

# 大气温度升高下冻土桩负摩阻力试验研究<sup>\*</sup>

唐丽云<sup>1</sup>, 王鑫<sup>1</sup>, 杨更社<sup>1</sup>, 金龙<sup>2</sup>, 王晓刚<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710000)

**摘 要:** 全球气温变暖, 冻土的上限下移使得桩周土体融沉量改变进而引起桩侧负摩阻力的变化, 最终影响桩基长期服役性能。为了研究大气温度升高对冻土区桩侧负摩阻力的影响, 基于查拉坪大桥 16 号桩实际地勘资料, 考虑大气温度升高预测 10、30、50、70 年后桩侧土体温度场变化, 并基于预测的温度场开展室内模型试验, 研究当年、10、30、50、70 年后冻土桩桩侧负摩阻力的变化规律。试验得到冻土桩桩侧负摩阻力在 10 年、30 年、70 年分别为 5.2 kPa、2.4 kPa、2.0 kPa。分析认为, 在当年工况到 10 年后工况过渡的阶段, 由于桩体和大气温度的共同作用, 桩侧冻结力明显减小, 桩侧产生较大的负摩阻力; 随着年份的增加, 较深处地温的降低使得桩侧冻结力明显增加, 因此桩侧负摩阻力逐渐减小。

**关键词:** 大气温度升高; 冻土区; 负摩阻力; 模型试验

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)06-1527-09

## Experimental Study on Negative Friction Resistance of Pile in Frozen Soil under Raising Atmospheric Temperature

Tang Liyun<sup>1</sup>, Wang Xin<sup>1</sup>, Yang Gengshe<sup>1</sup>, Jin Long<sup>2</sup>, Wang Xiaogang<sup>1</sup>

(1. Xi'an University of Science and Technology, School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an 710054, P.R. China;  
2. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710000, P.R. China)

**Abstract:** The moving downward of the upper bound of frozen soil with global warming caused the increase of thaw settlement of the soil around pile, weakened the negative frictional resistance, and finally adversely affected the long-term performance of the pile in permafrost regions. To study the influence of raising atmospheric temperature on the negative frictional resistance of piles, according to the data on No. 16 pile of the Chalaping Bridge, the temperature field of soil around the pile after 10, 30, 50 and 70 years was first predicted, and the corresponding negative frictional resistance of the frozen piles in these years was also analyzed by physical model tests that were conducted on the basis of simulated temperature field. The negative frictional resistance of frozen piles was 5.2 kPa, 2.4 kPa, and 2.0 kPa after 10, 30, and 70 years respectively. It's indicated that the freezing force on the pile side decreased and the negative friction resistance of the pile increased 10 years later because of the influence of the pile and atmospheric temperature; the ground temperature decreased with the increase of the predicted period, making the freezing force increase significantly and the freezing force decrease gradually.

**Keywords:** rising atmosphere temperature; frozen soil area; negative friction resistance; model test

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-06-27(修改稿)

作者简介: 唐丽云(1977-), 女, 湖南祁阳人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、寒区工程等领域的教学与科研工作。

E-mail: tangly@xust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(41502298); 中国博士后基金(2017M613293XB)

## 0 引言

土体的下沉会对桩基产生向下的下拽力,即负摩阻力,负摩阻力的产生使地基非但不能分散桩体受力,反而增加了桩基受力。随着气温升高,加之多年的冻土退化,高温下多年冻土区土体结构会发生巨大变化,从而导致桩土相互作用发生变化,使得冻土中桩基负摩阻力对桩基的影响不容忽视。桩侧负摩阻力随温度的变化,关系到桩基在设计使用年限内能否满足结构的功能要求,因此,研究大气温度变化,对桩侧负摩阻力、冻土理论和工程实际的影响都具有重要的理论研究意义和工程应用价值。

关于融土中的负摩阻力问题,众多学者做了大量研究。赵明华等<sup>[1]</sup>从桩土相互作用机理出发,根据软土压缩曲线性质,推导了软土地基桩侧土沉降随深度和时间变化的计算公式。戴国亮等<sup>[2]</sup>进行了两侧边载作用下砂土中单桩和3×3群桩负摩阻力试验,比较了两侧边载情况与围载情况下的负摩阻力分布规律。夏力农等<sup>[3]</sup>分析了带负摩阻力桩基的荷载传递特点,通过一个工程实例说明了带负摩阻力桩的承载力评价的缺陷并提出了带负摩阻力桩设计与检测的合理方法。吕世斌等<sup>[4]</sup>对桩基中性点深度取值及负摩阻力计算方法进行了讨论,并给出了如何减小负摩阻力的可靠方法。聂如松等<sup>[5]</sup>对负摩阻力作用下的单桩承载性状、负摩阻力与工作荷载之间的关系进行理论分析。程学军等<sup>[6]</sup>将理论与工程实例相结合,评估负摩阻力对项目的影响。王建华等<sup>[7]</sup>使用比奥一维固结理论及积分变换方法,探讨了负摩阻力群桩受力等相关问题,得出群桩沉降变形、轴向应力、孔隙压应力及桩侧负摩阻力在桩周圆形均布堆载作用下随时间的影响曲线。李广信等<sup>[8]</sup>通过室内试验研究发现,加载位置及加载方向对桩侧受力传递均有较大影响。陆明生<sup>[9]</sup>提出了经验公式计算单桩下拽力,并得出在实际工程中,将填土超载分级加载可以有效地降低桩上的负摩阻力。针对桩侧负摩阻力,以上学者对桩基设计中桩侧土负摩阻力的产生机理、产生原因及影响负摩阻力的因素以及减小负摩阻力的方法已有大量成果。然而,针对高温多年冻土地区,桩侧负摩阻力的文献相对较少。

周国庆<sup>[10]</sup>对饱水砂层中结构的融沉附加力进行研究得出,在整个冻砂融化下沉过程中模型结构融沉附加力经历急升、急降与稳定3个阶段。王建

州等<sup>[11]</sup>研究了冻土上限的下移会导致桩基承载力急剧的下降。Crowther<sup>[12]</sup>提出了一种分析水平荷载对于冻土区桩基影响的方法,模拟了桩侧荷载传递情况。丁靖康等<sup>[13]</sup>研究了冻融过渡带土体力学性质,指出冻融过渡带含水量大,未冻水含量高,其土体抗剪强度以主,内摩擦角很小,且过渡带上的抗剪强度大于已融土抗剪强度。Tang等<sup>[14]</sup>基于冻土电阻率变化,准确测试了冻融过渡段的未冻水含量,指出未冻水含量对冻融土力学性质影响。李浩伟<sup>[15]</sup>对冻土融化过程中桩土相互作用机理进行了研究,并指出在桩土相互作用的第三、第六和第八阶段桩折断的可能性最大。徐春华<sup>[16]</sup>对冻土工程桩负摩阻力试验进行了研究,并得出负摩阻力随时间变化分3个阶段,负摩阻力最大值随含水率的增大而减小。孙建波等<sup>[17]</sup>进行室内冻土与混凝土圆柱间负摩阻力试验,得到土的融沉量与桩体单位负摩阻力关系曲线。唐丽云等<sup>[18]</sup>对大气温度变化下冻土区桩基承载力进行预测。

目前,国内对于气候变化及经济活动影响下冻土工程的地质评价以及结构稳定性变化趋势预报等方面的工作尚处于起步阶段,以桩侧负摩阻力变化和以未来气候升高为主导因素对冻土区桩基承载力影响的研究相对较少。本文基于查拉坪大桥16号桩实际地勘资料,考虑大气温度升高,得到10年、30年、50年、70年后桩侧土体温度场的变化,利用温度场模拟结果开展室内模型试验,研究当年、10年、30年、50年、70年后冻土桩侧负摩阻力的变化规律。

## 1 大气温度升高下冻土区桩侧负摩阻力模型试验测试

为了研究大气温度升高下冻土区桩侧负摩阻力的变化规律,以查拉坪大桥实际工程为依托计算10年、30年、50年、70年后桩周土体温度场的变化,以对应年份地温场的变化作为室内模型试验工况划分的依据,开展室内模型试验。

### 1.1 数值模型建立及计算

本文选取共和至玉树(结古)公路一期工程查拉坪大桥为本课题的桩基试验依托工程。结合查拉坪大桥地质钻孔资料及地温监测结果,以查拉坪大桥16号桩基作为数值计算设计参考模型。如图1所示,数值模型计算区域由混凝土桩及四层土层组成,桩长28 m,桩径为1.4 m,土层从上到下依次为2 m杂填土,4 m粉质黏土,8 m含砾黏土,50 m

强风化泥岩层。

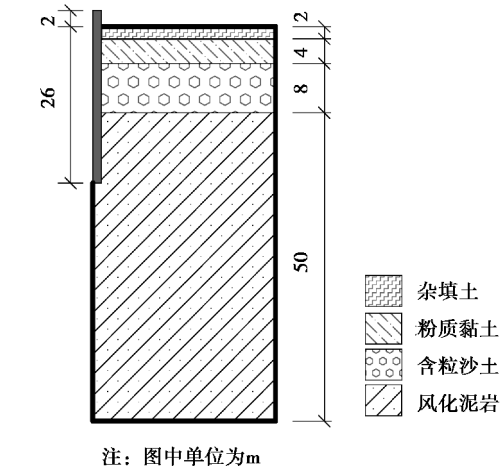


图1 数值计算模型

Fig. 1 Numerical calculation model

1.1.1 初始条件和边界条件确定

本文数值计算模型是模拟查拉坪大桥16号桩基地温场的变化特征。本文采用ABAQUS有限元软件进行计算,有限元数值计算模型的初始温度条件根据图2中2013年实测地温值确定。边界条件为所研究的区域边界与外界环境的相互作用,要得到土体温度场,必须加入土体边界条件。温度边界条件有三类边界条件:第一类边界条件给出边界的温度值或温度函数,第二类边界条件给出边界的热流密度,第三类边界条件给出边界的热流交换情况。对于研究冻土温度场的分布,模型上、下表面一般为第一类边界条件,即设定温度值或温度函数,土体侧面不传递温度,将热流密度设为零。本次温度场计算,根据青藏高原地区气象观测资料及附面层原理,天然地表的温度边界条件为:

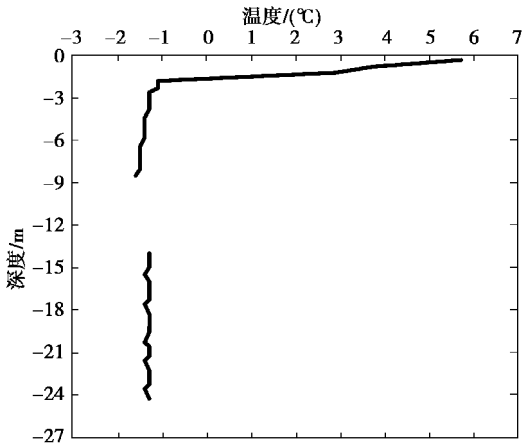


图2 初始地温曲线

Fig.2 Initial ground temperature curve

$$T_n = -1.5 + 12\sin\left(\frac{2\pi}{8760}t_h + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2.6 \times t_h}{8760 \times 50}$$

(1)

式中: $t_h$ 为时间,单位为h,当 $t_h=0$ 时,对应试验路所在地区的时间为8月初。定义两侧边界为绝热边界,即温度梯度为0。将天然地表温度边界以幅值形式输入。

1.1.2 数值计算模型的材料热物理参数的选取

由于冻土的热敏感型,使得其导热系数和比热也是随温度的变化而变化,因此在本次数值模拟中将土体在正温和负温下的导热系数、比热分开考虑,根据《冻土工程地质勘察规范》(GB 50324—2014)确定本次数值模拟各土层各项热物理参数如表1所示。

表1 材料的热物理参数

Table 1 Thermo-physical parameters of materials

材料 类型	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	导热系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )		容积热容量/ ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )	
		$\lambda_f$	$\lambda_u$	$C_f$	$C_u$
杂填土	1 700	2.20	1.68	1 593	2 083
粉质黏土	1 890	1.351	1.125	1 879	2 357
含砾黏土	1 500	2.12	1.36	1 697	2 163
风化泥岩	2 500	2.70		2 122	2 413
混凝土	2 400	2.94		2 075	

注:表中下标 $u$ 、 $f$ 分别代表融化和冻结状态。

1.1.3 未来70年桩土体系地温场温度变化

由于在高温多年冻土区桩侧负摩阻力受桩周土体融沉量影响较大,一般认为10月份是冻土融化深度最大的月份,故根据运算结果分别提取当年、10年、30年、50年、70年后10月份地温场变化如图3所示。

1.2 试验设备及材料

1.2.1 模型试验箱融沉监测设备

试验利用步入式多功能环境模型试验箱来完成。试验箱系统主要由制冷系统、冻融系统、温控系统、数据采集系统组成。试验箱内气温由电脑温控器控制,控制精度为 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。箱内气温控制范围为 $-40\text{ }^\circ\text{C} \sim +85\text{ }^\circ\text{C}$ ,均匀度为 $2.0\text{ }^\circ\text{C}$ 。试验箱内有两个试验槽,尺寸均为 $4.0\text{ m} \times 1.1\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ ,试验槽之间由隔板隔开。模型试验箱示意图如图4所示。

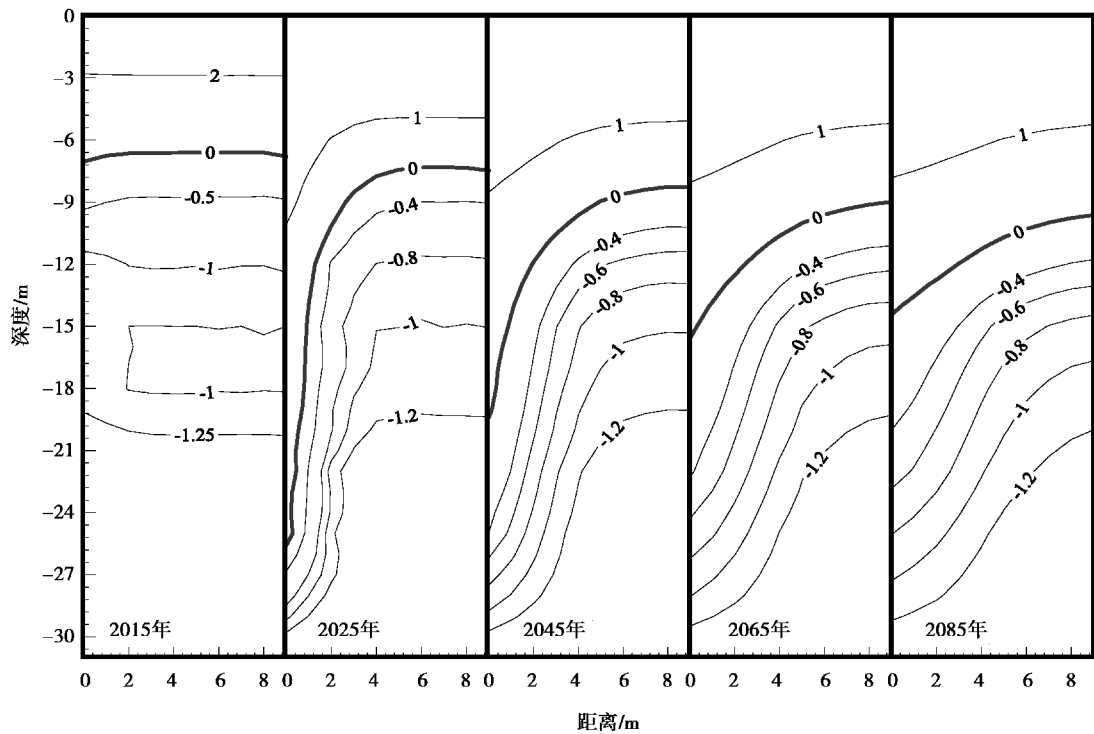


图 3 2015~2085 年桩周地温分布状况

Fig. 3 Distribution of ground temperature in piles from 2015 to 2085

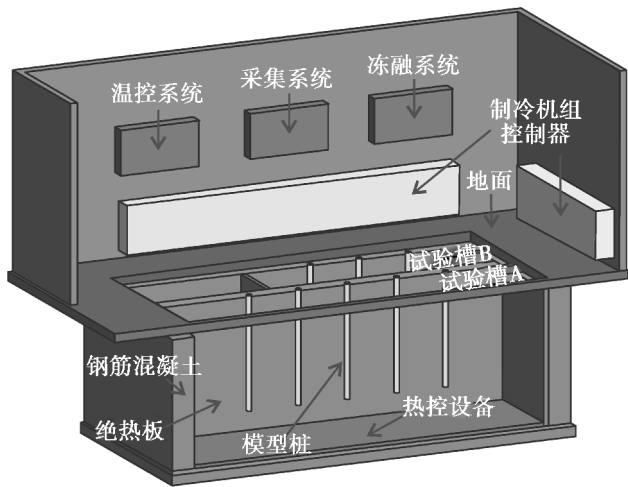


图 4 模型试验箱示意图

Fig.4 Schematic diagram of model test chamber

为了得到试验过程中桩周土体的位移,利用 Leika Nova MS60 全站扫描仪扫描土体在不同工况下的高程变化。此设备是由西安科技大学与徕卡公司设备开发部门联合研制的高精度激光扫描设备,设备扫描精度可以满足试验要求(0.01 mm),试验仪器设备如图 5 所示。

1.2.2 模型桩及试验填土

室内模型试验依托共和至玉树公路查拉坪大桥桩基工程,故模型桩的尺寸以共和至玉树公路查拉坪特大桥 16 号桩作为试验桩基原型。模型桩的

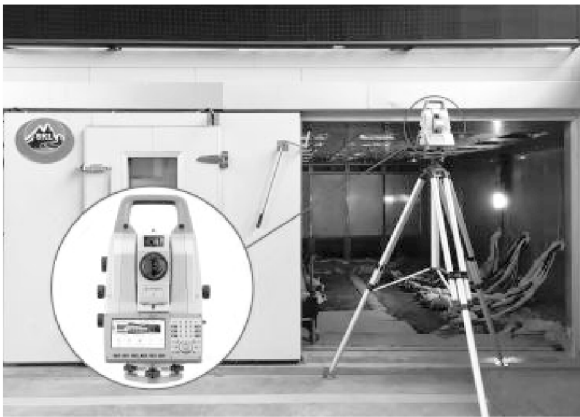


图 5 Leika Nova MS60 全站扫描仪

Fig.5 Leika Nova MS60 total station scanner

相似常数确定应考虑几何相似、材料相似和强度相似。对于桩周土体,由于试验土体的力学性能与实际工程土体力学性能类似,所以只考虑几何相似常数,最终确定几何相似常数为 20,具体如表 2。根据共和至玉树公路桥梁桩基设计文件,桩基尺寸为:直径 1.4 m,桩长 28 m。由几何相似比可知,室内模型桩基直径为 7 cm,桩长为 1.4 m。根据试验槽的实际条件,本次试验在 1 号试验槽中设 5 根桩,2 号试验槽中设 3 根桩,8 根桩桩体埋深均为 130 cm。试坑内土体成分及含水率配置参考查拉坪大桥现场工程勘察报告进行。试坑中填土高度



为 180 cm,沿深度方向由上至下各试验土层厚度 及其物理参数如表 3 所示。

表 2 模型桩试验参数

Table 2 Model pile test parameters						
参数	几何比例	桩径/m	桩长/m	埋深/m	桩体材料	试验材料
模型	1	0.07	1.4	1.3	混凝土	土、水
实际	20	1.4	28	26	混凝土	土、水

表 3 原型及模型试验中土体物理力学常数

Table 3 Physico-mechanical constants of soil in prototype and model tests								
土体类型	厚度/m		弹性模量/MPa		体积质量/(kg·m <sup>-3</sup> )		水分含量/%	
	原型	模型	原型	模型	原型	模型	原型	模型
杂填土	2	0.1	14~20	12~28	20		30	
粉质黏土	4	0.2	24~28	25~30	21		40	
砂土	8	0.4	38~44	33~42	23		20	
风化泥岩	22(50)	1.1	30~34	28~35	18		10	

在两个试验槽中填土埋桩,同时埋置温度传感器与压力传感器。首先铺筑 10 cm 厚度土层,然后按照设计含水率计算需水量,并均匀喷洒到土的表面。为了使土层含水率均匀,采用喷雾器进行洒水,洒水完成后将用塑料薄膜布盖住土体表面防止水分蒸发并静置 12 h,使水分能够充分渗透。静置完成之后启动模型箱的控温装置,开始冻结土体,完成一层土的施工,其余各层土均按照类似流程施工。模型桩为钢筋混凝土预制摩擦桩,具体为桩体内置钢筋笼,外部用以混凝土浇筑成型,应变片沿钢筋长度方向布置,在钢筋骨架中的两根钢筋上布置应变片然后接线到数据采集端。土层铺完后,土体冻结完成后将桩端压力盒计数清零以便采取数据。此外在达到不同的填土高度时需进行桩、温度

传感器和压力传感器的布置,直到铺设达到指定高度。

1.3 试验工况及测点布置

1.3.1 工况划分

根据大气温度升高对桩土体系地温场的影响分析,认为在大气温度升高的情况下,桩周土体地温场的变化受到水平和竖向两个因素的综合影响。每年 10 月份是冻土区由暖季转为冷季的时间节点,以数值模拟得到的未来 10 年、30 年、50 年、70 年 10 月地温为基础,经过几何相似计算之后,得到 5 种工况下试坑内桩侧土体融化深度及 5 倍桩径处土体融化深度。根据上述分析,具体工况划分如表 4 所示。

表 4 试验工况划分

Table 4 Classification of test cases						
工况	工况 1(当年)	工况 2(10 年)	工况 3(30 年)	工况 4(50 年)	工况 5(70 年)	
地温状态	数值模拟	$M=-7\text{ m}$	$M=-25.8\text{ m}$	$M=-19.8\text{ m}$	$M=-15.6\text{ m}$	$M=-14.4\text{ m}$
		$N=-7\text{ m}$	$N=-7.5\text{ m}$	$N=-8.4\text{ m}$	$N=-9\text{ m}$	$N=-9.9\text{ m}$
	模型试验	$M=-0.35\text{ m}$	$M=-1.29\text{ m}$	$M=-0.99\text{ m}$	$M=-0.78\text{ m}$	$M=-0.72\text{ m}$
		$N=-0.35\text{ m}$	$N=-0.38\text{ m}$	$N=-0.42\text{ m}$	$N=-0.45\text{ m}$	$N=-0.50\text{ m}$

注: $M$  代表桩侧冻土上限变化值, $N$  代表距桩 5 倍桩径冻土上限变化值。

1.3.2 填土埋桩及传感器布置

试验需要在填土、冻结土体以及融化土体整个

过程中全方位监测试验地层的温度场变化,以确定填土过程中各层土的冻结情况,并在控温过程中调

整各个桩周土的融化深度,使其达到指定的工况。为此,在每根模型桩的两侧沿深度方向布置两排温度传感器,桩侧和距桩体较远的 5 倍桩径处均布置

竖向测点。设置压力传感器监测桩基加载过程中的桩端阻力的变化情况,传感器示意图如图 6 所示。

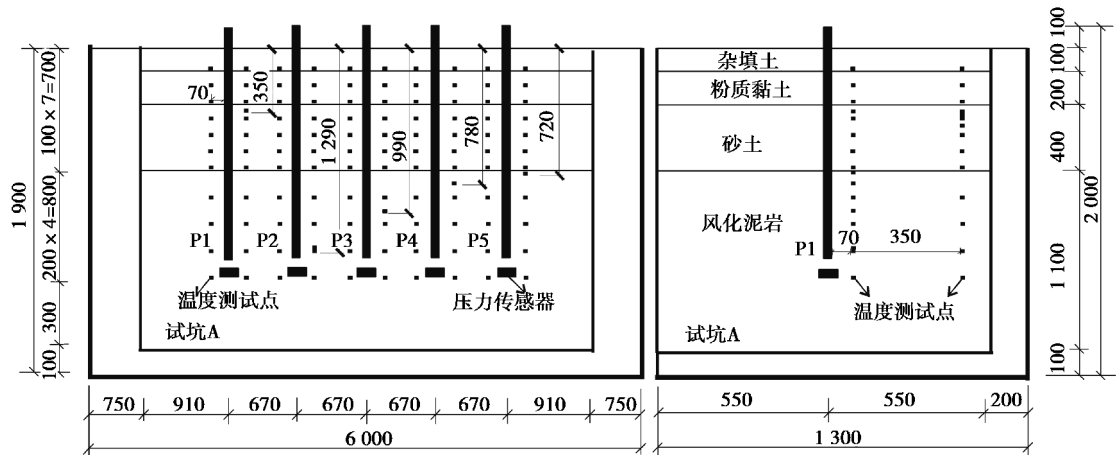


图 6 温度、压力传感器布置示意图

Fig 6 Layout of temperature sensors and earth pressure sensor

1.4 土体融沉监测及桩端阻力监测

不同工况的实现,需要控制桩周土体地温达到各工况对应的地温。地温控制分两个阶段进行,即试坑填土阶段的控温和填土完成之后的控温。试验初始地温场的调控具体过程如下:由于试验在填土过程中采用分层填土的方法进行,因此对试验土层进行分层冻结,冻结温度参考试验工况划分中的预设工况,在此过程中利用温度传感器实时监测坑内温度场变化,分析桩体不同位置融化深度的变化情况,及时调节地温的变化规律保证填土完成后的土层地温与当年工况基本一致。试验过程中温度

调控具体过程为:调节箱内温度,并实时监测各温度传感器测点的数值变化,当需要达到某一融化深度时,观察该融化深度点对应的温度传感器数值变化,当该点温度显示由负温即将转为正温时,说明该深度土体已经趋于融化,此时降低上部箱内温度,使下部温度场保持稳定,以此达到 5 种工况对应的所需冻土融化深度。其中 50 年的工况由于温度传感器失效,没有监测到数据,因此后续介绍中缺少了工况 4 的数据。各工况下土体地温场如图 7 所示。

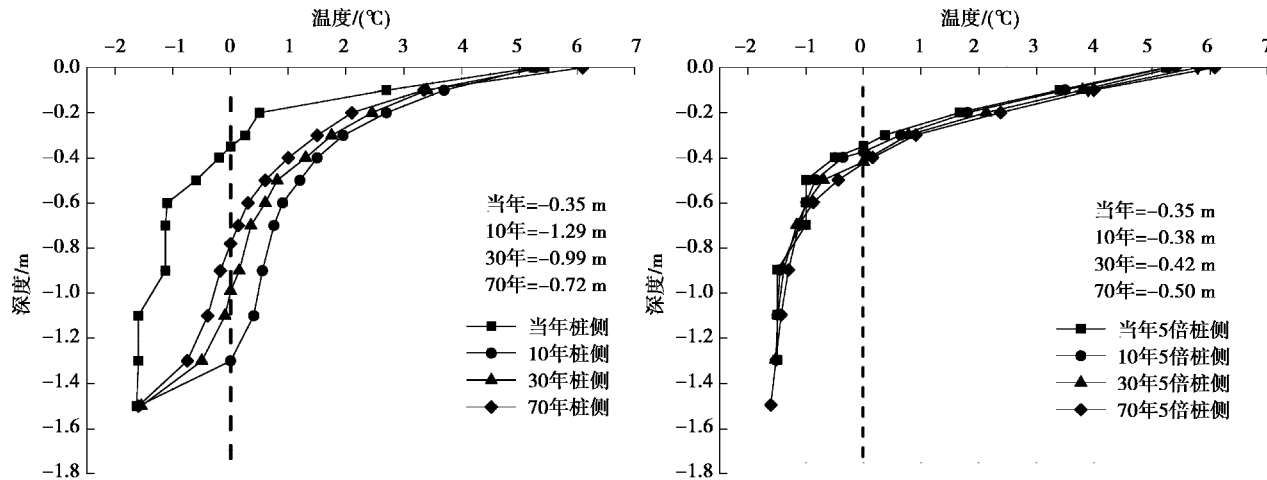


图 7 各工况下桩侧及 5 倍桩径处实验室实测地温

Fig.7 Ground temperature measured at pile side and 5 times pile diameter away from pile side for each test case

利用 Leika Nova MS60 全站扫描仪记录试验开始前(工况 1)的桩土体系高程数据。在试验过程

中,待桩土体系温度场达到试验要求之后,依次对各工况下桩土体系高程数据进行采集,利用 Geomagic qualify 软件将各工况下的高程数据与工况 1 高程数据进行 3D 比较,得到对应工况下桩土体系融沉量。

2 试验结果

试验测试了不同年份下(10 年、30 年、70 年)桩土体系融沉量,及各工况下桩端阻力的变化量。以桩土体系的融沉量和桩端阻力的变化量为基础,计算未来 10 年、30 年、70 年后冻土桩桩侧负摩阻力。

2.1 大气温度升高下桩体中性点位置变化

根据桩身应变片的数据采集,在每个工况下桩身轴力最大处为中性点的大体位置。随着融化深度的变化,中性点的位置也是随之变化。工况 1、2、3 和 5 的中性点位置如图 8 所示。

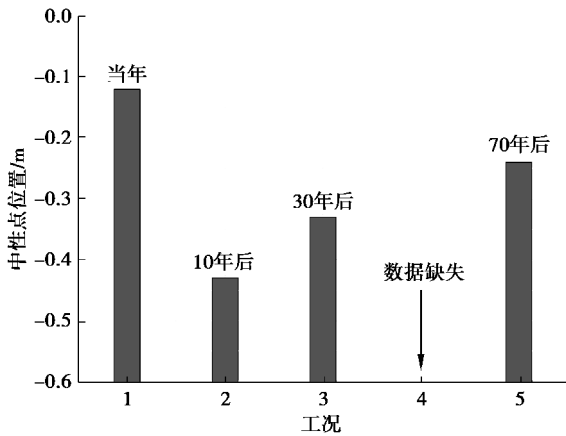


图 8 各工况下中性点位置

Fig.8 Neutral point position under different working conditions

从图 8 中可以看出,中性点位置先下移,在工况 2 达到最大,在未来年份位置逐渐上移。这是因为工况 2 的冻土上限变化最大,随着后续工况的冻土上限上移中性点位置也随之上移。

2.2 大气温度升高下桩土体系融沉变化

利用 Leika Nova MS60 全站扫描仪对试坑中的桩体、土体进行激光扫描,得到各工况下(不同的地温状态)桩土体系高程数据。利用 Geomagic qualify 软件将各工况下的高程数据与工况 1 高程数据进行 3D 比较,得到对应工况下桩土体系位移变化,如图 9 所示。

从图 9 可以看出桩土体系距桩不同位置处桩土体的沉降变化特点。图中桩周土体存在两种不同的变化趋势,如图右块部分所示离桩越近桩周土

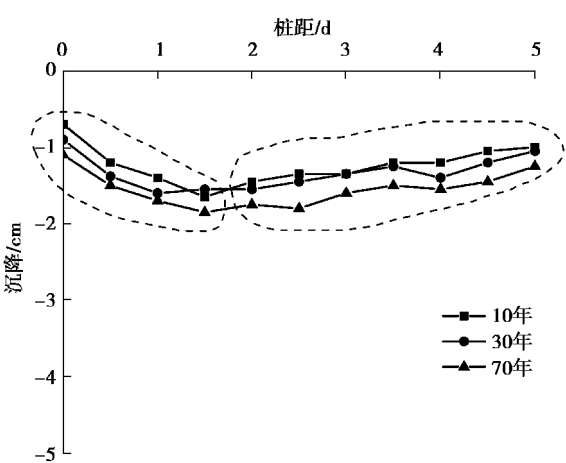


图 9 桩体下沉量及地表不同桩径位置处土体融沉量

Fig.9 Soil body sinking at different pile diameters on the ground and pile settlement

体融沉量呈现逐渐增加的趋势,原因在于在冷季冻结过程中桩土界面处土体温度场与离桩较远处温度场存在差异,使得桩周土体中产生横向的温度梯度,距桩较远处的土体水分会在温度梯度下向桩侧迁移,导致冻结过程中离桩越近的土体含水量越高,使得在暖季到来时离桩越近的土体含水量越高,因此土体固结过程所产生的沉降量自然增加。但相反的规律同样存在,如图 9 左边部分所示,桩周处土体呈现出离桩越近、沉降越小的相反规律。根据徐学燕等<sup>[19]</sup>的研究,桩体的存在会对桩周土体的变形存在约束作用,在离桩土界面 1.5 倍桩径的范围内,桩的约束作用大于桩周土体的自由沉降作用,使得在此范围内离桩越近桩周土体融沉量呈现逐渐减少的趋势。

2.3 大气温度升高下桩侧负摩阻力变化

提取当年、10 年、30 年、70 年土体及桩体沉降数据,采集各工况桩端阻力数据,整理之后的数据如表 5 所示。

表 5 各工况下桩土沉降及桩端阻力数据对比

Table 5 Comparison of pile-soil settlement and pile tip resistance data for all test cases

工况	土体沉降 /cm	桩体沉降 /cm	桩土位移差 /cm	桩端阻力 /kN
当年	0	0	0	0
10 年	0.68	0.03	0.65	1.607
30 年	0.87	0.05	0.82	0.81
70 年	1.05	0.08	0.97	0.611

由表 5 可见,随着年份增加,土体的沉降增加(最大沉降量为 1.05 cm),桩土沉降也随之增大(最大沉降量为 0.08 cm),明显看出土体沉降量大于桩体沉降量。桩土位移差增加的趋势渐缓,桩端阻力却有减小的趋势。产生这一现象的原因是根据地温场分析结果中桩侧冻土冻结范围增加,导致桩侧冻结强度增大,所以桩端阻力减小。

基于表 5 所示的测试数据,按照公式(2)进行冻土桩桩侧负摩阻力的计算:

$$f = \frac{F_n - F_0}{A_n} \quad (2)$$

式中: $f$ 为单位负摩阻力,kPa; $F_n$ 为融沉中土压力计数据计算得到的桩端压力,kN; $F_0$ 为融沉前土压力计初始数据计算得到的桩端压力,kN; $A_n$ 为桩侧与土体接触的面积, $\text{m}^2$ 。

结合表 5 的测试数据得到不同工况下的单位负摩阻力变化,如图 10 所示。

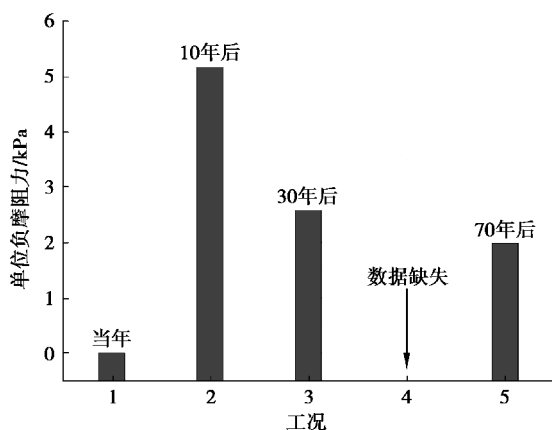


图 10 不同工况下冻土桩桩侧单位负摩阻力变化

Fig 10 Unit negative skin friction of permafrost piles for different cases

从图 10 可以明显看出,冻土桩桩侧负摩阻力在 10 年后工况下为 5.2 kPa,30 年后降低为 2.4 kPa,70 年后持续降低至 2.0 kPa。因为建模模拟的初始地温高,模型试验桩侧土体的初始地温则具有较高温度,所以土体的冻结力会明显减少,桩周土体在桩体与土体差异沉降的共同作用下会产生较大的负摩阻力。随着年份的增加,对应工况 3 和工况 5,桩周土体温度出现了不同程度的回冻,地温的回冻使得桩侧冻结力明显增加,因此桩侧负摩阻力的作用变得不再明显。

### 3 结论

为了研究大气温度升高下多年冻土区桩侧负摩阻力变化规律,利用数值分析软件对实际工程未来 70 年后的桩土体系温度场进行了预测,并以此结果作为工况划分依据设计室内试验,对大气温度升高下桩土差异沉降及桩侧负摩阻力变化规律进行研究。

(1)室内试验结果表明冻土桩桩侧负摩阻力在 10 年后工况下为 5.2 kPa,30 年后降低为 2.4 kPa,70 年后持续降低至 2.0 kPa。

(2)在从当年工况到 10 年后工况过渡的阶段,由于桩体和大气温度的共同作用,桩侧土体的地温出现明显升高的趋势,土体的冻结力明显减少,桩周土体在桩体与土体差异沉降的共同作用下会产生较大的负摩阻力。

(3)因为初始地温较高,且远大于环境升温的影响,随着年份的增加,伴随周围冻土提供冷能,所以桩周土体温度出现了不同程度的回冻。地温的回冻使得桩侧冻结力明显增加,因此桩侧负摩阻力逐渐减小。

### 参考文献 (References)

- [1] 赵明华,胡倩,杨超伟,等.考虑地基土非线性固结的桩侧负摩阻力计算方法研究[J].岩土工程学报,2016,38(8):1417-1424. (Zhao Minghua, Hu Qian, Yang Chaowei, et al. Negative skin friction of piles considering nonlinear consolidation of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1417-1424. (in Chinese))
- [2] 戴国亮,黄挺,龚维明,等.边载作用下砂土桩基负摩阻力试验[J].中国公路学报,2015,28(1):1-7. (Dai Guoliang, Huang Ting, Gong Weiming, et al. Experiment of negative skin friction for pile foundation in sand under two side load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(1): 1-7. (in Chinese))
- [3] 夏力农,王星华.带负摩阻力桩基的设计与检测[J].岩土力学,2003,24(增1):491-494. (Xia Linong, Wang Xinghua. Design and check measuring of negative skin friction piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Supp.1): 491-494. (in Chinese))
- [4] 吕世斌,李文鑫,刘利国,等.浅述桥梁桩基设计中



- 桩侧土的负摩阻力问题[J]. 北方交通, 2008(1): 68-71. (Lü Shibin, Li Wenxin, Liu Ligu, et al. A discussion on negative friction resistance of lateral soil in bridge pile foundation design [J]. Northern Transportation, 2008(1): 68-71. (in Chinese))
- [5] 聂如松, 冷伍明. 负摩阻力作用下的单桩竖向承载性状[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1539-1544. (Nie Rusong, Leng Wuming. Vertical bearing behavior of single pile subject to negative skin friction [J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2013, 44(4): 1539-1544k. (in Chinese))
- [6] 程学军, 李继良. 桩基设计中考虑负摩阻力时中性点位置的确定[J]. 岩土工程技术, 1999(1): 34-36. (Cheng Xuejun, Li Jiliang. Determination of neutral point location in consideration of negative friction resistance in pile foundation design [J]. Geotechnical Engineering Technique, 1999(1): 34-36. (in Chinese))
- [7] 王建华, 高绍武, 陆建飞. 表面堆载作用下群桩负摩擦研究[J]. 计算力学学报, 2003, 2(20): 169-174. (Wang Jianhua, Gao Shaowu, Lu Jianfei. Study on negative friction of pile group under surface loading[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 20(2): 169-174. (in Chinese))
- [8] 李广信, 黄峰, 帅志杰. 不同加载方式下桩的负摩阻力的试验研究[J]. 工业建筑, 1999, 29(12): 19-21. (Li Guangxin, Huang Feng, Shuai Zhijie. Test study on influence of loading ways on friction of pile [J]. Industrial Construction, 1999, 29(12): 19-21. (in Chinese))
- [9] 陆明生. 桩基表面负摩擦力的试验研究及经验公式[J]. 水运工程, 1997(5): 54-58. (Lu Mingsheng. Experimental study and empirical formula of negative friction on the surface of pile foundation [J]. Water Sports Engineering, 1997(5): 54-58. (in Chinese))
- [10] 周国庆. 饱水砂层中结构的融沉附加力研究[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 11-14. (Zhou Guoqing. Study on the additional absorption of structures in water-saturated sand courses [J]. Journal of glaciology and geocryology, 1998, 20(2): 11-14. (in Chinese))
- [11] 王建州, 李生生, 周国庆, 等. 冻土上限下移条件下高温冻土桩基承载力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 4226-4232. (Wang Jianzhou, Li Shengsheng, Zhou Guoqing. Analysis of bearing capacity of pile foundation in high temperature permafrost regions with permafrost table descending[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 4226-4232. (in Chinese))
- [12] Crowther G S. Lateral Pile Analysis Frozen Soil Strength Criteria [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2013, 27(3): 155-167.
- [13] 丁靖康, 徐学燕, 娄安金. 冻融过渡带土的长期抗剪强度[J]. 冰川冻土, 1993, 15(2): 283-288. (Ding Jingkan, Xu Xueyan, Lou Anjin. Long-term shear strength of frost-thaw thansite zone [J]. Journal of Glaciology and Geocrylogy, 1993, 15(2): 283-288. (in Chinese))
- [14] Tang L r, Wang K, Jin L, et al. A resistivity model for testing unfrozen water content of frozen soil [J]. Cold Regions Science & Technology, 2018, 153:55-63.
- [15] 李浩伟. 冻土融化过程中桩土相互作用机理研究[J]. 路基工程, 2009(6): 119-120. (Li Haowei. Study on the mechanism of pile-soil interaction in thawing process of frozen soil [J]. Subgrade Engineering, 2009(6): 119-120. (in Chinese))
- [16] 徐春华. 多年冻土区砼灌注桩竖向承载性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. (Xu Chunhua. Research on axial bearing behavior of cast-in-place concrete pile in permafrost region[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese))
- [17] 孙建波, 徐春华, 徐学燕. 冻土地区工程桩负摩阻力试验研究[J]. 施工技术, 2011(13): 47-50. (Sun Jianbo, Xu Chunhua, Xu Xueyan. Test Research on Negative Friction of Engineering Pile in Permafrost Regions[J]. Construction Technology, 2011(13): 47-50. (in Chinese))
- [18] 唐丽云, 杨更社, 叶万军. 考虑大气温度变化的冻土区桩基承载力预测[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 652-657. (Tang Liyun, Yang Gengshe, Ye Wanjun. Pile Bearing Capacity Prediction Considering Air Temperature Change in Cold Regions [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 652-657. (in Chinese))
- [19] 徐学燕, 李海山. 桩基础约束条件下季节冻土地带冻胀量的二维数值求解[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(6): 8-11. (Xu Xueyan, Li Haishan. Calculation of frost heave in seasonal frozen soil under piled foundation restrain condition [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2001, 34(6): 8-11. (in Chinese))