

DOI: 10.11779/CJGE201806014

螺旋桩冻拔特性的模型试验研究

王腾飞¹, 刘建坤^{1, 2}, 邵博文¹, 吕鹏³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 青海省交通科学研究院多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室青海研究观测基地, 青海 西宁 810000; 3. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300041)

摘要: 冬季, 季冻区光伏支架基础受地基土不均匀冻胀的影响, 引起系统发电效率降低, 甚至导致上部结构的整体破坏。因此, 工程中常应用螺旋桩来抑制这种病害。通过进行单向冻结条件下的模型试验, 考察多种螺旋桩及光滑桩的冻拔特性, 总结温度分布、冻拔位移和轴向上拔力的变化规律。结果表明: ①确定平均冻拔率 η_j 为表征抗冻拔能力的合理指标, 其中半螺旋大叶片桩具有最小平均冻拔率 (1.03%), 全螺旋桩的平均冻拔率最高; ②冻拔位移与冻深之间存在线性关系, 螺旋叶片的布设影响冻拔发展; ③限定桩竖向位移条件下, 轴向上拔力与冻深之间存在指数关系。因此, 研究成果可为季冻区轻荷载工程基础的抗冻拔措施提供参考。

关键词: 螺旋桩; 冻拔; 轴向上拔力; 冻拔力; 模型试验; 季节性冻土区

中图分类号: TU471.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)06-1084-09

作者简介: 王腾飞(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事冻土工程与交通岩土方面的研究工作。E-mail: knight_90@163.com。

Model tests on frost jacking behaviors of helical steel piles

WANG Teng-fei¹, LIU Jian-kun^{1, 2}, TAI Bo-wen¹, LÜ Peng³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Qinghai Research and Observation Base, Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Permafrost Region, Qinghai Research Institute of Transportation, Xining 810000, China 3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300041, China)

Abstract: The foundations of the photovoltaic frames suffer from uneven frost heave of the soils during cold seasons, triggering generation inefficiency or even the total failure of superstructures. As a result, the helical steel piles (HSP) are widely adopted to deal with frost diseases in engineering practices. A small scale experiment is conducted to assess the jacking behaviors of different helical piles and the piles with no helix exposed to unidirectional freezing. Then, the variation laws of the temperature, jacking displacement and axial uplift force are summarized. The results indicate: (1) The average frost jacking rate η_j is determined as the reasonable index in terms of anti-jacking ability. In this study, η_j of the large half-helix pile is the least, with the value of 1.03 %, and η_j of the multi-helix one is the largest; (2) There is a linear relationship between the jacking displacement and the frost depth, and the layout of helices has impact on the development of frost jacking; (3) With the vertical displacement of the pile restrained, the axial uplift force grows exponentially over the frost depth. Thus, the research results can provide reference to address the frost jacking problems of lightweight structures in seasonally frozen regions.

Key words: helical pile; frost jacking; axial uplift force; frost jacking force; model test; seasonally frozen region

0 引言

在日益严峻的能源与环境形势下, 世界光伏产业与市场进入快速增长期, 中国的光伏及相关产业也正在蓬勃发展。光资源丰富的区域大约占中国国土面积的 2/3, 且该区域与季节性冻土区广泛重叠^[1]。此区域内兴建的光伏发电项目, 其基础在寒冷季节将遭受不均匀冻胀病害^[2-3], 这将进一步引起上部太阳能光伏板断裂破坏, 在活动层较深的区域尤为严重^[4]。为减轻冻害的影响, 螺旋桩被广泛应用于季节性冻土区内光

伏发电项目(图1)。螺旋桩叶片与土体之间的机械咬合作用提升了桩-土界面的抗剪强度, 且在螺旋桩的安装过程中桩周土得到进一步压实, 使得螺旋桩在抗拔工程中有独特的优势^[5-7]。

目前国内外学者已对寒区桩基与螺旋桩的特性有

基金项目: 国家自然科学基金项目(41731281); 神朔铁路科技开发项目(2015-10)

收稿日期: 2016-12-21

*通讯作者(E-mail: jkliu@bjtu.edu.cn)

了多方面的认识, 包含室内试验、现场试验与数值模拟方法等。Tsuha 等^[8]针对埋设在热带非饱和残积土的多种螺旋桩进行轴向荷载试验, 用以探究螺旋桩埋设过程对周围土的扰动作用。Sakr^[9]进行了 11 组全尺寸螺旋桩试验, 包含轴向加载试验、上拔试验与侧向承压试验, 并根据结果建立了油砂中螺旋桩的理论模型。Li 等^[10]提出了一种适用于青藏高原的新型混凝土桩, 它能提高冻土上限, 进而增强地基承载力。Gavin 等^[11]研究了埋设现场密砂土中的螺旋桩竖向承载力, 通过等速率加载贯入试验评估试验桩的蠕变响应。Gu 等^[12]采用一种有限元方法来模拟阿拉斯加的现场试验中埋设在冻土层的钢桩非线性响应。Chen 等^[13]提出了一种自由衰减信号响应法, 能对部分埋设在粉砂中的桩-冻土系统的动力特性进行可靠性预测。陈然^[14]基于热应力原理建立有限元模型, 分析多种影响螺旋桩冻拔规律的因素。王腾飞等^[15]基于有限元软件, 采用多种数值方法计算螺旋桩冻拔规律。董天文等^[16-17]根据建立的螺旋桩地基破坏模式, 对螺旋桩几何尺寸的优化设计进行研究; 将土体材料双折线数学模型与简化的竖向受压螺旋桩的力学模型结合, 推导出螺旋桩桩顶荷载与位移的显式解。

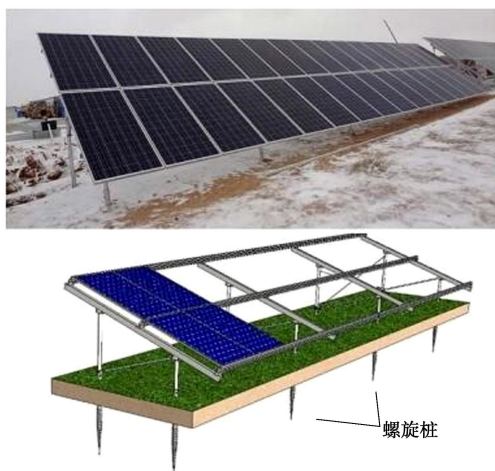


图1 光伏支架螺旋桩示意图

Fig. 1 Schematic of helical piles for photovoltaic frames

在负温影响下, 冻土与桩身胶结在一起, 形成一定冻结强度, 此时随着土体冻胀, 产生的切向冻胀力驱动螺旋桩克服自重、上部荷载与叶片锚固力向上拔起。虽然螺旋桩基相较于其它基础有明显的抗冻拔优势, 但对于季节冻深过大或强冻胀场地, 螺旋桩基工程也不能免于冻拔破坏。目前有关螺旋桩的冻拔特性研究颇少, 对土体冻结过程中桩的冻拔力发展规律并不明确, 这将影响实际工况下抗冻拔措施的决策。因此, 本文通过模型试验对螺旋桩相关工程特性展开研究, 得到桩体冻拔位移与轴向上拔力的发展规律, 提出表

征桩基抗冻拔能力的指标, 进而对季节性冻土区螺旋桩基优化设计与防冻拔措施提出建议。

1 试验概况与方案设计

1.1 试验土样性质

为更好地体现螺旋桩抗冻拔性能, 本文选用当地易冻胀土样进行试验^[18], 取土点位于内蒙古锡林郭勒盟镶黄旗文贡乌拉 20 MWp 风光同场光伏发电项目的施工现场。土颗粒最大干密度 1.726 g/cm^3 , 最优含水率 17.0%, 液塑限分别为 27.3% 与 17.4%。根据土工试验规程 (SL—237—1999), 该土样定义为粉土 (ML)。同时, 为了确定冻深, 对土样进行冻结温度试验^[19], 得到该土样冻结温度为 -0.1°C 。

土样的冻胀率通过三相冻结试验确定^[20], 根据建筑地基基础设计规范 (GB 50007—2011), 土样定为强冻胀土。

1.2 试验设备与模型桩

试验所用的多功能试验箱 (图 2) 由北京交通大学自主研发。试验箱的几何尺寸为 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 。3 根模型桩等间距地垂直埋设于试验箱中, 并从顶板 3 个孔中穿出 (图 3)。顶板水平放置于填土表面, 冷浴循环机 (thermo haake A40) 与之相连, 以持续提供负温条件。试验箱的外侧均覆盖隔热材料, 使箱中形成稳定的一维冻结温度场。

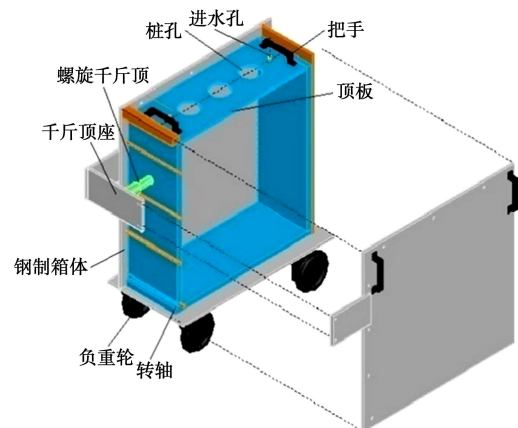


图2 多功能模型试验箱结构图

Fig. 2 Schematic of multifunctional model test box

光伏发电工程中所使用的螺旋桩通常长 $4.2 \sim 4.5 \text{ m}$, 在本次室内试验中, 选用按 6:1 等比例缩小的模型桩进行分析, 包括 4 种螺旋桩与一种光滑桩 (图 4)。模型桩的相关尺寸参数见表 1, H 为螺距, D 和 r 分别为桩外、内径, S 和 h 分别为叶片厚度与宽度, β 和 φ 分别为叶片上、下倾角。材料的物理参数: 密度为 7.85 g/cm^3 , 弹性模量为 202 GPa, 剪切强度为 310~380 MPa, 抗拉强度为 440~470 MPa, 导热系数为

52.34 W·m⁻¹·K⁻¹。

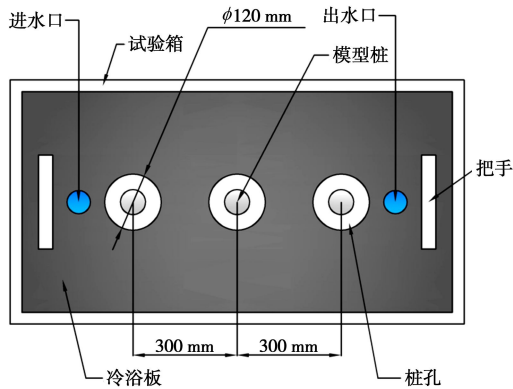


图3 模型箱顶部俯视图

Fig. 3 Top view of model test box



(a) 全螺旋桩 (b) 双螺旋桩 (c) 半螺旋小叶片桩 (d) 半螺旋大叶片桩 (e) 光滑桩

图4 5种模型桩

Fig. 4 Model piles

1.3 试验方案与步骤

试验箱中的传感器布设见图5。使用PT100温度传感器测量温度，精度±0.1℃。温度传感器共分4列，埋设于桩身附近，间隔10 cm，底层传感器与桩头齐平，一共24个。使用6个微型土压力传感器测量桩身附近土压力，精度为0.2%FS，分两层布设，深度与上两层温度传感器齐平。在冻结试验进行时，冻拔位移与轴向上拔力分别使用位移百分表（图5(a)）与轴向应力计（图5(b)）测量，两种传感器均布设于桩顶，轴向应力计的精度大约为0.05%FS。光伏支架自重相对于冻拔力可忽略不计，故在自由边界条件下测定冻拔位移；在限定桩的竖向位移条件下测量冻胀过程中产生的轴向力。此外，在距离桩身一定距离的土体表面对称设置两个位移百分表，对测得的数值加权平均来表征土体的冻胀量。

传感器设定为试验开始两小时内每10 min采集一次数据，此后每一小时采集一次；读取桩顶位移的时间间隔为2~4 h。

试验方案见表2，同一组试验中3根模型桩的编号分别为#1，#2和#3，考虑两种顶板温度条件，冻拔

位移与轴向上拔力分开测量。

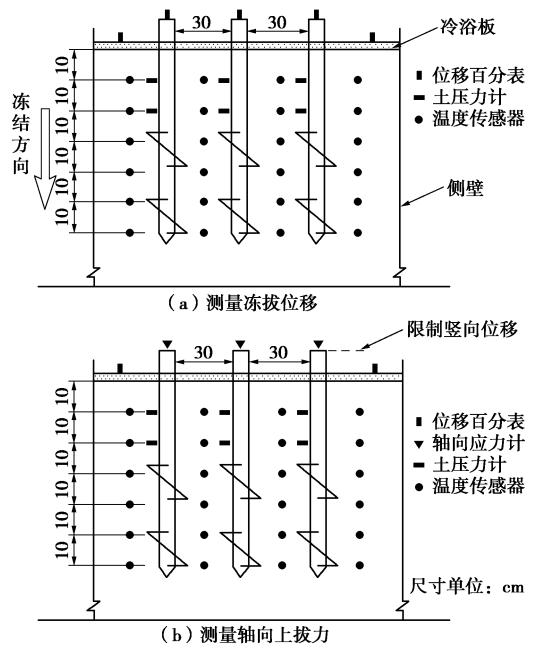


图5 传感器布设示意图

Fig. 5 Layout of sensors

表1 模型桩参数表

Table 1 Basic properties of model piles

编号	H/mm	r/mm	h/mm	D/mm	S/mm	β/φ(°)	埋深/mm
a	54	59	2	79	10	30	600
b	206	59	2	93	17	30	600
c	54	59	2	93	17	30	600
d	54	69	2	123	27	30	600
e	—	59	—	—	—	—	600

试验步骤如下：

(1) 试验准备：晒干土样，添水搅拌均匀，配备足量含水率为22%的试验用土（依据现场实测）。将传感器连接至数据采集系统（DT80）。每一列PT100温度传感器集成在PVC管中，方便安放且确保固定的布设间距。

(2) 埋设与压实：将试验箱内壁涂抹凡士林，保证充分润滑。第一层填土控制压实后厚度为30±2 cm，压实度根据工程现场确定为0.93。桩头位置固定于此深度，桩身垂直（图6）。此后，每次填筑并压实10 cm厚度的土层，在填筑过程中，传感器按图5进行布设，集成PT100的PVC管垂直放置于桩身附近。填筑每层土时，环桩身土体需填高2~3 cm，使用橡皮锤横向竖向进行击实，确保桩土之间紧密咬合。填筑到指定高度后，整平土体表面。将顶板（冷浴板）放置在土体表面，用泥浆密封空隙处，确保制冷效果。将循环冷浴机连接至顶板的进水孔与出水孔。最后在冷浴

板上方再填充一层隔热材料。



图6 模型箱内景与击实锤

Fig. 6 View inside test box and compaction tool

(3) 冻拔位移与轴向上拔力的测量: 将百分表固定于桩顶(图7), 测量冻拔位移。测量轴向上拔力时, 移除百分表, 将预制钢架固定在试验箱上部(图8), 轴力传感器放置在钢架与桩顶之间, 通过通丝与桩顶相连。调节通丝上的螺母, 固定轴力传感器, 记录此时轴力传感器的初始读数。



图7 冻拔位移测量示意图

Fig. 7 Measurement of frost jacking displacement



图8 轴向上拔力测量示意图

Fig. 8 Measurement of axial uplift force

(4) 一维冻结试验: 将顶板温度调为 15℃, 持续 12 h, 使土体的初始温度稳定在 15℃左右。然后根据试验方案(表2)调节顶板到指定温度。整个冻结过程由电脑自动控制。在试验开始 6~9 d 后, 冻拔位移、轴向上拔力等指标稳定时, 结束冻结试验。

(5) 融化: 冻结试验结束后, 调整顶板为 15℃, 融化土体, 时间持续 24~36 h。在融化过程中, 记录位移、轴力等数据。

(6) 卸土: 关闭循环冷浴机, 取下顶板, 打开试验箱活动侧壁。用铁锹取出融土, 根据试验方案, 按照步骤(1)~(5)重复试验。

2 试验结果与分析

为评估多功能模型试验箱的尺寸效应, 使用 ABAQUS 建立单桩三维冻拔模型, 土体模型尺寸取直径 0.6 m, 高 1 m 的圆柱体。经过单向冻结后(上表面温度 -10℃, 冻深条件与本试验一致), 土体表面冻胀位移如图 9 所示。随距桩水平距离增大, 土体竖向位移逐渐增高, 并趋向定值(24.5 mm)。可知, 距桩 0.2 m 处土体的冻胀位移基本不受桩体影响, 即本文中试验箱的尺寸不对试验结果造成影响。

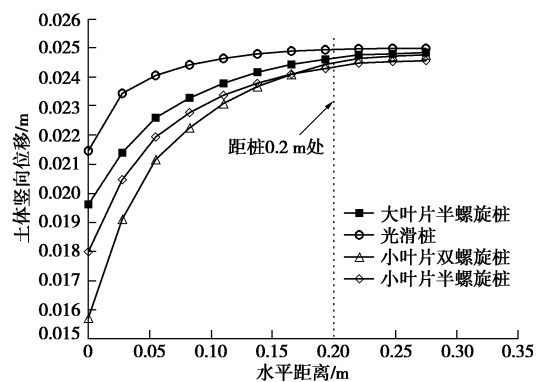


图9 土体竖向位移随桩距变化曲线

Fig. 9 Frost heaves of soil surface at different distances from pile

2.1 温度场

图 10 表示温度场变化曲线, 图例中用符号代表土体的不同深度, 如 P10 代表土表面以下 10 cm 处。

由图 10 可知, 4 组试验中平均温度的变化趋势基本一致, 温度在初始阶段下降较快, 当时间达到总时间的一半后, 温度分布趋于稳定。当顶板温度为 -10℃ 时, 表层 10 cm 的土体温度明显高于边界温度为 -20℃ 的情况。下层土体的温度时程曲线趋于一致, 桩头位置的温度变化较小, 平均下降 5℃~8℃。此外, 后半段时间温度随深度的分布趋势比较接近, 随时间演化已基本稳定, 且深度大于 40 cm 的土体, 温度变化在 10℃ 以内。对于第一组试验, P10 在试验开始 30 h 后达到冰点; 而对于其余 3 组, P10 降至冰点仅需 10 h。对最终的温度随深度分布曲线进行拟合:

$$y = y_0 + A \cdot e^{-x/t} \quad (1)$$

式中, y_0 , A 和 t 为拟合参数。4 组试验的拟合数据见表 3。由式(1)可知, 边界温度对下层土体的影响呈指数衰减。

每根桩周围土体的温度分布通过临近两列温度传感器加权平均得到(图 5)。根据土体冻结温度试验结果, 规定 -0.1℃ 等温线为冻结深度线。由图 10 可知,

表 2 冻拔试验方案

Table 2 Experimental schemes for frost jacking

组号	桩编号	含水率/%	初始土温/°C	顶板温度/°C	桩型	约束条件
1	#1	22	15	-10	全螺旋桩	自由
	#2				光滑桩	自由
	#3				半螺旋小叶片桩	自由
2	#1	22	15	-20	半螺旋小叶片桩	自由
	#2				双螺旋桩	自由
	#3				半螺旋大叶片桩	自由
3	#1	22	15	-20	光滑桩	竖向位移
	#2				双螺旋桩	竖向位移
	#3				全螺旋桩	竖向位移
4	#1	22	15	-20	半螺旋小叶片桩	竖向位移
	#2				半螺旋大叶片桩	竖向位移
	#3				光滑桩	自由

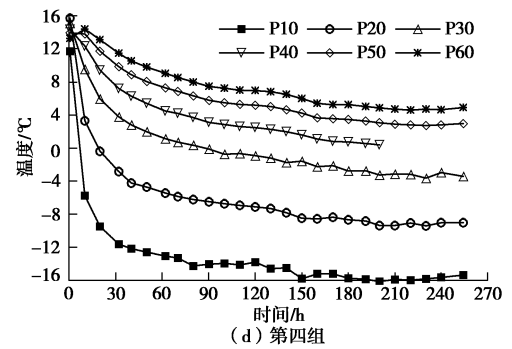
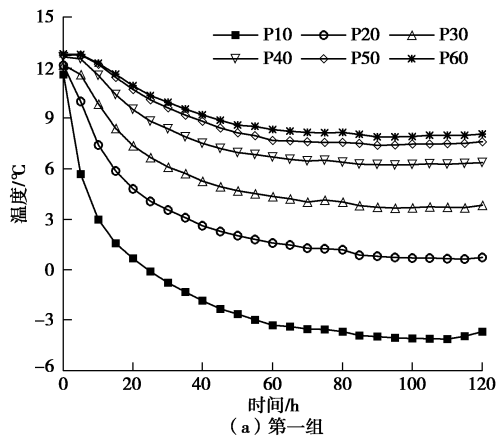


图 10 温度场时程曲线

Fig. 10 Variation of temperature with time

表 3 温度 - 深度曲线拟合参数

Table 3 Fitting coefficients of temperature vs. depth

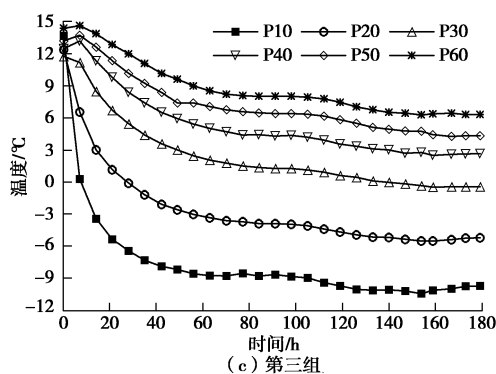
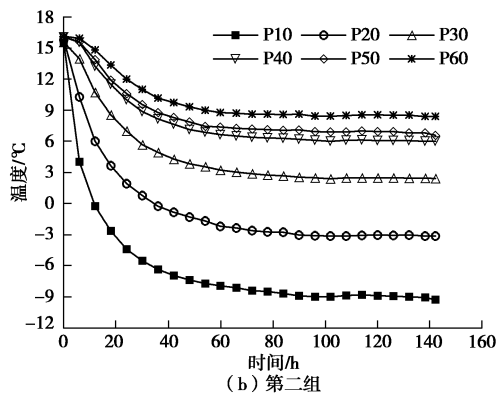
组号	y_0	A	t	R^2
1	2.84	10.98	-0.86	97.02
2	5.39	15.76	-7.03	96.70
3	-0.86	26.75	-8.64	99.63
4	-6.17	40.70	-12.54	99.66

冻深线基本在 P10, P20 和 P30 之间迁移。由于内插值具有较高精度, 选取 P10, P20 和 P30 共 3 个位置的温度数据进行插值, 得到冻结深度的位置。本文选用 3 点拉格朗日插值:

$$L_3(T_f) = \sum_{i=1}^3 h_i \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^3 \left(\frac{T_f - T_k}{T_i - T_k} \right), \quad (2)$$

其中, T_f 为冻结温度, 下标 1, 2 和 3 分别表示 P10, P20 和 P30, h_i 为深度, T_i 为瞬时温度。计算结果如图 11 所示, 图中标注数值为试验结束时的最大冻深。

由空间差异性引起的同一组试验中不同桩冻深的发展规律差别较小。当边界温度为 -10°C 和 -20°C 时,



平均冻深分别达 15.3 cm 和 26.8 cm。冻深发展趋势基本与温度场变化相对应, 冻结速率呈减速下降趋势, 在试验初期, 冻结速率峰值可达到 25 cm/d 以上。

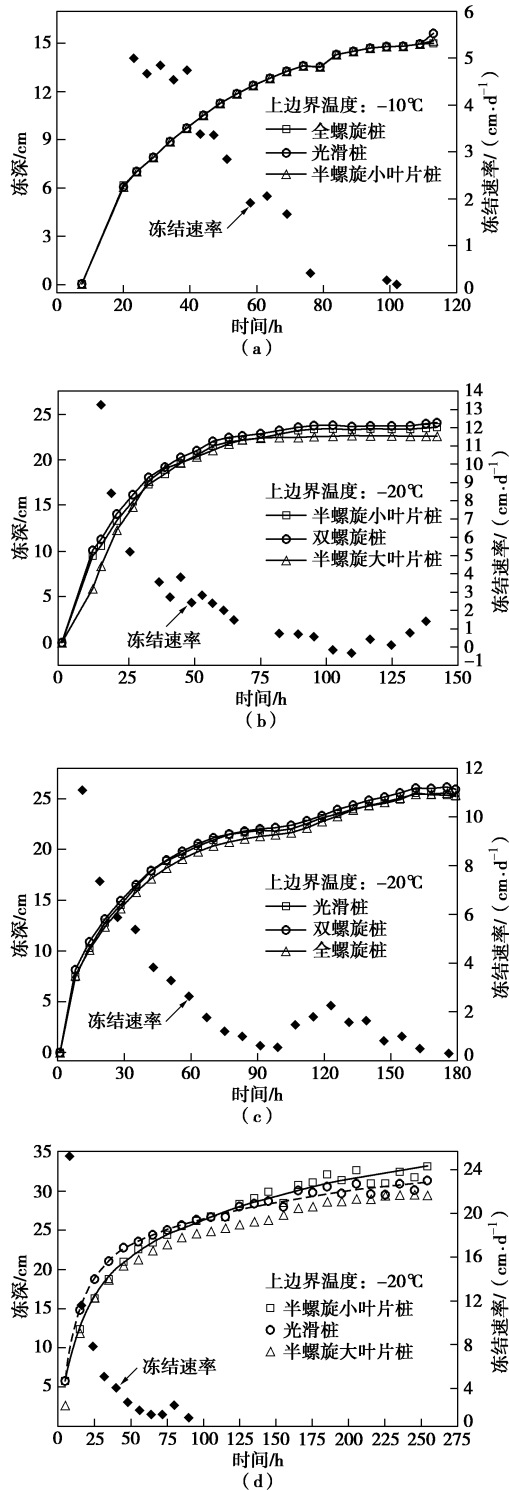


图 11 计算冻深与冻结速率时程曲线

Fig. 11 Variation of calculated frost depth and freezing rate with time

2.2 冻拔位移试验

冻拔试验过程中, 保持桩顶无约束, 将百分表放置于桩顶测量其竖向冻拔位移, 如图 12 所示, 3 组试

验趋势类似, 图例中编号对应试验组别。对于第一、二组试验, 试验开始 10~15 h 后出现冻拔, 其原因是: 冻结初期, 土体冻胀对桩体产生的上拔力需先克服桩下半部分的螺旋叶片的锚固力。对于全螺旋桩, 冻拔位移出现较早, 这是由于上部螺旋叶片的影响, 使得冻结的土体与螺旋叶片之间产生较强的咬合作用, 而此时下层未冻区的螺旋叶片没有足够的锚固力抵抗上拔力。全螺旋桩的最终冻拔量为 13.54 mm, 高于光滑桩的 11.34 mm; 究其原因, 在负温作用下, 全螺旋桩处于冻结层的叶片与周围土体胶结在一起, 由于冻土的抗剪强度较大, 叶片与冻土形成整体, 随土体冻胀的发展向上移动。此时, 全螺旋桩的整体抗冻拔承载力大幅降低, 锚固效果劣于光滑桩。下文的轴向上拔力试验结果与数值模拟同样验证了冻结线以上的叶片加剧冻拔过程的负面效应。此后, 桩的冻拔量进入稳定增长阶段, 并在试验末段逐渐平缓, 达到峰值。对于自由冻拔的情况, 第二组试验结果表明: 大叶片的锚固效果较小叶片好, 且增加螺旋叶片数量能显著抑制冻拔, 半螺旋大叶片桩的最终冻拔量较双螺旋桩减少 6.13 mm。第四组表示光滑桩的冻拔位移、土体表面的冻胀量及两者间相对位移 (土冻胀量-桩冻拔位移) 的时程曲线, 其中相对位移在试验进行 10 h 后趋于稳定, 表明此时桩的位移与土的冻胀已同步。

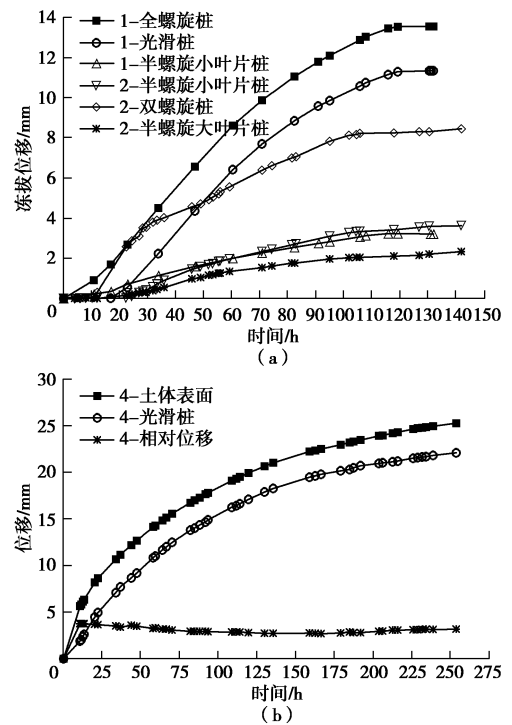


图 12 桩的冻拔位移与土体表面冻胀

Fig. 12 Variation of frost jacking of piles and frost heaves of soil surface with time

本文定义平均冻拔率为

$$\eta_j = \frac{\Delta h_j}{H} \times 100\% \quad (3)$$

其中， η_j 为平均冻拔率， Δh_j 和 H 分别为最终冻拔量与冻深。计算所得 η_j 列于表4，平均冻拔率说明模型桩的抗冻拔能力，值越小代表抗冻拔效果越优。5种桩型的抗拔效果关系如下：半螺旋大叶片桩>半螺旋小叶片桩>双螺旋桩>光滑桩>全螺旋桩。本文运用ABAQUS软件建立桩-土三维模型，在相同条件下计算部分算例。表4列出各桩型冻拔量的试验值与数值计算结果，两者间误差较小。

基于计算黏性土的螺旋桩上拔极限承载力的cylindrical shear method^[5, 21]，笔者提出季冻区一定冻深下螺旋桩抗冻拔承载力计算公式（图13）：

$$Q_{cr} = \pi D S_f (n-1) S c_u + A_h (N_u c_u k_f + \gamma' H_t) \quad (4)$$

式中， Q_{cr} 为抗冻拔极限承载力， D 为螺旋桩外径， S_f 为叶片间距系数， n 为叶片数目， S 为叶片间距， c_u 为土不排水剪切强度， A_h 为顶叶片映射面积， N_u 为承载力修正系数， k_f 为冻土强度修正系数， γ' 为土体有效重度， H_t 为顶叶片埋深。需要注意，若冻深较小，抗冻拔极限承载力要考虑桩侧摩擦力。

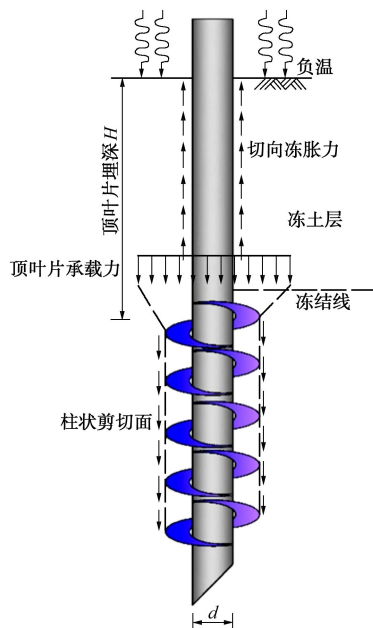


图13 修正 cylindrical shear method 示意图

Fig. 13 Diagram of modified cylindrical shear method

若叶片均设置在冻结线以下，增加桩外径、一定范围内增大叶片间距等方式均能提高螺旋桩抗冻拔承载力；若锚固段长度一定，增加叶片数量将影响 S_f 值，进而强化抗拔承载力。故本文试验中半螺旋大叶片桩的抗冻拔效果是最优的。实际工程中，采用非连续式大叶片桩（如双叶片桩）抗拔效果优于连续性小叶片桩（如半螺旋小叶片桩）^[3]。

在冻拔稳定发展阶段，冻深与冻拔位移呈线性增

加关系。对于第一、二、四组试验，在冻深处于6~22 cm阶段时，冻拔位移稳定发展；而当冻深继续下移，冻拔量增速加快。拟合公式表示为

$$\Delta h_j = a + b \cdot H \quad (5)$$

式中， a 、 b 为拟合参数。 a 表征稳定发展的阶段，而 b 反映不同桩型的冻拔特性，其值从0.132到1.13变化，桩的几何参数对 b 值产生影响。具体拟合值见表5。综上所述：寒区工程中螺旋桩叶片严禁布设于冻土层；综合考虑螺旋桩安装工艺与经济效益等因素，可适当增大螺旋叶片宽度，增加叶片数量。

表4 试验最终冻拔量与计算值

Table 4 Measured ultimate displacements and calculated values (mm)

项目	桩型				
	全螺旋桩	双螺旋桩	半螺旋小叶片桩	半螺旋大叶片桩	光滑桩
-10℃	13.54	-	3.22	-	11.34
-20℃	-	8.46	3.65	2.33	22.11
$\eta_j/\%$	9.54	3.38	2.18/1.60	1.03	6.76/7.11
计算值	-	7.58	3.72	2.35	-/17.7
相对误差/%	-	10.4	1.88	0.85	19.94

表5 冻深-冻拔位移拟合参数表

Table 5 Fitting coefficients for frost jacking vs. frost depth

桩例	a	b	R^2
1-全螺旋	-8.04	1.44	0.979
1-光滑	-5.64	0.91	0.965
1-半螺旋小叶片	-1.11	0.26	0.991
2-半螺旋小叶片	-3.15	0.25	0.983
2-双螺旋	-3.71	0.41	0.956
2-半螺旋大叶片	-1.67	0.13	0.893
4-光滑桩	-14.52	1.13	0.940

2.3 轴向上拔力试验

钢架结构限制模型桩的竖向位移，其目的在于测量冻结过程中桩产生的轴向上拔力（图8，14），轴向上拔力是桩的抗拔力与冻土的冻拔力共同作用的结果。试验初期，轴向力随时间呈线性增长，并在达到峰值前突然变缓。当冻深达到24.86 cm时，全螺旋桩的最终轴向力为13.8 kN，接近光滑桩的6倍。由上文分析可知，冻结区的螺旋叶片引起最终轴向力激增。在第四组试验中，半螺旋大叶片桩最终轴向力仅为半螺旋小叶片桩的一半左右，除叶片宽度外，冻深也产生一定影响。图15为冻深与轴向上拔力的关系曲线，当冻深为24 cm时，双螺旋叶片桩的轴向力为1.37 kN，仅比光滑桩小0.1 kN，这表明双叶片对抑制冻拔力的效果有限。轴向力随冻深发展趋势呈指数增长，不同于其他4种桩，全螺旋桩轴向力急速增长阶段出现的更早，幅值更大。其余4种桩型在试验初期的轴

向力发展存在差异;但在冻深达到 20 cm (桩埋深的 1/3) 后趋于一致,此时非冻区的叶片对冻拔力的抑制作用不断减弱。结合第四组试验结果,笔者认为相对于桩的几何参数,冻深是影响冻拔力发展更重要的因素。鉴于冻土相对于非冻土有更大的刚度与抗剪强度^[22],这将明显改变桩-土间相互作用。此外,随着温度的降低,桩-土之间的冻结强度不断增强^[23]。用指数函数拟合轴向上拔力(kN)与冻深(cm)关系:

$$\left. \begin{aligned} F_{a1} &= 747.2e^{0.122H} - 1612.9 \quad (7 < H < 24), \\ F_{a2} &= 0.029e^{0.151H} + 0.31 \quad (2 < H < 27), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中,下标 a1 和 a2 分别表示全螺旋桩与其余 4 种桩型,这里拟合范围限定在稳定阶段。综上所述:冻拔力主要随冻深变化,且冻深超过阈值(20 cm,桩埋深的 1/3)时,非冻区叶片抑制冻拔的作用有限,无关桩型。

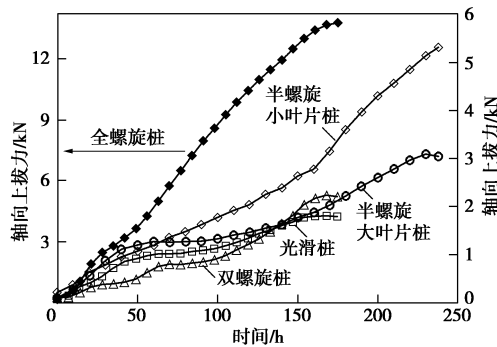


图 14 轴向上拔力的时程曲线

Fig. 14 Variation of axial uplift force with time

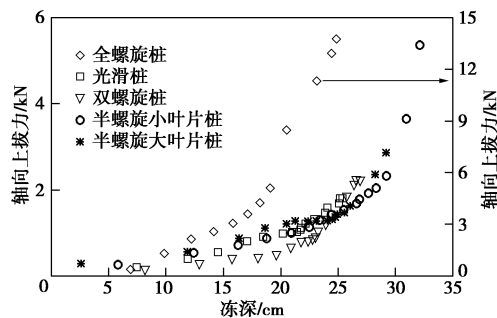


图 15 轴向上拔力与冻深的关系曲线

Fig. 15 Variation of axial uplift force with frost depth

工程中可用下式计算冻拔驱动力:

$$Q_u = \int \pi d \eta_f q_f dx \quad (0 \leq x \leq H) \quad , \quad (7)$$

式中, Q_u 为总切向冻胀力, d 为螺旋桩内径, η_f 为冻深影响系数, q_f 为切向冻胀力, 其值与含水率、温度和法向应力等有关^[24]。

由式(4)、(6)、(7)可知,试验测得轴向上拔力存在如下关系:

$$F_a = Q_u - Q_{t,f} = F_c + (N_G + G_p) \quad , \quad (8)$$

式中, F_c 为外加约束力, N_G 与 G_p 分别为上部结构自重与桩基自重。对于光伏支架工程, N_G 与 G_p 可忽略不计;根据轴向上拔力试验结果,冻深超过阈值(桩埋深的 1/3)时, $Q_{t,f}$ 远小于 Q_u 。

工程中若采用约束螺旋桩竖向位移的措施预防冻拔病害,估计 F_c 值可参考本文计算的 F_a 值,或视冻深情况,由 Q_u 与 $Q_{t,f}$ 计算得到。

3 结论与建议

(1)根据模型桩的冻拔位移时程曲线与平均冻拔率,评估不同桩型抗拔效果,可知半螺旋大叶片桩冻拔位移最小;同时,拟合得到稳定阶段冻拔位移与冻深之间存在线性关系。不同桩型抗冻拔承载力可根据修正 cylindrical shear method 公式进行分析。

(2)使用钢架限制模型桩竖向位移,得到冻结过程中轴向上拔力的发展规律,进一步明确了冻结区的螺旋叶片将加剧冻拔力的发展,而冻深超过桩埋深 1/3 时,非冻区的叶片抑制冻拔力作用有限。同时,拟合得到轴向上拔力与冻深之间存在指数关系,提出了冻拔驱动力计算公式。

(3)本文研究成果可为实际工况提供参考:针对轻荷载工程(如光伏支架)基础,选用螺旋桩基减轻冻拔病害。根据施工地气候条件确定标准冻深,此时顶层螺旋叶片应布设于冻结线以下,优先增大叶片宽度(外径),并适度增加叶片数量,提高螺旋桩抗拔极限承载力。当标准冻深超过桩埋深 1/3,可适当增加桩埋深或采取保温措施减小桩周土的冻深,削弱冻拔作用;若采取外加约束的措施限制螺旋桩竖向位移,应重点依据冻深验算轴向上拔力。

参考文献:

- [1] 赵杰. 光伏发电并网系统的相关技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 1 - 3. (ZHAO Jie. Study on related technologies of grid-connected photovoltaic power system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 1 - 3. (in Chinese))
- [2] GUO L, XIE Y, YU Q, et al. Displacements of tower foundations in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 121: 187 - 195.
- [3] WANG T, LIU J, ZHAO H, et al. Experimental study on the anti-jacking-up performance of a screw pile for photovoltaic stents in a seasonal frozen region[J]. J Zhejiang Univ Sci A, 2016, 17(7): 512 - 524.
- [4] CHEVEREV V G, PUSTOVOIT G P, VIDYAPIN I Y, et al. Stabilization of tubular pile foundations in heaving soils[J].

- Soil Mech Found Eng, 2006, **43**(6): 211 - 227.
- [5] MOHAJERANI A, BOSNJAK D, BROMWICH D. Analysis and design methods of screw piles: a review[J]. Soils and Foundations, 2016, **56**(1): 115 - 128.
- [6] KRASIŃSKI A. Numerical simulation of screw displacement pile interaction with non-cohesive soil[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, **14**(1): 122 - 133.
- [7] 董天文, 梁力, 黄连壮, 等. 螺旋桩基础抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(1): 186 - 190. (DONG Tian-wen, LIANG Li, HUANG Lian-zhuang, et al. Pullout test of screw pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(1): 186 - 190. (in Chinese))
- [8] TSUHA C H C, DOS SANTOS FILHO J M S M, SANTOS T C. Helical piles in unsaturated structured soil: a case study[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**: 103 - 117.
- [9] SAKR M. Performance of helical piles in oil sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(8): 1046 - 1061.
- [10] LI N, XU B. A new type of pile used in frozen soil foundation[J]. Cold Reg Sci Technol, 2008, **53**(3): 355 - 368.
- [11] GAVIN K, DOHERTY P, TOLOOIYAN A. Field investigation of the axial resistance of helical piles in dense sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(11): 1343 - 1354.
- [12] GU Q, YANG Z, PENG Y. Parameters affecting laterally loaded piles in frozen soils by an efficient sensitivity analysis method[J]. Cold Reg Sci Technol, 2016, **121**: 42 - 51.
- [13] CHEN G S, DUANE D, HULSEY J L. Measurement of frozen soil-pile dynamic properties: a system identification approach[J]. Cold Reg Sci Technol, 2012, **70**: 98 - 106.
- [14] 陈然. 螺旋桩在季节性冻土地场抗冻拔性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 3 - 20. (CHEN Ran. Study on anti-frost heaving characteristic of the screw piles in the seasonal frozen region[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 3 - 20. (in Chinese))
- [15] 王腾飞, 刘建坤, 刘晓强, 等. 季节冻土区光伏支架螺旋桩基的冻胀数值分析研究[J]. 冰川冻土, 2016, **38**(4): 1167 - 1174. (WANG Teng-fei, LIU Jian-kun, LIU Xiao-qiang, et al. Numerical simulation on anti-jacking-up performance of helical piles of photovoltaic stents in seasonal frozen region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, **38**(4): 1167 - 1174. (in Chinese))
- [16] 董天文, 梁力, 王明恕, 等. 极限荷载条件下螺旋桩的螺距设计与承载力计算[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 2031 - 2034. (DONG Tian-wen, LIANG Li, WANG Ming-shu, et al. Pitch of screws and bearing capacity of screw piles under ultimate load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 2031 - 2034. (in Chinese))
- [17] 董天文, 梁力. 竖向受压螺旋桩荷载沉降函数解[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(10): 1483 - 1487. (DONG Tian-wen, LIANG Li. Solution of load-settlement function of single screw pile under axial pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(10): 1483 - 1487. (in Chinese))
- [18] 田亚护, 刘建坤, 彭丽云. 动、静荷载作用下细粒土的冻胀特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(12): 1882 - 1887. (TIAN Ya-hu, LIU Jian-kun, PENG Li-yun. Experimental study on frost action of fine-grained soils under dynamic and static loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(12): 1882 - 1887. (in Chinese))
- [19] 刘谡. 粉质黏土纯盐胀试验研究及经验模型分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 30 - 33. (LIU Chen. Investigation of the silty clay pure salt expansion and experience model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016: 30 - 33. (in Chinese))
- [20] 聂志红, 刘源, 王翔. 客运专线基床表层级配碎石冻胀影响因素的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, **10**(4): 59 - 62. (NIE Zhi-hong, LIU Yuan, WANG Xiang. Experimental study on frozen-heave influence factors for graded gravel in surface layer of passenger dedicated line[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, **10**(4): 59 - 62. (in Chinese))
- [21] CHONG Tang, KOK-KWANG Phoon. Model uncertainty of cylindrical shear method for calculating the uplift capacity of helical anchors in clay[J]. Engineering Geology, 2016, **207**: 14 - 23.
- [22] AKILI W. Stress-strain behavior of frozen fine-grained soils[J]. Highw Res Rec, 1971, **360**: 1 - 8.
- [23] LIU Jian-kun, LÜ Peng, CUI Ying-hui, et al. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface[J]. Cold Reg Sci Technol, 2014(104/105): 1 - 6.
- [24] 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. (LÜ Peng, LIU Jian-kun. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, **37**(2): 106 - 110. (in Chinese))