

# 复杂地质条件下地铁联络通道冻结工程 冻土温度场变化规律\*

张潮潮<sup>1,2</sup> 崔 猛<sup>1,2</sup>

(1. 南昌工程学院土木与建筑工程学院, 330099, 南昌; 2. 江西省水利土木特种加固与安全监控工程研究中心, 330099, 南昌//第一作者, 讲师)

**摘 要** 目的:揭示冻土形成与发展的过程可以为复杂地质条件下的冻结法施工提供科学依据,因此需研究冻结过程中冻土温度场的变化规律。方法:以福州地铁某江底联络通道冻结工程为例,开展土体热物理参数试验及冻结温度场试验。通过试验获得土体的导热系数、比热容、冻结温度等重要热物理参数值,以及冻结温度分别为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冻土温度场的变化规律。利用 ANSYS 有限元计算软件开展了冻土温度场数值计算分析,获得了不同冻结时间下,冻结温度场计算分布图、沿路径 A—B 的温度分布情况、有效厚度范围内冻土的平均温度等计算结果,并与工程实际测量值进行了对比分析。结果及结论:冻结温度越低,土体温度的变化速率越快;当冻结温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,距离冷源最远处的测温孔测量得到的冻结温度稳定值分别为 $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-3.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-4.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $-7.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,稳定温度与相应冻结温度之间的差值分别为 $5.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $7.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $9.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及 $12.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;该冻结工程冻土交圈时间为 30 d,积极冻结时间为 45 d,冻土平均温度达到了 $-14.80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;计算结果与实测数据基本吻合,误差在工程允许范围之内,验证了所提数值计算模型对温度场计算结果的可靠性。

**关键词** 地铁;联络通道;冻结工程;冻土温度场

**中图分类号** TU472.9

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.09.026

## Temperature Field Change Law in Metro Link Passage Freezing Engineering under Complex Stratigraphical Conditions

ZHANG Chaochao, CUI Meng

**Abstract** Objective: To reveal the formation and development process of frozen soil can provide scientific basis for freezing method construction under complex stratigraphical conditions, thus it is necessary to study the frozen soil temperature field change law of freezing process. Method: Taking a river

bottom link passage freezing engineering of Fuzhou Metro as example, soil thermophysical parameter tests and freezing temperature field tests are carried out. Values of important soil thermophysical parameters including thermal conductivity, specific heat capacity, freezing temperature are obtained through the tests, as well as the change law of the frozen soil temperature field when the freezing temperature is  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectively. Frozen soil temperature field numerical calculation analysis is carried out by ANSYS finite element calculation software, and calculation results such as freezing temperature field calculation distribution diagram, temperature distribution along path A-B, average temperature of frozen soil in effective thickness range under different freezing time conditions are obtained and compared with engineering field-measured values for analysis. Result & Conclusion: The lower the freezing temperature, the faster the soil temperature change rate. When the freezing temperature are  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the soil temperature stable values measured by the temperature measuring hole farthest from the cold source are  $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-3.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-4.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and  $-7.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively. The difference between the stable temperature and the corresponding freezing temperature is  $5.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $7.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $9.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and  $12.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively. In the freezing engineering, the frozen soil closing time is 30 d, active freezing time is 45 d, frozen soil average temperature reaches  $-14.80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The calculation results generally comply with the measurement data, errors are within the engineering allowable range, thus verifying the reliability of the proposed numerical calculation model on temperature field calculation results.

**Key words** metro; link passage; freezing engineering; frozen soil temperature field

**First-author's address** School of Civil and Architectural Engineering, Nanchang Institute of Technology, 330099, Nan-

\* 国家自然科学基金项目(52268059)

chang, China

冻结法利用人工制冷技术,使地层中的水结冰,把天然岩土变成冻土,增加其强度和稳定性,已广泛应用于煤矿竖井、地铁和基坑等工程领域<sup>[1-2]</sup>。在土体由初始状态转化为冻土的过程中,冻结温度场是其形成与发展的决定因素之一,表征了冻土的形成过程与强度特性。因此,研究冻结工程中的冻结温度场变化规律具有较大的现实意义。

针对冻结过程中的冻结温度场,国内外的研究人员已开展了较多研究,主要有通过冻结工程现场测温情况研究冻结温度场的变化规律,以及通过有限元软件进行冻结温度场数值模拟计算等<sup>[3-4]</sup>。然而,由于冻土的组成较为复杂,关于冻土温度场室内试验及其解析解的研究尚不够全面。

基于此,本文以福州地铁某区间联络通道冻结工程为例,开展热物理参数试验及冻结温度场试验研究,获得了土体热物理参数及冻结温度场的变化规律。建立有限元模型,进一步研究在现场实际冻结条件下,滨海地区江底联络通道的冻结温度场变化情况。本文研究可为冻结法施工提供理论依据及工程指导。

### 1 冻结工程概况及土体热物理参数

#### 1.1 工程概况

福州地铁 2 号线某联络通道位于江底,联络通道位置所处的土层以淤泥夹砂及卵石为主,地层复杂,含水量丰富,孔隙水压力大,施工中容易出现突水、涌砂的情况,施工风险较高,因此采用人工冻结法对开挖联络通道周围土体进行加固止水。联络通道位置示意图如图 1 所示。

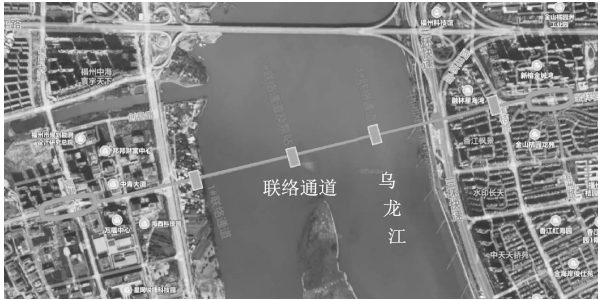


图 1 联络通道位置示意图

Fig.1 Location diagram of link passage

#### 1.2 土体热物理参数

通过试验可以获得各土层的主要热物理参数,

如表 1 所示。

表 1 土层热物理参数						
Tab.1 Thermophysical parameters of soil layer						
土层名称	含水率/%	天然密度/(g/cm <sup>3</sup> )	导热系数/(W/(m·℃))		比热容/(J/(kg·℃))	结冰温度/℃
			未冻土	冻土		
淤泥夹砂	10.94	2.08	1.271	1.502	1 520	-1.0
粗中砂	13.21	1.87	1.415	1.837	1 290	-0.9

### 2 冻结温度场试验

#### 2.1 人工冻土多功能试验系统

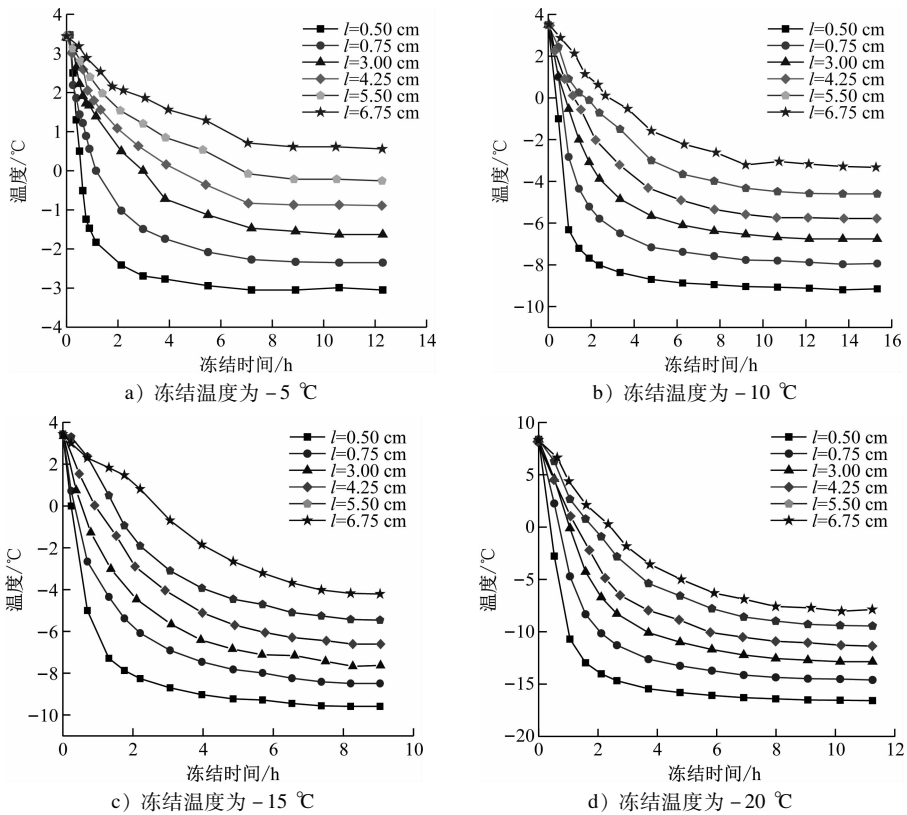
本次试验采用一台集压力、温度、水分控制于一体的 WDC-100 型多功能试验机,通过改变上下端温度、施加载荷的大小、补水条件及环境温度等外部边界条件,研究土体的冻结现象。试验样品室外侧为隔绝层,主要装置有传压板和透水板,侧面布置有导热盘及温度探头等。

土体试样筒采用  $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  圆柱形筒。在土壤样本的顶部和底部各有一套装置,设有制冷剂循环管和温度传感器。制冷剂循环形成冷源,温度传感器用于监测温度。在试样筒的土样位置设置一排均匀分布的测温孔。测温孔与样品底部的距离分别为 0.50 cm、1.75 cm、3.00 cm、4.25 cm、5.50 cm 和 6.75 cm。温度采集探头通过预留测温孔伸入土样,测量土样内部温度并获得其与冷源距离的关系。

#### 2.2 试验结果与分析

研究冻结温度对土体的影响,所采用的试样含水率为 26%,试样上部施加 0.6 MPa 的荷载,令冻结温度分别为 -5℃、-10℃、-15℃和 -20℃,不同冻结温度下,测温孔的温度变化情况如图 2 所示。研究冻融循环对土体的影响,当冻结温度为 -15℃、融化温度为 15℃时,冻融循环下测温孔温度随冻结时间的变化情况如图 3 所示。

整个冷却过程大致可分为 3 个阶段,即积极冻结阶段、衰减冷却阶段和稳定阶段。在冻结初期,土体温度较高而冻结管温度较低,冻结管与土体之间的温度梯度大,土体降温速度快,积极冻结阶段是土体温度迅速下降的阶段。随着土体温度的降低,冻结管与土体之间的温度梯度有所减小,土体降温速率减小,土体中的水分开始冻结并释放潜热,进入衰减冷却阶段。随着冻结时间的延长,土体温度持续下降,冻结管与土体的温差逐渐减小,



注： $l$  为测温孔与样品底部距离。

图 2 不同冻结温度下的测温孔温度变化情况

Fig. 2 Temperature changes of temperature measuring holes under different freezing temperatures

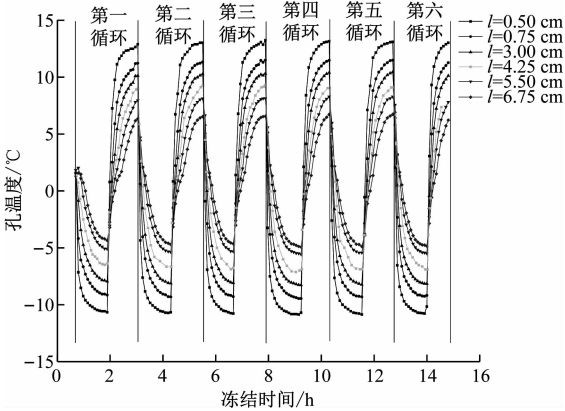


图 3 冻融循环下测温孔温度随冻结时间的变化情况

Fig. 3 Temperature changes of temperature measuring holes over freezing time through freeze-thaw cycles

热交换总体趋于平衡,土体温度缓慢下降,最终趋于稳定。

不同测点的温度变化趋势基本相同,离冷源越近,土体冷却速率越快,稳定温度越低。当冻结温度为  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,最远测点( $l=6.75\text{ cm}$ )的最终稳定温度为  $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而最近测点( $l=0.50\text{ cm}$ )的最终稳定温度为  $-3.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这说明冻结温度越低,土体温度

变化速率越快,最终稳定温度越低。

当冻结温度为  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,最远测点( $l=6.75\text{ cm}$ )的最终稳定温度分别为  $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-3.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-4.00\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-7.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。稳定温度与其相应冻结温度之间的温差分别为  $5.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $7.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $9.00\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $12.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这说明冻结温度越低,温差越大。

在临时冻土区,随着季节和昼夜温度的变化,天然冻土会产生冻融循环。在人工冻结过程中,由于停电、冻结管断裂及盐水泄漏等原因导致冻结过程中断,冻土将解冻;采取措施恢复冻结后,解冻冻土将再次开始冻结,产生冻融过程。冻融试验条件封闭且不排水,在冻融循环条件下,冻结温度场发生周期性变化。

### 3 冻结温度场数值分析

#### 3.1 ANSYS 热分析简述

ANSYS 有限元数值计算是一种应用较为广泛的工程分析方法,通过 ANSYS 软件的数值模拟可以预测工程的进展情况,并可与现场实测数据进行

对比分析,从而不断优化设计,为工程施工的安全提供有效保障。

瞬态传热与稳态传热是 ANSYS 热分析的两类型,稳态传热符合热力学第一定律,瞬态系统是由静态系统加入热量储项而形成的。大部分冻结工程的实际温度场变化情况均属于瞬态传热,故本次数值模拟分析采用瞬态传热分析。

3.2 计算模型

根据地勘报告,设定初始地温为 26 ℃;根据冻土试验,设定土的冻结温度为 -1.0 ℃;设冻结时间为 45 d,本模型不考虑对流传热影响。以联络通道中部处截面为计算模型,模型尺寸与实际尺寸相同,模型外边界取 4 倍冻结壁厚度,计算采用 plane55 单元。有限元计算模型截图如图 4 所示。边界条件为模型左侧外边界施加对称边界条件,其他 3 个边界施加固定初始地温值,取为 26 ℃。

3.3 冻土温度场计算分析

通过计算可以获得不同冻结时间下的冻土温

度场分布情况,如图 5 所示。根据土体起始结冰温度绘制不同冻结时间下的冻土交圈图,如图 6 所示。为判断冻结区不利位置温度场分布情况,建立路径 A—B,其中:A 点为路径起点;B 点为路径终点。A 点和 B 点位置示意图如图 7 所示。不同冻结时间下,路径 A—B 上各点的温度分布情况如图 8 所示。

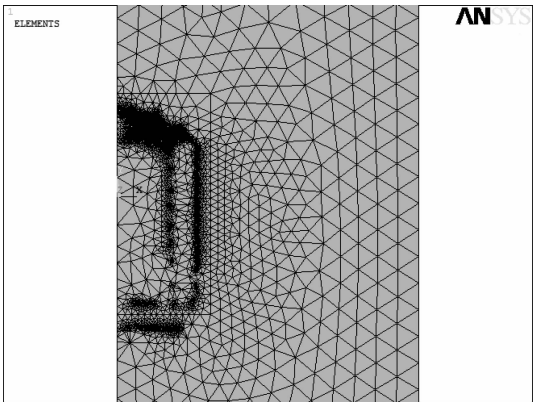


图 4 有限元计算模型截图  
Fig. 4 Screenshot of finite element calculation model

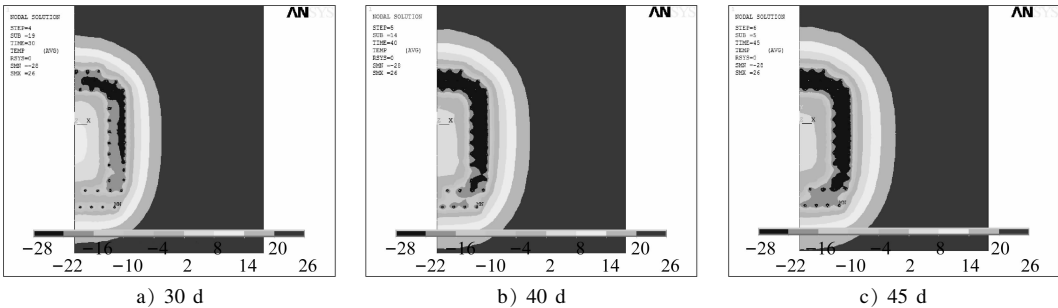


图 5 不同冻结时间下的冻土温度场分布情况软件截图

Fig. 5 Software screenshot of frozen soil temperature field distribution under different freezing time conditions

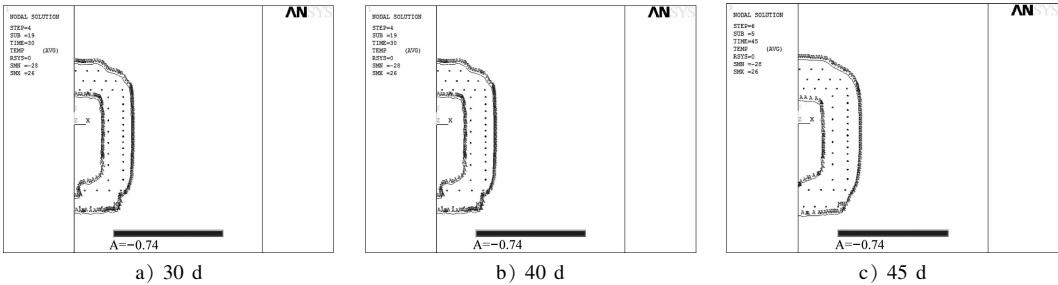


图 6 不同冻结时间下的冻土交圈情况软件截图

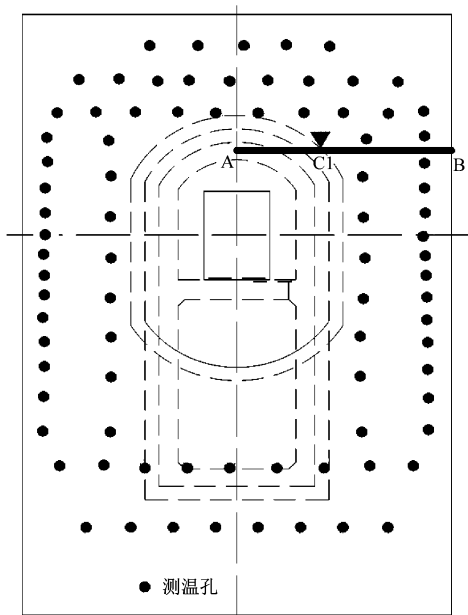
Fig. 6 Software screenshot of frozen soil closing situation under different freezing time conditions

平均温度是影响冻土强度的主要因素。当冻结时间为 30 d、40 d、45 d 时,有效厚度范围内的冻土平均温度如表 2 所示。

3.4 计算数据与实测数据对比分析

C1 测温点位于联络通道开挖面拱肩(见图 7),

该处温度值可以直接反映出联络通道临挖面土体的温度,具有重要的现实意义。因此,选择该处测点温度值与有限元温度计算值进行对比分析,结果如图 9 所示。由图 9 可知:计算结果与实测数据基本吻合,二者误差在工程允许范围之内;积极冻结



注：C1 为测温点。

图 7 路径 A—B 位置示意图

Fig. 7 Diagram of path A-B position

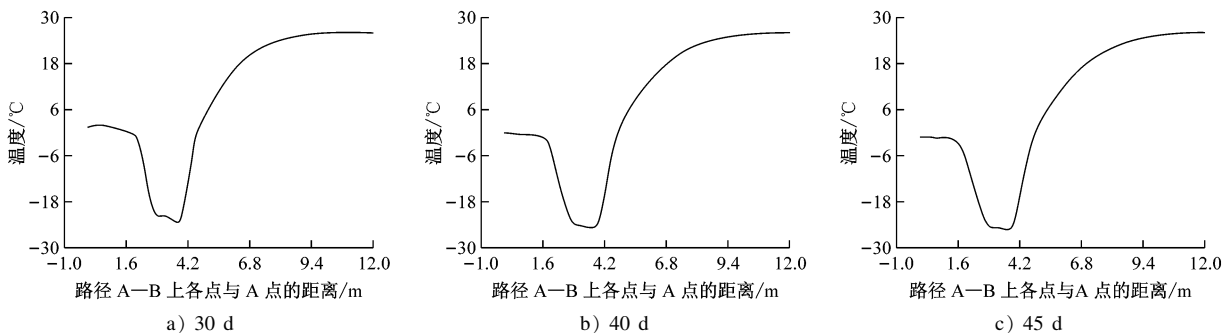


图 8 不同冻结时间下路径 A—B 上各点的温度分布情况软件截图

Fig. 8 Software screenshot of temperature distribution at various points along path A-B under different freezing time conditions

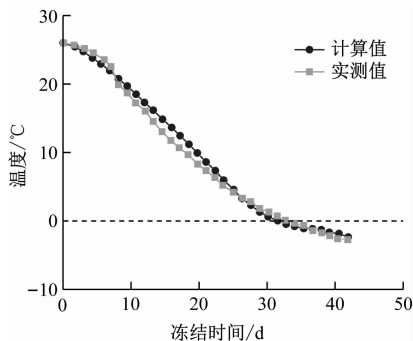


图 9 C1 测温孔处土体温度计算值与实测值对比

Fig. 9 Comparison of calculated and measured soil temperatures at C1 temperature measuring hole

要获得以下结论：

1) 整个冷却过程大致可分为 3 个阶段：积极冻结阶段、衰减冷却阶段和稳定阶段。在冻融循环

表 2 不同冻结时间下有效厚度范围内的冻土平均温度  
Tab. 2 Frozen soil average temperature in effective thickness range under different freezing time conditions

冻结时间/d	冻土平均温度/℃
30	-10.71
40	-13.77
45	-14.80

后期及维护冻结期,两者的数据几乎完全重合。由此可知,数值模拟计算可以准确反映出冻结稳定阶段土体的温度场,计算所用参数是可靠的。

## 4 结语

温度场是冻结帷幕形成和发展的最直接诱因,是冻结法研究的关键。通过土体热物理试验和冻土温度场试验,获得了土体的热物理参数和冻土温度场发展规律。建立了冻结温度场有限元计算模型,计算模拟了现场工况下土体的温度场变化。主

中,冻结温度场呈周期性变化。

2) 在积极冻结阶段,地层温度迅速下降。随着土体温度的降低,冻结管与土体之间的温度梯度有所减小,土体降温速率减小,土体中的水分开始冻结并释放潜热,进入衰减冷却阶段。随后,冻结管与土体的温差逐渐减小,热交换总体趋于平衡,土体温度缓慢下降,最终趋于稳定。

3) 冻结温度越低,土体温度变化速率越快,最终的稳定温度越低。当冻结温度为  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,最远测点 ( $l=6.75\text{ cm}$ ) 的最终稳定温度分别为  $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-3.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-4.00\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。稳定温度与其相应冻结温度之间的温差分别为  $5.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $7.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $9.00\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $12.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冻结温度越低,温差越大。

(下转第 159 页)

温技术,有望实现对长大距离、敷设环境多变、故障类型复杂的电力贯通线电缆进行实时状态监测和故障判断。

## 参考文献

- [1] 梁永春. 高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3760.  
LIANG Yongchun. Technological development in evaluating the temperature and ampacity of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3760.
- [2] 张苏. 高速铁路电力电缆局部放电在线监测与模式识别[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 104.  
ZHANG Su. Power cable partial discharge monitoring and pattern recognition for high-speed railway[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 104.
- [3] 徐志强, 李冰, 张海波, 等. 贯通线故障定位的区间算法研究[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(7): 64.  
XU Zhiqiang, LI Bing, ZHANG Haibo, et al. Study on the interval algorithm for locating fault of railway continuous power transmission Line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(7): 64.
- [4] 潘文霞, 谢晨, 赵坤, 等. 计及护层环流的电缆温升分析与故障定位方法研究[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(1): 38.  
PAN Wenxia, XIE Chen, ZHAO Kun, et al. Cable temperature rise analysis and fault location considering sheath circulation[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(1): 38.

- [5] 郭文强, 张梦梦, 李清华, 等. 基于有限的电力电缆芯温度预测方法研究[J]. 电子器件, 2020, 43(1): 46.  
GUO Wenqiang, ZHANG Mengmeng, LI Qinghua, et al. Research on temperature prediction method of power cable core based on FEM[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2020, 43(1): 46.
- [6] 牛海清, 郑文坚, 雷超平, 等. 基于有限元和粒子群算法的电缆周围土壤热特性参数估算方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1557.  
NIU Haiqing, ZHENG Wenjian, LEI Chaoping, et al. Estimation method for thermal parameters of soil around the cable based on finite element and particle swarm optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1557.
- [7] 孙汝杨. 高速铁路全电缆电力贯通线相关研究[J]. 电气铁道, 2021, 32(1): 29.  
SUN Ruyang. Research on all-cable railway power transmission line of high-speed railway[J]. Electric Railway, 2021, 32(1): 29.
- [8] 刘家军, 刘创, 韩斌, 等. 一种铁路电气化区段电力电缆头的监测保护装置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 141.  
LIU Jiajun, LIU Chuang, HAN Bin, et al. A monitoring and protection device of power cable joints for the railway electrified section[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 141.

(收稿日期: 2022-12-14)

(上接第 154 页)

4) 利用有限元分析软件 ANSYS 对冻结过程中温度场的变化、冻结帷幕的形成过程进行分析, 计算出冻土交圈所需时间及有效厚度范围内的冻土平均温度。该冻结工程的冻土交圈时间为 30 d, 积极冻结时间为 45 d, 冻土平均温度达到了  $-14.80^{\circ}\text{C}$ 。计算结果与实测数据基本吻合, 误差在工程允许范围之内, 说明运用数值模拟计算冻结施工温度场是可行的, 计算所用参数是可靠的。

## 参考文献

- [1] 刘巍, 张进鹏, 刘立民, 等. 袁大滩煤矿风化岩土体冻结热参数及单轴压缩试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 31.  
LIU Wei, ZHANG Jinpeng, LIU Limin, et al. Experimental study on freezing thermal parameters and uniaxial compression of weathered rock and soil in Yuandatan coal mine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(5): 31.

- [2] 陈军浩, 刘桐宇, 李栋伟. 人工三圈管冻结模型试验及冻结方案研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 94.  
CHEN Junhao, LIU Tongyu, LI Dongwei. Study on artificial three-tube freezing model test and freeze program[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 94.
- [3] 张玉伟, 谢永利, 李又云, 等. 基于温度场时空分布特征的寒区隧道冻胀模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1625.  
ZHANG Yuwei, XIE Yongli, LI Youyun, et al. A frost heave model based on space-time distribution of temperature field in cold region tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1625.
- [4] 龙小勇, 岑国平, 蔡良才, 等. 道面结构不均匀冻胀水热耦合模型试验及现场验证[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 172.  
LONG Xiaoyong, CEN Guoping, CAI Liangcai, et al. Hydro-thermal coupling model test and field validation of uneven frost heave of pavement structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(3): 172.

(收稿日期: 2021-07-10)