

引文格式:朱彦鹏,张辉,王雪浪,等.新型叶片式螺旋钢管桩极限承载性能研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(2):180-189.
ZHU Yanpeng, ZHANG Hui, WANG Xuelang, et al. Study on ultimate bearing capacity of new type of blade-type spiral steel pipe pile[J].
Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(2): 180-189.

DOI:10.19815/j.jace.2023.07073

新型叶片式螺旋钢管桩极限承载性能研究

朱彦鹏^{1,2},张辉^{1,2},王雪浪³,朱嘉辉^{1,2},黄安平^{1,2},张兴旺^{1,2},王澳^{1,2}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部
工程研究中心,甘肃 兰州 730050; 3. 兰州理工大学 建筑与设计艺术学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:针对传统叶片式螺旋钢管桩在承载力方面的局限性,通过改良其几何结构,提出了一种叶片直径递变的新叶片式螺旋钢管桩以提升其极限承载力。进行了6组抗压试验和6组抗拔试验,每组抗压试验包含1根桩,每组抗拔试验包含2根桩,以研究叶片间距和叶片直径递变对螺旋钢管桩承载力的影响;利用ABAQUS数值模拟软件建立模型,并与实测数据进行对比,以验证模型的精确性和准确性。通过对比现场试验结果与数值模拟结果,分析改良后的新叶片式螺旋钢管桩在极限承载力方面的提升效果。结果表明:叶片参数的改变对螺旋钢管桩的承载力具有显著影响,叶片直径的递变与螺旋钢管桩的极限承载力呈正相关关系,即叶片直径的适当增加能够显著提升桩的承载力;叶片间距决定着螺旋钢管桩的承载模式,叶片间距改变同样会对桩的极限承载力产生影响;在用钢量相同的情况下,新叶片式螺旋钢管桩的抗压承载力相比传统螺旋钢管桩提升了约28%,抗拔承载力提升了约13%;验证了ABAQUS数值模拟软件在新叶片式螺旋钢管桩承载力分析中的可行性,也进一步证明了该桩型在村镇住宅承载力不均匀地基中应用的可靠性。

关键词:新叶片式螺旋钢管桩;极限承载力;现场试验;数值模拟;叶片参数

中图分类号:TU473

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)02-0180-10

Study on ultimate bearing capacity of new type of blade-type spiral steel pipe pile

ZHU Yanpeng^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, WANG Xuelang³, ZHU Jiahui^{1,2}, HAUNG Anping^{1,2},
ZHANG Xingwang^{1,2}, WANG Ao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of
Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. School of
Architecture and Art Design, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In view of the limitations of traditional blade-type spiral steel pipe piles in terms of bearing capacity, a new type of blade-type spiral steel pipe pile with gradually changing blade diameter was proposed by improving its geometric structure to enhance its ultimate bearing capacity. Six sets of compressive tests and six sets of tensile tests were conducted, with one pile in each set of compressive tests and two piles in each set of tensile tests, to study the influence of

收稿日期:2023-07-22

投稿网址:<http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(51978321);教育部长江学者和创新团队支持计划项目(IRT_17R51)

作者简介:朱彦鹏(1960-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:zhuyp1@163.com。

通信作者:王雪浪(1973-),男,工学博士,教授,E-mail:394605975@qq.com。

blade spacing and blade diameter variation on the bearing capacity of spiral steel pipe piles. A model was established by using numerical simulation software ABAQUS and compared with measured data to verify the accuracy and precision of the model. By comparing on-site test results with numerical simulation results, the improvement effect of the new blade-type spiral steel pipe pile on the ultimate bearing capacity was analyzed. The results show that the change of blade parameters has a significant impact on the bearing capacity of spiral steel pipe piles. The gradual variation of blade diameter is positively correlated with the ultimate bearing capacity of spiral steel pipe piles, that is, an appropriate increase in blade diameter can significantly improve the bearing capacity of piles. The blade spacing determines the bearing mode of spiral steel pipe piles, and any changes in it will also affect the ultimate bearing capacity of the piles. Under the same amount of steel used, compared with traditional spiral steel pipe piles, the compressive bearing capacity of the new blade-type spiral steel pipe pile is increased by about 28%, and the tensile bearing capacity is increased by about 13%. The feasibility of using ABAQUS numerical simulation software in the analysis of the bearing capacity of the new type of blade-type spiral steel pipe pile is verified, and the reliability of this pile type in the uneven bearing capacity foundation of rural residential buildings is further demonstrated.

Key words: new type of blade-type spiral steel pipe pile; ultimate bearing capacity; on-site test; numerical simulation; blade parameter

Author resumes: ZHU Yanpeng (1960-), male, PhD, professor, E-mail: zhuyp1@163.com; WANG Xuelang (1973-), male, PhD, professor, E-mail: 394605975@qq.com.

0 引言

叶片式螺旋钢管桩通过在桩身增加叶片来提高抗压、抗拔承载力,可实现多角度安装(水平安装、竖直安装或任意角度安装),具有施工快、可回收利用、环保经济等功能性优点^[1-2]。因此,叶片式螺旋钢管桩具有广泛的发展前景。

相比传统等叶片直径的螺旋钢管桩,新型叶片式螺旋钢管桩是更为复杂的桩体,几何参数的改变对桩体极限承载力的影响明显,因此影响特征与机理相对于传统等直径叶片式螺旋钢管桩也更为复杂。叶片式螺旋钢管桩是 19 世纪中后期的工程发明,1833 年米歇尔在伦敦申请专利,首次提出螺旋钢管桩^[3]。1961 年 Balla 在进行理论计算时给出了螺旋桩叶片抗拔土壤滑移面形状,并将其近似为圆形,研究发现该模型抗拔能力受桩体及土壤质量和沿曲面表面土体摩擦力共同影响^[4]。该理论公式是基于土体滑移理论公式建立的,但螺旋锚土体滑移模型准确度有待提高。1967 年 Adams 针对螺旋桩的旋桩阶段扭矩与螺旋桩抗拔力之间的关系进行了试验研究,并由此给出了一种桩体抗拔力的承载力公式^[5]。该公式受到土体材质、旋桩条件和桩型尺寸影响较大,并不能给出精确解。目前已有很多研

究对轴径 d 大于 150 mm 的单螺旋钢管桩进行了大量轴向现场荷载试验^[6-10]。

螺旋钢管桩的承载性能很大程度上取决于桩型参数与地基强度。Chance 公司通过大量现场试验研究了不同桩型参数对桩的承载力影响,结果表明,对于分层式叶片桩,当螺旋钢管桩叶片间距大约为叶片直径的 3 倍时,桩的承载力达到最大值^[11]。螺旋间距比(螺距 S 与桩径 D 之比)是影响叶片式螺旋钢管桩最终地基破坏模式的关键桩型参数。基于文献[12]的简单分析模型,文献[13]采用透明土壤和激光辅助 PIV 等方式来研究叶片间距比 S/D 在 1.5~3.0 范围内的螺旋钢管桩破坏机理。文献[14]通过砂箱试验,对相似地质条件下螺旋钢管桩与直桩的端部承载力进行对比分析。研究发现,在类似的桩尖面积和接地条件下,具有单螺旋的小型螺旋桩极限承载力平均比直管桩低 16.25%。基于试验结果对传统螺旋钢管桩桩端承载力计算公式进行修正折减。螺旋钢管桩极限承载力的研究在中国引起了大量学者的关注,目前学者大多采用理论计算、数值分析、模型试验及实际工程观测等方法进行研究。董天文等^[15-18]对螺旋钢管桩进行了较为系统的理论研究和试验研究,提出了螺旋钢管桩在抗压和抗拔条件下承载力的计算方法;通过改变桩的若

干几何参数,探究其对承载力的影响,但由于试验试桩数量不足,所以涉及桩的几何参数不够完整。

目前传统叶片式螺旋钢管桩普遍为等叶片大小及等间距设计。针对村镇建筑物基础建设中,地基表层中存在杂填土的影响导致地基承载力不均匀的情况,本文设计 6 种新型叶片式螺旋钢管桩,通过静载试验研究叶片间距、叶片直径等叶片参数对新型叶片式螺旋钢管桩极限承载力的影响。本研究可为新型叶片式螺旋钢管桩在地基承载力不均匀的村镇建筑物建设中的应用提供数据支持和理论依据。

1 新型叶片式螺旋钢管桩试验

1.1 试验概况

试验场地位于甘肃省兰州市七里河区彭家坪镇,试验地貌单元属于黄河南岸高级阶地,勘察期间场地地形南高北低,地面标高 1 596.34~1 597.89 m。场地原先为耕地,上部土层为耕植土或杂填土,原状土层为风积黄土,地基承载能力较差,土质多孔疏松。因此试验前向下开挖 1 m,挖去表层杂填土,杂填土层厚剩余 1.2 m,开挖面积 10.0 m×10.0 m,试桩间距为 1.5 m,剩余场地为挖机作业空间,现场开挖与试桩布置如图 1 所示。场地土层自上而下依次分布为:主要由粉质黏土组成的填土层,层厚约为 2.2 m;含白色钙质条纹的黄土状粉土层,层厚约为 2.2 m,含铁锈色条纹的粉质黏土,层厚约为 2.6 m;含石英长石、云母、粉质黏土的粉细砂层,层厚约为 1.9 m。叶片式螺旋钢管桩现场承载力试验中桩型对比试验分 6 组,每组 3 根,试桩总数 18 根,试桩的螺距 P (相邻两个螺旋线在中径线上对应两点间的轴向距离)均为 102 mm。试验所采用的螺旋钢管桩见图 2。

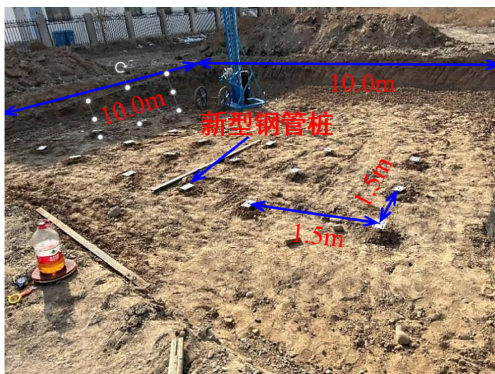


图 1 现场开挖与试桩布置

Fig. 1 Site excavation and test pile layout

1.2 土体参数

工程现场挖取试样,根据《土工试验方法标准》



图 2 试桩成品

Fig. 2 Finished test pile

(GB/T 50123—2019)开展室内土工试验,确定土层物理力学参数(表 1)。

表 1 现场土层的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of on-site soil layers

土层类型	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	土层厚 度/m
杂填土	16.30	4	0.2	10.32	15.30	1.2
黄土状粉土	17.20	10	0.4	15.00	25.24	2.0

1.3 桩型参数

按照试验内容要求,本次试验所用试桩均为厂家提前加工定制。所有试桩桩长 L (桩尖至桩顶的长度)为 1.6 m,桩径 d (钢管部分的直径)为 60 mm,叶片直径 D (叶片外径)有 200、150、250 mm 三种,螺距 P 均为 102 mm,材质均为 Q235B,内外进行热镀锌防锈蚀处理,桩型参数符号含义如图 3 所示,其中 H 为首层叶片埋深, S 为桩叶片间距。试桩总数量为 18 根,每组桩型制做 3 根,具体桩型参数如表 2 所示。

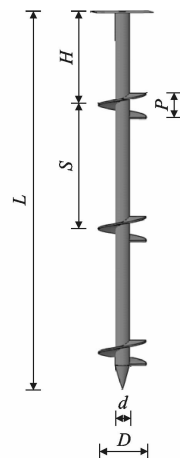


图 3 新型叶片式螺旋钢管桩参数示意图

Fig. 3 New type of blade-type spiral steel pipe pile parameter schematic diagram

表 2 桩型参数

Table 2 Pile type parameters

桩号	桩长 L/m	钢管直径 d/mm	叶片直径 D/mm			叶片数量	叶片距桩端距离 V/mm			试桩数量
			第 1 道	第 2 道	第 3 道		第 1 道	第 2 道	第 3 道	
a1	1.6	60	200	200	200	3	100	625	1 150	3
b1	1.6	60	200	200	200	3	100	550	1 150	3
a2	1.6	60	150	200	250	3	100	625	1 150	3
b2	1.6	60	150	200	250	3	100	550	1 150	3
a3	1.6	60	250	200	150	3	100	625	1 150	3
b3	1.6	60	250	200	150	3	100	700	1 150	3

1.4 现场试验

根据图 1 的试桩布置,将提前预制好的叶片式螺旋钢管桩由专业的打桩设备通过施加扭矩使试桩旋入地下。专业打桩设备如图 4 所示。



图 4 专业打桩设备

Fig. 4 Professional piling equipment

试验加载方式采用锚桩法,试验装置如图 5 所示。加载时通过对 160 kN 的油压千斤顶(显示吨位压力数值)进行加压,此时中间试桩承受向下的抗压承载力,同时两端的试桩通过钢丝绳承受向上的抗拔力,向上的抗拔力大小可由拉力计直接读出,采用量程 50.0 mm 的位移计测量试桩加载过程中的竖向变形,在试桩顶部对称安置 2 支位移计,位移量取其平均值。

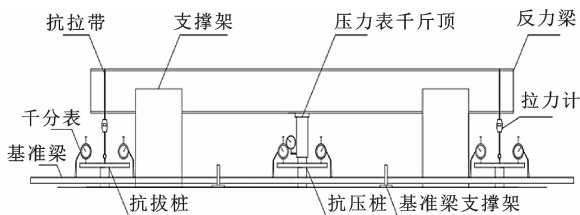


图 5 拉压试验装置

Fig. 5 Tension and compression test device

试验中采用慢速维持荷载法加载,根据估算的单桩极限承载力确定设计加载量,试验单级荷载取

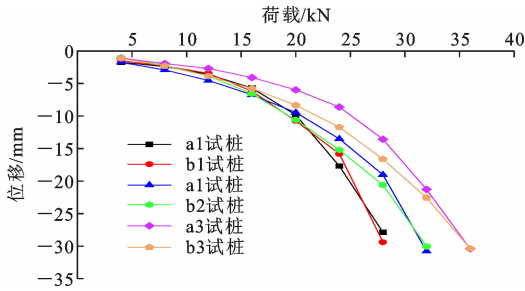
设计加载量的 1/10~1/8。桩基极限承载力判定指标包括:①施加本级荷载后桩顶位移大于前级荷载位移的 5.0 倍;②桩顶累计位移大于 30 mm;③荷载-位移曲线($Q-s$ 曲线)出现明显拐点,可终止加载^[19]。本文采用②和③两种指标进行桩基极限承载力判定。

试验结束后对试验桩进行拆除回收,并对拆桩过程进行观察。

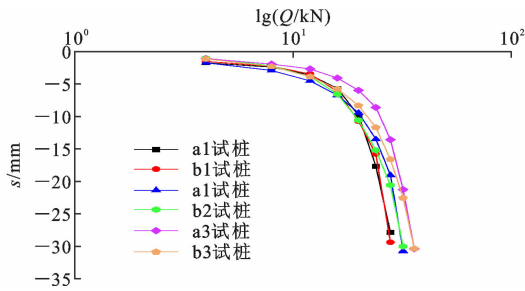
1.5 试验结果分析

1.5.1 抗压试验结果分析

将 6 种桩型抗压承载力数据整理统计,得到单桩静载试验荷载-位移($Q-s$)曲线,如图 6 所示。从图 6 可以看出:6 种桩型 $Q-s$ 曲线基本一致,但是在相同荷载情况下,a3 桩型沉降量明显小于 a2 桩型;在 30 mm 标定位移处时,a3 桩型承载力高于 a2 桩型 12.5%,高于 a1 桩型 28.6%。分析其原因是因为桩体在施工过程中叶片会对原状土体造成扰动,此时叶片下方土体是否扰动对桩的抗压承载力至关重要。对于 a1、a2、a3 三种桩型而言,直径最大叶片所处桩身位置的不同是影响 3 种桩型抗压承载力大小的关键。a3 桩型直径最大的叶片为第 1 道叶片,位于桩端位置处,此时,第 1 道叶片下方土体未造成扰动,因此第 1 道叶片的承载力可以完全发挥;a2 桩型直径最大叶片为第 3 道叶片,位于桩身上部,在施工过程中,第 2 道叶片已对原土体造成扰动,因此 a2 桩型第 3 道叶片下方土体由原状土体和扰动土体两部分组成,导致 a2 桩型的第 3 道叶片承载力不能够充分发挥;a1 桩型 3 道叶片直径相等,此时第 2 道叶片和第 3 道叶片下方土体均处于扰动状态,因此 a 类桩中 a1 桩型的抗压承载力最小。b 类桩荷载较小时,b2、b3 桩型的 $Q-s$ 曲线基本一致,当累计位移量达到标定位移 30 mm 时,b3 桩型的承载力大于 b2 桩型,出现这种结果的原因与 a 类桩相同。所有桩型曲线平滑,拐点并不明显,不容易判断极限

图6 试桩抗压 $Q-s$ 曲线Fig. 6 $Q-s$ curves of compression resistance of test piles

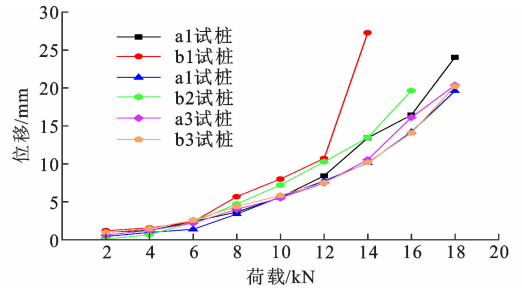
承载力,所以需要对曲线进行处理,此处选用曲线 $\lg(Q)-s$ 进行处理,结果如图7所示。从图7可以看出,a类桩与b类桩承载力从小到大依次为b1、a1、b2、a2、b3、a3。

图7 试桩抗压 $\lg(Q)-s$ 曲线Fig. 7 $\lg(Q)-s$ curves of compression resistance of test piles

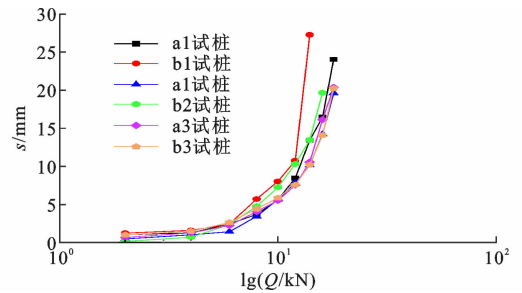
根据迈耶霍夫承载力理论,叶片周围土体滑移区为梨形破坏面,滑移线为对数螺旋线,当相邻两级叶片滑移区刚好重合时,叶片承担的承载力能发挥更充分,此时的螺距设计最为合理^[20]。由于新型叶片式螺旋钢管桩为非等直径叶片,存在叶片直径成比例增变现象,其滑移区重合点到叶片边缘连线并非垂直向径线。参考董天文等^[15]针对等直径叶片提出的叶片间距控制理论,其次对比桩型a1和b1、桩型a2和b2、桩型a3和b3两两之间的抗压承载力,发现其承载力大小为a1大于b1,a2大于b2,a3大于b3,分析其原因为变间距设计会导致叶片路径的改变,使得下一道叶片会对上一道的土体造成二次扰动,从而使承载力降低,即等叶片间距设计对于新型叶片式螺旋钢管桩在地基承载力不均匀地基中设计较为合理。

1.5.2 抗拔试验数据统计及处理

将6种桩型的抗拔承载力数据进行整理统计,得到 $Q-s$ 曲线,如图8所示。由图8可以看出:a1、b1、a2、b2、a3、b3试桩的 $Q-s$ 曲线在荷载较低时位移沉降量走势基本一致,但当荷载较大时,a2桩型位移突变,存在第二拐点,出现这种情况的原因是在

图8 试桩抗拔 $Q-s$ 曲线Fig. 8 $Q-s$ curves of uplift resistance of test piles

试验过程中因为a2桩型在首次旋入时存在位置偏差,进行位置校正导致桩周土体松动,造成试验误差。其余桩型曲线走势均平缓且平滑,第二拐点并不明显,所以需对曲线进行处理,此处选用 $\lg(Q)-s$ 曲线进行处理,结果如图9所示。

图9 试桩抗拔 $\lg(Q)-s$ 曲线Fig. 9 $\lg(Q)-s$ curves of uplift resistance of test piles

通过对比a1和b1试桩的 $Q-s$ 曲线可以发现,当螺旋钢管桩各叶片间距不相等时,对于抗压极限承载力的影响较小,但是对于抗拔极限承载力的影响十分明显。等螺距设计使得螺旋钢管桩旋桩时下级叶片旋入轨迹与上级叶片旋入轨迹重合,对土体扰动较小,所以当叶片直径相同时,变叶片间距螺旋钢管桩承载能力低于等叶片间距螺旋钢管桩承载力。a3和b3桩型的抗拔承载力相近,造成这一结果的原因为a3和b3桩型第1道叶片直径最大。越靠近地表叶片直径递减,所以第1道叶片相对于上面两道叶片来说对土体的扰动变小了,使得变叶片间距对于土体扰动的影响减小,导致其承载能力与等叶片间距差别不大。

1.5.3 拆桩分析观察

承载力试验结束后,对螺旋钢管桩进行拔出拆除工作。拆除过程中,对螺旋钢管桩拔出过程和拔出后结果进行记录分析。

拔出后螺旋钢管桩叶片间有完整的土柱面存在(图10),土体在拔出过程中为剪切破坏,此时为圆柱剪切模式。最上层叶片上并未出现完整的圆柱形



图 10 拆桩

Fig. 10 Remove piles

土柱,这也证明了最上层叶片为叶片承载模式。叶片间土体被压实(图 11)证明了螺旋钢管桩在对边坡及道路加固中可以发挥其挤土效应,是一种适用范围很广的基础形式。



(a) 叶片间土柱主视图

(b) 叶片间土柱左视图

图 11 叶片间土柱

Fig. 11 Soil column between blades

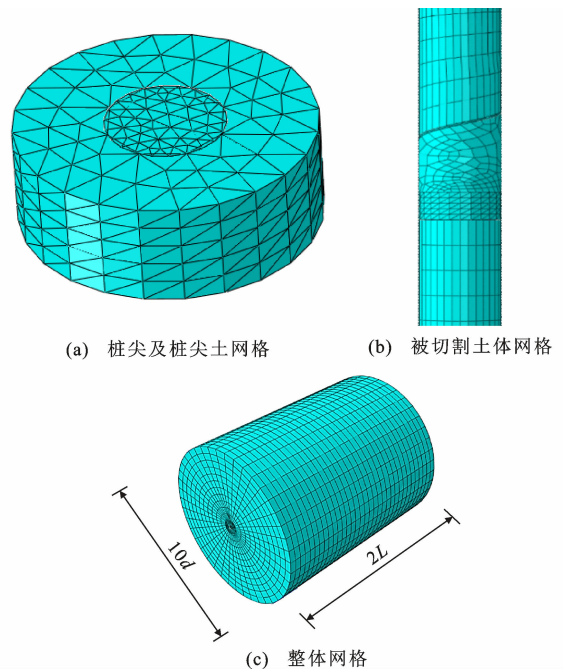
2 新型叶片式螺旋钢管桩数值模拟

基于通用数值模拟分析软件 ABAQUS 建立桩-土相互作用的计算模型。本次模拟研究采用与现场试验相同尺寸的新型叶片式螺旋钢管桩三维模型,并根据地勘报告和室内试验所得场地土体基本数据建立土体三维模型。总体建模原则是,模拟中考虑到土体边界对模拟计算结果的影响,土体深度为 2 倍桩长,土体半径为最大叶片半径的 10 倍。下面简述模型建立与计算过程。

(1) 模型单元划分

对于整个模型的网格划分是计算精度得以保证的前提。为了提高计算精度,对模型按照其形状进行区域划分来实现对桩身及土体的结构网格划分。在设置网格时,中心区域进行加密处理,对于被叶片切割土体部件网格重点加密。除桩尖及桩尖土体外,其余部件网格单元类型均为 C3D8R 单元,桩尖

及桩尖周围土体采用 C3D4 单元进行划分。因桩型不同,所以采用的网格数量也有差异,为了保证计算精度和计算速度,单元数量总体控制在 40 000 个左右。网格划分如图 12 所示。



(a) 桩尖及桩尖土网格

(b) 被切割土体网格

(c) 整体网格

图 12 新型叶片式螺旋钢管桩模型网格划分

Fig. 12 Grid division of new blade-type spiral steel pipe pile model

(2) 材料属性

土体本构模型中采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型考虑土体塑性,参数按照土工试验测得的数据取值。桩体模型赋予 Q235B 材料属性,弹性模量为 210 MPa,泊松比为 0.3。界面强度根据以往研究对土体强度进行折减,折减系数取 0.5。

(3) 荷载及模型边界条件

为平衡地应力,首先对地应力计算模型施加 -20 kN 的体力。对于土体侧向约束其水平位移,但可以发生竖向位移,因此边界条件除顶面取为自由边界外,其他面均采取法向约束。

(4) 数值模拟可靠性分析

为检验网格划分对试验结果的影响,进行不同网格划分情况下的单桩抗压数值分析试验,对比相同条件下数值分析与物理模型试验所得的 $Q-s$ 曲线。图 13 为在最优网格划分条件下的试验结果与模拟结果对比。可以看出,两条曲线较为贴合,可认为试验结果在误差允许范围内吻合度较高,所建数值分析模型可较准确反映实际承载力。因此,后续研究中均采用该网格划分标准。

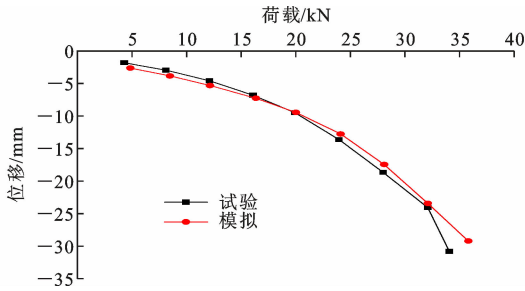


图 13 最优网格条件下数值模拟与现场试验数据对比

Fig. 13 Comparison of numerical simulation and field test data under optimal grid condition

2.1 叶片直径递变对螺旋钢管桩承载力的影响

图 14 和图 15 分别为数值模型得到的最大位移时 a1、a2 和 a3 三种桩型对应的抗压、抗拔破坏形式。可以看出,新型叶片式螺旋钢管桩螺旋叶片间土体在螺旋叶片的带动下产生较大的位移,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,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剪切阻力则提供了螺旋钢管桩桩侧承载力。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,表明三叶片新型叶片式螺旋钢管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力。从图 14 可以看出,抗压桩 a1 的破坏形式较为均匀,符合圆柱剪切破坏模式,与现场试验得到的破坏模式相符。对于抗压桩 a2、a3 的破坏形式,特别是 a2 桩型的第 1 道叶片与第 2 道叶片间土体位移很小,更加符合董天文等^[15]给出的梨形破坏模式;a3 桩型叶片直径自下而上依次递减,第 1 道叶片对土的破坏程度大于第 3 道叶片,总体破坏形式呈圆台形。随着叶片直径的递变,滑裂区扩散范围也发生改变,从图 15 可以看出抗拔桩 a1 的土体变形区域较为规则,抗拔桩 a2 越靠近地表位移区面积越大,抗拔桩 a3 桩周土体位移区呈现葫芦形破坏模式。

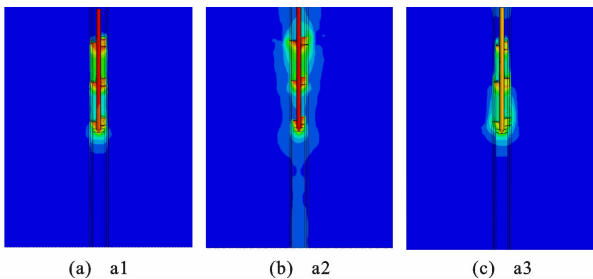


图 14 桩型 a 竖向抗压破坏形式

Fig. 14 Vertical compressive failure form of pile type a

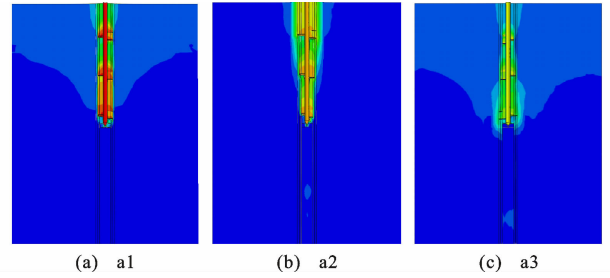


图 15 桩型 a 竖向抗拔破坏形式

Fig. 15 Vertical uplift failure form of pile type a

a1、a2、a3 三种桩型的单桩抗压和抗拔承载力随着螺旋叶片直径的变化分别如图 16、17 所示。现场试验结果与数值模拟结果表明,叶片直径的递变对于螺旋钢管桩承载力的影响较为明显,特别是叶片直径从上而下依次递增时,螺旋钢管桩承载力显著提高。a2 桩型和 a3 桩型相较于 a1 桩型抗压极限承载力分别提高了 12% 和 28%,极限抗拔承载力分别提高了 16% 和 9%。这是因为,试验场地上下土层分布不均匀,下部黄土状粉土承载能力优于上部杂填土层,所以下部叶片直径对承载力的影响更为明显。

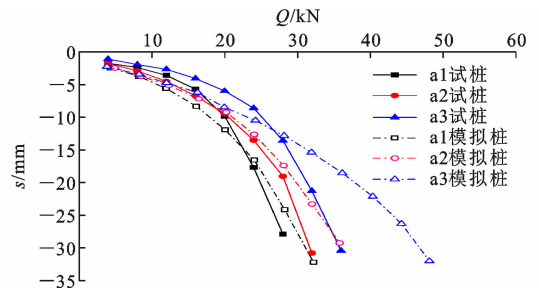


图 16 桩型 a 抗压承载力 $Q-s$ 曲线

Fig. 16 Compression bearing capacity $Q-s$ curve of pile type a

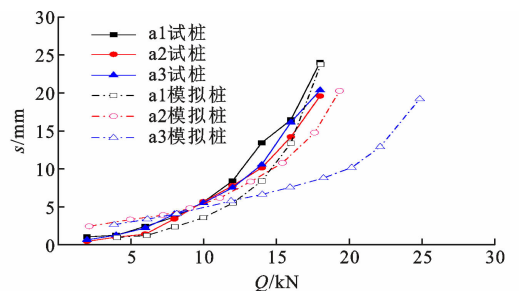


图 17 桩型 a 抗拔承载力 $Q-s$ 曲线

Fig. 17 Uplift bearing capacity $Q-s$ curve of pile type a

a1 桩型和 a2 桩型 $Q-s$ 曲线基本保持一致,但是对于 a3 桩型,模拟结果与现场试验结果差距较大。分析其原因是模拟试验并未考虑土体扰动,现场试验中 a3 桩型因下部叶片最大,对于土体扰动也最

大,导致上部叶片承载力发挥并不完全,因此试验结果与模拟结果出现较大差值,并且由图 16、17 对比发现,对其抗拔承载力的影响比对抗压承载力的影响更大。

在实际的工程应用中,针对村镇建筑物地基上层为杂填土、下层为黄土状粉土这种不均匀分布的特点,在设计螺旋钢管桩时,应采用叶片直径从上而下依次递增的设计思路,以提供更高的承载力。

2.2 叶片直径、间距对钢管桩承载力的影响

考虑到与桩型 a 进行对比,本次现场试验与数值模拟采用 b 类三叶片式螺旋钢管桩来进行对比分析,研究叶片直径 D 和叶片间距 S 逐级改变对螺旋钢管桩承载力的影响。图 18、19 分别为最大位移时 b 类桩的抗压、抗拔破坏形式。

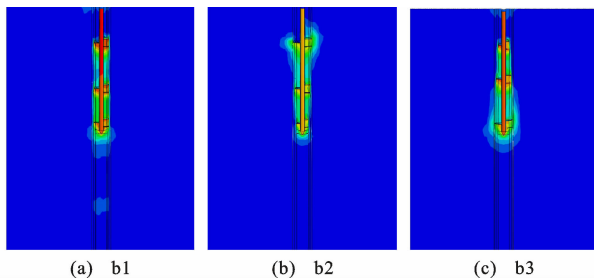


图 18 桩型 b 竖向抗压破坏形式

Fig. 18 Vertical compression failure form of pile type b

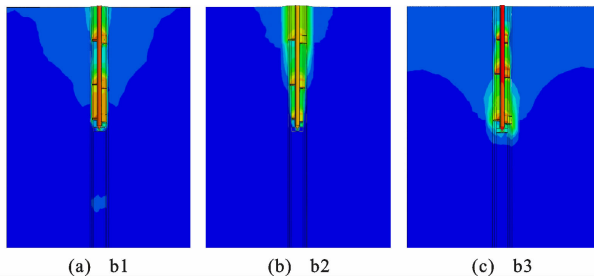


图 19 桩型 b 竖向抗拔破坏形式

Fig. 19 Vertical uplift failure form of pile type b

从图 18、19 可以看出,随着叶片间距的递变,叶片间土体共同作用区更为紧密,b2 桩型与图 15 中的 a2 桩型破坏形式对比尤为明显。从图 18 的抗压破坏形式可以看出,随着叶片间距的递变,滑裂区扩散范围也发生递变。从图 19 可以发现,第 1 道叶片与第 2 道叶片间距的扩大使得第 1 道叶片影响范围加大,因此,b3 桩型的破坏形式较 a2 桩型的破坏范围要大,这与国内研究者们关于叶片间距的研究结果相吻合。对比图 19 和图 11 可以看出,抗拔桩叶片间土体变形破坏形式的模拟结果也与现场试验结果相类似,并且地表土体位移变形范围随着第 3 道叶片直径的增大而增大。

b 类桩抗压、抗拔现场试验结果与数值模拟结果对比分别如图 20、21 所示。对比结果表明,在变叶片间距情况与等叶片间距情况下数值模拟与现场试验结果基本一致,b1 和 b2 桩型抗压极限承载力模拟结果与现场试验结果的相对误差均小于 5%,预测精度较高,但是 b3 桩型的预测精度较差,相对误差为 17%。分析其原因,与第一组试验中 a3 桩型现场试验与数值模拟结果产生误差的原因类似,均为对土体造成扰动导致现场试验承载力降低,而数值模拟无法模拟土体扰动对试验结果的影响。

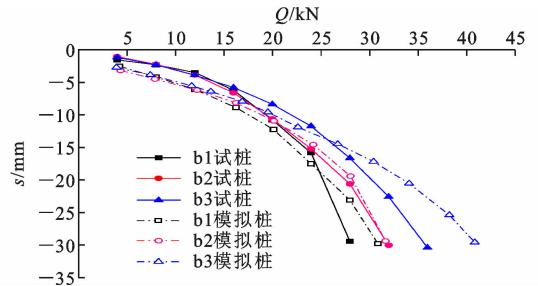


图 20 桩型 b 抗压承载力 $Q-s$ 曲线

Fig. 20 Compression bearing capacity $Q-s$ curve of pile type b

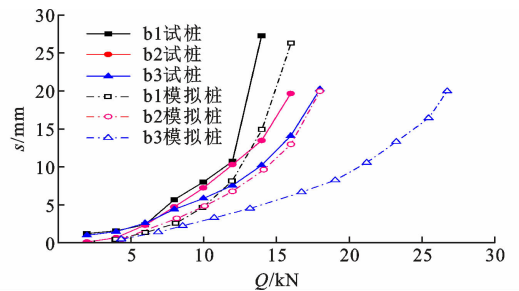


图 21 桩型 b 抗拔承载力 $Q-s$ 曲线

Fig. 21 Uplift bearing capacity $Q-s$ curve of pile type b

从图 20、21 可以看到,叶片间距的递变和直径的递增、递减都会影响钢管螺旋钢管桩的抗拔承载力。从图 21 的 a3 试桩与 a3 模拟桩抗拔承载力 $Q-s$ 曲线中发现,叶片直径自上而下依次递增时,对原土体造成的扰动更大。因此这种桩型在现场实际工程应用时,应对模拟结果考虑安全系数后再加以使用,保证上层建筑物安全性。

3 新型叶片式螺旋钢管桩承载力分析

采用拐点法和累计位移法判定螺旋钢管桩极限承载力,现场试验与数值模拟得到的抗压、抗拔极限承载力对比如表 3 和图 22、23 所示。

由表 3 和图 22 可知,a1、b1、a2、b2 四种桩型的抗压极限承载力数值模拟结果均大于现场试验结

表 3 螺旋钢管桩极限承载力结果对比

Table 3 Comparison of ultimate bearing capacity of spiral steel pipe pile

桩型	现场试验		模拟试验	
	抗压承载力/kN	抗拔承载力/kN	抗压承载力/kN	抗拔承载力/kN
a1	25.0	16.8	26.3(5.07%)	16.5(-1.80%)
b1	24.6	14.8	25.8(4.76%)	18.5(22.22%)
a2	28.0	19.0	29.2(4.20%)	23.3(20.33%)
b2	28.0	16.5	28.3(1.07%)	14.5(-12.9%)
a3	32.0	18.3	37.5(15.83%)	17.3(-5.62%)
b3	30.5	19.0	36.1(16.82%)	24.3(24.48%)

注:括号内数值为数值模拟结果与现场试验结果的差值百分比。

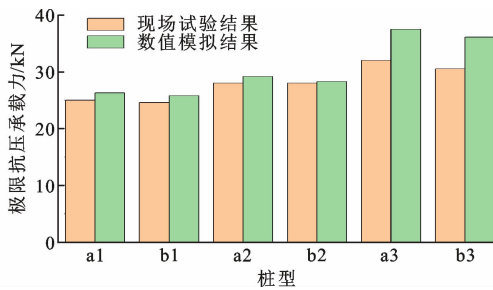


图 22 极限抗压承载力对比

Fig. 22 Comparison of ultimate compressive bearing capacity

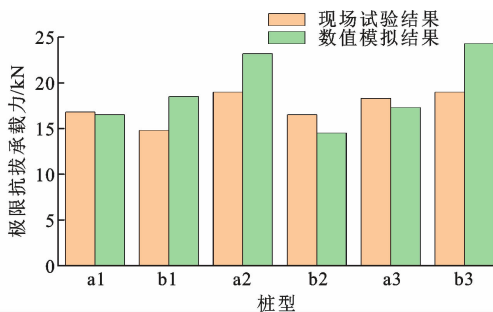


图 23 极限抗拔承载力对比

果,差值均小于 10%。对 a3、b3 桩型进行分析可以发现,模拟结果与现场试验结果有较大的差值,原因是模拟过程中没有考虑第 1 道叶片对原地基土层的扰动影响,所以模拟结果与现场试验得到的结果相比差值较大。由表 3 和图 23 可知,b1、a2、b3 三种桩型的抗拔承载力模拟结果与现场试验的差距较大。对比发现,数值模拟预测结果比现场试验结果最高超出 20%。a1、b2、a3 桩型抗拔承载力估算过低,差值均在 15% 以内。总体而言,数值模拟与现场试验结果较为一致,最大差值不超过 25%,这表明数值模拟具有较高的预测精度。因此,在村镇建筑地基设计中,可以采用数值模拟方法提前预估新

型叶片式螺旋钢管桩极限承载力。

4 结 语

(1)通过对试验结果分析可以发现,螺旋钢管桩叶片间距递变对于抗压承载力影响相对较小,而对于抗拔承载力影响较大;a3 桩型在村镇建筑物地基土层不均匀的情况下最为适合,其抗压承载力相较于 a1 桩型提升了 21%,抗拔承载力提升了 8%,用钢量仅增加 2%,承载力提升显著,造价变化不大且能快速安装,提高了施工效率。

(2)通过对试桩进行拆除可以看出,桩体拔出后叶片间土柱为剪切破坏,叶片间土体被挤压密实,证明了新型螺旋钢管桩在现场实际工程应用的可靠性。

(3)通过现场试验与数值模拟结果对比分析发现,螺旋钢管桩叶片直径与承载力为正相关关系,但叶片的增大会增强对原地基土体的扰动,使得地基承载力下降,尤其是对下部叶片直径大、上部叶片直径小的新型桩影响最为显著。

(4)各桩型的数值模拟与现场试验结果较为一致,最大差值不超过 25%,数值模拟具有较高的预测精度。因此,在村镇建筑地基设计中,可以采用数值模拟方法提前预估新型叶片式螺旋钢管桩极限承载力。

参考文献:

References:

- [1] MAHMOOD M R, SALIM N M, AL-GEZZY A A. Effect of soil saturation conditions and helical configurations on compression capacity of screw piles[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1058(1): 012031.
- [2] DEBNATH A, SINGH V P. Analysis and design methods of helical piles: a critical review with emphasis on finite element method[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(18): 1496.
- [3] 彭丽云. 叶片式钢管螺旋桩基理论与技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
PENG Liyun. Theory and technology of vane type steel pipe spiral pile foundation[M]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [4] ASFAW N T, LEI G, AZIZIAN M, et al. Field pull-out tests of percussion driven earth anchors (PDEAs) [J]. Applied Sciences, 2023, 13(4): 2132.
- [5] DAS B M. Shallow foundations: bearing capacity and settlement[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.

- [6] MUKHERJEE S, KUMAR L, CHOUDHARY A K, et al. Pullout resistance of inclined anchors embedded in geogrid reinforced sand[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(5): 1368-1379.
- [7] VANDERMEER J, MUELLER-STOFFELS M, WHITNEY E. Wind power project size and component costs: an Alaska case study[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2017, 9(6): 061703.
- [8] LI W D, ZHANG D J Y, SEGO D C, et al. Field testing of axial performance of large-diameter helical piles at two soil sites[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(3): 06017021.
- [9] BAK H M, HALABIAN A M, HASHEMOLHOSSEINI H, et al. Axial response and material efficiency of tapered helical piles[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(1): 176-187.
- [10] SHUMAN N M, KHAN S, AMINI F. Settlement based load capacity curve for single helix helical pile in $c-\phi$ soil[J]. *Soils and Foundations*, 2023, 63(1): 101265.
- [11] SPAGNOLI G, DE HOLLANDA CAVALCANTI TSUHA C. A review on the behavior of helical piles as a potential offshore foundation system[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38(9): 1013-1036.
- [12] NOWKANDEH M J, CHOBBASTI A J. Numerical study of single helical piles and helical pile groups under compressive loading in cohesive and cohesionless soils[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(5): 4001-4023.
- [13] VIGNESH V, MAYAKRISHNAN M. Design parameters and behavior of helical piles in cohesive soils-a review[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(22): 1194.
- [14] HO H M, MALIK A A, KUWANO J, et al. Experimental and numerical study on pressure distribution under screw and straight pile in dense sand[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(9): 04022139.
- [15] 董天文,梁力,王伟,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): 150-155,163.
- DONG Tianwen, LIANG Li, WANG Wei, et al. Experimental analysis on the lamina-soils interaction in pullout screw pile foundation[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(8): 150-155, 163.
- [16] 董天文,张亚军,梁力. 螺旋桩基础破坏机理与承载力设计方法[M]. 沈阳:东北大学出版社,2011.
- DONG Tianwen, ZHANG Yajun, LIANG Li. Failure mechanism and bearing capacity design method of spiral pile foundation[M]. Shenyang: Northeast University Press, 2011.
- [17] 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.
- LIU Bingke. Experimental research and parameters optimization on screw piles with steel blade[J]. *Construction Technology*, 2019, 48(4): 93-97.
- [18] 李绪勇,杨忠平,刘纲,等. 隔离式螺旋桩抗压承载与抗地基冻融特性[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(6): 1187-1196.
- LI Xuyong, YANG Zhongping, LIU Gang, et al. Characteristics of compressive bearing capacity and resistance to foundation freeze-thaw of the isolation helical pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(6): 1187-1196.
- [19] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [20] 王曙光,冯浙,唐建中,等. 竖向荷载作用下螺杆灌注桩受压承载机理的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(2): 383-389.
- WANG Shuguang, FENG Zhe, TANG Jianzhong, et al. Experimental study on bearing mechanism of screw cast-in-place piles under vertical loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(2): 383-389.