

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.02.004

# 预埋与绑扎埋管形式能量桩传热特性研究

刘汉龙<sup>1,2,3</sup>, 吴迪<sup>1,2</sup>, 孔纲强<sup>2,3</sup>, 王成龙<sup>1,2</sup>, 吴宏伟<sup>4</sup>

(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; 4. 香港科技大学 土木与环境工程系, 香港)

**摘 要:** 预埋钢管能量桩是一种新型埋管形式的地源热泵技术, 然而, 针对其特殊埋管形式下传热特性的研究却相对较少。针对预埋钢管单 U 型埋管能量桩的传热管-钢管-混凝土-桩周土的传热特性开展模型试验和数值模拟研究, 测得在热-冷循环温度荷载作用下预埋钢管单 U 型埋管能量桩桩体及桩周土体的温度变化规律; 为了对比分析, 同时开展了传统绑扎单 U 型埋管能量桩的传热特性模型试验, 并分析了预埋钢管能量桩的适用性。研究结果表明, 预埋钢管能量桩的传热性能略低于绑扎埋管能量桩的传热性能; 夏季工况两种埋管形式能量桩桩体温度和桩周土体温度最终变化量分别相差 23% 和 16% 左右; 冬季工况该数值约为 14% 和 18% 左右。

**关键词:** 能量桩; 埋管形式; 传热特性; 模型试验; COMSOL 软件

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)02-0333-08

## Thermal response of energy piles with embedded tube and tied tube

LIU Han-long<sup>1,2,3</sup>, WU Di<sup>1,2</sup>, KONG Gang-qiang<sup>2,3</sup>, WANG Cheng-long<sup>1,2</sup>, CHARLES W W Ng<sup>4</sup>

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

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

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

4. Civil Engineering Department, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

**Abstract:** The energy pile with embedded steel tube is a new type of ground source heat pump (GSHP) technique in the form of pipe-coupled pile. However, there are few studies focused on thermal response of this new pipe form. Experimental test and numerical simulation were conducted to study the heat transfer from tube to steel tube, to concrete, and to soil of energy piles with single U-shaped embedded steel tube. Temperature variations of surrounding soil and pile shaft under temperature loading of heating-cooling cyclic were measured. The thermal response of the ordinary single U-shaped heat exchanger energy pile with tied tube was also tested for comparative analysis. Finally, the applicability of energy pile with embedded steel tube was analyzed. The results show that the thermal response of energy pile with embedded steel tube is slightly lower than that of energy pile with tied tube. The final temperature of surrounding soil and pile shaft of two types of energy pile varies 23% and 16% in summer, and 14% and 18% in winter.

**Keywords:** energy pile; tube buried type; thermal response; model test; COMSOL software

## 1 引 言

能量桩是在传统的混凝土桩基础内部埋入通水的传热管道<sup>[1]</sup>。传统的能量桩埋管形式有单 U 型、串联双 U 型 (W 型)、并联双 U 型、并联三 U 型和单螺旋形等<sup>[2]</sup>。在能量桩施工过程中, 需要先将传热管道绑扎在钢筋笼上, 随后与钢筋笼一起浇筑到

混凝土内部, 在浇筑混凝土时, 传热管道的存在会使得混凝土振捣不密实, 传热管道与钢筋之间易留空隙, 从而造成钢筋锈蚀, 在混凝土振捣时还会对传热管道造成损伤, 这些都会影响能量桩的施工质量。

能量桩传热性能的好坏直接决定其能不能大规模地推广应用, 针对其传热性能, 国内外的学者

收稿日期: 2015-04-09

基金项目: 重庆市研究生科研创新项目资助 (No. CYB16013); 国家自然科学基金项目 (No. 51378178, No. 51306080); 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室开放基金 (No. 0902071812401)。

This work was supported by the Graduate Scientific Research and Innovation Foundation of Chongqing of China (CYB16013), the National Natural Science Foundation of China (51378178, 51306080) and the Foundation of Key Laboratory of Mountainous Town Construction and New Technology of the Ministry of Education (0902071812401).

第一作者简介: 刘汉龙, 男, 1964 年生, 博士, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学和科研。E-mail: hliuhhu@163.com

开展了一系列的研究: 桂树强等<sup>[3]</sup>通过原位试验研究了在保持桩顶荷载条件下, 能源桩换热过程中的结构响应, 研究表明, 当对桩体施加温度荷载后, 桩体中会产生不可忽略的附加温度荷载, 其大小受桩端约束的影响。Li 等<sup>[4]</sup>通过原位试验对比了 U 型换热管数量和桩身材料等对能量桩传热性能的影响, 研究表明, 当钻孔回填材料为混凝土时, 能量桩的传热效率比钻孔回填材料为砂岩时高, 单 U 型埋管换热器的传热效率远不如双 U 型埋管换热器。Murphy 等<sup>[5-6]</sup>通过原位试验对不同数量和不同连接方式 U 型管能量桩的传热性能进行了研究, 得到了桩体温度分布和桩侧土体的温度分布, 并进一步分析了能量桩和热泵之间水平连接管路的长度对能量桩传热性能的影响。黄旭等<sup>[7]</sup>将能量桩与 PCC 桩结合起来, 研究了循环温度场作用下 PCC 能量桩热力学特性。考虑到试验方法花费较大以及周期较长等问题, 越来越多的学者采用数值方法对能量桩展开研究<sup>[8]</sup>。Gao 等<sup>[9-10]</sup>将原位试验的方法与数值方法进行了对比, 研究了不同埋管形式、不同循环水速和不同入口水温对能量桩传热性能的影响, 并利用数值模型进一步模拟了能量桩长时间的温度循环过程。Ozudogru 等<sup>[11]</sup>介绍了测试场地传热系数和热容的试验方法, 分析了该试验方法存在的问题, 利用数值方法解决了试验方法在场地传热系数和热容测试中存在的问题。

由上述分析可知, 目前针对能量桩传热性能的研究成果大多针对传统埋管形式的能量桩, 而传统的埋管方法存在一些问题。针对传统埋管方法存在的问题, 相关研究人员提出了由预埋钢管替代传统的实心钢筋作为钢筋笼主筋的一种新的施工方法, 该方法先把钢管预埋在混凝土内, 然后将传热管道埋设在预埋钢管内(如图 1 所示), 能够很好地解决传统埋管方法存在的问题, 为能量桩的施工以及提高能量桩的承载性能带来了极大的便利<sup>[12-13]</sup>。本文利用模型槽试验并结合数值模拟的研究方法, 对预埋钢管单 U 型埋管能量桩的传热性能进行了研究, 分析了其夏季、冬季两种工况桩体及桩周土体温度场的变化, 通过把传统绑扎单 U 型埋管能量桩与预埋钢管单 U 型埋管能量桩进行对比, 分析了预埋钢管能量桩的适用性, 为预埋钢管能量桩大规模地推广和应用提供参考依据。

## 2 模型试验概况

### 2.1 试验方案设计及参数选择

本文模型试验模型槽尺寸为 3 m (长) × 2 m

(宽) × 1.75 m (高), 其中地上部分高 0.25 m, 地下部分深 1.5 m, 模型槽实物图如图 2 所示。温度循环系统共包括温控循环仪、保温水箱、制冷机和流速控制箱 4 个部分。其中保温箱内部带有加热器, 该加热器由温控循环仪控制, 水箱内水温由温控循环仪进、出口水温读出, 当温控循环仪进口水温达到预定循环水温时, 温控循环仪自动切断加热器, 当其低于预定循环水温时, 温控循环仪开启加热器; 制冷机内部带有温度感应器, 当循环水温降到预定温度时, 其自动停止工作; 能量桩循环水速通过调节流速控制箱里面水泵的转速来控制, 温度循环系统的实物图如图 2 所示。

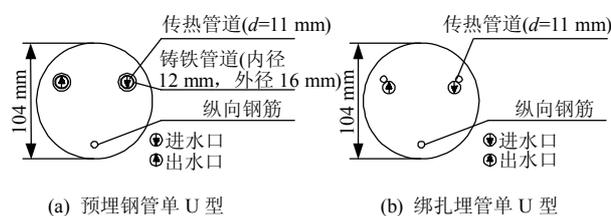


图 1 两种桩型截面示意图

Fig.1 Cross-section diagrams of two types of energy pile



图 2 模型槽及温度循环系统实物图

Fig.2 Images of model tank and thermal circulating system

模型试验采用混凝土能量桩, 桩体直径为 104 mm, 桩长为 1 600 mm, 实际埋入模型槽中的有效长度为 1 400 mm, 桩底部离模型槽底部 350 mm。桩体混凝土强度等级为 C30, 配合比为水:水泥:砂:碎石 = 0.44:1:1.79:3。模型试验共研究了 2 种不同埋管形式的能量桩, 分别为传统绑扎单 U 型埋管能量桩和预埋钢管单 U 型埋管能量桩。两根能量桩内部传热管道都采用 PVC 管, 外径为 11 mm, 内径为 8 mm。其中传统绑扎单 U 型埋管能量桩的传热管道预先绑扎在钢筋笼上, 随钢筋笼一起浇筑在混凝土内; 预埋钢管单 U 型埋管能量桩是先将两根竖向钢筋换为两根铸铁管道, 其内径为 12 mm, 外径为 16 mm, 长度为 1 460 mm, 然后将传热管道在两根铸铁管道内部穿过, 最后一起浇筑在混凝土中。两种埋管形式能量桩截面示意图详见图 1。

模型试验选用土体为南京地区砂土,天然砂含水率为 10.94%,填砂之前通过晾晒的方法制得干砂,填砂时通过酒精燃烧法测得土体表面、750 mm 深度和 1 400 mm 深度处的砂土含水率,分别为 0.26%、0.3%和 0.35%。由试验测得砂土内摩擦角为  $30.1^{\circ} \sim 32.2^{\circ}$ ,最大干密度为  $1.77 \text{ g/cm}^3$ ,最小干密度为  $1.40 \text{ g/cm}^3$ ,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 3 所示。

为了保证土体的密实度均匀,填砂时根据模型槽尺寸,将约  $11 \text{ m}^3$ 干砂分 5 次填入模型槽,每次约填 350 mm,然后通过人工夯实法来控制土体的相对密实度,试验测得砂土的相对密实度为 75%~80%。

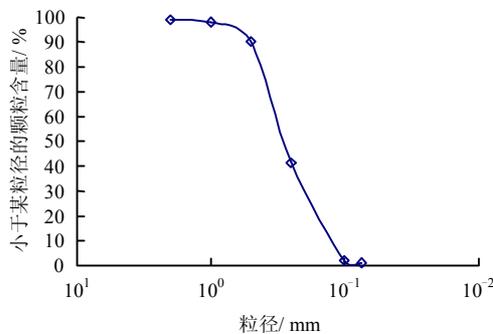


图3 颗粒级配曲线

Fig.3 Curve of grain size distribution

## 2.2 温度传感器布设

温控循环仪进、出口循环液体的温度由温控循环仪的显示屏读出。试验采用的温度传感器为 WDJ-9001 型数字式温度计,测量范围为  $-55 \sim 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度为  $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。两种埋管形式的能量桩中分别布置了 3 个温度传感器,距离桩顶分别为 440、850、1 260 mm。在距离土体表面 240、650、1 060 mm 3 个高度上放置有温度传感器,每个高度上各放置 3 个温度传感器,分别离桩中心距为 1 倍、2 倍和 3 倍桩径,桩体和土体温度传感器布置示意图详见图 4。温度传感器读数由江苏海岩仪器设备厂生产的 XP05 多功能频率仪读出。

## 2.3 温度荷载施加及温度测量

模型试验共包括热-冷两个循环过程。其中热循环研究的是夏季高温液体向桩体和土体中传热的过程,冷循环研究的是冬季低温液体从桩体和土体中吸热的过程。夏季工况水温控制为  $57 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;冬季工况水温控制为  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验在密闭实验室中进行,由于进行时间较短,两种工况的室温都在  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,昼夜温差不超过  $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。循环水速由速度控制箱控制,

大概在  $3 \text{ L/min}$ 左右。夏季工况高温循环水从能量桩进水口进入桩体,热量从循环水传到桩体,再由桩体逐渐传到土体中,大约持续 4 h 后停止,之后桩体及土体自然冷却 15 h;冬季工况低温循环水从能量桩进水口进入桩体,热量从土体传到桩体,再传到循环水中,大约持续 4 h 后停止,之后桩体及土体自然恢复 10 h。

在温度荷载施加之后前 50 min,每隔 10 min 测量一次桩体和桩周土体的温度,在 50~130 min,每隔 20 min 测量一次桩体和桩周土体的温度,之后在第 160、190、240 min,各测量一次桩体和桩周土体的温度,恢复过程的桩体和桩周土体温度没有测量。由于试验采用干砂,通过试验测得其含水率非常小,仅为 0.26%~0.35%,因此,不考虑土体温度改变引起孔隙水的迁移。

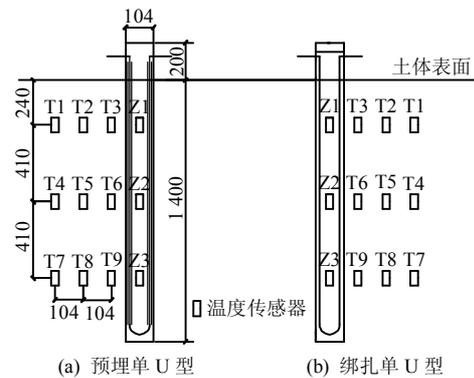


图4 温度传感器布置示意图(单位:mm)

Fig.4 Schematic diagrams of temperature sensors layout (unit: mm)

## 3 数值模型建立

本文利用数值软件 COMSOL Multiphysics,通过建立三维模型模拟了两种埋管能量桩夏季和冬季两种工况。本文数值模型能够模拟传热液体在传热管道中流动,液体中的热量通过管壁传到混凝土中,进而传到周围土体这一过程,考虑了能量桩在实际使用过程中的整个物理过程。

### 3.1 模型概述

模拟能量桩与模型试验研究的能量桩一致,桩径为 104 mm,桩长为 1 600 mm,为了使计算更容易收敛,本文仅模拟埋在土中的 1 400 mm 的部分,见图 4。内部传热管道与模型试验能量桩内埋管一致,管径为 11 mm,U 型管的两肢相距为 80 mm,下部采用半圆环。两根铸铁管管径取为 16 mm,设置在传热管道外侧。根据模型槽尺寸 ( $2 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 1.75 \text{ m}$ ),桩周土体的计算区域选为长方体,长 $\times$ 宽 $\times$

高为  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.75\text{ m}$ ，如图 5 所示。

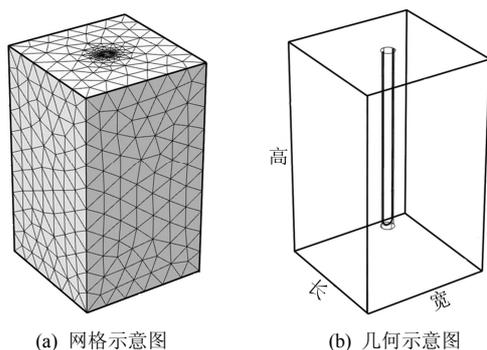


图 5 数值模型网格和几何示意图

Fig.5 Meshes and geometry of numerical model

本文数值模型根据能量桩各部分几何的不同形式，将土体、桩体部分和传热管道部分分别划分。其中土体和桩体部分采用自由四面体单元来对模型进行网格划分，传热管道采用边单元形式进行网格。由于在传热管道附近温度梯度较大，为了保证计算精度，在传热管道附近对网格进行了细分，如图 5 所示。数值模型传热液体选为水，预埋钢管的材料设为铸铁，预埋钢管和传热管道之间的空隙设为空气，三者的热传导参数由 COMSOL 软件材料库导入，材料库中上述 3 种材料的热传导参数是与温度有关的变量，因此，未在表 1 中列出。能量桩在传热过程中会引起桩体及桩周土体温度的变化，但由于该温度变化量相对较小，不会引起土体和混凝土热传导性质的显著变化<sup>[14]</sup>，本文数值模型没考虑这一影响，假定土体和混凝土的热传导参数为定值。土壤类型为砂土，通过试验测得其含水率非常小，仅为  $0.26\% \sim 0.35\%$ ，因此，孔隙水对土体传热的影响不大，模型假定砂土为干砂，不存在孔隙水，根据 McCartney 的研究结果<sup>[15]</sup>，砂土的热传导系数为  $0.3 \sim 2.5\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，考虑到试验时砂土的含水率较低，本文将砂土的热传导系数选为  $0.6\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；混凝土的热传导参数受其配合比的变化而变化，试验过程没有单独测量混凝土和 PVC 管道的热传导参数，二者的热传导参数均在其合理的取值范围选取，详见表 1。数值模型在夏季和冬季工况的运行时间与模型试验一致，都为 4 h，模型求解器选为与

表 1 材料参数表

Table 1 Properties of materials

材料	热传导系数 $\lambda$ / $(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	比热容 $C_p$ / $(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	密度 $\rho$ / $(\text{g}/\text{cm}^3)$
砂土	0.6	940	1.74
混凝土	0.8	970	2.40
PVC 管	0.3	900	1.38

时间相关的瞬态求解器。

### 3.2 边界条件和初始条件

能量桩的传热特性会受到室温和土体温度共同的影响，并且土体的温度还会受气温的影响<sup>[8]</sup>。根据密闭实验室温度测定，模型土体上表面的温度设为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。考虑到模型的对称性，并且为了减少土体由于空间上的初始温度不同引起热对流的影响，土体四周表面设为热绝缘，土体下表面设为恒定温度，大小与其临近土壤温度相同。根据土体内温度传感器（见图 4）的读数显示，土体在空间上温度分布并不均匀，在水平向上变化不大，在竖直方向上土体的温度相差较大，因此，本文数值模型假定水平方向上土体初始温度没有变化，竖直方向在与温度传感器相同深度处，土体温度与温度传感器读数一致，不同温度传感器中间部分土体温度根据插值选取，最下部温度传感器以下的土体温度根据其上部临近土体温度的变化规律选取。桩体的初始温度根据其内部 3 个温度传感器（见图 4），仿照土体的初始温度选取。

### 3.3 温度荷载

数值模型温度荷载与模型试验一致。循环水速设为  $3\text{ L}/\text{min}$ 。夏季工况水温控制为  $57\text{ }^\circ\text{C}$ ，模型运行 4 h 后停止；冬季工况水温控制为  $5\text{ }^\circ\text{C}$ ，模型运行 4 h 后停止。温度恢复过程数值模型不予考虑。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 桩体温度变化和分布规律

两种埋管形式能量桩离土体表面  $650\text{ mm}$  深度（见图 4）夏季和冬季两种工况的桩体温度随时间变化如图 6 所示。从图可以看出，两种埋管形式能量桩桩体温度的变化趋势一致，当  $57\text{ }^\circ\text{C}$ （夏季工况）的循环水通入能量桩后，桩体温度不断上升，在开始的  $0 \sim 20\text{ min}$  内，桩体温度上升相对缓慢，这是由于能量桩进水口与水速控制箱之间存在一段连接管路，试验开始时该段管路内部的循环水温度较低。随后桩体温度上升速度先逐渐增大后又逐渐减小，温度变化曲线比较平缓，桩体温度最终趋于稳定，曲线呈上凸形状（见图 6(a)）；当  $5\text{ }^\circ\text{C}$ （冬季工况）的循环水通入桩体后，桩体温度不断下降，桩体温度的变化趋势与夏季模式一致，曲线呈下凹形状（见图 6(b)）。从图 6 可以看出，本文建立数值模型模拟的桩体温度变化趋势与模型试验测试的桩体温度变化趋势一致，并且数值模拟的结果在温度变化总量上与试验测试的数据也能够很好地吻合，说明数值模型能够很好地应用于能量桩桩体传热的模拟。从

图 6 还可以看出，预埋钢管单 U 型埋管能量桩夏季和冬季工况桩体的温度变化量都比传统绑扎单 U 型埋管能量桩小，其中夏季工况两种桩型的桩体温度变化量分别约为 10、13 °C（见图 6(a)），冬季工况两种桩型的桩体温度变化量分别约为 6、7 °C（见图 6(b)），两者之间存在差别，这是由于预埋钢管的内径为 12 mm，传热管道的外径为 11 mm，两者之间存在 0.5 mm 的间隙。由于间隙较小，混凝土不易进入，因此，造成了热阻。但夏季工况两种桩型桩体温度变化量之间的差别大约为 23%左右，而冬季工况该数值仅为 14%左右，预埋钢管单 U 型埋管能量桩的传热性能略低于传统绑扎单 U 型埋管能量桩的传热性能。本文建立的数值模型通过设置薄膜热阻考虑了铸铁管和传热管道之间空隙的影响，从图可以看出，数值模拟的结果与试验测试的结果比较吻合，说明该方法是可行的。

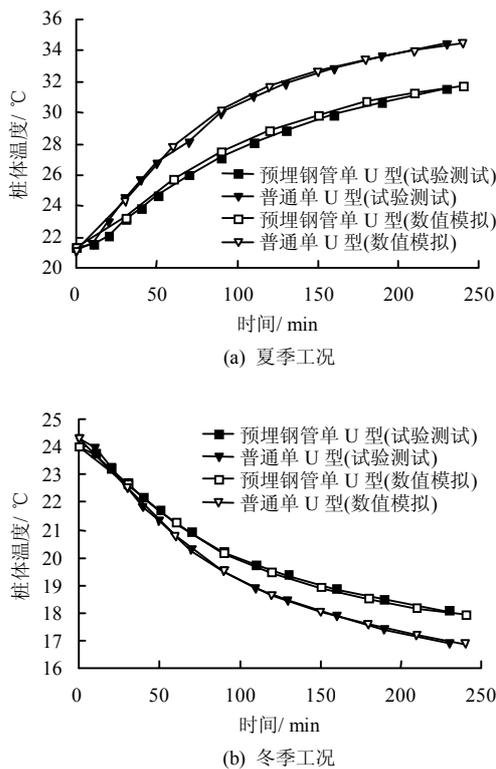


图 6 桩体温度变化图

Fig.6 Variations of pile shaft temperature

模型试验预埋钢管单 U 型埋管能量桩夏季和冬季两种工况不同时刻桩体沿轴向的温度分布如图 7 所示。从图上可以看出，夏季工况桩体的初始温度分布比较均匀，温差在 0.5 °C 之内，而冬季工况桩体的顶部和底部初始温度相差大约 1.5 °C。在开始施加温度荷载阶段，桩体温度曲线之间的间隔比较大，随着时间增长，相邻温度曲线之间的间隔逐渐

减小。这说明整个桩体的温度变化速度随时间增长逐渐减小，桩体上部和底部的温度变化趋势和中部的变化趋势（见图 6）相同。从图 7(a)可以看出，在夏季工况开始的 1 h 内，桩体底部的温度变化量较其他位置的温度变化量大，这是因为桩体底部埋设的温度传感器离 U 型管弯折处较近，该位置传热管道相对于桩体其他位置比较密集，对桩体的作用效果比其他位置明显，这与 Murphy 等<sup>[5-6]</sup>的研究具有相同的规律，随着时间增长，这一差别随着桩体温度稳定逐渐减小，不同时刻的桩体温度变化曲线趋于平行。由图 7(b)可见，冬季模式也具有相同的变化规律，并且随着时间的增长，冬季模式的桩体温度分布较初始状态更为均匀。

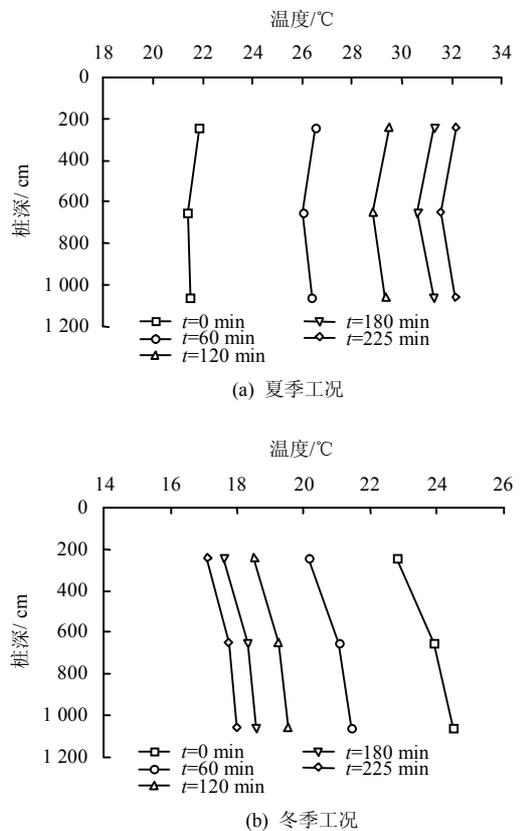


图 7 不同时刻桩体轴向温度分布图

Fig.7 Temperature distributions along pile shaft at different times

数值模型最终时刻桩体不同深度截面上 U 型管两肢之间的温度分布如图 8 所示。从图可以看出，桩体截面的温度按一定规律分布：桩体温度沿桩轴线大致呈对称分布；在 U 型管弯折处上部，桩体不同深度截面的温度分布规律一致，对于夏季模式，离桩轴线越近，桩体温度越低，离桩轴线越远，桩体温度越高，冬季模式与夏季模式桩体温度分布的规律相反；在 U 型管弯折处下部，桩体温度分布规

律与U型管弯折处上部相反,对于夏季模式,离桩轴线越近,桩体温度越高,离桩轴线越远,桩体温度越低,冬季模式同样与夏季模式桩体温度分布的规律相反。以上规律与Gashti<sup>[16]</sup>的研究结果一致。

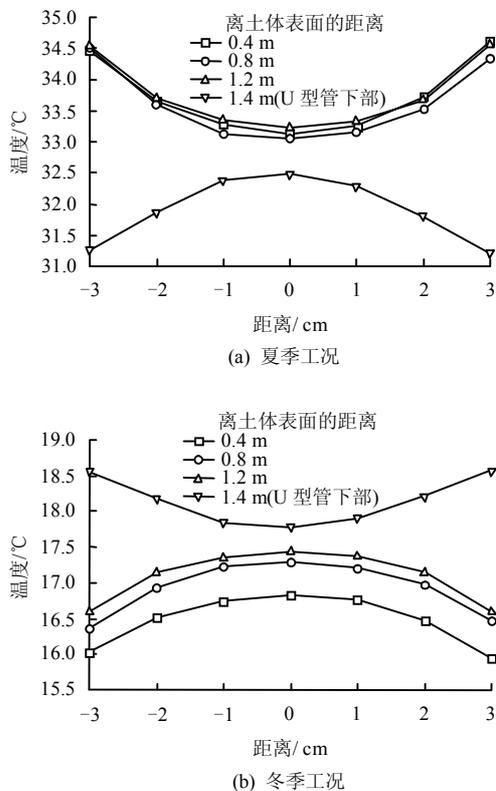


图8 桩体不同深度截面温度分布图  
Fig.8 Temperature distributions on cross-section at different depths

#### 4.2 桩周土体温度变化和分布规律

两种埋管形式能量桩离土体表面650 mm深度处(见图4)夏季和冬季两种工况桩周土体温度随时间的变化如图9所示。从图可以看出,桩周土体温度变化的趋势与桩体温度变化的趋势不同,夏季工况在开始的0~50 min内,桩周土体温度上升相对缓慢,但温度上升速度逐渐加大,随后桩周土体温度近似呈直线变化,这一阶段温度变化曲线呈下凹状,随着时间增长,桩体温度增长速度有放缓趋势,但温度变化曲线并没有明显地上凸(见图9(a));冬季工况在开始施加温度荷载之后,桩周土体温度不断下降,桩周土体温度变化的趋势与夏季模式一致,但温度变化曲线的凹凸性与夏季模式相反(见图9(b))。本文建立数值模型能够模拟出桩周土体温度的变化趋势,并且在温度变化总量上数值模拟的结果与试验测试的数据也能够很好地吻合,说明数值模型能够很好地应用于能量桩桩周土体传热的模拟。

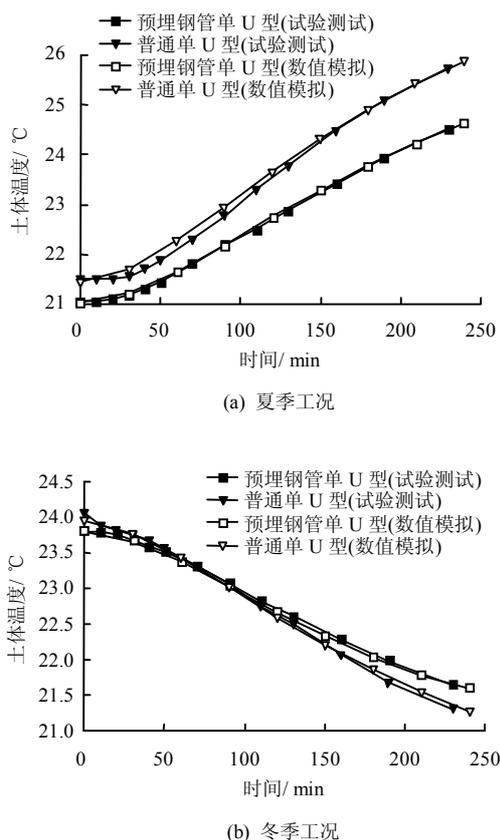


图9 桩周土体温度变化图  
Fig.9 Temperature variations of surrounding soil

从图9还可以看出,相比两种埋管形式能量桩桩体温度的变化曲线,桩周土体温度的变化曲线更为接近。预埋钢管单U型埋管能量桩夏季和冬季工况土体温度的最终变化量分别约为3.5、2.2℃,传统绑扎单U型埋管能量桩两种工况土体温度的最终变化量分别约为4.2、2.7℃。造成差别的原因同样是因为预埋铸铁管与传热管道之间存在空隙。但夏季工况两种桩型桩周土体最终温度变化量之间的差别大约为16%左右,而冬季工况该数值为18%左右,因此,可以认为两种埋管形式对桩周土体传热影响的差别不大。

由上述分析可知,在U型管弯折处附近桩体的加热效果最明显,因此,选取最下面一层温度传感器附近的土体温度来研究桩周土体温度沿径向的分布规律,如图10所示。图中横坐标为正规化的距离, $d_p$ 为桩体直径。从图中可以看出,夏季模式桩周土体的初始温度沿径向分布比较均匀,而冬季模式的初始温度沿径向分布不均匀,这是由于冬季模式是在夏季模式结束之后进行,土体温度没有完全恢复到初始状态。两种埋管形式能量桩桩周土体温度沿径向的变化趋势一致,离桩体越近,土体受到桩体的作用效果越明显。夏季模式(见图10(a))在1倍

桩径处, 两种桩型桩周土体温度升高  $3.6\sim 4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在 2 倍桩径处桩周土体温度变化值为  $0.3\sim 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在 3 倍桩径处土体温度几乎不受影响; 冬季模式 (见图 10(a)) 与夏季模式的影响范围比较相近。这说明能量桩的影响范围一般在 1~2 倍桩径, 并且在 2 倍桩径范围内的土体, 其温度变化梯度较大。在工程建设中, 当确定能量桩桩体的间距时, 要考虑其传热半径, 以免造成相邻能量桩之间的热短路。

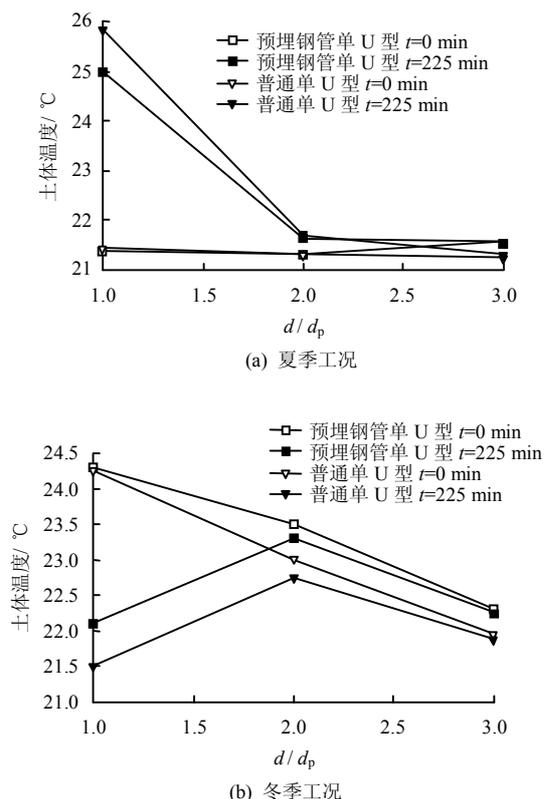


图 10 土体温度沿径向分布

Fig.10 Temperature distributions of soil in radial direction

## 5 结论

(1) 桩体温度与桩周土体温度随时间变化的规律是不同的。夏季和冬季工况桩体的温度随时间增长逐渐趋于稳定, 温度变化曲线分别呈上凸型 (夏季工况) 和下凹型 (冬季工况), 而桩周土体的温度在开始阶段温度变化较慢, 随后温度进入直线增长阶段, 整个温度变化曲线没有明显趋于平缓。

(2) 在 U 型管的上方, 越远离轴线, 桩体加热和制冷的效果越明显, 在 U 型管的下方, 桩体温度有相反分布规律; 下部桩体的加热和制冷效果较其他位置的桩体更明显; 夏季和冬季两种工况桩周土体的传热影响半径为 2 倍能量桩桩径。

(3) 夏季工况预埋钢管单 U 型埋管能量桩与传

统绑扎单 U 型埋管能量桩桩体温度和桩周土体温度最终变化量分别相差 23% 和 16% 左右; 冬季工况该数值仅为 14% 和 18% 左右, 说明两种埋管形式的能量桩传热性能相差不大, 预埋钢管能量桩的传热性能略低于绑扎埋管能量桩的传热性能, 在后续研究中会进一步改进。

## 参考文献

- [1] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. *Geotechnique*, 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, 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.
- [3] 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 test for structural responses of energy pile to heat exchanging process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(6): 1087-1094.
- [4] LI X, CHEN Y, CHEN Z, et al. Thermal performances of different types of underground heat exchangers[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(5): 543-547.
- [5] MURPHY K D, MCCARTNEY J S, HENRY K S. Thermo-mechanical characterization of a full-scale energy foundation[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2014, 233: 617-628.
- [6] MURPHY K D, MCCARTNEY J S, HENRY K S. Impact of horizontal run-out length on the thermal response of full-scale energy foundations[C]//Geo-Congress. Reston, VA: [s. n.], 2014: 2715-2724.
- [7] 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 Gang-qiang, LIU Han-long, 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.
- [8] ZANCHINI E, LAZZARI S, PRIARONE A. Long-term performance of large borehole heat exchanger fields with unbalanced seasonal loads and groundwater flow[J].

- Energy**, 2012, 38(1): 66—77.
- [9] GAO J, ZHANG X, LIU J, et al. Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2008, 28(17): 2295—2304.
- [10] 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.
- [11] OZUDOGRU T, BRETTMANN T, OLGUN C G, et al. Thermal conductivity testing of energy piles: Field testing and numerical modeling[C]//GeoCongress. California: ASCE, 2012: 25—29.
- [12] 孔纲强. 能量桩换热管新型埋管方式技术比较分析[J]. **建筑节能**, 2014, 42(12): 104—108.  
KONG Gang-qiang. Comparative analysis on heat exchange tube in energy pile with various embedded manners[J]. **Building Energy Efficiency**, 2014, 42(12): 104—108.
- [13] 孔纲强, 彭怀风, 吴宏伟, 等. 一种地源热泵灌注桩钢筋笼内埋管的施工方法: 中国, ZL201310302155.6[P]. 2013-11-06.  
KONG Gang-qiang, PENG Huai-feng, CHARLES W W NG, et al. A construction method of energy pile by laying pipe in reinforcement cage: China, ZL201310302155.6[P]. 2013-11-06.
- [14] LALOU L. Thermo-mechanical behaviour of soils[J]. **Revue Française De Génie Civil**, 2001, 5(6): 809—843.
- [15] MCCARTNEY J S. Engineering performance of energy foundations[C]// Pan-American CGS Geotechnical Conference. Toronto: [s. n.], 2011: 2—6.
- [16] GASHTI E H N, UOTINEN V, KUJALA K. Numerical modelling of thermal regimes in steel energy pile foundations: A case study[J]. **Energy and Buildings**, 2014, 69: 165—174.
- 
- 上接第 332 页
- [18] KAUSEL E, PEEK R. Dynamic loads in the interior of a layered stratum: An explicit solution[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1982, 72(5): 1459—1481.
- [19] 柴华友, 白世伟, 刘明贵, 等. 瑞利波特性刚度矩阵研究[J]. **岩土力学**, 2006, 27(2): 209—213.  
CHAI Hua-you, BAI Shi-wei, LIU Ming-gui, et al. Analysis of behavior of Rayleigh waves by stiffness matrix method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 209—213.
- [20] 柴华友, 张电吉, 卢海林, 等. 层状饱和和介质瑞利波传播特性薄层分析方法[J]. **岩土工程学报**, 2015, 37(6): 1132—1141.  
CHAI Hua-you, ZHANG Dian-ji, LU Hai-lin, et al. Behavior of Rayleigh waves in layered saturated porous media using thin layer method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(6): 1132—1141.
- [21] 柴华友, 韦昌富. 刚度缓变系统中瑞利波特性[J]. **岩土力学**, 2009, 30(9): 2545—2551.  
CHAI Hua-you, WEI Chang-fu. Behavior of Rayleigh waves in media with smoothly varying stiffness profile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2545—2551.
- [22] 柴华友, 张电吉, 韦昌富, 等. 层状地基中表面波有效相速度[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(6): 892—898.  
CHAI Hua-you, ZHANG Dian-ji, WEI Chang-fu, et al. Effective phase velocity of surface waves in layered soil media[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(6): 892—898.
- [23] 柴华友, 韦昌富, 白世伟. 表面波有效相速度的近似分析方法[J]. **岩土力学**, 2008, 29(1): 87—93.  
CHAI Hua-you, WEI Chang-fu, BAI Shi-wei. Approximate approach to analyzing effective phase velocity of surface waves[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 87—93.
- [24] FOTI S. Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves[D]. Torino, Italy: Politecnico di Torino, 2000.
- [25] STROBBIA C. Surface wave methods: Acquisition, processing and inversion[D]. Torino, Italy: Politecnico di Torino, 2003.
- [26] LU L Y, ZHANG B X. Analysis of dispersion curves of Rayleigh waves in the frequency-wavenumber domain[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2003, 41(4): 583—598.