

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.008



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 水平荷载作用下能量桩群桩的变形特性

吴琪<sup>1</sup>, 丁选明<sup>1</sup>, 王成龙<sup>1,2,3</sup>, 张鼎新<sup>1</sup>

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

**摘要:** 目前外部荷载下能量桩群桩基础热-力学特性的研究主要针对竖向荷载, 而对于水平荷载的影响考虑较少。为研究非对称加热、制冷条件下水平受荷能量桩群桩的变形特性, 对  $2 \times 2$  能量桩群桩的单根桩开展加热、制冷工况下的模型试验并建立能量桩群桩三维有限元模型, 将实测数据和数值模拟结果进行对比验证, 再进行参数分析, 研究能量桩群桩单根桩运行过程中桩体的热-力学响应。结果表明: 数值模拟结果与试验结果较为吻合, 弯矩主要分布在桩体上半部, 其峰值和反弯点分别位于土表面以下  $0.23L_1$  和  $0.8L_1$  ( $L_1$  为桩体有效埋置深度); 桩身水平位移随深度的增大而减小。水平荷载对桩体变形特性影响更大, 但温度的影响不可忽略。在加热和制冷阶段, 随着温度升高和降低, 能量桩的弯矩、位移均有增大趋势。与只受水平荷载时相比, 在水平荷载与温度变化联合作用下, 通水温度升高 10、20 °C 能量桩的弯矩峰值  $M_{\max}$  增加幅度为 23.36%、25.46% 左右, 桩顶水平位移增加幅度为 20.59%、21.93% 左右; 通水温度降低 10、20 °C 能量桩的弯矩峰值  $M_{\max}$  增加幅度为 23.48%、24.39% 左右, 桩顶水平位移增加幅度为 17.97%、21.27% 左右。

**关键词:** 能量桩; 群桩; 砂土; 变形特性; 数值模拟; 模型试验

**中图分类号:** TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)03-0091-11

## Deformation characteristics of energy pile group under horizontal loading

WU Qi<sup>1</sup>, DING Xuanming<sup>1</sup>, WANG Chenglong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Dingxin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, P. R. China;

3. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, P. R. China)

**Abstract:** Current research on the thermodynamic characteristics of the energy pile group foundation under external load mainly focuses on the vertical load, however the study on impact of horizontal load is limited. To investigate the deformation characteristics of horizontally loaded energy pile groups under asymmetric heating or cooling conditions, a single pile within the  $2 \times 2$  energy pile group was heated and cooled through the model

**收稿日期:** 2023-12-07

**基金项目:** 国家自然科学基金 (52278396); 中国博士后科学基金 (2023T160766); 重庆市博士后研究项目 (2022CQBSHTB3006)

**作者简介:** 吴琪 (1998 -), 女, 主要从事能量桩热-力学特性研究, E-mail: 18339189718@163.com。

王成龙 (通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: wangclong@cqu.edu.cn。

**Received:** 2023-12-07

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52278396); China Postdoctoral Science Foundation, Special Fund (No. 2023T160766); Special Foundation of Postdoctoral Support Program, Chongqing (No. 2022CQBSHTB3006)

**Author brief:** WU Qi (1998 -), main research interest: thermal mechanical properties of energy piles, E-mail: 18339189718@163.com.

WANG Chenglong (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: wangclong@cqu.edu.cn.

tests, and a three-dimensional finite element model of the energy pile group was established. The measured data and numerical results were compared and validated, and parametric analysis was conducted to study the thermo-mechanical response of the pile during the operation of a single pile for the energy pile group. Results indicate that the findings of numerical model and model tests are generally consistent. The bending moment was mainly concentrated in the upper part of the pile, its peak bending moment and inflection point are located  $0.23L_1$  and  $0.8L_1$  below the soil surface, and the horizontal displacement of the pile also decreased with the increasing depth ( $L_1$  is the effective buried depth of pile). The horizontal loading had a greater impact on the deformation characteristics of the pile, but the influence of temperature could not be ignored. As the temperature increased or decreased, the bending moment and displacement of the energy pile tended to increase. Compared with the only subjected to horizontal load, the increase in water temperature by  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  led to an increase in the  $M_{\max}$  (peak bending moment) of the energy pile by about 23.36% and 25.46%, and an increase in the horizontal displacement of the pile top by about 20.59% and 21.93% when the horizontal load and temperature variation were applied simultaneously. The decrease in water temperature by  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  resulted in an increase of approximately 23.48% and 24.39% in the energy pile  $M_{\max}$  (peak bending moment), and an increase of approximately 17.97% and 21.27% in the horizontal displacement of the pile top.

**Keywords:** energy pile; pile groups; sand; deformation characteristics; numerical simulation; model tests

能量桩技术是将地源热泵技术和传统建筑桩基相结合<sup>[1]</sup>。能量桩在承担外部荷载的同时,还可以作为地源热泵换热管载体进行热交换<sup>[2]</sup>。其在环保、施工工艺、建筑物地下空间的使用以及地热能的开采方面具有很大优势,逐渐得到了工程界和学术界的重视<sup>[3-4]</sup>。

在实际工程应用中,群桩基础的存在形式比较常见。近年来,学者们针对能量桩群桩的热-力学响应开展了相关研究。Mimouni等<sup>[5]</sup>在瑞士洛桑联邦理工学院进行了现场测试发现,群桩顶部的位移大于单桩,常规桩和能量桩之间会发生应力重分布,径向应变会对能量桩的轴向热-力学响应产生重大影响。Di Donna等<sup>[6]</sup>和Fang等<sup>[7-8]</sup>研究了能量桩群桩之间的相互作用,并分析了温度引起的群桩效应。Ng等<sup>[9]</sup>进行了饱和砂土中不同温度和荷载组合下的能量桩群桩离心机模型试验研究,结果表明,在工作荷载作用下,加热后桩顶位移增加,能量桩群桩在连续冷热循环后经历了棘轮效应,产生了不可逆的倾斜。针对能量桩群桩中能量桩工作桩和能量桩非工作桩的不同组合,Kong等<sup>[10]</sup>分析讨论了桩-筏基础的应力和位移。Zhang等<sup>[11]</sup>进行了有无刚性承台能量桩群桩模型试验,研究了刚性承台对能量桩群桩的轴摩擦、桩体倾斜、桩身弯矩和桩顶位移的影响。任连伟等<sup>[12]</sup>开展了冬季工况多次温度循环下微型钢管桩群桩的热-力响应现场试验,结果表明,桩身附加温度应力随循环次数增加而增大,且随间歇时间的延长而减小。在数值方面,也有许多学者针对群桩展开了系列研究。Jeong等<sup>[13]</sup>建立

了能量桩群桩三维有限元模型,结果表明,桩距、桩的布置情况、土体种类以及端承条件均会对群桩热-力学响应产生影响。在考虑群桩效应基础上,Rotta-Loria等<sup>[14]</sup>提出了能量桩群桩位移分析的相互作用因子法,并与三维有限元分析结果进行对比验证。杨涛等<sup>[15]</sup>建立了热-力学响应分析的三维非线性有限元数值模型,分析群桩效应,结果表明,加热时能量桩群桩内部任意一根桩的桩身附加轴向压应力比能量桩单桩要小得多。陆浩杰等<sup>[16]</sup>开展了竖向受荷下能量桩热响应特性模型试验研究,在单次温度循环过程中,桩顶位移变化率在制热时略小于制冷时,桩顶位移变化率的差值随着循环次数的增加而逐渐减小,从而累积沉降也逐渐趋于稳定。张沛等<sup>[17]</sup>基于荷载传递法,考虑桩-桩相互作用,对能量桩群桩基础沉降特性进行分析发现,力学荷载作用下,群桩位移比随着桩顶荷载水平的增大而减小,温度荷载作用下,群桩桩顶位移方向一致。

目前,对能量桩的研究主要考虑竖向荷载,而对承受水平荷载的能量桩热-力学响应研究较少。然而,当用于高层建筑基础、桥面除冰、挡土结构和路堤加固等情况时,能量桩会承受水平荷载<sup>[18]</sup>。基于模型试验和圆孔扩张理论,陈志雄等<sup>[19]</sup>对砂土中能量桩单桩在水平荷载下的承载特性进行了研究,并将试验结果与理论值进行对比分析。Heidari等<sup>[20]</sup>建立了能量桩单桩三维有限元模型,研究了不同土体参数、温度变化和荷载条件对桩体水平极限承载力的影响,结果表明,水平极限承载力随温度的升高或弯矩的减小而增大。Zhao等<sup>[21]</sup>利用离心

机试验和有限元模拟研究了水平荷载下砂土中能量桩单桩的热-力学响应,结果表明,循环温度作用会引起桩顶水平位移和桩体弯矩的增加。赵华等<sup>[22]</sup>基于模型试验分析了饱和黏土中水平受荷能量桩单桩在不同温差梯度下的桩顶位移、桩身弯矩、孔压和桩前土压力等的变化规律,发现加热和制冷条件都会引起额外的桩顶位移,均会造成桩体受到的约束减小。

虽然水平荷载下能量桩群桩的研究较少,但针对普通群桩水平受荷的研究较多,McVay等<sup>[23]</sup>进行了砂土中群桩水平受荷试验,结果表明,测得的桩体力学特性受到了群桩相互作用的影响。Comodromos等<sup>[24]</sup>评估了群桩之间的相互作用对水平承载力的影响,分析了桩数、间距和水平挠度对群桩效应的影响。Rollins等<sup>[25]</sup>开展了水平荷载下全尺寸群桩试验,评估了桩-土相互作用的影响,结果表明,群桩效应显著降低了群桩的水平抗力。曹维科<sup>[26]</sup>利用有限元模型模拟了群桩在水平荷载作用下的工作性能,得出增大桩长、桩径、桩周土的弹性模量都能提高刚性短桩水平承载力的结论。赫中营等<sup>[27]</sup>建立了 $1 \times 3$ 群桩基础数值模型,发现群桩效应对桩身分布弯矩峰值影响较小,但对弯矩沿桩身的分布和桩身分布曲率峰值影响很大,桩身长度和砂土密度对群桩效应的影响均较大。

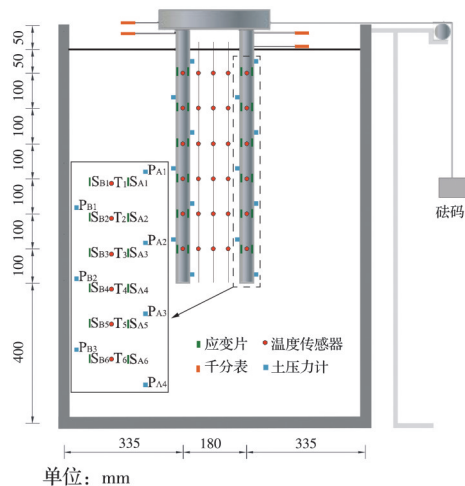
对水平荷载作用下能量桩热-力学性能的研究仍然有限,尤其对于群桩基础。笔者利用模型试验和数值模拟研究水平荷载作用下能量桩群桩的变形特性,通过试验对能量桩群桩的桩-土温度、桩体弯矩、桩身水平位移进行了测量和分析,并建立能量桩群桩三维有限元模型,将数值与试验结果对比分析,研究群桩之间的相互作用机理;进一步考虑温度和水平荷载的影响,分析不同温度梯度和不同水平荷载大小分别对能量桩群桩的弯矩和水平位移的影响,从而揭示砂土地基中能量桩群桩的变形特性。

## 1 模型试验概况

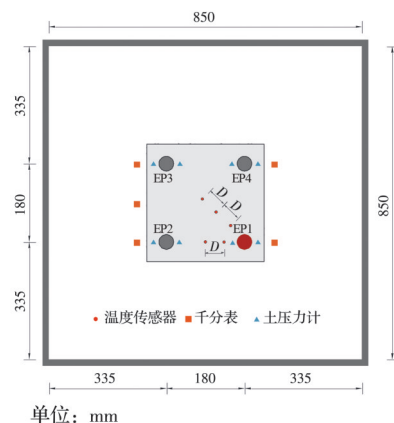
### 1.1 模型装置

试验使用的模型桩群桩按 $2 \times 2$ 布置,如图1所示。模型桩由混凝土浇筑而成,桩长 $L_0$ 为700 mm,在模型槽中的有效埋置深度 $L_1$ 为650 mm,桩体直径 $D$ 为45 mm,相邻桩体间距为180 mm( $4D$ ),承台尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ,模型桩内部换热管为外径5 mm,内径3.5 mm的单U形铜管。通过向铜管内通入不同温度的水进行热交换。模型槽尺寸长 $\times$ 宽 $\times$ 高分别为 $850 \text{ mm} \times 850 \text{ mm} \times 1150 \text{ mm}$ ,

桩体距槽壁的距离为335 mm(约 $7.5D$ )。桩体表面及土体埋设6组温度传感器(T),在桩体两侧对称布置应变片(S)和土压力计(P),并在能量桩桩顶、桩土接触面及承台处安置电子千分表。



(a) 立面图



(b) 平面图

图1 模型槽布置图

Fig. 1 Layout of the model tank

### 1.2 试验过程

通过静载试验确定群桩水平极限承载力,选定试验工作荷载。实验室环境温度为 $29^\circ\text{C}$ 左右。采用维持荷载法对带承台的群桩分级施加水平荷载,每级荷载为0.1 kN,当桩体位移达到相对稳定时,记录一次桩顶位移并继续施加下一级荷载。试验测得的桩体水平极限承载力约为1.5 kN,取群桩水平极限承载力的一半作为工作荷载,即0.75 kN。

接着挖土填槽,再通过砝码对群桩逐级施加工作荷载,施加水平荷载装置实物如图2所示。位移稳定后,利用水泵和恒温槽向EP1中换热管通入 $49^\circ\text{C}$ 热水,持续时间为270 min,之后冷却至室温。而后重新挖土填槽,重复之前操作,在水平荷载持续作用下,通入 $9^\circ\text{C}$ 冷水,持续270 min,分析能量桩群桩的热-力学特性。



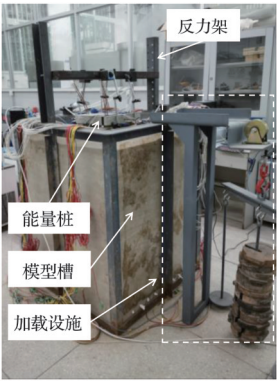


图 2 模型试验实物图

Fig. 2 Picture of the model test

2 数值模型的建立

2.1 几何模型及模拟工况

有限元模型桩径为 45 mm,桩长为 700 mm。Wang 等<sup>[28]</sup>建立了水平荷载作用下群桩三维有限元模型,该模型将刚性承台耦合为一个控制点,将数值结果与离心机模型试验结果进行对比验证,结果较为吻合,说明群桩情况下该控制点能较好地模拟刚性承台条件。数值模型中假定承台为刚性,仅会影响桩体之间的相互作用,因此,为了简化模型,如图 3 所示,将刚性承台耦合为一个控制点,4 根桩顶部就建立了运动耦合,在水平荷载作用下桩体之间的相互作用不会受到影响。内部 U 型传热管道等效为桩体中左右两侧对称排列的长方体集合,与模型试验中能量桩内埋管类似,两肢相距为 22.5 mm,距离桩体底部 30 mm。考虑到换热管管壁很薄,为方便建模,管壁不单独划分实体。桩周土体的计算区域

选为长方体,长×宽×高分别为 850 mm×850 mm×1 150 mm。数值模拟工况与室内试验一致,均为同一工作荷载下的制冷和加热工况,加热和制冷时换热液体分别为 49、9℃,见表 1。

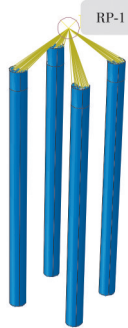


图 3 数值模型中的 2×2 能量桩群桩

Fig. 3 2×2 energy pile group in numerical model

表 1 模型试验验证工况

Table 1 Validation cases of the model test

工况	桩体	水平荷载/N	通水温度/℃	温度变化/℃
1	EP1	750	49	+20
2	EP1	750	9	−20

2.2 材料参数

土体类型为砂土,桩体为混凝土材料。为优化模型求解的计算过程,在建立能量桩数值模型时需引入一些假设条件。桩身材料和桩周土体各向同性,模型各部分的热物性参数保持恒定。桩身采用线弹性模型中的各向同性弹性模型进行有限元模拟,土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型进行模拟。数值模拟所采用的材料与试验中的材料保持一致,具体材料参数见表 2。

表 2 材料物理参数

Table 2 Physical parameters of materials

材料	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	膨胀系数 $(1/^\circ\text{C})$	热导率 $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	比热 $C/[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$
能量桩	$3\times 10^4$	0.20	$1.06\times 10^{-5}$	1.614	800	2 700
砂土	50	0.35	$1\times 10^{-6}$	1.2	13.8	1 700

2.3 边界条件及初始条件

土体和桩体初始温度为 29℃。在传热计算中,通过定义温度边界条件的方式模拟能量桩的温度变化,将此传热计算得到的温度场作为后续计算的预定义场,从而实现热力耦合。模型的土体底面固定,侧面进行水平约束,顶面自由。桩-土切向接触设置摩擦系数为 0.3,法向接触面采用硬接触。能量桩群桩的工作荷载为 0.75 kN,即桩顶边界荷载。考虑地应力影响,模拟过程中对桩体和土体施加重力荷载。

2.4 网格划分

三维数值模型的网格越精细,计算所得的各项数据越可靠,但计算所需的时间更长,对运行软件的设备性能要求更高。因此,需要根据模拟的具体情况选择适当的网格密度。在传热分析中,所有单元类型均采用三维八节点六面体单元(DC3D8)划分。在应力场的分析计算中,则全部采用三维应力单元(C3D8R)。考虑研究重点,合理调控网格密度,减少非必要的计算成本。桩体是主要研究对象,因此,需要细化能量桩及其附近土体的网格。模型的网格数量为 55 832 个单元,具体划分如图 4 所示。

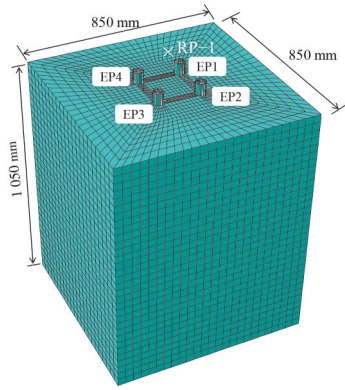


图4 网格划分图

Fig. 4 Finite element meshes

### 3 结果与分析

#### 3.1 桩-土温度变化

能量桩传热性能是影响能量桩应用的一个重要因素,在能量桩换热过程中,桩体和周围土体的温度会受到影响。图5为EP1在加热或制冷时不同深度处的温度变化,T1~T6为位于桩体不同深度处的温度传感器。将数值模拟得到的桩体温度与试验得到的实测值进行对比,结果表明,不同深度处温度的变化趋势基本相同,加热与制冷结束后EP1的温度变化值约为14℃。图6所示为加热和制冷过程中土体的温度变化规律。取距离EP1一倍桩径(1D)处不同深度的温度平均值为1D处土体温度,同理取2D处土体温度、3D处土体温度。桩周土

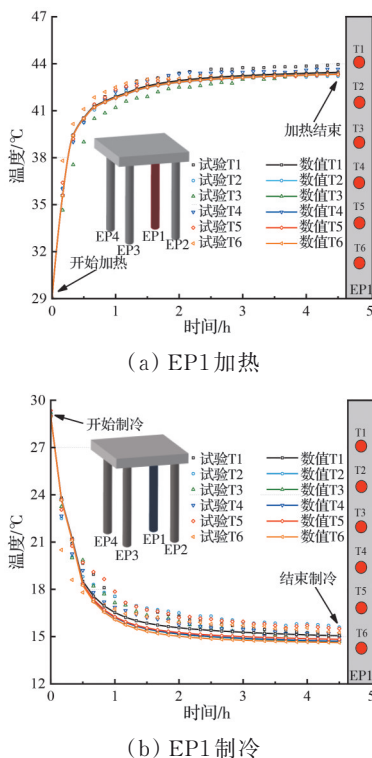
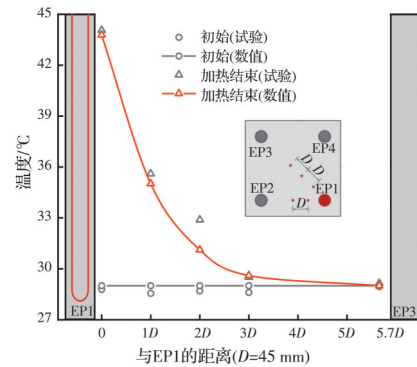


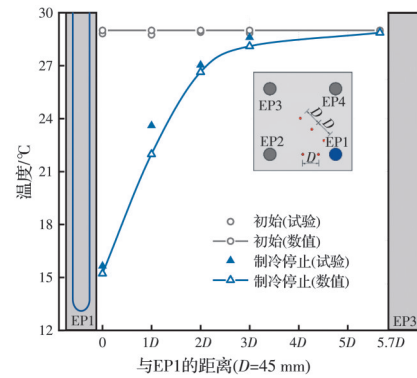
图5 EP1不同深度处的温度变化

Fig. 5 Temperature variation at different depths of EP1

体的温度受到换热管温度的影响,影响范围约为3D。因此,建立的数值模型能较好地模拟模型试验中桩-土之间的热传导过程。



(a) EP1加热



(b) EP1制冷

图6 桩-土温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of soil and pile

#### 3.2 桩体的弯矩

桩体在承受水平荷载时会产生弯矩,随着深度的增加,桩身剪力逐渐减小,桩身弯矩达到最大值,随后弯矩逐渐减小。在水平荷载的约束作用下,能量桩内部产生热应力,在外部荷载和温度变化共同作用下,桩身弯矩随之产生变化。因此,与普通桩相比,能量桩群桩的力学特性不仅受到传统荷载下群桩效应的影响,还受到温度的影响。通过固定在桩体表面不同深度处的前后两个应变片,测量桩身的拉伸应变 $\epsilon_B$ 和压缩应变 $\epsilon_A$ ,记录温度变化下桩身弯矩的变化规律,弯矩的计算公式如式(1)所示。

$$M = \frac{EI(\epsilon_B - \epsilon_A)}{D} \quad (1)$$

式中: $M$ 为弯矩, $N \cdot m$ ;  $D$ 为桩体直径, $m$ ;  $EI$ 为桩截面抗弯刚度, $N \cdot m^2$ 。

图7所示为加热和制冷后EP1、EP2弯矩的变化规律。桩身弯矩主要集中在桩身上部,随深度的增加先增大后减小,当深度达到土面以下 $0.23L_1$ 和 $0.8L_1$ 处出现峰值( $M_{max}$ )和反弯点。无论加热还是制冷,EP1的桩身弯矩大于EP2。这是由于EP1温

度变化大,桩体受附加加热应力的影响,引起了桩身热致弯曲应变,弯矩也随之增加。由图 7 可见,试验得到的桩体弯矩与数值模拟中加热或制冷桩弯矩的变化规律基本一致。数值模拟与试验中得到的 EP1 加热后的  $M_{\max}$  相差约 3.32%,制冷后相差幅值约 9.83%,整体来看,数值模拟结果与试验结果较吻合。

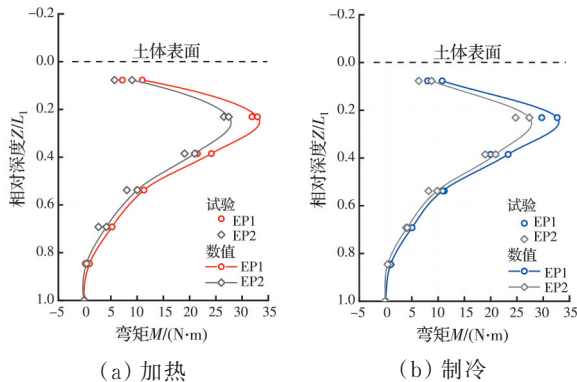


图 7 桩体弯矩的变化

Fig. 7 Variation of pile bending moment

根据试验测得应变计算:EP1 制冷前后  $M_{\max}$  分别为 25.85、29.74 N·m;EP1 加热前后  $M_{\max}$  分别为 26.79、31.88 N·m。因此,EP1 制冷和加热前后  $M_{\max}$  的变化幅值分别为 13.08%、15.97%。然而,陈志雄等<sup>[19]</sup>在砂土中能量桩单桩水平承载特性模型试验研究中发现,在制冷和加热前后,弯矩最大变化分别达到 9.93% 和 10.32%。表明本试验中温度变化对能量桩群桩变形性能和承载性能的影响比对能量桩单桩的更大。

### 3.3 桩身的水平位移

与普通混凝土桩相比,能量桩受温度影响产生变形。荷载作用下桩体会产生水平位移,参考陈祥等<sup>[29]</sup>推导的相关公式计算桩身水平位移。自下而上地将桩身分为多个连续的单元,并假设在每个单元内弯曲应变  $\Delta\epsilon$  沿桩身呈直线分布。基于弯矩与挠度的微分关系,推导出两相邻截面间桩身水平位移  $y_i$ 、 $y_{i+1}$  的递推公式,计算式为

$$y_{i+1} = y_i + \theta_i l_i + \frac{l_i^2}{6D} (\Delta\epsilon_{i+1} + 2\Delta\epsilon_i) \quad (2)$$

式中: $D$  为桩基外径; $\Delta\epsilon_i$ 、 $\Delta\epsilon_{i+1}$  和  $y_i$ 、 $y_{i+1}$  分别为第  $i$  断面和第  $i+1$  断面的应变差和水平位移; $\theta_i$  为第  $i$  断面的桩身转角; $l_i$  为第  $i$  单元的长度。

图 8 所示为加热和制冷后 EP1、EP2 的水平位移。可以发现,桩身水平位移随深度的增大而减小,具有明显的非线性变化趋势。桩身水平位移主要集中在桩身的上半部分,位移零点以上的桩段出

现了明显的挠曲变形,表现出柔性桩的特性。结果表明,EP1 的水平位移大于其他桩体,这是由于 EP1 受到温度影响水平位移增大,而 EP2、EP3、EP4 几乎不受温度的影响。在土面以下  $0.7L_1$  深度处水平位移减小为 0,随着深度的增加,土体的覆盖层荷载逐渐增加,桩体位移受到限制并逐渐减小,土面  $0.7L_1$  深度以下桩身几乎不发生水平位移。试验结果和数值结果较为吻合,拟合效果较好。

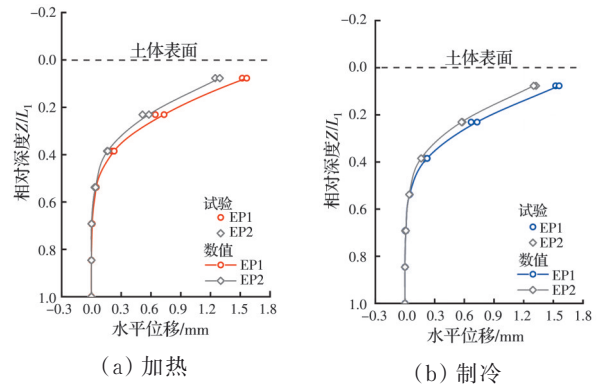


图 8 桩身水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of the pile

## 4 水平荷载联合温度作用的影响因素分析

数值模拟结果表明,Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型能够很好地模拟水平荷载下能量桩群桩的热-力学特性。但实际工作中桩身温度和荷载不断变化,因此,能量桩的变形特性还有待深入研究。考虑了在 750 N 水平荷载下设置 19、39 °C 两组温度,与原有的 9、49 °C 两组温度下得到的结果进行对比;在 500、1 000 N 的水平荷载条件下,设置通水温度为 49 °C。具体工况见表 3。

表 3 数值模拟工况

Table 3 Cases of numerical simulation				
工况	桩体	水平荷载/N	通水温度/°C	温度变化/°C
①	EP1	750	39	+10
②	EP1	750	19	-10
③	EP1	500	49	+20
④	EP1	1 000	49	+20

### 4.1 温度分布

图 9 为 4 种不同温度作用下 EP1 的温度变化。随着换热管中温度的变化,桩体温度随之变化,EP1 温度变化明显,且试验与数值模拟中 EP1 温度变化趋势相同。图 10 所示为数值模拟工况③的桩-土径向温度分布图。径向温度场为土面以下 0.6 m 处的



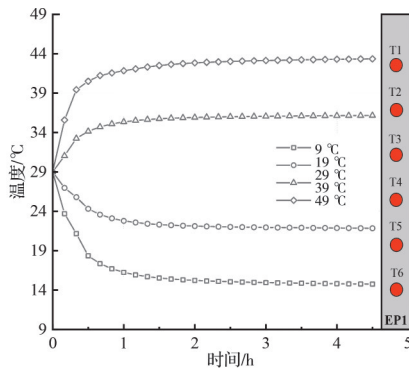


图9 EP1的温度变化

Fig.9 Temperature variation of EP1

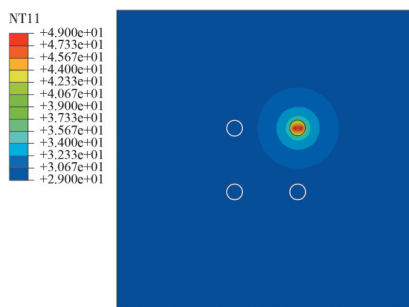


图10 桩-土径向温度分布图

Fig.10 Pile-soil radial temperature distribution

温度分布,加热桩为EP1,因此EP1温度变化最明显。以EP1中的换热管为中心,温度以圆形向外扩散分布,温度影响范围约为 $3D$ ,其他桩体温度几乎不变。

#### 4.2 温度变化对弯矩的影响

为了探讨温度变化对能量桩群桩的影响,绘制EP1、EP2、EP3、EP4在不同温度下的弯矩分布图,如图11所示。由图11可见,相对深度0以下为能量桩群桩与土相互作用的部分,桩底弯矩逐渐趋近于0。加热和制冷对水平受荷能量桩群桩最大弯矩和反弯点的位置分布没有明显影响。

温度对EP1的影响较大,EP1的弯矩大于EP2、EP3、EP4。通入49、39、19、9 °C水后,相比常温(29 °C)水平受荷时,EP1弯矩最大值增加幅度分别为25.46%、23.36%、23.48%、24.39%。桩在水平荷载作用下发生位移,导致前后土压力并不相等,当温度升高时,EP1轴向膨胀,不相等的土压力导致桩前后受到不一致的摩阻力,即桩在伸长时不是均匀伸长的,而是发生了额外的弯曲,表现为弯矩增大。此外,桩前土体受到桩身向上的剪切力,土体应力状态改变,可能会导致土体水平承载能力降低,弯矩也会随之增大;当温度降低时,EP1径向收缩,桩周土体也发生收缩,桩-土相互作用减弱,水平

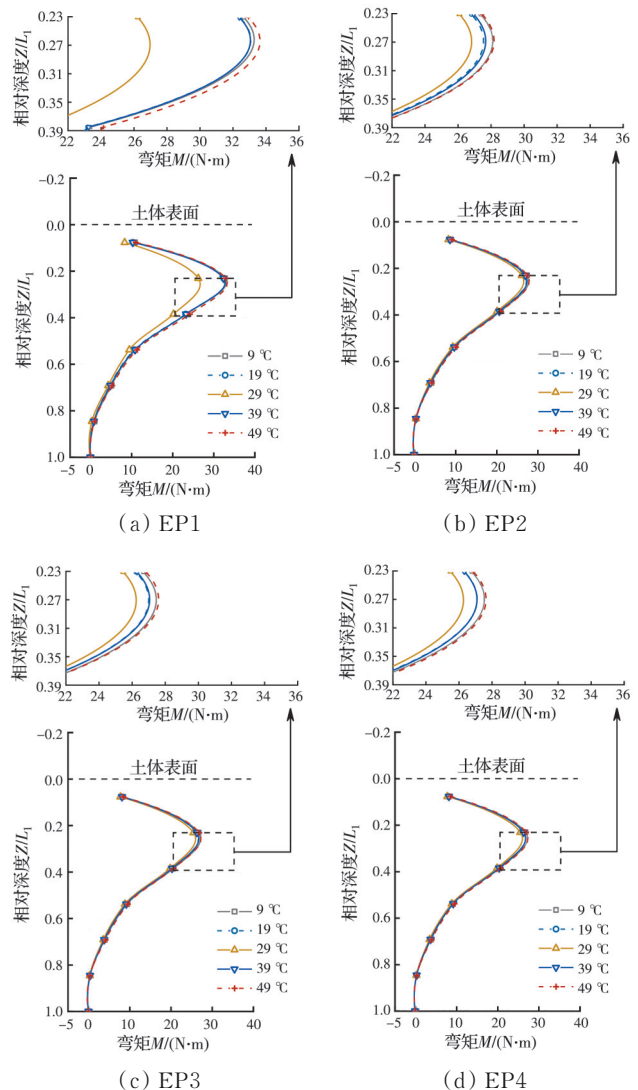


图11 不同温度下各桩弯矩

Fig. 11 Bending moment of each pile at different temperature

荷载为主导作用,使得桩体继续向前挤压,能量桩进一步发生弯曲变形,桩体的弯矩增大。因此,加热制冷均会使得EP1弯矩变大。

与EP1相比,EP2、EP3、EP4几乎没有受到温度的影响,所以其弯矩理论上基本由水平荷载产生。但在温度变化时,EP2、EP3、EP4的弯矩却有较小变化,这是由于群桩效应。即群桩是一个整体,群桩中各桩体之间会因为承台的约束产生相互作用,水平力促使群桩整体向一个方向运动,EP2、EP3、EP4可能会受到EP1的牵引作用。群桩整体向受拉方向运动,桩后与土体的压力减小,桩周土对能量桩群桩的约束减小,引起EP1、EP3、EP4的弯矩略微增大。

#### 4.3 温度变化对位移的影响

图12为各桩体在不同温度下的桩顶位移变化

规律。在温度作用下,EP1 桩顶位移比其他桩顶位移大。通入 49、39、19、9℃ 水后,桩体位移稳定时,桩顶位移分别增加 21.93%、20.59%、17.97%、21.27%。产生该现象的原因为:加热时,土体变形能力增强,土颗粒自身发生调整,可能会产生体积收缩,而且桩体轴向伸长导致桩发生额外弯曲,压迫桩前土体,土体发生压缩变形,桩顶水平位移增大;制冷时,桩体收缩,桩-土相互作用减弱,与土体有分离趋势,水平荷载为主导作用继续拉动桩体向前挤压,导致制冷时桩顶水平位移也增大,直到达到新的桩-土平衡状态。对 EP1 施加温度作用时,EP2、EP3、EP4 不受到温度影响,桩顶水平位移基本不变,水平位移理论上是由水平荷载产生。EP2、EP3、EP4 的水平位移有轻微变化是因为 EP2、EP3、EP4 与 EP1 组成了一个群桩整体,在 EP1 产生水平位移时,带动了其他桩体一起运动。因此,温度升高和降低时,群桩中温度变化明显的桩体会产生相对显著的水平位移,其他桩体水平位移变化非常小。

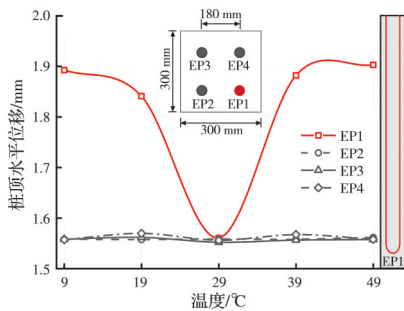


图 12 不同温度下各桩桩顶位移

Fig. 12 Pile head displacement under different temperature

#### 4.4 水平荷载对弯矩的影响

图 13 为在不同水平荷载和温度作用下 EP1、EP2、EP3、EP4 的弯矩。当水平荷载由 500 N(1/3 荷载极限值)增加到 750 N(1/2 荷载极限值),再到 1 000 N(2/3 荷载极限值)时,桩体弯矩值不断增大,加热前后 EP1 的弯矩最大处增加幅度分别为 45.16%、25.53%、17.36%,说明水平荷载增大会削弱温度对桩体的作用。加热后,只有 EP1 弯矩变化较为明显,其他桩体弯矩几乎不变。这是由于温度的影响范围是 3D,只有 EP1 的温度变化较大,其他桩体基本上不受温度影响,受到温度作用的 EP1 会产生附加热应力,从而产生更大的应变差,桩身弯矩就会增大。与施加温度作用后的弯矩值相比,水平荷载产生的弯矩值更大,水平荷载增加时弯矩

增大幅度也更明显,说明水平荷载为主导作用且对桩-土变形特性的影响更大。

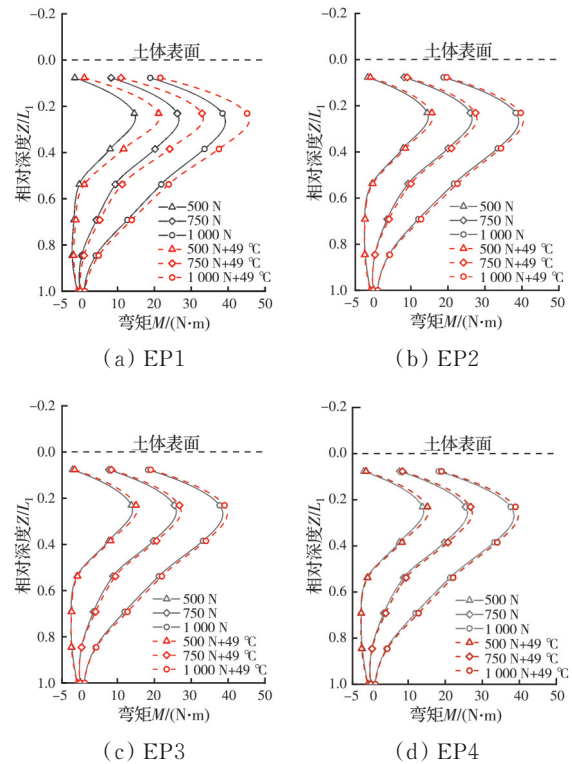


图 13 不同水平荷载下能量桩弯矩

Fig. 13 Bending moment of energy piles under different horizontal loads

#### 4.5 水平荷载对位移的影响

图 14 为不同水平荷载和温度作用后桩身的水平位移。在不同水平荷载条件下桩身位移分布形式相似,随着深度的增加,桩体位移逐渐减小。在土面以下 0.7L<sub>1</sub> 处桩身水平位移减小为 0,即桩身位移零点,表示此处桩身不发生位移。在仅承受水平荷载时,随着荷载不断增大,各桩体的水平位移明显增大。施加温度作用后,EP1 的水平位移变化比其他桩体更明显,这是由能量桩膨胀伸长及外部荷载作用共同引起的。在温度作用前后,随着水平荷载从 500 N 增加到 1 000 N,土面以下 0.05 m 处桩身水平位移增加幅度分别为 25.27%、21.28%、21.19%。表明随着水平荷载增大,温度对桩体的影响幅度减小。EP2、EP3、EP4 的水平位移基本由水平荷载产生,在温度作用后,EP2、EP3、EP4 的水平位移有较小变化。这是因为 EP2、EP3、EP4 虽然不受温度的影响,但群桩是一个整体,桩体之间会产生相互作用,当 EP1 受到温度作用水平位移增大时,可能会带动其他桩体变形,但产生的变形较小。



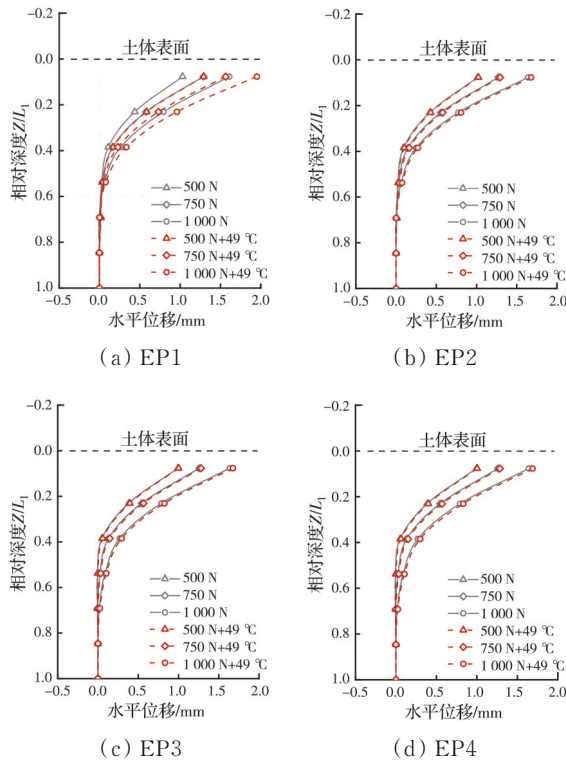


图14 不同水平荷载下能量桩桩身位移

Fig. 14 Displacement of energy piles under different horizontal loads

## 5 结论

为研究砂土中能量桩在水平荷载及温度共同作用下的变形特性,开展模型试验和数值模拟,主要结论如下:

1)建立了能量桩群桩三维有限元模型,并将试验结果和数值结果进行对比验证。桩的弯矩主要集中在桩的上部,其峰值和反弯点分别位于土表面以下 $0.23L_1$ 和 $0.8L_1$ 处。桩身水平位移随深度的增大而减小,在土面以下 $0.7L_1$ 深度处水平位移减小为0。桩体不同深度处温度、弯矩、位移的变化趋势基本相同,说明三维数值模型能较好地模拟桩体热-力学响应。

2)温度的影响不可忽视,温度影响范围约为 $3D$ 。随着温度的升高和降低,能量桩工作桩的弯矩、位移均有增大趋势。与只受水平荷载时相比,在水平荷载与温度变化联合作用下,通水温度升高 $10、20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,能量桩弯矩峰值 $M_{\max}$ 增加幅度为 $23.36\%、25.46\%$ 左右,桩顶水平位移增加幅度为 $20.59\%、21.93\%$ 左右;通水温度降低 $10、20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,能量桩弯矩峰值 $M_{\max}$ 增加幅度为 $23.48\%、24.39\%$ 左右,桩顶水平位移增加幅度为 $17.97\%、21.27\%$ 左右。温度升高时,能量桩膨胀,变形增大;温度降低时,桩体径向收缩,导致桩侧土体松散,水平荷载为

主导作用,使得桩体继续产生变形。

3)能量桩的弯矩和位移受水平荷载的影响较大。随着水平荷载的增大,桩身弯矩和位移随之增大,温度对桩体的影响幅度减小。施加温度作用后,能量桩工作桩弯矩和位移变化明显;能量桩非工作桩的弯矩和位移有较小变化,可能是由群桩效应引起的,即在承台的约束下桩体之间产生相互作用。在水平荷载和温度的共同作用下,能量桩的弯矩和位移产生变化,从而影响了能量桩群桩的变形。

为了分析非对称加热或制冷条件下能量桩群桩的变形特性,主要对能量桩群桩中单根桩运行条件进行研究,将来还需对不同运行桩数的能量桩群桩进行深入研究,揭示砂土地基中能量桩群桩的变形特性,为水平荷载作用下能量桩群桩的工程应用提供参考。

## 参考文献

- [1] 武瞳,刘钰莹,董喆,等.地源热泵的研究与应用现状[J].制冷技术,2014,34(4):71-75.  
WU T, LIU Y Y, DONG Z, et al. Research and application status of ground source heat pump [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014, 34 (4): 71-75. (in Chinese)
- [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 H L, KONG G Q, CHARLES W W NG. 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] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81-122.
- [4] 郭红仙,李翔宇,程晓辉.能源桩热响应测试的模拟及适用性评价[J].清华大学学报(自然科学版),2015,55(1):14-20,26.  
GUO H X, LI X Y, CHENG X H. Simulation and applicability of thermal response tests in energy piles [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(1): 14-20, 26. (in Chinese)
- [5] MIMOUNI T, LALOUI L. Behaviour of a group of energy piles [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(12): 1913-1929.
- [6] DI DONNA A, ROTTA LORIA A F, LALOUI L. Numerical study of the response of a group of energy piles under different combinations of thermo-mechanical loads [J]. Computers and Geotechnics, 2016, 72:

- 126-142.
- [7] FANG J C, KONG G Q, MENG Y D, et al. Thermo-mechanical behavior of energy piles and interactions with in energy pile-raft foundations [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, 146(9): 1-13.
- [8] FANG J C, KONG G Q, YANG Q. Group performance of energy piles under cyclic and variable thermal loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, 148(8): 1-10.
- [9] NG C W W, MA Q J. Energy pile group subjected to non-symmetrical cyclic thermal loading in centrifuge [J]. *Géotechnique Letters*, 2019, 9(3): 173-177.
- [10] KONG G Q, CAO T, HAO Y H, et al. Thermomechanical properties of an energy micro pile-raft foundation in silty clay [J]. *Underground Space*, 2021, 6(1): 76-84.
- [11] ZHANG D X, WANG C L, BOUAZZA A, et al. Influence of a rigid cap on thermo-mechanical behavior of nonsymmetrical thermally loaded energy pile group in clay [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2023, 60(5): 654-668.
- [12] 任连伟, 徐健, 孔纲强, 等. 冬季工况多次温度循环下微型钢管桩群桩热力响应特性现场试验[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(11): 2053-2060.
- REN L W, XU J, KONG G Q, et al. Field tests on thermal response characteristics of micro steel pile group under multiple temperature cycles in winter conditions [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(11): 2053-2060. (in Chinese)
- [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] ROTTA LORIA A F, LALLOUI L. The equivalent pier method for energy pile groups [J]. *Géotechnique*, 2017, 67(8): 691-702.
- [15] 杨涛, 陈洋, 孔纲强. 悬浮能量桩-筏基础的热-力学特性数值模拟[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2022, 39(1): 67-74.
- YANG T, CHEN Y, KONG G Q. Numerical simulation of thermo-mechanical behavior of floating energy pile-raft foundation [J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2022, 39(1): 67-74. (in Chinese)
- [16] 陆浩杰, 吴迪, 孔纲强, 等. 循环温度作用下饱和黏土中摩擦型桩变形特性研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(5): 156-165.
- LU H J, WU D, KONG G Q, et al. Displacement characteristics of friction piles embedded in saturated clay subjected to thermal cycles [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(5): 156-165. (in Chinese)
- [17] 张沛, 石雨恒, 费康. 能量桩群桩基础沉降特性分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(1): 75-86.
- ZHANG P, SHI Y H, FEI K. Analysis of foundation settlement behaviors of energy pile groups [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(1): 75-86. (in Chinese)
- [18] CHEN Z X, ZHAO H, WANG C L, et al. Deformation characteristics of energy piles subjected to horizontal load under heating-cooling cycles in sand [J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(9): 4789-4799.
- [19] 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*, 2024, 41(3): 114-123.
- CHEN Z X, ZHAO H, WANG C L, et al. Model tests on lateral bearing behavior of single energy pile in sand [J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(3): 114-123. (in Chinese)
- [20] HEIDARI B, AKBARI GARAKANI A, MOKHTARI JOZANI S, et al. Energy piles under lateral loading: Analytical and numerical investigations [J]. *Renewable Energy*, 2022, 182: 172-191.
- [21] 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*, 2023, 73(9): 826-839.
- [22] 赵华, 王成龙, 陈志雄, 等. 饱和黏土中水平受荷能量桩热-力响应特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(1): 248-260.
- ZHAO H, WANG C L, CHEN Z X, et al. Study on thermo-mechanical response characteristics of horizontally loaded energy pile in saturated clay [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(1): 248-260. (in Chinese)
- [23] MCVAY M, ZHANG L M, MOLNIT T, et al. Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(10): 1016-1026.
- [24] COMODROMOS E M, PITILAKIS K D. Response evaluation for horizontally loaded fixed-head pile groups using 3-D non-linear analysis [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2005, 29(6): 597-625.
- [25] ROLLINS K M, LANE J D, GERBER T M. Measured and computed lateral response of a pile group in sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(1): 103-114.
- [26] 曹维科. 桩基础水平承载力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

- CAO W K. Research on the bearing capacity performance of pile foundation under horizontal loading [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [27] 赫中营, 叶爱君. 群桩效应对砂土地基中高桩承台群桩基础抗震性能的影响[J]. 土木工程学报, 2014, 47(1): 117-126.
- HE Z Y, YE A J. Influence of group effect on the seismic performance of elevated pile-cap foundation in sand [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1): 117-126. (in Chinese)
- [28] WANG Z L, ZHOU H, FRANZA A, et al. Numerical evaluation of scour effects on lateral behavior of pile groups in clay [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 150: 104913.
- [29] 陈祥, 孙进忠, 蔡新滨. 基桩水平静载试验及内力和变形分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 753-759.
- CHEN X, SUN J Z, CAI X B. Horizontal static loading test and analyses of internal force and distortion on single pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 753-759. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)