

液氮冻结竖直向与水平向温度场特性

黄建华^{1,2}, 王叶^{1,2}, 覃少杰³, 严耿明⁴, 袁晓玉^{1,2}

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州, 350118; 2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州, 350118; 3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都, 610031; 4. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州, 350108)

摘要: 分析液氮冻结的现场实施情况, 结合工程背景资料建立数值分析模型, 通过计算分析并与现场实测成果验证, 系统研究液氮冻结过程中竖直方向与水平方向温度场分布特征及其变化规律。结果表明: 液氮冻结通过沸腾吸热与对流换热方式达到降温冻结的效果, 相较于盐水循环冻结方式, 液氮冻结效率高, 周期短; 但其冻结温度场分布不均匀, 在竖直方向上存在较大温差, 温度最低区域分布在液氮沸腾区范围, 而水平方向上分布较为均匀; 温度场中低温区域并不在两排冻结管之间均匀发展, 冻结区域向连续墙方向发展的速度比土体方向发展速度快。基于研究成果, 提出了液氮冻结加固设计、施工的优化建议, 为今后液氮冻结工程提供理论依据与技术参考。

关键词: 人工冻结加固; 液氮冻结; 温度场; 对流换热; 数值模拟

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)01-0020-09

Temperature-field characteristics of liquid-nitrogen freezing along the vertical and horizontal directions

HUANG Jianhua^{1,2}, WANG Ye^{1,2}, QIN Shaojie³, YAN Gengming⁴, YUAN Xiaoyu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering for Universities in Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

4. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The field implementation of liquid nitrogen freezing was analyzed and the numerical analysis model was established by combining engineering background information. The characteristics of vertical and horizontal temperature field distribution and its change law during the freezing process of liquid-nitrogen were systematically studied through calculation and analysis and verification with field measurement results. Results show that liquid-nitrogen freezing method could achieve the effect of cooling and freezing through the way of boiling heat absorption and convection heat transfer. Compared with the brine circulation freezing method, the liquid-nitrogen freezing method has a higher efficiency and a shorter cycle. However, the distribution of freezing temperature field of the liquid-nitrogen freezing method is not uniform. There is a large temperature difference in the vertical direction, and the lowest temperature region is distributed in the liquid-nitrogen boiling area, but the temperature field is more uniformly distributed in the horizontal direction. The medium to low temperature region of the temperature field does not develop uniformly between the two rows of frozen pipes, and the frozen area develops faster in the direction of the diaphragm-wall than in the direction of the soil. Based on the research results, suggestions are proposed for the optimization design and construction of liquid nitrogen freezing reinforcement, which can provide theoretical basis and technical references for future liquid-nitrogen freezing projects.

Keywords: artificial frozen reinforcement; liquid nitrogen freezing; temperature field; convective heat transfer; numerical simulation

收稿日期: 2022-10-27

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2021J011064)

第一作者简介: 黄建华(1969—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士, 研究方向: 岩土与地下工程。

液氮冻结是一种人工冻结土层技术,依靠液氮的沸腾气化吸热与低温氮气的对流吸热带走土层中的热量,实现土层的快速冻结。液氮冻结周期短,形成的冻土强度高,冻结壁发展更迅速,止水效果更好^[1]。但由于液氮冻结速率较快,液氮冻结的温度场在竖直与水平方向上的分布呈现出较大的差异。

随着液氮冻结的应用越来越广泛,对液氮冻结温度场竖直与水平方向上分布的差异性研究也逐渐增加。李方政等^[2]对上海轨道交通盾构进洞水平冻结进行模拟,探究了液氮冻结帷幕不同方向上厚度和平均温度随时间发展的规律。陈成等^[3]对液氮冻结盾尾密封加固温度场进行数值模拟,研究了温度空间分布及温度随时间变化规律,并对影响冻结温度场的因素进行敏感性分析。石荣剑等^[4-5]通过模型试验,获得了塑料冻结管的液氮冻结温度场的分布规律,研究表明液氮冻结管底部与冻结管头部温度差别大,形成的冻结帷幕不均匀。张全全^[6]对液氮管壁温度的分布情况进行研究,通过单管计算结果得出不同流速的地下水流作用下液氮冻结温度场发展的不均匀性。

本文以福州地铁盾构始发端液氮冻结加固工程为背景,通过对冻结管内液氮的流动情况进行分析,分析冻结管内液氮对流换热过程,系统研究液氮冻结温度场在竖直与水平方向上的特性与变化规律及其影响范围,提出工程优化意见,可为液氮冻结工程提供理论基础与技术依据。

1 液氮冻结实施

1.1 冻结工况

盾构始发端头区域主要位于粗中砂地层中,由于地下水位较高,在端头设置 12.0 m 长的加固区域以保证盾构进出洞安全。地下水位埋深在 3.4~5.66 m。盾构始发冻结施工地层为强透水的粗中砂层,下部为淤泥质土及粉质黏土,如图 1 所示。

盾构始发洞口采取液氮冻结加固,冻结加固体在盾构进洞凿壁时起到止水帷幕作用,抵御水土压力、防止土层塌落和泥水涌入工作井。出于设计安全考虑,冻结加固体承受的荷载、计算模型采用洞门最底缘埋深 19.38 m,计算得到水土压力 $P \approx 0.26$ MPa,基本满足各工况设计要求。经计算分析后液氮冻结施工设计指标如表 1 所示。

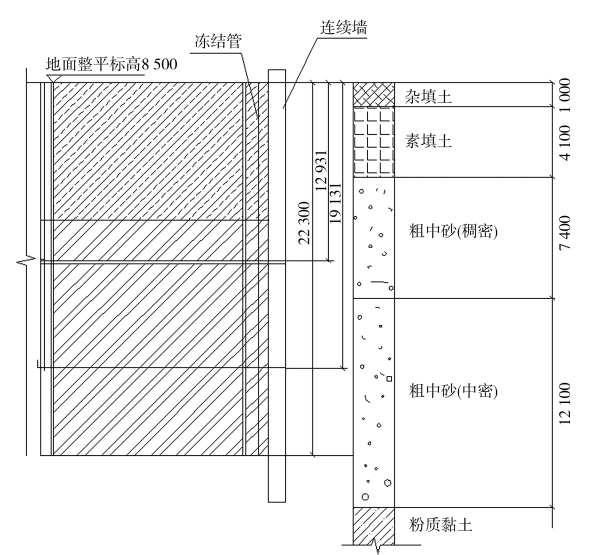


图 1 地铁盾构始发地质剖面图(单位:mm)
Fig.1 Geological profile of metro shield initiation area(unit : mm)

表 1 液氮冻结施工设计参数
Tab.1 Design parameters for liquid nitrogen freezing construction

参数	设计值
冻结壁厚度/m	≥2
冻土平均温度/℃	≤ -20
洞门周边水平探孔温度/℃	≤ -5
液氮进口温度/℃	-150 ~ -170
出口温度/℃	-50 ~ -70

根据以往相关的地铁盾构冻结加固工程经验,取冻土的发展速度为 10 cm/d。冻结孔间距为 800 mm,加上 1% 的偏斜,最大孔间距 $L = 1\,022.9$ mm,距此推算冻土交圈时间 $T = 6.39$ d,此处取 7 d,即积极冻结期为 7 d。

1.2 液氮冻结方式与用量分析

液氮冻结装置如图 2 所示,冻结开始时,低温液氮从供液管流入冻结管中,液氮在冻结管底部积累并沸腾,沸腾相变的液氮吸收了大量的热量,沸腾后形成的氮气在冻结管内对流换热再吸收部分热量,然后通过出气管流出冻结管^[7-8]。

工程设计的冻结体积为 543.876 m³,每 m³ 冻土约需液氮 1.5 t,则积极冻结时总需液氮量 979 t。维护冻结按 24 h 计算,每组的 0.2 t/h,共分 15 组,维护冻结需液氮量 72 t/d,盾构工程破洞门工期 7 d,初步估计液氮消耗量 1 483 t。

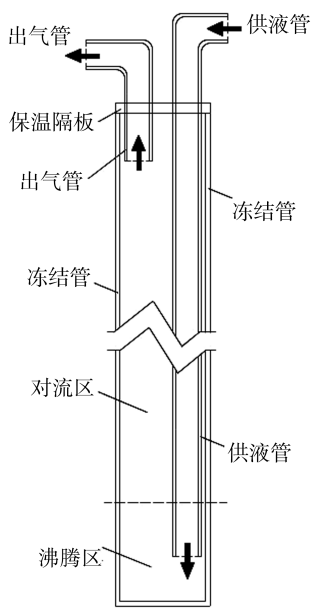


图 2 冻结管结构示意图

Fig.2 Diagram of freezing pipe structure

1.3 测温孔布置方式

图 3 为液氮冻结的冻结孔布置图。左线冻结孔布置 2 排,共计冻结孔 29 个,冻结方案为竖直向布设冻结管。第一排孔与第二排排距 1.0 m,孔间距均为 0.8 m,深度 22.29 m,冻结管总长度 646.4 m。

布设 C1~C4 等 4 组测温孔,见图 3 所示,其中 C1 测温孔在靠近土层一侧距离 B 组冻结孔中心线 700 mm 处;C2 测温孔在 A、B 组冻结孔中间,距离 A 组测温孔 500 mm 处。

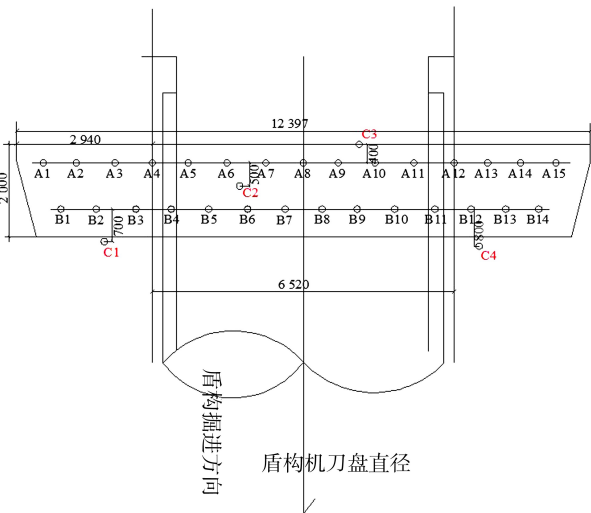


图 3 冻结孔、测温孔布置图(单位:mm)

Fig.3 Layout of freezing holes and temperature measuring holes(unit: mm)

2 盾构隧道建模及验证

2.1 模型假定

- (1)模型假定地层为各向同性弹塑性体。
- (2)冷量在竖直于冻结管方向即水平方向传导,不考虑沿冻结管方向的损失。
- (3)考虑冰水相变作用,忽略温度引起的对流及热辐射,未冻水含量是温度的函数,由未冻水含量计算的潜热在相变温度区间内产生,地层相变温度范围取 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- (4)不考虑施工对地层冻结效果的影响,假定几何模型外(远离冻结管布置区域)为绝热边界。
- (5)温度场计算中不考虑地下水渗流作用的影响。

(6)不考虑冻结管内流体的流速差异,对整个冻结管取平均流速。

由于冻结施工时间为 7~8 月,福州地区此时正值夏季,环境平均温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,赋予土层以及混凝土连续墙冻结开始前初始温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,并赋予冻结管正式冻结前预冷后初始温度 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。土体上表面以及地下连续墙外表面赋予空气对流换热边界条件,流体温度设为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,对流换热系数取 $15\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。考虑冻结温度场影响范围以外土体温度保持 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此赋予土体其他边界面温度层温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

对液氮冻结温度场进行三维建模,土体使用实体模型,考虑到冻结温度场主要是发展 Y 轴方向,长度为 14 m,为冻结帷幕设计值长度 5 倍以上;X 轴长度 20 m。冻结管长度 22.3 m,考虑到沿 Z 轴方向温度场开展范围较小,取 Z 轴长度 30 m。冻结管采用实体模型,长 22.3 m,管径 108 mm,5 根,材质为不锈钢。不考虑冻结管偏斜,全部放进土体的冻结孔中,不考虑冻结管与土体之间的间隙,设定冻结管外表面与土体冻结孔内表面绑定接触。

本次计算中,共定义两个分析步,分别对应积极冻结期及维护冻结期。赋予积极冻结期及维护冻结期各 8 d,设置分析步类型为热传递,系统默认对整个模型中出现的温差都会进行热传导。

对模型的冻结管内部赋予相应的对流换热冷源荷载,为准确模拟液氮在冻结管内的对流换热,把冻结管分成 4 个区域分别赋予不同的对流换热系数,低温氮气在自上而下 5、11.6、18.3 m 处划分为 1~3 区域,第 4 区域为液氮沸腾换热区。同时

把各个区域的对流换热系数制成以时间为变量的分段函数,把积极冻结及维护冻结 8 d 分为 8 个时间段,具体液氮对流换热系数如表 2、表 3 所示。

表 2 积极冻结期对流换热系数

Tab.2 Convective heat transfer coefficient during active freezing period				
冻结时间/d	0~5 m 换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	5~11.6 m 换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	11.6~18.3 m 换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	18.3~22.3 m 换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
0~0.25	25.0	29.8	31.6	145.6
0.25~0.5	26.4	31.8	32.4	156.2
0.5~0.75	27.2	32.8	33.2	161.7
0.75~1	28.0	33.1	34.9	168.3
1~1.5	28.2	33.2	35.4	172.0
1.5~2	28.8	33.4	35.8	180.8
2~4	29.6	34.3	36.0	191.9
4~8	30.1	35.8	37.6	211.3

表 3 维护冻结期对流换热系数

Tab.3 Convective heat transfer coefficient during maintenance freezing period				
冻结时间/d	0~5 m 换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	5~11.6 m 换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	11.6~18.3 m 换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	18.3~22.3 m 换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
8~8~25	13.8	15.0	16.8	67.6
8.25~8.5	13.4	14.6	16.5	59.7
8.5~8.75	13.3	14.4	16.1	57.4
8.75~9	13.3	14.2	15.9	55.3
9~9.5	13.2	14.1	15.8	54.1
9.5~10	13.1	14.0	15.6	51.8
10~12	13.0	13.7	15.4	50.8
12~16	12.5	13.2	15.0	48.5

2.2 工程实测与模拟结果对比

由于实测部分测温点数据相近,所以本文选取 C1 测温孔 14.7 m 测温点及 C2 测温孔 12.5 m 测温点,对比结果如图 4 所示。

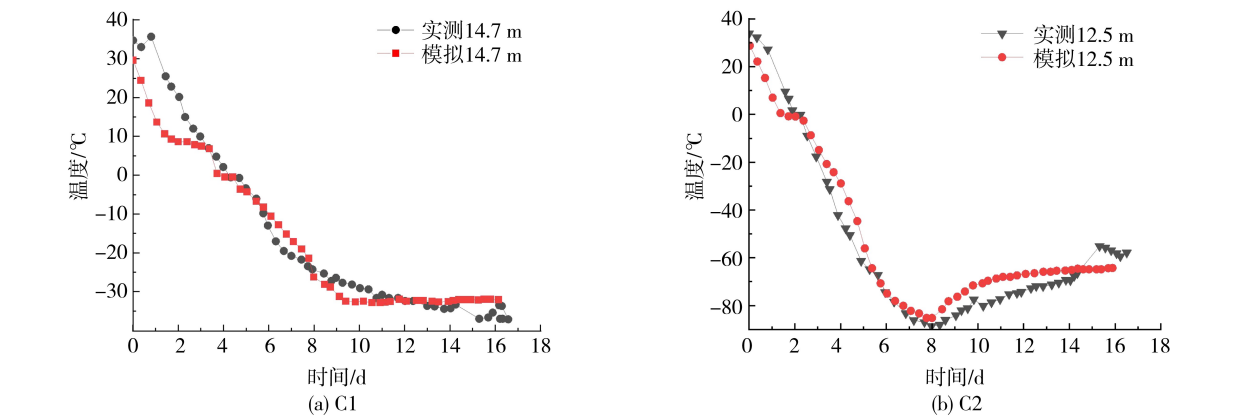


图 4 有限元与实测结果对比

Fig.4 Comparison of finite element and measured results

从图 4 可以看出,两测点模拟效果良好,模拟曲线的变化趋势与实测曲线的拟合程度较高,降温趋势和降温幅度基本保持一致,并且模拟曲线各个时间节点的温度也与实测曲线十分接近。由此可知,各个参数及有限元模型较为准确地反映了温度场的整体发展规律,模拟冻结温度场结果与工程实测温度场特性接近;也由此说明对流换热的冷源荷载模拟液氮冻结温度场可行。

3 计算结果分析

3.1 液氮冻结温度场竖直方向分布特点

液氮冻结竖直方向温度场的一大特点就是冻结管及土体温度在竖直方向产生变化,通过有限元模型计算结果对液氮冻结竖直方向温度场特性

进行分析。

图 5 为液氮竖直方向冻结温度场计算结果,(a)为液氮积极冻结第 8 天在土体 $Y=0.9\text{ m}$ 处(两排冻结管中心线距离的中点)的剖面图;(b)为土体在 $X=10\text{ m}$ 处(冻结管中心线的中点)的剖面图。

在 $X=10\text{ m}$ 剖面处作 4 条路径,研究温度随 Z 轴坐标的变化。如图 6(a)所示,第 1 条路径位于 $Y=0\text{ m}$ 处(于地连墙接触位置);第 2 条路径位于 $Y=0.4\text{ m}$ 处(冻结管内),沿土体表面到冻结管底部;第 3 条路径位于 $Y=0.9\text{ m}$ 处,沿土体表面延伸到土体模型底部;第 4 条路径位于 $Y=2\text{ m}$ 处(冻结壁厚度最小设计范围),沿土体表面延伸到土体模型底部。

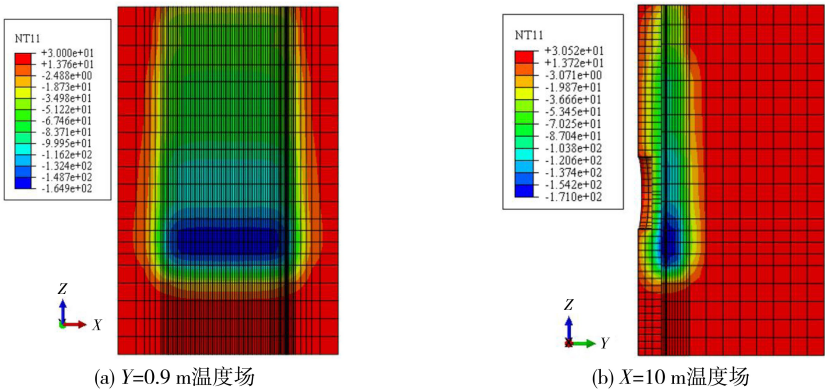


图 5 液氮冻结竖直方向温度场分布图

Fig.5 Vertical temperature field distribution of liquid nitrogen freezing

图 6(b)为沿上述 4 条路径的 Z 轴温度曲线图。冻结管温度在低温区域低于 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$,在接近地表处为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,在竖直方向上温差约为

$-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。巨大温差需要合理利用液氮冻结的低温区域,同时避免冻结管高温区对冻结产生的不利影响。

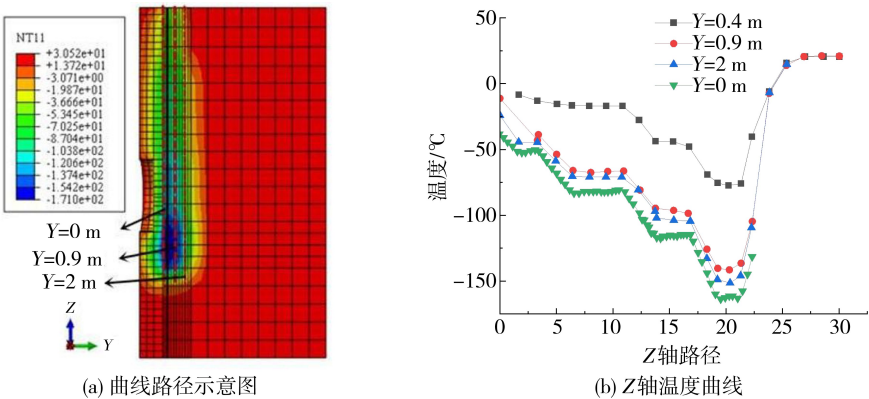


图 6 液氮冻结竖直方向温度路径曲线分析

Fig.6 Temperature path curve analysis in vertical direction of liquid nitrogen freezing

从图 6 可看出,冻结管及土体各个坐标随 Z

轴路径的变化趋势基本一致,最低温度区域发生

在地表以下 20 m 附近,即为液氮的沸腾换热区域的中间部位。从整个冻结管的冻结范围来看,不论是冻结管还是土体,温度梯度最大的区域都发生在 15~20 m 之间,也就是沸腾换热与对流换热的交界区域,说明沸腾换热产生的低温区域对整个温度场的竖直方向上温度差异产生较大影响。第 2 个温度梯度较大的区域在 0~5 m 之间,该区域一方面低温氮气温度较高,吸热能力弱,另一方面地表空气对流换热源源不断地给土体提供热量,使得土体温度迅速升高。

从 $Y=2$ m 曲线可以看出,在距离连续墙 2 m 处,土体深度在 10~23 m 范围内土体温度已达到 0℃ 以下,在洞门范围内的土体温度达到 -40℃ 以下,完全满足冻土墙温度低于 -20℃,冻土墙厚度大于 2 m 的设计要求。

对竖直方向冻结温度场随冻结时间的变化情况进行分析,图 7 为冻结 4、8、12、16 d 时,竖直方向的温度场开展情况。积极冻结 4 d,冻结管温度进一步降低,达到 -160℃。冻结区域内三分之二土体降低至 -50℃ 以下,冻结交圈逐渐形成,低温冻土范围自上而下逐渐扩大,土体温度也逐渐降低,在底部液氮沸腾区域冻土达到最低温度,接近冻结管温度 -169℃。

积极冻结 8 d,冻结效果主要体现在整个冻结区域冻土温度的进一步降低,低温冻结范围在 Y 轴方向上的扩大,冻结壁完全达到盾构进洞施工的设计要求。

经过 8 d 的积极冻结,液氮冻结温度场已经交圈完毕并且满足施工要求,理论上来说,维护冻结只需要维持住温度场范围即可。如图 7(c)(d) 所示,8 d 维护冻结温度场范围稍有增加,洞门附近冻土壁的温度维持在 -80℃ 以下,温度场整体温度达到 -50℃ 以下,冻结壁范围也大于 2 m,满足施工要求。

从竖直方向来看,温度场变化基本趋于稳定,冻结 12 d 时,随着冻结管温度升高,冻结管与土体的温度梯度逐渐降低,热传导速率逐渐降低,冻结管温度的上升趋势趋于平缓。冻结 16 d 时,整个冻结温度场温度保持稳定,除液氮冻结低温区外,整体冻结范围几乎不变,整个温度场达到了新的平衡。基于当前的液氮输入量、冻结范围以及温度场中各个部分的温度梯度,使得在当下温度场中,输

入液氮吸收的热量与土体热传导所耗散的各种能量达到平衡。在积极冻结与维护冻结的过渡阶段以及维护冻结达到平衡阶段,温度场的冻结范围都没有缩减,说明维护阶段冻结设计方案可行。

在冻结施工前,一般都会进行洞门预凿施工,连续墙厚度为 2 m,在盾构要通过的部位预先凿除 1.2 m 厚混凝土,仅留下 0.8 m 混凝土。施工正值夏季,白天施工场地温度达到 30℃,温差较大,空气对流提高洞门温度,预凿后的混凝土在冻结 8 d 后温度已升高至 -30℃。从图 7 各个时期冻结竖直方向剖面图都可以看出,在连续墙洞门预凿部分,等温线明显向内凹,说明空气对流对洞门的加热效果明显,带走了大量制冷量,足以改变温度场的等温线。

3.2 液氮冻结温度场水平方向分布特点

在水平方向上选取 $Z=20.3$ m 剖面进行分析,该剖面在液氮沸腾区的中心位置,是整个液氮冻结温度场中温度最低的区域,该剖面有助于了解液氮沸腾区温度场的变化趋势。

图 8 为 $Z=20.3$ m 水平方向剖面液氮冻结温度场在 4、8、12、16 d 的发展情况,从图中可知,液氮沸腾区土体温度下降迅速,冻结 4 d 时冻结壁已经完成交圈,形成了完整的冻结壁,处于连续墙与冻结管之内的土体温度降低至 -110℃ 以下。此时冻结范围向连续墙方向快速发展,而向土体方向发展缓慢,连续墙与土体的接触部分达到 -110℃ 以下。冻结 8 d 时,冻结管周围土体温度进一步降低,最低温度降至 -160℃ 以下,冻结范围在地下连续墙方向快速发展,向土体方向缓慢发展。

从图 8 可以发现,温度场中的低温区域并不是在两排冻结管之间均匀发展,整个低温区域的中心移动到了第 2 排(远离连续墙那一排)冻结管与连续墙中间的位置,并且冻结范围向连续墙方向发展的速度比向土体方向发展的速度快,温度也相对较低。温度场产生这种发展趋势的原因主要是因为冻结范围内的土体不断与远处的土体进行热交换,热量耗散快,所以沿土体方向冻结范围发展较慢。而地下连续墙本身导热系数较小,且与低温区域直接接触,所以沿地下连续墙方向温度场发展的速度相对较快。因此液氮制冷能量在第 2 排冻结管与连续墙之间大量积累,形成低于 -130℃ 的低温区。

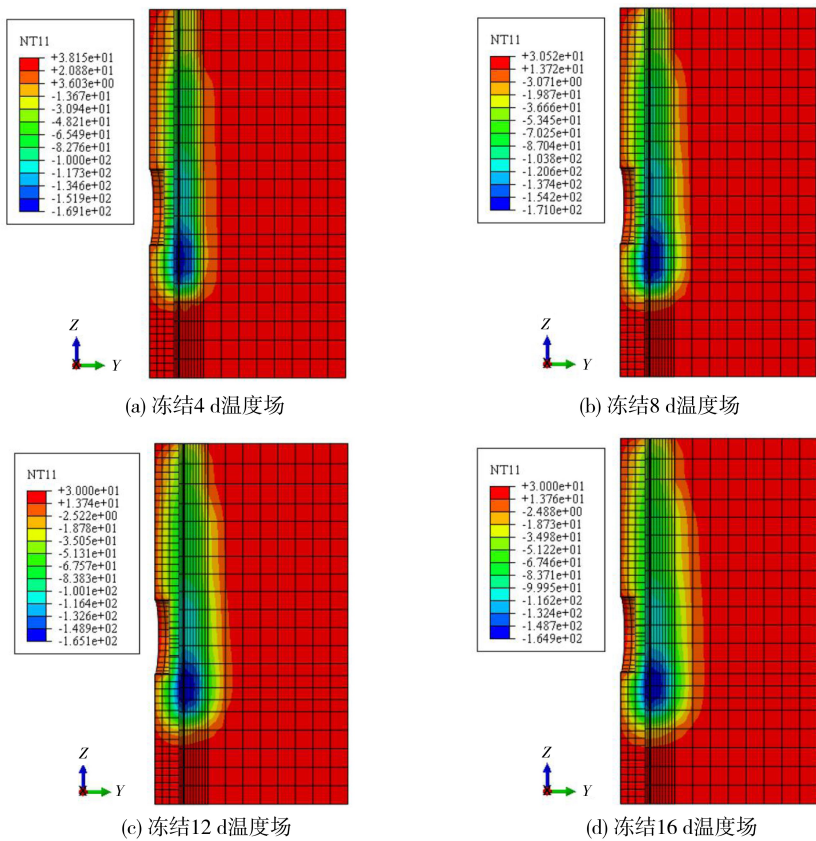


图 7 竖直方向冻结温度场随冻结时间变化趋势图

Fig.7 Trend chart of vertical freezing temperature field changing with freezing time

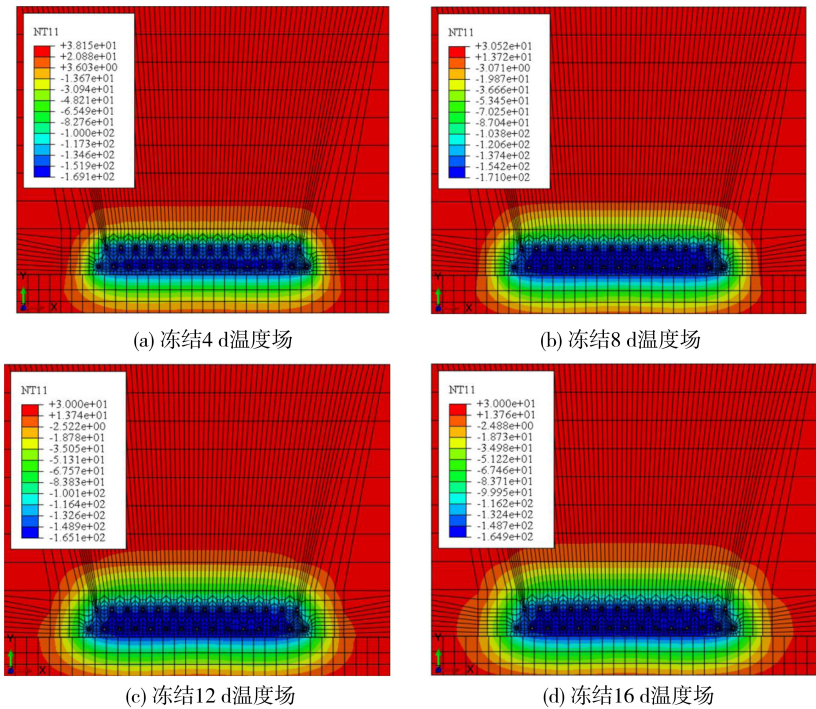


图 8 $Z=20.3\text{ m}$ 水平方向剖面温度场随时间变化趋势图

Fig.8 $Z=20.3\text{ m}$ horizontal profile temperature field trend changing with time

冻结设计时,理想的冻结温度场能尽可能快速向土体方向开展并达到设计厚度,并且低温土体能够均衡的分布,以保证形成均匀的冻土壁,用以承受土压力并隔绝地下水。从目前的情况来看,液氮制冷能量大部分集中在地下连续墙与冻结管之间,虽然地下连续墙能使温度场更均匀地朝地下连续墙延展方向发展,但冷量并没有高效地传递到远离冻结管的土体而快速的形成均匀冻土壁。另一方面由于洞门处连续墙较薄,低温连续墙直接暴露在空气当中,空气对流换热带走大量液氮制冷能量,不利于温度场的发展,并且造成经济、能源浪费。

如图8(c)(d)所示,在维护冻结期间,连续墙的保温效果显得更为明显,在冻结到12 d时,连续墙的温度场基本不再变化,由于导热系数低并且与土层接触面的温度梯度小,从冻结管中传递到连续墙的能量达到最小值(大约为空气对流在墙面吸收的热量),此时连续墙起到一个保温隔膜的作用。在连续墙温度稳定之后的16 d,制冷能量在两排冻结管中间的土层集中,使得低于 $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超低温土范围进一步扩大,但由于液氮输入量的减少,低温区土体的最低温度有所提高。低温土体引起的温度差异导致冻结区域开始向无限远处的土层进一步发展,从图8(c)中可以明显观察到,土体冻结范围的扩大,直到16 d时冻结范围依然没有停止扩大。Y轴方向低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 土体的范围达到3.83 m,远大于设计冻结范围2 m,若冻结时间继续增加这一范围将继续扩大。

4 液氮冻结设计施工优化

4.1 液氮冻结竖向方向设计施工优化

(1)在洞门竖直冻结施工时,为了提高安全系数,往往设计冻结管埋深大于洞门底部,然而在液氮竖直冻结施工中,这种做法反而会降低冻结效果。在盾构洞门液氮竖直冻结施工时,冻结管埋深不应大于洞门底部过多,竖直冻结液氮大部分在底部汽化,底部温度最低,若冻结管埋深大于洞门底部则低温区域会集中在洞门以下,不仅造成液氮冷量的浪费,还会减小最需要加固的洞门部分土体及其上部土体的冻结范围及冻结温度,影响冻结效果。

(2)当冻结区域埋深过大,冻结管长度较长时,应适当降低出口氮气温度。因为冻结管产生

温度差异的原因一方面是低温氮气自下而上的流动,另一方面是冻结管自身在竖直方向的温度交换,而与底部低温区的距离越大,后者的作用就越小,而低温氮气的对流换热效果有限,冻结管长度过大会使得中上部土体温度过高强度不足,并且使得冻结范围内交圈不完全。所以当冻结管长度过大时,应该适当降低出口氮气温度,以保证整个液氮冻结区域的冻结效果。

(3)液氮竖直冻结可考虑在供液管不同部位开孔,使得液氮能够在不同的高度流出,尽可能让液氮的沸腾区域在冻结管内均匀分布,降低冻结管在竖直方向的温度梯度。这样不仅有利于土体温度场的均匀分布,增强施工人员对温度场发展的控制,进而提高冻结施工的质量;也有利于提高液氮制冷的利用率,降低液氮施工成本,同时也减少了能源的浪费。

(4)由上述可知,预凿后洞门混凝土由于厚度较薄,积极冻结时温度达到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,在施工时洞门预凿混凝土往往直接暴露在空气中,浪费液氮制冷能量,也不利于冻结温度场的发展。建议在开凿前对洞门预凿部分混凝土作一些保温处理,例如铺设保温材料等。对连续墙厚度较小的工程,建议对暴露在空气中的地下连续墙都作保温处理。保温处理有助于地下连续墙温度场尽快达到稳定状态,地下连续墙温度场降温到稳定的时间长短会影响整个土层冻结温度场的发展速度。对地下连续墙采取保温措施能够缩短冻结交圈时间,提高冻结施工效率和质量,节约液氮制冷能量。

4.2 液氮冻结水平方向设计施工优化

(1)由于地下连续墙的保温效果,在各个剖面中,土体温度最低的区域总是集中在第2排(远离连续墙那一排)冻结管与地下连续墙之间,制冷能量往地下连续墙方向传递逐渐达到饱和之后才开始大量往第2排冻结管之后的土层发展。施工中更希望冻结范围能够尽可能快地向土层方向发展,冻土壁早日达到设计厚度后进行盾构进出洞作业。所以根据上述规律,在冻结设计时第1排靠近连续墙的冻结管布置数量相对较少,管间距相对扩大,而第2排冻结管布置数量增加,管间距缩小;或者使用两管串联的方式把液氮的进液口布置在第2排管,而第1排管与第2排管的出液口相连接。总的来说,应把更多的制冷能量

分配到远离连续墙的冻结管中,这样能够更合理地分配液氮制冷能量,提高冻结壁达到设计厚度的效率。

(2)由上述可知,维护冻结期主要存在的问题为液氮沸腾换热区容易造成土体低温区域温度过低,且冻结温度场范围大于设计范围。使用水平冻结方案或在供液管中设计多个出液口,让沸腾区更均匀分布是一种解决方案,低温区的扩大使得低温土体温度相对升高,温度梯度减小将减小冻结范围的扩大。若无可避免使用本项目的竖直方向冻结管布设方案,让沸腾换热区集中在某一区域,则应在冻胀、融沉控制措施设计时,充分考虑低温区的冻结范围,对可能产生的冻结范围采取控制措施。若条件允许应在沸腾换热区设计冻结区范围外的土层中布置测温孔,严格控制冻结时间,防止冻结时间过长,尽可能缩短积极冻结期时间。盾构进洞施工完成后,可对冻结土体进行强制解冻,防止冻结范围进一步扩大。

5 结论

1)液氮冻结是通过液氮沸腾吸热、低温氮气对流换热来冻结土体,相较于盐水冻结,液氮冻结

加固效率高,周期短,但液氮冻结也存在温度场分布不均匀的现象。

2)液氮冻结土体竖直方向存在较大的温度差异,液氮的沸腾吸热是液氮冻结的主要吸热方式,温度最低区域分布在深度为 18.3~22.3 m 的液氮沸腾区,最低温度低于 -160°C 。洞门预凿降低连续墙厚度,导致空气对流,带走大量冷量,影响冻结壁发展速度。

3)液氮冻结在水平方向上并未产生很大的温差,但由于地下连续墙与土体导热系数的差异,冻结温度场中低温区域并不是在两排冻结管之间均匀发展,冻结区域在连续墙方向发展速度相较于土体方向发展速度更快,温度也更低。

4)液氮冻结竖直方向上,液氮冻结施工应缩短冻结管长度,适当减小冻结区埋深,在供液管不同深度区域开孔,并对暴露的洞门和地下连续墙做好保温措施,提高工程效率与质量。

5)液氮冻结水平方向上,液氮冻结施工时应优化冻结管布设,设置更多针对性的测温孔,也可以布设水平液氮冻结管来降低冻胀融沉效应,使冻结壁发展更均匀。

参考文献:

- [1] 方江华,张志红,张景钰. 人工冻结法在上海轨道交通四号线修复工程中的应用[J]. 土木工程学报,2009,42(8): 124-128.
- [2] 李方政,李栋伟,韩圣铭. 液氮冻结帷幕水热耦合温度场数值分析及应用[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(3): 590-595,632.
- [3] 石荣剑,岳丰田,张勇,等. 使用塑料冻结管的液氮冻结温度场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S1): 2894-2899.
- [4] 张全全. 饱和砂层渗流作用下液氮快速冻结温度场研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.
- [5] 覃少杰. 盾构始发超低温冻结加固温度场研究[D]. 福州:福建工程学院,2018.
- [6] WANG X Y, YUAN D J, JIN D L, et al. Thermal and mechanical response of soil and tunnel during replacement of shield tail brush by freezing method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(5): 1632-1640.
- [7] 梅源,赵良杰,周东波,等. 冻结法在富水砂层暗挖施工中的应用[J]. 中国铁道科学,2020,41(4): 1-10.
- [8] 刘子昕. 滨海地层液氮冻结温度场形成机理研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2019.
- [9] ROUABHI A, et al. Modeling heat and mass transfer during ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120: 523-533.
- [10] 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.

(责任编辑:陈雯)