

滨海软土能源桩热力性能数值模拟研究

胡晨晓¹, 秦鹏举^{1*}, 高飞宇¹, 王庆华^{2,3}, 杨梅芳^{2,3}

- (1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024;
2. 上海浅层地热能工程技术研究中心, 上海 200072;
3. 上海市地矿工程勘察(集团)有限公司, 上海 200003)

摘要:研究了滨海软土能源桩的热力性能。基于修正剑桥模型、能量方程和动量守恒方程,建立单桩及群桩三维多物理场耦合有限元模型,系统分析了换热管排布、管壁厚度、地层温度及桩顶荷载对能源桩及其周围土体热力性能的影响。结果表明:(1)单桩和群桩支管间距在100~200 mm时,单位换热量增速显著,超过200 mm后增速减缓;(2)随着管壁厚度增加,单桩和群桩换热量显著降低,超过4 mm后降低幅度减小;(3)桩顶加载前后单桩沉降量变化为0.07 mm,群桩为0.027 mm,说明单桩沉降对荷载变化的响应更加明显;(4)单桩和群桩循环介质流速越快,提热效率越低;当高于0.4 m/s时,提热效率降低幅度减小。研究结果揭示了滨海软土能源桩系统热力性能变化机理,可为滨海地热能桩基工程的设计、材料选型和施工控制提供理论依据。

关键词: 能源桩; 热力性能; 桩-土相互作用; 数值分析

中图分类号: TK529

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical simulation study on thermal performance of energy piles in coastal soft soil

HU Chenxiao¹, QIN Pengju^{1*}, GAO Feiyu¹, WANG Qinghua^{2,3}, YANG Meifang^{2,3}

- (1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Shanghai Engineering Research Center for Shallow Geothermal Energy, Shanghai 200072, China;
3. Shanghai Geological Engineering Exploration (Group) Co., LTD, Shanghai 200003, China)

Abstract: The thermal performance of energy piles in coastal soft soil was investigated. Based on the modified Cambridge model, the energy equation, and the momentum conservation equation, a three-dimensional multi-physics field coupling finite element model for single piles and pile groups was developed. The effects of heat exchange pipe arrangement, pipe wall thickness, ground temperature, and pile top load on the thermal performance of energy piles and surrounding soil were systematically analyzed. The results indicated that: (1) When the branch pipe spacing for single piles and pile groups was within the range of 100 to 200 mm, the unit heat exchange rate increased significantly; However, when it exceeded 200 mm, the growth rate diminished; (2) As the pipe wall thickness increased, the heat exchange rate of single piles and pile groups decreased markedly, with the reduction rate slowing down when the thickness exceeded 4 mm; (3) The settlement change of single piles before and after pile top loading was 0.07 mm, while for pile groups, it was 0.027 mm, suggesting that single piles exhibited a more pronounced settlement response to load variations; (4) For both single piles and pile groups, the faster the flow rate of the circulating medium, the lower the heat extraction efficiency; When the flow rate exceeded 0.4 m/s, the decrease in heat extraction efficiency slowed down. The results elucidated the mechanisms underlying the changes in thermal performance of coastal soft soil energy pile systems, providing a theoretical foundation for the design, material selection, and construction control of coastal geothermal energy pile foundation engineering.

收稿日期: 2025-04-16; 修回日期: 2025-05-21; * 通信联系人, E-mail: qinpengju@tyut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177138; 41907239)

作者简介: 胡晨晓(1999—), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事能源桩数值模拟研究; 秦鹏举(1986—), 男, 山东东营人, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程和环境岩土工程等方面的研究。

引用格式: 胡晨晓, 秦鹏举, 高飞宇, 等. 滨海软土能源桩热力性能数值模拟研究[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版), 2026, 39(1): 10-18.

HU Chenxiao, QIN Pengju, GAO Feiyu, et al. Numerical simulation study on thermal performance of energy piles in coastal soft soil[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(1): 10-18.

Key words: energy pile; thermodynamic performance; pile-soil interaction; numerical analysis

0 引言

随着社会经济的快速发展,各行各业对能源的需求量显著增加。当前主要供应能源为煤炭、石油和天然气等化石能源。鉴于化石燃料具有不可再生性,并日益趋于紧缺。不加控制地使用化石燃料和不开发利用可持续性的能源技术^[1],将加剧全球能源危机,并对全球能源安全构成威胁^[2]。因此,浅层地热能凭借其可持续且无污染的特性,受到了越来越多的关注^[3-5]。地热能源桩是一种利用浅层地热能作为建筑物供暖与制冷的技术,对于节能以及削减温室气体排放具有重要意义^[6]。地热能源桩兼具结构基础和地源热泵的双重功能,其热力性能已成为众多工程研究人员关注的焦点;而作为一种将能源利用与结构支撑相融合的技术,其在滨海区的应用面临着诸多复杂问题。滨海区的软土物理力学特性受温度变化的影响更为显著。温度的变化会引起土体内部的热传导、水分迁移以及应力变化等一系列复杂的热-水-力变化,从而对能源桩的承载性能、稳定性以及与周边土体的相互作用产生影响。随着能源桩技术的不断发展,探究滨海区软土能源桩与土体的热力学响应以及桩群之间应力的相互影响,具有重大的现实意义。

为确保能源桩的长期正常运转,保障对浅层地热能的开发,人们对能源桩的热力性能开展了广泛且深入的研究。就单桩而言,DING等^[7]针对热-冷循环对饱和黏土中能源桩热力响应带来的影响展开了研究,结果表明,热-冷循环与桩顶沉降呈负相关,且能够提升桩侧阻力,增强桩顶承载特性。孙旻洋等^[8]通过模型试验研究饱和黏土地基中能源群桩的热力特性,发现桩间热扩散导致非加热桩温度升高和桩顶位移增大,群桩平均换热效率低于单桩;制冷工况下位移变化绝对值更大,需重点考虑安全风险。群桩效应使桩顶位移增幅更大,但附加温度应力减小,运行桩数量增加会显著强化热力扰动,导致桩周土压力与孔隙水压力变化加剧。然而,地热能源桩现场试样所涵盖的工况相对较少,借助数值模拟能够深入理解能源桩及其周围土体的热力响应,进而实现优化能源桩设计的目标。

在多物理场的耦合计算中,诸多研究证实COMSOL在土壤水热计算方面的准确性与稳定性^[9-10]。FERRANTELLI等^[11]采用COMSOL建立两种不同边界条件(地板、地板与土壤相结合)的模型,并对计算的热分布进行比较和讨论,发现在平均温度和能量平衡时,边界条件不会对隔热效应产生影响。XU等^[12]运用COMSOL整合模型,计算发现埋管类型对能源桩的热交换和温度控制能力有显著影响,螺旋埋管相比U型埋管展现出了更优异的性能。

在夏季条件下,实心混凝土能源桩在径向方向温差最大,桩边缘的温差约为中心轴线的一半。相较而言,管状能源桩减轻了温度差引起的应力,提升了上部结构的安全性。尽管单桩在运行过程中具有不受桩间效应干扰、升温迟缓和附加应力偏小的优势,但群桩在传热效率、温度响应等方面亦拥有一定长处。因而,人们对群桩也展开了诸多研究。李康^[13]基于COMSOL Multiphysics建立分层地基能源桩数值模型,发现制冷工况下桩身温度呈中间高、两端低的分布特征,制热工况下则反之;此外,土体热导率增加可提升能源桩换热效率,分层土体中能源桩换热能力优于单一土体,间歇运行模式在合理启停时间比下可优化换热效果,而持续运行模式总换热量更大。BEZYAN等^[14]发现螺距尺寸为0.4 m的螺旋形配置的桩基换热器在传热速率和能量输出方面具备较高的效率,同时对于大型桩基施工而言,串联是水冷却方式的最优选择。CUI等^[15]运用COMSOL对能源桩组的热性能进行了研究,发现当桩组之间的间距足够小(即平衡热负荷约为2 m)时,桩组之间的热干扰便会生效,热效应会致使桩体轴向力减小。KONG等^[16]利用COMSOL软件构建了夏季工况下单桩和桩组的传热模型,发现桩间的热干扰会随时间推移而增加。能源桩组中每根桩的换热能力小于单桩单独运行时的换热能力。其中,中心桩受热扰动最为强烈,热交换损失最大,其次是边桩,角桩的热交换损失最少。此外,伴随着桩间距的增加,中心桩、边桩和角桩的热交换损失均有所减小。

目前的研究主要聚焦于能源桩的分布状况、冷热循环以及换热管类型等因素对能源桩热力性

能的影响,关于能源桩中换热管的排布规律以及在不同地层温度下能源桩热力学性能的研究相对较少。基于此,本文通过对不同换热管分布方式以及在不同地层温度下能源桩及土体性能的模拟分析,阐明了换热管排列方式和地层温度对能源桩换热性能的作用机制。同时,还探讨了温度和桩顶荷载共同作用下桩顶和桩周土的位移情况,为实际工程中能源桩沉降问题的考量提供了相应的理论支撑。考虑到实际工程中桩群较为常见,桩群中的各能源桩在工作过程中会产生热干扰,影响周边土体的温度场和应力场,从而改变桩群的整体性能。故而,通过有限元模拟分析,进一步研究了桩群的热力学变化规律,为实际工程中桩群的设计与施工提供了理论依据。

1 能源桩数值模拟控制方程

1.1 剑桥模型

剑桥模型是针对正常固结土和超固结土的排水和不排水三轴试验研究提出的,该模型率先提出了土体临界状态的理念,融合加载硬化原理与能量方程,构建相应模型。该模型阐释了土体的弹塑性变形特性,尤其对土的塑性体积变形进行了考量。之后,该模型经过多次修正与完善。李杭州等^[17]引入统一强度理论和洛德角修正临界状态线,构建了考虑中间主应力与土体结构性的本构模型;基于非关联流动法则定义剪胀方程,将结构性参数嵌入修正剑桥模型屈服函数,并通过黏性土真三轴试验验证了该模型对结构性土体多应力路径的适应性。虞洪等^[18]利用室内试验与 PSO-BP 神经网络反演方法,成功获取湖州典型软土的修正剑桥模型参数。修正后的剑桥模型本质上属于一种临界状态模型,其特征为材料在应力空间中的加载与卸载路径中产生的变形存在差异。同时,该模型还包含了黏土的硬化与软化过程。该本构模型由以下部分组成:

1) 屈服函数

$$F_y = q^2 + M^2(p - p_c)p = 0, \quad (1)$$

式中: q 为土体的偏应力,单位 Pa; M 为饱和状态下临界状态线的斜率; p 为土体的净平均应力,单位 Pa; p_c 为固结压力,单位 Pa;参数 M 可与莫尔-库仑准则中的内摩擦角对应为:

$$M = \frac{6\sin(\Phi)}{3 - \sin(\Phi)}. \quad (2)$$

2) 体积应变增量

$$d\epsilon_{el,vol} = \frac{de}{1 + e_0} = -\frac{\kappa}{1 + e_0} \frac{dp}{p} - \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{dp_c}{p_c}, \quad (3)$$

式中: κ 为土回弹指数; e_0 为初始孔隙比; λ 为压缩指数。

3) 孔隙比

各向同性压缩下土的变形响应由孔隙比与压力的对数曲线描述,分为固结线和膨胀线两条,固结线为:

$$e = e_{ref} - \lambda \ln\left(\frac{p}{p_{ref}}\right), \quad (4)$$

式中: e_{ref} 为参考孔隙比; p_{ref} 为参考压力,单位 Pa。

膨胀线为:

$$e = e_0 - \kappa \ln\left(\frac{p}{p_i}\right), \quad (5)$$

式中: p_i 为初始平均应力,单位 Pa。与总体积应变相联系,可得到:

$$e = (1 + e_0)\epsilon_{vol} + e_0, \quad (6)$$

$$e = e_{ref} - \kappa \ln\left(\frac{p}{p_i}\right) - \lambda \ln\left(\frac{p_c}{p_{ref}}\right) + \kappa \ln\left(\frac{p_c}{p_i}\right). \quad (7)$$

4) 塑性流动规律

根据相关联流动规则($Q_p = F_y$)和屈服面公式,给出了塑性应变的速率方程:

$$\dot{\epsilon}_p = \lambda_p \frac{\partial Q_p}{\partial \sigma} = \lambda_p \left(\frac{\partial Q_p}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \sigma} + \frac{\partial Q_p}{\partial J_2} \frac{\partial J_2}{\partial \sigma} \right). \quad (8)$$

根据偏向和各向同性应力状态,可得:

$$\frac{\partial I_1}{\partial \sigma} = I, \quad (9)$$

$$\frac{\partial J_2}{\partial \sigma} = \text{dev}(\sigma). \quad (10)$$

将其整合可以得到流动规律:

$$\dot{\epsilon}_p = \lambda_p \left(-\frac{1}{3} M^2 (2p - p_c) I + 3 \text{dev}(\sigma) \right). \quad (11)$$

1.2 能量方程

在数值模拟计算当中涉及能量方程、动量方程、传热平衡方程以及土体和桩的本构模型。能量方程在数值模拟中,可用于计算温度场分布以分析物体或系统的热状态,还能通过描述能量的转化与传递来研究热交换、热对流等热过程,进而为工程设计、物理现象等的研究提供热学方面的理论依据与数据支持。

不可压缩流体在管道中流动的能量方程为:

$$\rho AC_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho AC_p \cdot \nabla T = \nabla \cdot A k \nabla T + f_D \frac{\rho A}{2d_h} |u|^3 + Q + Q_{\text{wall}} + Q_p, \quad (12)$$

式中: ρ 为流体密度,单位 kg/m^3 ; A 为管道可用于流动的截面面积,单位 m^2 ; C_p 为恒压下的热容,单位 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为温度,单位 K ; u 为速度场,单位 m/s ; k 为导热系数,单位 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。方程右边的第二项对应于由于黏性剪切而消散的摩擦热。 Q 表示一般热源,单位 W/m ; Q_{wall} 表示通过管壁的外部换热,单位 W/m ; Q_p 为压力功,单位 W/m ,在预期压力下降较大且流体可压缩的情况下可选用此项。

方程(12)中压力功 Q_p 为:

$$Q_p = -\frac{TA}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial T} + u \cdot \nabla p \right). \quad (13)$$

通过管壁的外部换热 Q_{wall} 为:

$$Q_{\text{wall}} = (hZ)_{\text{eff}} \cdot (T_{\text{ext}} - T), \quad (14)$$

式中: $(hZ)_{\text{eff}}$ 为换热系数 h (单位 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$)乘以管壁周长 Z (单位 m)的有效值; T_{ext} 为管道外部温度,单位 K 。

1.3 动量方程

动量方程在数值模拟中,可用于计算流体的速度、压力分布,分析物体所受的升力、阻力等,还能研究流体的流动形态,在水利工程中模拟水流对堤坝的作用,在非等温管道流中模拟流体对管道的压力等,其动量方程为:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla_x (FS) + F_v, \quad (15)$$

式中: ρ_0 为初始质量密度,单位 kg/m^3 ; u 为速度矢量,单位 m/s ; t 为时间,单位 s ; ∇_x 为梯度算子(单位 $1/\text{m}$),表示函数在空间中的变化率; F 为变形梯度; S 为第二Piola-Kirchhoff应力张量,单位 Pa ; F_v 为具有当前配置分量的体力,单位 N/m^3 。

1.4 传热平衡方程

传热平衡方程在数值模拟中,可用于确定系统内的温度分布,还能计算传热速率,帮助评估热传递效果;此外还可用于在非等温管道流中计算流速、压力以分析流动特性,确定系统整体的状态和行为。

固体传热平衡方程为:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_{\text{trans}} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (q + q_r) = -\alpha T: \frac{dS}{dt} + Q, \quad (16)$$

式中: ρ 为密度,单位 kg/m^3 ; C_p 为恒定应力下的比热容,单位 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为绝对温度,单位 K ; u_{trans} 为平移运动的速度矢量,单位 m/s ; q 为传导热通量,单位 W/m^2 ; q_r 为辐射的热通量,单位 W/m^2 ; α 为热膨胀系数,单位 $1/\text{K}$; S 为第二Piola-Kirchhoff应力张量,单位 Pa ; Q 为额外的热量来源,单位 W/m^3 。

2 数值模拟方法验证

基于上述本构模型,运用COMSOL软件对已有研究进行计算,验证本文所用数值模拟方法的合理性。ZENG等^[19]针对非饱和土能源桩开展了热响应测试,并获取了土体温度的空间分布图。研究发现,运行两个月后,桩面附近的土体温度略有上升。当进入夏季降温的峰值负荷阶段时,负荷的增加加快了土体温度的上升速度。随着土体温度的持续升高,桩组内的温度分布变得更加均匀。这一现象表明,影响区域正在逐步扩大。实际上,由于桩组之间的相互作用,中心桩周围的温度显著高于侧桩或角桩周围的温度。通过采用数值模拟方法,对相同条件下的非饱和土能源桩进行了计算。模拟对比结果如图1所示,所得结果相近,证实了所用数值模拟方法可行。李峙等^[20]基于多孔介质混合物理论构建了地热能源桩热-水-力全耦合控制方程,结合COMSOL有限元方法验证模型有效性,为本研究的模型验证提供了参考。非饱和土能源桩模型参数如表1所示。

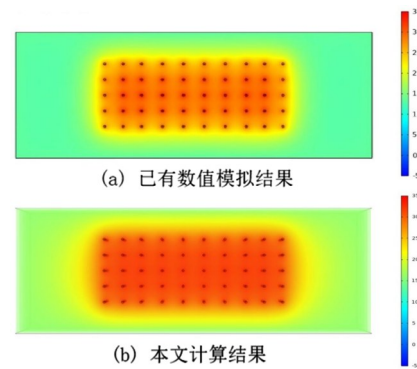


图1 数值模拟结果对比

Fig. 1 Comparison of numerical simulation results

表 1 非饱和土能源桩模型参数

Tab. 1 Parameters of the energy pile model for unsaturated soil

参数	数值
能源桩内径	420 mm
埋深	18 m
管道内径	20 mm
土层深度	40 m
体积流量	0.16 L/s
热膨胀系数	4×10^{-5} 1/K
土层平均孔隙度	0.303
壁层导热系数	0.42 W/(m·K)
地下水位	-21 m

3 数值模型构建及计算步骤

3.1 数值模型建立

计算模型参考滨海地区典型能源桩工程案例,结合《地源热泵系统工程技术规范》(DB 45/T 586—2009)中对桩基换热器尺寸的推荐范围(内径 300~500 mm)进行设定,并根据上海滨海软土典型地层分布(如图 2),确定计算区域土层深度为 30 m。基于上海滨海软土室内试验测定的天然密度范围(1800~2000 kg/m³),取中间值代表均质特性。参考《岩土热物性测试规程》(T/CECS 730—2020)中黏性土热膨胀系数典型值(3.5×10^{-5} ~ 5.0×10^{-5} 1/K),结合滨海软土矿物成分(蒙脱石含量较高)调整取值。循环介质为水(常压下比热容为 4182~4200 J/(kg·K)),与工程中常用循环介质一致。根据换热管材料(HDPE 高密度聚乙烯)的实测导热系数(0.28~0.35 W/(m·K)),选取中间值。通过网格敏感性计算(对比 5 m、8 m、10 m 边界的位移收敛性),确定 8 m 边长可平衡计算效率与边界效应影响。管道内径结合 COMSOL“非等温管道流模块”的网格划分要求(管径与计算区域比例),避免因管径过小导致网格畸变。表 2 显示了能源桩模型参数的详细信息,包括几何尺寸和材料属性,能源桩由混凝土填充而成。再经试算确定计算区域边长为 8 m,高为 30 m。表 3 显示了所用滨海软土的剑桥黏土模型参数。

对于单桩,地基数值模型的计算区域设定为边长 8 m,深度 30 m,单桩模型中的能源桩处于地基模型的正中心位置,能源桩内的布管方式以及群桩计算区域的几何模型如图 3(a)所示。在仿真过程中,桩周土体依照上海典型地层构建模型,土层分布如图 4 所示。能源桩桩身采用 C30 混凝土,

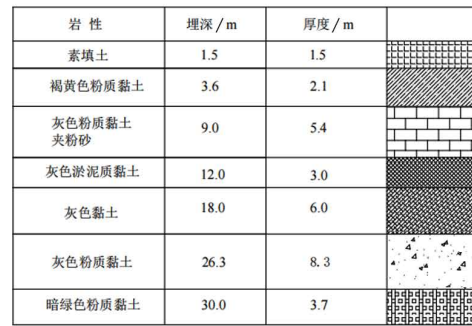


图 2 上海滨海软土典型地层分布

Fig. 2 Typical stratum distribution of soft soil in Shanghai coastal area

表 2 能源桩模型参数

Tab. 2 Parameters of energy pile model

能源桩及土层参数	数值
能源桩内径	400 mm
埋深	29 m
管道内径	12 mm
土层深度	30 m
饱和黏土密度	1900 kg/m ³
热膨胀系数	4×10^{-5} 1/K
循环介质比热容	4200 J/(kg·K)
壁层导热系数	0.3 W/(m·K)

表 3 剑桥黏土模型参数

Tab. 3 Parameters of Cam-Clay model

类别	厚度/m	临界状态应力比 M	压缩指数 λ	回弹指数 κ	初始孔隙比 e_0
素填土	1.5	0.964	0.13	0.028	0.703
褐黄色粉质黏土	2.1	1.076	0.15	0.031	0.837
灰色粉质黏土夹粉砂	5.4	1.334	0.14	0.026	0.791
灰色淤泥质黏土	3.0	0.721	0.29	0.059	1.362
灰色黏土	6.0	0.815	0.28	0.055	1.214
灰色粉质黏土	8.3	1.367	0.18	0.039	0.851
暗绿色粉质黏土	3.7	1.422	0.13	0.027	0.652

埋深为 29 m,桩内换热管通过 COMSOL Multiphysics 非等温管道流模块建立 U 型管模型。整个模型通过固体力学模块和固体传热模块来建立。网格划分的方式为常规单元物理场控制网格,单元类型选取四面体,这种类型更适合网格划分。另外,网格划分由物理场进行控制,允许在不

同物理场的界面处自动对网格进行细化处理。最终单桩数值模型中生成了10 925个单元和51 934个自由度。

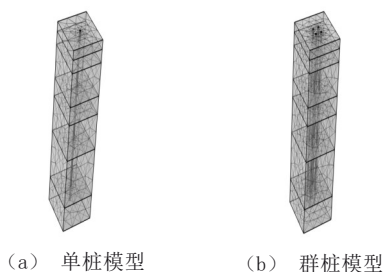


图3 计算的网格模型图

Fig. 3 Computational grid model diagram

对于群桩,地基数值模型的计算区域与单桩相同,同时利用COMSO软件构建了多个能源桩模型,位于以地基模型中心为坐标轴的 ± 0.7 m处。建立群桩所用的模块和物理场与单桩相同。能源桩内的布管方式以及群桩计算区域的几何模型如图3(b)所示。在群桩数值模型的网格划分中,生成了27 939个单元和130 872个自由度。

3.2 数值计算步骤

首先,分析支管间距和厚度对换热量的影响,支管间距从100 mm增加至250 mm时,增加间隔为50 mm,管壁厚度从1 mm增加至6 mm时,增加间隔为1 mm;然后,分析流速和地层温度对换热量的影响;最后,分析桩顶荷载作用下能源桩及其周围土体沉降的特征,对桩顶分级施加荷载,从0~40 000 N/m²,每级增量为10 000 N/m²。以群桩为例,整体的计算模拟过程如图4所示,单桩的模拟过程与群桩相似。

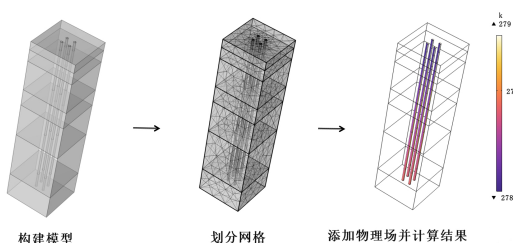


图4 能源桩数值模拟步骤

Fig. 4 Steps for numerical simulation of energy piles

4 结果

4.1 单桩数值模拟结果

单一温度地层中单桩热力特征如图5—图9所示。

如图5所示,当支管间距从100 mm增加至

200 mm时,每增加50 mm,单位换热量分别提高了6.0%和5.7%,从200 mm增加至250 mm时,单位换热量仅提高2.7%。由此可见,在本文所述的支管间距范围(100~250 mm)内,存在两个阶段。第一阶段,支管间距从100 mm增加至200 mm时,单位换热量随支管间距的增加提升较快;第二阶段,在200 mm之后,单位换热量虽随支管间距的增加有所上升,但增速较缓。这是由于支管间距过近会在各支管间产生热干扰^[21-22],热干扰会影响换热管与桩体的热交换,导致设计长度增加以及能源利用率降低,所以应选用较大的支管间距。然而,支管间距不能盲目地增大,过大的支管间距会导致桩径增加,从而大幅提高钻孔成本和混凝土成本,造成资源浪费,因此应在桩径允许的范围内合理增大支管间距,以减小热干扰的影响。

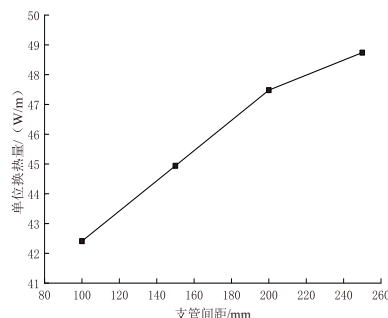


图5 单桩单位换热量随支管间距的变化

Fig. 5 The variation of the heat exchange per unit of single pile with the spacing of branch pipes

如图6所示,管壁厚度从1 mm增加至2 mm时,单位换热量降低了9.0%;从2 mm增加至3 mm时,单位换热量降低了6.6%;从3 mm增加至4 mm时,单位换热量降低了6.4%;从4 mm增加至5 mm以及从5 mm增加到6 mm时,单位换热量均仅降低了4.2%。由此可见,在4 mm以下时,管壁厚度对单位换热量的影响显著,超过4 mm后降低幅度减小。单位换热量随着管壁厚度的增加而降低,这是因为换热管材料的导热系数相对于循环介质、混凝土桩、岩土体等较低,管壁越厚能源桩的换热性能越差。在能源桩的设计中,应在确保管的强度和长期耐久性的前提下,选用较薄的管壁。

如图7所示,管内进出口温差会随流速的增加而大幅减少。这一热量提取的效率还会受到地层温度变化的共同影响,地层温度越高时提热效率下降幅度越大,在管内循环介质流速高于0.4 m/s

时提热效率下降幅度趋于平缓,在地层温度为 20 °C 的情况下流速 0.4 m/s 相较于流速 0.1 m/s 提热效率下降幅度超过 74%,因此,综合考虑提热量和提热效率的情况,建议循环介质的流速不应高于 0.4 m/s。

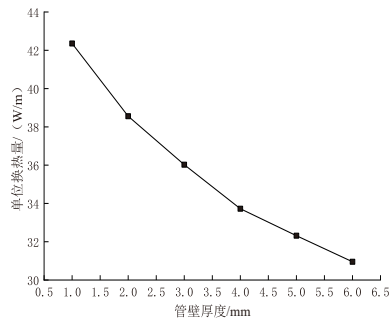


图 6 单桩单位换热量随管壁厚度的变化

Fig. 6 The variation of the unit heat exchange of a single pile with the thickness of the pipe wall

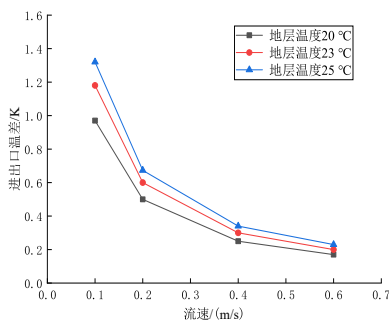


图 7 进出口温差随流速和地层温度的变化

Fig. 7 The temperature difference between the inlet and outlet varies with the flow rate and the formation temperature

研究了桩及桩周土在荷载作用下的沉降规律,在通过能源桩提取浅层地热能时,桩顶因温度应力产生向下的位移;在通过能源桩向地层输送热量时,桩顶产生向上的位移。所以,考虑最大沉降时应研究提取热能时的向下位移。如图 8 所示,桩顶压力从 0 N/m² 开始,以 10 000 N/m² 的变化幅度增加至 40 000 N/m² 时,桩及桩周土由于施加荷载产生较大沉降,且桩顶相较于桩周土产生更明显的位移变化。单桩的整体变形云图如图 9 所示。

4.2 群桩数值模拟结果

单一温度地层中群桩热力特征如图 10—图 14 所示。

如图 10 所示,当支管间距从 100 mm 增加至 200 mm 时,每增加 50 mm,单位换热量分别提高了 1.93% 和 1.67%,从 200 mm 增加至 250 mm 时,单位换热量仅提高 1.24%。由此可见,与单桩支

管间距类似,在本文所述的支管间距范围(100~250 mm)内,存在两个阶段:第一阶段,支管间距从 100 mm 增加至 200 mm 时,单位换热量随支管间距的增加提升较快;第二阶段,在 200 mm 之后,单位换热量虽随支管间距的增加有所上升,但增速较缓。

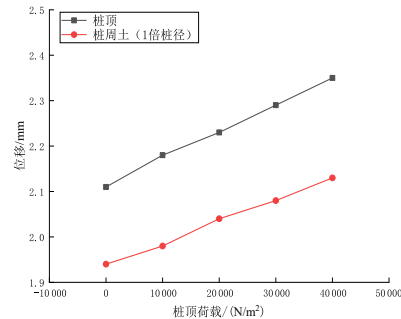


图 8 位移随桩顶荷载的变化

Fig. 8 Variation of displacement with pile head load

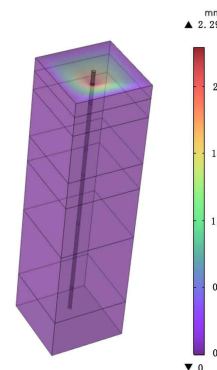


图 9 单桩变形图

Fig. 9 Deformation diagram of single pile

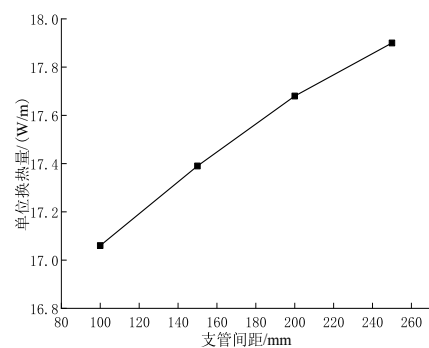


图 10 群桩单位换热量随支管间距的变化

Fig. 10 Variation of unit heat exchange with branch pipe spacing

对于管壁厚度对群桩换热性能的影响,如图 11 所示,管壁厚度从 1 mm 增加至 2 mm 时,单位换热量降低了 2.74%;从 2 mm 增加至 3 mm 时,单位换热量降低了 2.70%;从 3 mm 增加至 4 mm 时,单位换热量降低了 2.54%;从 4 mm 增加至 5 mm 以

及从5 mm增加到6 mm时,单位换热量仅分别降低了1.82%和1.66%。

由此可见,群桩换热量变化幅度相对单桩更小,受管壁厚度的影响更为轻微,这是因为群桩主要从整体外部土体中提取热量,而桩间换热量有限,因此换热管厚度对群桩换热量的变化幅度影响更小。

与单桩变化情况类似,群桩换热管内进出口温差同样会随流速的增加而大幅减少。如图12所示,在各个地层温度下,流速0.4 m/s相较于流速0.1 m/s提热效率下降幅度均超过67%,因此,综合考虑提热量和提热效率的情况,建议循环介质的流速不应高于0.4 m/s。

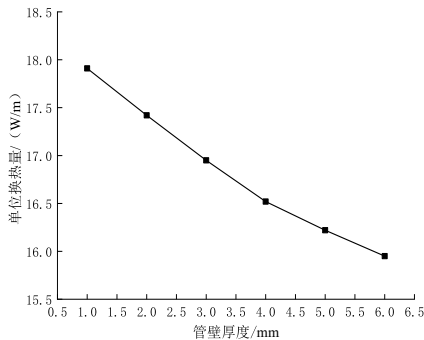


图11 群桩单位换热量随管壁厚度的变化

Fig. 11 Variation of the specific heat exchange rate with pipe wall thickness

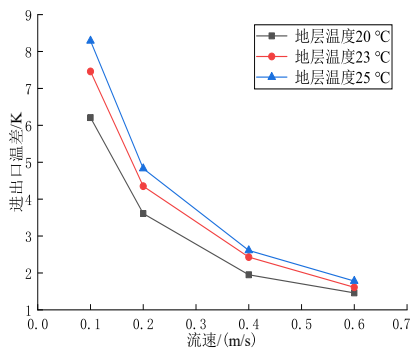


图12 进出口温差随流速和地层温度的变化

Fig. 12 The temperature difference between the inlet and outlet varies with the flow rate and the formation temperature

群桩的具体沉降变化和整体变形云图如图13和图14所示,桩顶压力从0 N/m²开始,以10 000 N/m²的变化幅度增加至40 000 N/m²时,桩及桩周土由于施加荷载产生较大沉降,且群桩的沉降变化相较于单桩更加稳定,桩周土的沉降整体小于桩顶沉降,沉降变化幅度也更小。

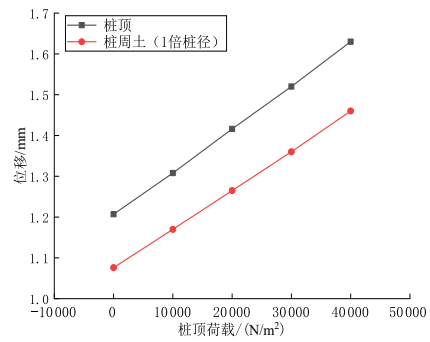


图13 位移随桩顶荷载的变化

Fig. 13 Variation of displacement with pile head load

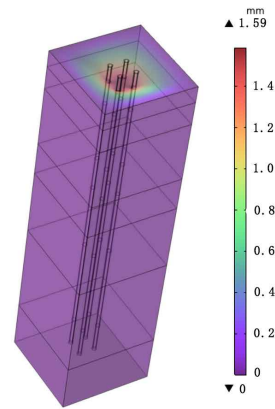


图14 群桩变形图

Fig. 14 Deformation diagram of pile group

5 结论

对滨海区软土能源桩的热力学性能以及其周围土体的力学性能展开了研究。首先,对研究涉及的本构模型、能量守恒方程、动量守恒方程进行了分析。其次,验证能源桩数值模拟方法的可靠性。接着,通过数值模拟方法计算了能源桩单桩和群桩的热力响应。最后,对试验所涉及工况的参数予以分析,并进行数值计算,将两者结果进行对比。得出以下结论:

(1)单桩和群桩支管间距在从100 mm增加至200 mm时,单位换热量随支管间距的增加提升较快;在200 mm之后,单位换热量虽随支管间距的增加有所上升,但增速较缓。

(2)单桩和群桩能源桩管壁厚度在4 mm以下时对单位换热量的影响显著,壁厚超过4 mm后单桩单位换热量相较于1 mm时降幅超过20%,而群桩降幅超过7%。故而,在能源桩的设计中,应在保证管的强度和长期性能的前提下,选用较薄的管壁。

(3)能源桩及桩周土施加荷载会产生较大沉降,随后增加荷载所产生的沉降增幅较小,且群桩比单桩的沉降更小,桩周土的沉降整体小于桩顶沉降,沉降变化幅度也更小。

(4)单桩和能源桩管内进出口温差会随流速的增加而大幅降低,这一热量提取的效率还会受

到地层温度变化的共同影响,地层温度越高时提热效率下降幅度越大,在管内循环介质流速高于 0.4 m/s 时提热量变化幅度趋于平缓。因此,综合考虑提热量和提热效率的情况,建议循环介质的流速不应高于 0.4 m/s。

参考文献:

- [1] PELLEGRINI M, BLOEMENDAL M, HOEKSTRA N, et al. Low carbon heating and cooling by combining various technologies with aquifer thermal energy storage[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 1-10.
- [2] GUAN Yanan, TAI Lingyu, CHENG Zhanjun, et al. Biomass molded fuel in China: Current status, policies and suggestions[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138345.
- [3] FENG Guanhong, WANG Yu, XU Tianfu, et al. Multiphase flow modeling and energy extraction performance for supercritical geothermal systems[J]. *Renewable Energy*, 2021, 173: 442-454.
- [4] HWANG S, OOKA R, NAM Y. Evaluation of estimation method of ground properties for the ground source heat pump system[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(9): 2123-2130.
- [5] ZHENG Bobo, XU Jiuping, NI Ting, et al. Geothermal energy utilization trends from a technological paradigm perspective[J]. *Renewable Energy*, 2015, 77: 430-441.
- [6] CUNHA R P, BOURNE-WEBB P J. A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 158: 112072.
- [7] DING Xuanming, ZHANG Dingxin, WANG Chenglong, et al. Investigation on thermo-mechanical response of energy piles in saturated clay[J]. *Environmental Geotechnics*, 2024, 11(9): 765-780.
- [8] 孙旻洋, 王忠瑾, 谢新宇, 等. 饱和黏土中能源群桩热力特性模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(S1): 382-390.
SUN Minyang, WANG Zhongjin, XIE Xinyu, et al. Model test on thermal-mechanical characteristics of energy pile groups in saturated clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(S1): 382-390.
- [9] WISSMEIER L, BARRY D A. Simulation tool for variably saturated flow with comprehensive geochemical reactions in two and three dimensional domains[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(2): 210-218.
- [10] BEHBEHANI F, MCCARTNEY J S. Energy pile groups for thermal energy storage in unsaturated soils[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 215: 119028.
- [11] FERRANTELLI A, FADEJEV J, KURNITSKI J, et al. Energy pile field simulation in large buildings: Validation of surface boundary assumptions[J]. *Energies*, 2019, 12(5): 770.
- [12] XU C, Wang Y, Meng X, et al. A multiphysics simulation study of the thermomechanical coupling response of energy piles[J]. *Buildings*, 2024, 14(5): 1440.
- [13] 李康. 层状地基中能源桩热力学特性研究[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2024.
LI Kang. Study on thermodynamic characteristics of energy piles in layered foundations[D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2024.
- [14] BEZYAN B, PORKHIAL S, MEHRIZI A A. 3-D simulation of heat transfer rate in geothermal pile-foundation heat exchangers with spiral pipe configuration[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 87: 655-668.
- [15] CUI Ping, YANG Weibo, ZHANG Wenke, et al. Advances in ground heat exchangers for space heating and cooling: Review and perspectives[J]. *Energy and Built Environment*, 2024, 5(2): 255-269.
- [16] KONG Lingpeng, QIAN Lan, XIAO Yunyang, et al. A study on heat transfer characteristics and pile group influence of enhanced heat transfer energy piles[J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 24: 100768.
- [17] 李杭州, 张志龙, 廖红建, 等. 结构性土的三维修正剑桥模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(S1): 12-16.
LI Hangzhou, ZHANG Zhilong, LIAO Hongjian, et al. Three-dimensional modified cam-clay model for structured soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(S1): 12-16.
- [18] 虞洪, 陈晓斌, 易利琴, 等. 软土修正剑桥模型参数反演及其应用研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(11): 3318-3326.
YU Hong, CHEN Xiaobin, YI Liqin, et al. Parameter inversion and application of soft soil modified cambridge model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(11): 3318-3326.
- [19] ZENG Shu, YAN Zhenguo, YANG Jun, et al. Thermal performance of energy piles in unsaturated soils: Experiment, simulation, and case study[J]. *Energy and Buildings*, 2024, 321: 114658.
- [20] 李峙, 刘福深, 杨仲轩, 等. 考虑 THM 耦合的地热能源桩热-力行为分析[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(10): 2129-2138.
LI Zhi, LIU Fushen, YANG Zhongxuan, et al. Thermo-mechanical behavior of energy piles based on coupled THM model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(10): 2129-2138.
- [21] SANI A K, SINGH R M, TSUHA C D H C, et al. Pipe-pipe thermal interaction in a geothermal energy pile[J]. *Geothermics*, 2019, 81: 209-223.
- [22] PARK S, LEE S, LEE D, et al. Effect of thermal interference on energy piles considering various configurations of heat exchangers[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 199: 381-401.

责任编辑: 张伟博 申晓伟