

考虑温度修正的能源桩力学响应研究

刘铠宁^{1,2}, 王忠瑾^{2*}, 谢新宇¹

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙大宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

摘要: 本文基于有限长圆柱热源模型, 对能源桩的荷载传递算法进行温度修正。通过算例分析, 研究了能源桩在温度荷载下的桩土界面温度与径向附加应力沿深度方向的分布规律, 将得到的径向附加应力代入荷载传递参数的经验公式中, 从而实现荷载传递曲线的温度修正。最后通过案例分析, 研究了温度修正对能源桩力学响应计算结果的影响。结果表明: (1) 不同加热时间下, 桩土界面的温度规律大致相同, 除桩顶和桩底外, 桩身的温度分布较为均匀; 随着深度增加, 温度变化量先增加, 在桩身中部达到最大值并保持一段距离不变, 而在桩底附近又逐渐减小。(2) 桩土界面的径向附加应力沿深度方向的分布形状与温度变化量的分布大致相同。(3) 温度修正对能源桩的位移发展影响很小, 而对温度应力的影响较大。具体来说, 在桩顶处, 温度应力的修正值小于原计算值, 在中性点处, 温度应力的修正值大于原计算值。

关键词: 能源桩; 荷载传递法; 热力学响应; 热源模型; 桩土界面温度分布; 径向附加应力

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2025)01-0010-08

Mechanical response of energy pile considering thermal correction

LIU Kaining^{1,2}, WANG Zhongjin^{2*}, XIE Xinyu¹

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. NingboTech University, Ningbo 315100, Zhejiang, China)

Abstract: Based on the finite-length cylindrical heat source model, this paper introduces a temperature correction to the load transfer algorithm of energy piles. The distribution patterns of the temperature at the pile-soil interface and the radial additional stress along the depth under thermal loading were investigated. The obtained radial additional stress was substituted into the load transfer parameter empirical formula, enabling temperature correction of the load transfer curve. Finally, the effect of temperature correction on the mechanical response of energy piles was evaluated using a specific example. The results indicate that: (1) The temperature distribution along the pile-soil interface remains consistent for different heating durations, with a relatively uniform distribution along the pile body, except for the pile top and bottom. As depth increases, temperature variation initially increases, reaching a maximum at the middle section of the pile and then remains constant for a certain distance before gradually decreasing near the pile bottom. (2) The distribution of radial additional stress along the pile-soil interface follows a pattern similar to temperature variation. (3) Temperature correction has a minor impact on displacement development but significantly affects temperature-induced stress in energy piles. Specifically, at the pile top, the correction value for temperature-induced stress is smaller than the original calculation, while it is greater at the neutral point.

Key words: energy pile; load transfer approach; thermodynamic response; heat source model; temperature distribution at the pile-soil interface; radial additional stress

收稿日期: 2023-05-05; 修回日期: 2023-05-25; 录用日期: 2023-05-30

基金项目: 宁波市青年科技创新领军人才项目 (2023QL018); 宁波市重大科技攻关暨揭榜挂帅项目 (2022Z030); 浙江省自然科学基金项目 (LY20E080001); 国家自然科学基金项目 (51708496, 52478365)。

作者简介: 刘铠宁 (1997—), 男, 天津人, 硕士研究生, 主要从事能源桩承载特性方面的研究。E-mail: lkn@zju.edu.com。

*通信作者: 王忠瑾 (1986—), 男, 山东菏泽人, 博士, 副教授, 从事桩基工程、基础工程、能源桩等研究。E-mail: zhongjin_wang@zju.edu.cn。

0 引言

作为一种常用的地热能利用技术, 地源热泵存在钻孔和埋管施工复杂、造价昂贵的缺点。能源桩通过将换热管埋置在建筑物桩基础的内部, 在承担上部荷载的同时, 实现了浅层地热能的利用, 具有广阔的应用潜力。

不同于普通的桩基础, 能源桩在使用中会受到温度荷载的作用。为了合理评估温度对能源桩承载性能的影响, 近二十年来自国内外的学者分别采用原位、模型试验的方法进行了研究。LALOUI 等^[1]和 BOURNE-WEBB 等^[2]在试验中发现温度荷载会影响侧摩阻力的发挥, 并改变桩身位移的方向, 产生温度附加应力。试验研究虽然加深了人们对能源桩热力响应的认识, 但是有关能源桩温度影响的定量分析研究仍然不足。而且早期的一些试验在分析数据时, 往往采用过于简单的假设, 仅定性分析温度的影响。例如, AMATYA 等^[3]对温度应力产生机理的解释中, 虽然对于温度应力沿深度的发展趋势给出了合理的预测, 但是其假设侧摩阻力沿深度均匀分布, 在对最大温度应力进行定量评估时会产生较大误差。

近年来, 荷载传递法因其概念清晰、计算简单的特点, 逐渐受到能源桩计算分析领域的关注。KNELLWOLF 等^[4]最早将荷载传递法引入到能源桩的计算中, 并使用了分段函数形式的荷载传递函数。PLASEIED^[5]和 CHEN 等^[6]对能源桩的荷载传递函数进行了更深入的研究, 为了反映不同土体性质、土体饱和度和温度的影响, 经过现场和离心模型试验的参数校正, 使用了双曲线形式的荷载传递曲线。当选取双曲线等非线性的荷载传递函数时, 控制方程一般难以直接求解, 通常需要借助变形协调法或矩阵位移法^[7-8]等数值方法得到桩身响应。

以上的能源桩数值分析方法中, 均忽略了桩土界面温度变化对于荷载传递曲线的影响, 简化了解过程。然而现场^[2]和模型试验^[9]的结果分析表明, 桩土界面的温度沿径向和轴向的分布并不均匀。骆湘勤等^[10]和 LIU 等^[11]分别假设桩土界面的温度沿深度方向的分布为线性函数和分段函数, 通过曲线拟合的方式确定待定系数, 进而确定桩土界面温度的具体分布, 并根据得到的温度分布修正桩侧荷载传递函数, 考虑温度分布的影响。

本文借助有限长圆柱热源模型的解析解, 直接得到桩土界面的温度分布, 在提高计算精度的同时简化了荷载传递函数的修正步骤, 并且结合具体算例, 定量地评估温度修正对能源桩荷载传递计算的影响。

1 桩土界面的温度分布

1.1 计算方法

一般来说, 地源热泵以及能源桩的温度场求解较为困难, 通常需要适当简化, 借理想热源模型得到温度分布的具体形式。常用的理想热源模型分为无限长和有限长两类; 根据理想热源的形状, 又可以分为点热源、线热源、圆柱热源等。对于能源桩来说, 通常将空间分布上对称的换热管等效为一个圆心在原点的圆柱热源^[12], 从而将三维的传热问题简化为二维问题求解。本文使用 MAN 等^[13]提出的有限长圆柱热源模型计算桩土界面的温度分布, 计算模型如图 1 所示。这里 r_0 为圆柱热源的半径, m; h 为热源的长度, m; r 为计算位置距离中心的距离, m; z 为计算位置深度的坐标, m。

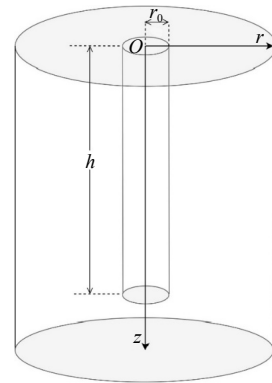


图 1 有限长圆柱热源模型示意图

Fig. 1 Finite-length cylindrical heat source model diagram

经过推导^[13], 圆柱热源周围温度场可以用下式计算:

$$\theta(r, z, t) = \frac{q_l}{8\pi k} \int_0^t \frac{1}{t-t'} \cdot I_0 \left[\frac{rr_0}{2D(t-t')} \right] \cdot \exp \left[-\frac{r^2 + r_0^2}{4D(t-t')} \right] \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{h-z}{2\sqrt{D(t-t')}} \right] + 2\operatorname{erf} \left[\frac{z}{2\sqrt{D(t-t')}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{h+z}{2\sqrt{D(t-t')}} \right] \right\} dt' \quad (1)$$

式中: θ 为过剩温度; t 为时间; t' 为积分变量, 计算后不出现在温度场函数中; q_l 为单位长度的热流; k 为导热系数; D 为热扩散率; $I_0(x)$ 为零阶第一类修正贝塞尔函数; $\exp(x)$ 表示指数函数; $\operatorname{erf}(\zeta)$ 为误差函数。

1.2 影响因素

结合式 (1), 对桩土界面温度分布的影响因素进行分析, 算例中能源桩桩径为 0.5 m, 桩长为 20 m。为了简化计算, 将“U”型换热管等效为一个长度、半径均相等的圆柱热源, 且中心与桩横截面的圆心

重合^[12]。参考 GHASEMI-FARE 和 BASU^[14] 的算例, 取热源半径 r_0 为 0.02 m。其他热学参数根据 GAO 等^[15] 的试验数据选取, 如表 1 所示。最后, 根据单位长度热流 q_l 的大小和加热时间的长短, 将计算工况分为 4 组。

表 1 传热参数

Table 1 Heat transfer parameters

参数	取值	工况
热源半径 r_0 /m	0.02	1—4
热源埋深 h /m	19.8	1—4
导热系数 k /(W/(m·K))	1.74	1—4
热扩散率 D /(m ² /s)	7.57×10^{-7}	1—4
热流 q_l /(W/m)	70	1、2
	100	3、4
时间 t /d	30	1、3
	60	2、4

桩土界面温度分布如图 2 所示, 通过计算, 可以发现 4 种工况下温度分布的形状大致相同, 从上到下, 桩土界面处的温度先增加至最大值, 然后保持此温度不变, 经过平台段后, 在靠近热源底部处, 温度变化量开始减少。换言之, 桩土界面的温度变化量沿深度方向的分布大致均匀, 除去顶部和端部, 其余部分基本保持一个相同的值。

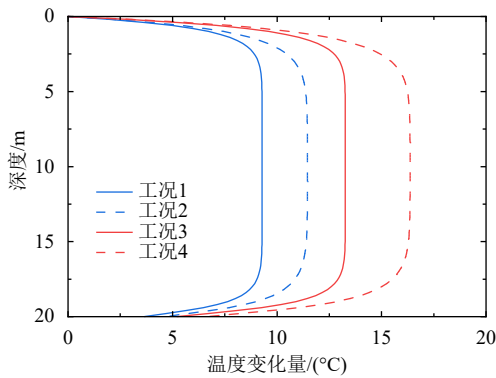


图 2 桩土界面温度分布

Fig. 2 Temperature distribution at the pile-soil interface

从最大温度变化量的角度来看, 加热时间从 30 d 增加到 60 d, 分别对比工况 1、2 和工况 3、4, 最大温度变化量均增加了 23%。由此可见, 随着加热时间的增加, 最大温度变化量也逐渐增加。

从温度变化量的深度分布来看, 随着加热时间的增加, 温度平台段的长度有所减小, 而顶部和端部的温度、衰减段的长度相应地有所增加。工况 1 中的温度变化量在 5.20 m 处达到最大值, 在 15.00 m 处开始衰减, 工况 2 中的平台段从 7.40 m 开始, 到 13.00 m 处结束, 平台段的长度减小了

42.86%; 而从工况 3 到工况 4, 平台段的长度更是减少了 50%, 这说明增加加热时间会显著影响温度的分布, 使桩土界面温度的均匀分布段不断缩短。对比工况 1 和工况 3、工况 2 和工况 4, 平台段的长度仅缩短了 2.04% 和 14.29%, 这说明单位长度热流的大小对界面温度在深度方向的分布影响较小, 只会使平台段的长度略微缩短, 但随着加热时间的增加, 这种缩短效应会进一步被放大。

2 荷载传递函数的温度修正

使用荷载传递法求解能源桩问题时, 往往假设桩土界面的温度均匀分布, 并且忽略桩土界面温度变化对于荷载传递函数中参数取值的影响。实际上, 温度荷载下, 能源桩在径向的自由变形会受到约束, 产生径向温度附加应力, 根据强度理论, 桩土界面的法向应力会影响剪切强度的发挥, 进而影响到桩土间的荷载传递关系。

2.1 荷载传递曲线

为了更好地模拟桩土间荷载传递的非线性关系, 一般采用双曲线型、指数型的荷载传递函数, 并通过经验公式或曲线拟合的方式确定其中的参数取值。本文选取双曲线型的荷载传递曲线, 如图 3 所示。

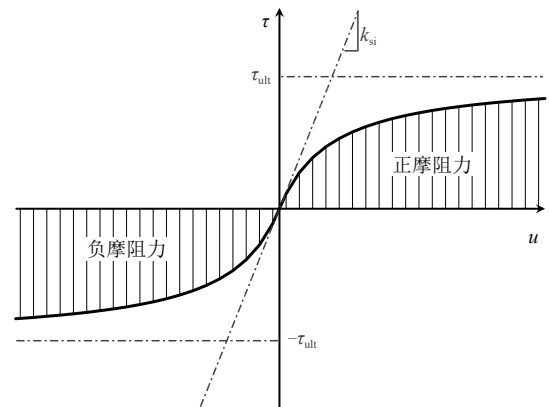


图 3 桩侧荷载传递曲线

Fig. 3 Load transfer curve

在能源桩的实际使用过程中, 桩身相对于土体的位移可能向上也可能向下, 随之产生的侧摩阻力方向也相反, 因此荷载传递曲线关于原点对称, 其函数表达式如下:

$$\tau = \frac{u}{a + b|u|} \quad (2)$$

式中: τ 为侧摩阻力; u 为桩土相对位移; a 和 b 为模型参数, 可以根据以下公式确定^[16-18]:

$$a = \frac{1}{k_{si}} \quad (3)$$

$$b = \frac{R_f}{\tau_f} \quad (4)$$

式中: k_{si} 为桩-土界面的初始剪切刚度; τ_f 为桩-土界面的剪切强度; R_f 为破坏比 ($R_f = \tau_f/\tau_{ult}$), 破坏比的常见取值为 0.85~1^[7-8], 本文取为 1, τ_{ult} 为桩-土界面的极限剪切强度。桩-土界面的初始剪切刚度 k_{si} 可以根据 RANDOLPH 和 WROTH^[19] 给出的公式计算:

$$k_{si} = \frac{G_s}{r_0 \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} \quad (5)$$

$$r_m = 2.5\rho(1 - \nu_s)L \quad (6)$$

式中: G_s 为土体的剪切模量; r_0 为桩身半径; r_m 为桩的影响半径; ρ 为桩周土的不均匀系数, 对于均质土取 1; ν_s 为桩周土的泊松比。桩-土界面的剪切强度 τ_f 则可以根据有效应力法计算^[18]:

$$\tau_f = K_0 \tan \phi'(\gamma'z + \Delta\sigma') \quad (7)$$

式中: K_0 为静止土压力系数; γ' 和 ϕ' 为土体有效重度和有效内摩擦角; $\Delta\sigma'$ 为深度 z 处由孔隙水压力消散引起的附加应力。

对于桩端未发生刺入破坏的桩, 可以近似用线弹性模型模拟桩底应力与位移的关系, 其中桩底弹簧刚度 k_b 采用 RANDOLPH 和 WROTH^[19] 给出的公式计算:

$$q_b = k_b u_b \quad (8)$$

$$k_b = \frac{4G_b}{\pi r_b(1 - \nu_b)} \quad (9)$$

式中: q_b 为桩端应力; u_b 为桩底位移; G_b 为桩底土体的剪切模量; r_b 为桩底处的桩身半径; ν_b 为桩底土体的泊松比。

2.2 温度修正

在温度荷载下, 桩身径向变形对于桩土界面法向应力有所影响, 进而改变桩土界面的剪切强度和荷载传递参数 b 。通过在剪切强度 τ_f 的法向应力计算中添加径向温度附加应力项, 实现温度的修正。考虑温度修正的桩土界面的剪切强度计算式如下:

$$\tau_{TT} = \zeta(\sigma_{rT} + \sigma_h) \quad (10)$$

$$\sigma_h = K_0 \gamma z \quad (11)$$

式中: τ_{TT} 为修正后的桩土界面剪切强度; ζ 表示界面摩擦系数, 可以根据桩侧土的内摩擦角进行估算; σ_{rT} 为温度引起的桩身径向附加应力; σ_h 为土体的自重应力; K_0 为静止土压力系数; γ 为土体重度。

温度引起的径向附加应力可以根据圆孔扩张理论和 FAIZAL 等^[20], 以及 LIU 等^[11] 的推导得到:

$$\sigma_{rT} = \frac{\Delta r E_s}{(1 + \nu_s)r_0} = \frac{E_s}{1 + \nu_s} \cdot \left(\sqrt{\frac{1 + 3\alpha \cdot \Delta T}{1 + \alpha \cdot \Delta T}} - 1 \right) \quad (12)$$

式中: Δr 为桩径在温度荷载下的变化量; r_0 表示原桩径; E_s 和 ν_s 分别为桩侧土体的弹性模量和泊松比; α 为桩体的线膨胀系数。

将桩土界面的温度计算式 (1) 代入式 (10) ~ 式 (12), 最终将桩土界面剪切强度 τ_{TT} 转化为深度 z 的函数。表 2 为桩土计算参数, 这里根据表 1 和表 2 选取相关参数进行径向附加应力的计算。

表 2 桩土计算参数

Table 2 Calculation parameters of pile and soil

桩长 L/m	桩径 d/m	桩身模量 E/GPa	线膨胀系数 $\alpha/(^{\circ}C^{-1})$	土体模量 E_s/MPa	泊松比 ν_s	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	摩擦系数 ζ	双曲线参 数 $a/(m \cdot Pa^{-1})$	桩顶刚度 $k_h/(GPa \cdot m^{-1})$	桩底刚度 $k_b/(GPa \cdot m^{-1})$
20	1	30	1.0×10^{-5}	11	0.2	31	11.4	0.52	2.79×10^{-7}	2.01	2.01

如图 4 所示, 径向附加应力沿深度方向的分布形状与对应的温度变化量沿深度方向的分布较为相似, 都是随着深度增加逐渐增加到最大值, 随后保持一段长度不变, 并在桩端附近开始减小。工况 1 到工况 4 的径向附加应力的最大值分别为 851.23 Pa、1 049.93 Pa、1 215.96 Pa、1 499.79 Pa。对比工况 1、2 和工况 3、4, 可以发现随着加热时间从 30 d 增加到 60 d, 附加径向应力均增加了 23.34%。基于以上分析, 不难发现, 虽然式 (12) 中径向附加温度应力与温度变化量之间并不是线性关系, 但是可以近似作线性处理, 这与方鹏飞等^[21] 在试验中观察到的现象一致。

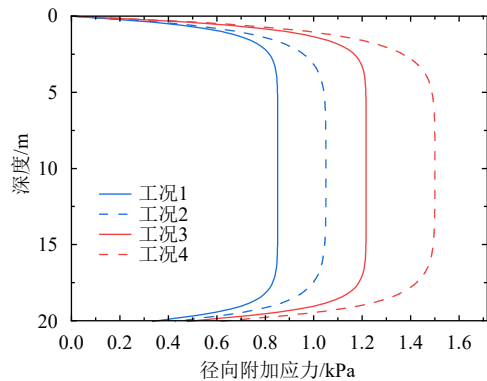


图 4 径向附加应力

Fig. 4 Radial additional stress

3 能源桩荷载传递模型

3.1 假设条件

能源桩在运行中会受到温度荷载的作用，为了简化计算，相关的假设条件和符号规定如下：

- (1) 桩身符合热弹性本构假设；
- (2) 任意计算时刻，桩身温度均匀分布，仅考虑桩土界面温度不均匀分布的影响；
- (3) 不考虑桩身自重的影响；
- (4) 桩身、土体的材料性质不受温度的影响；
- (5) 桩身位移向下为正，桩身应变及应力以受压为正，侧摩阻力以向上为正，结构荷载向下为正，温度荷载以温度升高为正。

3.2 控制方程

以温度升高的工况为例，建立如图5所示的坐标系，并取一桩身微段：

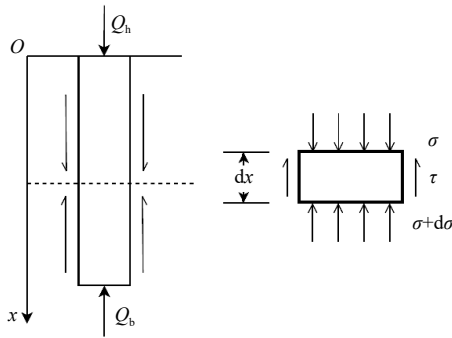


图5 能源桩计算简图

Fig. 5 Calculation diagram of energy pile

由微段的受力平衡条件得到：

$$\frac{d\sigma}{dx} = -\frac{\pi d}{A} \cdot \tau \quad (13)$$

式中：\$\sigma\$为轴向应力；\$d\$为桩身直径；\$A\$为桩身截面面积；\$\tau\$为侧摩阻力。忽略高阶项后，可以得到几何方程表达：

$$\varepsilon = -\frac{du}{dx} \quad (14)$$

式中：\$\varepsilon\$为桩身应变；\$u\$为桩体位移。结合假设条件，桩身的本构关系可以表示为：

$$\sigma = E(\varepsilon + \alpha\Delta T) \quad (15)$$

式中：\$E\$为桩身弹性模量；\$\alpha\$为桩体热膨胀系数；\$\Delta T\$为温度变化量。

联立式(13)~式(15)，可以得到温度荷载作用下的控制方程：

$$\frac{d^2u}{dx^2} - \frac{\pi d}{EA} \cdot \tau(u) = 0 \quad (16)$$

在温度荷载下，能源桩的变形受到桩顶、桩底和桩侧的约束，边界条件如下：

$$\sigma(0) = -k_h \cdot u(0) \quad (17)$$

$$\sigma(L) = k_b \cdot u(L) \quad (18)$$

式中：\$k_h\$为桩顶与上部结构相互作用的弹簧刚度；\$u(0)\$为桩顶位移。

3.3 数值求解

桩身位移控制方程式(16)为二阶常微分方程，且边界条件较为复杂，不便解析求解。因此，这里采用费康等^[7-8]和石雨恒^[22]使用的矩阵位移法，通过桩段离散并结合中心差分将控制方程转化为线性方程组求解。

如图6所示，将能源桩平均地分为\$N\$段，共\$N+1\$个节点。将侧摩阻力表示为位移的函数：

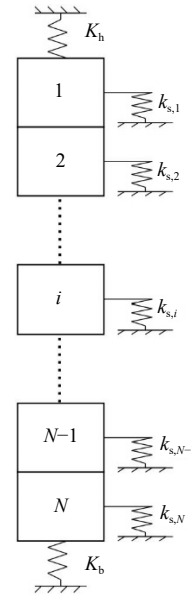


图6 桩段离散示意图

Fig. 6 Pile segment discrete diagram

$$\tau_z = k'_{s,z} u_z \quad (19)$$

式中：\$k'_{s,z}\$为当前加载状态、深度\$z\$处的桩土界面剪切刚度。结合上式，将控制方程写为如下的差分形式：

$$k'_{s,i} u_i = \frac{Ed}{4l^2} (u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}) \quad (20)$$

结合边界条件，有：

$$u_0 = u_2 + \frac{2k_h l}{E} u_1 - 2l \cdot \alpha \Delta T \quad (21)$$

$$u_{n+2} = u_n - \frac{2k_b l}{E} u_{n+1} + 2l \cdot \alpha \Delta T \quad (22)$$

差值也逐渐变大。

总体来看,修正后的温度应力仅在桩顶处小于修正前的结果,在其余位置处,修正后的温度应力都略大于未修正前结果,这是由于考虑了附加径向应力使得侧摩阻力更加容易发挥,从而增加了桩侧土体对于桩身变形的约束作用。并且随着深度的增加,修正前后的温度应力差也越来越大,并在中性点处达到最大,随后又逐渐减小,这说明荷载传递曲线的修正对于桩顶处和中性点处的温度应力影响较大。

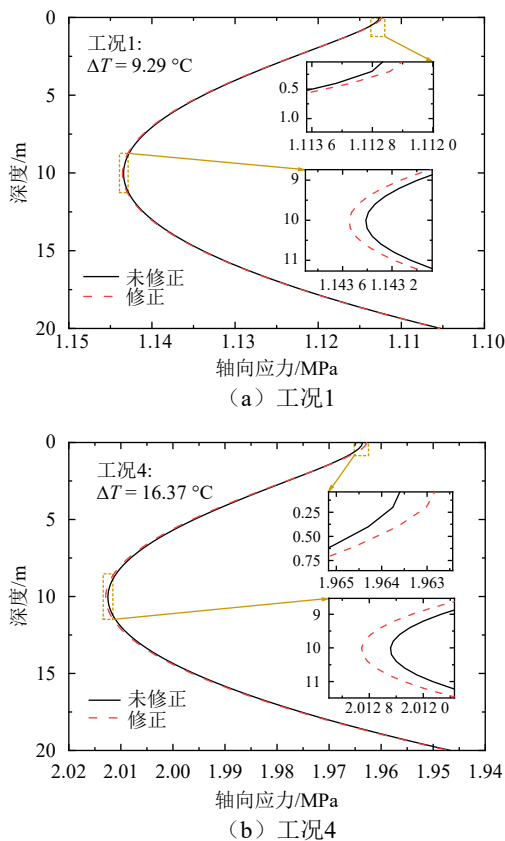


图8 修正前后的轴向应力

Fig. 8 Axial stress before and after correction

5 结论

(1) 采用有限长圆柱热源模型,计算得到桩土界面的温度分布,在30d和60d的加热条件下,温度分布形状大致相同,从桩顶至桩底,温度变化量先增加,随后保持不变,最后逐渐减小,在桩身中部的温度变化量基本分布均匀。随着时间和单位长度热流的增加,最大温度变化量均有所增大。

(2) 考虑径向温度附加应力的影响,对双曲线荷载传递函数中的参数 b 进行修正,并分析其中的轴向位移、应力在修正前后的结果。经过分析发

现,温度修正几乎不影响轴向位移的发展;在轴向应力方面,修正后的桩顶应力有所降低,中性点处的最大温度应力有所增加,其余位置处修正后的结果都略大于修正前,且温度荷载越大,两者的差越大。在16.37 °C的温度荷载下,修正后的最大温度应力增长了0.1%,因此,在正常范围内的温度变化下,可以忽略桩土界面温度不均匀分布的影响,简化计算。

(3) 本文中对桩土界面荷载传递参数的温度修正仅考虑了法向应力变化的影响,而能源桩周围土体在温度变化过程中可能会发生热固结等现象,桩周土中水分迁移以及热固结对荷载传递函数的影响有待进一步研究。

参考文献

- [1] LALOU 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] 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] KNELLWOLF C, PERON H, LALOU L. Geotechnical analysis of heat exchanger piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(10): 890–902.
- [5] PLASEIED N. Load-transfer analysis of energy foundations[D]. Boulder: University of Colorado at Boulder, 2012.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 费康,朱志慧,石雨恒,等. 能量桩群桩工作特性简化分

- 析方法研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3889–3898.
- FEI Kang, ZHU Zhihui, SHI Yuheng, et al. A simplified method for geotechnical analysis of energy pile groups[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 3889–3898.
- [9] 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.
- [10] 骆湘勤, 刘干斌, 郑言东, 等. 考虑温度影响的能源桩桩-土界面荷载传递模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 171–179.
- LUO Xiangqin, LIU Ganbin, ZHENG Yandong, et al. A load transfer model of energy pile-soil interfaces under temperature variation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(1): 171–179.
- [11] LIU S W, ZHANG Q Q, LIU J H, et al. A simple method for predicting the response of single energy pile considering temperature variation of pile-soil interface[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(2): 04022293.
- [12] YANG Y, LI M. Short-time performance of composite-medium line-source model for predicting responses of ground heat exchangers with single U-shaped tube[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 82: 130–137.
- [13] MAN Y, YANG H X, DIAO N R, et al. A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(13–14): 2593–2601.
- [14] GHASEMI-FARE O, BASU P. A practical heat transfer model for geothermal piles[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 66: 470–479.
- [15] GAO J, ZHANG X, LIU J, et al. Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: a case study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(17–18): 2295–2304.
- [16] KIM S, JEONG S, CHO S, et al. Shear load transfer characteristics of drilled shafts in weathered rocks[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(11): 999–1010.
- [17] BASARKAR S S, DEWAIKAR D M. Load transfer characteristics of socketed piles in Mumbai Region[J]. *Soils and Foundations*, 2006, 46(2): 247–257.
- [18] CAO W P, CHEN Y M, WOLFE W E. New load transfer hyperbolic model for pile-soil interface and negative skin friction on single piles embedded in soft soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2014, 14(1): 92–100.
- [19] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1978, 104(12): 1465–1488.
- [20] FAIZAL M, BOUAZZA A, HABERFIELD C, et al. Axial and radial thermal responses of a field-scale energy pile under monotonic and cyclic temperature changes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(10): 04018072.
- [21] 方鹏飞, 高翔, 娄扬, 等. 夏季工况下正常服役地热能源桩承载性能原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 1032–1042.
- FANG Pengfei, GAO Xiang, LOU Yang, et al. Field test on the bearing behaviors of geothermal energy piles in natural service under the summer condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(5): 1032–1042.
- [22] 石雨恒. 能量桩群桩基础力学特性分析方法研究[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2020.
- SHI Yuheng. Study on analysis method for mechanical behaviors of energy pile groups[D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2020.