

文章编号:1673-9469(2021)01-0013-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.01.003

砂土中倾斜螺旋桩水平承载性能有限元分析

韦芳芳,华子伟*,邵盛,于玮伟,朱俞

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

摘要: 受限于锚-土间相互作用的复杂性,当前倾斜螺旋桩水平承载特性的相关研究仍不能满足相关工程要求。基于螺旋桩竖直单桩水平承载试验,并通过非线性有限元软件 ABAQUS 研究了倾斜单桩在水平荷载作用下的承载性能,具体分析不同倾斜角度对承载特性的影响,主要研究结果如下:(1)在水平荷载作用下,倾斜角度不超过 45° ,螺旋桩由水平极限位移控制破坏;(2)随着倾斜角度的增加,螺旋桩的水平承载力逐渐提高,对于相同倾角的螺旋桩,正倾的水平承载力始终大于负倾,叶片分担的荷载与水平极限承载力的比值不断增大(对于正倾螺旋桩,比值从2.4%增大到15.6%);(3)在加载的全过程中,土体的塑性变形区域主要集中在顶端桩侧小范围内,叶片处土体未发生塑性变形。

关键词: 螺旋桩;倾斜角度;承载性能;有限元分析

中图分类号: TU473.1+1

文献标识码: A

Horizontal Bearing Performance of Inclined Helical Pile in Sandy Soil Using Finite-Element Analysis

WEI Fangfang, HUA Ziwei*, SHAO Sheng, YU Weiwei, ZHU Yu

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: On account of the complexity of the interaction between anchor and soil, the current researches on the horizontal bearing capacity of inclined spiral piles are still unable to meet the relevant engineering requirements. Based on the horizontal bearing test of spiral vertical single pile, the bearing performance of tilted single pile under horizontal load was studied by nonlinear finite element software ABAQUS, and the influence of different inclined angles on the bearing performance was analyzed in detail. The main research results are as follows: (1) When the tilt angle does not exceed 45° , the screw pile is controlled by the horizontal limit displacement under the action of horizontal load. (2) With the increase of the tilt angle, the horizontal bearing capacity of the spiral pile gradually increases. For the helical pile with the same dip angle, the horizontal bearing capacity of positive dip is always greater than that of negative dip, and the ratio of the load shared by the blades to the horizontal ultimate bearing capacity keeps increasing (for the helical pile with positive dip angle, the ratio increases from 2.4% to 15.6%). (3) In the whole process of loading, the plastic deformation area of soil mass is mainly concentrated in a small range on the side of the top pile, and the soil mass at the blade has no plastic deformation.

Key words: helical pile; tilt angle; bearing performance; finite-element analysis

螺旋桩是一种由螺旋状叶片板焊接在长钢杆上的异形桩,施工时无需开挖土体,在桩顶施加扭矩便可将桩体旋入土层中^[1]。具有施工快、承载高、污染小、成本低等特点^[2],又因其对原状土体

扰动较小,而被广泛应用于基坑支护、输电线路塔杆以及房屋基础等众多领域。除了常规的竖直埋置外,螺旋桩还可以根据需要进行倾斜埋置,使用十分灵活,具有广阔的应用前景。目前,国内外学

收稿日期:2020-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608168)

作者简介:韦芳芳(1978-),女,浙江东阳人,博士,副教授,主要从事螺旋锚基础和钢-混组合结构方面的研究。

* 通讯作者:华子伟(1995-),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事螺旋锚基础方面的研究。

者对螺旋桩的相关性能进行了大量研究。Elsherbiny^[3]通过采用现场试验和模拟相结合的方式,提出了无粘性土中螺旋桩抗压承载力折减系数和螺旋效率系数。符胜男^[4]研究了螺旋桩锚板上拔承载力的尺寸效应,提出了适用于不同埋深的极限上拔承载力计算公式。蔡伽哲^[5]发现利用扩径装置灌浆的方法能显著提高螺旋钢桩抗压极限承载力。张亚惠等^[6]通过改变不同叶片倾角进行螺旋桩竖向向上拔模拟,提出了新的破裂面模型。曹日跃^[7]通过数值模拟分析了螺旋桩单桩在竖向荷载作用下桩侧摩阻力和桩体轴力的分布规律。胡伟等^[8]通过螺旋锚单桩水平拉拔模型试验,提出了砂土中螺旋单桩的水平拉拔力学模型,并给出了位移相关的水平承载力计算理论。韩春雨^[9-11]等基于水平加载试验和数值模拟研究了螺旋桩单桩在水平激励下桩-土间的动态响应以及承载性能。Luo^[12]等通过数值模拟考虑了边界条件的非反射性和桩-土间相互作用的非线性行为,研究了螺旋桩在地震作用下桩-土间的动态响应。王国粹等^[13]通过参数分析,证实了双曲线模型可广泛用于砂土中水平荷载作用下桩基的非线性分析。曹卫平等^[14]基于模型试验构建了砂土地基中斜桩的 p - y 曲线,并分析了水平荷载作用下斜桩性状的影响因素。王健^[15]等结合某实际工程,用螺旋桩替换复合地基中的 CFG 桩进行了数值模拟,发现螺旋桩同样满足沉降要求。

综上所述,当前有关螺旋桩的研究主要集中在竖直单桩的极限承载力和桩-土相互作用方面,针对螺旋桩倾斜单桩水平向抗倾覆能力的研究则相对较少。本文基于螺旋桩竖直单桩水平承载试验,结合数值模拟对螺旋桩倾斜单桩在水平荷载作用下的承载性能进行了分析。

1 试验简介

1.1 试验概况

本次螺旋桩竖直单桩在水平荷载作用下的承载试验采用缩尺的单叶片螺旋桩,桩长 1.8 m,锚杆直径为 76 mm;叶片总直径为 176 mm,厚度为 8 mm,顺时针螺旋向下,螺距为 90 mm,叶片中心距离桩尖 150 mm。螺旋桩模型实物及具体尺寸如图 1 所示。

所用试验槽规格为 2.0 m×2.0 m×2.5 m,见图 2,采用砂土作为试验用土,土体的压缩模量 E_s 为 11.1 MPa,黏聚力 c 为 0,内摩擦角 φ 为 35.9°,含

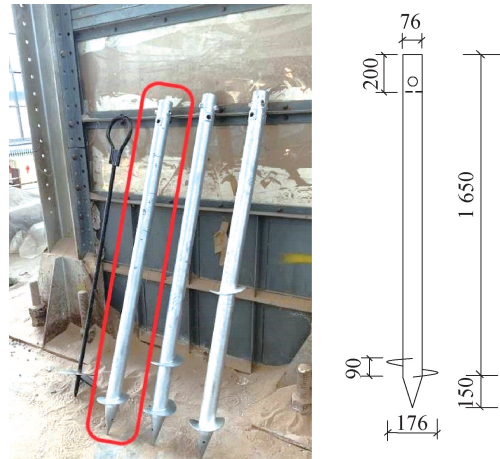


图 1 螺旋桩模型实物及具体尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Screw pile model and its size

水率 w 为 2.3%,土体密度 ρ 为 1.45 g/cm³。试验加载装置如图 3 所示,桩体竖向安装在土体内,预埋土压力盒,并控制桩中心至试验槽边界的垂直距离,从而忽略水平承载试验过程中边界条件的影响。此外,为了方便荷载的施加,桩顶预留 20 cm 的高度露出土体表面,通过油压千斤顶对螺旋桩施加水平荷载,以获得桩顶的水平荷载-位移曲线。



图 2 试验槽

Fig. 2 Test apparatus

1.2 试验结果

试验过程中主要通过布置荷载传感器和水平位移计来测量试件的水平荷载和水平位移。本试验加载方法参照《建筑桩基础检测技术规范》(JGJ106—2014)^[16],采用维持荷载法逐级等量加载:(1)分级荷载宜取最大加载值或预估极限承载力的 1/10,其中第一级加载可取分级荷载的 2 倍;(2)每级荷载施加后静置 15 min,并按第 1、3、5、10、15 min 记录一次土压力和桩顶位移。水平承载极限状态判定:(1)当桩顶的水平位移达到前一级荷载下水平位移的 5 倍;(2)达到 2 倍且长时间



图 3 试验加载及测量装置

Fig. 3 Test loading and measuring device

未出现稳定;(3) 桩顶最大水平位移超过 40 mm;
(4) 水平荷载无法维持时即可终止试验。

试验得到的螺旋桩水平荷载-位移曲线如图 4 所示。根据《架空输电线路螺旋锚基础设计技术规范》(Q/GDW 10584—2018) B. 4. 3^[17] 对极限承载力确定方法,取水平极限位移量为 10 mm,极限位移量所对应的荷载即为极限荷载,试验中竖直螺旋桩的水平极限承载力为 3.80 kN。

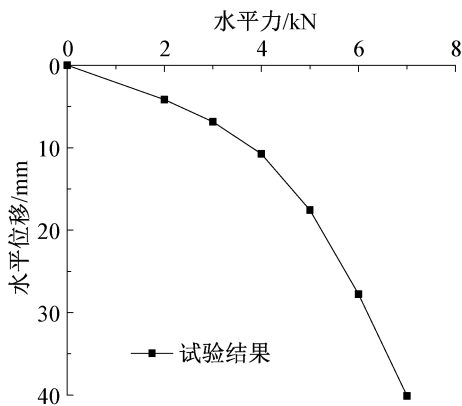


图 4 螺旋桩水平承载试验的荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve of screw pile horizontal bearing test

2 有限元模型建立与验证

2.1 模型建立

本文采用 ABAQUS 对砂土中倾斜螺旋桩水平承载性能进行数值模拟,建立了与试验试件尺寸相一致的水平承载力学模型。螺旋桩叶片是旋转体,属于三维非对称问题,建模时桩体采用三维实体建模。土体属于半无限空间体,对土体建模时可通过大尺寸来模拟,桩下土体深度取桩身长度的 0.5~1.5 倍,土体模型的宽度应取叶片总直径的 10 倍以上。为了较好地模拟桩-土之间的非线性行为,桩-土接触属性采用摩尔-库伦摩擦罚函数

形式,采用面与面接触单元形式,取刚度较大的桩体表面为主接触面,从面选择刚度相对较小的土体接触面,法向关系选择“硬”接触,切向行为选择“罚”接触,取桩-土的摩擦系数为 $\tan \varphi$ (φ 为土体内摩擦角),允许接触面之间出现相对滑动但不分离。土体底部约束水平和垂直位移,土体侧面约束水平位移,荷载设置为分级加载。划分网格时,桩体采用 C3D8R 单元,土体采用 C3D4 单元,为了提高计算效率,模型中螺旋桩锚端未采用变截面形式,同时加密模型中心处的网格,并重点加密土体接触叶片区域的网格。螺旋单桩及土体的网格划分如图 5 和图 6 所示。

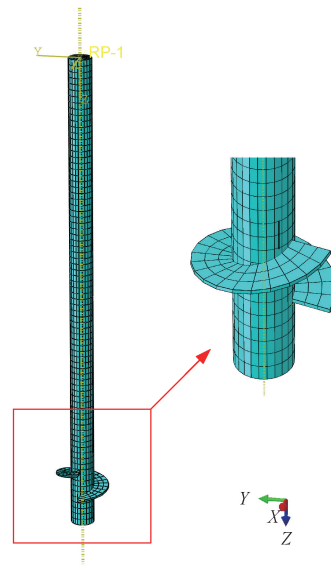


图 5 螺旋桩网格划分

Fig. 5 Mesh division of screw single pile

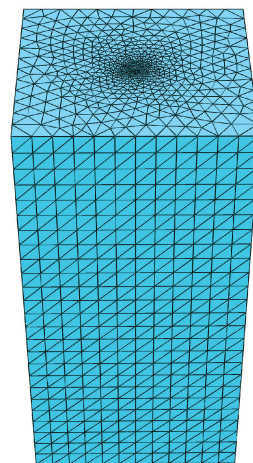


图 6 土体网格划分

Fig. 6 Mesh division of soil

在试验过程中,螺旋桩桩体不会发生屈服,因此在模拟时采用弹性模型,钢桩的弹性模量取 $E =$

210 GPa,泊松比取 0.3,密度为 7.8 g/cm^3 ;土体选用砂土,泊松比为 $\mu=0.35$,黏聚力为 0,内摩擦角为 33° ,膨胀角为 10° ,平均重度取值 14.5,静止侧压力系数按照 $\mu/(1-\mu)=0.538$ 进行计算。

2.2 模型验证

如图 7 所示,将数值模拟的结果与试验结果进行对比,可以看出从开始加载至水平位移达到极限位移,螺旋桩模拟结果与试验结果的水平荷载-位移曲线非常相近,竖直螺旋桩在水平荷载作用下的极限承载力模拟结果为 3.75 kN,与试验结果相比,两者相差约为 1.3%,即水平荷载作用下螺旋桩的模拟结果与试验结果吻合良好。上述模型能够较好地模拟砂土中螺旋桩的水平承载性能。

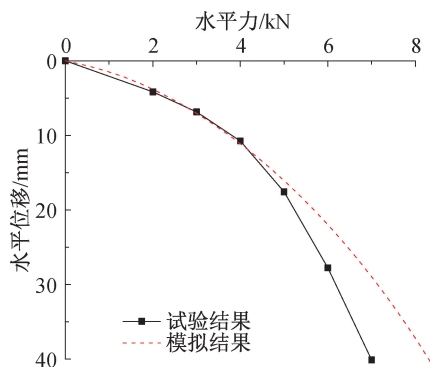


图 7 水平荷载作用下竖直螺旋桩的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of vertical spiral pile under horizontal load

3 倾斜螺旋桩水平承载性能分析

为了研究倾斜螺旋桩在水平荷载作用下的承载性能,根据已有参考文献结合实际工程经验,本文设计了不同倾斜角度的螺旋桩工况,选择 45° 为最大倾斜角度,倾斜角度分别为 0° 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ (倾斜角度是指螺旋桩轴心方向与竖直方向的夹角,本文力的作用方向水平向右,以桩身倾斜方向与水平荷载方向一致为正倾,反之为负倾),其中螺旋桩采用同一规格型号,在桩顶施加水平向荷载。螺旋桩的尺寸为:锚杆直径 108 mm,叶片总直径 400 mm,叶片厚 8 mm,螺距 90 mm,叶片数为 1,桩长 8 m。土体边长随着螺旋桩倾斜角度的增加需逐渐放宽,放宽的尺寸不应小于倾斜螺旋桩的水平投影长度。

3.1 极限承载力

对上述不同倾角的螺旋桩工况进行数值模

拟,水平荷载作用下倾斜螺旋单桩的荷载-位移曲线如图 8 所示,图 8 中水平-正(负)倾表示正(负)倾螺旋桩的水平位移,竖直-正(负)倾表示正(负)倾螺旋桩的竖向位移。

从图 8 中可以看出,不同工况下的荷载-位移曲线均较为平滑,斜率的变化未出现明显的拐点。当螺旋桩的倾角较小时,施加水平荷载只产生很微小的竖直位移分量,随着倾角的增大(不超过 45°),同一荷载等级下的竖直位移逐渐变大,但螺旋桩的竖向位移始终小于对应的水平位移,因此取水平极限位移作为倾斜螺旋单桩的控制破坏条件。此外,对于倾角相同的螺旋桩而言,正倾螺旋桩的水平极限承载力始终大于负倾螺旋桩,且随着倾角的增大两者差值不断增大。这是因为正倾螺旋桩的桩侧极限土反力大于直桩,负倾螺旋桩的桩侧极限土反力小于直桩,而影响极限土反力的因素主要是桩侧土的被动土压力系数,结合本文,被动土压力系数的因素主要是由螺旋桩的倾角所决定。当水平荷载增大时,负倾螺旋桩的桩侧土体先发生破坏,桩顶位移优先达到水平极限位移,即水平极限位移一定时,正倾螺旋桩的承载力要优于负倾螺旋桩,这与曹卫平^[14,18]开展的室内斜桩模型试验结果相一致。

将上述工况的荷载-水平位移曲线进行对比,如图 9 和图 10 所示。对于正倾螺旋桩,随着倾斜角度的增加,螺旋桩的水平极限承载力逐渐提高,当倾斜角度大于 15° 时,水平承载力增大的幅度越来越大;对于负倾螺旋桩,当角度小于 30° 时,角度对螺旋桩的水平承载能力影响不大,当角度大于 30° 时,螺旋桩水平承载能力随着负倾角度的增大而缓慢增大。不同工况下螺旋桩达到极限位移时水平极限承载力如表 1 所示。

3.2 塑性变形

为了研究土体的变形规律,以正倾 15° 的螺旋桩为例,分析水平极限荷载下桩侧土体的等效塑性应变分布情况。如图 11 和图 12 所示,在水平向荷载的作用下,竖直螺旋桩桩侧土体最大等效塑性变形区域主要集中在顶端桩侧小范围土体内;正倾 15° 的螺旋桩桩侧土体最大等效塑性变形区域仍然只在顶端桩侧小范围土体内,直至达到极限荷载,螺旋桩叶片处的土体都未发生塑性变形。负倾螺旋桩周围土体的变形规律与竖直桩基本一致,其他正倾的螺旋桩周围土体的变形规律同正倾 15° 时的工况,这里不再列出。

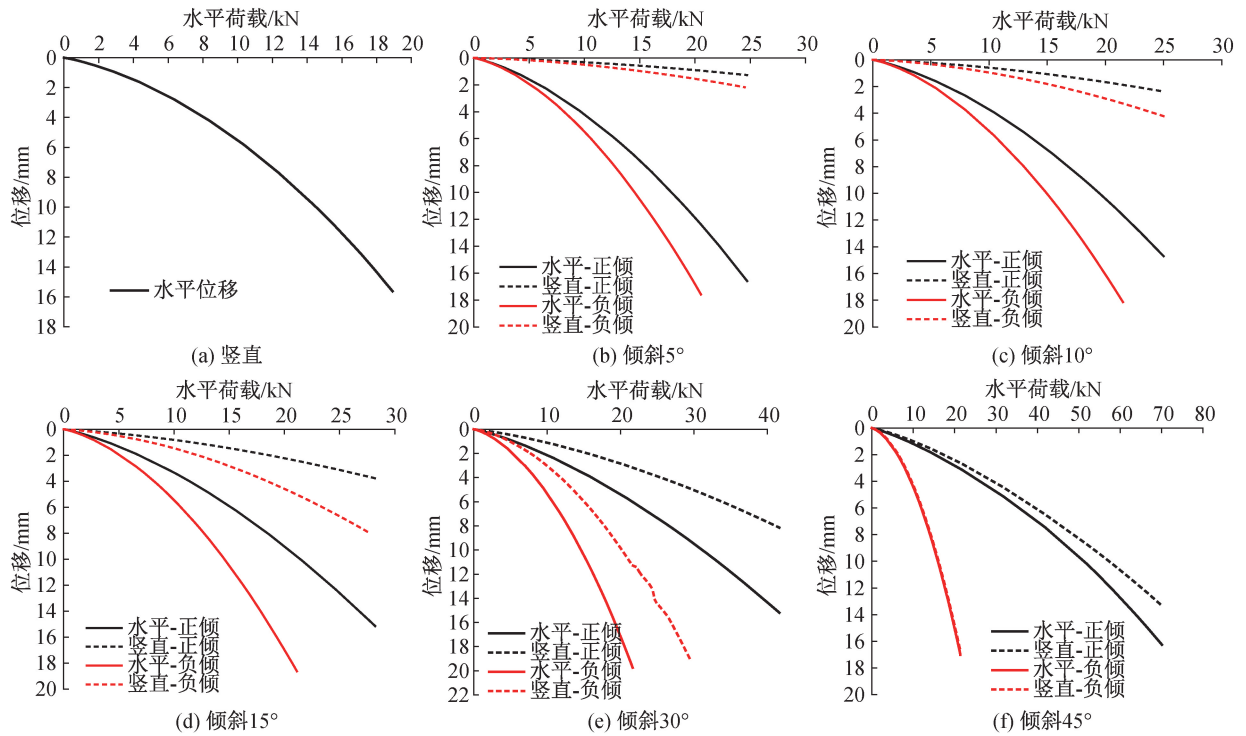


图 8 倾斜螺旋单桩荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve of single inclined helical pile

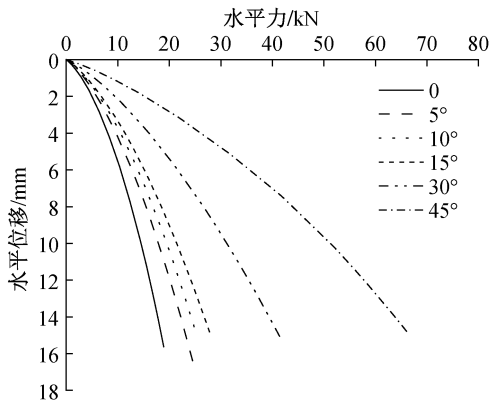


图 9 正倾螺旋桩荷载-水平位移曲线

Fig. 9 Load-horizontal displacement curve of positively dip spiral pile

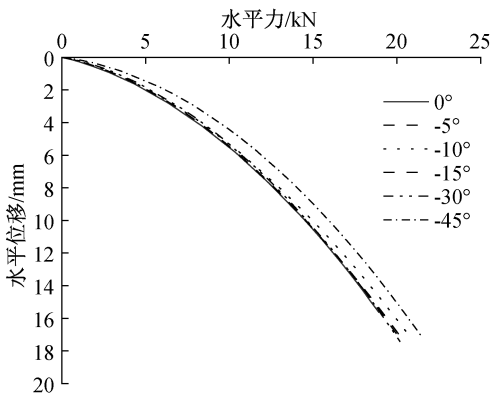


图 10 负倾螺旋桩的荷载-水平位移曲线

Fig. 10 Load-horizontal displacement curves of negative dip spiral pile

表 1 倾斜螺旋桩单桩水平向极限承载力
Tab. 1 Ultimate horizontal bearing capacity of single inclined spiral pile

倾斜角度	水平极限承载力/kN
0°	14.48
5°	17.93
10°	19.48
15°	21.45
30°	31.10
45°	51.18
-5°	14.44
-10°	14.47
-15°	14.95
-30°	14.50
-45°	15.93

3.3 结构荷载分配

在水平外荷载作用下,倾斜螺旋桩所受荷载可分解为沿桩轴的轴向荷载和垂直于桩身的荷载,其中沿桩轴的轴向荷载主要由叶片承受,垂直于桩身的荷载则主要由锚杆分担。为了深入研究倾斜螺旋桩在水平外荷载作用下荷载的分配情况,将试件达到水平极限荷载时,叶片所承受的荷载进行提取。

图 13 和图 14 主要展示了不同倾角下螺旋桩的水平极限荷载以及叶片分担的荷载,当螺旋桩

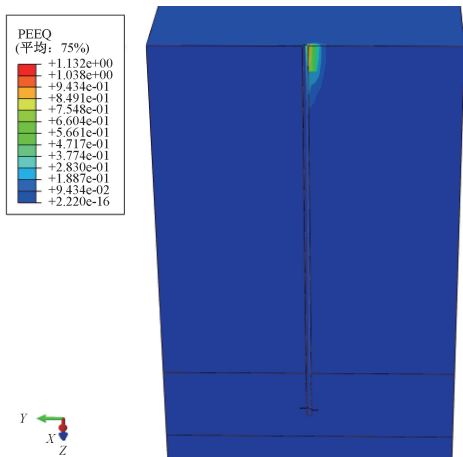


图 11 竖直螺旋桩桩侧土体等效塑性应变
Fig. 11 Equivalent plastic strain of soil on the side of vertical screw pile

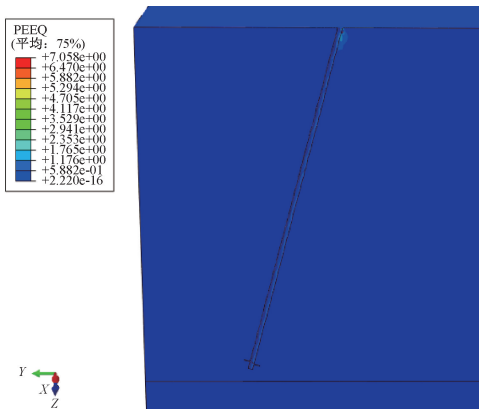


图 12 正倾 15°螺旋桩桩侧土体等效塑性应变
Fig. 12 Equivalent plastic strain of soil at the side of an inclined 15° screw pile

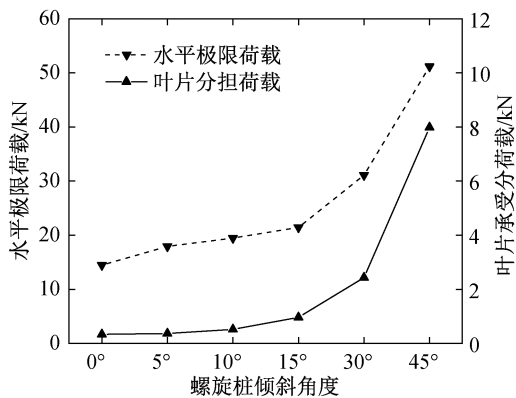


图 13 正倾螺旋单桩荷载分布
Fig. 13 Load distribution of single positive helical pile

竖直埋置时(即倾角为 0°时),叶片分担荷载为 0.35 kN,约占水平极限荷载的 2.4%,即水平荷载主要由锚杆承担。如图 13 所示,随着正倾角度的增加,叶片分担的荷载逐渐提高,但增长缓慢,直到倾斜 30°时叶片分担的荷载与水平极限荷载的

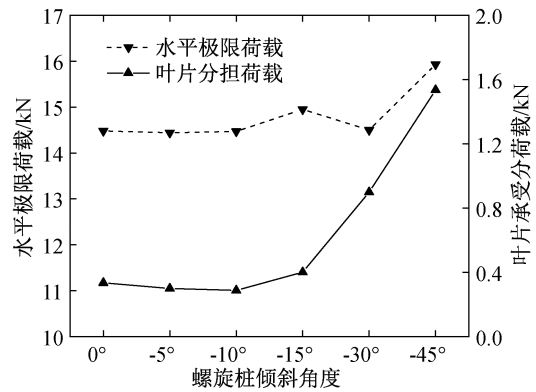


图 14 负倾螺旋单桩荷载分布

Fig. 14 Load distribution of single negative helical pile

比值都未曾超过 8%;当倾斜角度为 45°时,叶片分担荷载达到了 8 kN,达到了水平极限荷载的 15.6%。如图 14 所示,螺旋桩负倾角度小于 15°时,叶片分担的荷载几乎不变;负倾角度超过 15°后,叶片分担的荷载逐渐增大,当倾斜角度为 45°时,叶片分担的荷载达到了 1.55 kN,占水平极限荷载的 9.7%。这表明随着倾斜角度的增大,正倾螺旋桩叶片分担的荷载以及与水平极限荷载的比值要大于负倾螺旋桩,但增长都较为缓慢,螺旋桩的水平荷载主要由锚杆分担。

4 结论

1) 在水平荷载的作用下,随着埋置倾斜角度的增大(不超过 45°),倾斜单桩的水平位移始终大于竖向位移,螺旋桩由水平极限位移控制破坏。

2) 正倾螺旋桩的水平承载力随着倾斜角度的增加(不超过 45°)逐渐提高,当倾斜角度大于 15°,每增加相同的倾斜角度,水平承载力提高的幅度越来越大;负倾螺旋桩的水平承载力随着倾斜角度的变化增长相对缓慢。对于相同倾角的螺旋桩,正倾螺旋桩的水平承载力始终大于负倾螺旋桩。

3) 当倾斜螺旋桩承受水平荷载时,土体的塑性变形区域主要集中在顶端桩侧小范围内,加载过程中,倾斜螺旋桩叶片处的土体均未发生塑性变形。

4) 在水平荷载作用下,当螺旋桩竖直埋置时,叶片几乎不分担荷载,水平荷载主要由锚杆承担;随着倾斜角度的增加,叶片分担的荷载以及该荷载与水平极限荷载的比值逐渐提高,但增长较为缓慢(对于正倾螺旋桩,比值从 2.4%增大到 15.6%)。

参考文献:

- [1]董天文,梁力,张成金.旋入式螺旋桩[J].世界桥梁,2004(4):73-75.
- [2]张春新,韩春雨,白云灿,等.叶片可伸缩钢管螺旋桩结构的承载特性及设计方法[J].中国工程机械学报,2018,16(2):130-135.
- [3]ELSHERBINY Z H,EL NAGGAR M H. Axial Compressive Capacity of Helical Piles from Field Tests and Numerical Study[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(12): 1191-1203.
- [4]符胜男.砂土中螺旋锚上拔承载特性研究[D].吉林:东北电力大学,2016.
- [5]蔡伽哲.拼接式螺旋钢桩竖向承载性能现场试验与数值计算研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [6]张亚惠,胡伟,邹贵华,等.不同叶片倾角单螺旋桩桩竖向拉拔破坏机理分析[J].施工技术,2017,46(02):88-91.
- [7]曹日跃.基于FLAC3D的单桩承载特性的数值模拟[J].北京信息科技大学学报,2016,31(3):88-91.
- [8]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(01):158-167.
- [9]韩春雨.钢管螺旋桩的承载特性及桩-土相互作用分析[D].北京:华北电力大学,2018.
- [10]白云灿.横向荷载下钢管螺旋桩-土相互作用动力响应特性分析[D].北京:华北电力大学,2019.
- [11]胡丹.冲刷作用下单桩水平承载特性试验研究及数值模拟[J].水利学报,2015,46(S1):263-266.
- [12]LUO C, YANG X, ZHAN C B, et al. Nonlinear 3D Finite Element Analysis of Soil-Pile-Structure Interaction System Subjected to Horizontal Earthquake Excitation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 84:145-156.
- [13]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(S2):261-267.
- [14]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.
- [15]王健,陈拓,白新平,等.螺旋桩在复合地基中的应用探讨[J].建筑结构,2018,48(S1):711-714.
- [16]JGJ 106—2014,建筑桩基础检测技术规范[S].
- [17]Q/GDW 10584—2018,架空输电线路螺旋锚基础设计技术规范[S].
- [18]曹卫平,夏冰,赵敏,等.砂土中水平受荷斜桩的 $p-y$ 曲线及其应用[J].岩石力学与工程学报,2018,37(3):743-753.

(责任编辑 王利君)