

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221020005

长期循环温度下能源桩-土热传播特性研究*

胡逸凡¹, 陈 龙^{1,2}, 张嘉乐¹, 陈永辉^{1,3}, 金格格¹

(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. 南通河海大学海洋与近海工程研究院, 江苏 南通 226334; 3. 河海大学苏州产业研究院, 江苏 苏州 215000)

摘要: 开展了桩长 52.5 m、桩径 1.05 m 的能源桩-土热传导离心模型试验, 揭示了三十个周期的冷热循环温度作用下能源桩-土传热规律, 基于 ABAQUS 有限元数值模拟, 建立了桩周土体温度场长期数值计算模型, 并将其与离心模型试验结果进行了对比验证。结果表明: 各循环温度区间变化模拟值与实测值整体波动具有很好的一致性, 各周期内最大相对误差为 5.6%, 整体误差较小, 验证了模型的合理性; 长期冷热循环温度作用下, 能源桩整体运行效率存在降低趋势; 桩端土体的温度变化滞后于桩体中部区域土体, 因此在进行能源桩内管道布设时可以考虑桩端部分区域内适当加密, 提高能源桩的换热性能; 热循环阶段, 模拟值变温区峰值高于实测变温区峰值, 而在冷循环末期, 模拟值较小, 且距桩不同距离位置处实测值相对应的变温时间区间, 相较模拟值变温区间均存在一定程度的后延, 且循环周期越多时间区间后延效应越明显。

关键词: 能源桩; 离心机试验; 冷热循环; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TU83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0697-08

Study on the Heat Propagation Characteristics of Energy Pile-Soil under Long-Term Cycling Temperature

HU Yifan¹, CHEN Long^{1,2}, ZHANG Jiale¹, CHEN Yonghui^{1,3}, JIN Gege¹

(1. Key Laboratory of Rock Mechanics and Dam Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Institute of Ocean and Offshore Engineering, Nantong Hohai University, Nantong 226334, China; 3. Suzhou Industrial Research Institute, Hohai University, Suzhou 215000, China)

Abstract: A centrifugal model test was conducted on an energy pile-soil heat conduction system, featuring a pile length of 52.5 meters and a pile diameter of 1.05 meters. This study investigated the heat transfer patterns between the energy pile and the surrounding soil over 30 cycles of cold and hot temperature. A long-term numerical model for the temperature field around the pile was established using ABAQUS finite element simulations and validated against centrifugal model test results. The following conclusions were drawn: the simulated temperature variations within each cycle closely matched the measured values, exhibiting consistent overall fluctuations and a maximum relative error of 5.6%,

* 收稿日期: 2022-10-20; 修回日期: 2023-02-15

基金项目: 南通市基础研究计划项目(JC22022087)、中央高校基本科研业务费项目(B210202032)、国家自然科学基金(52178327)资助

作者简介: 胡逸凡(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事软土地基处理等方面的研究。E-mail: 1430283397@qq.com

confirming the model's accuracy. The overall operational efficiency of the energy pile showed a declining trend under long-term thermal cycling. Temperature changes in the soil at the pile end lagged behind those in the soil at the mid-section of the pile. To enhance the heat exchange performance of the energy pile, it was suggested to increase the density of the pipeline layout within the pile end area. During the heating stage of the thermal cycling, the peak temperature in the simulated variable temperature zone was higher than the measured peak temperature. Conversely, at the end of the cold cycle, the simulated values were lower. Additionally, the measured temperature variation time intervals at different distances from the pile lagged behind the simulated time intervals. This lag effect became more pronounced with an increasing number of cycles.

Keywords: energy pile; centrifugal test; thermal cycling; temperature field; numerical simulation

0 引言

能源桩将桩基与竖直埋管换热器相结合,将换热管埋设于建筑物桩基中,一方面免去了重新设置竖直埋管换热器所需的高昂钻孔费用和回填材料费用,有更高的经济效益;另一方面桩基埋管换热器直接利用建筑桩基已有空间布置埋管,进一步节约地下空间资源,也因此更适用于城市等地下空间较为稀缺,又存在巨大能源消耗的建筑群桩基系统设计中。

能源桩在较长期的设计使用年限内,需要长期承受以年为单位的四季温度交替导致的部分地温变化对能源桩热效率的影响,以及桩身内部长期冷热温度循环作用下对桩周土体的长期温度影响,从而保障能源桩的长期正常运转。国内外众多学者通过现场试验对能源桩的桩周温度传播及热响应等展开了相关分析研究。T.Amis等^[1]在伦敦Lan-beth学院的能源桩测试中,发现桩身平均温降19℃,并且由于能源桩附加温度作用的影响,能源桩长期运行过程中桩周土体热力学参数一定程度上将发生变化。A.K.Sani等^[2]研究发现加热功率的大小会影响桩周围土壤的温度变化,从而影响系统性能。赵海丰等^[3]分别比较了制冷、制热阶段不同时刻桩侧土体横向与纵向温度场分布特征,发现桩端温度上升或下降速率慢于桩体中间变温速率。常虹等^[4]开展室内模型试验,发现升温过程中任意时刻土体竖直面上的温度曲线呈现梭形;降温过程如沙漏,这也说明接近能源桩中间部位的土体温度扩散速度快于桩上、下两端。陈家威等^[5]通过开展

层状地层能源管桩长期原位热响应试验来研究同一地层中土体温度变化规律,发现距离能源桩越近的土体,受能源桩温度影响越大且响应越敏感,随着距离增大,温度影响变小;土体温度响应存在延迟效应,且距离能源桩越远,延迟越大。

现场试验存在一定程度的局限性,为了保障试验结果的可靠性,国内外一些专家学者针对能源桩的热力耦合问题开展了大量数值分析。C.Pasten等^[6]发现与单一温度变化相比,频繁的循环温度作用可能在桩中和桩-土界面引起不同大小的热负荷。杨涛等^[7]采用多场耦合有限元分析方法,发现桩周土温度的变化随温度荷载的增加而增大,影响主要发生在桩外10倍桩径范围内。A.F.R.Loria等^[8-10]将离心机试验数据与有限元模拟结果进行比较,发现离心条件下能源桩的热扩散特性与真实时间尺度有所不同,但能较好地模拟桩体热力学特性。徐健等^[11]基于现场试验,采用数值模拟方法研究了冬季工况下5种不同流速、5种不同布桩形式对能源桩热力响应特性的影响。

桩周土体温度变化会影响到桩土的相互作用,进而对桩的承载力和变形有较大影响。目前针对能源桩传热过程中桩周土体温度场研究较多,但主要根据考虑桩径和埋管形式的不同提出了各种传热模型,并进行了大量理论计算和数值模拟^[12-15],对桩身温度的分布规律讨论较少。因此本文针对长期冷热循环温度作用下,长细比为50的能源桩温度传导特性开展研究,结合离心模型试验以及有限元模拟,对桩周土体温度场进行分析,研究了能源桩运行过程中地桩周温度场分布特征,为指导能源桩设计提供了科学依据。

1 离心模型试验

1.1 试验方案

离心机试验在交通运输部天津水运工程科学研究院的土工离心设备(TX-C500)上进行,试验选用的重力加速度为70g($N=70$)。表1为离心模型中相关比例准则,其中 N 为重力加速度倍数。

表1 离心机模型试验比例尺
Table1 Scale of centrifuge model test

| 参数 | 相似比 | 参数 | 相似比 |
|--------------------------|-------|--------|-------|
| 加速度/($m \cdot s^{-2}$) | $1/N$ | 应力/kPa | 1 |
| 温度/ $^{\circ}C$ | 1 | 应变 | 1 |
| 热传导/s | N^2 | 蠕变 | 1 |
| 固结/s | N^2 | 位移/m | N |
| 长度/m | N | 轴向刚度/N | N^2 |

模型箱内部尺寸为:1 000 mm×400 mm×1 000 mm,用于模拟原型为:70 m×28 m×70 m(长×宽×高)的土体区间。模型箱内设置长径比为50的模型桩,桩长 $l=750$ mm;桩直径 $D=15$ mm;对应原型桩长 $L=52.5$ m;桩直径 $D=1.05$ m。

图1为离心机模型温度传感器布置示意图。在模型桩两侧共布置七列温度传感器,桩体右侧布置四列,与桩轴线距离分别为1.3 D 、2.7 D 、4.7 D 、6.7 D ;桩体左侧布置三列,与桩轴线距离分别为2.7 D 、4 D 、5 D 。每列由三个温度传感器组成,距离试验箱土体表面为试验共布置三排温度传感器,与桩轴线距离分别为205、375、545 mm。双侧温度传感器分别监测全程温度循环作用下桩周土体不同位置处土温变化情况,桩体及桩周温度传感器布置。

1.2 土层制备

选用1 000 mm×400 mm×1 000 mm(长×宽×高)的模型箱,箱底设置多孔排水管用于进行砂土饱和。桩周土体及桩底持力层选用标准丰浦砂。丰浦砂由带棱角的石英颗粒组成,颗粒比重 G_s 为2.65,平均粒径 d_{50} 为0.20 mm,最大孔隙比 e_{max} 为0.977,最小孔隙比 e_{min} 为0.597,不均匀系数 C_u 为1.7,极限状态的剪切摩擦角 φ 为31°。

砂样制备采用砂雨沉积法进行,周内壁面每隔50 mm标记一条刻度线,是为了使每次上升砂桶位

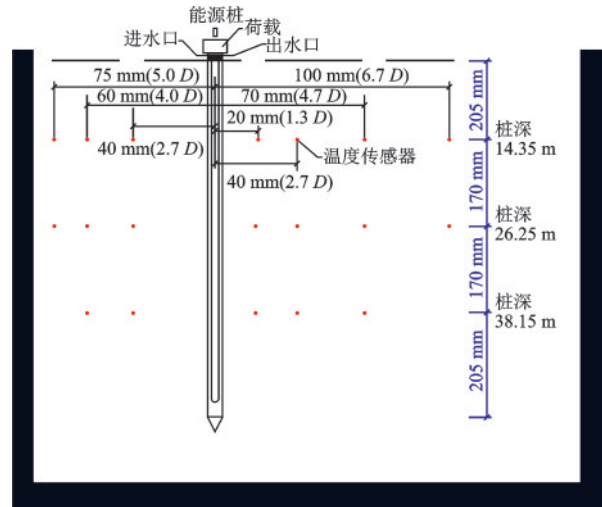


图1 离心机模型温度传感器布置示意

Fig.1 Schematic diagram of temperature sensor layout in centrifuge model

置可以保持一致,标注完成后在箱体内壁刷硅油保护试验箱。接着,根据四周标记的刻度位置,保持砂桶上升高度一致,均匀自下而上分层撒砂。然后,当模型箱内完成150 mm深度撒砂后暂停撒砂。

1.3 温度循环系统

冷热循环设备固定在离心机机臂上,由气动隔膜泵、冷却装置、加热装置、保温绝管道、温控器及组成,如图2所示。

本试验温度荷载的施加过程为:在离心机旋转至70 g后,确保离心机稳定旋转的同时各数据采集系统能稳定运作;稳定旋转10 min(相当于原型34 d)稳定固结后,系统开始模拟制热工况:打开气动隔膜泵及加热棒,水箱温度在40 $^{\circ}C$ 稳定后,保持整体模型箱内循环液流速不变,热水循环模拟35.265 min(相当于原型120 d,即冬季能源桩制热作用,热量由桩周地基土体传至桩体,与循环液发生热交换),随后进行冷循环:关闭加热棒,打开制冷机,水箱温度降至-1 $^{\circ}C$ 稳定后,保持水箱温度恒定,冷水循环35.265 min(相当于原型120 d),循环液采用多效防冻液,防冻液冰点不高于-25 $^{\circ}C$,沸点不低于107 $^{\circ}C$,能够保证在加热和制冷条件下的液体传热状态。完成后关闭制冷机,继续打开加热棒。之后便是重复上述热冷循环全过程,直至循环次数达到30次,关闭制冷机,并且停止加热,关闭加热棒、制冷机及气动隔膜泵,试验结束。

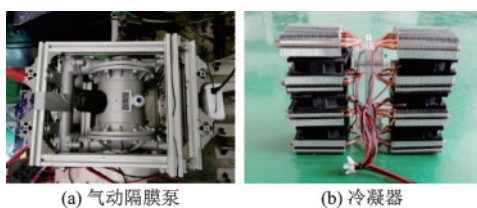


图2 冷热循环设备

Fig.2 Thermal cycling equipment

2 数值模拟

2.1 桩身及桩周土体建模

创建桩身模型,考虑到单个周期长,周期数较多,将离心试验模型中的能源桩桩体进行简化建模,如图3所示。

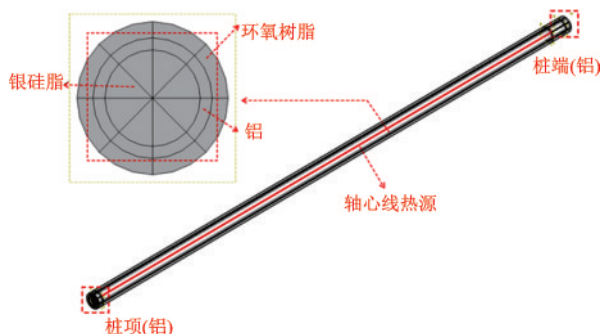


图3 模型桩建模示意

Fig.3 Schematic diagram of model pile construction

离心试验模型桩从内至外由银硅脂、U型换热管、铝管、环氧树脂四部分组成,桩身建模过程中,将离心试验中银硅脂层中布设的U型换热管,简化为有限长线热源布设于桩体中轴线上,对桩身及桩周土体施加循环温度荷载作用条件,导入对应试验实测真实时间尺度下换热流体温度来模拟试验实际温度荷载情况。模拟原型尺寸桩,桩长52.5 m,桩径1.05 m,内径0.84 m,分别由银硅脂层与铝制结构层组成,外圈包裹环氧树脂。材料参数见表2。

创建土体模型,将桩身位置处土体提前剖出,选取合适的距离点将土层进行切割,便于后处理阶段测点的选取,分别在距桩中心1.4、2.8、4.9、7.0 m位置处对桩周土体结构进行划分;桩深范围内,分别对应桩深为14.35、28.25、38.15 m处依次对土体结构进行划分,剖分完成后,定义桩周土体材料属性,完善桩周土体参数。

表2 模型材料参数

Table 2 Model material parameters

| 材料 | 热导率 $\lambda/$ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{k})^{-1}$) | 密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 比热 $c_{p,s}/$ ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{k})^{-1}$) | 热膨胀系数 $\alpha/(\mu\epsilon\cdot\text{C}^{-1})$ |
|------|---|---|---|---|
| 铝 | 155 | 2 750 | 896 | 23.6 |
| 银硅脂 | 4.5 | 1 700 | 600 | 60 |
| 环氧树脂 | 1.5 | 1 950 | 550 | 60 |
| 桩周土体 | 1.5 | 1 509 | 1 000 | 1×10^{-5} |

2.2 初始及边界条件预设

2.2.1 初始条件预设

假设整体系统开始时均处于平衡状态,桩身组件、桩壁、桩周土体初始温度保持相同,土体测试区域边界温度与系统温度保持一致。

2.2.2 分析步设置

设置热传递过程:热响应方式瞬态传热分析,设置循环过程为一个整体分析步;选取温度求解时间长度为27.45 y,换算为865 757 031 s输入计算;为了确保循环结果能够正常输出,限制整体循环过程中最大增量步为100 000。

2.2.3 相互作用及边界条件设置

在进行分析求解时,由于桩身刚度较大,因此桩土相互作用接触方式采用绑定约束方式。在考虑主面从面的选取上,根据模拟过程中主从面设置条件,接触方向通常假定为主面的法线方向,而且主面节点可以穿越到从面,而从面节点不穿越到主面。遵循上述原则,且考虑到桩身与桩周土体材料特性、刚度差异大,因此选择桩体侧壁为主面,土体与桩体接触侧壁为从面进行接触方式设置。设置整体系统预定义温度场为统一定值。

2.3 网格划分

图4为桩周土体有限元网格示意图。用ABAQUS对桩身及桩周土体分别进行三维网格划分。设定网格控制属性,设定土体区域范围为 $25\text{ m}\times 25\text{ m}\times 63\text{ m}$,桩周及桩周土、桩端及桩端土体采用相对应的网格密度。

完成桩身与桩周土体模型的装配,由于参照离心试验模型对应的原型尺度,模型桩长52.5 m,直径为1.05 m,近桩侧部分土体要进行网格加密,使其与桩体网格密度保持一致,52.5~63 m桩身下部垂直范围内土体与桩身加密程度保持一致,且在桩身材料存在突变的桩顶与桩端位置,也对网格进行

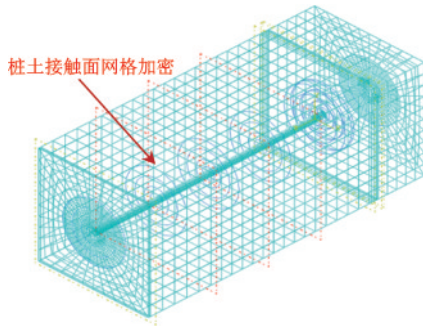


图4 桩周土体有限元网格示意

Fig.4 Finite element mesh of soil around pile

一定程度的加密,来避免网格刺入,确保整体网格均匀、布置疏密得当,减少网格突变点的产生。

3 离心机试验与数值模拟结果对比

3.1 室温变化桩周土体温度响应

图5为考虑室温影响的模拟结果与实测值对比。各循环温度区间变化模拟值与实测值整体波动具有很好的一致性,且满足距桩中心越远,全周期循环温度波动现象越明显的实测规律。观察图5(b)发现:模拟变温区间不断向低温区移动,首周期距桩中心 $1.3D$ 位置处变温区间为 $8.62\sim 19.90\text{ }^{\circ}\text{C}$;第一阶段一直下降直到第九周期,其变温区间为 $6.98\sim 17.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与此同时,图示对应各周期实测变温区间同步下移,实测值变温区间从 $9.13\sim 20.23\text{ }^{\circ}\text{C}$,不断下降为 $7.47\sim 18.04\text{ }^{\circ}\text{C}$,模拟值与实测值变温区间保持同步下移,各周期内最大相对误差为 5.6% ,整体误差较小。

从图5中可以观察到:距桩中心不同距离处土温随着循环次数的增多,其温度呈现波浪式下降,说明长期冷热循环温度作用下,能源桩整体运行效率存在降低趋势。距桩中心越远,土体的变温区间越小。热循环阶段,模拟值变温区峰值高于实测变温区峰值,而在冷循环阶段,只有距桩中心 $1.3D$ 处土温模拟值低于实测值, $2.7D$ 和 $4.7D$ 模拟值均高于实测值,这是因为实测过程中,循环液流动过程存在一定程度的热量散失,且数值模拟中温度作用是瞬时施加的。而实验中存在温度的施加过程,随着循环周期数不断增加,距桩不同距离位置处实测值相对应的变温时间区间,相较模拟值变温区间均存在一定程度的后延,且随着周期数增加,各周期变温时间区间产生的延后时间存在叠加趋势,说明

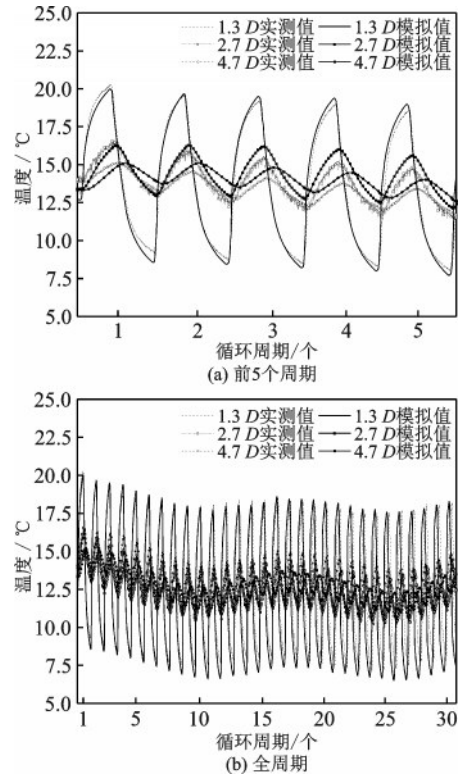


图5 考虑室温影响的模拟值与实测值对比

Fig.5 Comparison of simulated and measured values considering the influence of room temperature

随着循环周期数不断增加,变温周期后延效应不断叠加,循环周期越多时间区间后延效应越明显。

3.2 首末循环周期桩周土体横向温度分布

选取桩深 14.35 m 冷热温度循环过程中处首、末周期结束时刻($t=210\text{ d}$:首周期制热结束; $t=405\text{ d}$:首期制冷结束; $t=9\ 180\text{ d}$:末周期制热结束; $t=9\ 363\text{ d}$:末期制冷结束)桩周土体($d=0D$ 、 $1.3D$ 、 $2.7D$ 、 $4.7D$ 、 $6.7D$ 位置)实测温度分布情况,与数值模拟结果相对比,如图6所示。温度随着距桩中心距离不断增加,呈现类似抛物线型变化趋势,同样由数值模拟得出的温度分布云图(图7)能看出,在桩壁部位的温度始终最高(低),而后向四周温度逐渐下降(上升)。

在 $t=0\text{ d}$ 时,桩周土体呈现初始试验室温条件下的地温场,各监测点温度虽然存在微小差异性,但是总体地温基本相同;首周期升温阶段末期, $t=210\text{ d}$ 时刻,桩周土体不断升温,随着加热时间的延续,热量不断向桩周扩散,桩周土体变温范围随之扩大;随后制冷阶段末期,在 $t=420\text{ d}$ 时刻,桩周土体快速受到制冷作用,此时刻距桩中心 $4.7D$ 位置

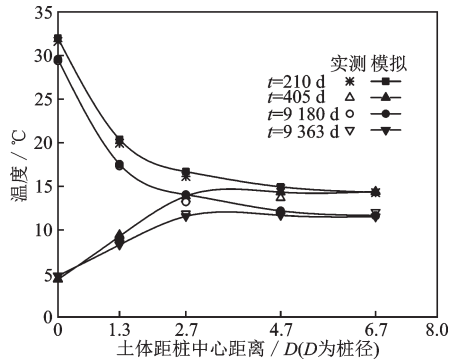


图6 桩周土体横向温度分布

Fig.6 Lateral temperature distribution of soil around pile

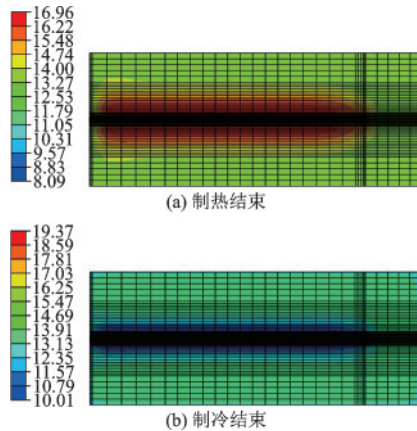


图7 桩周土体温度分布云图

Fig.7 Soil temperature distribution contour map around pile

处仍存在温度响应。末周期升温阶段在 $t=9\ 180\text{ d}$ 时刻,热循环温度明显低于 $t=210\text{ d}$ 时,桩中心处实测值温差约为 $2.34\text{ }^\circ\text{C}$,模拟值温差为 $2.37\text{ }^\circ\text{C}$, 6.7 D 位置处实测值约为 $2.67\text{ }^\circ\text{C}$,模拟值为 $2.72\text{ }^\circ\text{C}$,距桩中心不同位置处温差差异并不大,且模拟值温差略大于实测值温差;而制冷阶段上述温差趋势越发明显,桩中心处温差实测值约为 $-0.37\text{ }^\circ\text{C}$,模拟值也为 $-0.37\text{ }^\circ\text{C}$, 6.7 D 位置处实测值约为 $2.29\text{ }^\circ\text{C}$,模拟值为 $2.32\text{ }^\circ\text{C}$ 。说明温度循环作用下,离桩中心距离增大,冷循环对桩首末周期温差差异的影响要大于热循环。整个热循环阶段,模拟值土温均大于实测值,而在冷循环末期,模拟值则出现比实测值小的情况。

3.3 桩周土体纵向温度分布

选取首末周期,距桩中心 1.3 D 处和 2.7 D 处冷循环升降温过程不同桩深处实测温度值与所得模拟温度进行对比,如图8所示。

观察图8可以发现:桩周土体初始温度就有一

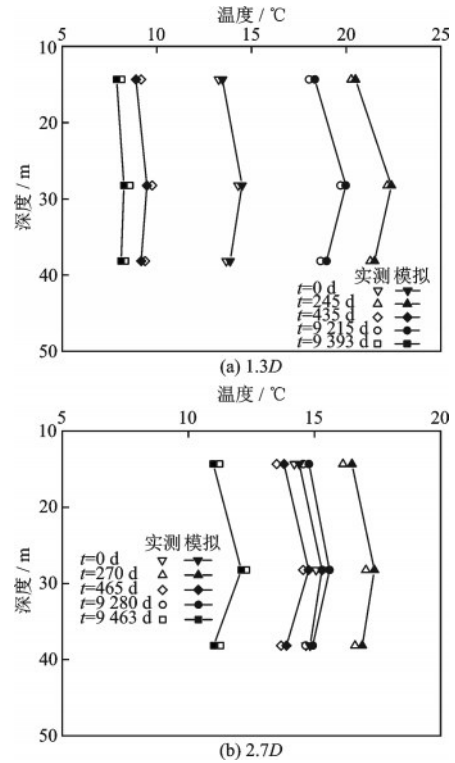


图8 桩周土体纵向温度分布

Fig.8 Longitudinal temperature distribution of soil around pile

定的区别,在桩身中部位置处土体温度比桩顶和桩端位置处土体温度大,在热循环阶段,这一现象更加明显,距桩中心 1.3 D 处桩顶和桩中间部位温差约 $1.8\text{ }^\circ\text{C}$,距桩中心 2.7 D 处桩顶和桩中心部位温差为 $0.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。这是因为桩顶处土体与上部空气接触,受室温影响较大,较桩中部土体温度较小,而桩端由于竖向传热的影响,桩端温度上升或下降速率慢于桩体中间部位,导致桩端土体温度也有减小趋势,不利于地温能的存储。因此在进行能源桩内管道布设时可以考虑桩端部分区域内适当加密,从而使能源桩达到更好的换热效果,提高能源桩的换热性能。由于能源桩整体运行效率的降低,末次循环温度较初次循环桩身不同深度处土温都有减小趋势。数值模拟结果与实测值基本吻合,在加热阶段模拟值略大于实测值,在冷循环末期模拟值要小于实测值。

3.4 远端土体温度分布

图9所示为远端土温分布图。随着循环的进行,远端土体温度也和桩周土体有一致的变化趋势。总体运行过程中冷循环效率大于热循环效率。因为对比远端土温 $t=0\text{ d}$ (初始土温) 和 $t=10\ 000\text{ d}$

(试验结束土温)差异为 2.76°C ,明显小于桩中心及近桩位置处循环始末温差,一定程度上说明长期循环温度作用下,系统存在差异负荷,也就是能源桩在实际运行中会产生季节性负荷情况,并且整个桩身均存在差异负荷现象。若长期对桩进行冷热循环作用,那么或将会对桩周土体持续施加低温作用,温度作用叠加可能导致桩周土温持续性下降,从而增加整体系统与桩周土体的不稳定性^[16]。

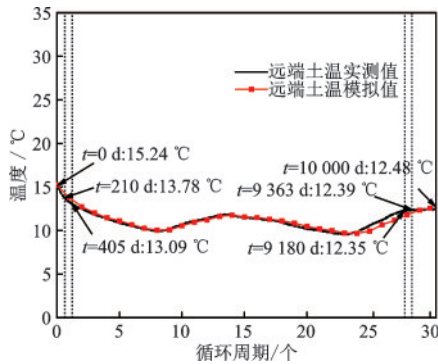


图9 远端土温分布图

Fig.9 Soil temperature distribution at the farthest point from pile

4 结论

通过离心机模型试验,模拟全运行周期(30 y)工况下,桩周土体温度变化,与ABAQUS有限元数值模拟相结合,得出以下结论:

(1)考虑环境温度因素(最大温差可达 3°C),各循环温度区间变化模拟值与实测值整体波动具有很好的一致性,各周期内最大相对误差为 5.6% ,整体误差较小。且满足距桩中心越远,全周期循环温度受环境温度影响导致的整体波动现象越明显。

(2)距桩中心不同距离处土温随着循环次数的增多,其温度也呈现波浪式下降,说明长期冷热循环温度作用下,能源桩整体运行效率存在降低趋势。距桩中心越远,土体的变温区间越小。热循环阶段,模拟值变温区峰值高于实测变温区峰值,而在冷循环末期,模拟值较小。距桩不同距离位置处实测值相对应的变温时间区间,相较模拟值变温区间均存在一定程度的后延。

(3)温度随着距桩中心距离不断增加,呈现类似抛物线型变化趋势,在桩壁部位的温度始终最高(低),而后向四周温度逐渐下降(上升)。热循环阶

段,首末周期桩中心和 $6.7D$ 位置处土温温差约为 0.4°C ,温差差异并不大,而制冷阶段首末周期桩中心和 $6.7D$ 位置处土温温差约为 2.7°C 。说明温度循环作用下,离桩中心距离增大,冷循环对桩首末周期温差差异的影响要大于热循环。

(4)能源桩实际运行时,桩周温度场在纵向方向上存在差异,桩身中部位置处土体温度比桩顶和桩端位置处土体温度大,能源桩在设计时可以考虑在桩端区域适当增加埋管量以提高换热效率。

(5)远端土体温度也和桩周土体有一致的变化趋势,并且长期循环温度作用下整个桩身可能存在差异负荷现象。

参考文献:

- [1] Amis T, Bourne-Webb P, Davidson C, et al. The effects of heating and cooling energy piles under working load at Lambeth College, UK [C] // Proceedings of the 33rd Annual and 11th international Conference on Deep Foundations. New York: [s.n.], 2008.
- [2] Sani A K, Rao M S. Response of unsaturated soils to heating of geothermal energy pile [J]. Renewable Energy, 2020, 147: 2618-2632.
- [3] 赵海丰, 唐荣彬, 桂树强, 等. 双U型埋管能源桩桩周岩土体温度场分布特征试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(5): 157-163.
Zhao H F, Tang R B, Gui S Q, et al. Experimental analysis of ground temperature distribution of double-U type energy piles [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering. 2016, 38(5): 157-163. (in Chinese)
- [4] 常虹, 刘津男, 孟庆宇. 循环温度场作用下能量桩热-力学性能的试验研究 [J]. 工业建筑, 2021, 51(1): 125-130.
Chang H, Liu J N, Meng Q Y. Experimental study on the thermal-mechanical properties of energy piles under the action of circulating temperature field [J]. Industrial Buildings, 2021, 51(1): 125-130. (in Chinese)
- [5] 陈家威, 张国柱, 郭易木, 等. 层状地层能源管桩传热性能试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增2): 3615-3626.
Chen J W, Zhang G Z, Guo Y M, et al. Investigation on heat transfer characteristics of PHC energy piles in multi-layer strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup2): 3615-3626. (in Chinese)

- [6] Pasten C, Santamarina J C. Thermally induced long-term displacement of thermoactive piles [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(5):06014003.
- [7] 杨涛, 刘律智, 花永盛. 冷-热循环下能量桩热-力学特性的数值模拟[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(4): 585-591.
Yang T, Liu L Z, Hua Y S, Numerical simulation of thermo-mechanical behavior of energy pile subjected to cooling-heating cycle[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(4): 585-591. (in Chinese)
- [8] Loria A F R, Laloui L. Group action effects caused by various operating energy piles[J]. *Géotechnique*, 2018, 68(9): 834-841.
- [9] Loria A F R, Di Donna A, Lyesse L. Thermo-mechanical analysis of energy piles through numerical and centrifuge tests[J]. *Stand Alone*, 2015 :793-800.
- [10] Loria A F R, Di Donna A, Laloui L. Numerical study on the suitability of centrifuge testing for capturing the thermal-induced mechanical behavior of energy piles [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(10):04015042.1-04015042.10.
- [11] 徐健, 任连伟, 马艳, 等. 冬季工况下微型钢管桩热力响应特性数值分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(4):665-672.
Xu J, Ren L W, Ma Y, et al. Numerical Analysis on Thermodynamic Response Characteristics of Micro Steel Piles under Winter Conditions[J], *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(4):665-672.(in Chinese)
- [12] Go G, Lee S, Yoon S, et al. Design of spiral coil PHC energy pile considering effective borehole thermal resistance and groundwater advection effects [J]. *Applied Energy*, 2014, 125:165-178.
- [13] 曾和义, 方肇洪. 双U型埋管地热换热器的传热模型[J]. *山东建筑工程学院学报*, 2003(1):11-17.
Zeng H Y, Fang Z H. A heat transfer model for double U tube geothermal heat exchangers [J]. *Journal of Shanxi University of Architecture and Engineering*, 2003(1): 11-17.(in Chinese)
- [14] Hamada Y, Saitoh H, Nakamura M, et al. Field performance of an energy pile system for space heating[J]. *Energy & Buildings*, 2006, 39(5):517-524.
- [15] 闫振国, 张正威, 杨军. 考虑桩身热容的能量桩传热性能分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(4): 599-606.
Yan Z G, Zhang Z J, Yang J. Analysis of heat transfer performance of energy pile considering heat capacity of pile body[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(4):599-606.(in Chinese)
- [16] 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.
Wang Z, Liu Y J, Zhang Z W, et al. Simplified calculation method of thermal response radius of energy pile in its whole life cycle[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(2): 514-522. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)