

文章编号: 1007-2993(2025)01-0105-08

上下错位地铁隧道异型联络通道冻结法 施工及实测研究

袁华崧 张婷 杨平

(南京林业大学土木工程学院, 江苏南京 210037)

【摘要】 为解决间距大, 上下错位地铁隧道异形联络通道的施工问题, 采用在联络通道中部设置竖井、上下双通道分别冻结与构筑的方案, 对冻结过程进行了温度与地表位移变化规律实测研究。结果表明: (1) 冻结期间测温孔的温度变化可分为 3 个阶段, 包括积极冻结前期测点温度迅速下降、积极冻结后期测点温度稳定下降、维护冻结阶段前期温度稳定后期开挖温度持续升高; (2) 冻结壁向内侧扩展速率是向外侧扩展速率的 1.1 倍左右; (3) 联络通道的地表位移在积极冻结期间迅速隆起, 在维护冻结期间冻结产生的隆起和开挖引起的沉降相互抵消, 大致呈现稳定趋势; (4) 在不同埋深条件下, 竖向和水平向地表冻胀隆起速率都是由联络通道轴线中心处向两侧逐渐减小, 同时埋深越深地表的冻结隆起速率差异越小; (5) 大间距、上下错位地铁隧道异形联络通道采用在联络通道中部设置竖井、两个错位通道分别冻结构筑方案合理可行, 可为类似工程参考。

【关键词】 上下错位异形联络通道; 冻结法; 冻结温度场; 地表竖向位移

【中图分类号】 U455

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2023-0887

Construction and field study of the freezing method for vertically misaligned irregular connection passage in subway tunnels

Yuan Huasong Zhang Ting Yang Ping

(School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

【Abstract】 To solve the construction issues of irregular connection passages in subway tunnels with significant gaps and vertical misalignments, a structural scheme involving the incorporation of vertical shafts at the midpoint of the connection passage was proposed, alongside a dual-channel method where both the upper and lower passages were separately frozen and constructed. An empirical study scrutinizing the patterns of temperature variations and ground surface displacements during the freezing process was conducted, revealing the following results: (1) The fluctuations in temperature recorded at the monitoring holes during the freezing phase can be delineated into three distinct stages: a rapid decline in temperature during the early active freezing stage, followed by a stable decrease in temperature in the latter part of the active freezing stage, temperature stability in the early stage of the segment and finally a sustained increase in temperature during the later part of the maintenance freezing stage, exacerbated by ongoing excavation activities; (2) The speed of inward expansion of the freezing wall was found to be approximately 1.1 times higher than the outward expansion rate, illustrating a predominant inward growth during the freezing operations; (3) The ground deformation within the connection passage exhibited a rapid uplift during the active freezing phase. This was counterbalanced during the maintenance freezing phase, where the uplift induced by freezing was largely offset by the settlement caused by excavation, thus resulting in a generally stable trend; (4) At various burial depths, both vertical and horizontal ground freezing expansion uplift rates demonstrated a gradual decrease from the central axis of the connection passage moving towards either side. Furthermore, it was observed that greater burial depths resulted in a reduced discrepancy in ground freezing uplift rates; (5) The structural approach of installing vertical shafts at the midpoint of the irregular connection passage, complemented by individual freezing plans for the two vertically misaligned passages in the wide-spacing subway tunnel, proved to be a rational and viable solution for similar engineering projects.

【Key words】 vertically misaligned irregular connection tunnel; freezing technique; frozen temperature field; vertical surface displacement

基金项目: 国家自然科学基金(52178337)

作者简介: 袁华崧, 男, 1999 年生, 在读硕士研究生, 主要从事城市地下工程的研究。E-mail: yhsq@njfu.edu.cn

通信作者: 张婷, 女, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事城市地下工程的研究。E-mail: zhangting1028@sina.com

0 引言

对于地铁隧道工程,为应对突发水灾、火灾等情况,需在区间内设置联络通道,又被称为“逃生通道”,有时其位置不可避免地会遇到透水性强、承载力低的软弱地层,这种情况下联络通道施工难度大、风险高。在富水软弱地层联络通道常采用人工冻结法加固、矿山法构筑施工^[1-3]。

近年来,国内外学者对常规地铁联络通道冻结温度场进行了大量研究,主要采用的方法为数值模拟、实测、实测模拟结合分析。实测方面,杨平等^[4]以软弱地层联络通道冻结法施工为背景,结合实测数据将地层冻结过程分为温度下降、降温减慢、降温加快、温度稳定和维持冻结5个阶段;林小淇等^[5]依据现场实测数据判断冻结壁交圈时间,验证了冻结施工方案的可行性。数值模拟方面,Fu等^[6]基于南宁地铁3号线联络通道加固工程,分析了冻结壁形成过程,讨论了热物理参数、土壤地层条件等因素对冻结壁形成的影响。实测模拟结合分析方面,李珂等^[7]通过对呼和浩特市地铁某联络通道冻结工程的研究,使用ADINA有限元软件结合实测数据分析温度场发展规律;张世雷等^[8]以兰州地铁2号线联络通道冻结法施工为背景建立数值模型,通过与实测数据进行对比,研究了复合地层联络通道冻结温度场的发展规律。

地铁联络通道冻结法施工中土体冻胀融沉引起的土体变形会影响周边建筑的安全,诸多学者通过现场实测数据来的处冻结法施工中地表位移的规律。陶东军等^[9]以苏州轨道交通5号线联络通道施工为研究对象,分析了软土地层中冻结法施工引起的地表沉降变形趋势。Zhang等^[10]结合哈尔滨轨道交通2号线联络通道施工与实测数据得出沉降和隆起量均在控制范围内。光辉等^[11]针对软土地区联络通道工程,分析在整个冻结过程中周边地表的变形规律,总结出地表沉降与通道中心距离和施工扰动程度相关。何玉华等^[12]以盾构区间联络通道冻结法施工为研究背景,通过对周边地表进行监测设计和数据分析,得出了地表沉降变化规律。

对于非常规型联络通道方面的研究,目前涉及的主要形式为超长通道和上下高差。朱泽莹等^[13]以福州地铁2号线60m级超长联络通道工程为背景,通过合理设置冻结参数、布置孔位和优化注浆参数,成功解决了冻结法施工引起的冻胀融沉问题。王祥等^[14]通过研究水平冻结法加固武汉某长距离联络通道,提出采用双侧布置冻结孔和防偏技术,经软件分

析验证,冻结效果满足设计要求。马俊等^[15]研究常州地铁1号线某“Z”字型平面斜交联络通道冻结法施工,采用分析现场实测数据的方法得出冻结过程中温度与地表位移的发展规律。

综上,绝大多数的隧道联络通道冻结工程均属于两隧道间无高差或小高差的联络通道,对于大高差、大间距联络通道,由于联络通道高差及跨度大,冻结体积较大,冻胀处理难度较大,目前的冻结施工技术还尚未成熟。因此,需要对特殊施工条件下的冻结工程开展研究,掌握大高差、大间距联络通道冻结过程中的冻胀作用对隧道结构的影响,了解冻结过程中的地表位移规律,保证隧道结构的安全。同时,对类似复杂结构的联络通道应用冻结法施工技术,具有一定的现实意义。

1 工程概况

苏州轨道交通7号线会展中心站—青龙港路站区间联络通道高差达到4.1m,线间距长达40.9m。联络通道左侧拱顶埋深16.0m,右侧拱顶埋深11.8m。通道开挖区间土层主要为④-2a黏质粉土夹粉质黏土、④-2砂质粉土、⑤-1粉质黏土,具体地层参数见表1。所处地层地下水主要有潜水、微承压水、承压水3种类型。联络通道采用冻结法施工,为了满足区间紧急疏散和排水的要求,于联络通道中部设置竖井,将联络通道分割成两个较短的单元,以减小冻结加固施工风险。

表1 地层参数表

名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	土层厚度 /m
④-2a黏质粉土夹粉质黏土	19	9	25	3~3.9
④-2砂质粉土	18.7	28	16.5	2~3.4
⑤-1粉质黏土	19.4	40	16	6.5~7.2

2 联络通道结构及冻结施工方案

2.1 联络通道结构方案

目前国内外针对下错位、线间距大的联络通道,主要采用以下方案:①“Z”型平面斜交结构方案,这种“Z”型联络通道直接将两个隧道连接起来,可以有效缩短工期;②在联络通道之间再设置一个竖向联络通道,通过双跑楼梯将上下两个隧道连接起来,这种形式的联络通道施工简便;③在联络通道中间从地表开挖出一个竖井,再由竖井向两侧开挖,这种形式具有很大的空间优势,为后续开挖提供便利。

本工程线间距长达40.9m,隧道距离地面的垂直距离较短,综合考虑经济效益和施工效率确定采用

竖井方案, 将联络通道分割成两个较短的施工区域, 以减小冻结加固施工风险。竖井位于两个隧道之间, 竖井长 19 m, 宽 9.4 m, 埋深 22.9 m, 竖井内部在两侧联络通道底板位置处设置休息平台, 通过楼梯连接两个休息平台。由于竖井跨度较大, 在楼梯中间再设置一个休息平台, 楼梯台阶尺寸为 800 mm×150 mm, 采用 C30 混凝土浇筑。竖井侧井壁厚度 0.9 m, 隧道侧管片壁厚 0.35 m。采用矿山法施工, 复合式衬砌结构, 初期支护与二次衬砌之间设置防水层, 初支设计厚度为 0.25 m, 采用 C25 喷射混凝土, 二衬设计厚度为 0.4 m, 采用 C35、P10 防水钢筋混凝土, 结构型式见图 1。

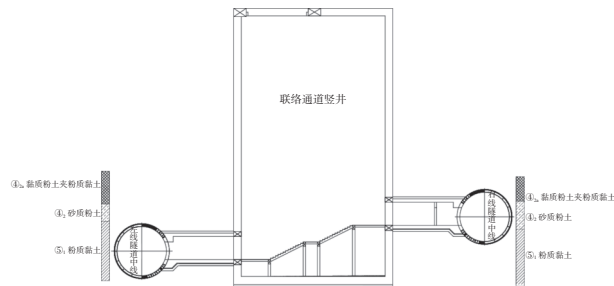


图 1 联络通道结构示意图

2.2 联络通道构筑方案

联络通道构筑过程中首先完成竖井结构, 用大型挖机从地面开始施工, 进行地下空间的支护和加固, 竖井结构的建设确保了联络通道的核心部分。在开挖过程中浇筑联络通道底板处的休息平台, 挖至设计深度之后浇筑底板。待强度满足要求后, 为节省开挖联络通道的时间, 设置梯笼代替楼梯, 梯笼垂直安装在竖井顶端, 并固定在两个休息平台之间, 在联络通道施工结束之后再完善楼梯结构。

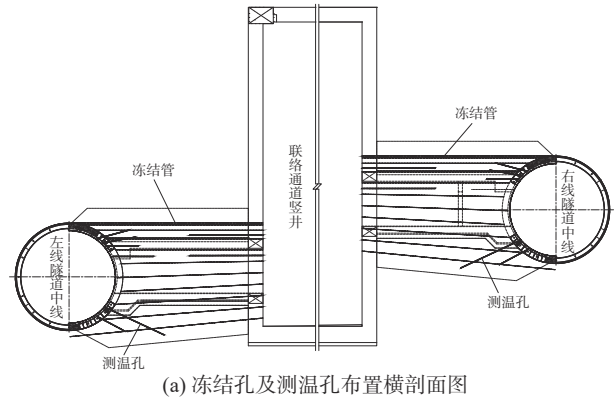
该施工过程的优势在于: 在联络通道主体结构施工结束前设置梯笼, 可以在联络通道施工过程中为工人提供施工便利, 提高工程效率, 减少工期。

2.3 冻结加固

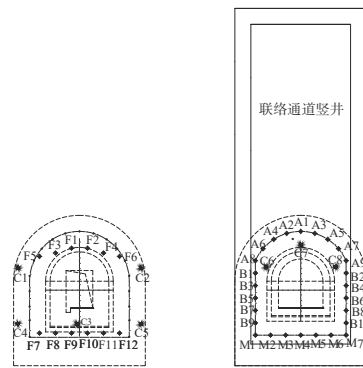
依据联络通道所处地层以及结构特点, 采用上下双通道分别冻结与构筑的冻结施工方案。左、右线联络通道共用一个冻结站, 由于竖井空间有限, 冻结站设置地面, 内置三台冷冻机, 两台工作一台备用。左右联络通道所处地层条件类似, 为缩短工期, 左、右线同时冻结, 2023 年 3 月 14 日开机冻结, 冻结 55 d 后, 左右联络通道围岩状态均达到设计要求。

冻结孔按水平、上仰两种角度布置在通道的四周, 共布置冻结孔 76 个(包括 4 个穿孔), 以竖井为中轴线对称布置, 其中竖井内布置 52 个(两端各 26 个), 隧道内 24 个(左、右线各 12 个), 由于竖井侧壁是个

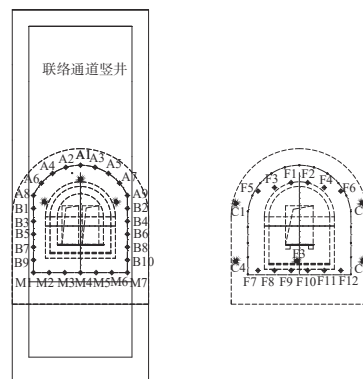
平面, 与一般联络通道的弧形管片不同, 在联络通道的底板处只设计了一排冻结孔。设计最低盐水温度 $-28 \sim -30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 冻结 7 d 盐水温度达 $-18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 维护冻结的盐水温度达到 $-28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。冻结壁设计平均温度 $\leq -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 有效厚度 $\geq 1.8 \text{ m}$, 冻结壁与管片界面平均温度 $\leq -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 积极冻结 45 d。冻结孔布置如图 2 所示, 具体冻结参数见表 2。



(a) 冻结孔及测温孔布置横剖面图



(b) 低侧(左线)



(c) 高侧(右线)

图 2 冻结孔及测温孔布置图

2.4 联络通道开挖构筑

联络通道开挖方式采用矿山法暗挖施工。根据上下错位、线间距大的结构特点, 从竖井两侧同时向左线、右线开挖。开挖及结构施工顺序为: ①先进行通道部分开挖; ②再开挖隧道侧喇叭口位置; ③最后开挖竖井侧喇叭口(见图 3)。开挖通道时采用短挖、

表2 联络通道冻结主要设计参数表

序号	参数名称	单位	参数值
1	冻结壁设计厚度	m	1.8
2	冻结壁平均温度	℃	≤-10
3	积极冻结时间	天	45
4	设计最低盐水温度	℃	-28~-30
5	维护冻结盐水温度	℃	≤-28
6	测温孔个数	个	16
7	卸压孔个数	个	8
8	冻结孔	个	76

短支方式,最大步距按不大于0.8 m进行控制,并及时对暴露的冻结壁进行保温。出土方式采用水平及垂直运输相结合,将开挖土方用水平运输车集中运输至竖井所搭的开挖平台处,由吊机吊至地面指定堆放处,再集中运出场地。

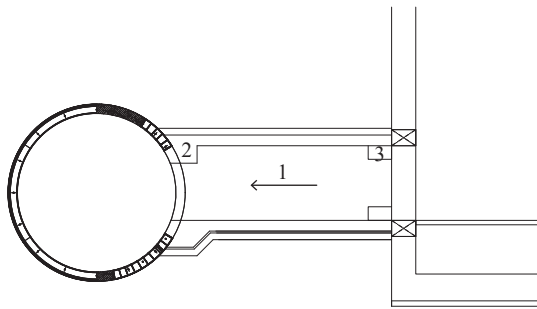


图3 联络通道开挖顺序图

3 温度场与位移场实测分析

3.1 测温孔及地表位移点布置

3.1.1 测温孔布置

为掌握冻结壁温度变化情况,研究冻结土体温度发展规律,在竖井及联络通道洞口两侧布置16个测温孔(左线、右线各8个),左线测温孔与右线冻结孔的布置位置相同。左线隧道一侧布置5个测温孔(C1—C5),其中C1、C2、C4、C5位于联络通道主体结构的两侧,C3位于联络通道底部位置。左线竖井一侧布置3个测温孔(C6—C8),C6、C8位于联络通道主体结构两侧,C7位于联络通道拱顶处,各测温孔的位置示意图如图2。

3.1.2 地表位移点布置

联络通道正上方共布置8排地表竖向位移监测点(D1—D8)。其中右线上方为D1—D4,D1—D3排测点编号为 $D_i-1—D_i-11$,D4排为D4-1—D4-8;左线上方为D5—D8,D5排测点编号为D5-1—D5-8,D6—D8排测点编号为 $D_i-1—D_i-11$ 。联络通道上方区域测点间距为3 m,区域外测点间距为5 m,排间距为5 m。监测点布置如图4所示。

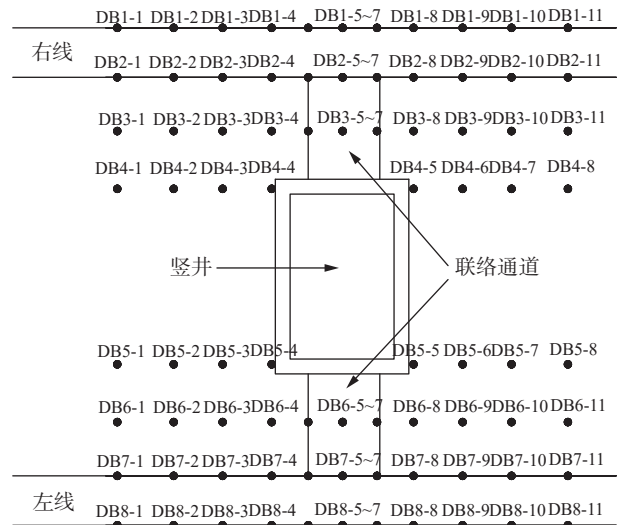


图4 地表位移监测点布置

3.2 盐水温度分析

本工程于2023年3月14日开机冻结,总去总回盐水温度如图5所示。

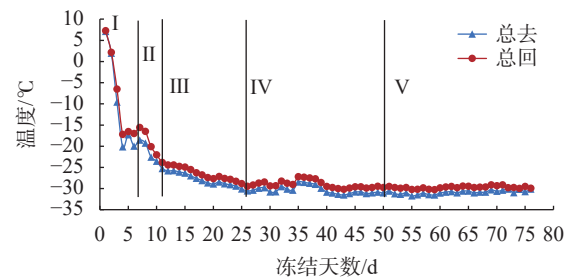


图5 盐水总去、总回温度随冻结时间变化图

实测结果表明:总去、总回盐水温度变化大致分为5个阶段:I阶段处于盐水温度迅速下降阶段,盐水温度从7℃迅速降至-20℃;II阶段处于盐水温度稳步下降阶段,相较于I阶段盐水温度下降速率变低;III阶段盐水温度缓慢趋稳;IV阶段处于盐水温度稳定阶段,盐水温度稳定在-30℃左右,期间因冷冻机调试和维护导致轻微升温,仍稳定在-30~-32℃;V阶段处于维护冻结段,竖井温度对流比较大,冷冻机仍然保持积极冻结的工作状态,温度稳定在-30~-32℃,保证施工安全。

3.3 温度场实测分析

3.3.1 测温孔温度变化规律

选取位于左线、右线墙体部分的内外侧测温孔C1、C6,分析其所在位置的地层温度变化情况,结果如图6所示。结果表明:冻结期间各测温点温度变化趋势基本相似。冻结前期,地层温度与盐水温差大,导致土体温度快速下降;随土体温度下降,盐水与地层温差逐渐缩小,土体降温速度逐渐减缓。

如图6(a)所示,测温孔左线C1位于左线联络通

道冻结管外侧,测点温度随时间变化可分为3个阶段:①积极冻结前期持续约20 d,刚开机盐水温度偏高温度下降缓慢,前期盐水温度与土层初始温度温差过大,测点温度迅速下降各测点平均降温速度为 $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$,同时测点深度越深,温度越高;②积极冻结后期持续约30 d,沿测点深度方向3个测点的温度变化梯度分别为 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$,说明沿测温孔方向温度稳定下降;③维护冻结由于C1位于冻结管外侧远离开挖范围,测点温度几乎不受开挖影响,平均降温速度为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

如图6(c)所示,测温孔左线C6位于左线联络通

道冻结管内侧,测点温度随时间变化可分为3个阶段:①积极冻结前期与冻结管内侧的规律相似,各测点平均降温速度为 $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$,内侧的降温速度为外侧的1.5倍;②积极冻结后期盐水温度稳定在 $-30\sim-32\text{ }^{\circ}\text{C}$,盐水的去回路温差小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,受潜热影响土体降温速度减缓,测点的平均降温速度为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$,在此期间冻结壁逐渐达到设计厚度;③维护冻结由于C6位于冻结管内侧处于开挖范围附近,随着开挖深度接近测点进入土体的深度出现温度回升的现象,通道初期支护完成后,冻结壁受喷射混凝土保护,测点温度又出现快速下降趋势。

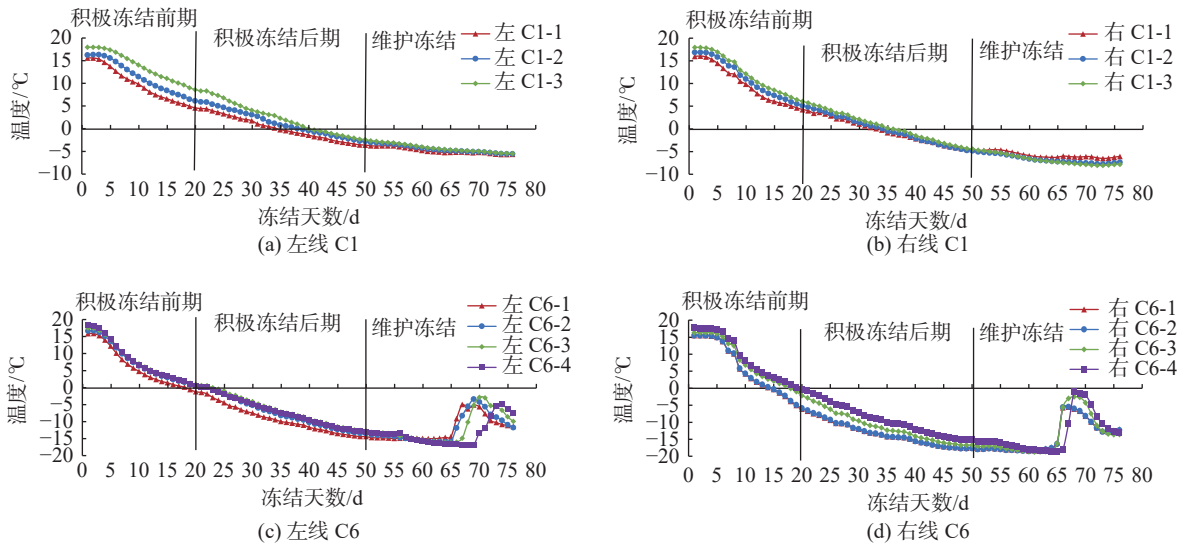


图6 墙体部分的内外侧测点温度与冻结时间变化曲线

左、右线冻结管内外侧测温孔温度变化规律几乎一致,差异在于积极冻结前后期时间节点,以及维护冻结期间右线C6在开挖过程中达到正温(存在一定风险),原因在于冻结管以及测温孔在打孔过程中施工存在误差。故类似工程需要注意保证施工质量,严格遵守设计标准。

3.3.2 冻结壁发展速度

为了解冻结比发展速度,继续分析图6的测点降温曲线,左线C1-3,C6-4最晚达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,时间分别为40 d,23 d。依据冻结管间距及测点温度,可以推算出冻结壁发展速率分别为 $2.3\text{ cm}/\text{d}$, $2.6\text{ cm}/\text{d}$;右线C1-3,C6-4最晚达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,时间分别为36 d,20 d。依据冻结管间距及测点温度,可以推算出冻结壁发展速率分别为 $2.6\text{ cm}/\text{d}$, $2.9\text{ cm}/\text{d}$;

冻结壁向内发展速度比向外发展速度快,左线冻结壁向内发展速度约为向外发展速度的1.16倍,右线冻结壁向内发展速度约为向外发展速度的1.11倍,在粉质黏土层中冻结壁往内侧扩展速率是

向外侧扩展速率的1.1倍左右,与其他工程研究结果^[4]相近。这是由于冻结管位于施工区域的外部或表面,冷量向内扩散的热量传导路径较短,而内侧土体因无法自由膨胀或流动,使得其更容易被冻结,导致冻结壁向内侧迅速扩展。同时冻结管向外冻结范围大,冷量损耗大,导致冻结壁向内发展速率比向外发展速率快。

4 地表位移实测分析

4.1 各断面最大竖向位移随冻结时间变化规律

为掌握上下错位、大线间距联络通道水平冻结对地表位移的影响,进行地表竖向位移监测,2023年3月14日开始冻结,6月12日停止冻结,图7为左线、右线各断面地表竖向位移最大测点的竖向位移随冻结时间变化曲线。

实测结果表明地表竖向位移变化可分为4个阶段。阶段I处于积极冻结前期持续20 d,前10 d左右盐水温度较高土体未出现冻胀现象,但是打孔引起的地表沉降仍在继续,随着盐水温度稳定后,局部形

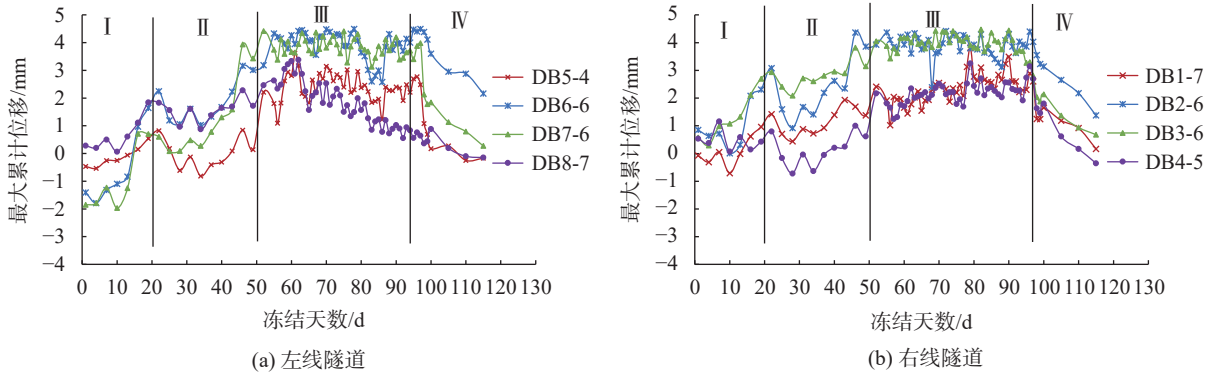


图7 最大地表竖向位移随冻结时间变化

成冻土地表开始出现轻微冻胀隆起的情况,左线最大隆起位置于DB6-6处,其值为2.24 mm,右线最大隆起位置于DB3-6处,其值为2.7 mm。阶段Ⅱ处于积极冻结后期持续30 d,期间20~25 d时现场周边降水施工,冻结对地表的影响远小于降水影响,地表沉降幅度较大,左线最大沉降位置为DB5-4,最终竖向位移为-0.82 mm,右线最大沉降位置DB4-5,最终竖向位移为-0.72 mm;现场发现沉降趋势过大停止降水后地层沉降趋于稳定,地表继续迅速冻胀隆起,在积极冻结50 d时达到冻结壁设计厚度,同时冻胀隆起达到最大值,左线最大隆起位于DB3-6处,其值为4.48 mm,右线最大隆起位于DB6-6处,其值为4.49 mm。阶段Ⅲ处于维护冻结时期,开挖引起的沉降和冻结引起的冻胀进行了抵消,表现出基本上维持很小的竖向位移,右线的测点沉降趋于稳定;由于左线比右线的拱顶埋深深4.2 m,左线的沉降变化大于右线的沉降变化,左线联络通道两侧测点DB5-4和DB8-7处于开挖部分的上方有少量沉降。阶段Ⅳ开始停止冻结,沉降最明显的是左线DB6-10处和右

线DB3-10处,冷冻机停机停止冻结后冻土开始融化,土体的体积开始发生收缩,土体的强度和稳定性会逐渐恢复到原始状态,导致土体液化和软化,从该阶段起土体开始快速沉降。

4.2 各断面最大竖向位移沿断面位置变化分析

由于现场环境复杂,多数测点因受影响而无法进行监测,根据已有数据绘制各个监测断面竖向位移分布曲线,如图8所示。

由图8可知,各测点的位移变化规律基本相同,地表最大的冻胀变形大致呈现两边往中间凸起的趋势,最大的隆起点都在DBi-6测点。左线最大的冻胀隆起位于测点DB6-6,最大竖向位移为4.77 mm,而DB6-11的竖向位移为2.74 mm,联络通道中线处隆起量是布点最远处(与通道埋深相近)的1.75倍;右线最大的冻胀隆起位于测点DB3-6,最大竖向位移为4.48 mm,而DB3-11的竖向位移为2.44 mm,联络通道中线处隆起量是布点最远处的1.83倍。在粉质黏土层中实施冻结,联络通道地表中线处隆起量是布点最远处的1.8倍左右。

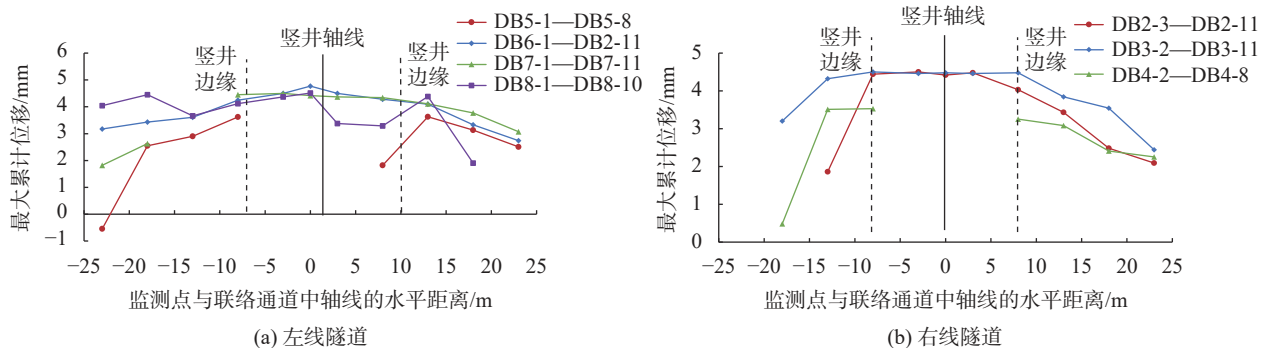


图8 联络通道冻结期间最大冻胀分布

冻胀竖向位移较大的监测点均位于联络通道及冻结壁的正上方,其原因是在联络通道顶部的冻结管布置密集,冻结时土中应力难以释放,导致在联络通道顶部位置出现明显的冻胀影响。随着距联络通道中轴线的水平距离的增大,最大的冻胀隆起量逐渐

减少。

4.3 联络通道不同埋深在各阶段引起的地表竖向位移差异

为研究联络通道在各个阶段不同埋深下地表竖向位移的变化规律,选取水平方向测点DB3、DB6

以及垂直方向 Di-6 测点进行分析, 结果如图 9 所示, 其中, DB3 和 DB6 两排的第一个测点均被破坏无法获得数据。

由图 9(a)可知, 各测点随着冻结时间的变化左右两线的地表均出现冻胀隆起的现象。左线最大冻胀隆起速率的测点位于 DB6-6, 达到 0.033 mm/d, 左线最小冻胀隆起速率的测点位于 DB6-11, 达到 0.021 mm/d, 左线地表最大冻胀速率是最小冻胀速率的 1.57 倍; 右线最大冻胀速率的测点位于 DB3-6, 达到 0.029 mm/d, 右线最小冻胀速率的测点位于 DB3-11, 达到 0.011 mm/d, 右线地表最大冻胀速率是最小冻胀速率的 2.6 倍。在不同埋深情况下, 水平方向上埋深越深地表冻胀隆起速率差异越小, 水平方向冻胀隆起速率由联络通道轴线中心处逐渐向两侧减小。

由图 9(b)可知, DB6-6—DB8-6 是位于左线上方测点, 左线最大冻胀隆起速率为 0.033 mm/d, 左线最小冻胀隆起速率的测点位于 DB8-6, 达到 0.026 mm/d, 左线地表最大冻胀速率是最小冻胀速率的 1.26 倍; DB1-6—DB3-6 是位于右线上方测点, 右线最大冻胀隆起速率为 0.029 mm/d, 右线最小冻胀隆起速率的测点位于 DB1-6, 达到 0.006 mm/d, 右线地表最大冻胀速率是最小冻胀速率的 4.8 倍。在不同埋深情况下, 竖直方向上埋深越深地表冻胀隆起速率差异越小, 竖直方向冻胀隆起速率由联络通道轴线中心处逐渐向两侧减小。

综上所述, 竖向和水平方向上地表冻胀隆起速率都是由联络通道轴线中心处向两侧逐渐减小, 同时埋深越深地表的冻胀隆起速率差异越小。

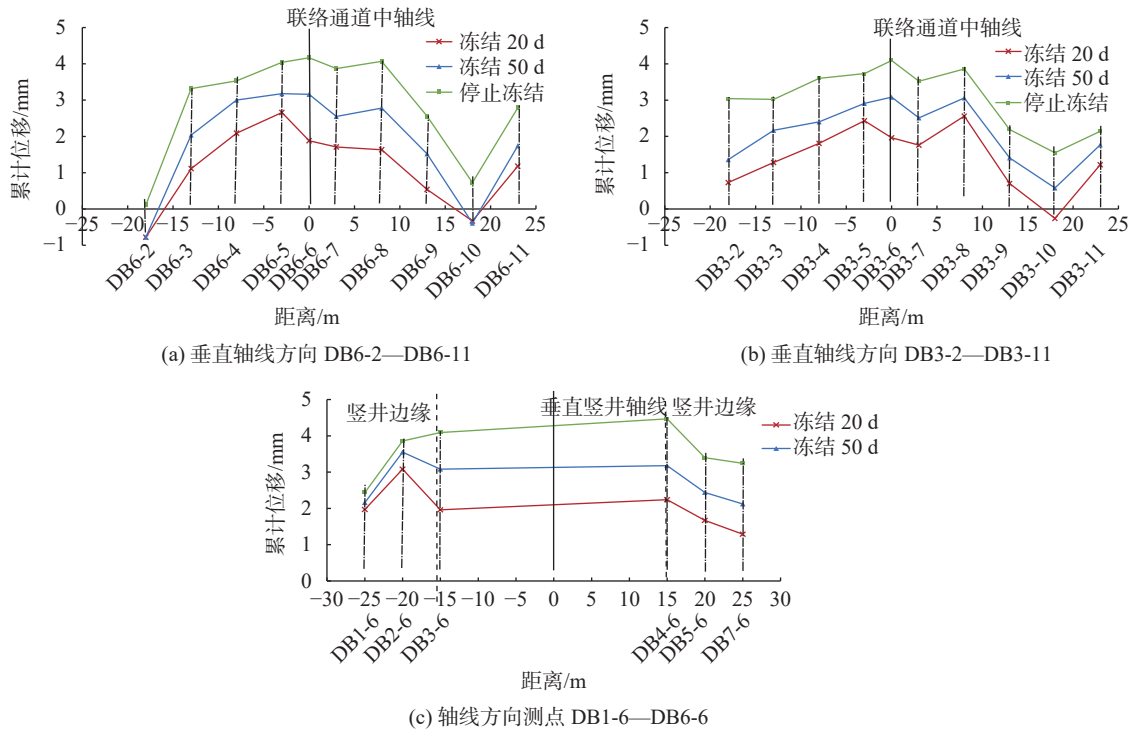


图 9 测点在各阶段地表竖向位移变化图

5 结论

(1)对于大线间距、上下错位联络通道, 可分割成两个小区域联络通道并用竖井连接, 两个独立通道分别冻结与开挖。工程实践验证了其合理有效性。

(2)上下错位双通道分别冻结, 简化了冻结孔布置。冻结期间温度变化分为温度缓慢下降、温度稳定下降、温度保持稳定 3 个阶段。冻结壁向内侧扩展的速率约为向外侧扩展速率的 1.1 倍。

(3)地表竖向变形变化分 4 个阶段: 初期为轻微冻胀隆起; 20 d 后迅速隆起; 维护冻结期地层隆起和沉降相互抵消, 地层位移呈稳定趋势; 停止冻结后沉

降明显。融沉对地表竖向位移影响较大, 停冻后应加强地表竖向位移监测, 并辅以融沉注浆来控制地层沉降。

(4)联络通道中轴线处冻胀竖向位移最大, 随联络通道中轴线的水平距离增加最大冻胀隆起量逐渐减少, 中线最大隆起量是布点最远处的 1.8 倍左右。

(5)根据上下错位联络通道冻胀隆起分析, 随联络通道埋深增加, 冻胀隆起速率差异变小。

参 考 文 献

[1] 董新平, 于少辉, 张毅豪, 等. 地铁联络通道冻结法施工

- 中涌水成因及防治[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(1): 322-329,340. (DONG X P, YU S H, ZHANG Y H, et al. The causes and prevention measures of water inflow at cross passage located in sandy gravel layers and constructed by artificial ground freezing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(1): 322-329,340. (in Chinese))
- [2] 韩晓明, 何源, 张飞雷. 富水粉细砂层大直径盾构隧道联络通道施工关键技术研究——以孟加拉卡纳普里河底隧道为例[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(3): 227-235. (HAN X M, HE Y, ZHANG F L. Study on key construction technology for cross passages in large-diameter shield tunnels in water-bearing silty fine sand stratum: A case study of the Karnaphuli River Tunnel Project in Bangladesh[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(3): 227-235. (in Chinese))
- [3] 赵江涛, 王笑欢, 程敏, 等. 冻结法施工联络通道渗漏水病害的原因及治理方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(8): 77-81,88. (ZHAO J T, WANG X H, CHENG M, et al. Causes and treatment measures of water seepage and leakage diseases in freezing construction link passage[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(8): 77-81,88. (in Chinese))
- [4] 杨平, 陈瑾, 张尚贵, 等. 软弱地层联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2226-2234. (YANG P, CHEN J, ZHANG S G, et al. Whole range monitoring for temperature and displacement fields of cross passage in soft soils by AGF[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2226-2234. (in Chinese))
- [5] 林小淇, 胡俊, 任军昊, 等. 呼和浩特市地铁联络通道冻结施工监测与分析[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2022, 40(4): 426-433. (LIN X Q, HU J, REN J H, et al. Monitoring and analysis of freezing construction for contact passage of Hohhot Metro[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2022, 40(4): 426-433. (in Chinese))
- [6] FU Y, HU J, WU Y W. Finite element study on temperature field of subway connection aisle construction via artificial ground freezing method[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 189: 103327.
- [7] 李珂, 胡俊, 林小淇, 等. 砂卵石地层联络通道温度场发展规律及敏感性分析[J]. 森林工程, 2023, 39(1): 174-186. (LI K, HU J, LIN X Q, et al. Development law and sensitivity analysis of temperature field of contact channel in sand and pebble strata[J]. Forest Engineering, 2023, 39(1): 174-186. (in Chinese))
- [8] 张世雷, 汪磊, 何越磊, 等. 复合地层联络通道冻结温度场发展规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 266-273. (ZHANG S L, WANG L, HE Y L, et al. The development regularities research of freezing temperature field for the cross passage in compound stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(S1): 266-273. (in Chinese))
- [9] 陶东军, 桂林, 李建望. 地铁隧道联络通道冻结施工引起地表变形实测分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(5): 69-73. (TAO D J, GUI L, LI J W. Measurement analysis of surface deformation caused by freezing construction of connection passages in metro tunnels[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(5): 69-73. (in Chinese))
- [10] ZHANG M H, WAN H, YANG Y J, et al. Construction technology of the freezing method for the connecting-passage in the subway[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 384(1): 012090.
- [11] 光辉, 高燕, 胡俊. 软土地区某隧道联络通道施工地表沉降监测分析[J]. 公路工程, 2017, 42(3): 95-97,179. (GUANG H, GAO Y, HU J. Monitoring and analysis of surface settlement of tunnel construction in soft soil area[J]. Highway Engineering, 2017, 42(3): 95-97,179. (in Chinese))
- [12] 何玉华, 刘强, 陈昌六, 等. 联络通道冻结法施工周边环境监测实例分析研究[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(14): 80-82. (HE Y H, LIU Q, CHEN C L, et al. Analysis and research on surrounding environment monitoring of freezing method of connecting channel construction[J]. *Building Technique Development*, 2022, 49(14): 80-82. (in Chinese))
- [13] 朱泽莹, 吴永哲, 杨平, 等. 60 m级超长联络通道冻结法施工融沉控制研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(1): 61-66. (ZHU Z X, WU Y Z, YANG P, et al. Research on melting settlement construction control by artificial ground freezing method of a 60m level super-long cross passage[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2023, 45(1): 61-66. (in Chinese))
- [14] 王祥, 陈发达, 徐文胜, 等. 某地铁工程长距离联络通道水平冻结法加固设计与有限元分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(10): 82-86. (WANG X, CHEN F D, XU W S, et al. Reinforcement design of horizontal freezing method applied to a long-distance link passage of metro project, and finite element analysis[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 82-86. (in Chinese))
- [15] 马俊, 胡导云, 杨平. 平面斜交联络通道水平冻结及实测分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(12): 1965-1972. (MA J, HU D Y, YANG P. Horizontal freezing and measurement analysis of plane oblique connection gallery[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(12): 1965-1972. (in Chinese))