

DOI: 10.11779/CJGE20230678

非对称循环温度荷载下 2×2 能源群桩倾斜性状离心机试验研究

马奇杰¹, 周超^{*2}

(1. 中北大学能源与动力工程学院, 山西 太原 030051; 2. 香港理工大学建设及环境学院, 香港 100872)

摘要: 在能源桩地源热泵系统运行过程中, 能源群桩基础可能产生非对称温度分布, 导致基础倾斜, 对其正常使用构成不利影响因素。研究通过离心机试验, 量化了砂土中 2×2 能源群桩在非对称循环温度荷载下的倾斜变形, 试验在恒定竖向荷载下施加 15 个幅值为 10°C 的双向循环温度荷载, 共开展 10 个试验, 研究了群桩基础中能源桩非对称布置形式、竖向荷载大小以及筏板-土体相互作用对基础倾斜的影响。结果表明: 非对称循环温度荷载导致基础倾斜不断累积并逐渐趋于稳定, 在正常竖向荷载作用下(安全系数 2.0), 基础累积倾斜约 1.8% , 小于规范限值 2.5% , 群桩发生轴力重分布, 最大轴力增加约 40% 初始值; 随着竖向荷载的增加, 基础累积倾斜有可能超过 2.5% 。非对称循环温度荷载所导致群桩基础倾斜在设计中应予以考虑。

关键词: 能源群桩; 循环温度荷载; 基础倾斜; 离心机试验

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)10-2158-08

作者简介: 马奇杰(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事能源地下结构与可再生能源建筑利用方面的研究工作。E-mail: qijie.ma@163.com。

Centrifuge modelling of inclination of 2×2 energy pile groups subjected to non-symmetrical cyclic thermal loading

MA Qijie¹, ZHOU Chao²

(1. School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Faculty of Construction and Environment, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 100872, China)

Abstract: During the operation of energy pile-based ground source heat pump systems, the energy piles may experience non-symmetrical temperature changes, resulting in inclination of pile group. This can affect its serviceability unfavourably. By conducting centrifuge tests, the inclination of 2×2 energy pile groups in sand induced by non-symmetrical cyclic thermal loading is quantified. During each test, 15 two-way thermal cycles with an amplitude of 10°C are applied while maintaining a constant vertical load. A total of 10 tests are carried out to evaluate the effects of the distribution of energy piles within the group, magnitude of vertical load and raft-soil interaction on the inclination of pile groups. The results show that the inclination of pile group accumulates with thermal cycles at a reducing rate. Under normal vertical load ($\text{FoS} = 2.0$), the accumulated inclination is about 1.8% , less than 2.5% as specified by the China design code. The redistribution of axial load occurs with the maximum increase of about 40% of the initial value. As the vertical load increases, the accumulated inclination can exceed 2.5% . The inclination of pile group induced by non-symmetrical cyclic thermal loading should be well considered at the design stage.

Key words: energy pile group; cyclic thermal loading; inclination of pile group; centrifuge modelling

0 引言

根据《2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告》统计, 建筑冬季采暖碳排放约占其运行阶段碳排放的 22%。能源桩地源热泵技术利用浅层岩土体作为热量存储媒介, 把换热管预埋到桩体内部形成能源桩, 利用能源桩与土体交换热量, 为建筑供热制冷等应用提

供绿色能源, 并承担结构荷载, 实现一桩两用^[1-3]。

目前, 对能源单桩已开展大量研究, 能源单桩在

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908328); 香港研究资助局优配研究金项目(16207417, 15200120)

收稿日期: 2023-07-18

*通信作者(E-mail: c.zhou@polyu.edu.hk)

热力荷载共同作用下的承载力、变形以及桩身完整性已基本得到可靠验证^[4-10], 其中值得注意的是: 由于桩身钢筋、混凝土以及换热管之间热膨胀系数的差异导致桩身表面形成裂缝, 可能影响能源桩耐久性^[11]; 此外, You 等^[12]的研究表明降温会导致单桩承载力有所降低, Liu 等^[13]发现施加循环温度荷载后单桩竖向承载力降低约 10%; Ng 等^[14]以及 Fei 等^[15]的研究表明循环温度荷载会导致摩擦型能源单桩发生塑性沉降累积并逐渐趋于稳定, 产生上述沉降累积的原因主要是桩-土接触面土体以及桩底土体在循环剪切与循环温度作用下产生的塑性变形^[16-17]。

对于能源群桩, 除了桩-土相互作用约束能源桩热变形, 群桩基础中的普通桩通过承台对能源桩顶形成约束, 进一步限制其热变形, 产生附加热应力^[18-20], 随着桩顶约束作用的增加, 附加热应力增大^[21]。此外, 通过土体热传导, 群桩基础中的普通桩也会发生温度变化, 进而影响基础性能。对于工程实践中的能源群桩基础, 由于群桩基础中能源桩与普通桩混合布置所产生的非均匀性, 能源桩在载热工质循环管路中所处位置的不同, 以及可能发生的预埋换热管破裂造成能源桩失效等原因, 导致群桩基础温度变化存在差异, 进而产生非均匀变形或群桩倾斜^[22]; 在循环温度荷载下, 上述群桩倾斜可能发生累积^[23], 对其正常使用产生一定影响。Ng 等^[24]开展软黏土中 2×2 能源群桩在非对称循环温度荷载下的离心机试验, 结果表明群桩累积倾斜有可能超过规范限值。Fang 等^[25]的原位试验证实了非对称循环温度荷载导致群桩基础倾斜累积。

本研究开展了系列离心机试验以量化砂土中 2×2 能源群桩基础在非对称循环温度荷载下产生的倾斜变形, 考虑了群桩基础中能源桩非对称布置形式, 竖向荷载大小以及筏板-土体相互作用的影响。

1 试验概况

离心机试验利用 N 倍于重力加速度的离心加速度在缩尺模型中实现原位土体的应力状态, 提高了缩尺物理模型试验的准确性。本研究试验在香港科技大学的离心机上开展, 所有试验均在 $60g$ 离心加速度下完成, 离心机试验的相似关系见表 1^[26]。

表 1 离心机试验相似关系

Table 1 Scaling laws of centrifuge modelling

物理量	原型/模型
重力加速度	$1/N$
长度(位移)	N
应变(应力)	1
荷载	N^2
扩散时间	N^2
温度	1

注: N 为离心加速度。

1.1 试验内容

本研究开展了 3 组共 10 个试验(见表 2), 测试了 3 种不同基础类型, 每组试验独立完成模型制备与测试。第一组试验测试对象为独立单桩, 共 2 个试验, 分别测试了单桩竖向极限承载力, 以及能源单桩在恒定竖向荷载下施加循环温度荷载; 第二组试验测试 2×2 能源群桩承台基础(承台下表面与土体表面不接触), 在恒定竖向荷载下施加循环温度荷载, 探究了恒定竖向荷载大小以及群桩基础中能源桩非对称布置形式的影响, 其中竖向荷载分两个等级, 第二级荷载是第一级荷载的 2 倍, 能源桩非对称布置形式包括两个工况(见图 1), 工况 1 中只有一根能源桩, 工况 2 中两根能源桩同侧布置; 第三组试验测试对象为 2×2 能源群桩筏板基础(承台下表面与土体表面接触), 试验因素与第二组试验相同。

表 2 试验内容

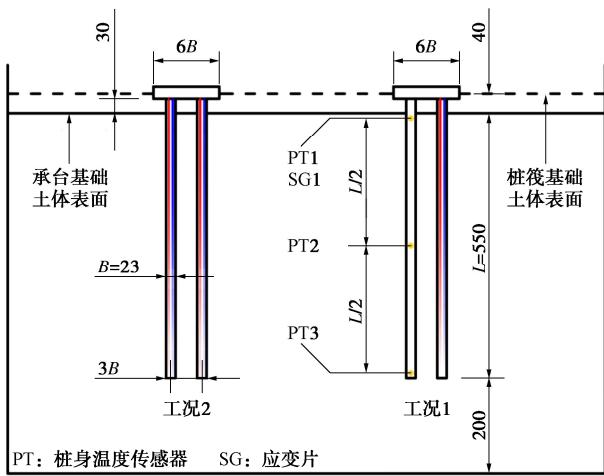
Table 2 Test programme

试验 编号	基础 类型	竖向荷载/kN	双向循环 温度荷载
SP 1	独立	竖向承载力试验	无
SE 1	单桩	2375 (FoS = 2)	有
EG 1			工况 1 (单根能源桩)
EG 2	群桩 承台	9500 (FoS ≈ 2)	工况 2(两根能源桩 同侧布置)
EG 3			工况 1
EG 4		19000 (FoS ≈ 1)	工况 2
PR 1			工况 1
PR 2	群桩	9500 (FoS ≈ 2)	工况 2
PR 3	筏板		工况 1
PR 4		19000 (FoS ≈ 1)	工况 2

注: 上表中基础竖向荷载安全系数是根据 Ng 等^[27]提出的破坏准则确定的。

1.2 模型能源桩

如图 2 所示, 本试验模型能源桩桩头与桩身通过连接件连接, 铝制桩头与连接件共 345 g , 桩身 645 g , 桩身材料的相关重要特性见表 3。循环载热工质由桩头入口进入桩身, 流经空心桩身内预设导管到达桩底, 然后沿导管与桩内壁之间空腔向上流出, 桩身温度随之改变。在桩身顶部、中部与底部分别布置热电偶温度传感器, 并在桩身顶部布置轴力应变片(见图 1(a)), 桩身外部用环氧树脂包裹以保护传感器, 包裹环氧树脂后桩身宽度为 23 mm 。通过桩-土接触面剪切试验, 测得包裹桩身所用的环氧树脂与本研究所用 Toyoura 砂土之间的临界摩擦角为 29° 。



(a) 剖面视图

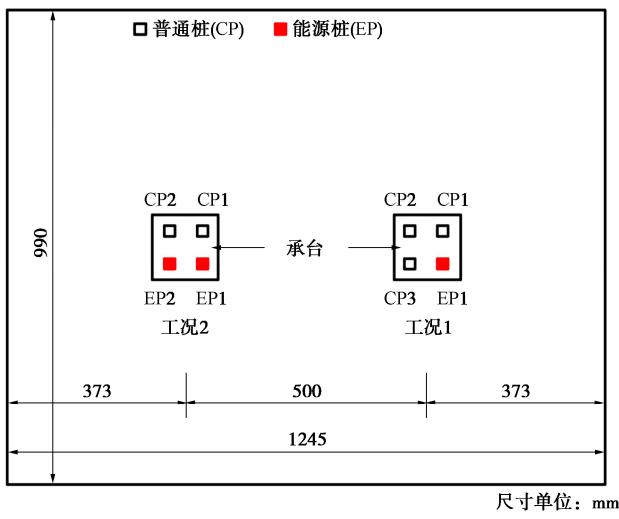


图1 试验布置图

Fig. 1 Test set-up

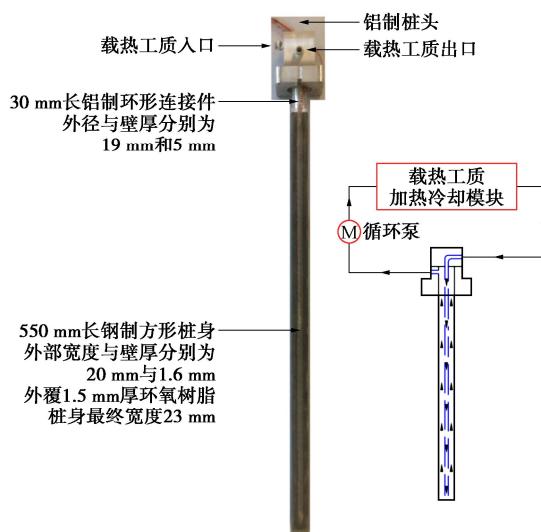


图2 模型能源桩

Fig. 2 Model energy pile

表3 模型能源桩材料特性

Table 3 Material properties of model energy pile

物理量	钢材	环氧树脂
弹性模量/GPa	205	2.5
泊松比	0.33	0.4
热膨胀系数/°C	1.2×10^{-5}	8.5×10^{-5}
密度/(kg·m ⁻³)	7800	1050
导热系数/(W·(m·°C) ⁻¹)	45	0.22
比热容/(J·(kg·°C) ⁻¹)	470	1100

1.3 试验制备

试验制备过程主要可分为3步：

(1) 第一步固定模型能源群桩基础，在模型箱中同时固定两个 2×2 能源群桩基础，两个群桩基础间距约为22倍桩身宽度（见图1），群桩内部桩间距为3倍桩身宽度，每个群桩基础的4根基桩通过尺寸为 $138 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ （宽×厚）的方形铝制承台实现连接，根据Horikoshi等^[28]计算该群桩承台属于刚性承台。

(2) 第二步制备土体，本研究采用Toyoura砂，砂土临界摩擦角为 31° ，平均粒径 d_{50} 为 0.17 mm ，最小与最大孔隙比分别为 0.597 , 0.977 ^[16]。本研究通过砂雨法制备土体，洒落高度距土体表面保持约 1 m ，所制备砂土平均相对密度约 65% ，土体制备过程中埋设热电偶以监测土体温度变化。

(3) 第三步在离心机试验平台完成准备工作（见图3），主要包括安装位移计与孔隙水压力传感器，连接载热工质循环管路并测试气密性，以及在土体内部注水实现自然饱和状态以增加土体导热系数，根据Johansen公式^[29]估算，对于本研究所制备相对密度约 65% 的砂土，饱和状态与干燥状态所对应导热系数分别为 $2.6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 与 $0.22 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 。



图3 能源群桩基础离心机模型试验

Fig. 3 Centrifuge modelling of energy pile group

1.4 试验步骤

离心机加速度升到目标值 $60g$ 后，等待 3 h 以消散升 g 过程中可能产生的超孔隙水压力（根据所安装

孔隙水压力传感器判断), 然后施加 15 个双向循环温度荷载, 每个温度循环持续 96 min, 其中升温与降温各持续 48 min 以模拟季节性供热制冷。如图 4 所示, 桩身温度沿深度方向基本呈均匀分布, 幅值约 10°C , 在 15 次循环温度荷载施加过程中, 升温荷载下桩身温度变化基本保持一致, 降温荷载下各个循环之间的最大差异约 1°C 。在同一次试验中, 两个群桩基础中的能源基桩在载热工质循环管路中并联连接, 从而保证不同能源基桩温度变化的一致性, 实现试验工况之间的可比性。循环温度荷载施加结束后, 等待 3 h, 降 g 完成本次试验。在 $1g$ 条件下, 加倍模拟竖向荷载重物的质量, 然后升 g , 重复上述步骤, 完成本组试验。

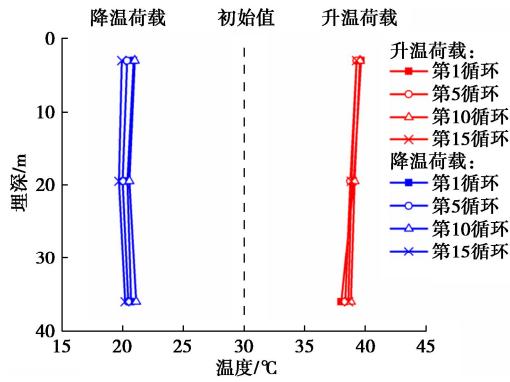


图 4 桩身温度分布

Fig. 4 Temperature distribution along energy pile

能源群桩基础试验中所施加的恒定竖向荷载是根据单桩竖向极限承载力试验结果确定的(见图 5), 图示单桩竖向荷载-沉降曲线呈缓慢增长形式, 无明显陡降转折点, 本研究采用 Ng 等^[27]提出的破坏准则判定单桩竖向承载力为 4750 kN, 略小于《建筑基桩检测技术规范》^[30]规定的 5% 柱径沉降所对应的竖向荷载, 取安全系数 2.0, 不考虑群桩效应的影响, 计算群桩基础的正常竖向工作荷载为 9500 kN, 在同一组试验的第二次试验中, 该竖向荷载加倍至 19000 kN 以对比竖向荷载大小的影响, 本研究利用重物模拟上述竖向荷载, 重物质量的确定考虑了旋转半径对离心加速度的影响。上述所确定群桩基础竖向荷载同样施加于群桩承台与群桩筏板基础, 对于群桩筏板基础, 由于筏板-土体相互作用, 且桩体埋深相较于群桩承台基础有所增加(见图 1), 其竖向承载力应高于群桩承台基础, 对应于相同竖向荷载, 安全系数会有所增加。

2 结果分析

2.1 热响应

本文中所有试验结果均对应原型状态。由于各试验中能源桩温度变化及土体热学特性基本相同, 影响群桩基础热响应的主要因素是能源桩布置形式, 图 6

所示为两种不同能源桩布置形式下对应于第一个温度循环中升温与降温结束时基础热响应典型结果, 图中横坐标代表温度测点到能源桩 EP1 截面中心的距离与桩宽 B 的比值, 温度测点埋深位于桩身中部, 由图 6 可知, 随着热响应半径的增加土体热响应逐渐减弱, 对于工况 1, 3 个土体温度测点中最大温度升高约 4°C (ST 2), 工况 2 中土体热响应明显增大, 最大升温约 6°C (ST 2), 随着热响应半径的增加, 工况 2 与工况 1 之间土体热响应的差异逐渐减小; 此外, 基础中的普通桩也会发生温度变化, 幅值符合上述规律。降温结束时, 土体热响应幅值略小于升温过程, 从 $3B$ 距离半径开始降温后土体与普通桩温度基本恢复初始值, 大于 $5B$ 距离半径的土体热响应可忽略。

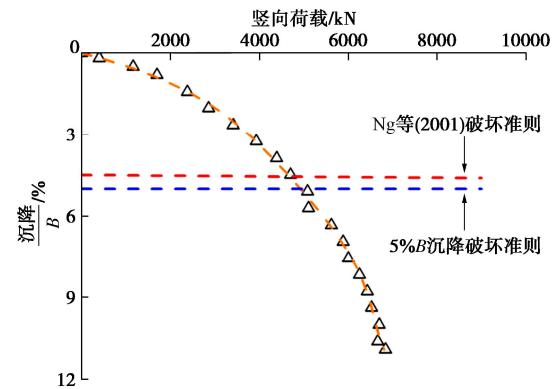


图 5 单桩竖向荷载-沉降曲线

Fig. 5 Vertical load-settlement curve of single pile

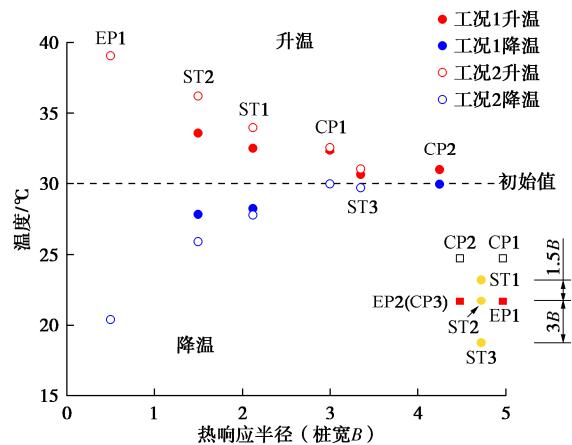


图 6 土体和普通桩热响应

Fig. 6 Thermal responses of soil and conventional piles

2.2 群桩位移

非对称循环温度荷载作用下, 群桩基础位移发展变化的典型试验结果如图 7 所示, 对于只有单根能源桩的工况 1(见图 7(a)), LVDT 1 与 LVDT 3 所监测位置的位移发展变化呈相反趋势, 而 LVDT 2 与 LVDT 4 所监测位置的位移发展变化基本一致, 表明群桩基础绕图示虚线轴发生整体倾斜, 随着循环温度荷载的不断施加, LVDT 1 与 LVDT 3 所监测位置的沉降差逐

渐累积, 循环温度荷载结束时累积沉降差达约 25 mm, LVDT 2 与 LVDT 4 所监测位置的沉降也有所累积, 造成上述现象的原因是循环温度荷载下摩擦型能源单桩的沉降累积效应^[14-15]。

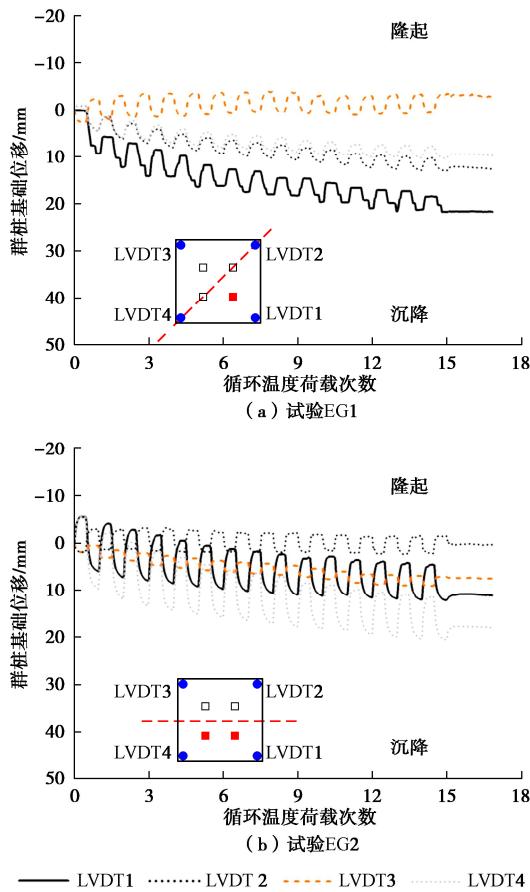


图 7 群桩基础位移

Fig. 7 Displacements of pile group

对于两根能源桩同侧布置的工况 2(见图 7(b)), 由于对称性, LVDT 1 与 LVDT 4 所监测位置的位移发展趋势保持一致, 二者之间的数值差异是由试验制备过程中所产生的非均匀性误差导致的(如所制备砂土体密度分布非均匀性, 以及群桩基础中单桩空间分布与理想状态之间存在的差异), LVDT 2 与 LVDT 3 所监测位置的位移发展趋势保持一致, 但与 LVDT 1 与 LVDT 4 所监测位置的位移发展趋势相反, 表明群桩基础绕图示虚线轴发生整体倾斜, 与工况 1 相类似, 两组位移测点之间的沉降差也随循环温度荷载的施加而增大, 达约 18 mm。

图 8 对比了循环温度荷载下群桩基础平均位移(工况 1 单根能源桩)与独立能源单桩的位移, 群桩基础的恒定竖向荷载为独立单桩的 4 倍, 二者所施加循环温度荷载相同, 由图 8 可知, 类似于独立能源单桩, 群桩基础的平均沉降也不断累积, 并逐渐趋于稳定, 但是, 相较于独立能源单桩, 由于受到普通桩的约束作用, 群桩基础平均位移的变化幅值远小于独立

能源单桩, 约为后者的 1/5~1/4, 当循环温度荷载施加结束时, 能源群桩基础的平均累积沉降小于独立能源单桩约 10 mm, 相较于群桩承台基础, 群桩筏板基础的平均沉降累积进一步减小, 上述对比表明群桩基础中普通桩以及筏板-土体相互作用所产生的约束可以有效减少能源桩基础平均沉降累积。此外, 规范要求当建筑高度小于 100 m 时, 基础沉降小于 350 mm^[11], 图示基础平均沉降满足规范要求。

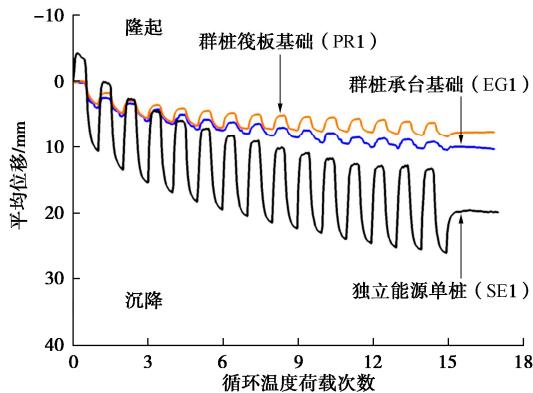


图 8 群桩基础平均位移

Fig. 8 Average displacements of pile group

2.3 群桩倾斜

根据上述位移测点间的最大沉降差与相应测点之间距离的比值计算基础整体倾斜, 对于工况 1, 取 LVDT 1 和 LVDT 3 之间沉降差进行计算, 对于工况 2, LVDT 1 和 LVDT 4 以及 LVDT 2 和 LVDT 3 所测结果根据对称性应当分别保持一致, 但是, 由于试验中存在的非均匀性误差, 导致数值存在差异, 在群桩基础倾斜计算中取两组位移之间最大沉降差进行计算, 以考虑最不利可能性, 所得结果如图 9 所示, 对于正常竖向荷载 9500 kN, 循环温度荷载下基础倾斜累积最大值约 1.8‰, 未超过规范限值 2.5‰^[11]。此外, 由于筏板-土体之间相互作用约束基础变形, 群桩筏板基础的循环倾斜幅值略小于群桩承台基础, 而工况 2 的循环倾斜幅值则远大于工况 1, 前者约为后者的 2 倍, 相较于工况 1 中只有一根能源桩, 工况 2 中普通桩对两根能源桩热变形的相对约束作用减弱。当竖向荷载增加到 19000 kN 时, 循环温度荷载会导致基础累积倾斜超过规范限值, 随着竖向荷载的增加, 桩-土接触面土体以及桩底土体应力状态更趋近于屈服面, 在桩身循环热变形扰动下, 产生更大塑性变形。本研究在同一模型上先后完成高荷载试验, 在低荷载试验中, 由于循环温度荷载导致桩体塑性沉降累积, 桩底土体压缩, 可能会增加桩体承载力, 因此, 低荷载试验结束后, 本研究在原模型上继续开展高荷载试验, 会导致高荷载试验中观察到的群桩基础倾斜小于在新模型上开展试验所得结果。

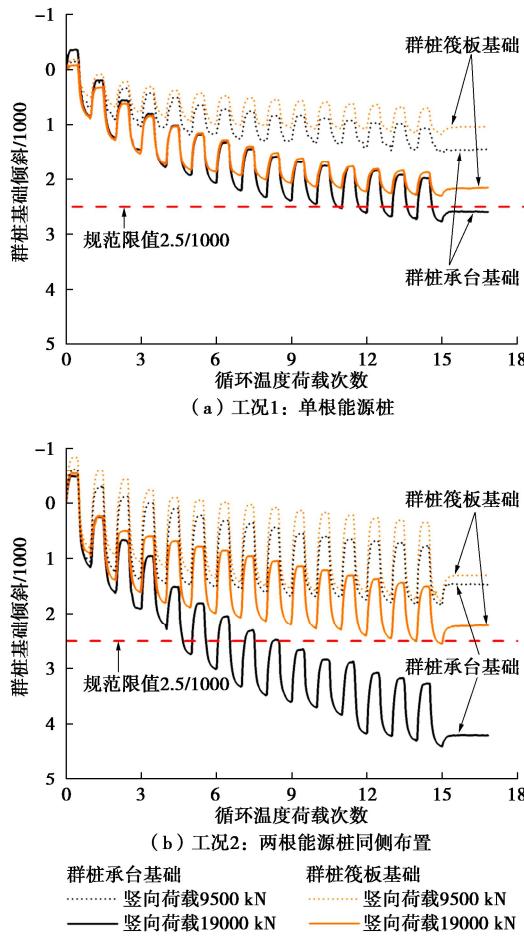


图9 群桩基础倾斜

Fig. 9 Inclinations of pile group

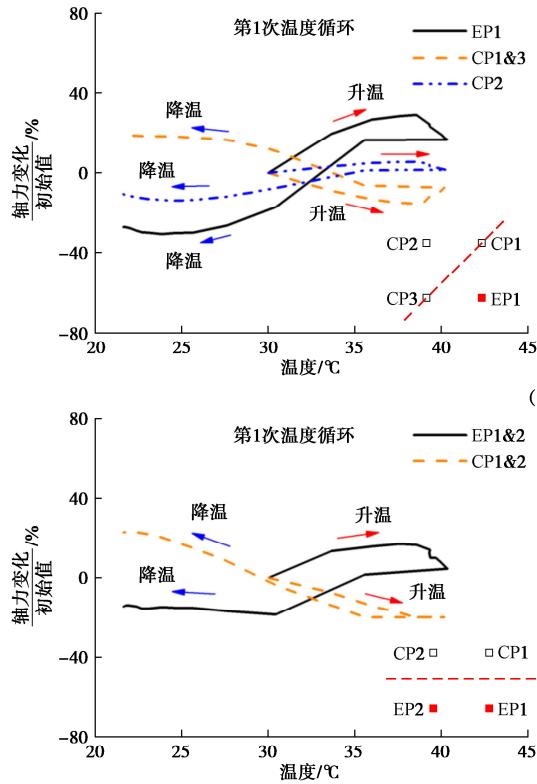


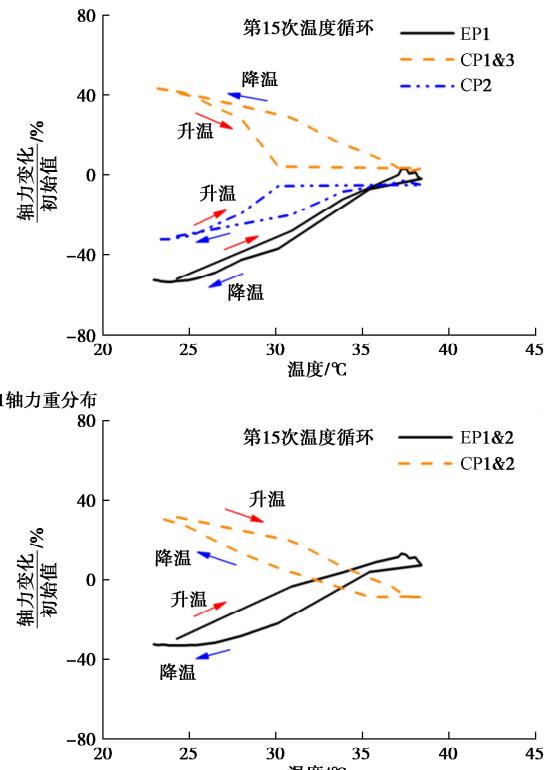
图10 试验EG 1 和EG 2 轴力重分布

Fig. 10 Redistribution of axial load of tests EG 1 & EG 2

在 Ng 等^[23]所开展离心机试验中, 2×2 群桩基础中单根能源桩所受循环温度荷载幅值为 $\pm 7^{\circ}\text{C}$ (略小于本研究所施加的温度荷载 $\pm 10^{\circ}\text{C}$), 其他试验条件与本研究相同, 对比其试验结果与本研究 EG 1 试验结果表明, 随着循环温度荷载幅值增大, 群桩倾斜亦有所增加, 10 个循环温度荷载后, 二者相差约 0.6‰。

2.4 轴力重分布

伴随着群桩倾斜的发展, 群桩内部产生轴力重分布, 对于只有一根能源桩的工况 1 (见图 10 (a)), 在升温过程中, 能源桩轴力增加, 与之成对角分布的普通桩 (CP 2) 轴力也增加, 而另外两根普通桩 (CP 1 和 CP 3) 轴力减小, 产生上述现象的原因在于能源桩热膨胀变形受到普通桩的约束作用, 导致能源桩轴力增加, 对于普通桩 CP 1 和 CP 3, 能源桩热膨胀使其产生上升位移, 因此轴力减小, 对于与能源桩成对角分布的普通桩 CP 2, 基础整体倾斜使其产生沉降位移, 因此轴力增加。在降温过程中, 群桩内部轴力重分布与升温过程呈相反趋势。15 次循环温度荷载施加结束时, 由于基础倾斜发生塑性累积, 能源桩 EP 1 与普通桩 CP 2 轴力分别减小约 50%, 35%, 而普通桩 CP 1 和 CP 3 轴力增加约 40%, 大于 Ng 等^[23]所测 30%, 后者试验中共施加 10 个温度循环, 且温度荷载幅值为 $\pm 7^{\circ}\text{C}$, 小于本试验 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。



对于群桩中两根能源桩同侧布置的工况 2(见图 10(b)), 由于对称性, 能源桩与普通桩轴力变化相等且呈相反趋势, 15 个双向循环温度荷载施加结束时能源桩轴力减少约 35%, 与之相应, 普通桩轴力增加约 35%。

3 结 论

本研究开展了 10 个离心机试验以量化砂土中 2×2 能源群桩基础在非对称循环温度荷载下的热力响应特性, 每个试验在保持恒定竖向荷载下施加 15 个幅值为 10°C 的双向循环温度荷载, 根据试验结果, 主要得到以下 3 点结论。

(1) 在非对称循环温度荷载作用下, 2×2 能源群桩基础整体倾斜不断累积, 并逐渐趋于稳定。基础倾斜随着循环温度荷载幅值以及群桩中非对称分布能源桩数量的增加而增大; 相较于群桩承台基础, 筏板-土体相互作用有利于减少基础倾斜。在正常竖向工作荷载作用下(安全系数约 2.0), 基础累积倾斜最大为 1.8‰, 没有超过规范限值 2.5‰, 但是随着竖向荷载的增大, 基础累积倾斜可能超过规范限值。

(2) 基础倾斜变形导致群桩内轴力重分布, 在本研究试验中, 正常竖向工作荷载下能源桩最大轴力减小约 50%, 与之相应, 普通桩轴力增加约 40%。

(3) 在本研究试验条件下, 大于 5 倍桩身宽度距离半径的土体热响应可忽略, 且循环温度荷载施加结束时, 土体热响应基本恢复至初始值。

本研究通过离心机模型试验量化了简单的 2×2 能源群桩在非对称循环温度荷载下的热力特性与倾斜变形, 对于工程实践中使用的大规模群桩基础在复杂非对称循环温度荷载下的热力响应特性有待进一步量化研究, 以促进能源桩技术的发展与应用。

参 考 文 献:

- [1] BRANDL H. Energy foundations and other thermos-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, **56**(2): 81-122.
- [2] 江强强, 焦玉勇, 骆进, 等. 能源桩传热与承载特性研究现状及展望[J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3351-3362, 3372. (JIANG Qiangqiang, JIAO Yuyong, LUO Jin, et al. Review and prospect on heat transfer and bearing performance of energy piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3351-3362, 3372. (in Chinese))
- [3] MA Q J, FAN J H, LIU H T. Energy pile-based ground source heat pump system with seasonal solar energy storage[J]. Renewable Energy, 2023, **206**: 1132-1146.
- [4] 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 Shuqiang, CHENG Xiaohui. In-situ tests on structural responses of energy piles during heat exchanging process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(6): 1087-1094. (in Chinese))
- [5] 路宏伟, 蒋刚, 王昊, 等. 摩擦型能源桩荷载-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 Hongwei, 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))
- [6] 郭易木, 钟鑫, 刘松玉, 等. 自由约束条件下分层地基中 PHC 能源桩热力响应原型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(3): 582-590. (GUO Yimu, ZHONG Xin, LIU Songyu, et al. Prototype experimental investigation on the thermo-mechanical behaviors of free constrained full-scale PHC energy piles in multi-layer strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(3): 582-590. (in Chinese))
- [7] BERGSTRÖM A, JAVED S, DIJKSTRA J. Field test of a floating thermal pile in sensitive clay[J]. Géotechnique, 2021, **71**(4): 334-345.
- [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 Pengfei, 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. (in Chinese))
- [9] CUNHA R P, BOURNE-WEBB P J. A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, **158**: 112072.
- [10] REN L W, REN J Y, HAN Z P, et al. Field tests on the thermomechanical responses of PHC energy piles under cooling and loading conditions[J]. Acta Geotechnica, 2023, **18**(1): 429-444.
- [11] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Technical Code for Building Pile Foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [12] YOU S, CHENG X H, GUO H X, et al. Experimental study on structural response of CFG energy piles[J]. Applied

- Thermal Engineering, 2016, **96**: 640-651.
- [13] LIU H L, WANG C L, KONG G Q, et al. Ultimate bearing capacity of energy piles in dry and saturated sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, **14**(3): 869-879.
- [14] 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*, 2014, **4**(4): 310-316.
- [15] FEI K, DAI D. Experimental and numerical study on the behavior of energy piles subjected to thermal cycles[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018: 3424528.
- [16] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. *Géotechnique*, 1993, **43**(3): 351-451.
- [17] NG C W W, MU Q Y, ZHOU C. Effects of specimen preparation method on the volume change of clay under cyclic thermal loads[J]. *Géotechnique*, 2019, **69**(2): 146-150.
- [18] MIMOUNI T, LALOUI L. Behaviour of a group of energy piles[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, **52**(12): 1913-1929.
- [19] 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.
- [20] 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 Lianwei, XU Jian, KONG Gangqiang, 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))
- [21] 王成龙, 刘汉龙, 孔纲强, 等. 不同刚度约束对能量桩应力和位移的影响研究 [J]. 岩土力学, 2018, **39**(11): 4261-4268. (WANG Chenglong, LIU Hanlong, KONG Gangqiang, et al. Study on stress and displacement of energy pile influenced by pile tip stiffness[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(11): 4261-4268. (in Chinese))
- [22] PENG H F, KONG G Q, LIU H L, et al. Thermo-mechanical behaviour of floating energy pile groups in sand[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2018, **19**(8): 638-649.
- [23] NG C W W, MA Q J. Energy pile group subjected to non-symmetrical cyclic thermal loading in centrifuge[J]. *Géotechnique*, 2019, **9**(3): 1-5.
- [24] NG C W W, FARIVAR A, GOMAA S M M H, et al. Centrifuge modeling of cyclic nonsymmetrical thermally loaded energy pile groups in clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2021, **147**(12): 04021146.
- [25] 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 ASCE*, 2022, **148**(8): 04022060.
- [26] GARNIER J, GAUDIN C, SPRINGMAN S M, et al. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2007, **7**(3): 1-23.
- [27] NG C W W, YAU T L, LI J H. et al. New failure load criterion for large diameter bored piles in weathered geomaterials[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2001, **127**(6): 488-498.
- [28] HORIKOSHI K, RANDOLPH M F. On the definition of raft-soil stiffness ratio for rectangular rafts[J]. *Géotechnique*, 1997, **47**(5): 1055-1061.
- [29] JOHANSEN O. Thermal Conductivity of Soils[D]. Trondheim: University of Trondheim, 1975.
- [30] 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))