

文章编号: 1000-7598 (2010) 02-0441-09

斜向上拔螺旋桩基础极限荷载计算

张亚军¹, 董天文², 黄连壮³, 梁 力¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004; 2. 辽宁省交通高等专科学校 道桥系, 沈阳 110122; 3. 辽宁省电力勘测设计院, 沈阳 110016)

摘 要: 斜向荷载作用下抗拔螺旋桩基础的研究选用螺旋桩为研究对象, 引入了随动坐标系, 并将桩-土相互作用形成的地基反力以载荷的形式施加于桩体和叶片, 解决了大变形材料使用小变形弹性材料叠加原理问题, 分析了斜向荷载抗拔螺旋桩基础的破坏模式, 建立了斜向荷载作用下抗拔螺旋单桩和群桩基础的极限荷载估算公式, 通过与螺旋群桩原型试验的极限荷载判定值的对比, 斜向极限荷载估算值约为判定值的 93.3 %。表明所使用研究方法, 提出的破坏模式和极限荷载计算方法比较符合实际情况, 对斜向荷载抗拔螺旋桩基础工程的设计与分析有一定的指导意义。

关 键 词: 桩基础; 螺旋桩; 斜向荷载; 破坏模式; 极限承载力

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Calculation of ultimate bearing capacity of screw pile group by inclined pull-out test

ZHANG Ya-jun¹, DONG Tian-wen², HUANG Lian-zhuang³, LIANG Li¹

(1. School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Department of Road and Bridge Engineering, Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang 110122, China; 3. Liaoning Electric Power Survey and Design Institute, Shenyang 110016, China)

Abstract: The screw pile body and pitch of screw is chosen as the subject investigated of the pull-out screw pile foundation under inclined load; and the subgrade reaction by the pile-soil interactivity were put on surfaces of pile body and pitch of screw by the formal load; at the same time, the moving coordinates were introduced in the analysis. So the used problem of superposition theorem for large deformation material system, for instance soil-pile, could be transferred the small deformation & elastic mass for screw pile body and pitch of screw. The failure model of pull-out screw pile under inclined load was analyzed; and the calculation of ultimate load for a pile and pile group were given; and calculations of ultimate inclined load of screw pile group was 93.3% to the average determined value from field pull-out tests under inclined load. It is shown that the research technique, the failure model and the calculation formulas are consistent with the practical characteristics of the pull-out screw pile group under inclined load on the whole; and these research results can guide the designing and analysis of pull-out screw pile foundation under inclined load.

Key words: pile foundation; screw pile; inclined load; failure model; ultimate bearing capacity

1 引 言

当前桩基础的研究工作一般集中于静荷载条件下基础的承载性状研究, 即使是斜向静荷载下的承载性状也研究较少, 而且主要集中在传统的等截面直型桩, 研究方法是将斜向荷载分解为等效的水平分量与垂直分量荷载, 分别作用于桩基础进行理论研究与试验分析^[1-9], 这种研究方法不符合岩土材料的大变形性质, 并且不能反映荷载水平分量与垂直分量的荷载耦合效应^[10-11]。

斜向荷载抗拔螺旋桩基础的承载过程属于复杂几何体与土介质相互作用过程, 桩体表面螺旋形叶片的存在, 使得桩体表面几何特性表现为不连续; 同时, 地基材料的非线性力学特征的存在, 也增加了螺旋桩基础的桩、土相互作用的复杂性^[12]。

2 斜向荷载抗拔螺旋桩破坏模型

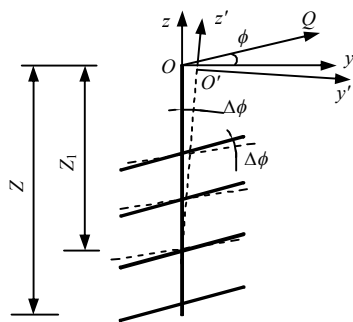
在斜向上拔荷载作用下, 首层叶片以上桩体沿荷载方向推动地基。荷载向下传递, 受载一侧叶片(表示与荷载水平分量方向一致的桩侧叶片)向下

收稿日期: 2008-08-06

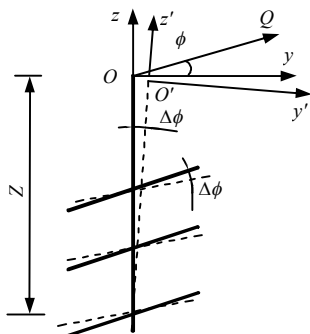
基金项目: 沈阳市科技攻关计划 (No. 1041023-4-02)。

第一作者简介: 张亚军, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事基础工程方面的研究。E-mail: lnczyj@sina.com

压缩地基材料, 背载一侧叶片 (表示与载荷水平分量方向相反的桩侧叶片) 向上推动地基, 该层地基达到极限状态后, 荷载通过桩体继续向下传递, 桩体斜向推动地基, 首层和二层叶片间桩体受地基反力作用而逐渐达到塑性破坏; 桩顶荷载继续增加, 第2层叶片的受载侧叶片向下推动地基, 背载侧叶片向上推动地基, 导致其周边地基材料发生极限平衡破坏; 桩顶荷载持续增加, 各层螺旋桩叶片间地基、受载侧叶片下部地基和背载侧叶片上部地基依次逐步进入极限平衡破坏阶段。当桩端部受载侧叶片下地基与背载侧叶片上地基达到极限平衡条件后, 斜向荷载作用的螺旋桩基础形成极限平衡状态。图1为斜向荷载作用的螺旋桩破坏模型, 其中 Q 为上拔斜向荷载, ϕ 为荷载作用角度, Z 为桩长, Z_1 为螺旋桩水平抗力深度。



(a) 有限深度破坏模型



(b) 完整型破坏模型

图1 斜向荷载抗拔螺旋桩破坏模型

Fig.1 The failure model of a screw pile under inclined pull-out load

斜向上拔荷载作用过程中, 在随动坐标系 $y'o'z'$ 的 z' 轴方向上拔荷载分量对背载侧叶片上部地基形成推举作用, 在桩-土系统的荷载耦合效应作用下, 降低了背载侧叶片上部地基形成的有效地基压力, 加速了该处地基的破坏, 表现为在 y' 轴方向的地基极限抗力降低, 使得 y' 和 z' 轴方向极限载荷分

量小于单独施加荷载条件的桩顶极限荷载。

当斜向荷载上拔螺旋桩的水平推力在桩的有限深度 z_1 发挥作用时, 若螺旋桩的桩体和叶片形成的水平抗力先于其竖向反力达到极限条件, 则地基水平抗力决定了斜荷载上拔螺旋桩基础的极限载荷大小; 反之, 由其竖向地基反力决定桩顶极限载荷大小。而 z_1 深度以下的螺旋桩叶片和桩体仅承担竖向上拔荷载的作用。

对于全部桩长范围内螺旋桩的叶片、桩体充分发挥作用, 单桩极限斜向荷载的大小需要在随动坐标系 $y'o'z'$ 中对 y' 和 z' 轴方向的极限载荷分量进行判断。

3 螺旋桩的叶片和桩体力学关系

斜向荷载作用的螺旋桩基础, 桩周地基材料因桩体的变位 (包括桩体和叶片的变形) 引起桩周材料力学响应, 形成地基反力。针对桩体材料而言, 不论是钢筋混凝土结构螺旋桩, 还是钢结构螺旋桩, 其材料相对土材料的物理性质具有较好的连续性, 力学特征具有小变形、连续特点, 因此, 选用桩结构体为研究对象, 可沿用弹性体小变形的应力-应变叠加理论, 解决斜向荷载螺旋桩基础的极限荷载计算问题。

3.1 螺旋桩旋转叶片几何关系

螺旋线参数方程如下:

$$\left. \begin{aligned} x' &= r \cos \theta \\ y' &= r \sin \theta \\ z' &= b\theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: θ 为螺旋线向径旋转角; r 为半径; $b = h/2\pi$, h 为螺距。

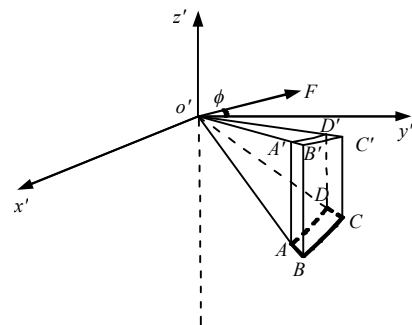


图2 螺旋叶片微面积单元几何投影关系

Fig.2 The projecting geometric relation for differential area of the pitch of screw

螺旋线参数方程对旋转角 θ 求导, 并代入 $b = h/2\pi$, 得

$$\frac{dx'}{d\theta} = -r \sin \theta \quad (2)$$

$$\frac{dy'}{d\theta} = r \cos \theta \quad (3)$$

$$\frac{dz'}{d\theta} = b = \frac{h}{2\pi} \quad (4)$$

M 点微元 ($ABCD$) 与 $x'o'y'$ 坐标平面的投影关系为

$$dA' = r \sec \gamma dr d\theta \quad (5)$$

螺旋叶片上微单元上 M 点的切向量和法向量分别为

$$N_1 = \left\{ -r \sin \theta, r \cos \theta, \frac{h}{2\pi} \right\} \quad (6)$$

$$N_2 = \left\{ \frac{1}{r \sin \theta}, -\frac{1}{r \cos \theta}, \frac{2\pi}{h} \right\} \quad (7)$$

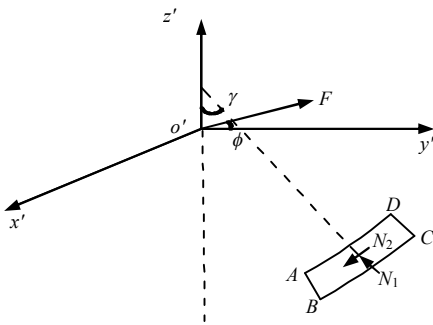


图3 螺旋叶片微面积单元方向余弦
Fig.3 The direction cosine of differential area for the pitch of screw

假定法向量的方向是向上行的, 即它与 z' 轴的正向成的角 γ 是锐角, M 点微元法向量的方向余弦为

$$\cos \alpha = -\frac{2\pi r \sin \theta}{\sqrt{4\pi^2 r^2 + h^2}} \quad (8)$$

$$\cos \beta = \frac{2\pi r \cos \theta}{\sqrt{4\pi^2 r^2 + h^2}} \quad (9)$$

$$\cos \gamma = \frac{h}{\sqrt{4\pi^2 r^2 + h^2}} \quad (10)$$

因此, M 点微元面积 dA' 为

$$dA' = r \sec \gamma dr d\theta = \frac{r \sqrt{4\pi^2 r^2 + h^2}}{h} dr d\theta \quad (11)$$

3.2 螺旋桩叶片面积微元受力分析

3.2.1 M 点微元的力学分析

令 F_1 表示叶片下基底反力, F_2 表示叶片表面摩擦力。在图中坐标系中, 叶片基底反力 F_1 在 y' 轴方向的分量为

$$F_{1y'} = F_1 \sin \gamma_1 \sin \theta \quad (12)$$

叶片表面摩擦力 F_2 在 y' 轴方向的分量为

$$F_{2y'} = F_2 \cos \gamma \sin \theta \quad (13)$$

选择一个螺距的叶片体为研究对象, 受载侧叶片所受地基作用在 y' 轴方向的综合分量为

$$F_{12y'} = F_1 \sin \gamma \sin \theta + F_2 \cos \gamma \sin \theta \quad (14)$$

其中, 摩擦力 F_2 可表示为 $F_2 = \mu F_1$, 则

$$F_{12y'} = F_1 (\sin \gamma \sin \theta + \mu \cos \gamma \sin \theta) \quad (15)$$

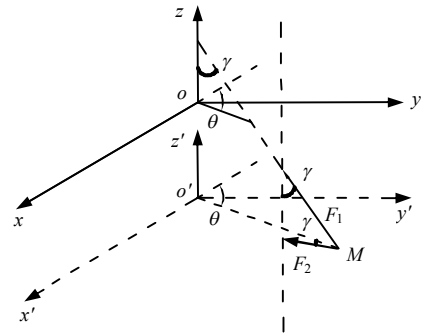


图4 螺旋叶片微面积单元 M 点力学分析简图
Fig.4 The mechanics sketch of the differential area at M point for the pitch of screw

同理, 建立 x' 轴方向的综合分量, 即定义为 x' 轴向干扰力, 表示为 F_x , 则

$$F_{12x'} = F_1 (\sin \gamma \cos \theta + \mu \cos \gamma \cos \theta) \quad (16)$$

F_1 在 z' 轴的荷载分量

$$F_{1z'} = F_1 \cos \gamma \quad (17)$$

F_2 在 z' 轴的荷载分量

$$F_{2z'} = F_2 \sin \gamma \quad (18)$$

则 M 点微元下表面在 z' 轴方向的荷载分量为

$$F_{12z'} = F_1 \cos \gamma - F_2 \sin \gamma = F_1 (\cos \gamma - \mu \sin \gamma) \quad (19)$$

3.2.2 M' 点微元的力学分析

背向荷载施加方向一侧的螺旋叶片的上表面承受上部土体的重力、被动土压力和叶片表面的摩

擦力；叶片下表面因斜向载荷的作用，叶片下表面脱离周边地基，形成局部较小的似真空吸力，但一般可忽略不计。

与 M 点的力学分析相同， M' 点的有关力学关系表示如下：

$$F'_{12y'} = F'_1 (\sin \gamma \sin \theta + \mu \cos \gamma \sin \theta) \quad (20)$$

$$F'_{12x'} = F'_1 (\sin \gamma \cos \theta + \mu \cos \gamma \cos \theta) \quad (21)$$

$$F'_{12z'} = F'_1 (-\cos \gamma + \mu \sin \gamma) \quad (22)$$

3.2.3 单螺距叶片载荷理论解

螺旋桩基础的承载可以划分为叶片间桩体承载和叶片承载，其中叶片主要承担由斜向载荷引起的地基材料压缩而形成的地基竖向反力。

(1) y' 轴方向荷载分量计算

$$F_{y'} = \int_{-\pi}^0 \int_{r_1}^{r_2} F_{12y'} dA' + \int_0^{\pi} \int_{r_1}^{r_2} F'_{12y'} dA' = F_{y'r} + F_{y'l} \quad (23)$$

代入方向角 $\sin \gamma$ 和 $\cos \gamma$ ，整理上式得

$$F_{y'r} = \int_{-\pi}^0 \int_{r_1}^{r_2} F_1 \left(\frac{2\pi r}{h} + \mu \right) r \sin \theta dr d\theta \quad (24)$$

$$F_{y'l} = \int_0^{\pi} \int_{r_1}^{r_2} F'_1 \left(\frac{2\pi r}{h} + \mu \right) r \sin \theta dr d\theta \quad (25)$$

(2) x' 轴方向荷载分量计算

与 y' 轴方向荷载分量推导相同， x' 轴方向荷载分量为

$$F_{x'} = F_{x'r} + F_{x'l} \quad (26)$$

$$F_{x'r} = \int_{-\pi}^0 \int_{r_1}^{r_2} F_1 \left(\frac{2\pi r}{h} + \mu \right) r \cos \theta dr d\theta \quad (27)$$

$$F_{x'l} = \int_0^{\pi} \int_{r_1}^{r_2} F'_1 \left(\frac{2\pi r}{h} + \mu \right) r \cos \theta dr d\theta \quad (28)$$

(3) z' 轴方向荷载分量计算

建立单螺距斜向载荷 z' 轴方向荷载分量为

$$F_{z'} = F_{z'r} + F_{z'l} \quad (29)$$

$$F_{z'r} = \int_{-\pi}^0 \int_{r_1}^{r_2} F_1 \left(1 - \mu \frac{2\pi r}{h} \right) r dr d\theta \quad (30)$$

$$F_{z'l} = \int_0^{\pi} \int_{r_1}^{r_2} F'_1 \left(-1 + \mu \frac{2\pi r}{h} \right) r dr d\theta \quad (31)$$

3.2.4 关于地基反力函数讨论

由于螺旋线在 $x'o'y'$ 坐标面投影旋转的角度与螺旋叶片法向反力的分布无关，即 θ 不为法向荷载函数 F_1 和 F_2 的变量，而仅与叶片半径 r 有关，同时根据有关试验可知，叶片的应力分布从桩体向外逐渐增大，一般为多次曲线形式。为简化计算过程，使用偏心荷载基底反力的三角形荷载分布形式，方便极限荷载的力学关系建立。

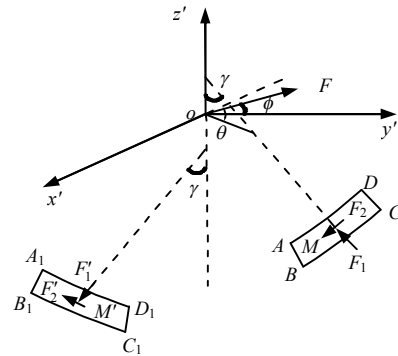


图5 螺旋叶片力学分析简图

Fig.5 The mechanics sketch of the pitch of screw

当荷载函数 F_1 、 F_2 和 F'_1 、 F'_2 按照三角形分布时，即荷载函数 F_1 、 F_2 和 F'_1 、 F'_2 为变量 r 的一次函数时，假设荷载函数 F_1 、 F_2 和 F'_1 、 F'_2 分别为

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{r}{r_2 - r_1} f, F_2 = \frac{\mu r}{r_2 - r_1} f \\ F'_1 &= \frac{r}{r_2 - r_1} f', F'_2 = \frac{\mu r}{r_2 - r_1} f' \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

式中： f 为叶片下表面边缘最大面积载荷； f' 为叶片上表面边缘最大面积载荷； μ 为摩擦系数。

将以上 4 个荷载函数代入式 (24)、(25)、(30) 和 (31)，得到斜向载荷作用下单螺距叶片 y' 轴和 z' 轴方向的荷载分量计算公式，结果如下。

(1) y' 轴方向荷载分量计算

$$F_{y'r} = -2 \int_{r_1}^{r_2} F_1 \left(\frac{2\pi r}{h} + \mu \right) r dr = -\frac{f}{(r_2 - r_1)h} \left(\pi r^4 - \frac{2\mu}{3} h r^3 \right) \Big|_{r_1}^{r_2} \quad (33)$$

$$F_{y'l} = -2 \int_{r_1}^{r_2} F'_1 \left(\frac{2\pi r}{h} + \mu \right) r dr = -\frac{f'}{(r_2 - r_1)h} \left(\pi r^4 - \frac{2\mu}{3} h r^3 \right) \Big|_{r_1}^{r_2} \quad (34)$$

(2) z' 轴方向荷载分量计算

(3) 水平方向极限承载力估算方法

在计算斜向承压螺旋桩极限荷载过程中, 叶片周边地基材料不仅要考虑其上覆土层的有效应力, 同时还要考虑到上一层叶片对下层叶片周围的地基影响 (首层叶片除外)。

$$Q_h = \sum_{i=1}^n F_{y'i} + \sum_{j=1}^m F_{y'j} \quad (44)$$

式中: Q_h 为极限条件水平荷载分量; 桩 $F_{y'i}$ 为第 i 层叶片形成的水平反力; $F_{y'j}$ 为第 j 层桩体或叶片间土柱形成的水平反力。

4.2 极限条件竖向荷载分量 (z' 轴方向) 估算方法

引用文献[13], 建立极限斜向上拔载荷作用下在随动坐标系 $y'o'z'$ 的极限载荷单桩 z' 轴方向分量计算方法。

4.3 斜向载荷抗拔螺旋桩单桩极限承载力估算方法

与斜向载荷承压螺旋桩基础单桩极限荷载公式建立相同, 在随动坐标系中, 斜向载荷单桩的极限荷载依据 y' 和 z' 轴方向荷载分量进入极限状态次序判定。

由随动坐标系 $y'o'z'$ 的荷载分量确定斜向载荷承压桩的桩顶荷载极限值, 如下式:

$$Q = \sqrt{Q_h^2 + Q_v^2} \quad (45)$$

式中: 当 y' 轴方向荷载首先达到极限条件时, Q_h 为 y' 轴方向极限荷载, Q_v 为 Q_h 条件对应的 z' 轴方向地基反力; 当 z' 轴方向荷载首先达到极限条件时, Q_v 为 z' 轴方向极限荷载, Q_h 为极限载荷 Q_v 对应的 y' 轴方向的地基反力。

5 抗拔螺旋群桩的斜向极限载荷估算方法

斜向载荷螺旋桩基础受到基桩的几何形式、斜向载荷的荷载耦合效应等因素影响, 增加了承载机制研究的复杂性, 要从该方向现有的研究成果得到较为精确的极限荷载计算值尚有困难。因此, 本文从基本的土力学角度出发, 选用文献[14]的计算模型构建方法, 初步建立斜向载荷抗拔螺旋桩基础破坏模型和极限斜向桩顶荷载估算方法。

(1) 当桩距 l 大于 6 倍桩径 r 时, 群桩基础的斜向极限载荷可以为单桩的极限荷载代数和:

$$Q_u = \sum_{i=1}^{n_i} Q_i \quad (46)$$

式中: Q_u 为斜向载荷抗拔螺旋群桩极限承载力; Q_i 为斜向载荷抗拔螺旋桩基础单桩极限承载力; n_i 为

群桩的基桩总数。

(2) 当桩距 l 小于 6 倍桩径 r 时, 螺旋群桩基础的承载性状比较复杂, 相邻两桩之间的受载侧叶片、背载侧叶片相互影响, 荷载方向外侧螺旋桩的背载叶片与内侧螺旋桩的受载叶片的桩-土相互作用减弱, 从而降低了桩-土系统荷载耦合效应。若 θ 和 φ 相同, 斜向载荷作用下的抗拔群桩的桩间叶片效应一般决定于 z' 轴方向的应力重叠区情况。

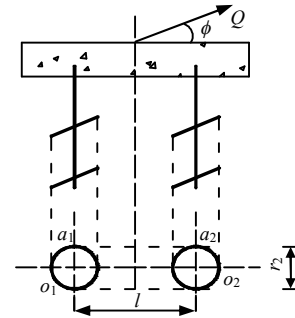


图 7 斜向载荷抗拔螺旋群桩示意图
Fig.7 The sketch of screw pile group under pull-out inclined load

①斜向载荷抗拔桩基础在随动坐标系 y' 轴方向的极限载荷估算

群桩基础水平极限荷载的计算中引入了由 η_i (基桩相互影响效应系数)、 η_r (桩端约束效应系数)、 η_l (承台侧向土抗力系数)、 η_b (承台底摩擦效应系数) 等 4 项组成的群桩效应综合系数 η_h [15], 但由于受到桩体复杂几何形式的限制, 这些系数的计算和选取尚难解决。因此, 本文基于规范, 引入 y' 轴方向基桩叶片间应力重叠区域的判定条件, 提出螺旋群桩极限水平荷载分量的计算方法。

$$Q'_h = \eta_h Q'_{ht} = (\eta_i \eta_r + \eta_l + \eta_b) \left(\sum_{i=1}^n F_{y'it} + \sum_{j=1}^m F_{y'jt} \right) \quad (47)$$

式中: Q'_h 为极限条件水平荷载分量; Q'_{ht} 为第 t 根基桩的极限条件水平荷载分量; $F_{y'it}$ 为群桩中第 t 根桩的第 i 层叶片形成的水平反力; $F_{y'jt}$ 为第 t 根桩的第 j 层桩体或叶片间土柱形成的水平反力。

由于螺旋桩基础叶片对桩体反弯点影响, 桩的入土换算深度需要进行判定选取。当首层叶片以上桩长 l_1 小于换算深度时, 桩的入土换算深度选择 l_1 ; 当桩体的入土换算深度小于首层叶片以上桩长 l_1 时, 桩的入土换算深度选择桩长。

②斜向载荷抗拔桩基础在随动坐标系 z' 轴方向的极限载荷估算

由文献[13]可知, 桩体几何形式、埋深以及地

基材料不同时,螺旋桩单桩基础破坏模式不同。对于竖向荷载抗拔群桩基础的破坏模式而言,根据整体破坏模式和非整体破坏模式,极限承载力计算包括两部分:一部分是不进行参数折减的桩-土总重(整体破坏模式)或基桩自重(非整体破坏模式);另一部分是进行参数折减的基桩极限承载力(该值对应于破坏模式)。本文根据这一群桩基础抗拔极限承载力构成形式,建立了 z' 轴方向的极限荷载估算公式。

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。

①I型破坏模式

$$Q'_v = \sum_{t=1}^{n_t} (G_t + W_t) + \frac{\sum_{t=1}^{n_t} f_{1t}}{\gamma_{s1}} + \frac{\sum_{t=1}^{n_t} \sum P_{it}}{\gamma_p} + \frac{\sum_{t=1}^{n_t} \sum F_{jt}}{\gamma_{s4}} \quad (48)$$

式中: Q'_v 为 z' 轴方向群桩斜向荷载分量极限值; G_t 为第 t 根桩拔出体范围内的土重; P_{it} 为第 t 根桩的第 i 层叶片滑裂体表面剪阻力; F_{jt} 为第 t 根桩的滑裂体间土柱面的剪阻力; W_t 为第 t 根桩的桩体自重; f_{1t} 为第 t 根桩的桩长范围内的桩体与桩侧地基的剪移摩阻力; γ_{s1} 为 h_2 范围内的桩体与桩侧地基的剪移摩阻力分项系数; γ_{s4} 为滑裂体间土柱面的剪阻力分项系数; γ_p 为叶片端阻力分项系数。

②II型破坏模式:

$$Q'_v = \sum_{t=1}^{n_t} (G_{1t} + G_{2t} + W_t) + \frac{\sum_{t=1}^{n_t} f_{1t}}{\gamma_{s1}} + \frac{\sum_{t=1}^{n_t} f_{2t}}{\gamma_{s2}} + \frac{\sum_{t=1}^{n_t} p_{1t}}{\gamma_{s3}} \quad (49)$$

式中: G_{1t} 为第 t 根桩的首层叶片以上倒圆台的土重; G_{2t} 为第 t 根桩的叶片间圆柱体土重; p_{1t} 为第 t 根桩的首层以上倒圆台滑裂面阻力; f_{1t} 为第 t 根桩的 h_2 范围内的桩体与桩侧地基的剪移摩阻力; f_{2t} 为第 t 根桩的叶片间土柱剪移摩阻力; γ_{s2} 为叶片间土柱剪移摩阻力分项系数; γ_{s3} 为首层以上倒圆台滑裂面阻力分项系数。

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III型破坏。极限抗拔承载力计算如下:

$$Q'_v = \sum_{t=1}^{n_t} (G_{1t} + G_{2t} + W_t) + \frac{\sum_{t=1}^{n_t} f_{1t}}{\gamma_{s1}} + \frac{\sum_{t=1}^{n_t} f_{2t}}{\gamma_{s2}} \quad (50)$$

(3) 在随动坐标系中抗拔桩基础的斜向极限荷载估算

$$Q' = \sqrt{(Q'_h)^2 + (Q'_v)^2} \quad (51)$$

式中: Q'_v 为斜向荷载群桩极限承载力;当 y' 轴方向荷载首先达到极限条件时, Q'_h 为 y' 轴方向群桩极限荷载; Q'_v 为 Q'_h 条件对应的 z' 轴方向地基反力;当 z' 轴方向荷载首先达到极限条件时, Q'_v 为 z' 轴方向群桩极限荷载; Q'_h 为极限荷载 Q'_v 对应的 y' 轴方向的地基反力。

当 Q'_v 先达到极限状态时,抗拔螺旋桩基础的斜向极限荷载按下式估算:

$$Q' = \frac{Q'_v}{\sin \varphi} \quad (52)$$

若 Q'_h 先于 Q'_v 达到极限状态时,斜向极限荷载可以由下式估算:

$$Q' = \frac{Q'_h}{\cos \varphi} \quad (53)$$

6 算例与分析

试验场地地貌为滨海冲积平原地貌。地下水稳定水位为4.5 m,物性参数如表1所示。

表1 土材料的物理力学参数

Table1 The physico-mechanical parameters of soils

土层	h /m	w /%	γ /(kN/m ³)	c /kPa	φ /(°)	E_s /MPa	f_p /kPa
耕土	0.5						
粉质黏土	7.0	47.2	16.0	9.3~10	2	1.30	80
粉砂	7.5						120

螺旋的桩体和叶片选用钢材 Q235,钢管直径为0.108 m,桩长为5 m,叶片为3层,叶片直径为0.65 m,螺距为0.144 m,叶片间距为1.08 m,端部焊接锥形铸铁墩头。群桩由3根桩组成,承台为边长为1.3 m的等边三角形,承台高为0.8 m,桩边到承台边为0.1 m,桩伸入承台0.7 m。

斜向荷载抗拔螺旋群桩基础的载荷试验采用维持荷载法,荷载与桩顶平面夹角约为63.4°。经判定在斜向荷载极限条件下,斜荷载极限荷载水平分量为60、72、72 kN;极限荷载竖向分量为120、144、144 kN。

分析表2、3可知,斜向荷载作用的抗拔螺旋群桩基础,极限荷载水平分量先于竖向分量达到极限状态,估算的极限荷载水平分量为66.5 kN,与试验判定值相差在10%以内,分别为9.8%、8.3%和8.3%,与试验判定极限水平荷载(68 kN)相差2.1%。此时试验判定极限斜荷载的竖向分量仅为估算竖向

分量的 65.5 %、78.6 %和 78.6 %，而平均判定竖向荷载分量为 74.2 %。这一情况说明，在本例条件下斜向荷载作用的抗拔螺旋群桩基础，沿“水平”方向的地基压缩变形首先达到破坏，其斜向极限荷载取决于“水平”方向的地基抗力。使用式（53）估算极限斜荷载为 148.68 kN，试验极限斜向荷载判定值分别为：156、160、160 kN，估算极限斜荷载为

试验判定值的 95.3 %、92.3 %和 92.3 %，估算值为平均判定极限斜荷载（159.33 kN）的 93.3 %。

竖向荷载与斜向荷载的抗拔桩基础相比，其基桩的极限竖向荷载是不同的，在荷载“水平”分量的作用下，抗拔螺旋桩基础的破坏加速，表现为桩顶“水平”位移或荷载“水平”分量达到极限破坏条件，而桩基础的竖向承载能力还有一定的储备。

表 2 斜向荷载螺旋群桩极限水平反力计算表

Table 2 The calculation table of ultimately horizontal resisting force of screw pile group under inclined load

F_{yh}/kN			F_{yh} /kN	Q_h /kN	η_i	η_e	η_l	η_h	η	Q'_h /kN	Q'_{ht} /kN	$Q'_{ht}:Q'_h$	Q''_{ht} /kN	$Q''_{ht}:Q'_h$
1	2	3												
											60.00	0.902		
24.17	20.39	20.39	0.22	65.17	0.581 1	1.732 0	0	0.013 9	1.020 4	66.50	72.00	1.083	68.00	1.021
											72.00	1.083		

表 3 斜向荷载螺旋群桩极限竖向反力计算表

Table 3 The calculation table of ultimately vertical resisting force of screw pile group under inclined load

荷载	G_1+G_2 /kN	f_1 /kN	f_2 /kN	p_1 /kN	U /kN	Q_v /kN	η	Q'_v /kN	Q'_{vt} /kN	$Q'_{vt}:Q'_v$	Q''_{vt} /kN	$Q''_{vt}:Q'_v$
竖向上拔荷载	27.21	8.48	22.05	29.00	86.74							
									120	1.272		
斜向上拔荷载	27.21	2.92	13.37	17.57		61.07	1.65	183.21	144	1.527	136	1.347
									144	1.527		

7 结 语

本文选用螺旋桩为研究对象，引入了随动坐标系，将桩-土相互作用形成的地基反力以载荷的形式施加于桩体和叶片，解决了大变形、非线性材料使用小变形弹性材料叠加原理问题，分析了斜向荷载抗拔螺旋桩基础的破坏模式，建立了斜向荷载作用下抗拔螺旋单桩和群桩基础的极限荷载估算公式，通过与螺旋群桩原型试验的极限荷载判定值的对比，估算值能够较好地接近判定值，表明本文的研究方法、斜荷载抗拔桩基础的破坏模式和极限荷载计算方法比较符合实际情况，对斜向荷载抗拔螺旋桩基础工程的设计与分析有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] MEYERHOF G G, RANJAN G. The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand I: Vertical piles[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1972, 106(9): 440—446.

[2] MEYERHOF G G, RANJAN G. The bearing capacity of rigid piles under eccentric and inclined loads in sand: pile groups[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1973, 22(6): 267—276.

[3] KOUMOTO T, MEYERHOF G G. Analysis of bearing capacity of rigid piles under eccentric and inclined loads[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1986, 23(3): 127—131.

[4] YALCIN A S, MEYERHOF G G. Bearing capacity of flexible piles under eccentric and inclined loads in layered soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1991, 28(3): 909—917.

[5] MEYERHOF G G. Behavior of pile foundations under special conditions: 1994 R. M. Hardy key note address[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1995, 32: 204—222.

[6] SASTRY V V R N, MEYERHOF G G. Behavior of flexible pile under inclined loads[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1990, 2(1): 19—28.

[7] SASTRY V V R N, MEYERHOF G G. Behavior of flexible piles in layered sands under eccentric and inclined loads[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(2): 513—520.

[8] SASTRY V V R N, MEYERHOF G G. Behavior of flexible piles in layered clays under eccentric and inclined loads[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 32(3): 387—396.

- [9] 赵明华, 李微哲, 杨明辉, 等. 成层地基中倾斜偏心荷载下单桩计算分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 670—674.
ZHAO Ming-hua, LI Wei-zhe, YANG Ming-hui, et al. Analysis of single piles under eccentric and inclined loads in layered soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 670—674.
- [10] 横山幸满. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 唐业清, 吴庆荪译. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [11] 范文田. 轴向与横向力同时作用下柔性桩的分析[J]. 西南交通大学学报, 1986, 23(1): 39—44.
FAN Wen-tian. Analysis of flexible pile under axial and horizontal loads[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 1986, 21(1): 39—44.
- [12] 董天文, 张亚军, 李士伟, 等. 斜向抗拔螺旋群桩基础承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 429—433.
DONG Tian-wen, ZHANG Ya-jun, LI Shi-wei, et al. Bearing capacity of screw pile group determined by inclined pull-out test[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(3): 429—433.
- [13] 董天文, 李士伟, 张亚军, 等. 软土地基螺旋桩竖向抗拔极限承载力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 3054—3062.
DONG Tian-wen, LI Shi-wei, ZHANG Ya-jun, et al. The calculation method of vertical ultimate bearing capacity of vertical pull-out screw pile in soft ground[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28 (Supp.1): 3054—3062.
- [14] 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承载力计算[J]. 岩土工程学报, 2006, 27(11): 2031—2034.
DONG Tian-wen, LING Li, WANG Ming-shu, et al. Designing pitch of screws and computing capacity of screw pile under ultimate load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 27(11): 2031—2034.
- [15] 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.