

竖向和水平组合荷载下能量桩单桩变形特性

蒋济泽¹, 王成龙^{1,2,3}, 黄煜宾¹, 赵 华¹, 陈志雄¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 大足石刻研究院, 重庆 402360; 3. 重庆市地质矿产勘查开发局, 重庆 401121)

摘 要: 能量桩作为一种新型能源地下结构, 在承受上部建筑荷载同时, 能够获取浅层地热能。目前针对水平荷载与竖向荷载共同作用下的能量桩热力学特性的研究较少, 而水平荷载与竖向荷载共同作用下, 桩身温度变化会引起桩体弯矩、水平和竖向位移等发生变化。基于模型试验, 对桩体施加 10 次冷热循环, 开展了竖向和水平组合荷载下能量桩的变形特性研究。结果表明, 组合荷载下冷热循环会进一步增大桩身弯矩, 且对桩体中部的影响更大, 最大桩身弯矩增幅达到了 117%; 冷热循环会产生桩顶累积位移, 试验桩竖向位移增加了 0.201 mm, 温度作用引起的水平位移增加值达到了 1.46% D (D 为桩体直径); 同时, 冷热循环会导致桩向桩前倾斜, 10 次冷热循环后转角达到 1.88×10^{-3} rad, 且会随着循环次数增加有缓慢增加趋势; 加热时桩前土压力减小, 而制冷时使桩前土压力增大。

关 键 词: 能量桩; 组合荷载; 模型试验; 冷热循环; 热力学特性

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2024)03-0788-09

Deformation characteristics for single energy pile under combined loads in vertical and horizontal directions

JIANG Ji-ze¹, WANG Cheng-long^{1,2,3}, HUANG Yu-bin¹, ZHAO Hua¹, CHEN Zhi-xiong¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, China;

3. Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, China)

Abstract: Energy piles, as innovative energy underground structure, serve the dual purpose of shallow extracting geothermal energy while bearing the upper building load. There are few studies on the thermomechanical properties of energy piles under combined horizontal and vertical loads. The temperature change of pile body under combined horizontal and vertical loads will result in variations in pile bending moment, horizontal and vertical displacement, etc. This paper investigated the deformation characteristics of energy piles under combined vertical and horizontal loads through model tests with 10 heating-cooling cycles applied to the piles. The results showed that the heating-cooling cycles under combined load led to further increase in the pile bending moment, particularly affecting the middle section of the pile, with the maximum increase in pile bending moment reaching 117%. Additionally, the heating-cooling cycles caused cumulative displacement at the top of the pile. The vertical displacement of the test pile increased by 0.201 mm, and the increase in horizontal displacement due to the thermal cycles reached 1.46% D (D is the diameter of the pile). Simultaneously, the heating-cooling cycles induced a forward tilt of the pile, with the tilt angle reached 1.88×10^{-3} rad after 10 heating-cooling cycles and gradually increasing with the number of thermal cycles. Moreover, the soil pressure in front of the pile decreased during heating, while increased during cooling.

Keywords: energy pile; combined load; model test; heating-cooling cycles; thermo-mechanical behavior

1 引 言

能量桩系统是一种新型的地源热泵系统, 它是在地源热泵的基础上, 将换热管埋于建筑物的混凝土桩内而形成的新型桩基础形式^[1-2]。

能量桩具有承担上部建筑结构荷载和获取浅层地热能的双重功能。相较于传统的地源热泵系统技术可以节约土地和减少建设成本^[3-4]。针对能量桩的热力学特性, 国内外相关研究人员开展了一系列研究。Laloui^[5]、Bourne-Webb^[6]等分别对温度影响下

收稿日期: 2023-04-20

录用日期: 2023-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(No.52278396); 中国博士后科学基金(No.2022M720591); 重庆市博士后研究项目特别资助(No.2022CQBSHTB3006)。This work was supported by National Natural Science Foundation of China (52278396), China Postdoctoral Science Foundation (2022M720591) and Special Foundation of Postdoctoral Support Program, Chongqing (2022CQBSHTB3006).

第一作者简介: 蒋济泽, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的科研工作。E-mail: jjz2332s@163.com

通讯作者: 王成龙, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 主要从事能源地下结构、桩-土相互作用方面的科研工作研究。E-mail: wangchlong586@163.com

的桩体热力学特性进行了现场研究,分析其桩身的应力变化规律。桂树强等^[7]对信阳能量桩竖向静荷载作用下的热力响应进行现场测试,结果表明温度变化会明显改变桩顶沉降量,且可能产生不可恢复的沉降变形。方鹏飞等^[8]在桩顶完全约束条件下,开展了能量桩承载特性的原位现场试验,分析了温度影响下桩土荷载传递规律。Wu等^[9]研究了5次冷热循环时饱和黏土中摩擦型能量桩相邻桩的影响。结果表明有相邻桩存在时,能量桩的不可逆桩顶位移比没有相邻桩时小。Stewart等^[10]开展了能量桩离心机模型试验,研究结果表明,温度变化引起的轴向应变随着深度的增加而减少,且在土体表面附近接近自由膨胀的热应变。Saggu等^[11]采用非线性有限元分析方法,对温度循环和恒定外部荷载作用下砂土中能量桩的热力学响应进行了分析,结果表明,在热-力耦合作用下桩中产生的径向应变比在只有外部荷载产生的径向应变更高。高磊等^[12]建立了螺旋式埋管PCC能量桩数值分析模型,结果表明,桩身应变会随埋管温度的升高而减小,并随着桩顶荷载增加而增加。Jeong^[13]、费康^[14]等开展了能量桩热-力耦合作用的数值模拟研究,分析了温度变化引起的桩身附加应力随竖向荷载大小变化的规律。

以上研究主要针对竖向荷载下能量桩的热力学特性。对于水平荷载作用下的能量桩热力学特性,国内外已开展相关研究。Heidari等^[15]利用数值分析方法研究了水平荷载作用下能量桩的热力学性能。研究结果表明,加热对桩的内力矩以及最大水平位移有影响,且会因桩周土体种类不同而有一定差别。Zhao等^[16]对水平荷载下能量桩的热力学行为进行了模拟,研究结果表明,桩顶累积位移与温度循环产生的塑性剪切应变有关。Vitali等^[17]进行了一系列的离心机模型试验,试验和计算结果表明,不饱和粉土中的能量桩具有加固土体的作用,并且不会在土体发生位移时产生额外的弯曲应力。陈志雄等^[18]开展了砂土中能量桩在水平荷载作用下的承载特性模型试验,结果表明,加热会产生更大的水平位移变化。

当桩基础同时承受竖向和水平荷载时,其组合作用会影响桩的受力特性。针对常规桩,赵春风等^[19]通过室内模型试验,分析了砂土中竖向和水平荷载共同作用下的单桩承载特性。试验结果表明,预先施加竖向荷载有利于提高单桩水平承载力;预先施加水平荷载降低了单桩的竖向承载力。顾国峰等^[20]开展了砂土中组合荷载下单桩承载特性的室内模型试验,分析了水平荷载对竖向承载力的影响

机制以及弯矩荷载对水平承载力的影响机制。

综上所述,竖向和水平荷载的组合作用对桩体的承载特性影响较大,但是目前针对竖向和水平荷载组合下的能量桩热力学特性的研究较为缺乏,龚建清等^[21]建立三维有限元模型,研究了倾斜荷载下能量桩的受力变形特性。本文基于模型试验,研究了竖向和水平荷载组合作用下的能量桩变形特性。分析了多次冷热循环后,桩体位移、弯矩、土压力等的变化规律,为能量桩在组合荷载作用下的变形特性提供参考。

2 模型试验概况

2.1 模型能量桩布置

本次试验共3根模型桩,编号分别为EP1、EP2和EP3。试验模型桩均由C30混凝土预制而成,在填土时需先用固定梁固定塑料管将桩孔固定好,防止在填泥浆时,将桩孔堵塞。试验相似比为1:21,模型能量桩长为900 mm,直径 D 为42.6 mm,伸入土体有效长度 L 为800 mm。模型桩内部浇筑有外径为6 mm,内径为4 mm的铜管作为换热管。为方便模型桩的安装,在填土时先用反力架固定的PVC管预留桩孔,防止在填泥浆时,将桩孔堵塞。

模型槽使用亚克力板制作,并使用角铁进行加固,在亚克力板外侧贴有保温棉以减少能量耗散。模型槽的尺寸为1.00 m(长)×0.75 m(宽)×1.20 m(高)。图1为模型槽布置情况。

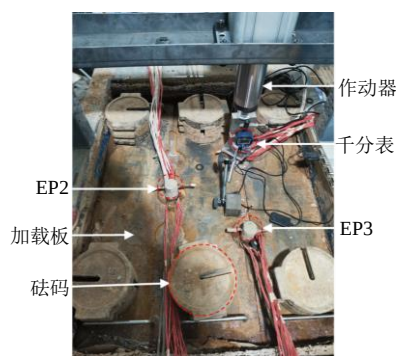


图1 模型槽布置

Fig.1 Arrangement of the model tank

2.2 土体制备

试验所用土体为超固结饱和黏土,土体底部设有砂石排水层,属于重庆红黏土,其基本参数见表1。红黏土经过充分干燥后,加入足量水充分搅拌后制成泥浆,此时含水率约为液限的2倍,随后将制备好的泥浆缓慢导入模型槽中,直到泥浆达到设计高度后,静置72 h,以模拟饱和黏土。待静置

结束后，在土表面覆盖一层塑料薄面以防止土中水分流失。然后在塑料膜表面布置加载板以及砝码，

对土体进行加载、静置，使其快速达到超固结饱和，以模拟土体真实的状态。

表 1 试验用土参数
Table 1 Soil properties in the test

物理量	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	相对密度 G_s	含水率 $\omega/\%$	饱和度 $S_r/\%$	液限 $\omega_p/\%$	塑限 $\omega_L/\%$	比热容 $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	导热系数 $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
参考值	2.02	2.76	25.70	98.80	33.80	19.30	1 370	1.614

2.3 测点布置

试验共安装有 3 个温度传感器序列 TA、TB 和 TC，TA 固定在试验桩后表面，TB 和 TC 安装在距离桩表 1*D* 处和 2*D* 处（*D* 为桩体直径），每个序列包括 7 个温度传感器，从上到下分别为 1~7，同一序列中的相邻温度传感器相距 100 mm；桩两侧成对安装应变片 S1/S1'~S7/S7'，每对应变片上下相距

100 mm；模型桩的一侧安装有土压力盒 P1~P3，相邻土压力盒竖直上相距 200 mm，位置位于两个应变片中间，竖直方向上距最近的应变片 50 mm；桩顶部安装有千分表，可测量顶端位移，桩顶作动器也可测量竖向位移，如图 2 所示。此外，在水箱以及室内也装有温度传感器，用以实时监测水温以及室内环境温度。监测数据显示，环境温度变化较小。

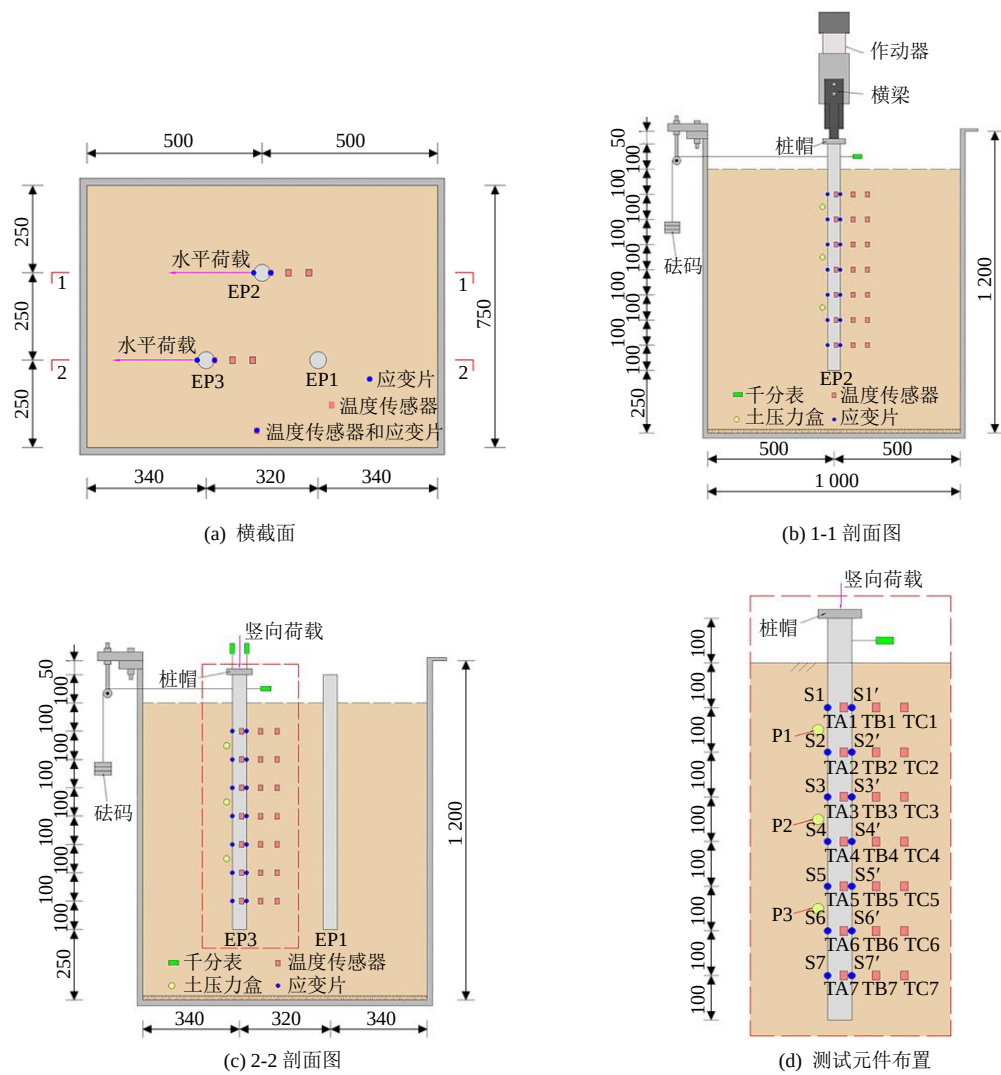


图 2 试验布置示意图 (单位: mm)
Fig.2 Schematic of model test arrangement (unit: mm)

2.4 试验步骤

本次试验共有 3 根桩：EP1、EP2、EP3，具体试验如下：

EP1 作为承载力测试桩，用于测量桩的竖向承载力。通过固定在反力架上的作动器对桩分级施加竖向荷载，每级为 0.02 kN，直到最后桩体破坏，通

过荷载-沉降 ($Q-s$) 曲线得到其最大极限承载力为 0.22 kN, 为方便参照桩和试验桩施加竖向工作荷载, 取 0.10 kN 作为竖向工作荷载。

EP2 作为试验桩, 首先分级施加竖向工作荷载以及水平工作荷载, 施加完成后直到桩身位移完全稳定, 然后向换热管内交替通热水和冷水, 以实现冷热循环, 具体试验过程如下:

(1) 分级施加竖向工作荷载, 然后等待至桩顶竖向位移完全稳定。

(2) 桩顶竖向位移完全稳定后, 分级施加水平荷载, 每级水平荷载为 0.02 kN, 每 30 min 加载一级, 共加载 5 级, 与竖向工作荷载保持一致, 然后停止加载直到桩顶水平位移完全稳定。

(3) 桩顶位移完全稳定后进行温度循环, 首先通入比室温高 15 °C 的热水, 持续 240 min; 然后通入比室温低 15 °C 的冷水, 持续 240 min; 此为一个循环, 试验中共进行 10 次冷热循环, 记录温度、应变、位移和土压力。最后一次循环过程中, 部分测试元件损坏, 该元件测量值取前 9 次循环数据进行分析。

(4) 冷热循环后, 向试验桩分级施加水平荷载测试其极限承载力, 每级荷载为 0.02 kN, 每 30 min 加载一级。

EP3 作为参照桩, 分级施加竖向工作荷载与水平工作荷载, 试验过程中不向换热管内通水, 试验时间与 EP2 保持一致, 通过提前安装好的测量器材测量温度、应变、位移和土压力。

3 试验结果与分析

3.1 温度变化规律

研究土体温度变化规律时, 考虑到各土层温度变化规律差异不大, 且为减小环境对土层温度的影响, 选取靠近桩体中部的测点进行分析, 即选取距离土体表面 400 mm 的 TA4、TB4 与 TC4 测点, 分析土体温度的变化规律。图 3 为试验过程中, 模型能量桩内循环水的温度变化, 图中表明, 通入的循环水温度在试验过程中比较稳定, 且每次循环具有可重复性。图 4 为在水平荷载和竖向荷载共同作用下模型能量桩冷热交替过程中土层温度变化图。由图可知, 随着土体离桩的距离增加, 冷热循环时温度变化幅度减小, 加热时, 相对于试验时室内温度 (16 °C) 最高上升 56.3% (桩体表面)、28.8% (距桩 1D 处) 和 9.4% (距桩 2D 处); 制冷时, 相对于试验时室内温度最高下降 60.6%、29.4% 和 16.9%。这表明离桩越近, 能量桩对土体温度影响越显著。

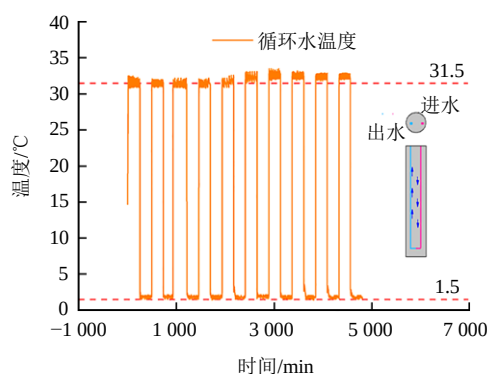


图3 冷热循环时循环液温度

Fig.3 Temperature of circulating liquid during heating-cooling cycles

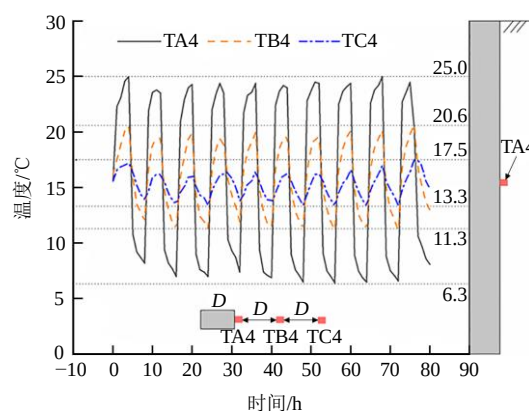


图4 冷热循环时土层温度变化规律

Fig.4 Variations of soil temperature under heating-cooling cycles

图 5 为冷热循环时试验桩桩身沿埋深的分布规律。各冷热循环过程中桩体温度随深度的变化规律趋于一致, 从图中可以观察到, 随着冷热循环次数的增加, 桩体温度变化逐渐增大, 即加热时温度逐渐升高, 制冷时温度逐渐下降, 但总体变化不大。

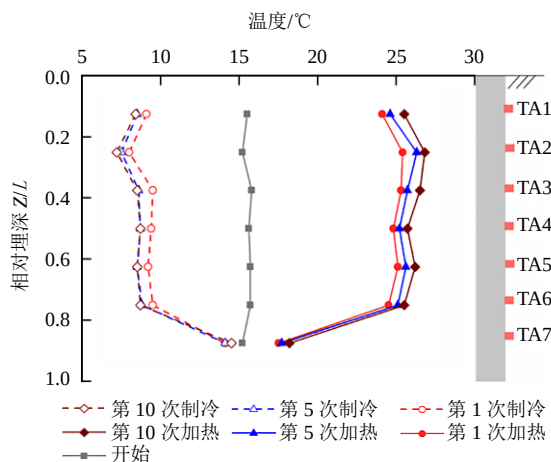


图5 冷热循环时桩身温度变化规律

Fig.5 Temperature range variations of pile under heating-cooling cycles

靠近桩底处, 桩体温度变化较小, 而在其他位置处, 桩体温度变化较为明显。TA2 测点 (即桩埋深的 1/4 桩长处) 的温度变化幅度最大, 达到室温 (16 °C) 的 123.1%; TA7 测点 (距桩底部 1/8 处) 温度变化幅度最小, 为室温的 26.9%。

3.2 试验桩弯矩变化规律

试验桩在水平荷载作用下会产生弯矩, 同时由于温度循环的作用, 桩体会因为加热膨胀或制冷收缩导致桩-土相互作用改变而产生额外的变形。通过应变片 S1/S1'~S7/S7' 对冷热循环过程中桩体的应力进行检测。假设桩体横截面上温度分布是均匀的, 根据检测的应变可以计算得到桩体的弯矩 M_T :

$$M_T = \frac{EI(\varepsilon_h - \varepsilon_q)}{D} \quad (1)$$

式中: E 为桩的弹性模量 (kN/mm^2), 本次试验中取 30 kN/mm^2 ; I 为桩界面惯性矩 (mm^4); ε_h 为桩后应变; ε_q 为桩前应变。

图 6 为在水平荷载、竖直荷载以及冷热循环作用下, 加热和制冷时, 桩体弯矩沿着深度的分布规

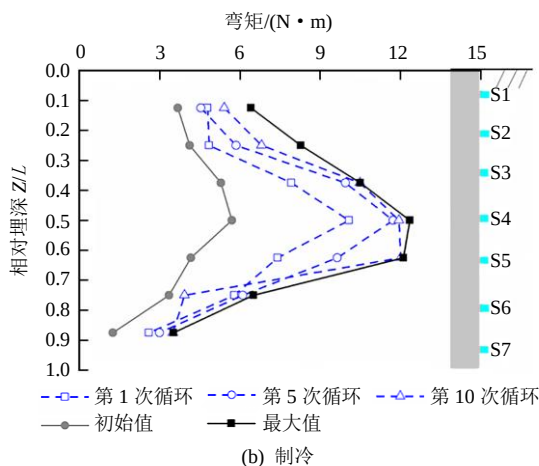
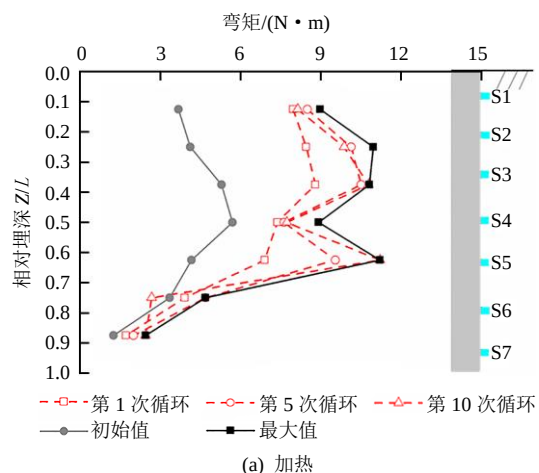


图 6 冷热循环作用下桩身弯矩分布

Fig.6 Moment distribution along depth under heating-cooling cycles

律。试验开始时, 桩体最大弯矩 $M_{\max}$ 产生在桩埋深中部 ($L/2$), 达到了 $5.69 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。由图 6(a)可知, 加热会改变桩体弯矩大小, 且随着冷热循环次数的增加, 加热后的弯矩变化更加显著, 改变了桩体最大弯矩的位置。第 10 次加热结束后, 最大弯矩产生在桩埋深 $5L/8$ 处, 达到 $11.21 \text{ N} \cdot \text{m}$, 是试验开始时桩体最大弯矩 $M_{\max}$ 的 197%。由图 6(b)可知, 制冷也会改变桩体弯矩大小, 冷热循环次数的增加会加剧这种变化。10 次冷热循环过程中, 桩体最大弯矩位置在桩埋深中部处 ($L/2$), 达到 $12.35 \text{ N} \cdot \text{m}$, 相较于 $M_{\max}$ 增加了 117%。并且随着冷热循环次数进一步增加, 桩体最大弯矩位置有向下移动的趋势。

对比图 6(a)、6(b)可知, 相较于制冷, 加热对埋深较浅处桩体弯矩影响更强, 而对埋深较深处桩体弯矩的影响较弱。这可能是因为竖向加载方式采用的作动器, 其刚度较大, 对桩顶的约束较强, 而桩端处是由土体进行约束, 约束作用较弱。加热时, 试验桩受热膨胀, 由于桩顶作动器的约束作用, 埋深较浅处的桩土相互作用增强, 进而导致桩体的弯矩较大。制冷时, 试验桩遇冷收缩, 作动器对桩的约束作用减弱, 从而使得桩体弯矩变化较加热时小。

3.3 试验桩位移变化规律

为探究在组合荷载作用下, 桩体位移的变化规律, 试验中分别测量记录作动器的竖向位移以及桩后的水平位移。同时, 设置 EP3 参照桩进行试验研究。规定桩体向下的竖向位移为正, 向上为负。

图 7 为工作荷载作用下桩的竖向位移随着冷热循环的变化规律。由图可知, 加热时, 桩的位移曲线上升, 表明桩在受热时会膨胀, 引起桩顶位移上升; 制冷时, 桩的位移曲线下移, 桩的沉降增加, 最终使得桩的竖向位移下降 0.201 mm 。随着冷热循环次数的增加, 加热和制冷时的最大位移均增加, 这是由于在温度的作用下, 饱和黏土会产生热固结,

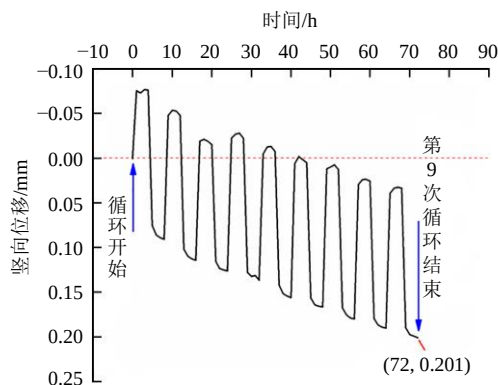


图 7 冷热循环时桩的竖向位移

Fig.7 Vertical displacement of piles under heating-cooling cycles

土体会产生变形。在冷热交替作用下，桩的最终位移有随着冷热交替次数增加而增加的趋势。

图8为冷热循环时试验桩水平位移与参照桩水平位移以及二者差值随时间的变化规律。由图可知，组合荷载作用下，能量桩在进行冷热循环时会导致桩的水平位移增加，且前几次冷热循环的影响更大，随着冷热交替次数的增加，其影响趋于稳定。试验开始时的水平位移为1.02 mm，10次冷热循环后的试验桩水平位移为2.01 mm，此时参照桩的水平位移为1.39 mm，水平位移增加0.62 mm，是测点距离桩底（850 mm）的0.73%，约为试验桩直径（42.6 mm）的1.46%。

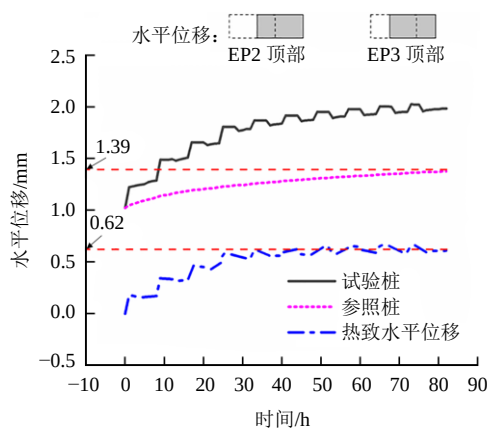


图8 冷热循环时桩的横向位移

Fig.8 Lateral relative displacement of pile under heating-cooling cycles

这表明相对于参照桩，试验桩的竖向位移在增加的同时也在往水平荷载作用方向移动。一方面是由于在组合荷载作用下，相对于参照桩，温度循环的作用使桩顶向桩前转动，这使得桩的竖向位移增加的同时也使得桩向水平荷载方向移动。另一方面，在竖直方向，试验桩两端的约束分别为作动器与土体，且桩底温度变化较小；而在水平方向，桩端周边的约束都为土体，且桩端的温度变化较大，这可能是温度变化引起的桩端水平位移比桩端竖向位移大的原因。

3.4 试验桩转角变化规律

桩在受水平荷载时会产生偏移，桩在加热或制冷是也会产生膨胀或收缩，二者同时作用时，水平偏移会增大，其中由冷热循环产生的偏移程度可以由转角来表示。在计算桩的转角时，忽略桩的刚性倾斜的影响，认为截面转角由弯矩引起，则桩的转角 θ 可由下式计算：

$$\theta = \int \left(-\frac{\Delta \varepsilon}{D} \right) dx \quad (2)$$

式中： $\Delta \varepsilon$ 为试验桩桩前与桩后的应变差； dx 为沿着桩长进行积分。

图9所示为冷热循环过程中试验桩的转角随时间变化的规律。由图可知，温度变化引起的桩身转角随着循环次数的增加而增加，且加热相较于制冷引起更大转角。转角在前4次增加较快，4次循环后，增加速度减小，经过10次循环后，最终转角为 1.88×10^{-3} rad，相较于试验开始增加了 0.65×10^{-3} rad。尽管转角很小，但随着循环次数的增加，其转角还会上升，这反映了土的应变累积性，即土中塑性变形的出现会使得滞回曲线^[22]不能封闭或对称，滞回曲线的中心点要逐渐向应变增大的方向移动的特性。在能量桩的长期使用过程中，这是需要考虑的问题之一。

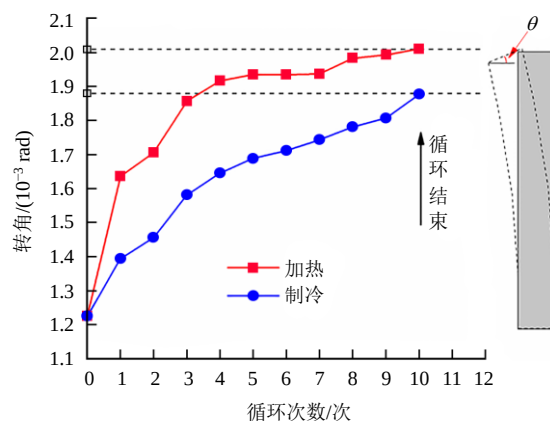


图9 冷热循环桩顶转角

Fig.9 Angle of pile under heating-cooling cycles

3.5 桩前土压力变化规律

桩在有水平荷载作用时，桩会有向水平荷载作用方向偏移的趋势，这会导致土体产生抗力，影响桩周土压力。在有水平荷载作用下，桩周的土压力分布并非沿着桩的深度增加而线性增加，大致呈随着埋深先减小再增加的趋势^[23]。本模型试验通过测量桩前（靠近水平荷载加载方向一侧）不同深度的土压力，得到冷热循环作用下桩前土压力变化规律，如图10所示。

由图10可知，桩前的土压力在埋深较浅处最大，随着埋深增加，土压力会先减小后增加，一定深度范围内，会小于无水平荷载、无冷热循环时的静止土压力，这与文献^[23]的结论相符。随着冷热循环的次数增加，桩前土压力先增加再减小，经过9次循环后，沿桩深度的桩前土压力向试验开始时的桩周土压力靠拢。这是由于水平荷载与温度共同作用改变桩周土压力，随着冷热循环次数增加，桩周的土体逐渐稳定，桩土间的作用缓慢减弱。由于

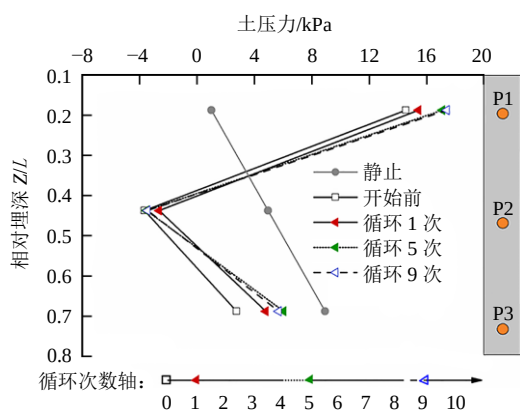


图 10 冷热循环时桩前土压力

Fig.10 Soil pressure around pile under heating-cooling cycles

水平荷载作用在桩顶，故而埋深较浅处受其影响最大，且水平荷载使桩前受压，故其土压力较大。此外，试验桩受到的竖向荷载对桩的两端起到约束作用，结合桩的弯矩规律分析，桩在中部弯矩最大，即其有向桩后弯曲的趋势，故在桩中部的桩前土压力最小。随着深度增加，水平荷载作用以及温度作用影响变小，土压力渐渐靠近静止土压力。

图 11(a)、11(b)为加热、制冷完成后的桩前土压力随着冷热循环次数增加的变化规律。结果表明，

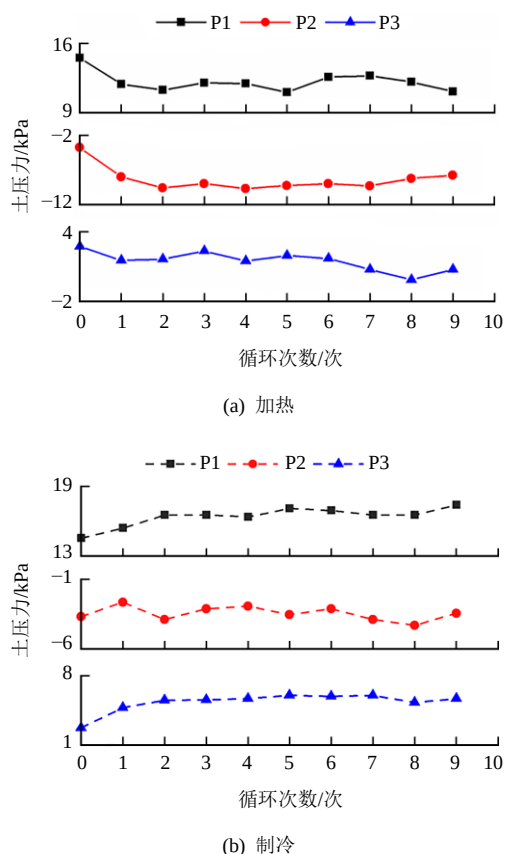


图 11 桩前土压力随循环次数变化规律

Fig.11 Variations of soil pressure in front of pile with the number of cycles

加热会减小桩前土压力，制冷会增大桩前土压力，且随着循环次数增加，加热和制冷表现出相反的变化趋势。这是由于正常固结和轻度超固结饱和黏土在加热时，土的体积会发生可逆的收缩；此外，土的膨胀系数小于孔隙水的膨胀系数，加热时，饱和黏土中会产生超孔隙水压，导致土体出现时间依赖性的、不可恢复的体积收缩^[24]。从而导致桩土间的作用减弱，桩前土压力减小。

4 结 论

本文开展了水平荷载与竖向荷载共同作用下的能量桩模型试验。通过对试验结果的分析，得到以下结论：

(1) 第 10 次加热结束后，最大弯矩产生在桩埋深 $5L/8$ 处，达到 $11.21 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，是试验开始时桩体最大弯矩 $M_{\max}$ 的 197%。10 次冷热循环过程中，桩体最大弯矩位置在桩埋深中部处 ($L/2$)，达到 $12.35 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，相较于 $M_{\max}$ 增加了 117%。在实际工程中，设计时需要考虑温度的影响，可做适当处理，避免因弯矩过大而破坏。

(2) 桩在加热时会因为膨胀导致桩顶向上移，制冷时会因为收缩导致桩顶向下沉。在工作荷载作用下，加热会使桩的竖向位移减小，制冷会使桩的竖向位移增大（向下为正）；10 次冷热循环后的试验桩竖向位移增加了 0.201 mm 。冷热循环也会影响桩的水平位移，10 次冷热循环后的试验桩水平位移为 2.01 mm ，此时参照桩的水平位移为 1.39 mm ，水平位移增加 0.62 mm ，约为试验桩直径 (42.6 mm) 的 1.46%。

(3) 温度变化引起的桩身转角随着循环次数的增加而增加，且在加热时比制冷时更大；经过 10 次循环后，最终稳定后转角为 $1.88 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ，增加了 $0.65 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。

(4) 水平荷载对桩前土压力有较大的影响，且该影响随着埋深的增加而减弱。在进行能量桩的冷热循环时，加热会使桩前土压力减小，制冷会使桩前土压力会增大。

本文主要对在水平荷载和竖向荷载组合作用下能量桩单桩变形特性进行分析，研究结果可为该种组合荷载作用下的能量桩的优化设计和工程应用提供一定参考。

参 考 文 献

- [1] 汤扬, 刘干斌, 郑明飞, 等. 饱和粉土中相变能源桩热力响应模型试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 2):

- 282-290.
- TANG Yang, LIU Gan-bin, ZHENG Ming-fei, et al. Model test on thermal response of phase change pile in saturated silt ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 4(Suppl.2): 282-290.
- [2] 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.
- HUANG Xu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Experimental research on thermomechanical characteristics of PCC energy pile under cyclic temperature field[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 667-673.
- [3] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. **Geotechnique**, 2006, 56(2): 81-122.
- [4] 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.
- KONG Gang-qiang, WANG Cheng-long, LIU Han-long, et al. Analysis of pile head displacement of energy pile under repeated temperature cycling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 958-964.
- [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**, 2006, 30(8): 763-781.
- [6] BOURNE-WEBB P J, AMATYA B, SOGA K, et al. Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles[J]. **Geotechnique**, 2009, 59(3): 237-248.
- [7] 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.
- GUI Shu-qiang, CHEN Xiao-hui. In-situ tests on structural responses of energy piles during heat exchanging process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(6): 1087-1094.
- [8] 方鹏飞, 高翔, 娄扬, 等. 夏季工况下正常服役地热能源桩承载性能原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 1032-1042.
- FANG Peng-fei, GAO Xiang, LOU Yang, et al. Field test on the bearing behaviors of geothermal energy piles in natural service under the summer condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(5): 1032-1042.
- [9] WU D, LIU H L, KONG G Q, et al. Displacement response of an energy pile in saturated clay[J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering**, 2018, 171(4): 285-294.
- [10] STEWART M A, MCCARTNEY J S. Centrifuge modeling of soil-Structure interaction in energy foundations[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 140(4): 1-11.
- [11] SAGGU R, CHAKRABORTY T. Cyclic thermo-mechanical analysis of energy piles in sand[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2015, 3(2): 321-342.
- [12] 高磊, 季保全, 刘汉龙, 等. 螺旋式热源 PCC 能量桩桩身变形数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 628-635.
- GAO Lei, JI Bao-quan, LIU Han-long, et al. Numerical simulation study on deformation of PCC energy pile with spiral heat source[J]. **Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering**, 2019, 39(4): 628-635.
- [13] JEONG S, LIM H, LEE J K, et al. Thermally induced mechanical response of energy piles in axially loaded pile groups[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2014, 71(1): 608-615.
- [14] 费康, 钱健, 洪伟, 等. 黏土地基中能量桩力学特性数值分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2651-2661.
- FEI Kang, QIAN Jian, HONG Wei, et al. Numerical analysis of mechanical behavior of energy piles in clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(7): 2651-2661.
- [15] HEIDARI B, AKBARI G A, MOKHTARI J S, et al. Energy piles under lateral loading: analytical and numerical investigations[J]. **Renewable Energy**, 2022, 182: 172-191.
- [16] ZHAO R, LEUNG A K, KNAPPETT J A. Thermally induced ratcheting of a thermo-active reinforced concrete pile in sand under sustained lateral load[J]. **Géotechnique**, 2021(3): 1-39.
- [17] VITALI D, LEUNG A K, FENG S, et al. Centrifuge modelling of the use of discretely spaced energy pile row to reinforce unsaturated silt[J]. **Géotechnique**, 2021(3): 1-14.
- [18] 陈志雄, 赵华, 王成龙, 等. 砂土中能量桩单桩水平承载特性模型试验研究[J]. 工程力学, 2023, 41(3): 1-10.
- CHEN Zhi-xiong, ZHAO Hua, WANG Cheng-long, et al. Model test on lateral bearing behavior of single energy pile in sand[J]. **Engineering Mechanics**, 2023, 41(3): 1-10.
- [19] 赵春风, 刘丰铭, 邱志雄, 等. 砂土中竖向和水平荷载共同作用下的单桩承载特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 183-190.
- ZHAO Chun-feng, LIU Feng-ming, QIU Zhi-xiong, et al.

- Study on bearing behavior of a single pile under combined vertical and lateral loads in sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(1): 183-190.
- [20] 顾国峰, 赵春风, 李尚飞, 等. 砂土中组合荷载下单桩承载特性的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 2): 379-383.
- GU Guo-feng, ZHAO Chun-feng, LI Shang-fei, et al. Laboratory model tests on bearing character of single pile under combined load in sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(Suppl.2): 379-383.
- [21] 龚建清, 彭文哲. 倾斜荷载下能量桩受力变形特性三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2105-2111.
- GONG Jian-qing, PENG Wen-zhe. Three-dimensional finite element analysis of stress and deformation characteristics of energy piles under inclined loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(11): 2105-2111.
- [22] 黄福云, 周志明, 庄一舟, 等. 整体桥高性能混凝土桩-土相互作用试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 591-601.
- HUANG Fu-yun, ZHOU Zhi-ming, ZHUANG Yi-zhou, et al. Experiment on interaction of high performance concrete pile-soil in IAJBs[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(3): 591-601.
- [23] 汪杰, 姚文娟. 水平荷载作用下单桩桩周土抗力分布数值分析[J]. 安徽建筑, 2016, 23(3): 132-134.
- WANG Jie, YAO Wen-juan. Numerical analysis of soil resistance distribution around a single pile under lateral load[J]. **Anhui Architecture**, 2016, 23(3): 132-134.
- [24] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, BOUAZZA A. Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay[J]. **Engineering Geology**, 2007, 89(1-2): 144-154.
-
- 上接第 768 页
- [26] ZHANG Y, LU Y, LIU S, et al. Volumetric behavior of an unsaturated clayey soil-rock mixture subjected to freeze-thaw cycles: a new insight[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2022, 201: 103608.
- [27] 白福青, 刘斯宏, 王艳巧. 土工袋加固原理与极限强度的分析研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 172-176.
- BAI Fu-qing, LIU Si-hong, WANG Yan-qiao. Research on reinforcement mechanism and failure strength of soilbags[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Suppl.1): 172-176.
- [28] SHEN C, FAN K, LIU S, et al. A simple unified stress-strain model for geotextile-wrapped soils[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2021, 49(3): 697-706.
- [29] WANG Y, WANG D, MA W, et al. Laboratory observation and analysis of frost heave progression in clay from the Qinghai-Tibet plateau[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2018, 131: 381-389.
- [30] AZMATCH T F, SEGO D C, ARENSEN L U, et al. New ice lens initiation condition for frost heave in fine-grained soils[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2012, 82: 8-13.
- [31] GAO H, GHOREISHIAN AMIRI S A, KJELSTRUP S, et al. Formation and growth of multiple, distinct ice lenses in frost heave[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2023, 47(1): 82-105.
- [32] TENG J, LIU J, ZHANG S, et al. Frost heave in coarse-grained soils: experimental evidence and numerical modelling[J]. **Géotechnique**, 2022: 1-12.
- [33] WANG C, LI S, LAI Y, et al. Predicting the soil freezing characteristic from the particle size distribution based on micro-pore space geometry[J]. **Water Resources Research**, 2022, 58(1): e2021WR030782.