

上海软土地层中地铁联络通道冻结法施工的温度场发展特性*

赵昊楠¹ 夏才初^{1,2} 王兴开¹

(1. 绍兴文理学院土木工程学院, 312099, 绍兴; 2. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海)

摘要 [目的] 为了在冻结法施工前预先判断冻结壁的发展情况, 验证设计的合理性, 从而科学地指导工程施工, 需要研究上海地铁联络通道在软土地层中冻结法施工的温度场发展规律, 并提出检验指标及经济指标。[方法] 以上海轨道交通 15 号线某区间联络通道为背景, 对冻结壁厚度、土层温度、盐水温度及冻结过程进行分析, 通过 ABAQUS 有限元软件建立全地层三维数值模型, 预测冻结温度场发展特性, 并与现场实测温度数据进行验证。[结果及结论] 黏土层冻结帷幕平均发展速度为 54.535 mm/d, 粉质黏土层冻结帷幕平均发展速度为 52.450 mm/d, 黏土层比粉质黏土层冻结效果好; 由于冻结管端头截面冻结效果较弱, 以该截面处弱侧冻结壁厚度和平均温度作为冻结效果的检验指标, 降低强度破坏可能性; 盐水温度对冻结壁厚度发展的影响随温度的降低而减弱, 其中 $-35 \sim -30$ °C 时经济效益最高; 模拟结果与实测数据总体降温趋势一致, 可较为真实地反映实际工程。

关键词 地铁隧道; 冻结法; 数值模拟; 联络通道; 瞬态温度场

中图分类号 U455.49

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.015

Temperature Field Development Characteristics of Frozen Method Construction for Metro Link Passages in Shanghai Soft Soil Stratum

ZHAO Haonan¹, XIA Caichu^{1,2}, WANG Xingkai¹

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, 312099, Shaoxing, China; 2. School of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In order to predict the development of the frozen wall before the frozen method construction and validate the rationality of the design, providing a scientific guidance for engineering construction, it is necessary to study the temperature field development law of frozen method construction for Shanghai Metro link passages in soft soil stratum, and propose evaluation and economic indicators. [Method] Taking an interval of Shanghai Rail Transit Line 15 as engi-

neering background, the frozen wall thickness, soil temperature, brine temperature, and freezing process are analyzed. A three-dimensional numerical model of the entire stratum is established using ABAQUS finite element software to predict the development characteristics of the frozen temperature field and verify it with field-measured temperature data. [Result & Conclusion] The average development speed of the clay layer frozen curtain is 54.535 mm/day, while the average development speed of the silty clay layer frozen curtain is 52.450 mm/day, indicating a better freezing effect of the former. Considering the relatively weak freezing effect at the end profile of the freezing pipe, the thickness of the weak-side frozen wall and the average temperature at that profile are adopted as the freezing effect evaluation indicators, thereby reducing the possibility of structural damage. The influence of brine temperature on the development of frozen wall thickness weakens with decreasing temperature, with the highest economic benefit observed between -30 °C and -35 °C. The simulation results are consistent with the overall cooling trend of the field-measured data, providing a relatively realistic reflection of the actual construction process.

Key words metro tunnel; frozen method; numerical simulation; link passage; transient temperature field

上海轨道交通 15 号线(以下简称“15 号线”)的联络通道所处地层为软土地层。受软土地层承载力不够且含水率较高等因素影响,开挖时易发生隧道内渗水,引发隧道失稳、淹水甚至通道坍塌等事故。使用冻结法施工可以很好地解决这一隐患。

冻结法施工通常会通过测温孔来实时监控温度,但尚不能在开挖施工前对冻结壁瞬态温度场进行预测分析。通过对冻结温度场的预测分析,可以提前判断冻结壁的发展情况,验证设计的合理性,从而科学地指导工程施工。为此,本文以上海地区

* 国家自然科学基金面上项目(51778475)

某联络通道为背景,根据现场实测的盐水温度、土体温度等温度数据,对冻结过程进行分析,探究软土对冻结发展的影响。

国内外学者做了关于地铁联络通道冻结法的研究。文献[1]依托沈阳苏家屯地区地铁联络通道模拟了某渠基土冻结条件下温度场和位移场的变化规律;文献[2]提出了水平冻结法冻胀效应准耦合数值分析方法;文献[3]依托地铁线路隧道重叠段联络通道施工,分析了下部隧道采用冻结法施工时对上部隧道的影响;文献[4]研究了不同送风量下隧道的温度场分布规律和通风系统对温度的影响;文献[5]依托福州 2 号线某区间超长联络通道研究了冻结温度场的变化规律;文献[6]依托上海市轨道交通 9 号线部分工程,分析了人工冻结法施工中冷冻排管的布置形式;文献[7]通过建立了冻胀数学模型研究多场耦合下人工冻结技术下冰透镜的形成;文献[8]依托福州某超长联络通道工程,利用 ANSYS 有限元分析软件模拟了温度场的发展规律及特性。

本文利用 ABAQUS 有限元软件建立全地层三维冻结模型,结合模拟数据和实测数据,探讨上海地铁联络通道在软土地层中冻结法施工的温度场发展特性。

1 工程概况

1.1 工程简介

15 号线某联络通道(以下称为“联络通道 A”)埋深为 20 m,总长 22.73 m。联络通道 A 为直墙拱型隧道,采用矿山暗挖法施工,宽 3.4 m,高 4.09 m。初期支护为钢拱架支撑和 C25 喷射混凝土。联络通道 A 正上方为大渡河路,是交通繁忙地段。隧道中心线与古南小区的最小距离为 15 m。沿天山路方向还有一条平行于联络通道的新建盾构隧道,且隧道顶标高为 -25 ~ -24 m。综合判断,联络通道 A 的工程风险等级为一级,其由施工引起的地面及周边建筑变形控制要求严格。联络通道 A 的冻结管布置如图 1 所示。

根据工程勘察资料,联络通道 A 所在地层自上而下依次为:①₁ 杂填土、③₁ 灰色淤泥质粉质黏土、④₁ 淤泥质黏土、⑤₁ 黏土、⑤₂ 粉质黏土。联络通道 A 的主体部分位于黏土层中,下端部分冻结管位于粉质黏土层中。粉质黏土层含水率较高且强度较

弱、压缩性较高,故联络通道 A 开挖时易发生失稳、塌方等事故,且极易引发较大的地表位移和周边建筑变形,施工风险高。因此在开挖联络通道 A 前,须对位于开挖断面周边的土体进行加固,以保证工程顺利、安全进行。

1.2 冻结设计方案

根据地质条件及上海地区类似的施工经验,联络通道 A 开挖采用水平冻结法加固地层 + 矿山法暗挖的施工方案。

联络通道 A 的冻结管按照上仰、水平及下俯三种方法布置;在喇叭口、拱顶及拱脚等冻结效果较差区域,均采用双排冻结管布置,以改善冻结效果。共布置 86 根冻结管(其中下行线隧道布置 42 根,上行线隧道布置 44 根),包含 2 根对穿冻结管(D7、D8);测温孔共有 20 个(C1—C20);上、下行线隧道各布置 4 个泄压孔(X1—X8)。

2 现场实际监测数据

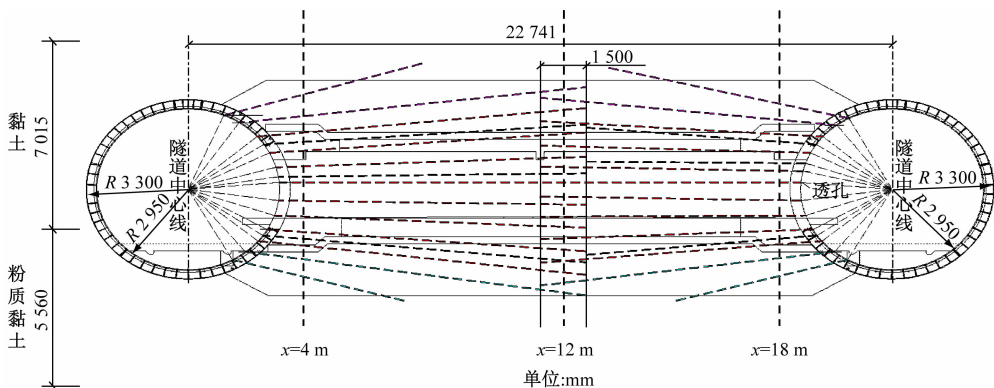
2.1 盐水温度

冻结初期冷冻机处于调试阶段,盐水下降温度并不是匀速的,最大盐水温差为 3.4 °C。当盐水温度降至 -18 °C 时,盐水去回路温差稳定在 2 °C;当盐水温度保持在 -30 °C 上下时,温差基本保持不变,冻土帷幕平均温度基本稳定在 -10 °C 左右,土层与冻结管的热交换达到平衡状态。

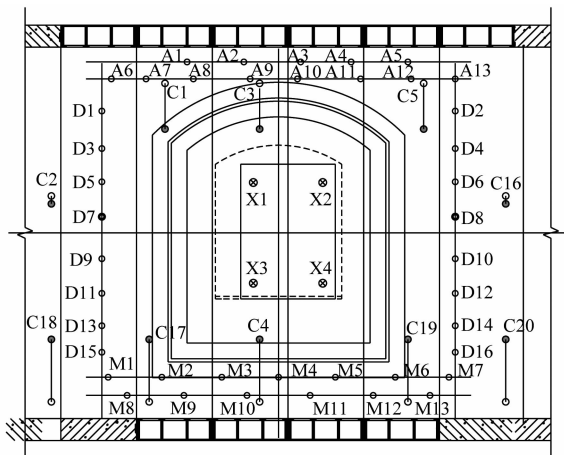
2.2 土体温度

测温点选取位于联络通道 A 喇叭口截面测温孔(C2—C4)的横坐标 $x=4$ m 处(测温点编号分别为 C2-4、C3-4、C4-4),位于联络通道冻结管端头上截面和下截面测温孔(C3 及 C4)的 $x=12$ m 处(测温点编号分别为 C3-12、C4-12)。通过比较各测温点的不同时间温度值,分析冻结温度场的变化趋势。不同测温点的温度变化曲线如图 2 所示。

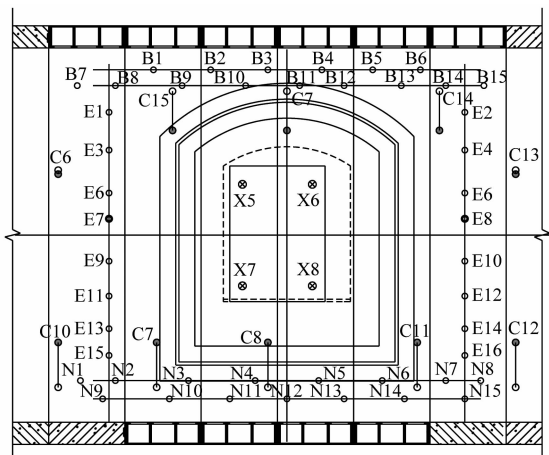
由图 2 a)可以看出,温度变化曲线大致可分为三个阶段:第一阶段(约 11 d),土体初始温度和盐水温度温差大,两者之间发生剧烈热交换,故各测点温度下降速率快,平均降温速率为 1.16 °C/d;第二阶段(约 14 d),当土体温度接近 0 °C 左右时,其温度下降速率逐渐减小,说明各冻结锋面已经开始交圈,平均降温速率为 0.78 °C/d;第三阶段(约 25 d),土体温度降至 -10 °C 以下,降温速率进一步减小,平均降温速率为 0.26 °C/d。



a) 冻结管位置及横坐标示意图



b) 上行线隧道开孔

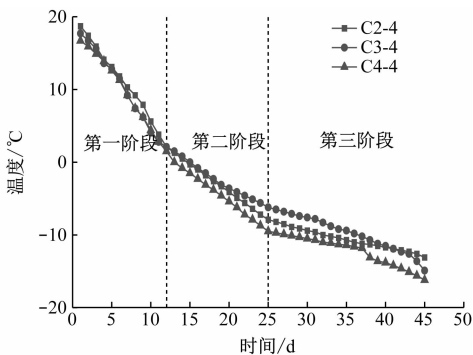


c) 下行线隧道开孔

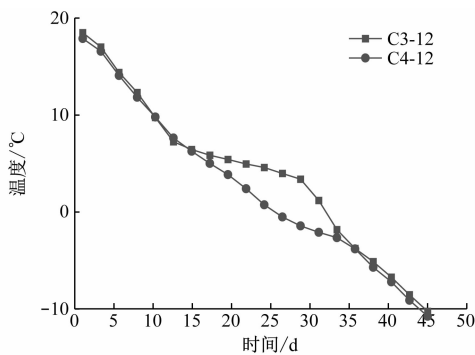
注: X1—X8 为泄压孔; D7、D8 为透孔; D1—D16、A1—A13、M1—M13、E1—E16、B1—B15、N1—N15 为冻结孔; C1—C20 为测温孔。

图 1 联络通道 A 的冻结管布置图

Fig. 1 Diagram of link passage A freezing pipe layout



a) C2-4、C3-4、C4-4



b) C3-12、C4-12

图 2 不同测温点的温度变化曲线

Fig. 2 Temperature change curves of different temperature measuring points

如图 2 b) 所示,当测温点 C3-12 的温度降至 5°C 以下时,降温速度相较于测温点 C4-12 温度大幅放缓,这是由于上下行线冻结管布置不对称所导致。C4 测温孔离下行线冻结管较近,故 C4 测温孔的降温幅度比 C3 测温孔更大。由于冻结管端头部

位冻结效果相对较弱,故测温点 C3-12 与 C4-12 的最终温度相差不大。

2.3 冻结壁计算结果分析

测温点选择 C3-4 及 C4-4,以及 C7 及 C8 测温孔 $x=12\text{ m}$ 处(测温点编号分别为 C7-12、C8-12),

其中 C3-4 及 C7-12 位于黏土层,C4-4 及 C8-12 位于粉质黏土层。冻土发展速度计算式为:

$$v = s/t \tag{1}$$

式中:

- v ——冻土发展速度;
 - s ——测温孔与最近冻结孔距离;
 - t ——冻结壁温度下降至 0℃所用时间。
- 计算得到各测温点的 v 如表 1 所示。由表 1 进一步计算可得,黏土层中 v 的均值为 53.535 mm/d,粉质黏土层 v 的均值为 52.450 mm/d。可见,黏土层的冻结效果比粉质黏土层的冻结效果好。

表 1 冻土扩展速度
Tab.1 Expansion rate of frozen soil

测温点	s/mm	降温至 0℃所用时间/d	v/(mm/d)
C3-4	810	15	54.00
C7-12	743	14	53.07
C4-4	678	13	52.15
C8-12	633	12	52.75

3 冻结温度场的有限元分析

联络通道 A 的冻结温度场是含有内热源且边界条件复杂,并含多相变的瞬态导热动态温度场,其发展规律和各地层的密度、比热容、导热系数、盐水去回路温度等变化有关。结合工程设计和现场实际情况,采用 ABAQUS 有限元软件建立冻结温度场的有限元数值模型(以下简称“温度场模型”),对联络通道 A 的冻结过程进行数值模拟。

3.1 冻结温度场的计算

在冻结法施工过程中,冻结土体的温度场为非线性的瞬态变化。根据实测温度数据可以发现,土体冻结其实是土中水发生相变。瞬态温度场的微分方程见文献[9]。

3.2 温度场模型的建立

温度场模型包含地铁盾构隧道、联络通道 A、冻结管及周围土体。地铁盾构隧道、联络通道 A 及冻结管均按照工程实际设计图纸建模。土体按工程实际情况分为 5 层,分别为杂填土、灰色淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土、黏土、粉质黏土,均选用实体单元来模拟。冻结管也选用实体单元来模拟。在地层中共创建 86 根冻结管,根据工程实际按上、中、下三层放射性布置,并与土体以绑定约束来固定。温度场模型中,隧道中心距地面 16.12 m,隧道半径为

2.95 m,管片厚 350 mm。一般情况下,冻结管的温度影响范围约为冻结管布置圈半径的 5 倍,故温度场模型尺寸为 40 m×25 m×25 m。

温度场模型的尺寸及网格划分见图 3。模型共划分了 380 610 个单元,冻结管单元密度为 0.1 m,土体单元密度为 1 m,局部加密单元 0.25 m,土体单元与冻结管单元均采用 8 节点传热六面体单元(DC3D8)划分。

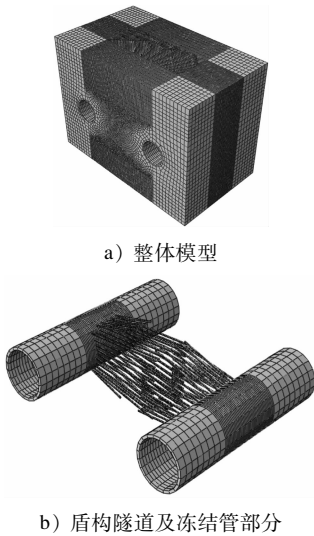


图 3 温度场模型的尺寸及网格划分

Fig.3 Dimensions and meshing of temperature field models

3.3 材料参数及模型边界条件

为确保模拟计算结果正确,土体热物理性质的重要参数结合工程实际情况取值,如表 2 所示。

根据上海市气候资料及地层温度数据,假定模型初始温度为 17℃,设置积极冻结期为 45 d,盐水温度施加在冻结管边界上。冻结第 7 d 时盐水温度低于 -18℃,在第 15 d 时盐水温度达到最低温度 -30℃。

3.4 冻结温度场发展特性

3.4.1 各截面冻结温度场发展规律

考虑到冻结管分层布置,以及冻结温度场的发展和分布不尽相同,本文选取联络通道 A 上行线喇叭口截面($x = 4$ m 截面)、联络通道中点处截面($x = 12$ m 截面)、下行线喇叭口截面($x = 18$ m 截面)进行分析。

如图 4 所示,积极冻结 17 d 后, $x = 4$ m 截面和 $x = 18$ m 截面的冻结温度场均已交圈, $x = 12$ m 截面的冻结范围继续扩散。冻结帷幕向内扩散速度大于向外扩散速度。

表 2 各土层热物理性质参数的取值

Tab.2 Values of thermal physical property parameters of various soil layers

土层编号	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	比热容/(kJ/(kg·℃))		导热系数/(W/(m·℃))		相变潜热/(MJ/m ³)
				冻土	未冻土	冻土	未冻土	
① ₁	19.4	22.3	0.3	1 320	1 950	2.23	1.20	107
③ ₁	19.3	23.2	0.3	1 210	1 850	2.30	1.18	120
④ ₁	16.5	13.3	0.3	1 150	1 640	2.26	1.32	140
⑤ ₁	17.0	15.4	0.3	1 550	1 800	2.23	1.48	150
⑤ ₂	17.7	14.3	0.3	1 200	1 690	2.23	1.41	135

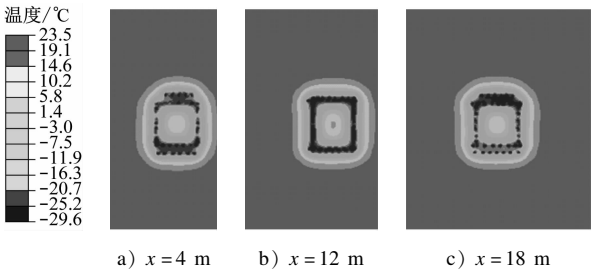


图 4 积极冻结 17 d 温度分布云图

Fig.4 Nephogram of active freezing 17 d temperature distribution

如图 5 所示,积极冻结 45 d 后各截面所有开挖土体温度均降至 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, $x=4\text{ m}$ 截面冻结壁平均厚度为 2.05 m ; $x=12\text{ m}$ 截面冻结壁平均厚度为 2.25 m ; $x=18\text{ m}$ 截面冻结壁平均厚度为 2.19 m 。均达到实际工程设计要求的冻结壁厚度 (1.90 m)。冻结壁发展较为均匀,整体呈“回”字型,开挖土体温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,尚未完全冻实,但对后续开挖有利,表明上下行冻结管布置合理。

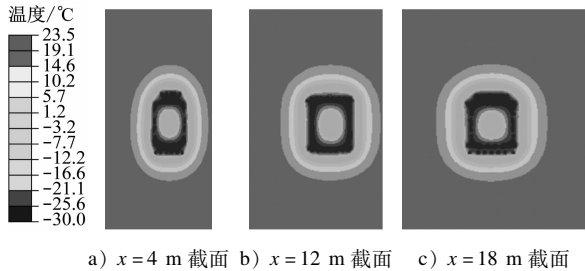


图 5 积极冻结 45 d 温度分布云图

Fig.5 Nephogram of active freezing 45 d temperature distribution

$x=4\text{ m}$ 截面和 $x=18\text{ m}$ 截面冻结期间的冻结温度场发展规律类似。在冻结初期,温度场发展十分迅速,土体温度由初始温度逐渐下降至接近冻结管温度;积极冻结 17 d 后,截面冻结壁均已交圈,此时冻结温度场的发展速度逐渐减缓,但由于冻结影响范围内的土体温度已经下降至接近冻结管温度,

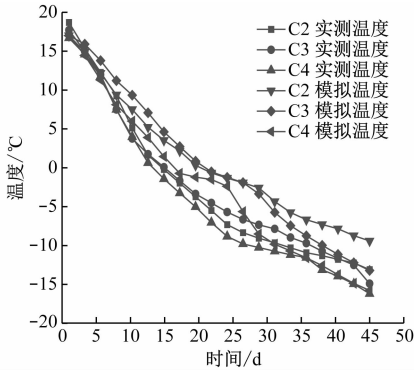
冻结壁的厚度增速较快,此时冻结温度场向内发展速度逐渐慢于向外发展速度;冻结 45 d 后,各截面的冻结壁厚度均已超过设计要求。由此可见,在喇叭口附近的冻结壁封闭交圈速度较慢,应严格确保盐水温度的质量,保证冻结壁厚度的发展。

$x=12\text{ m}$ 截面由于位于冻结管端头,理论上冻结管端头均是冻结壁发展速度较慢的部位,冻结效果要弱于 $x=4\text{ m}$ 截面和 $x=18\text{ m}$ 截面。但由于上下行均布置冻结管,冻结管端头部位是处于叠加区域,在双向冻结管的共同影响下,该截面冻结 10 d 后冻结壁开始交圈。因为冻结范围较大,开挖土体的温度下降速率要低于 $x=4\text{ m}$ 截面,冻结壁厚度的发展速度和厚度均优于 $x=4\text{ m}$ 截面。

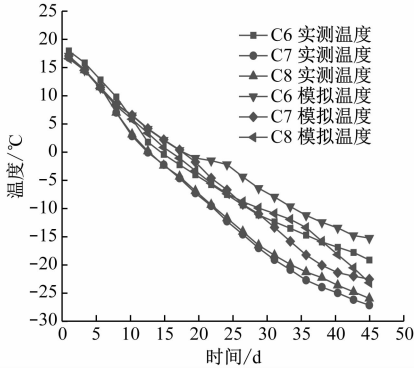
3.4.2 数值模拟温度与监测数据对比

为探究不同深度不同截面的模拟结果和实测数据之间的关系,选取在上行线 $x=4\text{ m}$ 截面内的 C2—C4 测温孔、 $x=12$ 截面内的 C3—C4 测温孔、下行线 $x=18\text{ m}$ 截面内的 C6—C8 测温孔进行温度分析。积极冻结 45 d 中,各测温孔的实测温度和模拟温度曲线对比情况见图 6。

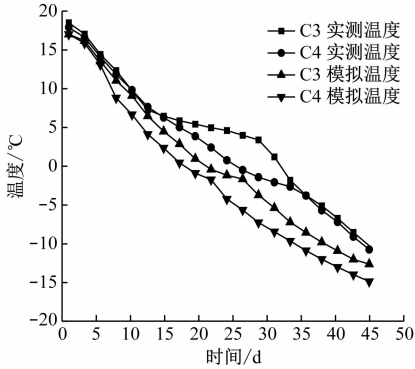
模拟测温孔温度和实测温度温差较小,模拟结果总体降温趋势与实测值吻合。由于数值模拟是理想化的传热模型,且受现场施工的不可预测因素等影响,实测数据与数值模拟结果存在一定误差是可接受的。模拟温度整体比实测温度更低,其原因是数值模拟中并未考虑地下水的影响,在实际工程中,土体含水率、地下水的存在会使热交换的过程更为复杂。故可以认为数值模型较为准确地描述了温度场发展变化规律。利用 ABAQUS 有限元软件数值模拟得到的多地层温度场可以较为真实地反映实际工程。通过温度场分布云图可直观地看到联络通道的冻结效果。



a) $x = 4\text{ m}$ 截面的 C2—C4 测温孔温度



b) $x = 18\text{ m}$ 截面的 C6—C8 测温孔温度



c) $x = 12\text{ m}$ 截面的 C3、C4 测温孔温度

图 6 实测与模拟温度对比图

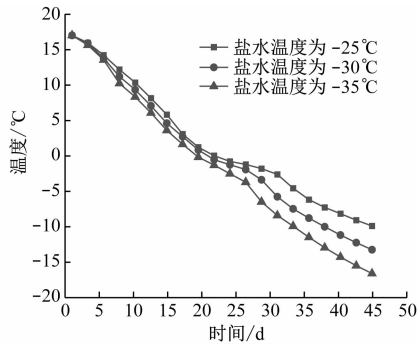
Fig. 6 Comparison diagram of measured and simulated temperatures

3.5 不同盐水温度对冻结效果的影响

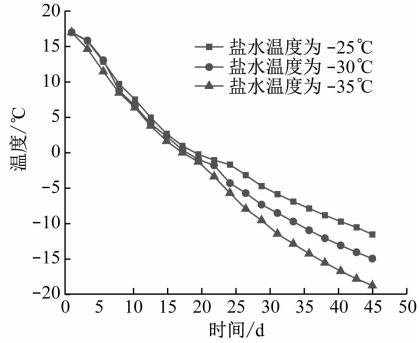
为研究盐水温度对冻结效果的影响,本文依托该工程,采用同样的冻结管数和布置方法,通过改变盐水温度,对冻结温度场进行模拟,可得到在盐水温度分别为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,不同冻结温度的变化曲线。选取上行线冻结管内侧 C3 测温孔($x = 4\text{ m}$ 截面)、冻结管端头部位 C4 测温孔($x = 12\text{ m}$ 截面)进行分析,相应不同盐水温度下温度变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,不同盐水温度下,三种温度变化曲

线在冻结初期相差不大,在此阶段内温度随冻结时间的增长而降低。盐水温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土体相变过程中释放的潜热在数值上等同于冻结管内冷冻液传来的冷量,故温度变化速率较小且呈缓慢下降的趋势。盐水温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土体相变过程中释放的潜热略小于冻结管内冷冻液传来的冷量,故温度变化速率仍呈下降趋势。盐水温度为 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土体相变过程中释放的潜热小于冻结管内冷冻液传来的冷量,故温度变化速率在一定时间段内持续减小后增长速率变快。



a) C3 测温孔 ($x = 4\text{ m}$ 截面)



b) C4 测温孔 ($x = 12\text{ m}$ 截面)

图 7 不同盐水温度下温度变化曲线

Fig. 7 Temperature change curve at different brine temperatures

综上可知,土体在冻结时释放的潜热是影响冻结效果的重要因素,而不同的土层具有不同大小的相变潜热,故选择合适的盐水温度是保证冻结帷幕能在积极冻结期达到设计厚度的重要因素。

不同盐水温度下冻结壁厚度达到设计厚度所需时间如图 8 所示。由图 8 可知:在不同盐水温度下,形成相同厚度冻结帷幕所需的时间相差较大;盐水温度在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间时,对冻结帷幕厚度达到不同设计要求所需时间的影响较大;而在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间时影响较小;盐水温度低于 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时影响可忽略不计。

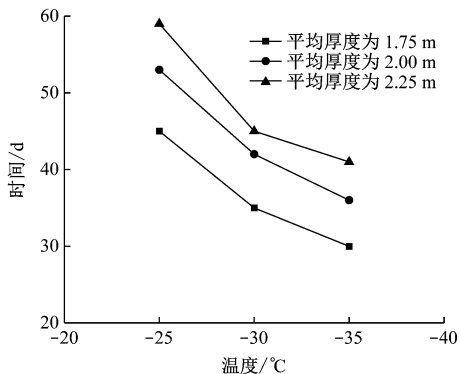


图8 不同盐水温度下冻结壁厚度达到设计厚度所需时间

Fig. 8 Time required for freezing wall reaching the design thickness at different brine temperatures

4 结论

1) 黏土层的冻结壁平均发展速度为 53.535 mm/d,粉质黏土层的冻结壁平均发展速度为 52.450 mm/d,由此说明黏土层的冻结效果比粉质黏土的冻结效果好。

2) 冻结温度变化速率可细分为 3 个阶段:温度快速下降阶段、温度下降速度先缓后陡阶段、温度下降速度缓慢阶段。相变潜热是影响温度下降的重要原因之一,在积极冻结期前注入适量水泥浆,可改善土层的相变潜热,从而提高冻结效率。

3) 积极冻结 37 d 后,冻结帷幕内平均温度低于 -10°C ,冻结 43 d 时冻结壁厚度超过 2 m。但在 $x=12\text{ m}$ 截面的降温效果比其他截面相对较弱,建议以冻结管端头截面处左右侧冻结壁厚度和平均温度作为冻结效果的检验指标。

4) 盐水温度在 -30°C 至 -25°C 区间时对冻结帷幕厚度达到不同设计要求所需的时间影响较大,而在 -35°C 至 -30°C 区间时影响较小,盐水温度低于 -35°C 时影响可忽略不计。建议人工冻结法施工盐水温度选择 -35°C 至 -25°C 区间,其中盐水温度在 -30°C 左右时最为经济; -35°C 左右最节省工期。

参考文献

[1] 吴文杰,姜国辉,杨璐宇. 沈阳苏家屯地区某渠基土冻结条件下温度场及位移场分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(12): 95.

WU Wenjie, JIANG Guohui, YANG Luyu. Analysis of tempera-

ture field and displacement field under freezing condition of foundation soil in Sujiatun area of Shenyang[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(12): 95.

- [2] 程桦,臧华. 人工地层水平冻结冻胀效应准耦合数值分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 87.
CHENG Hua, ZANG Hua. Quasi-coupling numeric analysis of frost heave effect of horizontal freezing in artificial ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 87.
- [3] 唐震东. 线路重叠交叉段下部隧道联络通道冻结法施工对上部隧道的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 92.
TANG Zhendong. Influence of the freezing construction of lower tunnel connecting passage on upper tunnel at overlapped and crossing line section[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 92.
- [4] ZHANG Z, CHEN F, YANG S, et al. Study on temperature control of ventilation system in construction period of high ground temperature tunnel[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 741(1): 012100.
- [5] 崔灏. 超长地铁联络通道水平冻结温度场变化规律分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(8): 54.
CUI Hao. Temperature field variation law of the horizontal freezing in ultra-long subway connecting aisle[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(8): 54.
- [6] 张松. 地铁联络通道冻结法施工中冷冻排管布置形式分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(11): 108.
ZHANG Song. Analysis on the freezing row tube layout in freezing construction for metro tunnel bypass[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(11): 108.
- [7] TALAMUCCI F. Freezing processes in porous media: formation of ice lenses, swelling of the soil[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2003, 37(5/6): 595.
- [8] 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.
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.
- [9] DEL G S, COMINI G, LEWIS R W. Finite element simulation of freezing processes in soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1978, 2(3): 223.

· 收稿日期:2021-08-03 修回日期:2021-09-28 出版日期:2024-01-10

Received:2021-08-03 Revised:2021-09-28 Published:2024-01-10

· 第一作者:赵昊楠,助理工程师,610540844.com

通信作者:夏才初,教授,tjxiacbb@126.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license