

联络通道二维水热耦合数值模拟

李亚利¹, 田亚护¹

1. 土木建筑工程学院, 北京交通大学, 北京市, 北京

简介: 为了得到联络通道冻结壁厚度达到2m时的合理的冷媒温度, 考虑不同的冷媒温度对冻结效果的影响, 分析冷媒温度、冻结时间和冻结壁厚度的关系, 从而达到缩短工期、节约工程资金的目的。

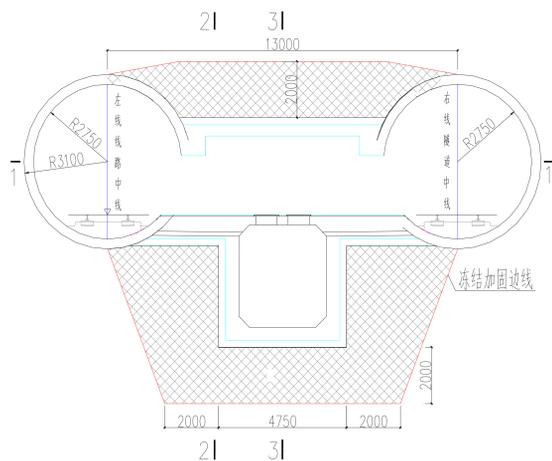


图 1. 联络通道及泵房冻结加固设计图

结果: 冷媒温度为-30°C时, 冻结壁不同冻结时间下温度场的模拟结果。

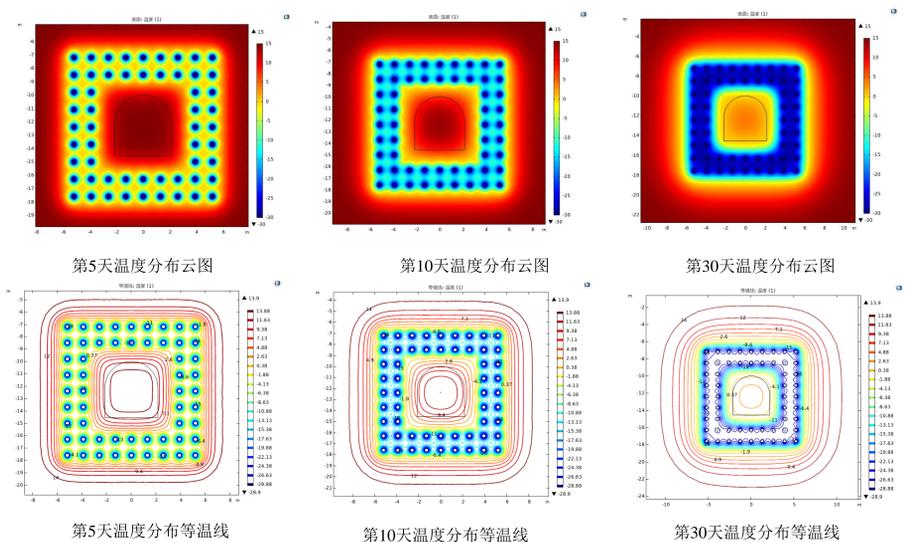


图 3. 不同冻结时间冻结壁温度分布云图(-30°C)

计算方法: 通过COMSOL中系数型偏微分方程模块(PED)进行求解。

$$\begin{cases}
 \rho C_{(\theta)} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{(\theta)} \nabla^2 T + L \rho_I \frac{\partial \theta_I}{\partial t} & \text{温度场控制方程} \\
 \frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_{(\theta_u)} \nabla \theta_u - k_{g(\theta_u)}) + \frac{\rho_I}{\rho_w} \frac{\partial \theta_I}{\partial t} = 0 & \text{水分场控制方程} \\
 \theta_I = B_I(T) \theta_u & \text{联系方程}
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + \alpha u = f \\
 \nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]
 \end{cases}$$

COMSOL中偏微分方程

创建的几何模型及网格划分如图2所示。

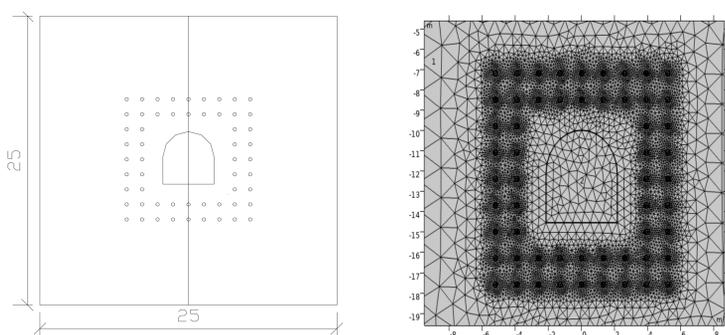


图 2. 几何模型及网格划分

初始值及边界条件:

(1) 温度条件

初始条件: $T|_{t=0} = T_0$

冻结锋面处边界条件: $T_f[R(t), t] = T_d$

冻结管处边界条件: $T|_{x_p, y_p} = T_c$

无穷远处土体: $T|_{(x=0, y=0)} = T_0$

式中:

T_0 —土体初始温度, 取15°C;

T_f —土体冻结温度, 取-0.4°C;

T_c —冻结盐水温度, 取-20、-25、-30、-35°C。

(2) 水分条件

相对饱和度 $S=0.9$ 水分场四周边界条件为零通量

表 1. 粉砂土热力学参数

变量	数值	单位
土体密度	1850	kg/m ³
冰的密度	920	kg/m ³
未冻土热容量	1464	J kg ⁻¹ °C ⁻¹
冻土热容量	1276	J kg ⁻¹ °C ⁻¹
未冻土导热系数	0.84	W m ⁻¹ °C ⁻¹
冻土导热系数	0.79	W m ⁻¹ °C ⁻¹
未冻土渗透系数	6.0×10^{-4}	cm s ⁻¹

结论:

- 1) 积极冻结初期, 在冻结管外壁形成冻土圈, 随着冻结时间的增加冻结圈相交成波浪形外表的冻结壁, 然后冻结壁增厚且外壁变得光滑。
- 2) 冷媒温度对冻结时间影响较大, 冷媒温度越低, 所需的冻结时间越短。当冷冻液温度分别为-20°C、-25°C、-30°C和-35°C时, 达到冻结壁平均温度-10°C以下所需要的冻结时间分别为50天、25天、18天和13天左右。
- 3) 当冷冻液温度分别为-20°C、-25°C、-30°C和-35°C时, 达到冻结壁厚度达到2m所需要的冻结时间分别为76天、54天、43天和31天左右。

参考文献:

1. 耿萍, 晏启祥, 何川, 汪波. 隧道水平冻结施工过程的数值模拟[J]. 工程力学, 2010.36(5):122-127.
2. 李双洋, 张明义, 高志华, 张淑娟. 广州某地铁人工冻结法施工热力分析[J]. 冰川冻土, 2006.28(6):823-831.
3. 高娟, 冯梅梅, 高乾. 地铁联络通道冻结施工的热-流-固耦合分析[J]. 冰川冻土, 2013.35(4):905-911.
4. 白清波, 李旭, 田亚护, 房建宏. 冻土水热耦合方程及数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2015.37(2): 132-135.