀引起的位移由中心向两端呈减小趋势。

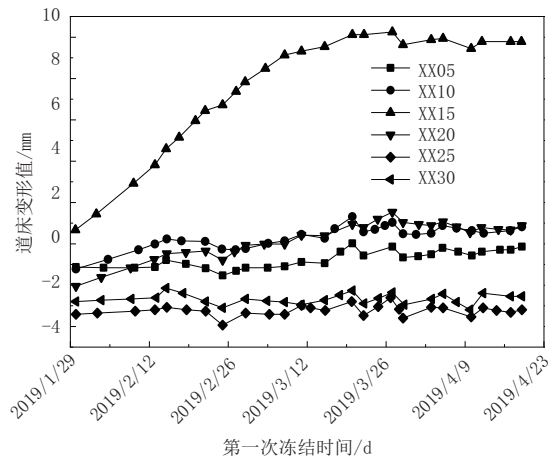


图10 道床沉降

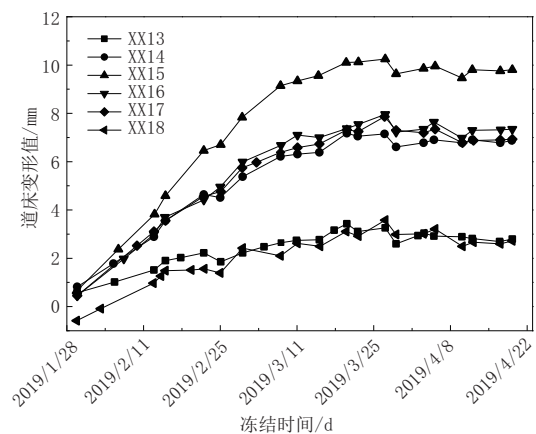


图11 中心点位道床沉降

3.2.3 立柱沉降

提取18号线国权路站下行线立柱垂直位移监测点位LZ01~LZ05的监测数据,如图12所示。由图可知:在0~20 d内,由于LZ03位于冻结中心区域,该处冻结温度下降较快,导致立柱产生5 mm的沉降值,其余点位的沉降均在3 mm之内。积极冻结至35 d,中心区域降至0℃,土体发生冻胀现象,土体的水分凝结成冰,产生较大的冻胀力。立柱开始产生较为明显的变形沉降,其中冻结中心区域的道床沉降较为明显,沉降值达到23 mm。继续冻结至50 d时,此时降温速率基本保持不变,地面变形沉降保持稳定。整个冻结过程中,冻结中心区域的冻胀效果较为明显,产生的位移幅值较大。其他点位的冻结沉降幅值呈现对称分布,中间区域冻胀变形较大,两端区域冻胀变形较小。

4 结语

考虑到水平冻结会对上部运营车站产生不好的影响,所以针对其施工过程中的监测数据进行分析,获得以下结论。

(1)本研究聚焦上海地铁18号线国权路站在建

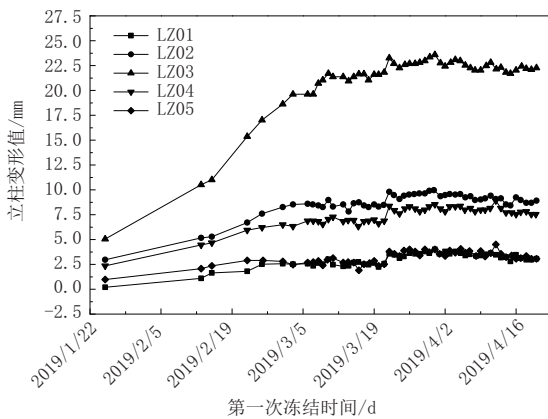


图 12 立柱沉降

隧道下穿 10 号线上部运营车站冻结法施工项目,进行了冻结施工过程的完整监测,同时对温度与沉降指标进行对比分析,总结分析了采用冻结法施工的关键温度参数的变化过程。

(2)通过分析冻结施工过程中冻结温度与时间的历时变化曲线可知:积极冻结期间,冻结温度前期较后期下降速率较快,内圈测温孔的温度较外围测温孔低。冻结 30 d,土体初步形成冻结壁。

(3)通过分析冻结施工过程中冻胀变形与冻结时间的变化曲线可知:积极冻结期间,道床、立柱与侧墙均产生地表沉降。0~15 d 内,沉降值均在 2 mm 之内,冻结 30 d,道床沉降与立柱沉降较为明显,沉降值分别达到 10 mm 与 22 mm。冻结至 50 d 时,降温速度减缓,结构沉降变形趋于稳定。

参考文献:

[1] 赵鹏.浅埋暗挖隧道上穿既有盾构变形控制研究[J].铁道建筑技术, 2021(11):137-141.
 [2] 朱国斌.软土地区近接工程对隧道的安全影响分析[J].交通世界, 2021(26):163-164.
 [3] 张珣.盾构近接施工对既有构筑物的影响[J].铁道建筑, 2021, 61(4): 71-74, 106.
 [4] 刘士波.盾构邻近既有隧道施工控制技术及影响分析[J].山西建筑, 2021, 47(7):139-142.
 [5] 王婷.既有盾构隧道受近接上穿地下通道施工影响研究[D].石家庄:河北地质大学, 2020.
 [6] 余双池.明挖隧道近接施工对既有地铁隧道的变形控制研究[D].重庆:重庆交通大学, 2020.
 [7] 尚明源.既有隧道近接施工安全影响分析[J].四川水泥, 2020(5): 301.
 [8] 鲁茜茜, 蹇蕴奇, 王先明.软硬不均地层盾构下穿既有隧道近接施工影响特性研究[J].四川建筑, 2019, 39(6):161-164.
 [9] 李方政, 方亮文, 王磊, 丁航.近接隧道冻结对运营车站冻胀变形控制研究[J].土木工程学报, 2020, 53(增刊 1):292-299.
 [10] 王磊, 李方政, 方亮文, 等.-18℃盐水冻结隧道近接下穿上覆结构冻胀规律试验研究[J].隧道建设(中英文), 2020, 40(9):1307-1313.
 [11] 龙道选, 王凯, 何红员, 等.饱和粉砂地层中联络通道冻结法在水流-盐分共同作用下的施工监测方法[J].隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(3):107-114.
 [12] 冶林茂, 杨海鹰, 许蓬蓬.河南土壤冻融过程与土壤水分的变化探讨[C]//第 28 届中国气象学会年会——S11 气象与现代农业.中国气象学会, 2011:6.
 [13] 牛江宇.人工冻结黏土特性试验研究[D].淮南:安徽理工大学, 2015.
 [14] 洪荣宝.地铁隧道水平冻结法施工期地层三维融沉变形规律研究[D].淮南:安徽理工大学, 2023.

(上接第 193 页)

[4] 杨洋.大直径电力顶管隧道下穿既有高铁桩基础的影响研究[D].郑州:郑州大学, 2020.
 [5] 宋艺.地铁区间隧道浅覆土下穿水库方案设计[J].铁道标准设计, 2017, 61(10):112-117, 124.
 [6] 仓乃瑞.软土地层中地道下穿工法适用性分析[J].城市道桥与防洪, 2019(6):189-193.
 [7] 王利民.浅埋隧道下穿季节性河道施工技术研究[J].施工技术, 2018

(S1):758-760.

[8] 赵刚, 薛普恒.综合管廊下穿某河流方案研究[J].建筑技术开发, 2019, 46(5):106-107.
 [9] 彭荣华.地铁盾构隧道浅覆土下穿河道方案设计[J].低温建筑技术, 2019, 41(1):109-113.
 [10] 陈德国.盾构近距离下穿河底大直径承压管道施工关键技术[J].铁道建筑技术, 2018(3):102-106.