

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.070



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



季节性冻土区能量桩位移变化规律

彭宸, 王成龙, 丁选明, 陈志雄

(重庆大学土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 能量桩是一种既可以与土体进行能量交换, 又可以承担上部荷载的桩基形式。上部土层冻结, 下部土层未冻结, 由温度变化引起的桩体自身变形及土体的冻胀融沉引发的桩体位移是能量桩在季节性冻土地区推广中亟待解决的主要问题。针对季节性冻土地区土体温度分布特点, 将土体分为冻结层和非冻结层分别开展模型试验, 测得冻结层和非冻结层中能量桩多次温度循环后的桩-土温度分布、桩周土体孔隙水压力及桩体位移的变化规律。结果表明: 在非冻结土层中, 多次循环取热后桩顶会产生不可逆的沉降位移, 5 次取热循环后, 桩顶沉降达到 $0.95\% D$ (D 为桩体直径), 且桩体沉降未达到稳定; 在冻结层, 放热过程中能量桩会发生桩体融沉现象, 恢复过程中会发生桩体冻胀现象, 融沉导致的沉降位移随着循环次数的增加逐渐减小, 在第 3 轮放热循环后消失。第 1、2、3 轮的融沉位移分别为 $5.9\% D$ 、 $0.93\% D$ 、 $0.11\% D$ 。每轮循环过程中, 冻胀引起的上升位移虽逐轮减小, 但在 5 轮循环之后依旧存在, 且冻胀引发的总位移呈阶梯状上升, 桩体最终产生上升位移, 达到 $3.8\% D$ 。

关键词: 桩基; 能量桩; 季节性冻土; 模型试验; 沉降变形

中图分类号: TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)02-0065-09

Displacement characteristics of energy piles in seasonally frozen regions

PENG Chen, WANG Chenglong, DING Xuanming, CHEN Zhixiong

(College of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Energy pile is a type of structure which can not only exchange energy with soil, but also bear the upper loading. In the seasonal frozen soil area, the upper soil layer would be frozen, and the soil in the lower part would not. The thawing settlement, frosting heave and self-deformation of the pile caused by temperature

收稿日期: 2022-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(51908087); 重庆市“博士后创新人才支持计划”(CQBX201903); 中央高校基本科研业务费(2021CDJQY-042); 中国博士后科学基金(2019M663439)

作者简介: 彭宸(1998-), 男, 主要从事能量桩-土相互作用研究, E-mail: cqupcc@163.com。

王成龙(通信作者), 男, 副教授, E-mail: wangclong@cqu.edu.cn。

Received: 2022-01-12

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51908087); Chongqing Postdoctoral Innovative Talents Support Program (No. CQBX201903); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2021CDJQY-042); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2019M663439)

Author brief: PENG Chen (1998-), main research interest: energy pile-soil interaction, E-mail: cqupcc@163.com.

WANG Chenglong (corresponding author), associate professor, E-mail: wangclong@cqu.edu.cn.

variation are the main problems to be solved for application of energy piles in this area. According to the distribution characteristics of ground temperature in seasonal frozen soil areas, the soil was divided into frozen layer and non-frozen layer, and the model tests were carried out respectively. The pile and soil temperature distribution, pore water pressure of the soil surrounding the pile and pile displacement after multiple temperature cycles in frozen and non-frozen layers were measured. The results show that irreversible settlement of the pile top would occur after multiple cycles of heat extraction in the non-frozen soil area. After 5 cycles of heat extraction, the settlement of the pile top reached $0.95\%D$ (D is the diameter of the pile), while the settlement of the pile would not reach stable state. In the frozen layer, thawing settlement of the pile would occur in the heat injection process, and frosting heave of the pile would occur in the recovery process. The settlement caused by thawing gradually decreased with increase of thermal cycles, and disappeared after the 3rd heat injection cycle. The thawing settlement of the pile after the 1st, 2nd and 3rd heat injection reached $5.9\%D$, $0.93\%D$ and $0.11\%D$, respectively. During each cycle, although the rising displacement caused by frosting heave decreased in each following cycle, it still existed after 5 cycles, and the displacement caused by frosting heaving rose is of a ladder shape. The pile heave was produced in the end and reached $3.8\%D$.

Keywords: pile foundation; energy pile; seasonally frozen regions; model test; displacement

中国国土面积辽阔,跨度大,冻土分布广泛,尤其是季节性冻土区,约占国土面积的53.5%^[1]。而中国北方地区气候寒冷,季节性冻土区较为普遍,对供暖的需求较大,在建筑能耗中所占的比例最高可达36%^[2]。由于取暖方式单一,主要靠烧煤,焚烧秸秆等低效能、高排污的方式,这是导致中国北方冬季雾霾天气的主要原因之一^[3]。能量桩技术是将建筑桩基技术与地源热泵技术相结合,将换热管直接埋设在建筑物混凝土桩基中,通过热交换液,利用土体温度和冬夏两季较大的反向温差,实现土体与上部建筑的热交换,获取地热能,可以有效降低北方地区的建筑能耗。

近年来,学者们针对能量桩-土的热力学特性,已经开展了一系列研究^[4-7],结果表明,温度变化会引起桩体内部应力及桩顶位移的变化。桂树强等^[8]、路宏伟等^[9]、You等^[10]和Fang等^[11]开展了能量桩现场试验,针对温度荷载和外部荷载作用下桩基的热力学响应进行了系统的分析,揭示了桩体内部热应力、桩侧摩阻力的分布规律及桩顶位移的变化规律。王成龙等^[12-13]、Liu等^[14]开展了砂土中能量桩的传热特性和承载机理室内模型试验,进行了不同埋管形式、不同外部荷载、不同冷热循环次数的影响分析。McCartney等^[15]、Stewart等^[16]开展了粉土中能量桩-土热力学特性的离心机模型试验,研究了粉土中温度对桩体极限承载力的影响,进一步分析了多次冷热循环下桩-土的热力学响应,结果表明,随着冷热循环次数的增加,桩周土体刚度发生

了变化,桩体内部应力有一定程度的增加。Wu等^[17]、Ng等^[18]和刘干斌等^[19]开展了饱和黏土中能量桩的荷载传递特性和沉降机理研究,重点分析了多次冷热循环下桩顶位移的变化规律,结果表明,随着循环次数的增加,桩顶产生了不可恢复的沉降位移。

目前对能量桩的研究很少考虑冻土的影响,尤其是冬季季节性冻土地区土体温度与外部环境温差较大,地热能源丰富^[20-22]。但冻土力学性质对温度变化更为敏感,实际工作过程中,相较于上部冻土层,热交换液温度较高,会不断与周围土体进行热交换,融化土层变软,产生沉陷,进一步引起桩体沉降,极限承载力降低,导致结构破坏。另外,由于季节变化及热交换液的长期冷热交替作用,引起土体冻融循环,弱化了土体的结构性,对上部结构造成较大安全隐患^[23-26]。目前,针对季节性冻土中能量桩热力学特性的研究较少,中国鲜有报道。最新研究中,Snoeren^[27]基于理想化数值模型分析了冻融循环下端承型能量桩的传热特性和承载特性,研究表明,在工作过程中,土体冻融循环主要发生在能量桩桩周。冻融循环主要影响黏土的黏聚力,使桩侧摩阻力减小,影响桩基承载力,在冻土融化过程中,对桩体产生负摩阻力,给桩基的正常使用带来风险。该数值模型针对冻土的传热方程和冻胀融沉模型进行了简化,但研究缺乏相应的模型试验,不能反映真实情况下能量桩的温度变化和变形。笔者基于室内模型试验进行季节性冻土中能量桩

位移变化规律研究,针对冻结土层和非冻结土层,进行多次冷热循环下能量桩的传热和位移变化分析。

1 模型试验概况

1.1 试验土体

试验选用土体为饱和黏土,物理力学参数如表1所示。将预先干燥后的黏土与水进行混合制得泥浆(含水量达到1.5倍液限)^[17, 28],泥浆达到设计高

度后,通过砝码和加载板分5级对土体表面施加荷载,每级荷载分别为1、2.5、4、5.5、7 kPa,间隔24 h;最后一级荷载加载过程中,在土体表面安装百分表,记录土体表面沉降量;施加最后一级荷载至沉降稳定后(约72 h后),卸去表面荷载,土体制备完成,在土体表面覆盖一层塑料膜,防止土体水分散失,根据《土工试验规程》对土体的物理参数进行测定,并采用KD2 pro热分析仪测量试验土体热学参数。

表1 模型试验黏土的物理参数

Table 1 Physical parameters of clay in model tests

密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	颗粒比重	含水率/%	饱和度/%	塑限/%	液限/%	土体比热/ ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
2.02	2.76	25.7	98.8	19.3	33.8	1 370	1.61	0.5×10^{-6}

1.2 模型桩

模型试验桩包括参照桩和能量桩,模型桩由空心钢管组成,桩体外径为20 mm(D),桩体内径为18 mm,桩长为300 mm(L_0),如图1所示。在钢管内部空腔填充环氧树脂,桩体在模型槽中的有效长度为235 mm(L),钢材弹性模量 $E_1=193$ GPa,环氧树脂弹性模量 $E_2=3$ GPa,经自由热膨胀试验得到桩体热膨胀系数为 $18\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。在能量桩空腔内埋置U型传热铜管,热交换管外径为3 mm,内径为2 mm。



图1 模型桩

Fig. 1 Model pile

1.3 试验模型槽

模型试验布置示意图如图2所示。模型槽内部尺寸为400 mm(长) \times 300 mm(宽) \times 400 mm(高),槽四周和底部采用隔热保温处理,侧面设有排水孔,便于土体固结排水。为防止泥沙漏出,在设有排水孔的两侧面粘贴土工布。桩底与槽底部距离

为115 mm(5.8 D)。槽中分别放置孔压计(K1~K4)和温度传感器(S1~S7),孔压计位于距离土体表面25、105、185 mm的3层土体中,在水平方向,孔压计K1~K3位于距离桩轴线1倍桩径处,K4位于距离桩轴线2倍桩径处。温度传感器位于距离土体表面25、105、185 mm的3层土体中,在水平方向,温度传感器S1~S3位于距离桩体1倍桩径处,S4~S6位于距离桩体2倍桩径处,S7位于距离桩体3倍桩径处。在试验桩外壁不同高度处各对称安置6个温度传感器(T1~T6)。温度传感器采用PT100型热电阻,测量精度为0.1 $^\circ\text{C}$,形状为直径3 mm、长度20 mm的圆柱体。孔压计采用微型压阻式孔隙水压力计,测量精度为0.25级,形状为直径5 mm、长度15 mm的圆柱体。在参照桩和能量桩桩顶安置电子式千分表来测量桩顶位移,其精度为0.001 mm。

1.4 试验装置

采用小型高低温交变试验箱,温度控制范围可达 $-40\sim 100$ $^\circ\text{C}$,用于控制环境温度,冻结土体。采用保温水箱和温控水循环装置,完成水速及水温的自动控制,土体外部的热交换管采用保温隔热处理。利用数据采集仪,完成对数据的自动采集和实时监控,试验系统实物图如图3所示。

1.5 试验设计与实施

在制备好的土样中埋设模型桩和测试仪器。使用直径和长度分别为18、400 mm的薄壁土壤采样器在模型桩所处位置的黏土中钻孔,然后将模型桩竖直插入钻孔至预定深度。埋设温度传感器前,预先将温度传感器用环氧树脂固定到钢钎(直径

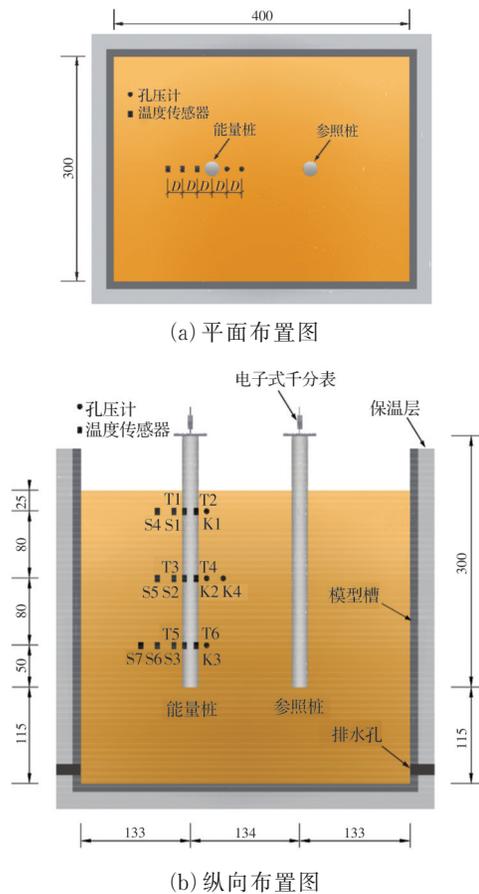


图2 试验布置示意图(单位:mm)

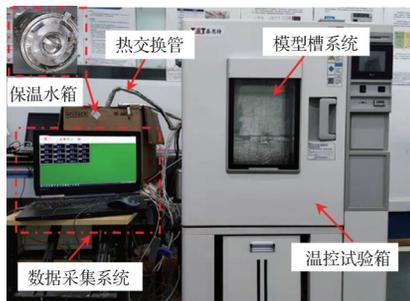
Fig. 2 Schematic diagram of the test arrangement
(Unit: mm)

图3 试验系统实物图

Fig. 3 Physical diagram of the test system

3 mm)上,构成温度传感器序列,随后将钢钎直接插入黏土中,达到设计高度。孔压计的埋设与温度传感器类似。模型桩和测试仪器埋设完成后,将模型槽整体放置于高低温交变试验箱中,桩顶安置电子式千分表。

对于冻结土层,土体温度低于零度,其相变温度区间为 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1],随着距离土体表面距离的减小,冻结层的土体温度逐渐降低,并接近外部环境温度。下部非冻结土层温度可达 $8\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左

右^[21,29-30]。针对冻结土层和非冻结土层分别进行试验研究。在未冻结土中,考虑到冬季外部较低的环境温度,控制水温为 $0\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,而在冻结土中,土体冻融对桩体的沉降影响较大,为研究较高温度下的影响,将入水温度设置为接近室内的温度,即 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑到两组试验入水温度与土体温度的初始温差差别较大,冷热循环时间也有所不同,故试验具体过程为:

首先开展未冻结层试验,即取热试验,保持高低温交变试验箱温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,当土体温度基本不再发生变化后,通过热交换管向桩体内通水240 min,水温控制为 $0\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,水速约为 0.3 L/min ,之后进行自然恢复240 min,随后继续开展冷循环试验,重复5次。

重新填槽,开展冻结土层试验,即放热试验,保持高低温交变试验箱温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,单向冻结,当土体温度基本不再发生变化后,通过热交换管向桩体内通水300 min,水温控制为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,水速约为 0.3 L/min ,之后进行自然恢复600 min,随后继续开展热循环试验,重复5次。

2 试验结果与分析

2.1 桩-土温度变化规律

图4(a)所示为未冻结土层中桩体及桩周土体温度随时间的变化规律。选取底层土体温度进行分析,在未冻结土层中,桩体初始温度为 $14.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,取热时能量桩桩体及周围土体温度下降。各循环过程中,温度变化规律基本一致,可重复性较强。5次循环中,桩体最低温度为 $8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,而距桩中轴线1倍桩径处温度最低为 $10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,距桩中轴线2倍桩径处最低温度为 $10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,距桩中轴线3倍桩径处最低温度为 $11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在距桩中心2倍桩径处,温度变化已经较小,5次循环过程中土体最大温差仅为 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在距桩中心3倍桩径处,5次循环过程中最大温差仅为 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图4(b)所示为冻结层中桩体及桩周土体温度随时间的变化规律。在冻结层中,桩土初始温度为 $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,放热后,桩土温度持续增加,桩体最高温度可达 $9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,土体1倍桩径处最高温度为 $4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,而2倍桩径处最高温度为 $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,3倍桩径处最高温度为 $-0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见,1倍桩径处冻结土体已经开始融化,而2倍和3倍桩径处土体仍处于冻结状态。自然恢复过程中,当土体温度恢复到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,会出现一段温度不随时间变化的稳定阶段,持续时间

约为 270 min,这是由于在恢复过程中是单向冻结,由上至下冻结较慢,而水-冰相变过程中需要释放相变潜热,这一阶段即为水转换成冰释放热量的过程。2倍及3倍桩径的土体温度变化较小,未达到 0℃以上,所以,在恢复过程中同样也未出现温度稳定阶段,且恢复后的温度要略低于1倍桩径处的土体温度。

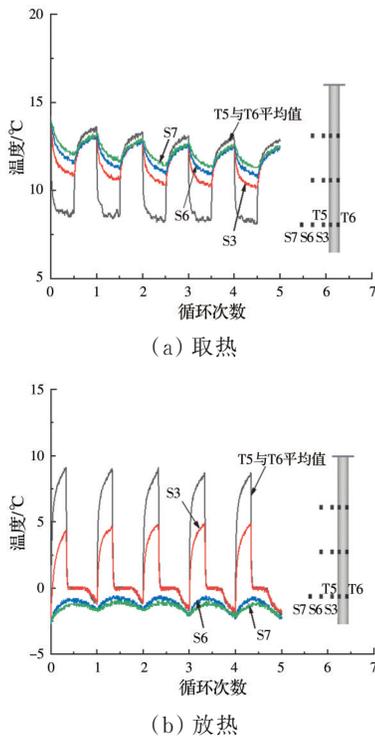


图 4 桩土温度的变化规律
Fig. 4 Measured temperature history of pile and surrounding soil

图 5(a)所示为取热试验后未冻结土层桩体温度沿深度的变化规律。 Z 为土体表面以下深度, L 为桩体有效长度。未冻结土层中,能量桩取热后桩体温度沿深度方向逐渐降低,这是由于外部环境温度高,对上部桩体和土体温度影响较大,能量桩取热后桩体温度分布规律大致相同,但随着循环次数的增加,桩体温度逐渐降低。5次冷热循环结束后,桩体温度明显低于初始温度。

图 5(b)所示为冻结土层放热试验后桩体温度沿深度的变化规律。第 5 次放热后桩体温度最低,而第 3 次放热后桩体温度略高于第 1 次放热后,5 次冷热循环结束后,桩体温度略高于初始温度。

2.2 孔隙水压力变化规律

图 6 所示为在未冻结层中取热时能量桩孔压变化值随时间的变化规律。从图中可以看出,1 倍桩

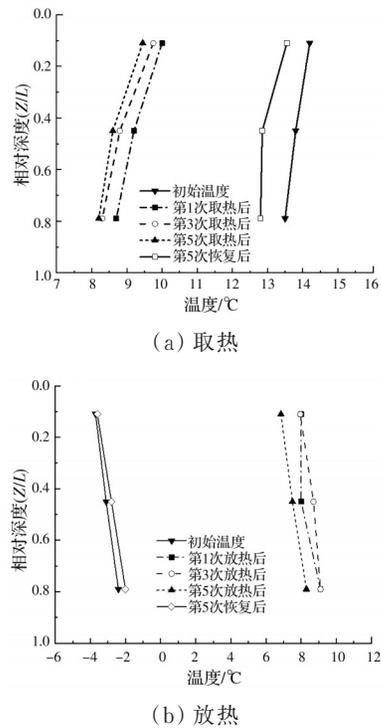


图 5 桩体温度沿深度的变化规律
Fig. 5 Distribution of pile temperature along depth

径处(K1和K3)孔压随温度的降低而降低,随温度的升高而升高。这是由于当土体温度降低时,土体骨架的体积收缩小于水的体积收缩,使土体内产生了负的超静孔隙水压力,在自然恢复过程中,负超静孔隙水压力逐渐消散。由图 6 可知,孔压在 K3 处的变化幅值大于 K1 处,可能由以下两个原因导致: 1) 土体制备过程是由上至下排水,水分分布不均匀,上部土体的饱和度小于下部土体。2) 下部土体的应力水平大于上部土体,孔隙水压力变化更加明显。在能量桩取热试验过程中,孔压计 K2 和 K4 数据采集出现问题,故未在本文中给出 K2 和 K4 处土体孔压变化曲线。

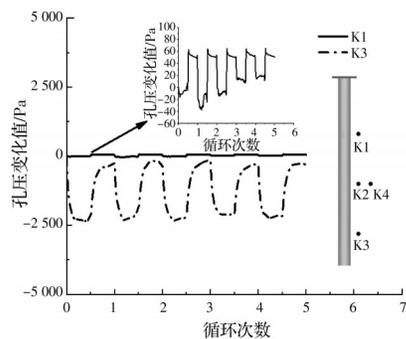


图 6 未冻结层中孔隙水压力随时间的变化规律
Fig.6 Time history of pore water pressure in non-frozen layer

马田田等^[31]的研究结果表明,由于土中盐分、毛细压力等影响,使得土中水的凝固点小于 0°C ,在非极端温度下,冻土中始终有未冻水存在。根据Burt等^[32]和李正^[33]的研究,冻土中的未冻孔隙是相互连通的,冻土可以视为多孔介质材料。试验中土体温度最低为 -3.8°C ,土体中的水未完全凝固,由于未冻水的存在,温度变化会引起孔隙水压力的变化。图7所示为在冻结层中能量桩放热时孔隙水压力随时间的变化规律。由图7可知,在能量桩放热过程中,K1、K2、K3、K4处孔压逐渐减小,在自然恢复过程中孔压逐渐增大。这可能由于冻结状态下水的体积会发生膨胀,达到9%,而土体颗粒不会发生膨胀,因此会引起孔压的增大^[27]。而在放热过程中,孔隙中的冰开始融化,体积缩小,使孔压降低,而恢复过程中恰恰相反。由图7可知,4个孔压计中,K1的孔压变化幅值和随时间变化率最大,K2、K3、K4孔压变化幅值和随时间变化率依次减小。这是因为K1处于土体顶部,温度最低,与外部环境热交换最剧烈,土中冰含量最高,在能量桩放热过程中冰融化较多,引起孔压变化较大,K3处孔压的变化值大于K2的原因是上部土体的饱和度要略低于下部,引起孔压变化较大。这与图6中能量桩取热时的规律差别较大。而K2、K3距离土体顶部较远,温度较K1高,且冻结过程中土中水分会向上迁移,土体含冰量较K1处少,所以孔压变化较小。而K4小于K2、K3的原因是其距离能量桩较远,温度变化小,使得孔压变化较小。

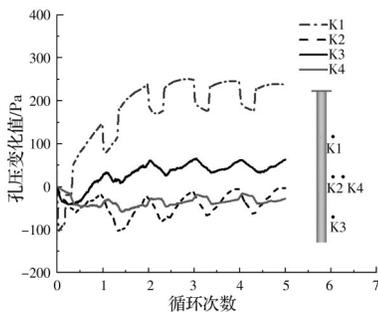


图7 冻结层中孔隙水压力随时间的变化规律

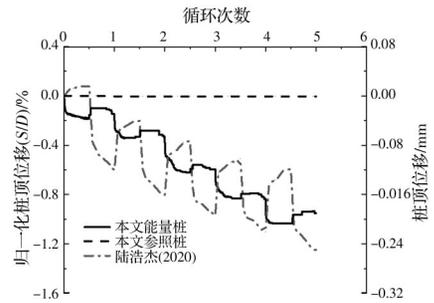
Fig. 7 Time history of pore water pressure in frozen layer

2.3 桩顶位移变化规律

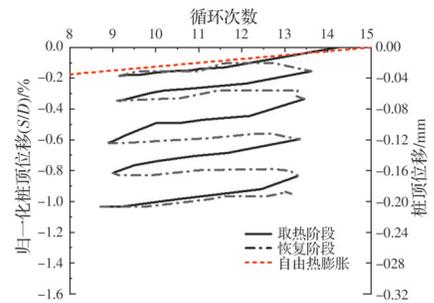
图8(a)所示为未冻结层中桩顶位移随时间的变化规律。由图8(a)可知,取热时能量桩桩顶产生沉降位移,自然恢复时,桩顶产生向上的位移,但不能完全恢复,沉降位移不断积累,5轮循环之后,桩顶共产生累积沉降位移约为 $0.95\%D$ 。陆浩杰^[34]

开展了循环温度荷载作用下能量桩在饱和黏土中的模型试验,其桩体形式同为摩擦桩。相较于陆浩杰^[34]的研究,本文模型试验的外界环境温度保持为恒定。由图8(a)可知,陆浩杰^[34]的研究中桩体沉降规律与本文基本一致,5轮循环后,桩顶累积沉降达到 $1.15\%D$,大于本试验中累积沉降位移,这是由于陆浩杰^[34]的模型试验中桩体温度变化较大,并且其桩体顶部施加了工作荷载,进一步增大了桩体沉降。由图8(a)可知,参照桩位移值很小,可基本忽略,即能量桩的位移值是由温度变化所致。

图8(b)所示为未冻结层中能量桩桩顶位移随温度的变化规律。由图8(b)可知,桩顶沉降位移随循环次数的增加逐渐累积,与根据自由热膨胀系数计算得出的桩自由热膨胀曲线进行对比,结果表明,在温度荷载下,能量桩产生的位移略大于桩体自由热膨胀产生的位移,与Ng等^[18]的研究结果一致。这可能是由于温度变化引起的土体固结或体积收缩所致。



(a) 桩顶位移随时间的变化规律



(b) 桩顶位移随温度的变化规律

图8 未冻结层中桩顶位移的变化规律

Fig.8 Variation of pile head displacement in non-frozen layer

图9(a)所示为冻结层中能量桩桩顶位移随时间的变化规律。在冻结层中,桩体位移变化较为复杂,在放热过程中,桩顶位移先上升后沉降,这是由于桩体温度上升引发桩体热膨胀,导致桩体产生上升位移,而后由于冻土中冰发生融化,使桩体发生

融沉现象。每一轮的融沉位移逐轮减小,第 1 轮融沉导致的沉降位移达到 $5.9\%D$,第 2 轮和第 3 轮融沉沉降分别为 $0.93\%D$ 和 $0.11\%D$,第 4 轮消失。自然恢复过程中,桩体首先发生沉降,随后桩体位移呈阶梯状上升。这是由于在开始恢复时,桩体温度降低引发桩体收缩,导致沉降发生,随后由于土体中的水转换为冰,引发冻胀现象,使桩体被挤出。在每轮循环中,和融沉现象相似,冻胀引发的位移也逐轮减小,第 1 轮恢复过程中产生的冻胀位移为 $2.8\%D$,第 2、第 3、第 4、第 5 轮产生的冻胀位移分别为 $1.96\%D$ 、 $1.53\%D$ 、 $1.04\%D$ 、 $0.9\%D$,但 5 轮循环之后冻胀位移并未消失,这是因为桩顶未施加外部荷载,上部约束较弱,使冻胀现象持续发生。恢复过程中桩体冻胀位移呈阶梯状上升,原因可能是由于土体中水分含量的差别引起土体热传递系数的不同,桩周土中水冻结成冰的过程为由上至下不均匀的冻结过程,导致桩体出现阶梯状的冻胀位移。桩体最终产生向上的位移,达到了 $3.8\%D$ 。由图 9(a)可知,在放热试验中,参照桩未发生位移,可忽略其他因素对试验造成的影响。图 9(b)所示为冻结层中能量桩桩顶位移随温度的变化规律。冻胀和融沉引起的位移明显变化点都已在图中作出标注。由图 9(b)可知,放热过程中,第 1 轮的桩体明

显融沉现象发生在桩体温度约为 $4.3\text{ }^\circ\text{C}$ 时,随后两轮融沉引起的桩体位移明显变化点温度逐渐升高,第 2 轮约为 $7.5\text{ }^\circ\text{C}$,第 3 轮约为 $7.9\text{ }^\circ\text{C}$,随后的循环中融沉现象不显著。在温度恢复过程中,出现了明显的冻胀现象,5 轮循环中桩体的明显冻胀现象发生温度都在 $-0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,这与土体温度相变温度区间 $-1\sim 0\text{ }^\circ\text{C}$ 一致,且冻胀位移随温度的变化幅度逐渐减小。

图 10 所示为循环过程中能量桩位移累计变化曲线。非冻结层中,每轮循环后能量桩的沉降位移都逐渐增加,但增加速度逐渐变缓,表明能量桩的位移正在逐渐达到稳定。在冻结层中,第 1 轮循环表现为土体融沉引起的桩体沉降,后 4 轮循环都为冻胀引起的桩体上升位移,且位移累积速率基本不变。冻结层中能量桩工作时的位移累积速率显著大于非冻结层,说明冻融引起的能量桩安全问题不可忽视。

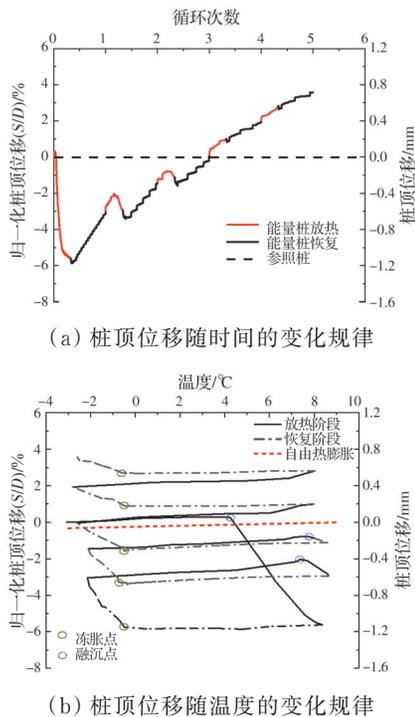


图 9 冻结层中桩顶位移的变化规律
Fig. 9 Variation of pile head displacement in frozen layer

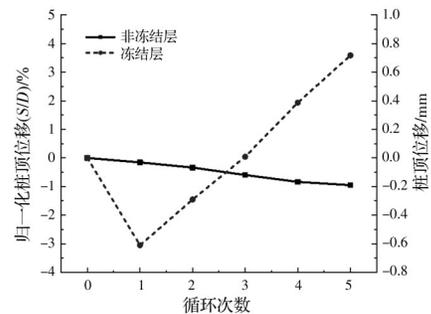


图 10 循环过程中能量桩位移累积的变化规律
Fig. 10 Accumulation displacement of energy piles in each cycle

3 结论

基于室内模型试验,对季节性冻土地区能量桩的位移变化规律进行研究,得到以下结论:

1) 季节性冻土中,取热(放热)过程中能量桩桩体及桩周土体温度随之下降(上升),每轮循环温度变化规律基本一致。在 1 倍桩径处,由于相变潜热的影响,恢复过程中冻结层土体会出现一段温度稳定期,即水-冰转换过程中吸收相变潜热的阶段。2 倍和 3 倍桩径处土体温度变化较小,不存在温度稳定期。

2) 未冻结层中,取热时能量桩孔压降低,自然恢复时,孔压升高。在冻结层中,放热时能量桩孔隙中的冰开始融化,体积缩小,孔压下降。温度恢复过程中则恰恰相反。

3)未冻结层中,桩顶位移随温度升高而增长,随温度降低而减小。随着循环次数的增加,桩体产生累积沉降。在冻结层中,桩顶位移首先随温度升高而增大,之后由于冻土中冰发生融化,使桩体发生较大的融沉位移,且每轮融沉位移逐渐减小,直至消失。温度恢复过程中,桩体先发生短暂沉降,随后由于土体冻胀,桩体产生上升位移。在每轮循环中,冻胀引发的位移逐轮减小,但并未消失,5轮循环后,桩体最终产生上升位移。

4)桩体融沉引起的位移明显变化点温度随循环次数的增加逐渐升高,而冻胀引起的桩体位移明显变化点温度基本一致,约在 -0.5°C 左右。冻结层中能量桩位移累积速率显著大于非冻结层,在冻土地区工作的能量桩安全问题不容忽视。但冻土中水-热耦合机理较为复杂,后续应开展大尺度模型试验和数值模拟,进一步研究季节性冻土中能量桩工作时的热力学响应。

参考文献

- [1] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
XU X Z, WANG J C, ZHANG L X. Physics of frozen soils [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 徐伟. 中国地源热泵发展研究报告—2013[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
XU W. China ground source heat pump development report-2013 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [3] 张姝. 严寒地区空气源土壤蓄热式热泵系统及运行特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHANG S. The heat pump system with air-source oil heat storage and research on the peration characteristics in severe old area [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (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(8): 763-781.
- [6] 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.
- [7] WU D, LIU H L, KONG G Q, et al. Interactions of an energy pile with several traditional piles in a row [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(4): 06020002.
- [8] 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 tests on structural responses of energy piles during heat exchanging process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1087-1094. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] YOU S, CHENG X H, GUO H X, et al. Experimental study on structural response of CFG energy piles [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96: 640-651.
- [11] FANG J C, KONG G Q, MENG Y D, et al. Thermomechanical behavior of energy piles and interactions within energy pile-raft foundations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(9): 04020079.
- [12] 王成龙, 刘汉龙, 孔纲强, 等. 不同埋管形式下能量桩热力学特性模型试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(1): 85-91.
WANG C L, LIU H L, KONG G Q, et al. Model tests on thermal mechanical behavior of energy piles influenced with heat exchangers types [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 85-91. (in Chinese)
- [13] 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 C L, LIU H L, KONG G Q, 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. (in Chinese)
- [14] LIU H L, WANG C L, KONG G Q, et al. Ultimate bearing capacity of energy piles in dry and saturated sand [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 869-879.
- [15] MCCARTNEY J, ROSENBERG J. Impact of heat exchange on side shear in thermo-active foundations [J]. Geotechnical Special Publication, 2011, 211: 488-498.
- [16] STEWART M A, MCCARTNEY J S. Centrifuge modeling of soil-structure interaction in energy foundations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(4): 04013044.

- [17] WU D, LIU H L, KONG G Q, et al. Displacement response of an energy pile in saturated clay [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2018, 171(4): 285-294.
- [18] 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.
- [19] 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)
- [20] 白天. 严寒地区土壤源热泵系统地埋管运行特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- BAI T. Research on operation characteristic of ground heat exchanger for ground coupled heat pump system in cold climate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [21] 王鹏轩. 严寒地区土壤源热泵系统热平衡问题分析[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2013, 30(1): 34-36.
- WANG P X. Analysis of ground-coupled heat pump thermal equilibrium in the severe cold regions [J]. Journal of Jilin Institute of Architecture & Civil Engineering, 2013, 30(1): 34-36. (in Chinese)
- [22] 吴晓寒, 孙友宏. 东北地区太阳能联合地源热泵供暖系统仿真模拟分析[J]. 暖通空调, 2015, 45(3): 101-105.
- WU X H, SUN Y H. Simulation research on heating system combining solar collector with ground-source heat pump in northeast China area [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(3): 101-105. (in Chinese)
- [23] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133-143.
- QI J L, MA W. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133-143. (in Chinese)
- [24] 宋琿, 朱明, 袁文忠. 季节性冻土地区路基的冻胀与沉降[J]. 路基工程, 2007(1): 26-28.
- SONG H, ZHU M, YUAN W Z. Frost heaving and thawing settlement of subgrade in seasonal frozen soil zone [J]. Subgrade Engineering, 2007(1): 26-28. (in Chinese)
- [25] LUNARDINI E J. Heat transfer in cold climates [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- [26] 张玉芝, 杜彦良, 孙宝臣. 季节性冻土地区高速铁路路基地温分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1286-1296.
- ZHANG Y Z, DU Y L, SUN B C. Temperature distribution in roadbed of high-speed railway in seasonally frozen regions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1286-1296. (in Chinese)
- [27] SNOEREN J. The influence of freezing-thawing cycles on the geotechnical performance of an end-bearing energy pile [D]. Delft, Nederland: Delft University of Technology, 2020.
- [28] HOANG L, MATSUMOTO T, DAO K. Settlement and pile response in a long-term vertically loaded piled raft foundation model on saturated clay-Experimental study [M]//Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, Singapore: Springer, 2020: 33-40.
- [29] 吕朋. 基于热电制冷技术的热响应测试系统研制[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- LV P. Development of thermal response test system based on thermoelectric refrigeration technology [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [30] 刘冬生. 地源热泵实验台及同轴套管换热器传热模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- LIU D S. Research on experimental table and heat-transfer model of concentric-tube heat exchanger of ground source heat pump [D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)
- [31] 马田田, 韦昌富, 周家作, 等. 土体的冻结特征曲线和持水特性[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(Sup 1): 172-177.
- MA T T, WEI C F, ZHOU J Z, et al. Freezing characteristic curves and water retention characteristics of soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup 1): 172-177. (in Chinese)
- [32] BURT T, WILLIAMS P. Hydraulic conductivity in frozen soils [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1976, 1: 349-360.
- [33] 李正. 动荷载作用下冻土孔隙水压力变化与变形特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- LI Z. Study on the pore-water pressure change and deformation characteristics of frozen soil under dynamic load [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [34] 陆浩杰. 饱和黏土地基中能量桩-土相互作用机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- LU H J. Mechanism of energy pile-soil interaction embedded in saturated clay ground [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)