

引用本文:吴永哲,朱泽萱,杨平,等. 60 m级超长联络通道冻结法施工与实测分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(6): 148-156.
WU Yongzhe, ZHU Zexuan, YANG Ping, et al. Construction and measurement analysis of freezing method for 60 m level super long connecting passage[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6): 147-156.

DOI:10.19815/j.jace.2021.11039

60 m级超长联络通道冻结法施工与实测分析

吴永哲¹, 朱泽萱², 杨平², 刘红伟¹, 吴文亮¹

(1. 中交隧道工程局有限公司, 江苏 南京 210007; 2. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要:为全面掌握60 m级超长联络通道冻结温度场、冻胀融沉变形规律,为今后类似工程积累经验,对福州地铁2号线紫阳站—五里亭站区间66 m超长联络通道冻结法施工过程进行温度和变形实测,分析了该超长联络通道施工工艺、冻结温度和地层变形规律,总结了其有别于常规联络通道的特点。结果表明:与常规联络通道相比,超长联络通道在结构设计、冻结方案、施工工艺等方面需进行一系列优化与改进,保证冻结施工顺利完成的同时也兼顾经济性;冻结降温过程中,冻结向内侧发展速率是向外发展的1.75倍;淤泥夹砂地层在斜交冻结管处测点与常规联络通道测点规律有所区别;冻结管搭接区域测点温度低于非搭接区域;由于冻土体量更大,地表隆起与沉降量比常规联络通道更大,影响范围更广,同一断面测点距离隧道中线距离越小,位移越大;当测点超过隧道中线20 m后,冻胀融沉量较小;中线处D5-4测点冻胀量和融沉量分别是距中线20 m处D5-1测点的2.8倍和2.3倍;各断面最大冻胀融沉量出现在隧道中线处,并沿联络通道中线分布;由于联络通道端头断面冻土体量大,其冻胀量和融沉量分别是中线处的1.6倍和1.7倍,有别于常规联络通道。

关键词:超长联络通道;冻结法;温度场;冻胀;融沉;实测分析

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)06-0148-09

Construction and measurement analysis of freezing method for 60 m level super long connecting passage

WU Yongzhe¹, ZHU Zexuan², YANG Ping², LIU Hongwei¹, WU Wenliang¹

(1. CCCC Tunnel Engineering Company Limited, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: In order to comprehensively grasp the freezing temperature field, frost heave and thaw settlement deformation laws of the 60 m level super long connecting passage, and accumulate experience for similar projects in the future, the temperature and deformation measurement research was conducted on the freezing method construction process of the 66 m super long connecting passage between Ziyang station and Wuliting station on Fuzhou metro line 2. The construction process, freezing temperature, and formation deformation law of the super long connecting passage were analyzed through actual measurement, and the characteristics that were

收稿日期: 2022-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178337); 中交隧道局集团有限公司科研项目(KY-2021-03)

作者简介: 吴永哲(1978-), 男, 高级工程师, E-mail: 1627255299@qq.com.

通信作者: 杨平(1964-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: yangping@njfu.edu.cn.

different from conventional connecting passages were summarized. The results show that compared with conventional connecting passages, super long connecting passages require a series of optimizations and improvements in terms of structural design, freezing scheme, construction technology, and other aspects to ensure the smooth completion of freezing construction while also considering economic efficiency. During the freezing and cooling process, the development rate of freezing inward is 1.75 times that of outward development. There is a difference in the law between the measurement points at the oblique freezing pipe and the conventional connecting passage in the silt and sand layer. The temperature of the measuring point in the overlapping area of the frozen tube is lower than that in the non overlapping area. Due to the larger volume of frozen soil, the surface uplift and settlement are larger compared to conventional connecting passage, and the impact range is wider. The smaller the distance between the measuring points on the same section and the centerline of the tunnel, the greater the displacement. When the measuring point exceeds the centerline of the tunnel by 20 m, the amount of frost heave and thaw settlement is relatively small. The frost heave and thawing settlement of point D5-4 at the centerline are 2.8 times and 2.3 times that of point D5-1 at a distance of 20 m from the centerline. The maximum frost heave and thaw settlement of each section occurs at the centerline of the tunnel and is distributed along the centerline of the connecting passage. Due to the large volume of frozen soil at the end section of the connecting channel, its frost heave and thawing settlement are 1.6 times and 1.7 times that of the centerline, which is different with conventional connecting passage.

Key words: super long connecting passage; freezing method; temperature field; frost heave; thaw settlement; measurement analysis

0 引言

人工冻结法所形成的冻结帷幕具有较好隔水性和较高的强度,被广泛应用在地铁隧道始发、接收端头加固^[1-2]和联络通道施工中^[3-4],且取得良好效果。土体在冻结过程中可能因各种原因出现冻结帷幕达不到设计要求的情况,所以应进行数值模拟^[5-8]并对土体冻结进行全程温度监测^[9-10]。同时,冻结还会使土体产生冻胀融沉现象,进而影响周边环境和建筑稳定性^[11-12]。

基于上述问题,学者们通过各种手段详细研究了常规联络通道冻结法施工技术、冻结温度场、冻胀融沉等问题。覃伟等^[13]通过实测研究了双冻结站实施20 m超长联络通道的冻结法施工。冻结施工往往具有较高的危险性,冻结壁的发展状况是否良好预示着冻结施工的成功与否,为此杨平等^[14]对苏州轨道交通2号线软弱地层联络通道冻结法施工进行了全程实测,并对冻结壁形成和解冻过程进行全面分析。胡向东等^[15]对双层越江隧道联络通道冻结法实测分析,发现冻结管布置形式和管片散热是影响冻结帷幕厚度的主要因素。马俊等^[16]通过对

平面斜交联络通道实测分析,研究其冻结温度场发展规律以及因冻胀引起的地表位移变化规律。除了运用实测分析的方法,也开展了不少有限元模拟预测冻结壁的研究^[17-18]。人工冻结会产生冻胀融沉现象,严晗等^[19]通过室内试验研究了砂土的冻胀融沉特性。刘波等^[20]通过理论计算土体解冻后压缩变形,分析产生沉降的主要原因,提出可采用注浆等措施减少融沉。

尽管专家学者通过实测数据分析、室内试验、数值模拟等措施,对常规联络通道进行了行之有效的分析研究,但对超过60 m的联络通道的温度场、位移场分析尚属探索性研究。本文以福州地铁2号线紫阳站—五里亭站区间目前中国最长的66 m超长联络通道工程为背景,通过施工技术和实测分析,给出其工艺技术特点、冻结温度场、冻胀融沉发展规律,以便为后续工程提供参考。

1 工程概况

福州地铁2号线紫阳站—五里亭站区间由于需避让五里亭立交桩基,导致两隧道间距增大,联络通道净长达66 m,联络通道上覆土层厚度约14.7 m,

通道及泵站处土层自上而下依次为<2-4-5>淤泥质粉细砂、<2-4-4>淤泥夹砂、<3-1>粉质黏土。由于联络通道长度为中国首次达到 60 m 级,所以需对施工技术进行改进并通过实测掌握温度场及冻胀融沉变形变化规律,以确保工程顺利完成,并为今后 60 m 级联络通道施工提供技术经验。

2 冻结及监测方案

2.1 联络通道结构方案

一般联络通道长度为 15 m 左右,并在联络通道中间设置单个泵站,采用单侧冻结。当联络通道达到 60 m 级时,常规冻结方案会出现各种技术难题,所以亟需进行改进。

联络通道超过 60 m 时,中央单泵站方案会导致冻结体积过大,工期太长,所以将泵站设置在两侧靠近隧道处可有效减小冻土体积,形成异形冻结帷幕。双泵站设计不仅分担了集水作用,同时在靠近隧道的一侧进行钝角处理,方便了密集冻结管钻孔。除采用双泵站形式外,本工程还采取压低拱顶结构、中间通道部分由圆弧反底拱改为平底的措施,以减少冻结体积。联络通道中心两侧由 1 环钢管片增加至 3 环,且设置注浆孔,可减小冻结体对隧道结构的影响。联络通道采用分段顺序冻结、分段开挖,并增设多段式防护门,确保了已完成的结构处于安全状态,既减少工期又增加安全性。

2.2 冻结加固方案

隧道冻结孔按照对侧打孔的方式,分别按上仰、水平、下俯 3 种形式进行布置。由于联络通道长,冻结范围大,本工程共设计冻结孔 175 个,其中左线 89 个,右线 86 个。以左线为例,A1~A20 为上部冻结孔,采用上仰布置形式。B1~B25 为隧道两侧冻结管,主要作用是增大隧道两侧冻结范围,B 组冻结孔主要采用水平和水平倾斜的布置方式,其中有 B7、B8 两个透孔。M1~M17 冻结管采用下俯的布置方式。R 组冻结管为隧道下部及泵站冻结辅助冻结,采用下俯布置。P1~P12 为泵站冻结孔,因泵站设置靠近隧道,冻结孔也采用异形交叉布置,隧道左侧冻结孔向上偏斜,右侧冻结孔向下偏斜,使两侧冻结孔在孔底交叉,冻结孔具体布置见图 1。本工程冻结所需总冷量为 $39.633 \times 10^4 \text{ kcal} \cdot \text{h}^{-1}$,依据冻结方案设计和现场实际情况,在左右线隧道靠近联络通道处分别设置机房,每个机房各自配备 4 台冷冻机组、3IS200-150-315 型单台流量 $315 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 盐水泵、2 台清水泵、4 台 100 t 冷却塔,补充新鲜水

$30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。冻结管为 $\phi 108 \times 10 \text{ mm}$ 内丝箍扣连接,测温孔分浅孔和深孔,直径分别为 45、108 mm。

冻结设计最低盐水温度为 $-28 \sim -30 \text{ }^\circ\text{C}$,其中 7 d 应降至 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。冻土帷幕设计厚度在喇叭口处大于等于 1.7 m,通道正常段及泵站大于等于 2.0 m,通道端头大于等于 2.3 m,冻土帷幕平均温度小于 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$,冻结壁与管片交界面平均温度小于等于 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$,积极冻结期为 45 d,右线比左线早开机 15 d,以便两端错期开挖。

2.3 测温孔及地表位移测点布置

2.3.1 测温孔布置

为了掌握冻结过程中温度场变化规律,测温孔共布置 26 个,左右线各 13 个,深度为 2~33 m,主要是测量冻结帷幕范围不同部位的温度发展状况。其中左线 C1、C2 位于上部冻结帷幕外侧,每个测温孔布置 11 个测点(C1-1~C1-11、C2-1~C2-11),测点深度分别为 0.5、4、7、10、13、16、19、22、25、28、30 m,主要测量冻结外侧发展速度状况。C3、C4 位于上部冻结区域内侧,每个测温孔布置 3 个测点 C3-1~C3-3、C4-1~C4-3,测点深度分别为 0.5、1.2、2 m。C5、C6 分布在冻结帷幕中下部,测点分布情况与 C1、C2 相同,主要测量通道外侧冻结情况。C9、C10、C11 从左到右依次分布,每个测温孔布置 4 个测点 C9-1~C9-4、C10-1~C10-4、C11-1~C11-4,测点深度分别为 0.5、4、7、10 m,主要测量下部冻结帷幕和泵站部分。C7、C8 分布在冻结帷幕中下部内侧,每个测温孔布置 3 个测点 C7-1~C7-3、C8-1~C8-3,测点深度为 0.5、1.2、2 m。C12、C13 分布在冻结帷幕中上部内侧,每个测温孔布置 11 个测点 C12-1~C12-11、C13-1~C13-11,测点深度分别为 0.5、4、7、10、13、16、19、22、25、28、1.3 m。C1-C4、C7-C8、C12-C13 测温孔分布于淤泥质粉细砂地层,其余测温孔分布在淤泥夹砂地层。右线测温孔及测点分布与左线相同,测温孔布置如图 1 所示。

2.3.2 地表沉降变形测点布置

地表沉降测点布置分纵向和横向两部分。沿纵向(隧道中线方向)每个断面根据近密远疏的原则布点,在隧道中线两侧 15 m 范围内布点间距为 2~5 m,超过 15 m 范围布点间距为 10 m。依此原则,在联络通道上方布置 6 排沉降监测点,分别为 D1、D3、D5、D7、D9 和 D11 排,每排测点编号 $D_i-1 \sim D_i-7$,共 7 个监测点,如 D1-1~D1-7。此外,沿联络通道方向在横排监测点基础上在联络通道轴线位置增加 D2、D4、D6、D8 和 D10 监测点,地表沉降监测点

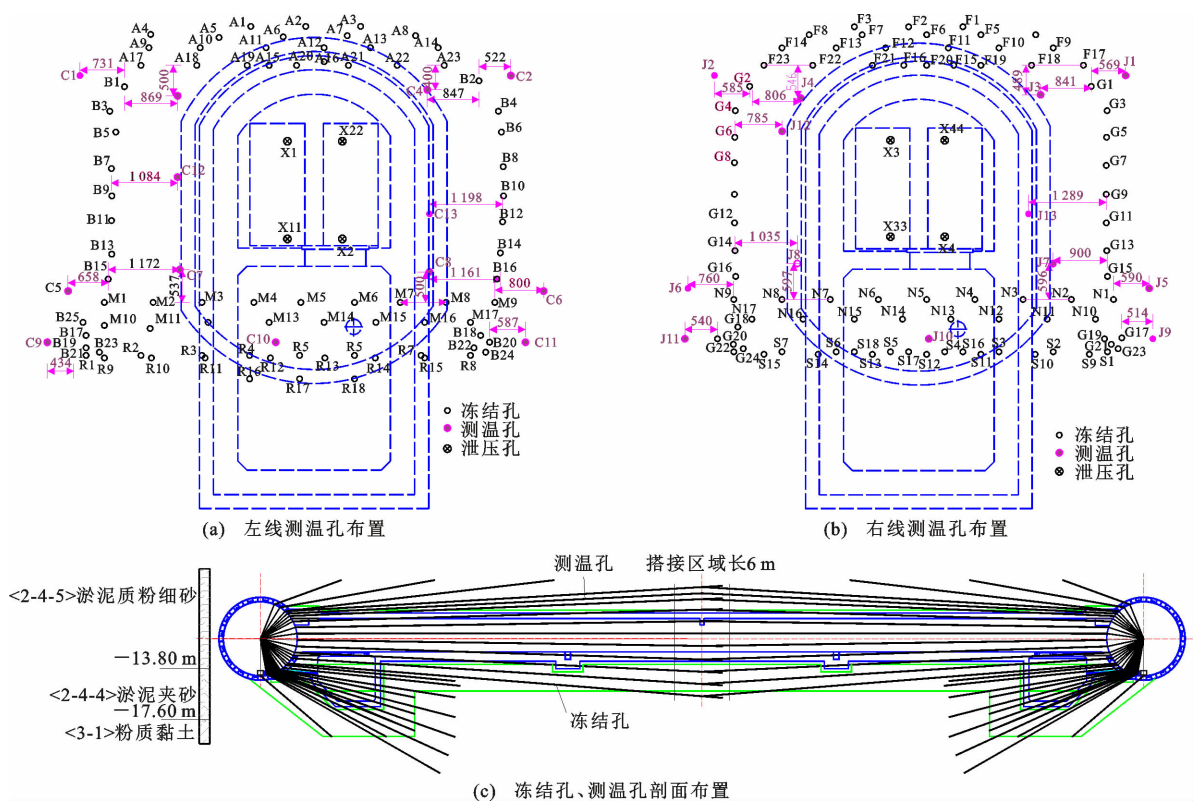


图 1 冻结孔、测温孔布置

Fig. 1 Layout of freezing hole and temperature measuring hole

布置如图 2 所示。

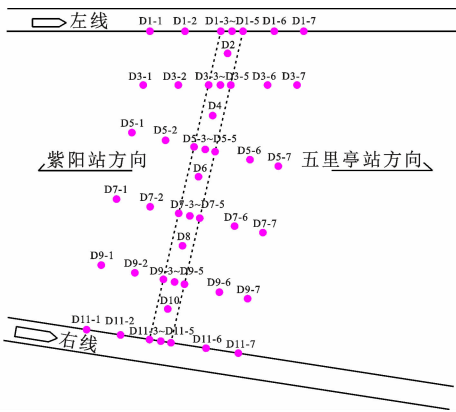


图 2 地表沉降监测点布置

Fig. 2 Layout of surface subsidence monitoring points

3 工程实施效果及实测结果分析

因右线冷冻站比左线早开机 15 d,左右线每侧积极冻结时间均为 45 d,故联络通道整体积极冻结期为 60 d。为了方便进行实测分析,下文积极冻结阶段皆取左线开机后积极冻结 45 d 进行分析。

3.1 去回路盐水温度分析

为了掌握整个冻结系统的实时温度,在总去路和总回路上设置温度测点以监控冻结冷量的传递并

绘制曲线进行去回路盐水温度分析。

盐水去回路温度和温差变化如图 3 所示,盐水总去回路降温曲线分为 3 个阶段:迅速降温阶段、平稳阶段、维护冻结阶段。第一阶段为迅速降温阶段,持续 20 d,该阶段去回路盐水温度迅速下降,平均降温为 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$,由于降温速度快,去回路温差较大,最大为 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,但随后温度下降逐渐减缓,去回路温差也逐渐小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,依据盐水降温计划表盐水温度下降到冻结所需温度。第二阶段为平稳阶段,盐水温度一直保持在 $-30\sim-32\text{ }^{\circ}\text{C}$,去回路温差降低到 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,说明冷量损失较前一阶段小,土体温度下降速率也逐渐减小,冻结情况良好,此过程约 25 d,总积极冻结期共 45 d。第三阶段为维护冻结阶段,为保证联络通道在开挖过程中温度不回升,此阶段温度维持在 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在超长联络通道冻结中,由于冻结所需冷量大,迅速降温期较长,盐水去回路温差也较高,这说明土体迅速吸收冷量,冻结效果好。

3.2 测温孔温度分析

3.2.1 土体降温规律

为了研究冻结温度场积极冻结期的发展规律,时间坐标仅给出了左线积极冻结期时间。图 4 为

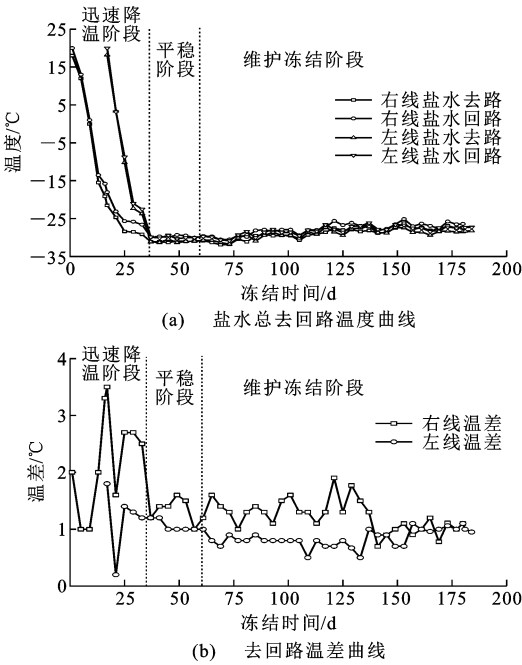


图 3 盐水温度及温差曲线

Fig. 3 Salt water temperature and temperature difference curves

C1、C4、C5、C8 测温孔温度变化曲线。由图 4 可知，联络通道开始冻结地层初始温度为 24~25℃。积极冻结期各个测点降温趋势大致相同。冻结前期，盐水与土体温差较大，各测温点温度下降速度快，后期土体与盐水温差变小，降温速率显著减小，并逐渐变缓。

为获得冻结温度发展规律，选取左线 C1~C13 测温孔数据进行分析，右线测温孔温度发展规律与左线大致相同。以 C1-4 测点（深 10 m）为例，土体冻结过程可分为 4 个阶段：第一阶段，从土层初始温度 24℃ 降至 0℃ 耗时 20 d，降温较快，平均降温 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$ ，这是由于盐水温度与土体温差较大，热交换快。当温度趋近于 0℃ 时，进入第二阶段，此阶段约 5 d，温度由 0℃ 左右缓慢下降至零下（冻结温度），曲线较前一阶段平缓，降温速度变慢，这是由于该阶段发生水相变潜热，导致土体冻结温度基本在冻结温度附近缓慢变化。水相变完成后，进入冻结第三阶段，也是积极冻结期的最后阶段，此阶段大约 20 d，土体温度由 -1℃ 降至 -10℃，平均降温速率 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$ ，明显慢于第一阶段，这是由于测点周围土体与盐水温差减小，冷量散失逐渐趋近于平衡。第四阶段为维持冻结阶段，各测点温度基本维持在某一温度值上下微弱波动，这是因为供冷量与冷量散失达到平衡。

测温孔 C1、C4 位于淤泥质粉细砂中，用于监测

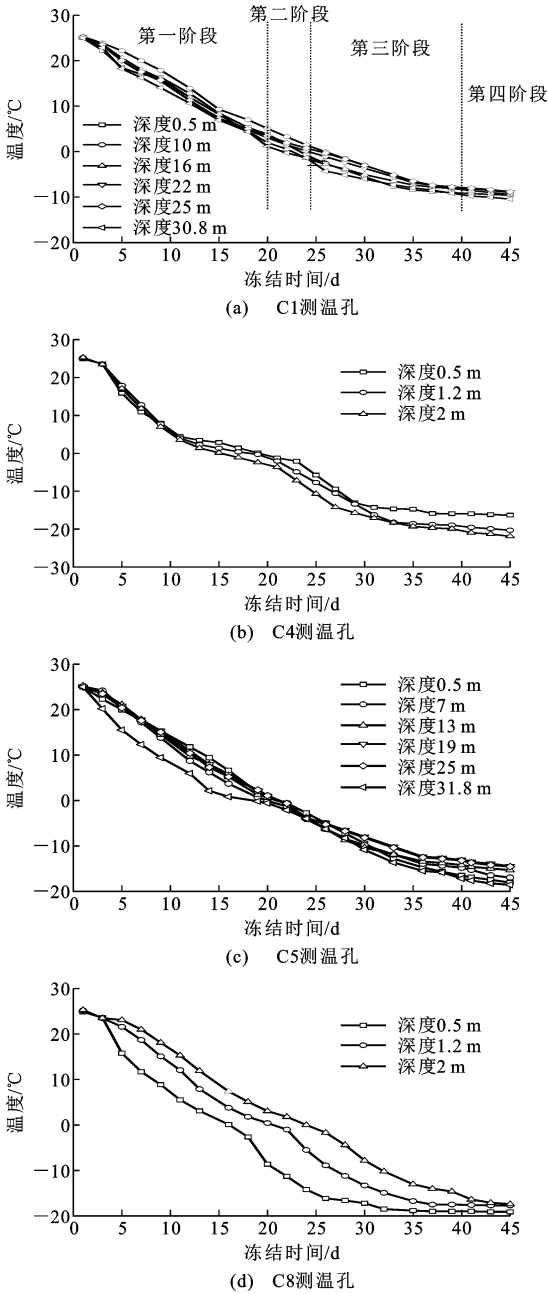


图 4 C1、C4、C5、C8 测温孔温度变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curves of temperature measuring holes C1, C4, C5, C8

联络通道上部冻结帷幕发展情况，其中 C1 位于冻结区外侧，C4 位于内侧。C1-1、C4-1（深 0.5 m）处温度降至 0℃ 所用时间分别为 22、18 d，并根据测温孔距离冻结管最短距离可计算出冻结发展速度分别为 29、58 mm·d⁻¹，由此可知冻结帷幕向内侧发展比向外侧快，大约为 1.75 倍。这是由于冻结管向内、外侧供应冷量相同，但与外侧进行热交换的土体体量比内侧大，冻土内外侧温度发展速率随参与热交换的土体量增加而减小。各测温孔到达 0℃ 的时间不同，这主要是因为测温孔与冻结孔最小距离不

同,距离越大,到达 0°C 时间越长,且距离与时间呈正相关。同一测温孔中各测点到达 0°C 时间也不相同,以 C1 为例,C1-11(深 30 m)比 C1-6(深 16 m)测点快 1 d,比 C1-1 测点快 3 d,这主要受冻结孔、测温孔偏斜导致不同深度处两者间距不同,同时深浅部热量交换条件不同所致,靠近隧道测温点冷量损失大,故降温速度较慢。

C5~C8 测温孔位于联络通道中部淤泥夹砂地层中,由图 3 可知 C5-1、C8-1 测点(深 0.5 m)处温度降至 0°C 所用时间分别为 22、21 d,根据测温孔距离冻结管最短距离可计算出冻结发展速度分别为 $25、50\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。可以发现在淤泥夹沙中,温度发展规律与淤泥质粉细砂地层相同,但淤泥夹沙水相变期比淤泥质粉细砂短,冻结发展速度相比淤泥质粉细砂稍慢,各测点温度下降速率也比淤泥质粉细砂地层慢。

C9~C11 测温孔用于监测泵站冻结情况。各深度测点温度发展规律要明显区别于前面的冻结孔。C9、C10、C12、C13 测温孔温度变化曲线如图 5 所示,C9~C11 所在冻结区域冻结孔布置与常规不同,冻结管以斜交插入土体并以交叉的形式排布,故喇叭口和泵站部分冻结管密集,周围土体获得冷量要明显高于深部土体,所以埋深浅的测点温度要明显低于埋深深的测点。

C1、C2、C5、C6、C12、C13 测温孔 30 m 深度的测点位于冻结管交叉区域内,冻结冷量相较于其他区域获得量大,温度下降要明显比其余测点快,这说明通过设置冻结管交叉区域加强末端冻结效果是可行的。

3.2.2 冻结实际效果

为了保障后续分步开挖进度,对冻结施工工期进行了进一步优化,本工程冻结施工由 2017 年 11 月 16 日右线冻结开机,12 月 2 日左线冻结开机,左右线间隔 15 d。经左线 45 d 冻结,各测点温度基本稳定,达到冻结设计的各参数要求,积极冻结完成,进入维护冻结阶段。

选取 C13 测温点进行计算,取靠近喇叭口测点冻结 45 d 温度为 -5.9°C ,计算可得冻结壁有效厚度为 2.3 m,大于设计要求的 1.7 m,取联络通道主体部分温度最高测点温度为 -10.3°C ,经计算冻结壁最薄有效厚度为 2.2 m,符合设计要求。

将上述数据分别代入成冰公式进行计算,得出冻结壁平均温度为 -10.68°C ,因成冰公式在实际工程中估算冻结壁平均温度时比较保守,所以实际

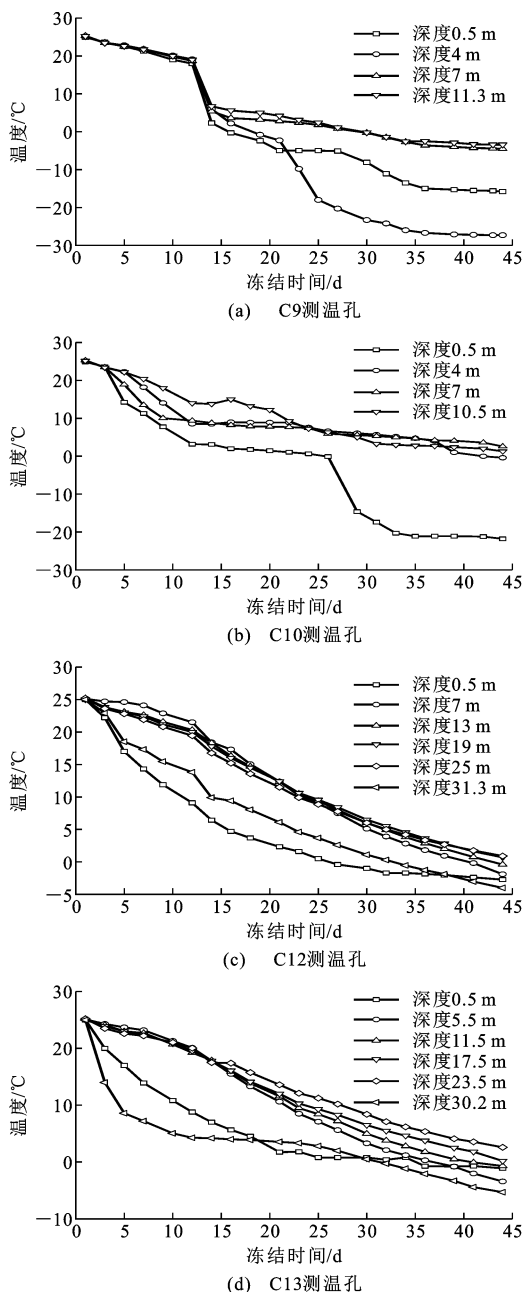


图 5 C9、C10、C12、C13 测温孔温度变化曲线

Fig. 5 Temperature variation curves of temperature measuring holes C9, C10, C12, C13

冻结壁平均温度应低于计算值,故冻结效果符合设计要求。

3.3 地表沉降分析

控制地表冻胀融沉是超长联络通道冻结施工关键技术。因需控制冻胀融沉,本工程采用泄压孔泄压控制冻胀、自然解冻配合融沉跟踪注浆的方案控制融沉。对地表位移的实测是融沉注浆参数调整的主要依据。地表监测点从钻孔阶段开始测量,至联络通道施工完成后 6 个月停止测量。D5 断面的实测数据如图 6 所示。

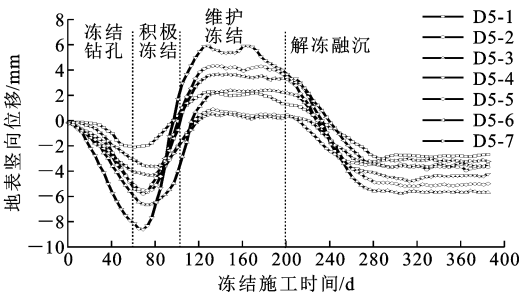


图6 D5断面累计竖向位移曲线

Fig. 6 Cumulative vertical displacement curves of section D5

从图6可知,冻结施工造成的地表隆起与沉降主要分为4个阶段。第一阶段为冻结钻孔阶段,由于冻结孔数量多达175个,成孔难度、测斜难度大,故此阶段大约60 d。钻孔阶段实时监测成孔水土流失量,对于土流失量大的进行补偿注浆以控制钻孔导致的部分土体流失,此阶段地表有一定程度的下沉,最大下沉9 mm。第二阶段为积极冻结阶段,此过程大约45 d。冻结5~20 d时盐水温度快速降低,土体温度迅速下降,但冻结帷幕尚未形成,冻胀不明显。冻结22 d后,各处土体温度陆续降至0℃以下,冻结壁逐渐形成,地表的冻胀速率迅速增加,地表快速向上隆起,隆起最高值为D5-4测点14 mm。第三阶段是维护冻结阶段,此过程大约90 d,盐水温度保持在较低温度,各步开挖施工带来的冷量损失与供冷量基本平衡,但由于联络通道长度大,开挖卸载作用及结构混凝土水化热影响,地表略有下沉,最大2.5 mm。第四阶段为解冻融沉阶段,此阶段冻结停机,自然解冻后土体立刻进入融化阶段,为防止地表较快融沉,经数值模拟预测后确定由停机后15 d开始进行工后融沉注浆,同时根据每天地表沉降与温度场实测结果对注浆参数进行适当调整,整个注浆时间大约150 d,其后地表沉降趋于稳定,最大融沉量为10 mm。

图7为各断面地表最大累计竖向位移曲线。从图7可知,冻结施工过程中,位于同一断面上的测点D5-1~D5-7在同一时间的地表融沉不同,测点与联络通道距离越远,融沉影响越小。当测点超过隧道中线20 m后,冻胀融沉量均小于5 mm。D5-4由冻胀引起地表隆起14 mm,融沉量为-10.7 mm,D5-1地表隆起5 mm,融沉量为-4.5 mm。D5-4冻胀量是D5-1的2.8倍,融沉量是D5-1的2.3倍。造成同一断面的地表融沉不同的主要原因是各测点距离冻结帷幕的距离不同。

由图7还可知,各断面最大冻胀融沉量都出现

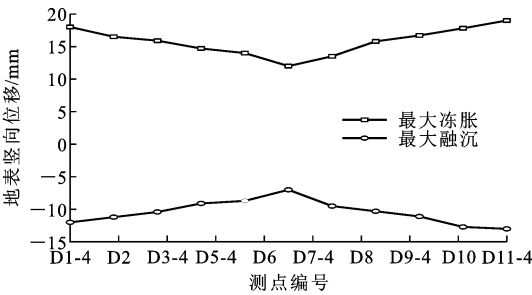


图7 各断面最大累计竖向位移曲线

Fig. 7 Maximum cumulative vertical displacement curve of each section

在Di-4测点处,竖向位移随测点离联络通道中线距离变长而减小。联络通道不同部位冻胀融沉对地表沉降的影响也有较大区别。位于联络通道两侧端头处冻胀融沉变化量比隧道中线处测点变化量大。D1-4测点最大冻胀为18 mm,最大融沉为-12 mm,D6-4测点最大冻胀为11 mm,最大融沉为-7 mm,联络通道端头处冻胀量是中线处的1.6倍,融沉量是中线处的1.7倍。这主要是因为超长联络通道冻结管数量较多,且由于双泵站设计,联络通道下部端头处有大量冻结孔,导致端头处冷量大,故冻胀量大。同样,解冻融沉也造成较大融沉量。

3.4 与常规联络通道的比较分析

超长联络通道主要有需冷量大、冻结时间长、钻孔施工控制钻孔方位困难、冻土体量大、冻胀融沉控制难等特点。因此在结构设计、冻结设计、冻结施工、监测等各方面都与常规联络通道方案有很大区别,需要创新设计与施工技术。

结构设计方面,采取压低拱顶结构、中间通道部分由圆弧反底拱改为平底,在通道两端采用双泵站设计,缩小联络通道结构尺寸,减小冻结范围,实现了冻结冷量和冻土体量的双减,确保冻结施工安全性的同时也兼顾了经济性。

冻结设计方面,由于联络通道长度大,故冻结范围大、需冷量大,冻结孔数量是常规联络通道的数倍,因此采用左右线双冻结站设计,并选择足够数量的冷冻机组以满足冷量需求,同时为了减小冻胀,两侧冻结选择间隔15 d开机。冻结孔数量大且钻孔长度长,最长的冻结孔钻进达到32 m。

冻结施工方面,与常规联络通道相比,需要使用更加精确的钻机并辅以精准测斜,以保证每个冻结孔偏斜在可控制范围内。通过特制内丝箍扣冻结管、给定冻结补偿角等措施保证冻结管施工质量。超长联络通道由于冻结孔多、冻结量大,相对常规联

络通道钻孔、冻结、开挖、融沉注浆工期都较长。超长联络通道无论是冻胀还是融沉对地表造成的隆起量和沉降量都比常规联络通道大,影响范围更广,进一步说明在超长联络通道后期融沉注浆时,应合理设置注浆孔,并需根据地表沉降监测实时调整注浆参数以保证地表稳定。

经济性方面,与常规联络通道相比,超长联络通道工期较长,本工程至融沉注浆结束耗时约350 d,由于冻结期长,每米联络通道费用更高,虽经方案优化已节约投资604万元,但仍比普通联络通道费用高。

4 结 语

(1)超长联络通道的冻结施工技术可从结构设计、冻结方案、钻孔施工技术等方面进行改进。冻结期间各测温孔温度下降趋势大致相同,但各测点温度下降速率不同。越靠近冻结孔的测点温度下降速率越快。在同一地层中,冻结帷幕向内侧发展比向外侧快,大约为1.75倍。同一深度的不同测温孔降温规律同样与测点距冻结孔距离有关。

(2)不同土层温度发展规律相同,但冻结壁发展速度不同,由大到小依次为淤泥夹砂、淤泥质粉细砂、淤泥质土。泵站部分冻结孔采用交叉排列形式,喇叭口和泵站部分冻结管密集,所以埋深浅的温度明显低于深部。冻结管搭接区域的测点降温速率比其余测点快,说明设置冻结搭接区域是可行的。

(3)60 m级超长联络通道冻胀融沉时间较长,冻胀融沉影响范围也较大。最大冻胀量和融沉量都出现在联络通道拱顶地表沉降测点处,冻结帷幕交圈前,地表无明显变化,交圈后地表迅速隆起;冻结停机15 d后,地表开始沉降,随时间推移沉降量逐渐变大,经过180 d融沉注浆后,地表沉降逐渐稳定。

(4)同一断面测点距离隧道中线距离越小,位移越大,当测点超过隧道中线20 m后,冻胀融沉量较小。各断面最大冻胀融沉量出现在隧道中线处,并沿中线分布,联络通道端头断面处冻胀量是中线处的1.6倍,融沉量为1.7倍。

(5)超长联络通道的冻结方案、开挖方式、实测结论、工期经济性都与常规联络通道有所区别。在进行暗挖过程中,随冻结体持续冻结,造成联络通道中间区间冻结时间过长,强度提高,对开挖进度有一定的影响。可进一步研究如何优化搭接区域冻结工期和控制冻结时间,以解决开挖困难的问题。

参考文献:

References:

- [1] 杨平,余才高,董朝文,等.人工冻结法在南京地铁张府园车站的应用[J].岩土力学,2003,24(增2):388-391.
YANG Ping, SHE Caigao, DONG Chaowen, et al. Application of artificial freezing method in Zhangfuyuan station of Nanjing subway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 388-391.
- [2] 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 Jianpeng, YANG Ping, HE Wenlong, 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.
- [3] 张志,张勇,陆路,等.冻结法在强扰动地层地铁联络通道施工中的应用[J].隧道建设,2011,31(1):114-120.
ZHANG Zhi, ZHANG Yong, LU Lu, et al. Application of freezing method in construction of connection galleries of metro works in intensely-disturbed ground [J]. Tunnel Construction, 2011, 31(1): 114-120.
- [4] 奚家米,熊元林,马新民,等.地铁联络通道冻结法施工研究现状[J].科学技术与工程,2020,20(17):6720-6728.
XI Jiami, XIONG Yuanlin, MA Xinmin, et al. Research status of freezing method construction of subway contact passage[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 6720-6728.
- [5] 黄建华,严耿明,杨鹿鸣.水泥改良土地层联络通道冻结温度场分析[J].土木工程学报,2021,54(5):108-116.
HUANG Jianhua, YAN Gengming, YANG Luming. Analysis of freezing temperature field in connecting passage of cement improved soil layer[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(5): 108-116.
- [6] ZHAO J L, YANG P, LI L. Investigating influence of metro jet system hydration heat on artificial ground freezing using numerical analysis[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(2): 724-734.
- [7] 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):2110-2121.
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

- tunnel using freezing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2110-2121.
- [8] 李晓娜, 杨双锁, 鲍飞翔, 等. 盾构始发端垂直冻结温度场数值分析与现场实测[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(1): 297-302.
- LI Xiaona, YANG Shuangshuo, BAO Feixiang, et al. Numerical analysis and field measurement of vertical freezing temperature field at the beginning of shield tunneling[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(1): 297-302.
- [9] 胡向东, 李忻铁, 吴元昊, 等. 拱北隧道管幕冻结法管间冻结封水效果实测研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2207-2214.
- HU Xiangdong, LI Xinyi, WU Yuanhao, et al. Effect of water-proofing in Gongbei tunnel by freeze-sealing pipe roof method with field temperature data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(12): 2207-2214.
- [10] 赵宇辉, 杨平, 王宁, 等. 下穿车站交叠区域 MJS+水平冻结加固解冻温度场研究[J]. 林业工程学报, 2021, 6(4): 159-166.
- ZHAO Yuhui, YANG Ping, WANG Ning, et al. Study on MJS+horizontal freezing reinforcement and thawing temperature field in the overlapped area of the underpass station[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(4): 159-166.
- [11] WU Y J. A study on frost heave and thaw settlement of soil subjected to cyclic freeze-thaw conditions based on hydro-thermal-mechanical coupling analysis[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 188: 103296.
- [12] 李治国, 徐海廷, 杨世彦. 富水砂层中盾构隧道联络通道施工技术[J]. 隧道建设, 2017, 37(5): 609-617.
- LI Zhiguo, XU Haiting, YANG Shiyan. Construction technology for cross passage of shield tunnel in water-rich sandy stratum[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(5): 609-617.
- [13] 覃伟, 杨平, 金明, 等. 地铁超长联络通道人工冻结法应用与实测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5): 1065-1071.
- QIN Wei, YANG Ping, JIN Ming, et al. Application and survey analysis of freezing method applied to ultra-long connected aisle in metro tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(5): 1065-1071.
- [14] 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 Ping, CHEN Jin, ZHANG Shanggui, 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.
- [15] 胡向东, 肖朝昀, 毛良根. 双层越江隧道联络通道冻结法温度场影响因素[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 7-12.
- HU Xiangdong, XIAO Zhaoyun, MAO Lianggen. The influencing factor of the temperature field of cross-passage construction by freezing method in double-deck road tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 7-12.
- [16] 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 Jun, HU Daoyun, YANG Ping. Horizontal freezing and measurement analysis of plane oblique connection gallery[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(12): 1965-1972.
- [17] 陈军浩, 刘桐宇, 张潮潮, 等. 超长联络通道冻结温度场发展特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 3059-3067.
- CHEN Junhao, LIU Tongyu, ZHANG Chaochao, et al. Analyzing development characteristics of freezing temperature field to ultra-long connected aisle[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(12): 3059-3067.
- [18] YANG P, KE J M, 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(6/7): 330-340.
- [19] 严晗, 王天亮, 刘建坤. 粉砂土反复冻胀融沉特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3159-3165.
- YAN Han, WANG Tianliang, LIU Jiankun. Experimental study of repeated frost heave and thaw settlement properties of silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3159-3165.
- [20] 刘波, 李东阳, 廖建军. 土体压力对地铁旁通道解冻后地表沉降的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 551-555.
- LIU Bo, LI Dongyang, LIAO Jianjun. The effect of earth pressure on ground settlement after frozen soil thawing in connect aisle construction of metro engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 551-555.