

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.004

# 沙漠风积沙地基扩展基础抗拔现场试验研究

鲁先龙, 丁士君, 杨文智, 郑卫锋

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 通过在新疆、宁夏和内蒙古典型沙漠地区完成的现浇混凝土和装配式2种扩展基础在上拔、上拔与水平力组合工况下的25个现场试验, 获得了风积沙扩展基础抗拔荷载-位移曲线, 并确定了各试验基础的抗拔极限承载力。按照“土重法”计算原理, 得到了反映沙漠风积沙地基抗拔承载性能的极限“上拔角”。经统计分析, 得到沙漠风积沙极限“上拔角”标准值为 $16.8^\circ$ , 该值考虑了沙漠风积沙的区域特征、基础型式与尺寸、荷载工况等因素, 可为沙漠地区输电线路杆塔基础的工程设计提供依据。

**关键词:** 沙漠; 风积沙; 抗拔; 扩展基础; 上拔角; 输电线路

中图分类号: TU375.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0020-06

## Uplift Field Load Tests on Spread Foundations in Aeolian Sand Area

LU Xianlong, DING Shijun, YANG Wenzhi, ZHENG Weifeng

(China Electric Power Research Institute, Beijing, 100192, China)

**Abstract:** In this study, the uplift performance of spread foundations were investigated in aeolian sand at typical deserts in Xinjiang, Ningxia, and Neimeng. Twenty-five full-scale spread foundations were installed at the aforementioned test sites, including the cast-in-place concrete spread foundations and the assembly foundations. The field load testing was conducted for each spread foundation under uplift loading or under the combination of uplift and lateral loadings, and the load-displacement curves for all tested foundations were obtained. Based on the characteristics of the load-displacement curve, the ultimate uplift capacity of each spread foundation was determined. The slope angle for the earth cone method was suggested, which is the parameter to determine the uplift capacity of spread foundations. Based on the statistic analysis, the standard value of the slope angle for earth cone method was suggested as  $16.8^\circ$ . The results in this study could be served as the support for foundation designs in aeolian sand because of the comprehensive considerations of the desert differences, the spread foundation structures, and the loading cases.

**Keywords:** desert; aeolian sand; uplift; spread foundation; uplift angle; electric power transmission line

我国是世界上沙漠分布最多、沙漠化危害严重的国家之一<sup>[1-2]</sup>, 从西北、华北到东北西部形成了一条弧形沙地和沙漠带, 面积达70多万 $\text{km}^2$ 。沙漠地区降水稀少、气候干燥、地面温度高、昼夜温差大、风沙活动强烈, 属于一种极端环境。此外, 沙漠地基性质特殊, 砂石料、水等建筑材料匮乏。因此, 沙漠地区工程建设难度大, 过去常被视为生命和工程建设禁区。但随着我国“一带一路”和西部开发等国家战略实施, 越来越多输电线路工程需建设在沙漠地区。

风积沙是沙漠和沙地的主要组成物质, 是干旱、半干旱气候环境下形成的一种特殊地质材料<sup>[3]</sup>。我国沙漠地区电网输电线路杆塔基础工程建设中都坚

持“就地取材”原则, 将风积沙作为地基土体。然而, 对于输电线路杆塔基础而言, 抗拔承载性能通常是其设计控制条件<sup>[4]</sup>。由于风积沙结构松散、无黏聚力、抗拔承载性能和稳定性差, 这就使得沙漠地区输电线路基础工程建设具有特殊的复杂性<sup>[5-9]</sup>。

结合我国电网工程建设, 在新疆、宁夏和内蒙古典型沙漠试验地点开展了现浇混凝土和装配式2种扩展基础型式, 在上拔、上拔与水平力组合工况下的25个抗拔基础现场试验成果, 分析了沙漠风积沙地基扩展基础抗拔荷载-位移特性, 得到了反映沙漠风积沙抗拔承载性能的极限“上拔角”取值, 可用于指导工程设计。

# 1 现场试验概况

## 1.1 试验场地

现场试验地点共 4 个,1 个位于新疆塔克拉玛干沙漠腹地,1 个位于新疆古尔班通古特沙漠腹地,另外 2 个分别位于宁夏毛乌素沙漠边缘的宁武市白炭滩自然保护区和宁夏平罗县境内。

试验场地风积沙厚度均大于 10 m,均匀松散,

主要物理力学性质如表 1 所示。

## 1.2 基础型式及其结构尺寸

沙漠地区输电线路杆塔基础一般采用开挖回填方法施工。由于风积沙自稳性差、现场支护困难等因素,风积沙基坑一般不宜太深,采用的杆塔基础型式主要为现浇钢筋混凝土基础和预制装配式基础 2 类。针对输电线路杆塔基础受力特点,这 2 类基础又有不同型式,如图 1 所示。

表 1 混凝土扩展基础设计参数

试验地点	天然重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	回填重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	含水率 /%	沙粒比重	内摩擦角 /(°)
新疆塔克拉玛干沙漠	15.6	14.3	2.5	2.64	33.7
新疆古尔班通古特沙漠	16.8	16.5	3.4	2.68	32.7
宁夏毛乌素沙漠白炭滩自然保护区	16.1	14.7	2.1	2.72	37.5
宁夏毛乌素沙漠平罗县	16.1	14.5	2.2	2.66	32.7

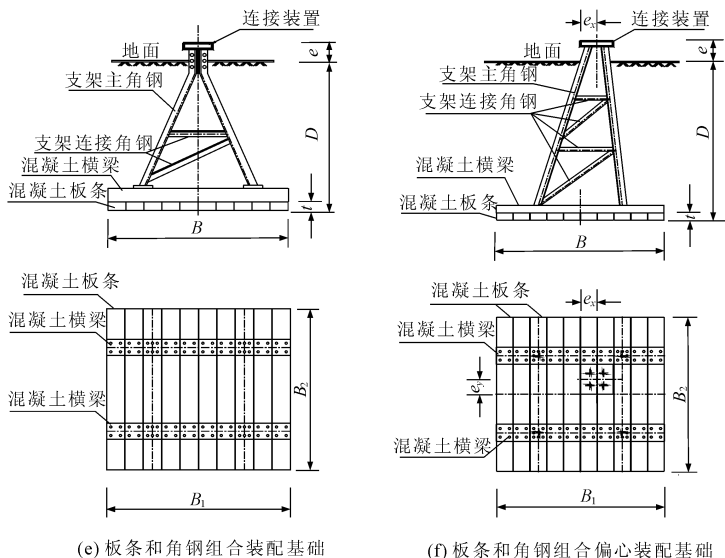
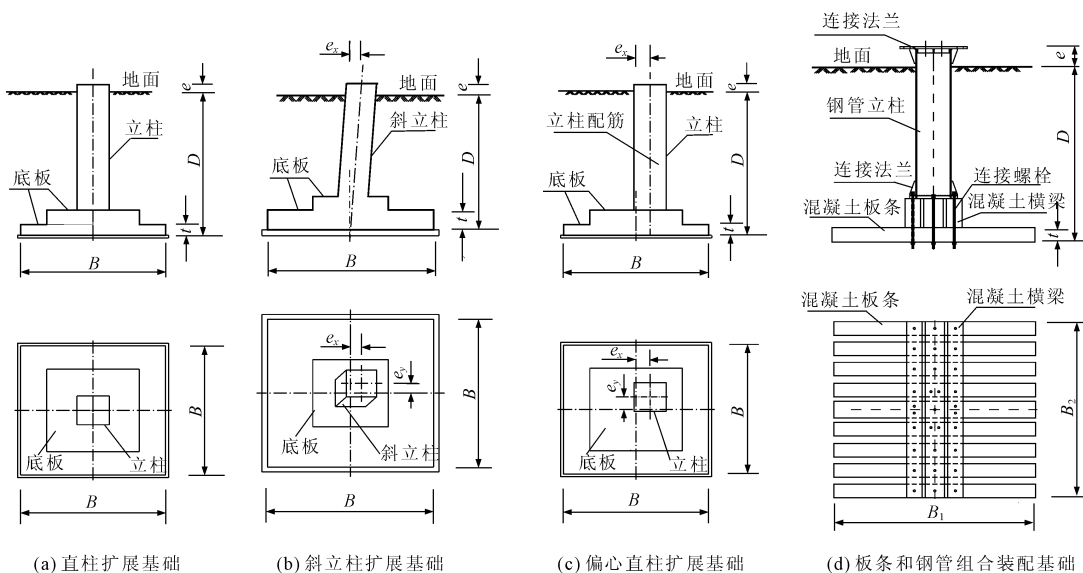


图 1 试验基础结构

图 1(a)为工程中通常采用的直柱扩展基础,其由钢筋混凝土立柱和底板 2 部分组成,通过预埋在基础立柱内的地脚螺栓与上部杆塔结构相连接。对一般格构式输电线路杆塔而言,其基础承受拉/压竖向荷载作用的同时,也承受横线路方向( $X$ 向)、顺线路方向( $Y$ 向)的水平力作用,3 个方向作用力的合力与铅垂方向一般有  $5^\circ \sim 15^\circ$  夹角。因此,在实际工程中若采用图 1(b)所示的斜立柱扩展基础,其立柱沿  $X$ 、 $Y$  方向进行相同的倾角,其一般与上部杆塔主材倾角一致,该类型基础立柱底面中心与底板中心重合,但立柱顶面中心与底板中心沿  $X$ 、 $Y$  方向分别形成了  $e_x$  和  $e_y$  的偏心距,这可有效降低水平力对基础立柱产生的弯矩作用,使得基础斜立柱近似处于轴向受力状态<sup>[5]</sup>。为方便基础施工,可采用图 1(c)所示的偏心直柱扩展基础,让基础立柱中心与底板中心沿  $X$ 、 $Y$  方向有  $e_x$  和  $e_y$  偏心距,也可降低基础

立柱所受的弯矩作用<sup>[7]</sup>。

由于沙漠地区混凝土现场浇注困难,可采用工厂预制、现场拼装的装配式基础,其形式多样,图 1(d)为混凝土板条和钢管组合装配基础,底板由混凝土板条和横梁连接形成,立柱由钢管组成,基础通过钢管法兰与上部杆塔结构连接<sup>[6]</sup>。图 1(e)为混凝土板条和角钢组合装配基础,底板也是由混凝土板条和横梁连接形成,但其基础立柱则由支架主角钢和连接角钢组成,通过顶板连接装置与上部杆塔连接。图 1(f)为混凝土板条和角钢组合的偏心装配式基础,其组成与图 1(e)基本相同,但其顶板连接装置中心与底板中心有  $e_x$  和  $e_y$  偏心距,基础承载性能得到优化<sup>[8]</sup>。

图 1 所示的 5 种现场试验基础尺寸分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 混凝土扩展基础设计参数

试验地点	基础类别	基础编号	试验荷载	埋深 $D/m$	下底板 ( $B \times B \times t$ ) /m	露头 $e/m$	$e_x/m$	$e_y/m$	$T_u/kN$	$s_u/mm$	$\alpha/(\circ)$
毛乌素	a	ZZ-1	上拔	4.0	$3.6 \times 3.6 \times 0.3$	0.20	0.000	0.000	1350	14.50	18.0
		ZZ-2	上拔 + 水平力	4.0	$3.6 \times 3.6 \times 0.3$	0.20	0.000	0.000	1200	9.43	14.0
		ZZ-3	上拔 + 水平力	4.0	$3.6 \times 3.6 \times 0.3$	0.20	0.000	0.000	1200	10.33	14.0
古尔班通古特	a	ZZ-4	上拔	1.3	$1.5 \times 1.5 \times 0.3$	0.20	0.000	0.000	240	5.77	64.0
		ZZ-5	上拔	2.3	$1.5 \times 1.5 \times 0.3$	0.20	0.000	0.000	300	22.49	34.2
		ZZ-6	上拔	3.3	$1.5 \times 1.5 \times 0.3$	0.20	0.000	0.000	340	25.00	18.5
毛乌素	b	XZ-1	上拔	3.0	$2.2 \times 2.2 \times 0.3$	1.20	0.346	0.346	490	5.77	22.2
		XZ-2	上拔 + 水平力	3.2	$2.6 \times 2.6 \times 0.3$	1.50	0.388	0.388	574	6.46	17.0
		XZ-3	上拔 + 水平力	4.0	$4.2 \times 4.2 \times 0.6$	0.20	0.346	0.346	1500	5.55	15.5
		XZ-4	上拔 + 水平力	4.2	$5.5 \times 5.5 \times 0.6$	1.20	0.363	0.363	2250	24.63	15.3
毛乌素	c	PXZZ-1	上拔	4.0	$3.6 \times 3.6 \times 0.3$	0.20	0.350	0.350	1050	6.56	12.1
		PXZZ-2	上拔 + 水平力	4.0	$3.6 \times 3.6 \times 0.3$	0.20	0.350	0.350	1350	12.32	18.0
		PXZZ-3	上拔 + 水平力	4.0	$3.6 \times 3.6 \times 0.3$	0.20	0.350	0.350	1350	12.66	18.0

### 1.3 基础施工

基础按以下工序施工:(1) 基坑开挖至设计埋深,并做好基坑支护;(2) 对混凝土扩展基础定位、支模、混凝土浇注,对组合装配基础直接进行组装;(3) 按 200 mm 分层回填并人工夯实,直至地表;(4) 为期 28 d 的混凝土养护和风积沙地基休止期。完成第(1)道工序后,立即进行第(2)道工序,以防风积沙移动而填埋已开挖的基坑。

### 1.4 荷载工况及加载系统

试验前以基础各方向预估极限承载力的 1/10 为增量进行荷载分级,确定每一级荷载值。试验采用慢

速维持荷载法,第 1 次加载量为分级荷载增量 2 倍,以后按分级荷载增量逐级等量加载。试验中上拔和水平力(沿  $X$ 、 $Y$  合力方向)按照同一分级荷载所对应的荷载值施加,并自动加载、补载与恒载<sup>[5-9]</sup>。

上拔加载系统由 3~5 根长 12 m 经加固工字钢梁、混凝土反力基础、千斤顶、连接螺栓、球形铰和连接板等组成。反力基础中心距 10 m,以消除反力支座对上拔范围内风积沙地基的影响。球形铰支座可消除加载偏心的影响。试验水平力加载系统,由人工用手拉葫芦(导链)通过反力地锚、滑轮组和钢丝绳组成的系统施加<sup>[5]</sup>。

表 3 装配式基础设计参数

试验地点	基础类别	基础编号	荷载工况	埋深 $D/m$	下底板 ( $B_1 \times B_2$ ) /m	混凝土板条 (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) /m	露头 $e/m$	$e_x/m$	$e_y/m$	$T_u/kN$	$s_u/mm$	$\alpha/(^\circ)$
古尔班通古特	d	ZPGL-1	上拔	2.0	2.600 $\times$ 2.60	2.60 $\times$ 0.20 $\times$ 0.20	0.30	0.00	0.00	400	13.61	28.1
		ZPGL-2	上拔	2.6	2.600 $\times$ 2.60	2.60 $\times$ 0.20 $\times$ 0.20	0.30	0.00	0.00	520	21.13	25.0
塔克拉玛干	e	ZPJL-1	上拔 + 水平力	3.4	3.045 $\times$ 3.00	3.00 $\times$ 0.30 $\times$ 0.16	0.20	0.00	0.00	876	25.00	25.7
		ZPJL-2	上拔 + 水平力	3.4	3.045 $\times$ 3.00	3.00 $\times$ 0.30 $\times$ 0.16	0.20	0.00	0.00	790	25.00	25.7
		ZPJL-3	上拔 + 水平力	4.2	3.550 $\times$ 3.50	3.50 $\times$ 0.35 $\times$ 0.17	0.20	0.00	0.00	1210	25.00	21.1
		ZPJL-4	上拔 + 水平力	4.2	3.550 $\times$ 3.50	3.50 $\times$ 0.35 $\times$ 0.17	0.20	0.00	0.00	1240	25.00	21.1
毛乌素	f	PXZP-1	上拔	4.0	3.600 $\times$ 3.60	3.60 $\times$ 0.35 $\times$ 0.18	0.40	0.35	0.35	1150	16.05	15.0
		PXZP-2	上拔 + 水平力	4.0	3.600 $\times$ 3.60	3.60 $\times$ 0.35 $\times$ 0.18	0.40	0.35	0.35	1200	17.78	18.9
		PXZP-3	上拔 + 水平力	4.0	3.600 $\times$ 3.60	3.60 $\times$ 0.35 $\times$ 0.18	0.40	0.35	0.35	1200	22.95	18.6

## 2 试验结果与分析

### 2.1 基础荷载 - 位移曲线

图 2 为各试验基础荷载 - 位移曲线,其中水平荷载和水平位移均为  $X$ 、 $Y$  方向合力及其对应位移。

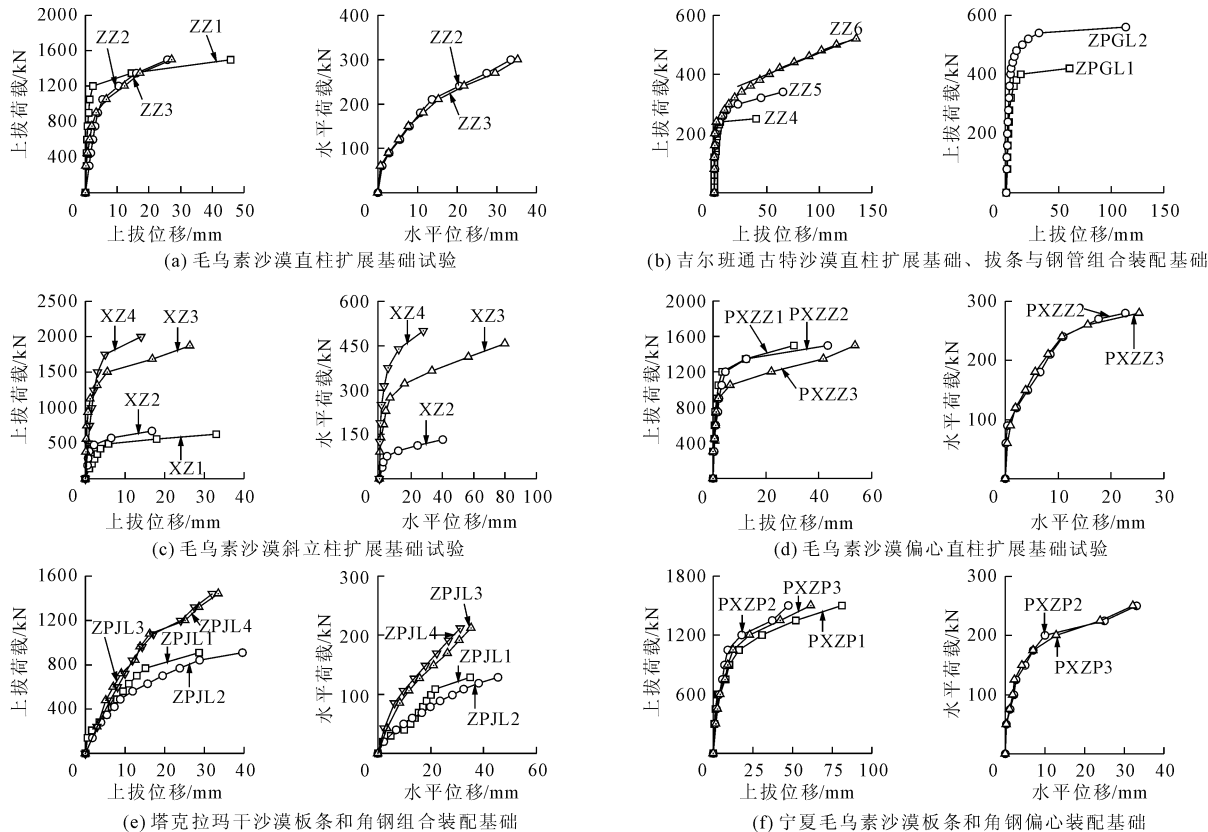


图 2 新疆和宁夏沙漠试验基础荷载 - 位移曲线

### 2.2 荷载 - 位移特性与极限承载力确定

图 1 ~ 图 3 所示的上拔、上拔 + 水平力组合试验工况下基础抗拔荷载 - 位移曲线表明,风积沙地基扩展基础抗拔承载过程总体上呈图 4 所示的 3 阶

此外,文献[10]在内蒙古达拉特旗境内的库布其沙漠开展的 3 个基础现场抗拔试验成果,3 个试验基础中 1 个为刚性台阶基础、2 个为拉线盘基础,基础尺寸及其抗拔 - 荷载位移曲线分别如图 3 所示。

段变化特征:(1) 初始弹性直线段( $oa$ 段),随外荷载增加,基础自重被克服,底板上风积沙地基变形引起基顶位移,位移增加速率缓慢,呈线性变化,抗拔荷载 - 位移曲线近似为直线;(2) 过渡段( $ab$ 段),

风积沙地基进入塑性阶段,地表出现裂缝,基顶位移随上拔荷载的增加而明显增大,呈非线性变化且位移变化速率明显大于初始弹性直线段;(3) 直线破坏段( $bc$ 段),基础位移随上拔荷载增加而迅速增大,较小的荷载增量即产生较大的位移增量,风积沙地基破裂面逐渐开展并直至破坏,上拔和水平位移都迅速增大,破裂面随即开展至土体表面,地基产生整体破坏。

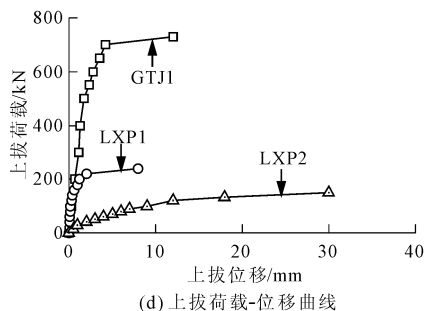
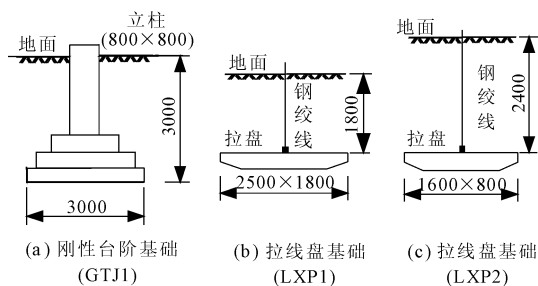


图 3 内蒙古库布其沙漠基础抗拔试验

根据图 4 所示的抗拔荷载-位移曲线特征,取  $b$  点所对应的荷载为相应试验基础的抗拔极限承载力<sup>[11-12]</sup>。考虑到一般建构(筑)物基础上拔位移允许值为 25 mm<sup>[4,13]</sup>,当  $b$  点位移大于 25 mm 时,取位移 25 mm 对应荷载为极限承载力。各试验基础抗拔极限承载力结果分别如表 2 和表 3 所示。

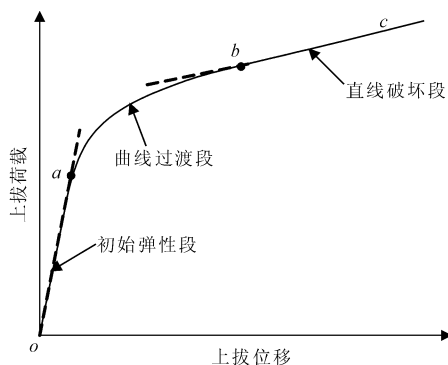


图 4 风积沙地基扩展基础抗拔荷载-位移曲线特征阶段

同时,按照这一极限承载力确定原则,得到文献[10]中试验基础 GTJ1、LXP1 和 LXP1 极限承载力分

别为 700 kN、220 kN 和 134 kN,所对应上拔位移分别为 4.20 mm、2.05 mm 和 18.10 mm。

### 3 风积沙扩展基础抗拔设计及其参数

对开挖回填类扩展基础抗拔稳定性计算,国内外主要采用如图 5 所示的“土重法”计算模型<sup>[13-17]</sup>。

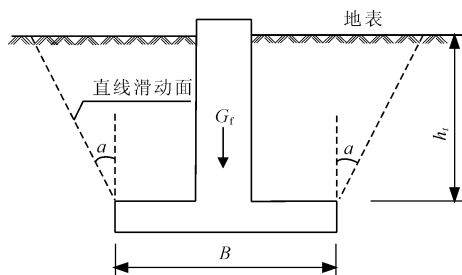


图 5 “土重法”计算模型

如图 5 所示,基础抗拔极限承载力由基础自重及抗拔倒锥体范围内的土体重量 2 部分组成,按式(1)计算其抗拔承载力:

$$T_u = \gamma_s(V_t - V_0) + G_f \quad (1)$$

式中: $\gamma_s$  为回填土重度,  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $V_0$  为地表下基础混凝土体积,  $\text{m}^3$ ;  $G_f$  为基础重量,  $\text{kN}$ ;  $V_t$  为直线滑动面所形成的抗拔倒锥体体积,由式(2)确定:

$$V_t = h_t(B^2 + 2Bh_t \tan \alpha + \frac{4}{3} h_t^2 \tan^2 \alpha) \quad (2)$$

式中: $h_t$  为基础抗拔计算深度,  $h_t = D - t$ ,  $\text{m}$ ;  $\alpha$  为抗拔倒锥体侧面与垂直方向夹角,称为“上拔角”, ( $^\circ$ );  $\alpha$  随土质条件而改变,反映土体抗拔性能。

按照“土重法”计算模型与方法,根据各试验基础的抗拔极限承载力,可计算得到各试验条件下风积沙地基的“上拔角”大小,结果分别如表 2 和表 3 所示。同时,文献[10]中的 3 个基础 GTJ1、LXP1 和 LXP1 抗拔试验得到的风积沙地基“上拔角”分别为  $21.9^\circ$ 、 $18.6^\circ$  和  $15.1^\circ$ 。

试验表明,风积沙地基“上拔角”不是定值,与基础底板尺寸、基础深宽比( $h_t/D$ )等因素有关。以直柱扩展基础为例,当基础底板边长相同时,埋深越大,风积沙“上拔角”越小,“上拔角”随深宽比增大而减小。此外,水平承载力也显著降低了基础抗拔承载力。在上拔和水平力组合作用下,采用斜立柱基础、直立柱偏心以及偏心装配式基础等型式,可改善相应基础的承载性能。

根据试验结果,可得到各沙漠风积沙极限“上拔角”均值  $\mu$ 、标准差  $\sigma$  和变异系数  $\delta$  分别为  $20.5^\circ$ 、 $10.4^\circ$  和 0.50。“上拔角”统计修正系数  $\varphi_\alpha$  按式(3)

计算<sup>[18]</sup>:

$$\varphi_{\alpha} = 1 - \left( \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta \quad (3)$$

式中  $n = 25$ 。计算得到  $\varphi_{\alpha} = 0.82$ 。

按(4)式计算风积沙极限“上拔角”标准值  $\alpha_{\mu k}$ :

$$\alpha_{\mu k} = \varphi_{\alpha} \mu \quad (4)$$

由此可计算得到  $\alpha_{\mu k}$  为  $16.8^{\circ}$ 。

通过现场试验确定的风积沙极限“上拔角”标准值  $\alpha_{\mu k}$  值综合考虑了风积沙的地域特征、试验基础类型、试验基础几何尺寸、水平荷载作用等多个因素的影响,可供沙漠地区输电线路杆塔基础设计参考。

## 4 结 论

(1) 不同类型的扩展基础在沙漠风积沙地基中均具有较好抗拔承载性能,可满足沙漠地区输电线路工程建设需要,斜立柱、直立柱偏心以及偏心装配等方法可进一步提高基础的载性能。

(2) 风积沙地基扩展基础抗拔承载过程呈初始弹性直线段、弹塑性过渡段和直线破坏段的3阶段渐进变化特征,可取直线破坏段的起点作为基础抗拔极限承载力。

(3) 风积沙地基“上拔角”与基础底板尺寸、基础深宽比等因素有关,试验确定的沙漠风积沙极限“上拔角”标准值为  $16.8^{\circ}$ ,该值考虑了沙漠的地域特征、基础类型及其几何尺寸、水平力作用等多个影响因素,可供沙漠地区输电线路杆塔基础设计参考。

### 参考文献:

[1] 张景焘. 风积沙的压实特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(1): 77-82.

[2] 焦 莉, 王 磊. 风积沙路基压实特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(4): 22-26.

[3] Elipe M G M, López-Querol S. Aeolian sands: Characterization, options of improvement and possible employment in construction - The state - of - the - art [J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 728-739.

[4] Lu X L, Qian Z Z, Zheng W F, et al. Characterization and uncertainty of uplift load-displacement behaviour of belled piers [J]. Geomechanics & Engineering, 2016, 11(2): 211-

234.

[5] 乾增珍, 鲁先龙, 丁士君. 上拔与水平力组合作用下加筋风积沙斜柱扩展基础试验[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 373-379.

[6] 乾增珍, 鲁先龙, 丁士君. 塔克拉玛干沙漠输电线塔装配式基础试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2359-2364.

[7] 乾增珍, 鲁先龙, 丁士君. 加筋风积沙地基直柱扩展基础抗拔试验[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S2): 29-32.

[8] 乾增珍, 鲁先龙, 丁士君. 风积沙地基装配式偏心基础抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1097-1102, 1108.

[9] Qian Z Z, Lu X L. Spread foundation behaviors in reinforced aeolian sand under a combination of uplift and lateral loadings [C]//Tunneling and Underground Construction. ASCE, Shanghai, 2014: 396-409.

[10] 孙俊华, 特木尔, 闫 涛. 达丰 500kV 输电线路工程沙漠地基铁塔基础抗拔稳定试验及探讨 [C]//中国电机工程学会输电线路专委会结构分专委会三届二次年会论文集, 2004.

[11] Hirany A, Kulhaw F H. Conduct and interpretation of load tests on drilled shaft foundations: Detailed guidelines [R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1988.

[12] Qian Z Z, Lu X L, Han X, et al. Interpretation of uplift load tests on belled piers in Gobi gravel [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(7): 992-998.

[13] 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.

[14] Matsuo M. Study on the uplift resistance of footing (I) [J]. Soil and Foundation, 1967, 7(4): 1-37.

[15] Meyerhof G G, Adams J I. The ultimate uplift capacity of foundations [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1968, 5(4): 225-244.

[16] Pacheco M P, Danziger F A B, Pinto C P. Design of shallow foundations under tensile loading for transmission line towers: An overview [J]. Engineering Geology, 2008, 101(3/4): 226-235.

[17] IEEE Std 691 - 2001. IEEE guide for transmission structure foundation design and testing [S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001.

[18] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.