

文章编号: 1000-7598-(2004) 07-1139-04

高原冻土区桩基施工温度场研究

贾晓云, 朱永全, 李文江

(石家庄铁道学院 土木工程分院, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 结合青藏铁路沿线多年冻土的主要特点, 利用 Ansys5.6 大型有限元计算程序, 对青藏铁路冻土区桥梁混凝土灌注桩基施工过程的地温场进行了模拟计算, 分析了高原冻土区桥梁桩基在施工过程中地温场的变化规律, 并据此对冻土桩基施工过程中的有关问题进行讨论, 所得成果可供相应工程借鉴。

关 键 词: 多年冻土; 混凝土灌注桩; 温度场; 水化热

中图分类号: TU 475⁺.2

文献标识码: A

Study of ground temperature field during pile foundation construction in permafrost regions

JIA Xiao-yun, ZHU Yong-quan, LI Wen-jiang

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Based on the characteristics of permafrost in plateau along the Qinghai-Tibet Railway, simulating calculation about the ground temperature during constructing concrete grouting piles is made by finite element program Ansys5.6. The changing rules of the ground temperature field during construction in plateau are analyzed too. According to the results, some problems, which are related to the construction of the pile in permafrost, are discussed. Then, some significant results are presented, which can provide a reference for corresponding engineering.

Key words: permafrost; concrete grouting pile; temperature field; hydration heat

1 引 言

我国的北方和西部与西南高山地区分布着广大的冻土地带。随着我国经济的发展以及西部大开发战略的实施, 越来越多的建筑物正在修筑或将要修筑在多年冻土地区, 在该地区进行建筑施工, 破坏了原有土层的天然状态, 使土体原有的各种平衡遭到了破坏, 尤其是热力学平衡在多年冻土地区带来的影响^[1]。

在钻孔灌注桩施工过程中, 随着混凝土浇筑、混凝土养护以及地基回冻等施工工况的不同, 地温场将相应地发生变化, 而这种地温场的变化又将直接导致冻土地层物理力学性能的改变, 其中包括冻土的融沉性、冻土回冻过程的膨胀性以及冻土地基的承载力等工程性能的改变。因此, 分析冻土地基在施工过程中冻土层地温场的变化规律将对施工具有指导和参考价值。

2 工程概况

青藏铁路格拉段五道梁中桥全长 59.04 m, 3 孔 16 m, 采用圆形桥墩。圆形桥墩基础为 4 ϕ 1 m 的钻孔灌注桩, 桩长 16 m, 桩间距为 3 m, 墩身高 (含墩帽) 2.8 m, 正方形布置 (见图 1)。桥址海拔高度为 4 700 m, 冻土下限 100~120 m。

桥址所处地层为粉土、含土冰层、片岩、砾岩夹泥岩、细砂、泥灰岩夹泥岩、泥灰岩夹砂岩、泥岩夹砂岩, 具体描述如下:

(1) 细砂, 分布于地表 0.5~1.7 m, 砂质不均, I 级松土, $\sigma_0=100$ kPa, 含土冰层、冻胀。

(2) 粉土, 分布于局部地表, 厚 0.2~2 m, 土质较均, 硬塑, 为 II 级普通土, $\sigma_0=100$ kPa。

(3) 含土冰层, 厚 2.0~2.6 m, 主要分布于冻土上限附近, 含土成分主要为全风化的片岩碎块及土质, IV 级软石, 富冰冻土、融陷, 特强冻胀。

(4) 泥岩夹砂岩，层块状构造，强风化。

不同龄期混凝土内部温度：

$$T_{u(\tau)}=T_2+T_{(\tau)}\xi \tag{3}$$

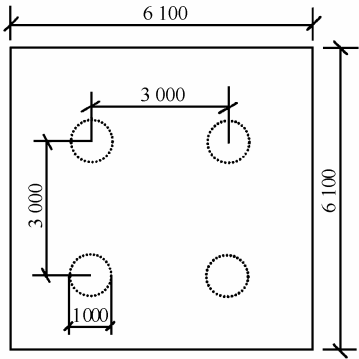


图1 墩下基础平台及桩基平台布置图 (mm)
Fig.1 The disposal of the flat roof under the pier and the piles

3 灌注桩混凝土的水化热计算

水泥与水作用时会释放热，这种由于水化而放出的热，称之为水化热。水泥的放热过程可以延续很长时间，但大部分热量是在早期，特别是在最初3 d内放出。当使用硅酸盐水泥建造大型基础、桥墩、水坝等大体积混凝土工程时，由于水化热积聚在内部不易发散，常使内部温度上升到50~60℃，较大的内外温差所引起的应力，可使混凝土产生温度裂缝以致影响工程品质。

水化热及放热速率与水泥的矿物成分及水泥细度有关，各熟料矿物在不同龄期的水化热有所不同。本文在计算水泥的水化热时，根据工程上估算水化热公式^[2]，计算出1 kg水泥的最终水化热为：

$$\begin{aligned} Q_0 &= 569(C_3S)+260(C_2S)+837(C_3A)+126(C_4AF) \\ &= 569\times 39\%+260\times 28\%+837\times 11\%+126\times 22\% \\ &= 400 \text{ (kJ)} \end{aligned}$$

式中 括号内指各矿物含量的百分率，其中C₃S为硅酸三钙取为，39%，C₂S为硅酸二钙，取为28%，C₃A为铝酸三钙，取为11%，C₄AF为铁铝酸四钙，取为22%。

由于水泥的水化热并不是一次释放完，而是随时间逐步释放的，故水泥的水化热随时间而变化的公式^[3]为：

$$Q=Q_0(1-e^{-m\tau}) \tag{1}$$

假设入模温度T₂为4.5℃，根据式(1)，不同龄期混凝土的绝热温度：

$$T_{(\tau)}=\frac{WQ}{\rho c}(1-e^{-m\tau}) \tag{2}$$

式中 Q为不同龄期水泥的水化热(kJ)；Q₀为每千克水泥的最终水化热量(kJ)；W为每立方米水泥的用量，取416 kg；T(τ)为不同龄期混凝土的绝热温度(℃)；ρ为混凝土的质量密度，取2 400(kg/m³)；c为混凝土的比热，取0.96(kJ/kg·℃)；m为与水泥品种、浇捣时温度有关的经验系数，取0.3；T_{u(τ)}为不同龄期混凝土内部温度(℃)；ξ为混凝土散热系数，取0.6。

在不同龄期混凝土的水化热、混凝土绝热温度、混凝土内部温度等计算结果如表1所示。

表1 不同龄期混凝土的水化热、绝热温度和内部温度
Table 1 The hydration heats, the insulative temperatures and internal temperatures of concrete in different times

龄期 /d	水化热 /kJ	绝热温度 /℃	内部温度 /℃	龄期 /d	水化热 /kJ	绝热温度 /℃	内部温度 /℃
1	117.4	5.4	8.24	15	1.5	79.9	52.94
2	76.7	16.6	14.96	16	1.2	80.4	53.24
3	57.0	28.7	22.22	17	0.9	80.7	53.42
4	42.1	39.9	28.94	18	0.6	81.0	53.6
5	31.3	49.3	34.58	19	0.4	81.2	53.72
6	23.1	56.9	39.14	20	0.4	81.3	53.78
7	17.1	62.9	42.74	21	0.3	81.4	53.84
8	12.8	67.6	45.56	22	0.1	81.5	53.90
9	9.3	71.1	47.66	23	0.2	81.6	53.96
10	7.0	73.8	49.28	24	0.1	81.64	53.98
11	5.1	75.8	50.48	25	0.1	81.68	54.00
12	3.9	77.3	51.38	26	0.1	81.7	54.02
13	2.8	78.5	51.98	27	0.06	81.73	54.03
14	2.1	79.3	52.58	28	0.04	81.75	54.05

4 桩基地温场计算分析

本工程由于混凝土灌注过程中，水泥水化热的作用，放出大量的热量，故水化热向冻土地层的传导属于有热源的导热。传热方程^[4]为：

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}=a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\frac{q_v}{\rho c} \tag{4}$$

式中 T为温度(℃)；τ为时间(h)；a为导温系数(m²/s)；c为比热容(kJ/kg·℃)；ρ为密度(kg/m³)；q_v为单位体积、单位时间内热源产生的热量(W/m³)；x，y，z分别表示直角坐标系中的坐标。

由于此问题的边界条件复杂，且属于非线性问题，很难得到它的解析解。我们将采用数值解法，借助于Ansys5.6进行求解。

桥墩基础采用4根矩形分布的φ1 m钻孔灌注

桩，为了分析地温场在这种工程因素的影响下变化的规律，研究中采用了基于 windows98 操作平台下的 ansys5.6 大型有限元计算软件，进行了三维群桩计算分析。计算过程中作如下假定：

(1) 假定在计算过程中材料的热力学属性（热传导系数、对流换热系数、比热、密度等）保持常量。

(2) 为简化计算，同时保证不失一般性，计算中假定地层原始地温沿深度方向各处相等。

(3) 假定桩身钢筋混凝土和周围土层均为均质、各向同性材料。

计算参数^[5]见表 2。

表 2 材料热力学参数

Table 2 The thermal parameters of materials

材料	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	热传导系数 / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	比热 / $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	对流换热系数 / $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
钢筋混凝土	2400	1.74	0.96	20
冻土	1920	2.11	1.0	20

计算中，根据青藏铁路格拉段（格尔木—拉萨）的环境条件，选定平均大气温度为 -20°C ；冻土浅表层：厚度为 3~5 m，平均温度为 -12°C ；永冻层：厚度为 100~120 m，平均温度为 -2°C ；混凝土浇筑温度为 4.5°C 。

4.1 计算模型

冻土水平计算范围为桩群中心两侧各 20 m 的方形区域，竖直范围为地表向下 26 m（桩长 16 m），桩顶与地表标高齐平。单元类型为 10 节点四面体单元，其中各桩取 4 个平面单元，中间密、周边疏，竖向均匀 0.5 m 划分，共 21 800 个节点，14 500 个单元。地表冻土地温取为 -12°C ，地表 4 m 以下冻土地温均取为 -2°C ，地表至 4 m 之间地温按直线分布。其他计算参数同上，三维计算模型如图 2 所示。

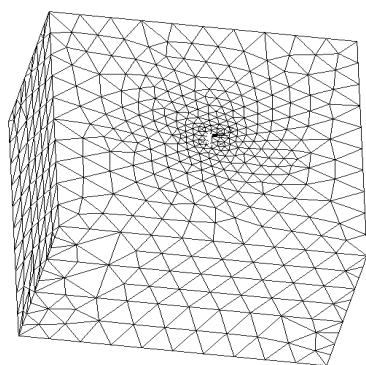


图 2 冻土地层群桩三维计算模型

Fig.2 The three-dimension calculation model of the group piles in permafrost layer

4.2 计算结果分析

在上述计算条件下，研究中主要计算分析了钢筋混凝土钻孔灌注桩在成桩过程中，冻土层在混凝土硬化不同龄期的温度场分布情况、地层中同一温度扩散路径在不同混凝土硬化龄期温度变化规律、距桩周不同距离位置上的点在不同时间温度场的变化规律。

地表平面群桩中心、单桩中心和单桩混凝土外边温度与时间的变化规律如图 3 所示。

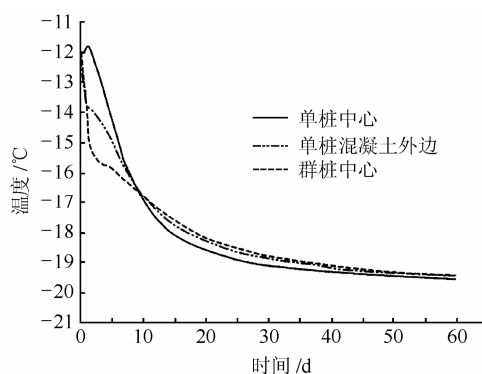


图 3 地表平面温度-时间曲线

Fig.3 The temperature-time cures of the ground plane

地表 4.0 m 以下稳定地温层平面沿群桩中心不同距离各点温度变化规律见表 3。

表 3 沿群桩中心不同距离和时间时的地温值

Table 3 The ground temperature along the center of group piles in different distance and different time

距群桩中心 距离 / m	混凝土典型龄期地温值/ $^\circ\text{C}$				
	3	7	28	60	90
0.0	-1.02	3.39	9.35	5.12	3.10
0.5	-0.53	4.44	9.14	5.00	3.04
1.0	0.06	5.62	8.79	4.81	2.94
1.5	0.80	7.01	8.22	4.51	2.78
2.0	0.45	6.11	7.31	4.09	2.55
2.5	-0.21	4.45	6.26	3.62	2.29
3.0	-1.06	2.08	4.99	3.08	1.99
3.5	-1.58	0.34	3.71	2.51	1.66
4.0	-1.89	-0.99	2.41	1.93	1.32
4.5	-1.95	-1.47	1.33	1.37	0.97
5.0	-1.98	-1.80	0.38	0.83	0.63
5.5	-1.99	-1.92	-0.37	0.33	0.29
6.0	-2.00	-1.97	-0.89	-0.100	-0.02
6.5	-2.00	-1.99	-1.31	-0.500	-0.32
7.0	-2.00	-1.99	-1.56	-0.82	-0.59
7.5	-2.00	-2.00	-1.74	-1.10	-0.83
8.0	-2.00	-2.00	-1.86	-1.33	-1.05
8.5	-2.00	-2.00	-1.91	-1.50	-1.22
9.0	-2.00	-2.00	-1.95	-1.64	-1.38
9.5	-2.00	-2.00	-1.97	-1.74	-1.51
10.0	-2.00	-2.00	-1.98	-1.82	-1.62

从群桩的计算结果来看,冻土在钻孔灌注桩浇筑后,受混凝土水化热的影响较大,冻融圈的范围限于桩周附近 7.0 m 的范围之内,冻土地温受影响的范围在距桩中心 10 m 以上,地层的回冻时间比较长,在混凝土浇筑后 90 d 左右,桩周地温都仍未降至 0℃以下。因此,在群桩桩基施工时,建议各桩灌注混凝土的时间错开。

5 结 论

(1) 地层的地温场受混凝土水化热的影响较大,冻融圈的范围限于桩周附近 7 m 的范围之内,冻土地温受影响的范围在距桩中心 10 m 以上,地层的回冻时间比较长,在混凝土浇筑后 90 d 左右,桩周地温仍未降至 0℃以下。

(2) 在实际施工中,建议各桩灌注混凝土的时间错开,以减少各桩混凝土水化热的相互影响。

(3) 由于在严寒环境温度下,距地表 4.0 m 范围内混凝土降温较快。因此,在桩基施工中,应采取必要措施,防止混凝土发生冻害,如在混凝土中掺加适量早强剂。

参 考 文 献

- [1] 程国栋,何平. 多年冻土地区线性工程建设[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 213—217.
- [2] 周以恪,张绍麟. 建筑材料[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- [3] 刘江南,唐春. 混凝土墙板的水化热升温计算浅探[J]. 南昌水专学报, 2000, 19(1): 13—17.
- [4] 程尚模. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [5] 冯恩民,王金芝,李洪升. 冻土温度场的参数辨识[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 299—303.

对科技论文的书写要求与建议

1. 如何写好中英文摘要

(1) 文摘应包含正文的要点,一般来说,文摘应包含研究对象(目的),研究方法(所用的设备、材料),结果和结论。写英文文摘时,不能因为某些内容不好翻译就弃掉要点。(2) 文摘要尽量简短,尽可能删掉课题研究的背景信息。(3) 文摘中出现的数据应该是最重要,最关键的数据。(4) 不需要自己标榜自己的研究成果。(5) 二次文献信息将脱离原文而独立存在,因此文摘中不能出现图表参数据。(6) 文摘中的内容应在正文中出现,文摘不能对原文进行补充和修改。(7) 文摘中的缩写名称在第一次出现时要有全称。(8) 文摘的句子应尽量简短。主谓语要搭配。(9) 文章作者是写好文摘的最佳人选:随着学科专业的细分,编辑人员不可能了解每一个专业,不能就文摘关于专业知识方面的论述进行修改,这就要求作者掌握写文摘的要领,自己写好文摘。

2. 作者和作者单位

(1) 提供完整对应的中英文对照(英文版除外)

由于处理数据时使用的语言为英语。因此,应确保出现在中文文摘的全部作者的姓名、单位及顺序号、城市及邮编、电子信箱(非必须)、身份头衔等在英文中得到对应反映,不可用 et al 代替后几位,以避免遗漏,损害著作者权益。

(2) 明确姓氏与名字的定位

作者为外族或外国人士时(尤其是中东、日本和朝鲜等国),最好用完全大写表示姓氏,首字母大写表示名字。或按照汉语姓名排列,做到全刊的姓名顺序一致,以避免可能出现的混淆和误解。

(3) 明确标示特定联系人

通常,第一作者即为联系人,这种情况下,可不作任何标识,否则应在首页页脚处指明特定联系人。写出详细的姓名,职称(位),工作单位,通讯地址,邮编,联系电话或 E-mail 地址。

(4) 完整译出单位名称

作者单位既是与作者通讯联系的重要途径,也是保证作者资格得到承认的必要参考。因此,除确性保密性质或全球知名的企事业单位外,单位名称请不要使用几个大写字母所组成的完全缩写或简称。同时,鉴于某些词汇的缩写有所不同,也请不要自行缩写个别单词,以减少出错的可能。

3. 关键词

(1) 尽量不要省去关键词或以分类码代替关键词。(2) 关键词尽量用名词或名词性词组,避免用形容词或形容词性词组做关键词。(3) 中英文关键词要对应。

4. 参考文献

参考文献可以指引读者进一步检索相关的文献,对某一篇文章被引频次的统计,也可以反映出该篇文章的重要性。编辑和作者不能忽略该部分的重要性。参考文献中经常出现的错误有(1)对于参考文献作者,经常出现只有姓没有名,或只有名没有姓的现象;(2)同一期刊,卷期号相同,但文章不同;(3)参考文献重要;(4)出现单词错误;(5)同一种期刊写法不同。

5. 为了便于中外读者查阅参考文献,根据“EI”检索部门的建议,请作者在书写中引用的中文参考文献时,凡有相应的英文题名、作者姓名、作者单位名以及刊名或书名的,请在列出中文文献后,按照中文的书写顺序列出相应的英文。

以上内容由“EI”信息部提供。

《岩土力学》编辑部