

DOI: 10.11779/CJGE20230710

考虑桩端持力层效应的能源桩受力变形特性研究

方金城¹, 冯世进^{*1,2}, 赵 勇¹

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 能源桩作为一种具备建筑承载和地热开发双重功能的新型建筑节能技术, 近年来得到了越来越广泛的研究和关注。温度荷载的施加对桩体的设计和安全服役带来了新的挑战, 但现有理论计算方法仍未能全面揭示热力耦合作用下不同承载性状能源桩的受力变形特性。基于弹性分析理论框架, 进一步考虑了桩端持力层的影响, 建立了能源桩热力分析模型, 并结合典型现场试验结果进行了模型验证, 着重分析了地层结构特征和桩基几何参数对能源桩荷载传递及位移行为的影响。研究结果表明: 热致轴向荷载将随着持力层刚度的增加而增加, 相较于摩擦型桩, 温度变化将导致支承于硬持力层的能源桩产生更大的温度应力; 桩端持力层、桩周土体及桩顶刚度情况是影响热致应力大小和分布以及热致位移的关键因素。基于理论模型获得的归一化计算结果旨在实现对能源桩热致应力及位移的估算, 为不同承载性状能源的设计计算提供参考依据。

关键词: 能源桩; 能源地下结构工程; 承载性状; 弹性分析; 热力耦合

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)10-2069-09

作者简介: 冯世进(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事环境岩土与能源岩土等方面的教学和研究工作。E-mail: fsjgly@tongji.edu.cn。

Investigations on thermomechanical behavior of energy piles considering bearing stratum effects at pile end

FANG Jincheng¹, FENG Shijin^{1,2}, ZHAO Yong¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As a new type of energy-saving technology, the energy piles have received increasing attention due to their dual functions of load bearing and heat transferring. The application of thermal loads poses new challenges for the design and serviceability performance of the energy piles. However, in the existing theoretical studies, the stress-deformation characteristics of the energy piles subjected to the combined thermomechanical loading under different bearing conditions have not been fully revealed. In this study, an analytical model for the energy piles under different bearing conditions is established based on the framework of the elastic analysis theory, taking into account the effects of the end-bearing layer. The model is validated against the field test data. This study focuses on analyzing the effects of geotechnical conditions and geometrical parameters of the piles on the load transfer and displacement behavior of the energy piles. The results show that the thermally induced axial loads increase with the stiffness of the bearing layer. Compared to the floating-bearing piles, temperature variations will cause greater thermal stress in the piles bearing on stiff soil strata. The stiffnesses of the end-bearing layer, surrounding soil and pile head are the critical factors affecting the magnitude and distribution of the thermally induced stress and displacement. The normalized calculated results obtained from the analytical model can be used to estimate the thermally induced stress and displacement of the energy piles in practice and provide a reference for the design and calculation of the energy piles under different bearing conditions.

Key words: energy piles; energy geostructure; bearing behavior; elastic analysis; thermomechanical coupling

0 引言

浅层地热能是一种蕴藏于地球浅表的低温热能, 具有储量巨大、分布广泛、绿色环保、可循环再生的

基金项目: 上海市科技创新行动计划项目(22dz1207000); 上海市教育委员会科研创新计划项目(2023ZKZD25); 上海市科技创新行动计划扬帆计划项目(23YF1449000); 土木工程I类高峰学科建设经费资助项目

收稿日期: 2023-07-25

*通信作者(E-mail: fsjgly@tongji.edu.cn)

独特优势^[1]。埋管式地源热泵技术是浅层地热能开发的主要手段之一，传统地埋管换热器通过将换热环路埋入地质钻孔中实现与岩土介质的热交换，但该技术需要专门用地、需要额外开挖及钻孔等施工费用，这在一定程度上限制了该技术的推广和应用。为克服这些技术缺陷，相关研究人员创新性地将传统地埋管技术与建筑桩基相结合，提出了具有建筑承载和地热开发双重功能的能源桩技术^[2]；该技术充分利用建筑桩基的桩孔空腔预埋换热器，无需专门用地和钻孔，具有较高的传热性能，大大降低了地源热泵技术的前期施工费用，实现了地热资源与地下空间的协同开发。

作为建筑基础，能源桩需要维持上部建筑结构的安全和稳定，在应用过程中不仅要承担来自上部结构的荷载作用，还要承受由于温度变化导致的附加应力和变形；因此，能源桩在热力耦合荷载作用下的受力变形特性是当前研究的热点问题。相关学者基于原位测试方法研究了能源桩的热力响应行为；Amatya 等^[3]讨论了桩端约束条件对能源桩荷载分布的影响，并提出了一个定性分析模型用于理解能源桩的热力学行为；Fang 等^[4-5]研究了嵌岩能源桩的热力响应特性，相关结果表明桩周和桩端约束情况将影响热应力的分布及大小。数值模拟方法作为复杂物理和工程问题的有力分析工具，近年来也逐步被用于能源桩的热力耦合分析；Gashti 等^[6]基于有限元数值方法发现摩擦型能源桩的热应力将显著低于端承情况下能源桩；相关学者综合评估了关键岩土参数对能源桩热致应力的影响，发现桩周土体的弹性模量对热应力具有较为显著的影响^[7-8]。上述试验和数值研究均表明桩端和桩轴的约束情况是影响能源桩热致应力及变形行为的关键因素。

但与试验手段和数值分析相比，简化理论模型由于计算简单，实用性强，并能灵活应用于桩基常规设计中，作为一种有力的设计分析工具受到了研究人员和工程师们的青睐。桩基的理论分析方法主要包括荷载传递法、弹性分析法、剪切位移法等。截至目前，荷载传递法是被研究和应用最广泛的能源桩分析方法之一；该方法通过将桩体划分为多个弹性单元，每个单元与土体之间采用独立的非线性弹簧连接，用以模拟桩体受荷时的荷载传递；该方法最早被 Knellwolf 等^[9]引入能源桩的分析中；随后，Pasten 等^[10]利用荷载传递法研究了桩体在多次热循环下的长期行为；Chen 等^[11]讨论了桩土界面剪切强度、桩端刚度等因素对能源桩荷载传递的影响；费康等^[12]采用双曲线模型作为桩土接触面荷载位移曲线。但荷载传递法假设桩体受多个独立弹簧作用，忽略了土体的连续性，无法考虑桩阻力对土体位移的影响。弹性分析法则基于桩土位

移协调假设，考虑了桩与土层的受力与变形相互作用；依此，相关学者在能源桩分析中引入了弹性分析方法，分析了能源桩的热力响应行为^[13-14]；然而，现有能源桩弹性分析模型将桩周土层假设为半无限弹性体，仅适用于分析深厚土层摩擦型能源桩，难以应用于其它承载性状的能源桩分析。

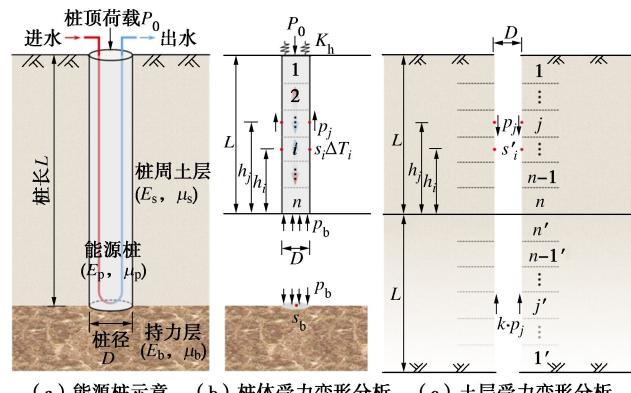
因此，本文将在前人研究基础上，基于弹性分析理论框架，进一步考虑桩端持力层的影响，构建能源桩在受热变形情况下的平衡方程，求解热力耦合作用下不同承载性状能源桩的热力及变形响应，分析桩的长径比、桩周土刚度、持力层刚度、桩顶刚度等因素对能源桩热致受力变形特性的影响，旨在为不同承载性状能源桩的设计计算提供一定的参考依据。

1 能源桩热力耦合分析模型

本文旨在研究在温度-结构荷载耦合作用下能源桩的热力响应特性（图 1 (a)）；为此，在桩体受力变形分析中考虑了桩体热膨胀/收缩变形的影响（图 1 (b)），并构建了桩阻力作用下桩周土层的位移方程（图 1 (c)）；最终，基于位移协调假设，获取热力耦合作用下能源桩的应力及位移解。

模型建立在以下基本假定基础上：①假设桩周土层与桩端持力层均为各向同性、均质的弹性体；②由于径向变形的影响较小^[15]，仅考虑了桩的轴向位移；③弹性模量、泊松比及热膨胀系数等材料参数与温度无关；④桩体被分为 n 个圆柱桩单元，假设桩单元侧面的摩阻力分布均匀，并假设在桩截面上的温度、位移和应力均匀分布；⑤仅考虑了温度变化对桩体受力变形行为的影响，未考虑桩体以外温度变化的影响；⑥假设桩身完全粗糙，即桩-土界面不产生滑移，这种桩-土位移协调的假设被许多已有研究所采纳^[14, 16]。

桩体和土体位移以向下为正，桩体应力以压为正，桩体侧摩阻力向上为正，温度变化量以升温为正。



(a) 能源桩示意 (b) 桩体受力变形分析 (c) 土层受力变形分析

图 1 考虑桩端持力层效应的能源桩热力耦合分析模型

Fig. 1 Analytical model for thermomechanical behavior of energy piles considering bearing stratum effects at pile end

1.1 热影响下桩体位移方程

如图 1 (b) 所示, 对于 i 点位置的竖向位移 s_i 为

$$s_i = s_{i,p} + s_{i,P} + s_{i,T} + s_b \quad (1)$$

式中: $s_{i,p}$, $s_{i,P}$ 与 $s_{i,T}$ 分别为桩侧阻力、桩顶荷载及温度变化导致在 i 处的轴向位移; s_b 为桩底位移。

由于桩侧阻力导致的 i 处位移可以表示为^[17]

$$s_{i,p} = -\frac{1}{E_p} \cdot \sum_{j=1}^n p_j D_{ij} \quad (2)$$

式中: E_p 为桩体弹性模量; p_j 为第 j 个桩单元的侧摩阻力。

D_{ij} 可以表示为

$$D_{ij} = \begin{cases} \frac{4Lh_j}{nd} & i \leq j \\ \frac{4Lh_i}{nd} & j < i \end{cases} \quad (3)$$

式中: h_i 和 h_j 分别为 i 点和 j 点的深度; L 为桩长; d 为桩径; n 为桩单元数量。

能源桩运行过程将产生膨胀或收缩变形, 从而导致桩顶发生抬升或沉降; 上部结构也将对桩顶的位移产生一定的约束作用, 导致桩顶荷载的变化。为模拟承台对桩顶位移的约束作用, 温度加载过程中可采用刚度系数为 K_h 的弹簧模拟桩与上部结构的相互作用^[9]。则由于桩顶荷载引起的 i 点处位移可以表示为

$$s_{i,P} = \frac{4P_0 - K_h \cdot \pi \cdot d^2 \cdot (s_1 - s'_1)}{E_p \cdot \pi \cdot d^2} \cdot h_i \quad (4)$$

式中: P_0 为桩顶荷载; K_h 为桩顶弹簧的刚度系数; s_1 为热力耦合作用下的桩顶位移; s'_1 为仅受结构荷载作用时的桩顶位移。

在 i 点位置受温度变化影响产生的位移为

$$s_{i,T} = -\alpha \cdot \left(\sum_{k=i+1}^n \Delta T_k \cdot \frac{L}{n} + \frac{1}{2} \cdot \Delta T_i \cdot \frac{L}{n} \right) \quad (5)$$

式中: α 为桩体的线热膨胀系数; ΔT_i 为 i 点的温度变化量。

假定桩底的位移 s_b 仅由桩端法向阻力产生, 则根据 Boussinesq 解, 可得在半无限弹性体受到圆形区域的桩端阻力作用产生的位移^[18]:

$$s_b = \frac{p_b \cdot d \cdot (1 - \mu_b^2) \pi}{E_b} \cdot \frac{4}{4} \quad (6)$$

式中: p_b 为桩端阻力; E_b 和 μ_b 分别为桩端持力层的弹性模量和泊松比。

而根据桩体的受力平衡方程, 则有

$$P_0 - K_h \cdot (s_1 - s'_1) \cdot \frac{\pi d^2}{4} = \sum_{j=1}^n p_j \frac{\pi d L}{n} + p_b \frac{\pi d^2}{4} \quad (7)$$

1.2 土的位移方程

根据 Mindlin 解^[19], 可以得到在半无限空间中桩

单元 j 的侧摩阻力 p_j 引起 i 点处竖向位移:

$$s'_{ij} = \frac{d}{E_s} \cdot p_j \cdot I_{ij} \quad (8)$$

式中: E_s 为桩周土体的弹性模量; I_{ij} 为 p_j 对 i 点处的位移影响系数, 可通过 Mindlin 解对桩单位侧面积分得到^[20]。

但由于持力层的存在将使得土的位移有别于理想半无限弹性空间中的位移; D'Appolonia 等^[21]所提出的镜像近似方法则提供了一种简化而有效的解决方案 (如图 1 (c)), 该方法通过将实际单元 j 通过持力层界面镜像形成一个虚拟单元 j' , 该虚拟单元受到与实际单元相反的侧摩阻力 $k \cdot p_j$ 的作用。则实际单元和虚拟单元侧摩阻力导致的 i 点位移为

$$s'_{ij} = \frac{d}{E_s} \cdot p_j \cdot (I_{ij} - kI'_{ij}) \quad (9)$$

式中: k 的取值受持力层刚度的影响, 当持力层刚度与桩周土层一致时, k 值取值为 0, 则位移值计算退化至式 (8), 当持力层刚度足够大时, k 值将趋于 1。

根据式 (9), 桩身所有桩单元侧摩阻力导致的 i 点竖向位移可表示为

$$s'_i = \frac{d}{E_s} \cdot \sum_{j=1}^n p_j \cdot (I_{ij} - kI'_{ij}) \quad (10)$$

1.3 温度影响下桩-土的共同方程

基于桩-土位移协调假设, 则有

$$s_i = s'_i \quad (11)$$

结合式 (1) ~ (7), 式 (10), 可得

$$\begin{aligned} \frac{d}{E_s} \cdot \sum_{j=1}^n p_j \cdot (I_{ij} - kI'_{ij}) &= -\frac{1}{E_p} \cdot \sum_{j=1}^n p_j D_{ij} + \\ \frac{4P_0 - K_h \cdot \pi \cdot d^2 \cdot (s_1 - s'_1)}{E_p \cdot \pi \cdot d^2} \cdot h_i - \alpha \cdot \left(\sum_{k=i+1}^n \Delta T_k \cdot \frac{L}{n} + \frac{1}{2} \cdot \Delta T_i \cdot \frac{L}{n} \right) + \\ \left(P_0 - K_h \cdot (s_1 - s'_1) \cdot \frac{\pi d^2}{4} - \sum_{j=1}^n p_j \frac{\pi d L}{n} \right) \frac{(1 - \mu_b^2)}{d \cdot E_b} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: s_1 可以根据式 (10) 表示为

$$s_1 = \frac{d}{E_s} \cdot \sum_{j=1}^n p_j \cdot (I_{1j} - kI'_{1j}) \quad (13)$$

根据上式, 可以得到热力耦合作用下能源桩完整矩阵方程:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{d}{E_s} \cdot ([I_s] - k[I'_s]) + \frac{1}{E_p} [\mathbf{D}] + \frac{\pi L}{n} \cdot \frac{(1 - \mu_b^2)}{E_b} \cdot [A] + \right. \\ &\left(\frac{K_h \cdot d}{E_p \cdot E_s} \cdot [\mathbf{hE}] + \frac{K_h \cdot \pi d^2 \cdot (1 - \mu_b^2)}{4 \cdot E_b \cdot E_s} \cdot [A] \right) \cdot \\ &\left([I_{s,1j}] - k[I'_{s,1j}] \right) \cdot [\mathbf{p}] = \left(\frac{4P_0}{E_p \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{K_h \cdot s'_1}{E_p} \right) \end{aligned}$$

$$[\mathbf{h}] + \left(\frac{K_h \cdot \pi d \cdot (1 - \mu_b^2) \cdot s'_1}{4E_b} + P_0 \cdot \frac{(1 - \mu_b^2)}{d \cdot E_b} \right). \\ [\mathbf{W}] - \alpha \cdot \frac{L}{n} \cdot [\mathbf{V}] \cdot [\Delta T] \quad . \quad (14a)$$

$$[\mathbf{I}_s] = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1n} \\ I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ I_{n1} & I_{n2} & \cdots & I_{nn} \end{bmatrix}; [\mathbf{D}] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \cdots & D_{nn} \end{bmatrix}; \\ [\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \ddots \\ 1 & \ddots & 1 \\ \ddots & 1 & 1 \end{bmatrix}; [\mathbf{hE}] = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_2 & 0 & \ddots \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & h_n \end{bmatrix}; \\ [\mathbf{I}_{s,1j}] = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1n} \\ I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1n} \end{bmatrix}; [\mathbf{p}] = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix}; \\ [\mathbf{h}] = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix}; [\mathbf{W}] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}; [\mathbf{V}] = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & \ddots \\ 0 & 0 & \ddots & 1 \\ 0 & \ddots & 0 & 0.5 \end{bmatrix}; \\ [\Delta T] = \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \vdots \\ \Delta T_n \end{bmatrix}. \quad (14b)$$

依此, 可求解出各桩单元的侧摩阻力, 再根据下式可得到各桩单元的轴向位移:

$$s'_i = \frac{d}{E_s} \cdot ([\mathbf{I}_s] - k \cdot [\mathbf{I}'_s]) \cdot [\mathbf{p}] \quad . \quad (15)$$

1.4 收敛条件

根据式 (10), 桩端位移可表示为

$$s_b = \frac{d}{E_s} \cdot \sum_{j=1}^n p_j \cdot (I_{bj} - kI_{bj}) = \frac{d}{E_s} \cdot (1 - k) \cdot \sum_{j=1}^n p_j \cdot I_{bj} \quad . \quad (16)$$

联立式 (6), (16), 则有

$$k = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \frac{E_s}{E_b} \cdot \frac{p_b \cdot (1 - \mu_b^2)}{\sum_{j=1}^n p_j \cdot I_{bj}} \quad . \quad (17)$$

式中: k 的取值范围为 $0 \sim 1$; 通过预设一个 k 值, 经由式 (14), (17) 计算可获得一个新的 k 值, 再带入式 (14), (17) 中进行迭代运算, 直至两个 k 值的差值小于它们平均值的 1% 达到收敛。

2 分析模型实现与验证

2.1 分析模型的实现

结合上述数学方程, 基于 MATLAB 软件开发了

计算程序以获得能源桩的应力和位移解; 在计算程序中, 可以自行定义能源桩的几何和材料参数, 并考虑沿桩轴的不均匀温度分布。模型计算需定义桩周土层参数和桩端持力层参数, 桩周土层参数取平均值。计算过程先进行力学加载计算, 得到仅受结构荷载作用时的桩顶位移 s'_1 ; 然后进行热力耦合加载计算, 同时需考虑桩顶约束作用; 据相关研究, 桩顶刚度系数 (K_h) 取值范围为 $0 \sim 10 \text{ GPa/m}$ ^[12]。

2.2 分析模型的验证

本文基于自行编制的分析程序对现场试验进行模拟, 并与现场实测结果进行对比分析以验证模型的合理性。Laloui 等^[22]在瑞士洛桑进行了能源桩的现场测试, 通过将建筑桩基改造为能源桩, 监测了测试桩在温度-结构荷载耦合作用下的热力响应行为。测试能源桩的直径为 0.88 m , 长度为 25.8 m ; 钢筋混凝土的弹性模量约为 29200 MPa , 线热膨胀系数为 $10 \times 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C}$ 。测试桩的桩端嵌入 Molasse 砂岩层中, 弹性模量 (E_b) 约为 1000 MPa ; 桩侧土为砂砾土层, 弹性模量 (E_s) 约为 130 MPa 。

在洛桑现场的试验 T1, 桩体仅受温度荷载作用, 桩顶无约束且无力学荷载作用。在试验过程中桩体温的变化如图 2 所示; 桩体经历了一次升温-自然回温的温度变化过程, 温度增量最大为 22.7°C , 而后降低至 3.2°C 。图 2 还显示了在 T1 试验过程中桩顶位移的实测值与计算值; Laloui 等^[22]利用 3 种不同的监测手段实测了桩顶位移变化, 得到了相近的热致桩顶位移变化规律; 由图 2 可知, 桩体由于温度升高将产生热膨胀变形, 从而引起桩顶抬升; 当桩体温度降低时, 热致桩顶抬升位移也随之降低。本研究所提出模型的计算结果与实测结果在规律和量级上均十分相近。

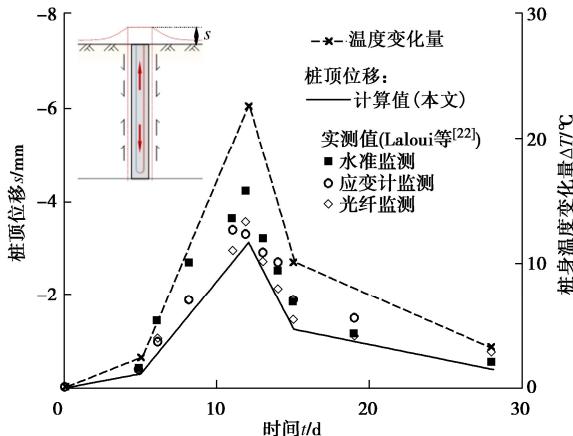


图 2 洛桑现场温度荷载作用下能源桩桩顶位移

Fig. 2 Head displacements of energy piles under thermal loading in Lausanne case

在洛桑现场建筑物修建完成后, 桩顶受到了约

1.20 MPa 的应力作用; 而后, Laloui 等^[22]开展了现场测试 T7, 桩体温度升高了约 15.0°C; 桩顶建筑物将对桩顶位移产生一定的约束作用, 桩顶刚度系数 (K_h) 取值根据实测结果反演获取, 取值为 1.0 GPa/m。图 3 为在热力耦合荷载作用下能源桩的轴向荷载分布曲线。由图 3 可知, 在仅桩顶力学荷载作用下, 桩身荷载总体上呈现沿桩深逐渐降低的规律。在桩体温度升高后, 桩身热膨胀变形将受到桩顶结构、桩周土体及桩端持力层的约束作用产生热致压应力; 桩身各部位在温度升高后竖向荷载均有一定程度的提高。热致荷载可以由热力叠加荷载曲线减去力学荷载曲线得到; 桩体温度升高后, 桩体温度荷载沿桩身呈现出中间大, 两端小的分布规律。本研究所提出模型的荷载计算曲线与实测曲线在规律上得到了较好的一致性。因此, 所提出的分析方法能较好地反映能源桩在温度变化过程中的荷载传递和位移行为。

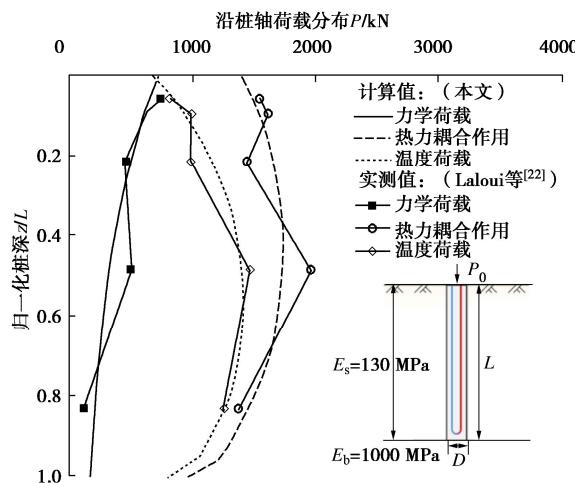


图 3 洛桑现场热力耦合荷载作用下能源桩轴向荷载分布

Fig. 3 Distribution of axial load of energy piles under combined thermomechanical loading in Lausanne case

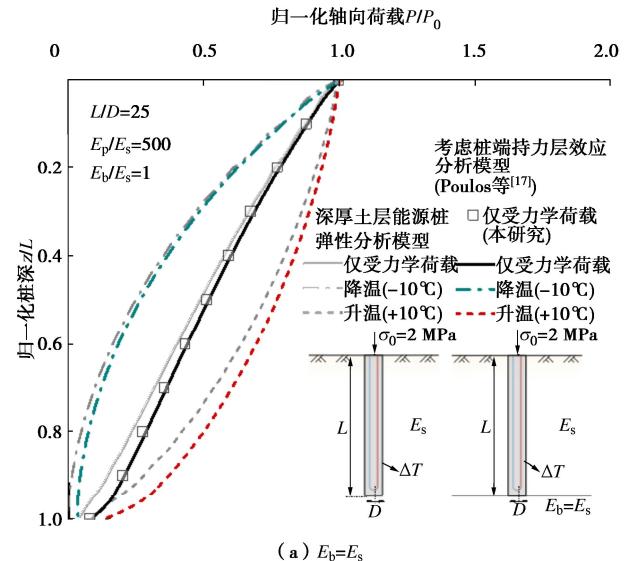
3 能源桩受力变形特性分析

3.1 考虑桩端持力层效应的能源桩荷载传递规律

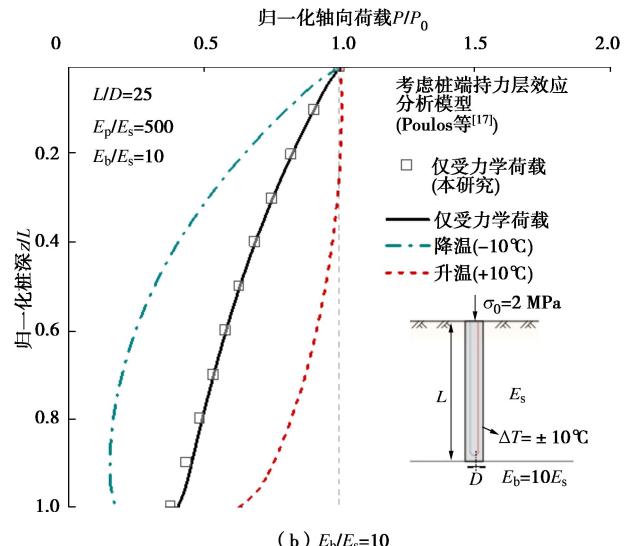
在不同持力层条件下, 能源桩在受到温度与结构耦合荷载作用时的轴向荷载分布如图 4 所示。图中将轴向荷载除以桩顶荷载进行归一化处理。当桩仅受到桩顶力学荷载作用, 桩身无温度变化, 本文模型将退化为 Poulos 等^[17]所提出的常规桩基分析模型; 由图可知, 仅力学荷载作用下, 桩体轴向荷载呈现沿深度逐渐减小的规律, 本文模型的计算结果与 Poulos 等^[17]的计算结果一致性进一步验证了模型的可靠性。而当桩体温度改变时, 桩身荷载分布也将发生改变, 升温将导致桩身附加压应力的产生, 而降温将导致附加拉应力。

当持力层的弹性模量 (E_b) 与桩周土 (E_s) 一致时, 所分析问题将等同于半无限均匀弹性土层中能源桩的分析问题; 图 4 (a) 也呈现了深厚土层能源桩弹性分析模型^[13-14]的计算结果; 值得注意的是, 本文所提出的模型计算结果与能源桩弹性分析结果总体规律一致, 但数值上存在轻微的差异, 差异主要来源于本文模型在计算桩端位移时忽略了桩端面上覆盖土层的影响, 这种误差在已有文献中被认为在实际工程计算中是可以忽略的^[17]。

由图 4 可知, 桩端阻力分担的荷载比将随着桩端持力层弹性模量的提高而提高; 当 $E_b/E_s=1$ 时 (即均匀土层, 图 4 (a)), 桩侧阻力几乎承担了全部的桩顶荷载, 桩端阻力仅分担了 7.8%; 而当 E_b/E_s 趋于无穷大时 (图 4 (d)), 桩端阻力将分担高达 65.8% 的桩顶荷载。还可以发现, 在相同温度变化情况下, 热致桩轴向荷载也会随着持力层刚度的增加而增加; 这主要是因为持力层刚度增加会对桩端部热致变形产生更大的约束作用, 从而产生更大的热致附加应力。



(a) $E_b=E_s$



(b) $E_b/E_s=10$

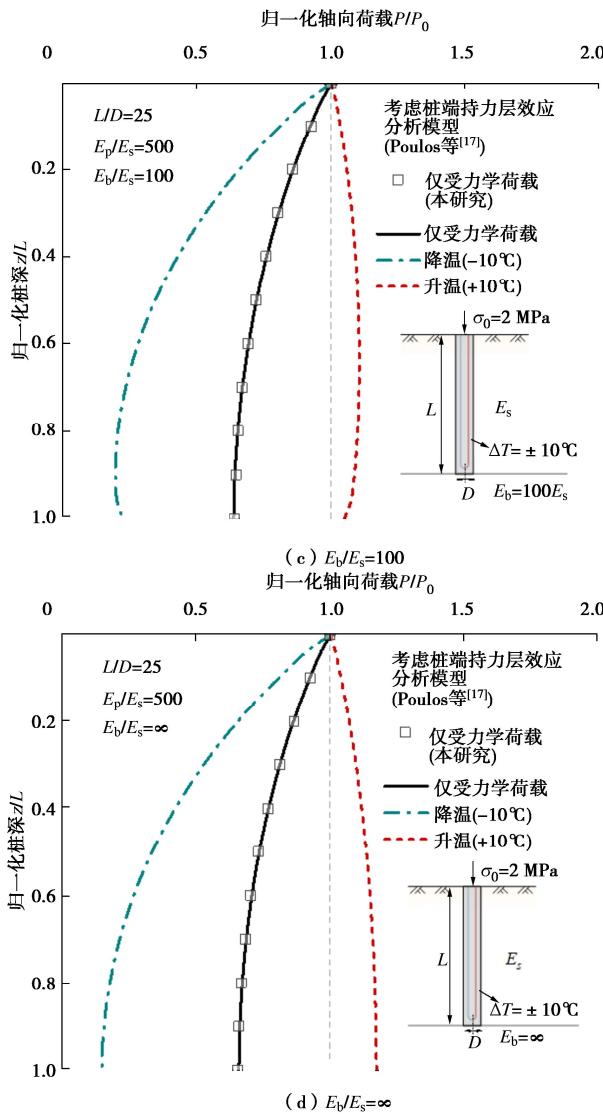


图 4 不同持力层条件下能源桩热力响应特性

Fig. 4 Thermomechanical behavior of energy piles under different bearing layer conditions

3.2 能源桩温度附加应力分布规律

在能源桩运行过程中温度将发生改变，同时将引起桩身的热膨胀/收缩变形，但热变形将受到桩侧摩阻力及两端的约束作用从而产生附加热应力 ($\Delta\sigma_T$)。如果能源桩产生的热变形完全被约束，热致应力将达到其理论最大值 ($\Delta\sigma_{T,\max}$)：

$$\Delta\sigma_{T,\max} = E_p \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad . \quad (18)$$

为深入理解能源桩的热力响应行为模式，将分别讨论桩端持力层刚度、桩周土刚度、桩顶刚度及桩长径比等要素对能源桩热力响应行为的影响。为了使结果易于比较，并为更为广泛的工程实际工况提供参考依据，在以下讨论中，对热应力及桩深均进行了归一化处理；这也使得分析结果对于温升和温降工况都是有效的。

在不同持力层条件下能源桩的热致应力分布曲线如图 5 所示。由图 5 可知，在桩周土体刚度不变的情

况下，附加热应力将随着桩端持力层弹性模量的增加而增加，最大附加热应力的位置将逐渐下移，该位置也对应于热致轴向位移零点的位置；在本模拟工况 ($L/D = 25$, $E_p/E_s = 500$) 下，当 $E_b/E_s = 1$ 时（即均匀土层），沿桩深最大附加热应力约为完全约束应力值的 17%，出现在桩中部，桩端热应力仅为完全约束应力值的 3%；而随着 E_b/E_s 的提高，最大附加热应力提高了近一倍，最大约束位置下移至桩端。

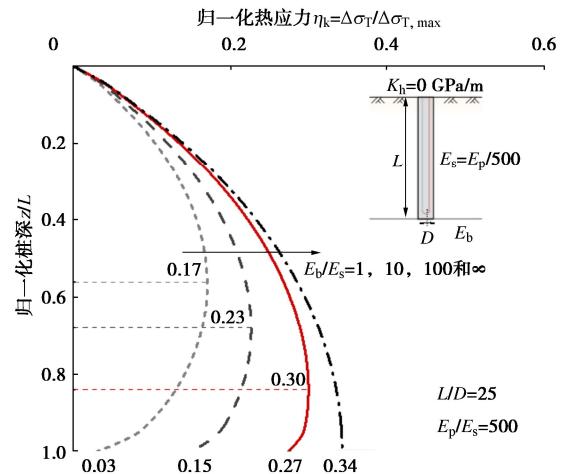


图 5 不同桩端持力层条件下能源桩的热应力分布

Fig. 5 Distribution of thermal stress of energy piles under different bearing layer conditions

图 6 显示了桩周土体刚度对能源桩热应力的影响。由图可知，在桩端刚度不变的情况下，附加热应力将随着桩周土体弹性模量的增加而增加；在本模拟工况 ($L/D = 25$, $E_p/E_b = 5$)，当比值 E_p/E_s 从 1000 降至 100 时，桩体最大附加热应力从完全约束应力值的 18% 提高至 66%，桩端附加热应力提高了近 35%。还可以发现，随着桩周土体刚度的提高，最大附加热应力的位置将从桩底部上移至桩中部。

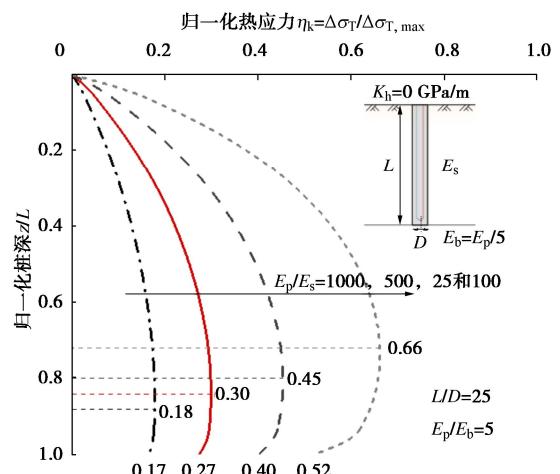


图 6 桩周土体刚度对能源桩热应力分布影响

Fig. 6 Effects of the stiffness of the surrounding soil on the thermal stress of energy piles

在温度作用下，桩体的热变形会引起桩顶的位移，

而上部结构将约束桩顶位移从而引起桩顶的附加应力。图 7 探究了桩顶刚度系数 (K_h) 对能源桩热致应力的影响。由图 7 可知, 在相同的桩周土和持力层刚度条件下, 能源桩的热致应力将随着桩顶刚度系数的提高而提高; 当 K_h 由 0 GPa/m 增加到 10 GPa/m 时, 桩身最大附加应力提高了近 52%。当 $K_h = 0$ 时, 桩顶的热致应力几乎为 0; 而随着 K_h 值的增加, 桩顶热致应力甚至达到了完全约束应力值的 79%。桩顶刚度的变化也会引起桩端阻力的改变, 随着 K_h 值的增加, 热致桩端阻力也将随之增大, 提高了近 50% 的完全约束应力值。此外, 桩顶刚度还影响着热致位移零点的位置, 随着刚度系数的提高, 位移零点也将上移, 位移零点会趋向于向更大约束的位置移动。

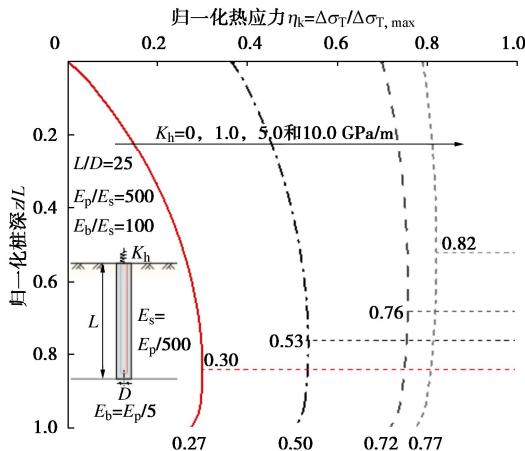


图 7 桩顶约束对能源桩热应力分布影响

Fig. 7 Effects of head restraint on thermal stress of energy piles

不同长径比的能源桩热应力分布如图 8 所示。由图 8 可知, 归一化热应力将随着能源桩长径比的增加而提高, 这意味着相同温度变化将在更大长径比的能源桩产生更为显著的热应力; 在本研究工况下, 当 $L/D = 100$ 时, 温度变化将导致能源桩产生高达完全约束值 86% 的附加热应力。这主要是因为随着桩长的增加, 与土体接触的桩侧面积增加, 热变形所调动的桩侧摩阻力也将随之增加; 如图 8 所示, 随着桩长径比从 10 增加至 100, 热致桩端阻力提高了近 72% 的完全约束应力值。

3.3 能源桩热致位移行为

能源桩运行过程中由于温度变化将产生热变形, 尽管热变形会受桩周土的约束作用, 但仍会引起桩顶的位移变化 (s_T)。如果能源桩产生的热变形完全自由且热致位移零点位于桩底时, 热致桩顶位移将达到其理论最大值 ($s_{T,max}$):

$$s_{T,max} = -\alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad . \quad (19)$$

为了使分析结果更具适用性, 以下讨论对热致桩顶位移基于其理论最大值进行归一化处理。图 9 分析

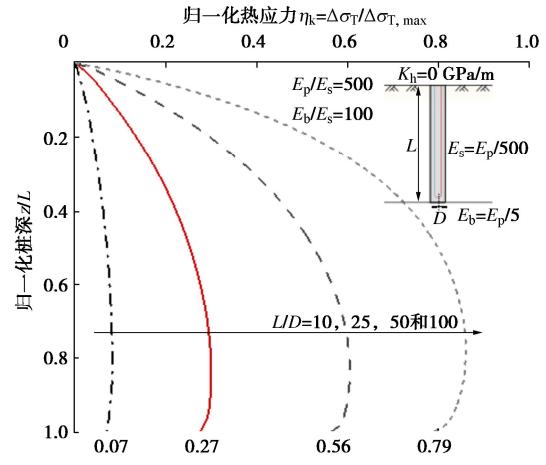


图 8 长径比对能源桩热应力分布影响

Fig. 8 Effects of slenderness ratios on thermal stress of energy piles

了能源桩在不同持力层条件下的归一化热致位移变化规律。由图 9 可知, 能源桩热致桩顶位移将随着桩端持力层刚度的增加而增加; 以 $L/D = 25$ 的工况为例, 当 $E_b/E_s = 1$ 时, 桩顶产生了约理论最大值的 53%, 而随着桩端持力层刚度的增加, 归一化桩顶位移值达到了近 76%。但对于长径比较大的能源桩, 桩端持力层刚度对桩顶位移的影响并不显著; 当 $L/D = 100$ 时, 归一化位移值变化随持力层刚度的增加仅增加了 0.02。此外, 还可以发现归一化位移值将随着桩长径比的增加而降低。

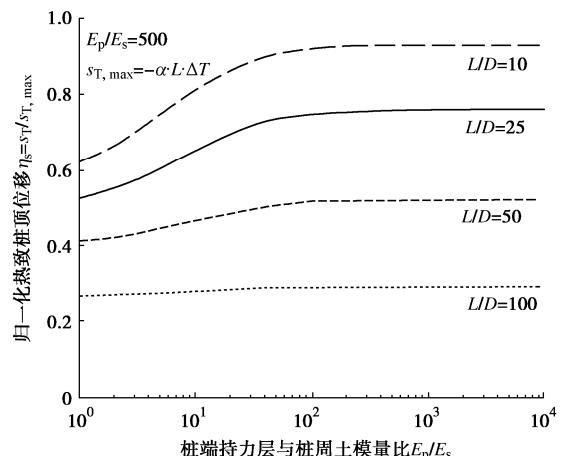


图 9 不同持力层条件下能源桩热致位移

Fig. 9 Thermally induced head displacements of energy piles under different bearing layer conditions

归一化位移值随桩周土体刚度的变化规律如图 10 所示。能源桩热致桩顶位移将随着桩周土体刚度的增加而减小; 以 $L/D = 25$ 的工况为例, 当 E_p/E_s 比值从 10 增加至 10^4 , 归一化位移值将从 0.11 提高至 0.98; 同样发现归一化位移值将随着桩长径比的增加而降低; 但不同的是, 桩周土体刚度对不同长径比的能源桩均有较大的影响。

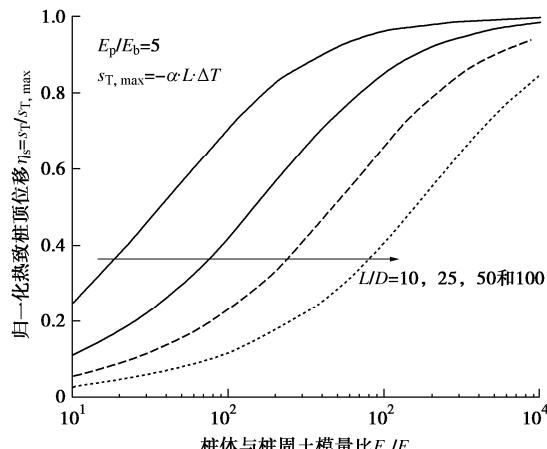


图 10 桩周土体刚度对能源桩热致位移影响
Fig. 10 Effects of stiffness of surrounding soil on head displacement of energy piles

4 应用分析

能源桩在温度变化时将产生热膨胀/收缩变形，桩周土及持力层通过对热变形产生约束作用，进而影响能源桩的热力响应及变形行为。本文提出的分析模型能较好地模拟不同承载性状的能源桩在热力耦合荷载作用下的响应行为，在较短的计算时间获取较为准确的计算结果，本文的分析结果也可为不同承载性状能源桩的设计计算提供一定的参考依据。根据《桩基地热能利用技术标准：JGJ/T438—2018》^[23]，桩身最大附加温度应力可根据式（20）计算；同理，桩顶热致位移可根据式（21）计算；但对于 η_k 和 η_s 的具体取值方法并不明确。

$$\Delta\sigma = \eta_k \cdot \Delta\sigma_{T,\max} = \eta_k \cdot (E_p \cdot \alpha \cdot \Delta T), \quad (20)$$

$$\eta_T = \eta_s \cdot \Delta s_{T,\max} = \eta_s \cdot (-\alpha \cdot L \cdot \Delta T). \quad (21)$$

本文所计算的归一化应力及位移值结果 (η_k 和 η_s)，可根据实际工程的地质条件及桩基结构特点，结合理论最大应力及位移值计算，对不同承载性状能源桩进行热致应力及位移的估算。例如，对于 $L = 25$ m, $D = 1$ m, $E_p = 30$ GPa, $\alpha = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 的能源桩，当 $E_s = 60$ MPa, $E_b/E_s = 100$ 且桩顶无约束时，可根据图 5 和图 9 得到 $\eta_k = 0.30$ 和 $\eta_s = 0.75$ ，当桩身温度提高了 10°C 时，可以根据式（20），（21）估算能源桩在这种情况下的最大热致压应力约为 0.90 MPa，热致桩顶抬升位移约为 1.88 mm。

但本研究仍具有一定局限性。首先，分析模型假设了桩周土体为弹性体，忽略了土体可能存在的不可逆体积变形行为，难以用于表征具有较强的固结和塑性特性的土体中（例如，低固结度饱和软土）的能源桩热力响应行为；其次，由于模型未考虑土体及界面的塑性行为，对于承受较大桩顶荷载的能源桩，相关

研究结果仅能作为部分参考。因此，未来仍需要更多的研究用于提升模型的准确性和适用性。

5 结 论

本文基于弹性理论分析框架，进一步考虑了桩端持力层的影响，建立了热力耦合作用下能源桩受力变形分析模型，并结合典型现场试验结果进行了模型验证，依此探究了地层条件及桩几何参数对能源桩荷载传递及位移行为的影响。主要得到以下 4 点结论。

(1) 基于典型现场试验数据的对比，本文提出的能源桩分析方法能够较好地反映不同承载性状能源桩在温度-结构耦合荷载作用的荷载传递规律及受力变形特性，具有物理意义明确和计算高效的特点，能较好地用于能源桩的设计计算。

(2) 当作用结构荷载时，桩端阻力分担的荷载比将随着桩端持力层刚度的增加而增加；桩体温度改变将引起桩身荷载分布的改变，升温将导致附加压应力产生，降温导致附加拉应力；热致的轴向荷载也将随着持力层刚度的增加而增加。

(3) 桩周土体、桩端持力层及桩顶的刚度情况是影响能源桩热致应力的大小和分布的关键因素；刚度的提高将增大对于桩体热变形的约束，从而引起更为显著的附加热应力；最大热应力位置（即热致位移零点位置）会趋于向更大约束位置移动。

(4) 热致桩顶位移将随桩端刚度的增加而提高，随桩周土体刚度的提高而降低；但对于长径比较大的能源桩，桩端持力层刚度对桩顶位移的影响并不显著。

本文归一化应力及位移值结果可根据实际工程的地质条件及桩基结构特点，预估不同承载性状能源桩的热致应力及位移，为能源桩设计计算提供一定的参考依据。

参 考 文 献：

- [1] 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 Hanlong, KONG Gangqiang, WU Hongwei. Applications of energy piles and technical development of PCC energy piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 176-181. (in Chinese))
- [2] B BRANDL H. Deep Foundations on Bored and Auger Piles: Energy Piles and Diaphragm Walls for Heat Transfer from and into the Ground[M]. London: CRC Press, 1998.
- [3] AMATYA B L, SOGA K, BOURNE-WEBB P J, et al. Thermo-mechanical behaviour of energy piles[J]. Géotechnique, 2012, 62(6): 503-519.

- [4] 方金城, 孔纲强, 孟永东, 等. 低承台 2×2 能量桩基础单桩运行热力耦合特性研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(2): 317-324. (FANG Jincheng, KONG Gangqiang, MENG Yongdong, et al. Thermo-mechanical coupling characteristics of single energy pile operation in 2×2 pile-cap foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(2): 317-324. (in Chinese))
- [5] FANG J, KONG G, YANG Q. Group performance of energy piles under cyclic and variable thermal loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, **148**(8): 04022060.
- [6] GASHTI E H N, MALASKA M, KUJALA K. Analysis of thermo-active pile structures and their performance under groundwater flow conditions[J]. Energy and Buildings, 2015, **105**: 1-8.
- [7] KONG G, FANG J, LV Z, et al. Effects of pile and soil properties on thermally induced mechanical responses of energy piles[J]. Computers and Geotechnics, 2023, **154**: 105176.
- [8] MORADSHAH A, FAIZAL M, BOUAZZA A, et al. Effect of nearby piles and soil properties on thermal behaviour of a field-scale energy pile [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, **58**(9): 1351-1364.
- [9] KNELLWOLF C, PERON H, LALOUI L. Geotechnical analysis of heat exchanger piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(10): 890-902.
- [10] PASTEN C, SANTAMARINA J C. Thermally induced long-term displacement of thermoactive piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(5): 06014003.
- [11] CHEN D, MCCARTNEY J S. Parameters for load transfer analysis of energy piles in uniform nonplastic soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, **17**(7): 04016159.
- [12] 费康, 戴迪, 洪伟. 能量桩单桩工作特性简化分析方法[J]. 岩土力学, 2019, **40**(1): 70-80, 90. (FEI Kang, DAI Di, HONG Wei. A simplified method for working performance analysis of single energy piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(1): 70-80, 90. (in Chinese))
- [13] 徐新丽, 蒋刚, 路宏伟, 等. 能源桩热-力半耦合弹性理论分析方法[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, **41**(1): 121-128. (XU Xinli, JIANG Gang, LU Hongwei, et al. Elasticity theory of energy pile under thermal-mechanical semi-coupling[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2019, **41**(1): 121-128. (in Chinese))
- [14] ROTTA LORIA A F, VADROT A, LALOUI L. Analysis of the vertical displacement of energy pile groups[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2018, **16**: 1-14.
- [15] MATTES N S. The influence of radial displacement compatibility on pile settlement[J]. Géotechnique, 1969, **19**(2): 157-159.
- [16] BATINI N, ROTTA LORIA A F, CONTI P, et al. Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, **86**: 199-213.
- [17] POULOS H G, MATTES N S. The behaviour of axially loaded end-bearing piles[J]. Géotechnique, 1969, **19**(2): 285-300.
- [18] MATTES N S, POULOS H. G. The analysis of downdrag in end-bearing piles[C]// 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 1969: 204-209.
- [19] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Journal of Applied Physics, 1936, **7**(5): 195-202.
- [20] POULOS H G, DAVIS E H. Pile Foundation Analysis and Design: Settlement Analysis of Single Piles[M]. New York: Wiley, 1980.
- [21] D'APPOLONIA E, ROMUALDI J P. Load transfer in end-bearing steel H-piles[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, **89**(2): 1-25.
- [22] 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.
- [23] 桩基地热能利用技术标准: JGJ/T 438—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. (Technical Standard for Utilization of Geothermal Energy Through Piles: JGJ/T 438—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese))