

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.04.005

# 多次温度循环对能量桩桩顶位移影响分析

孔纲强<sup>1</sup>, 王成龙<sup>2,3</sup>, 刘汉龙<sup>1,2,3</sup>, 吴迪<sup>2,3</sup>, 车平<sup>4</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;  
3. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 4. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007)

**摘 要:** 能量桩是一种在承载上部建筑荷载的同时获取地热能源的新技术。但目前对于能量桩在冷、热循环过程中尤其多次冷、热循环情况下的热力学效应研究较少。基于模型试验方法, 针对预埋钢管单 U 型新型能量桩, 开展工作荷载作用下多次冷、热循环时的传热特性和承载特性, 尤其是桩顶位移变化规律的研究; 并开展无荷载作用下单次冷、热循环试验进行分析。试验结果表明, 冷、热循环引起的桩体热应变, 在加热时桩体内部产生压应力, 而在制冷时桩体内部产生拉应力, 同时温度引起桩侧不同部位分别产生正摩阻力和负摩阻力。相较于工作荷载, 无荷载作用下加热会使桩体位移上升约 41%, 而一次加热与制冷循环作用后, 无荷载作用下桩顶残余位移约为工作荷载作用下的 10%。多次冷、热温度循环会导致桩体沉降不断积累。

**关键词:** 桩基; 能量桩; 预埋钢管; 热力学效应; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)04-0958-07

## Analysis of pile head displacement of energy pile under repeated temperature cycling

KONG Gang-qiang<sup>1</sup>, WANG Cheng-long<sup>2,3</sup>, LIU Han-long<sup>1,2,3</sup>, WU Di<sup>2,3</sup>, CHE Ping<sup>4</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** Energy pile is a new technology which supports the upper building load and extracts geothermal energy from its surrounding simultaneously. However, there is only little research available on the thermal-mechanical behavior of the piles subject to heating-cooling cycles and particularly repeated cycles. Model tests are carried out to examine the heat transfer performance and bearing characteristics of energy pile with embedded steel tube under working loading conditions over repeated temperature cycling, and especially the law of pile head displacement. Moreover, the displacement is also observed and analyzed under no load over one cycle of heating and cooling for comparative analysis. The results show that the heating-cooling cycles produce thermal strain in the pile shaft, heating generates compressive stress and cooling induces the tensile stress. Meanwhile, the positive and negative frictions are yielded in different parts of the pile side due to temperature. The upward displacement magnitude of pile top under no working load is 41% greater than that under working load, but the final displacement of pile top is approximately 10% of that under working load after one heating-cooling cycle. The repeated temperature cycling can lead to continuous accumulation of settlement.

**Keywords:** pile foundation; energy pile; embedded steel tube; thermal mechanical behavior; model test

## 1 引 言

能量桩是一种以可持续发展为原则的新型地

源热泵技术, 通过将一些热交换原件与传统的桩基础相结合, 来达到同时承重和获取地热能的目的; 相较于传统的地源热泵技术可以节省花费和节约土

收稿日期: 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51378178); 教育部博士点联合基金项目(No. 20130094140001); 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室开放基金项目(No. 0902071812401); 江苏省自然科学基金(No. BK2012478)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51378178), the Doctoral Program Foundation of Ministry of Education of China (20130094140001), the Foundation of Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education (0902071812401) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2012478).

第一作者简介: 孔纲强, 男, 1982 年生, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事桩-土相互作用方面的教学和科研。E-mail: gqkong1@163.com

通讯作者: 王成龙, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事能量桩桩-土相互作用方面的科研工作。E-mail: wangchlong586@163.com

地<sup>[1-2]</sup>。预埋钢管单 U 型能量桩是一种新型能量桩技术,通过将钢管代替钢筋并将热交换管埋设其内,来达到减轻热交换管损伤和钢筋腐蚀的目的。其可以解决传统埋管形式存在的一些问题,提高能量桩的长期使用效能<sup>[3-4]</sup>。

近几年来国内外针对能量桩技术与应用,开展了一系列研究并取得了许多成果。Laloui<sup>[5]</sup>、Bourne-Webb<sup>[6]</sup>、Murphy<sup>[7]</sup>等开展了能量桩的现场试验,对桩体的应变分布、应力变化以及侧摩阻力的变化进行了研究。桂树强等<sup>[8-9]</sup>通过现场试验对能量桩的温度变化、应变变化和沉降进行了观测,并通过数值模拟对桩体的传热特性进行了对比分析。由于现场试验花费较大且周期较长,许多研究人员通过模型试验对能量桩进行研究。Stewart 等<sup>[10]</sup>通过离心机试验对桩体内部的应变变化进行了研究,Yavari 等<sup>[11]</sup>通过室内模型试验对不同结构荷载下金属桩的热弹塑性变形与恢复进行了研究。Ng 等<sup>[12]</sup>通过离心机试验对黏土中多次冷、热循环下桩体的热力学效应进行了研究。Saggu 等<sup>[13]</sup>对土体和桩体进行了摩尔-库仑和塑性模型假定,通过数值模拟对多次冷热循环下桩体的热力学效应的研究,黄旭<sup>[14]</sup>、王成龙<sup>[15]</sup>、刘汉龙<sup>[16]</sup>等通过模型试验研究了现浇大直径管桩(PCC 桩)以及不同埋管形式能量桩的热力学特性。

目前虽然对能量桩技术的研究较多,但对于预埋钢管单 U 型能量桩研究较少,并且仅局限于传热方面。本文通过开展模型试验对工作荷载作用下,单次和多次冷、热循环时能量桩的传热和承载特性进行研究,并对比分析了有无荷载对桩体位移的影响,为桩体在长期使用过程中应注意的问题提供参考和依据。

## 2 模型试验概况

### 2.1 桩周土体参数

试验选用的砂土天然密度为  $1.26 \text{ g/cm}^3$ ,天然湿度为 10.94%,最大干密度和最小干密度分别为  $1.77 \text{ g/cm}^3$  和  $1.40 \text{ g/cm}^3$ ,砂土内摩擦角为  $30.1^\circ \sim 32.2^\circ$ 。不均匀系数  $C_u=2.69$ ,曲率系数  $C_c=0.97$ ,颗粒级配曲线如图 1 所示。

自然风干天然砂土获得干砂,利用砂雨法填筑土体,并控制其相对密实度,漏斗底面与槽中砂土表面距离保持在 350 mm,本试验两次填砂中:第 1 次砂土相对密实度为 60%~64%,第 2 次相对密实度为 58%~61%。

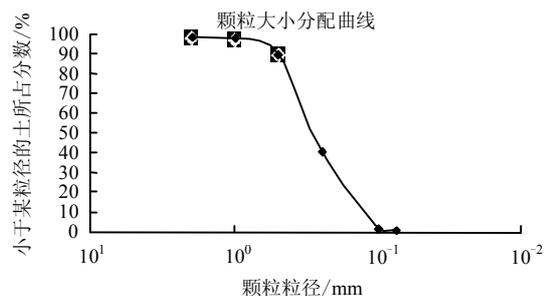


图 1 砂土颗粒级配图  
Fig.1 Sand grain composition

### 2.2 能量桩模型及其布置

试验模型桩由 C30 混凝土浇筑而成,配合比为水:水泥:砂:碎石=0.44:1:1.79:3,桩体直径  $D$  为 104 mm,桩长为 1 600 mm,桩体在模型槽中的有效长度  $L=1\ 400$  mm,弹性模量  $E=30$  GPa,热膨胀系数为  $1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,传热管外内径分别为 11、8 mm。钢筋直径为 6 mm、长度为 1 560 mm;预埋钢管单 U 型能量桩先将两根竖向钢筋替换为两根钢管,钢管内外径分别为 12、16 mm,长度为 1 460 mm,后将热交换管埋设在钢管内部,最后进行浇筑。桩体横截面及内部布置示意图如图 2 所示。

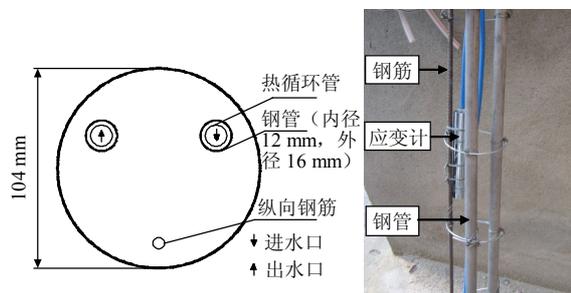


图 2 桩体横截面及内部布置示意图  
Fig.2 Schematic of cross-section and arrangement of strain gauge

试验模型槽尺寸为 3 m (长)  $\times$  2 m (宽)  $\times$  1.75 m (高),模型槽壁与桩中心的距离大于  $6D$ 。

桩体中分别布置了 3 个振弦式混凝土应变计和 3 个温度传感器,混凝土应变计距桩顶的距离分别为 440、850、1 260 mm,温度传感器距桩顶的距离分别为 440、850、1 260 mm。

模型槽中预埋有土压力盒以及温度传感器,土压力盒分别位于桩体底部,以及离土体表面 240、1 060 mm 处。底部土压力盒 (P1) 直径为 95 mm,上部土压力盒 (P2, P3) 直径为 108 mm。在离土体表面 240、650、1 060 mm 的 3 层土体中温度传感器放置于距桩中心距 104 mm ( $1D$ )、208 mm

(2D)、312 mm (3D) 处。桩顶位移用百分表进行测量。模型试验布置示意图如图 3 所示。

### 2.3 试验过程

本试验的温控设备温控循环仪能够完成水速以及水温的自动控制，同一功率下不同温度的水温略有差异，在加热时水速控制为 3.21 L/min，制冷时水速控制为 3.01 L/min。加热和制冷时水温分别为 5 °C 和 55 °C。本试验在密闭试验室中进行，昼夜温差不超过 2 °C。由于本试验周期较长，从开始到结束室温变化为 12~16 °C。

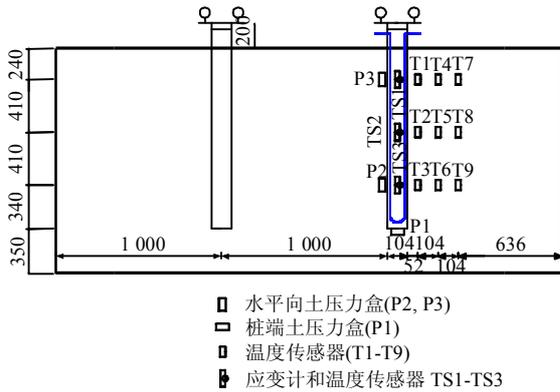


图 3 试验布置示意图 (单位: mm)

Fig.3 Schematic of model test arrangement (unit: mm)

本试验具体过程如下:

(1) 用千斤顶对图 3 所示左边桩体进行加载，直到桩体发生破坏，通过 Q-s 曲线测得其极限承载力在 21 kN 左右，工作荷载取为 10 kN (即安全系数为 2)。

(2) 之后对右侧桩体施加热荷载即桩体中通 55 °C 的热水，时间为 305 min，待桩体沉降稳定后，停止通水，自然冷却 18 h，之后通 5 °C 的冷水，给桩体施加冷荷载，时间为 265 min，待桩体沉降稳定后，停止通水，自然恢复。

(3) 恢复到自然状态后，对右侧桩体施加工作荷载，后对桩体施加热荷载即桩体中通 55 °C 的热水，时间为 305 min，待桩体沉降稳定后，停止通水，自然冷却 18 h，之后通 5 °C 的冷水，给桩体施加冷荷载，时间为 265 min，待桩体沉降稳定后，停止通水，自然恢复。

(4) 之后进行第 2 轮试验，重新挖砂填砂，待一切准备就绪时，对桩体施加工作荷载，后对桩体施加热荷载即桩体中通 55 °C 的热水，时间为 305 min，待桩体沉降稳定后，停止通水，自然冷却 8 h，之后通 3 °C 的冷水，给桩体施加冷荷载，时间为 265 min，

待桩体沉降稳定后，停止通水，自然恢复 390 min，之后通热水，重复之前的工作，如此循环 3 次。

工作荷载通过砝码堆载的方式进行，桩体顶部放置有刚性加载板，桩体工作荷载为 10 kN，分 10 级加载，每级 1 kN，时间间隔为 15 min。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 桩、土温度变化规律

研究土体温度变化规律时，由于各层土体温度变化大致相同，选取距土体表面 650 mm 平面上的温度即可，并选取距桩中心距 104、208 mm 处的温度进行观测，监测元件分别为 T2、T5。桩体从上到下所对应的监测元件分别为 TS1、TS2 和 TS3。图 4 为工作荷载作用下桩体和土体温度随时间的变化规律，在加热时桩体和土体温度均升高，桩体温度相较于土体温度变化较快，并且不同埋深处桩体温度变化略有差异，TS2 和 TS3 处温度变化相差不大，而 TS1 相较于 TS2 和 TS3 变化略小，其原因是受到外部低温空气的影响。对于土体，T2 处温度变化也较为明显，而 T5 处温度基本无变化。加热后，桩体和土体温度最大变化值分别为 13.75 °C 和 5.68 °C。在制冷时，桩体和土体温度降低，并且桩体温度变化较为明显，土体 T2 处温度也有较大变化，而 T5 处土体温度基本无变化。制冷结束后桩体和土体温度最大变化值分别为 -4.4 °C 和 -2.12 °C。制冷开始前，桩体和土体以及不同埋深处的桩体温度相差较大，其原因是自然恢复过后，干燥砂土中桩体和土体温度恢复较慢，并且由于外部低温空气的影响，引起初始温度的差异。从而造成制冷过程中不同埋深处桩体温度的不同。

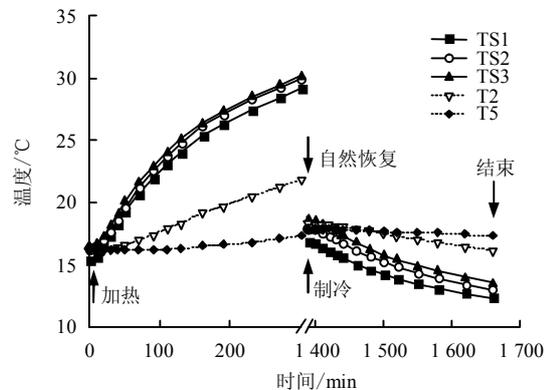


图 4 冷热循环时桩、土温度变化规律

Fig.4 Temperature variations of pile and soil under heating and cooling

图 5 所示为多次冷、热循环时桩体和土体温度随时间的变化规律，每次冷、热循环过程中桩体和

土体温度变化趋势基本一致。同时可观察到在冷循环开始前桩体和 1D 处土体温度都下降,而 2D 处土体温度均上升,反映了自然恢复过程中热量的径向传递以及土体的储热机制,随着循环次数的增加,热量也不断累加,3 次冷、热循环过后,桩体和土体温度都有所提高。其中桩体温度仅变化了 1.25 °C,1D 和 2D 桩径处土体分别变化了 2.75 °C 和 2.44 °C。本试验加热和制冷时温差梯度差别较大,同时加热时间较制冷时间长,是引起土体温度变化较大的主要原因。

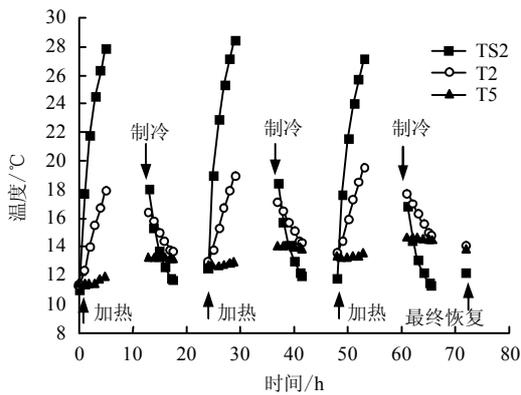


图 5 循环荷载作用下桩、土温度变化规律

Fig.5 Temperature variations of pile and soil under thermal cycle load

### 3.2 土压力变化规律

图 6 所示为工作荷载作用下桩体水平土压力的变化规律,由于桩体和土体热膨胀系数以及温度变化的不同,桩体受热膨胀和受冷收缩时会引起土体压力的增大与减小。加热时不同位置处土体压力均增大,在前 150 min 压力增大较快,之后变化较慢,不同位置土体压力变化差别不大,P2 和 P3 处土体压力变化值分别为 6.51、6.33 kPa。制冷时土体压力降低,由于制冷时温差梯度较小,P2 和 P3 处土体压力变化值仅为-1.26 kPa 和-1.40 kPa。图 6 所示水平土压力的变化趋势与图 4 桩体温度变化趋势基本一致,水平土压力的变化又会引起桩侧摩擦阻力的变化,反映了热效应引起的力学效应的变化。

### 3.3 桩体应变和应力变化规律

在加热和制冷时桩体由于膨胀和收缩会产生热应变,通过混凝土应变计可对冷热循环过程中桩体的热应变进行观测,在加热时桩体膨胀,定义其热应变为正值,制冷时桩体收缩,其热应变定义为负。图 7 所示为工作荷载作用下桩体内热应变沿桩身分布规律。纵坐标中 Z 为距土体表面深度,L 为模型槽中桩体有效长度。土体表面处桩体热应变可通过 TS1 处所测应变线性分析得到。通过观测,在

加热时桩体内部产生了正的热应变,而在制冷时桩体产生了负的热应变,最大热应变分别为  $136 \times 10^{-6}$  和  $-41.5 \times 10^{-6}$ ,在桩体中部应变变化最小,这是由于在桩体两端受到约束时,靠近桩体中间处有一个收缩和膨胀交界面,其对应的观察应变最小。该试验现象可通过 Bourne-Webb<sup>[17]</sup>的边界假设和模型简化分析得到验证。

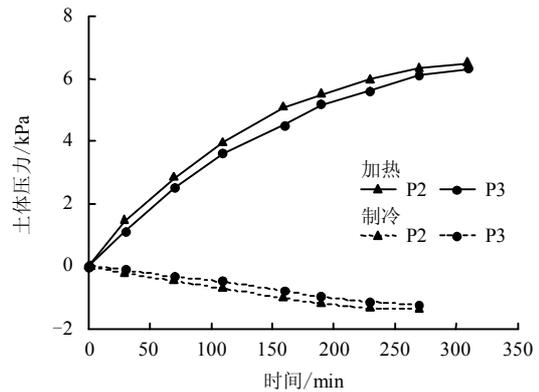


图 6 冷、热循环时水平土压力变化

Fig.6 Variations of horizontal soil pressure with time elapsing subject to heating-cooling cycles

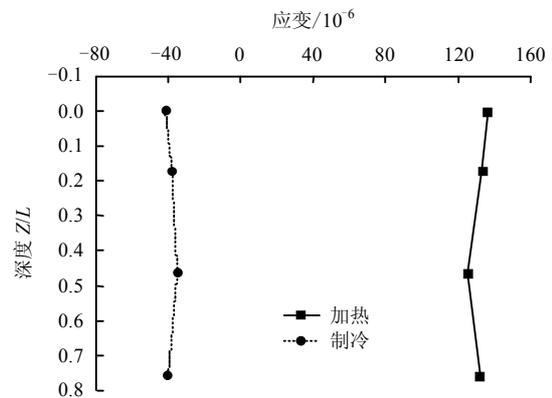


图 7 冷、热荷载作用桩体应变分布

Fig.7 Strain distribution along depth under heating-cooling cycles

由于土体和桩端的约束,桩体在加热和制冷时产生的观察应变小于其自由膨胀时的热应变,因此,桩体内部就会产生对应的热应力  $\sigma_T$  :

$$\sigma_T = E(\varepsilon_T - \alpha_c \Delta T) \quad (1)$$

式中:  $\alpha_c$  为混凝土线膨胀系数;  $\varepsilon_T$  为热应变;  $E$  为弹性模量;  $\Delta T$  为温度变化值。定义压应力为负,拉应力为正。图 8 所示为经过计算后的由温度引起的热应力分布图。在加热时桩体产生了压应力,制冷时桩体产生了拉应力,并且在桩体靠近中间处产生热应力最大,最大压应力和最大拉应力分别为 -241 kPa 和 123 kPa,其拉应力也远远低于混凝土抗

拉强度标准值 (2 000 kPa)。

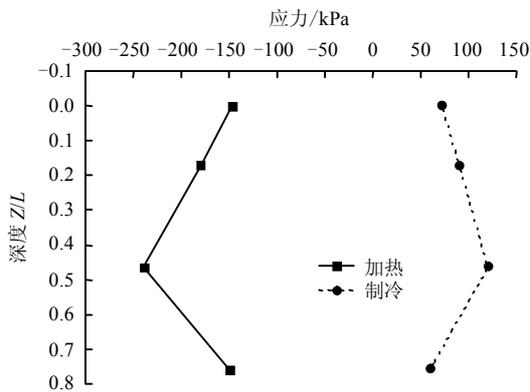


图 8 冷、热循环时桩体热应力分布  
Fig.8 Distribution of thermal axial stress under heating-cooling cycles

### 3.4 桩体侧摩阻力变化规律

在加热或制冷时，桩体和土体会产生相对位移，引起侧摩阻力的变化，不同埋深处土体的侧摩阻力的变化值可通过热应力来计算<sup>[7]</sup>。

$$f_{s,mob,j} = (\sigma_{T,j} - \sigma_{T,j-1})D / 4\Delta l \quad (2)$$

式中： $\Delta l$  为相邻应变计之间的距离； $j=1,2,3,4$ ，表示从桩顶到桩底。规定摩擦力向上为正，向下为负。图 9 所示为经计算后的侧摩阻力分布规律。桩端侧摩阻力假定为 0。加热时土体上部侧摩阻力为负，靠近底部侧摩阻力为正，反映了桩体受热向上膨胀时，土体向下的约束，向下膨胀时土体向上的约束。制冷时土体上部侧摩阻力为正，而下部为负，反映了桩体受冷向下和向上收缩时，土体向上和向下的约束。

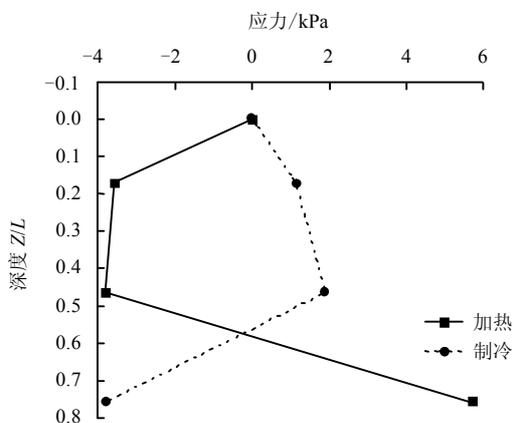


图 9 冷、热荷载作用侧摩阻力分布  
Fig.9 Distribution of mobilized side shear stress heating-cooling cycles

### 3.5 桩顶位移变化规律

图 10 所示为冷热循环时无荷载和工作荷载作用下桩顶位移变化曲线。加热时，无荷载和工作荷载分别作用下桩体均产生上升位移，最终位移分别为 0.166 mm 和 0.117 mm，无荷载作用下土体上升位移更为明显，约为工作荷载作用时的 1.41 倍，其原因是桩体上部无荷载约束，接近自由膨胀，所以其上升位移更明显。一段时间的自然恢复后，桩顶产生向下的位移，无荷载作用时，桩顶位移基本能恢复到初值，而工作荷载作用下桩顶位移沉降较大，最终沉降为 -0.070 mm，其原因可能是，由于热膨胀系数和热传导效率的差别，受冷时桩体收缩更快，其与土体之间的水平土压力减小，在工作荷载作用下，桩体易发生较大沉降。制冷时，无荷载作用下桩顶沉降较小，最终仅为 -0.017 mm，其原因是制冷时温差梯度较小。工作荷载作用下土体的最终沉降达到了 -0.163 mm。其原因与自然恢复时桩顶产生较大沉降的原因一致，反映了实际工作中建筑荷载作用下，桩体可能产生的安全隐患。

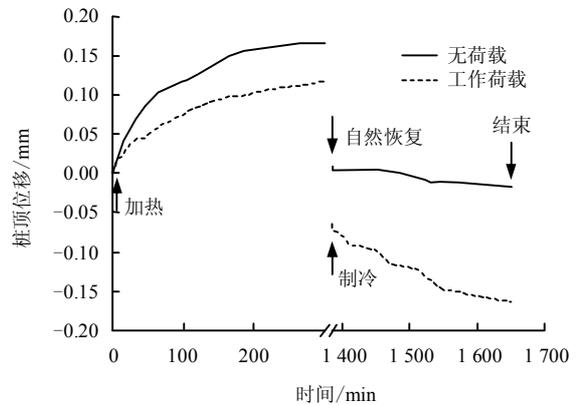


图 10 无荷载和工作荷载作用下桩顶位移变化曲线  
Fig.10 Displacements of pile head under no load and working load

图 11 所示为工作荷载作用下，多次冷、热循环时桩顶位移变化规律，每次冷、热循环时桩体位移的变化趋势基本一致，加热时桩顶均产生上升位移，制冷时桩顶沉降，加热后的自然恢复会引起桩顶较大沉降，而制冷后的自然恢复只会产生较少的上升位移，并且由于每轮冷、热循环时热荷载产生的上升位移小于冷荷载产生的沉降，因此，桩体总体在沉降，并且在不断累计，3 次冷、热循环过后，桩体最终沉降为 -0.528 mm，约为桩径的 0.5%，虽然仍相对较小，但在桩体的长期使用过程中，桩顶沉降仍会不断积累应当引起重视。加热时，桩体的第

2次上升位移比第1次大, 而第3次的上升位移也略大于第2次的上升位移, 反映了土体在冷、热循环过程中不断被塑性化, 对桩体变形的约束也越来越小。这也是桩体在长期使用过程中应注意的问题。

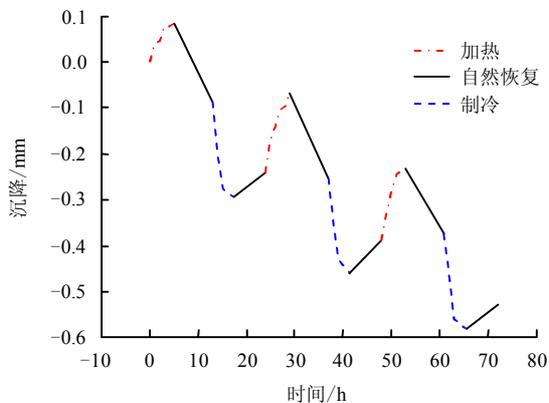


图11 循环热荷载作用下桩顶位移变化曲线  
Fig.11 Displacement of pile head under cycle thermal load

## 4 结 论

(1) 在冷、热循环时, 桩体温度和离桩轴线1D处土体温度变化较为明显, 2D处土体温度基本无变化, 由于外界环境温度的干扰, 不同埋深处桩体温度略有差异。多次冷、热循环过后, 桩体温度变化较小接近初值, 而土体温度变化较大, 尤其是2D处土体温度在不断增加。

(2) 加热后不同位置处的水平土压力均增大, 而且相差不大, 分别为6.5 kPa和6.3 kPa, 而制冷时水平土压力均减小, 分别为-1.26 kPa和-1.40 kPa。

(3) 冷、热循环时桩体由于膨胀和收缩会产生相应的热应变, 在加热和制冷时, 桩体中部产生较小的热应变, 而两端应变较大。而由于土体和荷载的约束, 桩体内部会产生相应的热应力, 在加热时桩体产生了压应力, 在制冷时桩体产生了拉应力, 其中靠近桩体中部热应力最大, 最大压应力和最大拉应力分别为-241 kPa和123 kPa。通过计算得到在加热时桩体上部产生了负侧摩阻力, 下部产生了正的侧摩阻力, 在制冷时桩体上部产生了正侧摩阻力, 下部产生了负侧摩阻力。

(4) 无荷载作用下的桩顶上升位移为工作荷载作用下的1.41倍, 自然恢复过后无荷载作用下的桩顶位移基本恢复到初值, 而工作荷载作用下的桩顶位移沉降为-0.070 mm; 制冷结束后, 工作荷载作用下的最终沉降位移为-0.163 mm; 而无荷载作用时仅为-0.017 mm, 反映了制冷时工作荷载对桩顶

沉降的重要影响。

(5) 每次冷、热循环过后桩顶总体在发生沉降, 并随着循环次数的增加而不断累积, 最终沉降为-0.528 mm, 达到其直径的0.5%。并且每次加热时桩体产生的上升位移较上一次大。

## 参 考 文 献

- [1] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. *Geotechnique*, 2006, 56(2): 81-122.
- [2] 刘汉龙, 孔纲强, 吴宏伟. 能量桩工程应用研究进展及PCC能量桩技术开发[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(1): 176-181.  
LIU Han-long, KONG Gang-qiang, CHARLES NG. Review of the applications of energy pile and development of PCC energy pile technical[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(1): 176-181.
- [3] 孔纲强. 能量桩换热管新型埋管方式技术比较分析[J]. *建筑节能*, 2014, 42(12): 104-108.  
KONG Gang-qiang. Comparative analysis on heat exchange tube in energy pile with various embedded manners[J]. *Building Energy Efficiency*, 2014, 42(12): 104-108.
- [4] 孔纲强, 彭怀风, 吴宏伟, 等. 一种地源热泵灌注桩钢筋笼内埋管的施工方法: 中国, ZL201310302155.6[P]. 2013-11-06.  
KONG Gang-qiang, PENG Huai-feng, CHARLES NG, et al. A new-type energy pile with embedded steel tubes: China, ZL201310302155.6[P]. 2013-11-06.
- [5] LALLOUI 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] MURPHY K D, MCCARTNEY J S, HENRY K H. Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations[J]. *Acta Geotechnica*, 2015, 10(2): 179-195.
- [8] 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, CHENG Xiao-hui. In-situ test for structural responses of energy pile to heat exchanging process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(6): 1087—1094.
- [9] 桂树强, 程晓辉, 张志鹏. 地源热泵桩基与钻孔埋管换热器换热性能比较[J]. **土木建筑与环境工程**, 2013, 35(3): 151—156.
- GUI Shu-qiang, CHENG Xiao-hui, ZHANG Zhi-peng. Comparative analysis of heat exchange performance of energy piles and borehole heat exchangers in GSHP system[J]. **Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering**, 2013, 35(3): 151—156.
- [10] STEWART M A, MCCARTNEY J S. Strain distributions in centrifuge model energy foundations[M]. [S. l.]: Geotecnology, ASCE, 2012: 25—29.
- [11] YAVARI N, TANG A M, PEREIRA J M, et al. Experimental study on the mechanical behaviour of a heat exchanger pile using physical modelling[J]. **Acta Geotechnica**, 2014, 9(3): 385—398.
- [12] NG C W W, SHI C, GUNAWAN A, et al. Centrifuge modelling of energy piles subjected to heating and cooling cycles in clay[J]. **Géotechnique Letters**, 2014, (4): 310—316.
- [13] SAGGU R, CHAKRABORTY T. Cyclic Thermal-mechanical analysis of energy piles in sand[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2015, 33(2): 321—342.
- [14] 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[J]. **岩土力学**, 2015, 36(3): 667—673.
- HUANG Xu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Experimental on thermal-mechanical characteristics of PCC energy pile under circular temperature field[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 667—673.
- [15] 王成龙, 刘汉龙, 孔纲强, 等. 工作荷载下温度循环对桩基变形与应力的影响分析[J]. **岩土力学**, 2016, 37(增刊 1): 317—322.
- WANG Cheng-long, LIU Han-long, KONG Gang-qiang, et al. Influence of circular temperature on the strain and stress of energy piles under a working load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp. 1): 317—322.
- [16] 刘汉龙, 王成龙, 孔纲强, 等. U 型、W 型和螺旋型埋管形式能量桩热力学特性对比模型试验[J]. **岩土力学**, 2016, 37(增刊 1): 441—447.
- LIU Han-long, WANG Cheng-long, KONG Gang-qiang, et al. Comparative model test on thermomechanical characteristics of energy pile with U-shape, W-shape and spiral-shape[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp.1): 441—447.
- [17] BOURNE-WEBB P J, AMATYA B, SOGA K. A framework for understanding energy pile behavior[J]. **Geotechnical Engineering**, 2012, 166(2): 170—177.

#### 上接第 957 页

- [6] WANG L Z, SHEN K L, YE S H. Undrained shear strength of  $K_0$  consolidated soft soils[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2008, 8(2): 105—113.
- [7] 黄茂松, 宋晓宇, 秦会来.  $K_0$  固结黏土基坑抗隆起稳定性上限分析[J]. **岩土工程学报**, 2008, 30(2): 250—255.
- HUANG Mao-song, SONG Xiao-yu, QIN Hui-lai. Basal stability of braced excavations in  $K_0$ -consolidated soft clay by upper bound method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(2): 250—255.
- [8] 侯伟, 姚仰平, 崔文杰.  $K_0$  超固结土的不排水抗剪强度[J]. **力学学报**, 2008, 40(6): 795—803.
- HOU Wei, YAO Yang-ping, CUI Wen-jie. Undrained shear strength for  $K_0$  overconsolidated clays[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2008, 40(6): 795—803.
- [9] 郭小青, 朱斌, 刘晋超, 等. 珠江口海洋软土不排水抗剪强度及循环弱化特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2016, 37(4): 1005—1012.
- GUO Xiao-qing, ZHU Bin, LIU Jin-chao, et al. Experimental study of undrained shear strength and cyclic degradation behaviors of marine clay in Pearl River Estuary[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(4): 1005—1012.
- [10] 黄茂松, 柳艳华. 天然软黏土屈服特性及主应力轴旋转效应的本构模拟[J]. **岩土工程学报**, 2011, 33(11): 1667—1675.
- HUANG Mao-song, LIU Yan-hua. Simulation of yield characteristics and principal stress rotation effects of natural soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(11): 1667—1675.