

# 多年冻土区锥柱基础抗拔承载性能试验研究

许健<sup>1</sup>, 袁俊<sup>2,3</sup>, 管顺清<sup>2</sup>, 钱文君<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075;  
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**以青藏直流输电线路工程为背景,在活动层处于冻结和融化状态时,分别进行上拔和水平力组合荷载作用下锥柱基础抗拔承载特性真型荷载试验。试验表明:冻结期冻土地基整体处于冻结状态,冻土地基回冻情况良好;融化期最大融化深度与地基多年冻土上限较吻合,表明施工开挖对多年冻土地基热稳定性影响较小。上拔加载过程中基础底板接触土压力减小,基底扩展板上方土体土压力明显增大,基础侧壁土压力变化不明显。冻结期基础位移量显著低于融化期,承载力明显高于融化期;基础上拔荷载与上拔位移关系可采用幂函数模型进行预测。融化期基础抗拔承载力试验值与规范法计算结果比较吻合;冻结期试验抗拔承载力与规范计算值存在一定差异。

**关键词:**多年冻土;锥柱基础;抗拔承载力;温度场

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0070-06

## Experimental studies on the uplift bearing capacity of cone-cylindrical foundation in permafrost area

XU Jian<sup>1</sup>, YUAN Jun<sup>2,3</sup>, GUAN Shunqing<sup>2</sup>, QIAN Wenjun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-

Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:**Based on the background of Qinghai-Tibet DC Engineering, the uplift bearing capacity of cone-cylindrical foundation under uplift and horizontal loads is put to test, while the active layer was in the freezing and thawing state. Research results show that the ground temperature is in a frozen state during the freezing period, indicating that the foundation refreezing is in a good condition. During the thawing period, the maximum melting depth is in accordance with the upper limit of permafrost, indicating that the effect of construction excavation on the thermal stability of frozen soil foundation is slight. The soil pressure of the foundation plate is reduced, the soil pressure on the top of the basal plate is obviously increased, and the pressure on the foundation wall is not obvious during the uplift loading process. The displacement of cone-cylindrical foundation in freezing period is significantly lower than that in the melting period and the bearing capacity is significantly higher than that in the melting period. The power function model can predict the relationship between uplift load and displacement. The calculation results of uplift bearing capacity by the standard method are in agreement with the experimental results in the melting period. However, there is some difference between the values of test and standard in the freezing period.

**Key words:**permafrost; cone-cylindrical foundation; uplift bearing capacity; temperature field

随着我国社会经济的发展及西部大开发的不断深入,在青藏高原等多年冻土区建设输电线路工程是不可避免的,相应的寒区工程问题无法回避。目前,国内外研究人员已在冻土物理力学性质试验方法、力学特性、冻融病害治理、人工冻

土及冻土工程技术应用等方面取得了大量研究成果<sup>[1-8]</sup>。研究显示,冻融循环对土体结构的冷生作用,可导致冻土工程力学性质发生显著变化。多年来,我国研究人员结合青藏铁路和公路工程,进行了大量的冻土学基础理论及试验研究。此外,

收稿日期: 2016-01-12 修改稿日期: 2016-12-29

基金项目: 国家电网公司科学技术基金资助项目(SGKJJSKF[2009]553); 冻土工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLFSE201312); 西北电力设计院技术创新科研基金资助项目(XB1-TM04-2013)

作者简介: 许健(1980—),男,博士,副教授,主要从事寒区岩土工程研究。E-mail: xujian@lzb.ac.cn

为确保冻土地区地基基础的安全, 研究学者亦开展了大量研究工作. 汪仁和等对冻土中单桩的抗压承载力进行了模型试验研究<sup>[9]</sup>; 王旭等针对多年冻土区灌注桩的承载力和变形特性进行了桩基现场抗压载荷试验研究<sup>[10]</sup>; 张建明和朱元林对动荷载作用下冻土中模型桩做了沉降试验研究<sup>[11]</sup>; 臧国华等对青藏直流联网工程杆塔基础的防冻胀措施进行了初步分析<sup>[12]</sup>; 丁士君等通过现场实验初步研究了锥柱基础不同冻结期承载力及变形性质<sup>[13]</sup>; 苏凯等通过锥柱基础初始回冻过程模型试验对工程设计、施工与维护提出建议<sup>[14]</sup>. 锥柱(斜面)基础作为新型的抗冻拔基础, 具备了消减外部荷载(切向冻胀力)和加强抗力作用(底板锚固)的优点, 近年得到了广泛的推广和应用. 但针对冻土地区锥柱基础受力状态及上拔和水平力组合荷载作用下基础承载力特性研究, 特别是活动层冻融状态下锥柱基础承载性能尚未进行深入研究.

基于此, 本文以青藏直流输电线路工程为背景, 依托高海拔多年冻土区基础选型及设计研究课题, 通过锥柱基础现场真型载荷试验, 分析冻融过程地基温度场变化规律, 研究上拔和水平力组合荷载作用下基础的承载性能, 为工程设计提供依据, 也为类似工程积累技术经验.

1 试验概况

1.1 试验基础设计及反力锚桩布置

试验场地位于青藏高原五道梁 110 变电所东南角, 距变电所约 100 m. 试验基础与反力锚桩按“一”字形布置, 其中试验基础 2 个, 编号分别为 ZZ1、ZZ2; 竖向反力基础和水平反力地锚各 3 个. 试验基础尺寸和场地布置见图 1. 依据 DL/T 5219-2014《架空输电线路基础设计技术规程》<sup>[15]</sup>, 上部结构对基础作用力标准值为: 上拔荷载 450 kN, X 向水平荷载设计值 50 kN, Y 向水平荷载设计值 50 kN; 混凝土设计强度等级为 C30.

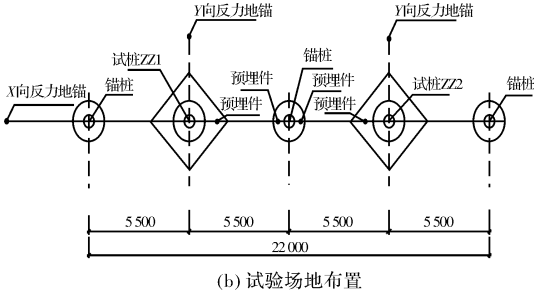
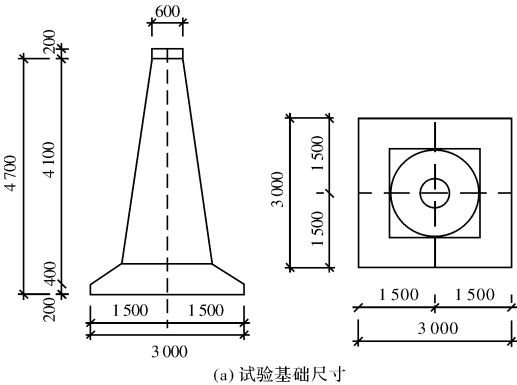


图 1 试验基础尺寸与平面布置(单位: mm)

Fig. 1 Dimensions and layout of the test foundation(unit: mm)

1.2 加载监测方案

载荷试验测试系统主要为荷载和位移测试, 试验采取上拔和水平力组合荷载作用下同时加载. 依据规范, 静载荷试验采用分级加载, 每级荷载稳定的判断标准与单向静载试验判断依据相同, 其终止条件包括基础位移突变、荷载无法稳定、达到位移限值、最大施加荷载、基础结构破坏等, 并据此确定基础的极限承载力和极限位移.

温度是影响冻土地基承载性能的主要因素之一, 不同温度下其工程性质会有很大差异. 因此, 本次试验沿基础埋深每米布置 1 组温度传感器至地下 20 m, 在静载试验期内进行地基温度监测. 此外, 为分析上拔过程中冻土地基基础相互作用特性, 采用土压力计测试基础周围土压力变化规律, 土压力计具体布置见图 2. 试验加载选择在冻结期和融化期分别对 ZZ1 和 ZZ2 基础进行载荷试验, 试验项目如表 1 所示.

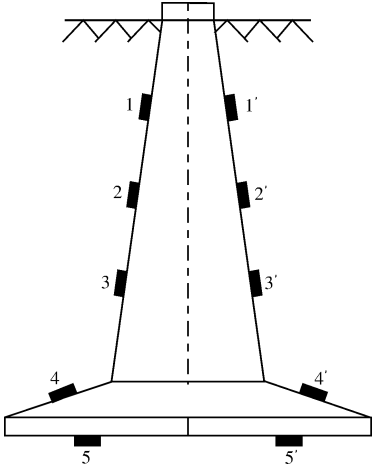


图 2 基础表面土压力盒布设位置示意图

Fig. 2 Location of earth pressure cells

表 1 试验项目分类

Tab. 1 Classification of the test

试验类型	试验工况	试验对象	试验日期
静载试验	上拔+水平力组合	ZZ1	冻结期
	上拔+水平力组合	ZZ2	融化期

## 2 试验结果与分析

### 2.1 冻土地基温度场分析

图3为不同监测时期冻土地基温度随埋深变化关系。从图中可以看出,冻土地基约2 m以上温度测点随外界气温变化趋势明显,且变化幅度较大;2 m以下温度测点随气温变化幅度较小,趋于稳态,且地基土层始终处于冻结状态,由此可得该试验场地多年冻土上限为2.0 m左右。

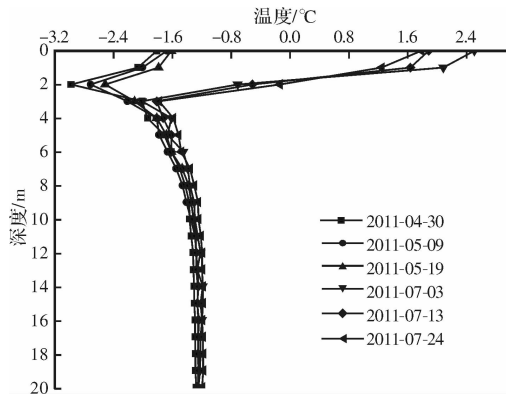
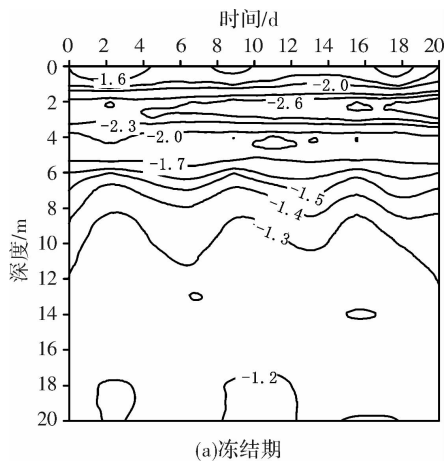


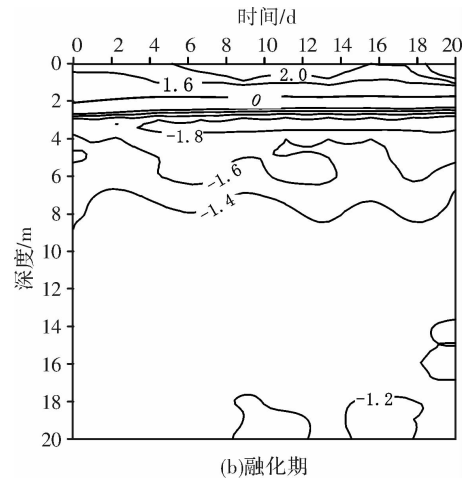
图3 冻土地基温度随埋深变化

Fig. 3 Temperature variation along depth

冻结期和融化期冻土地基温度时程变化规律分别如图4(a)~(b)所示。图5(a)~(b)分别为冻结期和融化期不同深度处地温随时间变化规律。从图4~5中地温监测数据可以看出,冻结期地基温度波动幅度不大,地基整体处于冻结状态,反映出锥柱基础开挖及土方回填对多年冻土地基温度场扰动较小,地基回冻情况良好;融化期地基温度随时间变化整体亦较稳定,最大融化深度( $0^{\circ}\text{C}$ 等值线)约为2 m,与地基多年冻土上限较吻合,反映出施工开挖对多年冻土地基热稳定性影响较小。



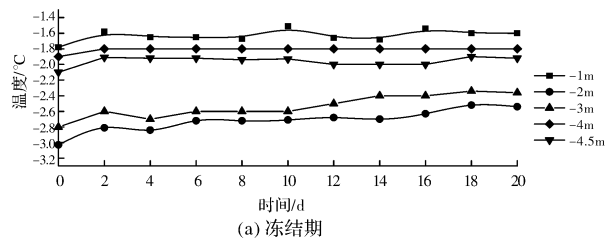
(a)冻结期



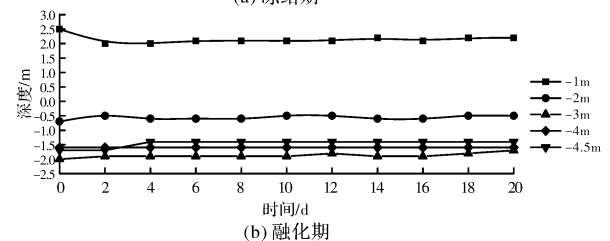
(b)融化期

图4 不同时期冻土地基温度时程图

Fig. 4 Temperature distribution in subgrade over time



(a)冻结期



(b)融化期

图5 冻土地基温度随时间变化关系

Fig. 5 Relationship between temperature and time

### 2.2 冻土地基基础相互作用分析

图6(a)和(b)分别为冻结期和融化期加载过程中土压力变化规律(土压力计布置位置见前面图2)。从图中可以看出,无论冻结期或融化期,上拔加载过程中土压力表现出相似的变化规律:基础底板接触土压力减小;基底扩展板上土体因整体受到挤压作用,加载过程中土压力明显增大;由于加载过程中水平荷载相对较小,因而基础侧壁土压力变化不明显。

### 2.3 基础承载力分析

图7为试验基础荷载-位移曲线。由图可见,基础上拔荷载-上拔位移曲线及水平荷载-水平位移曲线均表现为缓变型。相同荷载下冻结期基础位移量显著低于融化期,冻结期抗拔及水平承载力明显高于融化期。分析其原因,主要是由于冻结期活动层回冻情况较好,地基承载力较高的缘故。

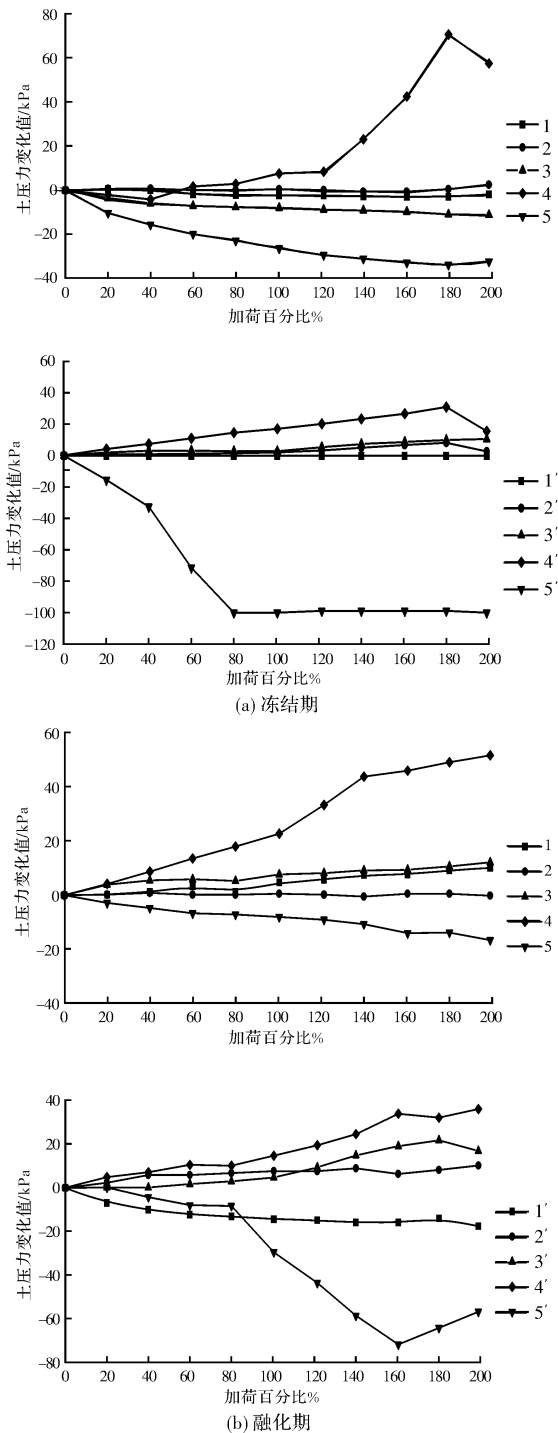


图 6 加载过程中土压力变化

Fig. 6 Variation of soil pressure during loading

根据荷载与位移关系曲线特点, 及地基与基础在加载过程中的表现等, 试验基础极限承载力均取最大稳定加载量。不同工况下基础极限承载力取值如表 2 所示。

目前, 国内外学者多采用双曲线模型、幂函数模型、指数函数模型等描述基础荷载-位移曲线。按照以往工程经验, 上拔荷载作用下地基基础发生剪切破坏时, 可采用双曲线模型表征上拔荷载与上拔位移关系<sup>[16]</sup>。但双曲线模型中极限承载力

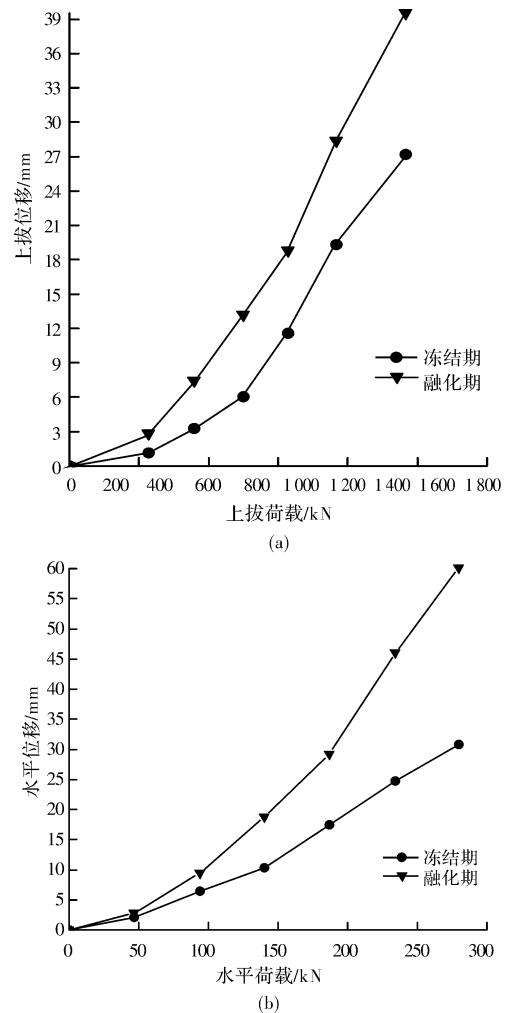


图 7 试验基础荷载-位移曲线

Fig. 7 Loading-displacement of the foundations

表 2 基础极限承载力取值

Tab. 2 Bearing capacity values of foundations

工况	上拔方向		水平方向	
	极限荷载 /kN	极限位移 /mm	极限荷载 /kN	极限位移 /mm
冻结期(ZZ1)	1 450	27.19	280	30.77
融化期(ZZ2)	1 150	30.00	234	46.09

是在假设基础上拔量趋于无限大时得到的, 这与实际试验结果不相符, 因此本次试验采用幂函数模型表征基础上拔荷载与上拔位移关系, 其关系式为:

$$S = aT^b \quad (1)$$

式中:  $T$  为上拔荷载, kN;  $S$  为基础位移, mm;  $a$ 、 $b$  分别为曲线拟合计算参数。

图 8 为基础上拔荷载与上拔位移关系的实测与拟合曲线对比。从图中可以看出, 拟合曲线与实测曲线有较好的一致性, 表明幂函数模型能够较好的预测试验基础的抗拔承载能力, 拟合参数见表 3。

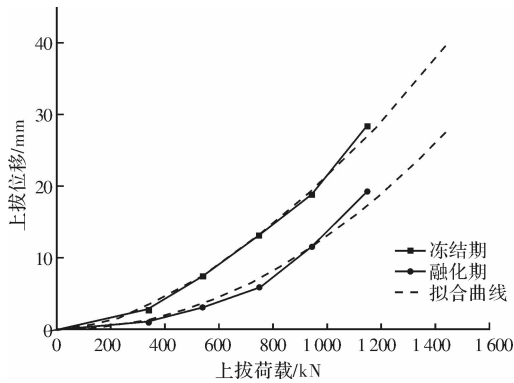


图8 上拔荷载-上拔位移试验曲线与拟合曲线对比

Fig. 8 Comparison of fitting and test curves

表 3 拟合参数取值

Tab. 3 The Values of fitting parameters

工况	$a$	$b$	$R^2$
冻结期(ZZ1)	$8.553 \times 10^{-6}$	2.061	0.985
融化期(ZZ2)	$1.770 \times 10^{-4}$	1.694	0.996

此外,为验证新实施规范 DL/T5501-2015《冻土地区架空输电线路基础设计技术规程》中锥柱基础抗拔承载力计算方法的可靠性,采用规范推荐方法对试验基础抗拔极限承载力进行计算,并与试验值进行对比分析。图 9 所示为规范推荐锥柱基础极限抗拔承载力计算分析模型。参照规范取值,图中  $\alpha$ 、 $\alpha'$  分别取  $23^\circ$ 、 $10^\circ$ 。

融化期和冻结期基础极限抗拔承载力分别按照土重法(图 9a)和剪切法(图 9b)进行计算<sup>[17]</sup>,其关系式为

$$T_u = \begin{cases} \gamma_E \gamma_s \gamma_{\theta 1} (V_t - \Delta V_t - V_0) + G_f & \text{融化期} \\ 4\gamma_E h_c \tau_f (h_c \tan \alpha_p + B) + G_f & \text{冻结期} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\gamma_E$  为水平力影响系数;  $\gamma_s$  为基础底面以上土的加权平均重度,  $\text{kN/m}^3$ ;  $\gamma_{\theta 1}$  为基础底板上平面坡角影响系数;  $V_t$  为上拔深度内土和基础的体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_0$  为上拔深度内基础的体积,  $\text{m}^3$ ;  $\Delta V_t$  为相邻基础影响微体积,  $\text{m}^3$ ;  $h_c$  为基础埋置深度,  $\text{m}$ ;  $\tau_f$  冻土的抗剪强度,  $\text{kPa}$ ;  $\alpha_p$  为多年冻土地基中的上拔角,  $^\circ$ ;  $B$  为方形基础底板宽度,  $\text{m}$ ;  $G_f$  为基础自重,  $\text{kN}$ 。

根据式(2),计算得到冻结期和融化期基础极限抗拔承载力,并与试验结果进行比较,见表 4。

由表 4 可见,融化期基础抗拔承载力试验值与规范法计算结果比较吻合,而冻结期试验抗拔承载力与规范法计算结果存在较大差异。分析其原因,主要是由于冻结期试验基础抗拔承载力较高,

现场试验未加载到最大极限荷载,地基基础尚未达到整体屈服阶段。

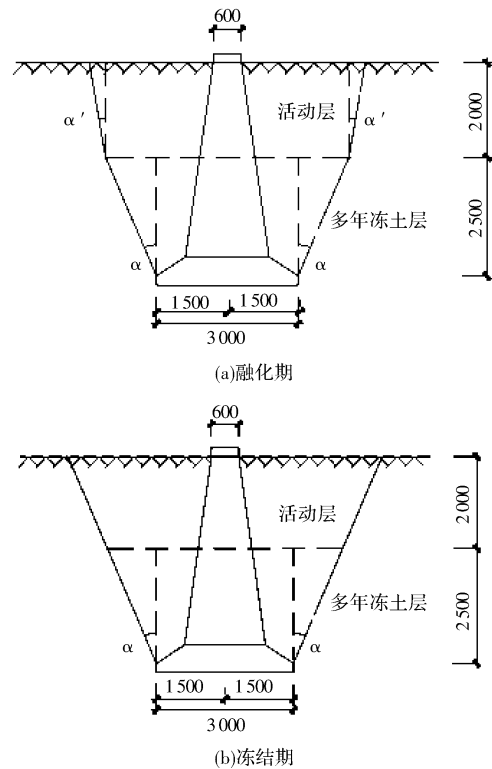


图 9 锥柱基础上拔承载力规范推荐计算模型

Fig. 9 Calculation model of uplift bearing capacity

表 4 基础极限抗拔承载力试验值与规范计算值对比

Tab. 4 Comparison of test and calculated values

工况	试验值/kN	规范计算值/kN
冻结期(ZZ1)	1 450	3 752.73
融化期(ZZ2)	1 150	1 062.16

### 3 结语

(1)冻结期冻土地基整体处于冻结状态,冻土地基回冻情况良好;融化期最大融化深度与地基多年冻土上限较吻合,表明施工开挖对多年冻土地基热稳定性影响较小。

(2)上拔加载过程中基础底板接触土压力减小,基底扩展板上方土体土压力明显增大,基础侧壁土压力变化不明显。

(3)冻结期基础位移量显著低于融化期,承载力明显高于融化期;基础上拔荷载与上拔位移关系可采用幂函数模型进行预测。

(4)融化期基础抗拔承载力试验值与规范法计算结果比较吻合;冻结期由于基础承载力较高,现场试验未加载到最大极限荷载,因而试验抗拔

承载力与规范计算值存在一定差异。

## 参考文献 References

- [1] ZHANG Mingyi, LAI Yuanming, GAO Zhihua, et al. Influence of boundary conditions on the cooling effect of crushed-rock embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Cold Regions Science & Technology, 2006, 44(3):225-239.
- [2] SALLY A S, SUSAN R B. Moisture migration during freeze and thaw of unsaturated soils: modeling and large scale experiments [J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25 (2): 33-45.
- [3] CZURDA K A, HOHMANN M. Freezing effect on shear strength of clayey soils[J]. Applied Clay Science, 1997, 12(1/2):165-187.
- [4] QI Jilin, PIETER A. Vermeer, CHENG Guodong. Review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, 17 (3): 245-252.
- [5] 王大雁,马巍,常小晓,等. 深部人工冻土抗变形特性研究[J]. 岩土工程学报,2005, 27(4):418-421.  
WANG Dayan, MA Wei, CHANG Xiaoxiao, et al. Study on resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 418-421.
- [6] 齐吉琳,马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学,2010,31(1):133-143.  
QI Jilin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133-143.
- [7] 徐湘田,赖远明,刘峰,等. 冻土中几类力学试验方法的探讨[J]. 冰川冻土,2011,33(5): 1132-1138.  
XU Xiangtian, LAI Yuanming, LIU Feng, et al. A study of mechanical test methods of frozen soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 35(5): 1132-1138.
- [8] 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 Dongqing, ZHU Linnan. 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.
- [9] 汪仁和,王伟,陈永锋. 冻土中单桩抗压承载力模型试验研究[J]. 冰川冻土,2005,27(2):188-193.  
WANG Renhe, WANG Wei, CHEN Yongfeng. Model experimental study on compressive bearing capacity of single pile in frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 188-193.
- [10] 王旭,蒋代军,赵新宇,等. 青藏高原多年冻土区不同地温分区下大直径钻孔灌注桩回冻规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(24):4206-4211.  
WANG Xu, JIANG Daijun, ZHAO Xinyu, et al. An experimental study on refreezing characteristics of large-diameter bored pile in different permafrost areas of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (24): 4206-4211.
- [11] 张建明,朱元林,张家懿. 动荷载下冻土中模型桩的沉降试验研究[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29 (S1): 27-33.  
ZHANG Jianming, ZHU Yuanlin, ZHANG Jiayi. Experimental study on settlement of model piles in frozen soil under dynamic loading[J]. Science in China(Series D), 1999, 29(S1): 27-33.
- [12] 臧国华,洪四永,李敬华,等. 青藏直流联网工程杆塔基础的防冻胀措施[J]. 电力建设,2012,33(12): 40-43.  
ZANG Guohua, HONG Siyong, LI Jinghua, et al. Anti-frost heave measures for tower foundation in DC Interconnection Project from Qinghai to Tibet[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(12): 40-43.
- [13] 丁士君,程永峰,李镜培,等. 青藏输电工程回填细粒冻土性质和铁塔基础荷载试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(S1):105-111.  
DING Shijun, CHENG Yongfeng, LI Jingpei, et al. Experimental study on fine-grained soil properties and tower foundation loading for the Qinghai-Tibet DC transmission line engineering[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental, 2013, 35 (S1): 105-111.
- [14] 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, 2013,35(4):794-799.  
SU Kai, ZHANG Jianming, FENG Wenjie, et al. Model tests on initial freezing process of column foundation on slope in permafrost regions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (4): 794-799.
- [15] 国家能源局. 架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5219-2014 [S]. 北京:中国计划出版社,2014.  
National Energy Administration. Technical code for design of foundation of overhead transmission line: DL/T 5219-2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [16] 鲁先龙,程永锋. 戈壁抗拔基础承载性能试验与计算[M]. 北京:中国电力出版社,2015.  
LU Xianlong, CHENG Yongfeng. Experimental and computational analysis on uplift behavior of shallow belled piers in Gobi gravel[M]. Beijing: China Electric Power press, 2015 .
- [17] 国家能源局. 冻土地区架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5501-2015 [S]. 北京:中国计划出版社,2015.  
National Energy Administration. Technical code for foundation design of overhead transmission line in frozen soil region: DL/T 5501-2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.

(编辑 桂智刚)