

# 人工土壤冻结过程的计算机模拟

苑中显 叶 芳 陈 峰 陈永昌 马重芳

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

**摘 要** 针对用液氮或液态 CO<sub>2</sub> 对建筑物地基实施冻结处理的相变传热问题, 进行了计算机数值模拟研究。相变导热方程采用了显热容法进行分析处理。采用自编程序对单管冻结速度、土壤容·积含水率的影响和冷冻管布置方式的优化等问题进行了计算研究。最后针对某一实际工程应用给出了冷冻管布置的优化方案。

**关键词** 土壤冻结; 传热; 数值模拟

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2000)04-0479-04

## 1 引 言

用土壤冻结法处理地基大约在 100 年前首先由德国发展起来<sup>[1]</sup>。与灌浆法、桩基法等地基处理方法相比, 冻结法可以得到均匀的固化土体, 使土壤抗剪强度和刚度大大提高<sup>[2]</sup>。此方法中早期采用 CaCl<sub>2</sub> 冷冻盐水作为冷却介质, 由于盐水的沸点较高, 约为 -20 ~ -40°C, 冻结速度较慢, 故以后又发展了采用液态氮或 CO<sub>2</sub> 的快速冻结法。然而冻结法的施工费用很高<sup>[3]</sup>, 进行合理的施工设计就显得尤为重要, 必须预先对冷冻管的数量和位置进行合理的确定。一般来说冷冻法处理地基费用庞大, 不大可能用实验方法来确定冷冻管的布置, 所以, 采用计算机数值分析方法对土壤冻结过程进行模拟, 以实现冷冻管布置的优化设计就具有特殊意义。

## 2 数学模型

土壤冻结过程为相变导热过程, 相变导热问题又称为 Stefan 问题。此类问题除极少数简单情况能进行分析求解外, 主要以数值方法求解, 包括近似积分法、摄动法、焓法和显热容法等。其中显热容法较为简单和实用, 并易于进行三维推广, 本文即采用此种方法。其思想是把相变潜热折算成在一个小的温度范围内的显热容, 显热容大小由相变潜热和相变温度范围所决定<sup>[4]</sup>。这样就可以把原 Stefan 问题转化为在同一区域内的单相非线性瞬态导热问题, 求出温度场后, 再确定相变界面的位置。

采用显热容法时, 假设相变发生在  $T_f - \Delta T \leq T \leq T_f$  温度范围内, 控制方程为:

$$C^* \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k^* \nabla T) \quad (1)$$

其中  $C = \rho C_p$ , 当冻结区和非冻结区的密度  $\rho$ 、比热  $C_p$  和导热系数  $k$  各自为常数时,  $C^*$  可表示为:

$$C^*(T) = \begin{cases} C_s & T < T_f - \Delta T \\ C_s + \frac{\rho\lambda}{\Delta T} & T_f - \Delta T \leq T \leq T_f \\ C_l & T > T_f \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为相变潜热, 下标  $s$  和  $l$  分别代表冻结相和非冻结相,  $f$  代表相界面。同时假设

收稿日期: 1999-05-12; 修订日期: 2000-01-17

作者简介: 苑中显 (1962-), 男, 河北晋州人, 副教授, 博士, 主要从事强化传热及传热过程的计算机模拟研究。

在  $T_f - \Delta T \leq T \leq T_f$  温度范围内的导热系数为线性分布,

$$k^*(T) = \begin{cases} k_s & T < T_f - \Delta T \\ k_s + \frac{k_l - k_s}{\Delta T} [T - (T_f - \Delta T)] & T_f - \Delta T \leq T \leq T_f \\ k_l & T > T_f \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\Delta T$  为相变带宽, 算例中  $\Delta T$  取为  $1^\circ\text{C}$ 。控制方程中的物性参数被认为与温度无关, 但与土壤含水率有关, 它们需要通过实验测定。计算中所用物性参数由课题委托单位提供。

计算几何区域如图 1 所示。所计算的冻结区域位于一带缺口的立井周围, 不考虑沿立井深度方向的温度变化, 故可采用极坐标系来描述, 计算区域中任一点的位置由  $r$  和  $\theta$  决定。几何边界可划分为四部分:

$B_1$  和  $B_3$  为对称线, 取为绝热边界;  $B_2$  为模拟无穷远处土壤的外边界, 计算中保持为土壤初始温度不变, 其位置由土壤物性与最长冷冻时间范围决定, 确定原则是计算终了时与  $B_2$  相邻的第一排内节点的温度仍为初始温度, 如冷冻时间取 365 天, 土壤含水率  $P = 60\%$  时,  $r_1$  与  $r_2$  之差不应小于 25 m。 $B_4$  为立井的实际边界, 边界条件较复杂, 计算中近似地取为绝热边界条件。

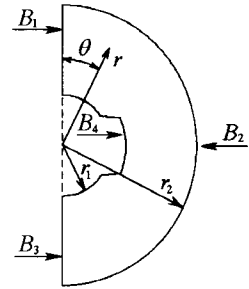


图 1 计算几何区域示意图

### 3 计算结果与分析

首先对单管冷冻的情形进行了计算, 结果如图 2 所示。计算中取冷冻管温度  $T_c = -20^\circ\text{C}$ , 土壤初始温度  $T_0 = 18^\circ\text{C}$ , 冷冻管直径 203.2 mm。土壤冻结速度取决于冻结区导温系数  $a_f$  和非冻结区导温系数  $a_0$ 。当二者一定时, 冻土厚度随冷冻天数的变化类似于反抛物线形状, 呈现出先快后慢的趋势。此外, 冻结速度受土壤导温系数的影响强烈。图中给出了 4 个导温系数时的变化情况, 可以看出, 随导温系数值的增大冻结速度大大加快, 与  $a_0 = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  时相比,  $a_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  时大约快 50%。

对图 1 所示的区域在极坐标下进行计算, 需用扇形网格来近似实际的圆形冷冻管, 每一根冷冻管与一网格相对应。由于计算中采用均分网格, 故网格的疏密直接与冷冻管的大小相对应。下面讨论的各算例中冷冻管的平均直径为 626 mm。计算区域的内半径  $r_1 = 11 \text{ m}$ , 外半径  $r_2 = 36 \text{ m}$ ,  $T_c = -20^\circ\text{C}$ ,  $T_0 = 18^\circ\text{C}$ 。

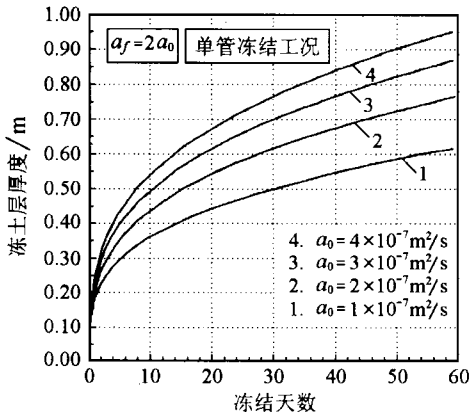


图 2 单管冷冻时 冻土层厚度随时间的变化

图 3 为土壤冻结区域随冷冻天数的变化情况。16 根冷冻管呈双排圆弧形布置, 冷冻管周向间隔  $13^\circ$  (周向间距内排管 4.13 m, 外排管 4.99 m), 径向间距 3 m, 土壤容积含水率  $P = 60\%$ 。由图可见, 50 天之前各冷冻管所形成的冻结区域是孤立的, 到 100 天时冻结区域开始沿径向连接, 200 天时周向也开始连接, 从而形成整体冷冻区, 300 天时冻结区接近于板状, 冻结区沿径向的平均厚度约为 5.14 m。

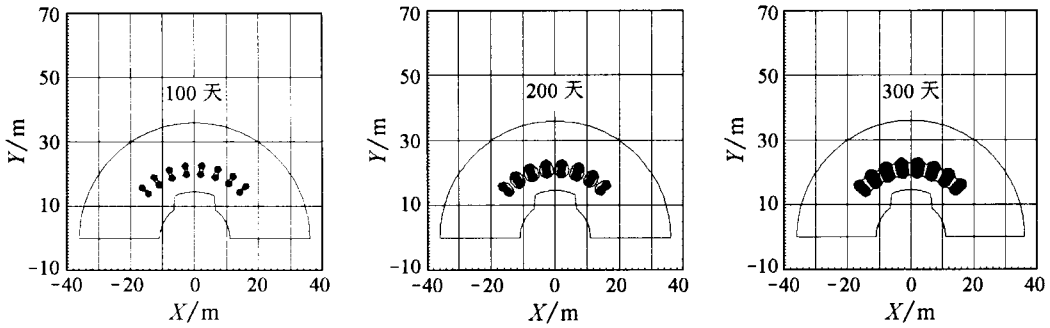


图3 冻结区域随时间的变化

图4为300天时计算区域中温度场的形状, 温度场大致呈漏斗状。 $Z$ 向表示温度,  $0^{\circ}\text{C}$ 以下为冻结区,  $0^{\circ}\text{C}$ 以上为未冻结区。

图5为三种土壤容积含水率下的冻结情况, 冷冻时间均为200天。如果以冻结区域面积来衡量, 冻结200天后 $P=20\%$ 的冻结区约比 $P=60\%$ 的冻结区大30~40%。从传热的角度来看, 容积含水率高就意味着相变所释放出的热量在冷冻管所带走的热量中所占比重较大。由于相变过程中土壤温度基本保持不变, 故在相同条件下, 相变潜热愈大, 相变界面的移动速度就愈慢, 相同冷冻期内冻结区域也就愈小。

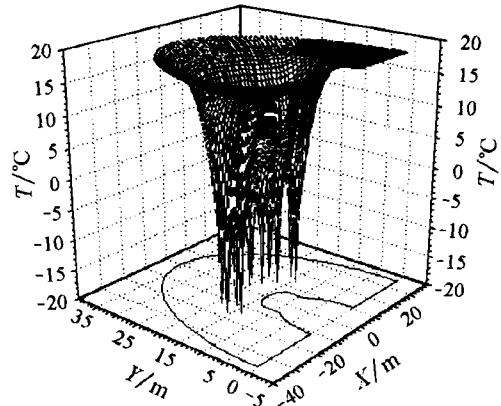
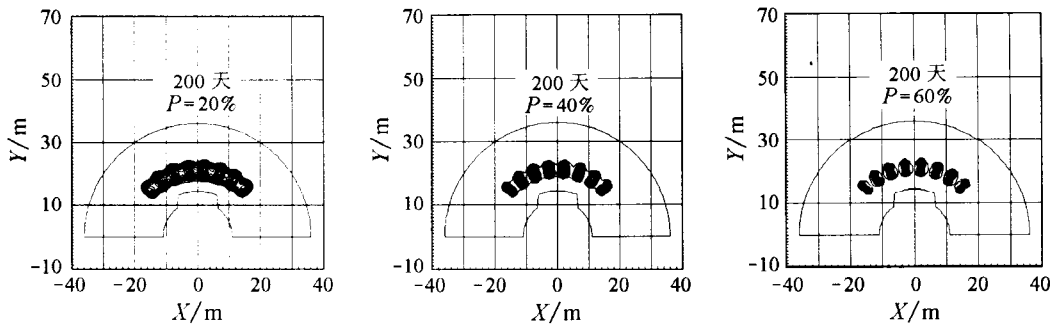


图4 冷冻300天后的土壤温度场

图5 土壤容积含水率 $P$ 对冻结过程的影响

本研究的主要目的在于通过计算机模拟对人工土壤冻结过程中冷冻管的合理布置进行预估。下面对不同冷冻管布置方式的冻结情况进行讨论。

图6给出了4种不同布置方式的计算结果, 冷冻天数为365天,  $P=60\%$ , 冷冻管间距为0.8m。从图中可以看出, 冷冻管数目及其布置方式对冻结区域的大小和形状均有很大影响。图6(a)采取31根冷冻管单排圆弧形布置, 此种布置方式使得立井缺口附近冻结区域较为均匀, 图6(b)、(c)和(d)为双排布置的情形。冷冻管数依次为43、65和77。比较发现, 图6(c)和(d)中冻结区域面积大于图6(b), 但图6(c)和(d)之间无

明显差别。如果就立井缺口附近的冻结情况来看,图 6(b)与图 6(c)、(d)之间也无大的差别。因此,如果以冻结区域整体面积的大小作为衡量标准的话,图 6(c)所示的冷冻管布置为最佳方案;但是若主要考虑立井缺口附近的冻结情况,图 6(b)方式亦不失为较佳方案之一,因为它可以利用较少的冷冻管数达到较理想的冻结效果。

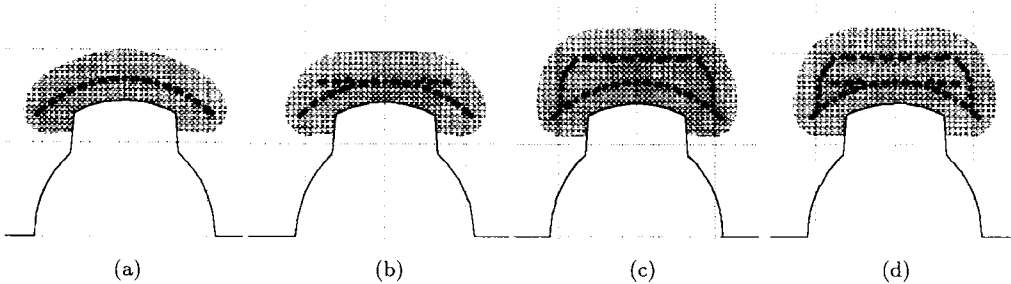


图 6 不同冷冻管布置方式时的冻结区域 (冷冻 365 天,  $P = 60\%$ )

## 4 结 论

对人工土壤冻结过程编制了二维数值模拟程序,采用此程序可以计算任意冷冻管数量和任意布置方式时的土壤冻结过程。文中对单管冷冻速度、土壤容积含水率的影响和冷冻管布置方式的影响等进行了分析讨论。发现冷冻 200 天后容积含水率  $P = 20\%$  的冻结区比  $P = 60\%$  的冻结区约大 30~40%, 容积含水率是影响土壤冻结过程的重要因素之一。冷冻管布置的合理与否直接影响到工程造价,密集布置的冷冻管起不到扩大冻结区的作用。

## 参 考 文 献

- [1] T R Braithwaite. Freezing Techniques for Shaft Support. In: Proc. of Tunnel and Shaft Conference, Rapid Excavation Problems and Progress, Minneapolis, Minnesota, 1968
- [2] I K Lee, W White and O G Ingles. 岩土工程. 俞调梅等译, 北京: 中国建筑工业出版社, 1986
- [3] E W Brand and R P Brenner. 软粘土工程学. 叶书麟等译, 北京: 中国铁道出版社, 1991, 377-378
- [4] C Bonacina, G Comini and A Fasano et al. Numerical Solution of Phase-Change Problems. Int. J. Heat Mass Transfer, 1973, 16: 1825-1832

## COMPUTATIONAL SIMULATION TO THE ARTIFICIALLY FREEZING PROCESS OF SHAFT SUPPORT IN EARTH

YUAN Zhongxian YE Fang CHEN Feng CHEN Yongchang MA Chongfang

(School of Environment and Energy Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

**Abstract** An numerical study has been conducted for the phase-changed Stefan problem in the freezing process of shaft support in earth with liquid nitrogen or liquid carbon dioxide vaporizing means. The method of equivalent specific heat was adopted during the discretization of the non-linear equation of conduction. With the developed code the performances of single cooling tube and multiple cooling tubes have been investigated. In addition, an optimized result to the arranging pattern of the cooling tubes for an actual project is presented.

**Key words** earth freezing; heat transfer; simulation