

DOI: 10.11779/CJGE2022S2030

饱和粉土相变能源桩热响应模型试验及验证

汤 焰^{1, 2}, 郑明飞¹, 史世雍¹

(1. 宁波宁大地基处理技术有限公司, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: 利用复合相变材料制备了相变混凝土能源桩, 并在粉土中开展了相变桩热响应模型试验, 在此基础上建立了能源桩有限元模型, 对比分析了相变桩和普通桩的热响应特性。结果表明: 在夏季($10^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$ 、 $10^{\circ}\text{C} \rightarrow 25^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$)和冬季($16^{\circ}\text{C} \rightarrow 5^{\circ}\text{C} \rightarrow 16^{\circ}\text{C}$)工况下的热响应过程中, 相变桩的桩身温度变化幅度均小于普通桩, 有利于缓解桩周土体热堆积效应的作用。相变陶粒的掺入减少了能源桩在热交换过程中由桩土热膨胀引起的位移。

关键词: 饱和粉土; 相变材料; 能源桩; 热力响应; 模型试验

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0139-04

作者简介: 汤 焰(1994—), 男, 硕士, 主要从事能源桩方面的研究工作。E-mail: 79967135@qq.com。

Model tests on thermal response of phase-change pile in saturated silt foundation

TANG Yang^{1, 2}, ZHENG Ming-fei¹, SHI Shi-yong¹

(1.Ningbo Ningda Foundation Treatment Technology Co., Ltd., Ningbo 315211, China; 2.Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The phase-change concrete energy pile is prepared by using the composite phase-change materials, and the thermal response model tests on the phase-change pile is carried out in silt. On this basis, the finite element model for energy pile is established, and the thermal response characteristics of the phase-change pile and ordinary pile are compared and analyzed. the results show that during the thermal response process in summer ($10^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$, $10^{\circ}\text{C} \rightarrow 25^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$) and winter ($16^{\circ}\text{C} \rightarrow 5^{\circ}\text{C} \rightarrow 16^{\circ}\text{C}$). The variation range of temperature of the phase-change pile is smaller than that of the ordinary pile, which is helpful to alleviate the thermal accumulation effects of the soil around the pile. The addition of phase-change ceramsite reduces the displacement of the energy pile caused by the pile-soil thermal expansion during the process of heat exchange.

Key words: saturated silt; phase-change material; energy pile; thermal response; model test

0 引言

近年来, 由于冬夏的取热量与排热量不一样, 地埋管地源热泵系统运行若干年之后造成“热堆积”现象(热屏障现象), 使得系统出现运行不良甚至瘫痪, 其热堆积问题已引起人们的关注^[1]。长期非稳态的桩土热交换使得能源桩桩周土温度不断上升, 产生“热堆积效应”, 桩土换热效率大大降低, 甚至也可使能源桩系统失效。

国内外学者考虑到相变材料(PCM)在相变过程中具有相变潜热大及温度恒定的特点, 展开了相变能源桩的研究^[2-4]。目前相变混凝土能源桩方面研究仍较少, 尤其缺乏相同条件下相变桩和普通桩工作性能的对比研究。为此, 本文选用癸酸-月桂酸、十五烷-十六烷作为复合相变材料, 制备相变混凝土能源桩(PCEP), 展开不同循环温度荷载作用下饱和粉土中相变能源桩热响应模型试验, 并采用数值模拟方法将相变桩与普通桩(OCEP)热响应结果进行了系统地

对比分析。

1 相变桩模型试验

模型试验系统由模型装置和 AWM-10 型温度循环控制仪等组成。模型箱长 2500 mm×宽 1200 mm×高 1200 mm。量测系统和温控系统主要包括数据采集仪、数显百分表(精度 0.01 mm)、温度传感器等, 通过数据采集仪实现自动采集。

1.1 模型桩

相变能源桩(PCEP)桩长 $L=800$ mm, 直径 $D=100$ mm, 内部均布置 U型 PVC 钢丝软管, 如图 1 所示。配合比设计如表 1 所示, 相变陶粒分为夏季相变陶粒 M 和冬季相变陶粒 N 两种, 热学性能见表 2。

1.2 试验方案

(1) 试验工况

通过静载试验确定普通桩、相变桩极限承载力分别为 1.4, 1.2 kN。为模拟上部结构荷载, 采用慢速维持荷载法, 在桩顶施加堆载 0.6 kN, 待桩顶沉降稳定后开始施加温度循环荷载。试验分为夏季工况和冬季工况, 夏季工况 1、工况 2 的循环温度分别采用 $10^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$ 、 $10^{\circ}\text{C} \rightarrow 25^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$, 桩土初始温度均为 10°C ; 冬季工况 3 则为 $16^{\circ}\text{C} \rightarrow 5^{\circ}\text{C} \rightarrow 16^{\circ}\text{C}$, 桩土初始温度均为 16°C , 如表 3 所示。通过温度循环控制仪调节循环水温度, 待加热/制冷时间达到 12 h 后, 关闭加热器, 让桩土温度自然冷却 12 h, 完成一次温度循环, 每组工况均进行 3 次温度循环, 共 72 h。

表 1 模型桩配合比设计

编号	水	水泥	砂子	碎石	(kg/m ³)	
					相变陶粒	石墨
PCEP	195	443	581	944.8	236.2	13.3

表 2 相变陶粒热学性能

Table 2 Thermal properties of phase-change ceramsite

编号	相变温度/°C	相变潜热/(J·g ⁻¹)	复合相变材料组合	相变材料质量比
M	24.52	150.5	癸酸-月桂酸	5:5
N	14.57	158.8	十五烷-十六烷	3:7

表 3 模型桩工况设计

Table 3 Test plans for model piles

工况	桩顶荷载/kN	循环水温度/°C	循环次数	测试内容
工况 1	0.6	10→40→10	3	桩土温度、
工况 2	0.6	10→25→10	3	桩身应变、
工况 3	0.6	16→5→16	3	桩顶位移

(2) 模型土及传感器布设

模型土采用粉土, 天然质量密度为 1.89 g/cm^3 , 天然含水率为 16.7%。填土深度 $Z=1000 \text{ mm}$, 分 10 层填筑, 每层虚高 200 mm, 静压夯实后为 100 mm。填土完成后, 灌水静置 7 d, 至土体饱和。

桩身温度传感器 T1、T2, 桩侧设置土体温度传感器 T3~T5、S1~S12, 温度传感器 T3、S1、S2、S3 和 S4 距离桩体中轴线依次为 $0.5D$ 、 $1D$ 、 $1.5D$ 、 $2D$ 和 $3D$ 。土体温度传感器 BT1、BT2 埋深 $Z=800 \text{ mm}$, 用于测量桩端温度变化情况。传感器布置如图 1 所示。

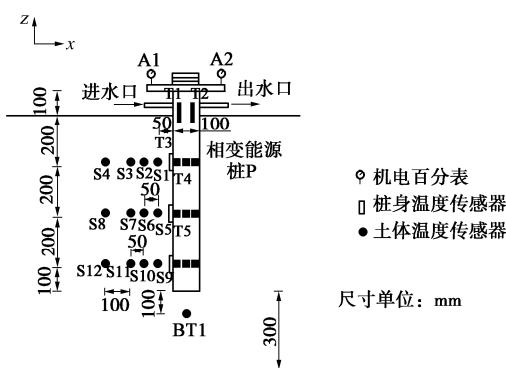


图 1 模型桩及测点布置

Fig. 1 Model piles and measurement points

2 有限元模拟

为了对比相同长度、直径的普通桩 (OCEP) 与相变桩 (PCEP) 热响应性能, 设定表 1 中相变陶粒、石墨掺量为零。采用二维轴对称模型, 采用分步耦合的方法, 对模型桩热力学特性进行研究, 将热力耦合计算分解为传热计算与静力计算^[5-6]。计算模型中, 桩体和地基土采用的材料参数如表 4 所示。桩体采用理想线弹性模型, 土体黏聚力取 0 kPa, 内摩擦角为 28.9° 。通过设置土体渗透性模拟地基土的饱和状态, 间隙流体比重取 10。

表 4 桩土计算参数

Table 4 Model parameters of pile-soil

参数	普通桩 P1	相变桩 P2	砂土
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2500	2500	1890
弹性模量 E/MPa	32500	30000	10.0
泊松比 ν	0.2	0.2	0.3
线膨胀系数 $\alpha/\text{°C}^{-1}$	1.0×10^{-5}	0.91×10^{-5}	0.53×10^{-5}
导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.78	0.70	1.70
比热容 $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	937	1266	1053

桩土整体均采用扫掠网格划分技术, 生成四边形单元, 单元数 1075 个。传热计算中, 单元类型为热传递单元; 静载计算中, 单元类型为轴对称应力单元。节点自由度包括温度和应力。计算工况如表 3 所示, 工况 1 模拟过程如表 5 和 6, 其它类似。

表 5 能源桩有限元传热计算模拟过程

Table 5 Numerical calculation of energy pile in heat-exchange

工况	分析步	模拟内容	初值
编号	定义		设定
工况 1	Step-1	加温温度 40°C , 加热时间 12 h	Initial
	Step-2	停止加热, 自然降温 12 h	Step-1
	Step-3	加温温度 40°C , 加热时间 12 h	Step-2
	Step-4	停止加热, 自然降温 12 h	Step-3
	Step-5	加温温度 40°C , 加热时间 12 h	Step-4
	Step-6	停止加热, 自然降温 12 h	Step-5

表 6 能源桩有限元静力计算模拟过程

Table 6 Numerical calculation process of energy pile in load tests

工况	分析步	模拟内容	初值
编号	定义		设定
工况 1	Step-1	地应力平衡	—
	Step-2	施加桩顶第一级堆载, 待沉降稳定	Step-1
	Step-3	施加桩顶第二级堆载, 待沉降稳定	Step-2
	Step-4	施加桩顶第三级堆载, 待沉降稳定	Step-3
	Step-5	施加桩顶第四级堆载, 待沉降稳定	Step-4
	Step-6	施加桩顶第五级堆载, 待沉降稳定	Step-5
	Step-7	施加桩顶第六级堆载, 待沉降稳定	Step-6
	Step-8	传热分析的桩土温度场(odb 文件导入)	Step-7

3 结果分析

3.1 相变桩试验和模拟结果对比

将模型试验中相变桩埋深 400 mm 处的桩土径向温度与数值模拟结果绘制如图 2 所示。可以发现, 在不同循环温度作用过程中, 模拟值与试验值存在一定量的差异, 但是温度变化规律一致, 桩周土体的温度变化相对于桩身表现出滞后和温度累积效应。

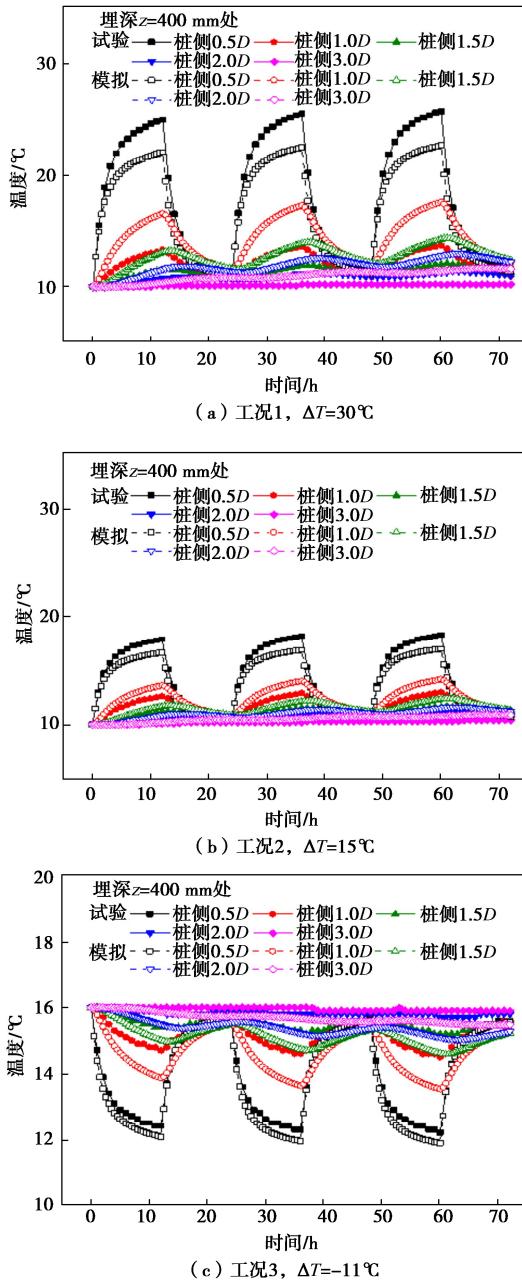


图 2 各工况下相变桩径向温度变化曲线

Fig. 2 Radial temperatures of PCEP under various conditions

在工况 1 (夏季循环温度: $10^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$, 循环次数: 3 次) 试验条件下, 相变桩桩顶位移的试验值和模拟值随时间变化曲线, 如图 3 所示。随着桩身温度的上升, 桩土受热发生膨胀导致桩顶快速向上隆起, 模拟结果的桩顶隆起速率明显大于试验值。当加热结束, 桩土自然降温, 造成桩土热膨胀消失, 且桩顶沉降量不断增加, 并随着温度循环次数的增加,

桩顶逐渐累积不可恢复的塑性位移。模拟结果中相变桩的桩顶沉降量略大于试验值, 但模拟结果与模型试验的整体规律一致, 具有较好的验证效果。

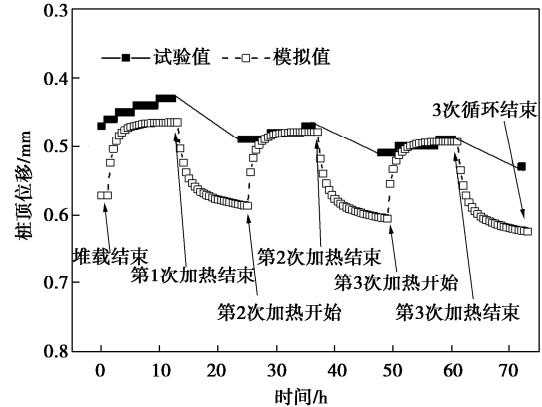


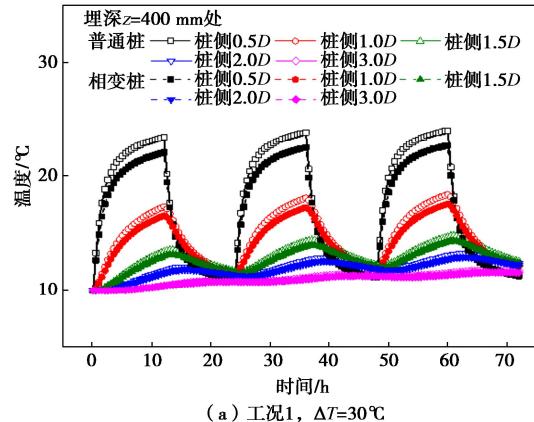
图 3 相变桩桩顶位移变化曲线 (工况 1, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 Displacements at pile head of PCEP

3.2 相变桩与普通桩模拟结果对比

图 4 为埋深 400 mm 处桩土径向温度变化曲线, 可以发现, 在不同循环温度作用下, 相变桩的桩身温度变化幅度均小于普通桩。因为在夏季加热工况下, 加热温度大于相变陶粒的相变温度, 冬季相变陶粒和夏季相变陶粒依次发挥作用, 吸收大量热量, 加热结束时形成了温度差。进入降温阶段时, 相变陶粒放热, 使相变桩的桩身温度下降趋势更为缓慢。冬季工况亦是相变陶粒的作用, 迟滞了相变桩桩身温度的变化。

图 5 为夏季工况 1 时普通桩和相变桩桩顶位移随时间变化曲线, 普通桩和相变桩在堆载结束时的桩顶位移值分布为 0.522 mm 和 0.572 mm, 在加热初期, 由于桩土温度上升引发桩土热膨胀, 加热 12 h 后, 普通桩桩顶位移值为 0.405 mm, 相变桩则为 0.465 mm, 位移变化量分别为 -0.117 mm 和 -0.107 mm , 相变桩的桩顶位移变化量减少了 8.55%, 说明相变陶粒的掺入减少了能源桩在热交换过程中由桩土热膨胀引起的位移。在能源桩的长期运行下, 相变陶粒对能源桩桩顶塑性位移的削弱效果将更加明显。



(a) 工况 1, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$

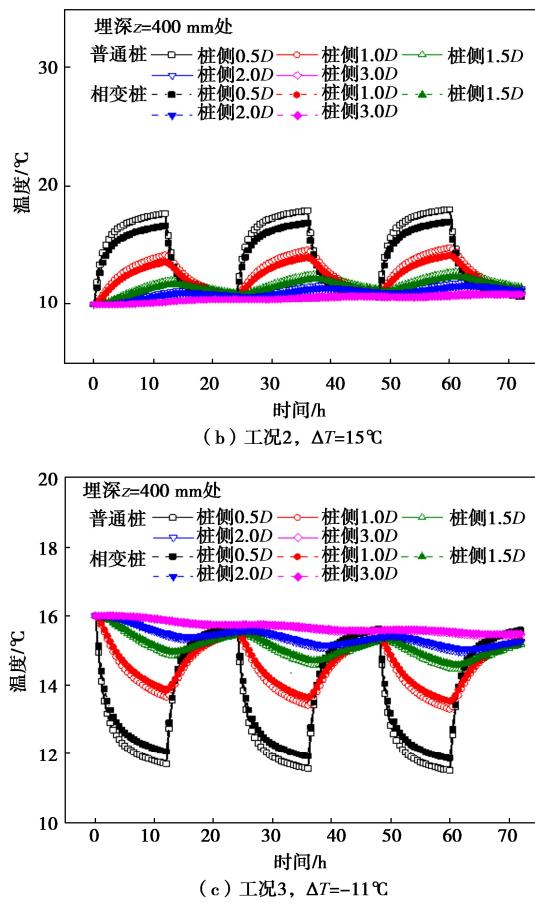


图 4 各工况下普通桩与相变桩径向温度变化曲线

Fig. 4 Comparison of radial temperatures between OCEP and PCEP

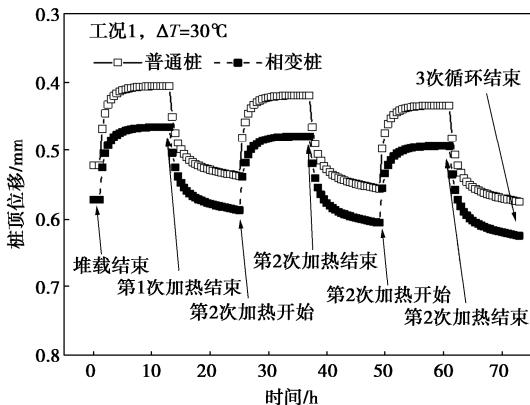


图 5 普通桩与相变桩桩顶位移变化曲线(工况 1)

Fig. 5 Comparison of displacements at pile head between OCEP and PCEP

4 结 论

本文通过不同循环温度荷载作用下的相变桩模型试验和模拟, 对比多工况下相变桩与普通桩的传热性能, 主要得到以下两点结论。

(1) 考虑试验情况与数值模拟的差异性, 模拟结果与试验数据虽有一定量的差别, 但两者的整体变化趋势基本吻合。

(2) 在不同循环温度作用下, 相变桩的桩身温度变化幅度均小于普通桩, 有利于缓解桩周土体热堆积效应的作用。相变陶粒的掺入减少了能源桩在热交换过程中由桩土热膨胀引起的位移。

参 考 文 献:

- [1] 朱 娜. 地源热泵地埋管换热系统热堆积分析[D]. 华中科技大学, 2009. (ZHU Na. Analysis on the Heat Accumulation of GSHP Heat Exchange System[D]. Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese))
- [2] 白丽丽, 裴华富, 宋怀博, 等. 相变能量桩段模型传热模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 684 - 690. (BAI Li-li, PEI Hua-fu, SONG Huai-bo, et al. Heat transfer simulation of phase change energy pile[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4): 684 - 690. (in Chinese))
- [3] 崔宏志, 邹金平, 包小华, 等. 制冷工况相变能源桩热交换规律[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(9): 715 - 725. (CUI Hong-zhi, ZOU Jin-ping, BAO Xiao-hua, et al. Heat exchange behavior of the phase change energy pile under cooling condition[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2020, 60(9): 715 - 725. (in Chinese))
- [4] 杨卫波, 杨彬彬, 汪 峰. 相变混凝土能量桩热-力学特性的数值模拟与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 268 - 277. (YANG Wei-bo, YANG Bin-bin, WANG Feng. Numerical simulation and experimental validation of the thermo-mechanical characteristics of phase change concrete energy pile[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(2): 268 - 277. (in Chinese))
- [5] LALOUI L, NUTH M, VULLIET L. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 30(8): 763 - 781.
- [6] FRANCO A, MOFFAT R, TOLEDO M, et al. Numerical sensitivity analysis of thermal response tests (TRT) in energy piles[J]. Renewable Energy, 2016, 86(FEB): 985 - 992.

(编校: 明经平)