

文章编号: 1001-1986(2019)01-0155-07

# 新型管幕冻结法温度场影响参数分析

吴雨薇<sup>1</sup>, 李春芳<sup>1</sup>, 胡俊<sup>1,2</sup>, 王志鑫<sup>2</sup>, 汪树成<sup>2</sup>

(1. 海南大学土木建筑工程学院, 海南 海口 570228;

2. 海南省水文地质工程地质勘察院, 海南 海口 570206)

**摘要:** 新型管幕冻结法中冻结管周围温度场的发展状况是这一工法施工的技术重点, 为研究这一工法中温度场的发展变化规律, 在模型中选取 2 条路径, 并在路径上布设分析点, 通过分析土体导热系数、容积热容量、相变潜热、原始地温这 4 个因素对温度场发展规律的影响, 形成如下结论: 与港珠澳拱北隧道管幕冻结法相比, 新型管幕冻结法支护形式更加灵活多样, 受地形制约更小; 土体导热系数对温度场有显著的影响, 导热系数越大, 温度下降越快, 且幅度越大; 容积热容量对温度场的影响效果较大, 容积热容量越小, 温度下降越快, 且幅度越大; 土体相变潜热对温度场变化几乎没有影响; 原始地温越低, 达到相同温度所需要的冻结时间越短。所得结果可供今后类似工程参考。

**关键词:** 新型管幕冻结法; 温度场; 影响参数; 数值分析

**中图分类号:** U456 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.01.024

## Analysis of influencing parameters of temperature field in a new pipe-roofing freezing method

WU Yuwei<sup>1</sup>, LI Chunfang<sup>1</sup>, HU Jun<sup>1,2</sup>, WANG Zhixin<sup>2</sup>, WANG Shucheng<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. Hainan Investigation Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Haikou 570206, China)

**Abstract:** The development status of the temperature field around the freezing pipe in the method of pipe roofing freezing is the technical focus of this construction method. In order to study the development of the temperature field in this method, two paths are selected in the model, and analysis points are placed on the path. By analyzing the effects of soil thermal conductivity, volumetric heat capacity, latent heat of phase change, and original ground temperature on the development law of the temperature field, the following conclusion was drawn: Compared with the method of freezing the pipe curtain of the Gongbei tunnel in Hong Kong-Zhuhai-Macau, the new method of pipe freezing was adopted. Supporting forms are more flexible and diverse, and are less constrained by the terrain; soil thermal conductivity has a significant effect on the temperature field, the greater the thermal conductivity, the faster the temperature drop, and the greater the magnitude; the volumetric heat capacity has a greater effect on the temperature field, the smaller the volumetric heat capacity, the faster the temperature drop, and the greater the magnitude; the latent heat of soil phase change has almost no effect on the change of temperature field; the lower the original ground temperature, the shorter the freeze time required to reach the same temperature. The results obtained can be used as reference for similar projects in the future.

**Keywords:** new pipe roofing freezing method; temperature field; influence parameters; numerical analysis

新型管幕冻结法是从港珠澳大桥拱北隧道应用的管幕冻结法的基础上发展而来的一种新型支护方

收稿日期: 2018-04-20

基金项目: 海南省自然科学基金项目(518QN307, 518MS122); 中国博士后科学基金项目(2018M630722); 海南省研究生创新科研项目(Hys2018-165)

**Foundation item :** Hainan Natural Science Fund Project(518QN307, 518MS122); China Postdoctoral Science Foundation Project(2018M630722); Hainan Provincial Graduate Innovation Research Project(Hys2018-165)

第一作者简介: 吴雨薇, 1994 年生, 女, 重庆人, 硕士研究生, 从事隧道及地下工程研究. E-mail: mikkyllala@163.com

通信作者: 胡俊, 1983 年生, 男, 四川乐山人, 博士, 副教授, 从事隧道及地下工程方面的教学与研究工作. E-mail: hj7140477@hainu.edu.cn

引用格式: 吴雨薇, 李春芳, 胡俊, 等. 新型管幕冻结法温度场影响参数分析[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(1): 155-161.

WU Yuwei, LI Chunfang, HU Jun, et al. Analysis of influencing parameters of temperature field in a new pipe-roofing freezing method[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(1): 155-161.

法。工法主要由两部分构成：一部分为多根钢管形成的管幕；一部分为钢管之间冻结管形成的多个冻土帷幕，如图 1 所示<sup>[1-5]</sup>。这一工法以顶进的钢管作为支护，确保了支护体系下土体的安全开挖，避免了地面出现不可接受的沉降，充分的结合了管幕法与人工地层冻结技术的优点。与现有的管幕法相比，管幕钢管的数量可以大量减少，减少管幕钢管的支护作用，由冻结管形成的冻土帷幕代替，可节省工期与成本；与单冻土帷幕支护形式相比，该工法解决了采用管幕法中曲

线管幕施工的封水问题，同时大大提高支护结构的刚度，可有效控制地表变形，安全性好。对管幕冻结法中冻土帷幕形成的研究不仅可以为解决高速公路、铁路、市政等复杂条件下交叉暗挖施工提供新的解决思路，同时也可以为富水地层的加固和地基处理提供新的技术途径，具有重要的应用价值。对于管幕法和冻结法的发展，前人做出了不少的研究，日本学者<sup>[6-7]</sup>和国内学者<sup>[8-12]</sup>对管幕法的理论研究做出了巨大的贡献，管幕法在工程实际中也得到了广泛的应用<sup>[13]</sup>。

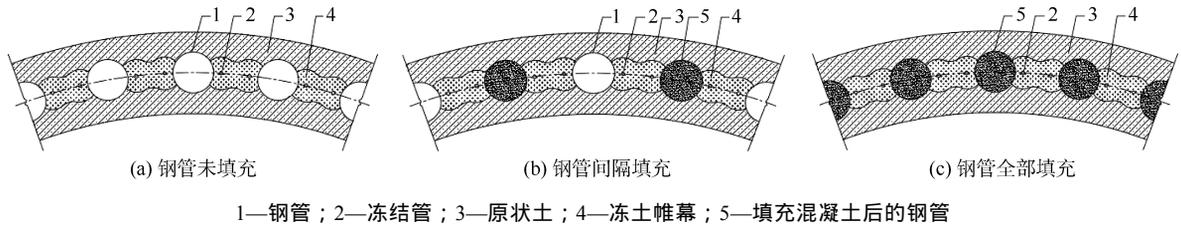


图 1 新型管幕冻结法施工示意图<sup>[4]</sup>  
Fig.1 Schematic diagram of a new pipe roofing freezing method

但是，对于管幕冻结法的研究，国内外的学者研究寥寥，日本的株式会社有过这样类似的构想<sup>[14]</sup>，并通过模型试验得出了相关的成果：在砂性土中该工法的加固效果要优于黏性土。德国柏林地铁站的施工中首次采用了这种工法，与日本不同的是，德国采用的钢管直径较大，分担的荷载较多，冻结管仅起到封水的作用。本文新型管幕冻结法比对管幕法做了进一步的改良，将冻结管设置于钢管之间，能更好的实现冻结封水的效果，同时，按照工程需要对钢管进行填充，可以尽可能减少建筑材料的浪费。

度即为冻结管外壁恒温边界，温度荷载直接施加到冻结管管壁上；各个热物理参数分层稳定，忽略水分迁移影响。温度低于 $-1^{\circ}\text{C}$ 时，土体开始冻结，冻结温度达到 $-10^{\circ}\text{C}$ 时，形成稳定的冻结土。

### 1 建立温度场数值模型

#### 1.2 计算几何模型

#### 1.1 基本假定

ADINA 是基于 Incremental 增量法的动力非线性有限元软件，它同时具有求解线性以及非线性问题的强大功能。其特有的计算方式有效的改善了由于时间步或者荷载过大导致的计算不收敛现象。因此本文选用 ADINA 进行研究分析，在 ADINA 建模中选用其预先定义的模块——热场分析模块(ADINA—Thermal)进行求解。

建立模型的基本假定如下<sup>[15-17]</sup>：计算的工程范围内地层水平分布，材料为单一均质、热各向同性体；土体拥有均匀的初始温度场，设置原始地温为  $18^{\circ}\text{C}$ ；忽略盐水循环的影响，冷媒入口温

模型底面为边长 20 m 的正方形，高 4 m。钢管与冻结管绕底面中心圆环形均匀布置(半径为 9 m)，钢管直径为 1 600 mm，冻结管直径为 127 mm。两相邻钢管中间沿弧线水平布置 2 根冻结管，钢管布置 16 根，冻结管布置 32 根。数值模型如图 2 所示。

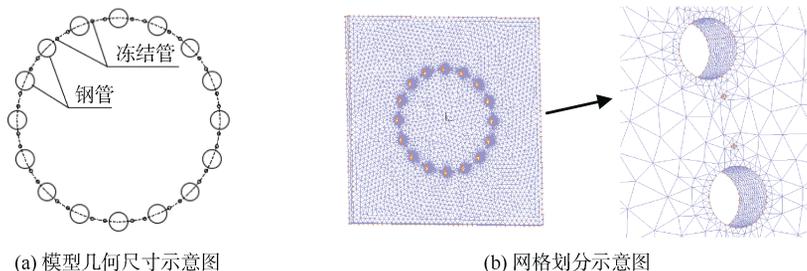


图 2 数值模型几何尺寸及网格划分示意图  
Fig.2 Sketch of geometry and mesh of the numerical model

#### 1.3 参数设置

##### a. 盐水温度设计

根据设计要求，本次数值模拟中选用盐水作为

冷煤介质，盐水降温计划见表 1。计划冻结时间为 40 d，每步时长为 24 h，在冻结期间根据模型变化观测记录冻土帷幕与钢管管幕交圈情况。

表 1 方案 1 冻结管盐水降温计划

时间/h	0.0	120.0	240.0	480.0	720.0	960.0
温度/°C	18.0	-15.0	-28.0	-28.0	-28.0	-28.0

b. 材料参数

模型选取最不利的土层条件进行分析, 其材料参数见表 2, 冻结前地层初始温度设置为 18°C, 并且假设在模型边界面上保持不变, 计算区域的外边界看作是绝热边界。将冻结管表面作为热荷载边界, 将盐水温度作为边界荷载。

表 2 土体材料参数  
Table 2 Parameters of soils material

密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	导热系数/ (kJ·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )		比热/ (kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )		相变潜热/ (10 <sup>8</sup> J·m <sup>-3</sup> )
	未冻土	冻土	未冻土	冻土	
1.880	118	179	1.53	1.61	1.20

2 温度场数值计算结果和分析

为更好地研究温度场发展规律, 在 X=0 的剖面上选定了 2 条路径, 每条路径上选取 10 个分析点, 每个分析点之间间距 1 m 左右, 如图 3 所示。路径 1 经过剖面中心点与钢管圆心, 9 号分析点距离钢管外圈 0.5 m, 10 号分析点距离钢管 1.7 m。路径 2 经过剖面中心与两相邻冻结管中点, 9 号分析点距离最近冻结管外圈 0.3 m, 10 号分析点距离最近冻结管外圈 1.1 m。模型采用三维实体单元, 选取具有代表性的路径进行研究, 由于在深度方向冻结管和钢管的布置均相同, 因此该方向上的温度场发展规律也处处相同。为简化分析模型, 选取三维模型中 X=0 的剖面进行温度场温度发展分布规律研究。

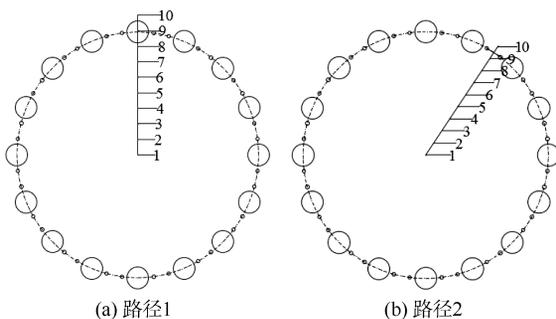


图 3 2 条路径示意图

Fig.3 Schematic of two paths

2.1 路径 1 上温度场发展与分布规律

路径 1 上 10 个分析点温度随时间变化曲线如图 4 所示。由图可知, 1 号—7 号分析点温度基本没有变化。8 号分析点距最近的冻结管外圈 2.17 m,

10 号分析点距最近的冻结管外圈 2.8 m, 两者温度变化幅度均不大; 9 号分析点距钢管外圈 0.5 m, 距最近冻结管外圈 1.5 m, 是 10 个分析点中离冻结管最近的分析点, 温度变化也最为剧烈, 下降最快。

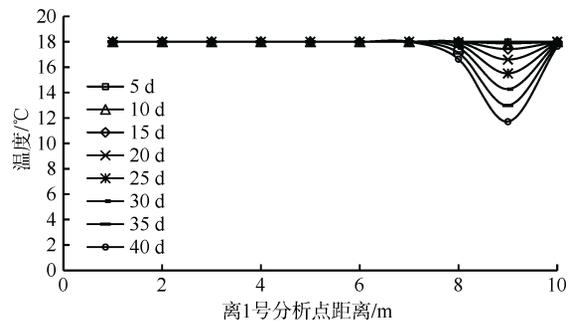


图 4 路径 1 上各点温度随时间变化曲线

Fig. 4 Variation of temperature with time at points No. 1-10 on path 1

如图 5 所示为路径 1 上各点不同时间的温度空间分布曲线。由图可知: 在 0~6 m 的土体温度基本没有变化, 不受冻结管影响; 6~10 m 之间受到冻结管影响, 温度随时间延长而下降, 离冻结管距离越近, 温度下降越快越剧烈。由于路径 1 上分析点离冻结管相距较远, 受到冻结管的影响较小, 故在 40 d 的冻结时间里, 没有分析点的温度下降到 0°C 以下。即, 在这一观察路径上没有分析点达到冻结要求, 因此可以判断, 在这种工况下, 冻结半径小于 1.5 m。

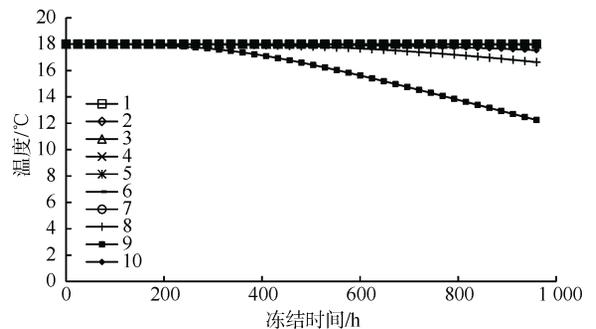


图 5 路径 1 上各点不同时间的温度空间分布曲线

Fig.5 Spatial distribution of temperature in various points on path 1 at different times

2.2 路径 2 上温度场发展与分布规律

路径 2 上 10 个分析点温度随时间变化曲线如图 6 所示。1 号—6 号分析点受到冻结管的影响很小, 温度基本没有变化; 7 号分析点距最近冻结管外圈 2.0 m, 受到冻结管的影响较小, 温度随时间变化幅度较小; 10 号分析点距最近的冻结管外圈 1.1 m, 受到的冻结管影响比 7 号分析点大, 温度随时间变化幅度也比 7 号分析点大; 8 号分析点距最近的冻结管外圈 0.7 m, 距较远的冻结管 1.2 m, 受到两根

冻结管共同影响，温度随时间变化幅度较大。冻结 700 h 左右，8 号分析点温度达到 0℃。冻结 960 h 时，8 号分析点温度接近 -2℃。冻结 700 h 之前，温度下降较快，700 h 后温度下降非常缓慢；9 号分析点处于 2 根冻结管之间，距 2 根冻结管外圈分别为 0.3 m、0.9 m，同时受到 2 根冻结管的影响，是路径 2 上 10 个分析点中受到冻结管影响最大的分析点。冻结 250 h 左右，9 号分析点温度达到 -1℃，即冻结 250 h 时，9 号分析点附近开始形成冻土帷幕；冻结 500 h 左右时，9 号分析点的温度达到 -10℃，即在 500 h 时，9 号分析点附近形成稳定的冻土帷幕。冻结 960 h 时，9 号分析点温度接近 -15℃。冻结 250 h 之前温度下降迅速，250 h 后温度下降幅度较小，最后于 -15℃ 趋于平缓。冻结 700 h 左右时，8 号分析点达到 -1℃，在冻结达到 1 000 h 时，路径 2 上仅有 8 号和 9 号分析点达到冻结要求温度。

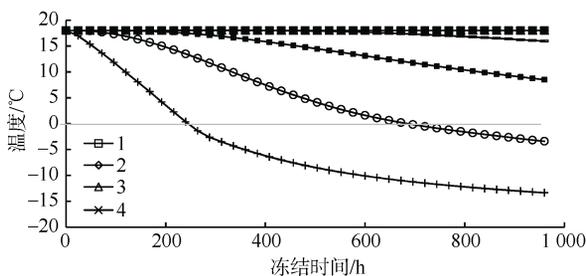


图 6 路径 2 上各分析点温度随时间变化曲线

Fig.6 Variation of temperature with time at analysis points No.1-10 on path 2

如图 7 所示为路径 2 上各点不同时间的温度空间分布曲线。由图可知，在 0~6 m 之间基本不受冻结管影响，土体温度基本没有变化；6~10 m 之间的土体都受到冻结管的影响，温度随时间增加而下降。

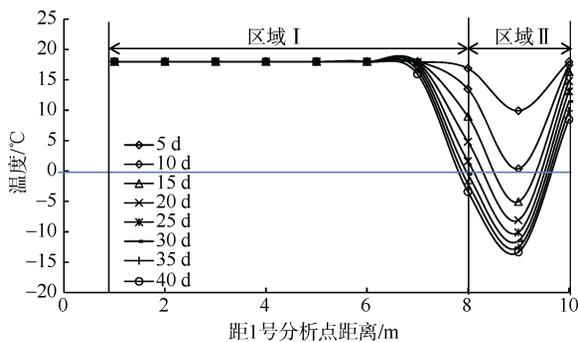


图 7 路径 2 上各点不同时间的温度空间分布曲线

Fig 7 Spatial distribution of temperature distribution at different points on path 2 at different times

越靠近冻结管，温度下降幅度越大。区域 1 内的土体不能实现期望的冻结效果，而区域 2 内的土体有较好的冻结效果。9 号分析点在冻结 10 d 左右时接近 0℃；冻结 40 d 时，8 号分析点、9 号分析点

均在 0℃ 以下。

总的来看，路径 2 上分析点的温度变化情况较路径 1 上分析点的温度变化剧烈，通过对比路径 1 和路径 2 上不同分析点距离冻结管远近的关系可以大致判断出在这样的工况下，冻结半径约为 1 m 左右。因此，冻结管的冻结半径可以保证这一工法在施工过程中形成有效的冻土帷幕。

### 3 温度场敏感性分析

由于影响温度场的因素很多，本文选用土体导热系数、容积热容量、相变潜热、原始地温这 4 个影响因素进行对比分析。研究方法为控制变量法，即在分析一种因素变化对温度场的影响时，保持其余参数不变。路径 1、路径 2 上都选取具有代表性的 9 号分析点，根据 9 号分析点的温度变化情况分析不同因素的影响大小。

#### 3.1 导热系数的影响

以数值模型中土体导热系数为基数，将土体导热系数分别进行减小和增大 20%、40% 的变化，路径 1 上 9 号分析点 5 组数据组成的温度变化曲线如图 8 所示。由图可知，在相同条件下，土体导热系数越大，温度下降越快，且下降幅度越大。土体导热系数越小，温度下降越平缓，且下降幅度越小。

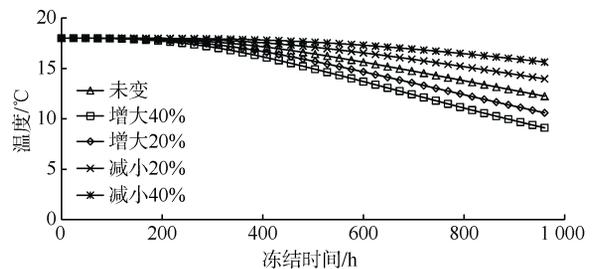


图 8 不同导热系数路径 1 上 9 号点温度随时间变化曲线

Fig.8 Variation of the temperature with time at the analysis point No. 9 on the path 1 under different thermal conductivity

路径 1 上 9 号分析点导热系数不变时，温度降低到 14℃ 需要冻结 800 h，而导热系数扩大 40% 时，冻结时间不到 600 h 温度便能降低到 14℃，冻结时间缩短了约 8 d。通过改变导热系数可以有效的减少工程的施工时间，从而控制施工成本。

路径 2 上 9 号分析点上 5 组数据组成的温度变化曲线如图 9 所示。由图可知，在相同条件下，土体导热系数越大，温度下降越快，且下降幅度越大。路径 2 上 9 号分析点导热系数不变时，温度降低到 0℃ 需要冻结约 250 h，而导热系数扩大 40% 时，冻结时间约 200 h 温度便能降低到 0℃，冻结时间缩短了约 1 d。

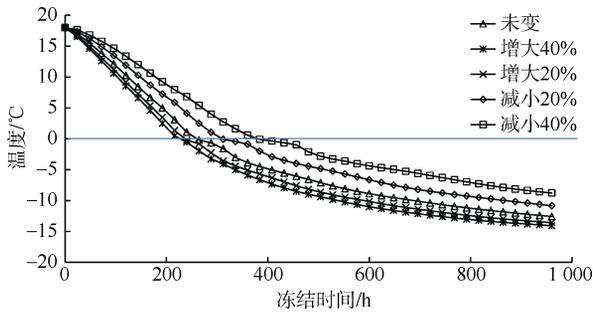


图 9 不同导热系数路径 2 上 9 号点温度随时间变化曲线  
Fig.9 Variation of the temperature with time at the analysis point No. 9 on the path 2 under different thermal conductivity

综上可知,随着土体导热系数的增加,温度下降速度和幅度会随之增加。导热系数越小,温度下降越平缓,且幅度越小。同时,可以看出,导热系数对土体温度变化的影响是非线性的,当冻结温度大于 0℃时,土体导热系数对冻结效果的影响比冻结温度小于 0℃的影响更为显著。

### 3.2 容积热容量的影响

以数值模型中容积热容量为基数,分别进行减小和增大 20%、40%的变化,观察路径 1 上 9 号分析点在改变容积热容量的情况下,不同冻结时间内的温度场变化情况。5 组数据的温度变化曲线如图 10 所示,路径 2 上 9 号分析点 5 组数据的温度变化曲线如图 11 所示。

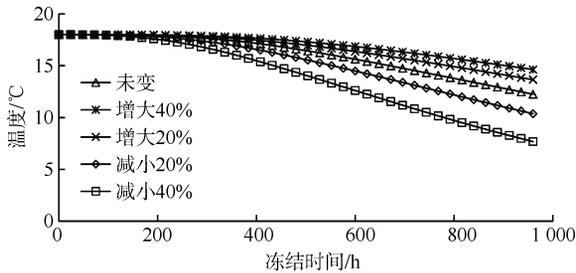


图 10 不同容积热容量路径 1 上 9 号点温度随时间变化曲线

Fig.10 Variation of the temperature with time at the analysis point No. 9 on the path 1 for different volume heat capacity

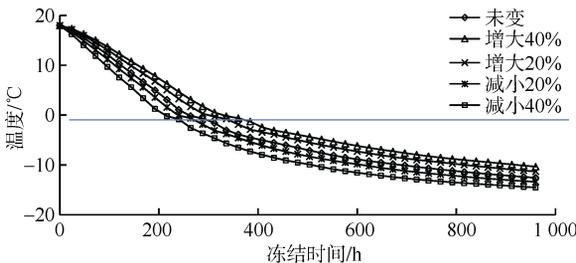


图 11 不同容积热容量路径 2 上 9 号点温度随时间变化曲线

Fig.11 Variation of the temperature with time at the analysis point No. 9 on the path 2 for different volume heat capacity

由图 10 可知,路径 1 中 9 号分析点温度降低到 14℃需要冻结时间约 800 h,容积热容量减小 40%后,9 号分析点温度降低到 14℃需要冻结约 500 h,冻结时间缩短了约 12 d。

路径 2 中 9 号分析点温度降低到 0℃需要冻结时间约 250 h,容积热容量减小 40%后,9 号分析点温度降低到 0℃需要冻结时间约 210 h,冻结时间缩短了约 1.6 d。可见,土体容积热容量越小,温度下降越快,且幅度越大;土体容积热容量越大,温度下降越平缓,且幅度越小。

### 3.3 相变潜热的影响

以数值模拟中相变潜热为基数,分别进行减小和增大 20%、40%的变化,路径 1 上 9 号分析点 5 组数据的温度变化曲线如图 12 所示,路径 2 上 9 号分析点 5 组数据的温度变化曲线如图 13 所示。

由图 12 可知,相变潜热减小或增大对于路径 1 上 9 号分析点温度变化影响不大。前期相变潜热对温度变化几乎没有影响;后期可以看出,相变潜热越小,对温度影响越大。这是由于在这一路径上,9 号分析点的温度一直没有降到 0℃以下,因此土中的水分不会产生相变,尤其是在冻结前期,因此相变潜热对冻结时间产生的影响可以忽略不计。

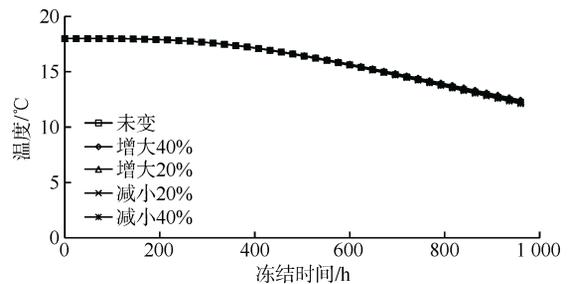


图 12 不同潜热路径 1 上 9 号点温度随时间变化曲线

Fig.12 Variation of temperature with time at on the 9th analysis point 9 on the path 1 for different latent heat

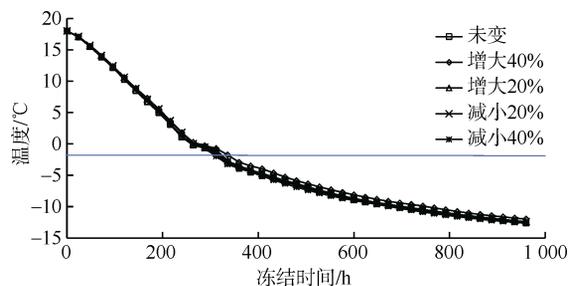


图 13 不同潜热路径 2 上 9 号点温度随时间变化曲线

Fig.13 Variation of temperature with time at on the 9th analysis point 9 on the path 2 for different latent heat

由图 13 可知,相变潜热对路径 2 上 9 号分析点温度变化影响不大,前期几乎没有影响,当温度降低到 0℃以下,相变潜热的影响变大。相变潜热越

小, 温度下降越快。随着冻结时间的延长, 土体完成相变阶段, 相变潜热基本释放完毕, 温度变化曲线趋于平稳。

可见, 土体相变潜热对温度场变化影响很小, 前期几乎没有影响, 后期相变潜热越小, 对土体温度场变化影响越大。相变潜热的改变对温度场的发展变化十分有限, 在没有达到相变的区域, 相变潜热的改变不影响温度场的发展变化。

### 3.4 原始地温的影响

数值模型中原始地温设置为 18℃, 现将原始地温分别设置成 10℃、25℃、35℃, 并获取相应的土体温度变化曲线。路径 1 上 9 号分析点 4 组原始地温的温度变化曲线如图 14 所示, 路径 2 上 9 号分析点 4 组原始地温的温度变化曲线如图 15 所示。

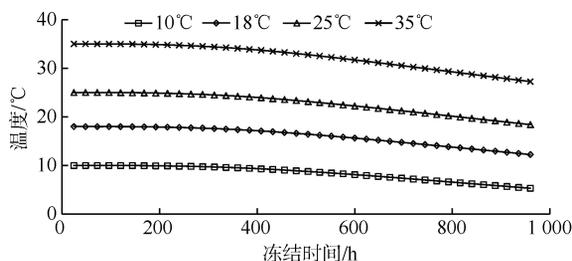


图 14 不同原始地温路径 1 上 9 号点温度随时间变化曲线

Fig.14 Variation of temperature with time at the analysis point No. 9 on path 1 for different original ground temperature

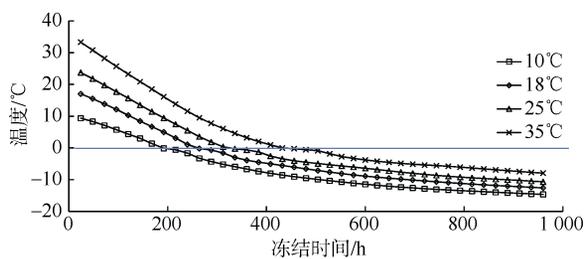


图 15 不同原始地温路径 2 上 9 号点温度随时间变化曲线

Fig.15 Variation of temperature with time at the analysis point No. 9 on path 2 for different original ground temperature

由图 14 可知, 不同原始地温路径 1 上 9 号分析点的温度变化曲线形状基本一致, 可见当土体温度下降至 0℃之前, 原始地温越高, 土体下降到相同温度所需时间越多。

由图 15 可知, 温度降低到 0℃之前, 不同原始地温时路径 2 上 9 号分析点的温度变化曲线形状基本一致, 即土体温度下降且幅度较大。温度降低到 0℃之后, 不同原始地温时路径 2 上 9 号分析点温度变化曲线形状也基本一致, 与 0℃之前有所不同的是土体温度随时间变化下降变得比较缓慢, 下降幅度较小且趋于平稳。

相同条件下, 不同原始地温的温度变化曲线形状基本一致, 即温度下降速率与下降幅度基本一致。土体达到 0℃之前, 温度下降较快, 幅度较大; 0℃之后, 温度下降较缓, 幅度较小且趋于平稳。原始地温越低, 达到相同温度所需要的冻结时间越短。

## 4 结论

运用 ADINA 有限元软件建立新型管幕冻结法的数值模型, 对 2 种路径的温度场发展规律进行对比分析, 通过分析土体导热系数、容积热容量、相变潜热、原始地温这 4 个因素对温度场的影响进行多方面的综合对比和分析后, 形成如下结论。

a. 土体导热系数对温度场有显著的影响, 土体导热系数越大, 温度下降越快, 且幅度越大。导热系数越小, 温度下降越平缓, 且幅度越小。

b. 容积热容量对温度场的影响效果较大, 容积热容量越小, 温度下降越快, 且幅度越大。容积热容量越大, 温度下降越平缓, 且幅度越小。

c. 土体相变潜热对温度场变化几乎没有影响。

d. 原始地温对温度场的影响效果较大, 相同条件下, 不同原始地温的温度变化曲线形状基本一致。原始地温越低, 达到相同温度所需要的冻结时间越短。

## 参考文献

- [1] HU Jun ,LIU Yong ,WEI Hong ,et al. Finite-element analysis of the heat transfer of the horizontal ground freezing method in shield-driven tunneling[J]. International Journal of Geomechanics , American Society of Civil Engineers , 2017 , 17(10) : 04017080.
- [2] HU Jun ,LIU Yong ,LI Yuping , et al. Artificial ground freezing in tunnelling through aquifer soil layers : A case study in Nanjing Metro Line 2[J]. Ksce Journal of Civil Engineering , 2018 , 22(10) : 1-7.
- [3] LIU Yong ,HU Jun ,XIAO Huawen ,et al. Effects of material and drilling uncertainties on artificial ground freezing of cement-admixed soils[J]. Canadian Geotechnical Journal , 2017 , 54(5) : 1659-1671.
- [4] 胡俊, 杨平. 大直径杯型冻土壁温度场数值分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(2) : 523-531.  
HU Jun ,YANG Ping ,Numerical analysis of temperature field of large diameter cup type frozen soil wall[J]. Rock and Soil Mechanics , 2015 , 36(2) : 523-531.
- [5] 胡俊, 卫宏, 刘勇. 冻土帷幕设置加热限位管时温度场数值分析[J]. 隧道建设, 2016, 36(6) : 688-694.  
HU Jun ,WEI Hong ,LIU Yong. Numerical analysis of temperature field during the installation of heating limiting tube on frozen soil curtain[J]. Tunnel Construction , 2016 , 36(6) : 688-694.

- [6] GOTO Y, YAMASHITA A, TAKASE Y. Field observation of load distribution by joint in pipe beam roof[C]//Doboku Gakkai Ronbunshu, 1984, (344/I-1): 387-390.
- [7] TAN W L, PATHEGAMA R G. Numerical analysis of pipe roof reinforcement in soft ground tunneling[C]//Proceedings of 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, 2003, American Society of Civil Engineers, USA: 1-10.
- [8] 姚大钧, 吴志宏, 张郁慧. 软弱黏土中管幕工法之设计与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 2): 4999-5005.  
YAO Dajun, WU Zhihong, ZHANG Yuhui. Design and analysis of pipe work method in weak clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S2): 4999-5005.
- [9] 李向阳, 闫治国, 朱合华, 等. 软土地层管幕法隧道箱涵顶进开挖数值模拟[C]//全国城市地下空间学术交流会论文集, 2004.
- [10] 陆明, 朱祖熹, 陈鸿. 管幕法箱涵顶进施工工艺的防水设计探讨[J]. 中国建筑防水, 2006(9): 39-42.  
LU Ming, ZHU Zuxi, CHEN Hong. Discussion on waterproof design of jacket culvert jacket construction technology[J]. China Construction Waterproofing, 2006(9): 39-42.
- [11] 孙钧, 虞兴福, 孙旻, 等. 超大型“管幕-箱涵”顶进施工土体变形的分析与预测[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1021-1027.  
SUN Jun, YU Xingfu, SUN Min, et al. Analysis and prediction of deformation of super-large “tube curtain-culvert” jacking construction soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1021-1027.
- [12] 阎石, 金春福, 钮鹏. 新管幕工法大直径钢顶管施工力学特性数值模拟分析[J]. 施工技术, 2009, 38(增刊 2): 376-380.  
YAN Shi, JIN Chunfu, NIU Peng. Numerical simulation analysis of mechanical properties of large diameter steel jacking pipe in the new pipe construction method[J]. Construction Technology, 2009, 38(S2): 376-380.
- [13] 王健. 新管幕肋梁结构体系静力性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- [14] 张玲玲. 新管幕肋梁结构节点力学性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- [15] 森内浩史, 上田保司, 生頼孝博. 鋼管間止水凍土の凍着維持に関する研究[C]//土木学会論文集, 2008.
- [16] 胡俊. 水泥改良前后土体冻结温度及力学特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2013, 18(4): 156-159.  
HU Jun. Experimental study on freezing temperature and mechanical properties of soil before and after cement improvement[J]. Railway Construction, 2013, 18(4): 156-159.
- [17] 李剑. 管幕冻结施工工法研究与应用[D]. 西安: 长安大学, 2015.

(责任编辑 张宏)

## (上接第 154 页)

- [14] 兰凯, 黄汉盛, 鄢泰宁. 软土型水泥土掺砂试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(5): 113-116.  
LAN Kai, HUANG Hansheng, YAN Taining. Laboratory test for cement-stabilized soft soil added with sand[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(5): 113-116.
- [15] 王岩, 隋思涟, 王爱青. 数理统计与 MATLAB 工程数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 192-197.
- [16] 王贤昆, 庞建勇, 王强. 复合水泥土无侧限抗压强度正交试验研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12): 72-75.  
WANG Xiankun, PANG Jianyong, WANG Qiang. Orthogonal experimental studies on unconfined compressive strength of composite cement-soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(12): 72-75.
- [17] 淑波. 水泥土添加剂的室内试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [18] 燕仲彧. 水泥土添加剂室内试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [19] 钱小倩, 詹书林, 金南国. 建筑材料[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 37-39.

(责任编辑 张宏)