

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.024

# 青藏输电工程回填细粒冻土性质和铁塔基础载荷试验研究

丁士君<sup>1</sup>,程永峰<sup>1</sup>,李镜培<sup>2</sup>,鲁先龙<sup>1</sup>,杨文智<sup>1</sup>,杨与平<sup>3</sup>

(1. 中国电力科学研究院,北京 100192;2. 同济大学土木工程学院,上海 200000;3. 四川电力送变电建设公司,成都 610000)

**摘要:**为分析青藏直流输电工程回填冻土地基和铁塔基础承载性能,在浅部冻土处于冻结和融化两种状态时,分别进行回填细粒冻土性质试验和三向荷载共同作用下锥柱式扩展基础的载荷试验。基于土工试验结果分析了冻融过程中回填地基的工程性质,得到一个冻融周期后地表沉降量为 0.23 m,与实际情况一致。通过对基础承载特性及荷载与位移双曲线关系模型的分析,得到了基于地基基础相互作用极限状态条件下基础的极限承载力。针对季节活动层融化和冻结状态,应用试验结果验证了上拔工况下铁塔扩展基础稳定性分析模型和方法,获得了冻结状态时细粒冻土的上拔角。试验研究表明:当浅部活动层处于冻结状态时,地基强度及基础承载性能优于融化状态;冻土融化可缩小细粒土的孔隙比、提高密实度,并增加含水率和饱和度;土体冻结与否对地基的抗剪、上拔角等力学指标有显著影响,因此,保持深部回填地基的冻结状态对基础安全承载至关重要。

**关键词:**输电线路;冻土;锥柱基础;载荷试验;土工试验;极限承载力

**中图分类号:**TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0105-07

## Experimental Study on Fine-grained Soil Properties and Tower Foundation Loading for the Qinghai-Tibet DC Transmission Line Engineering

Ding Shijun<sup>1</sup>, Cheng Yongfeng<sup>1</sup>, Li Jingpei<sup>2</sup>, Lu Xianlong<sup>1</sup>, Yang Wenzhi<sup>1</sup>, Yang Yuping<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, P. R. China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

3. Sichuan Electric Transmission and Construction Company, Chengdu 610051, P. R. China)

**Abstract:** To analyze properties of frozen ground and bearing capacity of tower foundation for the Qinghai-Tibet DC Engineering, tests of fine-grained soil properties and frustum-column spread foundation loading under three-directions loading condition were carried out in the Wudaoliang area of Qinghai-Tibet Plateau, while the shallow backfilled ground was in the freezing and thawing state. According to results of loading tests, bearing characteristics of frozen ground and tower foundation was analyzed, and ultimate bearing capacity was obtained in the interaction limit state between foundation and ground through establishment and fitting analysis of the load-displacement hyperbolic model. Based on measured values of soil tests, engineering properties of the ground were studied, the ground surface settlement of thawing period relative to freezing period was calculated and was 0.23m, and the calculated value was consistent with actual situation. For thawing or freezing state of seasonally thawed layer, the stability analysis model and method of tower spread foundation under uplift conditions were proposed respectively, and uplift angle of frozen backfilled soil was calculated and was 20.5°. The results show that shear strength of ground and bearing performance of foundation are larger in the freezing state than in the thawing state of seasonally thawed layer, and the bearing capacities of foundations can meet the design requirements. Void ratio of fine-grained soil is reduced, density is improved, water content and degree of saturation are increased while frozen soil thawing. The freezing or thawing state of soil has great influence on mechanical parameters of ground including the shear strength, uplift angle, etc. So keeping the freezing state of deep backfilled ground is very important to bearing safety of the engineering foundations.

**Key words:** transmission line; frozen soil; frustum column foundation; loading test; soil test; ultimate bearing capacity

冻土是一种对温度十分敏感且力学性质极不稳定的特殊土类,其在反复冻融作用下,可导致地基土产生冻胀和沉降等危害,进而影响地基基础的稳定性。处于冻结状态的地基既能够防止水渗透,也可以为上部结构提供强度保证<sup>[1-2]</sup>,

且冻融作用可使松散扰动土的孔隙比降低、密实度和力学强度增加<sup>[3-4]</sup>。青藏高原是中国多年冻土的主要分布地区<sup>[5]</sup>,为促进这一地区的经济和社会发展,需要在该地区建设输电线路工程<sup>[6]</sup>。

收稿日期:2013-01-16

基金项目:国家电网公司科技项目(GCHZ200804)

作者简介:丁士君(1978-),男,高级工程师,主要从事输变电地基基础工程技术研究,(E-mail)acmilan03@126.com。

为确保冻土地基与基础的安全,进行工程建设时需要解决冻融作用及开挖回填等因素可能导致的工程问题<sup>[7-9]</sup>。多年来,工程人员结合青藏公路和铁路工程,对冻土及路基工程的性质进行了试验研究,在融沉系数与干密度和含水量的关系、细粒冻土的变形特性和强度预报、含水率对砂土强度的影响、块石护坡新型路基等方面取得了大量进展<sup>[10-14]</sup>。除地温、含水率等性质外,目前针对冻土的物理性质、抗压、剪切和蠕变等力学性能的试验研究主要集中在室内模型试验和土工实验方面<sup>[15-16]</sup>。王旭等研究了青藏高原多年冻土区灌注桩的承载力和变形性质,并开展了桩基现场抗压荷载试验<sup>[17]</sup>,程永锋等针对输电线路工程开展了室内桩基模型荷载试验<sup>[18]</sup>。而针对冻土地基输电杆塔基础的受力状态及三向联合加载冻土基础的静荷载试验研究,特别是在多工况和大荷载条件下的情况却未见报道。受荷载装置、现场环境和工程要求等限制,荷载试验往往并未加载至地基失稳的理想破坏状态,因此多位学者采用双曲线模型进行了承载力预测和承载特性研究<sup>[19]</sup>,输电杆塔基础试验标准采纳了基于该模型的承载力确定方法<sup>[20]</sup>。

青藏直流联网工程是被誉为穿越“世界屋脊”的“电力天路”,同样无法回避工程建设中的一系列冻土难题,其中既有其他工程普遍面临的冻胀问题,又有因输电线路工程而突出的问题。采用开挖回填施工方式对冻土地基扰动较大,处理不当则使冻融危害更加突出。抗拔和抗倾覆稳定一般是受可变荷载影响的铁塔基础设计的主控条件<sup>[6]</sup>,其所关注的重点冻害问题与以抗压承载为主的基础工程存在一定差别,而目前冻土地基的杆塔基础的上拔工况稳定性分析方法、计算参数等仍然套用常规地基和其他行业基础工程<sup>[21]</sup>,亟待通过相关研究加以改进。

本文通过土工试验和原型基础荷载试验,分析冻融作用后的冻土性质和基础承载性能,研究上拔工况下基础稳定性的计算方法和参数取值,为评价工程基础稳定性提供依据,也为类似工程积累技术经验。

## 1 试验概况

### 1.1 试验地基与基础条件

试验场地在青藏直流输电工程编号为 640 的铁塔附近,位于 109 国道青藏公路 K3007 km 处路西,距该公路约 400 m 处。基础埋深范围内场地条件如表 1 所示。试验原型为现浇钢筋混凝土锥柱扩展基础,地基由原状冻土开挖就地回填而成。

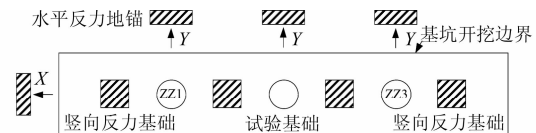
表 1 试验场地条件

地层 层号	地层 名称	原状冻土密度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	层底深度/ m	多年冻土 天然上限/m
①	粉、细砂	17~19	2.5~2.6	2.1
②	泥灰岩	19~21		

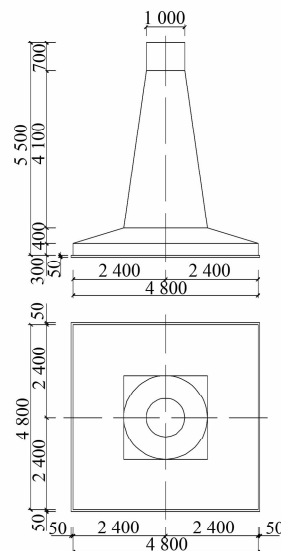
场地中试验基础与反力基础线状排列,其中试验基础 3 个(编号:ZZ1、ZZ2 和 ZZ3),竖向反力基础和水平反力地锚各 4 个,基坑开挖呈长方体(长 44 m×宽 6.5 m×深 4.8 m),试验基础尺寸和场地布置见图 1,试验基础形式和尺寸与距离场地最近的青藏直流工程转角塔基础一致,混凝土强度等级为 C20,上部结构对基础作用力设计值和预估极限承载力见表 2。

表 2 作用力与试验基础预估极限承载力

加载工况	力值类别	荷载/kN		
		x 向 $T_x$	y 向 $T_y$	竖向 $T$
上拔	作用力设计值	223	159	1 040
	预估极限承载力	357	254	1 664
下压	作用力设计值	280	194	1 364
	预估极限承载力	420	291	2 046



(a) 基础布置



(b) 试验基础尺寸

图 1 试验基础尺寸与布置

### 1.2 试验项目与加载系统

考虑到冻土地基会随环境因素变化,其工程性质往往会发生突变,冻土地基在冻结与融化状态的承载性能存在差异,因此,分别在 2011 年 3—4 月(以下简称“冻结期”)和 8—9 月(以下简称“融化期”)对同一基础完成回填冻土的物理力学性质试验和输电杆塔基础的荷载试验,该时期地基上部土层分别处于冻结和融化状态,试验项目如表 3 所示。

对于荷载试验,由于同一基础在不同时期进行 2 次试验,为确保融化期试验顺利进行,在冻结期试验仅加载至满足设计要求即可。

表 3 试验项目列表

试验种类	试验对象	试验时期	备注
静荷载试验	ZZ1 和 ZZ3		Z 向上拔、X 和 Y 向水平联合加载。
	ZZ2	结期和融化期	Z 向下压、X 和 Y 向水平联合加载。
土工试验	活动层回填冻土		包括:灌砂法原位密度、原位直剪、含水率等。

试验采取 X、Y、Z 三向联合加载,加载系统包括竖向上拔或下压、水平向(X 和 Y)2 个子系统,载荷试验测试系统主要为荷载和位移测试。竖向上拔或下压荷载由 12 m 长钢梁和钢筋混凝土反力基础组成的系统提供,水平加载装置由连接件、钢丝绳、滑轮组手拉葫芦等构成,试验中水平加卸载通过人工手拉葫芦调节钢丝绳的紧松来实现,水平荷载值由振弦式拉力传感器监测。

## 2 静载试验结果

### 2.1 基础破坏形态

基础的破坏形态是基础承载力等参数取值的依据之一,也是基础承载特性的外在表现。处于冻结期的地基上部季节活动层的基础载荷试验均未加载至破坏,其极限承载力可取最大试验荷载。处于融化期的活动层的试验基础因基础上部结构混凝土开裂、荷载无法维持而破坏(如图 2 所示),但地基未出现隆起、开裂等地基破坏特征,此时基础极限承载力取基础混凝土开裂破坏前一级荷载。

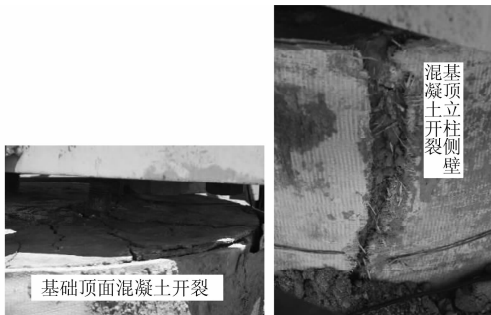


图 2 试验基础混凝土开裂

试验中基础结构早于地基出现破坏特征,从加载过程中各种现象综合分析,主要成因如下:

1) 试验中基顶所施加的荷载超过上部结构对基础承载力的要求,破坏时基顶所施加的荷载超过了铁塔对基础作用力标准值的 3 倍。

2) 连接设备和加载方式加速了基础混凝土结构开裂。为试验验证青藏直流工程冻土基础承载力,要求试验基础地脚螺栓尺寸、配筋、混凝土等均与工程基础一致,地脚螺栓直径为 52 mm,由于预留设备安装间隙,试验荷载作用点与基础混凝土顶面的距离约为 12 mm,地脚螺栓在水平荷载作用下类似悬臂梁,虽然竖向荷载有利于提高地脚螺栓的整体刚度,但基顶受较大荷载的作用地脚螺栓出现明显的弯曲变形,加速了基础顶部混凝土的撕裂,受此影响试验中破坏特征出现在基础立柱顶部。

3) 地基与基础作为一个承载体系,由地基、基础结构等构件串联组成,该体系的承载能力由最先达到破坏状态的构件决定,试验环境下地基承载能力优于基础混凝土结构。

### 2.2 试验基础承载性状

2.2.1 ZZ1 和 ZZ3 试验基础荷载与位移关系 两基础试验的加载工况均为竖向上拔与 X、Y 向水平荷载共同作用,融化和冻结期试验荷载与位移关系曲线如图 3 所示。

2.2.2 ZZ2 试验基础荷载与位移关系 该基础试验加载工况为竖向下压与 X、Y 向水平荷载共同作用,融化和冻结期试验荷载与位移关系曲线如图 4 所示。

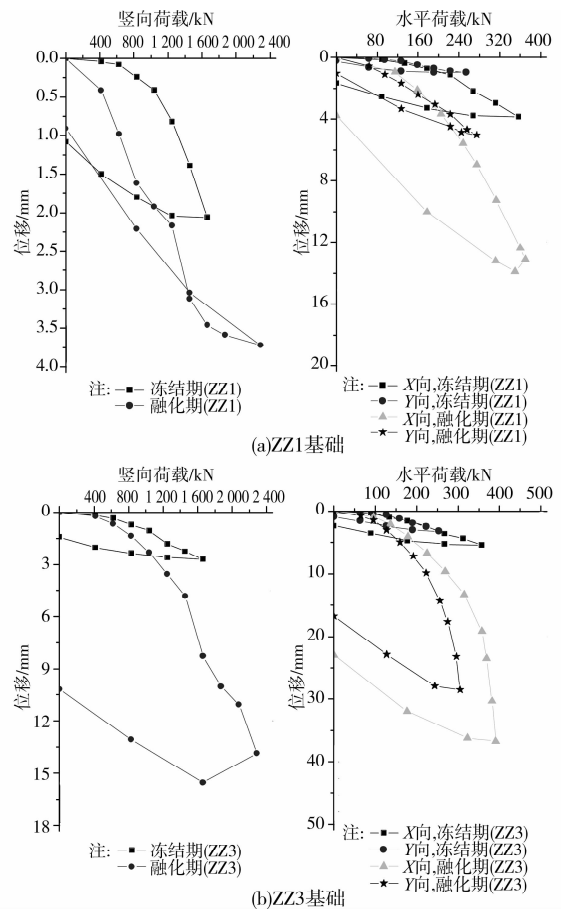


图 3 上拔工况下试验荷载-位移曲线

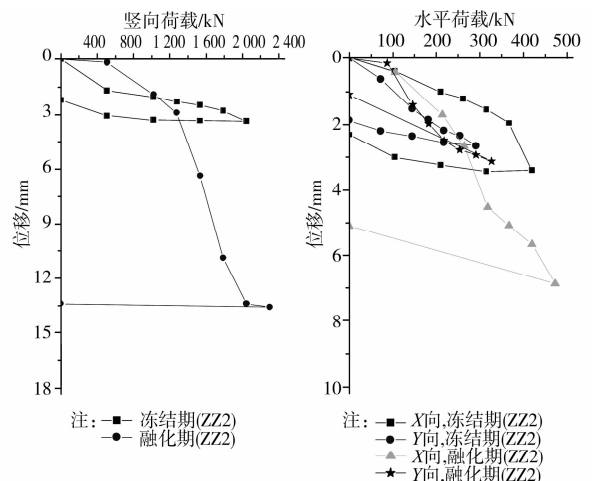


图 4 下压工况试验荷载-位移曲线

融化期试验加载时发生了基础顶部混凝土的开裂,引起位于基础顶部的监测点所采集的位移数据产生偏差,进而导致加载后期试验荷载与位移关系曲线局部表现异常。

2.1.3 基础承载性状分析 冻土是一种对温度极为敏感的土体介质,虽然输电线路基础也主要采用保持冻结状态的设计原则,但铁塔开挖回填基础施工作用面不可避免地延伸到多年冻土天然上限深度以下,并采取了开挖、回填、暴露、碾碎等剧烈扰动,易对基础的承载能力造成不利影响。基础的承载性状是冻土和输电铁塔基础相互作用的综合反映,从试

验荷载与位移关系分析,可以看出:

1) 试验基础的竖向和水平向的荷载与位移变化基本呈非线性变化关系,试验基础在上拔工况加载过程中未出现明显的陡降拐点。与其他文献[22]中上拔工况下扩展基础的典型荷载位移关系曲线因发生地基剪切破坏而表现为陡降型的特点存在差异,一方面由于本次未加载至地基剪切破坏;另一方面是试验的冻土地基相对混凝土结构具有更优的上拔承载能力。

2) 同一试验, X 和 Y 向的荷载与位移关系曲线一致性较好,尤其 ZZ1 和 ZZ3 基础。但由于回填冻土及基础的差异性较大导致不同基础、不同试验之间的荷载与位移关系曲线一致性较差。

3) 上拔工况时,同一基础融化期试验加载过程中各方向位移均大于冻结期,表明冻结期地基基础抗拔性能优于融化期。同一试验中基础顶部作用荷载相同时水平位移大于竖向位移,说明基础具有足够的抗倾覆能力是其保持稳定的关键。

4) 下压工况时,各方向不同时期的荷载与位移关系曲线交错,承载性状较上拔工况复杂,虽然融化期荷载试验也出现了基础混凝土开裂,但各方向基础位移较小,表明基底地基土处于冻结状态。

## 2.2 试验基础承载力

根据图 3~4 中的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,可确定基础极限承载力如表 4 所示。

表 4 试验基础极限承载力

基础编号	试验工况	极限承载力/kN			试验时期
		竖向	X 向	Y 向	
ZZ1	竖向上拔	1 664	357	254	冻结期
	与 X、Y 向水平荷载	1 872	370	275	融化期
ZZ2	竖向下压	2 046	420	291	冻结期
	与 X、Y 向水平荷载	2 046	420	291	融化期
ZZ3	竖向上拔	1 664	357	254	冻结期
	与 X、Y 向水平荷载	1 872	370	275	融化期

表 4 与表 2 对比分析表明:无论冻结期还是融化期,基础极限承载能力均不小于预估值。

## 3 土工试验结果分析

### 3.1 实测指标

在浅部活动层处于冻结和融化状态时,对回填地基土分别进行了灌砂法原位密度、含水率和原位直剪试验,如图 5 所示。

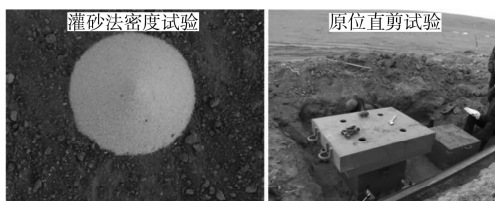


图 5 地基土性质原位试验

试验所获得的冻结期和融化期地基土的含水率和原位密度见表 5。图 6 为原位直剪试验抗剪强度峰值与垂直压力关系。

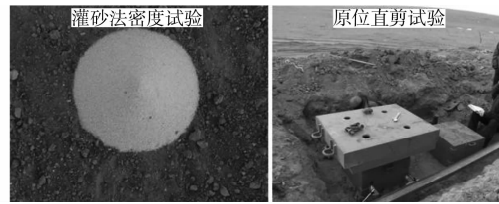


图 6 试验抗剪强度峰值与垂直压力关系

利用图 6 中抗剪强度峰值和法向压力的实测结果,线性拟合得到季节活动层深度范围内地基土处于冻结和融化状态时的抗剪强度指标(如表 5 所示)。

表 5 地基冻土性质试验结果

冻融状态	原位密度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	含水率试验		原位直剪试验		
		取样深度/m	平均值/ %	试验深度/m	内摩擦角/度	粘聚力/ kPa
冻结	15.2	0.4~0.8	11.5	0.4~0.8	36.8	22.5
融化	17.6	0.3~1.9	17.5	0.6~1.0	0.0	8.3

在季节活动层土体处于融化状态时,试验场地浅部土体呈软塑状。从表 5 分析可以看出:

1) 土体冻结与否对回填细粒地基土的抗剪强度指标有较大影响,含水率较高处于融化状态时,其抗剪力学特性接近淤泥质软土。

2) 处于融化期的土体的平均含水率高于冻结状态,回填土的高孔隙率及土中水呈液态时有利于水分的下渗。

回填地基土的物理力学性质试验及基础荷载试验表明地基是否处于冻结状态不仅决定了土体的性质指标,而且对基础承载力存在一定影响。

### 3.2 回填土性质分析

根据原位密度、含水率等土工试验结果,计算冻结期和融化期回填地基土的孔隙比  $e$ 、饱和度  $S_r$  指标(如表 6 所示)。

表 6 物理性质指标列表

试验时期	含水率/ %	原位密度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	土粒重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙比/ 无量纲	饱和度/ 无量纲
冻结	11.5	15.2	26.7	0.96	0.32
融化	17.5	17.6	26.7	0.78	0.60

由于施工开挖基坑为长方体,依据季节活动层冻结期和融化期地基土的孔隙率,可按式(1)计算相对于冻结期浅部活动层的地表,融化期浅部活动层因冻土融化密实产生的地表沉降:

$$\Delta S = \frac{H_D \cdot (e_1 - e_2)}{1 + e_1} \quad (1)$$

式中:  $\Delta S$  为季节活动层因冻土融化产生的地表沉降;  $H_D$  为活动层冻土厚度,可取为冻结期试验时冻土层融化深度;  $e_1$  和  $e_2$  分别为冻结期和融化期活动层冻土孔隙比。

根据融化期冻土层融化深度  $H_R = (H_D - \Delta S)$  实测结

果为 2.3 m,按表 6 中数据和式(1),计算得到相对于冻结期,融化期地表沉降  $\Delta S$  为 0.23 m,在  $H_D$  为 2.5 m,图 7 为融化期与冻结期地表位置对比。



图 7 冻结期和融化期地表位置对比图

图 7 中同一基础作为参照,相对于冻结期,融化期的地表沉降理论计算值与实际沉降值相当。试验所得融化期密度已接近原状冻土密度,具有较好的密实性。虽然融化期季节融土含水率较高、抗剪指标较低,但在不影响基础安全承载的情况下,有利于此后形成阻水渗透层及隔热层。

#### 4 基础抗拔稳定性计算分析

在铁塔开挖回填类基础抗拔稳定性计算中,有关地基的主要设计参数为“上拔角”<sup>[23]</sup>。试验过程中虽然发生了基础混凝土开裂的结构破坏状态,但未发生地基与基础相互作用而产生的刺入、剪切等地基破坏形式。因此,为取得回填地基的上拔角,首先需要基于试验数据来分析地基发生倒锥形整体剪切破坏时的试验基础抗拔极限承载力。

##### 4.1 基础抗拔极限承载力的预测

上拔工况下基础与地基相互作用发生地基剪切破坏时,可采用式(2)表征上拔荷载与位移关系。

$$T = \frac{S}{a + k \cdot S} \quad (2)$$

式中:  $T$  为上拔荷载;  $S$  为基顶竖向上拔位移;  $a$  和  $k$  曲线性状参数,其中,基础抗拔极限承载力  $T_z$  可取为上拔荷载极限值,即  $T_z = \frac{1}{k}$ 。

因此,将试验获得的  $(S, T)$  数据变换为  $(S, \frac{T}{S})$ ,据此通过线性拟合可得到参数  $a$  和  $k$ 。另外,扩展基础上拔荷载作用弹性阶段位移均较小,测量误差对拟合计算影响较大,为提高拟合的合理性,考虑位移测试误差和本次试验破坏特点,对基础顶部竖向位移小于 0.5 mm 和发生混凝土结构破坏时的试验数据不计入拟合分析过程。计算时,基础顶部竖向上拔位移取 ZZ1 和 ZZ2 加载试验中同荷载条件下的对应位移平均值。

图 8 为基础上拔荷载与位移关系的实测和拟合对比,所显示的拟合与试验数据具有较好的一致性。线性拟合得到活动层处于融化期和冻结期的  $a, k$  分别为:融化期  $a = 10.60 \times 10^{-4} \text{ mm/kN}$ ,  $k = 4.23 \times 10^{-4} \text{ kN}^{-1}$ ;冻结期  $a = 5.17 \times$

$10^{-4} \text{ mm/kN}$ ,  $k = 3.91 \times 10^{-4} \text{ kN}^{-1}$ 。

因此,融化期和冻结期的基础抗拔极限承载力 ( $T_z = 1/k$ ) 分别为 2 364 kN、2 558 kN。

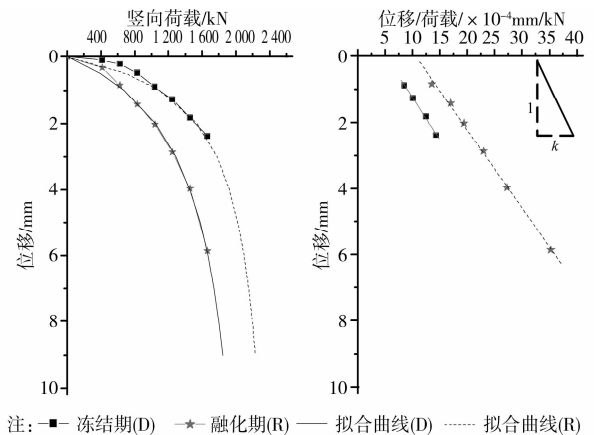


图 8 荷载与位移关系的实测和拟合对比图

##### 4.2 基础极限平衡状态方程

对于铁塔基础,上拔工况是指竖向上拔与水平荷载联合作用条件下的工况,该工况下地基与基础相互作用并不一定发生地基整体剪切破坏,一般发生底板上部土体局部剪切破坏。在进行抗拔稳定性分析时需考虑地基与底板上下表面作用力的大小和方向不均匀的特点,因此,上拔工况下锥柱式扩展基础稳定性分析模型见图 9(a),其中假设极限状态时基础倾覆转动轴固定,位于图 9(a)所示位置,极限稳定状态方程由确定转动中心的弯矩平衡确定,对应关系按下式(3)计算。

$$(T_z - Q_f) \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} B + T_H \cdot (h - d) = P_H \cdot z + \iint_{S_a} \frac{-\omega(x + y - \frac{2B}{3})}{\sqrt{2}} dS_a + \iint_{S_b} \frac{3\omega(x + y - \frac{2B}{3})^2}{2\sqrt{2}} dS_b \quad (3)$$

式中:  $T_z$  和  $T_H$  分别为极限状态时基础顶部竖向上拔和水平荷载,根据按表 2 设计荷载比例关系  $T_H = 0.263 T_z$ ;  $P_H$  和  $z$  分别为地基与基础间水平抗力合力大小和作用点距转动中心竖直距离;  $B$  为基础底板边长;  $d$  为底板边缘厚度;  $h$  为水平力与基底垂直距离;  $Q_f$  为基础重量;  $x$  和  $y$  为以底板中心为原点的水平坐标系内积分变量;  $S_a$  和  $S_b$  为积分区域,对应于图 9(a)中底板表面阴影和非阴影区域;  $\omega$  为底板上表面与地基间竖向极限压力。

地基土的水平抗力与土的性质、基础水平位移方向、埋深等因素有关,一般来说水平抗力最大处位于基础中部。因此,为简化计算,水平抗力合力大小  $P_H$  等于  $T_H$ ,作用点位置  $z$  取  $0.5z_1$ ,  $z_1$  为图 9(a)所示抗拔土体深度。对式(3)进行积分、求解及化简得:

$$(T_z - Q_f) \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} B + T_H \cdot (h - d - \frac{z_1}{2}) = \frac{5\sqrt{2}}{16} \omega B^3 \quad (4)$$

竖向极限压力  $\omega$  由轴向上拔荷载作用下基础抗拔极限承载力计算,当地基土全部处于冻结状态时,抗拔极限承载力按倒锥台体内土重法计算,计算模型见如图 9(b)所示;在融化期,融化深度以下地基土处于冻结状态,由该段倒锥台体内土重计算其抗拔能力,对处于融化状态的上部土体,抗

拔能力由方柱体土重

构成,计算模型见图 9(c),因此,  $w$  按式(5)计算:

$$w = \begin{cases} \frac{W}{B^2} & \text{冻结期} \\ \frac{W_n + W_D}{B^2} & \text{融化期} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $W$  和  $W_n$  分别为  $z_a$  取  $H_D$  和  $(H_R - z_n)$  时倒锥台形抗拔土体重量,按式(6)计算,其中,  $z_n$  为地基土融化深度,  $\Delta S = (H_D - H_R)$  为融化期相对冻结期地表沉降量;  $W_D$  为融化深度以上方柱形融化抗拔土体重量,按式(7)计算。

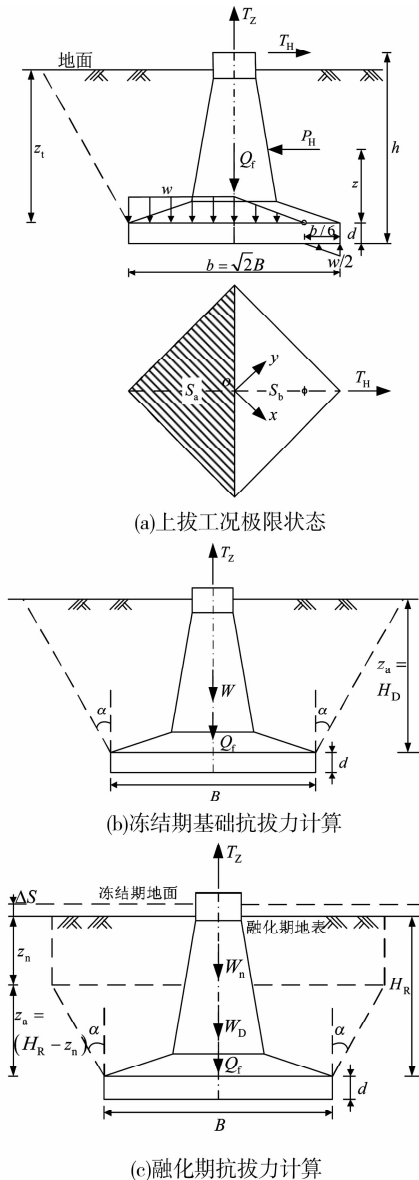


图 9 计算模型示意图

底板以上冻土厚度为  $z_a$  时,“土重法”计算倒锥台形抗拔土体重量  $W(z_a)$  如下:

$$W(z_a) = \left[ z_a(B^2 + 2Bz_a \tan\alpha + \frac{4}{3}z_a^2 \tan^2\alpha) - v_{f1} \right] \gamma_{S1} \quad (6)$$

式中:  $v_{f1}$  为抗拔体内基础部分体积;  $\gamma_{S1}$  为抗拔体内冻土平均密度;  $B$  为基础底板边长;  $\alpha$  为冻结状态地基土的上拔角。

方柱形融化抗拔土体重量  $W_D$  按下式计算:

$$W_D = \{ z_n [B + 2(H_R - z_n) \tan\alpha]^2 - v_{f2} \} \gamma_{S2} \quad (7)$$

式中:  $v_{f2}$  为方柱形抗拔体内基础部分体积;  $\gamma_{S2}$  为融土层内土体平均密度。

### 4.3 地基抗拔参数计算与分析

对于上节所提出的稳定性分析方法,基础上拔稳定性计算的关键参数是冻结状态地基土的上拔角。在已知极限状态基础顶部作用荷载时,可由式(4)~(7)联合来求解季节活动层处于冻结或融化状态时冻结地基土的上拔角  $\alpha$ , 计算结果见表 7,其中融化期地基土融化深度  $z_n$  实测值为 2.3 m。

表 7 上拔角计算值

试验时期	$T_z /$ kN	$T_H /$ kN	$B /$ m	$h /$ kN	$d /$ m	$H /$ kN	$w /$ kPa
冻结期	2 558	674	4.8	5.5	0.3	4.9	133
融化期	2 364	622				4.7	122

试验时期	$W /$ kN	$W_n +$ $W_D /$ kN	$\gamma_{S1} /$ ( $kN \cdot$ $m^{-3}$ )	$\gamma_{S2} /$ ( $kN \cdot$ $m^{-3}$ )	$v_{f1} /$ kN	$\alpha /$ 度
冻结期	3 064	/	15.2	/	13.8	19.7
融化期	/	2 820		17.6	11.1	21.3

根据表 7 中计算结果,该场地冻结状态细粒冻土上拔角取值为  $20.5^\circ$ 。综合分析如下:

1) 土体冻结与否对地基土的上拔稳定性的理论计算力学指标(即:上拔角)的取值有显著影响,融化状态时该值可取为零。

2) 保持深部回填地基冻结状态,不仅有利于基础下压承载的安全,而且有利于抗拔的安全。

3) 依据研究所得上拔角计算,基础轴心抗拔极限承载力在冻结期和融化期分别为:3 568、3 324 kN,试验加载条件下所得抗拔极限承载力约是该值的 0.71 倍,表明上拔工况下水平力作用显著削弱基础抗拔承载力,其影响程度大于文献[23]按水平力影响系数所考虑的程度。

## 5 结论

通过土工试验和基础荷载试验,研究了冻土地基的工程性质和铁塔扩展基础的承载规律。主要结论如下:

1) 土体冻结与否对地基的抗剪、上拔角等力学指标有显著影响,处于冻结状态时的浅部季节活动层的地基强度及基础承载性能优于融化状态。

2) 冻土融化可减小细粒土的孔隙比、提高密度,并增加含水率和饱和度,但保持深部回填地基冻结状态对基础安全承载至关重要。

3) 细粒冻土地基的转角塔锥柱式扩展基础具有良好的抗拔、抗压和抗倾覆性能。

4) 上拔工况下水平力作用显著削弱了基础抗拔承载力,增加了冻土地基铁塔基础相互作用的不均匀性,因此抗拔稳定分析时需合理计算。

### 参考文献:

[1] 吴紫汪, 刘永智. 冻土地基与工程建筑 [M]. 北京:海洋出版社, 2005.  
[2] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基 [M]. 北

- 京:科学出版社,2011.
- [3] 齐吉琳,马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报,2006,28(12):2082-2086.  
Qi J L, Ma W. Influence of Freezing-thawing on Strength of Over consolidated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2082-2086.
- [4] Nicholas A B, David C S. Cyclic Freeze-thaw to Enhance the Stability of Coal Tailings [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009,55(3): 278-285.
- [5] 徐敦祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [6] 鲁先龙,程永锋. 我国输电线路基础工程现状与展望[J]. 电力建设,2005,26(11):25-27.  
Lu X L, Cheng Y F. Current Status and Prospect of Transmission Tower Foundation Engineering in China [J]. Electric Power Construction, 2005, 26(11): 25-27.
- [7] 马巍,王大雁. 中国冻土力学研究 50a 回顾与展望[J]. 岩土工程学报,2012,34(4): 625-640.  
Ma W, Wang D Y. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 625-640.
- [8] 奥兰多·B·安德斯兰德,布兰科·洛达尼. 冻土工程[M]. 2 版. 杨让宏,李勇,译. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [9] 程国栋. 冻土力学与工程的国际研究新进展[J]. 地球科学进展,2001,16(3): 293-299.  
Chen G D. International Achievements of Study on Frozen Soil Mechanics and Engineering [J]. Advance in Earth Sciences, 2001,16(3): 293-299.
- [10] 梁波,张贵生,刘德仁. 冻融循环条件下土的融沉性质试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(10): 1213-1217.  
Liang B, Zhang G S, Liu Deren. Experimental study on thawing subsidence characters of permafrost under frost heaving and thawing circulation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1213-1217.
- [11] 王立娜,凌贤长,李琼林,等. 列车荷载下青藏冻结粉质黏土变形特性试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(Sup1):42-47.  
Wang L N, Ling X Z, Li Q L, et al. Experimental analyses of train-induced deformation behavior of frozen silt clay [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Sup1):42-47.
- [12] 赖远明,张耀,张淑娟,等. 超饱和含水率和温度对冻结砂土强度的影响[J]. 岩土力学,2009,30(12):3665-3670.  
Lai Y M, Zhang Y, Zhang S J, et al. Experimental study of strength of frozen sandy soil under different water contents and temperatures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3665-3670.
- [13] Cheng G D. Permafrost studies in the Qinghai-Tibet plateau for road construction [J]. ASCE, Journal of cold regions Engineering, 2005, 19(1): 19-29.
- [14] 张明义,赖远明,刘志强,等. 气候变暖条件下青藏铁路新型路基结构温度场特征非线性分析[J]. 土木工程学报,2006,39(2):93-97.  
Zhang M Y, Lai Y M, Liu Z Q, et al. Temperature characteristic nonlinear analysis for new-type embankment structures for Qinghai-Tibetan railway under climatic warming [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2):93-97.
- [15] 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 J L, Ma W. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133-143.
- [16] Christ M, Park J B. Laboratory determination of strength properties of frozen rubber-sand mixtures [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010,60: 169-175.
- [17] 王旭,蒋代军,赵新宇,等. 多年冻土区未回冻钻孔灌注桩承载力性质试验研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(1): 81-84.  
Wang X, Jiang D J, Zhao X Y, et al. Experimental study on bearing features of bored pile under non-refreezing condition in permafrost region [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 81-84.
- [18] 程永锋,鲁先龙,刘华,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(Sup1): 4378-4382.  
Cheng 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]. Electric Power Construction, 2004, 23(Sup1):4378-4382.
- [19] 黄锋,李广信,吕禾. 砂土中抗拔桩位移变形的分析[J]. 土木工程学报,1999,32(1): 31-36.  
Huang F, Li G X, Lu H. Analysis of deformation of tension piles in sandy soil [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(1): 31-36.
- [20] CEI/IEC 1773. Overhead lines-Testing of foundation for structures[S]. IEC, 1996.
- [21] 程永锋,丁士君,鲁先龙,等. 青藏直流输电工程粗粒冻土地基温度监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(11): 2363-2371.  
Cheng Y F, Ding S J, Lu X L, et al. Monitoring and analysis of coarse-grained frozen soil temperature in Qinghai-Tibet DC transmission line engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2363-2371.
- [22] 王永华,丁士君,郭永胜,等. 沙漠地区输电线路装配式基础设计及应用[J]. 电力建设,2010,31(11): 14-17.  
Wang Y H, Ding S J, Guo Y S. The design and application of assembly foundation of transmission line in desert area [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(11): 14-17.
- [23] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T 5219-2005 架空送电线路基础设计技术规定[S]. 北京:中国电力出版社,2006.

(编辑 王秀玲)