

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.091



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



密实砂土中螺旋锚的抗拔承载性能

刘光辉¹, 屈讼昭², 张博¹, 郝延周², 刘飞², 高子涵²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450001;

2. 河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467036)

摘要: 针对砂土中螺旋锚上拔失效模式临界触发机制不明及计算方法普适性不足的问题, 通过室内三轴试验、拉拔试验与数值模拟开展系统的机理研究并提出计算预测公式。基于三轴试验标定强度参数, 采用 ABAQUS 平台建立 MMC 本构模型(较 MC 模型精度提升 23%), 考虑盘径、盘数、埋深等参数, 对螺旋锚在密实砂土中的抗拔承载性能进行研究。以数值模拟结果为数据库, 通过机器学习进行结果预测, 得到影响承载力的关键参数, 并以此为变量提出新的承载力预测公式。结果表明: 多锚体系上部锚盘埋深降至深-浅临界区时, 承载力骤降 10%~15%; 锚盘数量增加引发承载力非线性衰减, 间距 $\geq 4D$ 时, 因下部锚盘贡献增强使整体承载力回升 7%; 钻入工况受挤密效应影响, 极限承载力较预埋工况提高 10%~20%; 基于修正的独立破坏模式承载力系数与圆柱剪切破坏模式侧压力系数构建的理论模型实现对密实砂土中单锚(误差 $\leq 5\%$) 极限承载力的高精度预测。

关键词: 螺旋锚; 上拔失效模式; 本构模型; 应变软化; 承载力系数; 侧压力系数

中图分类号: TU473.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-14

The pullout capacity and behavior of helical anchors in dense sand

LIU Guanghui¹, QU Songzhao², ZHANG Bo¹, HAO Yanzhou², LIU Fei², GAO Zihan²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450001, P. R. China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, Henan, P. R. China)

Abstract: Aiming at the problems of unclear critical trigger mechanism for the pull-up failure mode of helical anchors in sandy soil and insufficient universality of the calculation method, this paper conducts systematic research through indoor triaxial tests, pull-out tests and numerical simulations, simplifying the difficulty of evaluating the bearing performance of helical anchors and promoting their application in sandy soil foundations. Based on the strength parameters calibrated by triaxial tests, the MMC constitutive model was established using the ABAQUS platform (with an accuracy improvement of 23% compared to the MC model). The research

收稿日期: 2025-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(52208165); 国家电网科研项目(5500-202324543A-3-2-ZN); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2024GGJS125); 河南城建学院学术技术带头人培养项目(YCJXSJSDTR202202)

作者简介: 刘光辉(1988-), 男, 博士, 主要从事输电线路防灾减灾技术研究, E-mail: 1035896381@qq.com。

Received: 2025-06-20

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52208165); National Grid Scientific Research Project (No. 5500-202324543A-3-2-ZN); Training Program for Young Backbone Teachers in Higher Education Institutions of Henan Province (No. 2024GGJS125); Academic and Technical Leader Training Project of Henan University of Urban Construction (No. YCJXSJSDTR202202).

Author brief: LIU Guanghui (1988-), PhD, main research interests: disaster prevention and mitigation technologies for transmission lines, E-mail: 1035896381@qq.com.

results show that when the burial depth of the upper anchor disk of the multi-anchor system drops to the deep-shallow critical zone, the bearing capacity drops sharply by 10%-15%. The increase in the number of anchor discs leads to a nonlinear attenuation of bearing capacity. When the spacing is $\geq 4D$, the overall bearing capacity rebounds by 7% due to the enhanced contribution of the lower anchor discs. The ultimate bearing capacity under the drilling condition is 10%-20% higher than that under the embedded condition due to the compaction effect. Based on the modified independent failure mode bearing capacity coefficient and the lateral pressure coefficient of the cylindrical shear failure mode, the theoretical model constructed can accurately predict the ultimate bearing capacity of a single anchor (error $\leq 5\%$) in dense sandy soil, providing a universal framework for engineering design.

Keywords: helical anchors; uplift failure mode; constitutive model; strain softening; bearing capacity coefficients; lateral earth pressure coefficient

螺旋锚基础由钢质锚杆及单个或多个锚盘组成^[1]。其安装过程通过在锚杆顶部施加下压力与扭矩实现旋入,具有扰动原状土小、环境友好^[2]、设备轻便、安装高效及噪声低等优势^[3]。锚盘可提供显著承载力,其竖向承载性能优于传统桩基^[4-5],在同等承载力要求下,结构更紧凑且施工便捷,早期主要应用于软弱地基工程(如 Maplin Sands 灯塔^[6])。承载力主要由锚盘承担,通过调整锚盘数量可优化性能。目前该技术已广泛应用于海洋工程、输电线路、风力发电及光伏设施等领域^[7-10]。

学者们针对砂土中螺旋锚上拔特性开展了系统研究,其中数字图像相关技术(DIC)应用广泛。史旦达等^[11]基于 1g 离心试验与 DIC 技术,揭示了松砂中双盘锚埋深比(H/D)和间距对破坏规律的影响,建立了误差低于 25% 的承载力预测公式。林志等^[12]采用 DIC 技术阐明密砂中斜拉锚破坏机制:埋深比对位移场对称性的影响显著大于剪应变场,且埋深比增大会加剧曲线振荡。胡伟等^[13]发现荷载-位移曲线包含增长段与振荡下降段,振荡幅度随埋深增大(与林志等^[12]的结论一致);量化了埋深比对承载力突破因子 N_γ 和下盘锚发挥系数 η 的影响规律,并基于多盘锚滑动面演化提出普适力学模型。

数值模拟研究深入解析了破坏机理:郝冬雪等^[14]采用考虑应变软化的 Mohr-Coulomb 本构与 CEL 方法,建立了砂土中破坏模式、滑裂面形态与侧压力分布的预测模型。韦芳芳等^[15]研究表明:拉拔角 $< 30^\circ$ 时极限承载力呈线性增长, $H/D \geq 4$ 时承载力趋于稳定,据此建立了埋深-角度耦合计算模型。张浩等^[16]通过 FLAC3D 揭示了双锚复合桩“倒锥形+圆柱体”复合破坏模式,提出了相应的承载力公式。

还有研究综合运用多种手段阐明承载机理:Shao 等^[17]基于空腔膨胀理论建立了最优间距计算公式,与离心试验及 HST95 数值解吻合良好。

Bittar 等^[18]通过 20 组试验建立了拉拔承载力与 CPT 阻力的相关性,提出 UWASP-22 设计方法(预测误差 10%~15%)。Zhang 等^[19]基于 SPT 建立了单锚承载力经验公式,通过数据库关联了轴向承载力与标贯击数。Lin 等^[20]数值研究表明:当螺距 $\approx 0.02H$ 、盘径 ≈ 2.5 倍杆径、间距 > 2 倍盘径且盘数 ≤ 3 时单锚效率最优,但其竖向承载力较直桩无显著提升。Yuan 等^[21]基于极限平衡法建立了深埋单/多盘锚抗拔力预测模型,经离心试验验证。

尽管学者们已通过离心试验^[11,17,21]、数值模拟^[14-16,20]及理论模型^[21]等方法对螺旋锚上拔承载力预测公式开展研究,但仍有研究指出现有预测模型与实际试验结果存在偏差^[20]。同时,针对不同失效模式的临界条件的研究结果不统一,缺少公认确切的转换临界条件。为此,笔者以标准砂中螺旋锚上拔承载力为研究对象,通过三阶段研究实现理论突破:首先基于直剪与标准三轴试验精确测定不同密实度砂土的强度及变形参数;进而结合试验与数值模拟(考虑砂土应变软化本构)揭示破坏模式演化规律及其转换临界条件;最终通过大规模参数化数值分析,标定适用于独立破坏模式的承载力系数及圆柱剪切破坏模式的侧压力系数,构建普适性设计理论框架。

1 砂土性质测定

1.1 砂土密度

试验采用的土体为符合国标 ISO 要求的福建标准砂,平均粒径为 0.776 mm,不均匀系数为 1.41,泊松比 0.2。采用击实桶法测定该标准砂的干密度。根据质量控制法计算结果,标准石英砂的最小干密度 $\rho_d = 1.60 \text{ g/cm}^3$,最大干密度 $\rho_d = 1.90 \text{ g/cm}^3$,最大孔隙比为 0.952,最小孔隙比为 0.607。

1.2 砂土剪切强度

《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[22]

中规定三轴压缩试验适用土样粒径应小于 20 mm,标准石英砂粗粒一般小于 5 mm,因此适用于三轴剪切试验,可通过三轴压缩试验得到标准石英砂的三轴剪切强度及强度指标。根据测定砂土密度的范围,三轴剪切试验设置 4 级干密度,分别为 1.60、1.70、1.80、1.90 g/cm³,具体试验方案见表 1。

表 1 标准石英砂三轴试验方案

Table 1 Standard quartz sand triaxial test program			
试验分组	试样干密度 ρ_d /(g/cm ³)	试样编号	围压 σ_3 /kPa
a	1.60	1	100
a	1.60	2	200
a	1.60	3	300
b	1.70	1	100
b	1.70	2	200
b	1.70	3	300
c	1.80	1	100
c	1.80	2	200
c	1.80	3	300
d	1.90	1	100
d	1.90	2	200
d	1.90	3	300

试验试样制备严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[22]中关于三轴压缩试验砂样试样制备的要求,通过控制质量的方法将松散标准石英砂制备成尺寸为直径 $d=39.1$ mm、高 $h=80$ mm 的标准试样用于三轴剪切试验。

标准石英砂三轴剪切试验采用南京土壤仪器厂生产的 TSZ-3 型应变控制式三轴仪,采用不固结不排水剪切试验(UU),剪切速率为 0.5 mm/min,围压设置为 100、200、300 kPa。试验结束的标准为应力达到峰值或趋于稳定后轴向应变增量为 5% 左右。

标准石英砂三轴剪切强度和强度指标见表 2,三轴剪切强度随干密度的变化规律见图 1,内摩擦角随干密度的变化规律见图 2。

由表 2 和图 1 可以明显看出,随着干密度的不

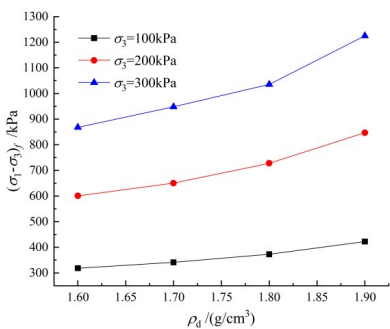


图 1 三轴剪切强度随干密度的变化曲线

Fig. 1 Variation of triaxial shear strength with dry density

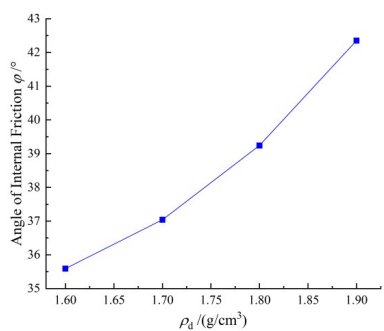


图 2 内摩擦角随砂土密度变化规律曲线

Fig. 2 Variation of internal friction angle with relative density of sand

表 2 标准石英砂三轴剪切强度和强度指标(UU)

Table 2 Triaxial shear strength and strength parameters of standard quartz sand (UU)						
土类别	干密度 ρ_d /(g/cm ³)	σ_3 /kPa	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ /kPa	c /kPa	φ /°	E /MPa
松砂	1.60	100	318.4	9.1	35.59	20
		200	600.6			
		300	867.7			
稍密砂	1.70	100	341.2	9.4	37.04	30
		200	650.2			
		300	947.9			
中密砂	1.80	100	372.8	5.9	39.24	40
		200	727.9			
		300	1 035.5			
密砂	1.90	100	422.4	4.7	42.35	50
		200	846.8			
		300	1 225.1			

断增大,同一围压条件下标准石英砂的三轴剪切强度逐渐增大,围压为 100、200、300 kPa 时, $\rho_d=1.90$ g/cm³ 对应的三轴剪切强度 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 分别是 $\rho_d=1.60$ g/cm³ 的 1.33、1.41、1.41 倍。随着围压的增大,相同干密度的标准石英砂的三轴剪切强度逐渐增大, ρ_d 为 1.60、1.70、1.80、1.90 g/cm³ 时,围压为 300 kPa 对应三轴剪切强度 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 分别是围压为 100 kPa 时的 2.73、2.78、2.78、2.90 倍。当干密度较小时,砂粒以松散形式相互搭接,呈点-点、点-线或点-面接触,此时土的结构不稳定,稍微施加振动,结构便会被破坏,标准石英砂的三轴剪切强度较小;当干密度较大时,砂粒间主要以点-面、面-面接触为主,此时的土体内部结构较稳定,标准石英砂的三轴剪切强度较大。

2 螺旋锚上拔试验研究

2.1 砂土的制备

在各类砂土制备方法中,砂雨法因其过程与砂土自然沉积过程相似,能更好地模拟砂土在天然状

态下的堆积与压实特性。这种相似性使基于砂雨法制备的砂土地基模型更贴近工程实际基础条件,为实验研究提供更精确的模拟结果。试验采用人工沙雨法进行试样制备。通过预先标定落砂速度和落砂距离,并严格控制这些参数,以提高试验结果的准确性。

标定所需主要的工具为木制标定盒子(尺寸为 $30\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 13\text{ cm}$)、落砂桶(落砂孔直径为 8 mm)等,分别对落距为 30 cm 、 40 cm 、 50 cm 的情况进行标定。最终确定试验采用落距为 50 cm ,保证制备的土样为密实砂。

试验采用砂箱尺寸为 $(2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 1.5\text{ m})$,为便于使用龙门架进行浇砂和卸砂,将砂箱分为3层,每层高 0.5 m 。由于砂箱体积较大,采用分层浇注的方式。每浇注到指定位置后对砂面进行抹平,以确保后续浇注准确无误。

2.2 加载试验

试验采用的试验装置包括模型砂箱、螺旋锚、螺旋锚灌入装置、荷载加载装置、力传感装置。

试验所用螺旋锚有3种,分别为单盘锚、双盘- $1D$ 锚(锚盘间距为 $1D$, D 为锚盘直径)以及双盘- $2D$ 锚(锚盘间距为 $2D$)如图3所示。螺旋锚由Q355级钢材制成,锚盘直径均为 200 mm ,螺距 50 mm ,厚度均为 8 mm ,通过焊接与锚杆形成整体,锚杆长度为 $1\,800\text{ mm}$,锚杆外径 45 mm ,锚杆壁厚为 4 mm ,锚盘螺距与直径比值为 0.25 。锚杆上方预留孔洞,方便后续做钻入实验和穿插钢丝绳与加载装置相连接。



图3 3种螺旋锚试件

Fig. 3 Three types of helical anchor specimens

试验加载方式为静力荷载,通过钢丝绳将螺旋锚和力传感器链接在将力传感器和龙门架的挂钩链接,通过缓慢拉动龙门架(最大承载力 50 kN)的手扳葫芦可以较为准确地进行加载。试验的加载方案和各仪器摆放示意图如图4所示。试验采集系统

为东华高频静态应变测试仪,该系统有18个通道,其最高采集频率可达到 10 Hz ,支持如全桥、半桥以及 $1/4$ 桥等多种不同的桥路接入方式。

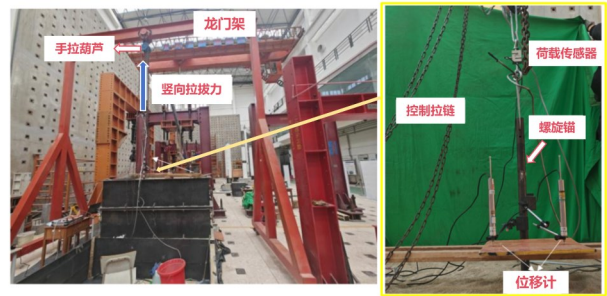


图4 静力加载与位移计示意图

Fig. 4 Schematic diagram of static loading and displacement transducer

为探究密砂中螺旋锚上拔承载力与锚盘间距及安装方式(预埋与钻入)的关系,设计试验方案如表3所示。

表3 螺旋锚上拔试验方案

Table 3 Helical anchor uplift test program

螺旋锚类别	锚盘间距/mm	底盘深径比	实验方式
单盘锚		$4D$	预埋
单盘锚		$4D$	钻入
双盘- $1D$ 锚	200	$4D$	预埋
双盘- $1D$ 锚	200	$4D$	钻入
双盘- $2D$ 锚	400	$4D$	预埋
双盘- $2D$ 锚	400	$4D$	钻入

2.3 试验结果

如图5~图7所示,3种螺旋锚的荷载-位移曲线整体呈现相似的变化规律。在荷载增长阶段,随着上拔荷载持续增大,位移相应增加。当荷载达到特定峰值后,曲线进入振荡下降阶段。该现象主要由土拱效应引发,且随锚盘埋深-直径比增大,土拱效应愈加显著。土拱效应指土体因不均匀变形形成类似拱形的应力分布,导致螺旋锚所受土体抗力分布不均。这种不均匀抗力分布会引发螺旋锚的不

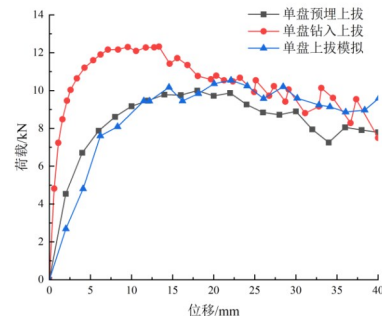


图5 单盘锚上拔荷载位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of single-helix anchor under uplift

稳定变形,进而表现为曲线的震荡现象。郝冬雪^[23]等和Rowe^[24]等的研究也曾观察到类似现象。

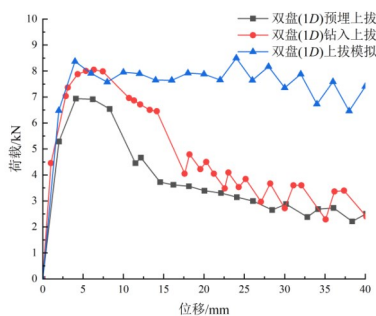


图6 双盘-1D锚上拔荷载位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of double-helix anchor with 1D spacing under uplift

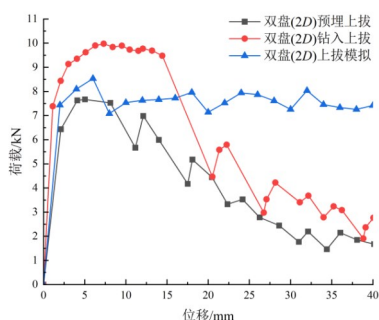


图7 双盘-2D锚上拔荷载位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of double-helix anchor with 2D spacing under uplift

在钻入式与预埋式两种安装方式中,钻入式始终表现出更高的承载力(提升约20%)。其主因在于:钻入过程中,螺旋叶片对土体产生挤压作用,提高了土体的密实度;同时,叶片与土体紧密啮合,增大了接触面积及摩擦阻力,从而提升了荷载传递效率。考虑钻入施工过程影响的模型承载力略高但分析复杂度大,后续数值模型均采用预埋式模型进行模拟^[25-28]。

在预埋安装的3种螺旋锚中,单盘螺旋锚的极限承载力最高(10.128 kN),而双盘-1D螺旋锚(6.943 kN)与双盘-2D螺旋锚(7.671 kN)均显著低于单盘锚。造成此差异的主要原因是:对于双盘螺旋锚,在较小盘间距(如1D)情况下,上拔荷载主要由顶盘承担;底盘由于受到顶盘土拱效应的遮蔽影响,分担荷载比例降低。同时,相较于底盘,顶盘的埋深减小导致其上方土体约束减弱,进一步降低了整体承载力。

3 螺旋锚上拔数值分析

3.1 数值模型建立

为了保证CEL法模拟的准确性,试验模型依据实际实验尺寸进行建模。螺旋锚采用理想刚体,砂

土采用Roy等^[29]提出的修正Mohr-Coulomb本构模型进行模拟。利用ABAQUS软件平台^[30]开发了二次子程序,将砂土强度参数的演变规律嵌入到数值模型,可以更加准确地模拟和预测砂土在剪切过程中的力学响应。模型试验中螺旋桩的最大埋深仅为1 m,因此在研究过程中不考虑土体弹性模量随应力变化的特性。

基于ABAQUS/Explicit平台建立耦合欧拉-拉格朗日(CEL)数值模型。螺旋锚采用可变形旋转实体建模,土体域通过欧拉-拉伸方法生成。在装配模块中将螺旋锚定位至设计埋深,并于锚杆顶端中心建立参考点。分析步采用动态显式算法,设定计算时长与输出频率。

螺旋锚简化为理想刚体(弹性模量210 GPa,泊松比0.3),其顶面与参考点建立运动耦合约束。土体赋予修正Mohr-Coulomb本构模型,参数见表4。锚-土接触采用通用接触算法:法向定义为硬接触,切向采用摩擦系数 $\mu=\tan\varphi$ 的罚函数模型。

加密区尺寸为3D,渐变区尺寸为4.5D。模型侧边界约束水平位移($U_1=U_2=0$),底边界完全固定($U_1=U_2=U_3=R_1=R_2=R_3=0$)。在参考点施加竖向速度荷载($U_3=0.04$)。土体初始应力场依据地应力平衡原理设置,并移除顶部20 cm欧拉域内材料属性以模拟空气层。

土体采用八节点缩减积分六面体单元(C3D8R),螺旋锚采用四节点完全积分四面体单元(C3D4)。实施渐变网格加密技术,于锚体周边区域强化网格密度。模型关键参数见表4,网格划分结果见图8。

表4 有限元模型材料参数

Table 4 Material parameters of finite element model

材料类型	密度 ρ /(g/cm ³)	弹性模量 E /MPa	泊松比	内摩擦角 φ /(°)	摩擦系数 μ
螺旋锚	7.85	2.06×10^5	0.3		
密砂	1.9	20	0.2	42	0.9

3.2 数值模型验证

单盘螺旋锚的数值模拟与试验荷载-位移曲线对比如图5所示。图5表明,数值结果具有可靠性,其极限承载力较试验值低约5%(在工程允许范围内)。加载初期,位移随荷载呈线性增长,表明土体处于弹性变形阶段;当荷载逼近极限值时,位移增速显著提升,且模拟曲线出现振荡现象,这与试验观测的失稳模式一致。值得注意的是,模拟的初始线性段演化趋势与试验曲线高度吻合。

如图6、图7所示,数值模拟与试验曲线在加载前中期阶段基本重合,极限承载力差异控制在10%

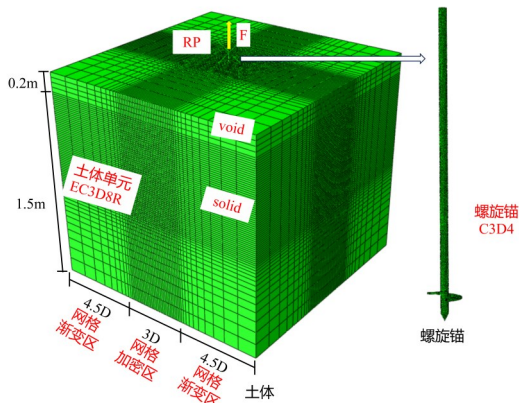


图8 数值模型

Fig. 8 Numerical model

以内。具体而言,双盘-1D间距螺旋锚的数值分析结果与钻入式锚的实测上拔承载力吻合良好,但较预埋式锚的实测上拔承载力高出约14%。其主要原因在于:两锚盘间距较近,预埋式锚在制样(浇砂)过程中难以确保盘间砂土达到所需的密实度。在加载后期,试验曲线因土拱效应引发的应变软化行为呈现下降段;而当前数值模型尚难以准确模拟此类复杂力学响应,导致后期荷载-位移曲线出现明显偏离。然而,就确定螺旋锚极限承载力而言,模型精度已满足要求。依据规范(Q/GDW 10584—2022)^[31]与(DL/T 5219—2023)^[32]规定,为确保极限状态下同时满足承载力与正常使用变形要求,最大加载时总位移量限值为15~25 mm。据此取15~25 mm作为基础作用力标准值下螺旋锚对应的最大变形控制值;同时,将锚盘直径10%位移量(计入锚杆弹性变形)所对应的荷载定义为极限承载力。统一采用0.1D(即20 mm)拉拔位移作为确定极限抗拔承载力的标准。

3.3 锚盘数量对上拔承载力影响

1)上拔承载力

图9展示了不同锚盘数量对密砂中螺旋锚极限上拔承载力的影响。对比分析表明,荷载-位移曲线呈现出明显的拐点,拐点前后的荷载增长率显著不同。随着锚盘数量增加,极限上拔承载力呈现不同程度的下降。其中,单盘螺旋锚的极限承载力最大,达到17.36 kN;双盘螺旋锚的极限承载力与之接近,降幅较小;而三盘、四盘螺旋锚的承载力降幅明显增大,且随着锚盘数量继续增加,承载力进一步降低。不同盘数螺旋锚的极限承载力对比详见表5。相较于单盘锚,双盘锚极限承载力降低了约9%,三盘锚降低了约23%,四盘锚降低了约44%,五盘和六盘锚则降低了约50%。

试验中,螺旋锚的底盘埋深设定为7D。对于双盘螺旋锚,尽管其顶盘埋深减小至6D,但由于锚盘

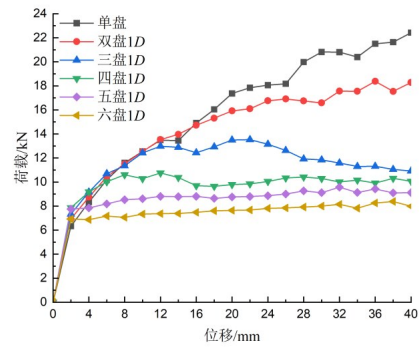


图9 不同锚盘数量螺旋锚承载力对比

Fig. 9 Uplift capacity comparison of helical anchors with different number of helices

表5 不同盘数螺旋锚极限承载力

Table 5 Uplift capacity of helical anchors with varying number of helices

螺旋锚形式	上拔极限承载力/kN
单盘螺旋锚	17.36
双盘(1D)螺旋锚	15.91
三盘(1D)螺旋锚	13.49
四盘(1D)螺旋锚	9.79
五盘(1D)螺旋锚	8.76
六盘(1D)螺旋锚	7.64

间距较小(1D),顶盘埋深减小引起的承载力削弱效应有限,且下部锚盘提供了有效的承载贡献,故其承载力下降幅度较小(约10%)。随着锚盘数量增加至三盘或四盘,上部锚盘位置进一步上移(即埋深显著减小),导致承载力下降幅度增大。当上部锚盘埋深减小至深埋与浅埋的临界区域5D(如三盘、四盘锚上部锚盘所处位置)时,承载力变化尤为显著。若上部锚盘埋深进一步减小至浅埋状态,螺旋锚的极限上拔承载力则趋于稳定。

图10为不同盘数螺旋锚的应力云图与等效塑性应变云图,通过图10(a)的应力云图对比分析可知,土体中的应力大小及其影响范围随锚盘数量的增多呈现递减趋势,这一规律与图9所示的承载力变化特征具有良好的一致性。由图10(b)的塑性应变分布可知,多锚盘工况下土体破坏模式主要表现为圆柱形剪切破坏,且随着锚盘数量的增加,剪切破坏区域的范围显著扩大,同时顶部锚盘上方的塑性应变区域明显减小。结合图9中承载力随锚盘数量增加而减小的变化规律可以发现:在密砂中,对于小间距(1D)的多盘螺旋锚,螺旋锚的极限承载力主要受顶部锚盘的承载性能控制,受下部锚盘承载性能影响有限。

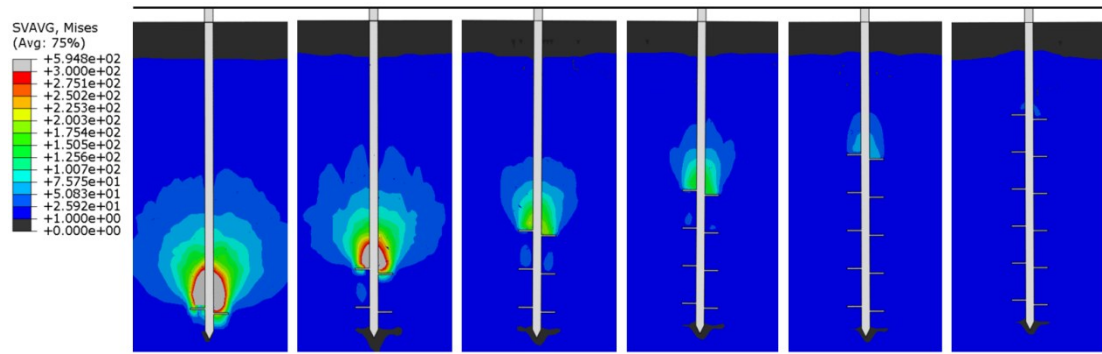
2)破坏模式

由图10(a)可知,多锚盘螺旋锚的上拔承载力主要由上部锚盘提供,顶盘占比约为70%以上^[33-34]。

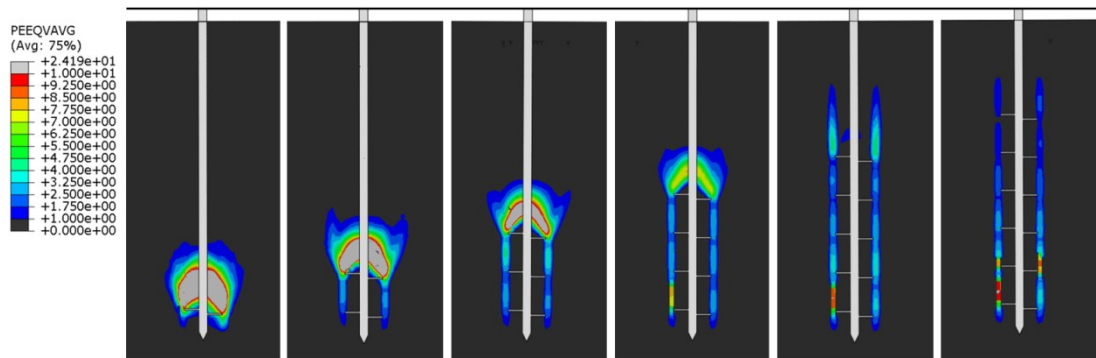
随着上部锚盘埋深减小,其周围土体所能提供的抗拔承载力相应降低;而下部锚盘提供的承载力贡献远小于上部锚盘。这解释了锚盘数量增加反而导致螺旋锚整体上拔承载力下降的原因。由图 10(b)可见,单盘螺旋锚的破坏模式为典型的独立破坏模式。当锚盘数量增至双盘时,破坏模式由单一独立破坏转变为独立破坏与圆柱剪切破坏的复合模式,

形成明显的扩径形破坏体(“灯泡状”)。随着锚盘数量进一步增加,顶部锚盘周围的塑性区形态由饱满渐变变为狭长,破坏模式逐渐向纯圆柱体剪切破坏模式过渡。相应地,螺旋锚的极限上拔承载力随之进一步降低。

因此,提高密砂中螺旋锚的承载力,不宜仅通过增加锚盘数量实现,而需探索其他优化方案。



(a) SVAVG 应力云图



(b) PEEQ 等效塑性应变云图

图 10 不同盘数下螺旋锚的 SVAVG 应力云图和 PEEQ 等效塑性应变云图

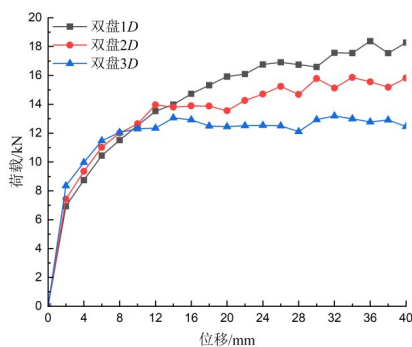
Fig. 10 Contour plots of SVAVG stress and PEEQ equivalent plastic strain for helical anchors with varying number of helices

3.4 不同锚盘间距对上拔承载力影响

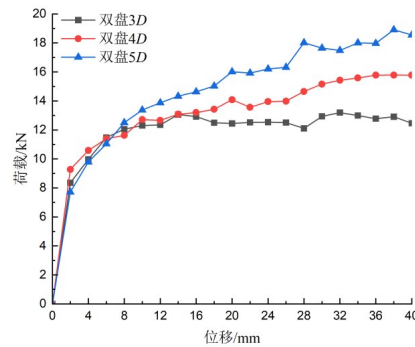
1) 上拔承载力

图 11 为不同锚盘间距下螺旋锚的荷载-位移曲

线对比。曲线特征与前述分析类似,此处不再赘述。为便于分析极限上拔承载力,表 6 列出了不同间距螺旋锚的极限承载力值。



(a) 锚盘间距 1D~3D



(b) 锚盘间距 3D~5D

图 11 不同锚盘间距对螺旋锚上拔承载力的对比

Fig. 11 Comparison of uplift capacity for helical anchors with different helical spacings

表 6 不同盘数螺旋锚极限承载力

Table 5 Uplift capacity of helical anchors with varying number of helices

螺旋锚形式	上拔极限承载力/kN
双盘(1D)螺旋锚	15.91
双盘(2D)螺旋锚	13.55
双盘(3D)螺旋锚	12.44
双盘(4D)螺旋锚	14.08
双盘(5D)螺旋锚	16.01

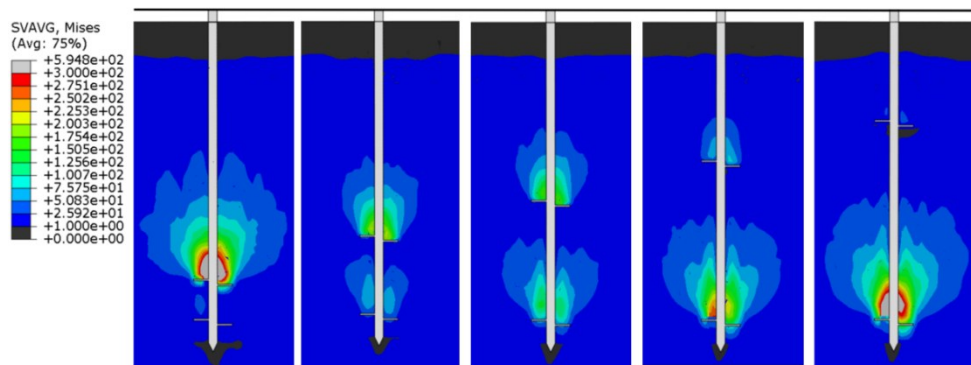
根据表 6 数据,随着锚盘间距从 1D 增至 3D,双盘螺旋锚的极限上拔承载力显著下降,从 15.91 kN 降至 12.44 kN。然而,当间距进一步从 3D 扩大至 5D,承载力则明显回升,从 12.44 kN 增至 16.01 kN。这表明承载力随间距变化呈现先降后升的趋势。

其机理在于:在密砂中,当底部锚盘埋深固定时,初始增大上部锚盘间距(如 1D 至 3D)会导致其顶盘埋深变浅,进而削弱其承载贡献;而下部锚盘的贡献相对有限,因此整体承载力下降。当间距继续增大至 4D 及以上,锚盘间的相互作用显著减弱。此时,虽然上部锚盘周围土体的抗剪强度降低,但下部锚盘得以发挥更大的承载作用,最终促使螺旋

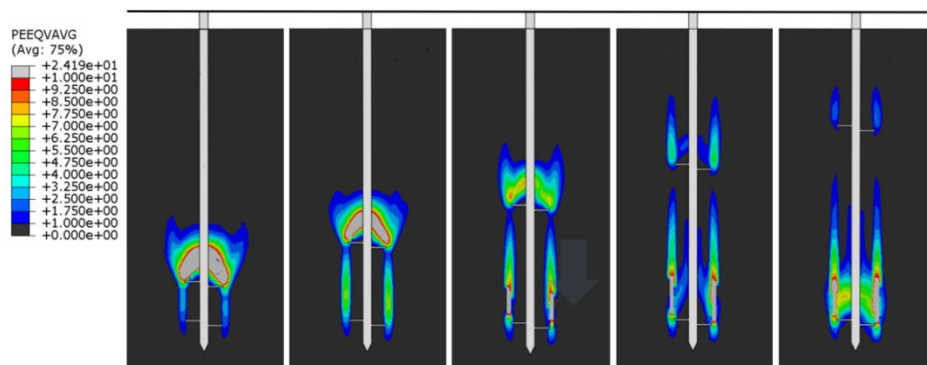
锚整体承载力重新提升。

2)破坏模式

图 12 展示了不同锚盘间距下螺旋锚数值模拟的平均应力(SVAVG)与等效塑性应变(PEEQ)云图。根据图 12(a)的 SVAVG 应力分布分析可知,锚盘间距存在一个临界值(约 4D),其显著影响主导承载力的锚盘位置:当间距小于 4D 时,上拔承载力主要由上部锚盘提供,下部锚盘形成整体剪切破坏土柱;随着间距增大,上部锚盘的承载力贡献逐渐降低,而其余锚盘间的相互作用减弱,其承载贡献相应提高。当间距 $\geq 4D$ 时,上拔承载力转由埋深较大的下部锚盘主导;在此范围内,随间距进一步增大,上部锚盘的贡献持续减弱,下部锚盘的贡献持续增强。这一承载力主导机制的转变规律解释了表 6 中的观测现象:双盘 5D 螺旋锚(主导锚盘为下部)的极限承载力略高于双盘 1D 螺旋锚(主导锚盘为上部)。其根本原因在于双盘 5D 螺旋锚的主导锚盘(下部)埋深与单盘锚相同,且额外增加了顶盘的承载力贡献。同时,由图 12(b)的 PEEQ 塑性应变云图分析可见,随锚盘间距增大,破坏模式由盘间土整体剪切破坏显著转变为近似各锚盘周土的独立破坏模式,该转变在较大间距下尤为显著。



(a) SVAVG 应力云图



(b) PEEQ 等效塑性应变云图

图 12 不同锚盘间距螺旋锚的 SVAVG 应力云图和 PEEQ 等效塑性应变云图

Fig. 12 Contour plots of SVAVG stress and PEEQ equivalent plastic strain for helical anchors at different helical spacing

3.5 锚盘埋深对上拔承载力影响

1) 上拔承载力

为探究螺旋锚极限承载力随锚盘埋深的变化规律,以单盘螺旋锚为例进行分析。如图 13 所示,其极限承载力随埋深增加呈现以下特征:当埋深小于 $6D$ 时,承载力增长显著,表明螺旋锚处于浅埋破坏模式;当埋深 $\geq 6D$ 时,承载力趋于稳定,表明破坏模式已转变为深埋破坏模式。上述结果表明,在密实砂土中,螺旋锚浅埋与深埋破坏模式的临界埋深约为 $6D$ 。

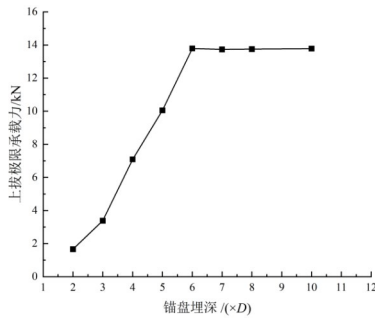


图 13 螺旋锚上拔承载力随锚盘埋深变化曲线

Fig. 13 Variation of uplift capacity of helical anchors with helix embedment depth

2) 破坏模式

图 14 为螺旋锚 PEEQ 等效塑性应变云图。由图 14 可见,随深径比 (H/D) 增大,桩周土体塑性区范围逐渐扩展。当深径比 $H/D=5$ 时,单盘螺旋锚呈现典型的“灯泡状”独立破坏模式。当深径比 $H/D>5$ 后,锚盘周围土体的塑性区范围趋于稳定,不再显著发展;然而,锚盘正上方土体的塑性等效应变 (PEEQ) 值持续增大。数值模拟结果表明,考虑砂土应变软化效应后,在竖向位移作用下,螺旋锚盘附近砂土 (尤其是盘上方区域) 率先进入塑性状态。这使得塑性区难以向锚盘外侧上方充分扩展,转而主要向锚正上方发展,从而无法充分激发更大范围砂土的塑性潜力。这一现象解释了考虑砂土应变软化效应后螺旋锚竖向抗拔承载力降低的原因。

4 螺旋锚上拔计算方法

4.1 规范计算方法

目前,螺旋锚通常作为深埋基础使用。中国《架空输电线路基础设计规程》(DL/T 5219-2023)^[32]中关于深埋螺旋锚上拔承载力计算方法与 IEEE 规范^[35]中的相关规定基本相同。由应变云图可见,螺旋锚盘间的破坏方式为单盘破坏加圆柱剪切破坏模式,则上拔承载力分为上拔锚盘承载力、锚杆阻力与盘间土层阻力 3 部分组成,如图 15 所

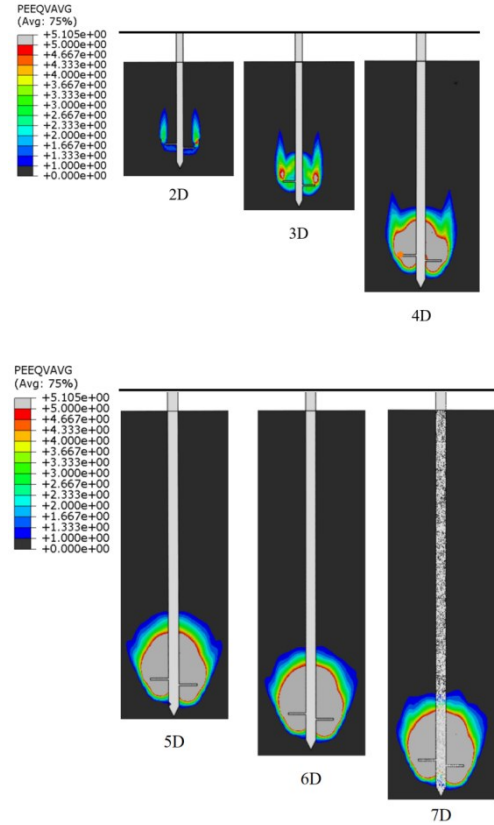


图 14 螺旋锚 PEEQ 等效塑性应变云图

Fig. 14 Helical anchor PEEQ equivalent plastic strain cloud map

示,砂土中上拔承载力计算模型如式(1)所示。

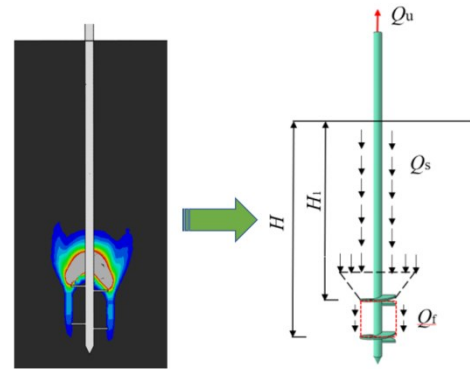


图 15 螺旋锚上拔承载力计算模型

Fig. 15 Calculation model for pull-out bearing capacity of spiral anchor

$$Q_u = Q_{u1} + Q_f + Q_s \quad (1)$$

式中: Q_{u1} 为顶部锚盘的上拔承载力标准值, kN; Q_f 为上、底锚盘间土层的摩擦阻力, kN; Q_s 为锚杆上的摩擦阻力, kN。

1) 顶部锚盘承载力

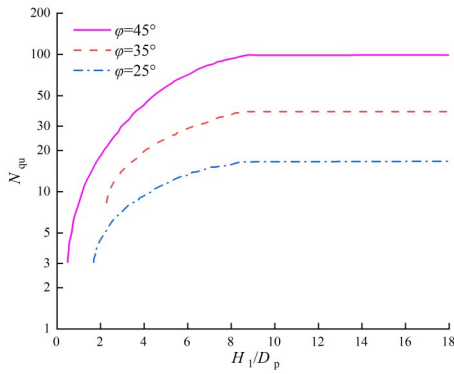
$$Q_{u1} = \gamma H_1 A N_q \quad (2)$$

式中: A 为顶部锚盘的面积, m^2 ; N_q 为顶部锚盘上拔承载力计算参数, 建议取值如图 16 所示; γ 为锚盘上面土的加权平均重度, kN/m^3 ; H_1 为顶盘埋深, m。

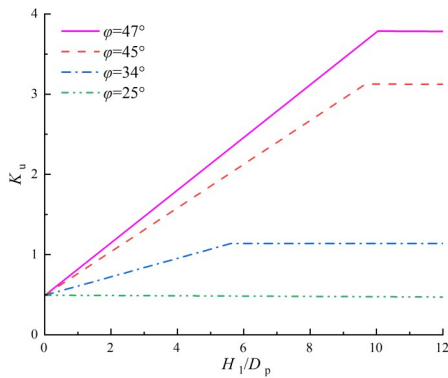
2) 盘间土层摩阻力

$$Q_f = \frac{\pi}{2} D \gamma (H^2 - H_1^2) K_u \tan \varphi \quad (3)$$

式中: H 为底部锚盘的埋深, m; K_u 为侧压力系数, 建议取值如图 16 所示; φ 为锚盘上面土层的内摩擦角加权平均值, ($^\circ$); H 为土层底部界面埋深, m; H_1 土层顶部界面埋深, m。



(a) 上拔承载力计算参数



(b) 侧压力系数

图 16 规范中系数建议取值曲线

Fig. 16 Variation of recommended coefficient values in design code

3) 锚杆摩阻力

$$Q_s = \pi d H_2 \left(\gamma \frac{H_1}{2} \right) K_u \tan \varphi \quad (4)$$

式中: d 为锚杆的直径, m; H_2 为锚杆没入土中的深度, m; φ 为土壤内摩擦角, ($^\circ$); K_u 为侧压力系数。

4.2 公式拟合

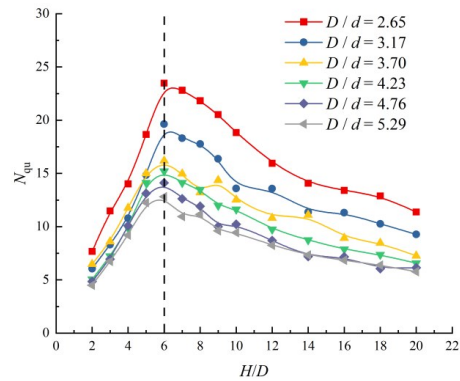
1) 上拔承载力系数 N_q

如式(2)所示, 砂土中螺旋锚顶盘承载力主要与埋深、盘径和上拔承载力计算参数 N_q 相关, 其中埋深、盘径和土重度是客观条件, 而上拔承载力系数 N_q 是决定螺旋锚承载力准确性的决定系数。

单盘螺旋锚的试验极限承载力为 10.1 kN, 理论公式计算结果为 53.7 kN ($Q_{ul}=48.4$ kN、 $Q_s=5.3$ kN), 可见理论公式计算结果明显大于试验结果。

上拔承载力计算参数 N_q 的建议取值如图 16(a) 所示, 当锚盘深径比 ≥ 8 时, N_q 取值基本上趋于常量, 此时随着锚盘埋深的增大, 承载力仍然呈现线性增大的趋势, 这与图 17 的分析结果不符, 这也解释了砂土中单盘螺旋锚承载力试验结果与公式计算结果偏差较大的主要原因。

由于螺旋锚上拔承载力主要由顶盘提供, 因此以单盘螺旋锚为研究对象, 考虑变埋深 ($2D \sim 20D$)、变盘径 (500、600、700、800、900、1 000 mm) 建立 70 组密实砂土中的单盘螺旋锚数值分析模型。根据数值模拟结果与式(2)计算出对应承载力系数 N_q 。图 17 展示了单盘螺旋锚上拔承载力系数-埋深比的曲线图, 上拔承载力系数为非单调函数, 在锚盘深径比为 5~6 时达到最大值, 随着锚盘 H/D 的持续增加, 承载力系数开始下降。

图 17 单盘螺旋锚上拔承载力-埋深比(H/D)曲线Fig. 17 Uplift capacity versus embedment depth ratio (H/D) for single-helix anchors

为了揭示螺旋锚承载力的核心影响因素, 基于团队自研的机器学习软件, 对数值分析中单盘锚进行上拔承载力模型训练, 获取最终训练模型的特征重要性。分别选取内摩擦角、密度、初始黏聚力、压缩模量、盘径和盘埋深作为特征, 将上拔承载力作为标签。采用贝叶斯优化选取模型超参, 利用 K 折交叉验证对模型进行训练^[36-37], 最终确定最优超参, 得到最优预测模型。如图 18 所示, 模型预测结果与试验结果吻合性良好, 偏差在 10% 以内。

通过提取机器学习模型中各特征的 Gain、Weight 和 Cover 参数, 确定了对承载力影响最为显著的 3 个特征内摩擦角、锚盘直径和嵌入深度, 如图 19 所示。

选取机器学习所确定的关键特征锚盘直径和嵌入深度作为变量参数, 将单盘数值模型结果带入式(2)计算得到上拔承载力系数 N_q , 对计算数据进行拟合得到螺旋锚上拔承载力 N_q 计算式(5)。单盘预埋安装螺旋锚的试验极限承载力为 10.1 kN, 规

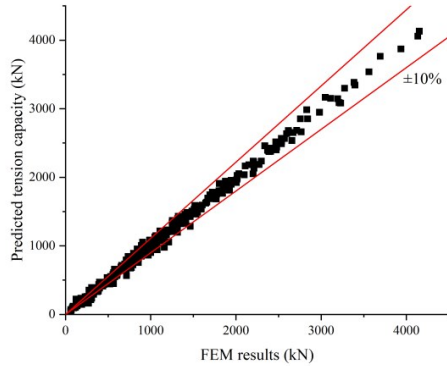
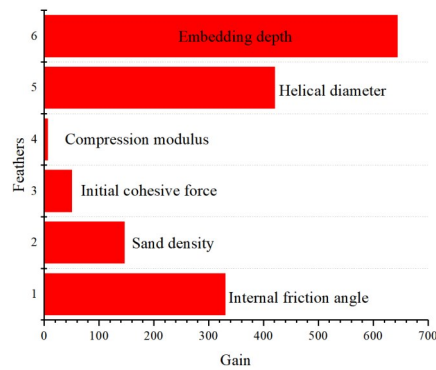
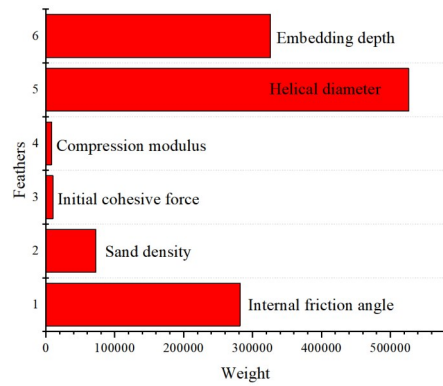


图 18 机器学习预测结果准确性对比

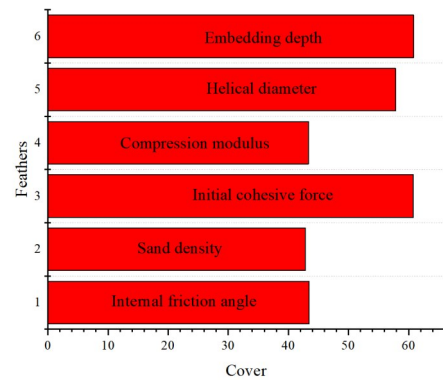
Fig.18 Machine learning prediction accuracy comparison



(a) Gain 重要性



(b) Weight 重要性



(c) Cover 重要性

图 19 机器学习上拔受力模型特征重要性

Fig. 19 Importance of machine learning uplift force model characteristics

范公式计算结果为 53.7 kN,修正后理论公式计算结果为 10.2 kN,证明了公式的准确性。

$$N_q = 22.11 - 10.24(D/d) + 0.94\left(\frac{D}{d}\right)^2 + 254.02D/H - 1073.16\left(\frac{D}{H}\right)^2 + 1207.01\left(\frac{D}{H}\right)^3 \quad (5)$$

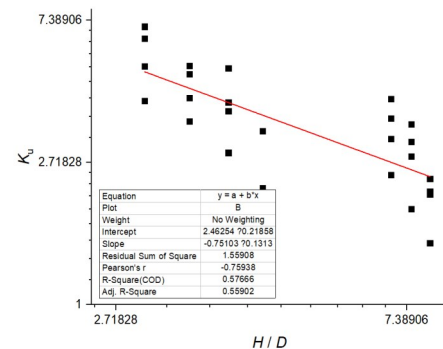
式中: N_q 为上拔承载力系数; D 为锚盘直径,m; d 为锚杆直径,m; H 为锚盘埋深,m。

2)侧压力系数 K_u

如式(3)所示,砂土中螺旋锚顶盘承载力主要与土重度、土体深度、内摩擦角和侧摩阻力系数 K_u 有关,其中土重度、土体深度与内摩擦角为客观条件,影响土层摩阻力的准确性的关键参数是 K_u 。

以双盘锚为研究对象,考虑变盘间距($2D$ 、 $3D$ 、 $4D$ 、 $5D$ 、 $6D$)、变盘径(500、1 000 mm)和变顶盘埋深($2D$ 、 $6D$)建立数值分析模型,根据数值分析结果与式(3)计算侧压力系数 K_u ,对于上拔多盘锚,当锚盘间距足够大时($\geq 4D$),其上拔承载力应该为对应嵌入深度单盘锚上拔承载力之和;当双锚盘间距较小时($< 4D$),其上拔承载力应小于对应嵌入深度单盘锚上拔承载力之和,将双盘锚上拔承载力减去顶盘对应上拔承载力即可得到两盘间砂土整体抗剪承载力。

选取机器学习确定的关键特征锚盘直径和嵌入深度作为变量参数,根据单盘与双盘锚数值模型结果,结合式(1)~式(3),通过双盘承载力减去对应顶盘承载力进行计算,得到侧压力系数 K_u 。如图 20 所示,将计算所得侧压力系数 K_u 进行拟合,得到侧压力系数 K_u 计算公式(6)。6 盘 1D 螺旋锚上拔承载力数值分析结果 7.64 kN,修正理论公式计算结果为 7.66 kN,说明该公式准确性可靠。

图 20 密实砂土侧压力系数 K_u 拟合曲线Fig. 20 Fitting curve of lateral pressure coefficient K_u for dense sand

$$K_u = 1.466 - 0.447 \ln \frac{H}{D} \geq 0.5 \quad (6)$$

式中: K_u 为土侧压力系数; D 为锚盘直径, m; H 为锚盘间土层中点埋深, m。

值得注意的是, 式(5)没有适用范围限制, 式(6)适用范围为 $K_u \geq 0.5$ 。在密实砂土地基工程设计中, 建议基于土体软化效应引入承载力折减系数: 对于常规静力荷载工况, 采用 0.8 的折减系数, 该取值符合 DNVGL-RP-C212^[38] 和 API RP 2GEO^[39] 规范要求; 对于承受循环荷载(如海上钻井平台)或安全等级要求较高的特殊工况, 建议将折减系数调整为 0.65, 并应根据荷载特性、土体参数和工程重要性进行动态调整。需要特别强调的是, 由于工程场地土质特性的区域性差异, 设计过程中必须优先依据当地规范要求, 必要时可开展离心模型试验或数值分析等专项研究, 以确保设计方案的可靠性与经济性。

5 结论

通过螺旋锚(单盘、双盘间距 $1D/2D$)上拔试验及基于 MMC 本构的 ABAQUS 数值模拟, 结合参数分析, 系统揭示了其破坏模式与承载特性, 并推导了承载力与侧压力系数计算公式, 结论如下:

1) 土拱效应与安装方式影响: 土拱效应导致上拔荷载-位移曲线呈现显著振荡衰减特征, 且埋深增大会加剧该现象。相较于预埋式安装, 钻入式安装因挤密效应使极限承载力提升 10%~20%。

2) 锚盘数量与埋深耦合机制: 增加锚盘数量导致顶部锚盘埋深减小。当埋深降至深-浅临界区 ($5D \sim 6D$) 时, 承载力显著下降; 进入浅埋区后承载力趋稳, 此时顶部锚盘分担比例降低, 承载力转由盘间土柱剪切抗力及周边摩阻力主导。

3) 锚盘间距的临界调控作用: 在密实砂土中固定底部埋深条件下, 增大上部锚盘间距至 $1D \sim 3D$ 时, 因上部锚盘贡献减弱且下部锚盘承载有限, 承载力下降; 当间距 $\geq 4D$ 后, 锚盘间相互作用弱化, 下部锚盘承载作用充分发挥, 承载力回升。螺旋锚盘间土体由整体剪切失效向独立失效转变的临界间距为 $4D$ 。

4) 理论模型验证: 通过修正承载力计算系数与侧压力系数, 提出新型理论方法, 可实现对密实砂土中螺旋锚上拔承载力的高精度预测。

参考文献

- [1] 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: 108010.
- [2] PERKO H A. *Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [3] BAILEY H, SENIOR B, SIMMONS D, et al. Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(6): 888-897.
- [4] CERFONTAINE B, KNAPPETT J A, BROWN M J, et al. A finite element approach for determining the full load-displacement relationship of axially loaded shallow screw anchors, incorporating installation effects [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021, 58(4): 565-582.
- [5] HAO D X, WANG D, O'LOUGHLIN C D, et al. Tensile monotonic capacity of helical anchors in sand: interaction between helices [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(10): 1534-1543.
- [6] MITCHELL A. On submarine foundations; particularly the screw pile and moorings [J]. *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1848, 7(1848): 108-132.
- [7] LEE J, KWON O, KIM I, et al. Cyclic pullout behavior of helical anchors for offshore floating structures under inclined loading condition [J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 92: 101937.
- [8] 郝冬雪, 王磊, 陈榕, 等. 冻融循环下粉砂中螺旋锚抗拔稳定模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(1): 57-65.
HAO D X, WANG L, CHEN R, et al. Experimental investigation on uplift stability of helical anchors in silty sand under freeze-thaw cycles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(1): 57-65. (in Chinese)
- [9] FENG S J, FU W D, CHEN H X, et al. Field tests of micro screw anchor piles under different loading conditions at three soil sites [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(1): 127-144.
- [10] 胡伟, 杨瑶, 刘顺凯, 等. 光伏支架螺旋桩斜向拉拔承载特性试验研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(12): 50-61.
HU W, YANG Y, LIU S K, et al. Experiment study on inclined pullout bearing characteristic of screw anchor pile of photovoltaic bracket [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2022, 43(12): 50-61. (in Chinese)
- [11] 史旦达, 俞快, 毛逸瑶, 等. 松砂中双叶片螺旋锚上拔承载及土体变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(11): 3059-3072, 3082.
SHI D D, YU K, MAO Y Y, et al. Experimental study on the uplift behavior and soil deformation characteristics of the double-blade screw anchor in loose sand [J]. *Rock*

- and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 3059-3072, 3082. (in Chinese)
- [12] 林志, 胡伟, 赵璞, 等. 砂土中平板圆锚倾斜拉拔承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3059-3068, 3168.
- LIN Z, HU W, ZHAO P, et al. Model test study on inclined pull-out bearing characteristics of flat circular anchor in sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(11): 3059-3068, 3168. (in Chinese)
- [13] 胡伟, 林天宇, 林志, 等. 砂土地基中螺旋锚上拔承载特性试验与理论研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(8): 1582-1595.
- HU W, LIN T Y, LIN Z, et al. Experimental and theoretical studies on modeling of uplift bearing characteristics of screw anchors in sandy soil foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(8): 1582-1595. (in Chinese)
- [14] 郝冬雪, 袁驰, 陈榕, 等. 砂土中浅埋圆或螺旋形锚板上拔承载机理数值分析[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(2): 101-112.
- HAO D X, YUAN C, CHEN R, et al. Numerical analysis of uplift bearing mechanism for shallow circular or helical anchor plate in sand [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(2): 101-112. (in Chinese)
- [15] 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 F F, BAO S M, SHAO S, 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. (in Chinese)
- [16] 张浩. 螺旋锚-岩石锚杆复合桩基础抗拔承载力及影响因素分析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2024.
- ZHANG H. Analysis of pulling capacity and influencing factors of spiral anchor-rock anchor composite pile foundation [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2024. (in Chinese)
- [17] SHAO K, SU Q, LIU J W, et al. Optimization of inter-helix spacing for helical piles in sand [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(3): 936-952.
- [18] BITTAR E, LEHANE B M, BLAKE A, et al. CPT-based design method for helical piles in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2024, 61(1): 102-117.
- [19] ZHANG Y W, LI W D, PENNER L, et al. SPT-based empirical method for estimating axial capacities of single-helix piles in sand [J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(3): 1581-1595.
- [20] LIN Y F, XIAO J D, LE C H, et al. Bearing characteristics of helical pile foundations for offshore wind turbines in sandy soil [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(7): 889.
- [21] YUAN C, HAO D X, CHEN R, et al. Numerical investigation of uplift failure mode and capacity estimation for deep helical anchors in sand [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(8): 1547.
- [22] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] ROWE R K, DAVIS E H. The behaviour of anchor plates in sand [J]. Géotechnique, 1982, 32(1): 25-41.
- [25] MERIFIELD R S, SLOAN S W. The ultimate pullout capacity of anchors in frictional soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(8): 852-868.
- [26] LIVNEH B, NAGGAR M HEL. Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(8): 1142-1155.
- [27] MERIFIELD R S. Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(7): 704-716.
- [28] SALHI L, NAIT-RABAH O, DEYRAT C, et al. Numerical modeling of single helical pile behavior under compressive loading in sand [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18: 4319-4338.
- [29] ROY K, HAWLADER B, KENNY S, et al. Finite element modeling of lateral pipeline - soil interactions in dense sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(3): 490-504.
- [30] SystèmesDassault. ABAQUS Analysis User's Manual, Version 2023 [M]. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes, 2023.
- [31] 架空输电线路螺旋锚基础设计技术规范: Q/GDW 10584—2022 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- Code for design of helical anchor foundation for overhead transmission lines: Q/GDW 10584—2022 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2022. (in Chinese)
- [32] 架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5219—2023 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2024.
- National Energy Bureau of the People's Republic of China. Technical code for design of foundation of overhead transmission line: DL/T 5219—2014 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese)

- [33] 屈讼昭, 郭咏华, 王仪, 等. 大锚片螺旋锚在粉质黏土中上拔受力性能的原位试验研究及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊2): 3655-3668.
- QU S Z, GUO Y H, WANG Y, et al. Bearing capacity of screw anchor with large anchor plate in silty clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup 2): 3655-3668.
- [34] 屈讼昭, 郭咏华, 王仪, 等. 大锚片螺旋锚在粉质黏土中的下压承载性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 34-44.
- QU S Z, GUO Y H, WANG Y, et al. Bearing capacity of screw anchor with large anchor plate in silty clay [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(5): 34-44. (in Chinese)
- [35] IEEE Standards Association. IEEE guide for transmission structure foundation design and testing: IEEE Std 691—2001 [S]. Piscataway, NJ: IEEE, 2001.
- [36] HASTIE T, TIBSHIRANI R, FRIEDMAN J. The Elements of Statistical Learning [M]. New York, NY: Springer New York, 2009.
- [37] KUHN M, JOHNSON K. Applied predictive modeling [M]. New York, NY: Springer New York, 2013
- [38] Offshore soil mechanics and geotechnical engineering: DNVGL-RP-C212 [S]. Høvik, Norway: DNV GL, 2018.
- [39] American Petroleum Institute. Geotechnical and foundation design considerations: API RP 2GEO [S]. 1st ed. Washington, DC: API, 2014.
- (编辑 XXX)