

文章编号: 1000-4750(2010)Sup.I-0145-05

相变效应对灌注桩与冻土回冻过程影响的研究

*贾艳敏¹, 徐 达¹, 郭红雨²

(1. 东北林业大学土木工程学院, 黑龙江, 哈尔滨 150040; 2. 江苏省交通科学研究院, 江苏, 南京 210017)

摘 要: 以传热学为基础, 考虑地质条件、冻土初始地温场的影响及相变效应, 在自然回冻状态下, 给出冻土地区桩基温度场的二维控制微分方程及初始边界条件。结合试桩工程实例, 建立二维数值模型, 数值方法求解的计算值与实测值吻合较好。分析了钻孔灌注桩与冻土回冻过程, 得出了灌注桩浇筑混凝土后桩体温度分布不均匀, 呈非线性变化; 确定了灌注桩的热扰动核心区域。

关键词: 桩基础; 冻土; 数值模拟; 相变效应; 水化热; 回冻

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A

STUDY ON PHASE TRANSFORMATION EFFECT DUE TO REFROZEN PROCESS OF CAST-IN-PLACE PILES AND FROZEN SOIL

*JIA Yan-min¹, XU Da¹, GUO Hong-yu²

(1. College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China;

2. Jiangsu Transportation Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210017, China)

Abstract: Based on the heat transfer theory, in the state of nature refrozen, the plane differential equation and initial boundary conditions of the temperature field of a pile foundation in a frozen soil region are presented considering hydrology-geology conditions and the initial ground temperature field and phase transformation effect. Taking the test pile engineering as an example, the numerical model of plane is established. The numerical results are in good agreement with the test results. The process of the refrozen both of the pile and frozen soil were analyzed. The conclusion is as follows: the distribution of temperature of the pile is asymmetry after casting, the change of temperature is nonlinear, and the core region of heat disturbance is ascertained.

Key words: pile foundation; frozen soil; numerical simulation; phase transformation effect; hydration heat; refrozen

目前, 关于冻土地区路基、隧道及人工冻土墙温度场的数值分析国内学者已进行了大量研究^[1-3], 近年来, 钻孔灌注桩作为桩基础的一种重要形式, 在寒区工程中得到了广泛的应用^[4-6], 但是有关冻土地区桩基温度场数值分析的研究工作开展较少, 现有的研究也主要基于群桩基础, 考虑了空气对流影响^[7-9]。

本文采用数值法求解, 考虑冻土初始地温场的影响及相变效应, 在自然回冻状态下, 给出冻土地区桩基温度场的二维控制微分方程及边界条件, 以此为基础建立试验桩的二维数值模型, 准确模拟成桩后由于混凝土水化热作用对冻土的热扰动以及这种热扰动的消散规律, 为进一步研究桩基各种力的形成及变化规律奠定基础。

收稿日期: 2009-03-28; 修改日期: 2010-02-01

基金项目: 2009 黑龙江省公路建设行动计划科研项目(2009-019)

作者简介: *贾艳敏(1962—), 女, 内蒙古人, 教授, 博士, 博导, 中国公路学会桥梁和结构分会理事, 主要从事桥梁工程、岩土工程方面的教学及科研工作(E-mail: yanminjia2008@126.com);

徐 达(1984—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士生, 从事桥梁工程和岩土工程的研究(E-mail: xuda84927@163.com);

郭红雨(1981—), 男, 辽宁辽中人, 硕士, 从事桥梁工程和岩土工程的研究(E-mail: hoyo269@126.com)。

1 数学模型

1.1 控制微分方程及初始条件

钻孔灌注桩以及桩周土的回冻过程是一个混凝土不断放出水化热并且伴有相变的瞬态传热过程。由于模型可简化为平面问题，根据经典传热学理论，平面二维问题的瞬态温度场的导热偏微分方程表达式为：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\lambda / \rho C(T)} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$T(x, y)|_{t=0} = T_1, \quad 0 \leq x \leq r \quad (2)$$

$$T(x, y)|_{t=0} = T_2, \quad x > r \quad (3)$$

式中： T 为物体的瞬态温度； T_1 为混凝土的入模温度； T_2 为灌桩前冻土的初始地温； r 为单桩半径； t 为过程进行的时间； λ 为材料导热系数； ρ 为材料密度； $C(T)$ 为材料的比热容，它是温度的分段线性函数，在相变区变化较大，将其考虑为等效比热容来处理相变潜热； x 、 y 为直角坐标系下坐标。

1.2 相变潜热的处理

桩基混凝土灌浆放热过程中，周围冻土存在着融化、冻结的相变过程，土的融化和冻结过程，实际上是土中冰晶的融化和水分的冻结过程，根据水分子和冰晶体距离固体颗粒的远近不同，其发生相变时的温度也不同。相变潜热的计算公式^[10]如下：

$$Q = L\rho_d W \quad (4)$$

式中： Q 为相变潜热； L 为单位质量土体中所含水的结晶或冰的融化潜热，在一般工程热工计算中，可取 $L=334.56\text{kJ/kg}$ ； W 为冻土天然含水量。

本文采用热焓法来求解相变问题，将焓定义为比热容对温度的积分，数学定义式为：

$$H(T) = \int_0^T \rho C(T) dT \quad (5)$$

或等效的微分形式：

$$\frac{dH(T)}{dT} = \rho C(T) \quad (6)$$

式中： $H(T)$ 为热焓； ρ 为材料密度； T 为绝对温度。在实际应用中焓值可由潜热与显热之和来确定，根据经验显热可取潜热的 10% 计算^[11]。将式(6)代入式(1)得到由焓控制的伴有相变过程的桩基回冻瞬态温度场控制方程，表达式为：

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

2 试桩工程概况

格尔木桩基试验场位于昆仑山垭口附近，海拔高度 4000m 以上。年冻结期长达 7 个月—8 个月，年均气温 -5°C ，年均地温 $-1.81^\circ\text{C} \sim -2.65^\circ\text{C}$ ，属低温稳定或基本稳定冻土区，基本上为多冰、少冰冻土。1 号试桩为人工挖孔灌注桩，浇筑时采用热敏电阻对 1 号桩布置的 9[#]、5[#]、6[#]、8[#] 测温孔进行实测。

试桩几何尺寸如下：桩径 $d=1.2\text{m}$ ，桩长 $L=16\text{m}$ ，入土深度 $h=15\text{m}$ 。

3 试桩数值模型的构建

热学模型基于 ANSYS 大型有限元软件建立，采用 PLANE55 平面四节点单元，单自由度，可用于稳态或瞬态热学分析。根据桩土问题的对称性，建立 1 号试桩的 1/2 模型，共划分 5008 个单元，5163 个节点，模型尺寸为 $15\text{m} \times 25\text{m}$ ，如图 1 所示。

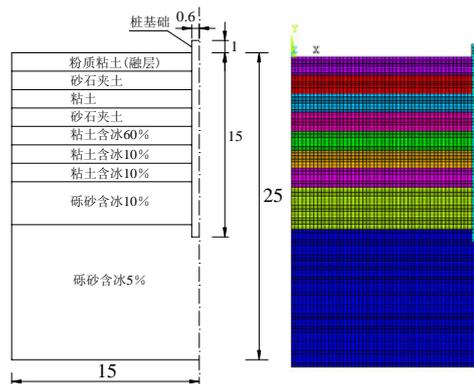


图 1 桩土平面简图及数值模型

Fig.1 Plane sketch of pile-soil and numerical model

3.1 模型计算假设

- 1) 计算过程中材料的热物理性质不随时间而改变。
- 2) 桩完全依靠侧表面散热(即表面无散热装置)。
- 3) 整个下埋桩段与冻土完全接触。
- 4) 空气对流作用只作用在融层, 对上限以下冻土和桩的回冻没有影响(即只考虑自然回冻)。

3.2 模型边界条件

由于不考虑边界面上的换热状态，故本问题属第二类边界条件^[10]，模型边界条件为：

- 侧边界： $\partial T(x, y) / \partial n = 0$ ；上边界： $T(x, y) = T_a$ ；
下边界： $T(x, y) = T_b$ ；桩孔壁边界： $\lambda \frac{\partial T(x, y)}{\partial n} + q = 0$ 。

冻土融层内地温随季节的变化性差异较大，桩基试验在夏季进行，根据实测数据近似取为常数， $T_a=0.5^{\circ}\text{C}$ ；在地温年变化深度以下，地温变化量很小，根据实测数据近似取 $T_b=-2.0^{\circ}\text{C}$ ； q 为桩孔壁上由混凝土水化热产生的单位面积的热流量。

3.3 初始地温场建立

模型中初始地温场按冻土天然状态下的温度场考虑。试验场内冻融活动层的厚度在 2.1m—3.0m 之间，温度波的传播是一个过程，所以冻土上限到达最大深度时，相对于地表温度有一个滞后，经过 7 月份、8 月份的最大正温后，认为到 9 月份、10 月份时冻土上限才到达最大深度，试验桩的施工日期在夏季 6 月份，故取融层计算厚度为 1.5m。试验桩所处低温冻土区，年平均地温小于 -1°C ，根据试验桩实测地温曲线，模型下边界输入恒温 -2.0°C ，上边界(融层)输入恒温 0.5°C ，中间土层输入过渡温度，以形成温度梯度，桩身模型输入混凝土的浇筑温度 5°C 。

4 数值计算结果讨论分析

4.1 回冻温度-时间曲线

为了详细研究单桩回冻规律及其影响范围，利用上述建模方法，考虑相变效应，对 1 号试验桩及周围冻土的回冻规律进行计算，计算用特征点共取 36 个，涵盖了以桩轴线为中心，半径 4.2m、深 20m 的区域，其中编号 1—编号 4 分别对应 9[#]、5[#]、6[#]、8[#] 实际测温孔道。具体位置(x, y)如图 2 所示，9[#] 测孔的计算值与实测数据见表 1，比较表 1 中 9[#] 孔地表下 5m、10m、15m 处最高温升和回冻时间，可以看出模拟值与热敏电阻实测值吻合较好，说明本文的计算方法是合理的。其它测孔计算结果如图 3—图 5 所示。

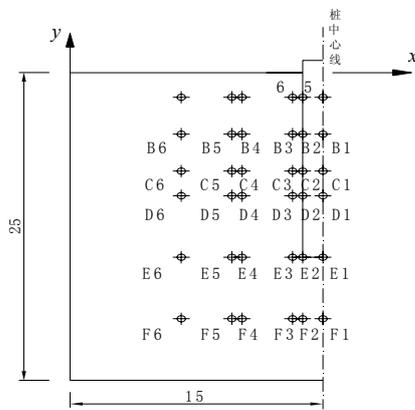


图 2 特征点位置示意图
Fig.2 Location sketch of representative points

表 1 计算值与实测值比较

Table 1 Comparison of calculated value and measured value

距地表面 深度/m	最高温升/ $^{\circ}\text{C}$		回冻时间/d	
	实测值	ANSYS	实测值	ANSYS
5	11	10.5	20	17
10	13	10	18	15
15	3.5	3.5	12	9

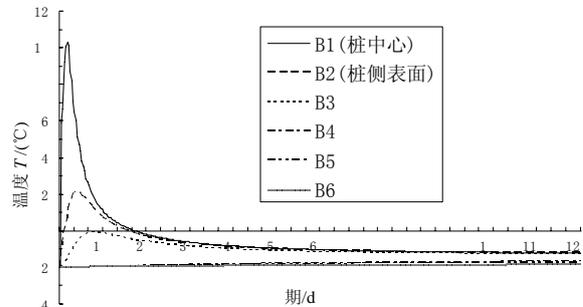


图 3 地表下 5m 处温度-时间曲线

Fig.3 Curves of temperature-time at 5m under the earth's surface

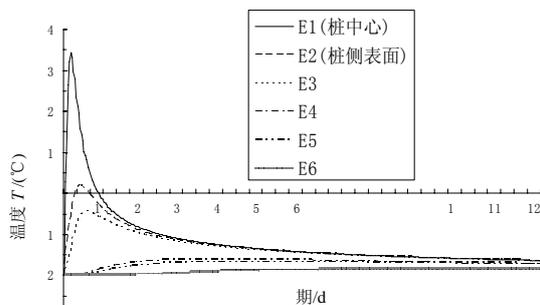


图 4 地表下 15m 处温度-时间曲线

Fig.4 Curves of temperature-time at 15m under the earth's surface

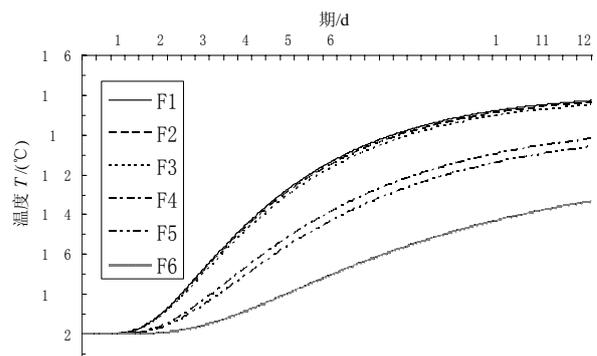


图 5 地表下 20m 处温度-时间曲线

Fig.5 Curves of temperature-time at 20m under the earth's surface

从图 3—图 5 中可以看出，9[#] 孔(桩中心)的温度变化最大，混凝土浇筑后 1d—3d 内温度上升，5m 深度处最高可达到 10°C ，15m 深度处最高可达到 3.5°C ，随后温度开始降低，在 10d 时，温度下的度开始，作为对比的天然孔温度，8[#] 孔及 B5—F5、B6—F6 点在计算周

期内一直呈现出升温的，整个测孔的温度一直处于温，这说明混凝土水化热的影响范围随着桩侧距离的增而小，距离桩侧 2m 处土体融化较小，容回冻初始地温，故施工时可不作考虑。

从图 5 中可以看出地表下 20m 深度处 F1—F6 各点的温度变化在计算周期内一直呈现出升温的，但升温度很小，最大为 0.1℃，整个桩体的温度一直处于温，这说明混凝土水化热的影响范围随着深度的增也小，地表下 20m 处土体基本没有融化，故施工时可不作考虑。

4.2 热扰动核心范围的确定

以地表下恒温绝对值的 1/10(即 0.2℃)作为温升控制标准，确定热扰动的核心范围。通过大量数值计算得出，混凝土水化热对桩侧热扰动范围随着桩径的增大而增大，者呈对数关系，如图 6(a)所示，水化热对桩热扰动范围随着桩长的增大而增大，者呈线性关系，如图 6(b)所示。

此可由桩径确定热扰动侧限，桩长确定热扰动下限，从而得出热扰动的核心范围。

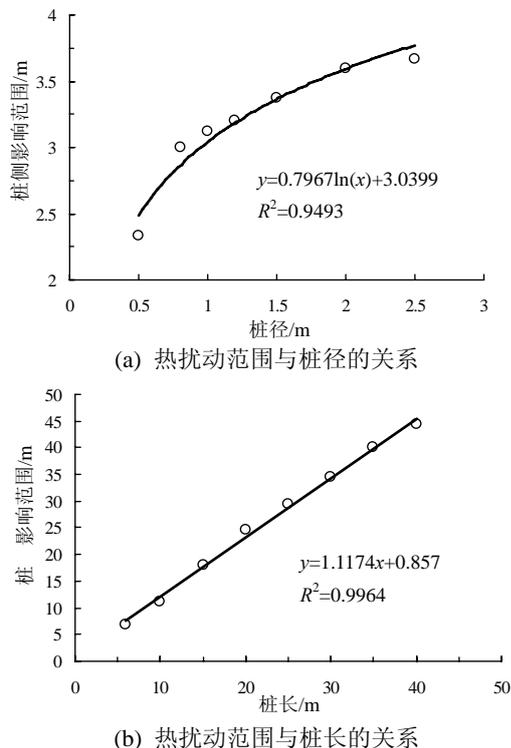


图 6 热扰动核心范围关系曲线

Fig.6 Relation curves of heat affect kernel area

5 结论

由以上分析可以得出以下结论：

(1) 混凝土水化热对地温的热扰动是一个长期的过程，它随着回冻时间的增而小，此要等混凝土水化热对地温的热扰动完全消（达到的热平状态）施工是不现实的。

(2) 试桩浇筑后桩体温度呈不均匀分布，存在一定的温差，桩中心温度高，桩侧温度低，呈非线性变化。由于桩周冻土各点离热的距离不同，以及各土层自身热物理数的不同，成各点的融化和回冻时间也各不相同，但变化规律具有相似性。

(3) 混凝土水化热对桩侧热扰动范围随着桩径的增大而增大，者呈对数关系，对桩热扰动范围随着桩长的增大而增大，者呈线性关系。

参考文献：

- [1] 海年, 明. 多年冻土区路基高度对温度场影响的非线性分析[J]. 公路交通科, 2006, 23(2): 1—5.
Li Xiaoyan, Wang Hainian, Dou Mingjian. Nonlinear analysis of influence of embankment height on embankment thermal regime in permafrost regions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(2): 1—5. (in Chinese)
- [2] 增, . 路多年冻土区路基温度场的模拟与测[J]. 北方交通大学学, 2004, 28(1): 55—59.
Sun Zengkui, Wang Lianjun, Wei Qingchao. Simulation and prediction of temperature field of Qinghai-Tibet railway roadbed on permafrost region [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, 28(1): 55—59. (in Chinese)
- [3] Zhang Xuefu, Lai Yuanming, Yu Wenbing. Nonlinear analysis for the three-dimensional temperature fields in cold region tunnels [J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 35: 207—219.
- [4] 贾艳敏, 郭红雨, 郭. 多年冻土区灌注桩桩-冻土相作用有限元分析[J]. 岩石力学与工程学, 2007, 26(增刊 1): 3134—3140.
Jia Yanmin, Guo Hongyu, Guo Qichen. Finite element analysis of bored pile-frozen soil interactions in permafrost [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(s1): 3134—3140. (in Chinese)
- [5] 郭红雨, 贾艳敏. 用量法确定考虑冻力和冻土力作用时桩基的界 [J]. 工程力学, 2007, 24(7): 167—173.
Guo Hongyu, Jia Yanmin. Determination of critical loads for piles by energy method considering forst heave forces

- and resistance to deformation of frozen soil [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(7): 167—173. (in Chinese)
- [6] 平, 苏, 郭. 冻土区桥梁群桩基础地基回冻过程的非线性分析[J]. *土木工程学*, 2006, 39(2): 78—84.
Wu Yaping, Su Qiang, Guo Chunxiang. Nonlinear analysis of ground refreezing process for pile group bridge foundation in permafrost [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(2): 78—84. (in Chinese)
- [7] 小和, 平, . 多年冻土地区不同入模温度下桩基温度场数值分析[J]. *北京交通大学学*, 2005, 29(1): 9—13.
Li Xiaohu, Yang Yongping, Wei Qingchao. Numerical simulation of pile foundation conduction at different molding temperature in permafrost regions [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2005, 29(1): 9—13. (in Chinese)
- [8] 徐学, , 立. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. *Frozen soil physics* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [9] 国 区研究与工程实验. 深季节冻土地区和多年冻土地区基础设计与施工[R]. 中国科学院冰冻土研究所, . : 中国科学院冰冻土研究所, 1984.
U.S. Army Cold Regions Research Engineering Laboratory. *Design and construction of foundation in areas of deep seasonal frost and permafrost* [R]. Translated by Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, 1984. (in Chinese)
- [10] 东, . 混凝土水化热瞬态温度场数值计算过程中的水化放热规律及水化问题[J]. *建筑科技大学学*, 1999, 31(3): 277—279.
Li Dong, Pan Yugeng. Law and velocity of hydro-thermo dissipation in the calculation of concrete transient temperature field [J]. *Xi'an University of Arch. & Tech.*, 1999, 31(3): 277—279. (in Chinese)
- [11] 敏, 从. 高 混凝土水化放热规律研究[J]. *混凝土*, 2003(3): 27—29, 43.
Xiang Min, Yang Congjuan. Study of the hydro-thermal dissipation law of high strength concrete [J]. *Concrete*, 2003(3): 27—29, 43. (in Chinese)