

DOI: 10.11779/CJGE202002013

# 低承台 2×2 能量桩基础单桩运行热力耦合特性研究

方金城<sup>1</sup>, 孔纲强<sup>1, 2</sup>, 孟永东<sup>2</sup>, 许晓亮<sup>2</sup>, 刘红程<sup>2</sup>

(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. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 能量桩技术是一种集地源热泵和建筑桩基功能于一体的新型节能技术。为了研究能量桩在运行过程中的热力学特性及其对基础结构的影响规律, 依托低承台 2×2 群桩基础, 开展单根能量桩加热工况下的群桩基础热力响应特性现场试验, 实测能量桩、对角桩及承台的温度和应变等变化规律, 着重分析能量桩本身由于温度变化引起的力学特性、及其对桩周土体、邻桩和承台等结构的影响规律。研究结果表明, 本文试验条件下, 加热工况下低承台 2×2 桩基础中单根能量桩桩身中部产生的最大约束压应力值约为 3.94 MPa, 约为考虑桩体被完全加热和完全约束情况下的应力上限值的 48%; 在温降和运行桩的共同影响下, 承台中部将产生约为 1.05 MPa 的附加拉应力(约为混凝土抗拉强度值的 43.8%); 在温度和上部荷载的耦合作用下, 能量桩桩顶位移达 -0.6 mm, 约为桩径的 0.6%。

**关键词:** 低承台桩基础; 能量桩; 温度应力; 热力耦合; 现场试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2020)02 - 0317 - 08

作者简介: 方金城(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事能量桩技术方面的研究工作。E-mail: jincheng199412@163.com。

## Thermo-mechanical coupling characteristics of single energy pile operation in 2×2 pile-cap foundation

FANG Jin-cheng<sup>1</sup>, KONG Gang-qiang<sup>1, 2</sup>, MENG Yong-dong<sup>2</sup>, XU Xiao-liang<sup>2</sup>, LIU Hong-cheng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankments Dam Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** The energy pile technology is a new energy-saving technology that integrates the functions of ground source heat pump and building pile foundation. In order to study the thermo-mechanical characteristics of energy piles and their effects on the other parts of pile foundation, field tests on the thermal response of a 2×2 pile-cap foundation under single pile heating conditions are carried out. The temperature and strain changes of energy piles, diagonal piles and cap are measured. The mechanical properties of the energy piles due to temperature changes, the influence laws on the soil around the pile and the structure of the cap are discussed. It is shown that the maximum constraint compressive stress of 3.94 MPa is generated in the middle of the pile during the summer operation of the energy piles. The condition of the thermal stresses associated with the complete heating and restraint of the pile provides a suitable upper bound for design, and the measured value is about 48% of the upper bound. Under the combined effects of atmospheric temperature and operating pile, an additional tensile stress of approximately 1.05 MPa (approximately 43.8% of the tensile strength of concrete) will be induced in the middle of the cap. The head displacement of the energy pile is about -0.6 mm (0.6% of pile diameter) under the thermo-mechanical coupling.

**Key words:** pile-cap foundation; energy pile; temperature stress; thermal coupling; field test

## 0 引言

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础, 能源问题一直是备受关注的重要课题。能量桩技术作为一种新型的节能技术, 近年来得到了越来越广泛的关注和应用, 该技术创新性地将传统地源热泵技术与建筑桩基相结合<sup>[1]</sup>。区别于传统地源热泵技术, 能量桩技术无需专门钻孔, 具有较高的传热性能及节约用地面积等优势<sup>[2]</sup>。能量桩在运行过程中, 一方面需要承担来自上部结构的荷载作用, 另一方面还需要

承担由于桩体温升或温降产生的温度荷载<sup>[3]</sup>。因此, 能量桩的结构应力和变形问题是决定该技术能否推广使用的最重要问题之一。

针对能量桩的结构应力和变形问题, 相关研究人员开展了系列现场试验研究, 并取得了一定的成果。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778212)

收稿日期: 2018 - 09 - 12

\*通信作者(E-mail: gqkong1@163.com)

Bourne-Webb 等<sup>[4]</sup>实测了加热/制冷两种换热模式下单根能量桩的应力变形关系; You 等<sup>[5-6]</sup>分析了不同加热功率、流速及进水温度对单根能量桩的热力耦合特征; Sutman 等<sup>[7]</sup>研究了单根能量桩在多次加热—制冷循环下的温度、变形及应力关系; 路宏伟等<sup>[8]</sup>开展了单根摩擦型能量桩现场测试, 分析了在多级上部结构荷载及不同换热工况下, 单根独立摩擦型能量桩的热力耦合特性。相关研究成果对于掌握能量桩热力耦合特性具有良好的意义; 然而, 这些研究主要均是针对无承台单根能量桩的, 对于含承台能量桩基础的相关研究仍相对较少。虽然 Laloui 等<sup>[9]</sup>、Murphy 等<sup>[10]</sup>、Kong 等<sup>[11]</sup>研究了桩—筏基础中单根能量桩运行引起的热力耦合特性; 然而, 这些研究主要关注运行能量桩桩体本身的温度、应力与变形特性, 对于筏板结构及其邻近桩体的相关实测数据仍相对匮乏, 对于能量桩基础内复杂相互作用的认识也相对不足。

因此, 本文依托低承台  $2 \times 2$  群桩基础, 开展单根能量桩热响应特性现场试验, 实测并分析在单根能量桩加热运行工况下, 能量桩桩体本身的温度变化及约束应力分布规律; 同时分析单桩能量桩运行对地层温度场、承台及其邻近桩体的影响规律, 为低承台能量桩基础的设计与计算提供参考依据。

## 1 现场试验概况

### 1.1 工程项目背景

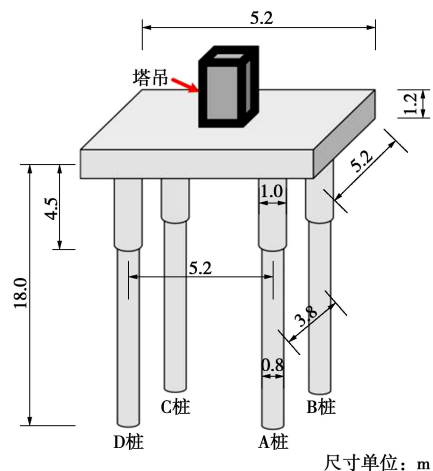
本文现场试验依托于湖北省宜昌市的三峡大学水利水电与环境工程教学实验中心楼工程。项目主体结构包括主副楼, 主楼地上 15 层, 地下 1 层, 副楼地上 6 层, 地下 1 层。利用工程项目的塔吊桩基础中开展能量桩研究, 桩基础形式为低承台  $2 \times 2$  群桩基础, 正方形布置。桩基为钻孔灌注桩, 桩长为 18.0 m, 桩顶以下 0~4.5 m 范围内桩径为 1.0 m, 桩顶以下 4.5~18.0 m 范围内桩径为 0.8 m, 桩间距为 3.8 m; 桩身和承台混凝土强度等级均为 C40, 承台尺寸为  $5.2 \text{ m} \times 5.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),  $2 \times 2$  能量桩—承台基础布置示意图如图 1 所示。

### 1.2 换热管及测试元件布置

振弦式应变计/温度计传感器和换热管均由细钢丝绑扎在钢筋笼上, 随钢筋笼一同埋于桩体与承台混凝土中。钢筋笼直径为 0.7 m, 由 10 根纵向主筋组成, 采用螺旋型箍筋。承台中分上、下两层布置水平传感器, 具体布置形式如图 2 (a) 所示; 4 根能量桩的埋管形式均采用 W 型, 进出水管由承台顶部伸出, 换热管为 PE 管, 其外径为 25 mm、壁厚 2 mm, 具有导热



(a) 塔吊实物图

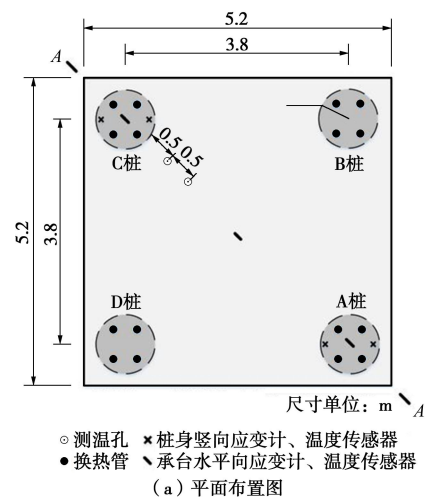


(b) 基础布置示意图

图 1 能量桩—承台基础布置示意图

Fig. 1 Sketch map of energy pile - cap foundation

性能好、可塑性强等特点, 其中在 A、C 桩中布置轴向传感器, 沿深度方向每间隔 3 m 对称布置一组传感器, 在 A 桩底部布置两个土压力计, 具体布置形式如图 2 (b) 所示; 能量桩横截面换热管及测试仪器布置形式示意图如图 2 (c) 所示。



尺寸单位: m  
 ○ 测温孔 × 桩身竖向应变计、温度传感器  
 ● 换热管 ▽ 承台水平应变计、温度传感器  
 (a) 平面布置图

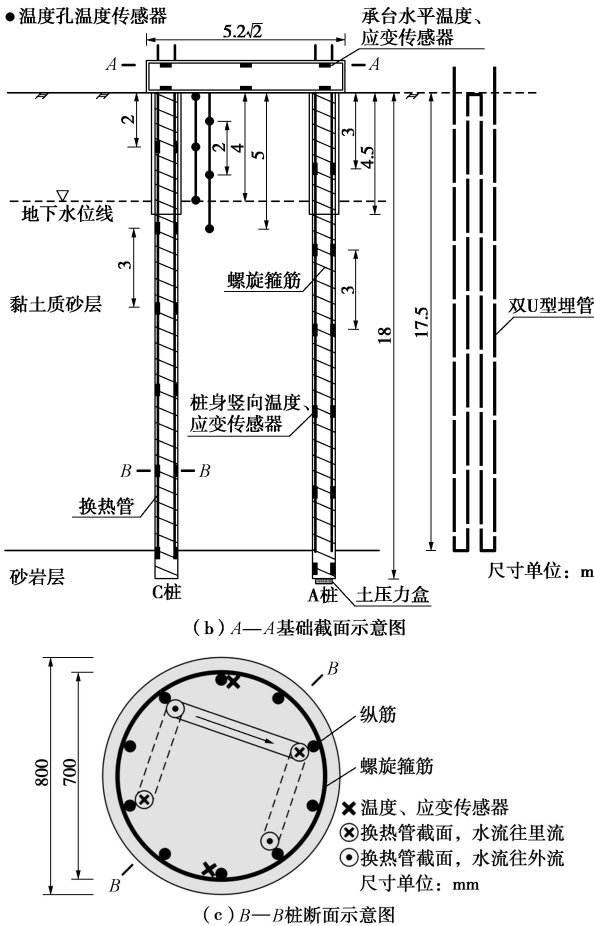


图2 能量桩-承台基础换热管及测试元器件布置示意图

Fig. 2 Layout of heat exchange tube and instruments in energy pile-cap foundation

1.3 桩周岩土体性质

桩周岩土层主要为黏土质砂层和砂岩层, 黏土质砂层中砾石以上粗粒组含量在 10%~15%。通过现场勘察揭露的地下水水面深度约为 4 m, 桩端嵌入弱风化砂岩层中, 具体土层基本物理力学性质如表 1 所示。根据桩周土的热性能测试结果, 桩深度范围内的土层平均热导率约为 1.70 W/(m·K)。现场试验开始前, 测试现场实测桩体温度分布如图 3 所示, 近地表由于受到大气温度的影响, 不同时间温度差异相对较大, 距离地表 10 m 以下深度温度基本稳定在 19℃~20℃左右。通入常温水进行能量桩运行循环, 用以获取初始平均桩身温度, 如图 4 所示, 通过实测获得桩身初始平均温度约为 18.8℃。

1.4 荷载类型及试验测试过程

低承台 2×2 群桩基础顶部受塔吊荷载作用, 塔吊总自重约为 440 kN; 试验期间, 塔吊处于非工作状态, 塔吊长、短附臂产生的弯矩基本平衡, 结构达到整

表1 土层基本物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of layered soils

土类	测试深度/m	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	塑限/%	液限/%	压缩系数 $\alpha_{1,2}$	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
黏土质砂	1	1.81	12.4	11.3	25.5	0.78	17.1	22.9
	5	1.99	20.7	12.4	26.1	0.45	26.0	14.8
	13	2.00	23.4	10.6	25.3	0.44	27.2	13.11

体平衡, 则与一般静力荷载类似, 对基础不产生弯矩。

本文试验模拟能量桩夏季运行模式, 以恒定的加热功率 (2.5 kW) 加热水箱中的水, 用水泵以恒定的循环流量 0.5 m<sup>3</sup>/h 导入 C 桩, 将热量释放到岩土层中, 经过桩体循环降温后的水返回水箱中继续循环。试验期间, 大气温度、进/出水温度随运行时间的变化曲线如图 5 所示。试验测试时间为 2018 年 1 月 18 日—2 月 4 日 (共计 16 d), 期间大气平均温度约为 10℃, 这种反季节模拟可能会导致能量桩的力学性质与实际情况有所差异; 针对这种差异, 本文将依据现场测试结果加以说明。在加热 C 桩 384 h 后, 进水温度达到 46.4℃, 出水温度由原来的 12.3℃升至 42.0℃; 由于受现场实测期间环境温度、昼夜温差及管道保温措施效果等综合因素影响, 进/出水温度存在轻微波动。

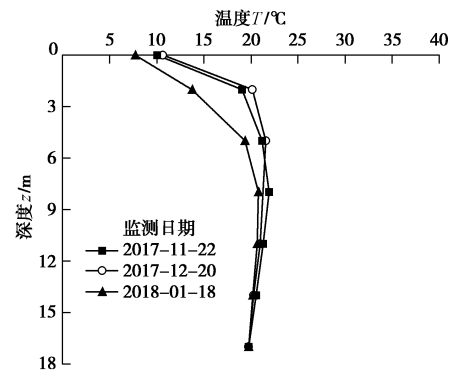


图3 试验现场初始桩身温度分布

Fig. 3 Distribution of initial temperature of pile in-situ

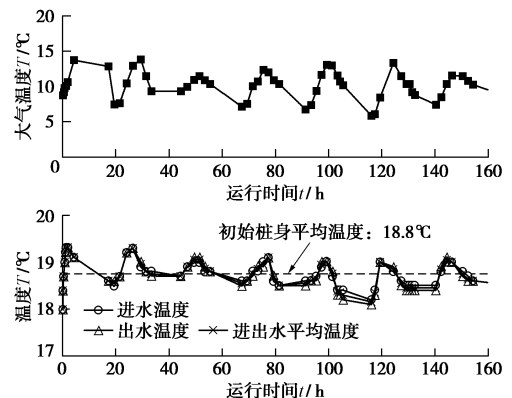


图4 桩身初始平均温度测试曲线

Fig. 4 Curves of test initial average temperature of pile

2 能量桩热响应特性分析

2.1 桩身温度响应

图 6 为试验前、后 C 桩桩身的温度分布曲线。由图 6 可知, 在运行过程中, 桩身各部位的温度均有一定程度的提高; 在试验前后, 桩身平均温度由 18.8℃

升至 32.6℃。但温度变化量在桩身的分布并不均匀，其中在桩顶产生的温度升幅最大，桩底最小，整体呈现温度升幅随深度降低的分布规律。由于进行反季节模拟，近地表深度范围内初始温度较低，更易达到较高的温度升幅；但实际夏季运行时，近地表初始温度将高于 10 m 以下温度，因此本试验条件下桩顶部产生的温度升幅将大于实际夏季运行情况。而由于桩底受桩底面以下半无限相对低温岩土层的作用，桩底的热量消散速度较桩身其他部位大；因此，桩底的温度升幅最小。

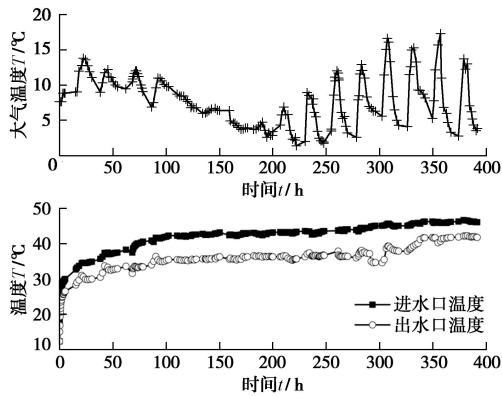


图5 大气温度、进/出水温度随运行时间的变化关系

Fig. 5 Curves of air temperature and inlet/outlet temperature versus time

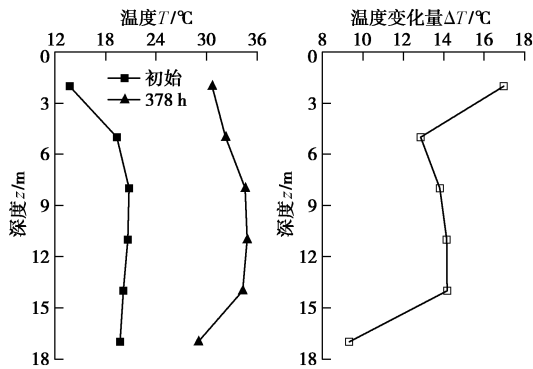


图6 C 桩桩身温度变化关系曲线

Fig. 6 Distribution of temperature of pile C

在运行时间为 10~16 d 时，此时桩的换热较稳定，进水和出水的平均温度随桩身温度升幅的变化规律如图 7 所示。由图 7 可知，随着进水和出水平均温度的提高，各深度温度升幅也呈现一定的增长，总体上呈一定的线性相关关系。通过线性拟合，得到各桩深对应的线性相关关系方程，不同桩深对应的相关方程仅在斜率上有所差异，截距上相同。这是由于通过初始桩温测试，得到平均初始温度为 18.8℃，而当进水和出水的温度平均值与平均初始温度相同时，桩体将不进行换热，桩身温度将不发生改变，温度升幅为 0。而斜率表征各深度受热扰动的影响程度，斜率越小，

受热扰动影响越大，桩顶受热扰动影响最大，相同进水和出水均温下温度增幅最大；桩底受热扰动最小，桩中部斜率相近，受热扰动影响也相近。

由于进水和出水均温可近似等于处于各桩深的换热液平均温度，而夏季模式下，换热后桩身温度难以超过换热液均温；因此温升线存在一个上限，即  $\Delta T = T^* - 18.8$ ，表征换热后，桩身温度恰好等于进出水均温。但是，现实情况下，由于相对低温岩土层的散热作用，桩身温度往往低于进水和出水平均温度。

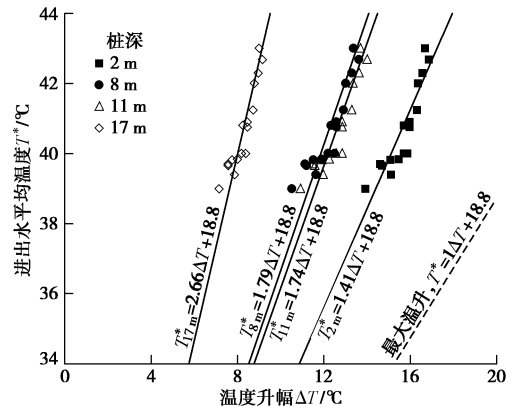


图7 进水和出水平均温度与温度升幅关系曲线

Fig. 7 Variation of average temperature of inlet & outlet water in response to temperature change

### 2.2 桩身应变与应力

在桩体温度升高的同时，桩体也将随之发生热膨胀变形，轴向上由于受到桩侧摩阻力及桩两端的约束作用，实际测量到的桩身轴向变形将小于无约束情况下自由膨胀的变形量。桩身约束应力为桩体变形受限而产生的应力，受热膨胀时，轴向约束应力为压力，表达式为

$$\sigma_a = -E \cdot (\epsilon_{free} - \epsilon_{obs}) \quad (1)$$

式中  $E$  为混凝土的弹性模量，混凝土强度等级为 C40，取 32.5 GPa<sup>[12]</sup>； $\epsilon_{free}$  为试验过程中无约束条件下的桩身应变，由于试验过程中未改变桩顶荷载等试验条件，因此只需考虑自由热膨胀产生的应变，计算式为  $\epsilon_{free} = \alpha \cdot \Delta T$ 。 $\alpha$  为混凝土的热膨胀系数，取  $10\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ <sup>[12]</sup>， $\Delta T$  为试验前后温度改变量， $\epsilon_{obs}$  为实际观测的应变值。

竖向应变、约束应力在桩身的分布曲线如图 8 所示。由图 8 可知，约束应力在桩身的分布规律与由于温度改变产生的自由应变分布规律相似，则可得约束应力与温度改变量  $\Delta T$  存在一定的相关关系。其中，桩顶产生的温度变化量最大，桩中部的温度改变量小于桩顶；但两部位产生约束应力却相近，则桩身不同部位受到的约束大小也是影响约束应力的重要因素，可以判断桩中部受到的约束作用大于桩顶；而桩底由于受热扰动影响最小，温度升幅较小；因此，约束应力

相较其它部位最小。

约束应力与桩身温度升幅之间的相关关系如图 9 所示。由图 9 可见：约束应力与温度升幅存在明显的线性相关关系，通过线性拟合得到两个最大约束应力位置的直线方程；由于本次试验过程中约束应力仅为温度变化产生，因此当温度升幅为 0 时，并不会产生约束应力，拟合直线均经过原点；而直线的斜率表示约束能力的大小，斜率数值越大表示相同的温升能产生更大的约束应力，约束能力越强，其中桩中部(11 m)的约束能力大于桩顶(2 m)；同样存在一个上限，即由于温升产生的热膨胀变形完全被约束，此时  $\sigma_a = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T$ 。

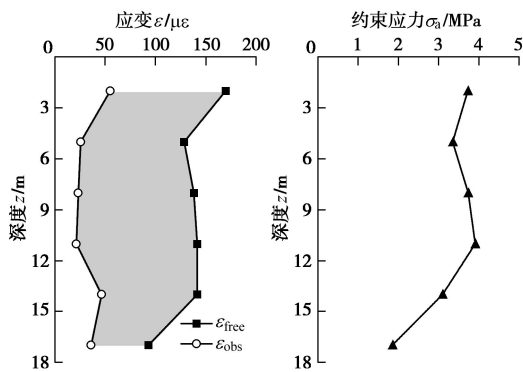


图 8 桩身竖向应变、约束应力分布曲线

Fig. 8 Distribution of vertical strain and constraint stress of pile along depth

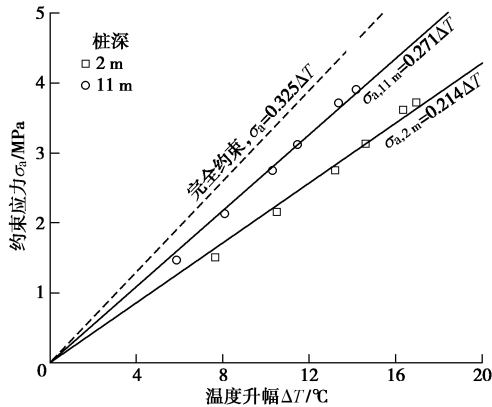


图 9 约束应力与桩身温度升幅关系曲线

Fig. 9 Variation of constraint stress in response to temperature change of piles

在进行能量桩设计时，可以通过现场地温资料或进行初始桩温测试，大致得到桩长范围内的初始平均桩温  $T_0$ ，推求最大的桩身温度升幅，并结合 (JGJ/T 438—2018)《桩基地热能利用技术标准》给出了单根能量桩温度应力的简化计算公式<sup>[13]</sup>，预估在一定进水和出水温度范围内桩身的应力上限值：

$$\sigma_{\max} = -E \cdot \alpha \cdot (T^* - T_0) \quad (2)$$

式中  $\sigma_{\max}$  为桩身约束应力的上限值； $T^*$ 为进水和出水的平均温度； $T_0$ 为初始桩身温度。

综合图 7, 9 的拟合曲线，建立约束应力  $\sigma_a$  与  $(T^* - T_0)$  (进水和出口均温与初始平均桩温之差) 的相关关系，如图 10 所示。各曲线表达式为

$$\sigma_a = -k \cdot T' = -k(T^* - T_0) \quad (3)$$

式中， $k$  值越大表示在同一进水和出水均温条件下，能产生越大的约束应力， $k$  值的上限为  $E \cdot \alpha$ 。由图 10 可知，桩中部(11 m)的直线斜率略大于桩顶部(2 m)，即最大约束应力将出现在桩中部。但由于本试验在冬季开展，使得桩顶部产生的温度升幅大于实际夏季运行，因此本试验桩顶产生的约束应力将大于实际情况。

在能量桩运行 384 h (16 d) 后，实测进水和出水的平均温度约为 44℃。对比现场实测和式 (2) 计算出的约束应力可知，现场实测得到的低承台四桩基础中单根能量桩最大约束应力值约为 3.94 MPa (其中取  $k=0.156$ )，约为 C40 混凝土轴心抗压强度 (27.0 MPa)<sup>[12]</sup> 的 14.6%；式 (2) 计算得到的单根能量桩最大约束应力约为 8.19 MPa，约为 C40 混凝土轴心抗压强度的 30.3%；式 (2) 计算得到的估算值为能量桩的应力设计计算提供了一个上限值，实测最大应力约为该上限值的 48%。

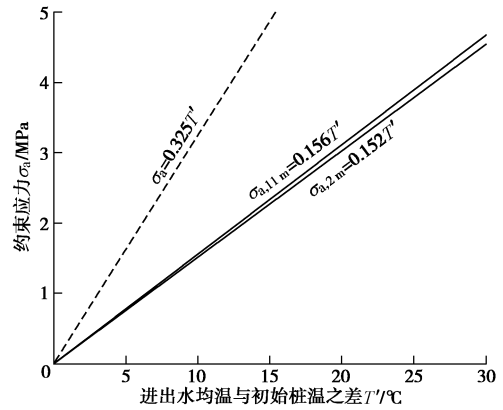


图 10 桩身约束应力随  $(T^* - 18.8)$  变化曲线

Fig. 10 Variation of constraint stress in response to  $(T^* - 18.8)$

### 2.3 桩顶位移

能量桩运行过程中，桩体由于温度变化引起热胀冷缩，也将引起桩顶位移变化。国内外相关学者开展了换热过程中能量桩桩顶位移的研究，积累了宝贵的现场实测资料 (表 2)。

本文试验桩桩端嵌入整体稳定的砂岩层中，不考虑桩端产生位移；因此，桩体受热膨胀，仅产生桩顶的抬升，可根据桩身实测应变大致估算桩顶位移，计算式为

$$s = - \sum \varepsilon_i \cdot \Delta l_i \quad (4)$$

式中  $s$  为桩顶位移, 桩顶沉降时位移为正值; 将桩体沿长度划分为数段等应变桩段,  $\Delta l_i$  为各桩段的长度,  $\varepsilon_i$  为各桩段的实测应变。

表2 现场测试能量桩桩顶位移值

Table 2 Measured displacements of energy pile top

桩长 /m	桩径 /mm	桩基类型	桩端土	结构荷载 /kN	温度变化 /°C	桩顶位移 /mm	文献来源
23.0	560	单桩	硬黏土	1200	-19~+29.4	4.0~-2.0	Bourne-Webb 等 <sup>[4]</sup>
14.8	910	桩筏	砂岩	2840	-5~+14	0.4~-0.8	Mccartney 等 <sup>[14]</sup> 、Murphy 等 <sup>[10]</sup>
12.0	800	单桩	泥质砂岩	1600	+22.2	-0.6	桂树强等 <sup>[3]</sup>

桩顶位移随运行时间的变化曲线如图 11 所示。

由图 11 可知, 由于运行初期桩身温度较低, 在稳定热功率作用下, 桩身温度升高、桩顶位移也相应增长; 而后桩身温度升幅逐渐趋于稳定, 桩顶位移也逐步趋于稳定, 最终达到约 -0.6 mm (桩径的 0.6‰) 的桩顶位移; 受热膨胀产生的桩顶抬升也将对承台及其它桩体产生影响。

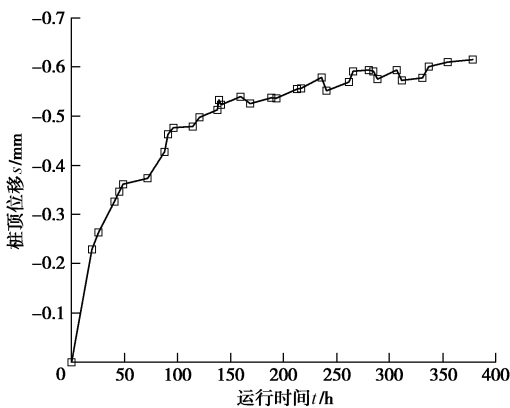


图 11 桩顶位移随运行时间变化曲线

Fig. 11 Curves of head displacement of piles versus time

### 3 承台及邻近桩结构响应特性分析

#### 3.1 桩周土体地温场扰动

能量桩夏季运行过程中, 在桩体被加热升温的同时, 桩体也向周围岩土体不断散热, 导致周围岩土体的温度上升。图 2 (a) 中 A—A 断面 4 m 桩深处的温度变化情况如图 12 所示。由图 12 可知, 随着换热的进行, C 桩周围岩土体的温度均有明显的升幅; 呈现出随距离增加, 温度不断降低的规律, 存在一定的温度梯度, 其中 A 桩身温度仅有轻微波动, 并未出现明显升幅, 且 H3 测温孔到 A 桩段与其它段的温度梯度差异较大; 因此, 可以判断热扰动范围小于 A、C 桩

间距。通过建立各运行时间温度升幅与桩中心距的关系, 拟合温升线, 发现随着能量桩运行时间的增加, 桩体温度不断增加, 热扰动范围也不断扩大; 当能量桩运行 16 d 时, 桩身温度上升 14.2°C, 热扰动范围约为 2 m (2 倍桩径)。这也将为需要进行短期运行的能量桩工程的桩间距设计工作提供一定的现场试验参考依据。

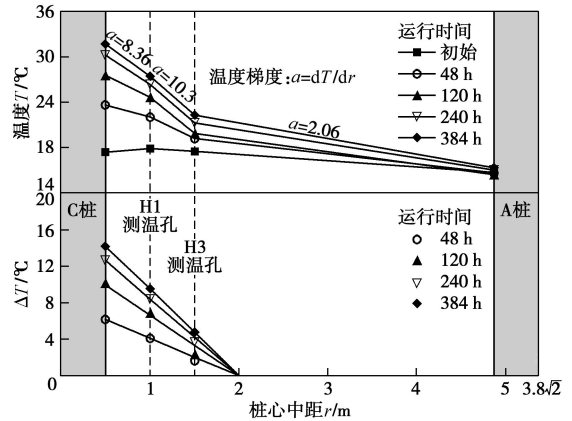


图 12 C 桩运行后, 4 m 深度处水平地温分布情况

Fig. 12 Distribution of temperature in horizontal direction at 4 m depth after heating pile C

#### 3.2 对角桩响应特性

C 桩模拟夏季模式运行过程中, 桩体受热膨胀, 虽然存在桩两端及桩周土的约束作用, 但桩体仍会产生较为显著的应变及桩顶位移; 当 C 桩受热后, 试验桩基础的变形及应力状态模型图如图 13 所示, 当 C 桩桩顶抬升时, 将对承台及其它桩体产生影响。

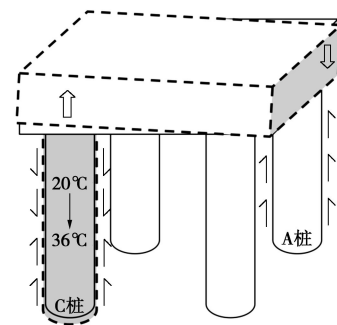


图 13 桩体变形及应力状态模型图

Fig. 13 Deformation and stress states in piles

C 桩运行 384 h (16 d) 后, A 桩温度改变量、实测应变和附加应力在桩身的分布情况如图 14 所示。由图 14 可见, 在 C 桩加热过程中, A 桩温度并未受到明显的扰动, 但由于受到大气温度的影响, 近地表深度的温度有所下降; 实测 A 桩产生压缩变形, 应变的分布规律总体上表现为随桩深而变小, 其中近地表桩深处应变值最大, 是由于该位置有明显的降温, 因此收缩变形来自降温收缩以及运行 C 桩引起的压应变; 在 A 桩上产生的附加应力表现为压力, 总体呈现沿桩

深方向不断减小的规律, 其中近地表深度由于受到大气温度影响, 将产生一定的冷收缩变形, 其产生的约束应力将抵消一部分承台对桩体产生的附加压力。

在整个测试过程中, A 桩桩底的土压力计测得的附加压力值几乎为 0, 这说明由于 C 桩运行产生的承台对 A 桩的附加压力在桩身的传递过程中, 被桩侧摩阻力逐级抵消, 并未引起桩底的应力变化。

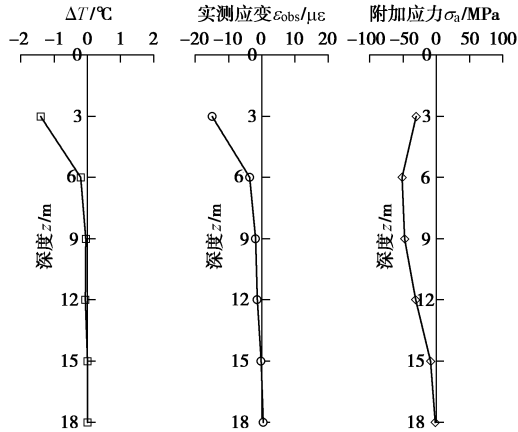


图 14 桩身温度改变量、实测应变、应力在 A 桩的分布曲线  
Fig. 14 Curves of temperature change, vertical strain and stress of pile A along pile depth

### 3.3 承台响应特性

如图 2 (b) 所示, 水平向温度和应变传感器分两层布置在承台中; 通过对换热前承台温度的现场监测, 承台下层测试点的平均温度约为 11.3°C, 上层测试点的平均温度约为 8.7°C。而在能量桩运行过程中, 承台也将受到一定的热力学影响。图 15 为 C 桩运行 384 h (16 d) 后承台观测点上的温度、实测应变及附加应力的变化情况; 由图 15 可知, 运行 C 桩对承台的影响不仅在于桩顶的抬升产生的应力作用, C 桩换热管贯穿承台也会对承台产生热扰动; 其中 C 桩位置的承台温度升幅达到了 15.6°C, 而其它位置由于远离 C 桩, 受到大气温度的影响产生了温降。

值得关注的是, C 桩位置承台下层观测点处, 由于温度升幅最大, 且受到来自桩体及桩周土的约束作用强于承台上部; 因此产生了较大的附加压力, 达到了 2.24 MPa; 而承台中部上层观测点处, 在温降及 C 桩的交叉影响下, 产生了 1.05 MPa 的附加拉力, 约为 C40 混凝土抗拉强度值的 43.8%。因此, 在能量桩基础设计时, 应该考虑能量桩运行过程中对整个基础结构的影响; 这种热力相互作用对承台及邻桩的结构影响也应在设计过程中加以考虑。另外, 布置合理的能量桩运行组合形式, 也可以避免承台产生过大的附加应力, 规避结构破坏的产生。而针对这些影响的相关

研究还有待进一步深入。

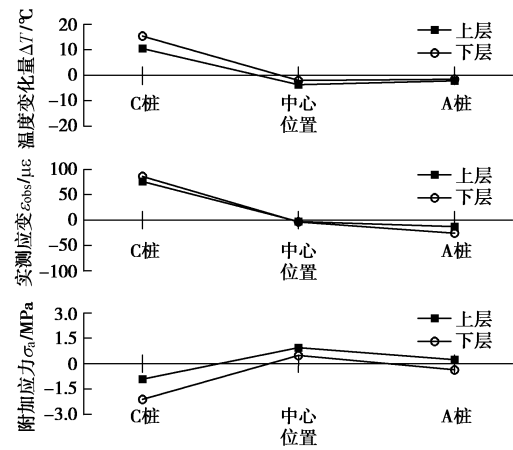


图 15 承台温度改变量、实测应变、附加应力的分布曲线  
Fig. 15 Curves of temperature change, vertical strain and additional stress of pile cap

## 4 结 论

本文现场实测了夏季运行工况下, 低承台 2×2 群桩基础中单根能量桩工作时, 桩体及承台的温度及应力的变化规律; 着重分析了运行能量桩桩体本身的热力耦合特性, 及其对低承台桩-筏基础整体结构的影响规律。本文试验条件下, 可以得到以下 4 点结论。

(1) 加热工况下低承台 2×2 群桩基础中单根能量桩最大约束应力产生在桩体中部位置; 本文试验条件下, 当能量桩运行 16 d 后, 桩身最大约束应力约为 3.94 MPa; 通过考虑桩体被完全加热且被完全约束的应力估算方法为能量桩约束应力的设计计算提供了上限值, 实测应力值约为该上限值的 48%。

(2) 桩体由于温升产生热膨胀, 虽然受到桩端及桩侧摩阻力的约束作用, 但桩体仍会产生一定的变形, 利用桩身应变估算的桩顶变形; 在试验前期由于桩体温度升高而增加, 而后桩身温度逐渐稳定, 桩顶位移也不再大幅提高, 最终稳定在 -0.6 mm (桩径的 0.6%)。

(3) 本文试验条件下, 单根能量桩运行 16 d 后, 桩身温度上升 14.2°C 时, 能量桩的热扰动范围约为 2 倍桩径。

(4) 在低承台 2×2 群桩基础中运行单根能量桩时, 对角桩、承台均会产生一定的附加应力; 在温度与荷载共同作用下, 运行桩顶部位置的承台产生约为 2.24 MPa 的附加压应力; 承台中心位置产生约 1.05 MPa 的附加拉应力, 约为混凝土抗拉强度值的 43.9%。因此, 进行低承台能量桩基础设计时, 应合理设计群桩的运行形式, 避免产生过大的附加应力, 造成基础结构的破坏。

## 参考文献:

- [1] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. *Géotechnique*, 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, NG W W C. Applications of energy piles and technical development of PCC energy piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(1): 176 - 181. (in Chinese))
- [3] 桂树强, 程晓辉. 能量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. (in Chinese))
- [4] 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]. *Géotechnique*, 2009, **59**(3): 237 - 248.
- [5] YOU S, CHENG X, GUO H, YAO Z. In-situ experimental study of heat exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers[J]. *Energy & Buildings*, 2014, **79**(4): 23 - 31.
- [6] YOU S, CHENG X, GUO H, et al. Experimental study on structural response of CFG energy piles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **96**: 640 - 651.
- [7] SUTMAN M, OLGUN C G, BRETTMANN T. Full-scale field testing of energy piles[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2015: 1638 - 1647.
- [8] 路宏伟, 蒋刚, 王昊, 等. 摩擦型能量桩荷载-温度现场联合测试与承载性状分析[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(2): 334 - 342. (LU Hong-wei, JIANG Gang, WANG Hao, et al. In-situ tests and thermo-mechanical bearing characteristics of friction geothermal energy piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(2): 334 - 342. (in Chinese))
- [9] LALOUI L, NUTH M, VULLIET L. Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, **30**(8): 763 - 781.
- [10] MURPHY K D, MCCARTNEY J S, HENRY K S. Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations[J]. *Acta Geotechnica*, 2015, **10**(2): 179 - 195.
- [11] KONG G, WU D, LIU H L, et al. Performance of a geothermal energy deicing system for bridge deck using a pile heat exchanger[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, **43**(1): 596 - 603.
- [12] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 2015. (Code for Design of Concrete Structure: GB50010—2010[S]. 2015. (in Chinese))
- [13] 桩基地热能利用技术标准: JGJ/T 438—2018[S]. 2018. (Technical Standard for Utilization of Geothermal Energy through Piles: JGJ/T 438—2018[S]. 2018. (in Chinese))
- [14] MCCARTNEY J S, MURPHY K D. Strain distributions in full-scale energy foundations[J]. *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 2012, **6**(2): 26 - 38.