

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202003059

高寒地区输电线路锥管板条装配式基础抗冻拔性能试验研究*

王卫东¹, 崔强¹, 韩杨春¹, 张树林², 孟宪乔²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 102401; 2. 中国能源建设集团公司安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要: 高寒地区分布大量多年冻土, 传统的现浇基础由于其抗冻拔性能差、施工周期长, 不易采用, 考虑受力合理, 施工快速便捷, 提出一种可灵活拼装的锥管板条装配式基础。为了分析该种形式基础的抗冻拔特性, 开展了一5、-10、-15℃三种温度梯度条件下的冻结试验, 分析了温度场、地基冻胀力、冻胀位移、基础本体应变的变化规律。研究表明: ① 基础顶部冻拔位移小于地基冻胀位移, 由于基础的“约束冻胀”作用, 距基础边缘最远处冻胀位移最大; ② 地基冻胀力与相应处冻胀位移之间呈正相关, 冻胀力随温度降低而增大, 且增加幅度随着温度的降低而加大; ③ 基础本体所受拉应力远小于材料屈服强度, 地基表面首先出现发状细微裂纹, 随着后期冻胀力的释放, 裂缝逐渐扩张、延伸; ④ 对于以承受上拔荷载为主的输电线路基础可采用回填非冻胀材料、基础表面光滑处理、优化结构形式等工程措施提高其抗拔性能。

关键词: 输电线路; 冻土; 装配式基础; 冻结试验; 冻胀力; 工程措施

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0542-11

Experimental Investigation on Frost Resistance of Assembled Foundation with Cone Tube and Slab of Transmission Line in Alpine Region Area

WANG Weidong¹, CUI Qiang¹, HAN Yangchun¹, ZHANG Shulin², MENG Xianqiao²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 102401, China;

2. China Energy Construction Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: There is a large amount of permafrost in the alpine region, where the traditional cast-in-place foundation is not suitable for use due to its poor frost resistance and long construction period. Considering the rational loading and fast construction requirements, this paper proposes an assembled foundation with cone tube and slab which can be flexibly assembled on site. In order to analyze the frost resistance of the proposed foundation, a series of freezing tests were carried out under the temperature gradient conditions of -5, -10, and -15℃. The distribution laws of temperature field, frost heaving displacement, foundation frost heaving force, and body strain were analyzed. The results show that ① The frost displacement at the top of the foundation was smaller than that of surface soil,

* 收稿日期: 2020-03-27; 修回日期: 2020-06-28

基金项目: 国家电网公司科技项目(GCB17201700134)资助

作者简介: 王卫东(1972—), 男, 高级工程师。主要从事输变电工程的科研管理工作。E-mail: weidongmail@sina.com

通讯作者: 崔强(1980—), 男, 教授级高级工程师。主要从事输电线路科研及试验检测工作。E-mail: everjstl@126.com

and the largest displacement appeared at the farthest distance from the foundation edge due to its "restrained frost heave" ; ② There was a positive correlation between the frost heave force of foundation and the corresponding frost displacement. With the decrease of temperature, the frost heave force increased, and the increasing range increased; ③ The tensile stress of the foundation body was far less than the yield strength of the corresponding material. Hairy cracks first appeared on the ground surface, and then gradually expanded and extended with the release of frost heaving force; ④ For the transmission line foundations mainly bearing uplift loads, engineering measures such as backfilling non-frost heaving materials, smoothing treatment of the foundation surface, optimizing the structural forms can be adopted to improve its frost resistance.

Keywords: Transmission line; frozen soil; assembled foundation; freezing test; frost heave force; engineering measures

引 言

随着我国社会经济的不断发展以及西部开发力度的不断加大,着力于投资基础设施的建设显得尤为重要。近年来,架空输电线路作为最主要的电力基础设施之一,成为国家重点投资和发展的重点基础设施建设工程。如已投运的“四交五直”特高压工程、西北 750 kV 超高压工程、青藏交直流工程等。

随着“一带一路”、“西电东送”等国家发展战略的实施,越来越多的架空输电线路工程穿越高寒地区,如青/川藏联网工程、新疆南北互联工程、内蒙古电网互联工程等。高寒地区是指因海拔高或纬度高而形成的特别寒冷的气候区,在我国主要指高海拔地区的青藏高原以及高纬度地区的东北四省,地区特点主要是分布着广泛的冻土。冻土地基中输电线路基础的设计和施工较常规地基条件要复杂的多,这主要由于冻土地基中因内部未融冰随温度变化表现出特殊的物理力学特性会引起基础的冻拔、融沉破坏,严重影响基础的整体稳定性。

近年来,国内学者针对冻土地区桩基工程开展了大量研究工作^[1-12],并成功应用于青藏铁(公)路工程、青藏电网工程等重大基础建设中,取得了丰富的工程实践经验。然而实践表明:传统的现浇类基础施工周期较长,在交通不便、环境恶劣的冻土地区施工难度大,混凝土质量难以得到保障,导致基础工程的质量及进度与高标准、高质量、高效率的电网设施建设要求不相匹配。

近年来,装配式结构作为一种绿色建筑的新型结构体系被工业民用建筑行业广泛采用。与传统

现浇类基础相比,预制装配式基础具有“四化标准”,既可有效保证质量,又可节省基础工程的施工时间。架空输电线路基础不同于其他行业基础,主要以承受上拔荷载为主,而冻土地基中潜在的冻胀力无疑使得输电线路基础承受更大的上拔力。因此,针对冻土地区特殊的工程特性及相对恶劣的施工环境,亟待开发出一种承载性能优良、施工难度低、周期短的预制类装配式基础。

已有研究表明^[13-18]:锥体结构形式的基础较常规等截面柱体更加有利于削弱地基冻胀力。因此,本文提出一种适用于高寒地区输电线路工程的锥管板条装配式基础,该基型充分利用正锥体结构形式的优势,同时考虑基础现场制作的便利及安全。通过开展不同温度梯度下模型基础的冻结试验,从温度场分布、冻胀量、冻结土应力等几个方面分析了该基型的抗冻拔特性,为该种形式的基础在高寒地区输电线路工程中的应用提供理论依据和实践经验。

1 高寒地区输电线路装配式基础选型

高寒地区架空输电线路基础的选型应遵循以下主要原则:① 构件尺寸小型化,重量轻,便于运输安装;② 基础整体和构件结构设计有利于削弱冻胀力;③ 构件材料应具有抗冻胀性能。

目前架空输电线路工程中常用的装配式基础结构形式主要包括预制混凝土装配式基础、全金属型钢装配式基础、预制混凝土板条与角钢支架组合的装配式基础 3 种^[19]。从结构的受力特点、经济性以及工程的可实施性 3 个角度分析,上述 3 种形式基础应用高寒地区时存在以下不足:

(1) 预制混凝土装配式基础:基础立柱常设计为等截面结构,承受切向冻胀力较大,同时基础构件单件重量大,不便于就位安装。

(2) 全金属型钢装配式基础:塔腿主材直接充当基础立柱,呈倾斜布设,塔腿产生较大的不平衡法向冻胀力,塔腿主材强度不易满足要求,同时耗钢量增加。

(3) 预制混凝土板条与角钢支架组合的装配式基础:基础立柱有效面积大,导致其受到较大的切向冻胀力,同时倾斜布设的立柱会产生较大的不平衡法向冻胀力,导致塔腿主材强度不易满足要求,同时增加耗钢量。

鉴于此,本文提出一种锥台型钢管立柱金属板条式装配式基础(简称“锥管板条装配式基础”),该基础由锥管立柱与板条底座两部分组成,其中锥管立柱为上下底面均为圆形的空心圆台体,上表面用于连接杆塔,下表面用于和底座连接;底座由钢制或预制混凝土板条组成,其中板条与锥管之间通过法兰连接,如图1所示。该种结构形式的基础单体重重量轻,其正锥体的结构形式可有效削弱冻胀力;同时锥管与板条之间可以灵活拆卸拼装,省去了混凝土浇筑的工序,具有抗冻拔性能良好、施工周期短以及施工工艺简单的特点。

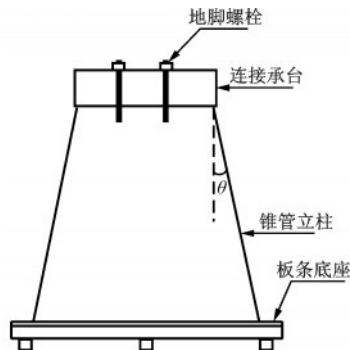


图1 本文提出的一种新型装配式基础
Fig.1 Schematic diagram of the assembled foundation proposed in this paper

2 地基土样特性

2.1 现场取样

本次试验依托 500 kV 海拉尔—牙克石(简称“海牙线”)输电线路工程,所用土样取自内蒙古自治区呼伦贝尔市谢尔塔拉镇所辖境内海牙线

53#基坑内。现场共取回原状土样 20 个,扰动土样 6 吨,如图 2 所示。其中原状土样用于土体物理力学特性指标测试,扰动土样用于基础模型的冻结试验。

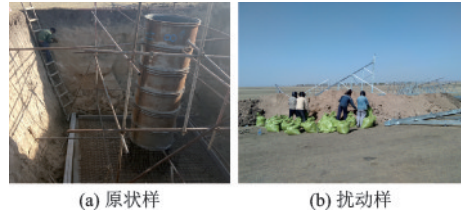


图2 取样现场
Fig.2 Sampling site

2.2 土样基本特性指标

通过土工试验,测得土样各项指标见表 1。依据《岩土工程勘察规范》^[20],判定为试验土样为非盐渍化强冻胀粉质黏土。

表 1 土样各项指标实测值

Table 1 Measured values of various indexes of soil samples

指标	数值
比重	2.5
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.5
含水率/%	10.4
液限/%	25.6
塑限/%	15.1
黏聚力/kPa	5.9
内摩擦角/($^{\circ}$)	10.4
最优含水率/%	11.17
最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.89
冻胀率/%	6.2
导热系数/($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	1.07
渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	5.87×10^{-5}

2.3 土样冻结温度及未冻水含量

土样在冻结过程中,孔隙水并不会全部转化成冰,未冻水是一直存在的,且未冻水含量与冻土温度和冻结温度(冰点)有关^[21]。因此,本文对土样冻结温度(冰点)及未冻水含量进行测试。

依据《土工试验方法标准》^[22],首先制作初始含水率分别为天然含水率、液限含水率、塑限含水率 3 个试样,分别测得各试样在相应含水率条件下的冻

结温度依次为 -0.054 、 -0.236 、 -0.097 $^{\circ}\text{C}$ 。依据标准中推荐的计算方法^[22],获得试样未冻水含量随冻结温度的变化曲线,如图3所示。从图中可以看出,试样在冻结状态时的未冻水含量及其变化幅度均随冷却温度的降低而逐渐减小,并趋于一个相对的稳定状态。同时,在极端低温下,土中仍有约1%的未冻水含量,即在工程实际中所谓的“冻透”现象中,仍有部分水分呈液态,冻胀程度随着环境温度的降低而加剧。

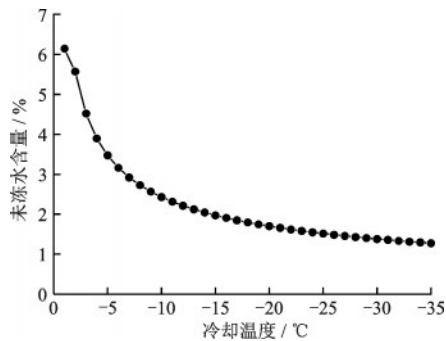


图3 未冻水含量与温度之间的变化曲线

Fig.3 Relationship between unfrozen water content and temperature

3 锥管板条装配式基础冻拔试验设计

3.1 模型基础

特高压直流工程上拔力的作用范围一般位于2 000~4 000 kN,参考相关文献^[23],设计出适用于工程的基础尺寸:高度 h 不小于6 m、底宽 B 不小于5 m。

冻土模型试验需遵循4个独立的相似准则^[16, 24]。本次模型试验所用土体取自现场,基础模型的材质及外形与工程基础相同,底板宽度 $B=0.5$ m、高度 $h=0.6$ m, $\theta=11^{\circ}$,尺寸大小为工程用基础的1/10,如图4所示。同时试验设计温度、湿度与现场条件基本保持一致,由此可确定本次模型试验的相似参数见表2。

3.2 试验装置

本次试验在自主研发的大型拼装式多功能冻土试验箱中进行^[25],该试验装置主由箱体单元、加

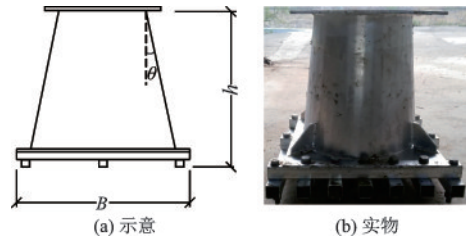


图4 模型基础示意

Fig.4 Schematic diagram of the model foundation

表2 本次模型试验的相似参数

Table 2 Similarity parameters of this model test

参数	几何比 C_l	时间比 C_t	应力比 C_σ	应变比 C_ϵ
数值	1/10	1/100	1	1

载单元和制冷单元3部分组成,如图5所示。其中,箱体单元由底板、围护板及其他辅件组成,箱体外轮廓尺寸为长 \times 宽 \times 高 $=2$ m \times 2 m \times 1 m,底板和围护板由含加劲肋的矩形钢板焊接而成;箱体内布设了加载装置,包括千斤顶、牵引梁、反力梁,用于对试验基础施加外荷载;制冷单元由步入式低温恒温温室、低温冷浴器、隔热板和冷媒管组成,试验箱中土体的温度由步入式低温恒温温室(最低制冷温度为 -30 $^{\circ}\text{C}$)和低温冷浴器(最低制冷温度为 -50 $^{\circ}\text{C}$)共同调节。

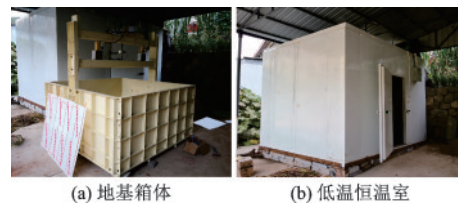


图5 试验装置

Fig.5 Test device

3.3 基础施工

考虑环境温度对试验结果的影响,试验于2018年10月份开始。首先根据设计方案,在基础构件表面布设应变传感器;然后将现场取回的土样人工制备成含水率为10.4%的填料,依次填入试验箱,按照设计图纸分别预埋温度、应力传感器,并引出测试线与采集系统连接;最后居中放置模型基础,按照工程要求,分层填筑并碾压,以达到95%压实度,回填至设计高度后,在地基表面撒上2 cm厚的散土,用于减少试验过程中地基土体水分的流失。基础施工过程如图6所示。

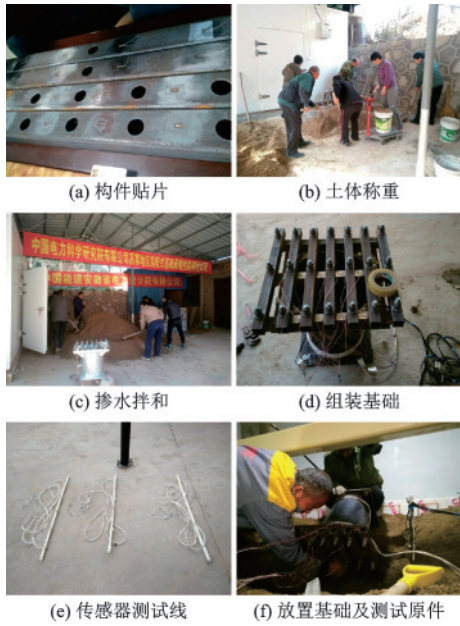


图6 试验基础施工过程

Fig.6 Construction process of the test foundation

3.4 测试方案

为研究冻结过程中地基土体不同位置处温度、应力、位移的实时变化,分别在地基与基础不同位置处布设了温度、应力、应变、位移四类传感器,其中温度采用WZP-02型的PT100温度传感器测试,土压力采用CJLY-350型应变式微型土压力盒测试,构件应变采用BE120-3AA(11)型胶基箔式电阻应变片测试,位移采用数显千分表测试,如图7所示。每一类测试原件的具体布设位置如图8所示。

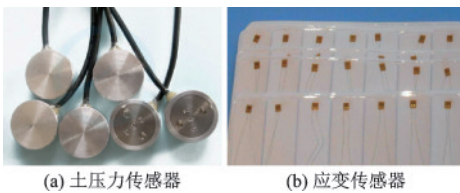


图7 测试原件实物图

Fig.7 Physical diagram of the sensors

3.5 冻结试验条件及样本

依据相关气象资料^[26],呼伦贝尔市海拉尔区年平均气温如图9所示。从图9中可以看出,当年10月开始上冻,次年3月逐渐开始解冻,该期间日均气

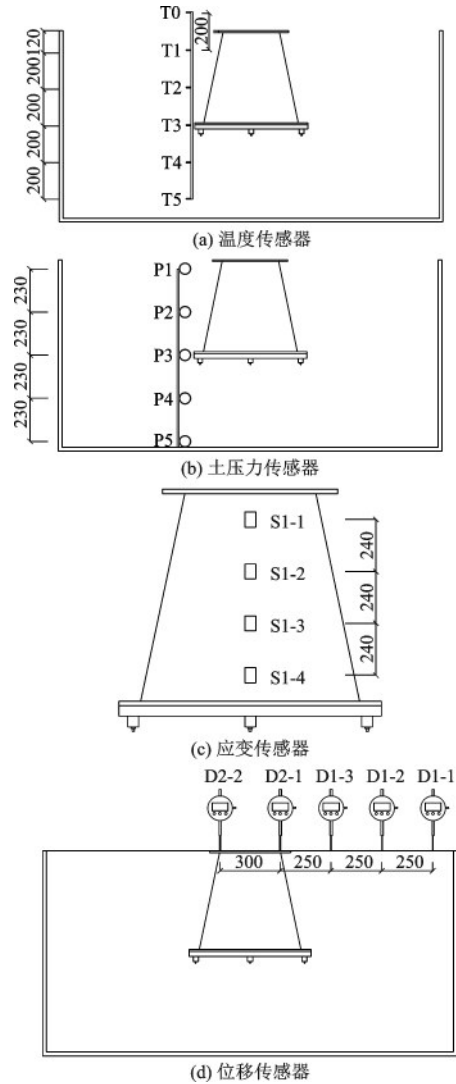


图8 测试原件布设方案

Fig.8 Layout plan of the sensors

温 $-28\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此本次试验的环境温度设定为 -5 、 -10 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3个梯度,每个温度条件下开展3组试验,见表3。

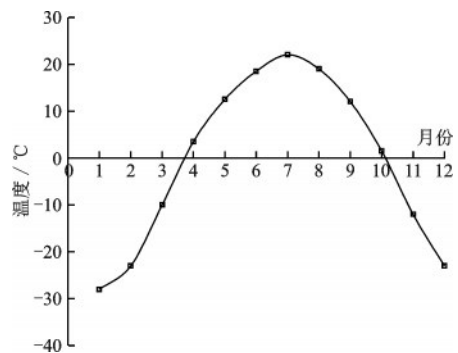


图9 取样点温度变化趋势

Fig.9 Trend chart of temperature changes at the sampling point

表3 试验条件及样本

Table 3 Test conditions and samples

编号	环境温度/°C	样本数量
No.1	-5	3
No.2	-10	3
No.3	-15	3

3.6 试验实施

冻结试验过程中,地基和基础顶部均为自由边界,垂直方向与水平方向双向冻结,试验时间为7天,冻结过程中实时采集相关数据。为确保地基土体较为稳定的达到试验设定温度,调节步入式低温恒温室和低温冷浴器的温度回差分别为1°C和0.1°C。

结束试验后,关停仪器,整理回收试验用具,将制冷单元(包括步入式低温恒温室和低温冷浴器)调节至正温,待地基融化后,将地基土体挖出晾晒,重新调制地基土样,为下一组试验做准备。

4 锥管板条装配式基础冻拔特性分析

4.1 地基温度场分布

图10为9组试验中,步入式低温恒温室内的环境温度时程曲线(图8(a)中T0号传感器的测值)。由图10可知,试验开始不久,室内环境温度便达到相应的目标值,但测值读数显示不稳,均在一定的范围内波动。这主要由于试验采用的步入式低温恒温室的控温原理为位式控制法,其回差温度值最小可设置为1°C,因此温度会出现有限范围内的波动状态。

图11所示为地基不同位置处实测温度的时程曲线,从图中可以看出地基土体内部不同位置处的温度随着时间的累积,呈逐渐降低的变化趋势。为分析地基土体温度沿深度方向分布规律,列出试验第7天时,9个试验样本最高、最低温度及所处位置,见表4。从表中可以看出地基表面土体温度最低,降温效果最为显著,这主要由于该位置土体与环境的热量交换效率最高。分析表明,冻结环境设定温度为-5、-10、-15°C时,地基最终平均温度

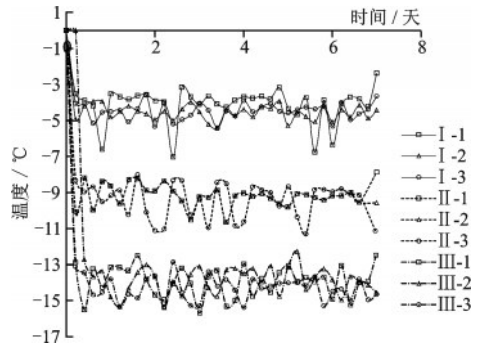
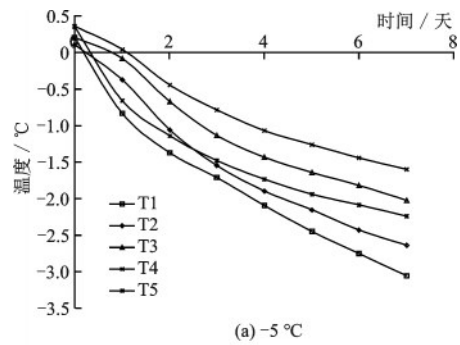


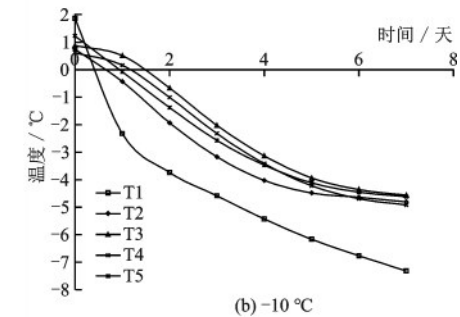
图10 室内环境温度时程曲线

Fig10 Time history curves of indoor ambient temperature

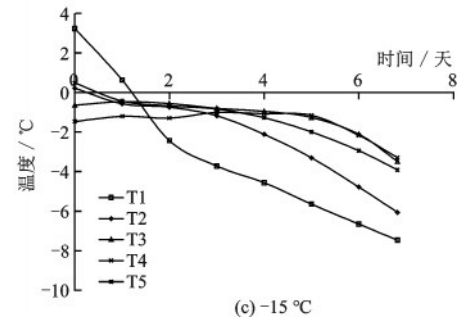
分别为-2.64、-7.22、-8.12°C,均低于冻结温度(-0.054°C),且高于环境温度,此时地基土体均处于冻结状态,但尚未与室内环境完全达到热交换平衡状态。



(a) -5°C



(b) -10°C



(c) -15°C

图11 地基不同位置处温度的时程曲线

Fig.11 Time history curves of temperature at different positions of foundation

表4 土体内部最高、低温度分布位置(试验第7天)

Table 4 Maximum and minimum temperature distributions in soil(7th day of test)

编号	最低温度/°C	出现位置	最高温度/°C	出现位置
I-1	-1.88	T1	-0.22	T3
I-2	-2.98	T1	-1.7	T3
I-3	-3.05	T1	-1.6	T4
II-1	-7.06	T1	-0.83	T3
II-2	-7.32	T1	-4.56	T3
II-3	-7.28	T1	-5.25	T5
III-1	-4.81	T1	-1.59	T3
III-2	-7.47	T1	-3.3	T4
III-3	-12.07	T1	-10.43	T5

4.2 冻胀位移

图12为基础顶部及地表不同位置处位移时程曲线,从图12中可以看出,基础及地表的冻胀位移均随着冻结时间的积累呈逐渐增大、后逐渐稳定的变化趋势。同时,地表不同位置处的冻胀位移也存在差异,其值与其距基础边缘的距离有关。相比地基的冻胀位移,基础的冻拔位移量相对较小,由此表明该种正锥体结构形式的基础可有效削弱切向冻胀力,减少其对基础本体冻拔效用的影响,具有较良好的抗冻拔性能。

计参数 l 为距基础边缘的距离,分别统计出 l 为不同值时,9个试验样本的最终冻胀量,见表5。从表5中可以看出,3种温度梯度下,地基基础的冻胀量均随着 l 的增大而逐渐增大,其中基础顶部($l=0$)最小,分别为0.43、0.52、0.69 mm, $l=75$ cm处,冻胀量最大,分别为0.96、1.32、0.93 mm。原因在于,当地基内部土质均匀且无其他构件时,地基相当于半无限的均匀体,地基的冻胀是均匀的,可看作“自由冻胀”。当地基中部埋入基础后,由于土体冻结过程中的体积膨胀作用对基础产生土压力作用,基础周围地基土的冻胀则受到基础的反约束作用,导致非均匀冻胀现象,该作用可称为“约束冻胀”。地基土靠近基础越近,受到的基础约束作用越大,冻胀量越小,当超过一定距离时,则逐渐接近自由冻胀,冻胀量越大。

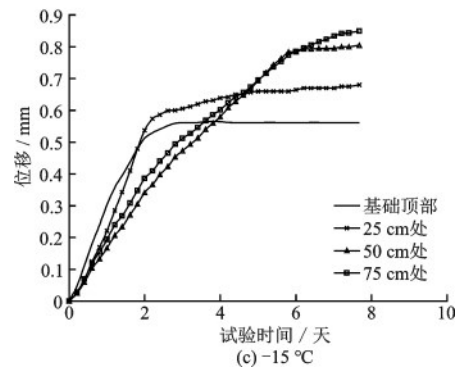
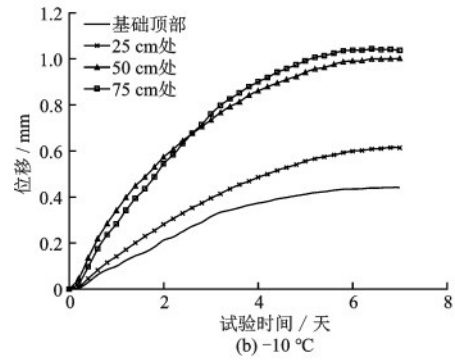
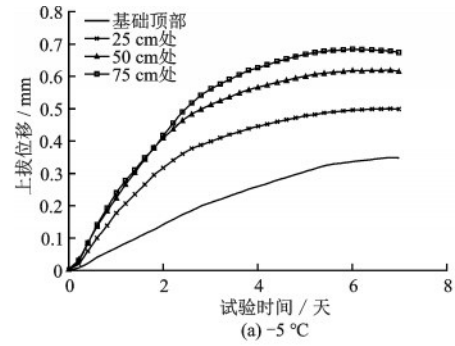


图12 不同位置处地基基础冻胀位移时程曲线

Fig12 Time history curves of frost heave displacement of foundation top and surface soil at different positions

表5 不同位置处地基基础最终冻胀量

Table 5 Final frost heave of the foundation top and surface soil at different positions

编号	地基			
	基础顶部 $l=0$	$l=25$ cm	$l=50$ cm	$l=75$ cm
I-1	0.33	0.38	0.46	0.71
I-2	0.62	0.77	0.99	1.49
I-3	0.35	0.5	0.62	0.67
II-1	1.14	1.32	2.04	2.06
II-2	0.44	0.61	1	1.04
II-3	0.5	1.04	0.98	0.87
III-1	0.48	0.63	1	1.08
III-2	0.56	0.68	0.81	0.85
III-3	0.53	0.96	0.9	0.86

4.3 土中应力

图 13 为冻结试验过程中地基土体冻胀力时程变化曲线。由图 13 中可以看出,地基冻胀力呈现先逐渐增大、后逐渐稳定的变化趋势,这与地基冻胀位移时程曲线的整体变化规律一致(图 12)。

冻胀力是周围环境或边界条件限制土体冻结膨胀而产生的反作用力,其值与周围介质的变形有关。冻结试验初期,地基冻胀位移发展较快(图 12 中曲线初始段斜率较大),在周围土体约束下,地基内部迅速产生较大的冻胀力;随着冻胀位移发展趋于稳定(图 12 中曲线后段趋于水平,斜率趋于 0),土体内部冻胀力的变化也趋于稳定。由此表明:地基内部冻胀力的大小与相应处冻胀位移呈正相关。

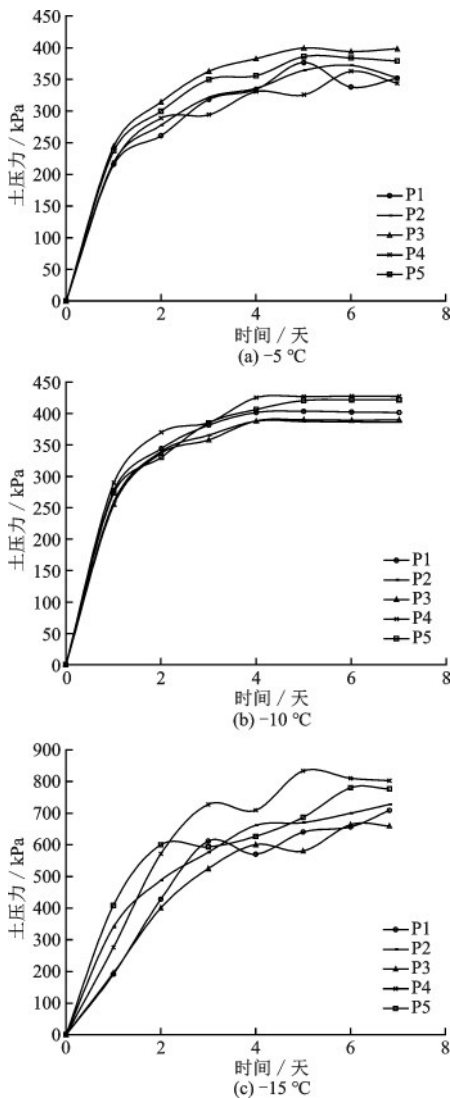


图 13 地基土体不同位置处冻胀力时程曲线

Fig.13 Time history curves of soil frost heave force at different positions

图 14 为地基冻胀力与温度之间的关系曲线,从图 14 中可以看出,地基中每一处冻胀力均随着温度的降低而逐渐增大,起初变化幅度较小,后期变化幅度急剧增大。经统计, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冻胀力平均值为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 1.2 倍,而 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冻胀力的平均值为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 2 倍, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 2.3 倍。由此表明,冻胀力的增加幅度随着温度的降低而增大。已有研究表明^[27]:地基内部法向冻胀力的大小与冻结锋面上析冰启动的“微型千斤顶”数量有关,温度越低,冻结锋面上启动的“微型千斤顶”数量越多。

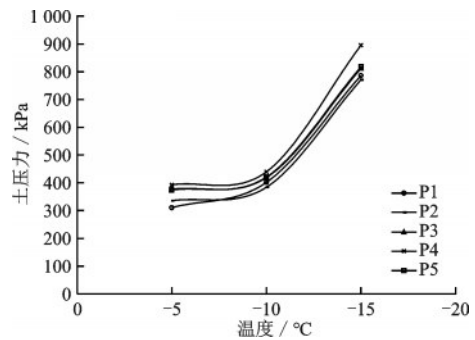


图 14 地基冻胀力与温度之间的关系曲线

Fig.14 Relationships between soil frost heave force and ambient temperature

4.4 基础应力

图 15 为模型基础锥管外壁不同位置处应变的时程曲线,从图 15 中可以看出,随着时间的累积,锥管立柱不同位置处的应变值呈非线性增加趋势。统计出每个试验样本最终的应变值,依据胡克定律,换算成应力,见表 6。从表中可以看出,9 个试验样本中,除样本 I-1 中 S1-1 位置处,其他测点均承受拉应力,锥管所受到的最大拉应力为 2.56 MPa,远小于 Q235 钢的屈服强度 235 MPa,由此说明钢管锥柱结构体在弹性状态下工作,冻结作用对材料强度的影响可不予考虑。

4.5 地基破坏模式

图 16 为冻结试验第 4 天和第 7 天时,地基表面的裂缝分布图,从图中可以看出,冻结第 4 天开始,随着地基内部温度不断降低,地基土体出现冻胀上抬的同时,地表不同位置处出现发状的细微裂缝,多数沿径向分布(图 16(a))。随着冻结试验的进行,地基土体内部温度逐渐降低,地表除大面积分布的发状裂缝之外,在冻结试验后期逐步形成数条

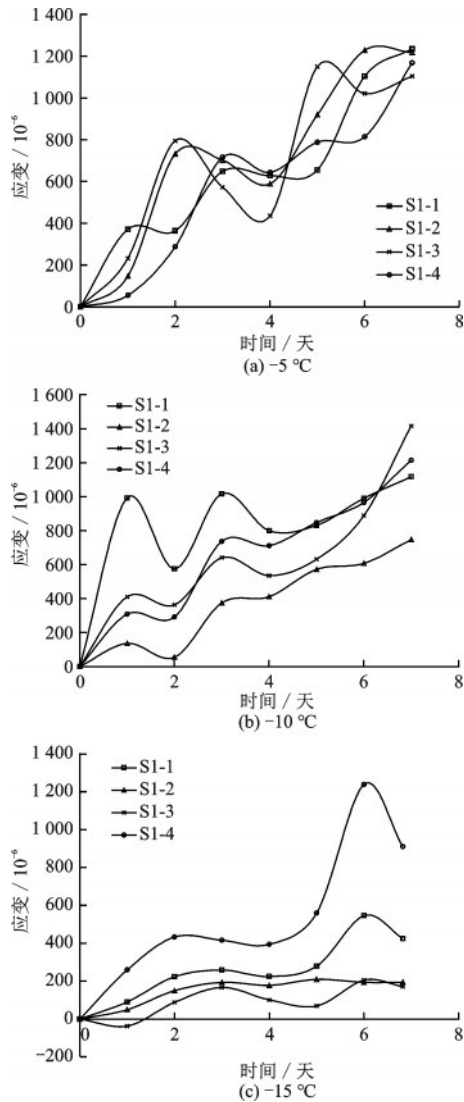


图 15 基础不同位置处应变时程曲线

Fig.15 Time history curves of foundation strain at different positions

表 6 锥管外壁不同位置处所受应力

Table 6 Stress on the outer wall of cone tube at different positions

编号	应力/MPa			
	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4
I-1	-0.42	0.13	0.06	0.19
I-2	2.28	2.53	2.10	1.68
I-3	0.63	0.48	0.75	1.44
II-1	0.77	0.59	0.74	1.80
II-2	2.04	1.25	1.83	1.99
II-3	1.53	2.34	2.56	1.14
III-1	0.77	0.59	0.74	1.80
III-2	1.13	0.40	0.42	2.55
III-3	0.69	1.62	1.76	1.22

裂缝宽度相对大、视觉相对显著的裂缝,并沿基础顶部矩形顶板向四周呈放射状分布(图 16(b))。这主要由于地基冻胀力的不断增大导致其将紧挨着的土颗粒撑开(从力学角度分析^[28],即该处冻胀力大于其自身强度)。然而,是否能被撑开,撑开距离的大小与外界约束条件有关,对于地表土体,由于边界自由无约束,因此在冻结过程中首先出现大面积分布的发状裂缝,其后随着冻胀力的增大,应力释放导致局部出现放射状裂缝。

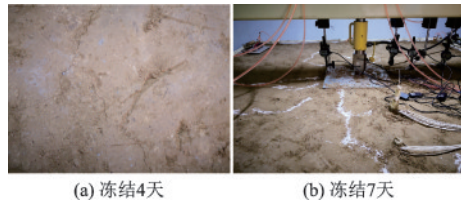


图 16 地表冻胀裂缝分布

Fig.16 Distribution of surface frost heave cracks

5 结论及建议

结合高寒地区输电线路工程的特点,提出一种锥管板条装配式基础,通过开展不同温度梯度下的冻结试验,得出如下结论:

(1)地基土体内部不同位置处的温度随着时间的累积,均呈逐渐降低的变化趋势,由于地基土体短时间内无法与室内环境完全达到热交换平衡状态,因此地基土体内部最终温度均高于环境温度,但低于土体的冻结温度,土体完全处于冻结状态。

(2)基础及地基的冻胀位移均随着冻结时间的积累呈逐渐增大、后逐渐稳定的变化趋势,相比地基的冻胀位移,基础的冻拔位移相对较小,由于基础的“约束冻胀”作用,地基的冻胀量随着距基础边缘距离的增加而增大。

(3)地基冻胀力与地基冻胀位移之间呈正相关。随着冻结环境温度的降低,地基内部冻胀力逐渐增大,并且其增加幅度随着温度的降低而增大。从冻土力学角度分析,冻胀力与冻结锋面上析冰启动的“微型千斤顶”数量有关,温度越低,冻结锋面上启动的“微型千斤顶”数量越多,相应处冻胀力也越大。

(4)冻结试验中,锥管表面受到不同程度的拉应力,其值远小于材料的屈服强度;冻胀力作用下,土体表面首先出现呈发状的细微裂纹,随着冻结时

间的累积,地表裂缝逐渐加宽并扩张,沿基础中心向四周呈放射状分布,这主要由于冻结后期冻胀力的释放,进一步扩张了发状裂缝的开口宽度和深度。

本文提出的基型具有较好的抗冻拔性能。但架空输电线路不同于其他行业基础,除承受下压力之外,还承受上拔力与水平力,因此还需采取必要的工程措施提高基础的抗冻拔性能:

(1)本着就地取材的原则,宜采用砂石、卵石、炉渣等非冻胀性材料回填基坑及空心锥管,这一方面可有效消除基础表面的切向冻胀力,另一方面可通过增加基础本体自重提高抗拔力。

(2)宜对基础外表面作光滑抹面处理,减小土体与基础间的摩擦系数;也可通过优化基础结构形式,减小基础与土体的接触面积(如采用小直径大底板的结构形式),以达到削弱基面切向冻胀力的目的。

参考文献:

[1] Isaev ON, Volkov FE, Minkin MA. Static-penetration determination of the bearing capacity of piles in plastic-frozen soils [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1987, 24 (5): 194-198.

[2] Thompson SR, Tart RG. Driven pile capacities in warm permafrost in Komi republic [C] //Russia. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Cold Regions Engineering*. Alaska, USA: ASCE, 1996: 254-265.

[3] Titi H, Wathugala G. Numerical procedure for predicting pile capacity-setup/freeze [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1999, 1663(1): 25-32.

[4] Li N, Xu B. A new type of pile used in frozen soil foundation [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53 (3) : 355-368.

[5] ChenGang Sheng, Davis Duane, Leroy Hulsey J. Measurement of frozen soil-pile dynamic properties: A system identification approach [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 70: 98-106.

[6] Gu Q, Yang Z, Peng Y. Parameters affecting laterally loaded piles in frozen soils by an efficient sensitivity analysis method[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 121: 42-51.

[7] 赖远明,朱元林,吴紫汪.桩基冻胀力三维问题的积分方程解法[J]. *铁道学报*, 1998 (6): 432-437.
Lai Y M, Zhu Y L, Wu Z W. A simple integral equation method for three-dimensional frost heaving force problem of piles[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1998 (6): 432-437. (in Chinese)

[8] 李洪升,刘增利,朱元林.冻土断裂学在桩基冻拔稳定性计算中的应用[J]. *冰川冻土*, 1998(2): 112-115.
Li H S, Liu Z L, Zhu Y L. Application of the fracture mechanics of frozen soil to the calculation of stability of pile foundation uplift [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998(2): 112-115. (in Chinese)

[9] 程永锋,鲁先龙,刘华清,等.青藏铁路110kV输电线路冻土桩基模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(增1):4378-4382.
Chen Y F, Lu X L, Liu H Q, et al. Model test study on pile foundation of 110 kV transmission line of Qinghai Tibet railway in frozen soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23 (Sup1) : 4378-4382. (in Chinese)

[10] 汪仁和,王伟,程永锋.冻土中单桩抗拔承载力的模型试验研究[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5):766-771.
Wang R H, Wang W, Chen Y F. Model study of tensile bearing capacity of a single pile under frozen condition[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5):766-771. (in Chinese)

[11] 蒋代军,郭春香.青藏高原多年冻土区单桩承载力的长期稳定性[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(2):59-65.
Jiang D J, Guo C X. Long-term stability of bearing capacity of single pile in permafrost area on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2016, 36(2) : 59-65. (in Chinese)

[12] 王腾飞,刘建坤,邵博文.螺旋桩冻拔特性的模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018,40(6):1084-1092.
Wang T F, Liu J K, Tai B W. Model experiment on frost jacking behaviors of helical steel pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40 (6) : 1084-1092. (in Chinese)

[13] 周有才.基侧斜面基础克服切向冻胀力的最小夹角[J]. *建筑技术*, 1990(10):23-25,54.
Zhou Y C. The minimum angle between the tangent frost heaving force and the slope foundation on the base side[J]. *Building Technology*, 1990 (10) : 23-25, 54. (in Chinese)

[14] 王力生,张云芳,刘鸿绪.斜面基础防切向冻胀力的

- 受力分析[J]. 低温建筑技术, 1995(3):30-32.
Wang L S, Zhang Y F, Liu H X. Stress analysis of anti-tangential frost heave force of inclined foundation[J]. Low Temperature Building Technology, 1995 (3): 30-32. (in Chinese)
- [15] 何晓光,张洪玉,于宏伟. 桩基冻拔及补救措施[J]. 水利科技与经济, 2002, 8(3):184-185.
He X G, Zhang H Y, Yu H W. Pile foundation freeze drawing and remedial measures[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2002, 8 (3): 184-185. (in Chinese)
- [16] 苏凯,张建明,冯文杰,等. 多年冻土区斜坡地带锥柱基础初始回冻过程模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 44(4): 794-799.
Su K, Zhang J M, Feng W J, et al. Model tests on initial freezing process of column foundation on slope in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 44(4):794-799. (in Chinese)
- [17] 徐会永,孙义红,张家琦,等. 季节性冻土地区通信铁塔地基设计及施工处理探讨[C]//中国高耸结构第十九届学术交流会. 西宁:中国土木工程学会, 2008.
Xu H Y, Sun Y H, Zhang J Q, et al. Foundation design and construction treatment of communication tower in seasonally frozen soil area[C]//The 19th Academic Exchange Conference of China's High-Rise Structure. Xining: China Society of Civil Engineering, 2008. (in Chinese)
- [18] 李孝臣. 季节冻土区高压输电杆塔斜面基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2008.
Li X C. Study on slope foundation of high voltage transmission tower in seasonal frozen soil area[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [19] 郑卫锋,鲁先龙,程永锋. 输电线路装配式杆塔基础关键技术及标准化研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2016.
Zheng W F, Lu X L, Cheng Y F. Key technology and normalization on assembly foundation in transmission line tower engineering [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2016. (in Chinese)
- [20] 岩土工程勘察规范(2009版): GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [21] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
Xu X Z, Deng Y S. Experimental study on water migration in freezing and frozen soils [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- [22] 土工试验方法标准: GB 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [23] 胡志义,管顺清,童武,等. 高海拔多年冻土区基础选型及设计应用研究[R]. 西安:西北电力设计院, 2012.
Hu Z Y, Guan S Q, Tong W, et al. Study on foundation selection and design application of permafrost area at high altitude [R]. Xi'an: Northwest Electric Power Design Institute, 2012. (in Chinese)
- [24] 李东庆,朱林楠. 荷载作用下冻土模型试验相似分析[J]. 自然科学进展, 1994, 4(3): 322-327.
Li D Q, Zhu L N. Similitude analysis of modeling test for pressure in the freezing-thawing process of soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 4 (3): 322-327. (in Chinese)
- [25] 中国电力科学研究院有限公司. 一种多功能冻土模型试验装置及其试验方法: 中国, 201911015894.0[P]. 2019-12-19.
China Electric Power Research Institute Co., Ltd. A multifunctional frozen soil model test device and its test method: Chinese, 201911015894.0 [P]. 2019-12-19. (in Chinese)
- [26] 中国气象局: 海拉尔全年气温, 天气网, 2018.1~12, http://www.tianqi.com/qiwen/city_hailaer/.
China Meteorological Administration: annual temperature in Hailar, Weather Network, 2018.1~12, http://www.tianqi.com/qiwen/city_hailaer/.
- [27] 刘鸿绪,朱卫中,朱广祥,等. 再论冻胀量与冻胀力之关系[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1):63-66.
Liu H X, Zhu W Z, Zhu G X, et al. Research on relationship of frost-heaving forces and amount of frost-heaving again[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(1):63-66. (in Chinese)
- [28] 马巍,王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Ma W, Wang D Y. Frozen soil mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)