

密砂中单盘螺旋锚安装效应对 抗拔能力影响的数值分析

陈榕¹,刘虎¹,郝冬雪¹,刘赵果²

(1. 东北电力大学建筑工程学院,吉林吉林 132012;

2. 中国能源建设集团黑龙江省电力设计院,黑龙江哈尔滨 150000)

摘要 目的 研究密砂中单盘螺旋锚安装过程中锚周土体变形特性及其对抗拔能力的影响,为螺旋锚基础精细化设计提供技术支撑。方法 利用 MatDEM 软件建立密砂中螺旋锚安装及拉拔过程的数值计算模型,通过与室内模型试验结果对比标定颗粒微观力学参数,进而分析钻入和预埋两种安装方式下不同埋深和盘径的螺旋锚安装效应及上拔承载力。结果 当 $H/d_w \leq 10$ 时,钻入安装的极限上拔力较预埋低,当 $H/d_w > 10$ 后,安装方式带来承载力差别不再随埋深增加而增加;随着盘径增大,两种安装方式下螺旋锚的承载能力均表现出增大的趋势,钻入方式下的 Q_{ut} 比预埋下的 Q_{up} 降低量从 33% 增至 53%,预埋方式螺旋锚的承载能力高于钻入。结论 钻入安装螺旋锚的上拔承载力低于预埋方式的承载力,但当埋深比超过 10 后,安装扰动对承载力的影响随着深度变化很小;随着盘径增加,安装扰动对极限上拔承载力的影响增大,相较于埋深变化带来的安装扰动差异,盘径变化带来的影响更明显。

关键词 螺旋锚;安装效应;上拔承载力;离散元;密砂

中图分类号 TU473

文献标志码 A

引用格式:陈榕,刘虎,郝冬雪,等.密砂中单盘螺旋锚安装效应对抗拔能力影响的数值分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):432-440.(CHEN Rong, LIU Hu, HAO Dongxue, et al. Numerical analysis of installation effect of single-helix anchor on uplift capacity in dense sand[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(3): 432-440.)

Numerical Analysis of Installation Effect of Single-helix Anchor on Uplift Capacity in Dense Sand

CHEN Rong¹, LIU Hu¹, HAO Dongxue¹, LIU Zhaoguo²

(1. Northeast Electric Power University, School of Civil Engineering and Architecture, Jilin, China, 132012;

2. China Energy Engineering Group Heilongjiang Electric Design Co. Ltd., Harbin, China, 150000)

收稿日期:2023-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52078108);吉林省科技厅科研项目(20210509058RQ);吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20210103KJ)

作者简介:陈榕(1979—),男,教授,博士,主要从事输电塔基础、地基处理等方面研究。

Abstract: The purpose of this study is to investigate the deformation characteristics of the soil around the anchor during the installation process of a single helix anchor in dense sand and its impact on the uplift capacity, in order to provide technical support for the refined design of helix anchor foundations. A numerical calculation model for the installation and pull-out process of helix anchor in dense sand was established using MatDEM software. The micro mechanical parameters of particles were calibrated by comparing with indoor model test results. The installation effect and uplift capacity of helix anchors with different embedment depths and diameters under drilling and pre embedding installation methods were analyzed. When $H/d_w \leq 10$, the ultimate uplift capacity of drilling installation is lower than that of pre embedded. When $H/d_w > 10$, the difference in uplift capacity caused by the installation method no longer increases with the increase of embedment depth; As the diameter of the disc increases, the uplift capacity of the helix anchor under both installation methods shows an increasing trend. The decrease in Q_{ut} under the drilling method compared to the pre embedded Q_{up} increased from 33% to 53%. The uplift capacity of the helix anchor under the pre embedded method is higher than that under the drilling installation method. The conclusion is that the uplift capacity of drilling and installing helix anchors is lower than that of pre embedded methods, but when the embedment depth ratio exceeds 10, the impact of installation disturbance on the uplift capacity changes little with depth; As the diameter of the disc increases, the impact of installation disturbance on the ultimate uplift capacity increases. Compared to the difference in installation disturbance caused by changes in embedment depth, the impact of diameter changes is more significant.

Key words: helical anchor; installation effect; uplift capacity; discrete element method; dense sand

由于锚片的存在,与等直径桩相比,螺旋锚桩承载力得到显著提高^[1],并且具有施工便捷高效、环境破坏小等优点,常用于承受拉伸荷载的构筑物基础,如输电塔、海底管道、海洋平台等^[2],甚至在一些工程中逐渐成为传统桩基础的替代品^[3]。Z. H. Elsherbiny 等^[4]结合现场试验和数值模拟,对砂土中螺旋桩抗压能力和荷载传递机理进行了研究。N. P. Kurian 等^[5]建立螺旋桩与土相互作用数值分析模型,研究了桩在压、拉和侧向荷载作用下的性能。F. H. Kulhawy^[6]在分析螺旋锚上拔特性时提出螺旋锚安装后会形成柱状扰动区,并建议在预测上拔承载力时应考虑安装对扰动柱状区域剪切阻力的影响。S. P. Clemence 等^[7]在中密砂及密砂中进行螺旋锚拉拔破坏试验时发现,螺旋锚安装完成后锚杆附近土中侧压力发生明显变化,获得的侧压力系数比 G. G. Meyerhof 的建议值^[8]低 30% ~ 40%。S. A. Kanai 等^[9]采用缩尺模型试验研究螺旋锚安装过程中锚盘周围土粒运动规律。A. J.

Lutenegger 等^[10]基于螺旋锚现场试验数据,采用上拔和下压承载力比值来分析不同土类中螺旋锚的安装扰动程度。J. R. Jeffrey 等^[11]进行了连续螺旋位移桩模型试验,认为挤土效应和安装扰动使得桩周土体密实度出现增加或降低现象与初始密实度有关。H. Nagai 等^[12]考虑了安装时螺旋锚不能连续钻进的情况,采用模型试验研究密砂中单片螺旋锚不同安装方法对土体扰动和上拔荷载-位移曲线的影响。B. E. George 等^[13]基于 FLAC3D 有限元软件模拟螺旋桩的安装及承载过程,采用应变路径法对土体进行空腔膨胀,用来预测桩体贯入过程中土体的运动。Z. A. Perez 等^[14]通过离心机试验和数值模拟研究密砂中单盘螺旋锚安装对锚承载性能的影响,将两者结果对比,确定扰动区砂土的计算参数。D. Shi 等^[15]采用三维离散元法研究连续螺旋桩在不同钻速比入土时桩周土应力分布、颗粒运动及孔隙比的变化规律。B. Cerfontaine 等^[16]利用有限元法模拟考虑安装影响的浅埋螺旋锚荷

载-位移关系,并且模拟在不同深度连续加载卸载模式下螺旋锚的安装。Z. A. Perez 等^[17]利用离散单元法研究了推进比对螺旋桩安装阻力和承载能力的影响。在锚的安装过程中,周围土体受挤压和剪切作用,引起锚周土体变形及应力变化,土体的强度和刚度也随之变化^[18-19],而有关螺旋锚安装扰动的研究十分有限^[20-21]。基于此,笔者利用 MatDEM 软件建立了密砂中螺旋锚安装及拉拔过程的数值计算模型,通过与试验结果对比,标定颗粒微观力学参数;在此基础上,进一步分析钻入和预埋两种不同安装方式下不同埋深及盘径螺旋锚的安装效应及上拔承载力,安装及上拔的全过程分析更符合实际工况。

1 模型的建立

1.1 接触模型的选择

在 MatDEM 软件中,利用线弹性接触模型通过一个法向可断裂弹簧和一个切向弹簧连接两个相邻的粒子,生成用一定量颗粒堆积构建成的土体模型,如图 1 所示。

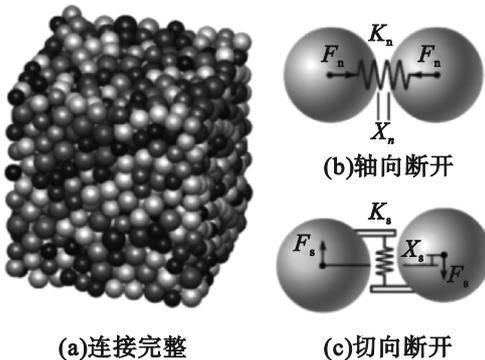


图 1 线弹性接触模型

Fig. 1 Linear elastic contact model

初始时,相邻颗粒间相互连接,受拉($X_n \geq 0$)或受压($X_n < 0$)的弹簧力作用;当两颗粒间的法向相对位移 X_n 超过断裂位移 X_b 时,弹簧断裂,颗粒间拉力消失。颗粒之间的作用力由式(1)来表示:

$$F_n = \begin{cases} K_n X_n, & X_n \leq X_b; \\ 0, & X_n > X_b. \end{cases} \quad (1)$$

与法向力的定义相似,模型中考虑切向弹簧力 F_s 为

$$F_s = K_s X_s. \quad (2)$$

对于颗粒的完整连接,库伦准则所允许的最大切向力为

$$F_{s\max} = \begin{cases} F_{s0} - \mu_p F_n, & \text{连接完整;} \\ -\mu_p F_n, & \text{连接断开.} \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_n 为法向力,N; K_n 为法向刚度,N/m; X_n 为法向相对位移,m; X_b 为断裂位移,m; F_s 为切向力,N; K_s 为切向刚度,N/m; X_s 为切向相对位移,m; F_{s0} 为粒间抗剪力,N; μ_p 为粒间摩擦系数。

等粒径下,颗粒间微观力学参数^[22]:

$$X_b = \frac{(3K_n + K_s)T_u d^2}{6\sqrt{2}K_n(K_n + K_s)}. \quad (4)$$

$$K_n = \frac{\sqrt{2}}{4(1-2\nu)}Ed. \quad (5)$$

$$K_s = \frac{\sqrt{2}(1-5\nu)}{4(1+\nu)(1-2\nu)}Ed. \quad (6)$$

$$F_{s0} = \frac{(1-\sqrt{2}\mu_p)}{6}C_u d^2. \quad (7)$$

$$\mu_p = \frac{-2\sqrt{2} + \sqrt{2}I}{2+2I}. \quad (8)$$

$$I = [(1+\mu_i^2)^{\frac{1}{2}} + \mu_i]^2. \quad (9)$$

式中: E 为杨氏模量,GPa; ν 为泊松比; C_u 为抗压强度,Pa; T_u 为抗拉强度,Pa; μ_i 为内摩擦系数; d 为颗粒直径,m。

1.2 模拟方案

为标定 DEM 数值计算模型中的微观力学参数,参照文献[12]中编号为 De-A 的缩尺试验试件建立数值模型,模型槽尺寸为 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,在土表面施加 100 kPa 的均布压力,锚杆直径 $d_0 = 48.6 \text{ mm}$,锚盘直径 $d_w = 97.2 \text{ mm}$,埋深比 $H/d_w = 5$ 。在此基础上,模拟钻入和预埋两种安装方式下不同盘径和埋深比螺旋锚拉拔过程,分析安装效应及上拔承载特性,模型设置如表 1 所示,其中 $d_w = 100 \text{ mm}$ 时,土体的初始堆积体尺寸设为 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times$

1.6 m, 其它盘径对应的土体尺寸为 $6.0 \text{ m} \times 6.0 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$; 在这些模型的土顶部同样施加了 100 kPa 的均布压力。

表1 螺旋锚数值计算模型

Table 1 Numerical models of helical anchors

组别	安装方式	d_w/mm	H/d_w
对照组	钻入	97.2	5
	预埋	100	3~12
埋深组	钻入	100	3~12
	预埋	200	10
盘径组	预埋	300	6.7
	钻入	400	5

1.3 MatDEM 模型

在 MatDEM 模型中, 螺旋锚安装及上拔过程分四个步骤实现, 即建立 4 个子文件进行分析: ①建立初始堆积模型即土体模型; ②建立锚体模型, 并与土体装配, 赋予材料参数; ③设置安装荷载进行螺旋锚安装迭代计算, 安装加载由竖向位移和角位移控制, 两者满足旋转一周沉入土中一个螺距的关系, 即钻入比为 1; ④设置上拔位移, 进行螺旋锚上拔迭代计算。

1.3.1 模型建立

首先建立初始堆积模型, 土体模型颗粒随机生成, 颗粒单元半径设为 0.012 m , 单元半径的分散系数设为 0.25 , 使最大与最小颗粒半径的比值为 $(1 + 0.25)^2$, 颗粒尺寸满足桩径与土颗粒比值超过 2.69 时, 可忽略颗粒

尺寸影响的要求^[23]。验证模型共包含 $105\,029$ 个颗粒。在顶部设置压力板, 采用重力堆积方式设置 100 kPa 的均布压力, 实际堆积高度为 1.1 m 。然后进行模型平衡, 得到初始地层的堆积模型, 如图 2 所示。

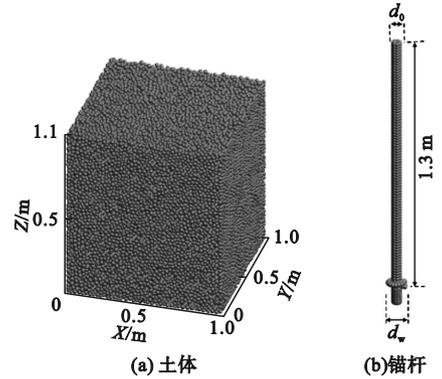


图2 初始地层堆积模型

Fig. 2 Model of initial soil particles

为了平衡边界效应和计算时间, 砂层宽度设为 10 倍的螺旋盘直径 (d_w)。锚杆安装上拔过程中, 边界 $10 d_w$ 处的颗粒位移小于 0.001 m 。锚体模型颗粒单元半径设置为 0.01 m , 将螺旋锚设置为弹性团簇。为避免建模时螺旋锚盘重叠, 锚盘螺距 p 设置为 50 mm 。安装时钻入速度与模型试验相同, 即每旋转一周锚沉入土中一个螺距。

堆积和胶结后, 特定微观的力学参数通过变化宏观力学参数计算获得的拉拔荷载位移曲线与试验结果对比来标定, 结果见表 2。

表2 土体、锚体材料参数

Table 2 Material parameters of soil and anchor

类别	宏观					微观					
	E/GPa	ν	T_u/Pa	C_u/Pa	μ_i	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$K_n/$ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$K_s/$ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	X_b/m	μ_p	F_{s0}/N
锚	5.4	0.24	1.2×10^4	1.3×10^4	0.3	9 341	112.31	19.363	1.363×10^{-5}	0	866.67
土	0.162	0.16	0.06	1.3	0.75	2 011	4.043	0.697	2.73×10^{-9}	0.283	0.075

注: E 为杨氏模量, GPa ; ν 为泊松比; T_u 为抗拉强度, Pa ; C_u 为抗压强度, Pa ; μ_i 为内摩擦系数; ρ 为密度, kg/m^3 ; K_n 为法向刚度, MN/m ; K_s 为切向刚度, MN/m ; X_b 为断裂位移, m ; μ_p 为粒间摩擦系数; N 为 F_{s0} 粒间抗剪力。

模拟安装时, 设置锚体位移加载条件: 竖向位移为埋深 H , 角位移为 $2\pi H/p$ 。安装后对

锚进行拉拔, 在锚顶施加上拔位移 0.01 m 。在安装及上拔阶段分别设置 $1\,000$ 个增量步,

每个增量步对应1个子增量步。共计2 000步迭代计算,迭代次数为40万次。

1.3.2 颗粒接触参数标定

为验证数值模拟的有效性和准确性,将数值模拟结果与试验结果对比,图3为模拟和试验的位移 u 与盘径 d_w 之比 δ 与锚盘整个横截面上平均压力 q_p 的关系比较。数值模拟结果的初始直线段斜率明显高于试验结果,但两者最后直线阶段基本重合,且直线的起始位移点相近,为 $0.016 d_w$;以 $0.1 d_w$ 位移对应的上拔承载力作为极限上拔承载力,此时两者的极限承载力仅相差3.4%。整体上,数值模拟获得的荷载-位移曲线趋势及极限承载力与试验结果较为吻合,以此输入参数作为后续计算依据。

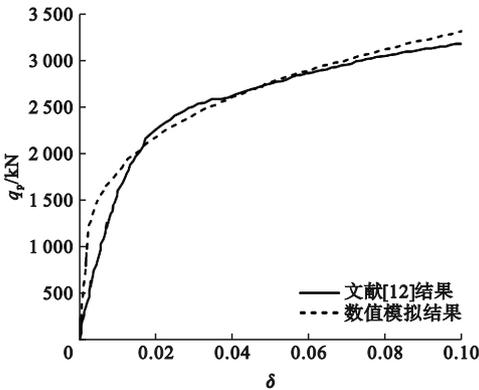


图3 盘压力-位移比曲线对比

Fig. 3 Comparison of helix pressure-relative displacement curves

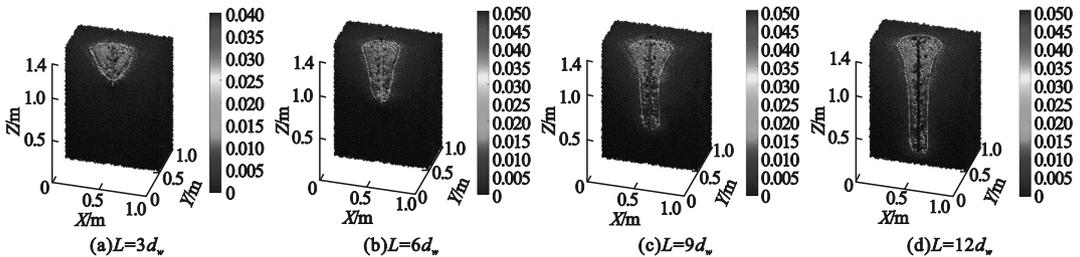


图4 埋深比 $H/d_w = 12$ 单盘锚钻入过程中位移云图

Fig. 4 Displacement contour plots of single-helix anchor with $H/d_w = 12$ during installation

2.2 颗粒位移

图5为距轴线 $r \approx d_w/2$ 位置上不同旋入深度的颗粒水平位移。随着螺旋锚旋入深度的增加,颗粒运动更为剧烈,最大水平位移值

2 颗粒运动特征分析

2.1 运动颗粒区域的变化

由于该问题具有轴对称性,故选择 Y 轴中间剖开截面,给出螺旋锚钻入过程该剖面土颗粒的位移云图,如图4所示。

将颗粒运动为1个颗粒半径时的位置连线,以白色虚线表示。在钻入深度较浅时($L = 3 d_w$),锚盘钻入使得周围颗粒向外侧移动,盘周 $1.2 d_w$ 范围内的颗粒受影响,如图4(a)白线所示,其轮廓在锚盘上方 $2 d_w$ 范围内按倒截锥形绘制的外凸红线,上方锚杆周围及接近地表颗粒位移明显大于外围颗粒,地表隆起明显。

受到扰动的颗粒整体呈向下运动的趋势,锚底颗粒受到挤压向下运动,锚底边缘处颗粒呈现沿外侧向下扩张的趋势,锚盘下方颗粒垂直于锚盘向下运动,锚盘上方颗粒逐渐趋于稳定。随着锚钻入深度的增加,锚盘上覆压力及围压增大,锚盘外围颗粒侧向运动逐渐受限,颗粒运动区域减小,盘周径向挤压更为明显。锚周运动颗粒的范围从近似倒锥形($L = 3 \sim 6 d_w$)逐渐转化为漏斗形($L = 9 \sim 12 d_w$),接近倒锥与圆柱组合。杆周及地表附近颗粒运动位移较大,当 $L > 3 d_w$,地表运动颗粒区域趋于稳定,半径约为 $4 d_w$ 。

逐渐增大,但在 L 为 $9 d_w$ 和 $12 d_w$ 时,最大水平位移基本相同,约为 0.05 m ,与锚盘半径相同,发生在盘上方约 $2 d_w$ 的位置。从最大位移位置至锚盘深度处,水平位移逐渐减小,

直至接近零,表明在该深度范围内颗粒以竖向移动为主。

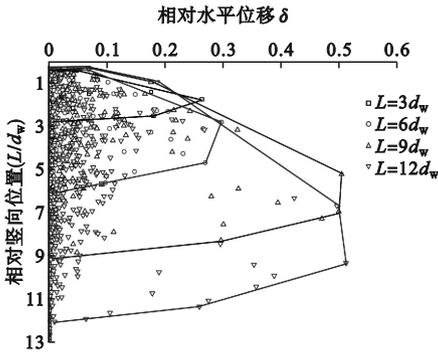


图5 $r \approx d_w/2$ 竖线上颗粒水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of particles on the vertical line $r \approx d_w/2$

图5中绘出了不同钻入深度时最大颗粒位移包线,由包线亦可见,钻入过程中的各包线在最大位移深度前基本重合。如 $L = 12 d_w$ 的包线在距地表约 $7 d_w$ 范围内基本与 $L = 9 d_w$ 的包线重合。这表明螺旋锚继续钻入对上方一定距离的颗粒不再有影响。

3 安装效应对抗拔能力的影响

设置钻入和预埋螺旋锚两种方式进行模拟。对比分析荷载-位移曲线、极限承载力及破坏模式,探讨安装扰动对螺旋锚抗拔能力的影响,其中预埋方式采用传统颗粒删除方法,即删除螺旋锚位置处土体颗粒,而后将螺旋锚放置其中。

3.1 不同埋深的安装效应

3.1.1 极限上拔承载力

图6为预埋和钻入两种安装方式下不同埋深比的螺旋锚荷载-位移曲线。钻入与预埋两种方式的荷载-位移曲线趋势相同。预埋曲线初始直线段斜率比钻入曲线大,这是由于预埋土体未受扰动,初始刚度较大;随着上拔位移的增加,两种安装方式的抗拔能力差别愈加明显。以位移达到 $0.1 d_w$ 作为极限承载力判别标准的结果见表3,其中 Q_{up} 为预埋方式的结果, Q_{ut} 为钻入方式的结果。钻

入安装的极限上拔力 Q_{ut} 较预埋值低12%~18%。

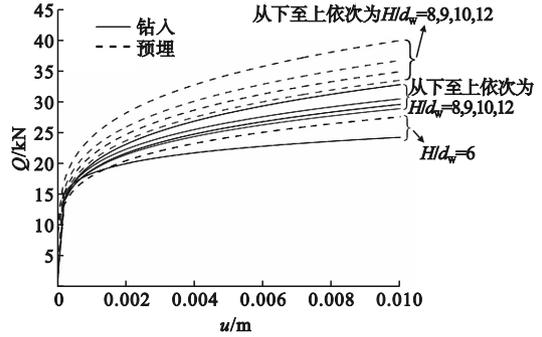


图6 不同埋深比的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves at various embedment ratios

表3 两种安装方式下不同埋深的 Q_u 值

Table 3 Q_u values for different embedment depths under two different embedment methods

H/d_w	Q_{up}/kN	Q_{ut}/kN	Q_{ut}/Q_{up}
6	27.53	24.20	0.879
8	33.48	28.86	0.862
9	34.88	29.56	0.847
10	36.71	30.44	0.829
12	39.97	32.77	0.820

图7为不同埋深比时 Q_{up} 、 Q_{ut} 及 Q_{ut}/Q_{up} 对比结果。

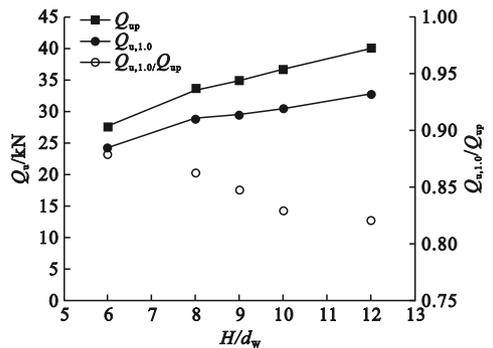


图7 两种安装方式下不同埋深比的 Q_u 对比

Fig. 7 Comparison of Q_u with different embedment depth ratios under two installation methods

当 $H/d_w \leq 10$ 时,随着埋深比增加,安装扰动引起的承载损失逐渐增加;当 $H/d_w > 10$ 后,安装扰动对承载力的影响随着深度变化

很小。这与破坏模式有关,当 $H/d_w > 10$ 后,密砂中螺旋锚可能为深埋模式,破坏区域基本不随埋深增加而增大,故安装带来的承载力减小量不再随埋深增加而增加。

3.1.2 上拔破坏模式

图8和图9分别为两种安装方式下的埋深比为6和12的螺旋锚上拔破坏模式对比。

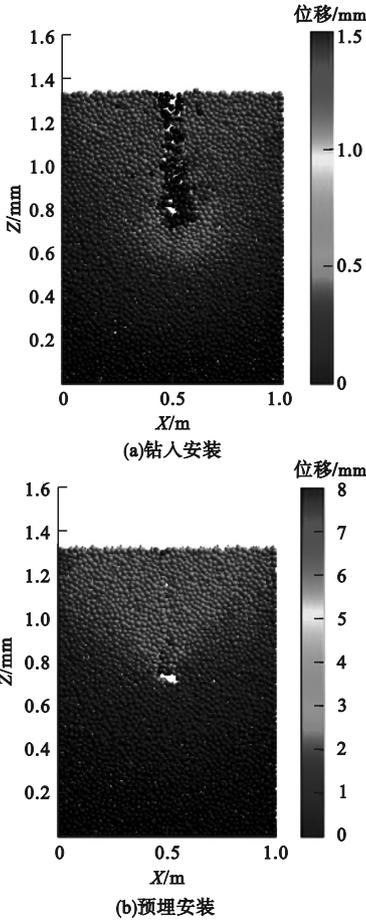


图8 $H/d_w = 6$ 时两种安装方式破坏位移云图

Fig. 8 $H/d_w = 6$ Displacement plots at failure under two installation methods for $H/d_w = 6$

从图8中可以看出,两种安装方式下破坏模式不同。图8(a)中移动颗粒的范围自锚盘位置处向四周延伸,逐渐延伸至地表,且盘下方颗粒也出现位移。可能是由于安装锚拉拔破坏位移图中没有剔除安装过程产生的位移,在安装过程中盘底小部分颗粒的位移可能会保留到上拔阶段,在上拔过程中,颗粒位移消减,原有位置颗粒呈现出向下的运动

趋势。图8(b)中移动颗粒自锚盘位置向上方以及斜上方延伸至地表,锚盘下方及盘周颗粒并没有发生明显位移,整体的破坏模式呈倒三角形。相比于钻入安装方式下带动的土体的范围更广,故表现出更大的抗拔能力。

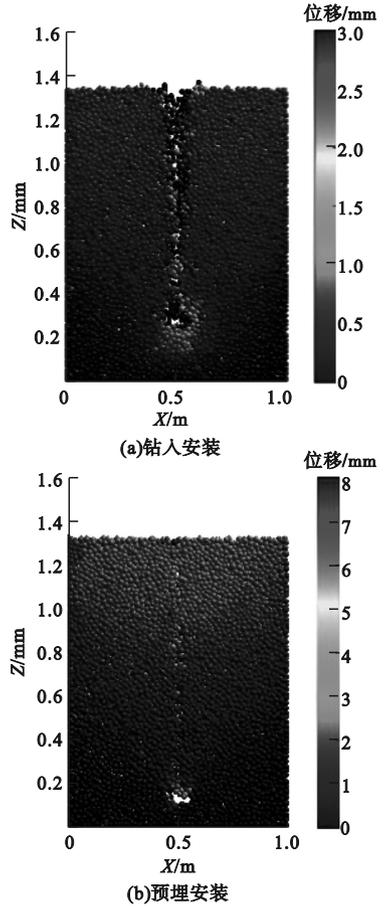


图9 $H/d_w = 12$ 时两种安装方式破坏位移云图
Fig. 9 Displacement contour plots at failure under two installation methods for $H/d_w = 12$

由图9可见,深埋锚上拔破坏时两种安装方式下移动土颗粒的范围均在锚盘附近,呈气泡状,表现为深破坏模式。但靠近地表时,杆周土体的破坏模式存在明显的差别,钻入安装时由于锚在土中旋转带动杆周土颗粒运动,密砂变松,浅层土尤其明显,导致拉拔破坏时浅层土体破坏区范围减小。预埋锚破坏时锚杆附近浅层土体破坏区域更大,且颗粒的位移值更大,主要是由于预埋锚杆侧土体较钻入安装锚更密实,土与锚杆摩擦力更大。

3.2 不同盘径的安装效应

为研究不同盘径螺旋锚的安装扰动对承载力的影响,设置埋深 $H=2\text{ m}$, 分别对 d_w 为 200、300、400 mm 三种盘径的单盘锚进行模拟,荷载-位移曲线如图 10 所示。表 4 为两种安装方式下不同盘径的极限上拔承载力。由图 10 可见,随着盘径增大,两种安装方式下螺旋锚的承载能力均表现出增大的趋势;预埋方式螺旋锚的承载能力高于钻入安装方式,并且随着上拔位移的增加,两种安装方式的抗拔能力差别愈加明显。

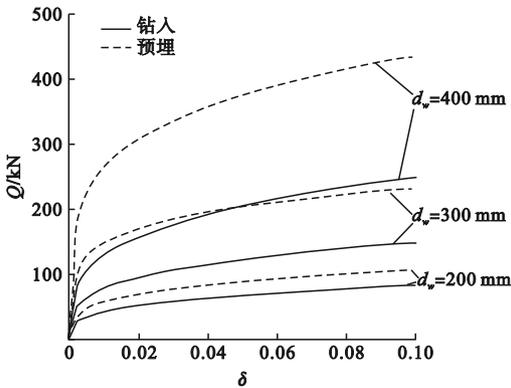


图 10 两种安装方式下不同盘径 $Q-\delta$ 曲线

Fig. 10 $Q-\delta$ curves of different disk diameters under two installation methods

表 4 两种安装方式下不同盘径 Q_u 值

Table 4 Q_u values for various helix diameters under two installation methods

d_w/mm	Q_{up}/kN	Q_{ut}/kN	Q_{ut}/Q_{up}
200	107.53	82.79	0.770
300	232.87	148.53	0.638
400	436.12	248.71	0.570

图 11 为两种安装方式下不同盘径螺旋锚的极限上拔力及其比值。钻入方式下, d_w 为 300 mm 和 400 mm 时 Q_{ut} 相较于 200 mm 时分别提高了 79% 和 200%。预埋方式下, 当 d_w 为 300 mm 和 400 mm 时的 Q_{up} 相较于 $d_w=200\text{ mm}$ 时分别提高了 115% 和 300%。随着盘径增加, 安装扰动对极限上拔承载力的影响越大, d_w 从 200 mm 到 400 mm, 钻入方式下的 Q_{ut} 比预埋下的 Q_{up} 降低量从 33%

增至 53%。由此可见,相较于埋深变化带来的安装扰动差异,盘径变化的影响更明显,这可能和安装引起的土颗粒运动形式、粒径与盘径比值等尺寸效应有关,仍需作进一步深入研究。

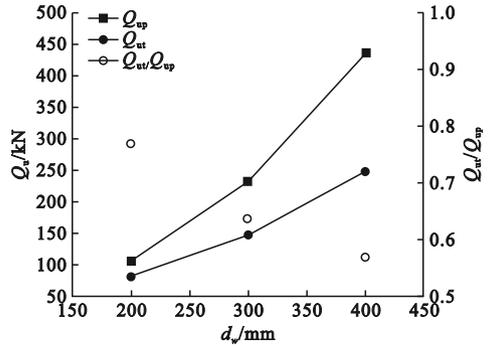


图 11 两种安装方式下不同盘径的 Q_u 对比
Fig. 11 Comparison of Q_u for different disk diameters under two installation methods

4 结论

(1) 在螺旋锚旋入过程中, 盘周颗粒向侧上方运动, 地表出现隆起; 随着钻入深度增加, 锚盘上覆压力及围压增大, 锚盘外围颗粒侧向运动逐渐受限, 颗粒运动区域减小, 盘周径向挤压作用更为明显, 运动颗粒区域逐渐趋于稳定, 钻入过程中, 锚周运动土颗粒的范围从近似倒锥形逐渐转化为漏斗形, 接近倒锥与圆柱组合。

(2) 钻入安装方式使得密砂受扰动而变松, 不同埋深时钻入螺旋锚上拔承载力低于预埋方式, 并且随着埋深比增加, 安装扰动引起的承载损失逐渐增加, 但当 $H/d_w > 10$ 后, 安装扰动对承载力的影响随深度变化很小。

(3) 随盘径增加, 安装扰动对极限上拔承载力的影响增大, 相较于埋深变化带来的安装扰动差异, 盘径变化引起的安装扰动影响更明显。

参考文献

[1] MENG Z, CHEN J J, ZHANG L, et al. Field tests to investigate the installation effects of drilled displacement piles with screw-shaped shaft in clay

- [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2015, 141(12): 06015010.
- [2] 郝冬雪, 王金宇, 陈榕, 等. 砂土中螺旋锚理论扭矩相关系数工程适用性探讨[J]. *东北电力大学学报*, 2022, 42(1): 79-86.
(HAO Dongxue, WANG Jinyu, CHEN Rong, et al. Engineering applicability of theoretical torque factor of helical anchors in sand [J]. *Journal of northeast electric power university*, 2022, 42(1): 79-86.)
- [3] DAVIDSON C, BROWN M J, CERFONTAINE B, et al. Physical modelling to demonstrate the feasibility of screw piles for offshore jacket-supported wind energy structures [J]. *Géotechnique*, 2022, 72(2): 108-126.
- [4] ELSHERBINY Z H, NAGGAR M H E. Axial compressive capacity of helical piles from field tests and numerical study [J]. *Canadian geotechnical journal*, 2013, 50(12): 1191-1203.
- [5] KURIAN N P, SHAH S J. Studies on the behaviour of screw piles by the finite element method [J]. *Canadian geotechnical journal*, 2009, 46(6): 627-638.
- [6] KULHAWY F H. Uplift behavior of shallow soil anchors; An overview [C]//Uplift behavior of anchor foundations in soil. [S. l.]: ASCE, 1985: 1-25.
- [7] CLEMENCE S P, PEPE F D. Measurement of lateral stress around multihelix anchors in sand [J]. *Geotechnical testing journal*, 1984, 7(3): 145-152.
- [8] MEYERHOF G G, ADAMS J I. The ultimate uplift capacity of foundations [J]. *Canadian geotechnical journal*, 1968, 5(4): 225-244.
- [9] KOMATSU A. Development on battered pile with screw pile method (NS-ECO pile) [C]//Proceedings of the international workshop on recent advances of deep foundations (IWDPF07). Yokosuka, Japan: Y. Kikuchi. Taylor & Francis, 2007: 253-257.
- [10] LUTENEGGER A J, TSUHA C H C. Evaluating installation disturbance from helical piles and anchors using compression and tension tests [C]//Proceedings of the 15th Pan-American Conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Buenosaires, Argentina: [s. n.], 2015: 373-381.
- [11] JEFFREY J R, BROWN M J, KNAPPETT J A, et al. CHD pile performance; part I-physical modelling [J]. *Proceedings of the institution of civil engineers-geotechnical engineering*, 2016, 169(5): 421-435.
- [12] NAGAI H, TSUCHIYA T, SHIMADA M. Influence of installation method on performance of screwed pile and evaluation of pulling resistance [J]. *Soils and foundations*, 2018, 58(2): 355-369.
- [13] GEORGE B E, BANERJEE S, GANDHI S R. Helical piles installed in cohesionless soil by displacement method [J]. *International journal of geomechanics*, 2019, 19(7): 04019074.
- [14] PEREZ Z A, SCHIAVON J A, TSUHA C H C, et al. Numerical and experimental study on influence of installation effects on behaviour of helical anchors in very dense sand [J]. *Canadian geotechnical journal*, 2018, 55(8): 1067-1080.
- [15] SHI D, YANG Y, DENG Y, et al. DEM modelling of screw pile penetration in loose granular assemblies considering the effect of drilling velocity ratio [J]. *Granular matter*, 2019, (21): 1-16.
- [16] CERFONTAINE B, BROWN M J, DAVIDSON C, et al. Optimised screw pile design for offshore jacket foundations in medium-dense sand [J]. *Geotechnique letters*, 2022, 12(2): 114-119.
- [17] PEREZ Z A, SCHIAVON J A, TSUHA C H C, et al. Numerical and experimental study on influence of installation effects on behaviour of helical anchors in very dense sand [J]. *Canadian geotechnical journal*, 2018, 55(8): 1067-1080.
- [18] SHARIF Y U, BROWN M J, CERFONTAINE B, et al. Effects of screw pile installation on installation requirements and in-service performance using the discrete element method [J]. *Canadian geotechnical journal*, 2021, 58(9): 1334-1350.
- [19] WANG L, ZHANG P, DING H, et al. The uplift capacity of single-plate helical pile in shallow dense sand including the influence of installation [J]. *Marine structures*, 2020, 71: 102697.
- [20] 和睿, 曹冬, 史旦达. 可破碎颗粒材料中螺旋桩贯入特性的离散元模拟[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(3): 128.
(HE Rui, CAO Dong, SHI Danda. Discrete element simulations of screw pile drilling in crushable granular materials [J]. *Journal of Changjiang river scientific research institute*, 2021, 38(3): 128.)
- [21] CERFONTAINE B, CIANTIA M, BROWN M J, et al. DEM study of particle scale and penetration rate on the installation mechanisms of screw piles in sand [J]. *Computers and geotechnics*, 2021, 139: 104380.
- [22] 刘春, 施斌, 顾凯, 等. 岩土体大型三维离散元模拟系统的研发与应用[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(增刊1): 551-557.
(LIU Chun, SHI Bin, GU Kai, et al. Development and application of large-scale discrete element simulation system for rock and soil [J]. *Journal of engineering geology*, 2014, 22(S1): 551-557.)
- [23] ARROYO M, BUTLANSKA J, GENS A, et al. Cone penetration tests in a virtual calibration chamber [J]. *Géotechnique*, 2011, 61(6): 525-531.
(责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)