

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.02.010

砂土中螺旋桩在斜拉荷载作用下的承载性能

韦芳芳¹,包淑珉¹,邵盛²,王永泉³,孔纲强¹

(1. 河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098; 2. 浙江省建筑设计研究院,浙江 杭州 310030;

3. 南京工程学院建筑工程学院 江苏 南京 211167)

摘要:为研究斜拉荷载倾斜角度和叶片埋深对螺旋桩极限承载力的影响,基于 ABAQUS 软件构建了砂土中螺旋桩的有限元模型,通过螺旋桩水平承载机理砂箱试验与竖向拉拔试验数据,对模型的准确性和可行性进行验证。设置 4 组不同叶片埋深的螺旋桩模型,分别施加不同角度的斜拉荷载,探讨了砂土地基中螺旋桩的承载性能与斜拉角度、叶片埋深的相关性。结果表明:砂土中螺旋桩的极限承载力随着斜拉角度的增大不断减小;当斜拉角度小于 30° 时,螺旋桩极限承载力与斜拉角度的关系曲线近似呈线性;螺旋桩极限承载力存在一个临界埋深比,当埋深比大于等于 4 时,承载力不随埋深比的增大而变化。推导了深埋状态下螺旋桩受斜拉荷载作用的极限承载力公式,经验证该公式能较好反映螺旋桩极限承载力随斜拉角度增大而逐渐下降的规律。

关键词:螺旋桩;斜拉荷载;承载性能;埋深比;数值模拟

中图分类号:TU432

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2024)02-0077-07

Bearing performance of helical piles in sand under oblique tensile load

WEI Fangfang¹, BAO Shumin¹, SHAO Sheng², WANG Yongquan³, KONG Gangqiang¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310030, China;

3. School of Architecture Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: In order to study the correlation between bearing capacity of helical piles in sand foundation and oblique tensile angle and burial depth, the finite element model of helical piles in sand is established by ABAQUS. The numerical simulation results and test results of helical piles under vertical and horizontal pull-out are compared to verify the accuracy and feasibility of the numerical model. Considering the influence of oblique tensile angle and burial depth on the ultimate bearing capacity of helical piles, four groups of helical pile models with different burial depths, are set up and different oblique tensile angles are applied respectively. The results suggest that the ultimate bearing capacity of helical piles in sand decreases when the oblique tensile angle increases. When the oblique tensile angle is less than 30° , the relationship curve between the ultimate bearing capacity and the oblique tensile angle is approximately linear. There is a critical burial depth ratio for the ultimate bearing capacity of helical piles. When the burial depth ratio is not less than 4, it does not change with the increase of burial depth ratio. Meanwhile, the ultimate bearing capacity formula of deeply buried helical piles under oblique tensile load is derived. Through verification, the formula can better reflect the rule that the ultimate bearing capacity of helical piles decreases gradually with the increase of oblique tensile angle.

Key words: helical pile; oblique tensile load; bearing performance; burial depth ratio; numerical simulation

架空输电线路是电力系统的重要组成部分,其运行状态将影响整个系统运行的可靠性^[1-2]。螺旋桩作为一种新型的锚固结构,抗倾覆能力较好,在输电线路杆塔基础和海上风电基础等工程项目中应用时,已被证实优于打入桩^[3-4]。现有研究揭示了一些螺旋桩承载时的理论规律,以支撑螺旋桩的设计与应用。Meyerhof 等^[5]提出与条形、圆形和矩形叶片相似的半经验理论公式,通过考虑螺旋叶片形状的抗拔力系数反映群受力桩的相关规律。Murray 等^[6]利用室内砂箱试验,推导了螺旋桩在水平静载作用下的极限承载力估算公

基金项目:国家自然科学基金项目(51608168);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B200202091)

作者简介:韦芳芳(1978—),女,副教授,博士,主要从事螺旋锚基础和钢-混组合结构研究。E-mail: ffwei@hhu.edu.cn

引用本文:韦芳芳,包淑珉,邵盛,等.砂土中螺旋桩在斜拉荷载作用下的承载性能[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):77-83.

WEI Fangfang, BAO Shumin, SHAO Sheng, et al. Bearing performance of helical piles in sand under oblique tensile load[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(2): 77-83.

式。Frydman 等^[7]结合螺旋单桩在密砂中拉拔原位试验结果,提出考虑叶片形状与叶片倾角的螺旋单桩极限抗拉承载力的可行公式。Polishchuk 等^[8]对比试验和理论研究结果,对双叶螺旋单桩的设计计算方法做出了改进。研究发现,螺旋桩的承载性能与叶片埋深存在密切联系;郝冬雪等^[9]在不同密实度的砂土中进行螺旋单桩的竖向上拔试验,得出不同土质条件下螺旋单桩的临界埋深比。除此以外,胡伟等^[10]通过模拟试验发现螺旋单桩水平承载能力远弱于竖向承载能力。因此不少研究展开了对提高螺旋桩水平承载能力方法的探索。张新春等^[11]结合螺旋桩在水平振动下的受力情况,发现适当减小桩体长径比可有效提高其抗水平荷载能力。

实际上,由于施工安装误差及长期受力导致的桩位移动,螺旋桩多呈现斜向受力。为此,张亚军等^[12]通过分析螺旋桩在斜向荷载作用下的破坏模式,给出了斜向荷载作用下螺旋单桩和群桩的极限载荷估算公式。韦芳芳等^[13]运用数值模拟方法,推导出倾斜螺旋桩受水平荷载作用下倾斜单桩极限抗水平承载力计算公式。

综上所述,目前针对螺旋桩承载性能的研究多集中于竖向和水平受载,对斜向受载的研究仍有不足。因此,本文在胡伟等^[10,14]开展的试验研究基础上,考虑斜拉荷载倾斜角度和叶片埋深对螺旋桩极限承载力的影响,建立螺旋单桩在斜拉荷载作用下的数值模拟模型,并基于 ABAQUS 验证了螺旋桩数值模型的有效性,给出了深埋状态下螺旋桩受不同角度斜拉荷载的极限承载力计算公式,同时结合相关理论验证了公式的准确性。

1 模拟模型

1.1 模型参数

为验证斜拉荷载下螺旋桩模型的有效性,在胡伟等^[10,14]开展的单叶片螺旋桩水平承载机理砂箱试验与单叶片全尺寸螺旋桩竖向拉拔试验的基础上,基于 ABAQUS 建立数值模型,对模拟结果和试验结果进行对比分析。2 个试验所用螺旋桩的几何参数见表 1。试验所用土体均为中砂,其中竖向抗拔试验土体密度 $\rho = 1.51 \text{ g/cm}^3$,内摩擦角 $\varphi = 39^\circ$,含水率 $w = 29\%$;水平承载试验土体密度 $\rho = 1.70 \text{ g/cm}^3$,内摩擦角 $\varphi = 39^\circ$,含水率 $w = 9.6\%$ 。

1.2 模型的建立与验证

对胡伟等^[14]竖向抗拔试验的螺旋桩体进行三维实体建模,螺旋叶片可通过旋转成型,并与锚杆绑定连接。因土体的半无限空间特点,采用大尺寸建模方法建立土体模型。根据 GB 51101—2016《太阳能发电站支架基础技术规范》,为消除边界条件的影响,桩端以下的土体深度可取 0.5~1.5 倍桩长,土体宽度应至少取 10 倍叶片总直径。此处取土体深度为 12 m,边长为 6.5 m。约束土体边界,使模型底部不产生水平和竖向位移,侧面不发生水平位移。采用 C3D8R 单元(即八节点六面体线性减缩积分单元)划分桩体网格,采用 C3D4 单元(即四节点四面体线性完全积分单元)划分土体模型。同时,加密桩土接触区域及螺旋叶片周围的网格以提高分析精度。为便于施加荷载,设置了耦合到桩顶上表面的 RP-1 参考点,荷载的施加均基于该点。钢螺旋桩弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.33,密度为 7.8 g/cm^3 ;土体泊松比为 0.35,土体密度为 1.51 g/cm^3 。

考虑到非线性接触行为的影响,以摩尔-库伦摩擦罚函数形式定义桩-土间与叶片-土体间的接触属性,分别设置接触对,一是在螺旋叶片与土体之间设置法向硬接触,接触刚度为非线性;二是在桩体与土体之间设置切向罚接触,取摩擦系数 $\tan\varphi$ 为各向同性。竖向抗拔试验的数值模型如图 1 所示。

图 2 所示为 1、2 桩型的模拟与竖向抗拔试验荷载-位移曲线,在达到 75% 最大加载量前,曲线按桩型两两对应、走向相似,达到最大加载量后的两者差距均小于 25%,可以认为该模型能较好反映砂土中螺旋桩在上拔荷载作用下的实际变形情况。

对胡伟等^[10]进行的水平承载试验采用相同方法建立 3、4 桩型模型。土体模型的尺寸取试验砂箱尺寸 ($2.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$)。钢螺旋桩相关的属性参数与竖向抗拔试验相同;取土体泊松比为 0.3,土体密度为 1.70 g/cm^3 。最终水平承载试验的数值模型如图 3 所示。

根据图 4,ABAQUS 的理想化模拟使得拟合存在差距^[15-16],而 3、4 桩型的模拟曲线和与之对应的试验曲线

表 1 螺旋桩几何参数

Table 1 Geometric parameters of helical piles

试验名称	桩型编号	L_1/m	d/m	S/m	D/m
竖向抗拔试验	1	0.6	0.06	0.15	0.3
	2	0.9	0.06	0.15	0.3
水平承载试验	3	0.6	0.06	0.0525	0.3
	4	0.9	0.06	0.0525	0.3

注:桩身长度为 1 m; L_1 为叶片埋置深度; d 为锚杆直径; S 为叶片螺距;
 D 为叶片直径;水平荷载作用点到土体表面的距离为 0.05 m。

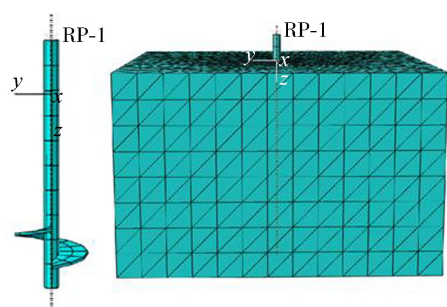


图 1 螺旋桩竖向抗拔试验的数值模型

Fig. 1 Numerical model of helical pile in the vertical pull-out test

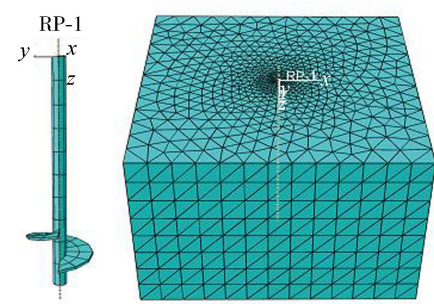


图 3 螺旋桩水平承载试验的数值模型

Fig. 3 Numerical model of helical pile in the horizontal bearing test

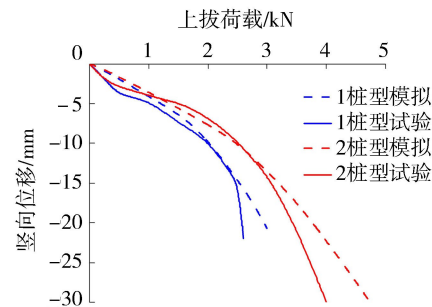


图 2 螺旋桩竖向抗拔荷载-位移曲线

Fig. 2 Vertical pull-out load-displacement curve of helical piles

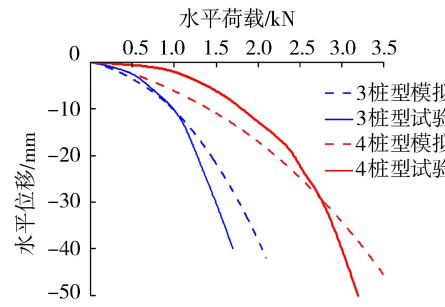


图 4 螺旋桩水平荷载-位移曲线

Fig. 4 Horizontal load-displacement curve of helical piles

趋势走向一致,基本可以认为该模型能够对砂土中螺旋桩在水平荷载作用下的实际变形情况进行合理模拟。

综上,本文建模方法在模拟砂土中螺旋桩受斜拉荷载作用时的变形情况具有一定真实性和准确性。

2 受斜拉荷载螺旋桩的承载性能

2.1 数值模型参数

按照已验证方法建立螺旋单桩在斜拉荷载作用下的数值分析模型,土体为砂土,密度为 1.80 g/cm^3 ,内摩擦角为 38° ,泊松比为 0.3 ,黏聚力为 2 kPa 。参与模拟的 5 根螺旋桩模型均为双叶螺旋桩,首层叶片埋深 L_1 分别为 $2D(0.8\text{ m})$ 、 $3D(1.2\text{ m})$ 、 $4D(1.6\text{ m})$ 、 $5D(2.0\text{ m})$ 、 $6D(2.4\text{ m})$,其他参数均保持一致 ($L=5\text{ m}$ 、 $S=0.1\text{ m}$ 、 $d=0.108\text{ m}$ 、 $D=0.4\text{ m}$ 、叶片间距 $H=1.2\text{ m}$ 、叶片数量为 2)。

2.2 模拟结果与分析

2.2.1 斜拉角度的影响

以 40 mm 斜向位移量对应的斜向荷载作为螺旋桩斜拉极限承载力,斜拉荷载与水平方向的夹角 ($\leq 90^\circ$) 为斜拉角度 θ ,得到 5 根螺旋桩模型在不同角度斜拉荷载作用下的极限承载力 (图 5)。

在不考虑 L_1 的情况下,随着 θ 的增大,螺旋桩极限承载力不断减小,且减幅度愈渐缓慢。当 $\theta < 30^\circ$ 时,螺旋桩极限承载力随着 θ 的增大而迅速减小,关系曲线趋于线性;当 θ 在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间时,随着 θ 的增大,螺旋桩极限承载力的下降幅度逐渐减小;当 θ 在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 之间时,螺旋桩极限承载力趋于稳定。这表明螺旋桩在小倾角的斜拉荷载作用下极易达到极限承载状态,从而发生破坏。当 θ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间时,在斜拉荷载水平分量作用下,螺旋桩挤压荷载水平分量所指的一侧土体的叶片受力会

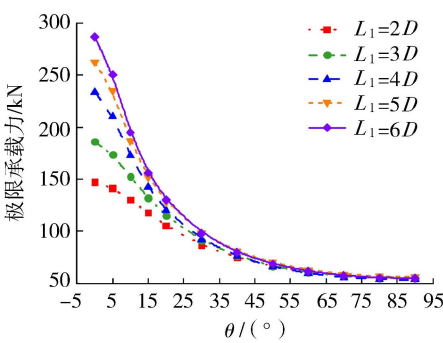


图 5 螺旋单桩极限承载力与斜拉角度的关系

Fig. 5 Relationship between ultimate bearing capacity of helical pile and oblique tensile angle

产生一定倾角,与之相对的一侧叶片与土体产生较大的被动土压力;在斜拉荷载竖向分量作用下,螺旋桩产生上拔作用,锚片向上挤压相邻土体,加快桩体邻近土体的破坏,桩体极限承载力下降。当 θ 在 $60^\circ\sim 90^\circ$ 之间时,此时的螺旋桩极限承载力完全由水平承载力控制,因此几乎不发生变化。

考虑到螺旋桩水平承载特性的影响,若改变 L_1 ,随着不断增大的 θ , L_1 的增大使得螺旋桩极限承载力的下降速度加快。

由图5可知,当 $L_1<4D$,在水平荷载作用时,叶片能抵抗水平荷载,但随着 L_1 增大,叶片抵抗水平荷载的能力逐渐减弱,甚至在达到一定深度后不再发挥作用。因此,对于叶片埋深较浅的螺旋桩,在荷载从竖直上拔向斜拉作用转变的过程中,叶片起到了抵抗水平荷载的作用,保证螺旋桩的承载力不会迅速下降。对于叶片深埋的螺旋桩,荷载水平分量随着 θ 增大而增大,直接导致螺旋桩承载力迅速下降。

2.2.2 叶片埋深的影响

在不同角度的斜拉荷载作用下,螺旋桩极限承载力与首层叶片埋深比 L_1/D (即首层叶片埋深与叶片直径之比)的关系如图6所示。螺旋桩极限承载力随着 L_1/D 增大而不断提高,且上升幅度愈渐缓慢。当 θ 小于 30° 时,螺旋桩极限承载力随 L_1/D 增大有明显提高;当 θ 达到 30° 时,随着 L_1/D 的增大,螺旋桩极限承载力仅有微小增量,表明 L_1 对螺旋桩极限承载力的影响已逐渐减弱;当 θ 处于 $60^\circ\sim 90^\circ$ 之间时,随着 L_1/D 增大,螺旋桩极限承载力几乎不再发生变化。

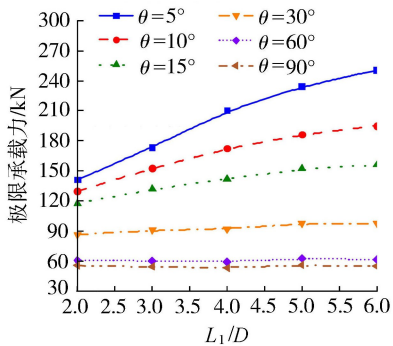


图6 螺旋桩极限承载力与 L_1/D 的关系
Fig.6 Relationship between ultimate bearing capacity of helical pile and L_1/D

3 理论计算与分析

由前文分析可知 θ 处于 $0^\circ\sim 30^\circ$ 之间时,螺旋桩极限承载力下降的速率最快; $\theta=30^\circ$ 时,螺旋桩仍有一定的承载力,但与水平荷载作用时的螺旋桩承载极限存在差距; θ 增至 60° 后,螺旋桩极限承载力基本与水平受载桩一致。因此计算不同角度斜拉荷载作用下的螺旋桩极限承载力时可分为3个区间进行:① θ 处于 $0^\circ\sim 30^\circ$ 之间,参照Q/GDW 10584—2022《架空输电线路螺旋锚基础设计技术规范》可对桩的抗拔承载极限引入水平力影响系数 k (即螺旋桩斜拉承载力与竖直上拔承载力的比值)(式(1))进行修正;② θ 处于 $30^\circ\sim 60^\circ$ 之间,将螺旋桩的抗拔承载力分量与水平承载力分量进行组合得到极限承载力;③ θ 处于 $60^\circ\sim 90^\circ$ 之间,可按水平极限承载力计算。

$$k = 1 - 0.0223\theta$$

(1)

当 θ 由 0° 增至 30° 时,螺旋桩由抗拔作用占主导逐渐转变为抗水平作用占主导。在该倾角范围内,即使螺旋桩的承载极限由水平承载极限控制,抗拔仍是螺旋桩发挥的主要作用。因此可引入 k 对抗拔承载极限进行修正。根据计算得到不同 L_1 的螺旋桩 k 与 θ 的关系曲线(图7)。由图7可知,随着 L_1 的增加, θ 越大, k 下降速率越快。当 $L_1\geq 4D$ 时, k - θ 关系曲线趋于重合,且曲线在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 区间段近似呈线性下降;当 θ 达到 30° , k 约为0.4。

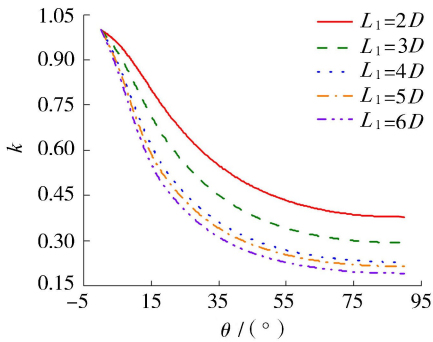


图7 不同 L_1 螺旋桩的 k 与 θ 关系
Fig.7 Relationship between k of helical pile with different L_1 and oblique tensile angle

根据Ilamparuthi等^[17]相关研究,可将破坏位移比与 L_1/D 的关系曲线中增长速率变化明显的点作为临界埋深比。由图8所示,符合要求的点分别位于 L_1/D 为3和4处。当 L_1/D 为4时,破坏位移比的增长速率较 L_1/D 为3时更快,曲线在此处的拐点整体向 L_1/D 为4逐渐逼近。这也与前文所述, L_1/D 达到4以上的螺旋桩斜拉承载力趋于稳定的规律相符,因此取 $L_1/D=4$ 为区分螺旋单桩浅埋和深埋的临界埋深比。

螺旋桩在深埋状态下($L_1\geq 4D$)受力更为复杂,更具工程应用价值,因此对深埋螺旋桩进一步展开分析。图9为深埋螺旋桩的 k 变化曲线,当 θ 处于 $0^\circ\sim 30^\circ$ 时,曲线近似呈线性,若根据Q/GDW 10584—2022《架空

输电线路螺旋锚基础设计技术规程》，当水平力与上拔力的比值位于 0.15 ~ 1.0 时，相应 k 为 1.0 ~ 0.75。即当 θ 为 45° 时仅对承载力乘以 0.75 进行折减，这将导致折减后的承载力偏大。

当 θ 处于 30° ~ 60° 时，斜拉荷载作用下螺旋桩叶片周围土体破坏位移明显减小，土体破坏区域减小，因此螺旋单桩抗拔承载力可通过计算叶片表面土压力及锚杆的摩阻力合力得到。此时螺旋桩的斜拉承载力主要由叶片上土压力 F_m 、桩体抗侧摩阻力 F_g 和螺旋单桩水平极限承载力 F_h 组成。螺旋单桩在斜拉荷载作用下的受力情况如图 10 所示。

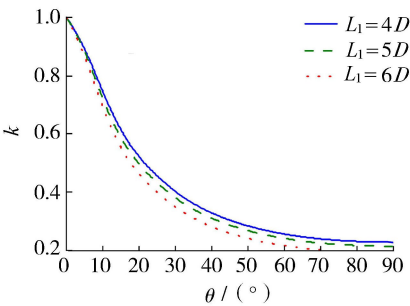


图9 深埋螺旋桩的 k 变化曲线 ($L_1 \geq 4D$)

Fig.9 Variation curve of k of deep buried helical pile ($L_1 \geq 4D$)

对叶片中的土压力分布做出假设：被动土压力均匀分布在挤压区，主动土压力均匀分布在分离区^[18]。土压力按朗肯土压力计算，并将叶片简化为圆盘，则

$$F_m = \frac{\pi}{4}(p_p - p_a)(D^2 - d^2) \tag{2}$$

式中： p_p 为叶片处的被动土压力； p_a 为叶片处的主动土压力。

锚杆侧阻力的计算参照 GB 51101—2016《太阳能发电站支架基础技术规范》中等截面微型短桩的极限抗拔承载力计算：

$$F_g = 0.5\pi dLq_{sik} \tag{3}$$

式中 q_{sik} 为桩侧土的极限侧阻力标准值，取值参照 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》岩土物理力学指标。

螺旋单桩受水平荷载作用时，桩体结构承受的侧向阻力可应用 p - y 曲线法计算 (p 为某一深度处的土体水平反力， y 为该点桩的位移)，锚杆表面土压力分布与挡土墙 RBT 模式类似^[18]。考虑到 $4D$ 埋深下的叶片不发挥抗水平作用^[10]，假设 $4D$ 埋深处为螺旋桩的转动中心，且不考虑 $4D$ 埋深以下桩体带来的水平承载作用。当桩顶位移为 y_0 时，埋深 z 处桩体位移 y 为

$$y = (4D - z)y_0/(4D) \tag{4}$$

采用王国粹等^[19-21]的归一化模型对螺旋桩的水平承载极限进行计算：

$$F_h = \int_0^{4D} \frac{y}{1/k_m + y/p_u} dz \tag{5}$$

其中 $k_m = n_h z$ $p_u = 6K_p d\gamma z$

式中： k_m 为初始地基反力模量； n_h 为地基反力系数的比例常数； K_p 为库伦被动土压力系数。

θ 变化会影响螺旋桩承载力，因此 θ 为 30° ~ 60° 时斜拉荷载作用下螺旋桩的极限承载力计算公式为

$$F = \left\{ \left[\frac{\pi}{4}(p_p - p_a)(D^2 - d^2) \right] + 0.5\pi dLq_{sik} \right\} \cos\theta + \sin\theta \int_0^{4D} \frac{y}{1/k_m + y/p_u} dz \tag{6}$$

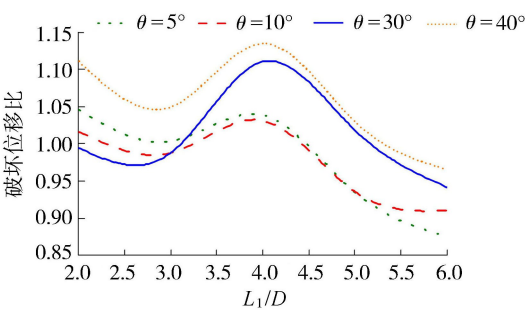


图8 破坏位移比与 L_1/D 的关系

Fig.8 Relationship between damage displacement ratio and burial depth ratio

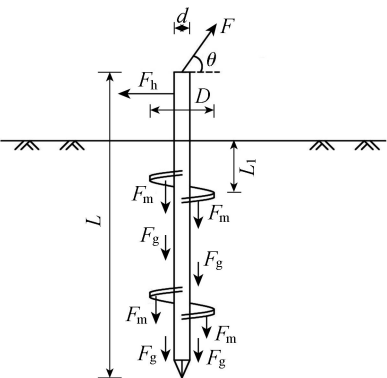


图10 斜拉荷载作用下螺旋单桩受力分析

Fig.10 Force analysis diagram of helical pile under oblique tensile load

按式(6)计算深埋螺旋桩的承载力理论值,并与模拟结果进行对比,结果见表2。总体而言,理论值比模拟值偏大,且随 θ 增大,误差呈现先增大后减小的趋势,其中 $\theta=30^\circ$ 时,理论值与模拟值最为接近,最小仅0.48%; $\theta=50^\circ$ 时,理论值与模拟值误差最大,最大可达21.61%。当 θ 为 $60^\circ\sim90^\circ$ 时,可按螺旋桩的水平承载极限计算。模拟值与理论值的误差均在22%以内,表明该公式具有一定可靠性。

4 结 论

- a. 不考虑首层叶片埋深,砂土中螺旋桩的极限承载力随斜拉角度增大不断减小,且减小幅度愈渐趋缓。当斜拉角度小于 30° 时,螺旋桩极限承载力随斜拉角度增大迅速减小,关系曲线近似线性;在斜拉角度从 30° 逐渐增加至 60° 的过程中,螺旋桩极限承载力的下降速率逐渐减小;当斜拉角度位于 $60^\circ\sim90^\circ$ 之间,螺旋桩极限承载力随着斜拉角度增大几乎不变,此时螺旋桩极限承载力完全由水平承载力控制。
- b. 在砂土中,螺旋桩极限承载力受到埋深比的影响,临界埋深比为4。当埋深比 $L_1/D<4$ 时,螺旋桩极限承载力随埋深比的增大而增大,且增幅趋缓;当埋深比 $L_1/D\geq 4$ 时,螺旋桩极限承载力随埋深比增大趋于不变。
- c. 通过模型参数分析,推导出砂土中深埋($L_1\geq 4D$)螺旋单桩在不同角度斜拉荷载作用下的极限承载力计算公式,该公式适用的斜拉角度范围为 $30^\circ\sim60^\circ$,经与模拟结果比对显示该公式具有一定准确性。

参考文献:

[1] 孙国强,朱超,卫志农,等.基于综合集成赋权法的输电线路动态综合评估[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):272-277. (SUN Guoqiang,ZHU Chao,WEI Zhinong,et al. Dynamic comprehensive evaluation of transmission lines based on integrated weighting method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(3):272-277. (in Chinese))

[2] 张子明,柯一丹,韩林,等.声子晶体导线的振动带隙特性[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):224-229. (ZHANG Ziming,KE Yidan,HAN Lin,et al. Vibration band gap characteristics of phononic crystal conductor[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(3):224-229. (in Chinese))

[3] SHARMA A,GUNER S. System-level modeling methodology for capturing the pile cap, helical pile group, and soil interaction under uplift loads[J]. Engineering Structures,2020,220:1-14.

[4] CERFONTAINE B,KNAPPETT J,BROWN M J,et al. Optimised design of screw anchors in tension in sand for renewable energy applications[J]. Ocean Engineering,2020,217:1-15.

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

[6] MURRAY E J,GEDDES J D. Uplift of anchor plates in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1987,113(3):202-215.

[7] FRYDMAN S,SHAHAM I. Pullout capacity of slab anchors in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal,1989,26(3):385-400.

[8] POLISHCHUK A I,MAKSIMOV F A. Improved design for settlement of helical pile in clay[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering,2018,451(1):1-7.

[9] 郝冬雪,符胜男,陈榕,等.砂土中锚板拉拔模型试验及其抗拔力计算[J].岩土工程学报,2015,37(11):2101-2106. (HAO Dongxue,FU Shengnan,CHEN Rong,et al. Experimental investigation of uplift behavior of anchors and estimation of uplift capacity in sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(11):2101-2106. (in Chinese))

[10] 胡伟,孟建伟,刘顺凯,等.单螺旋锚桩水平承载机理试验与理论研究[J].岩土工程学报,2020,42(1):158-167. (HU Wei,MENG Jianwei,LIU Shunkai,et al. Experimental and theoretical researches on horizontal bearing mechanism of single screw anchor pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(1):158-167. (in Chinese))

[11] 张新春,白云灿,何泽群,等.砂土中螺旋锚基础水平振动特性的模型试验研究[J].应用力学学报,2020,37(2):601-606.

表2 深埋状态下的螺旋桩斜拉极限承载力模拟值与理论值
Table 2 Simulated and theoretical values of oblique tensile ultimate bearing capacity of helical pile in deep burial condition

埋深	$\theta/(^\circ)$	模拟值/kN	理论值/kN	误差/%
4D	30	92.03	91.59	0.48
	40	75.78	84.48	11.48
	50	65.79	74.80	13.70
	60	59.51	62.85	5.61
5D	30	97.84	97.33	0.52
	40	80.39	89.56	11.41
	50	69.70	79.06	13.43
	60	62.96	66.17	5.10
6D	30	97.75	103.07	5.44
	40	79.57	94.64	18.94
	50	68.52	83.33	21.61
	60	61.65	69.49	12.72

(ZHANG Xinchun, BAI Yuncan, HE Zequn, et al. Experimental study on vibration response characteristics of screw pile foundation in sand under lateral dynamic loading [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37 (2): 601-606. (in Chinese))

[12] 张亚军,董天文,黄连壮,等.斜向上拔螺旋桩基础极限荷载计算[J].岩土力学,2010,31(2):441-448. (ZHANG Yajun, DONG Tianwen, HUANG Lianzhuang, et al. Calculation of ultimate bearing capacity of screw pile group by inclined pull-out test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (2): 441-448. (in Chinese))

[13] 韦芳芳,华子伟,邵盛,等.砂土中倾斜螺旋桩水平承载性能有限元分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2021,38(1):13-19. (WEI Fangfang, HUA Ziwei, SHAO Sheng, et al. Horizontal bearing performance of inclined helical pile in sandy soil using finite-element analysis [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2021, 38 (1): 13-19. (in Chinese))

[14] 胡伟,刘顺凯,张亚惠,等.单叶片全尺寸螺旋锚桩竖向拉拔试验研究[J].土木建筑与环境工程,2017,39(5):31-39. (HU Wei, LIU Shunkai, ZHANG Yahui, et al. Uplift loading test on full-scale single blade screw anchor pile [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2017, 39 (5): 31-39. (in Chinese))

[15] 张鹤志,王熙,谢献忠,等.不同荷载工况下钢筋混凝土深梁的拓扑优化设计[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):366-372. (ZHANG Huzhi, WANG Xi, XIE Xianzhong, et al. Topology optimization design for RC deep beams under different load conditions [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (4): 366-372. (in Chinese))

[16] 曹卫平,李贺,陶鹏.水平荷载-扭矩耦合作用下斜桩承载变形特性数值模拟[J].水利水电科技进展,2023,43(6):44-49. (CAO Weiping, LI He, TAO Peng. Numerical simulation of bearing and deformation behavior of batter piles under combined horizontal load and torque [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (6): 44-49. (in Chinese))

[17] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A, MUTHUKRIS-NAIAH K. Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39 (3): 648-664.

[18] 陈页开,汪益敏,徐日庆,等.刚性挡土墙被动土压力数值分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):980-988. (CHEN Yekai, WANG Yimin, XU Riqing, et al. Numerical analyses of active earth pressure on rigid retaining wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (6): 980-988. (in Chinese))

[19] 王国粹,杨敏.砂土中水平受荷桩非线性分析[J].岩土力学,2011,32(增刊2):261-267. (WANG Guocui, YANG Min. Nonlinear analysis of laterally loaded piles in sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (Sup2): 261-267. (in Chinese))

[20] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Analysis of laterally loaded piles in sand [C]//Proceedings of 6th Offshore Technology Conference. Houston: Engineering Geology, 1974: 473-485.

[21] 曹卫平,夏冰,葛欣.水平受荷斜桩双曲线型 p - y 曲线的构建及其应用[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(10):1946-1954. (CAO Weiping, XIA Bing, GE Xin. Formation and application of hyperbolic p - y curves for horizontally loaded single batter piles [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53 (10): 1946-1954. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-08 编辑:刘晓艳)