

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.03.024

# 地源热泵桩基与钻孔埋管换热器换热性能比较

桂树强<sup>1</sup>,程晓辉<sup>1</sup>,张志鹏<sup>2</sup>

(1. 清华大学 土木工程系,北京 100086;2. 南京丰盛新能源科技股份有限公司,南京 210012)

**摘要:**相对于钻孔埋管换热器,桩基埋管换热器在换热性能和经济性方面均具有较大优势,目前越来越广泛的应用于地源热泵工程中。围绕钻孔与桩基埋管换热器的结构特点和换热机理进行对比分析,针对南京某项目桩基埋管换热器开展了换热性能实测及数值模拟分析,并采用数值模拟手段对比分析了钻孔与桩基埋管换热器的换热性能差异。研究结果进一步证明了桩基埋管换热器具有良好的换热性能。提出的传热性能数值模拟方法可较准确地计算出桩基和钻孔埋管换热器的传热效率。

**关键词:**地源热泵;换热器;换热性能

**中图分类号:**TU831.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)03-0151-06

## Comparative Analysis of Heat Exchange Performance of Energy Piles and Borehole Heat Exchangers in GSHP System

Gui Shuqiang, Cheng Xiaohui, Zhang Zhipeng

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100086, P. R. China;

2. Nanjing Fullshare Energy Science & Technologies Co. Ltd., Nanjing 210012, P. R. China)

**Abstract:** Due to their enhanced cost-effectiveness and efficiency over traditional borehole exchangers, energy piles are increasingly used in Ground Sourced Heat Pump (GSHP) projects. In this paper, the structural characteristics of these two types of heat exchangers and their heat transfer mechanism were discussed firstly. The thermal response tests (TRT) were performed on two testing energy piles in one GSHP project in Nanjing, China. The TRT results were then used to verify the numerical simulations, which suggests that the heat exchange performance of energy piles is superior to that of the traditional borehole exchangers. Meanwhile, the numerical simulation method used in this paper was considered applicable to the optimization design of ground heat exchangers in GSHP system.

**Key words:** ground source heat pump; heat exchangers; heat exchange performance;

作为世界上最大的发展中国家,中国在经济高速发展的同时,面临着环境污染、能源短缺和气候变化等一系列的问题,其中能源短缺所造成的困扰尤为突出。据统计,目前建筑运行能耗约占全社会商品用能的 1/3,而在建筑运行能耗中,暖通空调系统的能耗约占 60%左右,是节能潜力最大的领域之一<sup>[1]</sup>。

地源热泵作为建筑节能的一个有效途径,目前已经广泛地应用于建筑空调系统供冷供热中。它以地下 15~200 m 以内的岩土层作为空调系统的冷热

源,夏季将室内热量通过热泵机组排入地下岩土层中,冬季则将地下岩土层中的热量通过热泵机组送至室内。地下换热器是整个地源热泵系统的关键组成部分。目前中国大多数工程均采用钻孔埋管换热器作为地下换热器。但由于其钻孔成本较高、钻孔占地面积较大,使地源热泵的推广普及受到了制约。20 世纪 80 年代,奥地利和瑞士等国技术人员开始利用建筑物基础作为地源热泵的地下换热器。起初利用基础底板,后来发展到利用桩基、地下连续墙甚

收稿日期:2012-11-26

基金项目:清华-MIT-剑桥三校低碳大学联盟基金(300907001)

作者简介:桂树强(1974-),男,博士(后),高级工程师,主要从事岩土工程和新能源研究,(E-mail)guishuqiang@vip.sohu.com。

至隧道结构作为地下换热器。这些利用建筑结构部件进行地下热交换的结构形式被统称为地下热工结构 (Thermo-active Ground Structures)<sup>[2]</sup>。与传统钻孔埋管换热器相比,它利用了建筑物基础中混凝土较好的热传导性能和建筑物基础与地下岩土体的更大换热面积,提高了地下换热器的换热性能,节省了大量的钻孔费用和地下空间资源。该技术已在其他国家得到较广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。近年中国也陆续开展了这方面的应用和研究工作。地下热工结构在工程应用中主要存在结构安全和传热规律两方面的障碍<sup>[2,5]</sup>。从传热角度分析,学者们采用理论分析<sup>[6-7]</sup>和数值模拟<sup>[4]</sup>2种手段对地下热工结构展开研究,研究的地下热工形式主要有双U型、螺旋型桩基埋管换热器,但由于其结构形式复杂多样,换热理论尚不完善。

笔者拟主要从换热性能的角度出发,在分析桩基与钻孔埋管换热器的换热结构和换热机理差异的基础上,通过实测和数值模拟2种手段对桩基和钻孔埋管换热器的换热性能进行对比分析,旨在找出桩基换热器的一般规律和优越性。

## 1 桩基与钻孔埋管换热器结构、换热机理及经济性对比分析

### 1.1 换热器结构对比分析

一般桩基深度为25~60 m,直径600~1 200 mm,其直径与长度之比约在0.01~0.048之间。目前中国常见的桩基埋管换热器为双U型和3U型,其布置形式分别如图1和图2所示。桩基埋管换热器的结构取决于所利用桩基的深度、直径等因素。若桩深大于50 m,循环水在管内的停留时间较长,循环水与周围介质换热充分,一般采用并联形式的换热器,即在一个桩基内埋设若干组U型管,每组U型管间以并联方式连接。若桩深小于50 m,循环水在管内的停留时间较短,换热不充分,为与地源热泵机组进出水温度匹配,需要保证一定的换热器进出口温差,一般采用串联形式的换热器,即桩基内U型管间的连接方式为串联。

此外,桩基埋管换热器的结构与施工工艺也有关系。目前主要的施工工艺有2种,一种是将地埋管绑扎在钢筋笼的内侧,埋管随钢筋笼一起下至桩基钻孔内,通过导管注浆将桩基钻孔用混凝土回填密封;另一种是先将钢筋笼下至桩基孔内,埋管随混凝土注浆导管下至孔中,使用同样的方法将桩基钻孔回填密封。前者埋管绑扎在钢筋笼上较为牢固,浇筑混凝土时对埋管的影响较小,施工成功率较高,但在

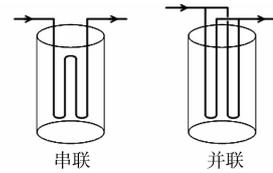


图1 双U型灌注桩埋管换热器示意图

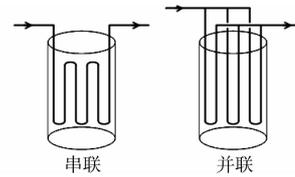


图2 3U型灌注桩埋管换热器示意图

埋管绑扎和下管时,需要桩基施工单位的配合,一定程度上延长了桩基埋管换热器的施工时间;后者在浇筑混凝土时产生的震动可能会造成埋管变形或损坏。

与桩基埋管换热器不同,钻孔埋管换热器是在钻孔中布置1组或2组U型管,并用水泥基回填材料将钻孔回填密封。钻孔埋管换热器的钻孔深度一般为50~120 m,钻孔直径为120~150 mm,其直径与长度之比约在0.001~0.003之间。钻孔埋管换热器由于孔径较小,一般为单U或双U型,双U型的连接方式分串联和并联2种,其连接方式与前述桩基埋管换热器的原则相同。

### 1.2 换热机理对比分析

桩基与钻孔埋管换热器有着相似的换热机理<sup>[8]</sup>。图3为埋管在水平截面的换热示意图。换热器的换热主要由管内流体对流换热、管内流体与管壁对流换热、管壁导热、管外壁与回填材料接触换热、回填材料导热、回填材料与岩土体接触换热、岩土体的导热等7部分构成。管外壁与回填材料的换热、回填材料与岩土体的换热主要由施工质量所决定。在理论计算时一般认为不同材料接触界面的接触良好,接触热阻为零。

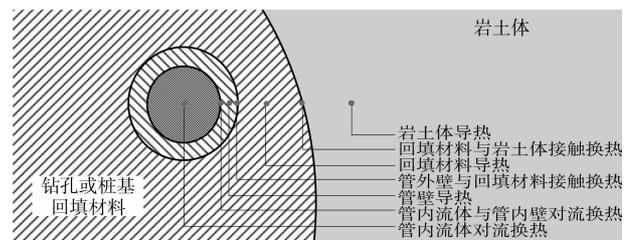


图3 桩基与钻孔埋管在水平截面的换热示意图

由于钻孔结构的长、细特点,在钻孔地埋管传热计算时通常以钻孔壁为边界将传热分为钻孔外传热和钻孔内传热2部分。钻孔外的传热可简化为无限长或半无限长的线热源,而对于钻孔内传热,由于钻

孔孔径较小,一般假设钻孔内的传热为稳态传热<sup>[9-11]</sup>,即钻孔内沿深度的热流密度相同,且温度分布不随时间变化。而对桩基而言,由于其与钻孔在结构尺寸上的巨大差异,桩基孔壁与周围岩土体的传热不能简单的简化为线热源传热,并且桩基内的传热要经过很长时间后才能达到稳态传热,因而也不能将桩基内的传热简化为稳态传热。

由以上分析可知,虽然钻孔与桩基埋管换热器具有相似的换热机理,但是由于它们结构尺寸上的差异,并不能直接利用已有的钻孔埋管传热模型来计算桩基埋管的传热。

### 1.3 经济性对比分析

钻孔埋管的施工费用包括成孔、下管和灌浆回填3个主要环节。成孔费用与地质条件有较大的关联性。调研发现,中国目前钻孔埋管成孔费用介于50~120元/m之间。对于特别复杂的地质条件,例如岩溶区、含流砂的地层以及断层破碎带等地层,该部分费用还可能更高。下管的费用一般在10元/m以内。灌浆回填的费用一般在20~30元/m。而对于桩基埋管来说,成孔和灌浆回填这2部分费用均不会产生,主要施工费用发生在下管这个环节。桩基埋管下管时要将换热管固定在钢筋笼上,因而其工艺较钻孔埋管要复杂的多,且涉及到与桩基施工单位相互配合时产生的管理成本,目前该部分的费用一般为30~40元/m。综上,不考虑换热管材料费的差异,沿深度方向每延米桩基埋管的施工费用约为钻孔埋管的20%~30%。可见桩基埋管在经济性上明显优于钻孔埋管。

## 2 桩基换热器换热性能实测

以南京某采用灌注桩埋管换热器的地源热泵项目为研究对象进行换热性能实测。选取2根埋管形式相同、埋管深度相同的桩基埋管换热器作为测试对象。桩基直径为800mm,深度为30m。考虑到对U型弯管处的保护,U型管的埋设深度为27m。2组U型管绑扎在桩基的钢筋笼上,U型管随钢筋笼一起下入桩基钻孔中。为减小2组U型管之间的换热影响,2组U型管分别绑扎在钢筋笼的两侧,2组U型管为串联连接方式。

试验目的主要有2个:其一为实测桩基埋管换热器的换热性能;其二为测试温度变化时桩基结构应力响应特征,笔者主要讨论第一个方面。测试设备原理如图4所示,主要由桩基埋管换热器、电加热器、冰水水箱、循环水泵、温度传感器、流量传感器和控制模块等组成。仅使用电加热时可测试桩基埋管

换热器放热工况下的换热性能;当在冰水水箱中不断加入冰块且开启电加热装置时,可测试桩基埋管换热器吸热工况下的换热性能。通过水泵变频器控制埋管中的水流量,并通过电加热控制模块控制所需要的加热量,进而控制进口水温。

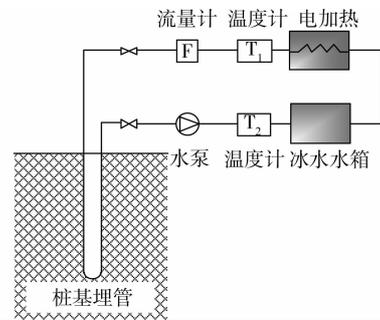


图4 热响应测试原理图

试验时换热器进口温度和流速的设计至关重要。夏季换热器设计进口温度一般为35℃。但也有文献指出,夏季可利用埋管换热器进行蓄热以供冬季使用,在蓄热工况下,埋管的进水温度可以达到60℃以上<sup>[12]</sup>。由于试验不仅要对灌注桩换热器的换热性能进行研究,还要研究极限温差条件下灌注桩桩身中的应力调整,因此试验中桩基埋管换热器放热工况进口温度确定为60℃。吸热试验时,与埋管冬季设计最低进口温度相同,即为5℃。试验中换热器内循环水的流速参照“地源热泵系统工程技术规范”的要求,管内流速控制在规定的范围内<sup>[13]</sup>。

在对每个桩基埋管换热器测试时,均采取了吸放热2种工况,1#基桩先进行放热测试,后进行吸热测试;2#基桩先进行吸热测试,后进行放热测试。试验中吸放热量的实测值和文献[14-16]中上海世博轴桩基埋管换热器的实测值对比如表1所示。对比试验1#和2#基桩的换热量可知,桩基埋管的放热量大于吸热量,这主要是由于放热时进口温度与岩土体初始温度之差大于吸热时的温差造成的。1#基桩放热量小于2#基桩放热量,而吸热量却相反。分析其原因,主要是由于时间条件限制,吸放热2种测试工况的时间间隔只有十几个小时,灌注桩周围地温及桩基内部及周围温度未恢复到初始岩土体温度。对比世博轴1#和2#基桩的换热量可知,桩基埋管换热器的换热量与流量有关,流量越大,换热量越大。

试验放热工况进口温度为60℃,此时换热量并不能代表本项目桩基埋管换热器夏季运行过程中的实际放热量。与上海世博轴项目桩基的放热量对比可知,试验桩基埋管放热量远远大于上海世博轴桩

基埋管换热量,可见进口温度与岩土体初始温度之差越大,换热量越大,桩基埋管换热器可以利用的能量越多。

表 1 本项目与世博轴项目桩基埋管换热器换热性能比较

桩基	桩基直径/mm	埋管深度/m	换热器进口温度/K	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	换热量/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ )
江宁 1# 桩(放热)	800	27	333.0	0.8	153
江宁 1# 桩(吸热)	800	27	278.0	0.6	89
江宁 2# 桩(放热)	800	27	333.0	0.6	176
江宁 2# 桩(吸热)	800	27	278.0	0.6	78
世博轴 1#(放热)	600	35	307.8	0.684	94
世博轴 2#(放热)	600	35	308.0	0.342	58

注:桩基埋管换热器均为 W 型连接方式,其中江宁项目岩土体初始温度为 291 K,世博轴项目岩土体初始温度为 291.2 K。

### 3 桩基与钻孔埋管换热器换热性能数值模拟对比分析

#### 3.1 桩基埋管换热器换热性能数值模拟

采用 CFD(Computational Fluid Dynamics, 计算流体动力学)方法对桩基埋管换热器开展非稳态流-固耦合的数值模拟分析,并与第 2 章的实测结果对比,以验证数值模拟的可靠性,为下一步采用数值模拟方法高效分析钻孔和桩基埋管换热器换热性能奠定基础。

由于实际桩基埋管的传热非常复杂,在模拟时需要采取必要的假设。具体假设包括<sup>[17]</sup>:1)桩基周围岩土体热物性均匀;2)忽略地下水流动,认为桩基与周围岩土体的传热过程为热传导;3)桩基内钢筋的热物性与混凝土相同;4)桩基周围岩土温度均匀。模拟中换热流体采用的模型为遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒以及湍流标准的  $k-\epsilon$  模型。采用非结构化网格对桩基埋管换热器进行网格划分,其水平界面和三维网格划分分别如图 5 和图 6 所示。模拟中各材料的热物性参数值如表 2 所示。

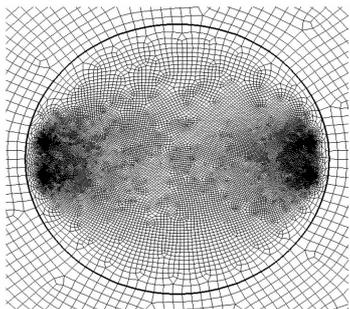


图 5 桩基埋管换热器水平界面网格划分示意图

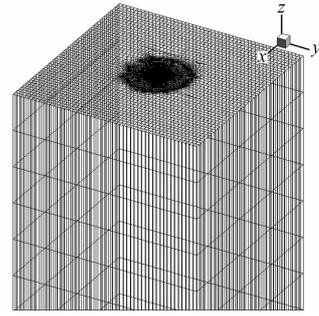


图 6 桩基埋管换热器三维网格划分示意图

表 2 材料热物性参数值

材料	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	导热系数/( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	比热容/( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ )
U 型管	950.0	0.42	2 200
混凝土	2 500.0	1.50	850
岩土体	1 285.0	1.30	1 800
流体	998.2	0.60	4 182

对进口温度为 278 K( $5^\circ\text{C}$ )时桩基埋管换热器的换热性能进行数值模拟,并与 2# 桩吸热时的试验数据对比。模拟中采用的流量与 2# 桩吸热时的流量相同,即  $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。图 7 为数值模拟和试验中换热器进出口温度随时间变化的对比,可以看出模拟得到的进出口温度曲线光滑,而试验得到的进出口温度曲线有一定的波动,这主要是由于冰水水箱中不断加入冰块使换热器进口温度波动所致。通过对比可发现,模拟与试验的进出口温度变化趋势相同,且模拟的温度接近实测值,由此可说明该数值模拟方法的可靠性。换热开始时,出口温度较高,随着加热过程的进行,管周围混凝土和岩土体的温度降低,出口温度也随之降低,换热器出口温度的变化趋势减缓,并逐渐趋于稳定。

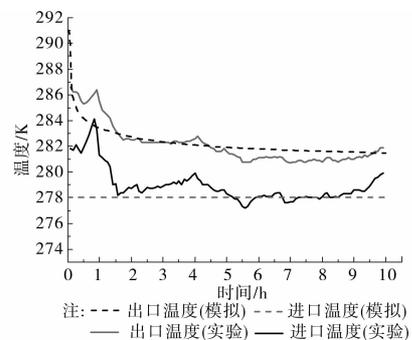


图 7 2# 桩吸热时进出口温度随时间的变化

根据进出口温差及流量换算出桩基单位深度换热量随时间的变化,如图 8 所示。模拟值与试验值变化趋势也相同,但模拟值比试验值大 15% 左右。这是由于试验采用恒温水箱加冰块来实现恒定进口

温度,在试验初期无法控制水箱内的融冰量使温度一直保持在 5℃,因此在试验初期,进出口温度均高于 278 K(5℃)。模拟的时候,将模拟的进口温度设置为 5℃,以便与后面较平稳段的实验值进行对比。

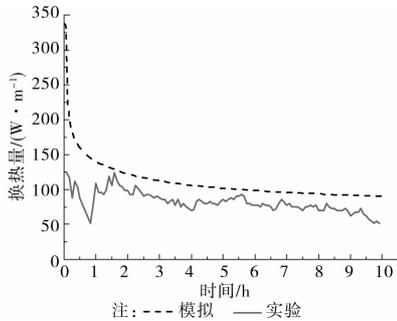


图 8 2# 桩吸热时单位深度换热量随时间的变化

取桩基埋管换热器吸热时管内温度沿深度方向变化的模拟值进行分析。选取运行 10 h 时刻沿深度方向的温度分布图,如图 9 所示。可以看到:在每根 PE 管内,流体温度随深度的变化接近线性,流体从周围介质吸热,温度沿流动方向逐渐升高。

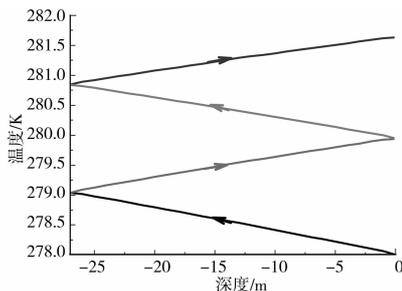


图 9 2# 桩吸热时管内流体温度沿深度方向的变化

为获得桩基埋管换热器放热工况下的换热量,对进口温度为 308 K(35℃)、流量为 0.6 m<sup>3</sup>/h 时桩基埋管换热器的换热进行数值模拟。换热量随时间的变化如图 10 所示。由此可得到趋于稳定时桩基埋管的换热量约为 119 W/m。

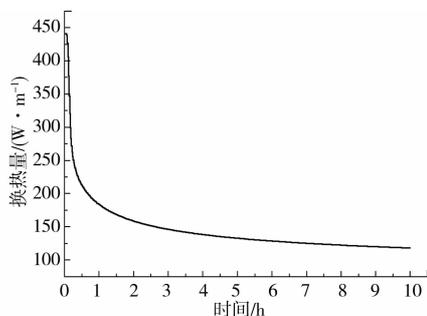


图 10 2# 桩放热时单位深度换热量随时间的变化

### 3.2 桩基与钻孔埋管换热器换热性能数值模拟对比分析

为了对比钻孔与桩基埋管换热器的换热性能差

异,建立实际尺寸的双 U 型钻孔埋管换热器的模型,并在相同的岩土热物性参数及岩土初始温度下对其进行了非稳态数值模拟,同时结合前述方法对桩基也进行了相同的模拟分析。

钻孔换热器尺寸及有关参数如表 3 所示。

表 3 并联双 U 型钻孔埋管换热器尺寸

钻孔深度/m	钻孔直径/mm	U 型管外径/mm	管壁厚/mm	支管中心距/mm	计算范围/m
100	135	25	2.3	70	5×5

图 11 和图 12 分别为桩基和钻孔埋管换热器夏季分别运行 10 h 沿深度方向的中心截面温度分布云图。可以看出,桩基埋管换热器 2 组 U 型管间距较远,运行 10 h 后 2 组 U 型管间的热干扰还很小;而钻孔埋管换热器不同,由于 2 组 U 型管间距很近,2 组 U 型管间热干扰较为严重。

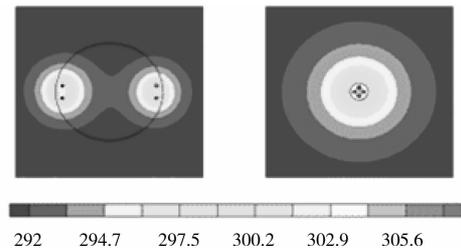


图 11 桩基与钻孔埋管换热器放热时水平截面温度分布云图

表 4 为桩基与钻孔埋管换热器换热量的模拟值对比表。模拟时为保证 2 种换热器管内流速相同,则钻孔埋管换热器流量为桩基埋管换热器的 2 倍。对比可知,单位长度桩基埋管换热器的换热量远大于钻孔埋管换热器,说明桩基埋管换热器具有更好的换热性能。

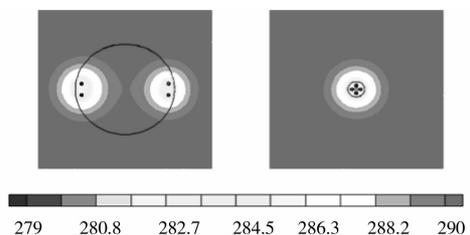


图 12 桩基与钻孔埋管换热器吸热时水平截面温度分布云图

表 4 桩基与钻孔埋管换热器换热性能比较

换热器类型	流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	夏季换热量/(W·m <sup>-1</sup> )	冬季换热量/(W·m <sup>-1</sup> )
桩基埋管换热器	0.6	119	91
钻孔埋管换热器	1.2	71	54

## 4 结论及展望

1) 钻孔与桩基埋管换热器换热机理相似,但由于两者结构尺寸方面的差异,钻孔埋管换热器的传热模型不能直接用于分析桩基埋管换热器。

2) 在相同岩土体中,换热器的换热性能首先与换热器类型有关,也与管内流速以及进口温度与岩土体初始温度之差有关。一般而言,管内流速越大,换热性能越好;进口温度与岩土体初始温度之差越大,换热性能也越好。

3) 数值模拟结果与实验值有较好的吻合性,验证了所采用的数值模拟方法的可靠性,为使用数值模拟方法分析桩基埋管换热器奠定了基础,提高了研究效率,可为地源热泵的优化设计和可靠运行提供技术支持。

4) 采用数值模拟手段对钻孔和桩基埋管换热器的换热性能进行了对比分析,结果证明桩基埋管换热器的换热性能明显优于钻孔埋管换热器。

试验对南京某项目桩基埋管换热器同步进行了热响应测试和结构响应测试。笔者仅从桩基埋管换热器换热性能的视角展开了研究,关于结构响应测试方面的研究成果将在后续工作中展开讨论。

(致谢:文中的桩基热响应实测工作得到了南京江宁科技展览馆指挥部和南京丰盛新能源科技股份有限公司的大力支持,以及清华-MIT-剑桥三校低碳大学联盟基金(300907001)的资助,特此致谢!)

### 参考文献:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2010[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81-122.
- [3] Monique D E, Peter M B, Abdelmalek B, et al. Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 2683-2696.
- [4] Suryatriyastuti M E, Mroueh H, Brulon S. Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16: 3344-3354.
- [5] 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.
- [6] Li M, Alvin C K L. Heat-source solutions to heat conduction in anisotropic media with application to pile and borehole ground heat exchangers [J]. Applied Energy, 2012, 96: 451-458.
- [7] Li M, Alvin C K L. New temperature response functions (G functions) for pile and borehole ground heat exchangers based on composite-medium line-source theory [J]. Energy, 2012, 38: 255-263.
- [8] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [9] 刁乃仁, 方肇洪. 地理管地源热泵技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [10] 方肇洪, 刁乃仁, 曾和义. 地热换热器的传热分析[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 685-687.
- Fang Z H, Diao N R, Zeng H Y. Heat transfer analysis of ground heat exchanges [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(4): 685-687
- [11] 杨卫波, 施明恒. 基于线热源理论的垂直 U 型埋管换热器传热模型的研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(5): 482-488.
- Yang W B, Shi M H. Study on heat transfer model of vertical u-tube ground heat exchangers based on line heat source theory [J]. Acta Energetica Sinica, 2007, 28(5): 482-488.
- [12] 李新国, 赵军, 王一平, 等. 太阳能、蓄热与地源热泵组合系统的应用与试验[J]. 太阳能学报, 2009, 30(12): 1658-1661.
- Li X G, Zhao J, Wang Y P, et al. The application and experiment of solar-ground coupled heat pump with heat storage [J]. Acta Energetica Sinica, 2009, 30(12): 1658-1661.
- [13] 中华人民共和国建设部. GB 50366—2009 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [14] 刘俊, 张旭, 高军, 等. 地源热泵桩基埋管传热性能测试与数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(6): 727-731.
- Liu J, Zhang X, Gao J, et al. Heat transfer performance test and numerical simulation of pile-pipe ground source heat pump system [J]. Acta Energetica Sinica, 2009, 30(6): 727-731.
- [15] 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(17/18): 2295-2304.
- [16] 张旭, 王松庆, 刘俊. 世博轴及地下综合体工程地源热泵系统运行特性模拟研究[J]. 制冷技术, 2010(Sup1): 13-16.
- Zhang X, Wang S Q, Liu J. Simulation study on ground-source heat pump performance characteristics in Expo Axis and underground syntheses project [J]. Refrigeration Technology, 2010(Sup1): 13-16.
- [17] 张志鹏. 地源热泵垂直土壤换热器温度过程与换热性能研究[D]. 镇江:江苏大学, 2010.