

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211120024

考虑地基刚度分区的能源支护桩有限元模拟*

田婉琪¹, 程晓辉¹, 关文¹, 杜风雷^{1,2}, 王宇东³

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100020;
3. 雄安云网科技有限公司, 河北 雄安 071700)

摘要: 能源支护桩在工程实践中已有应用, 但国内外相关研究甚少。以雄安城市计算(超算云)中心能源支护桩的应用为背景, 使用 COMSOL Multiphysics 软件对深基坑桩锚支护结构进行了基坑开挖和变温过程的有限元模拟。在开挖模拟中通过对比模拟结果和现场实测数据, 优化了模型参数设置, 提出了同时考虑回弹区土体的卸载状态、剪切区土体的小应变刚度以及土体刚度随深度增加而增大的“地基刚度分区”建模思路; 在基坑开挖模拟的基础上, 研究了不同温度荷载对支护桩变形和内力的影响, 并对如何在工程设计计算中考虑温度荷载对支护桩的影响提出建议。结果表明, 考虑地基刚度分区的建模方法能有效优化基坑开挖线弹性模型的模拟结果, 温度荷载对支护桩的变形和内力影响较小, 工程设计时可以忽略。

关键词: 能源岩土工程; 能源支护桩; 深基坑开挖; 地基刚度分区; 温度荷载

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0922-07

Finite Element Simulation of Energy Pile-anchor Retaining Structure Considering Subgrade Stiffness Partition

TIAN Wanqi¹, CHENG Xiaohui¹, GUAN Wen¹, DU Fenglei^{1,2}, WANG Yudong³

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. China Building Research Institute Co. Ltd, Beijing 100020, China;
3. Xiongan Cloud Network Technology Co. Ltd, Xiongan 071700, China)

Abstract: Energy piles have been applied in engineering practice as retaining piles, but there is little research at home and abroad. Based on the application of energy retaining piles in Xiongan Urban Computing (Supercomputing Cloud) Center, numerical simulations are conducted to study the excavation of a deep foundation pit and temperature change process of energy retaining piles using COMSOL Multiphysics software. In the excavation simulation, the model parameter setting was optimized by comparing the simulation results with the field measured data, and the “subgrade stiffness partition” modeling method for the foundation soil was proposed. Furthermore, the influence of different temperature loads on the deformation and internal force of the retaining pile is studied. Finally, based on the above analysis results, suggestions are put forward on considering the influence of temperature load on the retaining pile in engineering design calculation. The results show that the modeling method considering subgrade stiffness partition can effectively optimize the simulation results of the linear elastic

* 收稿日期: 2021-11-12; 修回日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778338, 52078274)、雄安云网科技有限公司项目(20212000016)资助

作者简介: 田婉琪(1999—), 女, 博士研究生。主要从事能源地下结构研究。E-mail: 1095585235@qq.com

model of foundation pit excavation. The temperature load has little influence on the deformation and internal force of the retaining pile, which can be ignored in engineering design.

Keywords: energy geotechnical engineering; energy retaining pile; foundation pit excavation; sub-grade stiffness partition; temperature load

引言

据《中国建筑能耗研究报告(2020)》^[1]提供的数据显示,2018年我国建筑全寿命周期能耗占社会总能耗的46.5%,其中建筑运行阶段能耗占全过程能耗的46.6%,占全社会总能耗的21.7%,且未来中国有大批量新建筑将投入使用,该比例将持续上升,建筑运行能耗正成为政府和公众关注的焦点。2020年9月22日,习近平总书记提出“双碳”目标^[2]:争取2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和。“双碳”目标将促进建筑节能新技术的发展,需要探索新型高效环保的建筑节能新技术。在这样的背景下,能源地下结构(包括能源桩、能源筏板、能源隧道等)作为一种绿色环保高效的建筑节能新技术逐渐进入工程界和学术界的视野。其中应用较为广泛、研究较为丰富的是能源桩技术,它能有效利用建筑的桩基结构,节省了额外的占地面积和地下空间,可以与基础工程的结构施工协同进行。在建筑节能方面,能源桩比传统空调系统节能30%~50%^[3]。

能源桩在换热过程中引起桩体温度变化,而桩周岩土体和上部结构对能源桩的热膨胀变形产生约束,使桩体内产生附加温度应力,从而改变了能源桩的力学特性。国内外学者对此已开展很多研究,H.Brandl^[4]、L.Laloui等^[5]、P.L.Bourne-Webb等^[6-8],国内的桂树强等^[9]、路宏伟等^[10]进行了能源桩原位试验,总结了能源桩在传热过程中的一些力学特性,提出了荷载-温度耦合作用下的能源桩结构响应的理想分析模型,为能源桩设计提供了可靠依据。

能源桩技术除了应用于桩基础,还能应用于支护结构,桩基础主要承受轴向荷载,而支护结构(尤其是支护桩)主要承受横向荷载,两者的荷载工况截然不同。然而,目前的研究基本只针对用作桩基的能源桩,而对于用作支护结构的能源桩则研究甚少。李淑勇等^[11]通过离心机实验发现能源地下连

续墙的温度应力与埋深与开挖侧有关;H.Brandl^[4]通过现场实验发现温度导致的应变远小于土压力引起的应变。但现有能源支护桩的研究缺乏对温度荷载下支护桩的变形特征和力学响应较为系统全面的研究工作,变温条件会如何影响支护桩的承载性能,工程设计中如何考虑温度荷载,这些都是工程师们关心的、尚待解决的问题。

本文以雄安城市计算(超算云)中心能源支护桩的应用为背景,对深基坑桩锚支护结构进行有限元模拟,通过对比模拟结果和现场实测数据的差异,提出了同时考虑回弹区土体的卸载状态、剪切区土体的小应变刚度以及土体刚度随深度增加而增大的“地基刚度分区”优化建模思路,极大地降低了模拟结果与实测结果的差异。研究了不同温度荷载对支护桩变形和内力(尤其是弯矩和剪力)的影响,对如何在工程设计计算中考虑温度荷载对支护桩的影响提出建议。本文的地基模型采用线弹性模型而不是弹塑性模型,因为有温度荷载的参与,热弹-热塑耦合模型复杂,为了便于工程设计和计算,仅使用热弹耦合模型来简化分析。

1 工程概况与地址水文条件

雄安城市计算(超算云)中心位于雄安新区容城县容东片区西侧悦容公园区域,总建筑面积37 536 m²,分为地上三层、地下一层。基坑总周长约700 m,形状近似为矩形,一期基坑深度15.7~16.7 m,二期基坑深度8.40~6.15 m,基坑深度较深,但周边无邻近建构筑物,场地空旷。南侧深坑区采用上部土钉墙、下部桩锚支护体系,北侧浅基坑区采用土钉墙及悬臂桩支护方案。

南侧深坑区桩锚支护结构剖面如图1所示,上部土钉墙深度6.7 m,支护桩桩长21 m,基坑深度16.7 m,桩顶和距桩顶5.8 m处分别设置了锚杆,锚杆倾角20°。热交换管采用串联双u(w)型,布设在能源桩靠近土体一侧。

根据建研院的勘察报告,桩周岩土层主要为粉

土、粉细砂、粉质黏土层,桩尖落在粉质黏土层。工程厂区 45 m 深度范围内量测到两层地下水,分别为埋深 15.70~16.60 m 的潜水和埋深 18.50~21.00 m 的承压水。

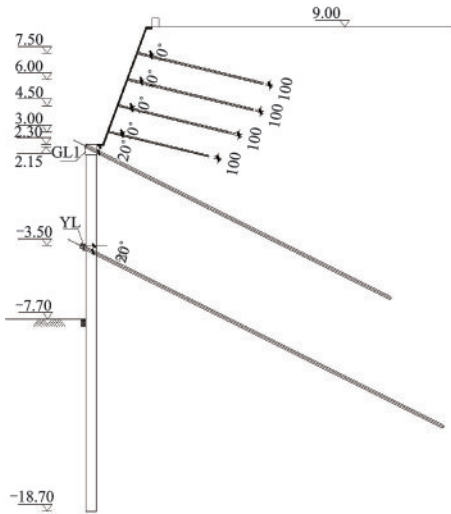


图1 桩锚支护结构剖面示意
Fig.1 Profile of the pile-anchor retaining structure
注:标高单位 m,其他长度单位 mm

2 深基坑支护能源桩有限元模型

本文使用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件对变温条件下深基坑支护能源桩热力耦合问题进行线弹性分析,采用各向同性弹性本构模型,分析正常使用时的桩土热力学特性,而非长期经受热荷载的承载力极限状态,在短期的升温降温时土体呈现出“热胀冷缩”的行为,进行线弹性分析是合理的,因此不考虑地基土在温度荷载作用下的热固结和热蠕变,仅考虑弹性热胀冷缩。

取桩土竖向截面建立二维平面应变模型如图 2 所示,左上角矩形为开挖土体,长(即坑内土计算范围)为 20 m,开挖深度为 10 m;坑外土计算范围为 30 m,全部土体计算深度取 30 m;中间细长矩形为支护桩,桩长 21 m,桩径 800 mm。为简化模型,省略土钉墙和其支护的土体的实体建模,将该部分土体自重作为边界荷载施加于模型上边界。本文未对锚杆进行实体建模,而是根据现场的锚索拉拔试验得到锚杆的荷载-位移(Q-s)曲线,将其分段参数化后作为外部荷载施加于固定点 $z = 0$ m 和 $z = -6$

m 处,如图 2 箭头所示。

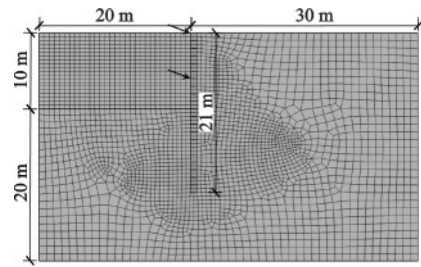


图2 桩锚支护结构有限元模型
Fig.2 FEM model of the pile-anchor retaining structure

支护桩材料参数参考混凝土(表 1),地基土体材料参数依据现场地勘报告进行取值(表 2)。由于地勘报告中仅给出土体侧限压缩模量,需代入式(1)得到输入模型的杨氏模量值:

$$E = \left(1 - \frac{\mu^2}{1 - \mu}\right) E_s \quad (1)$$

式中, E 为模型所用的土体杨氏模量; E_s 为地勘报告中给出的侧限压缩模量; μ 为土体泊松比。

地勘报告显示,该处土层虽为复杂地层,但各层土体杨氏模量随土体深度的变化可以近似为线性,因此模型将地层简化为一层,取土体杨氏模量随深度线性增加,且令求解域内土体的平均杨氏模量与地勘报告中各层土体杨氏模量平均值相等,根据地勘报告取 $z = 0$ m 处的杨氏模量为均值的 1/5。对于其他复杂地层,可以根据地勘采用分段线性函数对不同地层的杨氏模量进行参数取值。

地勘报告中未给出土体的泊松比,本文分别取泊松比为 0.25、0.3、0.35、0.4 代入模型进行试算,从基坑侧壁变形的角度对所取参数的合理性进行考量,最终取计算结果最合理的 $\mu = 0.35$ 作为土体泊松比。

模拟分为两个步骤进行,首先进行基坑开挖模拟,该步骤无温度荷载,其后进行考虑温度荷载的热力耦合模拟。

表 1 混凝土材料参数

Table 1 Parameter values of concrete

参数名称	取值	单位
热膨胀系数	10^{-5}	K^{-1}
密度	2.3×10^3	$kg \cdot m^{-3}$
杨氏模量	25	GPa
泊松比	0.20	1

表2 地基土材料参数表

Table 2 Parameter values of foundation soil

参数名称	数值	单位
热膨胀系数	10^{-6}	K^{-1}
密度	1.9×10^3	$kg \cdot m^{-3}$
杨氏模量均值	16.5	MPa

进行基坑开挖模拟时,本文使用了考虑地基刚度分区的地基土模型,以支护桩所在竖直平面为界,将土体模型分为回弹区和剪切区两个区域(图3),同时考虑回弹区土体的卸载状态、剪切区土体的小应变刚度以及土体刚度随深度增加而增大,从而进行不同的土体杨氏模量参数取值。

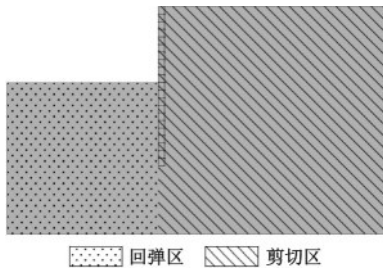


图3 地基土分区图

Fig.3 Foundation soil partition

为简化分析模型,本文不进行瞬态传热研究,而是在模型上添加一个稳态温度场(图4)来进行变温模拟,初始温度即为地温 $15^\circ C$,改变支护桩桩身温度来施加温度荷载,支护桩上的附加温度向桩周土体中传递,取热影响半径为 $4.5 m^{[12]}$,该范围内余热温度分布简化为线性分布。桩侧温度传递的土体范围远大于桩底^[5],因为桩底换热管面积远小于桩侧换热管面积,为简化模型忽略桩底部土体的温度改变。支护桩身初始温度为 $15^\circ C$,温度变化范围取 $+5 \sim +30^\circ C$,即温度荷载 ΔT 为 $-10 \sim +15^\circ C$,每 $5^\circ C$ 进行一次计算。



图4 地基温度场

Fig.4 Ground temperature field

3 模拟结果与分析

3.1 考虑地基刚度分区的基础开挖模拟结果分析

进行基坑开挖模拟时,本文对地基土的杨氏模量参数采用了两种取值方式。方式一将地勘报告土体侧限压缩模量通过公式(1)计算得到的杨氏模量作为地基土的模量参数;方式二以支护桩所在竖直平面为界,将土体模型分为回弹区和剪切区两个区域,对两区域土体的杨氏模量进行分别取值。

图5是两种土体杨氏模量取值方式下模拟的桩身水平位移曲线与现场第三方监测得到的桩体深层水平位移(测斜)曲线,负值表示位移指向坑内。图5中方式一的模拟曲线与实测曲线差异极大,方式一的模拟结果桩体中下部位移远大于桩体上部位移,这与实测结果完全相反,且模拟结果中桩体水平位移数值也远大于实测结果,模拟最大位移可达 $56 mm$,接近实际监测值的10倍。主要原因是方式一采用的是由地勘报告中土体侧限压缩模量转化而来的杨氏模量,侧限压缩试验测得的是土体加载受压时的模量,而开挖过程中随着开挖深度增加,基坑下方土体的上覆荷载减小,土体经历的是卸载过程而非加载过程。而土体加载受压时的变形包括弹性应变和塑性应变两部分,卸载回弹时仅弹性应变可恢复,塑性应变不可恢复,因此土体的回弹模量显著大于压缩模量,因此模型中基坑下方的土体杨氏模量取值显著偏小。另一方面,桩后地基土体的应力状态也与侧限压缩试验土体的受力状态差别较大。侧限压缩试验中土体的竖向应力增大,侧向应变受约束,而桩后土体在开挖过程中竖向应力基本不变,水平应力减小,偏应力(竖向应力减去水平应力)数值随开挖深度增加而增大,受力状态更类似于受剪,因此桩后土体的模量从剪切模量的角度考虑更合理。土体的抗剪刚度与应变水平有关,剪切模量随应变水平的增大呈现出极大的衰减^[13]。依据监测报告,可以估算桩后土体的剪切应变的数量级为 10^{-4} ,属于小应变范围。而根据地勘报告提供的侧限压缩试验数据分析,测得土体压缩模量时,试验样品的剪切应变数量级为 10^{-2} ,远高于实际的土体应变,此时土体的剪切刚度已衰减

很多。因此如果使用地勘报告的压缩模量作为模型参数取值依据,实际上极大地低估了土体的剪切刚度。

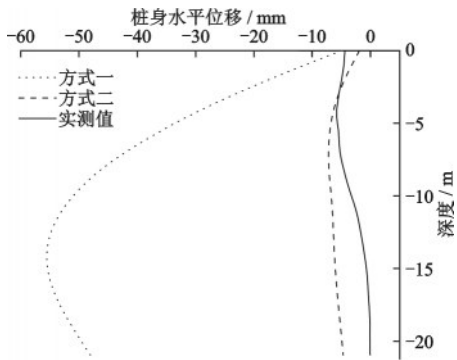


图5 桩身水平位移曲线

Fig.5 Horizontal displacement curves of the pile

方式二针对方式一的局限对地基土杨氏模量进行了考虑地基刚度分区的参数优化。以支护桩所在垂直平面为界,将土体模型分为回弹区和剪切区两个区域,同时考虑回弹区土体的卸载状态、剪切区土体的小应变刚度以及土体刚度随深度增加而线性增大(各向同性弹性模型),从而进行不同的土体杨氏模量参数取值。回弹区土体的杨氏模量取地勘报告数据的5倍作为回弹模量,剪切区土体的模量取值需考虑小应变剪切刚度问题。以砂土的剪切刚度退化曲线为参考^[12],得到砂土剪切应变为 5×10^{-4} 时的剪切模量约为160 MPa,由于模型输入参数为杨氏模量和泊松比,故需代入公式(2)进行转化:

$$E = 2(1 + \mu)G \quad (2)$$

式中, G 为土体剪切模量。算得对应的砂土杨氏模量为432 MPa。

由于当地土质主要为粉质黏土和粉土、含少量粉细砂,土体剪切模量与砂土相比应偏小。为了找出一个较合理的剪切区土体模量的取值,将得到的砂土杨氏模量定性地向下调整,通过反演计算,取计算结果与实测数据最相近的一组参数为优化的剪切区土体模量。剪切区土体杨氏模量的最终取值为200 MPa,对应的剪切模量为80 MPa。

图5中方式二的模拟位移曲线与实测位移曲线的差异显著小于方式一,曲线形状与实测结果更一致,模拟结果数值上也与实测值达到同一数量级:最大位移的模拟结果为7.12 mm,实测数据为5.77 mm,误差缩小为1.35 mm。显然,考虑地基刚度分

区的土体模量参数取值方法能够更好地模拟基坑开挖时支护桩的变形行为,使用方式二的参数进行下一步变温模拟。

3.2 变温模拟结果分析

3.2.1 温度荷载对基坑和支护结构变形的影响

图6为不同温度荷载下的桩身水平位移曲线,图6中桩身存在一个水平位移不随温度变化而改变的中性点,降温使中性点以上桩身水平位移略微减小、中性点以下桩身位移略微增大;升温则相反。桩身上部的附加位移比桩身下部大,这是因为坑底以上桩身仅坑外侧有土体约束,另一侧是自由端,而坑底以下桩身两侧都有约束,下部约束强于上部约束。附加位移最大值不足1 mm,温度荷载对支护桩水平位移影响较小,远小于土压力导致的桩体侧移。

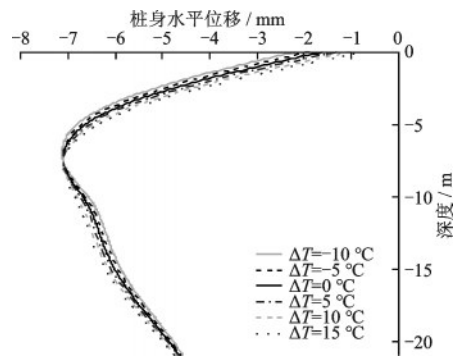


图6 不同温度荷载下的桩身水平位移曲线

Fig.6 Horizontal displacement curves of the pile under different temperature loads

图7是不同温度荷载下的坑底回弹曲线,温度对坑底回弹曲线的影响非常微小,可以忽略不计。

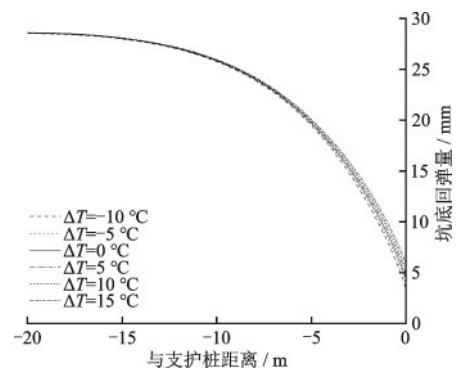


图7 不同温度荷载下的坑底回弹曲线

Fig.7 Rebound of pit bottom under different temperature loads

3.2.2 温度荷载对支护结构内力的影响

表3为不同温度荷载下的两层锚杆轴力,第二层锚杆轴力显著高于第一层锚杆轴力,说明第二层锚杆起主要作用,这个结果与设计中以第一层锚杆作为安全储备是一致的。随着温度升高,两层锚杆轴力都有所降低,其中温度荷载影响更大的是第一层锚杆。

表3 不同温度荷载下的两层锚杆轴力

Table 3 Axial forces of two layers of the bolt under different temperature loads

桩身温度/ °C	温度荷载/ °C	锚杆轴力/kN	
		第一层	第二层
5	-10	47.61	136.58
10	-5	41.40	135.15
15	0	35.19	133.71
20	5	28.98	132.29
25	10	22.76	130.86
30	15	16.55	129.44

图8为不同温度荷载下的支护桩弯矩,弯矩为负表示支护桩靠近坑内一侧受拉,靠近坑外一侧受压。支护桩受弯主要集中在坑底以上桩身处,最大弯矩出现在 $z=-4$ m附近,坑底以下弯矩水平很低。温度荷载对弯矩影响较小,弯矩图部分位置几乎重合为一条曲线,为了便于讨论附加温度弯矩,用各温度下的内力减去初始温度下的内力,作出附加弯矩图(图8(b))。附加弯矩较大的位置集中在支护桩中部(深度 $z=-6\sim-12$ m),升温降温导致的附加弯矩有对称性。

图9为不同温度荷载下的支护桩剪力图。支护

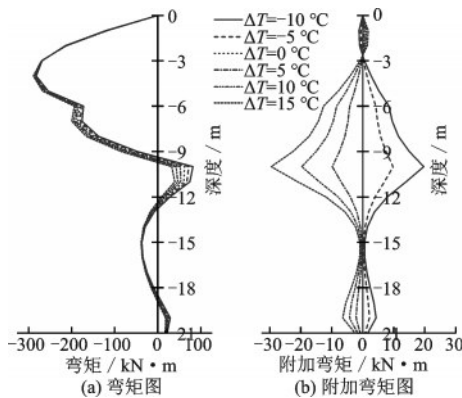


图8 不同温度荷载下的支护桩弯矩

Fig.8 Bending moments of the retaining pile under different temperature loads

桩受剪主要集中在坑底以上的桩身,接近坑底处剪力最大,坑底以下剪力随深度增加有所增大。温度荷载对剪力影响较小,同样作出附加剪力图(图9(b))。附加剪力较大的位置集中在桩顶和坑底附近(深度 $z=-10\sim-14$ m),桩顶附加剪力产生的原因主要是桩身水平位移改变导致的第一层锚索轴力变化。升温降温导致的附加剪力有对称性。

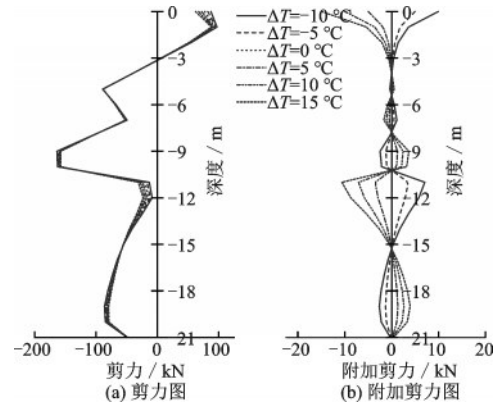


图9 不同温度荷载下的支护桩剪力

Fig.9 Shear force of the retaining pile under different temperature loads

线弹性模型模拟结果显示,温度荷载对支护桩弯矩和剪力的影响是微小的,尤其对于支护结构设计计算而言,温度荷载导致的最大附加弯矩仅为土压力导致结构最大弯矩的10.36%,最大附加剪力仅为土压力导致结构最大剪力的9.80%,且最大附加弯矩(剪力)并不出现在原本的危險截面处,因此认为按照不考虑温度荷载的荷载工况进行支护桩设计计算是安全可靠的。

4 结 论

(1)以支护桩所在竖直平面为界,将土体模型分为回弹区和剪切区两个区域,同时考虑回弹区土体的卸载状态、剪切区土体的小应变刚度以及土体刚度随深度增加而增大,从而进行不同的土体参数取值,这种考虑地基刚度分区的建模方法可以显著优化基坑开挖线弹性模型的模拟结果。

(2)施加温度荷载时,支护桩桩身存在一个水平位移不随温度变化而改变的中性点,温度荷载在中性点两边产生方向相反的桩体水平位移;温度荷载对支护桩水平位移影响较小,远小于土压力导致的桩体侧移。

(3)温度荷载引起的支护结构弯矩和剪力的变化与土压力导致的结构内力相比是微小的,因此对支护型能源桩的工程设计计算提出建议:温度荷载对支护桩变形和内力的影响可以忽略,按照无温度荷载的工况进行设计计算是安全可靠的。

参考文献:

- [1] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告 2020[J]. 建筑节能, 2021, 49(2):1-6.
China Association of Building Energy Efficiency. China building energy consumption Annual report 2020 [J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(2):1-6. (in Chinese)
- [2] 习近平. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1678546728556033497&wfr=spider&for=pc>, 2020-09-22/2021-10-03.
- [3] 夏才初, 曹诗定, 王伟. 能源地下工程的概念、应用与前景展望[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3):419-424.
Xia C C, Cao S D, Wang W. An introduction to energy geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3):419-424. (in Chinese)
- [4] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56(2):81-122.
- [5] 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, 30:763-781.
- [6] Bourne-Webb P J, Amatya, Sogaet K B, 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.
- [7] Amatya B, Soga K, Bourne-Webb P J, et al. Thermo-mechanical behaviour of energy piles[J]. Géotechnique, 2012, 62(6):503-519.
- [8] P.J. Bourne-Webb, B Amatya, K Soga. A framework for understanding energy pile behaviour[J]. Geotechnical Engineering, 2013, 166(2):170-177.
- [9] 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 S Q, Cheng X H. In-site tests on structural responses of energy piles during heat exchanging process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6):1087-1094. (in Chinese)
- [10] 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 H W, Jiang G, Wang H, et al. In-site tests and thermo-mechanical bearing characteristics of friction geothermal energy piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2):334-342. (in Chinese)
- [11] 李淑勇, 夏才初, 朱建龙, 等. 能源地下连续墙温度应力的离心模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4):1012-1020.
Li S Y, Xia C C, Zhu J L, et al. Centrifugal model test study on thermal stress of energy diaphragm wall [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4):1012-1020. (in Chinese)
- [12] 李晓星, 胡夏闽, 张正威. 竖直埋管换热器热响应半径计算方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17):248-253.
Li X X, Hu X M, Zhang Z W. Calculation method of thermal response radius for vertical borehole heat exchangers [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17):248-253. (in Chinese)
- [13] Zhang S, Cheng X H. Small-strain shear moduli modeling of sand: a non-equilibrium thermodynamic approach, including an application to Leighton Buzzard sand [J]. Granular Matter, 2019, 21(3):1-11.

(本文责编:苏泽云)