

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.005



单叶片全尺寸螺旋锚桩竖向拉拔试验研究

胡伟^{1,2}, 刘顺凯², 张亚惠², 邹贵华²

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411100; 2. 海南大学 土木建筑工程学院, 海口 570228)

摘要:对叶片镶嵌有微型土压力盒的自制全尺寸单叶片螺旋锚桩进行竖向拉拔试验,记录不同埋深下安装扭矩、桩身位移和叶片表面土压力随上拔荷载的变化情况。分析安装扭矩、极限抗拔承载力与埋深比三者之间的相互关系,并初步探究螺旋叶片表面的土压力分布规律。结果表明,在试验研究范围内,安装扭矩和极限承载力都随埋深比的增加呈线性增大,二者受共同因素影响,线性相关程度明显;在上拔过程中,叶片上表面土压力增量从根部到边缘呈逐渐增大趋势,下表面土压力增量则远小于上表面,且大部分区域压力基本保持不变,少数边缘区域增大;叶片上下表面土压力合力随上拔荷载的增加而增大;桩土之间摩阻力的发挥则呈抛物线形,当上拔位移达到土体破坏极限位移量时,摩阻力达到峰值,而后逐渐减小到零;可以通过叶片表面土压力的分布来计算螺旋锚桩的拉拔承载力。

关键词:螺旋锚桩;单叶片;埋置深度;土压力;极限承载力

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)05-0031-09

Uplift loading test on full-scale single blade screw anchor pile

Hu Wei^{1,2}, Liu Shunkai², Zhang Yahui², Zou Guihua²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411100, Hunan, P. R. China;
2. School of Civil and Architectural Engineering, Hainan University, Haikou 570228, P. R. China)

Abstract: Self-made single blade screw anchor pile which was embedded soil pressure gauges was tested by uplift loading experiment. The variation of mounting torques, anchor's displacements and soil pressures on blade surface versus uplift loading under different embedded depths was recorded to analyse the relationship between installation torque, ultimate uplift bearing capacity and embedded depth ratios, and a preliminary inquiry was also made on the distribution regulation of soil pressure on helical blade surface. The results showed that, both of mounting torque and ultimate bearing capacity increased linearly with the buried depth ratio, and they were linearly independent to each other for the common influenced factors. In the

收稿日期: 2016-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51508141); 教育部留学回国人员科研启动基金项目(第 48 批); 海南省科协青年科技英才创新计划项目(201506); 海南省研究生创新科研课题(hys201649)

作者简介: 胡伟(1982-), 男, 教授, 博士, 主要从事地基与基础工程、岩土工程减灾研究, (E-mail) yilukuangben1982@163.com。

Received: 2016-10-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51508141); Project Sponsored by SRF for ROCS, SEM (The Forty-eighth); Hainan Provincial Association for Science and Technology Excellence Youth Innovation Project (No. 201506); Hainan Innovation Research Project of Graduate Student (No. hys201649)

Author brief: Hu Wei (1982-), professor, PhD, main research interests: ground and foundation engineering, reduction for geotechnical engineering, (E-mail): yilukuangben1982@163.com.

pullout process, the increment of soil pressure on the surface of blade increased gradually from root to the edge, and the increment on the lower surface was far less than that of the upper one. The most of the area maintained the pressure constant except enlarged on few marginal area. The resultant force of two sides of blade increased with the loading, and the frictional resistance between pile and soil was parabolic developed. When the uplift displacement reached the limit ones of soil failure, the frictional resistance reached the peak value, and then decreased to zero. The bearing capacity of screw anchor pile could be calculated by the analysis of soil pressure on the blade surface.

Keywords: screw anchor pile; single blade; embedded depth; soil pressures; ultimate bearing capacity

螺旋锚桩由于易于安装^[1]、承载能力强^[2]、成本低^[3]等诸多优点在输电线路^[4]、海洋工程^[5]和民用建筑^[6]等工程中得到了越来越广泛的应用。螺旋锚桩的拉拔承载机理因螺旋叶片^[7]的存在而表现出与常规桩基础显著的差异,其承载力很大程度上取决于叶片的直径、间距、数量和埋置深度等因素^[8],而非桩体本身。目前,这方面的研究也主要针对上述因素的影响而展开。如刘福天等^[9]对螺旋锚桩模型试验的数据进行了回归分析,探讨了埋置深度和叶片直径对极限承载力的影响。Demir 等^[10]则同时进行了数值模拟和室内模型试验,对比分析了多叶片螺旋锚桩在不同埋深比下桩的抗拔性能变化规律。郝冬雪等^[11]对砂土中的螺旋锚桩进行了室内 1g 模型的试验研究,并考虑了叶片间距及数量对上拔承载特性及承载力影响。

浅埋螺旋锚桩拉拔过程中的锚桩-土整体和锚桩的平面受力分析如图 1 所示^[2]。若忽略由于叶片倾角而引起的拉拔过程中不能抵消的叶片表面摩阻力,则锚桩-土整体主要承受土体破裂面上的正压力 N_1 、 N_2 及相应的摩阻力 f_1 、 f_2 ,土体对叶片下表面的土压力合力 $F_{\text{下}}$ 、锚桩及土体自重 $W_{\text{S+P}}$ 、上拔荷载 T 。但现有研究成果对破裂面的形式尚未形成较为统一的认识^[12],故上述大部分力学量的大小无法直接测量或准确计算。以锚桩为研究对象,其在竖直方向主要受叶片上下表面的土压力合力 $F_{\text{上}}$ 和 $F_{\text{下}}$ 、桩体自重 W_{P} 、桩表面的摩阻力 F_{f} 、上拔荷载 T 。若能掌握拉拔过程中叶片上下表面土压力的变化规律,则可根据力学平衡关系直接计算出上拔荷载,继而确定螺旋锚桩的拉拔承载力,但目前尚未有关于叶片表面土压力分布规律的研究,理论分析中一般假定以主动土压力或被动土压力来进行计算^[13]。

笔者拟通过对浅埋的自制全尺寸单叶片螺旋锚桩在试验砂箱中进行竖向拉拔试验,分析其安装扭矩、埋置深度和极限抗拔承载力三者之间的相互关系,重点通过嵌入叶片上下表面的微型土压力盒测

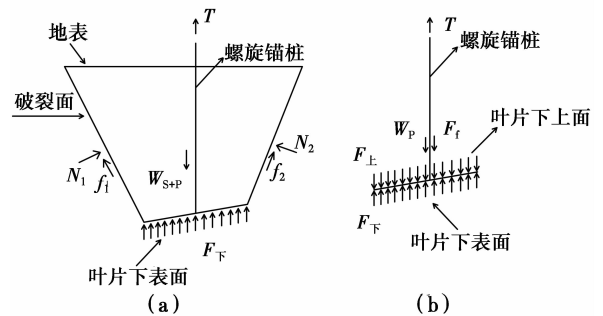


图 1 螺旋锚桩受力分析

Fig. 1 Force analysis of screw anchor pile

量拉拔过程中叶片表面土压力的分布情况及变化规律,以验证通过叶片表面土压力来计算螺旋锚桩拉拔承载力的可行性。

1 拉拔试验

试验采用自制的全尺寸单叶片螺旋锚桩和大型砂箱,对不同埋深下的螺旋锚桩进行竖向拉拔,获得拉拔荷载-位移曲线;通过嵌入式微型土压力盒测得拉拔过程中叶片表面不同位置处的土压力。

1.1 模型锚桩设计

试验所用单叶片螺旋锚桩制作材料为 Q235 钢,桩身长度 $l=1$ m,圆环形截面,外径 $d=60$ mm,管壁厚 $s'=5.5$ mm;叶片直径 $D=300$ mm,叶片厚度 $s=10$ mm,叶片倾角 $\theta=16.5^\circ$,顺时针螺旋向下,螺距为 150 mm,叶片通过套箍和桩体铆接在一起。桩身顶部焊接法兰盘以连接扭矩测量仪。螺旋锚桩模型示意及实物如图 2 所示。

叶片厚度为 10 mm,微型土压力计的厚度为 6 mm,故可在叶片上表面或下表面开与土压力计等大的圆槽,并根据土压力计的分布情况开设线槽。将土压力计放入圆槽中,用速干胶固定并尽量保证其表面与叶片表面高度一致,且周围与叶片间无间隙。整理土压力计电缆,使其通过线槽统一引向桩身与叶片结合处的布线孔,经由桩身内部从桩顶穿出,从

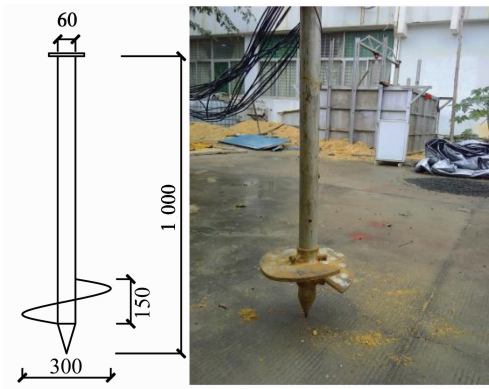


图 2 螺旋锚桩模型(单位:mm)

Fig. 2 Model of anchor pile

实物如图 4 所示。



图 4 试验砂箱及加载系统

Fig. 4 Experiment sand box and loading system

而减小电缆与土体的相互作用。土压力计的嵌入安装以最大限度地保证叶片表面土压力大小的量测少受土压力计本身的影响为原则。螺旋叶片上下表面的土压力盒沿叶片径向呈对角排列,如图 3(a)、(b)所示,上表面土压力盒编号为 1~12,下表面土压力盒编号为 13~24,具体分布如图 3(c)所示。

试验所用砂土为在南渡江取的河砂,通过网筛除去大颗粒后分 8 层铺设,每层压实到预设标准后再铺设下一层。经过相应的物理力学试验测试,得到所用砂土颗粒级配曲线如图 5 所示。



(a)

(b)

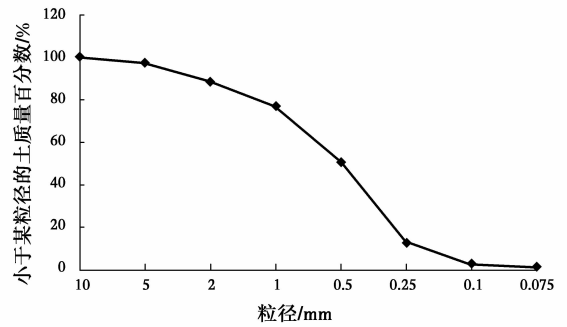


图 5 颗粒级配曲线

Fig. 5 Particle grading curve

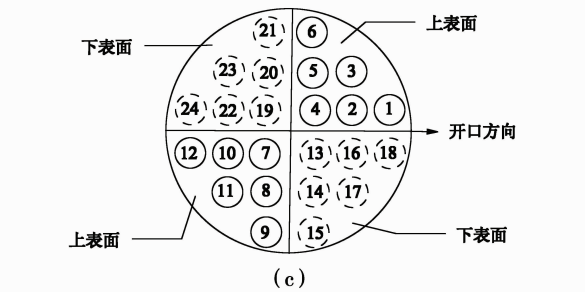


图 3 叶片表面土压力盒分布

Fig. 3 Distribution of soil pressure gauge on blade's surface

基本物理力学参数如表 1 所示。

表 1 试验用砂物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of tested sand

试验土	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	比重 G_s	含水率 $w/\%$	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$
中砂	39	2.63	29	2.74	0.95	1.51

1.3 试验数据测量

试验所测数据包括安装扭矩、桩顶竖向位移和荷载、叶片上下表面土压力。桩顶拉拔荷载由电阻应变式拉力传感器进行测定,拉力传感器与电阻应变式静态应变仪相连接,加载大小由显示器读数控制;桩顶位移测量系统由百分表、磁性表座和基准梁组成。基准梁采用槽钢,试验过程中保证基准梁无扰动且不受试验桩的影响;叶片表面土压力由土压力盒进行测量,通过应变仪进行数据采集并换算获得。各数据量测仪器仪表如图 6 所示。

1.2 试验砂箱

自制砂箱尺寸为 2 400 mm×2 400 mm×1 500 mm。试验时,螺旋锚桩安装在砂箱正中,桩中心距砂箱任一边界的垂直距离为叶片半径的 8 倍,故可忽略拉拔试验时边界条件的影响。砂箱所用钢板为 Q345 钢,厚度 8 mm,角部使用角钢通过 4 个螺栓连接。角钢尺寸为 L50×50,以保证试验箱的侧向刚度。砂箱上面设置加载横梁,通过千斤顶施加荷载,

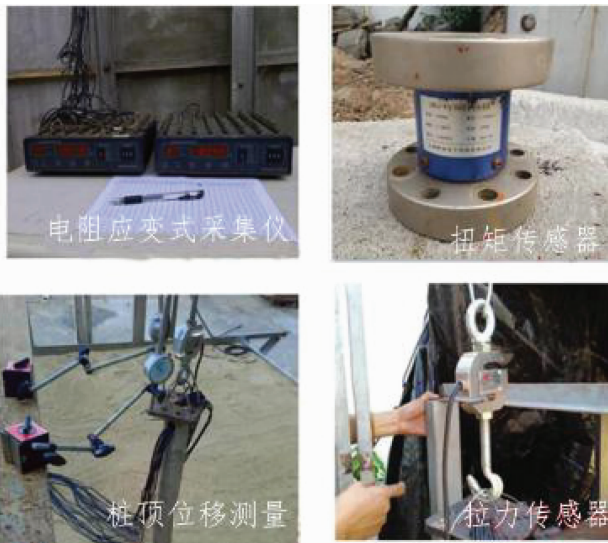


图 6 试验所用主要仪器

Fig. 6 The main instruments for testing

1.4 加载方式及数据采集

试验设置 5 个埋深 ($H = D, 1.5D, 2D, 2.5D, 3D$), 每个埋深进行一个预加载试验和 3 个平行试验, 共计 20 组试验。通过预加载试验以初步确定不同埋深下的拉拔极限荷载, 然后在 3 个平行试验中将预加载试验获取的极限荷载的 $1/10 \sim 1/12$ 作为分级加载增量, 采用分级加载方式进行加载; 每加载一级后静置 30 min, 每 10 min 记录一次土压力计及百分表读数, 待桩顶位移稳定以后施加下一级荷载, 直至破坏。

当出现以下情况之一时, 终止加载^[14]:

- 1) 某级荷载作用下桩顶的上拔位移量为上级荷载作用下位移量的 5 倍。
- 2) 某级荷载作用下桩顶位移为上一级荷载作用下位移量的 2 倍, 且 30 min 以后桩顶位移尚未稳定。
- 3) 荷载与位移关系曲线出现陡降段。
- 4) 千斤顶量程到极限。
- 5) 试验中发生影响试验结果的意外情况, 如锁紧钢丝绳的卡扣脱落等。

2 试验结果分析

2.1 安装扭矩

在旋入过程中通过扭矩仪实时记录安装扭矩, 不同埋深下的试验结果如表 2 所示。

从表中可看出: 同一埋深的 3 次平行试验的安装扭矩大小变化幅度很小, 随着埋深比的增加, 安装扭矩也逐渐增大。

表 2 不同埋深比下安装扭矩

Table 2 Installation torque under different buried depth

试验序号	N · m				
	$H = D$	$H = 1.5D$	$H = 2D$	$H = 2.5D$	$H = 3D$
1	126	176	261	355	410
2	122	168	255	323	401
3	130	180	268	367	415
平均值	126	175	261	348	409

2.2 荷载-位移曲线

螺旋锚桩在受拉拔荷载作用初期, 桩周土体处于弹性变形阶段, 对应的拉拔荷载随位移线性增长; 当荷载增大到一定程度时, 叶片边缘处土体开始发生局部剪切破坏, 桩周与土体间开始有相对滑移, 荷载-位移曲线表现出非线性特征; 随着荷载的继续增加, 土体中局部剪切破坏的范围增大, 并最终形成贯通至地表的破裂面, 位移急剧增大, 拉拔荷载达到极限值。典型的荷载-位移的非线性曲线如图 7 所示, 破裂面延伸至地表形态如图 8 所示。

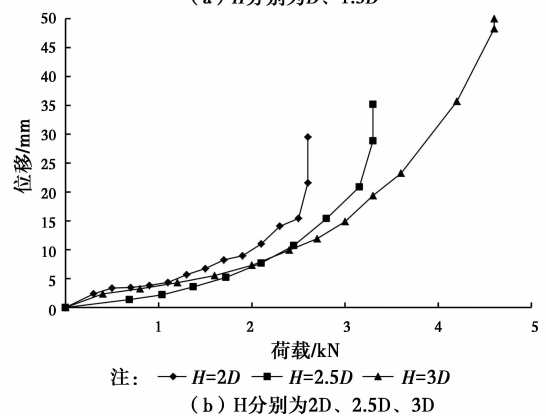
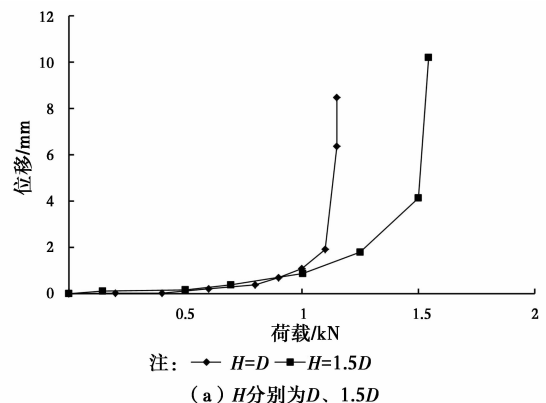


图 7 荷载-位移曲线

Fig. 7 Loading-displacement curves

从图 7 中可以看出, 不同埋深比下荷载-位移曲线的弹性段、非线性段、陡升段 3 阶段性较为明显。取曲线陡升段起始点对应的荷载值作为极限承载



图 8 地表破裂形态

Fig. 8 Failure mode on the ground

力^[15],结果如表 3 所示。

表 3 不同埋深比下的极限承载力

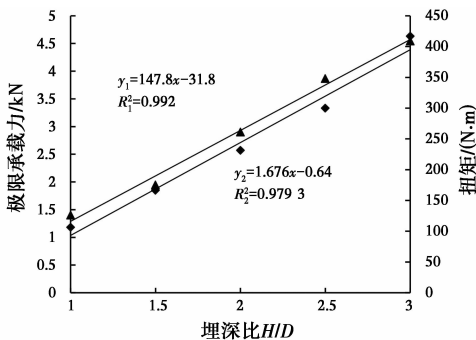
Table 3 Ultimate bearing capacity under different buried depth ratios kN

工况	$H=D$	$H=1.5D$	$H=2D$	$H=2.5D$	$H=3D$
1	1.15	1.75	2.60	3.30	4.60
2	1.05	2.00	2.40	3.25	4.50
3	1.35	1.80	2.70	3.45	4.80
平均值	1.18	1.85	2.57	3.33	4.63

D 不变时,随着埋置深度 H 的增大,螺旋锚桩极限承载力增大。当埋深比 H/D 从 1 增大到 3 时,极限承载力增加了近 3 倍,说明提高螺旋锚桩的埋置深度可有效增大其极限承载力。

2.3 安装扭矩-极限承载力-埋深比

不同埋深比下安装扭矩与极限承载力平均值拟合分析如图 9 所示,图中拟合式中 x 为埋深比, y_1 为极限承载力, y_2 为安装扭矩。



注: ◆ 极限承载力 ▲ 扭矩

图 9 不同埋深比下安装扭矩与极限承载力

Fig. 9 Ultimate bearing capacity and installation torque under different buried depth ratios

从拟合结果可以看出,安装扭矩与埋深比基本呈线性相关。螺旋锚桩安装过程中主要是要克服周围土体对叶片、桩体表面的摩阻力以及叶片切割土

体所受到的阻力,而埋置深度越大,土中应力的增加使得土体的抗剪强度及表面摩阻力增大,因而所需要的安装扭矩也就越大。同时,当叶片直径 D 一定时,单叶片螺旋锚桩极限承载力随着埋深比的增大呈线性增大。这是因为浅埋螺旋锚桩的抗拔承载力在很大程度上取决于叶片和破裂面范围内土体的自重以及破裂面上的土压力。随着埋深比增大,破裂面长度增加,则土体自重和土压力都会相应增大,对应的抗拔承载力也就越大。进一步对比两条曲线可以发现:安装扭矩和极限承载力都随埋置深度的增大而呈线性变化,且两条拟合曲线基本呈平行关系。由此说明:安装扭矩的大小与极限承载力有着很强的线性相关性。

2.4 叶片表面土压力

拉拔承载力与叶片上下表面土压力分布密切相关,故理清拉拔过程中叶片表面的土压力大小及分布情况对研究螺旋锚桩承载力具有重要意义。以下对埋深比 $H/D=3$ 的试验数据进行代表性分析。

2.4.1 叶片上表面土压力分析 在上拔荷载作用下,叶片上表面各土压力盒埋置区域压力增量(以螺旋锚桩埋置前的读数为基准,增大为正)随加载等级的变化曲线如图 10 所示。

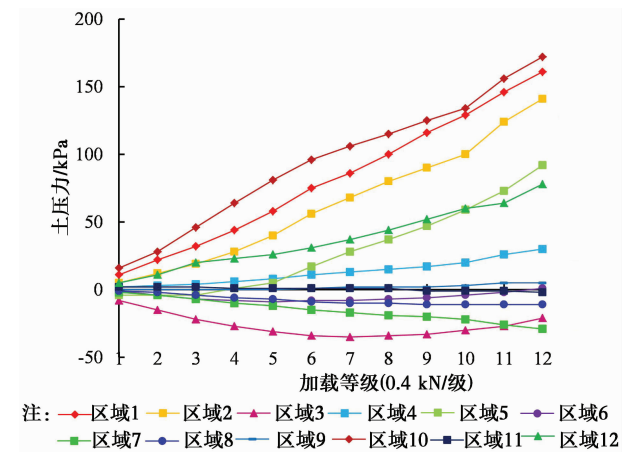


图 10 叶片上表面土压力-荷载等级曲线

Fig. 10 Soil pressure versus loading on the upper surface

从图 10 可以看出,叶片上表面土压力增量随上拔荷载增加的变化趋势呈现出 3 种形式。其中,大部分区域(区域 1、2、4、5、10、12)的土压力随着荷载的增加而显著增大;小部分区域(区域 6、8、9、11)的土压力则仅表现出微小的波动;极个别区域(区域 3 和 7)的土压力则有一定程度的减小。结合图 3 所示的土压力盒分布区域来看,土压力随加载等级增大的区域基本上位于叶片的中部和边缘,而不变或减小的区域则是以中部和根部区域为主。取最后一

级(第 12 级)荷载所对应的土压力增量进行区域分析如图 11 所示。

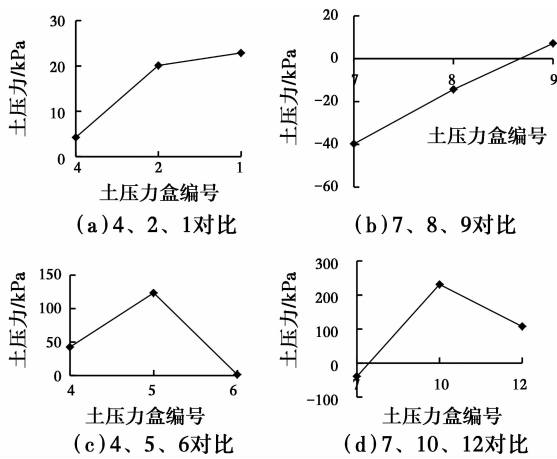


图 11 上表面部分区域土压力变化对比

Fig. 11 Contrast of pressure on the upper surface

从图中可以看出,从叶片根部区域(区域 4 和 7)到中部(区域 2、5、8 和 10)和边缘区域(区域 1 和区域 9)基本上呈增大趋势。叶片上部一定范围内的土体土体在上拔过程中会与周围土体发生相对位移而逐渐形成贯通至表面的滑裂面,而滑裂面剪阻力的垂直分量会传递至叶片,从而影响叶片上表面的土压力,这种影响从边缘到根部会逐渐减弱,从而导致叶片上表面土压力从根部到边缘逐渐增大。区域 6 和 12 上部土体可能在上拔过程中沿叶片边缘向下滑落,导致该区域的压力增量相对于其他边缘区域较小,区域 3 也可能是相同的原因。而还有部分中间区域(区域 11)可能是该部分土体受外部影响不大,导致该区域内始终只受其上部土体的压力,故而保持不变。而区域 7 则是因为其刚好处于固定叶片所用螺栓下方,导致上拔过程中土体因有螺栓阻挡而与该区域逐渐脱落致使压力增量为负。

2.4.2 叶片下表面土压力分析 拉拔过程中,叶片下表面土压力增量(以螺旋锚桩埋置前的读数为基准,增大为正)随加载等级的变化曲线如图 12 所示。

从图中可以看出,叶片下表面土压力增量变化与上表面有明显区别,大部分区域的土压力基本保持不变,变化量多在 ± 5 kPa 以内。这与叶片在上拔过程其下表面空隙会不断得到周围砂土的填充而重新维持压力的平衡有关。区域 19、22 和 23 因处于螺旋叶片下降方向上,在上拔过程中流向该区域的砂土被锚杆下端阻挡,导致该区域与土体出现脱离,故而土压力有明显减小,增量为负值。17、18 和 21 则因处于叶片外边缘,在上拔过程中周围土体会

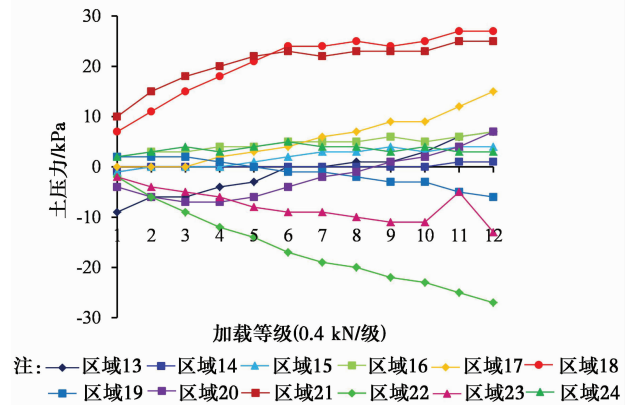


图 12 叶片下表面土压力-荷载等级曲线

Fig. 12 Soil pressure versus loading on the lower surface

首先填充这些区域,而后流向其他区域,从而导致局部土压力高于其他区域,压力增量相对较大。

2.4.3 叶片表面压力与上拔荷载的关系 加载前,以桩为研究对象,在竖直方向上有式(1)所示的力学平衡关系。

$$F_{\text{下}} - F_{\text{上}} = W_{\text{p}} \quad (1)$$

式中: $F_{\text{下}}$ 、 $F_{\text{上}}$ 分别表示叶片上、下表面所受土压力合力, W_{p} 为桩体自重。

加载后,桩体竖向受力平衡如式(2)所示

$$T = W_{\text{p}} + F_{\text{f}} + F_{\text{上}} - F_{\text{下}} \quad (2)$$

式中: T 为竖向拉拔荷载; $F_{\text{下}}$ 、 $F_{\text{上}}$ 分别为对应的叶片上、下表面所受土压力合力; F_{f} 为桩土之间的摩阻力。

将式(1)代入(2)中得

$$\begin{aligned} T &= (F_{\text{上}} - F_{\text{下}}) - (F_{\text{下}} - F_{\text{下}}) + F_{\text{f}} \\ &= \Delta F_{\text{上}} - \Delta F_{\text{下}} + F_{\text{f}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\Delta F_{\text{上}}$ 为叶片上表面土压力合力增量; $\Delta F_{\text{下}}$ 为叶片下表面土压力合力增量。

从式(3)可以看出,螺旋锚桩所受的竖向拉拔荷载是由叶片上下表面土压力合力增量的差值和桩土之间的摩阻力来平衡的。为了能更直观地体现出叶片表面土压力合力对螺旋锚桩承载力的贡献,现对叶片表面土压力合力做如下粗略计算,并与承载力进行比较。

根据土压力盒的分布划分所代表的区域如图 13 所示。单块区域内土压力增量的合力由每块区域的面积乘以该区域内土压力盒所测压强增量来计算。结合图 3 可知,叶片上下表面土压力盒均只在叶片的一半范围内有分布,故将上表面或下表面所有土压力盒计算的土压力增量合力的 2 倍作为该表面的总压力。据此,第 12 级加载所对应的上下表面

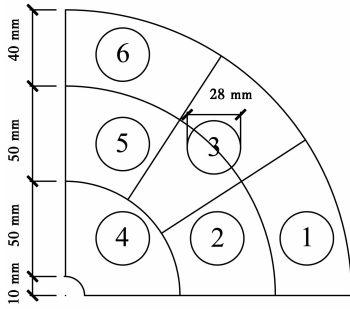


图 13 叶片表面区域划分

Fig. 13 Area partition of helical blade surface

计算结果分别如表 4、表 5 所示。

表 4 叶片上表面土压力

Table 4 Soil pressure of the upper surface

区域	压力增量/kPa	面积/cm ²	压力合力/N	$\Delta F_{上}/N$
1	228.797	32.7	748.167	4 964.6
2	201.179	26.7	537.147	4 964.6
3	-30.361 8	29.7	-90.175	4 964.6
4	42.573	27.5	117.076	4 964.6
5	123.547	26.7	329.870	4 964.6
6	1.356	32.7	4.433	4 964.6
7	-37.81	27.5	-109.396	4 964.6
8	-14.348	26.7	-38.309	4 964.6
9	7.149 7	32.7	23.379	4 964.6
10	230.975	26.7	616.704	4 964.6
11	-2.668	29.7	-7.924	4 964.6
12	107.437	32.7	351.320	4 964.6

表 5 叶片下表面土压力

Table 5 Soil pressure of the under surface

区域	压力增量/kPa	面积/cm ²	压力合力/N	$\Delta F_{下}/N$
13	9.283 82	27.5	25.530 51	334.4
14	1.438 8	32.7	4.704 88	334.4
15	5.082 6	26.7	13.570 54	334.4
16	9.914 8	32.7	32.421 4	334.4
17	20.170 5	29.7	59.906 39	334.4
18	36.652 5	26.7	97.862 18	334.4
19	-7.785 5	27.5	-21.410 1	334.4
20	9.308 53	32.7	30.438 89	334.4
21	33.333 25	26.7	88.999 78	334.4
22	-38.334 6	32.7	-125.354	334.4
23	-16.854	29.7	-50.056 3	334.4
24	3.971 76	26.7	10.604 6	334.4

各级加载下叶片表面土压力合力与拉拔荷载的对比如图 14 所示。从图中可以看出,叶片表面土压力的合力略低于上拔荷载;在加载前期(第 1~4 级),其增长速率要低于上拔荷载;在加载中期(第 5~8 级),其增长速率与上拔荷载基本一致;而在加载后期(第 9~12 级),则略高于上拔荷载。当达到极限承载力时,二者大小几乎一致。

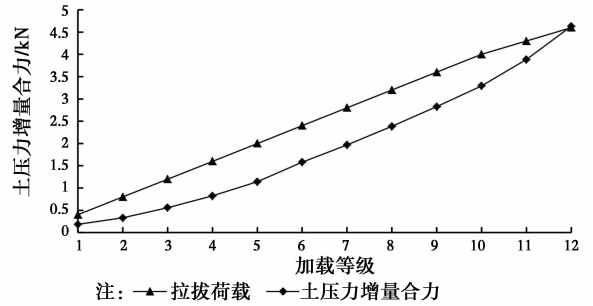


图 14 叶片表面土压力增量合力与上拔荷载比较

Fig. 14 Soil pressure of blade surface versus loading

根据式(3)可知,上拔荷载与叶片表面土压力的合力之差即为桩土之间的摩阻力。在加载初期,桩土相对位移会逐渐增加,其摩阻力也会增大。但与此同时,叶片的上移会逐渐带动一定范围内的土体整体运动并伴随破裂面的开展,该范围内桩土间的摩阻力会因不存在相对位移而消失;随着整体移动土体范围的不断扩大,存在桩土间摩阻力的长度则不断减小;当破裂面贯通至地表,桩长范围内全部土体都将随桩一起运动,则此时桩土摩阻力减小到 0。桩土之间摩阻力随加载等级的变化规律及大小如图 15 所示。

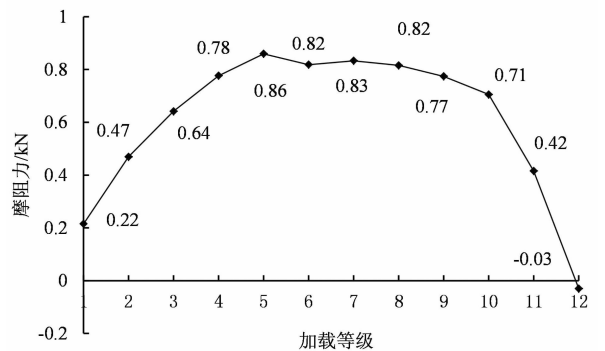


图 15 桩侧摩阻力变化

Fig. 15 Variation of frictional resistance around pile

2.5 桩土间摩阻力测算

为进一步验证试验结果,对该埋深比下桩土间摩阻力理论值进行估算,计算式如式(4)所示。

$$F_t = \mu p S = \mu p \pi d H \quad (4)$$

式中： μ 为桩与砂土之间的摩擦系数，参考许宏发等^[16]进行的土-结构(钢、混凝土)剪切摩擦试验结果，取 $\mu = 0.365$ ； S 为埋深范围内桩的侧表面面积，大小等于钢管外环周长 πd 与埋深 H 之积； p 为螺旋锚桩桩身表面土压力。

Ghaly 等^[17]对砂土中螺旋锚桩拉拔过程中应力变化的实测结果表明：桩周侧向土压力值介于静止土压力和被动土压力之间，分位值约在 0.3~0.7 之间变化，且埋深比越小，分位值越小，即越靠近静止土压力。据此，选取侧向土压力 p 计算式为

$$p = \alpha p_0 + \beta p_p = \alpha K_0 \gamma H + \beta K_p \gamma H \quad (5)$$

式中： $K_0 = 1 - \sin \varphi$ 为静止土压力系数； $K_p = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ 为被动土压力系数； p_0 为静止土压力， p_p 为被动土压力， α 和 β 为二者的权重系数，分别取 0.7 和 0.3； γ 为砂土重度，取 18 kN/m^3 。

将式(5)代入式(4)可得

$$F_t = (\alpha K_0 + \beta K_p) \gamma H \times \mu \times \pi d H = 0.802 \text{ kN}$$

即本试验中埋深比为 3 时桩土间的最大摩阻力大小理论值约为 0.802 kN。该埋深比下的位移-加载等级曲线如图 16 所示。

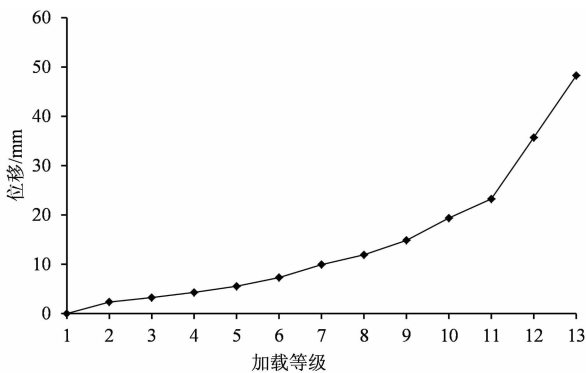


图 16 位移-加载等级曲线

Fig. 16 Displacement- loading grade curve

由图 15、16 可以看出，随着上拔荷载的增加，桩身位移量增大，桩土间相对位移量也由下至上逐渐增加，桩侧摩阻力随之逐步发挥出来。当荷载等级在 5~8 级之间时，对应的位移量为 7.3~14.86 mm，此时桩侧阻力也已发挥到极限值(0.82~0.86 kN)，这与砂土的极限位移在 8~15 mm 之间相对应^[15]，侧阻力与理论值(0.802 kN)也一致。在此之后，随着破裂面的不断开展，随叶片一起运动的土体范围逐渐扩大，存在桩土间摩阻力的长度则不断减小。故从第 9 级荷载开始，摩阻力开始降低，直至第 12 级荷载破裂面贯通至地表，桩长范围内全部土体都随锚桩向上运动，摩阻力减小到 0。

3 结论

通过单叶片螺旋锚桩的室内全尺寸模型试验测试了安装扭矩，获取了竖向拉拔荷载-位移曲线。分析了安装扭矩和极限抗拔承载力与埋置深度之间的关系；同时，通过微型土压力盒对叶片表面的土压力进行了测量，对其分布规律进行了分析，主要结论如下：

1) 随着埋置深度的增加，安装扭矩和极限承载力都呈线性增大，两者有着共同的影响因素，且具有较好的线性相关性。

2) 随着上拔荷载的增加，土压力增量分布整体上呈现从根部到边缘逐渐增大的趋势；叶片上表面大部分区域土压力增量显著增大，主要分布在边缘和叶片中间区域；下表面土压力增量则远小于上表面，且大部分区域基本保持不变，只有少数边缘区域增大。

3) 叶片上下表面土压力增量合力和桩土间摩阻力的发挥表现出不同的规律。前者随上拔荷载的增加而增大，不同加载阶段的增大速率有所不同，先慢后快；随着加载等级的增加，前者所占比重增大，在后期基本上与上拔荷载相等；桩土之间的摩阻力则呈抛物线型发挥，加载前期增大，中期不变，后期则逐渐减小到 0；当上拔位移达到土体破坏极限位移量时，摩阻力达到峰值。

4) 可以通过测量分析叶片表面土压力的分布变化来计算螺旋锚桩的拉拔承载力，但限于本次研究中叶片镶嵌土压力盒的数量，该方法还有待进一步的试验验证和深入研究。

参考文献：

- [1] 詹金林. 螺旋锚技术在静载试验测试工程中的应用[J]. 土工基础, 2012, 26(1): 63-66.
ZHAN J L. Application of the screw anchor in static loading tests [J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(1): 63-66. (in Chinese)
- [2] 汪滨, 万希岭, 李军. 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.
WANG B, WAN X L, LI J. Screw anchor technique and its application in engineering [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 吴敏, 李波杨. 全螺旋灌注桩螺旋纹桩竖向承载力初探[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(5): 109-112.
WU M, LI B Y. Primary discussion on vertical load bearing capacity of screwed filling piles [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35

- (5); 109-112. (in Chinese)
- [4] 董天文,梁力,黄连壮,等. 螺旋桩基础抗拔试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(1):186-190.
DONG T W, LIANG L, HUANG L Z, et al. Pullout test of screw pile foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 186-190. (in Chinese)
- [5] 张昕,乐金朝,刘明亮,等. 砂土中锚板的抗拔机理与承载力计算模型研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(9):1734-1739.
ZHANG X, YUE J Z, LIU M L, et al. Uplifting behavior and bearing capacity of plate anchors in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1734-1739. (in Chinese)
- [6] 董天文,梁力,黄连壮,等. 螺旋群桩基础承载性状试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(4):893-900.
DONG T W, LIANG L, HUANG L Z, et al. Experimental research on bearing characters of screw pile group [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 893-900. (in Chinese)
- [7] TSUHCA H C, AOKI N, RAULT G, et al. Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49: 1102-1114.
- [8] 王杰,杜秋男,孙海峰,等. 砂土中螺旋锚极限抗拔承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009,25(1):66-70.
WANG J, DU Q N, SUN H F, et al. Study on the ultimate up-lift bearing capacity of screw anchor [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2009, 25(1): 66-70. (in Chinese)
- [9] 刘福天,王妍,刘丹,等. 螺旋锚极限抗拔承载力的回归分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2005,21(3):215-219.
LIU F T, WANG Y, LIU D, et al. Regression analysis on the ultimate up-lift bearing capacity of screw anchor [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2005, 21(3): 215-219. (in Chinese)
- [10] DEMIR A, OK B. Uplift response of multi-plate helical anchors in cohesive soil [J]. Geomechanics and Engineering, 2015, 8(4): 615-630.
- [11] 郝冬雪,陈榕,符胜男. 砂土中螺旋锚上拔承载特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(1):126-132.
HAO D X, CHEN R, FU S N. Experimental study on uplift capacity of multi-helix anchors in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 126-132. (in Chinese)
- [12] NIROUMAND H, KASSIM K A, NAZIR R, et al. Systematic review of screw anchors in cohesionless soils [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2013, 50(5): 212-217.
- [13] 李锁林. 新型自旋锚杆在黄土基坑中的锚固特性研究[J]. 工程质量,2014(3):27-30.
LI S L. Research on the anchorage properties of new autorotation anchor in loess pit [J]. Construction Quality, 2014(3): 27-30. (in Chinese)
- [14] 位东升. 斜向荷载作用下螺旋桩基础力学特性试验研究[D]. 沈阳:东北大学,2009.
WEI D S. Experimental study on the mechanical behaviors of screw pile under inclined load [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. (in Chinese)
- [15] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
ZHANG Z M. Pile foundation engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese)
- [16] 许宏发,吴华杰,郭少平,等. 桩土接触面单元参数分析[J]. 探矿工程,2002(5):10-12.
XU H F, WU H J, GUO S P, et al. Study on the parameters of pile soil contact surface element [J]. Exploration Engineering, 2002(5): 10-12. (in Chinese)
- [17] GHALY A, HANNA A. Stresses and strains around helical screw anchors in sand [J]. Soil and Foundations, 1992,32(4):27-42.

(编辑 胡英奎)