

DOI: 10.11779/CJGE20220920

考虑 THM 耦合的地热能源桩热-力行为分析

李 峙^{1,2,3}, 刘福深^{*1,2,3}, 杨仲轩^{1,2,3}, 詹 伟⁴

(1. 浙江大学岩土工程计算中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058;
3. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 4. 浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 地热能源桩除了可以承受建筑物的上部结构荷载, 还能提供低碳、环保和可持续发展的制冷/制热功能, 因此在土木与能源等行业受到广泛关注。热-水-力 (THM) 三场耦合效应显著影响能源桩和土体的相互作用及其承载变形特性。利用多孔介质混合物理论推导了 THM 全耦合的基本控制方程, 并通过与饱和非等温固结问题的理论解对比, 验证了该耦合问题基于 COMSOL 有限元分析方法有效性。在此基础上, 考虑流体性质随温度的变化和不同的桩土接触模型, 开展了基于 THM 耦合的能源桩二维有限元模型的数值分析, 并与离心数值模型和现场试验数据进行对比。计算结果表明该耦合模型不但能预测能源桩中应力、应变和位移场分布与演化规律, 还能较好地模拟桩土多场耦合行为。研究结果表明, THM 耦合效应对土工分析具有重要影响, 研究成果可为能源桩设计、施工及使用过程中所涉及的多场耦合问题提供参考依据。

关键词: 能源桩; 热-水-力耦合模型; 桩土相互作用; 有限元; 模型验证

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)10-2129-10

作者简介: 李 峙(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事多场耦合和能源桩相关的研究工作。E-mail: lziyx@zju.edu.cn。

Thermo-mechanical behavior of energy piles based on coupled THM model

LI Zhi^{1,2,3}, LIU Fushen^{1,2,3}, YANG Zhongxuan^{1,2,3}, ZHAN Wei⁴

(1. Computing Center for Geotechnical Engineering (COMEGE), Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Engineering Research Center of Urban Underground Space Development of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The energy piles can underpin the superstructures and provide low-carbon, environmentally friendly and sustainable cooling/heating functions, leading to ever-growing attention received from the civil and energy industries. The thermo-hydro-mechanical (THM) coupling may significantly affect the interaction between the energy piles and the surrounding soils, and thus the load-bearing and deformation characteristics. In this study, the basic governing equations for full THM coupling are derived based on the standard mixture theory of porous media. The finite element method THM for and its implementation in COMSOL software are verified through comparisons with the analytical solutions to the saturated non-isothermal consolidation problem. Based on the THM coupled framework, a two-dimensional finite element model for the energy piles is further established considering the change of fluid properties with temperature and different pile-soil contact models, and the specific configuration and modeling procedures are described. The results indicate that the proposed model can predict the distribution and evolution of stresses, strains and displacements on the energy piles, and further capture the multi-physical behaviors associated with the piles and soils. This study highlights the importance of the consideration of THM coupling effects, which can provide a useful guidance for the multi-physical problems involved in the design, construction and utilization of the energy piles.

Key words: energy pile; coupled thermo-hydro-mechanical model; pile-soil interaction; finite element; model verification

0 引 言

由于化石能源的大量使用, 全球气候变化和能源短缺已经成为 21 世纪人类面临的最大挑战之一。随着中国“碳达峰、碳中和”目标的确定, 为减少对化石

能源的消耗和温室气体的排放, 各种清洁能源将得到

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52179112); 国家杰出青年科学基金项目 (51825803); 浙江省交通运输厅科技计划项目 (2021019)

收稿日期: 2022-07-25

***通信作者 (E-mail: fushenliu@zju.edu.cn)**

广泛应用。地热能作为一种绿色环保、储量充足、稳定可靠的可再生能源，具有较强的竞争力和广阔的应用前景。

地热能源桩简称能源桩、能量桩或地热桩，依靠地源热泵系统，在能源桩和桩周土体间进行热量交换。在夏季，通过吸收建筑物的热量制冷；在冬季，摄取地下热量用于建筑物供暖。过去 20 a 的相关研究证明了能源桩在技术和经济上的可行性。利用混凝土良好的储热性能，能源桩可用于建筑物以及道路、隧道等的制热与制冷。相比于传统钻孔地源热泵技术，能源桩将桩基础与热交换管结合，节约了用地面积和钻孔费用，因此该技术已逐渐成为岩土工程研究的热点。

通过原位试验可以研究能源桩在现场条件下的多场耦合行为。Laloui 等^[1]和 Bourne-Webb 等^[2]分别开展了能源桩热-力响应的原位试验，试验场地为砂土和黏土，分别得到了桩体的应力-应变分布及其受力特性。桂树强等^[3]、路宏伟等^[4]也通过原位试验研究了能源桩的结构响应和承载特性。原位试验通常耗时长、成本高，因此缩尺模型试验也常用于研究能源桩的多场耦合特性。Stewart 等^[5]、Goode III 等^[6]、Ng 等^[7]对黏土和砂土层内端承型和摩擦型能源桩开展了离心模型试验，获得了能源桩应力-应变分布规律和承载特性。黄旭等^[8]和孔纲强等^[9]利用模型试验研究了温度循环对能源桩热-力行为的影响。考虑到场地和模型试验普遍具有复杂性和不易重复等局限性，一些学者也采用了数值分析方法，Laloui 等^[1]、Wang 等^[10-11]、Loria 等^[12-13]、Saggu 等^[14-15]、di Donna 等^[16]、Rui 等^[17]、王成龙等^[18]、李翔宇等^[19]验证了原位试验和模型试验结果，并进行了参数敏感性分析。

能源桩温度变化导致桩体产生附加应力与变形，桩周土体出现热-水-力耦合现象，显著影响桩土相互作用及桩承载力学特性，并对建筑物的长期稳定和地热能的利用效果产生影响。Laloui 等^[1]未考虑温度梯度与达西流的耦合作用，而本文基于热流固三场全耦合理论，同时考虑了流体性质随温度的变化，研究能源桩的热-力耦合行为，并且比较了桩土间绝对粗糙和桩土间库仑摩擦的模拟结果。研究成果可为能源桩设计、施工及使用过程中的多场耦合问题提供参考。

1 THM 耦合理论及其验证

1.1 THM 耦合分析简介

多孔介质的热-水-力耦合分析方法已广泛应用于岩土工程的诸多领域，包括地热利用、二氧化碳地质封存、核废料处置、地下管线冻胀、油藏模拟等。

Coussy^[20]从开放系统和不可逆过程热力学出发，

建立了饱和多孔材料热-孔隙-弹塑性的一般理论。Booker 等^[21]通过将温度场与位移和压力的计算解耦，提出了饱和热弹性体中点热源和球热源固结效应的解析解。Bai 等^[22]给出了一维线性准静态弹性饱和体系的解析解，并比较了各种耦合情况和各耦合项的影响。Coussy^[23]从多孔介质力学基本理论出发推导了一维多孔弹性介质在温度荷载作用下的解析解。Olivella 等^[24]开发了用于多孔介质中流动和热分析的模拟程序 CODE_BRIGHT。Coussy^[23]、De Boer^[25]、Lewis 等^[26]开展了饱和与非饱和多孔介质弹性和弹塑性热-孔隙-力学模型的有限元分析。

1.2 THM 耦合理论

从动量、质量和能量等 3 个守恒条件出发，可推导 THM 三场全耦合的强形式方程组，该方程组给出了孔隙压力、固体位移和热流等在孔隙介质中的演化，详见 Wang^[11]、Coussy^[23]和 De Boer^[25]。

准静态条件下的动量守恒方程为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (1)$$

式中： $\boldsymbol{\sigma}$ 为总应力张量，受拉为正； ρ 为混合物质量密度； \mathbf{b} 为加速度矢量。总应力张量可写为

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - b p \boldsymbol{\delta} \quad (2)$$

式中： $\boldsymbol{\sigma}'$ 为有效应力张量； b 为 Biot 系数； p 为孔隙流体压力； $\boldsymbol{\delta}$ 为 Kronecker 符号，表示单位二阶张量。

值得一提的是，弹性应变可分为两部分：

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^e = \mathbf{E}^{-1} d\boldsymbol{\sigma}' - (\beta_s/3) \boldsymbol{\delta} d\theta \quad (3)$$

式中： $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ 为弹性应变张量； \mathbf{E} 为刚度矩阵； β_s 为固体的体积热膨胀系数； θ 为温度。

质量守恒方程为

$$b \nabla \cdot \mathbf{v}_s + c_m \dot{p} - \beta_m \dot{\theta} + \nabla \cdot \mathbf{v}^D - \beta_f \mathbf{v}^D \cdot \nabla \theta = 0 \quad (4)$$

式中： \mathbf{v}_s 为固体骨架的速度矢量； c_m 为混合物的压缩系数； β_m 为混合物的体积热膨胀系数； \mathbf{v}^D 为达西速度矢量。其中 c_m ， β_m 可由各组分定义， \mathbf{v}^D 可由达西定律定义：

$$c_m = n c_f + (b - n) c_s \quad (5)$$

$$\beta_m = n \beta_f + (b - n) \beta_s \quad (6)$$

$$\mathbf{v}^D = \frac{k}{\mu_f} (-\nabla p + \rho_f \mathbf{g}) \quad (7)$$

式中： n 为多孔介质的孔隙率； c_f ， c_s 分别为流体和固体的压缩系数； β_f ， β_s 分别为流体和固体的体积热膨胀系数； k 为多孔介质的渗透率； μ_f 为流体的动力黏度； ρ_f 为流体密度； \mathbf{g} 为重力加速度。

能量守恒方程为

$$(\rho C)_m \dot{\theta} + \rho_f C_f \mathbf{v}^D \cdot \nabla \theta + \beta_s K \nabla \cdot \mathbf{v}_s - K \beta_s^2 \theta \dot{\theta} + \nabla \cdot \mathbf{q} - \beta_m \theta \dot{p} - \mathbf{v}^D \cdot [-(1 - \beta_f \theta) \nabla p + \rho_f \mathbf{g}] = \rho r \quad (8)$$

式中： $(\rho C)_m$ 为混合物的热容密度； K 为固体骨架的

体积模量; \mathbf{q} 为热流矢量; ρr 为热源项。其中 $(\rho C)_m$ 可由各组分定义, \mathbf{q} 可由傅里叶定律定义:

$$(\rho C)_m = n\rho_f C_f + (1-n)\rho_s C_s \quad (9)$$

$$\mathbf{q} = -\lambda_m \nabla \theta \quad (10)$$

$$\lambda_m = n\lambda_f + (1-n)\lambda_s \quad (11)$$

式中: C_f , C_s 分别为流体和固体的比热容; λ_m 为混合物的平均导热系数; λ_f , λ_s 分别为流体和固体的导热系数。

将式 (1), (4), (8) 联立可得 THM 全耦合强形式控制方程组。静力平衡、流体流动和热流的 3 个方程含有固体位移、孔隙压力和温度 3 个因变量, 且因变量间相互关联, 因此该耦合是完全的, 并非单向的。

另外, Adinolfi 等^[27]认为热-水-力耦合中温度场对水力场的影响除了流体的热膨胀, 还有流体性质会随温度的变化而变化。本文通过多项式拟合来考虑此效应^[28]:

$$\rho_f = \begin{cases} 6.31 \times 10^{-5} \theta^3 - 0.06 \theta^2 + 18.92 \theta - 950.7 & (273.15 \text{ K} < \theta \leq 293.15 \text{ K}) \\ 1.03 \times 10^{-5} \theta^3 - 0.01 \theta^2 + 4.97 \theta + 432.26 & (293.15 \text{ K} < \theta \leq 373.15 \text{ K}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_f = 1.38 - 0.02 \theta + 1.36 \times 10^{-4} \theta^2 - 4.65 \times 10^{-7} \theta^3 + 8.9 \times 10^{-10} \theta^4 - 9.08 \times 10^{-13} \theta^5 + 3.85 \times 10^{-16} \theta^6 \quad (273.15 \text{ K} < \theta \leq 413.15 \text{ K}) \quad (13)$$

$$C_f = 12010.15 - 80.41 \theta + 0.31 \theta^2 - 5.38 \times 10^{-4} \theta^3 + 3.63 \times 10^{-7} \theta^4 \quad (273.15 \text{ K} < \theta \leq 553.75 \text{ K}) \quad (14)$$

$$\lambda_f = -0.87 + 8.95 \times 10^{-3} \theta - 1.58 \times 10^{-5} \theta^2 + 7.98 \times 10^{-9} \theta^3 \quad (273.15 \text{ K} < \theta \leq 553.75 \text{ K}) \quad (15)$$

1.3 THM 耦合理论的数值验证

采用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics^[28] 建立饱和介质 THM 耦合有限元模型。为了验证模型的正确性, 将 COMSOL 软件的模拟结果、Wang^[11] 的模拟结果与 Bai 等^[22] 的解析解进行对比分析。

该算例为饱和非等温固结问题, 不计重力影响, 几何模型及边界条件如图 1 所示。土柱高度为 0.3 m, 半径为 0.1 m。该模型初始温度场为 50°C。力学边界条件为: 顶部施加竖向荷载 $F = -1 \times 10^7 \text{ Pa}$, 底部固定边界, r 为 0, 0.1 m 处侧面边界约束其在 r 方向上的位移。水力边界条件为: 顶部为排水边界 ($p=0$), 其它边界为不排水边界。热边界条件为: 顶部设为恒温边界 ($\theta=0^\circ\text{C}$), 其它边界为绝热边界。在软件中使用了固体力学、达西定律和多孔介质传热 3 个模块, 场变量分别为位移 u 、水压 p 和温度 θ 。非结构三角形网格 (646 个单元和 360 个节点) 的模拟结果与图 1 所示四边形网格 (3 个单元和 8 个节点) 的模拟结果基

本相同。表 1 给出了模型的材料参数。

表 1 饱和非等温固结问题的材料参数^[11, 22]

Table 1 Material parameters for saturated non-isothermal consolidation^[11, 22]

参数	取值	单位
Lamé 第一常数 λ_{skel}	7.05×10^7	Pa
Lamé 第二常数 μ_{skel}	4.7×10^7	Pa
Biot 系数 b	1.0	1
孔隙率 n	0.42	1
渗透率 k	1.0×10^{-14}	m^2
流体动力黏度 μ_f	0.001	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
固体密度 ρ_s	3696	kg/m^3
流体密度 ρ_f	1000	kg/m^3
固体压缩系数 c_s	0	Pa^{-1}
流体压缩系数 c_f	0	Pa^{-1}
固体体积热膨胀系数 β_s	4.95×10^{-6}	K^{-1}
流体体积热膨胀系数 β_f	6.21×10^{-4}	K^{-1}
固体比热容 C_s	703	$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$
流体比热容 C_f	4180	$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$
固体导热系数 λ_s	1.38	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
流体导热系数 λ_f	0.6	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

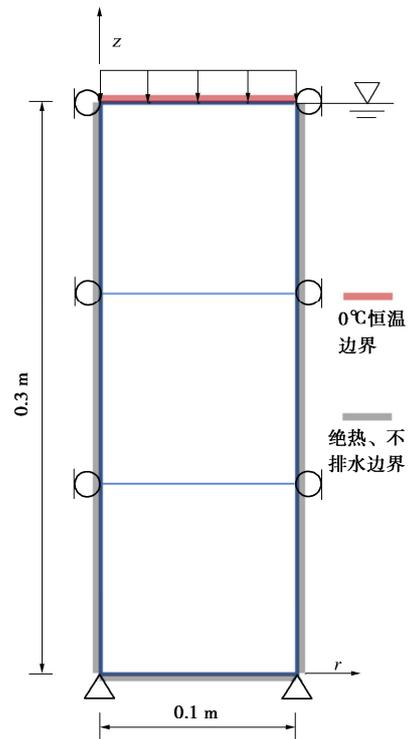


图 1 饱和非等温固结问题的几何模型及边界条件

Fig. 1 Geometric model and boundary conditions for saturated non-isothermal consolidation

图 2 给出了土柱非等温固结过程中温度、孔隙流体压力和顶部位移的响应。土柱底部的温度变化如图 2 (a) 所示, 底部温度在 10~100 h 期间变化较大, 在 100 h 后基本达到稳定状态。图 2 (b) 的结果是无量纲孔隙流体压力 (p/F) 随时间的变化, 可以看出

100 s 时超静孔隙压力基本消散, 由于未考虑重力影响, 孔隙压力在稳定状态时为 0。固结也基本在 100 s 时完成, 顶部沉降稳定值约为 18 mm, 如图 2 (c) 所示。通过比较可以看出模拟结果和解析解吻合较好, 验证了本文所建立的饱和介质 THM 全耦合有限元模型有效性。

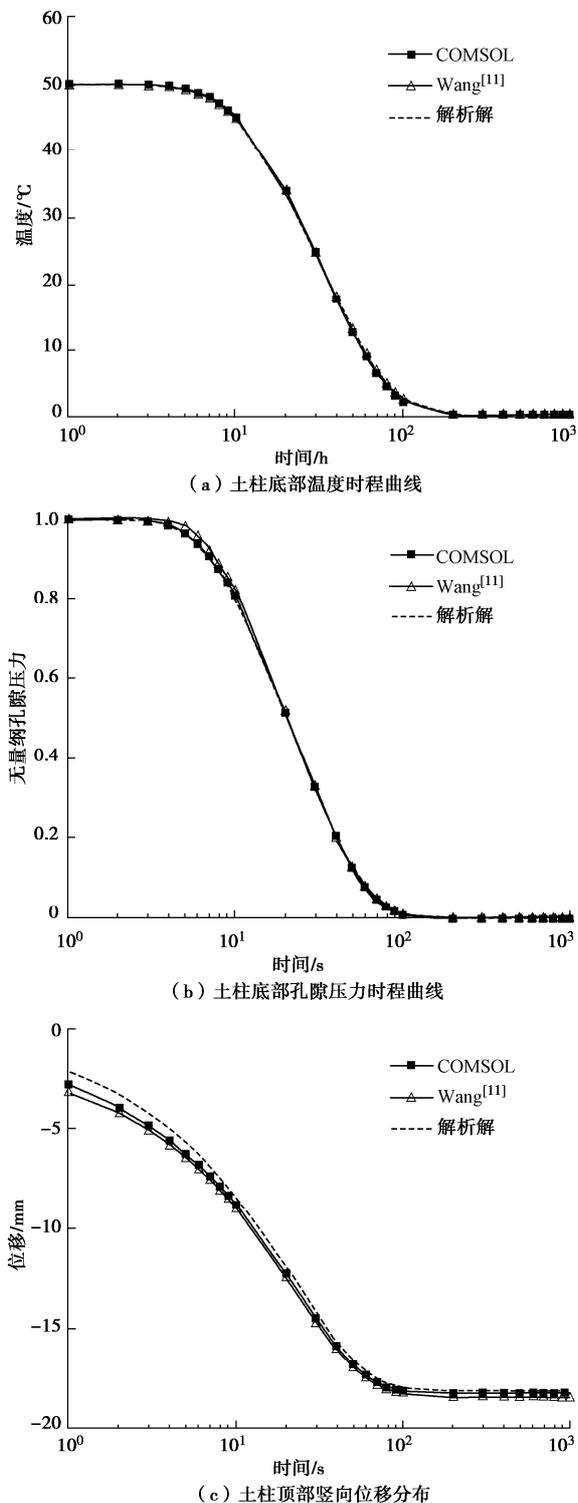


图 2 本文模拟结果与解析解的对比

Fig. 2 Comparison between simulated results and analytical solutions

2 能源桩的 THM 全耦合有限元分析

2.1 模型配置与简化

实际工程中的能源桩通常是群桩的一部分, 本文主要考虑单桩, 但所建立的计算方法同样适用于群桩的计算分析。能源桩横截面通常为圆形, 垂直放置在土中, 假设土层和地下水位水平, 因此可以建立轴对称模型。桩和岩层假定不透水, 各土层渗透率可通过现场试验确定, 并假设各向同性渗透。此外, 由于本文主要研究能源桩与周围土体的耦合行为, 无需对热交换管和热流体进行精细建模, 因此将热交换管模拟为线热源或将整个桩体作为热源。

对于桩体本构模型, 绝大部分文献[1, 10~13, 15~18, 29, 30]采用了热弹性模型, 仅 Saggiu 等[14]采用了混凝土损伤塑性模型。对于土体本构模型, 大部分文献采用了热弹性模型[10-11, 14, 18, 29-30]、Drucker-Prager 准则[1]、Mohr-Coulomb 准则[12-13, 16]、剑桥黏土模型[11]等常用本构模型, 也有 Saggiu 等[15]、Rui 等[17]采用了 CASM 模型和热弹塑性剑桥黏土模型。土体采用弹塑性模型时塑性区基本只出现在桩顶和桩底附近, 对重点关注的桩的应力应变分布影响较小; 另外 Laloui 等[1]和 Bourne-Webb 等[2]的原位试验结果中桩和土也都表现出较明显的弹性响应特征, 因此对于桩体和土体本文均假定为热弹性材料, 土层力学参数应由三轴试验确定。

桩和土之间的接触假定有绝对粗糙[1, 12, 17]、库仑摩擦[14-15]和荷载传递模型[31-32]3 种。桩土界面绝对粗糙即桩和土的有限元节点之间没有相对运动, 库仑摩擦通过下式来模拟桩土相互作用:

$$T_t = \min(\mu T_n + T_{cohe}, T_{t,max}) \quad (16)$$

$$\mu = \tan \delta \quad (17)$$

式中: T_t 为摩擦力; μ 为摩擦系数; T_n 为接触压力; T_{cohe} 为内聚抗滑阻力; $T_{t,max}$ 为最大摩擦力; δ 为界面摩擦角。

将底部的竖向位移和侧面的水平位移约束, 作为模型的力学边界条件。每次计算前需要进行地应力平衡, 即首先计算桩和土在重力作用下产生的初始应力, 然后将初始应力作为计算初始值, 以保证初始时刻合理的应力状态和零位移。水力边界条件是设定顶部为排水边界, 沿对称轴、岩层和桩土界面为不排水边界。地应力平衡时也需要考虑地下水, 初始孔隙水压力对应静水压力分布, 水位位于地表。需要说明的是, 自然条件下模型右侧是可渗透的, 但结构-温度荷载的影响范围有限, 对模型最右侧几乎没有影响, 因此为了提高计算效率, 将右侧也设为不排水边界。类似地,

热边界条件包括对称轴、底部和右侧的绝热边界条件以及顶部的恒温边界条件。

2.2 离心机模型的有限元分析

本节采用轴对称 THM 耦合有限元模型模拟饱和介质中能源桩的热-力行为, 并与 Wang 等^[10]的模拟结果进行对比分析。模型假设线弹性和准静态加载过程。该模型考虑了土骨架和水两相, 分别满足各向同性可压缩及不可压缩条件。有限元模型采用混合四边形单元模拟耦合效应。其中, 位移场采用双二次插值, 孔隙压力和温度场则采用双线性插值。

该算例的几何模型、边界条件及网格如图 3 所示, 包含 35 个单元和 48 个节点。根据 Wang 等^[10], 此模型的原型是饱和粉土中能源桩缩尺离心机试验, 离心加速度为 24g (g 为重力加速度)。模型桩半径为 0.025 m, 长度为 0.38 m; 模型箱半径为 0.25 m, 高度为 0.54 m。轴向荷载 $F=-268$ kPa 作用于能源桩顶, 方向竖直向下, 在模拟过程中保持恒定。整个模型的温度均为 20°C, 初始时刻起将桩体的对称轴设定为 50°C, 模型顶部的温度在室温下保持为恒定 20°C。对位移、水压和温度 3 个因变量, 通过向后欧拉法时间积分, 并采用全耦合牛顿迭代法求解。为与 Wang 等^[10]的数值模型保持一致, 本模型桩土界面假定为绝对粗糙。混凝土桩和土的材料参数如表 2 所示。

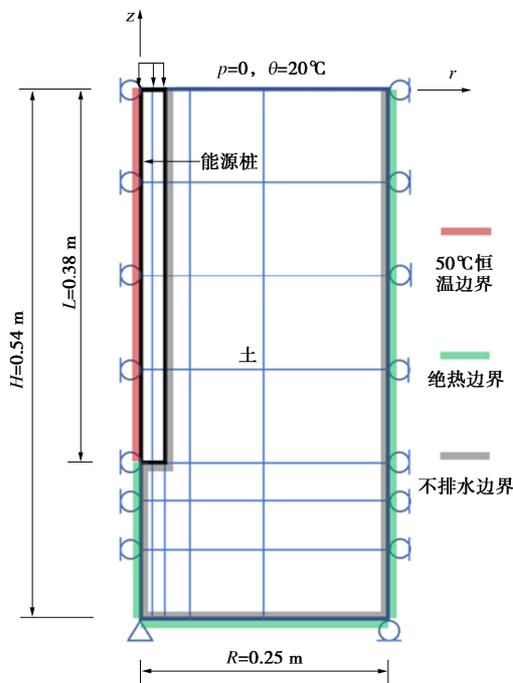


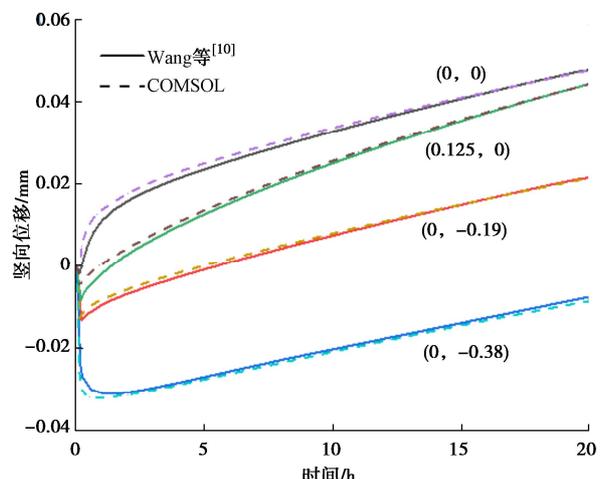
图 3 能源桩离心机模型的几何模型、边界条件及网格
Fig. 3 Geometric model, boundary conditions and mesh for centrifuge model for energy piles

表 2 离心机模型中桩和土的材料参数^[10]

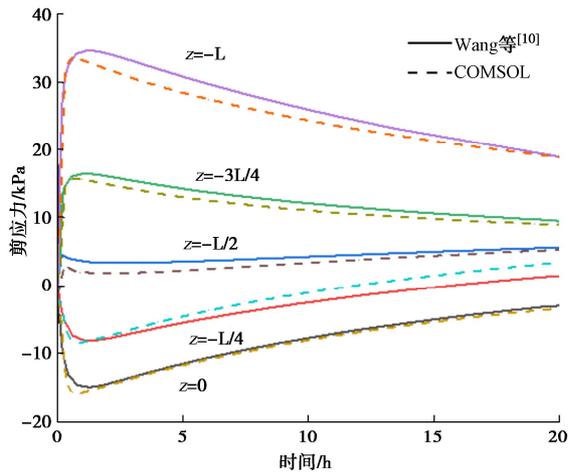
Table 2 Material parameters for energy piles and soils in centrifuge tests^[10]

参数	取值	单位
桩的弹性模量 E_c	3.452×10^{10}	Pa
桩的泊松比 ν_c	0.18	1
土的弹性模量 E_{soil}	1.222×10^4	Pa
土的泊松比 ν_{soil}	0.3	1
饱和水力传导率 k_{soil}	5×10^{-7}	m/s
桩的密度 ρ_c	2564	kg/m ³
土的密度 ρ_{soil}	1916	kg/m ³
水的密度 ρ_w	$\rho(\theta)$	kg/m ³
桩的线热膨胀系数 α_c	8×10^{-6}	K ⁻¹
土的线热膨胀系数 α_{soil}	1.17×10^{-5}	K ⁻¹
桩的比热容 C_c	855	J/(K·kg)
土的比热容 C_{soil}	1190	J/(K·kg)
水的比热容 C_w	$C(\theta)$	J/(K·kg)
桩的导热系数 λ_c	1.92	W/(m·K)
土的导热系数 λ_{soil}	1.2	W/(m·K)
水的导热系数 λ_w	$\lambda(\theta)$	W/(m·K)

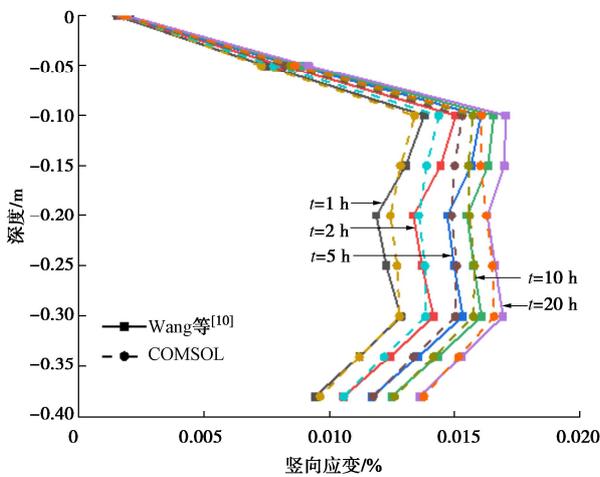
COMSOL 模拟结果和 Wang 等^[10]模拟结果的对比如图 4 所示。图 4 (a) 是对称轴上桩顶部、中部、底部以及模型中部表层土的竖向位移变化, 测点的具体位置在图中以 (r, z) 坐标的形式给出。由图可知能源桩顶部 $(0, 0)$ 处竖向位移向上, 而底部 $(0, -0.38)$ 处竖向位移向下, 这主要是土骨架变形、土固结以及桩和土的热膨胀共同作用的结果。同时可以看出能源桩和表层土在初始时刻发生瞬时沉降, 这是由于初始时刻轴向荷载瞬间施加于桩顶引起。随着温度逐渐升高, 桩和土都相应地膨胀。如图 4 (b) 所示, 剪应力 σ_{rz} 沿桩土界面随深度的变化也呈现类似现象。桩土界面上半部分剪应力为负, 而下半部分剪应力为正, 中部附近剪应力较小。如图 4 (c), 竖向应变包括弹性应变和热应变两部分, 能源桩顶部的竖向应变较小,



(a) 能源桩和土的竖向位移时程曲线



(b) 桩土界面的剪应力时程曲线



(c) 不同时刻桩轴的竖向应变分布

图4 本文结果与Wang等^[10]模拟结果的对比

Fig. 4 Comparison between simulated results and those from Wang et al^[10]

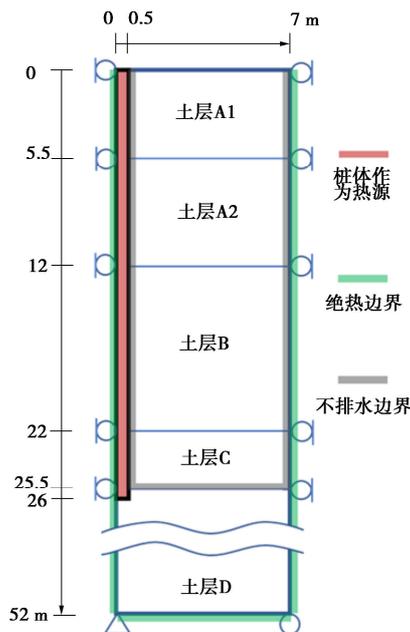


图5 原位试验有限元模型的几何模型与边界条件

Fig. 5 Geometric model and boundary conditions for finite element analysis of field tests

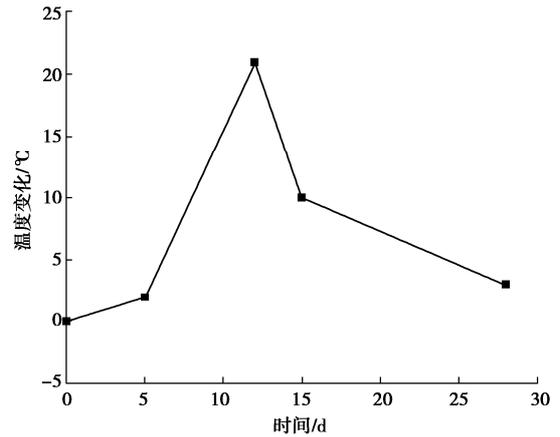


图6 试验1中施加在桩上的温度荷载时程曲线

Fig. 6 Time histories of temperature imposed on piles in Test 1

而中部和底部的竖向应变较大。由于顶部设置了恒温边界，因此顶部附近的温度更低，热应变较小，所以总竖向应变也较小。同时能源桩底部的竖向应变相对于中部也有降低，这是由于桩底应变受桩下土的作用。另外，桩土界面超静孔隙水压力在加载瞬间形成，尤其在桩底 ($z=-0.38\text{ m}$) 附近，但逐渐消散，在 100 s 时基本达到静水压力，可见相对于热传导和热对流，孔压消散较快。

2.3 原位试验的有限元分析

本节通过 THM 耦合有限元模拟 Laloui 等^[1, 33]开展的能源桩现场原位试验，并进行对比分析。该原位试验数据完整，结果广泛用于数值模拟校验验证。共开展了 8 组能源桩热循环原位试验（试验 1~8），每组试验为期 28 d，其中加热持续 12 d 冷却持续 16 d。能源桩同时承受结构荷载和热荷载，前者主要是在建建筑物的自重，桩顶上最大结构荷载约为 1088 kN；后者则通过控制热交换管中的水温来施加，在每层施工结束时施加一次完整的热循环。进行试验 1 时施工尚未开始，桩顶无结构荷载；进行试验 7 时施工完成，桩顶结构荷载达到最大。因此本文选取这两组代表性试验进行模拟。试验 1 的最大热荷载 $\Delta\theta=21^\circ\text{C}$ ，而其它试验的最大热荷载 $\Delta\theta=15^\circ\text{C}$ 。

能源桩的几何模型和边界条件如图 5 所示，该轴对称模型的半径为 7 m，深度为 52 m。能源桩半径为 0.5 m，长度为 26 m，桩周土是 5 层成层土。边界条件设置与 2.1 节类似，模型初始温度和顶部恒温边界均为 15°C 。将整个桩体作为热源，试验 1 中热荷载随时间变化如图 6 所示^[1]。能源桩和土均假设为热弹性材料，桩土接触模型假定为绝对粗糙或库仑摩擦，界面摩擦角根据相关文献^[16, 34, 35]确定，表 3 给出了材料参数。网格采用非结构三角形单元，包含 6399 个单元和 3455 个节点，在桩土界面附近较密，远处则相对稀疏。

表 3 原位试验中桩和土的材料参数^[1, 16]

Table 3 Material parameters for energy piles and soils in field tests^[1, 16]

参数	土层 A1	土层 A2	土层 B	土层 C	土层 D	能源桩
体积模量 K/MPa	122	122	59	83	1860	17381
剪切模量 G/MPa	113	113	1000	1400	1675	14313
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2000	1950	2000	2200	2550	2500
孔隙率 n	0.1	0.1	0.35	0.3	—	—
水力传导率 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2×10^{-6}	7×10^{-7}	1×10^{-6}	1×10^{-6}	—	—
导热系数 $\lambda/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	1.8	1.8	1.8	1.8	1.1	2.1
比热容 $C/(\text{J}/(\text{K}\cdot\text{kg})^{-1})$	1200	1231	1200	1091	784	800
体积热膨胀系数 β/K^{-1}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-6}	1×10^{-5}
界面摩擦角 $\delta/(\text{°})$	19.1	18.5	16.1	18.9	24.5	—
界面摩擦系数 μ	0.346	0.335	0.289	0.342	0.456	—

图 7 以试验 1 为例呈现了加热和冷却结束时的温度场模拟结果, 可以看出受温度荷载影响的部分主要限于桩的深度, 因此后续的部分结果仅给出模型上半部分桩长范围的模拟结果。

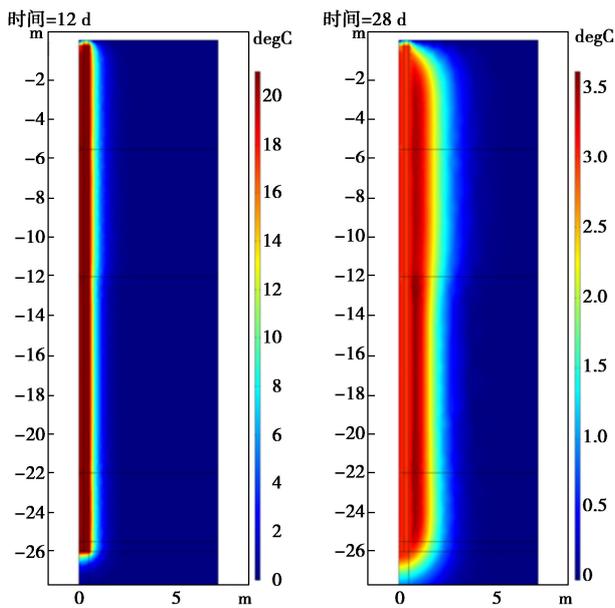


图 7 试验 1 加热和冷却结束时温度变化 $\Delta\theta$ 的分布

Fig. 7 Distribution of temperature variation at end of heating and cooling periods in Test 1

如图 8~12 可以看出数值模拟与试验结果及其它已发表的数值结果吻合较好。试验 1 中桩顶无结构荷载, 能源桩可自由上移, 仅热荷载在桩中产生应力和应变。图 8 将加热和冷却期间的竖向应变模拟值与测量值进行了对比, 可以看出加热期间竖向应变不均匀且受界面摩擦力的影响。桩土接触为库仑摩擦时的模拟结果比绝对粗糙更合理, 因为绝对粗糙大大高估了界面摩擦力, 使得竖向应变分布特别不均匀。图 9 中

模拟的 16 m 深度处径向应变变化与试验结果基本一致, 说明热循环期间桩土始终保持着径向接触。图 10 给出了整个热循环过程桩顶竖向位移的时程曲线, 可以看出位移呈明显弹性特征。土层 A1、A2, 土层 B、C 和土层 D 中的应力水平差异明显, 如图 11 所示。由于土层 D 模量很大且导热系数和热膨胀系数较小, 其受荷载影响较小。试验 7 桩同时承受结构荷载和热荷载, 模拟结果较好反映了能源桩的热-力行为。由于桩侧土的摩擦和桩底土的端承作用, 能源桩不能自由移动, 因此桩体会产生附加应力。 $\Delta\theta=13.4\text{°C}$ 时桩中竖向应力的模拟结果如图 12 所示, 与 Saggi 等^[14-15]的模拟结果较为一致。在土层 B、C 段桩中竖向应力较大, 这是由于这两层土模量相对较大, 对桩的约束更大, 因此产生的热应力也更大。

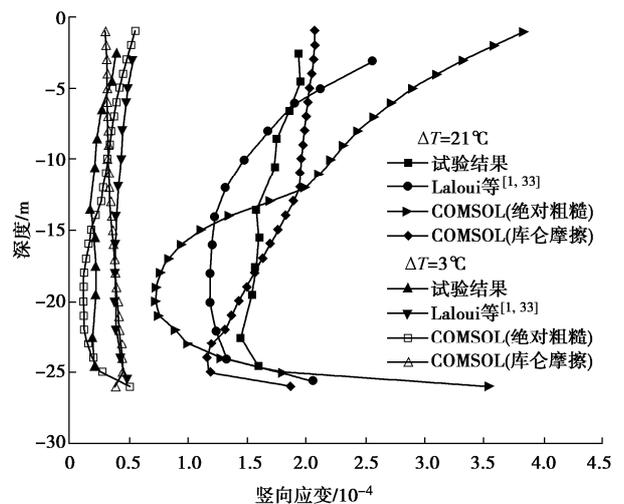


图 8 试验 1 中热循环期间桩的竖向应变分布

Fig. 8 Vertical strain distribution during a heating-cooling cycle of the pile in Test 1

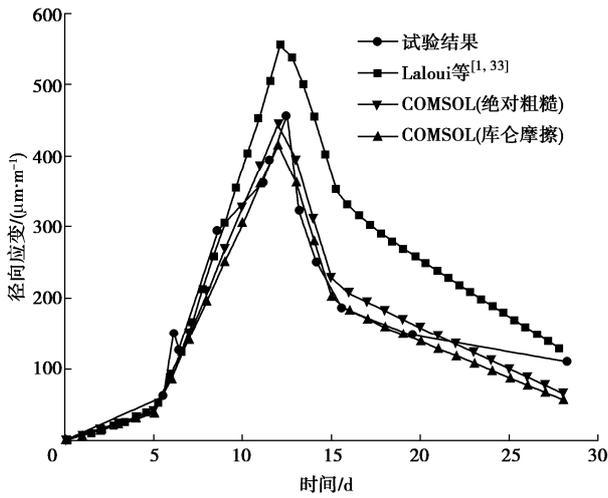


图9 试验1中桩的径向应变时程曲线

Fig. 9 Time histories of radial strain for piles in Test 1

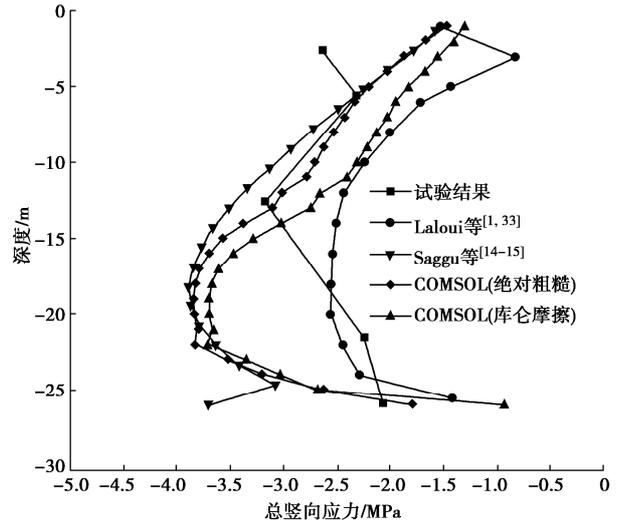


图12 试验7中 $\Delta\theta=13.4^\circ\text{C}$ 时桩的竖向应力分布

Fig. 12 Distribution of vertical stress along pile at $\Delta\theta=13.4^\circ\text{C}$ in Test 7

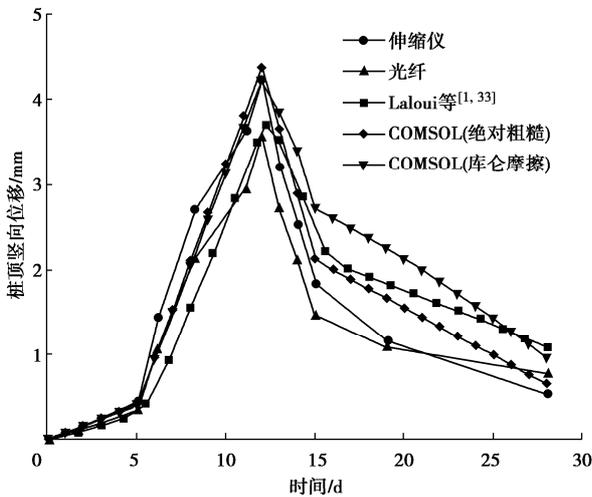


图10 试验1中桩顶竖向位移时程曲线

Fig. 10 Variation of vertical displacement at pile head in Test 1

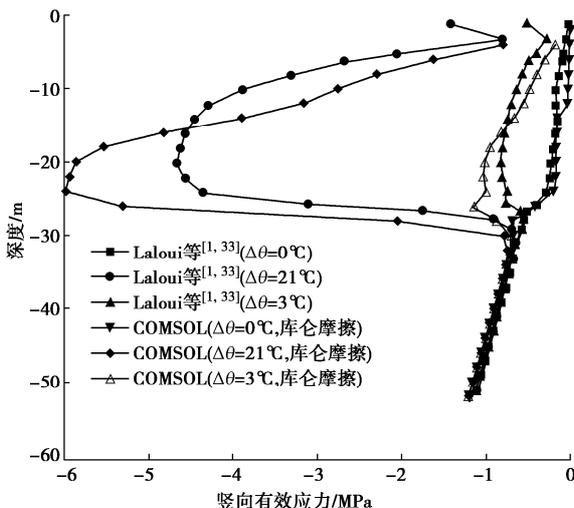


图11 试验1中热循环期间土的竖向有效应力分布

Fig. 11 Distribution of vertical effective stress during a heating-cooling cycle of soils in Test 1

3 结论与展望

本文基于热-水-力三场耦合理论，建立能源桩与土相互作用的 THM 全耦合有限元分析模型，研究能源桩的热-力响应，得到以下 3 点结论。

(1) 利用多孔介质混合理论推导了 THM 全耦合控制方程，通过饱和非等温固结问题验证了该模型的有效性，表明采用全耦合有限元模型分析 THM 多场相互作用的可行性。

(2) 考虑流体性质随温度的变化和不同的桩土接触模型，建立了基于 THM 全耦合的能源桩轴对称有限元分析模型，并与离心数值模型和现场试验结果进行了对比，表明该模型能够准确模拟能源桩复杂的热-力行为，且能较好地再现试验结果，可为能源桩相关多场耦合问题的数值分析提供参考。

(3) 模拟结果表明，相对于热传导和热对流，超静孔压的消散较快，热对流对分析结果的影响较大，孔隙压力的影响也不可忽略，因此考虑 THM 耦合效应非常重要。

土的本构模型和长期的热循环都会显著影响能源桩和土的承载特性，并对地源热泵系统的工作性能产生影响。因此，后续研究中将考虑引入土的弹塑性本构关系，分析能源桩及周围土体在长期热循环下的各种耦合响应。

参考文献:

[1] 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.
- [2] 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.
- [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 Shuqiang, CHENG Xiaohui. In-situ tests on structural responses of energy piles during heat exchanging process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(6): 1087-1094. (in Chinese))
- [4] 路宏伟, 蒋 刚, 王 昊, 等. 摩擦型能源桩荷载-温度现场联合测试与承载性状分析[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(2): 334-342. (LU Hongwei, JIANG Gang, WANG Hao, et al. *In-situ* tests and thermo-mechanical bearing characteristics of friction geothermal energy piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 334-342. (in Chinese))
- [5] STEWART M A, MCCARTNEY J S. Centrifuge modeling of soil-structure interaction in energy foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(4): 04013044.
- [6] GOODE III J C, MCCARTNEY J S. Centrifuge modeling of end-restraint effects in energy foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(8): 04015034.
- [7] NG C W W, SHI C, GUNAWAN A, et al. Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in saturated sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(8): 1045-1057.
- [8] 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研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(3): 667-673. (HUANG Xu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Experimental research on thermomechanical characteristics of PCC energy pile under cyclic temperature field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(3): 667-673. (in Chinese))
- [9] 孔纲强, 王成龙, 刘汉龙, 等. 多次温度循环对能量桩桩顶位移影响分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(4): 958-964. (Kong Gangqiang, WANG Chenglong, Liu Hanlong, et al. Analysis of pile head displacement of energy pile under repeated temperature cycling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(4): 958-964. (in Chinese))
- [10] WANG W, REGUEIRO R A, STEWART M, et al. Coupled thermo-poro-mechanical finite element analysis of an energy foundation centrifuge experiment in saturated silt[M]// GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. New York: Curran Associates Inc, 2012: 4406-4415.
- [11] WANG W. Coupled Thermo-Poro-Mechanical Axisymmetric Finite Element Modeling of Soil-Structure Interaction in Partially Saturated Soils[D]. Boulder: University of Colorado at Boulder, 2014.
- [12] LORIA A F R, GUNAWAN A, SHI C, et al. Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2015, **1**: 1-15.
- [13] LORIA A F R, DI DONNA A, LALOU L. Numerical study on the suitability of centrifuge testing for capturing the thermal-induced mechanical behavior of energy piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(10): 04015042.
- [14] SAGGU R, CHAKRABORTY T. Cyclic thermo-mechanical analysis of energy piles in sand[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, **33**(2): 321-342.
- [15] SAGGU R, CHAKRABORTY T. Thermomechanical analysis and parametric study of geothermal energy piles in sand[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, **17**(9): 04017076.
- [16] DI DONNA A, LORIA A F R, LALOU L. Numerical study of the response of a group of energy piles under different combinations of thermo-mechanical loads[J]. Computers and Geotechnics, 2016, **72**: 126-142.
- [17] RUI Y, SOGA K. Thermo-hydro-mechanical coupling analysis of a thermal pile[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2019, **172**(2): 155-173.
- [18] 王成龙, 刘汉龙, 孔纲强, 等. 不同刚度约束对能量桩应力和位移的影响研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(11): 4261-4268. (WANG Chenglong, LIU Hanlong, KONG Gangqiang, et al. Study on stress and displacement of energy pile influenced by pile tip stiffness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(11): 4261-4268. (in Chinese))
- [19] 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 Xiangyu, GUO Hongxian, CHENG Xiaohui. Experimental and numerical study on temperature distribution in energy piles[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(4): 102-110. (in Chinese))

- [20] COUSSY O. A general theory of thermoporoelastoplasticity for saturated porous materials[J]. *Transport in porous media*, 1989, **4**(3): 281-293.
- [21] BOOKER J R, SAVVIDOU C. Consolidation around a point heat source[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1985, **9**(2): 173-184.
- [22] BAI M, ABOUSLEIMAN Y. Thermoporoelastic coupling with application to consolidation[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1997, **21**(2): 121-132.
- [23] COUSSY O. *Poromechanics*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [24] OLIVELLA S, GENS A, CARRERA J, et al. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media[J]. *Engineering computations*, 1996, **13**(7): 87-112.
- [25] DE BOER R. *Trends in Continuum Mechanics of Porous Media*[M]. Dordrecht: Springer, 2005.
- [26] LEWIS R W, MAJORANA C E, SCHREFLER B A. A coupled finite element model for the consolidation of nonisothermal elastoplastic porous media[J]. *Transport in porous media*, 1986, **1**(2): 155-178.
- [27] ADINOLFI M, MAIORANO R M S, MAURO A, et al. On the influence of thermal cycles on the yearly performance of an energy pile[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2018, **16**: 32-44.
- [28] COMSOL Inc. *COMSOL Multiphysics User's Guide and Reference Manual, Version 5.6*[M]. Burlington: COMSOL Inc., 2020.
- [29] SALCIARINI D, RONCHI F, TAMAGNINI C. Thermo-hydro-mechanical response of a large piled raft equipped with energy piles: a parametric study[J]. *Acta Geotechnica*, 2017, **12**(4): 703-728.
- [30] 田婉琪, 程晓辉, 关文, 等. 考虑地基刚度分区的能源支护桩有限元模拟[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, **42**(5): 922-928. (TIAN Wanqi, CHENG Xiaohui, GUAN Wen, et al. Finite element simulation of energy supporting piles considering stiffness zoning of foundation[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, **42**(5): 922-928. (in Chinese))
- [31] KNELLWOLF C, PERON H, LALOUI L. Geotechnical analysis of heat exchanger piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, **137**(10): 890-902.
- [32] SUTMAN M, OLGUN C G, LALOUI L. Cyclic load-transfer approach for the analysis of energy piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, **145**(1): 04018101.
- [33] LALOUI L, MORENI M, VULLIET L. Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, **40**(2): 388-402. (LALOUI L, MORENI M, VULLIET L. Behaviour of a bi-functional pile, foundation and heat exchanger[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, **40**(2): 388-402. (in French))
- [34] RANDOLPH M F, WROTH C P. Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles[J]. *Géotechnique*, 1981, **31**(1): 143-157.
- [35] KRAFT Jr L M. Computing axial pile capacity in sands for offshore conditions[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 1990, **9**(1): 61-92.