

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0049

LIU Qinghe, WANG Yongtao, XU Xiangtian, et al. Experimental study on shear characteristics of the interface between the frozen silty clay and the pipe foundation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):491-498. [刘庆贺, 王永涛, 徐湘田, 等. 冻结粉质黏土-桩基接触面剪切特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):491-498.]

冻结粉质黏土-桩基接触面剪切特性试验研究

刘庆贺, 王永涛, 徐湘田, 赵宇琴, 李高升, 张伟东

(内蒙古大学 交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘 要: 在寒区工程中, 建筑物的冻拔病害和冻土-桩基接触面间的剪切特性密切相关。借助自制的试验模具, 采用压桩法对冻结粉质黏土中埋置的混凝土桩、钢桩以及木桩进行了不同负温条件下的剪切试验。结果表明: 在负温下随着剪切位移的增加, 剪切力经历线性增长、骤降的脆性破坏、维持恒定三阶段。温度越低, 桩与冻土间的冰胶结力越大, 冻结强度越大, 残余强度越大, 破坏允许位移也越大。在-30℃时, 木桩与冻土间的冻结强度最大, 混凝土桩与冻土间的冻结强度次之, 钢桩与冻土间的冻结强度最小。混凝土桩、钢桩对应的冻结强度及残余强度与温度的关系可用线性拟合, 木桩对应的冻结强度及残余强度与温度的关系可用二次多项式拟合, 三种桩的破坏允许位移与温度的关系均呈现线性规律。研究成果可为寒区结构物抗冻拔病害防治提供参考。

关键词: 压桩法; 桩土接触面; 冻结强度; 残余强度; 破坏位移

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0491-08

0 引言

在寒区工程中, 桩基础或杆体的冻拔作用是结构物面临的主要冻害问题^[1]。冻拔病害主要发生在埋深浅、小而轻的杆体或桩基结构中, 如电力杆塔设施中的混凝土线杆、木质线杆以及线杆的钢管基础等。

我国东北部地区属于典型的高纬度岛状多年冻土区域, 该地区冬夏温差跨度大, 冻结期长, 且大部分区域位于大兴安岭腹地, 密布沼泽, 具有高含水率特点, 土体多为冻胀敏感性黏土。在经历冻结期后, 活动层土体与桩基冻结为整体, 地下水分在温度梯度作用下通过土体的孔隙不断向活动层土体迁移, 活动层土体持续的冻胀, 杆塔设施基础与土体接触面间的切向冻胀力不断增长。当杆塔设施基础与上层冻土界面间的切向冻胀力大于下层未冻土层的线杆与未冻土间的摩擦力与杆塔设施的重力合力时, 在切向冻胀力作用下杆塔设

施基础就会出现上拔; 当春季温度回升时, 土体融化下沉, 杆塔设施基础回落量小于上拔量, 冻融循环作用导致了杆塔基础较原位置的上升, 即为冻拔, 冻拔病害影响着寒区线性工程安全^[2]。将电力设施中的线杆杆体的持土段以及杆塔的钢管圆柱桩基均视作桩基础, 这些桩基础所受的切向冻胀力大小是影响冻拔的主要因素^[3]。而冻土-桩基接触面间的接触强度特性是产生切向冻胀力的原因, 也是导致桩基产生冻拔病害的原因, 冻土-桩基接触面间的剪切特性是确定桩基的抗拔性能与桩基冻拔防治的关键^[4]。因此, 对冻土-桩基接触面间的剪切特性研究具有重要意义。

在进行寒区桩基础设计中应了解桩基与冻土接触面的力学特性变化规律。为了研究结构与土体接触面间的强度特性, 国内外学者在不同的角度分别对结构物与冻土之间的冻结强度进行了研究。

桩与冻土间的冻结强度研究起源于苏联, 崔托维奇^[5]提出可以采用量测结构与基础接触界面的剪

收稿日期: 2020-01-07; 修订日期: 2020-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879131; 51769018; 41901070); 冻土工程国家重点实验室开放课题(SKLFSE201805)资助

作者简介: 刘庆贺(1995-), 男, 内蒙古赤峰人, 2017年在内蒙古大学获学士学位, 现为内蒙古大学在读硕士研究生, 从事冻土力学研究. E-mail: liuqh_1995@163.com

通信作者: 王永涛, 副教授, 从事寒区工程热力稳定性研究. E-mail: wyt_827@imu.edu.cn.

切强度来度量冻结强度,冻结强度与温度、含水率、土质、加载速率等因素有关。童长江等^[1]在研究中发现,冻结强度不仅与影响冻土破坏强度的指标有关,还与基础表面的粗糙程度有关,粗糙程度越大,冻结强度越高。吴紫汪^[6]根据试验得到,随着温度降低,土体冻结强度增加,在冻结强度增加的过程中,冰胶结作用占主导地位,且随着温度进一步降低,冻结强度增加速率减缓。吕鹏等^[7]通过直剪试验,总结了垂直压力、温度、含水量对接触面抗剪强度的影响。Zhao等^[8-9]研究了不同的土质对结构接触面间的冻结强度的影响,得出在含水量较小时,冻结强度随含水量的增加而增加,当含水量达到一定值时,冻结强度随含水量增加出现降低趋势。王恒星等^[10]探究不同冻融循环次数下的植物根与土体相互作用规律,得出抗剪强度随着冻融循环次数增大而发生变化。温智等^[11-12]通过直剪试验得到了冻土与混凝土、玻璃钢接触面的冻结强度与冻结强度恢复值变化规律,探究了剪切过程中土体黏聚力与内摩擦角的变化规律,认为接触面粗糙程度改变导致内摩擦角的变化作用对冻结强度的影响要小于剪切位移改变导致的黏聚力变化的作用。石泉彬等^[13-14]通过自行研制的压桩法测试试验装置对冻结强度进行分析,解释了接触面压应力变化过程及沿桩身的分布情况。孙兆辉等^[15]测试了不同含水量与不同含盐量下的混凝土冻土界面抗剪强度,得出抗剪强度随含水量增大而增大,随含盐量增加而降低。Penner等^[16]和 Parameswaran^[17]测试了不同材质的桩体的冻结强度。

上述研究结果表明,温度、含水量、土体的性质以及桩体的材料是影响桩与冻土间冻结强度的主要因素,同时,加载的速率也影响冻结强度的变化。本文结合内蒙古东北岛状多年冻土区桩柱基础所受的极端负温及土体高含水率的环境特点,考虑影响冻结强度的主要因素,设置大范围负温、冻胀敏感性土体以及高含水率条件,并在此条件下采用压桩法^[3]进行等速率加载,测试混凝土桩、钢桩以及木桩三种材质的桩剪切力-位移的相关关系、冻结强度、残余强度以及破坏允许位移的变化规律。研究成果可为寒区工程中的冻土与桩基接触面间的剪切特性研究以及结构物抗冻拔病害防治提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 土体的物理特性

本试验所用黏土取自内蒙古东北岛状多年冻土区域^[18],土样呈黄褐色,粒径分布如表1所示。基本物理参数如表2所示,土体中粒径<0.075 mm的粒组占总质量的91.26%,塑性指数为10.38,定名为粉质黏土,属于冻胀敏感性土。

表1 土体粒径分布

Table 1 Particle size distribution of the soil

粒径/mm	>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.075~0.25	<0.075
质量百分比/%	0	0.39	1.86	2.8	3.69	91.26

表2 土体基本物理参数

Table 2 Basic physical indexes of the soil

测试参数	天然密度/ (g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数	比重
测试结果	1.80	38.14	27.76	10.38	2.68

1.2 试验设备

试验设备包括剪切力学试验机、可编程式高低温控箱和自制试样持土容器。

剪切力学试验机为HFDZ-100剪切力学试验仪,包括加载系统与数据采集系统。可编程式高低温控箱是由保温箱、冷浴系统组成(图1),保温箱为XT5438-TC80型高低温控制箱,恒温范围为-75~100℃,温度误差为±0.3℃。冷浴系统可控制温度范围为-75~100℃,温度波动度为±(0.02~0.05)℃。自制试样持土容器由钢板焊接制成,试样持土容器包括模具盒、托土底板、支架(图2),自制试样持土容器用以盛放试验土体与试验桩,模具盒尺寸为15 cm×15 cm×15 cm,底部放置中间开直径为5.2 cm圆孔的托土底板,上部不封顶,四角通过螺丝与四个支架进行连接固定,使得压桩过程中桩体底部脱空。

1.3 试验条件

本试验选用混凝土桩、钢桩和木桩三类材质桩,使用砂纸对三类桩打磨至肉眼所见近似光滑状态,忽略不同材质的桩表面粗糙度的影响,并分别在恒温-30℃、-20℃、-10℃、0℃进行冻结,对冻结后的试样进行压桩试验,采集剪切力与桩土间相对位移之间的关系数据。为贴合实际工况,试验土体的密度与含水率采用现场原位测试的天然土体密度与含水率,分别为天然密度1.80 g·cm⁻³,含水率23%。



图1 可编程式高低温控箱

Fig. 1 Programmable temperature control box



图2 自制试样持土容器

Fig. 2 Self-design experimental equipment

1.4 试验过程

自制混凝土桩、钢桩、木桩, 尺寸均为直径 5 cm、高 15 cm, 其中混凝土桩采用 C25 水泥砂浆进行制作, 并在养护室内养护 28 d 达到规定强度, 钢桩采用壁厚为 4 mm 的钢管进行模拟。取试验用土进行烘干碾碎, 过 2 mm 筛, 配置成含水率为 23% 的土体, 进行闷料 24 h。试验中持土容器装土高度为 10 cm, 桩与土接触高度为 10 cm, 每个持土容器所需用土质量为:

$$m_{\pm} = (b^2 h - \pi R^2 h) \cdot \rho \cdot (1 + \omega) \quad (1)$$

式中: b 为土盒边长(cm); h 为桩土接触高度(cm); R 为桩径(cm); ρ 为土体天然密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); ω 为天然含水率(%)。

计算得到每个持土容器所需用土质量, 称取土体, 然后将桩与土体填充到持土容器中, 分四层进

行装样压实。装土过程中, 在自制试验持土容器托土底板的开孔部分下面放置与四角支撑等高的垫板, 试验桩两端面均为平面, 桩放置在托土底板开孔部分下面的垫板上时, 试验桩在垫板支撑下能够保持竖直状态。填土完成后, 使用保鲜膜进行包裹, 放于设定温度下的保温箱内进行恒温冻结 24 h, 并将加载柱的压头一起放入保温箱内进行预冷。

待完全冻结后, 取出试样持土容器放置在剪切试验机上进行剪切试验。剪切过程中使用冰袋包裹持土容器底部与四周以及裸露在土体外部的试验桩, 保持土样与桩体的温度不会发生明显变化, 剪切过程中采用等速率加载模式, 加载速率为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 剪切位移达到 3 cm 时停止程序。加载过程如图 3 所示, 加载过程中计算机采集剪切力与桩土接触面相对位移的关系。



图3 剪切试验实物图

Fig. 3 Physical drawing of shear test

2 试验结果分析

2.1 剪切力与剪切位移关系

混凝土桩、钢桩以及木桩与冻结粉土接触面在不同温度下的试验力-剪切位移曲线如图 4 所示。三类桩在不同负温下的剪切位移均随着剪切力的增大而增大, 达到峰值剪切力后出现急速下降的趋势, 出现脆性破坏, 随位移的继续增加, 桩与冻土间的冻结力消失, 接触面间的力为冻土与桩表面的摩擦力, 曲线峰值后段保持稳定。三类

桩的峰值剪切力均表现为冻结温度越低,破坏的峰值剪切力越大。试验力-剪切位移曲线分为三个阶段:

第一阶段为剪切力线性增加阶段。此阶段内,随着桩与冻土间相对位移的增大,剪切力呈现线性增加的趋势,在不同的负温下剪切力增加的幅度不同,负温越低时剪切力增加幅度越大,对应位移下的剪切力值也越大。原因是在破坏前,桩与土体冻结在一起,桩土间主要通过冰胶结力黏结在一起,当温度越低时,冰胶结力越大,故在桩土间不同的位移下,温度越低,对应的剪切力值越大。

第二阶段为剪切力骤降的脆性破坏阶段。本阶段内,剪切力达到极限状态,此时的剪应力主要由冻结力承担,冻结力此时达到极限状态,桩土间的相对位移的继续增加导致冻结力消失,桩与冻土间出现脆性破坏,图中剪切力出现骤降。图4(a)中混凝土桩在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时及图4(c)中木桩在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时剪切力在极值后出现骤降达到最小值,然后剪切力出现微小转折提升。原因是

桩土冻结为整体后二者之间存在一种热平衡状态,当桩土产生相对位移至达到剪切力极限状态时,接触面热平衡状态被摩擦作用破坏,桩土间的冰膜形成的胶结力消失,试验剪切力出现骤降。但热平衡状态破坏后,冰与未冻水含量也会出现变化,桩土界面处的少量的未冻水会在桩周围土体的低温作用下冻结,桩土间会产生新的胶结力,使曲线剪切力出现转折点^[19]。

第三阶段为冻结力消失、剪切力维持恒定阶段。此阶段内,随着桩与冻土间接触面相对位移的增大,冰胶结力消失,桩与冻土间的接触力主要为摩擦力,此时由桩基与冻土间的摩擦力提供的强度为残余强度^[20]。桩为均质桩,表面粗糙度一致,摩擦力基本保持恒定,本阶段内的桩与冻土间的摩擦力与温度相关,温度越低时,对应的桩与冻土间的摩擦力越大,这与冻土强度的特性有关。原因是在较低的温度下,冻土的冻结强度大,桩与冻土接触更为紧密,相互之间的咬合力大,因此摩擦力越大。

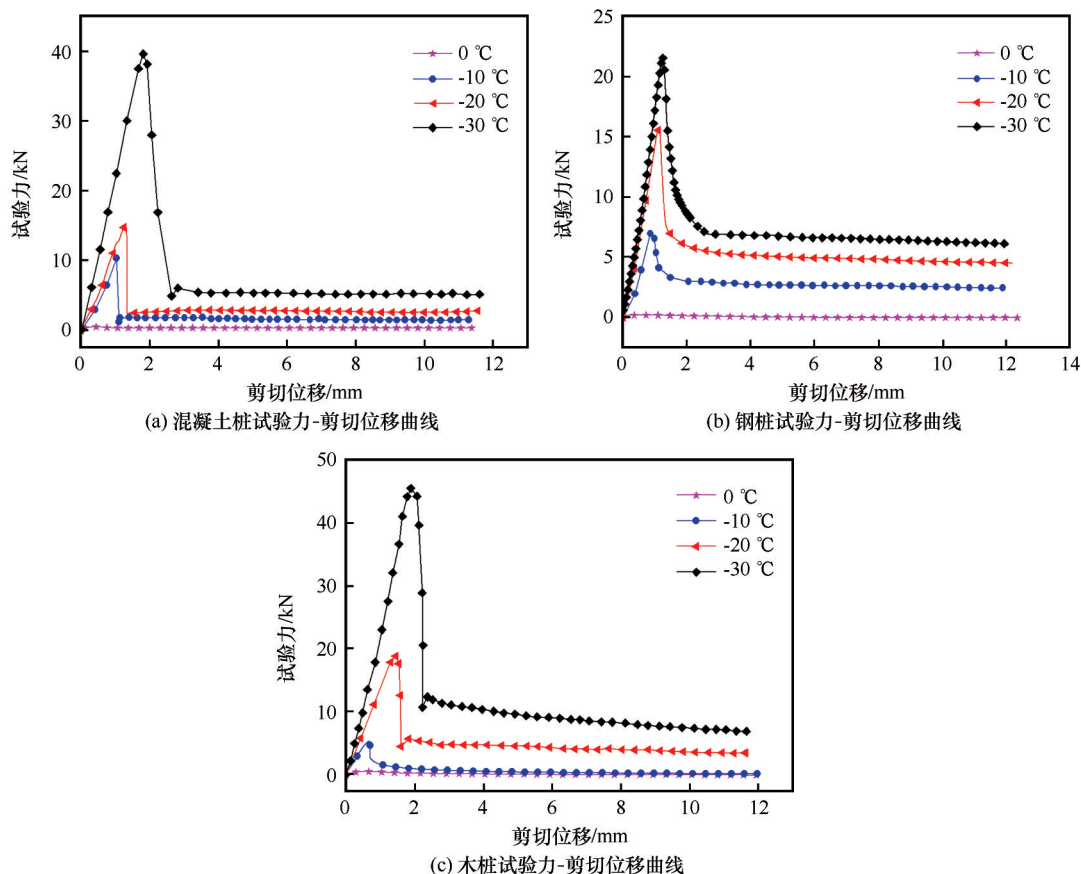


图4 冻结黏土中桩的试验力-剪切位移曲线

Fig. 4 Experimental curves between shear force and shear displacement of piles in frozen clay for concrete pile (a), steel pile (b) and wooden pile (c) under various temperatures

2.2 冻结强度

根据冻结强度的定义^[3-4], 冻土与桩接触面间的剪切强度即为冻结强度, 剪切强度为桩基侧表面与土冻结为整体后所能承受的最大剪应力。因此根据上述定义, 在剪切力-剪切位移曲线中, 剪切力的最大值对应的表征应力即为冻结强度, 计算公式如下:

$$\tau_f = \frac{F_f}{S} \quad (2)$$

式中: τ_f 为冻结强度(kPa); F_f 为剪切力(kN); S 为桩土接触面面积, 为0.0157 m²。将不同温度下的各类桩的冻结强度绘制曲线, 如图5所示, 将实测值进行拟合, 得到的拟合函数如表3所示。

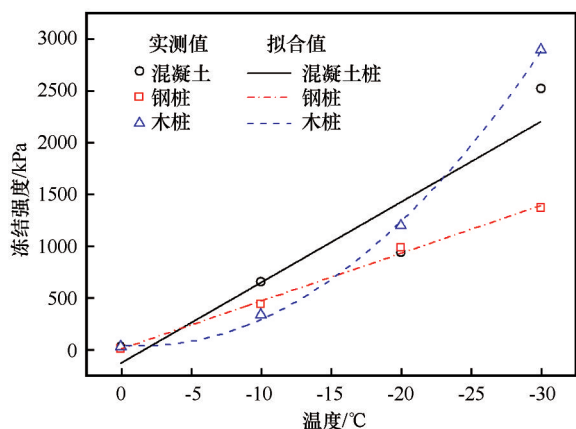


图5 冻结强度与温度的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of freezing strength and temperature

表3 冻结强度与温度的拟合公式

Table 3 Fitting formula of freezing strength and temperature

桩的类型	拟合方程	R^2
混凝土桩	$\tau_{fc} = -77.713T - 128.127$	0.840
钢桩	$\tau_{fs} = -46.197T + 9.325$	0.994
木桩	$\tau_{fw} = 3.478T^2 + 9.849T + 45.647$	0.998

从图5可以看出, 三类桩体均随着冻结温度的升高, 冻结强度出现下降的趋势。其中在-30℃时, 木桩的冻结强度最大, 混凝土桩次之, 钢桩最小, 在-20℃时, 木桩的冻结强度最大, 混凝土桩与钢桩接近, 在-10~0℃之间时, 混凝土桩、钢桩与木桩冻结强度区别不大, 0℃时三类桩强度近似相等。原因是土中的水分对不同材质的桩体的浸润程度不同, 三种材质桩的水分浸润程度为木桩>混凝土桩>钢桩, 当温度越低时, 水分浸润程度大的桩体对应的桩土界面处的冰胶结强度越大, 冻结强度主要与桩土界面处的冰胶结能力有关。因此

当较低温度时, 三类桩与冻土接触面处的冻结强度大小排序为木桩>混凝土桩>钢桩。将三类桩的冻结强度与温度之间的关系进行拟合, 发现混凝土桩与钢桩对应的冻结强度与温度之间关系呈线性函数, 与文献[21]和[22]中冻土与结构接触面之间的直剪试验得到的结论相符, 而木桩的冻结强度与温度之间的关系呈二次函数形式, 和混凝土桩、钢桩与冻土之间的冻结强度-温度拟合得到的线性关系存在区别。在冻结强度与温度关系的曲线中, 负温下的冻结强度远大于0℃时的冻结强度, 其原因是相对于0℃而言, 冻土中的水分在负温作用下出现冻结, 未冻水含量随温度降低不断减少, 未冻水在桩土界面间形成一层冰膜, 并在微小温度梯度作用下向桩土介质接触面间迁移, 导致桩与土接触面处出现冰胶结作用力^[1,23]。此外, 土体冻结产生的冻胀对桩表面的咬合力增加, 导致桩与冻土间冻结强度较大。

2.3 残余强度

在桩与冻土间的试验力-剪切位移曲线中, 峰值剪切力由冰胶结力与桩冻土间摩擦力组成。在第三阶段时冰胶结力消失, 此阶段的试验力可近似为冻土与桩之间的摩擦力, 峰值剪切力与摩擦力的差值可近似为冰胶结力^[20]。用摩擦力以及冰胶结力除以桩土的接触面积来计算表征应力值, 此时对应的表征应力分别为冰胶结强度以及残余强度。将计算出的冰胶结强度与温度的关系进行绘图, 如图6所示, 将计算出的残余强度与温度的关系进行绘图并拟合, 曲线如图7所示, 拟合公式如表4所示。

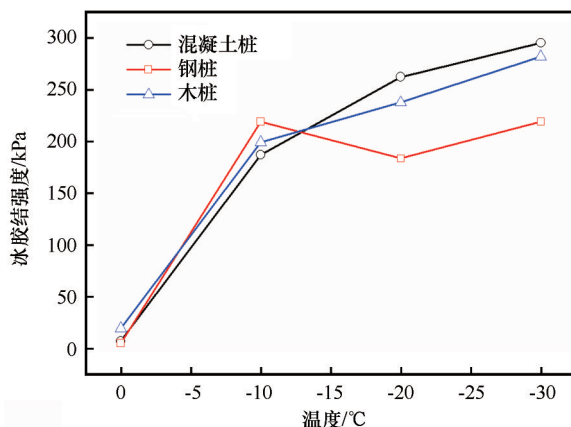


图6 冰胶结强度与温度的关系曲线

Fig. 6 Relationship between ice cementation strength and temperature

由图6可知, 在负温度作用下, 桩与冻土间的冰胶结强度迅速增大, 三类桩在0℃时, 胶结强度接近于0, 其他负温度下, 冰胶结强度远大于0, 温

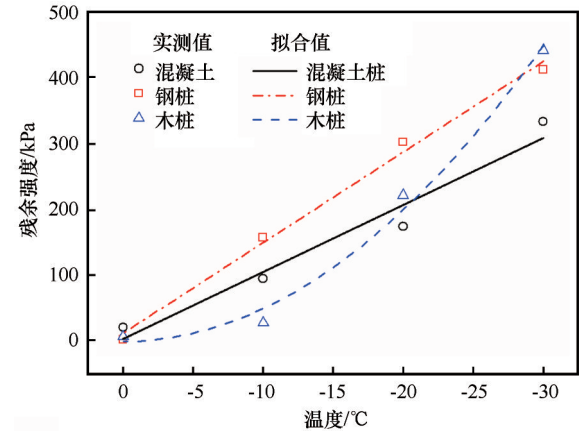


图7 残余强度与温度的拟合曲线
Fig. 7 Fitting curve of residual strength and temperature

表4 残余强度与温度的拟合公式

Table 4 Fitting formula of residual strength and temperature

桩的类型	拟合方程	R^2
混凝土桩	$\tau_{rc} = -10.181T + 2$	0.941
钢桩	$\tau_{rs} = -13.774T + 10.764$	0.992
木桩	$\tau_{rw} = 0.499T^2 - 0.016T - 1.755$	0.974

度为-10℃时，三类桩冰胶结强度均大于185 kPa，三类桩在相同的冻结温度下冰胶结强度区别不大。原因是在0℃时，土中的水分会产生少量的冰晶，并未形成冰晶联结体，因此在桩与土体接触面间的冰胶结强度很小，当温度达到负温时，桩与土体的传热性质存在区别，因此桩土二种介质接触面间会先出现薄的一层冰膜，土体中的气态及液态水分会向薄层冰膜处迁移，冰膜厚度逐渐增大^[23-24]，桩土界面处结冰，形成冰胶结强度，将桩与土体冻结为整体。冰胶结强度受土体含水量、土体性质及桩的材质影响。

由图7所示，残余强度与温度相关，温度越低时，三类桩对应的残余强度越大，与文献[20]中的冻土-混凝土结构接触面之间的直剪试验结果相符。二者间规律同冻结强度与温度之间的规律类似，混凝土桩以及钢桩与冻土间的残余强度-温度关系呈线性规律，木桩与冻土间的残余强度-温度关系呈二次函数关系。

2.4 破坏允许位移

剪切力-剪切位移曲线中峰值剪切力对应的位移称为破坏允许位移，将三类桩的破坏允许位移与温度之间的关系绘图并拟合，如图8所示。图形显示在-30~0℃范围内，破坏允许位移均处于2 mm以内，且桩冻土间的破坏允许位移与温度之间存在

良好的线性关系，温度越低，桩体对应的破坏允许位移越大。原因是桩与冻土经历恒温冻结后整体处于一种热平衡状态^[24]，在试验过程中保持着缓慢的加载速率，且试样一直被冰袋包裹，试样与外界温度热传递作用缓慢，因此加载中桩土界面出现相对位移趋势时，桩与冻土之间热平衡状态也出现变化的趋势，当发生微小位移时，土体在更低的温度下能更快速达到新的平衡状态，所以桩与冻土界面出现剪切峰值时对应的破坏允许位移越大。在-30℃时木桩对应的破坏允许位移要大于混凝土桩与钢桩，说明允许破坏位移与桩的刚度有关系，在低温时，木桩的刚度小，能够抵抗的变形程度大。拟合直线的斜率的绝对值代表桩与冻土间破坏位移受温度影响的程度大小，直线越陡，说明破坏允许位移受温度影响越大。其中木桩对应的直线斜率绝对值最大，木桩的破坏允许位移受温度影响最大，其次是混凝土桩，钢桩对应的破坏允许位移受温度影响程度最小。

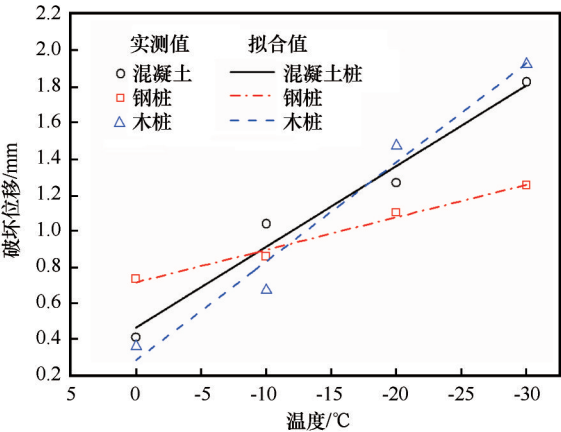


图8 破坏允许位移与温度的拟合曲线
Fig. 8 Fitting curve of allowable displacement of failure and temperature

表5 破坏允许位移与温度的拟合公式

Table 5 Fitting formula of allowable displacement of failure and temperature

桩的类型	拟合方程	R^2
混凝土桩	$s_c = -0.044T + 0.467$	0.959
钢桩	$s_s = -0.018T + 0.716$	0.979
木桩	$s_w = -0.054T + 0.288$	0.961

3 结论

为研究冻土与桩接触面之间的剪切特性，选取粉质黏土与混凝土桩、钢桩、木桩三类桩为研究对

象,通过自制的持土容器将桩与土冻结为整体,分别在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下展开压桩剪切试验,得到了不同温度下三类桩与冻土接触面间的剪切特性。主要结论如下:

(1)利用自制的持土容器将桩与土体冻结在一起,简化了试验装置,采用压桩法测试桩与冻土之间的剪切特性较为贴近实际状况。

(2)在负温时桩与冻土接触面的剪切力与剪切位移曲线分为三阶段,随着相对位移的增加,剪切力先线性增加,达到峰值剪切力后出现脆性破坏,剪切力骤降,最后剪切力趋于平缓,混凝土桩、钢桩、木桩的峰值剪切力值随温度降低而增大。

(3)桩与冻土接触间的冻结强度随着温度的降低而增大,在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,三类桩与冻土接触面间的冻结强度排序为木桩>混凝土桩>钢桩。混凝土桩、钢桩对应的冻结强度及残余强度与温度的关系可用线性拟合,木桩对应的冻结强度及残余强度与温度的关系可用二次多项式拟合,三种桩的破坏允许位移与温度的关系均呈现线性规律。

参考文献(References):

- [1] Tong Changjiang, Guan Fengnian. Frost heaving and the prevention of freezing damage[M]. Beijing: China Water Power Press, 1985. [童长江, 管枫年. 土的冻胀与建筑物冻害防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.]
- [2] Liu Wanfu, Cao Yang, Cong Rili, et al. Study on the frost damage and its control measures of the electric power tower foundation in high latitude permafrost regions in China[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(10): 119–124. [刘万福, 曹阳, 丛日立, 等. 我国高纬度多年冻土区电力杆塔常见冻害问题分析及治理措施[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(10): 119–124.]
- [3] Tsytoich H A. Subgrade and foundation on permafrost[M]. Beijing: China Industry Press, 1962. [崔托维奇. 冻土上的地基与基础[M]. 北京: 中国工业出版社, 1962.]
- [4] Dong Shengshi, Dong Lanfeng, Wen Zhi, et al. Study of constitutive relation of interface between frozen Qinghai-Tibet silt and concrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1629–1633. [董盛时, 董兰凤, 温智, 等. 青藏冻结粉土与混凝土基础接触面本构关系研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1629–1633.]
- [5] Tsytoich H A. Frozen soil mechanics[M]. Zhang Changqing, Zhu Yuanlin, trans. Beijing: Science Press, 1985. [崔托维奇. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [6] Wu Ziwang. Frozen soil engineering classification[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(4): 43–48. [吴紫汪. 冻土工程分类[J]. 冰川冻土, 1982, 4(4): 43–48.]
- [7] Lü Peng, Liu Jiankun. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(2): 106–110. [吕鹏, 刘建坤. 冻土与混凝土接触面直剪试验研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(2): 106–110.]
- [8] Zhao Lianzhen, Yang Ping, Wang Jianguo, et al. Impacts of surface roughness and loading conditions on cyclic direct shear behaviors of an artificial frozen silt-structure interface[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 106: 183–193.
- [9] Zhao Lianzhen, Yang Ping, Wang Jianguo, et al. Cyclic direct shear behaviors of frozen soil-structure interface under constant normal stiffness condition[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 102: 52–62.
- [10] Wang Hengxing, Yang Lin. Experimental study on the reinforcement of herbaceous plant roots under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 792–801. [王恒星, 杨林. 冻融作用下草本植物根系加固土体试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 792–801.]
- [11] Wen Zhi, Yu Qihao, Zhang Jianming, et al. Experimental study on adfreezing bond strength of interface between silt and foundation of Qinghai-Tibetan transmission line[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2262–2267. [温智, 俞祁浩, 张建明, 等. 青藏直流输电工程基础冻结强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2262–2267.]
- [12] Wen Zhi, Yu Qihao, Ma Wei, et al. Direct shear tests for mechanical characteristics of interface between Qinghai-Tibetan silt and fiberglass reinforced plastics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Suppl 2): 45–50. [温智, 俞祁浩, 马巍, 等. 青藏粉土-玻璃钢接触面力学特性直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 45–50.]
- [13] Shi Quanbin, Yang Ping, Tan Jinzhong, et al. Development of measuring system by pile-pressing method and experimental study on adfreezing strength at interface between frozen soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 139–147. [石泉彬, 杨平, 谈金忠, 等. 冻土与结构接触面冻结强度压桩法测定系统研制及试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 139–147.]
- [14] Shi Quanbin, Yang Ping, Zhang Yingming. Adfreezing strength at the interface between frozen soil and structure: research status and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6): 1298–1306. [石泉彬, 杨平, 张英明. 冻土与结构接触面冻结强度研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1298–1306.]
- [15] Sun Zhaohui, Bian Hanbing, Lu Xiangyu. Direct shear tests of interface between salinized frozen soil and concrete lining[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 556–562. [孙兆辉, 卞汉兵, 鹿翔宇, 等. 盐渍化冻土-混凝土衬砌接触面直剪试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 556–562.]
- [16] Penner E, Gold L W. Transfer of heaving forces by adfreezing to columns and foundation falls in frost-susceptible soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1971, 8(4): 514–526.
- [17] Parameswaran V R. Adfreeze strength of frozen sand to model piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(4): 494–500.
- [18] Yang Zongwei. Laboratory investigation on thermal conductivity of typical soil in northeast Inner Mongolia during freezing and thawing process[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2018. [杨宗维. 冻/融过程中内蒙古东北部典型土体导热系数的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.]
- [19] Roggensack W D, Morgenstern N R. Direct shear tests on natural fine-grained permafrost soils[C]//Proceedings of the 3rd International Permafrost Conference, July 10-13, 1978, Edmonton, Alberta. Canada: 1978: 728–735.
- [20] He Pengfei, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Study on freezing

- strength characteristics and formation mechanism of frozen soil-concrete interface[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(23): 127–133. [何鹏飞, 马巍, 穆彦虎, 等. 冻土-混凝土界面冻结强度特征与形成机理研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 127–133.]
- [21] Shi Quanbin, Yang Ping, Wang Guoliang. Experimental study on adfreezing strength of the interface between artificial frozen sand and structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2142–2151. [石泉彬, 杨平, 王国良. 人工冻结砂土与结构接触面冻结强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2142–2151.]
- [22] Liu Jiankun, Lü Peng, Cui Yinghui, et al. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 104: 1–6.
- [23] He Fei. Experimental research on regular patterns of water migration and mechanism of the formation of ice films between different mediums in freezing silty clay [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013. [何菲. 正冻粉质黏土水分迁移规律与不同介质间冰膜形成机理的试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.]
- [24] He Fei, Wang Xu, Jiang Daijun, et al. Thoughts on the research of behaviors of frozen soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12 (Suppl 1): 133–139. [何菲, 王旭, 蒋代军, 等. 关于冻土与结构接触面特性研究的几点思考[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊1): 133–139.]

Experimental study on shear characteristics of the interface between the frozen silty clay and the pipe foundation

LIU Qinghe, WANG Yongtao, XU Xiangtian, ZHAO Yuqin,
LI Gaosheng, ZHANG Weidong

(Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China)

Abstract: The pile foundation freezing uplift in cold region engineering is closely related to the shear behaviors of interface between the frozen soil and pile foundation. With the help of a self-design apparatus, series of the shear tests for concrete piles, steel piles and wood piles embed in gen-he silty clay at different freezing temperatures were carried out by using the static pressed pile method. Some conclusions can be obtained. At negative temperature, with the increased of shear displacement, the shear force experienced three stages: linear increased stage, brittle failure with an abrupt drop stage, and a stability stage. The lower the temperature, the greater the cementation force of ice between the pile and frozen soil. As a result, the freezing strength, the residual strength, and the allowable displacement of failure was higher in the lower negative temperature. It was worth mentioning that the freezing strength between the wooden pile and frozen soil interface was the highest, followed by that between the concrete pile and frozen soil interface, all big than that between the steel pile and frozen soil interface. The freezing strength and residual strength of the concrete pile and the steel pile had a linear relationship with the frozen temperature. However, the freezing strength and residual strength of the wooden pile has a quadratic function relationship. The allowable displacement of failure of the three kinds of piles had linear correlation with frozen temperature. This study is expected to provide a reference for the research on the shear characteristics between the frozen soil and the pile interface, and also supposed to help solving the pile foundation freezing uplift problem in cold region engineering.

Key words: the static pressed pile method; pile-soil interface; freezing strength; residual strength; failure displacement

(责任编辑: 温智; 编辑: 庞瑜, 周成林)