

多年冻土区静钻根植桩回冻过程温度场研究

詹钦鹏, 王彪, 王飒

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:基于传热学理论, 给出桩土温度场偏微分方程及边界条件, 结合低温稳定多年冻土区地质背景, 通过有限元数值分析求解, 分析静钻根植桩回冻过程桩土温度场随时间的分布变化规律, 讨论水泥掺入量及水泥石的水泥浆体初始拌入温度对回冻过程的影响。结果表明, 地表下 2 m 以内桩土温度受大气温度影响较明显, 水化热对 1.5 倍桩径以外及桩底 1~2 m 以下范围桩土温度影响甚微, 17 d 后桩侧温度回冻至 0 °C, 27 d 桩侧温度降至 -0.5 °C 以下; 水泥浆体初始拌入温度每升高 5 °C, 回冻时间增长 5~6 d; 水泥掺入量每减少 10%, 回冻时间缩短 1~2 d。静钻根植桩的温度场同样受水化热影响, 但回冻时间较短; 通过调整水泥浆体配合比和降低水泥浆体初始拌入温度可兼顾水泥石强度和回冻时间要求, 达到提高承载力、缩短施工工期的目的。

关键词:多年冻土; 静钻根植桩; 水化热; 水泥掺入量; 初始拌入温度

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)01-0100-07

0 引言

桩基础因其承载能力大、适用范围广、沉降小和稳定性好的特点, 在冻土区得到广泛的应用。目前, 国内学者在桩基温度场特性及冻土冻结强度方面已进行了大量的试验和仿真模拟研究^[1-7]。然而, 由于在冻土地区传统预制桩施工工艺的局限性以及承载能力的不足, 预制桩在冻土区的应用相对较少, 因此上述研究主要集中在冻土区钻孔灌注桩方面。随着施工技术的智能化和高效化, 预制产品在工程中得到了不断的优化和应用, 预制桩的成桩和施工工艺也在不断发展演变^[8]。在全球气候升温和冻土退化的背景下, 水泥石搅拌桩、基坑排桩、挡土墙以及组合桩等水泥石基础将在冻土地基基础设计中发挥重要作用^[9-10]。静钻根植桩作为一种将水泥石与预制管桩结合的新型预制桩具有良好承载力, 但其相关研究主要是由龚晓南院士的科研团队围绕软土地区所开展^[11-12], 暂未在多年冻土区见有与其相关的应用与研究成果。

因此, 基于冻土区钻孔灌注桩回冻过程温度场的变化特性及回冻规律, 结合静钻根植桩的结构及施工特点^[13], 通过数学计算和有限元数值分析的方法, 考虑了大气温度和初始地温场的影响, 以及冻土的相变效应^[7, 14], 给出桩基温度场的二维控制微分方程及边界条件; 对冻土区静钻根植桩回冻过程桩土温度变化规律进行了研究, 并对影响水化热的特殊因素进行分析, 进一步探讨了多年冻土区静钻根植桩回冻过程中的温度场特性以及桩土回冻规律。研究结论将为未来静钻根植桩在冻土地区的设计与施工应用提供重要的理论依据, 丰富多年冻土区桥梁基础形式的选择。

1 数学模型

桩周水泥石水化放热和桩周冻土的冻融过程是伴随相变的瞬态传热过程。该过程中本身就是一个非线性问题的求解过程, 由于轴对称, 此问题的求解可简化为平面二维瞬态温度场的导热偏微分方程求

收稿日期: 2023-10-17 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20230269

基金项目: 石家庄铁道大学 2023 年度研究生创新资助项目(YC202306)

作者简介: 詹钦鹏(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为桥梁工程。E-mail: zqinpeng1998@163.com

詹钦鹏, 王彪, 王飒. 多年冻土区静钻根植桩回冻过程温度场研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(1): 100-106.

解问题,其求解方程式为

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

式中, T 为冻土及水泥土的瞬态温度; ρ 为材料的密度; x, y 为直角坐标系下的坐标; $\lambda(T)$ 为导热系数表达式; $C(T)$ 为材料的比热容表达式,其表达式如下

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_f & T < T_f - \Delta T \\ \lambda_f + (\lambda_u - \lambda_f) [T - (T_f - \Delta T)] / (2\Delta T) & T_f - \Delta T \leq T \leq T_f + \Delta T \\ \lambda_u & T > T_f + \Delta T \end{cases} \tag{2}$$

$$C(T) = \begin{cases} C_f & T < T_f - \Delta T \\ \frac{L}{2\Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2} & T_f - \Delta T \leq T \leq T_f + \Delta T \\ C_u & T > T_f + \Delta T \end{cases} \tag{3}$$

式中, T_f 为冻土冻结温度; ΔT 为冻土发生相变的温度范围值; L 为相变潜热; λ_f 为冻土冻结时导热系数; λ_u 为冻土未冻结时导热系数; C_f 为冻土冻结时比热容; C_u 为冻土未冻结时的比热容。

2 有限元计算模型

2.1 计算模型与材料参数

利用 ANSYS 有限元软件计算低温稳定多年冻土区某桥梁桩基工程在采用静钻根植桩背景下的水化热对桩基温度场的影响。桩土示意图如图 1 所示,预制芯桩内径 0.4 m,芯桩壁厚 0.2 m,整桩直径 1 m,桩长为 30 m,土层厚度 50 m,土层长度 40 m。由于实际模型具有对称性,所以在建立计算模型时,可利用对称性建立二维的桩土轴对称模型,模型尺寸为 20 m×50 m,共划分为 1 150 个单元,1 224 个节点,计算周期为 365 d,有限元计算模型如图 2 所示,土层、水泥土和混凝土的物理学及热力学参数见表 1。

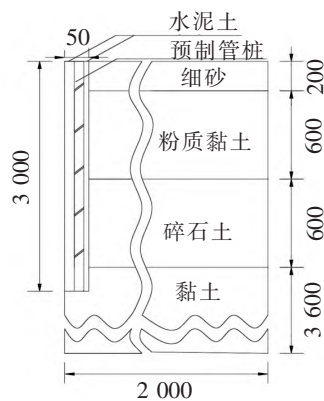


图 1 桩土示意图(单位:cm)

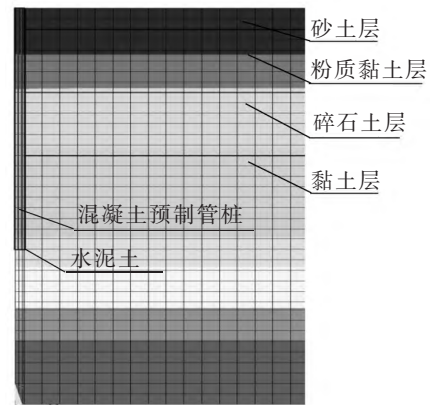


图 2 有限元计算模型

表 1 有限元计算模型中的土层和建筑材料的物理学及热力学参数

参数	厚度/ m	ω / %	ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	C_u / ($\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	C_f / ($\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	λ_u / ($\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	λ_f / ($\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
细砂	2	40.0	1 800	2.56	0.96	0.83	1.80
粉质黏土	6	22.9	1 900	1.39	0.64	1.09	1.93
碎石土	6	18.0	1 400	1.89	0.78	0.81	1.37
黏土	36	20.0	1 600	1.67	1.38	1.25	1.39
水泥土	—	55.7	2 000	1.22	1.22	1.80	1.80
混凝土	—	0.0	2 500	0.92	0.92	1.75	1.75

在采用静钻根植桩的工程背景下,水泥土为水泥浆与钻孔泥浆相互拌合组成的混合材料,其中水泥浆水灰比为 0.6,水泥掺入比为 60%^[13]。水泥土的水化热可看成是低强度混凝土的水化热,并以热源的形式施加于水泥土柱体,由于在搅拌初期水泥的水化放热速率远大于传热速率,因此可把搅拌初期的水泥土作绝热升温处理。

2.2 边界条件与初始值

由于模型不需要考虑边界面上的换热状态,故本模型计算上下边界属于第一类边界条件,左右边界则按照第二类边界条件进行处理,其中边界条件为

$$T(x, y, t) = E \quad y = 50 \text{ m} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \omega \quad y = 0 \text{ m} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad x = 20 \text{ m} \quad (6)$$

式中, T 为土体在 t 时刻,在 (x, y) 位置的温度; ω 为地温梯度,在本计算模型中取 $0.03 \text{ }^\circ\text{C}$; x, y 为计算模型的坐标; E 为地表下附面层温度。 E 的取值随地理位置及气候变化而变化,在本计算模型中,根据文献[2]、文献[7]及工程地质资料,可得 E 的函数表达式为

$$E = T_0 + A \sin \frac{2\pi t}{365 \times 86400} \quad (7)$$

式中, T_0 为年平均气温,根据文献[4],本计算模型取 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$; A 为年气温振幅,本计算模型取 $12.2 \text{ }^\circ\text{C}$; E 为与时间 t 相关的时间温度正弦函数,将此函数作为上边界条件施加于本计算模型上。

计算模型的初始条件为

$$T(x, y, t) |_{t=0} = \begin{cases} T_1 & 0 \leq x \leq 0.2 \text{ m}, 0.4 \text{ m} \leq x \leq 0.5 \text{ m} \\ T_2 & 0.2 \text{ m} < x < 0.4 \text{ m} \\ T_3 & 0.5 \text{ m} < x < 20 \text{ m} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $T(x, y, t)$ 为计算模型中的 (x, y) 点在任意 t 时刻的节点温度; T_1 为水泥土初始拌入温度加绝热升温; T_2 为芯桩植入时温度,温度为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$; T_3 为初始地温,模型计算时取用工程实际地温资料。

2.3 水泥土水化热的处理

水化热属于体载荷,施加的是生热率 $q(t)$,混凝土水化热温度场计算在 ANSYS 中采用瞬态方法,其计算的准确性与水化热公式有很大关系,应根据混凝土类别,选择合适的水化热公式及参数。虽没有可直接参考的有关冻土区水泥土水化放热的模拟方法,但由文献[10]可知水泥浆与泥浆拌合后的凝固过程中所产生的热是水泥土的水化热源。因此,利用 ANSYS 在将水泥土水化热等效为低强度混凝土水化热的基础上,建立水化生热模型,将水泥浆放热作为热源,泥浆作为导热介质,参考混凝土水化放热计算方法,并根据水泥土水泥掺量及水泥标号定义相关计算参数,具体计算公式为

$$Q(t) = Q_0 [1 - \exp(-mt)] \quad (9)$$

$$q(t) = \rho\lambda \frac{dQ(t)}{dt} = W_s m Q_0 \exp(-mt) \quad (10)$$

式中, Q_0 为水泥的水化热; t 为龄期; m 为水化系数,其值随水泥品种、水灰比和浇筑温度的不同而不同; $q(t)$ 为生热率; W_s 为水泥土的水泥用量。

3 有限元计算结果及讨论分析

为探讨静钻根植桩在多年冻土区应用时水泥土水化热对桩周冻土温度场及其回冻规律的影响,利用有限元软件对静钻根植桩在多年冻土区成桩过程中的桩土温度场进行模拟,以此对桩土温度场的分布及温度场随时间的变化规律进行分析。此外,通过对水泥土水泥掺入量和水泥浆体的初始拌入温度进行参数控制,结合仿真分析探讨这 2 种因素对桩周冻土回冻过程的影响。

3.1 桩土温度场分布

为直观反映出静钻根植桩回冻过程桩土回冻过程中的温度变化规律,图 3 给出了水泥石浆体初始拌入温度为 10 °C 时,水泥石拌和完成桩体植入后 3、7、30、60、90、120 d 时的桩土温度场分布图。

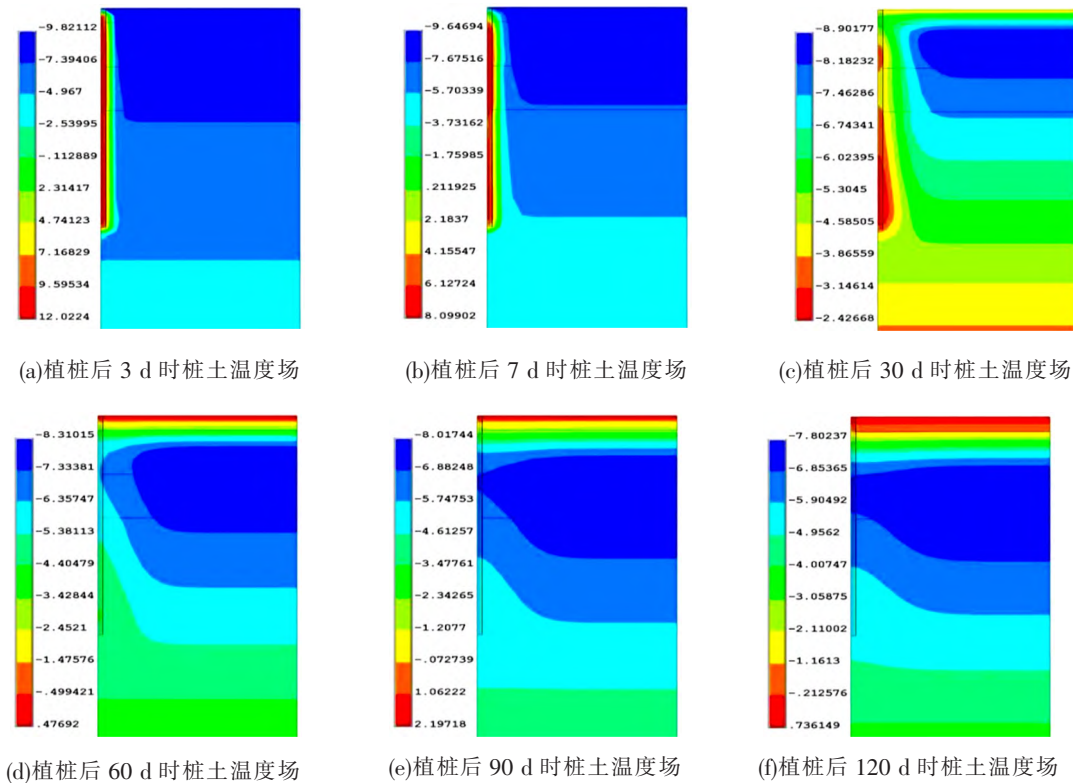


图 3 植桩后桩土温度场分布图(单位:°C)

由图 3 可知,水化热作用使得水泥石内外芯温度迅速上升,随后热量逐渐向周围冻土扩散,水泥石内芯温度在前 10 d 持续上升,且温度峰值高于水泥石外芯;水泥石内芯距地表下 2 ~ 7 m 范围内回冻较慢,直至 20 d 以后才逐渐降至负温,且随时间增长沿桩身自地表下 2 m 向上、7 m 向下,温度逐渐降低,表明混凝土预制管桩壁不良导热特性有效地阻隔了水化热径向传递,使得水泥石内芯热量以竖向传导为主;地表下 2 m 范围内桩土温度回冻时间较短,且越接近地表回冻时间越短,说明接近地表处桩土温度受大气温度影响较明显;1.5 倍桩径以外及桩底 1~2 m 以下范围桩土温度基本不受水化热的影响,随着深度的增加,桩土温度下降的时间在逐渐减小,表明水泥石水化热对桩土温度的影响随深度增加而减小。由文献[2]可知,相较于普通混凝土灌注桩,静钻根植桩的桩土温度同样受水化热的影响,但回冻时间有所缩短,从这一点看,在多年冻土区应用静钻根植桩是有利于缩短施工周期的。

3.2 桩土温度随时间的变化规律

为进一步对多年冻土区静钻根植桩回冻过程桩土温度变化进行研究,结合前文桩土温度分布特征,并参考冻土区现场试验测温点布设[2],取距地表 1、4、8、15、30、32 m 深度处桩中心和沿桩径方向距桩中心 0.2、0.5、1.0、1.5、2.0 m 共 36 个特征点,具体如图 4 所示。给出

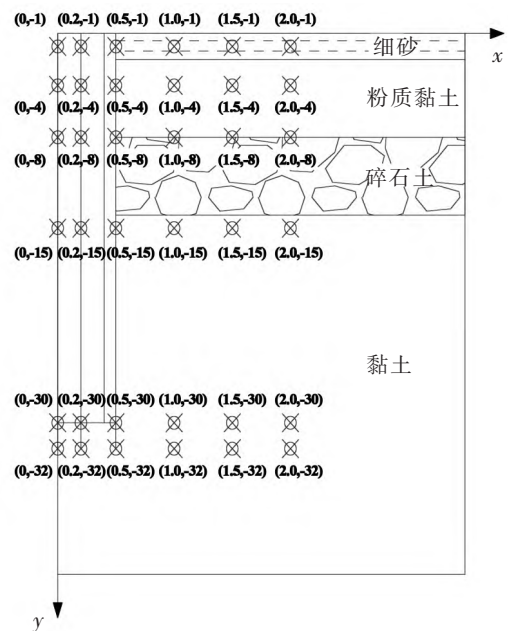


图 4 温度特征点布置示意

各特征点的温度随时间的变化关系,如图 5 所示。

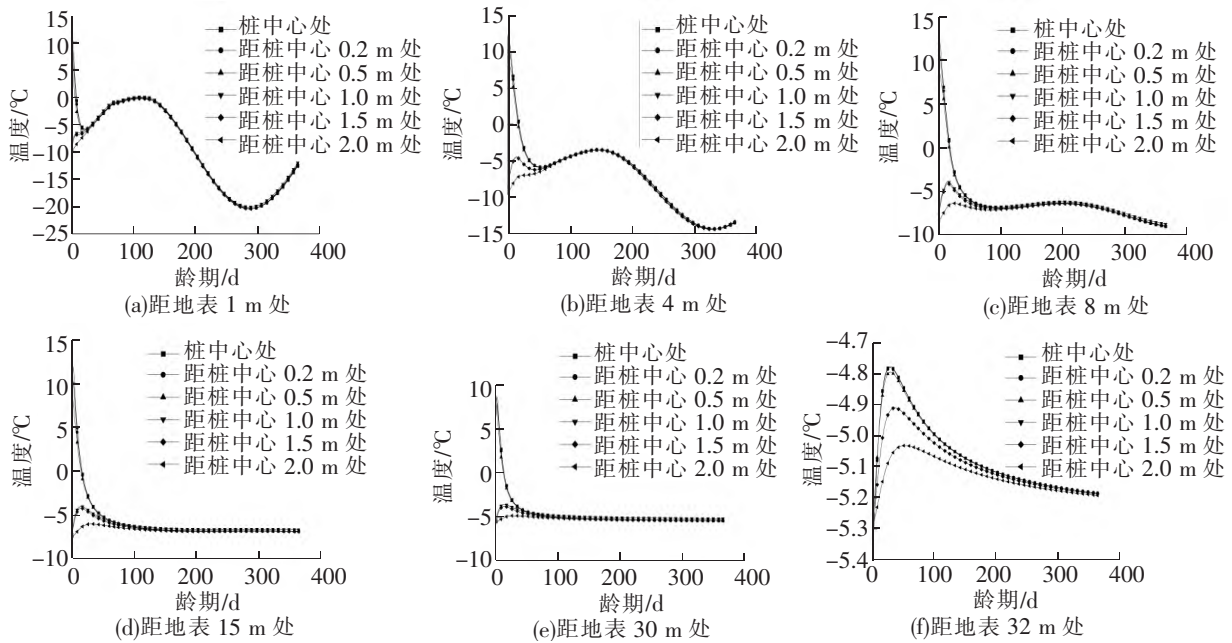


图 5 不同深度处纵向温度-时间曲线

由图 5 可知,不同深度处桩土温度随时间变化的整体趋势相似,沿桩径方向距桩中心越近,升温越快,达到温度峰值时间越短,桩中心及桩侧峰值温度约为 12°C ,出现在 $2\sim 3\text{ d}$ 左右,而距桩中心越远,温度峰值越小,达到峰值时间越长,距桩中心 0.5 m 到 2.0 m 处需要 $5\sim 17\text{ d}$ 左右才达到峰值温度,时间明显滞后。由图 5(a)、图 5(b) 可发现,距地表较近的桩土温度随时间增长存在负温峰位置,桩土温度受到环境季节温度变化的影响较大。图 5 中距桩中心 $1.5\sim 2.0\text{ m}$ 处温度值变化幅度较小,表明水化热的影响范围约为 1.5 倍以内的桩径。随着深度增加,各特征点的温度降低。在桩底 $1\sim 2\text{ m}$ 以下,特征点的温度变化范围为 $-5.2\sim -4.8^{\circ}\text{C}$,变化幅度不大。在这个深度范围内,冻土受大气温度和水化热影响较小,温度相对稳定。

3.3 水泥掺入量对回冻的影响

由式(10)可知,水泥土的生热率与水泥土的水泥用量成正比,因此,为研究水泥土的水泥掺入量对回冻的影响,取距地表 8 m 处桩中心和桩壁特征点,通过设置 40% 、 50% 、 60% (1 m^3) 的水泥掺入量这 3 种工况进行分析计算,计算结果如图 6 所示。

由图 6 可知,不同水泥掺入量下桩中心和桩壁的温度随时间的变化规律相似,随着水泥掺入量的减少,温度峰值随之降低,桩中心和桩壁处温度降低幅度分别为 0.6°C 和 0.25°C 左右;且桩土回冻时间也有所缩短,但不是十分明显,回冻周期缩短幅度在 $1\sim 2\text{ d}$,由此可见,水泥掺入量对于回冻的影响不十分显著,因此在冻土地区使用静钻根植桩时,可以兼顾回冻周期和水泥土强度因素,适当提升水泥土中水泥的掺入量。

3.4 水泥浆体初始拌入温度对回冻的影响

结合文献[2]、文献[7]中混凝土入模温度对桩土回冻的影响,仍取具有代表性的 8 m 桩深处的桩中心和桩壁特征点,通过对水泥浆体的初始拌入温度设置 5 、 10 、 15°C 这 3 组不同工况进行计算分析,以此探究水泥浆体初始拌入温度对静钻根植桩回冻的影响,计算结果见表 2。

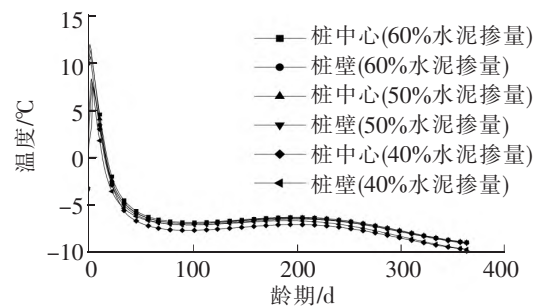


图 6 距地表 8 m 深度处水泥土不同水泥掺入量下的温度-时间曲线

表 2 不同水泥浆体初始拌入温度对温升及回冻的影响比较

水泥浆体初始拌入温度/℃	温度峰值/℃		回冻时间/d	
	桩中心	桩壁	桩中心	桩壁
5	8.61	2.35	12	10
10	12.03	8.39	18	17
15	15.93	13.56	23	22

由表 2 的数据可知,随着水泥浆体初始拌入温度的升高,桩中心及桩壁温度峰值也随着增大,水泥浆体初始拌入温度每增加 5℃,桩中心温度升高 3.5℃左右,桩壁温度升高 5.5℃左右,相对应的各特征点回冻时间也在增长,增长幅度保持在 5~6 d。由此可见,不同的水泥浆体拌入温度也同样比较显著地影响着在多年冻土区使用的静钻根植桩预制的回冻时间,因此在多年冻土区实际进行静钻根植桩的施工时,适当降低水泥浆体的初始拌入温度可以有效缩短施工周期。

4 结论

(1)静钻根植桩回冻过程,混凝土管桩壁的不良导热特性可有效阻隔水化热径向传递,使水泥土内芯热量以竖向传导为主,减少了水化热向周围冻土的传递,有效降低了冻土温度变化峰值,使得相较于常规灌注桩,静钻根植桩回冻时间有所缩短。

(2)接近地表处桩土温度受环境季节温度变化影响较大,桩土温度随时间增长存在负温峰值。

(3)水泥掺入量的变化对温度峰值及回冻时间有积极影响,但影响效果并非十分显著,因此在冻土地区使用静钻根植桩时,可以兼顾回冻周期和水泥土强度因素,适当提升水泥土中水泥的掺入量。

(4)在施工时适当降低水泥浆体初始拌入温度对于缩短施工周期有一定促进作用,根据数值分析结果,建议在多年冻土区进行静钻根植桩施工时将水泥浆体初始拌入温度控制在 5~10℃之间较为合理。

参 考 文 献

- [1]陈坤,俞祁浩,郭磊,等. 基于灌注桩试验的多年冻土区桩-土传热过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1483-1492.
- [2]商允虎,牛富俊,吴旭阳,等. 多年冻土区钻孔灌注桩施工过程热力特性研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(5): 127-135.
- [3]侯鑫,杨斌,陈继,等. 多年冻土区钻孔灌注桩基础早期热稳定性研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1202-1212.
- [4]陈川. 持续低温环境下混凝土灌注桩温度场模拟研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(1): 44-46.
- [5]孙哲,赵林,胡国杰,等. 下边界条件对多年冻土温度场变化数值模拟的影响[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 357-369.
- [6]高晓静,孙铁成,李晓康,等. 冻结作用下粉土-混凝土接触面抗拉强度试验研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 499-507.
- [7]李健宁,孙学先. 水化热对高温多年冻土区桩基温度场的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 2984-2990.
- [8]张亚妹,张立,秦明光,等. 泥岩地基打入式预制桩承载力时效性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(11): 4504-4513.
- [9]ZHANG Qi, ZHANG Jianming, WANG Honglei, et al. Mechanical behavior and constitutive relation of the interface between warm frozen silt and cemented soil[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 30(9): 1-9.
- [10]巢路鑫,冯俊青,杨平,等. MJS 加固试验桩水化热对温度场影响研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(4): 672-678.
- [11]ZHOU Jiajin, GONG Xiaonan, WANG Kuihua, et al. Effect of cemented soil properties on the behavior of pre-bored grouted planted nodular piles under compression[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2018, 19(7): 534-543.
- [12]俞建霖,徐嘉诚,周佳锦,等. 混凝土芯水泥土复合桩混凝土-水泥土界面摩擦特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(8): 93-104, 117.
- [13]凌造,王卫东,吴江斌,等. 静钻根植桩中水泥土力学性能试验[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊 1): 106-113.

[14]岳祖润,程佳. 季节性冻土地区保温护道路基温度场数值模拟[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2015, 28(3): 25-29.

Study on Temperature Field of Refreezing Process of Static Drill Rooted Pile in Permafrost Regions

ZHAN Qinpeng, WANG Biao, WANG Sa

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Based on the theory of heat transfer, a partial differential equation and boundary conditions for the temperature field of pile-soil were listed, and combined with the geological background of low temperature stable permafrost area, finite element numerical analysis was used to seek the solution. The distribution and variation of the temperature field of pile soil during the process of static drilling rooted pile refreezing were analyzed, and the influence of cement dosage and initial mixing temperature of cement slurry on the refreezing process was discussed. The results show that the temperature of pile and soil within 2 m below the surface was significantly affected by the atmospheric temperature, the hydration heat had little effect on the temperature beyond 1.5 times the pile diameter and within 1~2 m below the pile bottom, and after 17 d, the temperature of pile side was frozen to 0 °C, and after 27 d, the temperature of pile side dropped to below -0.5 °C. When the initial mixing temperature of cement paste increased by 5 °C, the refreezing time increased by 5~6 d and the refreezing time was shortened 1~2 d for every 10% reduction in cement dosage. The temperature field of the static drill rooted pile was also affected by the hydration heat, but the refrozen time was shorter. By adjusting the cement slurry mix ratio and reducing the initial mixing temperature of cement paste, the requirements for cement soil strength and refrozen time could be met, thereby improving the bearing capacity and shortening the construction period.

Key words: frozen soil; static drill rooted pile; hydration heat; cement dosage; initial mixing temperature