

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1610

基于能量桩现场试验的土体综合热导率系数研究

任连伟¹, 孔纲强², 郝耀虎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 210098;
3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 能量桩技术兼具支撑上部荷载和浅层地热能换热器双重功能; 作为一种节能减排技术, 近年来在国内外获得了一定的发展。然而, 目前简单套用基于传统埋管换热器获得的土体综合热导率系数, 无法准确计算能量桩换热效率。依托河南理工大学某低承台 3×3 能量桩群桩工程应用, 开展基于能量桩的土体综合热导率系数测试现场试验和数值模拟研究, 分析加热时长、加热功率、流速及桩长等因素对土体综合热导率系数的影响规律, 继而探讨能量桩在群桩中的布置形式对土体综合热导率系数的影响规律。研究表明, 基于传统地源热泵测试所发展起来的土体综合热导率系数线热源分析方法, 并不适用于分析基于能量桩现场实测所获得的相关数据; 有必要推导一套考虑桩径影响的、适用于能量桩的土体综合热导率系数测试与计算分析方法。

关 键 词: 能量桩; 综合热导率系数; 现场试验; 数值模拟

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)12-4857-08

Study of soil comprehensive thermal conductivity coefficient based on field test of energy pile

REN Lian-wei¹, KONG Gang-qiang², HAO Yao-hu², LIU Han-long^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400045, China)

Abstract: Energy pile is an energy-saving and emission-reduction technology, combining the functions of structure load supporter and shallow geothermal heat exchanger. There has been application in the world in recent years. Normally, the comprehensive thermal conductivity coefficient of soil is measured through ground source heat pump technique. However, this value is unsuitable to calculate the heat exchange efficiency of energy pile accurately. Field tests and numerical simulations on the soil thermal conductivity coefficient were obtained in energy pile group with low cap located on Henan Polytechnic University. The influence of heating time, heating power, flow rate, pile length and the arrangement of energy pile in groups on the soil comprehensive thermal conductivity coefficient are analyzed. It shows that the line heat source analysis method, based on the ground source heat pump testing, is unsuitable for the calculation of soil comprehensive thermal conductivity coefficient. Hence, it is necessary to develop one testing and analyzing method which can considering pile diameter, etc.

Keywords: energy pile; comprehensive thermal conductivity coefficient; field test; numerical simulation

1 引 言

能量桩(又称能源桩、热交换桩)技术是基于传统竖向埋管地源热泵和桩基础发展起来的, 既

有满足支撑上部建筑荷载功能、又有实现浅层地热能热交换功能^[1-2]。针对能量桩的热力学响应及承载性能, 相关研究人员开展了系列现场实测研究, 并取得了一定的成果。相关研究人员介绍了欧洲地区

收稿日期: 2018-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(No.51778212, No.U1810203)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51778212, U1810203).

第一作者简介: 任连伟, 男, 1980 年生, 博士, 副教授, 主要从事桩-土相互作用方面的教学与研究工作。E-mail: renhpu@163.com

通讯作者: 孔纲强, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事桩-土相互作用及能量桩技术与应用方面的教学与研究工作。

E-mail: gqkong1@163.com

依托桩基础、隧道等地下结构,布置传热管构成能源地下结构的工程应用案例^[3];开展了循环温度荷载下桩基的热-力耦合响应、温度引起的桩身轴力等现场实测工作^[4-6],分析了传热管埋管形式、循环水速度等因素对能量桩传热和热响应特性的影响规律^[7-9];并初步探讨了能量桩承载力设计与计算^[10]。相关研究成果为掌握循环温度荷载和建筑结构荷载联合作用下能量桩的热力学响应与承载性能提供了良好的数据支撑。

土体热导率系数是影响能量桩换热功率计算的最关键参数之一^[11],进而会影响桩体的热-力耦合特性。相关研究人员针对典型性土体开展了导热系数室内测试工作,并在优化测试方法、热导率系数预测模型等方面进行了积极探索^[12-15]。然而,由于取样对土体结构性的扰动、地下水等因素影响,室内实验室测试结果无法有效反映现场实际土层的热导率系数;因此,直接利用现场热响应测试获得土体的综合热导率系数就显得较为重要。目前土体综合热导率系数测定均是基于传统地埋管换热器获得的,直接套用该参数为能量桩换热功效进行计算。传统地埋管与能量桩两类结构形式具有巨大差异:传统地埋管一般深度为 80~120 m、孔径为 15~20 cm、回填材料为砂土等散体材料;而能量桩一般深度为 20~40 m、孔径为 60~100 cm、回填材料为混凝土等密实材料。相关数值模拟结果表明,基于能量桩测定土体综合热导率系数时,能量桩中传热管深度、加热时长、埋管形式及传热管直径等因素均会影响其最终结果值^[16]。

因此,本文依托河南理工大学低承台 3×3 能量群桩工程应用,首先开展基于能量桩的土体综合热导率系数现场试验和数值模拟研究;分析加热时长、加热功率、输入温度、流速等因素对土体综合热导率系数的影响规律,继而探讨能量桩在群桩中的布置形式对土体综合热导率系数的影响规律。

2 现场试验概况

2.1 依托工程背景

本文现场试验位于河南省焦作市,以河南理工大学锅炉房基础改造工程为依托,既有锅炉房总高度为 21.6 m,原有建筑面积为 1 610 m²,为单层建筑;一层改建建筑面积为 349 m²,分别在 10.25、15.75 m 高度处增加两层楼板,二、三层各增加两排柱及填充墙;既有建筑外景、新增楼面板及改造既有柱子与承台实物图如图 1 所示。在既有基础上增加微型钢管桩、增大承台以支撑上部增加荷载量。

既有桩基础的桩长为 8 m、桩径为 0.6 m。新增微型钢管桩以静压方式打入既有桩基础周围,并浇筑承台;承台尺寸为 3.3 m×3.3 m×1.85 m,承台埋深为 0.9 m;8 根微型钢管桩桩长为 13 m、桩径为 0.159 m、壁厚为 5 mm,桩间距为 1.25 m,钢管桩伸入承台内长度为 10 cm;桩基础结构示意图、承台钢筋笼与微型钢管桩、上部结构实物图分别如图 2(a)和 2(b)所示。



图 1 既有建筑及重点改造部位实物图
Fig.1 Photos of existing building and the reconstruction parts

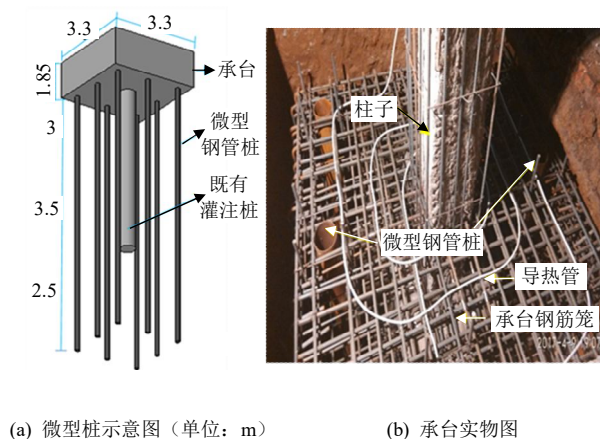


图 2 改造桩基础结构
Fig.2 Reconstruction pile foundation structure

2.2 能量桩及仪器设备布置

以桩基础中间对称位置的两根桩为研究对象,桩内埋管形式为单 U 型;且通过均匀布置在承台内的导热管(间距为 35 cm)将两桩串联。导热管材料为 PAP12-16 铝塑管材,内径为 12 mm、外径 16 mm。在距桩顶分别为 3、6.5、9 m 位置处分别布设 3 组钢筋应力计与温度计。钢筋计焊接在直径 12 mm 的螺纹钢筋上,通过钢筋将其放置于钢管桩中心位置处;测试仪器布置图如图 3 所示。

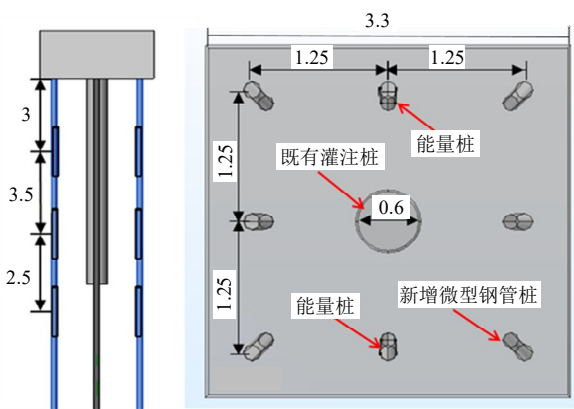


图 3 测试仪器布置图 (单位: m)

Fig.3 The layout of measurement cells(unit: m)

2.3 现场土性参数

根据勘察资料显示, 试验范围内土体为粉质黏土层, 地下水位埋深约为 2 m; 20 m 范围内土层平均重度为 19.2 kN/m³, 压缩模量为 5.0 MPa, 含水率约为 28%, 液限和塑限分别为 18%和 35%。

2.4 现场试验方案与工况设计

在进行热响应测试结果分析时, 使用最广泛的地埋管换热器理论模型为无线长线热源模型。在恒定加热功率 Q 与流速 V 下, 其计算方程^[17]为

$$T_f(t) - T_g = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + q \left\{ R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \right\} \quad (1)$$

$$T_f(t) = \frac{T_{in}(t) + T_{out}(t)}{2} \quad (2)$$

式中: T_{in} 和 T_{out} 分别为导热管进出口水温(K 或 °C); $q = Q/L$ 为单位长度热交换率 (W/m), L 为热交换体的长度 (m); T_g 为土体稳态温度 (K 或 °C); R_b 为钻孔或桩基热阻 ((K·m)/W); r_b 为热交换体半径 (m); α 为土体热扩散率 (m²/s); γ 为欧拉常数 ($\gamma = 0.577 2$); λ 为土体热导率系数 (W/(m·K))。

当 q 为常数时, 流体温度 $T_f(t)$ 与 $\ln(t)$ 呈线性关系, 其斜率为 k , 则式 (1) 可写为

$$T_f(t) = k \ln(t) + b \quad (3)$$

其中:

$$b = q \left\{ R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \right\} + T_g \quad (4)$$

由式(4)可得, 土体综合热导率系数 $\lambda = q/4\pi k$ 。

计算分析遵循最短时间原则, 当 $F_0 = \alpha t / r_b^2 > 5$ 时所得结果误差在 10%以内, 取 $\alpha = 10^{-6}$; 本试验计

算所得 t_{min} 约为 9 h; 因此, 整个试验过程循环及数值模拟时间选为 48 h 满足精度要求。

美国地源热泵规范建议在钻孔埋管的 TRT 测试中取 50~80 W/m; 能量桩相对于钻孔埋管而言, 其桩径相对更大、换热效率也更高, 能量桩的测试加热功率相对取大值^[18]。本试验中所采用的加热功率分别为 3、4、8 kW, 换热管总长度为 34 m, 单位长度加热功率分别为 88、118、235 W/m。具体试验工况见表 1 所示。

表 1 本文测试工况表

Table 1 Conditions of measurement carried out in this study

编号	加热功率/kW	流速/(m/s)	桩长/m	桩基形式	测试方法
1	3	0.51	13.0	单桩	数值模拟
2	4	0.51	13.0	单桩	数值模拟
3	8	0.51	13.0	单桩	数值模拟
4	3	0.51	13.0	2 桩串联	现场实测
5	4	0.51	13.0	2 桩串联	现场实测
6	8	0.51	13.0	2 桩串联	现场实测
7	4	0.51	19.5	单桩	数值模拟
8	4	0.51	26.0	单桩	数值模拟
9	4	0.26	13.0	单桩	数值模拟
10	4	1.02	13.0	单桩	数值模拟
11	4	0.51	13.0	2 桩串联	数值模拟
12	4	0.51	13.0	4 桩串联	数值模拟
13	4	0.51	13.0	8 桩串联	数值模拟

3 数值模型的建立与验证

3.1 模型建立

基于 COMSOL Multiphysics 数值软件, 建立尺寸为 10 m×10 m×19 m 的数值模型; 桩体和承台尺寸与现场试验一致; 桩体和承台采用固体传热模式、土体采用多孔介质传热模式。采用线单元模拟管内流体, 通过非等温管流的设定模拟流体与管壁以及土体间的换热过程。导热液体为水, 模型中桩体材料以及土体综合热物性参数见表 2 所示。桩体、土体均采用自由四面体单元网格划分; 为提高计算精度, 对桩体、桩与承台接触面做较细化处理, 模型网格划分如图 4 所示。

表 2 数值材料参数表

Table 2 Material parameters used in numerical model

材料	热导率系数 λ /(W/(m·K))	比热容 C_p /(J/(kg·K))	重度 γ /(kN/m ³)
混凝土	1.6	880	24.0
土体	1.2	1 500	19.0
钢管	41.0	440	78.7

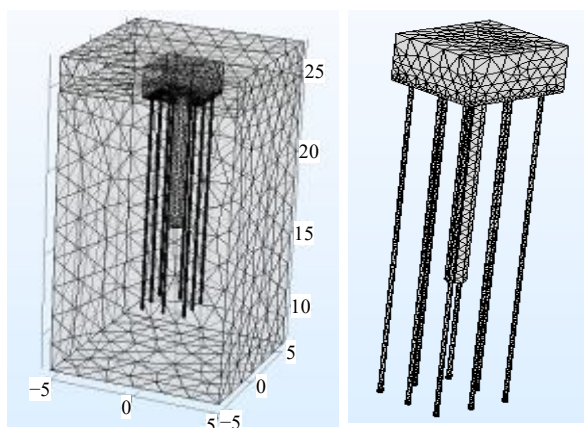


图4 数值模型网格划分图
Fig.4 Mesh of numerical model

3.2 边界条件与初始条件

能量桩的传热特性是由气温和土体温度共同影响决定的, 试验场地在室内, 一天时间内环境温度变化幅度较小; 土体温度在沿水平方向上变化不大, 初始温度设为一致。而在沿深度方向土体温度变化相对较大, 因此, 根据桩内不同位置处温度传感器所测温度来设置土体初始温度, 每层土体初始温度设定与传感器实测温度一致, 相邻温度传感器之间土体温度根据线性插值选取。模型底面以及四周面设为热绝缘面。桩体初始温度设定与土体一致。

3.3 数值模拟工况

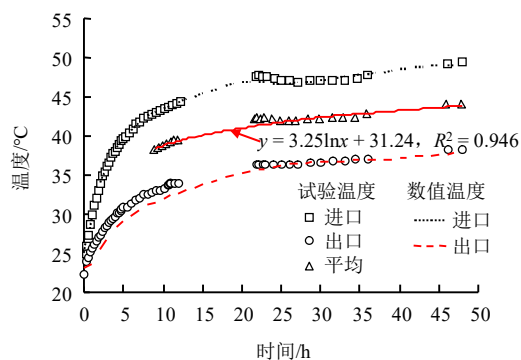
针对两个桩体串联的情况, 分别在 3、4、8 kW 的加热功率下进行土体热响应测试, 并将计算结果与试验所测值进行对比, 其中模型输入温度为试验入口温度实测值。对于单桩热响应测试, 分别针对不同的加热功率、桩长、流速以及布置形式等进行分析。具体数值模拟工况见表 1。

3.4 数值模型的验证与分析

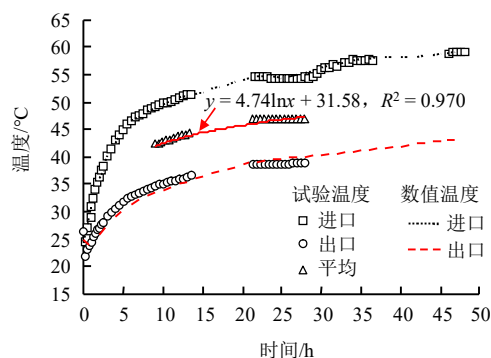
不同加热功率下数值模拟计算与现场实测所得的桩体进出口水温对比如图 5 所示。

由图 5 可见, 3 kW 与 4 kW 加热功率下, 导热管出口水温数值计算与试验结果基本一致, 4 kW 功率加热下进行 28 h 后出水口温度计损坏, 数据停止记录。8 kW 加热功率时, 试验过程中水温升高较快, 当进行到近 13 h 时水温就超过 70 °C, 水管在高温下发生软化, 接口处在断开, 因此试验终止。加热功率为 8 kW 时, 试验前期与数值计算结果略有不同, 但两者水温变化规律基本一致; 且随着时间的推移数值大小也接近相等, 由此验证本文所建立的数值模型的合理性。

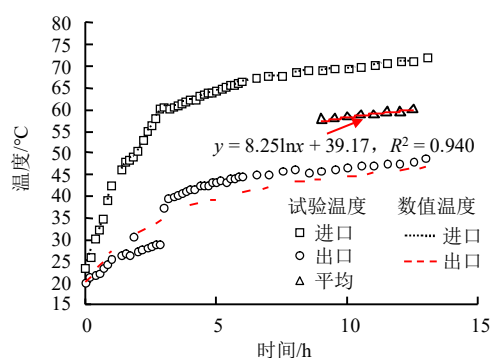
试验过程中, 分别测量桩体进出口液体温度 T_{in} 及 T_{out} , 根据进出口水温差以及循环液体质量流速



(a) 3 kW



(b) 4 kW



(c) 8 kW

图5 数值模拟与现场试验对比结果

Fig.5 Comparison between the numerical simulation and field test result

可以得出桩体的实际输入功率:

$$Q = v \rho_{\text{fluid}} c_{\text{fluid}} \nabla T_{\text{fluid}} \quad (5)$$

式中: v 为液体流速 (m^3/s); ρ_{fluid} 为液体密度 (kg/m^3); c_{fluid} 为液体比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); ∇T_{fluid} 为进出口水温差。

根据进出口水温平均值计算土体热导率系数, 由于试验为两桩串联连接, 因此, 定义试验所求得的热导率为 λ^* , 与综合热导率系数 λ 加以区分。

不同加热功率下现场试验与数值计算所得的 λ^* 值见表 3 所示。由表可知, 相同计算时间段内 3 kW 与 4 kW 所测得的 λ^* 分别为 1.87 和 1.88, 两者基本一致。8 kW 加热功率试验只进行了 13 h, 在此时间

段内较其他两个功率下计算所得 λ^* 略低，可能原因是加热功率相对较高，土壤内水分迁移较快，土体热物性有所改变，还有可能是试验时间不足， λ^* 还未趋于稳定。但数值计算与试验所得结果整体基本一致。

表 3 本文 2 根能量桩串联实测与数值计算 λ^* 值

Table 3 The λ^* values of two connect energy pile through measurement and numerical simulation in this work

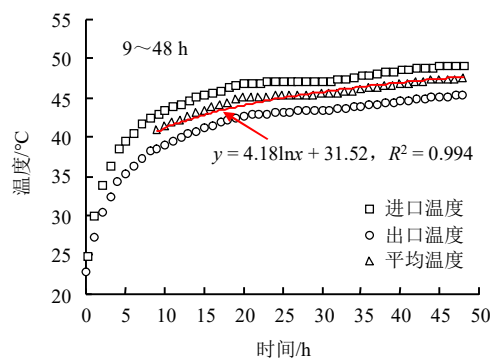
加热功率 /kW	加热时长 /h	实测功率/kW		λ^* 值/(W/(m·K))	
		试验	数值	实测	数值
3	48	2.6	2.7	1.87	1.83
4	48	3.8	3.7	1.88	1.57
8	13	5.7	6.0	1.62	1.81

4 研究结果与分析

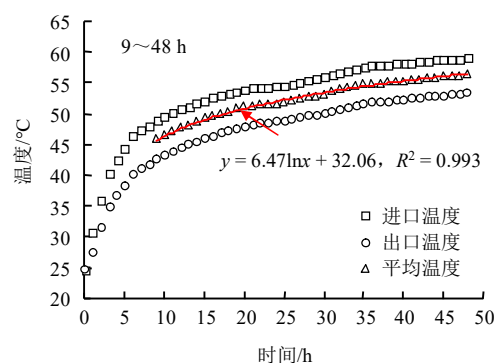
4.1 加热功率与计算时间的影响规律

取不同时间跨度（即不同加热周期）分析土体综合热导率系数，会获得不同的 λ 值。3、4、8 kW 加热功率下，扣除满足 $F_0 > 5$ 所需的 9 h 后，单根能量桩取 9~13 h 或 9~48 h 段分析土体综合热导率系数，数值模拟所得温度随时间变化规律如图 6 所示。由图可见，不同加热功率下进出口水温平均值拟合度相对较好，由式（3）计算获得各种情况下土体综合热导率系数 λ 值见表 4 所示。由表可见，在 9~13 h 时间段内， λ 值随着加热功率的增加而略有减小；当加热功率增加约 50% 时， λ 值变化量仅 1.6%；即在相同计算时间段内，加热功率对土体热导率值的计算结果影响甚微。加热功率增加不会减小热导率测试试验所需的时间，但加热周期会对土体的综合热导率系数有一定影响。在 9~48 h 时间段内 3 kW 和 4 kW 加热功率下所测热导率值分别为 1.36 和 1.32，与 9~13 h 段计算值小 3%~10%。

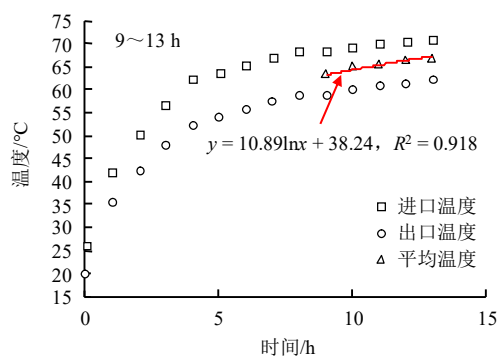
因此，本文针对不同的结束时间进行了土体综合热导率的进一步分析，其变化情况如图 7 所示。由图可知，数值计算输入温度为试验实测温度，由于测量误差以及环境温度的影响，入口温度有所波动，土体综合热导率系数随时间变化会有所波动。但随着计算时间的增加，不同加热功率下热导率系数波动减小并且逐渐趋于一致。因此，要保证有充足的试验时间，以减小由于外界因素引起的计算误差。对比已有文献现场实测获得的土体综合热导率系数 λ 值（见表 5）可知，基于线热源分析方法所获得的 λ 值在 2.4~2.8 之间，明显高于本文基于能量桩现场试验的土体综合热导率系数值（1.62~1.88）；这主要是由于能量桩桩径的差异造成的；换言之，



(a) 3 kW



(b) 4 kW



(c) 8 kW

图 6 不同加热功率下进出口温度与时间关系曲线
Fig.6 Curves on in/out temperature versus time under different heating powers

基于传统地源热泵测试所发展起来的综合热导率系数线热源分析方法，不适用于分析基于能量桩所获得的相关数据，有必要推导一套考虑桩径影响的适用于能量桩的测试分析方法。

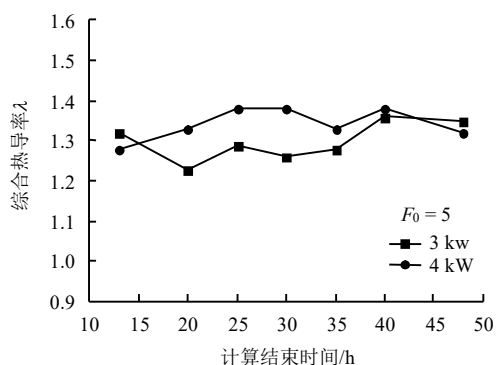
4.2 桩长的影响规律

由表 5 可知，不同桩长下单位长度的热交换率分别为 107、113、116 W/m，最大变化量为 8%。由图 8 可知，桩长增加 1 倍时，输入总功率增加 1.17 倍。随着桩长的增加，土体热导率计算值变大，桩长增加 1 倍时，热导率计算值增加约 11%。随着桩长的增加，导热液体与周围土体的换热量加大，桩体实际的输入功率与桩长变化基本呈正比，进出口

表 4 土体综合热导率系数测试结果汇总表

Table 4 The measured values of thermal conductivity of soils

编号	加热功率/kW	实测功率/kW	流速/(m/s)	桩长/m	桩基形式	时间段/h	$q/(W/m)$	$\lambda (\lambda^*)/(W/(m \cdot K))$
1	3	1.04	0.51	13.0	单桩	9~13	80	1.32
2	4	1.49	0.51	13.0	单桩	9~13	115	1.28
3	8	2.25	0.51	13.0	单桩	9~13	173	1.26
4	3	0.93	0.51	13.0	单桩	9~48	72	1.36
5	4	1.39	0.51	13.0	单桩	9~48	107	1.32
6	4	2.20	0.51	19.5	单桩	9~48	113	1.40
7	4	3.02	0.51	26.0	单桩	9~48	116	1.47
8	4	1.27	0.26	13.0	单桩	9~48	98	1.22
9	4	1.45	1.02	13.0	单桩	9~48	112	1.37
10	4	3.90	0.51	13.0	2 桩串联	9~48	115	1.53
11	4	5.25	0.51	13.0	4 桩串联	9~48	80	1.21
12	4	7.73	0.51	13.0	8 桩串联	9~48	60	1.06

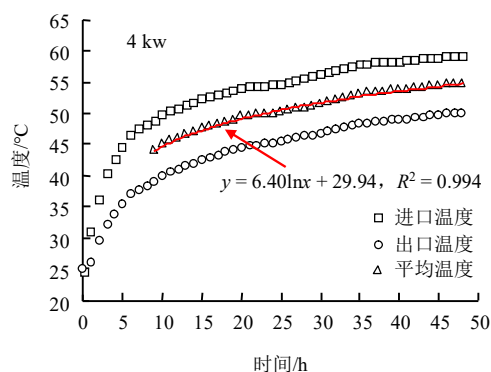
图 7 结束时间对热导率系数 λ 值的影响Fig.7 Thermal conductivity λ values influenced by the end of time表 5 已有文献现场实测热导率 λ 值Table 5 The λ values of field measurement in literature

桩长/m	桩径/mm	循环管	加热功率/(W/m)	分析方法	热导率/(W/(m·K))	参考文献
18	420	2	97~194	线热源	2.38~2.78	You 等 ^[6]
25	600	1~3	57~108	数值	5.80~6.00	Gao 等 ^[9]
12~17	244, 270	1	N/A	线热源	2.40~2.60	Lennon 等 ^[18]
18.3	300~450	2	73~80	线热源	2.50~2.60	Brettmann 等 ^[19]

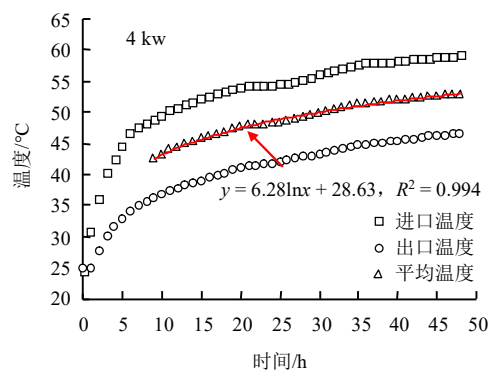
水温差增大, 热导率系数增加。

4.3 流速的影响规律

图 9 为不同流速下桩体热响应数值模拟结果, 当入口温度一定时, 进出口水温差随着流速的增加而减小。当流速提高 3 倍时, 实际输入功率仅约增加 14%; 即仅靠增加流速以提高换热效率作用并不明显。3 种流速下单位长度热交换率分别为 98、107、112 W/m。由表 5 可见, 流速增加 3 倍时相应的土体热导率值增加约 12%, 与数值计算所采用的热导率值相比, 其计算误差有所增加。因此, 在基于能量桩的土体综合热导率系数测试中, 要适当控制流



(a) 1.5 L



(b) 2 L

图 8 不同桩长下进出口温度与时间关系曲线

Fig.8 Curves on in/out temperature versus time under different pile lengths

速大小以保证导热液体与周围土体进行充足的热交换, 来减小测量误差及所需循环泵的功率。

4.4 布置形式的影响规律

不同桩体布置形式下进出口温度与时间关系如图 10 所示, 其中两桩串联时换热总长度为 34 m, 四桩或八桩串联时有效换热总长度分别为 66、128 m。布桩形式会影响导热液体与桩周土体的换

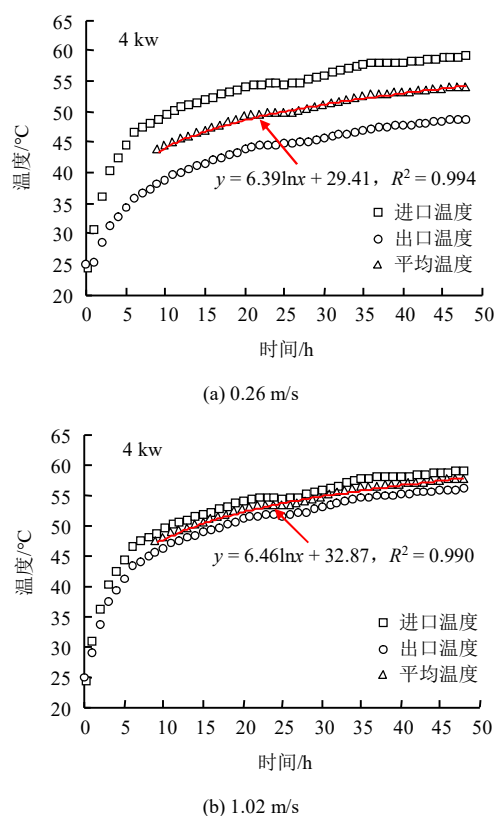


图 9 不同流速下进出口温度与时间关系曲线
Fig.9 Curves on in/out temperature versus time under different flow velocity

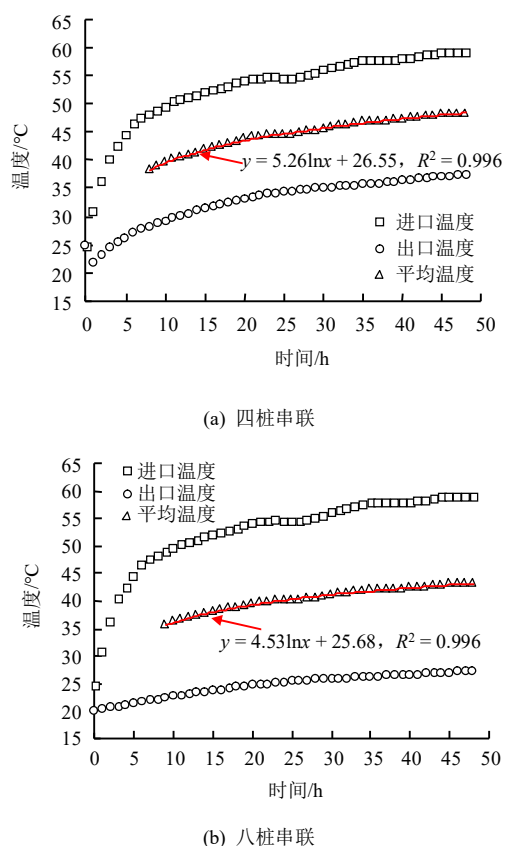


图 10 不同布置形式下进出口温度与时间关系曲线
Fig.10 Curves on in/out temperature versus time under different layouts

热接触面积, 桩体串联数越多导热液体与周围土体热交换量越多, 实际输入功率就越大。由于换热长度的增加, 单位长度热交换率逐渐减小, 分别为 115、80、60 W/m。两桩串联时, 桩间距为 2.5 m; 八桩串联时最小桩间距为 1.25 m; 桩间距减小, 桩体在换热过程中的相互影响增大, 而土体热导率计算值 λ^* 逐渐降低。

5 结 论

综合现场试验与数值模拟方法, 本文对基于能量桩现场试验的土体综合热导率系数的影响因素进行了系统研究, 可以得到如下几点主要结论:

(1) 基于传统地源热泵测试所发展起来的土体综合热导率系数线热源分析方法, 并不适用于分析基于能量桩现场实测所获得的相关数据; 因此, 有必要推导一套考虑桩径影响的、适用于能量桩的土体综合热导率系数测试与计算分析方法。

(2) 本文试验条件下, 加热功率、计算时长对土体综合热导率系数值的影响可忽略不计; 当入口流速增加 3 倍或桩长增加 1 倍时, 土体综合热导率值仅分别增加 12% 和 11%。

(3) 基于群桩测试土体综合热导率系数时, 随着串联桩体数量的增加, 桩体之间的相互影响将变大, 单位长度热交换率逐渐减小, 计算所得的土体综合热导率系数值降低。因此, 基于群桩测试土体综合热导率系数时, 要确保一定的桩间距以减小桩体之间的相互影响, 提高土体综合热导率系数的计算精度。

此外, 本文结论主要基于两根串联微型钢管桩的现场试验和数值计算结果, 土体综合热导率系数确定方法以及参数敏感性还有待更多现场试验来进一步验证和完善。

参 考 文 献

- [1] 余闯, 潘林有, 刘松玉, 等. 热交换桩的作用机制及其应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 933—937, 948.
YU Chuang, PAN Lin-you, LIU Song-yu, et al. Working mechanism and application of heat exchanger piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(4): 933—937, 948.
- [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, 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.
- [3] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. **Géotechnique**, 2006, 56(2): 81—122.
- [4] BOURNE-WEBB P J, AMATYA B L, 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] 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.
- [6] YOU S, CHENG X H, GUO H X, et al. In-situ experimental study of heat exchange capacity of cfg pile geothermal exchangers[J]. **Energy and Buildings**, 2014, 79: 23—31.
- [7] WANG C L, LIU H L, KONG G Q, et al. Different types of energy piles with heating-cooling cycles[J]. **Geotechnical Engineering**, 2017, 170(3): 220—231.
- [8] WANG C L, LIU H L, KONG G Q, et al. Model tests of energy piles with and without a vertical load[J]. **Environmental Geotechnics**, 2016, 3(4): 203—213.
- [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] ROTTA LORIA A F, LALOU L. The equivalent pier method for energy pile groups[J]. **Géotechnique**, 2017, 67(8): 691—702.
- [11] 张楠, 夏胜全, 侯新宇, 等. 土热传导系数及模型的研究现状和展望[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1550—1562.
- ZHANG Nan, XIA Sheng-quan, HOU Xin-yu, et al. Review on soil thermal conductivity and prediction model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(6): 1550—1562.
- [12] 徐婕, 朱合华, 闫治国. 淤泥质黏土火灾高温下导热系数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2108—2113.
- XU Jie, ZHU He-hua, YAN Zhi-guo. Experimental studies on coefficient of thermal conductivity of silty clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(11): 2108—2113.
- [13] 张涛, 蔡国军, 刘松玉. 南京地区典型土体热学特性与预测模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(3): 655—661.
- ZHANG Tao, CAI Guo-jun, LIU Song-yu. Thermal properties and prediction model of typical soils in Nanjing area[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2014, 44(3): 655—661.
- [14] 何春木, 邱战洪, 陈合龙, 等. 南方地区城市生活垃圾导热系数的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1057—1062.
- HE Chun-mu, QIU Zhan-hong, CHEN He-long, et al. Experimental determination of the thermal conductivity coefficients of municipal solid wastes in South China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 1057—1062.
- [15] 董西好, 叶万军, 杨更社, 等. 温度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2888—2894, 2900.
- DONG Xi-hao, YE Wan-jun, YANG Geng-she, et al. Experimental study of influence of temperature on thermal properties of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2888—2894, 2900.
- [16] 李翔宇, 郭红仙, 程晓辉. 能源桩温度分布的试验与数值研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(4): 102—110.
- LI Xiang-yu, GUO Hong-xian, CHENG Xiao-hui. Experimental and numerical study on temperature distribution in energy piles[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2016, 49(4): 102—110.
- [17] MIMOUNI T, LALOU L. Behaviour of a group of energy piles[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(12): 1913—1929.
- [18] LENNON D J, WATT E, SUCKLING T P. Energy piles in Scotland[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Deep Foundations on Bored and Auger Piles. London: Taylor and Francis, 2009.
- [19] BRETTMANN T, AMIS T. Thermal conductivity evaluation of a pile group using geothermal energy piles[C]//Proceedings of GeoCongress 2012 (GSP 225). Reston, VA: ASCE, 2011: 4436—4445.