

DOI: 10.11779/CJGE201911010

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

任连伟¹, 徐健¹, 孔纲强², 刘汉龙^{2, 3}

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 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;
3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 能量桩技术具有支撑上部结构和浅层地热能换热器双重作用; 作为一种节能减排新技术, 近年来获得了一定的发展。依托微型钢管桩加固既有基础托换工程, 开展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; 实测不同间歇时长情况下桩身温度与应力等变化规律, 探讨不同运行模式下的桩基换热性能系数 (C_{OP} , coefficient of performance)。试验结果表明: 文中试验条件下, 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; 桩基 C_{OP} 随循环次数增加而减小, 且随间歇时间的延长而增大; 附加拉应力未超过设计控制范围、不会导致桩体破坏。

关键词: 微型钢管桩; 能量桩; 多次温度循环; 热力响应; 现场试验

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)11-2053-08

作者简介: 任连伟(1980—), 男, 河南周口人, 博士, 副教授, 主要从事地基基础相关的教学与科研工作。E-mail: renhpu@163.com。

Field tests on thermal response characteristics of micro steel pile group under multiple temperature cycles in winter conditions

REN Lian-wei¹, XU Jian¹, KONG Gang-qiang², LIU Han-long^{2, 3}

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The energy pile technology has dual functions of supporting superstructure and acting as shallow geothermal heat exchanger. As an energy-saving and emission-reduction technology, it has obtained certain development in recent years. Relying on the micro steel piles to reinforce the existing foundation underpinning project, the field tests on thermal response of the micro steel group piles under multiple temperature cycles are carried out. The variation of pile temperature and pile stress under different intermittent time is measured. The coefficients of performance (C_{OP}) of piles are discussed and analyzed. It is shown that the additional thermal stress of piles increases with the increasing cycling times, and the increase ratio decreases with the interval time; the C_{OP} of piles decreases with the increasing cycling times, and the decrease ratio decreases with the interval time. The values of the additional tensile stress does not exceed the design control range, which will not cause the damage of the pile.

Key words: micro steel pile; energy pile; multiple temperature cycle; thermal response; field test

0 引言

地源热泵技术是一种节能环保的空调系统, 但地源热泵技术的钻孔埋管施工成本高, 且占用大量地下空间, 从而一定程度上限制其发展应用。能量桩(又称为能源桩、热交换桩等), 将传统地源热泵技术和建筑桩基础结合在一起, 既能满足桩基力学性能的要求, 又能通过桩体埋管内换热液的循环实现上部建筑与浅

层地能的热交换^[1-3]。

针对不同桩身材料的能量桩热力响应及承载性能, 相关学者开展了一系列的研究, 并取得了一定的成果: 针对夏季工况, Bourne-Webb等^[4-5]基于现场实

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778212)

收稿日期: 2018-11-30

*通讯作者(E-mail: gqkong1@163.com)

测,初步分析了混凝土灌注桩受力机理及承载力计算方法; Laloui 等^[6-7]分析了混凝土灌注桩桩身应力、应变变化情况,给出了附加温度应力计算方法; Murphy 等^[8-9]研究了桩端约束对混凝土灌注桩桩身附加温度应力及桩顶位移的影响; Guo 等^[10]重点分析了 PHC 能量桩桩身及桩周土体温度变化规律。针对夏/冬季工况,桂树强等^[11]、You 等^[12]分别针对混凝土灌注桩和 CFG 桩在温度和结构荷载联合作用下的热力响应特性,实测了桩身的应力-应变特性和桩周侧摩阻力变化的一般规律,并分析了不同加热功率对土壤综合导热系数的影响。针对温度循环次数、间歇时长对能量桩热力响应的影响,路宏伟等^[13]重点分析了单次短期冷热循环温度荷载下能量桩的桩侧摩阻力分布规律; Olgun 等^[14]研究了单次长期冷热循环温度荷载对能量桩热力学特性的影响; Wang 等^[15-16]、Liu 等^[17]开展了单次及 3 次冷热循环荷载下能量桩的热力学特性的模型试验; Faizal 等^[18]研究了多次温度循环下间歇时长对能量桩热响应及力学性能的影响。

相关研究成果对于了解能量桩热响应特性和承载力机理起到了积极作用;然而,已有研究对象绝大部分是针对钻孔灌注桩的能量桩,研究方式也往往是针对其在温度升高模式下的热响应特性开展研究;而针对微型钢管桩的温度降低(即冬季工况)下,尤其是多次温度循环条件下的研究仍相对较少。因此,本文依托既有建筑物基础加固改造工程,结合能量桩在办公楼等建筑间歇运行特点,开展冬季工况不同间歇时长下的现场试验,以研究微型钢管能量桩群桩在多次温度循环下的热力响应特性及性能系数,为冬季工况能量桩设计提供参考。

1 现场试验概况

1.1 依托工程背景

现场试验场地位于河南省焦作市,以河南理工大学锅炉房改造工程项目为依托。既有锅炉房建筑总高度为 21.6 m,由设备间及供电区域层和供暖锅炉设备层双层结构组成。改造工程,拟在建筑 10.25, 15.75 m 高度处分别增设楼板,将建筑改造成 4 层结构;二、三层延东西方向各增加两排混凝土柱及若干填充墙;一层为仓库层(即为既有 1 层)、二层标准游泳馆、三层和四层为办公用房。由于上部建筑荷载量增加,经核算既有桩基础承载力不足,故需要对既有桩基础进行加固。

既有桩基础为桩长 8 m、桩径 0.6 m 的灌注桩,既有承台尺寸 1.2 m×1.2 m×0.85 m(长×宽×高)、承台顶面上覆土层厚度为 1.85 m。经设计计算,确定既有桩基加固方案如下:①在既有桩基础周围以静压

方式压入 8 根微型钢管桩;②在既有承台周围布置钢筋笼,并于静压完成的微型钢管桩桩头相连接,钢筋笼底部与既有承台底部持平、钢筋笼高度为 1.7 m;③在微型钢管桩及承台钢筋笼内浇筑 C30 混凝土形成注浆微型钢管桩和新的整体承台,承台尺寸为 3.3 m×3.3 m×1.85 m(长×宽×高)、承台顶面上覆土层厚度为 0.85 m。微型钢管桩桩长 13 m,桩径 159 mm,壁厚 5 mm,分 4 段(4, 4, 4, 1 m)压入土层中,采用焊接法接桩。既有基础加固后的桩基础布置形式如图 1 所示。

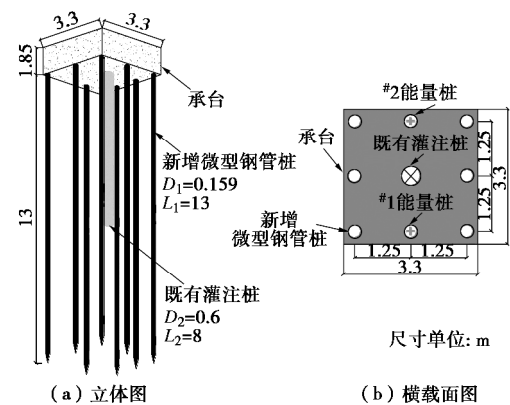


图 1 既有基础加固结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reinforced foundation

1.2 能量桩及土层性质参数

依托微型钢管桩,在管内预埋换热管并灌注混凝土后形成能量桩;以桩基础中间对称布置的两根微型钢管桩为研究对象。能量桩内换热管布置形式为单 U 形,材料为 PAP12-16(外径 16 mm、壁厚 1.5 mm)铝塑管材,该管材可塑性良好、导热性能较好。具体埋设方式:先在场外制作 U 管,再将 U 管埋入钢管桩内,最后浇筑 C30 混凝土。通过均匀布置在承台内的导热管(管间距为 35 cm)将#1 能量桩及#2 能量桩串联。试验期间,换热液从#1 桩体进入循环回路,经过承台内管道流向#2 桩体,再从出水口流出;换热管布置形式如图 2 所示。

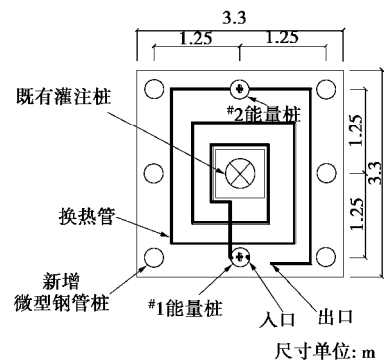


图 2 换热管布置示意图

Fig. 2 Arrangement of heat exchange pipes

表 1 现场土层主要物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of layered soils

土层编号	土层名称	H/m	w/%	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	e	$S_r/\%$	I_p	I_L	E_s/MPa
①	填土	1.8	28.0	19.6	0.80	97	11.9	0.93	6.1
②-1	粉质黏土	1.5	25.7	20.0	0.74	97	16.6	0.43	7.4
②-2	粉质黏土	1.4	27.2	19.8	0.79	98	14.0	0.72	6.1
②-3	粉质黏土夹粉土	1.6	28.8	19.6	0.83	100	12.4	0.97	5.5
③	粉质黏土	0.8	29.6	19.5	0.84	98	15.4	0.79	7.0
④	粉土夹粉质黏土	2.3	26.7	19.9	0.76	97	12.1	0.93	6.5
⑤	粉质黏土	1.1	24.2	20.1	0.74	96	15.3	0.48	8.1
⑥-1	粉质黏土	1.6	23.6	20.2	0.71	94	15.7	0.35	9.3
⑥-1a	粉质黏土夹结核	2.8	22.0	20.1	0.71	92	15.8	0.32	9.5
⑥-2	粉质黏土	2.6	24.2	20.0	0.73	96	16.2	0.42	7.6

注: 表中 H 为土层厚度, w 为土的含水率, γ 为土的重度, e 为土的孔隙比, S_r 为土的饱和度, I_p 为土的塑性指数, I_L 为土的液性指数, E_s 为土的压缩模量。

地表下 28 m 内以粉质黏土为主, 地下水埋深约 2 m, 无地下水渗流。土层分布如图 3 所示, 其具体物理力学参数见表 1 所示。

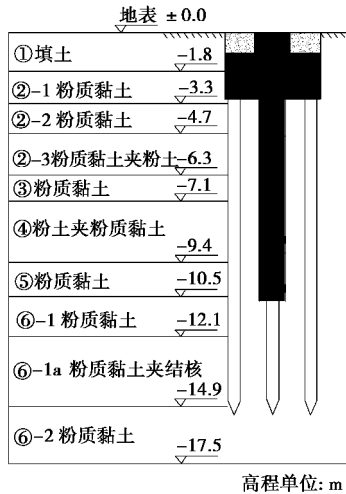


图 3 现场土层地质剖面示意图

Fig. 3 Field geological profile

1.3 现场试验方案与工况设计

本文开展冬季工况下微型钢管桩在多次温度循环下的热响应特性现场试验。以 24 h 为一个循环周期, 开展 4 个循环周期的对比试验, 讨论不同工况下能量桩的换热效率和热响应特性。具体试验方案见表 2 所示。在桩体中心沿桩深方向 -5.7, -9.2, -12.7 m (分别位于桩顶以下 3, 6.5, 10 m) 处布设 3 组振弦式钢筋计, 钢筋计用箍环绑扎在直径 12 mm 螺纹钢上, 监测桩体应变及温度。能量桩剖面及传感器布置如图 4 所示。

2 现场试验结果与分析

2.1 现场土层温度情况

土层温度分别由布置在地表、承台边缘及桩体内的传感器监测得到, 其春、夏、秋、冬四季的土层温

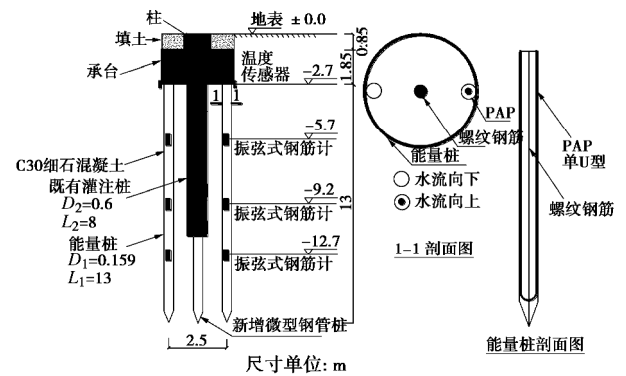


图 4 能量桩剖面及传感器布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of energy pile profile and layout of sensors in system

表 2 现场试验工况

Table 2 Field test schemes

工况	开停	入水温度/ $^{\circ}\text{C}$	流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	持续时间/h	循环次数
1	1 : 1	5	0.51	96	4
2	1 : 2	5	0.51	96	4
3	1 : 3	5	0.51	96	4

注: 开停 1 : 1 表示每个循环内能量桩系统开启 12 h, 停止 12 h; 开停 1 : 2 表示每个循环内能量桩系统开启 8 h, 停止 16 h; 开停 1 : 3 表示每个循环内能量桩系统开启 6 h, 停止 18 h。

度变化曲线如图 5 所示。由图 5 可见, 土层温度延桩深方向逐渐趋于稳定, -12.7 m 处土层温度约为 20.25°C 。

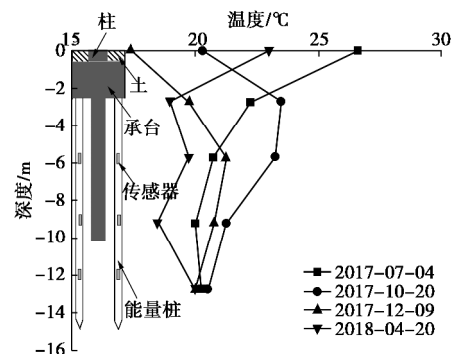


图 5 土层温度季节性变化

Fig. 5 Seasonal variation of soil temperature

2.2 桩身温度分布规律与分析

以#2 能量桩为主要研究对象, 不同桩深处桩身温度随循环次数及时间的关系曲线如图 6 所示。

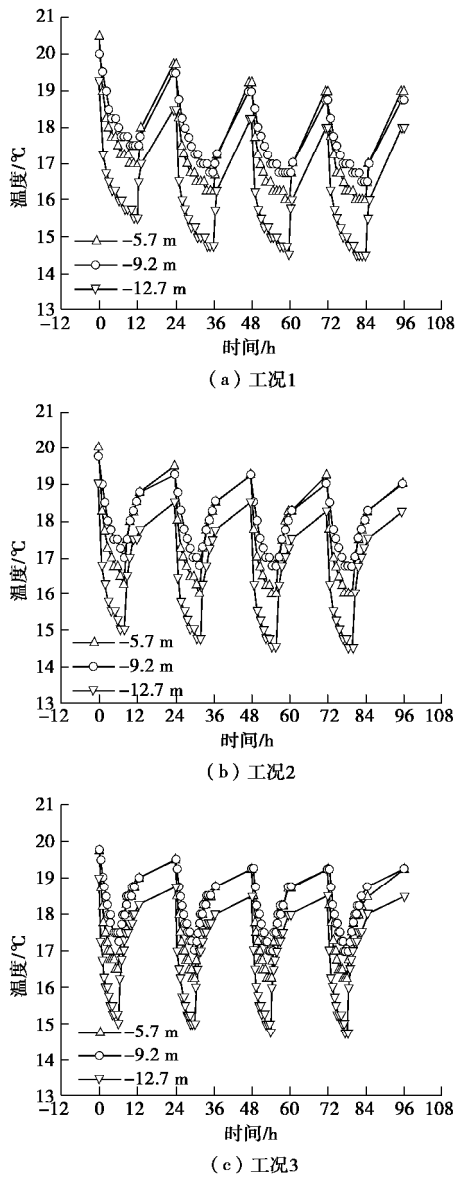


图 6 多次温度循环下桩身温度随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of pile temperature versus time under multiple temperature cycles

由图 6 可知, 3 种工况下, 随着温度循环次数的增加, 桩身温度曲线呈现整体下移趋势, 工况 1 循环下移趋势最明显。由此表明, 能量桩间歇时间越长, 桩身温度传递给土层的效果越好。能量桩运行短时间内, 桩体温度下降较快, 由于前期换热液与桩体温差较大且桩径较小, 换热液低温能量能快速传递至桩体。

第 1 次温度循环及第 4 次温度循环-5.7, -9.2, -12.7 m 处桩身温度初始值如图 7 所示。由图 7 可知, 不同工况下, 第四次循环桩身温度初始值较第一次循环均有所下降, 且下降幅度随开停比值减小而减小。

工况 1 循环模式下, -5.7 m 下降 1.5℃, -9.2, -12.7 m 处分别下降 1.25℃; 工况 2 循环模式下, -5.7, -9.2, -12.7 m 处温度分别下降 0.75℃; 工况 3 循环模式下, -5.7, -9.2, -12.7 m 出分别下降 0.5℃。桩身温度下降较均匀, 表明桩-土换热速率沿深度方向较均匀。

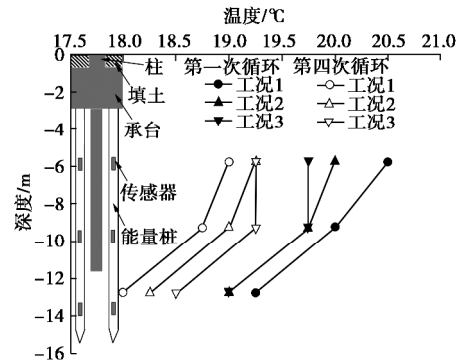


图 7 循环温度下桩身初始温度分布

Fig. 7 Initial temperature profile of piles under multiple temperature cycles

2.3 桩身应力变化规律

桩身自由膨胀或收缩, 桩身温度变化引起的轴向自由应变 e_f 表达式为

$$e_f = a_c \Delta T \quad (1)$$

式中, a_c 为钢筋混凝土线膨胀系数, 其值为 $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ^[19], ΔT 为桩身温度变化值。

实际工程中, 由于桩周岩土体及上部荷载约束, 则引起轴向附加温度应力 s_T :

$$s_T = E(e_T - a_c \Delta T) \quad (2)$$

式中, E 为桩体杨氏模量, C30 桩体杨氏模量为 30 GPa^[19], e_T 为试验过程中测得的桩体实际应变, 约定压应力为正、收缩应变为正。

以#2 能量桩为例, 3 种工况下桩身轴向附加温度应力随时间变化曲线如图 8 所示。

由图 8 可知, 3 种工况下, 曲线随循环次数增加呈现整体下降趋势, 表明桩身附加温度应力随循环次数增加而增大, 而工况 3 循环模式下曲线基本无下降趋势。因为工况 1 及工况 2 循环模式下能量桩停歇时间较短, 桩身温度未能完全恢复, 引起低温能量在桩身聚集, 附加温度应力也逐渐累积, 而工况 3 循环模式下, 能量桩运行时间较短, 停歇时间较长, 当能量桩再次运行时, 桩身残余附加温度应力较小。四次温度循环结束后, 3 种工况下桩身 3 m 处附加拉应力相对最大 (0.6 MPa), 该值小于 CFG 能量桩连续运行后的最大附加拉应力 (1.7 MPa)^[11], 也小于混凝土能量桩连续运行后的最大附加拉应力 (1.5 MPa)^[10]。

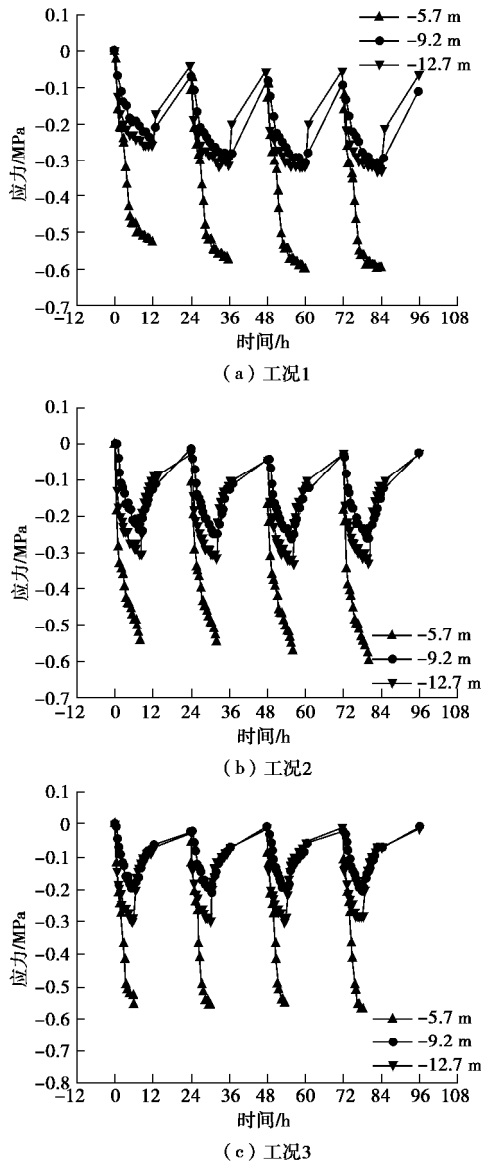


图 8 不同工况下桩身附加拉应力变化曲线

Fig. 8 Curves of additional tensile stress of energy piles under different conditions

图 9 给出了第四次温度循环结束能量桩停止运行时刻桩身轴向附加温度应力剖面图。由图 9 可知, 距桩顶 3 m 处, 桩身轴向附加拉应力相对最大; 桩身附加拉应力随间歇时间的增加而减小。

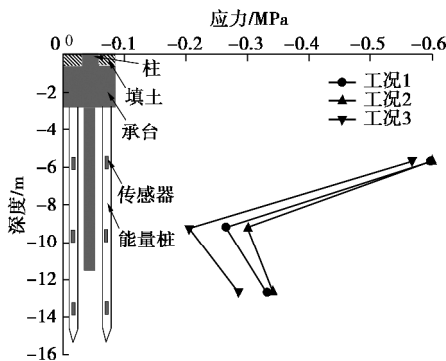


图 9 第 4 次循环下桩身轴向附加拉应力图

Fig. 9 Profile of axial additional tensile stress of pile at fourth cycle

试验过程中, #2 能量桩桩身轴向附加温度应力与温度变化之间关系曲线如图 10 所示。由图 10 可知, 第一次温度循环内测试桩桩身轴向附加温度应力与温度改变之间的相关关系为 $s_T=137\Delta T$; 即温度下降 1°C , 桩身轴向附加拉应力增加 137 kPa。该变化速率小于文献[11]中变化速率 $149\text{ kPa}/^\circ\text{C}$ (最大轴向附加拉应力出现在桩体中部), 大于文献[12]中变化速率 $111\text{ kPa}/^\circ\text{C}$ (最大轴向附加拉应力出现在桩体上部); 这主要是由于桩顶约束条件引起的。第 4 次温度循环内, 桩身轴向附加温度应力与温度改变之间的相关关系系数均有增加, 由于多次温度循环下残余应力的累积。桩体完全约束条件下, 桩身轴向附加拉应力与温度关系表现为 $s_T=300\Delta T$ 。

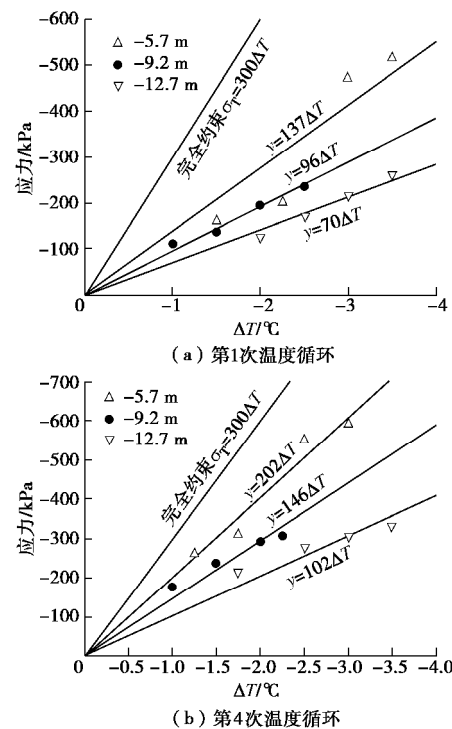


图 10 桩身轴向附加温度应力与温差关系曲线

Fig. 10 Variation of axial thermal stress of pile in response to temperature change

桩身附加温度应力平均值随循环次数变化曲线如图 11 所示。由图 11 可见, 3 处附加温度应力随循环次数增加而增大。第 4 次温度循环能量桩系统停止运行时: 在 -5.7 m 处, 工况 2 和工况 3 该处附加拉应力平均值与工况 1 相比, 分别下降 7.1% 及 21.3%; 在 -9.2 m 处, 工况 2 和工况 3 该处附加拉应力平均值与工况 1 相比, 分别下降 33.3%, 51.9%; 在 -12.7 m 处, 工况 2 和工况 3 该处附加拉应力平均值与工况 1 相比, 分别下降 13.3%, 23.3%。下降比例在 -9.2 m (桩体中部) 处最大, 表明间歇时间长对桩体中部附加应力影响较大。前 4 次循环, 开停 1:1, 1:2, 1:3 循环模式下: 桩身附加温度应力平均值分别为 0.35, 0.28,

0.24 MPa; 桩身最大附加温度应力 (-5.7 m 处) 平均值分别为 0.44, 0.41, 0.37 MPa。

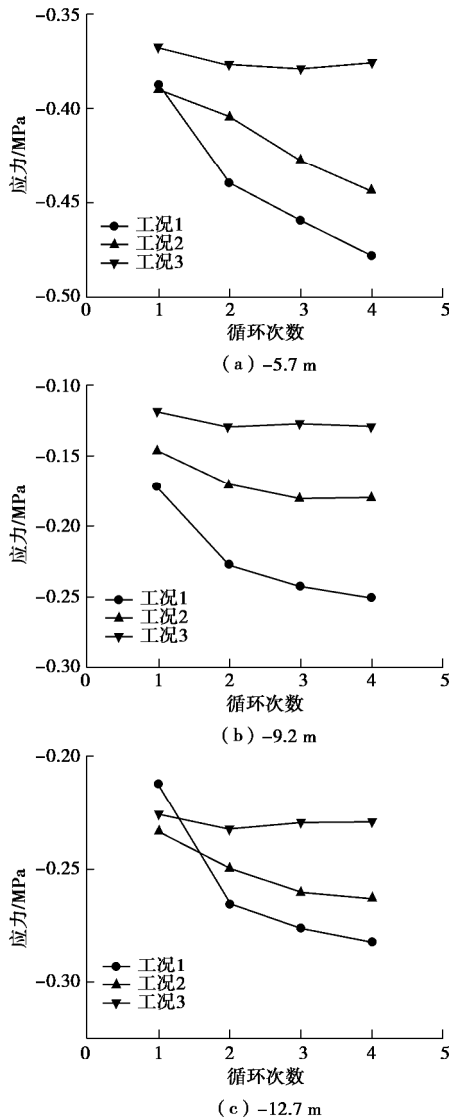


图 11 不同工况下桩身应力平均值分布

Fig. 11 Distribution of additional tensile stress of energy piles under different conditions

2.4 换热性能分析

试验过程中通过入水口与出水口处的温度传感器分别测得进出口水温 t_i 和 t_o , 根据进出口水温和循环液流速等可得出换热功率^[20], 进而计算可得每米单位长度换热量:

$$Q = m_w c_w (t_o - t_i) \quad (3)$$

$$q = Q/L \quad (4)$$

式中 Q 为换热功率 (W); q 为单位长度换热量 (W/m); c_w 为换热液的热容 (J/(kg·K)); m_w 为换热液的质量流速 (kg/s); L 为热交换体长度。

3 种工况下, 每次温度循环内, 每米单位长度换热量随时间推移而降低 (如图 12 所示)。从第二次温度循环开始, 每次循环能量桩运行阶段内, 同一时刻

的瞬时单位长度换热量随开停比值减小而增大。同一工况下, 随着循环次数增加, 单位长度换热量曲线呈现向上偏移的趋势。表明同一工况下, 换热速率随循环次数增加呈现递减趋势, 工况 1 递减趋势相对最明显, 工况 3 递减较慢。与工况 1 循环模式下换热量相比: 第二次循环能量桩系统停止运行时, 工况 2 及工况 3 循环模式下的值分别增长 5.3% 和 10.7%; 第三次循环能量桩系统停止运行时, 工况 2 及工况 3 循环模式下的值分别增长 7.4% 和 13.0%; 第四次循环能量桩系统停止运行时, 工况 2 及工况 3 循环模式下的值分别增长 7.9% 和 15.1%。增长比例随循环次数增加而增大, 且工况 3 循环模式下增长比率始终高于工况 2。

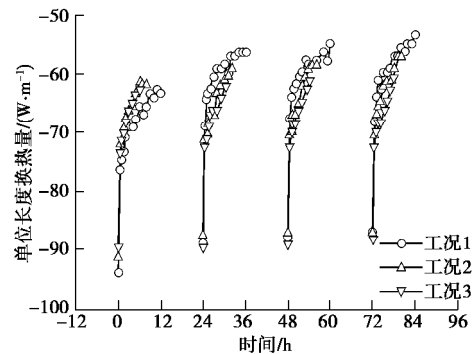


图 12 多次温度循环下单位长度换热量随时间变化曲线
Fig. 12 Curves of heat exchange rate per unit length versus time under multiple temperature cycles

单位长度换热量平均值随循环次数变化曲线如图 13 所示。由图 13 可见, 单位长度换热量平均值随循环次数的增加而递减。原因在于: 微型钢管桩桩径较小, 且导热性能好, 低温能量能迅速传递到桩土接触面, 在每个循环内能量桩运行阶段, 桩体低温能量不断扩散至桩周土体, 但土体回温时间过短, 导致低温能量在桩周土体之间聚集, 桩 - 土温差减小, 桩 - 土换热速率减小。从第二次循环开始, 同一个循环内, 不同工况下, 单位长度换热量平均值随间歇时间的增加而增大。这是由于能量桩间歇阶段, 桩周土体将低温能量不断传递至远处土体, 桩及桩周土体温度逐渐恢复, 随着能量桩停歇时间的逐渐增加, 桩及桩周土体温度恢复也越多, 能量桩再次运行时, 换热效率增大。能量桩运行阶段, 从第二次循环开始, 循环数增加 1, 工况 1、工况 2 及工况 3 循环模式下, 单位长度换热量分别约下降 1.2, 1.0, 0.1 W/m。前四次循环, 工况 1、工况 2 及工况 3 循环模式下每米单位长度换热量平均值分别为 60.2, 64.4, 67.3 W/m, 该值介于不同埋管形式下混凝土灌注能量桩运行一周后的最大换热量与最小换热量之间 (最大值 139.2 W/m, 最小值为 44.6 W/m), 小于单 U 埋管灌注能量桩 (直径 0.61 m) 的换热量 (82.1 W/m)^[8]。

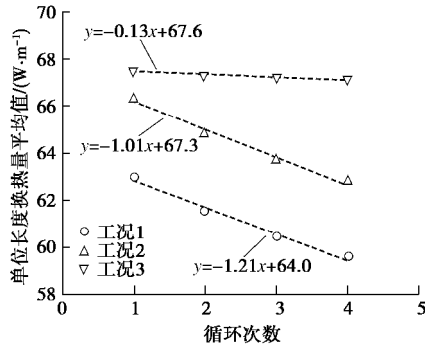


图 13 多次温度循环下单位长度换热量平均值拟合曲线

Fig. 13 Linear fitting between average heat exchange rate per unit length and cycle under multiple temperature cycles

2.5 能量桩 COP 值分析

能量桩性能系数 (COP, coefficient of performance)

计算公式如下:

$$C_{OP} = \frac{Q}{P}, \quad (5)$$

式中, Q 为换热功率 (W), P 为能量桩系统的能耗, 由累计电功率表测得。

不同工况下能量桩的 COP 随时间变化曲线如图 14 所示。由图 14 可见, 每个循环内 COP 值逐渐降低, 且能量桩启动的短时间内下降幅度较大, 而后下降幅度减小。3 种工况下 COP 均逐渐降低, 但 COP 变化幅度不同, 变化幅度最小的是工况 3 运行方案。与第 1 次循环能量桩停止运行时刻的 COP 相比, 在随后 3 次循环: 工况 1 循环模式下, 该值分别下降了 10.98%, 14.51%, 16.26%; 工况 2 循环模式下, 该值分别下降了 3.80%, 7.79%, 8.28%; 工况 3 循环模式下, 该值分别下降了 2.92%, 7.01%, 10.18%。与工况 1 循环下的 COP 相比: 第 2 次循环能量桩停止运行时, 工况 2 与工况 3 循环模式下的 COP 值分别高出 5.45% 和 15.58%; 第 3 次循环能量桩停止运行时, 工况 2 与工况 3 循环模式下的 COP 值分别高出 5.24% 和 15.27%; 第四次循环能量桩停止运行时, 工况 2 与工况 3 循环模式下的 COP 值分别高出 6.87% 和 13.68%。分析表明, 随着间歇时间的增大, 能量桩系统的性能有显著改善。

COP 平均值分布如图 15 所示。由图 15 可见, 工况 2 与工况 3 循环模式下: 第 2 次循环内的 COP 平均值分别比工况 1 循环模式下的值高出 8.38% 和 16.23%; 第 3 次循环内的 COP 平均值分别比工况 1 循环模式下的值高出 5.80% 和 14.99%; 第 4 次循环内的 COP 平均值分别比工况 1 循环模式下的值高出 8.58% 和 15.29%。4 次循环内, 工况 1、工况 2 及工况 3 循环模式下 COP 平均值分别为 1.24, 1.36 及 1.46。能量桩群桩设计时, 可根据工程实际情况选择合理的开停时间 (比如日开启时间为 6~8 h), 以减少残余应力的累积, 增大换热效率, 实现 COP 最大化。

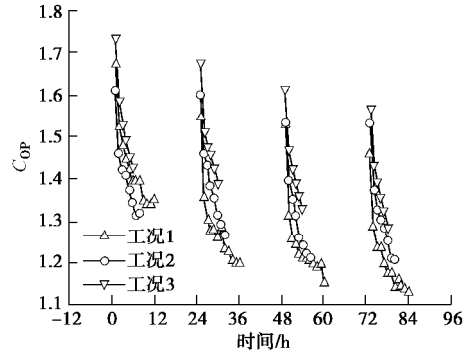


图 14 不同工况下 COP 随时间变化曲线

Fig. 14 Curves of COP versus time under different conditions

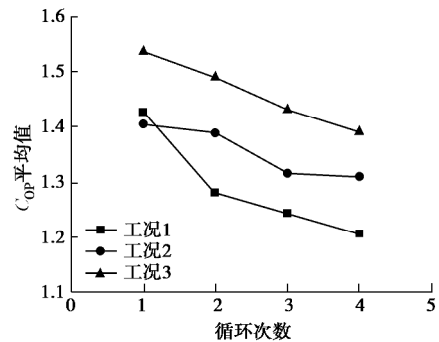


图 15 多次温度循环下 COP 平均值分布

Fig. 15 Distribution of average value of COP under multiple temperature cycles

3 结 论

本文依托微型钢管桩加固既有基础托换工程, 开展了 3 种间歇时长、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, 研究了微型能量桩热力响应及性能系数, 得到以下 4 点结论。

(1) 由于微型钢管桩桩径较小, 换热液携带的低温能量能迅速传递至整个桩体, 导致运行前期桩身温度下降较快, 运行期间桩身温度沿桩身下降较均匀; 间歇期间桩身温度逐渐恢复, 且间歇时间越长, 温度恢复越好。本文试验条件下, 与初始值相比, 第四次循环能量桩停止运行时, 工况 1 循环模式下桩身平均温度下降值为工况 2 及工况 3 循环模式下降值的 2 倍和 16 倍。

(2) 微型钢管能量桩桩身附加温度应力随间歇时间延长而减小, 且间歇时间长短对桩体中部附加应力影响最大; 系统停止运行后, 附加温度应力及桩身应变逐渐消失, 但由于桩身温度未能完全恢复, 会产生残余温度应力, 且间歇时间越长, 残余温度应力越小。距离桩顶 3 m 处桩身附加拉应力与温度改变之间的关系约为 $s_T = 137\Delta T$, 且变化系数随循环次数增加而增大。

(3) 微型钢管能量桩换热效率随循环次数增加而减小, 随间歇时间延长而增大。每次循环后, 工况 1、工况 2 和工况 3 单位长度换热量分别约下降 1.2, 1.0,

0.1 W/m; 4次温度循环内, 工况2及工况3的换热量平均值分别为工况1下的1.07倍和1.12倍。

(4) 微型钢管能量桩性能系数随循环次数增加而减小。4次温度循环内, 工况2及工况3循环模式下 C_{OP} 平均值分别为工况1循环模式的1.1倍和1.2倍; 工况3循环模式下能量桩能够更加稳定、高效地运行。

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*, 2013, **36**(1): 176 - 181. (LIU Han-long, KONG Gang-qiang, NG C W W. Review of the applications of energy pile and development of PCC energy pile technical[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **36**(1): 176 - 181. (in Chinese))
- [3] 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. (in Chinese))
- [4] BOURNE-WEBB P, 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] BOURNE-WEBB P J, AMATYA B, SOGA K. A framework for understanding energy pile behaviour[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering*, 2013, **166**(2): 170 - 177.
- [6] LALOUI L, NUTH M, VULLIET L. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, **30**(8): 763 - 781.
- [7] LALOUI L, DONNA A D. Understanding the thermal-mechanical behaviour of energy piles[J]. *Proceeding of the ICE - Civil Engineering*, 2011, **164**(6): 503 - 519.
- [8] 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.
- [9] MURPHY K D, MCCARTNEY J S. Seasonal response of energy foundations during building operation[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2015, **33**(2): 343 - 356.
- [10] GUO Y M, ZHANG G Z, LIU S Y. Investigation on the thermal response of full-scale PHC energy pile and ground temperature in multi-layer strata[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, **143**: 836 - 848.
- [11] 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 tests on structural responses of energy piles during heat exchanging process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(6): 1087 - 1094. (in Chinese))
- [12] YOU S, CHENG X H, GUO H, et al. Experimental study on structural response of CFG energy piles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **96**: 640 - 651.
- [13] 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 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))
- [14] OLGUN C G, OZUDOGRU T Y, ABDELAZIZ S L, et al. Long-term performance of heat exchanger piles[J]. *Acta Geotechnica*, 2015, **10**(5): 553 - 569.
- [15] WANG C L, LIU H L, KONG G Q, et al. Model tests of energy piles with and without a vertical load[J]. *Journal of Environmental Geotechnics*, 2016, **4**(3): 220 - 220.
- [16] WANG C L, LIU H L, KONG G Q, et al. Different types of energy piles with heating-cooling cycles[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2017, **170**(3): 220 - 231.
- [17] 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.
- [18] FAIZAL M, BOUAZZA A, SINGH R M. An experimental investigation of the influence of intermittent and continuous operating modes on the thermal behaviour of a full scale geothermal energy pile[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2016, **8**: 8 - 29.
- [19] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 2011. (GB 50010—2010 Code for design of concrete structure[S]. 2011. (in Chinese))
- [20] JGJ/T 438—2018 桩基地热能利用技术标准[S]. 2018. (JGJ/T 438—2018 Technical standard for utilization of geothermal energy through piles[S]. 2018. (in Chinese))