

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.021



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



温度影响下能量桩-土接触面剪切特性试验研究

陈志雄¹, 甘丰嘉¹, 王成龙^{1,2,3}, 彭宸¹, 丁选明¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 大足石刻研究院, 重庆 402360; 3. 重庆市地质矿产勘查开发局, 重庆 401121)

摘要: 能量桩工作过程中, 桩体受温度变化影响会产生热变形, 进而引起桩周土体的循环剪切作用, 弱化地基承载力, 给桩基的正常使用带来风险。由于传统直剪仪无法模拟能量桩工作过程中的温度变化, 因此对桩-土接触面力学特性受温度影响的变化规律研究较少。对传统直剪仪进行改造, 使其可以改变剪切试样温度; 所用土体从重庆某施工现场取样, 开展不同温度变化下桩-土接触面的室内土工直剪试验, 分析单次温度变化和循环温度变化对桩-土接触面力学性能的影响, 并对温度影响下桩-土接触面力学特性与土体力学特性的差异进行比较。结果表明, 能量桩-土接触面的抗剪强度受温度影响较大; 随着温度的升高, 能量桩-土界面摩擦角和黏聚力先减小后增大; 低法向应力下温度循环对桩-土接触面力学特性影响较大, 而高法向应力下温度循环对桩-土接触面力学特性影响不显著; 土体的抗剪强度、黏聚力和摩擦角随温度变化规律与桩-土界面类似。

关键词: 能量桩; 剪切特性; 桩-土接触面; 温度变化

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)03-0016-08

Experimental study on shear behavior of energy pile-soil interface affected by temperature

CHEN Zhixiong¹, GAN Fengjia¹, WANG Chenglong^{1,2,3}, PENG Chen¹,
DING Xuanming¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, P. R. China; 3. Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: In the working process of energy pile, the pile body will produce thermal deformation influenced by temperature change and induce cyclic shear action on the soil around the pile, which would weaken the bearing capacity of the foundation and bring risks to the normal use of the pile foundation. Because the traditional direct shear apparatus could not simulate the temperature variation of the pile and soil in the working process of energy piles, there was limited research on the mechanical properties of the pile-soil interface affected by the

收稿日期: 2022-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(51908087); 中央高校基本业务费(2021CDJQY-042)

作者简介: 陈志雄(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事桩-土相互作用机理研究, E-mail: chenzhixiong@cqu.edu.cn。

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

Received: 2022-12-08

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51908087); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2021CDJQY-042)

Author brief: CHEN Zhixiong (1982-), PhD, associate professor, main research interest: pile-soil interaction mechanism, E-mail: chenzhixiong@cqu.edu.cn.

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

temperature. In this paper, the traditional direct shear apparatus was modified to adjust the temperature of soil samples. The soil used in this test was sampled from a construction site in Chongqing, and the geotechnical direct shear tests of pile-soil interface under different temperatures were carried out. The effects of single and cyclic temperature variation on the mechanical properties of the pile-soil interface were analyzed. Meanwhile, the difference between the mechanical properties of pile-soil interface and soil was compared. The results showed that the shear strength of pile-soil interface was influenced significantly by the temperature. With the increase of temperature, the friction angle and cohesion of the pile-soil interface would firstly decrease and then increase. Temperature cycles had a great influence on the mechanical properties of pile-soil interface under low normal stress, while it had no significant influence under high normal stress. The variations of shear strength, friction angle and cohesion of the soil influenced by temperature was similar to those of pile-soil interface.

Keywords: energy pile; shear behavior; pile-soil interface; temperature variation

能量桩技术主要通过 在桩基中埋设热交换管, 利用热交换液高效提取浅层地热能, 并将其用于上部建筑的制冷或供暖, 达到降低建筑能耗的目的。而在加热或制冷过程中, 能量桩承担上部建筑荷载的同时还受到温度变化的影响, 而桩体和土体受温度影响会产生膨胀或收缩, 引起结构的热力学响应^[1-2]。

近年来, 学者们基于室内试验对能量桩-土接触面力学特性开展了一系列研究^[3-4]。李春红等^[5]通过水浴加热控制桩-土接触面的温度, 针对不同含水率的黏土、砂土和粉土开展了一系列直剪试验, 结果表明, 在相同温度下, 桩-黏土接触面剪切强度随着土体含水率的增加而增加, 而桩-砂土接触面和桩-粉土接触面剪切强度受土体含水率影响较小。Xiao等^[6]研究了温度作用下粉土与土-混凝土界面的剪切特性, 结果表明, 循环温度变化将引起粉土的抗剪强度增加, 且土体的峰值抗剪强度比土-混凝土界面峰值抗剪强度大 30%。Di Donna等^[7]对能量桩-砂土接触面开展了一系列直剪试验, 研究结果表明, 温度变化对桩-砂土接触面的剪切强度无明显影响。Maghsoodi等^[8]研究了热效应对土体-结构界面力学性能的影响, 结果表明, 温度变化对砂土和砂土-结构界面的抗剪强度的影响可以忽略不计, 但黏土在试验过程中会发生热收缩, 黏聚力增加, 从而导致抗剪强度增加。李春红等^[9]利用改装的传统应变控制三轴仪探究温度对能量桩-土界面力学特性的影响, 结果表明, 在单向温度作用下升温会使桩顶产生向上的位移而降温时相反, 循环温度变化会使桩顶产生不可逆的累积沉降位移。Yazdani等^[10]研究了温度对桩-土界面抗剪强度的影响, 研究结果表明, 在温度变化作用下, 黏土-混凝土的抗剪强度特性主要由施加的法向应力和黏土先期应力历史决定, 且正常固结黏土-混凝土界面的峰值摩擦角随温度升高而增加, 而其黏聚力随温度升高而降低。Di

Donna等^[11]的研究指出, 超固结土在温度循环的过程中表现为热弹性, 正常固结土表现为热弹性-热塑性, 但其塑性变形主要发生在第 1 轮温度循环。Yavari等^[12]的结果表明, 相同法应力下黏土-桩界面的峰值抗剪强度小于黏土的抗剪强度, 但温度对桩-黏土接触面的剪切强度影响较小, 这与 Murphy等^[13]和 Li等^[14]的结果一致。而 Di Donna等^[7]的结果却表明, 随着温度的增加, 桩-黏土接触面的剪切强度增加。

已有研究中温度对桩-土接触面强度影响的结果并不一致, 且不同地区的土体性质可能存在着差异。因此, 需要进一步探讨温度对桩-土接触面强度的影响。由于传统的直剪仪和三轴仪无法考虑温度变化的影响, 学者们对直剪仪和三轴仪进行改装, 使其适用于测量桩-土接触面抗剪强度^[15-17]。而目前考虑温度变化的对桩-土接触面剪切强度的研究仍然较少, 笔者通过对室内直剪仪进一步改造, 并进行了多组不同温度工况下桩-土界面的土工直剪试验, 探究温度变化及冷热循环对土体以及桩-土接触面的力学特性的影响。

1 试验概况

1.1 试验材料特性

试验所用混凝土为 C30 混凝土, 土体取自重庆渝北某施工现场非饱和粉土, 土体颗粒级配曲线如图 1 所示。土体比热以及导热系数由 KD2 Pro 热物性分析仪测得, 试验土体物理参数见表 1。

1.2 实验装置

试验采用 zj 型应变控制式直剪仪, 在此设备基础上改装其上下剪切盒, 在原剪切盒的外部增加了封闭水槽以控制剪切试样温度。新设计上剪切盒尺寸外模为 75 mm×75 mm×55 mm (长×宽×高), 剪切面直径为 63 mm。在外模四周安装封闭水槽, 水槽的尺寸为 120 mm×45 mm×48 mm

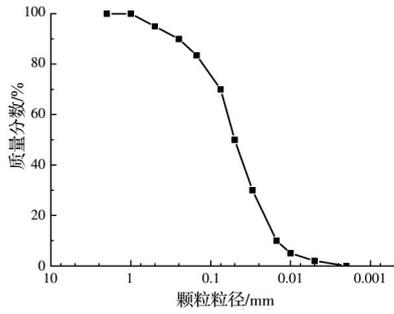


图 1 颗粒级配曲线图

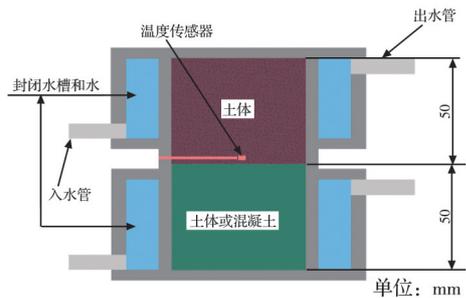
Fig. 1 Particle size distribution curve

表 1 试验土体物理参数

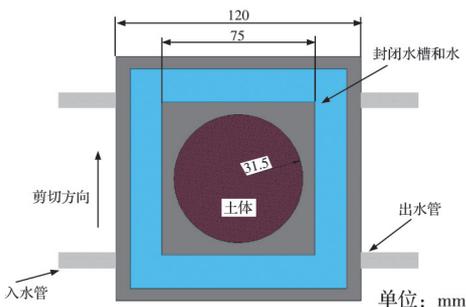
Table 1 Physical parameters of soil

密度/(g/cm ³)	颗粒比重	含水率/%	饱和度/%
1.76	2.66	15.50	55.50
干密度/(g/cm ³)	孔隙比	土体比热/(J/(kg·K))	导热系数/(W/(m·K))
1.53	0.74	984	1.34

(长×宽×高)。上剪切盒外模上表面与封闭水槽齐平,下表面略低于封闭水槽,以消除封闭水槽对剪切过程的影响。同时在剪切面上方预留有温度传感器的接线孔。下剪切盒设计与上剪切盒相似,在外模四周加上封闭的水槽,下剪切盒外模上表面略高于封闭水槽上表面,以消除水槽对剪切过程的影响。下剪切盒中为混凝土试样或土体,直径为 63 mm,高度为 50 mm,上剪切盒中为土体,直径为 63 mm,高度为 50 mm。改装后的剪切盒示意图如图 2 所示。



(a) 纵向示意图



(b) 俯视图

图 2 剪切盒示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the shear box

试验采用温控水循环装置完成对水温和水循环的控制。将目标温度的水不断通入封闭水槽,使水槽中的水保持恒温,以达到改变试验剪切界面温度的目的。试样中埋有温度传感器,利用数据采集系统对试样温度进行实时监控和采集。试验设备实物如图 3 所示。

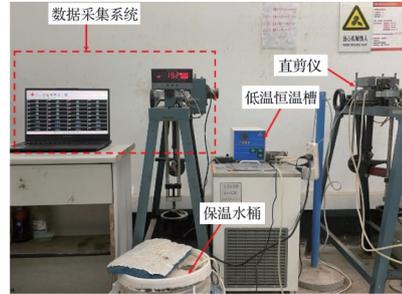


图 3 试验布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the test arrangement

1.3 实验设计与实施

将 C30 混凝土浇入下剪切盒,养护 28 d。将剪切上下盒对准,插入固定销,并将温度传感器插入剪切面上方的预留孔中。将固定质量的松散土样填入剪切盒,并用击实锤击实,击实过程中通过控制体积来控制土体试样的干密度,直至土体填至设计高度,土体填筑完成。每次试验土体试样的干密度均保持一致,控制为 1.53 g/cm³。达到预先设定温度后,将水通入剪切盒外部的封闭水槽,观察剪切试样剪切面的温度变化,当温度达到试验设计温度时,施加法向压力,随后拔出固定销,采用 0.8 mm/min 的剪切速率对试样进行剪切,当测力计的读数达到稳定或出现回退时,表示试样已剪损,剪至剪切变形达到 4 mm 时停止剪切,当测力计读数不出现稳定持续增长时,剪切变形达到 6 mm 时停止剪切,手轮每转一圈记录测力计位移,直到停止剪切。

针对土体和桩-土接触面分别进行了分析研究,通过控制剪切界面的温度来模拟能量桩工作过程中的温度变化。温度工况参考季节温度变化、昼夜的较大温差以及研究高温对桩-土接触面力学性能的影响将其划分为室温(21℃)、单次制冷(21~10℃)、单次加热(21~30℃)、单次加热(21~35℃)、单次加热(21~55℃)以及冷热循环(21~35~10℃)1次、冷热循环(21~35~10℃)5次。剪切目标温度为剪切界面的实际温度,通过埋入试样中的温度传感器测得,由于采用封闭水槽的加热方式,剪切试样的温度分布较为均匀。每组工况进行 3 组平行试验,并在每种温度工况下进行 50、100、150、200 kPa 法向压力的剪切试验,共需开展 168 组

直剪试验。试验中的制冷工况对应于能量桩实际运行时上部结构负荷侧的冬季制热,也就是能量桩对土体的吸热过程;反之,试验中的制热工况对应于上部结构负荷侧的夏季制冷,也就是能量桩对土体的放热过程。表2和表3分别为单次温度变化工况和多次温度循环下的试验工况。土体试验工况与桩-土界面试验工况一致。

表2 单次温度变化试验工况

Table 2 Test condition for different temperatures

序号	试验对象	法向压力/kPa	温度工况/℃
1	桩-土	50	21
2	桩-土	100	21
3	桩-土	150	21
4	桩-土	200	21
5	桩-土	50	21~10
6	桩-土	100	21~10
7	桩-土	150	21~10
8	桩-土	200	21~10
9	桩-土	50	21~30
10	桩-土	100	21~30
11	桩-土	150	21~30
12	桩-土	200	21~30
13	桩-土	50	21~35
14	桩-土	100	21~35
15	桩-土	150	21~35
16	桩-土	200	21~35
17	桩-土	50	21~55
18	桩-土	100	21~55
19	桩-土	150	21~55
20	桩-土	200	21~55

表3 循环温度变化试验工况

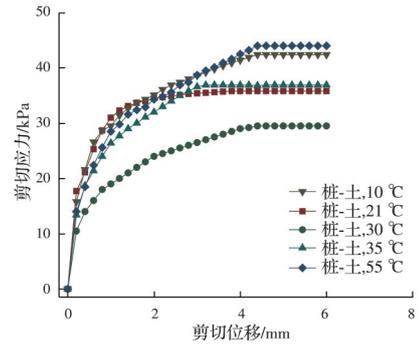
Table 3 Test condition for cyclic temperature load

序号	试验对象	法向压力/kPa	温度工况/℃
1	桩-土	50	21~35~10(1次循环)
2	桩-土	100	21~35~10(1次循环)
3	桩-土	150	21~35~10(1次循环)
4	桩-土	200	21~35~10(1次循环)
5	桩-土	50	21~35~10(5次循环)
6	桩-土	100	21~35~10(5次循环)
7	桩-土	150	21~35~10(5次循环)
8	桩-土	200	21~35~10(5次循环)

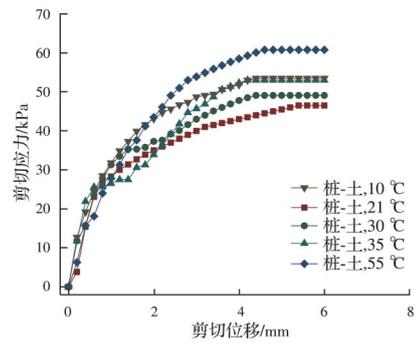
2 试验结果与分析

2.1 温度对桩-土接触面力学性能的影响

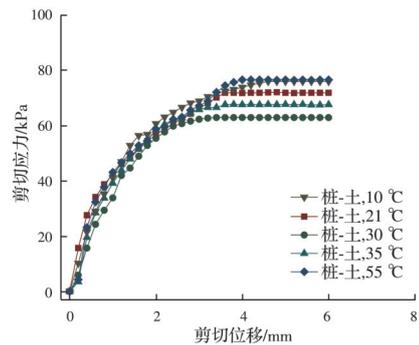
图4为不同温度下桩-土接触面剪切应力-位移变化曲线。如图4所示,在不同法向压力下,各温度工况的桩-土接触面剪切应力都随剪切位移的增大而快速增加,之后增长速率逐渐降低,直至剪切应力基本不发生变化,剪切面发生破坏。结果表明,



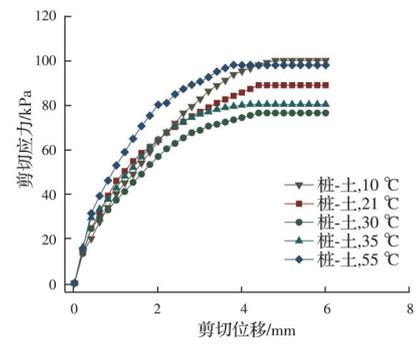
(a) 50 kPa



(b) 100 kPa



(c) 150 kPa



(d) 200 kPa

图4 同温度下桩-土接触面剪切应力-位移变化规律

Fig. 4 Variation of shear stress-displacement of pile-soil interface under different temperatures

在不同法向应力下,制冷时桩-土界面最大剪应力均有所增加,而加热时其随温度的升高基本上先下降后上升,原因可能是制冷时土体受冷收缩,土体颗粒间孔隙减小,桩-土接触更加充分,使桩-土接触面

抗剪强度有一定的提高;而加热时出现剪切强度下降的原因可能是随着温度的增加,土中水分受热膨胀,导致土体孔隙率增加,抗剪强度降低;当桩-土接触面的温度进一步升高后,桩体及土体受热径向膨胀,土体颗粒相互挤压,土体颗粒间作用力增大,引起土体强度升高,同时桩-土接触面受热相互挤压,接触面法向应力增加,导致桩-土界面抗剪强度提高。

通过测量土样在不同法向压力 σ 下的剪切强度 τ_f , 绘制出剪切强度 τ_f 与法向压力 σ 的关系曲线, 库

伦定律规定直线与横轴的夹角为摩擦角 φ , 与纵轴的截距为黏聚力 c , 库伦定律公式为

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \tag{1}$$

对不同温度和不同法向压力下的桩-土接触面进行直剪试验, 得到桩-土接触面的强度包络线如图 5 所示, 各拟合点基本在拟合直线上。结果表明, 不同温度和不同法向压力下桩-土接触面的摩擦角 φ 处于 $16.17^\circ \sim 21.31^\circ$ 之间, 并且黏聚力 c 处于 $13.15 \sim 26.15$ kPa 之间。

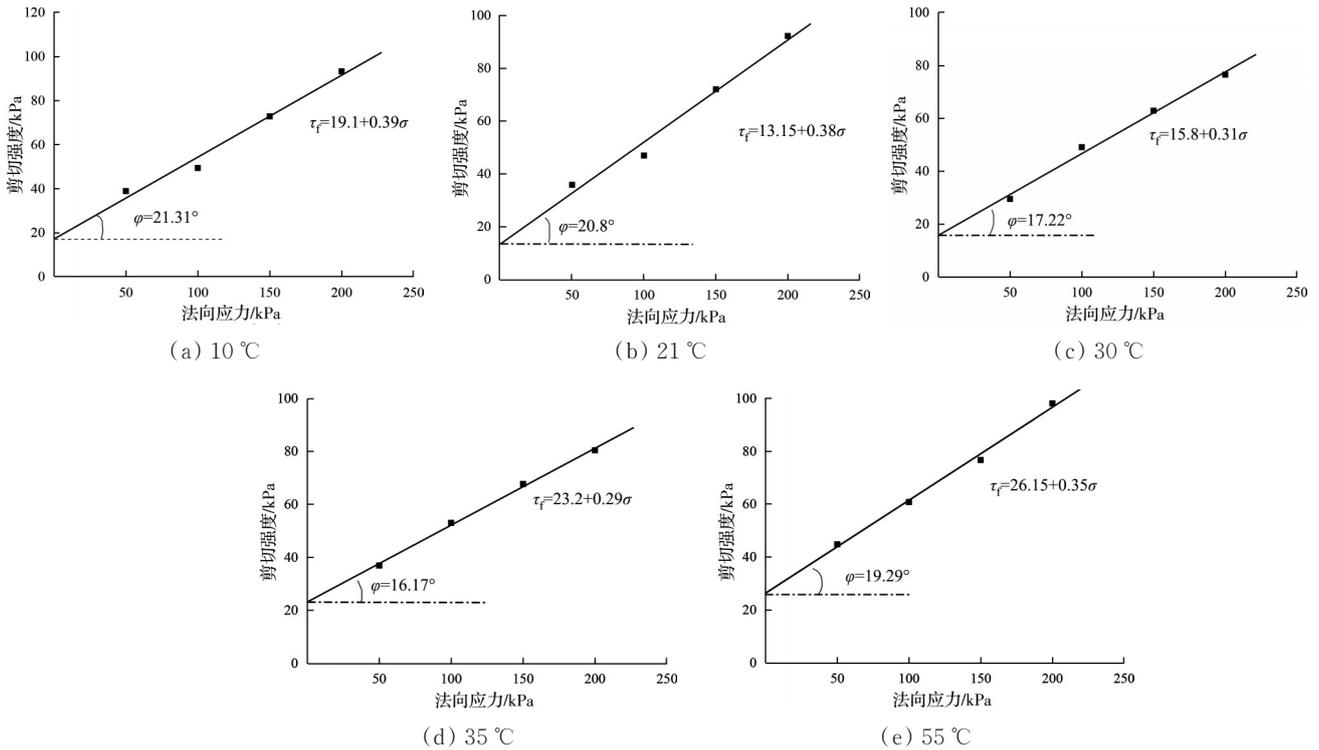


图 5 不同温度下桩-土接触面强度包络图

Fig. 5 Strength envelope diagram of pile-soil interface under different temperatures

图 6 所示为桩-土接触面的抗剪强度指标随温度的变化规律。室温下制冷后, 桩-土接触面摩擦角 φ 和黏聚力 c 均有所增加, 而在加热时, 随着温度的升高, 黏聚力逐渐增大, 而摩擦角先减小后增大。这可能是因为当温度相对较低时, 土体收缩, 土体

间的孔隙减小, 桩-土接触更加充分, 使得桩-土接触面的摩擦角和黏聚力增大。而随着温度增加到一定程度时, 土体发生热膨胀, 土体颗粒间相互挤压导致桩-土接触面的黏聚力和摩擦角增大, 引起土体抗剪强度指标提高。总体来说, 黏聚力受温度变化影响更为显著, 随着温度的升高 ($10 \sim 55^\circ\text{C}$), 能量桩-土界面摩擦角和黏聚力先减小后增大。

2.2 冷热循环次数对桩-土接触面力学性能影响

图 7 为不同冷热循环次数下桩-土接触面应力-位移变化曲线。如图 7 所示, 在初始阶段, 剪切应力随剪切位移的增加快速增长, 之后增长速率逐渐降低, 直至剪切应力基本不发生变化。在低法向应力工况下 (50、100 kPa), 随着温度循环的次数增多, 桩-土接触面的抗剪强度明显提高, 但在高法向应力情况下 (150、200 kPa), 温度循环次数对桩-土接触面的抗剪强度影响不显著。这可能是因为法向应力较低时, 冷热循环下, 土体交替膨胀和收缩, 土中

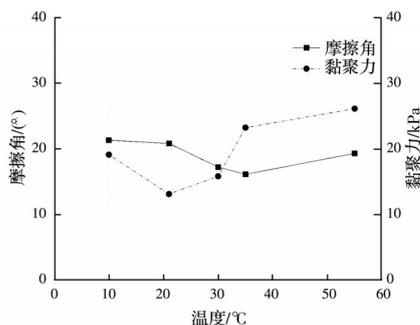


图 6 桩-土接触面力学指标随温度变化规律

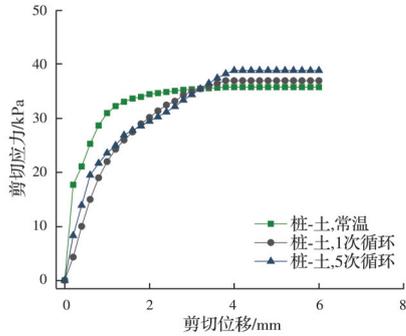
Fig. 6 Variation of mechanical properties of pile-soil interface with temperature

水分受热蒸发,多次循环后土体含水率减小,随着温度循环的次数增多,桩-土接触面的抗剪强度提高,而高法向应力下桩-土界面的抗剪强度主要受法向应力控制,桩-土界面的抗剪强度受法向应力影响

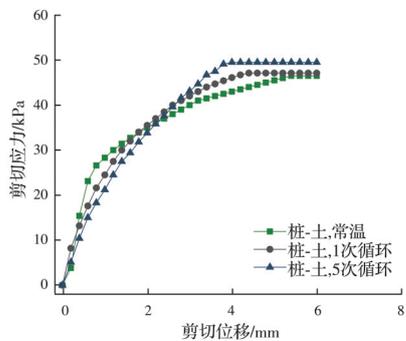
较大,温度循环的影响较小。

2.3 不同温度变化下土体与桩-土接触面力学性能对比

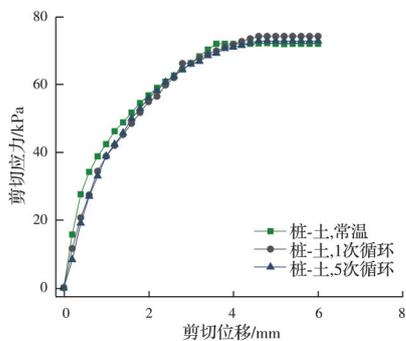
图 8 所示为不同法向压力下土体和桩-土接触面剪切强度随温度变化曲线。土体抗剪强度随温度的变化规律与桩-土接触面相似,在不同的法向应



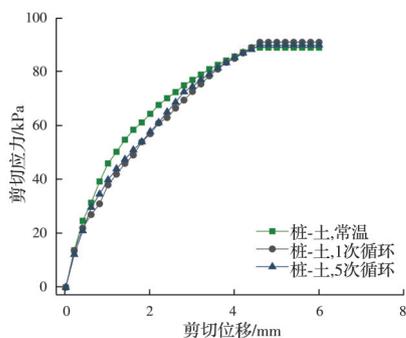
(a) 50 kPa



(b) 100 kPa



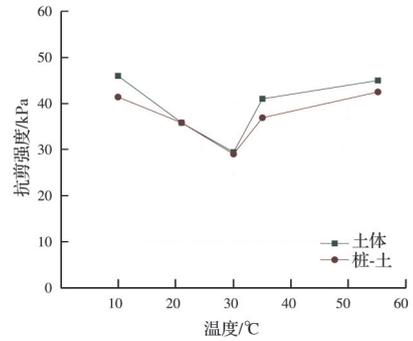
(c) 150 kPa



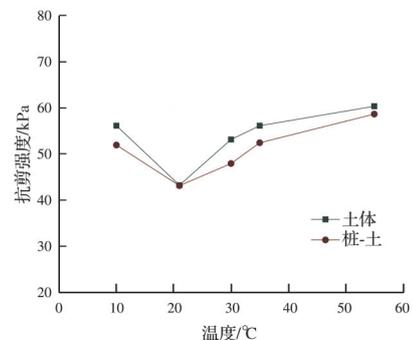
(d) 200 kPa

图 7 不同温度循环次数下桩-土接触面剪切应力-位移变化规律

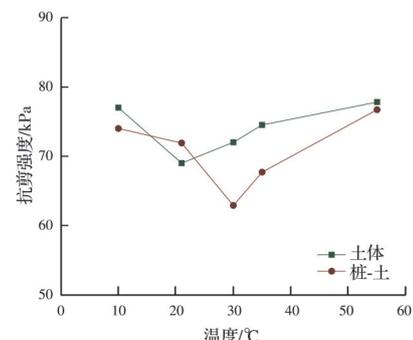
Fig. 7 Variation of shear displacement-shear stress of pile-soil interface under different temperature cycles



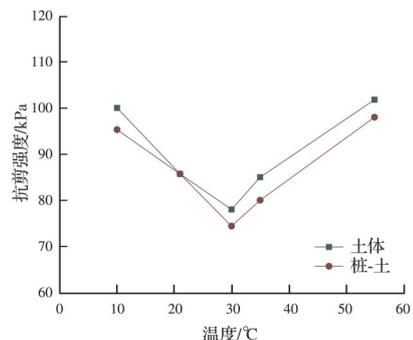
(a) 50 kPa



(b) 100 kPa



(c) 150 kPa



(d) 200 kPa

图 8 桩-土接触面与土体的剪切强度随温度变化规律

Fig. 8 Variation of shear strength of pile-soil interface and soil with temperature

力作用下,制冷时,桩-土接触面和土体的剪切强度均明显增大,而在加热后,其随着温度的增加呈现先减小后增大的趋势。在应力水平较高时更加明显。当温度在21~30℃之间时,桩-土接触面和土体抗剪强度出现最小值。原因可能是制冷时,土体中孔隙收缩,土体骨架强度提高,而当土体温度较高时,土体发生热膨胀,使土粒间法向应力提高,导致抗剪强度提高。

图9为不同温度下土体和桩-土接触面力学指标变化曲线。土体的抗剪强度指标变化和桩-土接触面抗剪强度指标变化规律类似,即随着温度的逐渐增加而先减小后增大,在21~35℃之间出现最小值,土体抗剪强度指标随温度变化的原因和桩-土接触面力学指标变化原因一致。如图9(a)所示,制冷时,桩-土接触面和土体摩擦角都增大,而在加热时随温度升高先减小后增大,且其最小值都出现在35℃左右,土体摩擦角普遍略大于桩-土接触面摩擦角,但最大差值仅为6%。如图9(b)所示,加热和制冷时,土体和桩-土接触面的黏聚力均有所增加,在21℃时,黏聚力出现最小值,且土体的黏聚力明显大于桩-土接触面的黏聚力,当温度升高至35℃以上时,其黏聚力的增长速率明显降低。

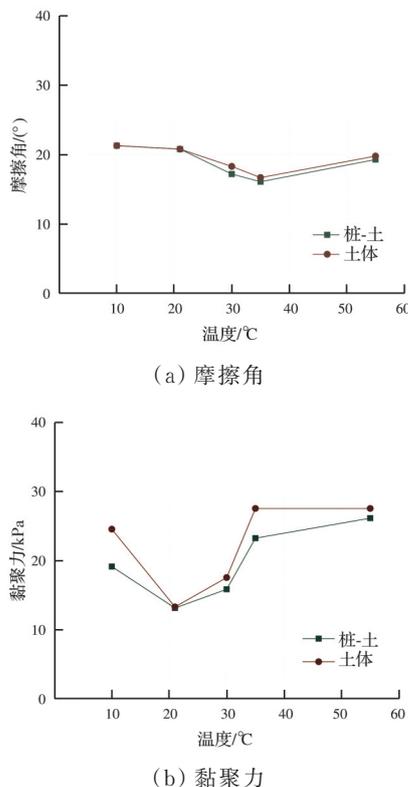


图9 桩-土接触面与土体的力学指标随温度变化规律
Fig. 9 Variation of mechanical properties of pile-soil interface and soil with temperature

3 结论

对室内常规直剪仪进行改装,模拟能量桩工作过程中的温度变化,并采用改装后的直剪仪对重庆某施工现场土体进行一系列土工直剪试验,分析了不同单次温度变化和循环温度变化下能量桩-土接触面的力学特性,进一步对温度变化下土体与桩-土接触面力学抗剪强度进行了对比分析,对于粉土和桩-粉土界面的力学特性主要得到如下结论:

1) 能量桩-粉土接触面的抗剪强度受温度影响较大。当桩-土界面温度从常温(21℃)开始降低时,其剪切强度增加,而当温度从常温(21℃)上升时,其剪切强度基本上先减小后增加。抗剪强度的最小值出现在21~30℃之间。

2) 温度会对能量桩-粉土接触面的抗剪强度指标产生影响,当桩-土界面温度从常温(21℃)开始降低时,其黏聚力和摩擦角增加,桩-土界面温度从常温(21℃)上升时,其黏聚力逐渐增加而摩擦角先减小后增大。总体来说黏聚力受温度变化影响更为显著。

3) 低法向应力影响下,温度循环引起桩周土体产生热膨胀和冷收缩,土体骨架强度提高,桩-土接触面抗剪强度受温度循环次数影响显著;高法向应力限制了土体的变形,桩-土接触面抗剪强度受温度循环次数影响不显著。

4) 土体抗剪强度随温度的变化规律与桩-土接触面相似。土体的摩擦角及黏聚力基本均大于同温度下的桩-土接触面的摩擦角及黏聚力。在制热工况下,土体的黏聚力增大,而摩擦角随温度增加先减小后增大,而制冷工况下黏聚力和摩擦角均增大。总的来说,随着温度的升高,土体和桩-土界面摩擦角和黏聚力先减小后增大。

参考文献

- [1] 陈志雄, 赵华, 王成龙, 等. 砂土中能量桩单桩水平承载特性模型试验研究[J]. 工程力学, 2024, 41(3): 114-123.
CHEN Z X, ZHAO H, WANG C L, et al. Model tests on lateral bearing behavior of single energy pile in sand [J]. 2024, 41(3): 114-123. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] VASILESCU R, YIN K, FAUCHILLE A, et al.

- Influence of thermal cycles on the deformation of soil-pile interface in energy piles [C]//7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (IS-Glasgow 2019), 2019, 92, 13004.
- [4] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, LIN B F. Effect of temperature on shear strength and yielding behavior of soft Bangkok clay [J]. *Soil and Foundations*, 2007b, 47(3): 423-436.
- [5] 李春红, 孔纲强, 车平, 等. 能量桩桩-土接触面力学特性室内试验研究 [J]. *建筑节能*, 2016, 44(3): 99-105, 114.
- LI C H, KONG G Q, CHE P, et al. Laboratory experimental on interface mechanical properties of energy pile-soil [J]. *Building Energy Efficiency*, 2016, 44(3): 99-105, 114. (in Chinese)
- [6] XIAO S G, SULEIMAN M T, MCCARTNEY J S. Shear behavior of silty soil and soil-structure interface under temperature effects [C]//Geo-Congress 2014, Atlanta, Georgia. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014: 4015-4114.
- [7] DI DONNA A, FERRARI A, LALOUI L. Experimental investigations of the soil-concrete interface: Physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(4): 659-672.
- [8] MAGHSOODI S, CUISINIER O, MASROURI F. Thermal effects on mechanical behaviour of soil-structure interface [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, 57(1): 32-47.
- [9] 李春红, 孔纲强, 张鑫蕊, 等. 温控桩-土接触面三轴试验系统研制与验证 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4955-4962.
- LI C H, KONG G Q, ZHANG X R, et al. Development and verification of temperature-controlled pile-soil interface triaxial shear test system [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(12): 4955-4962. (in Chinese)
- [10] YAZDANI S, HELWANY S, OLGUN G. Influence of temperature on soil-pile interface shear strength [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2019, 18: 69-78.
- [11] DI DONNA A, LALOUI L. Response of soil subjected to thermal cyclic loading: Experimental and constitutive study [J]. *Engineering Geology*, 2015, 190: 65-76.
- [12] YAVARI N, TANG A M, PEREIRA J M, et al. Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil - structure interface [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(7): 1186-1194.
- [13] MURPHY K D, MCCARTNEY J S. Thermal borehole shear device [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2014, 37(6): 20140009.
- [14] LI C H, KONG G Q, LIU H L, et al. Effect of temperature on behaviour of red clay-structure interface [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(1): 126-134.
- [15] YAZDANI S, HELWANY S, OLGUN G. Experimental evaluation of shear strength of Kaolin clay under cyclic and noncyclic thermal loading [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2018, 42(6): 1518-1548.
- [16] LIU H, LIU H L, XIAO Y, et al. Effects of temperature on the shear strength of saturated sand [J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(6): 1326-1338.
- [17] YAZDANI S, HELWANY S, OLGUN C G. The mechanisms underlying long-term shaft resistance enhancement of energy pile in clays [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021, 58(11): 1640-1653.

(编辑 胡英奎)