

DOI: 10.11779/CJGE2024S20007

# 环境温度对地下管廊温度场与力学特性的影响

崔飞龙<sup>1</sup>, 杨俊超<sup>\*2</sup>, 王进尚<sup>1</sup>, 张亚涛<sup>3</sup>, 李丽华<sup>4</sup>

(1. 郑州工程技术学院, 河南 郑州 450044; 2. 广州市第一市政工程有限公司, 广东 广州 510060; 3. 中建铁投开发建设有限公司, 山东 济南 250100;  
4. 湖北工业大学, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 季冻区季节性温度变化对地下管廊的工程应用性能产生显著影响, 为了研究季冻区环境温度对地下管廊温度场和力学特性的影响, 采用 ABAQUS 有限元数值模拟技术分别研究了季节性环境温度作用下地下管廊温度场和土压力的变化规律。数值分析结果表明: 管廊竖向截面最大冻深明显滞后于最低环境温度出现时刻; 在升温与降温过程中, 管廊上部及附近区域温度场先后出现“冷核区”和“热核区”等特殊现象, 随着升温与降温的持续作用而逐渐消失; 在降温与升温过程中, 管廊顶板土压力先后出现增加与减小趋势; 当季节性温度变化作用结束后, 管廊顶板土压力显著大于初始状态。

**关键词:** 环境温度; 温度场; 力学特性; 管廊; 数值模拟

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S2-0087-05

作者简介: 崔飞龙(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事加筋土、软土地基处理等方面研究。E-mail: ccuiffellong@163.com。

## Influences of ambient temperature on temperature field and mechanical behaviors of underground pipe galleries

CUI Feilong<sup>1</sup>, YANG Junchao<sup>2</sup>, WANG Jinshang<sup>1</sup>, ZHANG Yatao<sup>3</sup>, LI Lihua<sup>4</sup>

(1. Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450044, China; 2. Guangzhou First Municipal Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510060, China; 3. China Construction Railway Investment Development and Construction Co., Ltd., Jinan 250100, China; 4. Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Seasonal temperature changes in the seasonal frozen areas have a significant impact on the engineering application performance of the underground pipe galleries. To study the effects of ambient temperature in the seasonal frozen areas on the temperature field and mechanical behaviors of the underground pipe galleries, the change laws of temperature field and earth pressure of the underground pipeline galleries under seasonal ambient temperature are studied by conducting the ABAQUS finite element numerical simulation. The numerical analysis results indicate that the occurrence moment of the maximum freezing depth of the vertical section inside the pipe gallery is lagged behind that of the lowest ambient temperature. During the process of heating and cooling, the temperature fields inside the upper and nearby areas of the pipe gallery successively exhibit the special phenomena such as “cold core zone” and “hot core zone”. These phenomena gradually disappear with the continuous effects of heating and cooling. During the cooling and heating processes, the earth pressure on the roof of the pipe gallery shows an increasing and decreasing tendency. After the influences of seasonal temperature, the earth pressure on the roof is significantly greater than that at the initial state.

**Key words:** ambient temperature; temperature field; mechanical behavior; pipe gallery; numerical simulation

## 0 引言

季冻区广泛分布于我国北方地区, 气温变化具有显著季节性特征, 环境温度的显著变化对地下管廊温度场与力学特性将产生明显影响。例如, 在冬季低温作用下, 含水量较高的土体发生冻胀, 较强的冻胀力迫使管廊结构发生变形, 严重时可导致管廊壁破裂甚至破坏<sup>[1]</sup>, 目前, 国内外已有许多学者对此进行了研究, 并取得重要成果。Tan 等<sup>[2]</sup>采用数值模拟方法研

究了寒区隧道围岩的温度分布特性, 结果表明, 隧道内空气温度及其流动速度对隧道围岩的温度分布特性均有显著影响。Lai 等<sup>[3]</sup>通过开展有限元分析发现冬季低温作用引起的土体冻胀力对寒区隧道应力特性影响

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(23B560017); 广州市建筑集团有限公司科技计划项目(2022-KJ019, 2022-KJ026, 2022-KJ027)

收稿日期: 2024-06-21

\*通信作者(E-mail: yjcresearch@163.com)

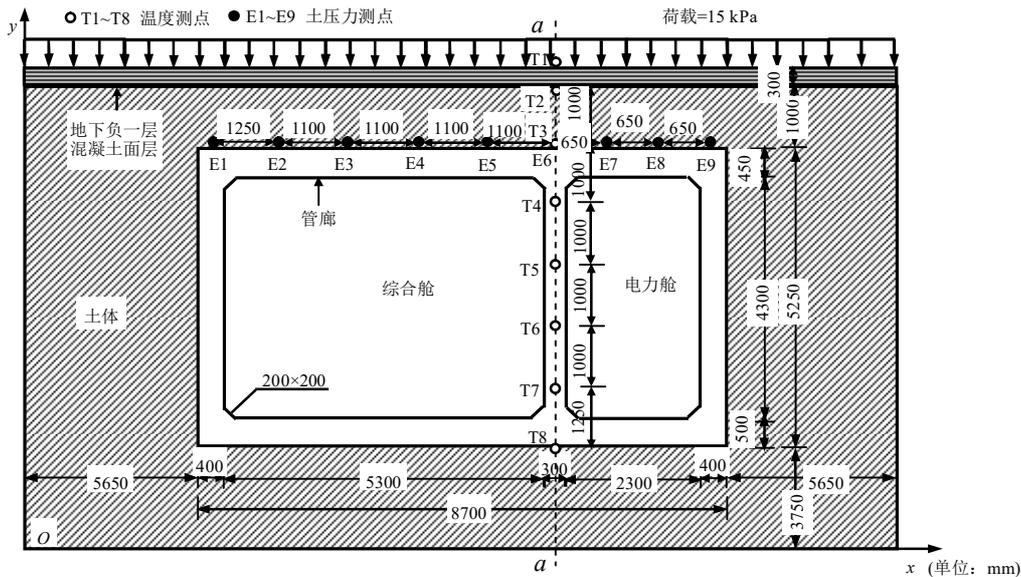


图1 地下管廊示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underground pipe gallery

十分显著，因此在工程设计中应予以考虑。Liu 等<sup>[4]</sup>基于模型试验发现隧道内的通风条件是影响寒区隧道热、力学特性的重要因素。尽管有关学者已做了大量研究，但针对我国华北地区，环境温度变化对城市地下水厂管廊的温度场与力学特性影响的研究相对缺乏。

Xiao 等<sup>[5]</sup>和 Yarivand 等<sup>[6]</sup>研究了环境温度作用下挡土墙温度场与力学特性演变规律，这些学者的研究成果均表明，ABAQUS 有限元的温度-位移 (Coupled Temperature-Displacement) 分析模块可以有效模拟环境温度变化对挡土墙温度场与力学特性的影响。本文采用 ABAQUS 有限元数值模拟方法<sup>[5-6]</sup>，研究季节性环境温度变化条件下华北地区某城市地下管廊温度场与管廊顶板背部土压力的变化特性。

## 1 数值模型

### 1.1 工程概况

管廊工程是华北地区北部某城市地下水厂的配套管廊，管廊结构位于地下负二层，由混凝土浇筑而成，管廊顶部是地下负一层空间结构，底部铺设混凝土路面，用于承受车辆荷载。考虑到 ABAQUS 软件的收敛性，将车辆荷载等效为 15 kPa 的均布静荷载<sup>[7]</sup>，荷载分布、管廊结构、截面 a-a 以及温度 (T1~T8) 和土压力 (E1~E9) 监测点所在位置如图 1 所示。

依据当地气象资料，年平均气温约为 10℃，冬季最低气温可降至 -15℃ 左右，夏季高温时期可达 35℃ 甚至更高。考虑到气温变化的周期性，以及本项目开始应用时的气温 (即初始温度  $T_0$ ) 约为 15℃，基于此，

可用式 (1) 描述当地 2019 年 9 月至 2021 年 9 月的气温变化，用于研究当地年气温变化对地下管廊热、力学特性的影响，式 (1) 相应的环境温度随时间变化曲线如图 2 所示。

$$T_{\text{air}}(t) = T_{\text{ave},0} - T_{\text{amp},0} \sin(2\pi t/365 - \phi_0) \\ = 10 - 25 \sin(2\pi t/365 - \pi/15) \quad (1)$$

式中： $T_{\text{air}}$  为大气温度，即环境温度 (°C)； $T_{\text{ave},0}$  为平均温度，即 10℃； $T_{\text{amp},0}$  为环境温度波动幅度，即 25℃； $\phi_0$  为环境温度变化的初始相位 (rad)，即  $\pi/15$ 。

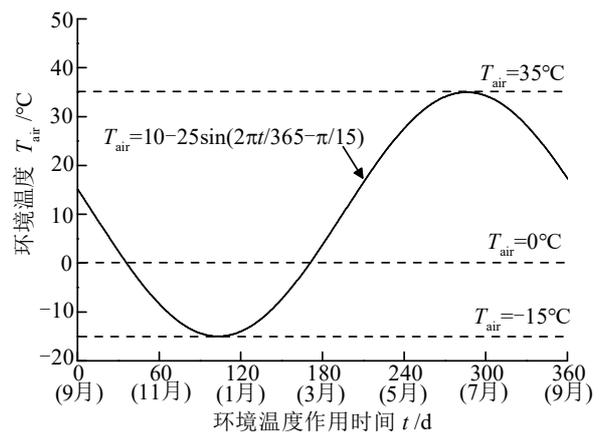


图2 环境温度变化图

Fig. 2 Variation of ambient temperature with elapsed time

### 1.2 有限元模型

根据图 1 中的管廊结构尺寸进行有限元数值建模，采用摩尔-库伦 (Mohr-Coulomb) 弹塑性模型描述土体的本构关系，顶部混凝土面层和管廊的本构模型均设置为线弹性 (Linear Elastic) 模型。忽略外界

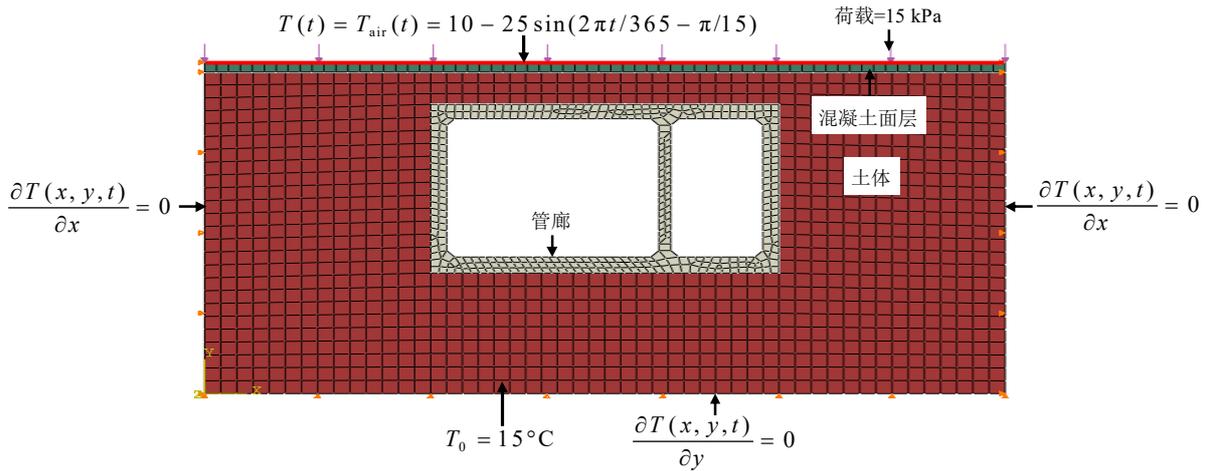


图 3 管廊结构数值模型图

Fig. 3 Numerical model for pipe gallery structure

环境温度变化对混凝土面层和管廊的热、力学性质的影响<sup>[8]</sup>, 混凝土面层和管廊二者均由混凝土浇筑而成, 其热、力学参数保持相同, 如表 1 所示。

表 1 混凝土面层与管廊的力学与热物理参数

Table 1 Mechanical properties and thermal physical parameters of concrete surface and pipe gallery

参数	值
密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	2.4
弹性模量 $E/MPa$	20000
泊松比 $\nu$	0.25
热传导系数 $\lambda/(W/(m \cdot ^\circ C))$	1.5
比热容 $C/(J/(kg \cdot ^\circ C))$	970

为了模拟土体在  $0^\circ C$  以下的冻胀现象, 对不同负温状态下的土体设置相应的热膨胀系数, 而  $0^\circ C$  以上的土体热膨胀系数设为 0, 即忽略土颗粒的热胀冷缩效应<sup>[9]</sup>。虽然土体的弹性模量  $E$ 、泊松比  $\nu$ 、热传导系数  $\lambda$  和比热容  $C$  等相关热、力学参数与温度变化相关, 但主要取决于土体是否为冻结状态, 此外, 数值分析过程中忽略温度变化对土体黏聚力、摩擦角和密度的影响<sup>[10]</sup>。不同温度状态下土体的热膨胀系数及热、力学物理参数分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 土体热膨胀系数

Table 2 Thermal expansion coefficients of soil

$T/^\circ C$	-20	-10	-3	0	>0
$\alpha/(^\circ C^{-1})$	$-6 \times 10^{-4}$	$-7.2 \times 10^{-4}$	$-9.6 \times 10^{-4}$	$-1.2 \times 10^{-3}$	0

注: 负号表示土体在低温作用下体积膨胀, 0 表示土体在正温作用下体积保持不变。

在模型建立过程中, 混凝土面层-土体和管廊-土体之间设置热、力学性质相同的接触面, 其摩擦系数和热传导系数分别为 0.4 和  $1.5 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。依据表 1~3 提供的热、力学参数对数值模型各部件赋予相应的参数, 随后对混凝土面层顶部施加温度边界条件和 15

kPa 的均布荷载, 并对地基土左、右两边侧施加水平约束, 以及在底部施加竖向约束。边界条件、初始温度  $T_0$  以及划分网格后的数值模型如图 3 所示。

表 3 土体力学与热物理参数

Table 3 Mechanical and thermal physical parameters of soil

主要参数	值	
	冻土	融土
黏聚力 $c/kPa$	12	12
内摩擦角 $\varphi(^\circ)$	22	22
密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.89	1.89
弹性模量 $E/MPa$	75	35
泊松比 $\nu$	0.25	0.3
热传导系数 $\lambda/(W/(m \cdot ^\circ C))$	1.82	1.63
比热容 $C/(J/(kg \cdot ^\circ C))$	2720	3140

## 2 温度场与土压力变化特性分析

### 2.1 截面 a-a 的温度场变化特性分析

为了研究环境温度作用下管廊结构的内部温度变化特征, 以截面 a-a 上测点 T1~T8 (图 1) 的温度变化为例, 距表面竖向距离  $D$  分别为 0, 0.3, 1.3, 2.3, 3.3, 4.3, 5.3, 6.55 m。图 4 给出了截面 a-a 的温度场变化过程, 根据图中的等温线分布特征可知, 当  $0 < D < 3.9 m$  时, 此区域内的等温线分布比较密集, 温度在  $-15 \sim 35^\circ C$  范围内变化, 且周期性变化十分显著, 说明外界环境温度对此区域内的温度变化影响显著, 因此, 可将该区域称为温度变化显著区。当  $3.9 m < D < 5.0 m$  时, 等温线分布比较稀疏, 仅有  $10^\circ C$  和  $15^\circ C$  两条等温线, 温度变化主要在  $5 \sim 20^\circ C$  范围内, 波动幅度相对于温度变化显著区明显减小, 这一区域可称为温度变化过渡区。当  $D > 5.0 m$  时, 图中显示该区域仅有  $15^\circ C$  一条等温线, 温度波动幅度较小, 主要集中在  $10 \sim 15^\circ C$  范围内变化, 故而这一区域可称为温度变化稳定区。

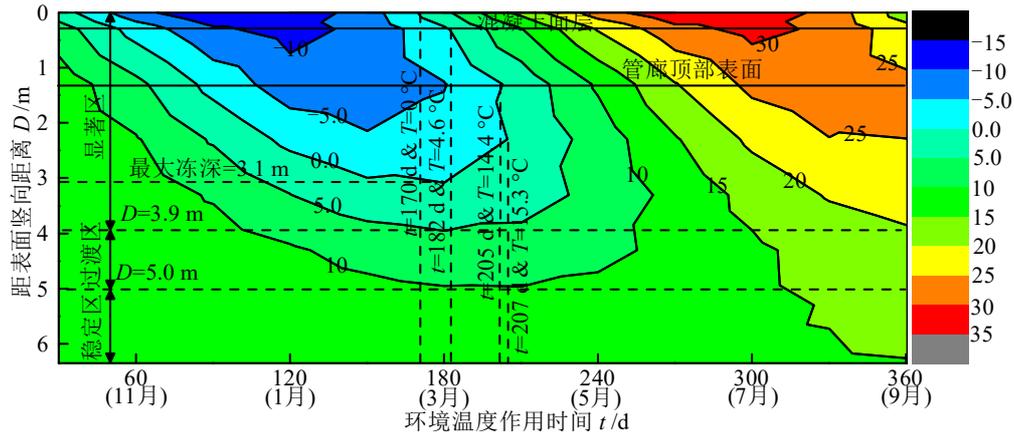


图4 截面 a-a 的温度场变化

Fig. 4 Variation of temperature field of section a-a with elapsed time

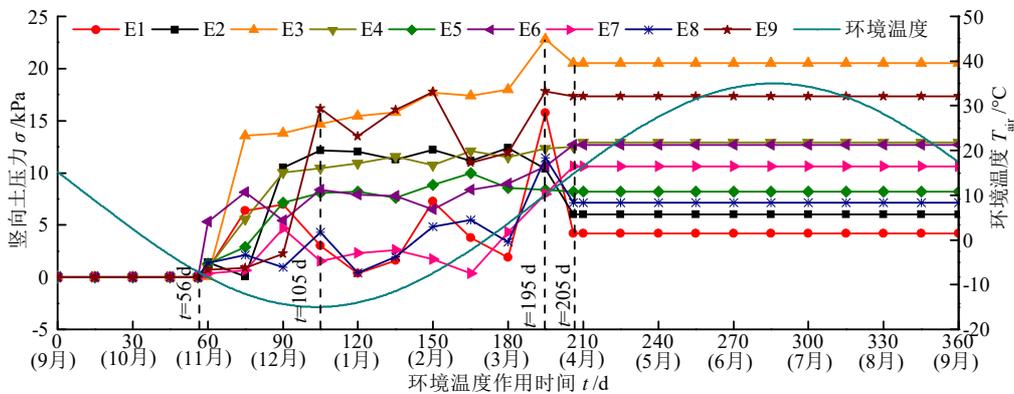


图5 环境温度对土压力的影响

Fig. 5 Effects of ambient temperature on earth pressure at top of pipe gallery

图4中显示截面a-a的最大冻深( $T=0^{\circ}\text{C}$ )为3.1 m,对应的时刻为 $t=180\text{ d}$ ,而此时环境温度已升至 $3.8^{\circ}\text{C}$ ,显著滞后于最低环境温度 $-15^{\circ}\text{C}$ 的出现时刻 $t=103\text{ d}$ 。另外,当 $t=170\text{ d}$ ,虽然顶部表面温度已升至 $0^{\circ}\text{C}$ ,但此时顶部表面下部 $0\sim 3.0\text{ m}$ 范围内的区域温度依然处在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下状态,形成 $0^{\circ}\text{C}$ 以上高温区包围 $0^{\circ}\text{C}$ 以下低温区的特殊现象,这一现象可称为“冷核”区,直至 $t=207\text{ d}$ 时才消失,而此时顶部表面温度已升至 $15.3^{\circ}\text{C}$ 。

实际上,“冷核”区形成的初期,即 $t=170\sim 182\text{ d}$ ,”冷核”区分布在混凝土面层、土体和管廊结构内部,在此过程中,“冷核”区的上、下限两端 $0^{\circ}\text{C}$ 线均呈向下方向发展,但总体上厚度在逐渐变薄。随着表面温度升高至 $4.6^{\circ}\text{C}$ 时(即 $t=182\text{ d}$ ),“冷核”区已从混凝土面层中退化,仅分布在土体和管廊结构中,此时“冷核”区的上、下端 $0^{\circ}\text{C}$ 线分别呈向下和向上方向发展,其厚度明显变薄。而当表面温度升高至 $14.4^{\circ}\text{C}$ 时(即 $t=205\text{ d}$ ),“冷核”区从土体中消失,仅存在于管廊结构内部,此时“冷核”区的上端 $0^{\circ}\text{C}$ 线迅速向下发展,与向上发展的下端 $0^{\circ}\text{C}$ 线在 $t=207\text{ d}$ 时交汇,“冷核”区至此完全消失,此时环境温度已回升至

$15.3^{\circ}\text{C}$ 。与之类似,由图4可知,当环境温度由高温逐渐降至低温过程中,混凝土面层下部将会产生“热核”区现象,并随着低温持续作用而消失。

## 2.2 土压力变化特性分析

为了研究季节性环境温度变化对管廊顶板表面竖向土压力 $\sigma$ 的影响,图5给出了环境温度作用下管廊顶板表面不同测点(E1~E9)处 $\sigma$ 的变化趋势。图5显示 $\sigma$ 可分为五个变化阶段。在第一阶段内, $t=0\sim 56\text{ d}$ 期间,在此期间 $\sigma$ 保持初始状态不变,主要是由于混凝土面层下部土体温度还未降至 $0^{\circ}\text{C}$ 以下(如图4所示),土体未发生冻胀。随后进入第二阶段,即 $t=56\sim 105\text{ d}$ ,环境温度 $T_{\text{air}}$ 继续降低至 $-15^{\circ}\text{C}$ ,总体上测点E1~E9处的 $\sigma$ 呈迅速增大趋势,最大土压力 $\sigma_{\text{max}}$ 达到 $16.1\text{ kPa}$ 。结合图4温度场分析可知,在此期间混凝土面层下部冻土区域面积迅速增大且温度降低,故而导致管廊顶部背部冻胀土压力增加。

当 $T_{\text{air}}$ 由 $-15^{\circ}\text{C}$ 逐渐回升至 $10^{\circ}\text{C}$ ,即在第三阶段的 $t=105\sim 195\text{ d}$ 期间,虽然各测点的 $\sigma$ 出现小幅度波动变化,但总体上呈缓慢增加趋势,且管廊顶部表面最大竖向土压力在 $t=195\text{ d}$ 时达到峰值 $22.8\text{ kPa}$ ,主要是由于在此阶段混凝土面层下部冻土区域温度进

一步有所降低, 引起冻胀土压力缓慢增加。

随着  $T_{\text{air}}$  继续回升, 在第四阶段  $t = 195 \sim 205$  d 期间, 多数测点的  $\sigma$  呈小幅度减小变化趋势, 其中  $\sigma_{\text{max}}$  减小至 20.5 kPa, 分析其原因主要是随着  $T_{\text{air}}$  的升高, 冻土区域面积逐渐减小直至消失, 随之引起冻胀土压力逐渐减小并直至消失。在随后  $t > 205$  d 期间, 即  $\sigma$  的第五变化阶段, 图 5 中显示各测点的  $\sigma$  均呈水平直线型变化, 即  $\sigma$  不再受  $T_{\text{air}}$  变化的影响, 但相对于初始状态的  $\sigma$ , 各测点的最终  $\sigma$  均显著增加, 主要是由于混凝土面层下部土体在经历过季节性温度作用后均保留了一定的残余应力而使其无法恢复初始状态。

### 3 结 论

本文采用 ABAQUS 有限元分析了季冻区季节性温度作用下地下管廊温度场和力学特性的变化规律, 并分析了温度场与力学特性之间的变化关系, 根据数值计算结果及相关分析得出以下结论:

(1) 环境温度对地下管廊温度场的影响主要集中在距顶部表面 3.9 m 范围内, 随着管廊截面深度的增加, 环境温度对管廊结构温度场的影响逐渐减弱。管廊竖向截面最大冻深明显滞后于最低环境温度出现时刻, 直至环境温度升高至 15.3°C 时刻, 截面冻深曲线才完全消失。

(2) 当环境温度由低温逐渐升至高温状态过程中, 地下管廊结构的混凝土面层下部区域会形成“冷核”区, 随着高温的持续作用, “冷核”区逐渐变薄直至消失, 而当环境温度由高温逐渐降至低温状态过程中, 混凝土面层下部区域则会形成“热核”区, 并随着低温持续作用而消失。

(3) 当环境温度逐渐降至 -15°C 过程中, 在初始 56 d 期间管廊顶部背部土压力保持不变, 随后总体上迅速增加, 随着环境温度逐渐回升至 10°C 时, 土压力呈缓慢增加趋势, 并达到极大值 22.8 kPa, 随后有所减小并保持稳定, 但最终土压力明显大于初始状态。

#### 参考文献:

- [1] LAI J X, QIU J L, FAN H B, et al. Freeze-proof method and test verification of a cold region tunnel employing electric heat tracing[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, **60**: 56-65.
- [2] TAN X J, CHEN W Z, YANG D S, et al. Study on the

influence of airflow on the temperature of the surrounding rock in a cold region tunnel and its application to insulation layer design[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, **67**(1/2): 320-334.

- [3] LAI Y M, WU Z W, ZHU Y L, et al. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature, seepage and stress fields in cold-region tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998, **13**(4): 435-440.
- [4] LIU L L, LI Z, LIU X Y, et al. Frost front research of a cold-region tunnel considering ventilation based on a physical model test[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, **77**: 261-279.
- [5] XIAO C Z, CUI F L, DING L Q, et al. Temperature distributions in geogrid-reinforced soil retaining walls subjected to seasonal freeze-thaw cycles[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, **22**(12): 04022234.
- [6] YARIVAND A, BEHNIA C, BAKHTIYARI S, et al. Performance of geosynthetic reinforced soil bridge abutments with modular block facing under fire scenarios[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, **85**: 28-40.
- [7] 高 煜, 刘 勇, 石苏意, 等. 泡沫轻质土路堤稳定性分析及材料参数控制标准[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2017, **14**(1): 24-30, 83. (GAO Yu, LIU Yong, SHI Suyi, et al. Foam light weight soil embankment stability analysis and control standard of material parameters[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science)*, 2017, **14**(1): 24-30, 83. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国建设部. 砌体结构设计规范: GB 50003—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for Design of Masonry Structures: GB 50003—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))
- [9] 付晓丹. 季冻区悬臂式支挡路基温度场与应力场数值分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019. (FU Xiaodan. Numerical Analysis of Temperature and Stress Fields in Subgrade with Cantilever Retaining wall in Seasonally Frozen Regions[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [10] LAI Y, WANG Q, NIU F, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, **38**(2/3): 165-184.

(编校: 明经平)