

文章编号: 1000-4750(2017)01-0085-07

不同埋管形式下能量桩热力学特性模型试验研究

王成龙^{1,2}, 刘汉龙^{1,2,3}, 孔纲强³, 吴迪^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 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;

3. 河海大学土木与交通学院, 江苏, 南京 210098)

摘 要: 桩埋管式地源热泵(也称能量桩)是一种可以节省地下空间和施工埋管费用的新技术, 目前在国内外得到了一定的应用。然而, 针对其在干砂中的传热特性和力学特性的研究却相对较少。基于模型试验方法, 对不同埋管形式下, 干砂中钢筋混凝土桩的传热特性及其力学特性进行了对比模型试验研究。试验测得桩体、桩周土体的温度变化规律, 桩体应变和桩体热应力的变化规律, 并对比分析了温度影响下基桩的极限承载力。试验研究结果表明, 同样输入功率条件下, 不同埋管形式相比, W型和螺旋型桩的应力变化和桩顶沉降量均较单U型桩要大。

关键词: 能量桩; 埋管形式; 模型试验; 热力学特性; 极限承载力

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.05.0455

MODEL TESTS ON THERMAL MECHANICAL BEHAVIOR OF ENERGY PILES INFLUENCED WITH HEAT EXCHANGERS TYPES

WANG Cheng-long^{1,2}, LIU Han-long^{1,2}, KONG Gang-qiang³, WU Di^{1,2}

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

2. Key Lab of Chinese Education Ministry For Construction and New Technology of Mountain Cities, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. College of Civil and Transportation Engineering Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Pile geothermal heat pump system (also called energy pile) is a new heat pump system that can save underground space and construction cost, which to date has been used at home and abroad. However, the studies focusing on the heat transfer efficiency and mechanical characteristics of piles in dry sand are still limited. Based on the model test, the heat transfer performance and mechanical characteristics of different heat exchange concrete piles in dry sand are investigated. The temperature of pile and soil around pile, the thermal strain and thermal stress of the piles induced by temperature variation are measured. Moreover, the ultimate bearing capacity of the piles associated with different temperatures is analyzed. The results show that, for different types of heat exchangers under the same power of pump, the strain variation and pile head settlement of the W-shaped and S-shaped piles are more significant than that of the single U-shaped pile.

Key words: energy pile; heat exchangers types; model test; thermal mechanical behavior; ultimate bearing capacity

能量桩技术是一种新型地埋管换热技术, 通过在桩基中埋设热交换管, 实现与土体热交换, 获取低温位地热能, 从而减少了对传统能源的消耗。该技

术相比于传统地源热泵技术可以减少钻孔费用, 节约土地。并且由于混凝土较高的热传导性, 以及和土体较大的接触面积, 增加了桩基的换热性能。显

收稿日期: 2015-05-26; 修改日期: 2015-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378178); 教育部博士点联合基金项目(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(0902071812401); 重庆大学2015年研究生科研创新项目基金项目

通讯作者: 王成龙(1989—), 男, 河南人, 博士生, 主要从事岩土工程方面的研究(E-mail: wangchlong586@163.com).

作者简介: 刘汉龙(1964—), 男, 江苏人, 长江学者特聘教授, 博士, 博导, 主要从事岩土工程方面的教学与科研(E-mail: hliuhhu@163.com);

孔纲强(1982—), 男, 浙江人, 教授, 博士, 博导, 主要从事桩-土相互作用方面的教学与研究(E-mail: gqkong1@163.com);

吴迪(1990—), 男, 山东人, 博士生, 主要从事能量桩桩-土相互作用方面的研究(E-mail: wudi2009814@163.com).

示了能量桩广阔的利用前景。

由于热能的传递,会引起土体内部温度场的变化,改变桩周土体性质,桩身混凝土也会产生附加应力,并且应力场和位移场会随着温度场的改变而改变,是一个复杂的热力学过程。因此对能量桩的研究与利用正在成为各国研究的热点问题之一。

陈忠购等^[1]和赵嵩颖等^[2]对不同埋管形式的能量桩进行了换热性能方面的研究。刘汉龙等^[3]提出了一种新型 PCC 能量桩,分析了热荷载可能引起的热力学效应。桂树强等^[4-5]对能量桩和钻孔埋管换热器换热性能进行了对比,研究了能量桩在换热方面的优越性,并通过现场试验对能量桩的热力效应进行了研究。Gao^[6]、Jung^[7]、Li^[8]、Yi^[9]等通过现场试验和数值模拟对不同埋管形式能量桩的传热特性进行了研究。McCartney^[10]、Yavari^[11]、Ng^[12]、黄旭^[13]等通过离心机模型试验和室内模型试验对单 U 型桩体的热力学效应进行了研究,并做了进一步分析,Brandl^[14]、Laloui^[15]、Bourne-Webb^[16]和 Wang^[17]、Akrouch^[18]、Murphy^[19]等对热交换桩进行了常规现场试验,研究了桩体内部应力,桩周侧摩阻力的分布规律。Knellwolf^[20]、Bourne-Webb^[21]、Mimouni^[22]等对桩体进行了模型简化,对桩体的热力学效应进行了理论分析。

然而目前对能量桩热力学效应的研究仍然较少。并且对于不同埋管形式桩体,由于传热量的差别,各埋管形式的桩体的力学效应也各不相同。但是目前对不同埋管形式桩体的对比研究过多局限于传热效率方面,对桩体的力学效应以及桩体沉降等对桩体安全因素的对比研究相对较少。而这往往是桩体在实际应用过程中特别应该注意的问题。本文通过模型槽实验,模拟不同埋管形式桩体的热力学效应,以及桩周土的温度变化,并对其作进一步的分析,为能量桩的实际应用与推广提供必要的设计依据。

1 模型试验概况

1.1 桩周土体参数

本试验选用砂土为南京地区砂,天然砂密度为 1.26 g/cm^3 ,天然砂含水率为 10.94% ,最大干密度为 1.77 g/cm^3 ,最小干密度为 1.40 g/cm^3 ,砂土内摩擦角为 $30.1^\circ \sim 32.2^\circ$ 。砂土不均匀系数 $C_u = 2.69$,曲率系数 $C_c = 0.97$,颗粒级配曲线如图 1。试验之前通过晒砂来制取干砂,并测得含水率仅为 0.3% ,该模

型槽底部用 $350 \text{ mm}(3.5D)$ 高的砂土做基础。

本试验砂土为干砂,通过人工夯实法来控制其相对密实度,填砂时每 350 mm 夯实一次,夯实 10 遍。最终所测得砂土相对密实度为 $75\% \sim 80\%$ 。

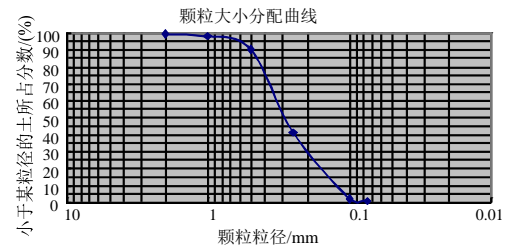


图 1 砂土颗粒级配图

Fig.1 Sand grain composition

1.2 模型能量桩及其布置

本试验对 3 种不同埋管形式的模型桩进行了研究,模型桩由 C30 混凝土浇筑而成,配合比为水:水泥:砂:碎石= $0.44:1:1.79:3$,测得其抗压强度标准值为 30.9 MPa ,弹性模量和热膨胀系数参照 C30 混凝土来取,弹性模量 $E = 3.09 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,热膨胀系数 $\alpha_c = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。桩体直径 104 mm ,桩长 1600 mm ,模型桩与现场试验桩尺寸比例为 $1:20$,桩体在模型槽中的有效长度为 $L = 1400 \text{ mm}$,3 种不同埋管形式桩体分别为单 U 型、W 型、螺旋型,桩体传热管外径为 11 mm ,内径为 8 mm 。3 根桩体中分别布置了 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 mm 、 850 mm 、 1260 mm ,温度传感器距桩顶的距离分别为 440 mm 、 850 mm 、 1260 mm ,3 种不同埋管形式的桩体的内部布置如图 2 所示。

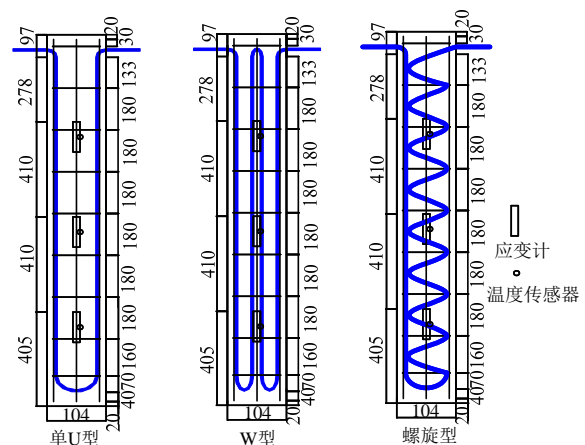


图 2 不同埋管形式的桩体及布置图

Fig.2 Different heat transfer tubes of instrumented model piles

本试验模型槽尺寸为 $3 \text{ m}(\text{长}) \times 2 \text{ m}(\text{宽}) \times$

1.75 m(高), 模型槽平面布置如图 3(a)。模型槽壁与桩中心的距离大于 $6D$ (D 为桩径), 距离较远, 因此可忽略边界效应。

模型槽中分别放置有土压力盒与温度传感器, 土压力盒分别位于桩体底部, 土压力盒直径为 95 mm。在离土体表面 240 mm、650 mm、1060 mm 的三层土体中, 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。模型试验立面布置示意图如图 3(b)所示。

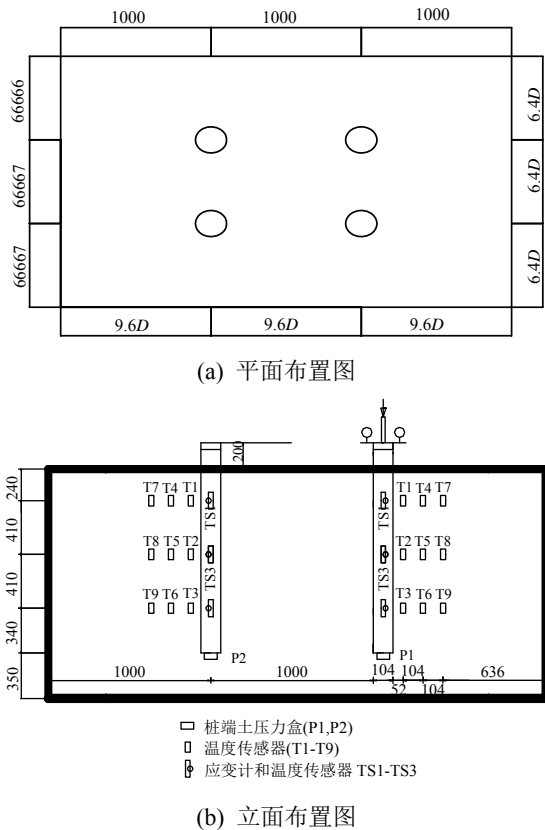


图 3 试验布置示意图 /mm

Fig.3 Schematic diagram of model test arrangement

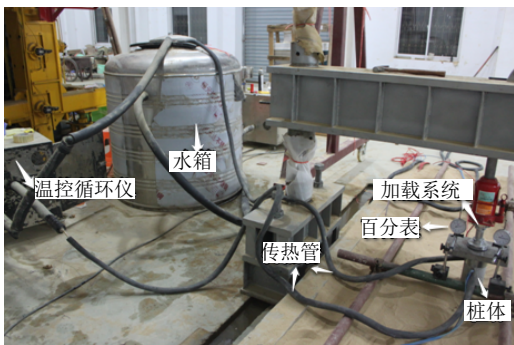


图 4 热、力加载系统布置实物图

Fig.4 Physical diagram of thermal and static load system layout

1.3 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, 温度控制为 5°C 、 35°C 、 57°C 。本试验在密闭实验室中进行, 室温 20°C 左右, 昼夜温差不超过 2°C 。同一功率下, 不同埋管形式和不同温度下流量略有差别, 加热时(57°C), 单 U 型、W 型、螺旋型流量分别为 3.20 L/min 、 3.08 L/min 、 3.11 L/min , 制冷时(5°C), 单 U 型、W 型、螺旋型流量分别为 3.02 L/min 、 2.78 L/min 、 2.88 L/min 。

试验分为两个过程, 第一个过程研究不同埋管形式的桩体在冷热循环过程中的热力学效应及其差别。具体过程如下: 先对每根桩施加热荷载, 即桩体中通 57°C 的热水, 待桩体沉降稳定后, 将桩体自然冷却 15 h , 之后通 5°C 的冷水, 给桩体施加冷荷载, 待桩体沉降稳定后, 停止通水, 自然恢复 10 h 。

第二个过程来研究不同水温下桩体极限承载力的差别。具体过程如下, 分别给三根桩通 5°C 、 35°C 、 57°C 水温的水, 直到桩体温度基本稳定, 之后用加载系统对桩体进行分级加载, 每 2 kN 加载一次, 时间间隔 15 min , 直到桩体发生破坏。热、力加载系统布置实物图如图 4 所示。

2 试验结果与分析

2.1 桩体温度与土体温度变化规律

选取距土体表面 650 mm 高度处的桩身温度和土体温度进行研究。在桩体中通 57°C 的热水后, 桩身和土体温度随时间逐渐增大, 如图 5 所示, 其中桩身温度变化最快, 离桩中心 1 倍桩径处土体温度变化也较快, 而 2 倍桩径处的土体温度基本无变化。在桩体温度基本稳定后, W 型桩体温度最高为 44.2°C , 螺旋型为 37.1°C , 单 U 型为 34.5°C , T2 所测 1 倍桩径土体处温度分别为 30.2°C (W 型)、 26.5°C (螺旋型)、 25.7°C (单 U 型)显示出不同埋管形式桩体的热交换能力的差别, W 型最大, 之后依次为螺旋形、单 U 型。而 T5 所测 2 倍桩径处土体温度分别为 22.1°C 、 21.9°C 、 21.8°C 。温度差别不大, 相较于初始温度也基本无变化。

自然恢复 15 h 后, 制冷开始前由于桩身和 1 倍桩径土体温度还未完全恢复, 故温度比 2 倍桩径处土体温度略高。在桩体中通 5°C 的冷水后, 桩身和土体温度随时间逐渐减小, 如图 6 所示, 其中桩身温度变化很明显, 离桩中心 1 倍桩径的土体温度变

化也较明显，而 2 倍桩径的土体温度基本无变化。温度稳定时，桩体温度分别为 12.2℃(W 型)、14.8℃(螺旋型)、16.9℃(单 U 型)，T2 所测 1 倍桩径处土体温度分别为 19.31℃(W 型)、20.81℃(螺旋型)、21.31℃(单 U 型)。由此可见，制冷时 W 型埋管形式桩体和 1 倍桩径土体温度变化最为明显，之后依次为螺旋形、单 U 型。而 2 倍桩径处土体的温度基本无变化。

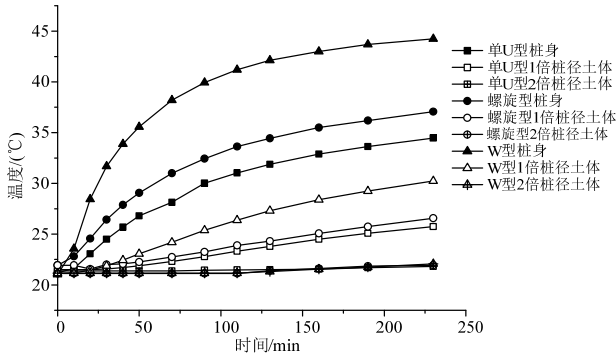


图 5 加热时桩身和土体温度随时间的变化

Fig.5 Temperature of pile body and soil over time when heating

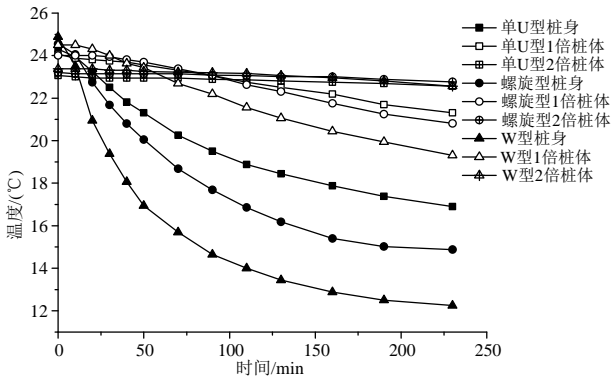


图 6 制冷时桩身和土体温度随时间的变化

Fig.6 Temperature of pile body and soil over time when cooling

2.2 桩端阻力变化规律

在施加热荷载时桩体受热膨胀，由于土体的约束，会增大对土体的压力。图 7 所示为加热时桩端土体压力随时间的变化规律，在施加热荷载的前 100 min，各埋管形式桩体的桩端土压力变化较快，之后逐渐趋于稳定，由于换热量的差别，桩端土压力大小也各不相同。稳定时 W 型埋管形式变化最大为 86.7 kPa，单 U 型变化最小为 55.9 kPa。

在施加冷荷载时桩体受冷收缩，会减少对底部土体的压力。图 8 所示为桩端土体压力的减小值，施加冷荷载时，随着时间进行，桩体温度逐渐减小，各埋管形式桩体的桩端土压力也逐渐减小，但变化

值较小，随着桩体温度的稳定，土压力也趋于稳定。但不同埋管形式桩体的桩端土压力减少大小各不相同，其中 W 型变化-2.4 kPa，螺旋型变化-2.0 kPa，单 U 型变化-1.9 kPa。

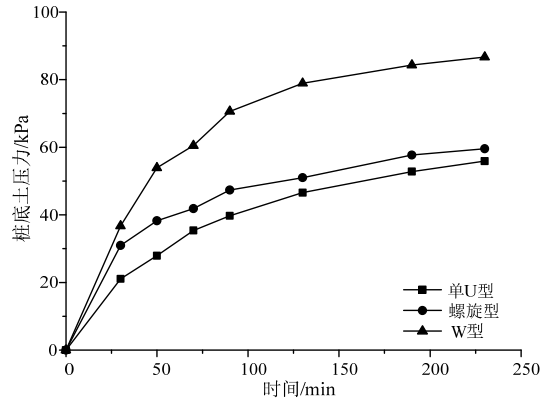


图 7 加热时桩端土体压力变化

Fig.7 Soil pressure of pile bottom when heating

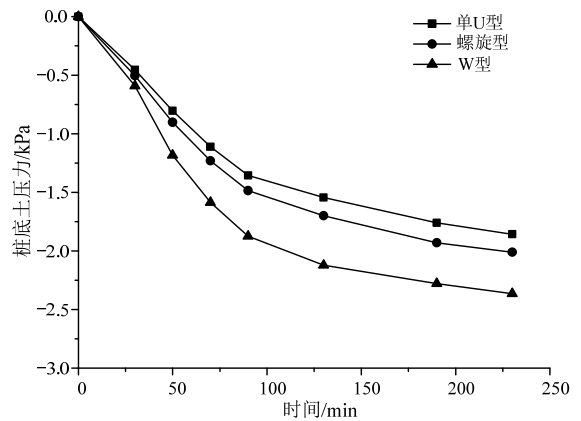


图 8 制冷时桩端土体压力变化

Fig.8 Soil pressure of pile bottom when cooling

2.2 桩体应变和应力变化规律

桩体在受热和受冷时会产生膨胀和收缩，引起桩体热应变的变化，桩体自由膨胀和收缩时其热应变变化值为 $\epsilon_{T,free}$ ：

$$\epsilon_{T,free} = \alpha_c \Delta T \tag{1}$$

其中： α_c 为热膨胀系数； ΔT 为温度变化值。定义正值为加热时产生的热应变，负值为制冷时产生的热应变。由于桩体在土体中受到土体的约束，其热应变小于自由热应变，如图 9 所示为桩体实际热应变，埋深 Z 即为距土体表面深度， $Z/L=0$ 处即为土体表面。土体表面处桩体热应变可通过 TS1 处所测得应变线性分析得到。由于桩顶无荷载约束，在加热和制冷时其热应变也最大。而在桩体下半部分由于桩侧和桩底土体的约束热应变较小。在 $Z/L=0.46$ 处，加热时不同埋管形式桩体的热应变分别为

203.4 $\mu\epsilon$ (W型)、133 $\mu\epsilon$ (螺旋型)、119 $\mu\epsilon$ (单U型), 制冷时热应变分别为-111.9 $\mu\epsilon$ (W型)、-82 $\mu\epsilon$ (螺旋型)、-66.1 $\mu\epsilon$ (单U型), 在加热和制冷时 W 型埋管形式桩体的热应变变化最大, 而单 U 型最小, 反映了不同传热量引起的桩体应变的差别。

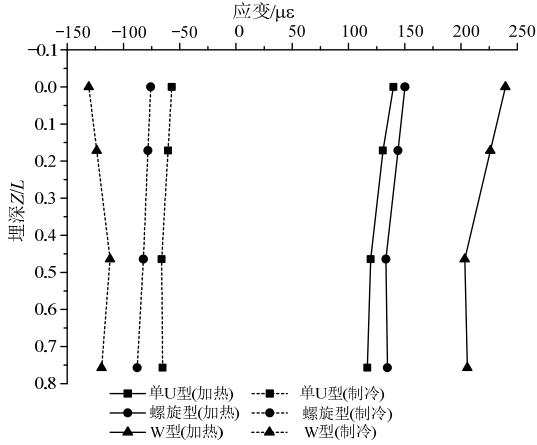


图 9 冷热荷载作用下不同埋管形式桩体的应变变化
Fig.9 Axial strain of different piles when heating and cooling

由于桩体的自由膨胀和收缩受到约束, 桩体的实际应变小于其自由应变, 因此桩体内部会产生热应力 σ_T :

$$\sigma_T = E(\epsilon_T - \alpha_c \Delta T) \quad (2)$$

其中: E 为混凝土弹性模量; ϵ_T 为热应变。定义压应力为负, 拉应力为正值。

图 10 即为按照式(2)求得的桩体内部应力变化规律。由于桩顶无荷载故在土体表明处热应力近似取为 0。各桩体加热时产生压应力, 制冷时产生拉应力, 并且在桩体中部产生的内应力最大。在桩体上部又无外加荷载, 因此在上部和底部桩体所受约束较小, 自由膨胀和收缩较大, 而在桩体中部砂土对桩体产生了较大的约束作用, 因此其中部产生的内应力最大。这与 Bourne-Webb 理论模型^[21]趋势一致。由于混凝土抗压强度较大, 抗拉强度较小^[23], 因此在降温时, 桩体内部产生的拉应力对桩体的危害性较大。

对于不同埋管形式的桩体, 在 $Z/L=0.46$ 处产生的热应力最大, 加热时 W 型埋管形式桩体为 -864 kPa, 是螺旋型的 1.6 倍, 单 U 型的 2.4 倍, 制冷时 W 型埋管形式桩体为 432 kPa, 分别为螺旋型和单 U 型的 1.3 倍和 1.8 倍。可见不同埋管形式桩体内部热应力等额差别。内应力大小的差别尤其是拉应力的大小差别, 对结构物的安全性影响比较大, 因此 W 型埋管形式的桩体对建筑物的安全性

影响最大。

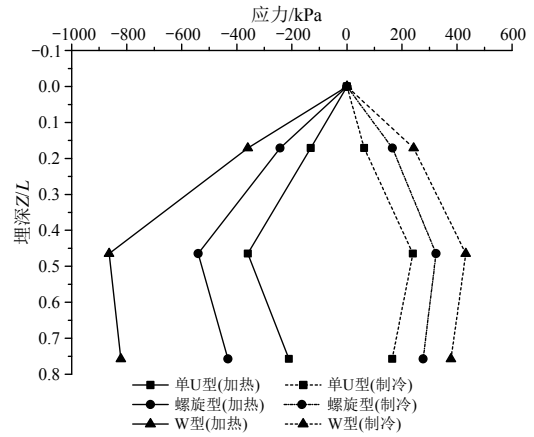


图 10 冷热荷载作用下不同埋管形式桩体的应力变化
Fig.10 Axial stress of different piles when heating and cooling

图 11 所示为桩体侧摩阻力的变化规律, 加热时上部产生负的侧摩阻力, 下部产生正的侧摩阻力, 这是由于桩体膨胀中心点上部分向上膨胀受到土体向下的约束, 以及以下部分向下膨胀受到土体向上的约束引起的。在制冷时其侧摩阻力方向与加热时刚好相反, 体现了土体对桩体相对位移的约束。并且由于换热量的差别, 在加热和制冷时 W 型桩体周围侧摩阻力变化较大。单 U 型最小。图中还可得到桩体侧摩阻力为 0 的位置(及膨胀中心点)更接近与桩体下半部分, 这是由于桩体上部无荷载, 接近自由膨胀, 而桩体下部仍受到土体的约束引起的。

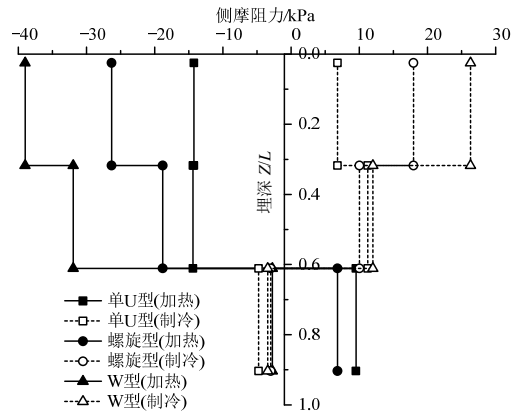


图 11 冷热荷载作用下桩体侧摩阻力变化
Fig.11 Mobilized side shear stress of different piles when heating and cooling

2.4 桩顶位移变化规律

图 12 所示加热制冷过程中桩顶位移随时间的变化规律, 加热时桩体由于膨胀而上升, 而制冷时桩体由于收缩而下沉, 因此在现场试验桩中施加热

荷载可以减少桩体沉降，在制冷时会进一步加剧桩体沉降。

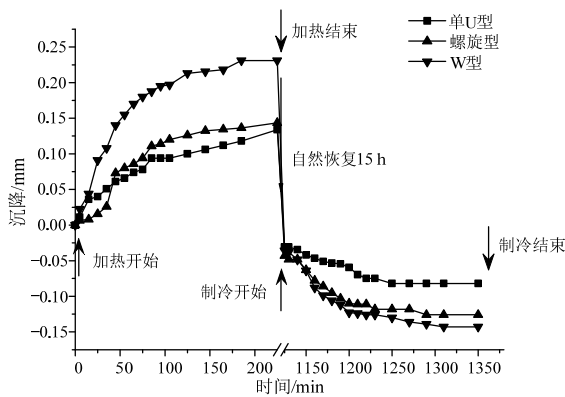


图 12 冷热荷载作用下桩顶位移随时间变化曲线

Fig.12 Displacement at pile top over time when heating and cooling

加热时由于桩体的横向膨胀，可以增大水平向土压力，有利于增强桩体的侧摩阻力，增加桩体承载力，而在制冷时由于桩体的横向收缩，桩土间的水平土压力减少，侧摩阻力减少，桩体的承载力降低，在现场实际桩体应用过程中容易对建筑物造成安全隐^[24-25]。

对于不同埋管形式的桩体在受到冷热荷载作用时，引起桩顶位移有较大差别，在施加热荷载桩体沉降稳定后，测得 W 型桩体的桩顶位移变化为 0.231 mm，变化大约为单 U 型的 1.8 倍，螺旋型的 1.6 倍。在施加冷荷载后位移变化分别为 -0.143 mm(W 型)、-0.126 mm(螺旋型)、-0.082 mm(单 U 型)，可见 W 型埋管形式桩体位移变化最大。而桩体位移尤其是沉降位移是影响结构安全的重要因素，因此应重视桩体位移的变化。

2.5 桩顶荷载位移关系曲线

如图 13 所示，研究了不同热荷载作用下桩体

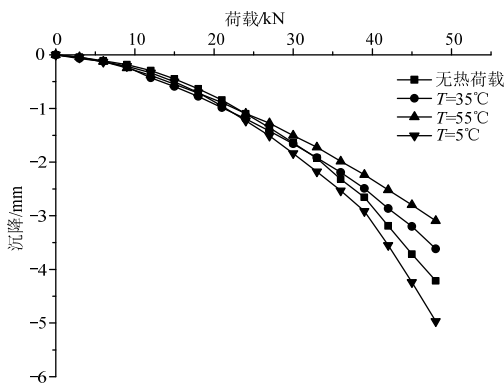


图 13 不同温度作用下桩顶荷载位移曲线

Fig.13 Load-displacement curves of pile top under different temperatures

的极限承载力。不同热荷载作用下，待桩体温度稳定之后，分级加载，如图所示，在荷载较小时，相同荷载作用下桩体位移基本一致，荷载较大时，温度越高，桩体的沉降越小，其极限承载力也越高，但差别不大。尽管 Olgun 等^[26]的研究表明，砂土中温度对极限承载力的影响不大，但是在 Kramer 等^[27]的试验中观察到承载力的提高，因此在后续工作中，会加强温度对桩体承载力影响的研究。

3 结论

本文对干砂中不同埋管形式桩体在无外力荷载作用下的热力学作用进行了研究，可以得到如下几点结论：

(1) 在干砂中，受冷热荷载作用，不同埋管形式的桩体桩身温度有较大差异，加热时 W 型埋管形式桩身温度变化最大为 23.22℃，为单 U 型的 1.74 倍，螺旋型的 1.53 倍，制冷时 W 型埋管形式桩身温度变化分别为单 U 型和螺旋型的 1.66 倍和 1.27 倍。在 1 倍桩径处土体处，W 型桩周土温度变化最大为 9.12℃，单 U 型变化最小为 4.25℃。三种埋管形式桩体在 2 倍桩径土体处温度变化均较小，较为一致。

(2) 冷热荷载会引起桩体热应变的变化，由于换热量的差别，W 型埋管形式桩体应变变化最大，加热和制冷时应变值分别为 203.4 με、-111.9 με，而单 U 型桩体变化最小，加热和制冷时分别为 114 με、-62.6 με。由于土体约束桩体内部会产生热应力，加热时 W 型埋管形式桩体螺旋型的 1.6 倍，单 U 型的 2.4 倍，制冷时分别为螺旋型和单 U 型的 1.3 倍和 1.8 倍。加热桩体上部产生向下的侧摩阻力，下部产生向上的侧摩阻力，而制冷时则相反。

(3) 在加热时 W 型埋管形式的桩顶位移上升 0.231 mm，为单 U 型的 1.8 倍，螺旋形的 1.6 倍。而在制冷时 W 型埋管形式的桩体位移变化也最明显，沉降位移为 -0.143 mm，单 U 型变化最小为 -0.082 mm，而桩体下沉不利于建筑物的结构安全，因此制冷时的桩体位移变化应引起重视。

(4) 不同温度下桩体的极限承载力略有差别，随着温度的升高，极限承载力略有增大。

参考文献：

[1] 陈忠购, 赵石娆, 张正威. 内置 U 形埋管能量桩换热性能研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 238-243.
 Chen Zhonggou, Zhao Shirao, Zhang Zhengwei. Heat transfer analysis of energy piles with parallel connected U-tubes [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 238-

243. (in Chinese)
- [2] 赵嵩颖, 张柏林, 刘奕彤, 付言. 能量桩换热管不同埋设方式储热模拟研究[J]. 建筑节能, 2013, 40(11): 66—67.
Zhao Songying, Zhang Bolin, Liu Yitong, Fu Yan. Thermal store simulation of heat exchange tube in energy pile with various embedded manners [J]. Building Energy Efficiency, 2013, 40(11): 66—67. (in Chinese)
- [3] 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 Hanlong, Kong Gangqiang, Ng C W W. 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. (in Chinese)
- [4] 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 Shuqiang, Cheng Xiaohui, Zhang Zhipeng. Comparative analysis of heat exchange performance of energy piles and borehole heat exchangers in GSHP system [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2013, 35(3): 151—156. (in Chinese)
- [5] 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 Test for structural responses of energy pile to heat exchanging process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1087—1094. (in Chinese)
- [6] Gao J, Zhang X, Liu J, et al. Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: an application [J]. Applied Energy, 2008, 85(10): 901—910.
- [7] Jung K, Chun B, Park S, et al. Test Construction of Cast-in-Place concrete energy pile in dredged and reclaimed ground [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 29(1): 04014035.
- [8] Li M, Lai A C. New temperature response functions (G functions) for pile and borehole ground heat exchangers based on composite-medium line-source theory [J]. Energy, 2012, 38(1): 255—263.
- [9] Yi M, Yang H, Fang Z, et al. Analytical thermal analysis of novel foundation pile ground heat exchanger with spiral coils [C]. Berlin Heidelberg: Springer, 2014: 653—663.
- [10] McCartney J S, Rosenberg J E, Sultanova A. Engineering performance of thermo-active foundations [C]. GeoTrends: the Progress of Geological and Geotechnical Engineering in Colorado at the Cusp of a New Decade (GPP 6), 2010: 27—42.
- [11] Yavari N, Tang A M, Pereira J M, et al. Experimental study on the mechanical behavior 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(4): 310—316.
- [13] 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 Gangqiang, Liu Hanlong, 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. (in Chinese)
- [14] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81—122.
- [15] Laloui 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.
- [16] 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.
- [17] Wang B, Bouazza A, Singh R M, et al. Post temperature effects on shaft capacity of a full-scale geothermal energy pile [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 141(4): 04014125.
- [18] Akrouch G A, Sánchez M, Briaud J L. Thermo-mechanical behavior of energy piles in high plasticity clays [J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(3): 399—412.
- [19] 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.
- [20] Knellwolf C, Peron H, Laloui L. Geotechnical analysis of heat exchanger piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(10): 890—902.
- [21] Bourne-Webb P J, Amatya B, and Soga K. A framework for understanding energy pile behavior. Proceedings of the Institution of Civil Engineers [J]. Geotechnical Engineering, 2012, 166(2): 170—177.
- [22] Mimouni T, Laloui L. Towards a secure basis for the design of geothermal piles [J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(3): 355—366.
- [23] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
GB 50010-2010, Code for design of concrete structure [S]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [24] McCartney J S, Rosenberg J E. Impact of heat exchange on side shear in thermo-active foundations [J]. Geo-Frontiers, 2011: 488—498.
- [25] Rosenberg J E. Centrifuge modeling of soil-structure interaction in thermo-active foundations [D]. Ann Arbor: University of Colorado At Boulder, 2010.
- [26] Olgun C G, Ozudogru T, Arson C F. Thermo-mechanical radial expansion of heat exchanger piles and possible effects on contact pressures at pile-soil interface [J]. Géotechnique Letters, 2014, 4: 170—178.
- [27] Kramer C A, Basu P. Performance of a model geothermal pile in sand [C]// Perth, Australia, Jan: Proceedings of 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, 2014: 14—17.