

软土地基螺旋桩竖向抗拔极限承载力计算方法

董天文¹, 李士伟², 张亚军², 黄连壮³

(1. 辽宁省交通高等专科学校, 辽宁 沈阳 110122; 2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110004; 3. 辽宁省电力勘测设计院, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 根据抗拔螺旋桩基础竖向抗拔承载性状, 使用极限平衡理论和 Meyerhof 深基础承载力理论, 提出抗拔螺旋桩基础首层叶片界限埋深和叶片控制间距, 给出多层叶片螺旋桩基础竖向抗拔破坏模式, 得到竖向抗拔螺旋桩基础的首层叶片界限埋深和极限承载力计算公式。通过对 14 次工程桩试验分析和极限承载力计算, 竖向抗拔极限承载力计算值与实测值误差一般在 10% 以内, 说明所建立的螺旋桩基础抗拔破坏模式比较接近于实际情况, 极限承载力计算方法可用于估算螺旋桩基础的承载力。

关键词: 桩基工程; 螺旋桩基础; 极限平衡理论; 极限承载力; 抗拔试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 3057 - 06

CALCULATION METHOD OF ULTIMATE BEARING CAPACITY OF VERTICAL PULL-OUT SCREW PILE IN SOFT GROUND

DONG Tianwen¹, LI Shiwei², ZHANG Yajun², HUANG Lianzhuang³

(1. Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang, Liaoning 110122, China; 2. Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China; 3. Electric Power Survey and Design Institute of Liaoning, Shenyang, Liaoning 110016, China)

Abstract: Based on the bearing capacity characteristics of vertical pull-out screw pile foundation, the limiting embedded depth of first layer lamina(LED) and the limiting space between of laminas(LSB) are proposed according to Meyerhof bearing capacity theory of deep foundation and limiting equilibrium mechanics. The pull-out failure model of multi-layered screw pile foundation is obtained, and the calculation methods of first LED, the conditional estimation of LSB and the ultimate pull-out bearing capacity of the vertical pull-out screw pile foundation are presented. On the basis of the analysis and the calculated bearing capacity of 14 times vertical pull-out field tests of screw pile foundation, the calculation mistakes of ultimate pull-out bearing capacity of screw pile foundation are less than 10% for the comparing the calculation values to the estimated values of 3 types of screw pile. It shows that the failure model of screw pile foundation is close to the practical situation, and the calculation method can be used to estimate the ultimate bearing capacity of screw pile foundations.

Key words: pile foundations; screw pile foundation; limiting equilibrium mechanics; ultimate pull-out capacity; pull-out test

1 引言

螺旋桩基础是一种复杂几何表面的异型桩基础

形式, 根据叶片布置形式一般分为连续叶片式螺旋桩和分层叶片式螺旋桩。抗拔螺旋桩基础也称为螺旋锚, 叶片直径较小, 其破坏模式和承载力计算一般以桩的埋深和叶片直径的比例关系确定。

收稿日期: 2007 - 10 - 31; **修回日期:** 2008 - 02 - 20

基金项目: 沈阳市科技攻关项目(1041023 - 4 - 02)

作者简介: 董天文(1970 -), 男, 博士, 1992 年毕业于沈阳大学工业与民用建筑专业, 现任高级工程师、副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dongtianwen111@163.com

螺旋桩基础的抗拔破坏模型有锥形(倒圆台)模型^[1], J. I. Adams 等^[2, 3]提出叶片支撑模型和圆柱模型, S. P. Clemence 和 F. D. Peter^[4]提出多层锚的圆柱倒圆台模型; A. M. Hanna 和 A. Ghaly^[5]提出单层叶片深埋和浅埋螺旋锚的破坏形式。深埋锚的滑裂破坏面在深部形成似球体的对数滑裂面, 浅埋锚是滑裂破坏面为对数螺旋面的倒圆台破坏模型, 简称为单层叶片对数滑裂面模型; G. Shubhra 等^[6]开展了砂土地基倾斜螺旋锚极限阻力的研究工作, 提出了一种圆形锚板的破坏模型。国内学者王 钊等^[7~13]也在螺旋锚斜向抗拔或垂直抗拔的承载机制方面开展了大量工作, 取得了有意义的研究成果。

基于以上破坏模型提出的单桩抗拔极限承载力计算方法有前苏联的螺旋桩抗拔承载力算法^[14]; 倒圆台法(简称为 ICCM 方法)及其演变方法是桩基础抗拔承载力计算的主要方法; 美国电力系统采用的 J. I. Adams 等^[2, 3]提出的计算方法(简称为 ASM 方法), 主要应用于输电塔架基础的抗拔承载力设计; 美国 A. B. Chance 公司使用扭矩系数法^[15]。

以上抗拔极限承载力计算方法基本上是从桩的深宽比(Z/B)关系确定的, 极限抗拔承载力主要是桩的自重、滑裂区内土的重量和桩土界面的滑移阻力, 对深基础的滑裂破坏研究较少。A. M. Hanna 和 A. Ghaly^[5]虽在 1994 年提出了单层叶片的非黏性土对数曲面的破坏模式, 但并未解决首层叶片埋置深度和多层叶片的抗拔承载力计算问题, 本文提出一种首层叶片埋深判定条件的多层叶片螺旋桩基础抗拔承载力理论计算模型, 以期解决竖向抗拔螺旋桩的桩型设计和极限承载力计算问题。

2 竖向抗拔破坏模式及判定条件

2.1 深基础塑性滑裂区的界限埋深

开展螺旋桩竖向抗拔试验, 沿基础深度布置了 9 个土应力计, 通过对地基应力场的分析, 发现首层叶片上部地基产生的破坏滑裂面存在界限深度, 导致螺旋桩基础抗拔的破坏模式不同^[16]。据此建立了基于极限平衡理论和 Meyerhof 深基础滑裂面破坏理论的塑性滑裂区临界深度判定条件^[17, 18]。

当深埋基础的地基发生塑性滑移破坏时, 地基深部将产生梨形滑裂破坏体, 其破坏曲面由对数螺旋线旋转而成, 见图 1。计算梨形滑裂区高度 h_1 :

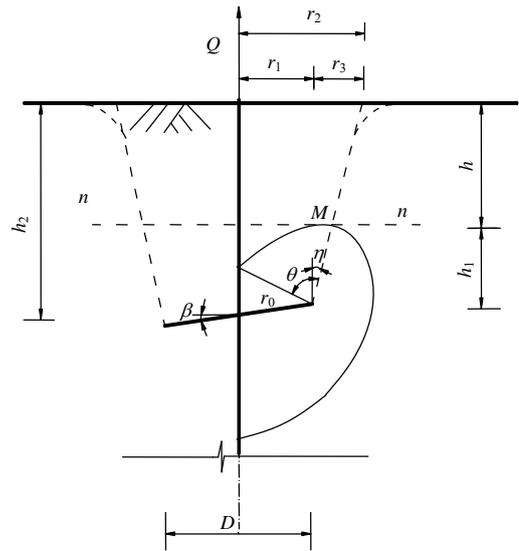


图 1 深基础滑裂面临界深度计算模型
Fig.1 Calculation model of limit depth of slide surface for deep foundation

$$h_1 = r \cos \eta = r_0 e^{\theta \tan \varphi} \cos \left(\theta + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \quad (1)$$

式中: h_1 为对数螺旋线向径在竖向的投影, θ 为向径旋转角, φ 为土的内摩擦角。

式(1)的等式两边对 θ 求导有

$$\frac{\partial h_1}{\partial \theta} = r_0 \tan \varphi e^{\theta \tan \varphi} \cos \left(\theta + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) - r_0 e^{\theta \tan \varphi} \sin \left(\theta + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) = r_0 e^{\theta \tan \varphi} \left[\tan \varphi \cos \left(\theta + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) - \sin \left(\theta + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (2)$$

解式(2)得

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \quad (3)$$

则叶片上部滑裂面的最大投影高度 h_1 为

$$h_1 = r_0 e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \tan \varphi} \cos \varphi \quad (4)$$

假设过叶片上部滑裂面点 M 的平面为 $n-n$, 在地基变形从弹性向塑性发展的临界点, $n-n$ 平面的点 M 面积元(dA)上的竖向力平衡(见图 2)。滑裂面径向反力的竖向投影为

$$q_1 dA = f \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) dA \quad (5)$$

$$q_1 = f \sin \varphi$$

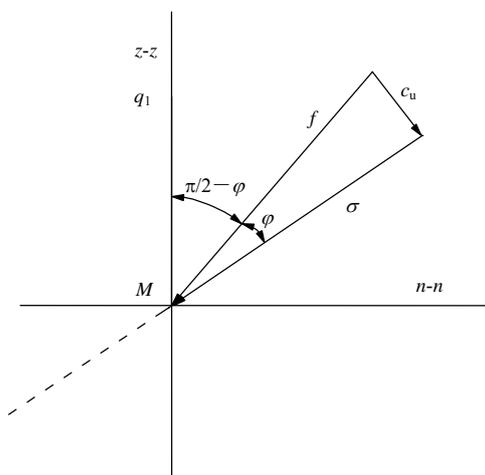


图 2 $n-n$ 平面点 M 面积元静力平衡示意图

Fig.2 Calculation sketch of static load balance at point M on $n-n$ plane

滑裂面点 M 面积微元 dA 的上的平均阻力 f 为

$$f = \frac{c_u}{\sin \varphi} \tag{6}$$

则, $n-n$ 平面 M 点的竖向应力分量(q_1)为

$$q_1 = \frac{c_u}{\sin \varphi} \sin \varphi = c_u \tag{7}$$

式中: c_u 为土的不排水剪切强度。

同时, 在 $n-n$ 平面上作用有土的有效应力, 平衡滑裂面对周围土体产生的竖向应力分量 q_1 , 有

$$\sigma_n = \sum_{k=1}^{m'} \gamma_k h_k \tag{8}$$

式中: σ_n 为 $n-n$ 平面上土的有效应力; m' 为 h 深度范围内土的层数; γ_k 为第 k 层土的天然容重, 土层处于地下水位以下取浮容重。

当 $n-n$ 平面上点 M 的竖向应力平衡时, 地基出现塑性滑裂区。其平衡条件为

$$\sigma_n = q_1 \tag{9}$$

$$\sum_{k=1}^{m'} \gamma_k h_k = c_u \tag{10}$$

据此可求出产生滑裂区的上覆土层临界深度 $[h]$ 为

$$[h] = h + h_1 \tag{11}$$

式中: $[h]$ 为滑裂区上覆土层临界深度; h 为滑裂面上部土层厚度, 由式(10)计算; h_1 为过对数螺旋面顶点(点 M)向径的竖向投影, 按照式(4)计算。

2.2 竖向抗拔破坏模式的桩型参数判定条件

在解决抗拔螺旋桩滑裂区产生的界限高度后, 抗拔螺旋桩的桩型参数(主要是叶片间距)将影响螺旋桩基础的破坏模式。螺旋桩基础在上拔过程中,

叶片将推动其上部地基, 从而产生连续的旋转滑裂体, 与螺旋桩的竖向承压条件的桩型设计问题相似, 螺旋桩的叶片间距参数^[19]设计如下:

$$h_1 = r_{0_{i+1}} e^{\theta_{i+1} \tan \varphi} = r_{0_{i+1}} e^{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \tan \varphi} \tag{12}$$

$$h_3 = r_{0_i} e^{\left(\frac{3\pi}{2} - \alpha\right) \tan \varphi} \tag{13}$$

$$[H] = h_1 + h_3 = \frac{D \cos \beta}{2 \cos \alpha} \left[e^{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \tan \varphi} + e^{\left(\frac{3\pi}{2} - \alpha\right) \tan \varphi} \right] \tag{14}$$

式中: $[H]$ 为叶片控制间距, r_{0_i} 为第 i 层叶片的初始向径, $r_{0_{i+1}}$ 为第 $i+1$ 层的初始向径, θ_{i+1} 为第 $i+1$ 层叶片对数螺旋线向径旋转角, $\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2}$ 。

叶片的最小间距为

$$[h_1] = \frac{D}{2 \cos \alpha} e^{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \tan \varphi} \tag{15}$$

3 抗拔极限承载力计算

极限抗拔荷载作用下的桩基破坏模式因叶片间距、首层叶片的埋深以及地质条件的不同而变化, 其计算方法简称为 TSGM 方法:

(1) 当桩侧首层叶片的埋深大于临界埋深时, 即 $h_2 > [h]$, 抗拔螺旋桩的破坏模式分为以下两种情况:

① 当叶片间距大于控制间距时($H > [H]$), 抗拔螺旋桩发生深基础塑性滑裂区破坏, 当塑性滑裂面连通后, 形成连续的旋转螺旋滑裂面, 见图 3。继续加载, 形成拔出体, 螺旋桩基础发生破坏, 该情况简称为 A 型。极限承载力计算公式为

$$Q_u = G + W + f_1 + \sum P_i + \sum F_j \tag{16}$$

式中: G 为拔出体范围内的土重, 对于软土地基该项按式(17)近似计算, 直径 D 以外的滑裂体土重可作为安全储备; P_i 为第 i 层叶片的滑裂体表面剪阻力, 计算方法见董天文等^[19]的研究成果; F_j 为滑裂体间土柱面的剪阻力; W 为桩体自重; f_1 为桩长范围内的桩体与桩侧地基的剪移摩阻力。

其中, 滑裂体间土柱剪阻力为

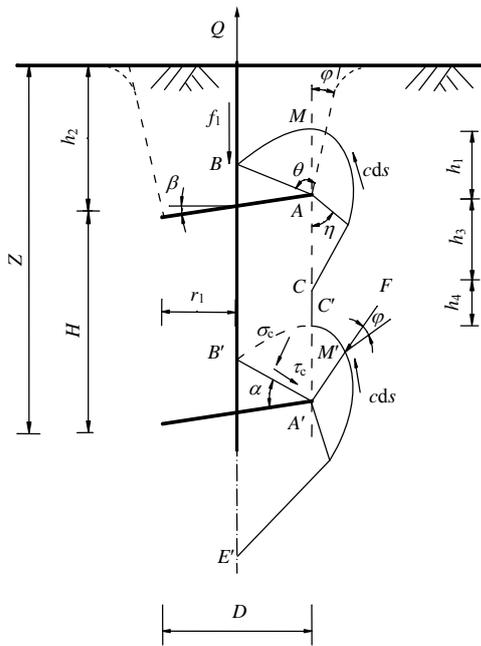


图3 TSGM计算方法A型计算简图
Fig.3 Calculation sketch of type A of TSGM method

$$F_j = \pi D h_4 c_{uj} \quad (17)$$

式中： h_4 为相邻两层滑裂面间土柱高度， c_{uj} 为第 j 层土的不排水抗剪强度。

根据对数螺旋线性质，当土的内摩擦角较小时，滑动破坏曲线接近于以对数螺旋线初始半径的圆。

$$G = \sum_{i=1}^n \frac{\pi D^2 z_i}{4} \gamma_i \quad (18)$$

式中： n 为桩长范围的土层数， z_i 为第 i 层土层厚度。

② 当螺旋桩的桩侧叶片间距(H)小于叶片控制间距($[H]$)时，抗拔螺旋桩的破坏面发生在叶片外边缘，形成柱状滑裂面，该情况简称为B型。极限荷载包括：柱状滑裂面阻力、该范围的土重，首层叶片以上倒圆台滑裂面阻力和倒圆台土重，见图4。

$$Q_u = G_1 + G_2 + W + f_1 + f_2 + p_1 \quad (19)$$

式中： G_1 为首层叶片以上倒圆台的土重， G_2 为叶片间圆柱体土重， p_1 为首层以上倒圆台滑裂面阻力， f_2 为叶片间土柱剪移摩阻力。

(2) 当首层叶片的埋深小于滑裂体界限埋深时，即 $h_2 < [h]$ ，该情况简称C型。极限抗拔承载力计算如下：

$$Q_u = G_1 + G_2 + W + f_1 + f_2 \quad (20)$$

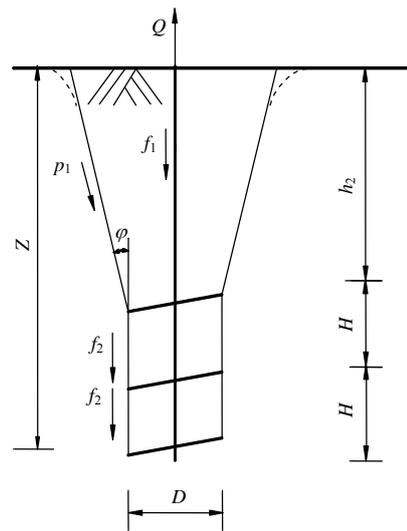


图4 TSGM计算方法B型和C型计算简图
Fig.4 Calculation sketch of types B and C of TSGM method

4 算例分析与讨论

4.1 螺旋桩竖向抗拔试验与极限承载力判定

输电塔基础工程位于某滨海冲积平原地貌，场地平整，地层从上到下依次为：(1) 耕土，灰褐色，黏性土颗粒组成，含植物草根，很湿，可塑到流塑状态；(2) 粉质黏土，灰黑色，有腥臭味，含水率情况为很湿到饱和，软塑到流塑状态；(3) 粉砂，灰黑色，以石英、长石为主，含云母和淤泥，饱和，稍密，未穿透，该层液化指数 $ILE = 8$ ，液化等级为中等液化；地下水稳定水位 4.5 m，土的平均重度 16 kN/m^3 ，各层土材料的物理力学参数见表 1^[20](表中 z 为土层厚度， ϕ 为土的内摩擦角， c 为土的黏聚力， E_s 为土的压缩模量， c_u 为土的不排水抗剪强度， f_a 为地基承载力特征值)。

表1 土材料的物理力学参数^[20]
Table 1 Physico-mechanical parameters of soils^[20]

土材料	z/m	$\phi/^\circ$	c/kPa	E_s/MPa	c_u/kPa	f_a/kPa
耕土	0.5	2	10.00	1.3	10	
粉质黏土	7.0	2	9.33~10.00	1.3	10	80
粉砂	7.5	25	5.00	14.1		120

螺旋桩抗拔试验使用抱杆做成人字形加荷架，用手扳葫芦加荷，拉力表测拉力读数，在测桩上放置标尺，用经纬仪测量桩顶位移，抗拔试验如图 5 所示，螺旋桩的桩型参数见表 2(表中 L 为螺旋桩的桩长； d 为桩体直径； H 为叶片间距，相邻两层

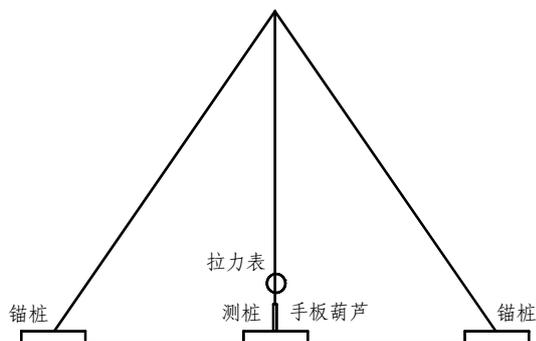


图 5 螺旋桩抗拔试验布置图

Fig.5 Sketch of pull-out test of screw pile

表 2 螺旋桩几何参数

Table 2 Geometric parameters of screw piles

桩型	L/m	D/m	H/m	S/m	D/m
1 [#]	6		1.50		0.708
2 [#]	8	0.108	1.08	0.144	0.650
3 [#]	5		1.08		0.650

螺旋叶片中截面距离; S 为叶片螺距, 单层叶片螺旋线起点与终点的投影距离; D 为叶片直径)。

抗拔试验共进行 3 组 14 次, 1[#]螺旋桩试验 2 次, 2[#]螺旋桩试验 7 次, 3[#]螺旋桩试验 5 次。根据沈保汉的研究成果^[1], 螺旋桩极限抗拔荷载为桩头位移 20 mm 对应的桩顶荷载以及荷载 - 位移曲线陡升点荷载综合判定 3 种桩型的平均极限荷载为: 1[#]螺旋桩 104 kN(上拔量为 11 mm), 2[#]螺旋桩 92.85 kN(上拔量为 19.7 mm), 3[#]螺旋桩 82 kN(上拔量为 20.3 mm)。其中, 1[#]螺旋桩单级设计加载量为 8 112 kN 荷载级时锚桩失稳, 因此判定极限荷载为 104 kN。

4.2 螺旋桩抗拔极限承载力估算与讨论

本文的竖向抗拔螺旋桩基础极限承载力计算分别使用了倒圆台算法(ICCM 方法)、桩基规范计算方法(JGJ 方法)、美国电力系统抗拔螺旋桩承载力计算方法(ASM 方法)和本文提出的计算方法(TSGM 方法), 抗拔承载力实测值和 4 种计算结果列于表 3(表中, JGJ 方法为桩基规范(JGJ94 - 94)中单桩非整体破坏抗拔极限承载力计算方法^[21], 具体参数选择如下: 粉质黏土层抗拔系数为 0.8, 极限侧阻力(q)为 34 kPa; 粉砂层抗拔系数 0.7, 极限侧阻力为 20 kPa)。

根据竖向抗拔螺旋桩首层叶片滑裂区界限埋深判定条件, 计算了产生深基础滑裂破坏的叶片界限埋深 $[h]$ 和叶片控制间距 $[H]$, 判定 2[#]螺旋桩满足 A 型破坏模式, 而 1[#]和 3[#]桩满足 B 型破坏模式, 使用

表 3 抗拔极限承载力对比表

Table 3 Comparison of ultimate of pull-out pipes bearing capacity

桩号	[h] /m	[H] /m	判定极限荷载 Q_u /kN	ICCM 方法		ASM 方法		JGJ 方法		TSGM 方法	
				Q_{k1} /kN	Q_{k1} /Q_u	Q_{k2} /kN	Q_{k2} /Q_u	Q_{k3} /kN	Q_{k3} /Q_u	Q_{k4} /kN	Q_{k4} /Q_u
1 [#]	5.90	1.020	104.00	50.46	0.481	73.03	0.696	50.73	0.488	108.89	1.047
2 [#]	5.86	0.936	92.85	54.03	0.582	65.13	0.701	66.94	0.721	100.58	1.083
3 [#]	5.86	0.936	82.00	45.02	0.549	62.54	0.763	46.12	0.562	87.67	1.069

TSGM 方法计算的单桩抗拔承载力分别为 108.89 kN(1[#]螺旋桩), 100.58 kN(2[#]螺旋桩), 87.67 kN(3[#]螺旋桩), 抗拔极限承载力与试验判定极限抗拔荷载的比分别为 1.047, 1.083, 1.069, 计算误差小于 10%, 说明多层叶片破坏模型基本符合螺旋桩抗拔破坏情况。抗拔极限承载力计算误差的产生一部分是因为施工中叶片对地基的扰动以及软土地基强度恢复较慢, 造成软土地基的强度降低; 另一部分误差是由于建立破坏模型过程中, 假定的地基破坏面形式与实际破坏形式存在误差, 从而导致计算值大于试验判定值。

而 ICCM 方法、JGJ 方法和 ASM 方法的单桩抗拔极限承载力计算值远低于试验的极限荷载判定值, 表明其破坏模型不能反映试验桩的实际破坏情况。

螺旋桩基础竖向抗拔试验与极限承载力计算表明: 因螺旋桩基础的桩体几何异形和桩土荷载传递的复杂性, 导致该种桩型抗拔承载机制不同于等截面直型桩。螺旋桩基础在上拔过程中, 叶片向上推动地基并产生塑性滑移, 当首层叶片埋深满足界限埋深时, 桩周地基将发生深基础滑裂破坏, $Q-s$ 曲线表现出渐进破坏特征, 形成拔出体时的桩顶累计位移量要大于等截面直型桩; 对于叶片数量、直径、倾角和间距等相同的螺旋桩而言, 如本次试验的 2[#]和 3[#]螺旋桩, 随着叶片有效上覆土层厚度的减少, 抗拔螺旋桩基础的桩土相互作用减弱, 螺旋形旋转滑裂体的体积(重量)减小, 滑裂体表面剪阻力发挥程度降低, 从而导致螺旋桩的抗拔极限承载力降低。

5 结 论

螺旋桩基础的桩体几何异形和桩土荷载传递的复杂性, 导致其抗拔承载机制不同于等截面直型桩。抗拔螺旋桩的叶片有效上覆土层厚度和叶片间距, 将对其桩土相互作用、螺旋形旋转滑裂体的体积(重

量)和滑裂面抗力发挥程度产生显著影响。本文从竖向抗拔螺旋桩基础承载特性出发,采用极限平衡理论和 Meyerhof 深基础承载力理论,提出了抗拔螺旋桩基础首层叶片界限埋深条件,给出竖向抗拔螺旋桩基础破坏模式,得到首层叶片界限埋深和极限承载力计算公式。

通过对 14 次工程桩试验抗拔承载力计算分析表明:竖向抗拔极限承载力计算值与实测值误差一般在 10%以内,说明本文建立的螺旋桩基础抗拔破坏模式比较接近于实际情况,极限承载力计算方法可用于估算螺旋桩基础的抗拔极限承载力。

致谢 感谢参加螺旋桩抗拔试验的人员!

参考文献(References):

- [1] 沈保汉. 桩基础测试、勘察、设计和施工(十四)——桩的抗拔承载力[J]. 工业建筑, 1991, (11): 51 - 55.(SHEN Baohan. Test, prospecting, design and construction of pile foundation(XIV)—the tension bearing capacity of piles[J]. Industrial Construction, 1991, (11): 51 - 55.(in Chinese))
- [2] ADAMS J I, HAYES U C. The uplift capacity of shallow foundation[J]. Ontario Hydro Research Quarterly, 1967, 19(1): 1 - 13.
- [3] UDWARI J J, RODGERS T E, SINGH H. A rational approach to the design of high capacity multi-helix screw anchors[C]// The 7th IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.]: [s.n.], 1979: 606 - 610.
- [4] CLEMENCE S P, PEPER F D. Measurement of lateral stress around multi-helix anchors in sand[J]. Geotechnical Testing Journal, 1984, 7(3): 145 - 152.
- [5] HANNA A M, GHALY A. Ultimate pullout resistance of groups of vertical anchors[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(5): 673 - 682.
- [6] SHUBHRA G, SHALINI PATRA N R. Break out resistance of inclined anchors in sand[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(6): 1 511 - 1 525.
- [7] 王 钊, 刘祖德, 程葆田. 螺旋锚的试制和在基坑支护中的应用[J]. 土木工程学报, 1993, 26(4): 47 - 53.(WANG Zhao, LIU Zude, CHENG Baotian. Trial-produce of Screw anchor and its application in fencing foundation pit[J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(4): 47 - 53.(in Chinese))
- [8] 王 钊, 周红安, 李丽华, 等. 玻璃钢螺旋锚的设计和试制[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2 325 - 2 328.(WANG Zhao, ZHOU Hong'an, LI Lihua, et al. Design and trial production of fiber reinforced plastic screw anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2 325 - 2 328.(in Chinese))
- [9] 王 钊, 王金忠, 曾繁平, 等. 玻璃钢螺旋锚的现场拉拔试验[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1 439 - 1 442.(WANG Zhao, WANG Jinzhong, ZENG Fanping, et al. Field pull out tests of FRP screw anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1 439 - 1 442.(in Chinese))
- [10] 郭方胜. 倾斜螺旋锚片锚杆上拔性能室内试验研究[J]. 武汉冶金科技大学学报, 1997, 20(4), 453 - 457.(GUO Fangsheng. Experimental studies on the behavior of inclined anchors in sand[J]. Journal of Wuhan Yejin University of Science and Technology, 1997, 20(4): 453 - 457.(in Chinese))
- [11] 陈基成, 柏文正, 魏文伯. 小型螺旋锚的快拉试验和研究[J]. 水利水电科学, 1999, (3): 296 - 301.(CHEN Jicheng, BAI Wenzheng, WEI Wenbo. The fast pulling experiment and research on minitype screw anchor[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1999, (3): 296 - 301.(in Chinese))
- [12] 汪 滨. 螺旋锚技术及其在工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 31 - 45.(WANG Bin. The technique and use of screw anchor in engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005: 31 - 45.(in Chinese))
- [13] 汪 滨, 李 军, 邓 昌. 螺旋锚加固滑坡抢险工程车的研制[J]. 水利水电机械, 2007, 29(11): 16 - 18.(WANG Bin, LI Jun, DENG Chang. Development of a vehicle for slope reinforcing by spiral anchors[J]. Water Conservancy and Electric Power Machinery, 2007, 29(11): 16 - 18.(in Chinese))
- [14] 桩基础地基与基础编委会. 桩基础[M]. 唐念慈译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982: 180 - 181.(Editorial Committee of Collected Paper of Foundation Engineering. Pile Foundation[M]. Translated by TANG Nianci. Beijing: China Architecture and Building Press, 1982: 180 - 181.(in Chinese))
- [15] A B Chance Co.. Helical pier foundation systems[R]. Bulletin: Hubbell Inc., 2000: 1 - 12.
- [16] 董天文. 预制螺旋桩基础力学特性与承载机制研究[博士学位论文][D]. 沈阳: 东北大学, 2007.(DONG Tianwen. Study of mechanics character and load-bearing mechanism on prefabricated screw pile foundation[Ph. D. Thesis][D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.(in Chinese))
- [17] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 387 - 395.(QIAN Jiahuan, YIN Zhongzhe. Soil mechanism and computation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996: 387 - 395.(in Chinese))
- [18] 华南工学院, 南京工学院, 浙江大学, 等. 地基及基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 297 - 313.(South China College of Technology, Nanjing College of Technology, Zhejiang University, et al. Ground and foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1985: 297 - 313.(in Chinese))
- [19] 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极限承载力计算[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 2 031 - 2 034.(DONG Tianwen, LIANG Li, WANG Mingshu, et al. Designing pitch of screws and computing capacity of screw pile under ultimate load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 2 031 - 2 034.(in Chinese))
- [20] 辽宁电力勘测设计院. 螺旋锚基础试验研究[R]. 沈阳: 辽宁电力勘测设计院, 2002: 12 - 13.(Electric and Power Survey and Design Institute of Liaoning. Testing and research of screw anchor[R]. Shenyang: Electric and Power Survey and Design Institute of Liaoning, 2002: 12 - 13.(in Chinese))
- [21] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ94 - 94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ94 - 94 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995.(in Chinese))