

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202003003

冷-热不平衡热荷载下黏土地基中能量桩 长期热-力学特性*

杨涛¹, 瞿广鑫², 花永盛³

(1. 上海理工大学土木工程系, 上海 200093; 2. 贵州省建筑设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;
3. 盐城市东亭投资有限公司, 江苏 盐城 224001)

摘要:建立了热-渗流-力(T-H-M)三场耦合能量桩有限元数值分析模型,研究了力学荷载组合不同热聚集度(桩的放热量与吸热量之比)温度荷载下黏土地基中能量桩的长期热-力学特性,包括桩身温度、桩头沉降、桩身轴向应力、地基土温度和超孔隙水压力特性等。计算结果表明:冷-热平衡时桩头沉降随温度荷载循环的增加逐渐增大,桩头发生沉降累积,桩身轴向应力和地基土温度变化的幅值不随温度荷载循环而变化。当桩的放热量大于吸热量时,桩身温度随温度荷载循环的增加而升高,桩头沉降随之减小,但热荷载循环对桩身轴向应力没有影响。桩周土温度随热循环的增加而逐渐增大,产生热聚集现象。温度荷载的热聚集度数值越大,桩身和桩周土的温度越高,桩身最小压应力越大,桩头沉降越小。温度荷载引起的超静孔隙水压力数值很小。

关键词: 能量桩; 长期热-力学特性; 不平衡冷-热循环; 黏土地基; 有限元法

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1333-08

Long-term Thermo-mechanical Behavior of Energy Pile in Clay under Unbalanced Cooling-heating Cycles

YANG Tao¹, QU Guangxin², HUA Yongsheng³

(1. Department of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Guizhou Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550081, China;
3. Yancheng Dongting Investment Co., Ltd., Yancheng 224001, China)

Abstract: A coupled thermal-hydro-mechanical (T-H-M) finite element model is established to investigate the long-term thermal-mechanical behavior of a single energy pile in clay subjected to mechanical load and thermal load with different thermal aggregation degrees (defined as the ratio of the heat injected into the ground to that extracted from the ground), including the pile temperature, pile head settlement, pile axial stress, ground temperature and the excess pore water pressure in the soil around the energy pile. The simulation results show that when the heating and cooling loads are reasonably balanced, the pile head settlement increases with the number of thermal cycles, that is, the pile head settlement accumulates gradually, while the amplitudes of the axial stress in the pile and the soil temperature around the pile keep the same. When the heating load is dominant, the pile temperature rises

* 收稿日期:2020-03-03;修回日期:2020-07-22

基金项目:上海理工大学沪江基金项目(D14003)资助

作者简介:杨涛(1962—),男,教授,硕导,博士。主要从事地基加固与桩基础研究。E-mail: shyangtao@163.com

with the increase of thermal cycles, and the pile head settlement decreases. Thermal cycles have no effect on the axial stress in piles. With the increase of the thermal cycles, the temperature of the surrounding soil gradually increases, resulting in heat accumulation in the ground. The more dominant the heating load is, the higher the temperatures of the energy pile and the soil around the pile, the larger the minimum compressive stress in the energy pile, and the smaller the pile head settlement. The thermally induced excess pore water pressure within the surrounding soil is very small.

Keywords: energy pile; long-term thermo-mechanical behavior; unbalanced cooling-heating cycle; clay; FEM

引 言

将传统地源热泵中的地理管置于建筑桩基中构成了能量桩技术。能量桩节约用地,换热效率高,节能环保,它起源于奥地利,后在瑞士、德国和日本等国家得到了应用^[1-2]。在我国的一些建筑中,如上海世博会汉堡馆、南京朗诗国际街区和同济大学旭日楼中应用了能量桩技术^[3]。

能量桩具有承受上部结构力学荷载和与地基土热交换的双重功能,冷、热荷载的施加极大地改变了桩基的承载和沉降特性。因此,能量桩热-力学特性的研究日益受到国内外学者的重视。L.Laloui等^[4]首先在瑞士联邦理工学院开展了热-力荷载下软、硬黏土地基中端承能量桩的现场试验。之后,P.J. Bourne-Webb等^[5]、桂树强等^[6]、路宏伟等^[7]、陈智等^[8]分别在英国伦敦、中国信阳、昆山和武汉等地对热-力荷载下黏土和粉质黏土地基中摩擦型能量桩和端承能量桩的热-力学特性进行了现场测试。现场试验发现,桩的热膨胀会引起数值大于力学荷载的附加压应力,桩的降温收缩会使桩体受拉,沉降加大。M. Faizal等^[9]通过奥地利一学生公寓楼下密砂地基中能量桩的现场试验发现,升温荷载引起桩的径向附加应力很小,对桩的竖向附加应力影响不大。M.A. Stewart等^[10]和C.W.W. Ng等^[11-12]进行了热-力荷载下砂土和黏土地基中摩擦型能量桩和端承能量桩的室内离心试验,发现随着冷-热温度循环,桩头沉降逐渐累积,超固结土中能量桩沉降累积小于正常固结土地基中的能量桩,沉降累积主要在前几个热循环中发生,砂土地基中能量桩的承载力随桩体温度的升高而增大。孔纲强等^[13]和V.T. Nguyen等^[14]通过室内模型试验,研究了冷-热循环对砂土地基中摩擦型能量桩长期位移的影响,发现

桩头累积沉降随温度荷载循环次数和力学荷载数值的增加而增大。刘干斌等^[15]进行了黏土地基中摩擦型能量桩承载力模型试验,发现黏土地基中能量单桩承载力随桩体温度的增加而增大。D. Wu等^[16]通过室内模型试验,研究了冷-热平衡温度荷载、制热荷载和制冷荷载三种不同温度荷载与力学荷载共同作用下黏土地基中摩擦型能量桩和端承能量桩的长期热-力学响应,发现能量桩的热-力学响应受温度荷载模式和桩端约束条件影响较大,冷-热平衡温度荷载下摩擦型能量桩的累积沉降和端承能量桩不可恢复的桩端阻力最大,摩擦型桩的累积位移大于端承桩。多场耦合有限元数值模拟是研究能量桩热-力学响应机理和长期热-力学特性的有效方法。郝耀虎等^[17]采用有限元法模拟分析了桩端约束对能量桩热-力学特性的影响。费康等^[18]采用有限元法,研究了砂土地基中摩擦型能量桩在力学荷载与冷-热平衡热荷载共同作用下的长期热-力学特性,获得了与室内模型试验^[13-14]相同的桩头累积沉降特性,指出桩身下部侧阻力弱化是能量桩承载力降低的主要原因。Y. Rui等^[19]采用三维热-渗流-力耦合有限元法研究了黏土地基中能量桩-土间相互作用,认为正是第一次冷-热循环中制冷时桩侧小部分区域内剪应力达到极限值才导致了桩头沉降累积。

长期热-力学特性是能量桩设计面临的重大挑战。前述能量桩的研究成果大多是在力学荷载+冷-热平衡温度荷载作用下取得的。实际上,能量桩的热荷载模式与当地的气候条件有关。我国南方炎热而北方寒冷,在炎热地区,夏天注入地基的热能远多于冬天从地基中吸取的热能,严寒地区则相反。显然,这些地区能源需求的不平衡造成了能量桩的冷-热不平衡。因此,深入研究冷-热不平衡温度荷载下能量桩的长期热-力学响应是非常必要的。

本文采用轴对称 T-H-M 三场耦合有限元数值模拟方法,考虑南方地区一年内桩体放热超过吸热的实际情况,研究饱和黏土地基中冷-热不平衡温度荷载与力学荷载共同作用下能量单桩的长期热-力学特性。

1 能量桩 T-H-M 三场耦合有限元模型

1.1 有限元模型

饱和黏土地基中摩擦型能量桩直径 $D=0.8\text{ m}$, 桩长 $L=20\text{ m}$ 。建立二维轴对称能量单桩热-渗流-力(T-H-M)三场耦合有限元分析模型。根据 C.W.W.Ng 等^[20]的研究,为消除边界影响,模型径向和深度方向计算范围均应不小于桩长的 1~2 倍,本文模型径向和深度方向都取 40 m。混凝土桩采用热弹性模型,地基土采用摩尔-库伦弹塑性模型。桩、地基土和水的热-力学参数见表 1。

表 1 材料热-力学参数

Table 1 Thermal and mechanical parameters of materials

参数	桩	黏土	水
杨氏模量/GPa	30	0.008	—
泊松比	0.2	0.31	—
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 400	1 700	1 000
热胀系数/($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	1.2×10^{-5}	1×10^{-5}	7×10^{-5}
导热系数/($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$)	1.7	1.51	0.57
比热容/($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$)	960	1 520	4 186
孔隙比	0.12	1.3	—
黏聚力/kPa	—	11	—
内摩擦角/($^{\circ}$)	—	10	—
渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	—	1.73×10^{-4}	—

采用荷兰大型岩土工程有限元软件 PLAXIS 进行能量桩热-渗流-力(T-H-M)三场耦合数值计算。各材料采用 15 结点三角形单元剖分,图 1 给出模型有限元网格图。单元总数 3 439 个,结点总数 27 897 个。模型的力学边界条件为:左边界为桩的中心线,竖向自由,径向约束;右边界竖向自由,径向约束;下边界竖向和径向都约束;模型上边界自由。模型热学边界条件为:左边界为热绝缘,右边界、下边界及上边界的温度恒定,数值为初始温度 15°C 。模型的孔压边界条件为:左边界、下边界和右边界均不排水,上边界排水。地下水位线位于地

表。地基土和桩的初始温度均为 15°C 。假设桩-土为全接触。

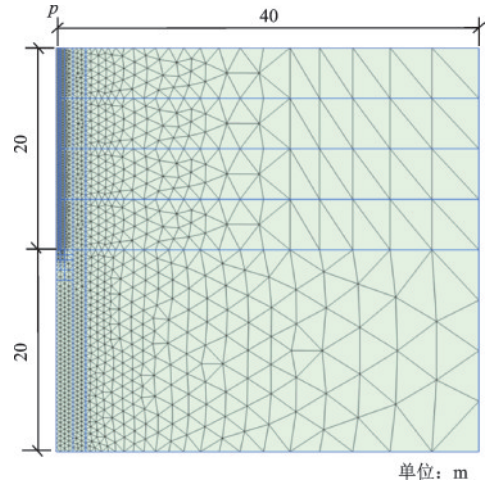


图 1 模型有限元网格

Fig.1 Mesh of FEM model

1.2 力学荷载与温度荷载

桩头均布荷载 $p=1\ 593\text{ kPa}$ 线性施加,加载时间为 30 d,待地基土固结稳定后对能量桩桩身施加热源荷载 Q 。

为反映桩身冷-热温度荷载的不平衡程度,本文定义指标“热聚集度 ρ ”为:

$$\rho = \frac{Q_{\text{放}}}{Q_{\text{吸}}} \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{放}}$ 和 $Q_{\text{吸}}$ 分别是热源荷载一时间曲线中放热和吸热部分图形的面积。

$\rho=1$ 时桩的放热与吸热相同,此时桩承受冷-热平衡的温度荷载; $\rho>1$ 时桩冷-热不平衡,桩的放热超过吸热而使桩和地基土的温度升高,本文称之为“热聚集温度荷载”; $\rho<1$ 时冷-热也不平衡,桩的放热小于吸热。

本文研究力学+热聚集温度荷载下能量桩的长期(10年)热-力学响应。选用四个不同热聚集度的温度荷载工况,各工况桩身热源荷载 $Q(\text{W}/\text{m})$ 的表达式为:

$$\rho = +\infty: Q_1 = -22.5\sin\left(\frac{\pi t}{180} + \pi\right) + 22.5\left|\sin\left(\frac{\pi t}{180}\right)\right| \quad (2)$$

$$\rho = 4: Q_2 = -28.125\sin\left(\frac{\pi t}{180} + \pi\right) + 16.785\left|\sin\left(\frac{\pi t}{180}\right)\right| \quad (3)$$

$$\rho=2: Q_3 = -33.75 \sin\left(\frac{\pi t}{180} + \pi\right) + 11.25 \left| \sin\left(\frac{\pi t}{180}\right) \right| \quad (4)$$

$$\rho=1: Q_4 = -45 \sin\left(\frac{\pi t}{180} + \pi\right) \quad (5)$$

图2为四种不同热聚集度的热源荷载第一年内(360 d)随时间变化曲线。 $\rho=+\infty$ 时能量桩在180 d内放热-恢复; $\rho=4$ 时能量桩在180 d内放热-恢复,180~360 d内吸热-恢复,放热量是吸热量的4倍; $\rho=2$ 时同样在180 d内放热-恢复,180~360 d内吸热-恢复,但放热量是吸热量的2倍; $\rho=1$ 时能量桩承受冷-热平衡的温度荷载。4个工况下0~180 d内热源荷载相同。除 $\rho=+\infty$ 工况外,180~360 d内各工况达到最大吸热荷载的时间相同,都是270 d。

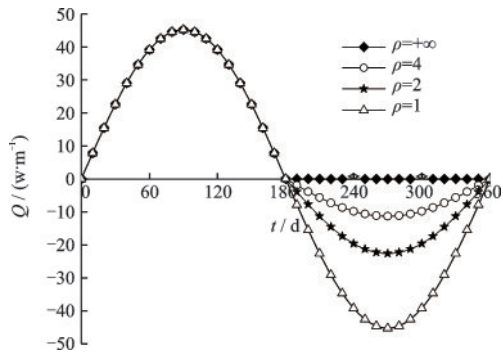


图2 第一个热循环中的 $Q-t$ 曲线

Fig.2 $Q-t$ curves in the first thermal cycle

1.3 有限元模型验证

M. Adinolfi等^[21]采用轴对称T-H-M三场耦合有限元方法分析了意大利一端承能量桩的热-力学特性。桩直径为0.8 m,桩长为11.4 m。上层火成碎屑土(Pyroclastic soil)厚3.55 m,下层为凝灰岩。地下水位在地表以下3.55 m处。筏板自重引起的均布力学荷载为17 kPa,桩头力学荷载为1 000 kN。桩和地基土的初始温度为16.9℃。桩采用热弹性模型,地基土采用Drucker-Prager弹塑性模型,桩-土完全接触,温度荷载考虑了三种模式。采用本文方法建立轴对称T-H-M三场耦合有限元模型分析该能量桩,取文献[21]中的第二种温度荷载模式,即400 d内桩受到从10℃到28℃的一个冷-热不平衡循环热荷载。桩头的力学荷载、桩和地基土的本构模型及模型参数、模型几何尺寸、力学、孔压和热学边界条件以及桩-土接触条件均与文献[21]相同。

计算获得的温度荷载引起的桩头附加竖向位移时程线和 $t=8\ 748$ h时刻桩身温度变化分布曲线与M. Adinolfi等^[21]计算结果的比较如图3所示。图3(a)中正值位移表示桩头隆起,负值位移表示桩头沉降。这两幅图表明,本文有限元计算的桩头附加位移和桩身温度变化与M. Adinolfi等^[21]计算结果较为一致,说明按本文方法建立的T-H-M三场有限元分析模型具有较高的计算精度,可以用来模拟饱和黏土地基中能量桩的热-力学特性。

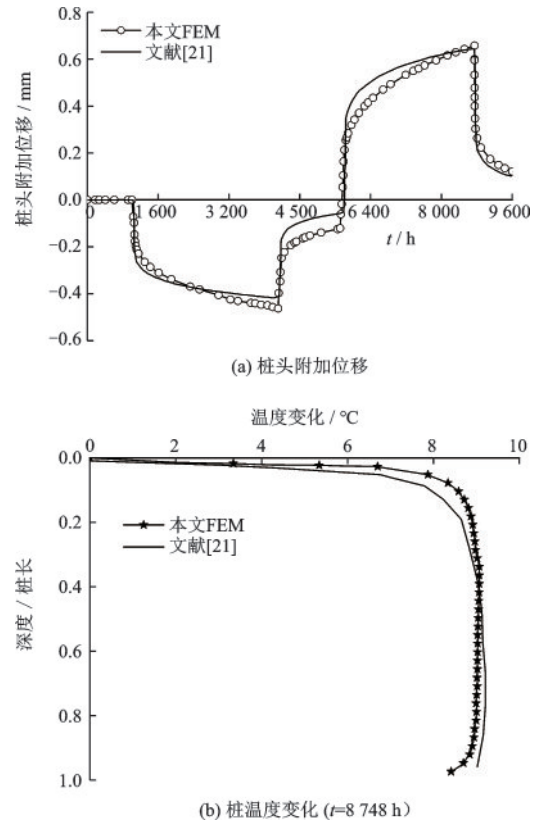


图3 不同数值分析结果的比较

Fig.3 Comparisons of different numerical results by FEM

2 热聚集温度荷载下能量桩长期热-力学特性

2.1 能量桩热-力学响应

图4给出力学荷载+不同热聚集度的温度荷载下桩头以下 $z=10$ m深度处桩身温度随冷-热循环次数 N 变化曲线。考虑10年温度荷载循环,即 $N=10$ 。该图表明,冷-热平衡温度荷载($\rho=1$)下桩身最高和最低温度不随 N 而变化。热聚集温度荷载($\rho>1$)下桩身温度随冷-热循环次数 N 的增加周期

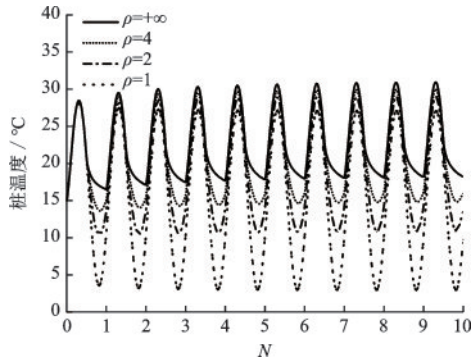


图4 桩身温度随温度循环变化曲线($z=10$ m)

Fig.4 Pile temperatures versus number of thermal cycles($z=10$ m)

性变化,桩的最高和最低温度随冷-热循环的增加而增大,变化主要在前5个周期完成,增大的幅度取决于热聚集度的数值。 $\rho=2,4$ 和 $+\infty$ 情况下 $N=10$ 时 $z=10$ m处桩的最高温度分别为28.5、30.0、31.0 °C,最低温度分别为10.5、14.4、18.2 °C。可见,热聚集度数值越大,桩身温度越高,随冷-热循环升温幅度也越大。与 $N=1$ 时数值相比, $\rho=2,4$ 和 $+\infty$ 情况下 $N=10$ 时最高温度分别增加了0.5、1.5、2.5 °C。

图5给出力学荷载+不同热聚集度温度荷载作用下桩顶沉降随冷-热循环变化曲线, $N=0$ 表示纯力学荷载作用。由图5可知,仅有力学荷载作用时桩顶沉降为6.86 mm,桩顶沉降随冷-热循环呈现周期性变化。表2给出不同热聚集度情况下 $N=1,5$ 和10时桩头最大沉降值。从图5和表2可知,当冷-热平衡时($\rho=1$),随着冷-热循环次数的增加桩顶沉降逐渐累积: $N=1$ 时桩头最大沉降为8.40 mm, $N=10$ 时桩头最大沉降为8.59 mm,沉降累积主要发生在前5个冷-热循环中。

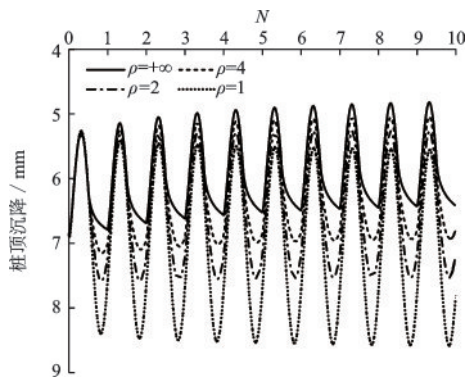


图5 桩头沉降随温度荷载循环变化曲线

Fig.5 Pile head settlements versus number of thermal cycles

表2 桩头最大沉降
Table 2 Maximum pile head settlement

单位: mm				
N	$\rho=1$	$\rho=2$	$\rho=4$	$\rho=+\infty$
1	8.40	7.58	7.15	6.86
5	8.55	7.54	6.99	6.50
10	8.59	7.53	6.93	6.41

若冷-热不平衡($\rho>1$),则桩头沉降不再累积,而是随冷-热循环次数的增加而逐渐减小,热聚集度数值越大,桩头最大沉降越小,随冷-热循环降低的幅度越大。 $\rho=2,4$ 和 $+\infty$ 情况下 $N=1$ 时桩顶最大沉降分别为7.58、7.15、6.86 mm, $N=10$ 时桩顶最大沉降分别减小至7.53、6.93、6.41 mm,分别减小了0.66%、3.07%和6.56%。 $\rho=+\infty$ 时桩头沉降为6.41 mm,小于力学荷载下的数值6.86 mm,此时桩头隆起了0.45 mm。

图6给出力学荷载+不同热聚集度温度荷载下桩头以下10 m处桩身轴向压应力随着冷-热循环变化曲线,负值表示压应力。图6表明,力学荷载作用下桩头以下10 m处桩的轴向压应力为995 kPa。随着冷-热循环的增加桩身轴向应力呈周期性变化,由于桩为热弹性材料,不同热荷载工况下桩身应力值受温度荷载循环影响较小,但受热聚集度的影响较大。虽然各工况热聚集度不同,但在任一冷-热循环中前半个循环桩都受到相同的温度荷载,故各工况10 m深度处桩身最大压应力相同,数值均为1 539 kPa。不同工况的热聚集度不同,导致10 m深度处桩身最小压应力不同。 $N=10$ 时 $\rho=1,2,4$ 和 $+\infty$ 情况下最小压应力分别为479、757、888、1 017 kPa,可见随着热聚集度的增加 $z=10$ m处桩身最小压应力逐渐增大。由于桩的热弹性性质,冷-热平衡($\rho=1$)时温度荷载引起的桩身附加轴向

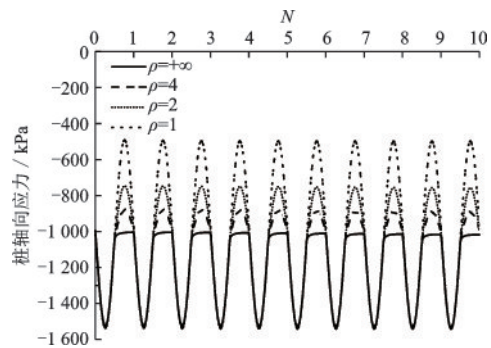


图6 轴向应力随温度荷载循环变化曲线($z=10$ m)

Fig.6 Pile axial stresses versus number of thermal cycles ($z=10$ m)

拉、压应力数值近乎相同。 $\rho=+\infty$ 时桩并不吸热, $z=10\text{ m}$ 处桩身最小压应力为1 017 kPa,接近纯力学荷载下的数值。

图7为力学荷载+不同热聚集度温度荷载作用下 $N=10$ 中最大放热时刻($t=3\ 330\text{ d}$)和最大吸热时刻($t=3\ 510\text{ d}$)桩身轴向应力沿桩长分布曲线,图中“P”表示纯力学荷载作用。从图7(a)可以看出,纯力学荷载单独作用时桩身轴向压应力沿桩身近乎线性变化,桩顶部轴向压应力最大,桩底部最小。由于不同热聚集度工况下桩身经历相同放热过程,故最大放热时刻桩身压应力数值与热聚集度无关,此时桩身压应力沿桩长呈两头小中间大的抛物线分布,数值大于纯力学荷载下的轴向压应力,最大压应力点在桩头以下约5.22 m深度处。图7(b)表明,最大吸热时刻桩身压应力呈桩头大桩端小的分布特征,轴向压应力的数值与温度荷载的热聚集度有关。随着热聚集度的减小,桩身压应力逐渐减小。对于 $\rho=+\infty$ 工况,此时桩的温度已恢复到其初始温度,桩身压应力与纯作用力学荷载时的数值几乎相同。冷-热温度荷载平衡($\rho=1$)时桩身压应力最小,近似抛物线分布。

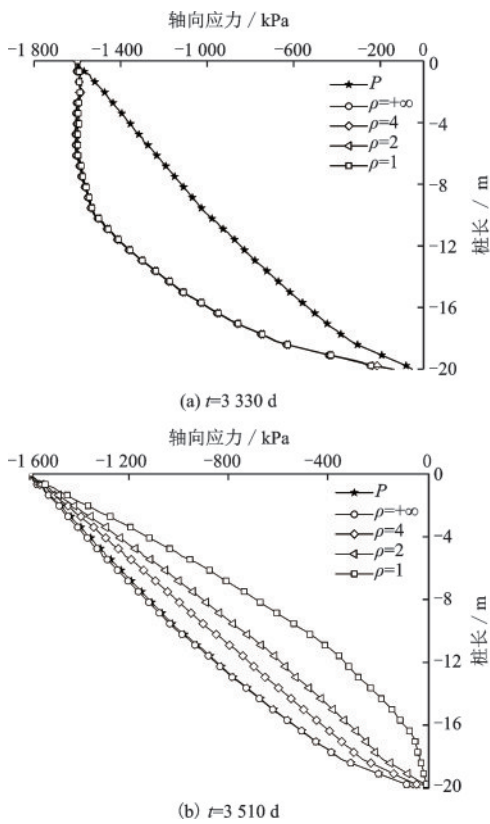


图7 桩轴向应力沿桩长分布曲线
Fig.7 Axial stress distribution along pile

2.2 地基土热-力学响应

图8给出力学荷载+热聚集温度荷载($\rho>1$)下 $z=10\text{ m}$ 深度且距桩中心线 $R=2D$ 处地基土的温度随冷-热循环的变化曲线, $N=0$ 给出地基土初始温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 。图9给出不同热聚集度温度荷载下 $N=10$ 中放热结束时($t=3\ 420\text{ d}$) $z=10\text{ m}$ 深度处地基土温度变化 ΔT 径向分布曲线。由图8可知,在热聚集温度荷载($\rho>1$)作用下,地基土的温度随冷-热循环的增加呈周期性变化,最高和最低温度随冷-热循环逐渐增大,温升幅度与温度荷载的热聚集度有关。 $N=1$ 时,三种热聚集度下该点地基土最高温度都为 $18.4\text{ }^\circ\text{C}$, $N=10$ 时 $\rho=2, 4$ 和 $+\infty$ 工况下该点地基土最高温度分别为 $19, 19.8, 20.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。 $\rho=2$ 和 $\rho=+\infty$ 时该点地基土平均温升分别为 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $2.2\text{ }^\circ\text{C}$, $\rho=+\infty$ 时出现了明显的热聚集现象,这种热聚集现象主要发生在前5个荷载循环内。温度荷载的热聚集度越大,地基土温度升高越显著。如果受到冷-热平衡温度荷载循环作用,地基土接收和放出的热能相等,不会产生热聚集现象。此外,地基土达到峰值温度的时间与桩身最高温度的时间并不

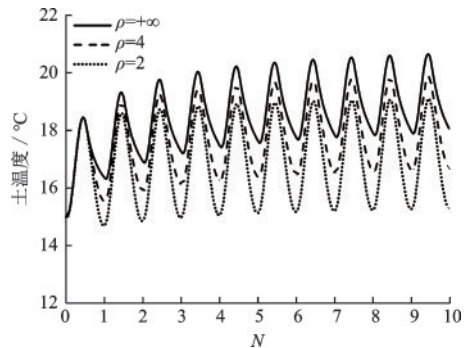


图8 地基土温度随温度荷载循环变化曲线
Fig.8 Soil temperature versus number of thermal cycles

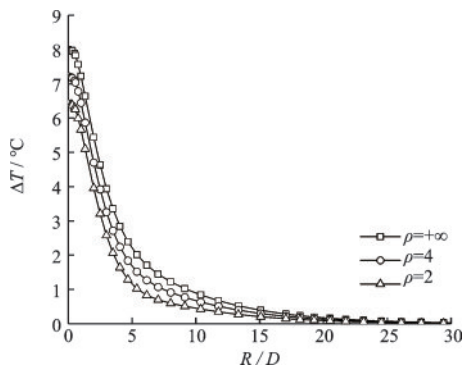


图9 地基土温度变化径向分布曲线($z=10\text{ m}$)
Fig.9 Radial distribution of soil temperature change($z=10\text{ m}$)

同步,呈现明显的滞后现象,如该点滞后约50 d。计算发现,这种滞后与热聚集度关系不大。图9表明,地基土的温度变化随距桩中心线距离的增加而逐渐减小, $N=10$ 时温度变化的径向影响距离约 $R=25\text{ m}\approx 31D$,这个范围以外地基土的温度没有变化。

图10给出不同热聚集度温度荷载在 $z=10\text{ m}$ 且距桩中心线 $R=2D$ 处地基土中引起的超静孔隙水压力随冷-热循环变化曲线。从图10中可见:(1)桩周地基土升温时产生正的超静孔压,降温产生负的超静孔压,这与H.M.Abu-el-Naga等^[22]研究的结果一致。(2)不同热聚集度的温度荷载在地基土中引起的超静孔隙水压力随冷-热循环周期性地变化,各工况下超静孔压的数值都很小,只有约 $-1.5\sim 2.7\text{ kPa}$ 。(3)冷-热平衡($\rho=1$)时正、负孔压的幅值近乎相等,这与D.Wu等^[16]能量桩室内模型试验的结果较为一致。正、负孔压的幅值约为 2.7 kPa 。 $\rho>1$ 时随着冷-热循环的增加,桩周土中正孔压峰值的数值逐渐减小,负孔压峰值的数值逐渐增大。 $N=1$ 时 $\rho=2,4$ 和 $+\infty$ 工况下的正孔压峰值与 $\rho=1$ 时相同,均为 2.7 kPa , $\rho=2$ 和 $\rho=4$ 工况下负孔压峰值分别为 -0.94 kPa 和 -0.27 kPa 。 $\rho=+\infty$ 时前三个温度荷载循环中最小孔压都是正孔压, $N=1$ 时最小孔压为 0.29 kPa 。 $N=10$ 时 $\rho=2,4$ 和 $+\infty$ 工况下正孔压峰值的数值分别为 $2.2,2.1,2.0\text{ kPa}$,负孔压峰值的数值分别为 $-1.5,-1.0,-0.5\text{ kPa}$ 。计算表明,冷-热平衡温度荷载引起的峰值孔压最大。温度荷载的热聚集度对孔压的影响较大, ρ 越大,长期冷-热循环引起的负孔压峰值的数值越小。

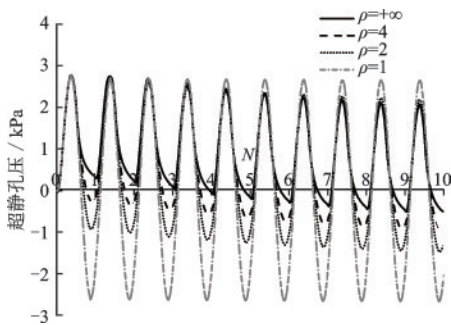


图10 超静孔压力随温度循环变化曲线

Fig.10 Excess pore water pressures versus number of thermal cycles

3 结 论

本文通过T-H-M三场耦合有限元模拟方法,研

究了力学荷载+冷-热不平衡的温度荷载下饱和黏土地基中能量桩的长期热-力学特性。主要结论如下:

(1) 力学荷载+冷-热平衡温度荷载下地基土的平均温度不变。随着冷-热循环的增加,桩头沉降逐渐累积。升温荷载引起的桩身附加压应力与降温荷载引起附加拉应力幅值相同,桩身应力幅值不随冷-热循环而变化。

(2) 力学荷载+热聚集温度荷载($\rho>1$)作用下桩身温度随冷-热循环的增加而升高。热聚集度数值越大,桩身温度越高。

(3) 力学荷载+热聚集温度荷载($\rho>1$)作用下桩头沉降不再累积。它随冷-热循环的增加而逐渐减小,热聚集度数值越大,桩头沉降越小甚至会发生隆起。

(4) 力学荷载+热聚集温度荷载($\rho>1$)作用下桩身最小压应力的数值主要取决于温度荷载的热聚集度,它不随冷-热循环而变化。温度荷载的热聚集度越大,桩身最小压应力数值越大。最大压应力的数值不受聚集度的影响。

(5) 力学荷载+热聚集温度荷载($\rho>1$)作用下桩周土产生热聚集。温度荷载的热聚集度越大,桩周土热聚集越显著。

(6) 不同热聚集度温度循环荷载在桩周土中引起的超静孔隙水压力数值较小,在本文计算条件下其数值在 $-1.7\sim 2.7\text{ kPa}$ 。温度荷载的热聚集度对正的峰值孔压的影响相对较小,热聚集度越大,长期冷-热循环后负的峰值孔压数值越小。

参考文献:

- [1] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56 (2) : 81-122.
- [2] Moel M D, Bach P M, Bouazza A, et al. Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14 (9) : 2683-2696.
- [3] 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 H L, Kong G Q, Wu H W. Applications of energy piles and technical development of PCC energy piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 2014, 36(1): 176-181. (in Chinese)
- [4] 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 Geomechanics*, 2005, 30(8): 763-781.
- [5] 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.
- [6] 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-situ test for structural responses of energy pile to heat exchanging process [J]. *Chinese Journal of Engineering Geotechnical*, 2014, 36(6): 1087-1094. (in Chinese)
- [7] 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-situ tests and thermo-mechanical bearing characteristics of friction geothermal energy piles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(2): 334-342. (in Chinese)
- [8] 陈智,高华雨,肖衡林,等. 温度荷载作用下灌注型能量桩热力响应原位试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(4): 592-598.
Chen Z, Gao H Y, Xiao H L, et al. In-situ thermo-mechanical response test of perfusion energy pile under temperature loading [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(4): 592-598. (in Chinese)
- [9] Faizal M, Bouazza A, McCartney J S. Axial and radial thermal responses of energy pile under six-storey residential building [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(7): 1019-1033.
- [10] Stewart M A, McCartney J S. Centrifuge modelling of soil-structure interaction in energy foundations [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(4): 04013044.
- [11] Ng C W W, Shi C, Gunawan A, et al. Centrifuge modelling of energy piles subjected to heating and cooling cycles in clay [J]. *Geotechnique Letters*, 2014, 4(4): 310-316.
- [12] 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.
- [13] 孔纲强,王成龙,刘汉龙,等. 多次温度循环对能量桩桩顶位移影响分析[J]. *岩土力学*, 2017, 38(4): 1-7.
Kong G Q, Wang C L, Liu H L, et al. Analysis of pile head displacement of energy pile under repeated temperature cycling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 1-7. (in Chinese)
- [14] Nguyen V T, Tang A M, Pereira J M. Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile in dry sand [J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(4): 729-737.
- [15] 刘干斌,谢琦峰,范高飞,等. 饱和黏土中热交换桩承载力特性模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(10): 2535-2543.
Liu G B, Xie Q F, Fan G F, et al. Model test on bearing capacity characteristics of heat exchanger piles in saturated clays [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(10): 2535-2543. (in Chinese)
- [16] Wu D, Liu H L, Kong G Q, et al. Thermo-mechanical behavior of energy pile under different climatic conditions [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(5): 1495-1508.
- [17] 郝耀虎,孔纲强,彭怀风,等. 桩端约束对桩身热力学特性影响的模拟分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(4): 532-539.
Hao Y H, Kong G Q, Peng H F, et al. Analysis of thermo-mechanical behavior of single pile influenced by pile tip constraint [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(4): 532-539. (in Chinese)
- [18] 费康,洪伟,钱建,等. 循环温度作用下砂土地基能量桩的长期工作特性[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(4): 525-531.
Fei K, Hong W, Qian J, et al. Long-term performance of energy piles subjected to cyclic thermal loading in sand [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(4): 525-531. (in Chinese)
- [19] Rui Y, Yin M. Investigations of pile-soil interaction under thermo-mechanical loading [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(7): 1016-1028.
- [20] Ng C W W, Ma Q J, Gunawan A. Horizontal stress change of energy piles subjected to thermal cycles in sand [J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 78: 54-61.
- [21] Adinolfi M, Maiorano R M S, Mauro A, et al. On the influence of thermal cycles on the yearly performance of an energy pile [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2018, 16: 32-44.
- [22] Aburl-Naga H M, Bergado D T, Bouzza A. Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay [J]. *Engineering Geology*, 2007, 89(1): 144-154.

(本文责编:池营营)