

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2022.02.011

淤泥质海岸螺旋桩的轴向承载特性研究

赵星婕¹, 王忠岱², 吴伟强³, 谢立全^{1*}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804;

3. 河北建投海上风电有限公司, 河北 唐山 063000)

摘 要: 海上风电高压海缆登陆后往往需要跨越平原淤泥质海岸, 高压电缆排管易发生不均匀沉降而裂损, 螺旋桩因施工方便、速度快, 可用于不均匀沉降的应急控制。螺旋桩的承载力是其工程应用的重要设计内容, 其桩型参数的改变, 对极限抗压承载力有着较大影响。本文结合工程实践, 通过开展抗压承载力数值模拟, 研究分析了螺旋桩叶片宽度、叶片个数、叶片间距、桩体埋深对螺旋桩极限抗压承载力的影响。研究结果表明: 增大螺旋板叶片宽度, 可提高螺旋桩极限抗压承载力; 双叶片螺旋桩的极限承载力明显比单叶片大; 增加螺旋板叶片间距, 螺旋桩极限抗压承载力整体呈先增大后减小的趋势; 增加桩体埋深, 桩基极限抗压承载力明显增大。

关键词: 淤泥质海岸; 螺旋桩; ABAQUS; $q-s$ 曲线; 极限承载力

中图分类号: TU312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2022) 02-0085-08

海上风电场的高压海缆登陆, 往往需要经由平原淤泥质海岸。河北省唐山乐亭菩提岛海上风电场示范项目工程, 位于唐山市京唐港与曹妃甸港之间的渤海海域, 场址中心距离岸线约 16 km, 风机总计 75 台, 总装机容量 300 MW, 风机外轮廓围成的调整风电场面积约 44.65 km²。风电场区内的电缆管线 (35 kV) 约 92 km, 220 kV 海缆登陆点至大清河口风电场陆上升压站, 采用了电缆排管敷设方式, 长度 6.5 km, 电力排管布置在新建路堤上, 该新建路堤必须跨越海岸水产养殖区的大面积水域。为了控制电缆排管的差异性沉降, 采用了螺旋桩, 将重力荷载传递到更深地基中。

螺旋桩作为桩基的一种新形式, 是将一片或多片螺旋状叶片板焊接在桩体轴上的异形桩, 施工时无需提前挖空, 通过机械或人工手段在螺旋桩顶部施加扭矩, 便可将桩旋入土中。这种螺旋桩结构增加了轴向基底阻力, 便于安装, 并可重复使用。国

外对于螺旋桩基础的研究比较早。1833 年, 英国建筑工人 Alexander Mitchell 采用螺旋桩替代英格兰附近岛屿上灯塔锚基, 抵御波浪作用, 提高灯塔基础耐久性。20 世纪 50 年代, 美国 Chance 公司 (A.B. Chance Co.) 发明了一种能高效安装的动力安装螺旋锚 (Power-Installed Screw Anchor), 将多层螺旋状的叶片焊接到一根钢管上, 在桩顶施加扭矩可旋入土中^[1]。Chance 公司还在输电线塔的基础工程中采用螺旋钢管桩, 并在 1959 年制定了第一个有关螺旋钢管桩的标准——PISA (Power Installed Screw Anchors)。目前已有很多研究对轴径 d 大于 150 mm 的单螺旋桩进行了大量轴向现场荷载试验^[2-6]。

螺旋桩的承载性能很大程度上取决于桩型参数与地基强度。Chance 公司^[7]通过大量现场试验研究了不同桩型参数对桩的承载力的影响, 揭示出对于分层式叶片桩, 当螺旋板叶片间距大约为叶片直径的 3 倍时, 桩的承载力达到最大。螺旋桩基础承载

收稿日期: 2022-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (02902340006)

作者简介: 赵星婕 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋岩土工程和桩基础研究。E-mail: 1243725868@qq.com

通讯作者: 谢立全 (1972—), 男, 博士, 教授, 从事近海和海洋岩土工程的教学和科研。E-mail: xie_liquan@tongji.edu.cn

特性的研究在我国也引起了大量学者的关注,但多集中于承受抗拔力^[8-9]的螺旋桩,大多采用理论计算、数值分析、模型试验及实际工程观测等方法进行研究。刘兵科^[10]、董天文等^[11-13]对螺旋钢桩进行了较为系统的理论研究和试验研究,提出了螺旋钢桩在抗拔和抗压条件下承载力的计算方法。并通过试验,改变桩的若干几何参数,探究其对承载力的影响,但由于试验试桩数量有限,所以涉及桩的几何参数不够全面。

本文依托河北省唐山乐亭菩提岛海上风电场示范项目 300 MW 工程,针对其 220 kV 电缆排管不均匀沉降控制的螺旋桩承载力因素,结合实验室模型实验土体深度条件,通过改变螺旋板叶片宽度、叶片个数、叶片间距、埋深,探究极限抗压承载力的变化规律。

1 有限元模型建立

工程中的电缆排管建设于海岸软土之上,可按照弹性地基梁法计算其排管基底应力。为了控制排管基底应力及不均匀沉降的发生,在排管沿线间隔布置螺旋桩加固,降低基础承载应力。每个加固点,均采用排管两侧加设螺旋桩 $\Phi 114$ mm,按照双桩承载 100 kN 设计。螺旋桩进行了外侧桩壁的防锈处理,并在安装结束后进行混凝土注浆处理,提升桩体承载性能。下面仅对螺旋桩的结构设计参数优化进行数值分析。

根据叶片式螺旋桩抗压承载机理,桩径、叶片宽度、叶片个数和叶片间距等对其极限抗压承载力都有影响(图1),螺旋桩的结构参数主要包括桩体埋深 L 、桩体直径 d 、螺旋板叶片外径 D 、螺旋板叶片螺距 s 、叶片宽度 $(D-d)/2$ 。下面应用商业岩土软件 ABAQUS,模拟螺旋桩在不同桩型参数下的荷载—沉降曲线(以下简称 $q-s$ 曲线),分析极限抗压承载力,进而优化桩型参数。

基于通用有限元软件 ABAQUS 建立桩—土相互作用的计算模型,利用对称性建立长方体三维模型,总体建模原则是,桩体直径 114 mm,计算土体范围(即正方形边长)为桩径的 10 倍,土体深度是桩长的 2 倍以上。下面简述模型建立与计算过程。

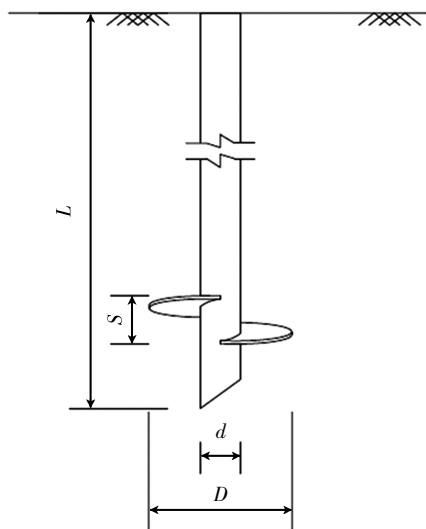


图1 螺旋桩参数示意图

(1) 模型单元划分情况

桩和土体采用实体单元 C3D10,单元划分如图2所示。

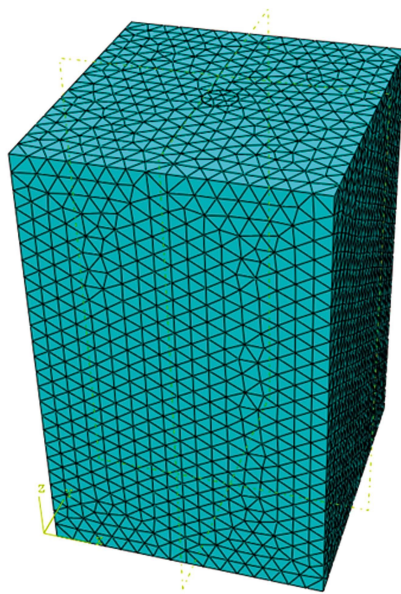


图2 桩—土装配模型整体布局图

(2) 材料属性

土体本构模型采用莫尔—库仑模型,杨氏模量为 50 MPa,泊松比为 0.4;通过前期对螺旋桩模型进行多次试算,得到合适的螺旋桩弹性模量为 20 GPa,泊松比为 0.2。

(3) 模型边界条件

边界条件除顶面取为自由边界外,其他面均采取法向约束。桩—土之间的接触采用粘结材料强度

破坏和刚度衰减的粘结接触模型, 接触面刚度系数为 $100 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

(4) 计算步骤

模拟螺旋桩静载试验的受力过程如下。

① 地应力平衡 (模拟土体原始状态)。去掉模型中的桩, 仅对土体进行自平衡分析, 对桩—土接触面 (侧面和底面) 施加水平位移约束, 再对整个土体施加自重荷载, 然后用软件自带的 Geostatic 进行土体自应力平衡计算, 自平衡收敛条件为土体的位移要小于 10^{-5} m 。自应力平衡后土体位移为 10^{-13} m 左右。

② 桩土接触计算 (模拟成桩后土体对桩的荷载作用)。在模型中加入桩, 放开第一步对桩与土的接触面 (桩侧和桩底), 使桩土接触, 土体的荷载施加到桩上, 同时计入桩自重的影响。

③ 桩顶施加位移荷载 (模拟桩试验加载下沉状态), 直至桩顶向下 0.05 m 位移。

2 螺旋桩的受力特性分析

通过数值模拟, 数据分析可得螺旋单桩的承受 $q-s$ 曲线。为研究各种桩型的几何参数对螺旋桩极限承载力的影响, 根据 $q-s$ 曲线确定桩的极限承载力就显得尤为重要。现行桩基规范和基桩检测规范对于静载试桩承载力的确定有明确规定, 参考相关文献, 归纳起来主要有第二拐点法、切线交会法、沉降速率法、 $s-lgq$ 曲线法^[4]。本次模拟得到 $q-s$ 曲线均为陡降型 $q-s$ 曲线^[5], 可以采用第二拐点法判断最大承载力。下面分别改变叶片宽度、叶片个数、叶片间距, 探究其对螺旋桩极限抗压承载力的影响。

2.1 不同叶片宽度的螺旋桩桩顶 $q-s$ 曲线

选取单叶片桩, 桩体埋深 0.7 m (以下计算工况均采用此埋深条件), 桩径取 114 mm , 螺距取 100 mm , 螺旋板叶片宽度分别取 70 mm 、 90 mm 、 105 mm 、 115 mm 、 125 mm 、 135 mm 进行对比, 叶片距离桩底 114 mm , 计算得到的承受荷载—沉降曲线如图 3 所示。

根据第二拐点法, 可以得出叶片宽度从小到大分别对应的最大承载力分别为 30 kN 、 40 kN 、 45 kN 、

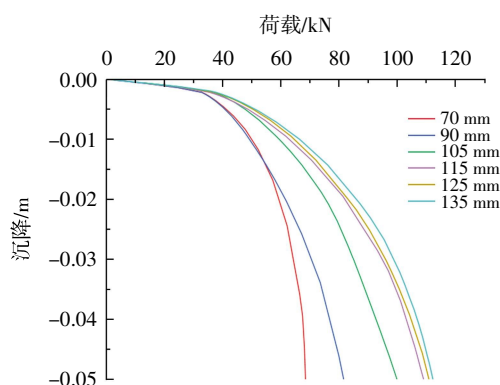


图3 不同螺旋叶片宽度条件下的螺旋桩承受荷载—沉降曲线

50 kN 、 60 kN 、 65 kN 、 70 kN 。同时, 达到限制的 -0.05 m 位移加载时, 叶片宽度从小到大所对应的破坏荷载也是越来越大。可以看出, 在叶片个数和桩径不变的条件下, 随着叶片宽度增大, 螺旋桩的抗压承载力提高, 但当叶片宽度超过 115 mm 时, 承载力提升效果不明显。

但值得注意的是, 如果叶片宽度过大, 叶片与周围土体的接触面积会随之增大, 安装时需要的扭矩也较大, 提高了安装成本; 且叶片与桩身连接处的弯矩过大, 加载时焊接处容易脱开, 导致螺旋桩在达到极限承载力之前, 桩身连接处破坏, 叶片失效。所以, 在桩型选择时, 应注意结合现场实际, 选取合适的叶片宽度。

2.2 不同叶片个数的螺旋桩桩顶 $q-s$ 曲线

选取桩径 114 mm , 螺旋板叶片宽度 90 mm , 螺距 100 mm 的单、双叶片螺旋桩, 其中双叶片间距为 125 mm , 下部叶片都距离桩底 114 mm , 双叶片螺旋桩模型如图 4 所示。

计算得到承受荷载—沉降对比曲线如图 5 所示。单叶片螺旋桩承载力为 30 kN , 双叶片螺旋桩承载力为 90 kN , 承载力明显大大提高, 说明增加叶片可增大单桩极限承载力。

图 6 为最大位移时单叶片螺旋桩和桩周土的竖向位移云图。可以看出, 对于螺旋叶片以上的桩周土体竖向位移远小于桩体位移, 桩体与桩侧土体产生了较为明显的相对滑移, 而螺旋叶片以下的桩周土体竖向位移, 则是逐渐过渡, 桩体—土体接触面无明显突变式滑移。从螺旋叶片以下的锥形土体位移模式可见, 螺旋桩竖向承载力的很大一部分由螺

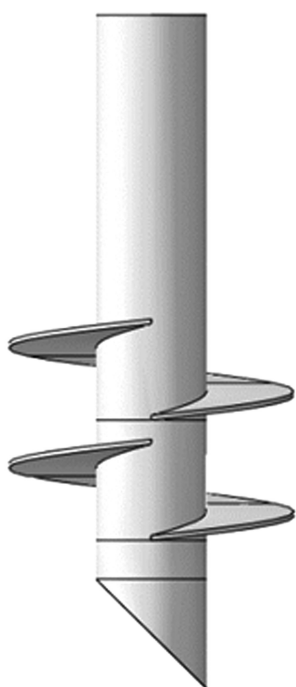


图4 双叶片螺旋桩模型

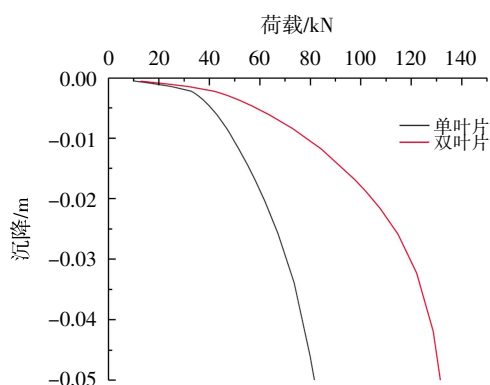


图5 不同叶片个数条件下的螺旋桩承受荷载—沉降曲线

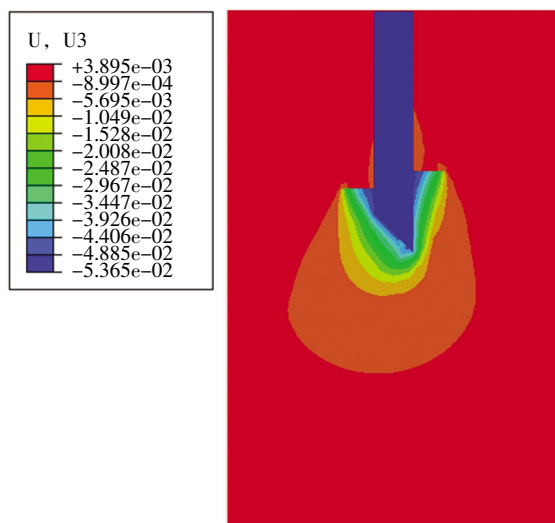


图6 单叶片螺旋桩竖向位移云图

旋叶片—桩底—土体共同承担,且优于普通桩(无螺旋叶片)的承载模式。

图7为最大位移时双叶片螺旋桩和桩周土的竖向位移云图。螺旋桩螺旋叶片间土体在螺旋叶片的带动下向下产生较大的位移,而螺旋叶片外的土体竖向位移明显小于螺旋叶片间的土体,说明二者产生了较大的相对位移,螺旋叶片间土体和螺旋叶片外土体发生相对位移而产生的抗剪力则提供了螺旋桩桩侧承载力。同时,螺旋叶片间部分土体和桩体的竖向位移大致相近,即螺旋叶片带动叶片间的土体与桩身共同发生位移,表明双叶片螺旋桩能够更好地将桩顶荷载传递至桩周土体,从而更充分地发挥桩周土体的承载能力。

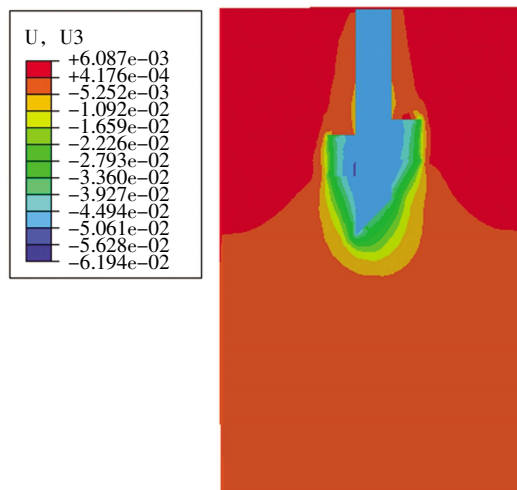


图7 双叶片螺旋桩竖向位移云图

总的来说,在单盘承载破坏模式下,增加叶片个数可以提高桩的端阻力;在柱状剪切模式下,增加叶片个数意味着增大叶片之间桩径,从而提高了桩侧摩阻力。无论是哪种模式,增加叶片个数都是可以明显提高桩的极限抗压承载力的。

2.3 不同叶片间距的螺旋桩桩顶 $q-s$ 曲线

取双叶片螺旋桩,桩径为114 mm,螺旋板叶片宽度取90 mm,叶片间距分别取100 mm、150 mm、200 mm、250 mm、300 mm、350 mm,下部叶片距离桩底114 mm,计算得到的桩基荷载—沉降曲线如图8所示。

随着叶片间距的增大,螺旋桩极限抗压承载力整体呈现先增大后减小的趋势。当叶片间距在100~250 mm时承载力增长较快,并在叶片间距

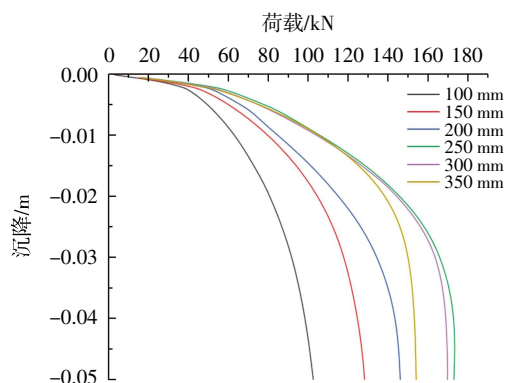


图8 不同叶片间距条件下的螺旋桩承受荷载—沉降曲线

250~300 mm 之间可能存在最大值, 随着叶片间距继续增大, 承载力反而略有降低。这与 Chance 公司通过大量现场试验得到的结论相同, 即对于分层式叶片桩, 当螺旋板叶片间距大约为叶片宽度的 3 倍时, 桩的承载力达到最大。

叶片间距可以影响螺旋桩的承载破坏模式, 进而影响其极限抗压承载力。以 100 mm、175 mm 的叶片间距为例, 桩—土竖向位移云图如图 9 和图 10 所示。叶片间距较小时, 螺旋桩呈柱状剪切破坏模式, 叶片间会形成土柱, 并且随着叶片间距的增加, 螺旋桩底部土柱的厚度也会随之增大, 从而桩侧阻力增加较多, 使得桩的承载力增大。

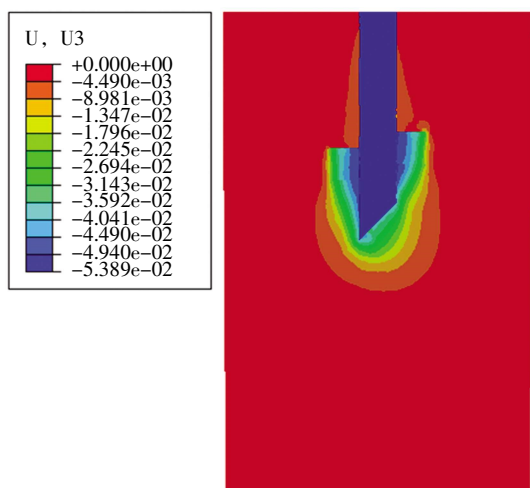


图9 双叶片螺旋桩竖向位移云图 (100 mm 叶片间距)

以 200 mm、350 mm 的叶片间距进行对比, 桩—土竖向位移云图如图 11 和图 12 所示。从图中可以看出, 当叶片间距较大, 即叶片间距大于 300 mm 时, 螺旋桩呈单盘承载破坏模式, 叶片单独受力, 叶片中间无法形成土柱, 故这部分侧阻力

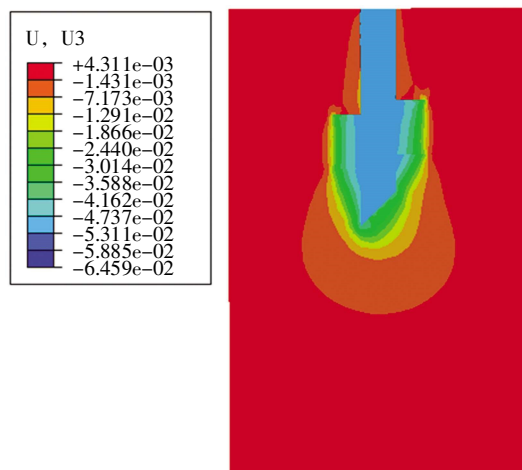


图10 双叶片螺旋桩竖向位移云图 (175 mm 叶片间距)

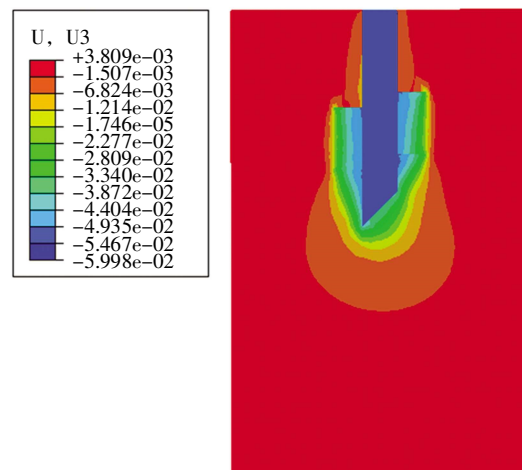


图11 双叶片螺旋桩竖向位移云图 (200 mm 叶片间距)

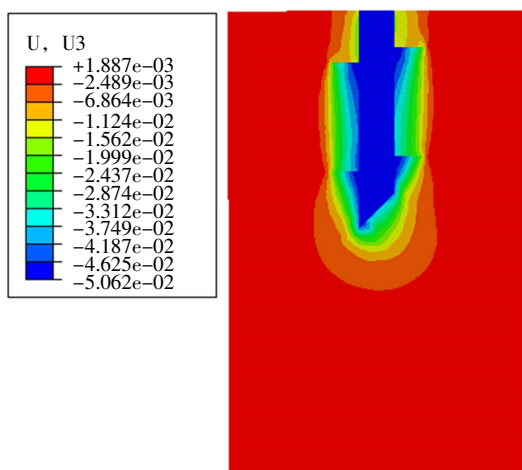


图12 双叶片螺旋桩竖向位移云图 (350 mm 叶片间距)

不对承载力直接发挥作用, 大多忽略不计。因此在此范围内, 随着叶片间距的增加, 端承力不变, 但侧阻力减小, 所以桩的承载力略有下降。

由此可知,当叶片间距较小时,可通过增大叶片间距来提高承载力;同时为了使双叶片螺旋桩达到较大承载力,在螺旋板宽度为 90 mm 的条件下,叶片间距取在 250~300 mm 之间较为合适。

2.4 不同桩体埋深的螺旋桩桩顶 q - s 曲线

上述模拟工况,桩体埋深较小,随着埋深增加,其承载性能会发生变化。下面取单叶片螺旋桩,桩径为 114 mm,螺旋板叶片宽度取 90 mm,桩体埋深分别取 0.6 m、0.7 m、0.8 m、0.9 m、1 m,下部叶片距离桩底 114 mm,计算得到的桩基荷载—沉降曲线如图 13 所示。

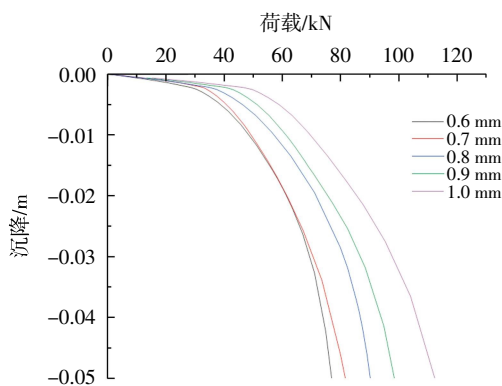


图 13 不同桩体埋深条件下的螺旋桩承受荷载—沉降曲线

从图 13 可以看出桩体埋深对控制桩基的沉降变形能力较为明显。随着荷载的增大,桩的沉降均越来越大,其中桩体埋深最浅的桩沉降速率最快,桩体埋深最深的桩沉降速率最慢。另外,不同桩体埋深的桩基,其 q - s 曲线的拐点也不一。桩体埋深为 0.6 m 时,桩的拐点出现在 50 kN 附近,而桩体埋深为 1.0 m 时,桩的拐点出现在 80 kN 附近。故增加桩体埋深是增大单桩承载力的直接有效手段,这在经济上也是合理的。

3 数值模拟结果的试验验证

为了进一步验证本文模型及计算结果,进行室内的抗压承载力试验,实验装置布置如图 14 所示。圆形的土箱选用 Q345 钢板,板厚为 3.5 mm,土箱顶面不封闭,内空直径 600 mm,高度 700 mm。

试验土体为上海软土,土样采用负载—反压法进行制样并饱和,土体密度 1850 kg/m^3 。试验用螺旋钢桩的尺寸为:桩径 114 mm,叶片宽度 90 mm,

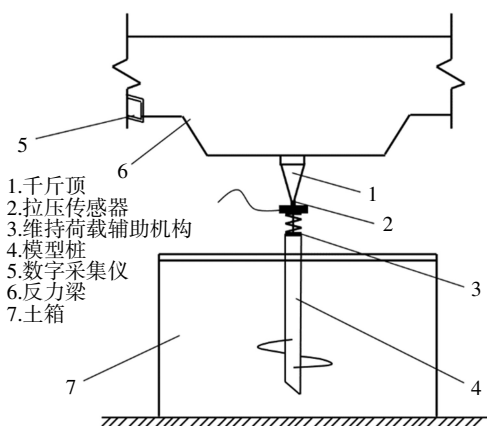


图 14 实验装置图

螺距为 130 mm。土的物理特性指标为:比重 $G_s = 2.72$,粘聚力 $c = 41 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\phi = 19.5^\circ$ 。

通过室内试验和数值模拟结果的对比,可分别得到试验和模拟的 q - s 对比曲线,具体对比结果如图 15 所示。

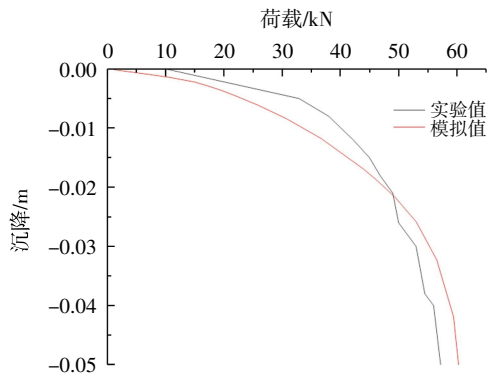


图 15 荷载—沉降曲线模拟值与实测值对比验证

从图 15 对比发现,模拟值和实测值符合较好,用切线相交法判定桩的极限抗压承载力,试验得到的极限承载力为 37 kN 左右,而数模得到的极限承载力为 40 kN 左右,相差在 3 kN 左右,这说明本模型较为符合实际情况,本文数值模拟方法具有一定的可靠性。比较其差别,可见试验中的螺旋桩入土深度小于 700 mm,土层深度也是有限的,这也使得极限承载力存在差异,而且沉降模式也不尽相同,试验中的沉降速率更大。

4 结论

本文基于试验与数值模拟的对比验证,并在系列数值模拟基础上,对较低埋深螺旋桩的承载特性

进行了研究,结果可为工程应用提供了技术指导。分析研究结果,可得如下结论。

(1) 相同叶片个数、桩径条件下,随着叶片宽度的增大,螺旋桩的抗压承载力增大。但受到实际施工安装等情况的限制,叶片宽度越来越大时,抗压承载力难以得到明显提高。

(2) 螺旋叶片的个数从单叶片到双叶片,螺旋桩极限抗压承载力明显增大。

(3) 螺旋叶片的布置间距直接影响螺旋桩的承载破坏模式,进而影响其极限抗压承载力。随着叶片布置间距的增大,螺旋桩极限抗压承载力整体呈先增大后减小的趋势。并且,叶片间距大约为叶片

宽度的3倍时,桩的承载力达到最大。

(4) 随着螺旋桩埋深的增大,桩基极限抗压承载力也明显增加。增加桩体埋深是增大单桩承载力的有效手段。

电缆排管加固的工程现场,鉴于施工条件的限制,螺旋桩采用了单叶片螺旋钢桩 $\Phi 114$ mm。埋深越大则安装扭矩要求也越大,土体强度越高则安装埋深就越小,总体上看,埋深在15倍桩径以上,承载力满足设计要求。承载力影响因素及其规律也是非常复杂,本文仅限于一种土质条件,并基于实验室结果进行验证,尚缺乏工程现场的实测数据验证,还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 张新春,何泽群,董思捷,等.砂土中钢管螺旋桩安装扭矩的研究[J].中国工程机械学报,2019,17(5):391-396.
- [2] ADAMS J I, KLYM T W. A study of anchorages for transmission tower foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1972, 9(1): 89-104.
- [3] DILLEY L, HULSE L. Foundation design of wind turbines in Southwestern Alaska, a case study [C]//In: Proceedings of the Arctic energy summit. Anchorage, Alaska: Institute of the North, 2007: 15-18.
- [4] HAWKINS K, THORSTEN R. Load test results: large diameter helical pipe piles[C]//In: Proceedings of the 2009 international foundation congress and equipment expo. New York: American Society of Civil Engineers, 2009: 488-495.
- [5] SAKR M. Performance of helical piles in oil sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(9): 1046-1061.
- [6] ZHANG D. Predicting capacity of helical screw piles in Alberta soils[D]. Edmonton: University of Alberta, 1999.
- [7] CHANCE CO A B. Helical pier foundation systems[R]. Centralia USA: Hubbell Inc, 2000.
- [8] MEYERHOF G, ADAMS J I. The Ultimate Uplift Capacity of Foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1968, 5(4): 224-244.
- [9] GHALY A M, HANNA A, HANNA M. Uplift behaviour of screw anchors in sand. I: dry sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(5): 773-793.
- [10] 刘兵科. 叶片式钢管螺旋桩试验研究及桩型参数优化[J]. 施工技术, 2019, 48(4): 93-97.
- [11] 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, 28(11): 2031-2034.
- [12] 董天文,梁力,王炜,等. 抗拔螺旋桩叶片与地基相互作用试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(8): 150-155.
- [13] 董天文,梁力. 竖向受压螺旋桩荷载沉降函数解[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1483-1487.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: 第5部分 桩基竖向承载力计算: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 4.
- [15] 孟晓伟,翟恩地,许成顺. $p-y$ 曲线对成层土体中大直径单桩的适用性研究[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(2): 105-112.

Study on Axial Bearing Capacity of Helix Piles on the Muddy Coast

ZHAO Xingjie¹, WANG Zhongdai², WU Weiqiang³, XIE Liquan¹

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. HECIC Offshore Wind Power Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

Abstract: When the high-voltage cables of offshore wind power are installed crossing the plain and muddy coast, the concrete duct for high-voltage cables tends to crack due to uneven settlement. Helix piles can be used for emergency control of uneven settlement because of its convenient construction and fast installation. The bearing capacity of helix pile is an important design content of its engineering application, and the change of pile type parameters has a great impact on its ultimate compressive bearing capacity. Therefore, combined with engineering practice, using finite element analysis, this paper studies and analyzes the effects of blade width, number of blades, blade spacing and buried depth of helix pile on the axial bearing capacity. The results show that: Increasing the width of helix plate blade can improve the ultimate compressive bearing capacity of helix pile; The bearing capacity of double blade helix pile is obviously higher than that of single blade; With the increase of blade spacing of helix plate, the ultimate compressive bearing capacity of helix pile increases first and then decreases. With the increase of pile depth, the ultimate compressive bearing capacity of pile foundation increases obviously.

Key words: muddy coast; helix pile; ABAQUS; q - s curve; ultimate capacity