

冷-热循环温度下桥梁能量排桩热-力响应特性 现场试验与数值模拟

吴迪¹, 陈嵘¹, 孔纲强², 牛庚¹, 缪玉松¹, 王振兴³

(1. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266525; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024;

3. 中建八局发展建设公司, 山东 青岛 266061)

摘要: 将桥梁排桩与能量桩相结合构成桥梁能量排桩, 可利用浅层地热能在冬夏季分别进行桥面除冰和桥面降温, 同时还支撑桥梁荷载。通过开展现场试验, 研究了冷-热循环下桥梁能量排桩的热-力响应特性, 揭示了桥梁能量排桩-承台-非加热桩的相互作用机制。将考虑桩-土界面循环剪切特性的界面模型在有限元软件中进行二次开发, 建立了桥梁能量排桩热-力耦合数值模型, 进一步探究了桩顶荷载和冷-热循环联合作用下桥梁能量排桩长期沉降特性及产生机制。研究表明, 桥梁能量排桩-承台-非加热桩的相互作用会造成荷载重分布, 导致桥梁能量排桩顶部受到较强约束作用而产生较大热应力, 可达桩体最大热应力的80% (约为1.1 MPa); 承台的附加应力最大可达3.75 MPa, 超过了C30混凝土抗拉强度。当桩顶荷载较大时, 随着冷-热循环次数的增加, 桥梁能量排桩逐渐产生长期沉降并呈负指数增长, 这一现象可归因于施加桩顶荷载会导致桩-土界面的力学性能接近极限状态, 极限状态下桩-土界面循环剪切容易产生塑性剪切位移, 最终导致桥梁能量排桩长期沉降的产生。

关键词: 桥梁能量排桩; 热-力响应特性; 冷-热循环; 现场试验; 数值模拟

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 11-3649-12

Field test and numerical simulation on thermo-mechanical response characteristics of a bridge energy row pile under heating-cooling cycles

WU Di¹, CHEN Rong¹, KONG Gang-qiang², NIU Geng¹, MIAO Yu-song¹, WANG Zhen-xing³

(1. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266525 China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China;

3. The Development Construction Co. Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division, Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: Combining bridge row piles with energy piles to create energy row piles can harness shallow geothermal energy for bridge deck deicing in winter and cooling in summer, respectively, while also supporting the mechanical loads of the bridge deck. This study investigates the thermo-mechanical response of energy row piles under heating-cooling cycles through field tests, and analyzes the interactions among energy row piles, slab, and unheated piles. An interface model considering the cyclic shear characteristics of the pile-soil interface is developed in a finite element software, and thermo-mechanical coupling numerical models of energy row piles are established to further explore the changes and mechanisms of long-term settlement of energy row pile under the combined effect of mechanical loads and heating-cooling cycles. The findings reveal that interactions among the energy row pile, slab, and unheated piles can result in load redistribution, leading to high thermally induced stresses of approximately 80% of the maximum thermally induced stress of the energy row pile (i.e. 1.1 MPa) at the top of the energy row piles due to strong restraining effects. Meanwhile, the slab experiences tensile stress exceeding the tensile strength of C30 concrete, reaching 3.75 MPa. Moreover, when the mechanical load is large, energy row piles progressively develop long-term settlement with an increasing number of thermal cycles, exhibiting a negative exponential growth pattern. This phenomenon is attributed to the mechanical load driving the pile-soil interface toward its

收稿日期: 2025-06-02

录用日期: 2025-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52478347, No. 52008225); 山东省自然科学基金项目 (No. ZR2024ME108); 山东省“青创团队计划” (No. 2023KJ115)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52478347, 52008225), the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2024ME108) and the Youth Innovation Team Foundation of Shandong Province (2023KJ115).

第一作者简介: 吴迪, 男, 1990年生, 博士, 副教授, 主要从事能源岩土与地下结构工程方面的研究。E-mail: wudi@qut.edu.cn

通讯作者: 缪玉松, 男, 1986年生, 博士, 副教授, 主要从事地下工程方面的研究。E-mail: gzcrazystone@163.com

limiting state, where cyclic shear at the interface readily induces plastic shear displacements, ultimately resulting in the long-term settlement of the energy row piles.

Keywords: bridge energy row piles; thermo-mechanical characteristic; heating-cooling cycle; field test; numerical simulation.

1 引言

在“双碳”目标的背景下,开发清洁能源,减少碳排放,实现能源可持续利用是土建行业重要的发展方向^[1]。浅层地热能分布广、储量大且清洁可再生,利用浅层地热能代替传统的化石能源,可以在不产生碳排放的前提下实现建筑室内的供暖或制冷^[2]。能量桩是将传统桩基础和地埋管换热器结合而成的一种新型桩基,其不仅能发挥桩基支撑结构荷载的作用,还能替代地埋管换热器进行地热能提取,从而起到“一桩两用”的效果。由于能量桩无需额外钻孔,因此其施工成本较低^[3]。相比于地埋管换热器,能量桩的直径较大,可为换热管的布置提供更大空间,因此具有更优的换热效率。

能量桩运行过程中会同时受到机械荷载和温度荷载的双重作用,导致其热-力响应特性更加复杂。目前,国内外学者针对能量桩的热-力耦合特性已开展相关研究。现场试验方面,任连伟等^[4]通过开展微型能量群桩现场试验,揭示了微型能量桩的桩身温度与应力规律。高磊等^[5]通过将分布式光纤智能感测技术应用于能量桩现场测试,揭示了荷载-温度联合作用下能量桩承载性状与荷载传递机制。刘春阳等^[6]基于现场试验测试了能量桩的热-力性能,发现间歇运行模式有利于减小能量桩的附加热应力与侧摩阻力。模型试验具有试验周期短、条件易控等优势,相关学者利用模型试验探究了约束条件^[7]、土体特性^[8-9]、桩顶荷载^[10]、换热管型^[11]和桩基形式^[12-13]等因素对能量桩热-力响应特性的影响。除了试验方法外,相关学者考虑土体类别、运行条件、加载方式等因素,开展了单次温度和循环温度条件下能量桩热-力响应特性的数值模拟和理论分析研究,为解释能量桩热-力响应特性的试验现象提供了支持和补充^[14-23]。

目前已有关于能量桩的研究主要是针对建筑荷载下桩-筏形式的能量桩。桥梁工程中常用到排桩支撑桥梁荷载,在排桩中布设换热管构成桥梁能量排桩,除了可以支撑桥梁荷载外,还能提取浅层地热能,在冬季进行桥面除冰^[24],在夏季进行路面降温^[25],起到“一桩三用”的效果,拓展和延长了桥梁排桩的使用价值。但目前关于桥梁能量排桩的研究案例相对较少。

相比于建筑荷载下桩-筏形式的能量桩,桥梁能

量排桩受力特点存在以下两方面不同之处。首先,桥梁能量排桩顶部常设有刚性较大的承台来提高其整体性,可能会导致桥梁能量排桩顶部受到较大约束^[7],进而引起能量排桩、承台和相邻桩之间的力学相互作用;其次,桥梁能量排桩运行过程中会受到多次冷-热循环(夏季桥面降温时受热,冬季桥面除冰时受冷)作用,冷-热循环温度作用下能量桩-土界面受到循环剪切,导致其荷载传递更为复杂^[4],且该效应受桩顶荷载大小的影响^[20-23]。因此,能量排桩-承台-相邻桩的相互作用和冷-热循环温度会加剧桥梁能量排桩热-力响应特性的复杂性。

综上所述,桥梁能量排桩的热-力响应特性比桩-筏形式下的能量桩更为复杂,但目前针对桥梁能量排桩的研究相对较少,尤其缺乏现场试验。鉴于此,本文通过开展现场试验,测试了冷-热循环温度作用下桥梁能量排桩的热-力响应特性,探究了能量排桩-承台-非加热桩的相互作用机制。同时,将考虑桩-土界面循环剪切特性的界面模型在有限元软件中进行二次开发,建立了能量排桩热-力耦合数值模型,利用现场试验结果验证了数值模型,并利用数值模型进一步探究了桩顶荷载和冷-热循环联合作用下能量排桩长期沉降的变化规律,揭示了能量排桩长期沉降的产生机制。

2 桥梁能量排桩现场试验

2.1 场试验概况

现场试验是基于江阴市的一例能量桩桥面除冰工程项目开展^[24]。测试现场包含一组1×5排桩,桩基的编号分别为A~E,如图1所示。桩基采用钻孔灌注桩,混凝土等级为C30。由于桥梁能量排桩的热胀冷缩变形会受到顶部承台的约束,而承台的位移又受到能量桩两侧非加热桩的约束。处于中间位置的桩B、桩C及桩D,其约束条件更具有代表性。另外,现场试验时项目仍在施工,桩C靠近场地中间位置,附近不具备放置测试设备的空间,因此选择桩B作为桥梁能量排桩,试验过程中受到冷-热循环温度作用。5根桩基的尺寸相同,桩长和直径分别为20.0 m和1.0 m,桩间距为5.4 m。桩基顶部与一根长×宽×高分别为26.0 m×1.3 m×1.1 m的承台相连。测试期间未施工桥梁面板,因此可将承台上部视为无机械荷载。桥梁能量排桩的钢筋笼上绑扎了5根串联连接的U型换热管,换热管材质为高

热管入口温度关于初始地温（测试现场为 21.0 °C）对称变化，这样可保证冬季取热和夏季注热的功率相同。综合考虑制冷机的功率，现场试验制冷、制热阶段换热管入口最低和最高温度分别为 5 °C 和 37 °C。考虑到工期的限制，现场试验包括 2 轮冷-热温度循环，每轮冷-热温度循环中制冷和制热的周期均为 180 h，总共 720 h。试验过程中桥梁能量排桩换热管入口温度的变化如图 2 所示。换热管内换热液体的流速为 0.9 m³/h，对应的雷诺数为 15 300，可保证管道中的换热液体处于湍流状态，从而达到更优的换热效果^[2]。冷-热循环结束后关闭循环水泵，使桩体的温度自然恢复至初始状态为止，最终恢复时间为 480 h，现场试验总时长为 1 200 h。

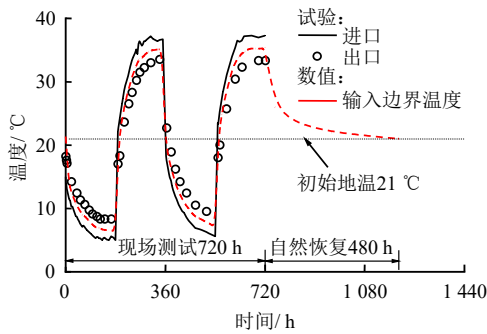


图 2 换热管进出口温度及数值模型换热管边界温度变化
Fig.2 Variation of inlet/outlet temperature of heat exchange pipes and temperature boundary at pipe interfaces in numerical model

3 热-力耦合数值模型

3.1 数值模型建立

利用有限元软件 ABAQUS 建立了桥梁能量排桩热-力耦合三维数值模型，在复现桥梁能量排桩现场试验的基础上，进一步开展了拓展研究。数值模型中承台和桩基的几何形状及布置形式均与现场相同，土体分层与现场试验一致，如图 3 所示。模型中所用的材料参数与试验现场一致（见表 1）。为了避免边界效应的影响，桩基到土体边界的最小距离选为 10 倍桩径^[2]，土体几何的长×宽×高分别为 42.0 m× 20.0 m×40.0 m。

数值模型的建立基于以下假定：

- (1) 桩体和土体中能量传递为热传导，其控制方程为能量守恒方程^[26]；
- (2) 桩体为均匀各向同性的热弹性材料^[14]；
- (3) 土体为弹塑性材料，采用摩尔-库仑模型^[16]；
- (4) 通过在换热管位置处施加温度边界来模拟

换热管的加热效应^[17]。

(5) 桩-土界面采用 Goodman 单元，其中切向接触为考虑循环剪切特性的双曲线模型；法向接触为硬接触。

模型采用顺序耦合的方式对桥梁能量排桩热-力耦合特性进行模拟。首先，建立桥梁能量排桩的传热模型，计算得到能量排桩的温度场变化的结果。随后，建立桥梁能量排桩热-力耦合模型，热-力耦合模型中温度场的变化调用传热模型的温度场计算结果。所建立的传热模型和热-力耦合模型采用相同的几何模型及网格划分。热-力耦合模型包括 3 个分析步，第 1 步进行地应力平衡；第 2 步施加桩顶机械荷载（桩顶无机械荷载的工况不包括此分析步）；第 3 步进行热-力耦合的计算，最终得到冷-热循环过程中桥梁能量排桩热-力响应的结果。

3.2 网格划分

数值模型中土体和承台采用 8 面体网格，水平向采用映射的方式进行网格划分，轴向采用扫略的方式进行网格划分，如图 3 所示。数值模型的网格单元类型为 C3D8R。由于热量扩散主要发生在能量排桩及附近土体区域，该区域温度梯度较大，因此对桩体及附近土体的网格进行了细化，模型中能量排桩水平向最大单元尺寸为 0.13 m，桩-土界面上桩体与土体的网格相匹配。

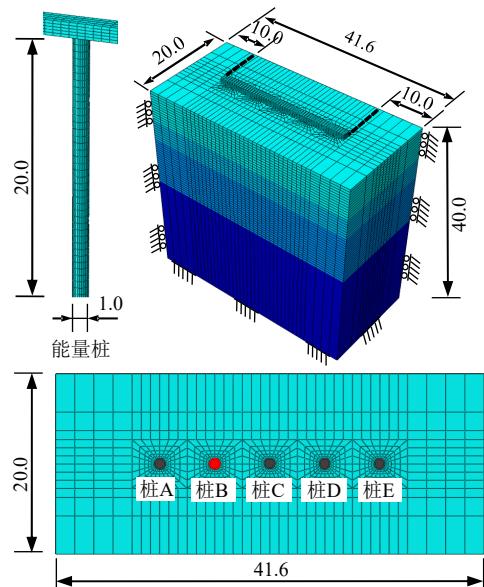


图 3 数值模型示意图（单位：m）
Fig.3 Schematic diagram of finite element model (unit: m)

3.3 边界条件和初始条件

力学边界方面，土体侧表面为辊支撑约束，底

面为固定约束，土体顶面和承台表面为自由约束。冷-热循环温度作用下桥梁能量排桩产生热胀冷缩变形，导致桩-土接触面受到循环剪切作用^[4]。为此，数值模型采用了考虑循环剪切特性的桩-土界面模型^[27]，通过编写子程序实现了该模型在 ABAQUS 中的二次开发。桩-土界面模型采用双曲线形式，桩侧剪应力和桩-土相对位移的关系为

$$\tau = \frac{E_{\max} u}{1 + E_{\max} b |u|} \quad (1)$$

式中： τ 为桩-土界面上的剪应力； u 为桩-土相对位移； E_{\max} 为桩-土界面荷载位移曲线的最大切线模量（初始模量），取为土体的弹性模量； b 为模型参数，通过下式计算：

$$b = \frac{R_f}{\tau_f} = \frac{R_f}{\sigma'_n \tan \phi'_{\text{int}}} \quad (2)$$

式中： R_f 为曲线拟合参数，取为 1^[27]； τ_f 为桩-土界面极限剪应力； σ'_n 为桩-土界面上的法向应力； ϕ'_{int} 为桩-土界面的内摩擦角。

式（1）适用于单调加载。Chin 等^[27]通过将 Masing's 法则引入该式，使其能够考虑循环剪切作用下桩-土界面的力学特性，对于卸载时，有：

$$\tau - \tau_r = \frac{\sigma'_n \tan \phi'_{\text{int}} E_{\max} (u - u_r)}{\sigma'_n \tan \phi'_{\text{int}} + E_{\max} R_f |u - u_r| / 2} \quad (3)$$

式中： τ_r 和 u_r 分别为荷载位移曲线转折点所对应的桩-土界面上的剪应力和相对位移。

对于再加载时，有：

$$\tau - \tau_r = \frac{\sigma'_n \tan \phi'_{\text{int}} c E_{\max} (u - u_r)}{\sigma'_n \tan \phi'_{\text{int}} + c E_{\max} R_f |u - u_r| / 2} \quad (4)$$

式中： c 为桩土接触面初始剪切模量的衰减系数，取为 0.8^[20]。

传热边界方面，土体边界为热绝缘。Batini 等^[18]研究发现，换热管内换热液体的平均温度基本等于进口和出口温度的平均值，因此，数值模型通过在桥梁能量排桩换热管的位置添加温度边界来模拟换热管对能量桩的加热和制冷效应，该温度边界上的温度变化为现场试验测得的换热管进出口平均温度（见图 2）。模型中桩体和土体的初始温度为 21.0 °C。

3.4 数值模拟方案

数值模拟研究工况包括 2 部分（见表 2）。首先，对桥梁能量排桩现场试验进行复现，模型中施加于能量排桩的冷-热循环温度与现场试验一致，通过对数值与试验结果，验证了模型的合理性，并为现

场试验提供补充数据。其次，探究了桩顶荷载大小对桥梁能量排桩长期沉降特性的影响，桩顶荷载 P 分别为 0%、20%、40%、60%、80% 的极限承载力 P_u ，共包括 20 轮冷-热循环，每轮循环周期为 1 a，温度变化采用正弦函数形式^[14]（见图 4(a)）。桥梁能量排桩的极限承载力 P_u 根据荷载-位移曲线确定（见图 4(b)）。图中， ΔT 为温度变化量。

表 2 数值模拟研究工况

Table 2 Simulation conditions for numerical modelling

模拟工况	运行时长	桩顶荷载 P	温度变化
现场试验	1 200 h	0% P_u	见图 2
桩顶荷载影响	20 a	0% P_u	见图 4
		20% P_u	
		40% P_u	
		60% P_u	
		80% P_u	

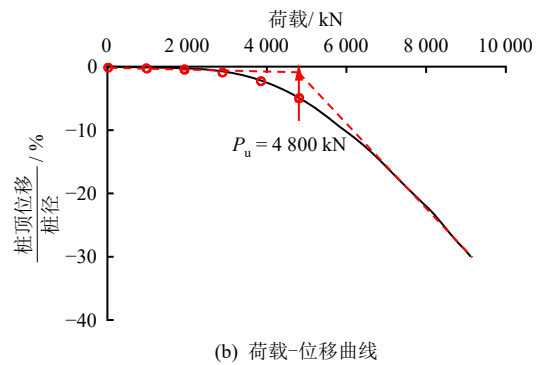
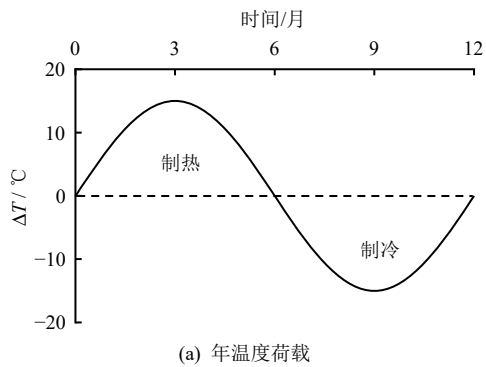


图 4 数值模拟参数

Fig.4 Parameters of the numerical modelling

4 桥梁能量排桩热-力响应特性现场试验与数值模拟结果的对比与分析

4.1 桩体及桩周土体的温度

桥梁能量排桩温度的变化和分布规律如图 5 所示。由图 5(a)可知，桩体温度与换热管温度变化规律一致。但由于混凝土存在热阻^[8]，桩体温度始终

小于换热管温度。现场试验中采用冷-热平衡的温度荷载，制热和制冷过程中桩体的温度变化量基本一致。试验结束后经过 480 h 的自然恢复，桩体温度基本可恢复至初始值 21 °C。由图 5(b)可知，沿桩深方向桩体温度基本为均匀分布，证明沿桩的轴向换热管对桩体产生了均匀的加热效应，Batini 等^[18]开展的研究中也发现了相同现象。数值模拟得到的桩体温度结果与现场实测结果基本吻合，说明建立的数值模型能够较为准确地模拟换热管对桥梁能量排桩的加热效应。

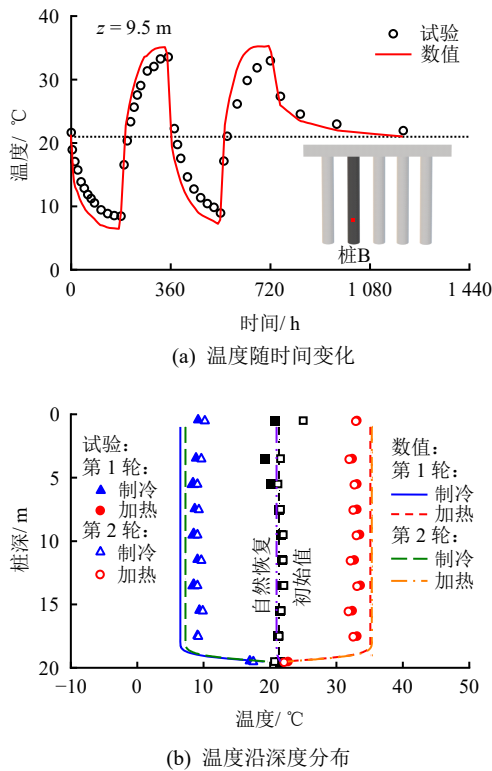


图 5 桥梁能量排桩的温度

Fig.5 Temperature distributions of bridge energy row pile

桩周土体及相邻非加热桩 A 和桩 C 的温度如图 6 所示。由图 6(a)可知，当桥梁能量排桩温度升高/降低时，桩体向土体释放/吸收热量，导致桩体周围土体温度升高/降低。由于土体存在较大热阻，随着与桩体距离 (r) 的增加，土体温度迅速下降，最终温度影响范围约为 1.5 倍桩径 (1.5 m)。现场试验中非加热桩与能量排桩之间的距离为 5.4 m，该距离大于能量排桩的温度影响范围。因此，两根相邻非加热桩 (桩 A 和桩 C) 的温度基本未受到能量排桩的影响，从而均未产生明显的温度变化 (见图 6(b))。桩 C 温度的轻微下降 (约 0.6 °C) 可归因于试验期间及之前一段时间内长期低气温导致桩基温

度产生了轻微的降低。另外，由于桥梁能量排桩受到了冷-热平衡的温度荷载，因此，2 轮循环过后桩周土体温度也未发生明显的累积现象 (见图 6)，这一规律与桩-筏形式下能量桩的传热特性一致^[14]。

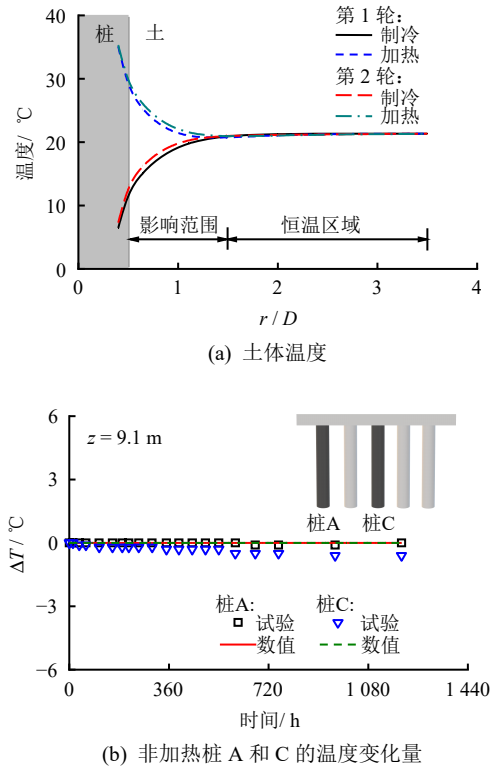


图 6 桩周土体和相邻非加热桩的温度

Fig.6 Temperatures of the soil and adjacent unheated piles

4.2 桥梁能量排桩的热应力

地热交互过程中桩体热胀冷缩，在土体和承台的约束下^[4]，桩体内产生了较大热应力。热应力由下式计算：

$$\sigma_T = E(\epsilon_T - \alpha_T \Delta T) \tag{5}$$

式中： σ_T 为热应力； ϵ_T 为热应变； α_T 为混凝土的热膨胀系数。桥梁能量排桩的热应力变化如图 7 所示。制冷阶段桩体内热应力为拉应力，制热阶段为压应力，热应力的变化趋势与桩体温度的变化基本一致，即温度变化越明显，桩体热应力越大。现场试验中桥梁能量排桩的温度变化量最大值约为 ± 12 °C，此时桩体热应力最大值为 ± 1.6 MPa。制热过程中桩体最大附加压应力为 -1.6 MPa，远小于 C30 混凝土抗压强度标准值，说明制热过程不会对桥梁能量排桩的力学性能造成过大的影响。然而，制冷过程桩体最大附加拉应力 (1.6 MPa) 接近 C30 混凝土抗拉强度的标准值 2.01 MPa。因此，在冬季

供暖需求较大的寒冷地区，应对桥梁能量排桩的混凝土强度等级或配筋予以加强。

试验结束后经过 480 h 自然恢复，桩体温度基本恢复至初始状态，此时桥梁能量排桩的热应力基本可恢复至 0 MPa（见图 7），证明冷-热循环过程中桥梁能量排桩未产生累积应力，LaLoui 等^[3]开展的桩-筏形式下能量桩现场试验中也观察到了相似的现象，可归因于现场试验时桩顶荷载等级较低。

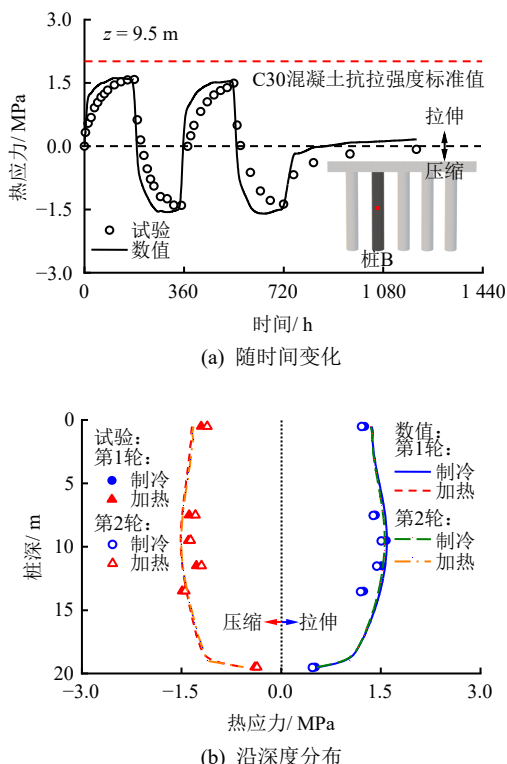


图 7 桥梁能量排桩的热应力

Fig.7 Thermally induced stresses of bridge energy row piles

4.3 桥梁能量排桩-承台-非加热桩的相互作用

由于桥梁能量排桩、非加热桩和承台连接为一个整体，当桥梁能量排桩 B 受热膨胀（或受冷收缩）时，其顶部产生向上（或向下）的位移，导致其与承台相互挤压或拉伸（见图 8），造成桥梁能量排桩顶部和承台内均产生了较大附加应力。此外，桥梁能量排桩 B 会通过承台影响到相邻的两根非加热桩 A 和桩 C，造成桩 A 和桩 C 受到承台的拉伸或压缩（见图 8）。桩 D 和桩 E 在杠杆原理的作用下，也会受到承台的拉伸或压缩，作用力的方向与桩 C 相反。

图 9(a)所示为非加热桩 A 和桩 C 的附加应力分布。需要强调非加热桩 A 和桩 C 距离桥梁能量排桩 B 的距离大于温度影响范围 1.5 倍桩径（见图 6(a)），因此，桩 A 和桩 C 的温度未产生明显的变化（见

图 6(b)）。然而，非加热桩 A 和桩 C 均产生了明显的拉/压应力，最大值发生在桩顶附近，约为±0.4 MPa（桥梁能量排桩最大热应力的 25%），随着深度增加逐渐减小，符合轴向拉压荷载作用下桩基的荷载分布规律^[28-29]，此结果印证了桥梁能量排桩的热胀冷缩变形对相邻非加热桩受力的影响。

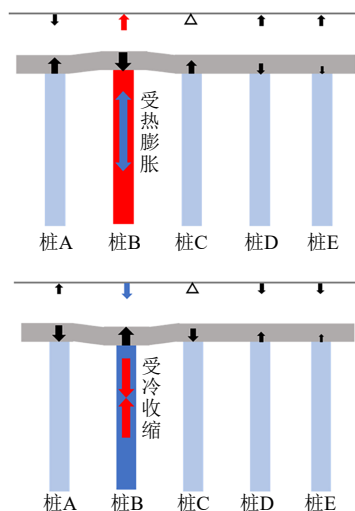
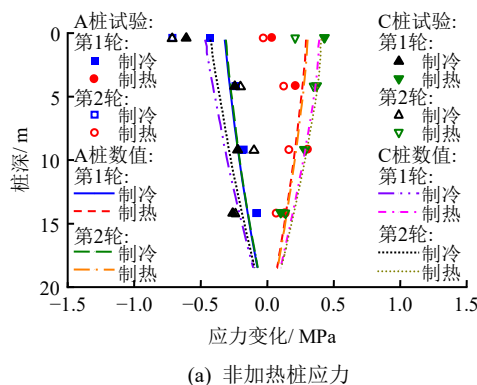
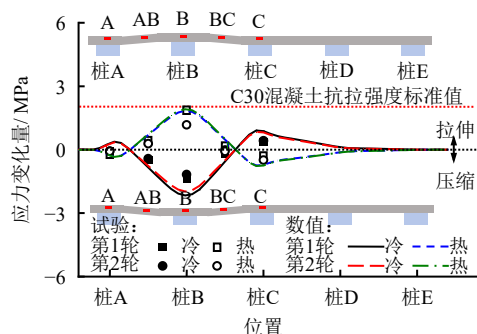


图 8 桥梁能量排桩-承台-非加热桩相互作用示意图
Fig.8 Schematic diagrams of interaction among bridge energy row piles, slab and unheated piles



(a) 非加热桩应力



(b) 承台上侧应力

图 9 非加热桩和承台的应力

Fig.9 Stress variations of the unheated piles and slab

在桥梁能量排桩 B 及非加热桩 A 和桩 C 的共同作用下, 承台会产生弯曲变形, 导致承台内产生附加应力, 如图 9(b)所示。以加热工况为例, 桥梁能量排桩 B 受热向上膨胀, B 处承台变形为向上凸, 承台上侧产生拉应力; 非加热桩和承台的节点为刚性连接, 因此桩 A 和桩 C 处承台变形为向下凹, 承台上侧产生压应力; 由于承台弯曲变形的挠曲线为连续光滑曲线, 因此位置 AB 和 BC 处为反弯点, 这两个位置承台的弯矩为 0, 因此横截面上应力几乎无变化; 制冷工况下承台的受力与上述分析相反。上述承台的变形机制与承台顶部应力的分布规律相吻合(见图 9(b)), 印证了图 8 所示的桥梁能量排桩-承台-非加热桩相互作用机制。

为了进一步探讨桩顶承台对桥梁能量排桩的约束效应, 与 Laloui^[3]和 Amaty^[30]等开展的桩-筏形式下能量桩现场试验的结果进行了对比, 如图 10 所示。图中利用能量桩的最大热应力将桩体热应力分布进行了归一化。Laloui 等^[3]开展的试验中能量桩顶部为筏板, Amaty 等^[30]开展的现场试验中能量桩顶无约束。当桩顶无约束时, 桩顶向上的热膨胀变形可自由发展, 此时能量桩顶处几乎不产生热应力; 当桩顶为筏板时, 由于筏板可在一定程度上限制能量桩顶的热膨胀变形, 能量桩顶观察到了明显的热应力, 约为桩体最大热应力的 57%。本文开展的现场试验中桥梁能量排桩顶部为刚度较大的承台, 承台对桥梁能量排桩造成了较强的约束, 导致桩体顶部产生较大的热应力, 达到桩体最大热应力的 80%。上述结果强调了桩顶的约束类型对能量桩热应力的影响。因此, 当能量桩顶部结构刚度较大时, 应考虑对桩顶局部进行加强。

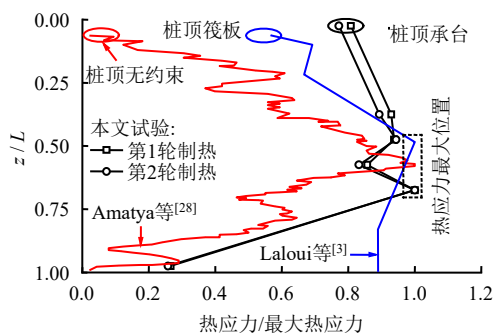


图 10 归一化的能量桩热应力分布

Fig.10 Distribution of normalized thermally induced stress of energy piles

制冷和制热工况下承台产生的最大应力约为 ± 2.0 MPa, 超过了桥梁能量排桩的最大热应力 ± 1.6 MPa,

接近 C30 混凝土抗拉强度标准值 2.01 MPa, 此时承台容易产生开裂, 因此设计中除了需要考虑温度荷载对桥梁能量排桩力学特性的影响外, 还应重点考虑承台的力学特性。此外, 由图 9 可知, 数值模拟得到的非加热桩和承台力学响应结果与现场实测结果能够较好的吻合, 说明建立的数值模拟能模拟桥梁能量排桩-承台-非加热桩相互作用。

5 不同桩顶荷载下桥梁能量排桩的长期沉降特性

5.1 不同桩顶荷载下桥梁能量排桩的温度变化

Olgun 等^[4]开展的研究表明, 在不平衡的冷-热循环温度条件下能量桩向周围土体吸收和释放的热量不相等, 此时能量桩及周围土体会产生热堆积现象, 从而导致能量桩的长期沉降。而本文的研究目标是揭示不同等级桩顶荷载对桥梁能量排桩长期沉降的影响机制, 需排除桩体及土体热堆积现象的干扰。因此, 本研究采用了平衡的冷-热循环温度(见图 4(a))。

模型计算得到的 20 轮冷-热循环过程中桥梁能量排桩的温度变化, 如图 11 所示。由图可知, 热-冷循环温度会导致桥梁能量排桩的温度交替上升和下降。每轮温度循环过程中, 桥梁能量排桩的温度变化量基本相同, 不随循环次数的增加而变化。这一结果表明在平衡的冷-热循环温度条件下能量排桩未产生热堆积现象。此外, 不同等级桩顶荷载 (P/P_0 分别为 0%、20%、40%、60%、80%) 所对应的数值模型中, 施加于桥梁能量排桩的温度条件一致, 进一步排除了温度条件对能量排桩长期沉降的影响, 从而突出了桩顶荷载等级的影响。

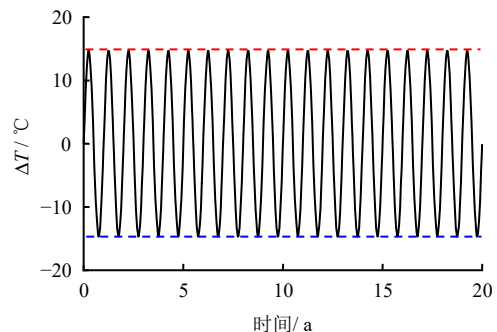


图 11 桥梁能量排桩的温度变化

Fig.11 Temperature changes of the bridge energy row piles

5.2 不同桩顶荷载下桥梁能量排桩的长期沉降

不同桩顶荷载下桥梁能量排桩长期沉降的变化

如图 12 所示。由图可知，当 $P/P_u = 0$ 时，冷-热循环未导致桥梁能量排桩产生长期沉降，这与现场试验的结果吻合。当 $P/P_u \neq 0$ 时，随着冷-热循环次数的增加，桥梁能量排桩逐渐产生沉降，但沉降产生的速率逐渐减小，且随着桩顶荷载的增大该现象更加显著。此规律与 Nguyen 等^[10]开展的能量桩模型试验的规律一致。

为了方便预测桥梁能量排桩长期沉降的变化，采用下式对结果进行了拟合：

$$\delta_T = \delta_{T, N_c=20} \times [1 - \exp(-\beta N_c)] \quad (6)$$

式中： δ_T 为冷-热循环中桥梁能量排桩的长期沉降； N_c 为冷-热循环次数； $\delta_{T, N_c=20}$ 为 20 轮冷-热循环后桥梁能量排桩的沉降； β 为拟合参数。由图 12 可知，式 (6) 能较好地预测桥梁能量排桩的长期沉降（图中实线），说明冷-热循环温度下桥梁能量排桩的长期沉降的变化趋势呈负指数增长。

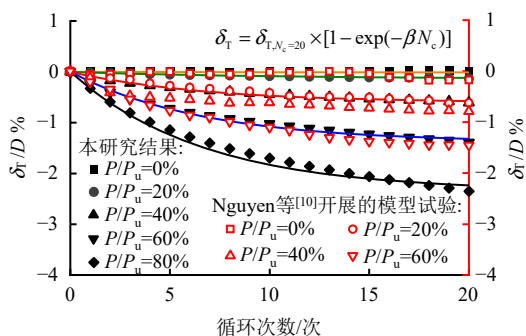


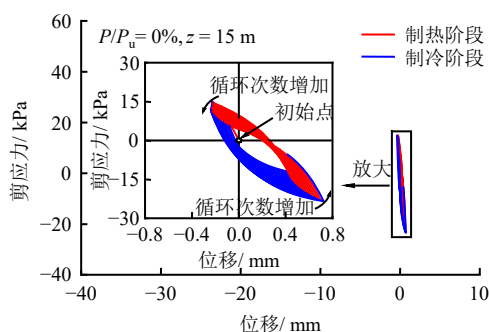
图 12 不同桩顶荷载桥梁能量排桩的长期沉降
Fig.12 Long-term settlement of bridge energy row piles under different mechanical loads

5.3 不同桩顶荷载下桩-土界面侧摩阻力的变化

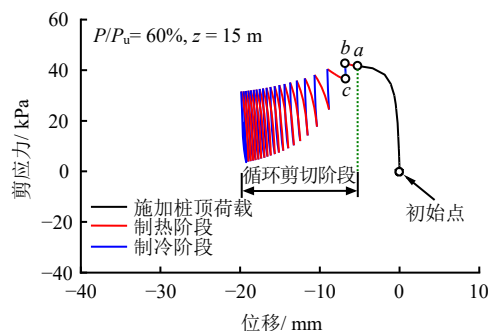
为了进一步揭示桥梁能量排桩长期沉降的产生机制，分析了不同桩顶荷载下 ($P/P_u = 0\%$ 和 60%) 桥梁能量排桩-土界面上侧摩阻力与剪切位移的关系，如图 13 所示。假设当桩体相对土体产生向下的位移为负，该方向的桩-土相对位移引起的桩-土界面上的侧摩阻力为正。由图 13(a)可知，当 $P/P_u = 0\%$ 时，桩体受热膨胀，此时桩体下部 ($z = 15\text{ m}$) 相对土体产生向下位移，桩体受冷收缩时则相反，多次冷-热循环温度下，桩-土界面上的侧摩阻力与桩-土相对位移交替变号，说明冷-热循环会引起桩-土界面的循环剪切。

由图 13(a)可知，当 $P/P_u = 0\%$ 时，随着温度循环次数的增加，桩-土界面上荷载-位移曲线的初始

切线斜率（桩-土界面的剪切刚度）逐渐减小，这是由于数值模型采用的桩-土界面模型中初始刚度随着循环剪切次数增加逐渐降低。另外，当桩顶荷载水平较低时 ($P/P_u = 0\%$)，桩-土之间的相对位移主要由桩体热胀冷缩变形所引起，此时桩-土界面上的剪切位移量较小，所导致桩-土界面上产生的侧摩阻力远小于界面的摩阻力极限值，侧摩阻力留有足够的储备，因此桩-土之间的循环剪切并未导致不可恢复塑性位移的产生，故 $P/P_u = 0\%$ 时桥梁能量排桩未产生长期沉降（见图 12）。



(a) $P/P_u = 0\%$



(b) $P/P_u = 60\%$

图 13 桥梁能量排桩-土界面上侧摩阻力与剪切位移的关系

Fig.13 Relationships between skin friction resistance and shear displacement at pile-soil interface of bridge energy row piles

上述桩-土界面的受力过程在每次冷-热循环过程中均会出现，因此随着冷-热循环次数增加，桥梁能量排桩长期沉降逐渐增大（见图 12）。综上，桩顶机械荷载越大，侧摩阻力的安全储备越小，冷-热循环导致的桩-土循环剪切越容易导致桥梁能量排桩产生不可恢复的桩-土相对位移，最终造成更大的长期沉降。

5.4 不同桩顶荷载下桩端阻力的变化

不同桩顶荷载下 (P/P_u 分别为 0% 、 60%) 桩端阻力变化与桩体温度变化的关系如图 14 所示。为

了突出桩顶荷载与冷-热温度循环的施加对桩端阻力的影响,将地应力平衡分析步结束时的桩端阻力做了归零化处理,图中所示为桩顶荷载施加与冷-热温度循环阶段桩端阻力的变化。由图可知,当桩体温度升高时,桩端阻力增大;当桩体温度降低时,桩端阻力减小。这是由于冷-热循环温度下桩体的热胀冷缩变形会影响桩底与桩端土体之间的相互挤压作用。

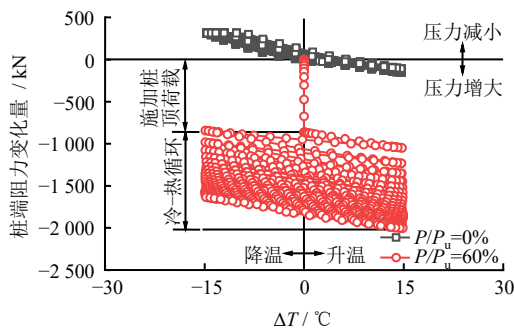


图14 桥梁能量排桩的桩端阻力变化与桩体温度变化的关系
Fig.14 Relationship between the tip resistance change and pile temperature change of the bridge energy row pile

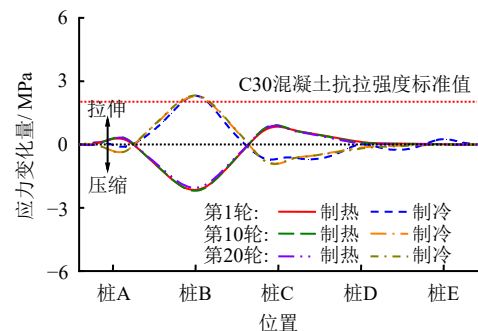
当 $P/P_u = 0\%$ 时,桩体温度升高阶段和降低阶段桩端阻力随桩体温差变化的速率基本相等,因此每轮冷-热循环中桩端阻力的变化基本相同,即桩端阻力表现为热弹性。20 轮冷-热循环过后桩端阻力未观察到明显的累积现象,这与 $P/P_u = 0\%$ 时桥梁能量排桩未产生长期沉降的结果相符合。

当 $P/P_u = 60\%$ 时,最初时刻施加桩顶荷载导致桩端阻力迅速增大至 865 kN,占桩顶荷载量 (2 880 kN) 的 30%。随后在冷-热循环过程中,桩体升温阶段桩端阻力的变化速率始终大于桩体降温阶段,导致每轮冷-热循环过后桩端阻力产生了累积现象。20 轮冷-热循环过后桩端阻力的累积量为 945 kN,约为桩顶荷载施加所产生桩端阻力 (865 kN) 的 1.1 倍。此外,桩端阻力的累积现象在最初几轮冷-热循环较为明显,随着循环次数增加逐渐趋于稳定,与能量排桩长期沉降的演化规律相似。

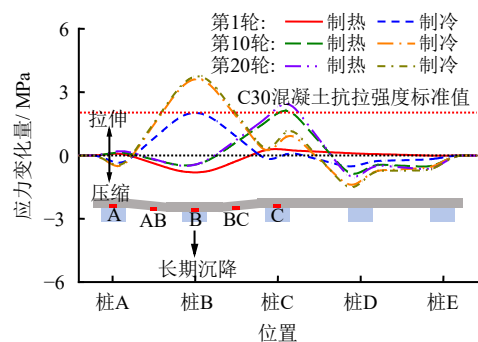
上述桩端阻力的累积现象表明,冷-热循环会加剧上部荷载向桩底传递,导致能量排桩侧摩阻力向桩端阻力的转化,可归因于冷-热循环下桥梁能量排桩长期沉降导致的桩底与土体的进一步挤压。因此,桥梁能量排桩设计或施工时应注重桩端的承载性能,例如将桩端设置在力学性能较好的持力层,或浇筑混凝土前应仔细清除钻孔产生的桩底浮渣。

5.5 桥梁能量排桩长期沉降对承台的影响

$P/P_u = 0\%$ 和 $P/P_u = 60\%$ 时承台下侧的应力分布如图 15 所示。当 $P/P_u = 0\%$ 时,由于冷-热循环中桥梁能量排桩未产生明显的长期沉降,因此 20 轮冷-热循环过后承台的应力分布基本不变,这与现场试验中观测到的规律一致 (见图 9)。



(a) $P/P_u = 0\%$



(b) $P/P_u = 60\%$

图 15 承台下侧的应力分布

Fig.15 Stress distributions along the downside of the slab

当 $P/P_u = 60\%$ 时,由于随着循环次数增加桥梁能量排桩逐渐产生长期沉降 (见图 12),导致承台受到能量排桩向下的下拽效应,进而造成承台下侧产生了较大拉应力 (见图 15(b))。20 轮冷-热循环过后,承台下侧的最大拉应力高达 3.75 MPa,超过 C30 混凝土抗拉强度标准值 2.20 MPa,这会导致承台混凝土的开裂。因此,当桥梁能量排桩的桩顶荷载较大时,应对承台底部的配筋进行加密处理,从而避免桥梁能量排桩长期沉降导致的承台混凝土开裂。

6 结论

本文通过现场试验和数值模拟相结合的方法,研究了冷-热循环温度下桥梁能量排桩的热-力学特性,主要得到以下结论:

(1) 桩顶承台的较强约束会导致桩顶局部产生

较大的热应力, 可达桩体最大热应力的 80%。尤其在制冷工况下, 桩顶局部的热应力(拉应力)达到 1.1 MPa, 因此桥梁能量排桩顶部配筋应局部加强。

(2) 桥梁能量排桩-承台-非加热桩相互作用会导致承台、非加热桩的荷载重分布。承台的最大附加应力接近 C30 混凝土的抗拉强度 2.01 MPa, 但非加热桩的最大附加应力仅为桥梁能量排桩最大热应力的 25%。

(3) 冷-热温度循环会导致桥梁能量排桩产生长期沉降, 且长期沉降随着循环次数增加呈负指数增长。桩顶荷载越大长期沉降现象越明显, 可归因于较大的桩顶荷载导致桩-土界面的受力接近或达到极限状态, 随后冷-热循环造成桩-土界面进一步循环剪切, 极限状态下桩-土界面循环剪切会产生塑性剪切位移, 最终导致桩体长期沉降的产生。

(4) 桥梁能量排桩的长期沉降使承台受到向下的拉拽效应, 导致承台内产生的附加应力高达 3.75 MPa, 超过了混凝土的抗拉强度。因此, 需加强桥梁能量排桩顶部承台的配筋以防止混凝土开裂。

参 考 文 献

- [1] 江亿, 胡姗. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. 暖通空调, 2021, 51(5): 1-13.
JIANG Yi, HU Shan. Paths to carbon neutrality in China's building sector[J]. **Heating Ventilating & Air Conditioning**, 2021, 51(5): 1-13.
- [2] WU D, LIU H L, KONG G Q, et al. Thermo-mechanical behavior of a full-scale energy pile equipped with a spiral pipe configuration[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2021, 58: 1757-1769.
- [3] 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.
- [4] 任连伟, 徐健, 孔纲强, 等. 冬季工况多次温度循环下微型钢管桩群桩热力响应特性现场试验[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 2053-2060.
REN Lian-wei, XU Jian, KONG Gang-qiang, et al. Field tests on thermal response characteristics of micro steel pile group under multiple temperature cycles in winter conditions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(11): 2053-2060.
- [5] 高磊, 韩川, 黄坚, 等. 基于 BOTDR 的能源桩现场试验与承载特性分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 1): 117-126.
GAO Lei, HAN Chuan, HUANG Jian, et al. Test and analysis of bearing characteristics of energy pile based on BOTDR[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.1): 117-126.
- [6] 刘春阳, 方鹏飞, 张日红, 等. 考虑间歇比的地热能源桩热-力性能试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(3): 562-572.
LIU Chun-yang, FANG Peng-fei, ZHANG Ri-hong, et al. Experimental study on thermo-mechanical properties of geothermal energy pile considering intermittent ratio[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2023, 57(3): 562-572.
- [7] 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 Cheng-long, LIU Han-long, KONG Gang-qiang, 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.
- [8] NG C W W, SHI C, GUNAWAN A, et al. Centrifuge modelling of energy piles subjected to heating and cooling cycles in clay[J]. **Géotechnique Letters**, 2014, 4(4): 310-316.
- [9] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1140-1146.
KONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(6): 1140-1146.
- [10] NGUYEN V T, TANG A M, PEREIRA J. Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile in dry sand[J]. **Acta Geotechnica**, 2017, 12(4): 729-737.
- [11] 刘汉龙, 吴迪, 孔纲强, 等. 预埋与绑扎埋管形式能量桩传热特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 333-340.
LIU Han-long, WU Di, KONG Gang-qiang, et al. Thermal response of energy piles with embedded tube and tied tube[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 333-340.
- [12] 李富远, 王忠瑾, 谢新宇, 等. 静钻根植能源桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3307-3316.
LI Fu-yuan, WANG Zhong-jin, XIE Xin-yu, et al. Model test on bearing characteristic of static drill rooted energy pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(10): 3307-3316.
- [13] 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. Applications of energy piles and technical development of PCC energy piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(1): 176-181.
- [14] OLGUN C G, OZUDOGRU T Y, ABDELAZIZ S L, et al. Long-term performance of heat exchanger piles[J]. **Acta Geotechnica**, 2015, 10(5): 553-569.
- [15] 吴迪, 刘汉龙, 孔纲强, 等. 预埋与绑扎埋管形式能量桩承载特性研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 1109-1116.
- WU Di, LIU Han-long, KONG Gang-qiang, et al. Study on bearing characteristics of energy piles with embedded tube and tied tube[J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**, 2017, 38(4): 1109-1116.
- [16] ROTTA LORIA A F, 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.
- [17] SAGGU R, CHAKRABORTY T. Thermomechanical response of geothermal energy pile groups in sand[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2016, 16(4): 04015100.
- [18] 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.
- [19] 龚建清, 彭文哲. 倾斜荷载下能量桩受力变形特性三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2105-2111.
- GONG Jian-qing, PENG Wen-zhe. Three-dimensional finite element analysis of stress and deformation characteristics of energy piles under inclined loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(11): 2105-2111.
- [20] 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.
- 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.
- [21] PASTEN C, SANTAMARINA J C. Thermally induced long-term displacement of thermoactive piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2014, 140(5): 6014001-6014003.
- [22] 罗喆, 胡彪. 基于热力荷载传递原理的能量桩长期响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 549-555.
- LUO Zhe, HU Biao. Long-term Response of energy pile based on thermo-mechanical load-transfer principle[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2019, 39(4): 549-555.
- [23] 董龙龙, 吴文兵, 梁荣柱, 等. 基于指数模型的能源桩长期响应研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2021, 40(3): 629-639.
- DONG Long-long, WU Wen-bing, LIANG Rong-zhu, et al. Long-term responses of energy piles based on exponential model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(3): 629-639.
- [24] KONG G Q, WU D, LIU H L, et al. Performance of a geothermal energy deicing system for bridge deck using a pile heat exchanger[J]. **International Journal of Energy Research**, 2018, 43(1): 596-603.
- [25] WU D, KONG G Q, LIU H L, et al. Performance of a full-scale energy pile for underground solar energy storage[J]. **Case Studies in Thermal Engineering**, 2021, 27: 101313.
- [26] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. **Geotechnique**, 2006, 56(2): 81-122.
- [27] CHIN J T, POULOS H G. A "T-Z" approach for cyclic axial loading analysis of single piles[J]. **Computers & Geotechnics**, 1991, 12(4): 289-320.
- [28] 王长虹, 杨天笑, 马铨涛, 等. 束浆挤扩钢管桩竖向抗拔承载力计算方法[J]. 岩土力学, 2024, 45(3): 846-856.
- WANG Chang-hong, YANG Tian-xiao, MA Cheng-tao, et al. Calculation of uplift capacity of steel pipe pile with constrained grouting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(3): 846-856.
- [29] 冷伍明, 丁荣锋, 杨奇, 等. 粗糙度对单桩竖向承载变形特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(6): 1597-1607.
- LENG Wu-ming, DING Rong-feng, YANG Qi, et al. Experimental study on the effect of roughness on the vertical bearing capacity and deformation characteristics of a single pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(6): 1597-1607.
- [30] AMATYA B L, SOGA K, BOURNE-WEBB P J, et al. Thermo-mechanical behaviour of energy piles[J]. **Géotechnique**, 2012, 62(6): 503-519.