

文章编号:1673-9469(2022)01-0023-07

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.01.004

半埋管能源桩温度传播特性现场试验及 Matlab 数值模拟

金格格^{1,2}, 陈 龙^{1,2*}, 李长恩², 王 明³, 曾昭宇⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 3. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507; 4. 深圳市综合交通设计研究院有限公司, 广东 深圳 518003)

摘要: 依托浙江某工程路段, 针对一种特殊的半埋管能源桩开展现场试验, 通过对桩身及桩周土体温度等进行监测, 研究了热水循环作用下能源桩的温度传播特性。发现温度荷载作用下桩体温升沿桩长方向先增大后减小, 桩体埋深较深处的换热效率更显著。后通过 Matlab 模拟出不同桩深处距桩中心不同位置处土体温度值, 桩侧临近范围内土体升温显著, 因此在实际应用中需要考虑热温度循环对土体热传递特性和力学性质等物性参数的影响。结果表明: 热水循环 48 h, 对距桩中心 1 m ($2.5D$, D 为能源桩直径) 范围内土体温度有一定影响。延长模拟时间至一年有效工作时间, 对土体温度场的影响范围可达 2.8 m ($7D$)。

关键词: 预应力管桩; 半埋管; 热水循环; 温度热响应; 温度场

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

Field Tests and Matlab Numerical Simulation on the Temperature Propagation Characteristics of Half-buried Energy Piles

JIN Gege^{1,2}, CHEN Long^{1,2*}, LI Chang'en², WANG Ming³, ZENG Zhaoyu⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 3. Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510507; 4. Shenzhen Transportation Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518003, China)

Abstract: Based on an engineering section in Zhejiang, field tests on exceptional energy piles with semi-buried pipes were carried out. By monitoring the temperature of the pile and the soil around the pile, the thermodynamic characteristics of the energy pile under hydrothermal circulation were studied. It was found that the temperature rise along the pile increased first and then decreased under temperature load, which indicated that the heat transfer effect of pile was more obvious at the greater depth. Values of soil temperature at different positions from different pile depths to the pile center were simulated by Matlab, and in the vicinity of the pile side, the soil temperature rose significantly. Therefore, the influence of thermal temperature cycle on the physical parameters of soil, such as heat transfer characteristics and mechanical properties, should be considered in practical application. The results show that the soil temperature within 1 m ($2.5D$, D is the diameter of the energy pile) from the pile center is affected by hydrothermal circulation for 48 hours. When the simulation time is extended to one year, the influence range of soil temperature field can reach 2.8 m ($7D$).

Key words: prestressed pipe pile; semi-buried pipe; hydrothermal circulation; temperature propagation; temperature pattern

收稿日期: 2021-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708175); 中央高校基本科研业务费项目(B210202032)

作者简介: 金格格(1997-), 女, 江苏苏州人, 硕士, 从事能量桩-土相互作用机理等方面的研究。

* 通讯作者: 陈龙(1987-), 男, 江苏盐城人, 博士, 副教授, 从事能量桩-土相互作用机理、软土地基处理新技术开发等研究。

近年来,随着城镇化发展,建筑能耗占比不断增大。能源桩技术的发展为降低暖通能耗、践行节能减排提供了新的可能性。作为一种新型桩基础形式,能源桩将竖直埋管地源热泵系统与传统建筑桩基结合,以换热流体为载体,通过消耗少量的清洁能源,提取浅层地热能进而转化为热能,为室内空调系统等提供能量来源。

目前,国内外许多专家学者已经通过试验、理论研究等对能源桩的受力特性、承载特性、桩周温度传播及热响应等展开了相关分析研究。Brandl^[1]研究发现施加一定程度的热载荷对桩身侧摩阻力、基础承载力等影响较小。Laloui 等^[2]研究发现温度升高使桩体内部产生较大的热应力。Olia 等^[3]建立了不同桩端约束和不同的载荷情况下,单个能源桩在热力学响应下的位移、应变和应力的解析解模型。此外,关于能源桩热响应范围的研究,具有代表性的有:崔宏志等^[4]基于模型试验,发现相变能源桩在饱和砂土中的热传递主要沿径向方向,相变能源桩热交换过程中对桩周土体的温度影响范围约为 2 倍桩径。王哲等^[5]在大量计算分析的基础上,采用最小二乘法拟合出单工况荷载作用下能源桩埋管换热器热响应半径计算公式。孔纲强等^[6]对多次温度循环下能源桩的热力学及承载特性进行了试验研究,发现桩体受热会出现压应力,受冷对应出现拉应力,多次冷热载荷交替作用后桩身整体下沉。骆湘勤等^[7]发现能源桩运行使得桩、土温度升高,二者间的法向应力增大,且热载荷作用下能源桩的承载力有所提高。深厚软土地区桩均为摩擦桩为主,当换热管道采用全桩长布置时,在温度作用下桩身由中点向顶和底两个方向发生位移,反复作用下可能会使得桩土之间的相互作用变弱,不断改变桩顶位移,从而降低桩身的承载力。黄旭等^[8]发现热循环中能源桩的换热效率高于冷循环,且热循环和冷循环都将改变桩顶位移,带来部分不可逆的塑

性变形,影响上部结构安全。桂树强等^[9]在叠加多周期温度循环后,试验发现桩侧土体的侧向约束导致了桩体中产生了由温度改变引起的约束力。因此,在全埋管能源桩已有的研究基础上,本试验引入一种新型半埋管能源桩,即仅在桩身上部埋管,桩身下部不受温度影响,桩土之间不存在相互位移的情况,处于稳定状态。这种埋管方式相较全埋管桩,能够在一定程度上削弱侧摩阻力的影响,保证桩的承载力。依托某半埋入式能源桩现场试验,采用并联三 U 型埋管形式^[10],具体对热载荷作用下能源桩埋管深度范围内的桩周土体温度及其影响范围等进行了研究分析。

1 工程概况

本次试验依托浙江某盖板涵拟建路段,施工场地下方存在多层软土,拟采用 23 m 长预应力管桩进行地基处理,在预应力管桩中放置水管布设温度传感器,形成能源桩。

能源桩打设处勘探孔土层分布与相应的物理力学性质指标,见表 1。

2 试验概况

2.1 能源桩仪器布设

试验采用长 12 m、3U 型并联换热管路与长 23 m、外径 0.4 m、壁厚 0.06 m 的预制预应力管桩组合。形成的能源桩横截面布置见图 1。具体工程概况与能源桩仪器布置与文献[11]相同。桩身及桩周土温度的量测分别选用 PT100(A 级)薄膜铂电阻芯片温度传感器及 T 型 PT100 铂电阻防腐蚀酸碱探头,精度可达: $0.15+0.002 \times |t|$, $(-50 < t < 200\text{ }^{\circ}\text{C})$ 。

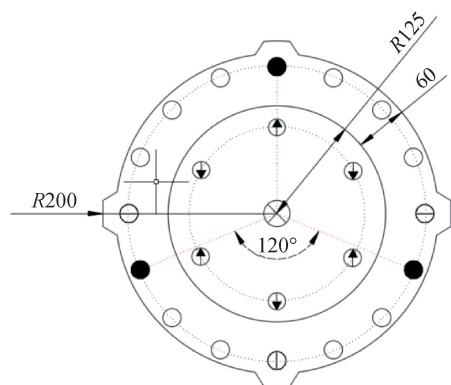
在桩中心处布置温度传感器的同时,在桩周一定范围内布设温度传感器。即距桩中心 0.3、0.5、0.9、1、1.5 m 位置处布置木桩孔,在桩深 2.7、

表 1 土层分布及相应物理力学参数

Tab. 1 Distribution of soil layer and its physical and mechanical properties

序号	土层	厚度/m	含水率 $\omega/\%$	天然湿密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	取土深度/m
1	杂填土	2.2	36.30	1.71	1.45	0~1.8
2	软粘土	2.5	39.30	1.87	1.03	2.7~3.2
3	淤泥质粉质粘土	4.4	23.40	1.89	0.79	4.7~5.2
4	淤泥质粉质粘土	4.4	27.03	1.94	0.79	7.6~8.1
5	粉质粘土	5.0	44.73	1.76	1.25	9.1~9.6
6	粉质粘土	5.0	55.84	1.77	1.42	12.1~12.6
7	淤泥质粉质粘土	4.0	51.39	1.87	1.22	14.1~14.6

5.2、7.7、10.2 m 处的木桩孔内埋设温度传感器,将温度传感器绑定在方形木桩的 3 个面上,用来测量热循环作用下桩周土体的温度变化,见图 2。



- 注: 自来水管 (直径20, 水流向下)
 自来水管 (直径20, 水流向上)
 原有设计预应力钢筋 (直径7)
 附加钢筋应力计
 温度传感器

图 1 能源桩横截面 (单位:mm)

Fig. 1 Cross section of the energy pile

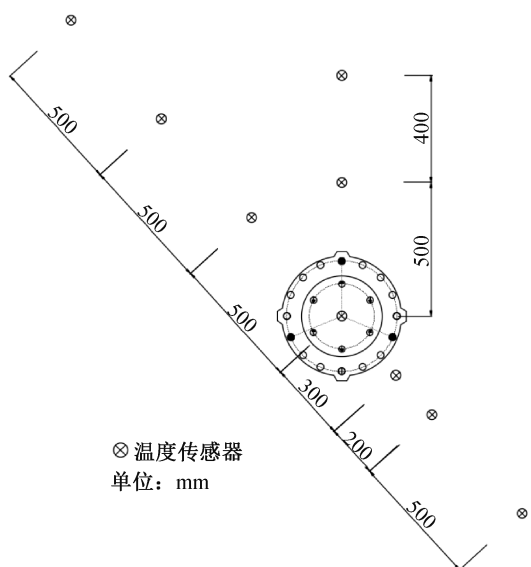


图 2 桩周土体温度测点布置

Fig. 2 Temperature measurement points around energy pile

2.2 试验方案

如图 3 所示,在桩内中空处布置 3 个水力回路,内置 360°弯头连接,设置循环水力回路。不同于常规全埋管能源桩,本次试验采用半埋管形式,因此仅在桩身上部 12 m 左右范围内设置换热管道。能源桩通过柴油锤打桩机打设,待预应力管

桩打设到指定深度,对连接好的并联 3U 型 PE 换热管路进行吊装就位并固定,再将管路与水池和电泵相接。

将能源桩进行热水循环试验,期间热水连续循环两昼夜,数据测量时间主要是集中在每天 7:00 至 17:00 之间,每间隔 1 h,记录该时刻对应桩身以及桩周土体温度变化。

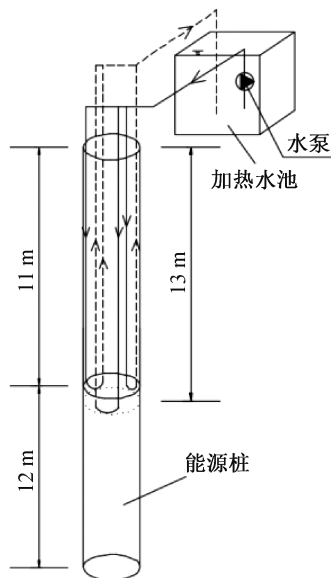


图 3 能源桩水循环示意图

Fig. 3 Water circulation of energy pile

3 试验结果及讨论

3.1 桩身温度变化

图 4、图 5 分别为热水循环作用下能源桩桩身温度及对应增量随桩深变化曲线。如图所示,随着桩内热水的循环,桩身温度逐渐增加,连续通热水 48 h 后,不同深度处的温度升高值介于 26.69 °C ~ 32.75 °C 之间,其中 10.2 m 深度处初始温度较低但升温较快。说明实际热水循环过程中,能源桩桩身温度变化趋势一致,但是不同桩深处,温度存在明显差异。因此,即使温升一致,局部温度差异也易增加桩身局部应力的复杂性,导致裂缝产生。此外,桩身温度增量沿桩长方向大致呈先增大后减小的趋势,表明在换热管道埋深较深处管道与桩身换热效率更高,而桩顶部位受环境温度影响更大。

3.2 不同埋深处热循环对桩周温度影响范围

图 6、图 7 为初始时刻和通热水循环 48 h 后,桩深 2.7 m 和 7.7 m 处桩周土体温度分布图。比

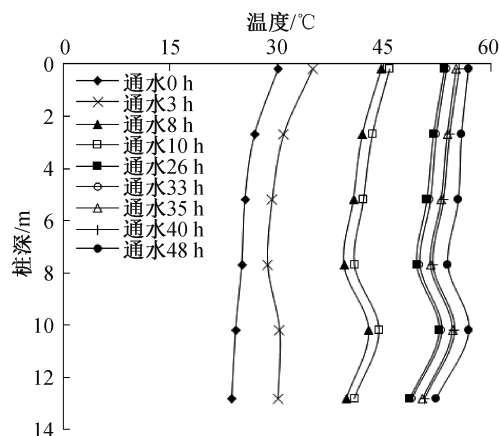


图4 不同桩深处温度变化

Fig. 4 Temperature variation in different pile depths

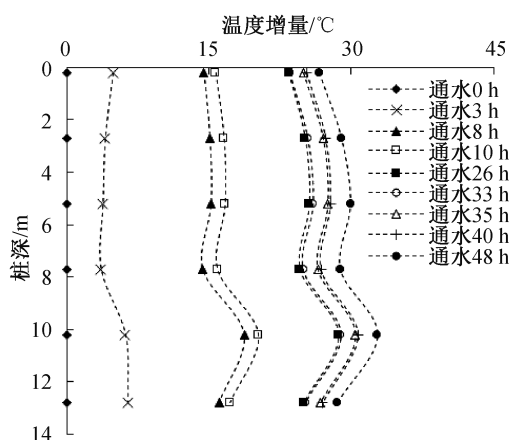


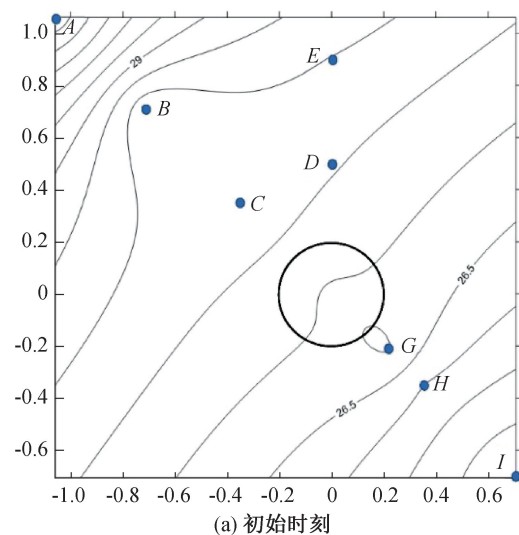
图5 不同桩深处温度增量变化

Fig. 5 Variation of temperature increment in different pile depths

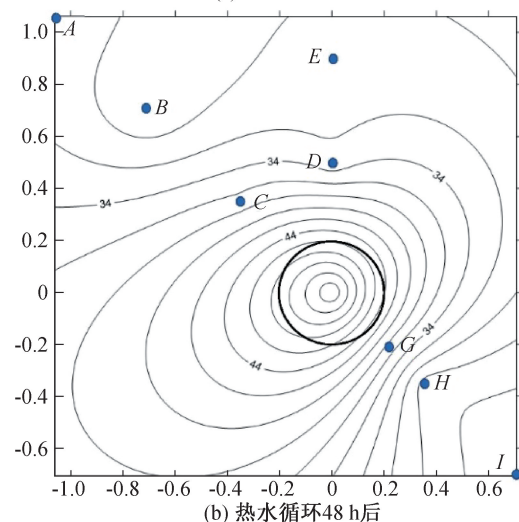
较图 6(a)、(b)发现,初始时刻桩周土体温度稳定且较为均匀,通热水循环 48 h 后,能源桩桩周等温线变得很密集,温度梯度显著加大,距离较远处等温线则较为稀疏,温度梯度逐渐减小。在试验进行的 48 h 内,随着与桩中心距离的增大,土体温度受影响程度逐渐降低,当距桩中心超过 0.5 m ($1.25D$) 以后,桩内热水循环对桩周土体温度的影响可忽略不计。由此可知,短期内热水循环对桩周土体温度场影响小,影响范围有限。且比较图 6(b)和图 7 可见,通热水循环 48 h 后,桩深 2.7 m 处桩周土体的温度沿桩身分布梯度相较于 7.7 m 桩深处明显更大,表明较大桩深处的热传递效果更加明显。

3.3 利用 Matlab 对桩周温度传播情况进行模拟

如图 8 所示为利用 Matlab PDE 工具箱模拟通热水循环 6 h 和 48 h 后,桩深 7.7 m 处桩周土体温度变化情况。



(a) 初始时刻



(b) 热水循环 48 h 后

图6 桩深 2.7 m 处桩周土体温度分布图(单位:m)

Fig. 6 Temperature distribution of soil around pile at 2.7 m deep

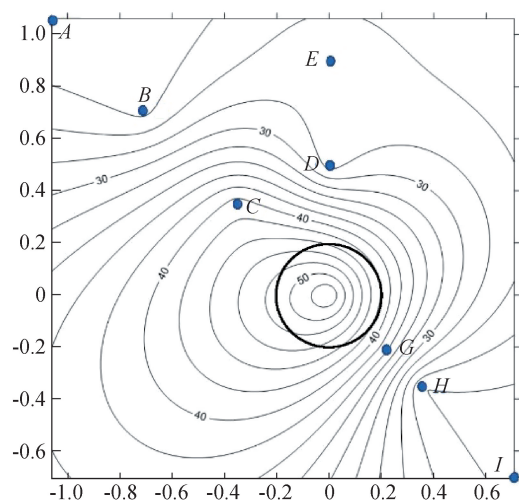
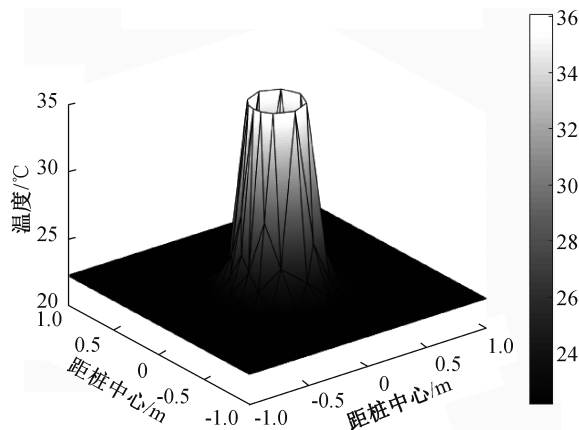
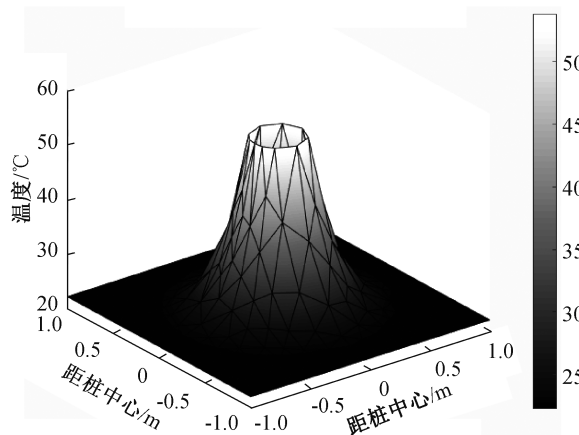


图7 热水循环 48 h 后桩深 7.7 m 处桩周土体温度分布图(单位:m)

Fig. 7 Temperature distribution of soil around pile at 7.7 m deep after 48 h heating



(a) 热水循环6 h后桩周土体温度



(b) 热水循环48 h后桩周土体温度

图 8 桩深 7.7 m 处桩周土体温度变化 Matlab 模拟云图

Fig. 8 Temperature distribution of soil around pile at 7.7 m deep simulated using matlab

热传导方程的一般形式:

$$C_p \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) - \nabla \cdot (\lambda \nabla u) = q_v \quad (1)$$

式中, u 为所求物体温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, s ; q_v 为物体内热源热流密度, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在计算时将热传导方程标准化为抛物线型方程:

$$au + d \cdot \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot (c \nabla u) = f \quad (2)$$

式中,对比两式可以发现: $d = C_p \rho$, $c = \lambda$, $f = au = q_v$ 。将表 2 中参数带入上述常量与变量,可以得出: $a = 0$, $d = C_p \rho = 3\,627\,800 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$, $c = \lambda = 1.2 \times 3\,600 = 4\,320 \text{ W}/\text{m}$, $f = 0$ 。

表 2 模拟参数部分取值

Tab. 2 Values of the simulation parameters

导热系数 λ / $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$	比热 C_p / $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$	土体密度 ρ / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
1.2	1 870	1 940

定义 Dirichlet 边界条件和 Neumann 边界条件:

$$hu = r \quad (3)$$

$$n \cdot (c \nabla u) + qu = g \quad (4)$$

后将桩身温度变化拟合为二次多项式,因此输入参数 r 为二次多项式。又因为桩与土接触面为第一类热传导边界条件,设置 Dirichlet 边界参数: $h = 1$ 。同时远端土体忽略局部热量的损失,设置 Neumann 边界参数 $g = 0, q = 0$ 。

使用 Matlab PDE 工具箱进行求解。

如图 9 所示模拟的各桩深处温度曲线与实际测温点的温度曲线变化趋势基本一致,但是不同桩深处温度存在差异。桩深 2.7、5.2、7.7、10.2 m 处模拟值与实测值最大误差分别 9.84%、8.05%、9.66%、8.94%,模型较为合理。误差可能是因为实际试验情况相较于模拟的理想状态存在一定的热量损失,所以桩周土体温度模拟值高于实测值。此外,由于建筑物的构筑与能源桩侧土体温度梯度的存在,一定程度上会使得桩周土体含水量变化,土体的热力学参数随之改变。且桩周土体升温不同导致的桩周土体含水率差异,也会影响桩周土体的热传递特性和力学特性。但是模拟同一桩深土层时取的导热系数、比热为确定常数,这也可能导致模拟结果与实测值存在误差。

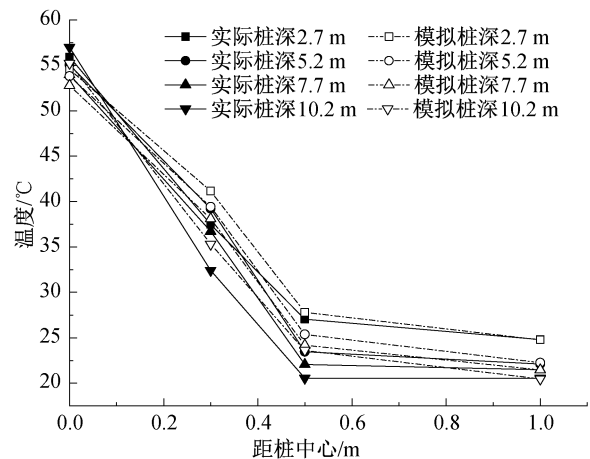
图 9 不同桩深处距桩中心不同位置处土体温度
实测值和模拟值对比图(48 h)

Fig. 9 Comparison of measured and simulated soil temperature at different positions from pile center in different pile depths (48 h)

为了充分研究长期温度作用对于能源桩桩周土体的影响,将 Matlab 模拟程序中的时间延长,获得了如图 10 所示的距桩中心 0.3 m 桩深 7.7 m 处土体温度增量变化情况。通过模拟程序发现,初始阶段随着桩身温度不断升高,桩土温差扩大,土

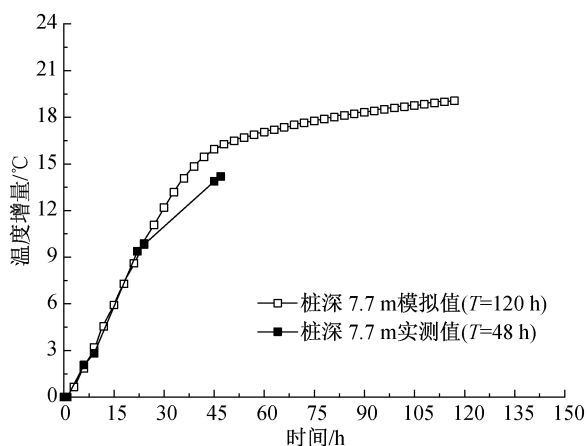


图 10 距桩中心 0.3 m 桩深 7.7 m 处土体温度增量模拟值
Fig. 10 Simulation of soil temperature increment at 7.7 m depth and 0.3 m from pile center

体温度增量不断增大,土体热交换显著加剧与实测结果变化趋势一致,说明模型具有一定的准确性,此时土体处于非稳态导热初始阶段;随着时间的推移,距桩中心 0.3 m 处土体温度累积上升,与桩壁温差不断减小,桩侧土体热传导有效传播效率不断降低,温度增量趋于稳定。

为了模拟热循环年均有效工作时间内桩周土体温度场变化情况,将程序模拟时间延长至四个月,见图 11。由于桩深 7.7 m,现场实测土体年变温幅度 $<0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此不考虑土体季节性温度变化对模拟结果的影响。由图可知热循环初期,距桩中心 0.5 m ($1.25D$) 处土体温度快速上升,后期温度增速减缓并趋于稳定,结束时温升为 $18.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。距桩中心 1 m ($2.5D$) 处,土体温度增量相较 $1.25D$ 处下降近一半,结束时温升约为 $10.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。距桩中心 2 m ($5D$) 与 2.8 m ($7D$) 处土体温度变化相对较小,结束时温升为 $3.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $1.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。距桩中心 4 m ($10D$) 位置处土体温度无明显变化。上述结果与王哲等^[5]获得的模拟相同桩径下土体热响应温度影响范围大致相同,考虑热扩散系数等误差后,可得模拟运行周期 1 个月时,土体温度影响范围为 $4.9D$,2 个月时为 $6.5D$,4 个月时为 $7.8D$ 。综上,在一年有效工作时间内,能源桩热循环可对距桩中心 2.8 m ($7D$) 内土体温度产生一定影响。因此,对于在实际工程中需要考虑长期热温度循环作用对桩周土体热传递特性与热力参数的影响。

4 结论

本现场试验由于进水温度设置较高,且埋管

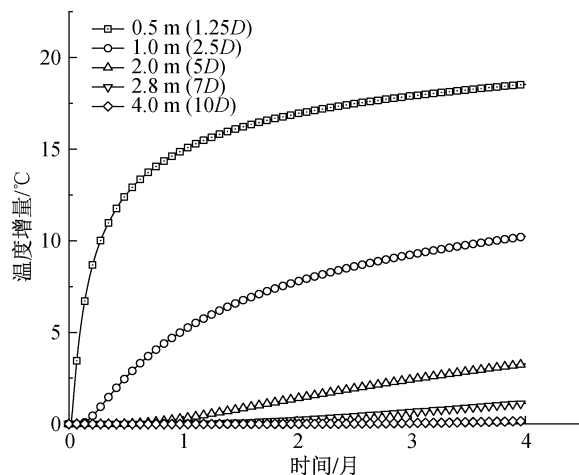


图 11 桩深 7.7 m 处距桩中心不同桩径位置处土体温度增量模拟值对比图(4 个月)

Fig. 11 Comparison of simulated of soil temperature increment temperature changes at different pile diameter positions at 7.7 m depth from pile center(4 months)

设置形式为并联三 U 型,满足能源桩所需换热效率要求,因此试验采用半埋管布置形式有利于减少桩身由于热效应产生的塑性变形,提高桩身承载力。同时缩小温度对桩周土体、特别是桩中下部土体的热效应影响范围。通过对热温度循环作用下半埋管能源桩热力学特性进行现场试验以及 Matlab 数值模拟,结论如下:

1) 能源桩桩身温度增量沿桩长方向大致表现为先增大后减小的趋势,表明在换热管路埋管较深处的桩身热传递效果更显著。

2) 热水循环 48 h 对桩周土体温度影响范围是有限的,实际测量得出的温度影响范围约为距桩中心 0.5 m ($1.25D$) 处,且试验表明较大桩深处的热传递效果更加明显。

3) 运用 Matlab 进行数值模拟,能够为在一年热循环有效工作时间(4 个月)内桩侧温度传递趋势进行解释。综合一年有效工作时间,能源桩对于桩周土体的温度影响范围可达 $7D$ 。因此在实际工程中需要考虑长期热温度循环作用对土体热传递特性和力学性质等物性参数的影响。

参考文献:

- [1] BRANDL H. Energy Foundations and Other Thermoactive Ground Structures [J]. Géotechnique, 2006, 56 (2): 81-122.
- [2] LALLOUI L, NUTH M, VULLIENT L. Experimental and Numerical Investigations of the Behaviour of a Heat Exchanger Pile[J]. International Journal for Numerical and

- Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30 (8): 763-781.
- [3] OLIA A, PERIC D. Thermo-Mechanical Soil Structure Interaction in Single Energy Piles Exhibiting Reversible Interface Behavior[J]. International Journal of Geomechanics, 202121(5):04021065.
- [4] 崔宏志,邹金平,李宇博,等. 饱和砂土地基中相变能源桩的热响应研究[C]//中国土木工程学会 2019 年学术年会论文集. 上海, 中国: 中国土木工程学会, 2019: 32-44.
- [5] 王哲,刘耶军,张正威,等. 能源桩全生命周期热响应半径简化计算方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2020, 51(2): 514-522.
- [6] 孔纲强,王成龙,刘汉龙,等. 多次温度循环对能量桩桩顶位移影响分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 958-964.
- [7] 骆湘勤,刘干斌,郑言东,等. 考虑温度影响的能源桩桩-土界面荷载传递模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 171-179.
- [8] 黄旭,孔纲强,刘汉龙,等. 循环温度场作用下 PCC 能量桩热力学特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 667-673.
- [9] 桂树强,程晓辉. 能源桩换热过程中结构响应原位试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1087-1094.
- [10] 刘俊,张旭,高军,等. 地源热泵桩基埋管传热性能测试与数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(6): 727-731.
- [11] 陈龙,陈永辉,李行,等. 冷水循环作用对半埋管能源桩承载特性影响试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4): 551-556.
- (责任编辑 王利君)