

基于能源地下结构的排桩在循环温度荷载作用下的热-力响应特性研究

于本昌

中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142

[摘要]为探究循环温度荷载下能源地下结构排桩的热-力响应特性, 依托大连某地铁车站基坑工程, 建立能量桩-土体三维传热数值模型, 采用数值模拟分析桩体与周边土体的温度及热应力变化规律。结果表明: 在循环温度荷载作用下, 能量桩内部交替产生拉压应力, 但无循环累积效应。研究验证了该类能量桩的力学安全性, 为浅层地热能轨道交通基坑工程的应用提供了技术参考。

[关键词]浅层地热能; 能源地下结构; 能量桩

DOI: 10.33142/aem.v8i2.19051

中图分类号: U443.15

文献标识码: A

Study on the Thermal-Mechanical Response Characteristics of Pile Arrangement Based on Energy Underground Structure under Cyclic Temperature Load

YU Benchang

China Railway Design Corporation Co., Ltd., Tianjin, 300142, China

Abstract: In order to explore the thermal-mechanical response characteristics of energy underground structure piles under cyclic temperature loads, a three-dimensional heat transfer numerical model of energy piles soil was established based on the foundation pit project of a subway station in Dalian. The temperature and thermal stress changes of the pile body and surrounding soil were analyzed by numerical simulation. The results indicate that under cyclic temperature loading, alternating tensile and compressive stresses are generated inside the energy pile, but there is no cyclic cumulative effect. The study has verified the mechanical safety of this type of energy pile, providing technical reference for the application of shallow geothermal energy in rail transit foundation pit engineering.

Keywords: shallow geothermal energy; energy underground structure; energy pile

引言

浅层地热能是指地表以下 200m 范围内土体储存的热量, 具有储量大、分布广、安全可靠等特点, 被认为是一种绿色低碳且可持续利用的清洁能源。能源地下结构是一种崭新的建筑物结构形式, 其原理是将地源热泵埋入处于恒温地层中的地下结构内, 与地下结构一起形成地下换热器, 进而吸收周围土体的热量, 为建筑供热或制冷。能源地下结构最初起源于欧洲, 在奥地利、德国和瑞士等国家得到发展, 我国主要在上海和南京等地有少量应用。随着绿色建筑概念的提出和重视, 能源地下结构在国内正在得

到更多的关注和应用。

本文依托大连某地铁车站基坑工程, 建立能量桩-土体三维传热数值模型, 主要探讨循环温度荷载作用下能量桩的热-力响应特性。

1 工程概况

大连某地铁车站基坑深约 17.5m, 采用钻孔桩+内支撑的支护形式。钻孔桩直径 0.8m, 桩间距 1.4m, 桩长 18.2m。场地内地层由上至下依次为素填土、粉质黏土、白云岩。场地内地下水主要以潜水及裂隙水为主, 稳定水位为地面以下 7m, 具体地质信息详见表 1。

表 1 地层参数统计表

材料名称	标高范围	导热系数	密度	比热容	渗透系数
	(m)	W (m.K)	(kg/m ³)	J/ (kg.K)	m/d
素填土	0.00~-1.50	1.2	1700	970	30
强风化白云岩	-1.5~-5.00	4.33	2300	870	40
中风化白云岩	-5.00~	4.83	2680	870	5

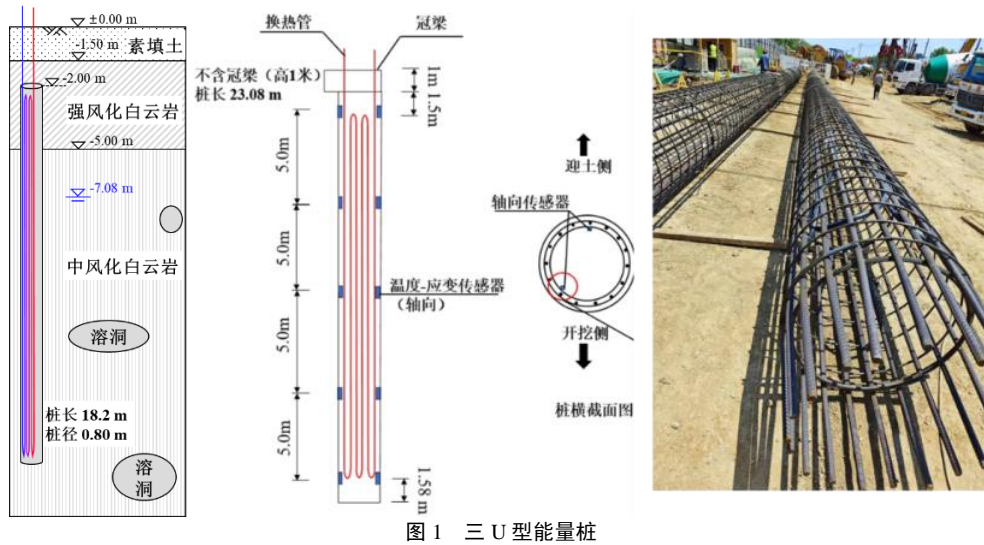


图1 三U型能量桩

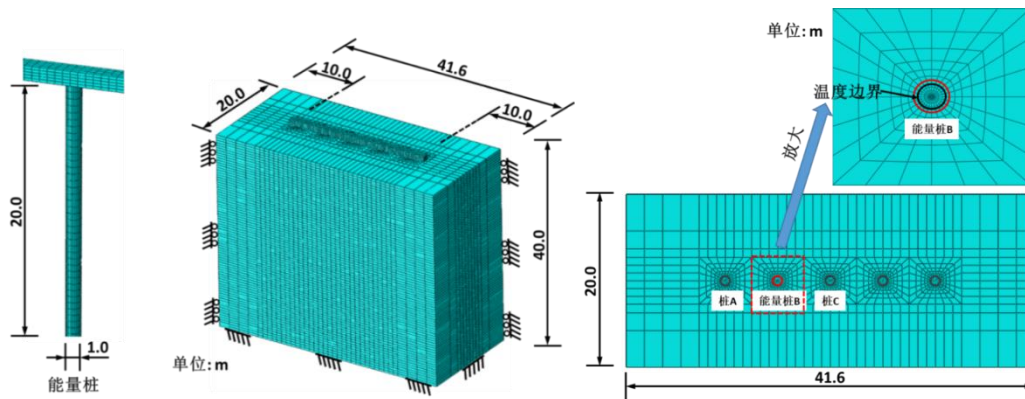


图2 数值模型的几何、网格和边界条件

基坑围护结构中能量桩与非能量桩按 1:1 比例间隔布置,能量桩内换热管采用聚乙烯(PE)管,布设形式为三U,集中布设在桩体土壤侧,三U型能量桩布置详见图1。

2 模型建立与网格划分

采用 Comsol Multiphysics 和 Abaqus 软件建立桩-土三维有限元模型进行数值模拟。模型长 41.6m,宽 20m,高 40m,能量桩与非能量桩间隔布置,见图2。土体底面为固定约束,用来约束底面上的竖向位移、水平位移和转动;侧面为辊支撑,用来约束土体的水平位移;顶面和冠梁表面无约束。土体四周和底面为热绝缘,顶部为热通量边界。需要指出,水平方向土体温度均匀分布;竖直方向,0~20m 范围内土体为现场实测温度,20~40m 范围内,土体温度恒为 21℃。

3 工况设置

现场试验主要测试循环温度荷载作用下能量桩和非能量桩的温度及应力变化规律。现场试验共包括 2 轮冷-热温度循环,每轮温度循环过程中通过控制换热液体的温

度,首先对能量桩制冷 180h,然后对能量桩制热 180h。在两轮热-冷温度循环之后,关闭循环水泵,能量桩的应力和温度自然恢复 480h 直至初始状态。因此,试验的总时长为 1200h。测试前测得试验场地及能量桩的初始温度为 21℃,温度循环过程中换热液体的温度变化范围为 5~37℃ (ΔT) = ± 16 ℃。

Comsol 模型模拟两轮冷-热温度循环过程中能量桩的温度及应力变化规律,并未模拟温度恢复过程中能源地下结构热-力学行为,模型的计算总时长为 720h。模型中几何尺寸、入口水温、流量、初始地温和地质条件等参数与现场试验一致。

Abaqus 模型模拟试验中温度循环和自然恢复阶段中能源地下结构的温度及应力变化规律,计算总时长等于 1200h。模型中的初始地温、地质条件和几何尺寸与现场试验一致。数值模型通过温度边界模拟换热管中换热液体对桩的加热效果,冷-热温度循环过程中温度边界的温度等于现场试验中换热管进口和出口水温的平均值。

4 研究结果与分析

4.1 能量桩和土体的温度变化规律

(1) 在循环温度荷载作用下, 能量桩中部 ($z=9.5\text{m}$) 的温度随时间变化的规律如图 3 所示。由图可知, 能量桩的温度与换热管入口水温的变化规律一致。当制冷和制热过程中能量桩的入口温度关于初始温度对称变化时, 每轮温度循环过程中, 能量桩的温度变化规律基本一致, 这意味着能量桩的温度不受循环次数的影响, 且经过 480h 的自然恢复, 桩体温度基本可恢复至初始值 21°C 。

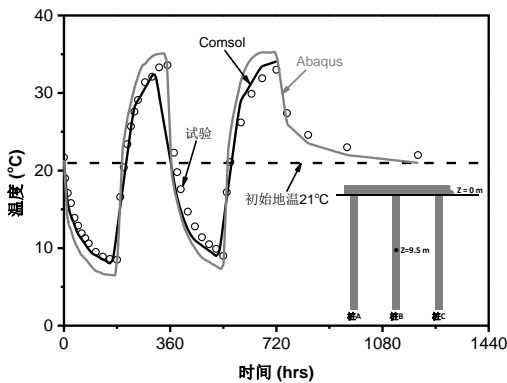
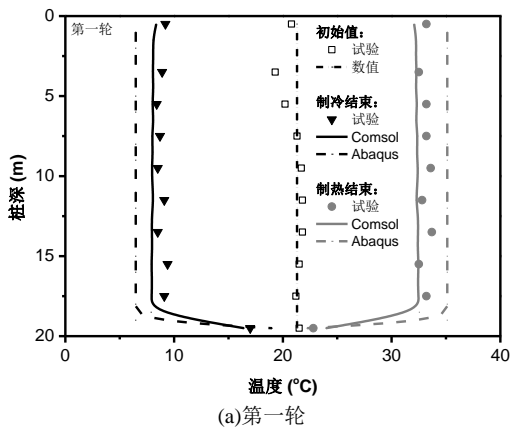


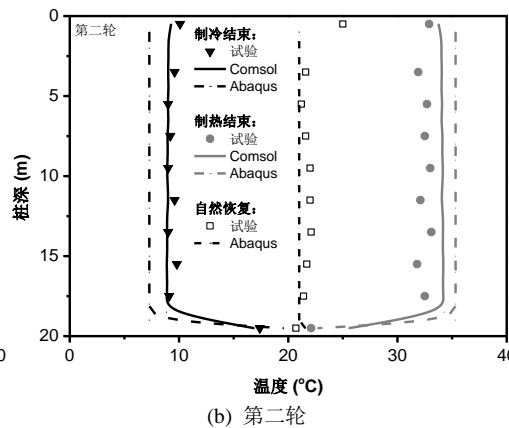
图 3 能量桩温度随时间的变化

(2) 在循环温度荷载作用下, 每轮制冷或制热结束时能量桩温度沿桩深方向的分布如图 4 所示。由图可知, 沿桩深方向, 能量桩的温度基本保持均匀, 这一规律在现场试验、Comsol 模型及 Abaqus 模型中均可发现相同规律。图 4 所示, 由于在靠近桩端位置桩体内没有设置换热管, 导致桩端的温度出现了明显的下降。

(3) 在循环温度荷载作用下, 桩周土体温度沿径向的分布规律如图 5 所示。由图可知, 沿能量桩径向, 距离能量桩越远, 土体的温度越低, 这是由于土体的热阻导致能量桩释放或吸收的热量无法影响较远处的土体。由于每轮温度循环周期仅为 180h, 因此能量桩的影响范围只有 1 倍桩径。



(a) 第一轮



(b) 第二轮

图 4 能量桩温度沿桩深方向的分布

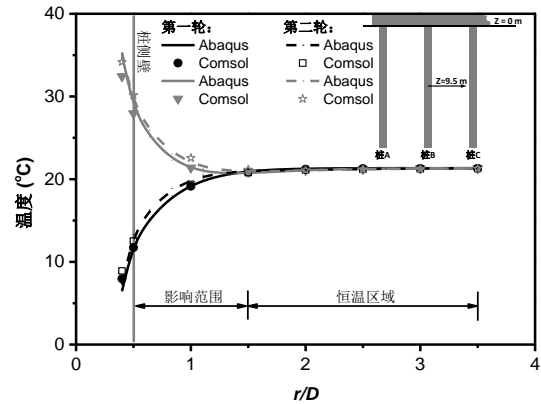


图 5 土体温度沿能量桩径向的分布

4.2 能量桩热应力变化规律

(1) 在循环温度荷载作用下, 能量桩中部的热应力 ($z=9.5\text{m}$) 随时间的变化规律如图 6 所示。由图可知, 当桩体温度下降时, 能量桩内部会产生拉应力, 当桩体温度上升时, 能量桩内部会产生压应力, 且每轮温度循环之间能量桩的热应力变化基本保持不变。这是因为当能量桩产生温度膨胀或收缩时, 桩-土接触面之间的摩擦力会限制能量桩的变形, 使得一部分能量桩温度变形被约束, 从而造成桩体内部产生热应力。

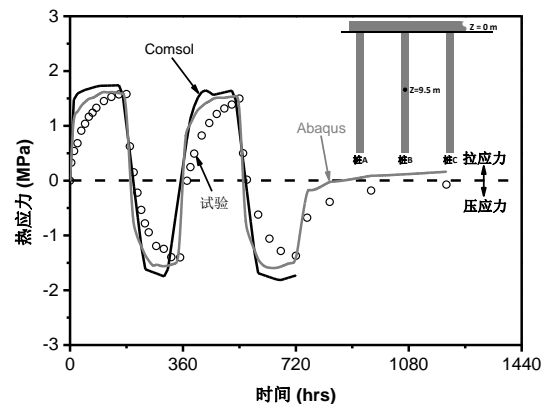


图 6 能量桩热应力随时间的变化

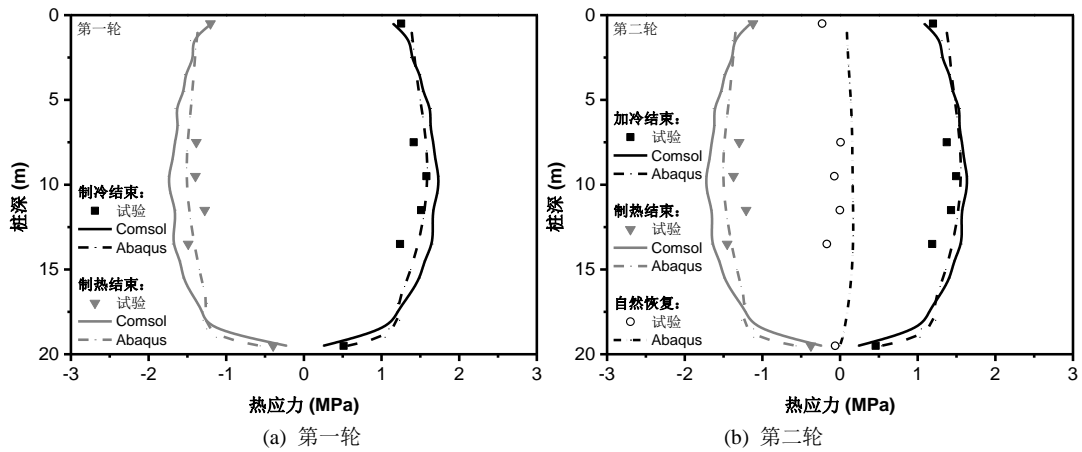


图7 热应力沿桩深方向的分布

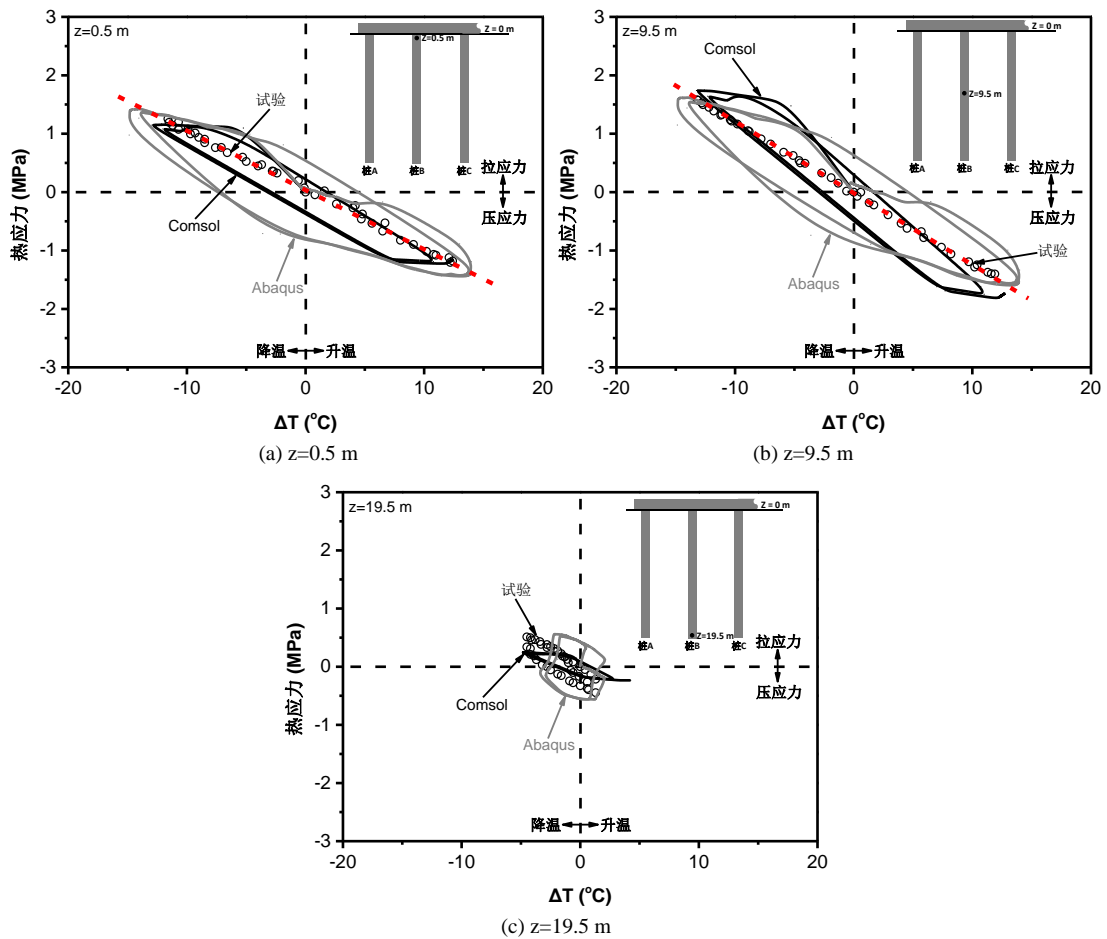


图8 能量桩热应力随桩体温差变化的规律

(2) 在循环温度荷载作用下, 每次制冷或制热结束时能量桩内热应力沿桩深方向的分布如图7所示。由图可知, 尽管桩体温度沿桩深方向分布基本一致, 但热应力沿桩深方向分布却不均匀, 且制冷过程和制热过程能量桩热应力沿桩深方向分布的规律及热应力的大小基本相同, 但

符号相反。每轮温度循环过程中热应力沿桩深方向的分布规律不随温度循环次数增加而改变。

(3) 在循环温度荷载作用下, 能量桩顶部($z=0.5\text{m}$)、中部($z=9.5\text{m}$)和底部($z=19.5\text{m}$)热应力随桩体温差的变化规律如图8所示。由图可知, 能量桩内的热应力随桩

体温差的增加而增大,且桩内热应力与桩体温差基本呈线性关系。在能量桩底部,由于桩体内未设置换热管,导致此处温度变化发生滞后,此处的热应力与温差之间的关系出现明显的滞回现象。

由图6~图8可知,在循环温度荷载作用下,Comsol模型和Abaqus模型中能量桩热应力随温差的变化规律与现场试验基本吻合,且并未随着循环次数的增加而出现累积,即能量桩热应力整体表现为热弹性的特性。由图6~图8可知,无论数值模型中是否考虑土体的塑性行为以及桩-土接触面的循环剪切退化与相对滑动,Comsol模型和Abaqus模型的结果相差不大,且二者都能和现场试验测得的结果吻合。这也说明了能量桩温度改变引起的桩体应变不会导致桩-土接触面产生过大的相对滑移而进入塑性阶段,且土体塑性和桩-土接触面的循环剪切退化对加热桩力学特性的影响也不大。

5 结论

本文依托大连某地铁站基坑工程,建立能量桩-土体三维传热数值模型,探讨循环温度荷载作用下能量桩的热-力响应特性研究,结论主要如下:

(1) 在循环温度荷载作用下,Comsol和Abaqus模型中温度变化规律和应力变化规律与现场试验基本吻合。

(2) 在循环温度荷载作用下,能量桩内部交替产生拉压应力,循环温差越大,应力越大,且表现为能量桩中部应力大两端小的特点。

(3) 在循环温度荷载作用下,能量桩内部的应力并未出现累积,即桩体热应力整体表现为热弹性的特性。能量桩温度改变引起的桩体应力不会导致桩-土接触面产生过大的相对滑移而进入塑性阶段。

基金项目:轨道交通车站应用浅层地温能关键技术研究(2023A0215805)。

[参考文献]

- [1]孔纲强,常洪林,王天赐,等.区域尺度地埋管地源热泵与能源地下结构开采浅层地热能评价综述[J].岩土力学,2024,45(5):1265-1283.
 - [2]朱巍,张静,唐雯,等.城市浅层地热能开发地质环境问题研究[J].地质与勘探,2024,60(1):113-120.
 - [3]陈鑫,孔纲强,王忠涛,等.能量桩桥面除冰融雪能源需求与供给能力案例分析[J].中国公路学报,2023,36(3):202-210.
 - [4]陈鑫,孔纲强,刘汉龙,等.桥面融雪除冰能量桩热泵系统换热效率现场试验[J].中国公路学报,2022,35(11):107-115.
 - [5]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.
 - [6]杨卫波,严超逸,张来军,等.渗流作用下能源桩的换热性能及热-力耦合特性[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(5):891-899.
 - [7]高磊,季保全,刘汉龙,等.螺旋式热源PCC能量桩桩身变形数值模拟研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(4):628-635.
 - [8]黄光勤,杨小凤,庄春龙,等.新型圆台型螺旋能量桩传热模型与换热性能[J].太阳能学报,2019,40(3):695-702.
 - [9]闫振国,张正威,杨军.考虑桩身热容的能量桩传热性能分析[J].防灾减灾工程学报,2019,39(4):599-606.
- 作者简介:于本昌(1989.6—),单位名称:中国铁路设计集团有限公司,毕业学校和专业:西南交通大学,地下结构与隧道。