

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20190702001

倾斜荷载下裙式吸力基础抗拔承载力模型 试验研究*

李大勇^{1,2,3}, 孙传平^{1,2}, 王栋林^{1,2}, 张雨坤^{1,2}

(1. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 3. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 开展室内模型试验, 研究倾斜荷载作用下裙式吸力基础的承载特性。探讨基础裙结构尺寸、加载角度、加载速度等因素对倾斜荷载作用下裙式吸力基础荷载-位移关系曲线以及抗拔承载力的影响, 研究加载过程中主桶和裙结构内吸力变化规律。试验结果表明: 倾斜荷载作用下, 裙式吸力基础抗拔承载力随着裙宽和裙高的增大逐渐增大, 随着加载速度的增大逐渐增大。另外, 随着荷载作用方向与水平方向角度的不断增大, 裙式吸力基础抗拔承载力有所降低, 主桶和裙内吸力均增大。

关键词: 倾斜荷载; 抗拔承载特性; 模型试验; 吸力; 加载速度

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0682-10

Model Tests on The Bearing Capacity of Modified Suction Caisson under Inclined Pullout Loading

LI Dayong^{1,2,3}, SUN Chuanping^{1,2}, WANG Donglin^{1,2}, ZHANG Yukun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266590, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In this paper, a model test was conducted to investigate the bearing characteristics of the skirt suction foundation under an inclined load. Through changing the skirt width, skirt height, loading angle and loading speed, the change of bearing capacity of the modified suction caisson base under an inclined load was explored, and the negative pressure in the main barrel and the negative pressure in the modified suction caisson were analyzed. The results show that the bearing capacity of the modified suction caisson base under the effect of inclined load increases with the increase of the skirt width, skirt height and loading speed, and the corresponding base displacement value increases when the ultimate bearing capacity is reached. With the increase of the load angle, the negative pressure in the barrel increases although the basic bearing capacity decreases.

Keywords: inclined load; pull-out bearing characteristics; model test; passive suction; loading speed

* 收稿日期: 2019-07-02; 修回日期: 2019-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879044)、国家自然科学基金项目(51808325)、山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2015TDJH104)资助

作者简介: 李大勇(1971—), 男, 教授, 博士。主要从事海洋岩土工程研究。E-mail: ldydy@163.com

通讯作者: 张雨坤(1987—), 男, 副教授, 博士。主要从事海上风电与海洋光伏研究。E-mail: philc007@163.com

0 引言

我国是一个海洋油气资源和海上风能资源大国,近海拥有丰富的海上风能,远海中蕴藏丰富的油气资源^[1]。无论是海上风机建设,还是油气平台建设,都离不开基础的稳定支撑。目前海上风电塔架和海洋平台基础型式主要有重力式基础、单桩基础、多桩基础、导管架基础、吸力基础。吸力基础具有造价低,易于吊运和安装,承载力较高,以及可回收利用的优点,在海洋工程领域得到广泛应用。当吸力基础用于系泊海上浮动平台时,会受到上部构筑物对基础的倾斜上拔荷载作用,研究斜向拉拔荷载下基础承载特性具有重要意义。

国内外学者对吸力基础抗拔承载力开展了大量研究。薛万东^[2]阐述了吸力基础在黏土中的三种破坏失稳模式,提出了基础极限抗拔力的理论方法,发现基础内部吸力的大小变化决定了吸力基础破坏模式。徐冰^[3]开展室内模型试验研究了倾斜荷载作用下软土地基中吸力基础的破坏模式,结果表明:吸力基础破坏模式主要与基础的加载角度有关;随着荷载方向与水平方向夹角增大,基础的破坏模式由旋转破坏转为向上的剪切破坏,此时水平土体抗力逐渐减小。C.Aubeny等^[4]将相应条件进行简化,探讨了倾斜荷载作用下吸力基础斜向抗拔承载特性,考虑土体不排水情况,分析了参数变化对吸力基础的斜向拉拔承载力的影响。S.Bang等^[5-7]提出了水平加载时吸力基础的竖向抗拔承载力的理论方法,同时探讨加载角度改变和加载作用点变化时吸力基础抗拔承载力的变化。S.E.Gharbawy等^[8-9]在正常固结地基土中开展模型试验,研究了张力腿平台中的吸力基础抗拔承载力特性,结果表明:当基础受荷时会影响基础周围土体孔隙水压力的变化;改变荷载角度及循环频率会影响基础承载力及地基土的变形。

裙式吸力基础是对传统吸力基础的改进,研究^[10-15]表明裙式吸力基础在砂土和黏性土中有较好的沉贯性,相比于传统吸力基础具有更高的水平和竖向承载力。但对于倾斜荷载作用下基础的抗拔承载特性需要进一步深入研究,完善裙式吸力基础承载特性研究。

开展模型试验,研究饱和细海砂中裙式吸力基

础在倾斜荷载作用下承载特性,分析了基础位移-荷载曲线、基础位移-吸力曲线,探讨裙结构尺寸、加载角度和加载速度对基础承载力和吸力的影响。

1 模型试验装置及试验过程

1.1 试验装置

(1) 模型箱及加载装置

模型试验考虑到模型边界对试验结果的影响,本试验采用的吸力基础模型直径 $D=120\text{ mm}$,高度 $L=240\text{ mm}$,而模型箱尺寸长 \times 宽 \times 高 $=1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 。试验装置如图1所示。液压千斤顶固定滑轮装置,可以上下移动,用于确定加载角度(加载方向与水平方向夹角)。

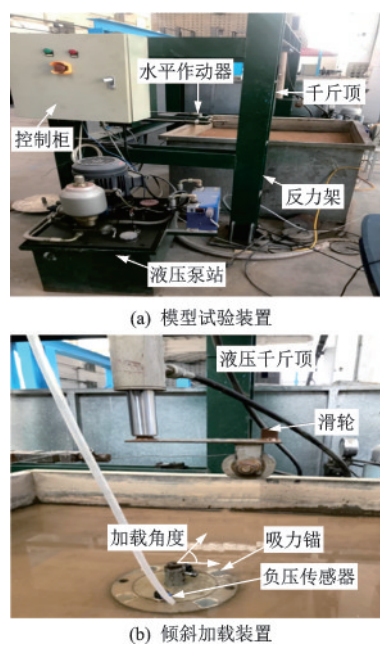


图1 试验装置

Fig. 1 Model test setup

(2) 裙式吸力基础模型

图2为裙式吸力基础模型,主桶直径 $D=120\text{ mm}$,高度为 $L=240\text{ mm}$,通过与不同尺寸的裙结构组合形成不同型号的裙式吸力基础。为便于说明,将吸力基础编号,II表示主桶长径比为 $2:1$, R 和 H 分别表示裙宽和裙高。具体类型、型号及尺寸见表1。基础顶部中间位置设有 55 mm 高的加载杆固定位置,此外基础顶部留有两个预留孔,一方面采用吸力沉贯安装时可以用来抽水

泵的抽水,另一方面试验时连接负压传感器量测基础吸力。



图2 裙式吸力基础模型

Fig.2 Modified suction caisson

表1 裙式吸力基础尺寸

Table 1 Dimensions of suction caissons

基础模型 编号	基础类型	主桶直径 D/mm	主桶高度 L/mm	裙宽R/ mm	裙高H/ mm
II	传统吸力 基础			—	—
II-R3H3	裙式吸力 基础			30	30
II-R3H6	裙式吸力 基础			30	60
II-R3H9	裙式吸力 基础	120	240	30	90
II-R5H3	裙式吸力 基础			50	30
II-R5H6	裙式吸力 基础			50	60
II-R5H9	裙式吸力 基础			50	90

1.2 试验用砂

模型试验箱中砂土属于海砂,取自青岛金沙滩,其颗粒级配曲线如图3所示,物理参数见表2,可知,海砂为级配不良的均质细海砂。

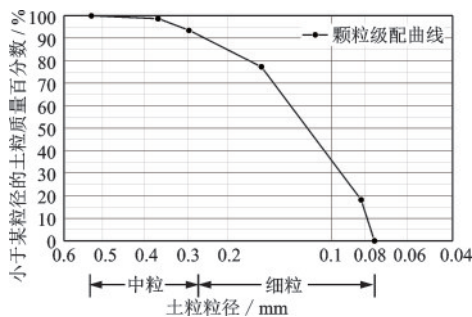


图3 颗粒级配曲线

Fig.3 Particle size distribution curve

表2 饱和细海砂的物理力学参数

Table 2 Physical parameters for sand

类型	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	e	G_s	D_r	$k/(cm \cdot s^{-1})$
细砂	1.78	0.997	0.903	0.61	0.62	2.69	0.997	0.002

1.3 试验流程

为保证试验条件一致,每次试验前,将模型箱内砂土均匀翻动,砂土翻动深度为主桶1.5倍高度。砂土翻动完成后向模型箱内注满水,打开排水孔,进行排水固结,直至模型箱内水面高于砂土面2~3 cm,关闭排水孔,刮平砂面,完成砂土的固结。

基础采用压贯方式贯入砂土中,安装完成后启动千斤顶装置,通过调整滑轮高度来完成不同加载角度的设置。试验采用位移控制式加载,加载速度分别为0.25、2.5、5和10 mm/s。当基础完全脱离砂土表面时,试验结束。

2 试验结果及处理

试验中每个工况重复三次,当三组重复试验数据相差不大时,则认为试验数据有效。液压伺服器加载系统水平导杆上装有拉压传感器和位移传感器,可直接导出荷载-位移数据。

R.M. El-Sherbiny^[16]认为吸力基础受到拉拔荷载向上发生位移时,将吸力基础的荷载-位移曲线峰值作为桶形基础的抗拔承载力;刘晶磊等^[17]认为当基础位移为0.6倍的基础直径时对应的荷载作为吸力基础的抗拔承载力;B.W.Byrne^[18]认为当基础加载点发生0.02倍的吸力基础直径时,吸力基础已经发生破坏,将基础位移为0.02倍主桶直径时对应的荷载作为吸力基础的抗拔承载力。由于当前学者还未对受倾斜荷载作用时吸力基础的承载力标准作规定,结合本文试验采用位移控制式加载模式,将基础受倾斜荷载作用时的荷载-位移曲线峰值作为吸力基础的承载力。

2.1 裙结构尺寸对基础承载力的影响

以加载角度为 60° ,加载速度 $v=0.25$ mm/s时的试验为例,研究裙高变化对基础承载力的影响。

由图5(a)可知,裙宽一定,裙高增大,裙式吸力基础极限承载力随之增大。当加载速度 $v=0.25$ mm/s,

裙式吸力基础 R3H3 与 R3H6 在达到极限承载力后,承载力呈现先稳定随后逐渐减小,裙式吸力基础 R3H9 在达到极限承载力后呈现陡降,随后逐渐减小。由图 5(b)可知,与裙宽为 30 mm 的吸力基础一样,裙宽一定,随着裙高增大,裙式吸力基础极限承载力增大。与之不同的是,裙宽为 50 mm 的吸力基础荷载位移曲线在上升阶段走势一致,在达到极限承载力后稳定随后逐渐减小,并未出现 R3H9 的裙式吸力基础陡降的情况。对比图(a)与图(b)可知,裙宽为 30 mm 的裙式吸力基础达到极限承载力时对应基础位移在 25~35 mm,裙宽为 50 mm 的裙式吸力基础达到极限承载力时对应基础位移要稍后一些,在 30~40 mm。

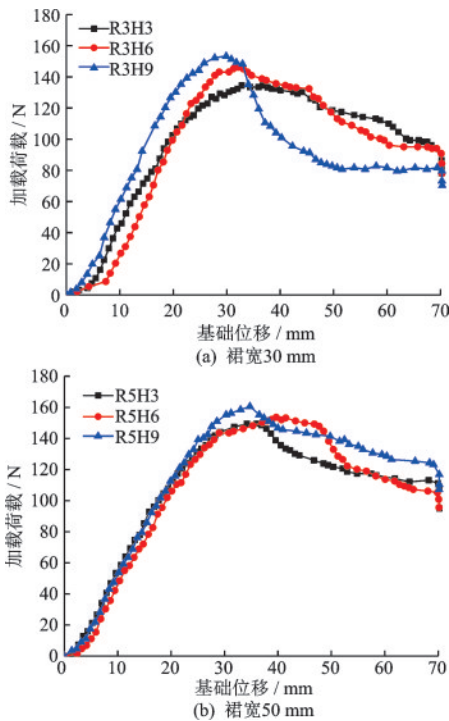


图 5 裙式吸力基础荷载位移曲线
Fig. 5 Uplift load versus vertical displacement

图 6 为裙高为 30 mm,加载速度 $v=5$ mm/s 时,不同裙宽下裙式吸力基础荷载位移曲线。

由图 6 可知,增大裙宽,裙式吸力基础极限承载力增大。三种荷载角度作用下,裙宽由 30 mm 增大到 50 mm,裙式吸力基础极限承载力分别增大 33.7%、13.7%、3%。加载角度为 30°、45°时,随着裙宽的增大,裙式吸力基础承载力增大明显;加载角度 60°时,裙宽增大对于吸力基础极限承载力增大不明显。两种裙宽不同的吸力基础荷载位移曲线在上升阶段走势基本一致,且裙宽改变对于吸力基础

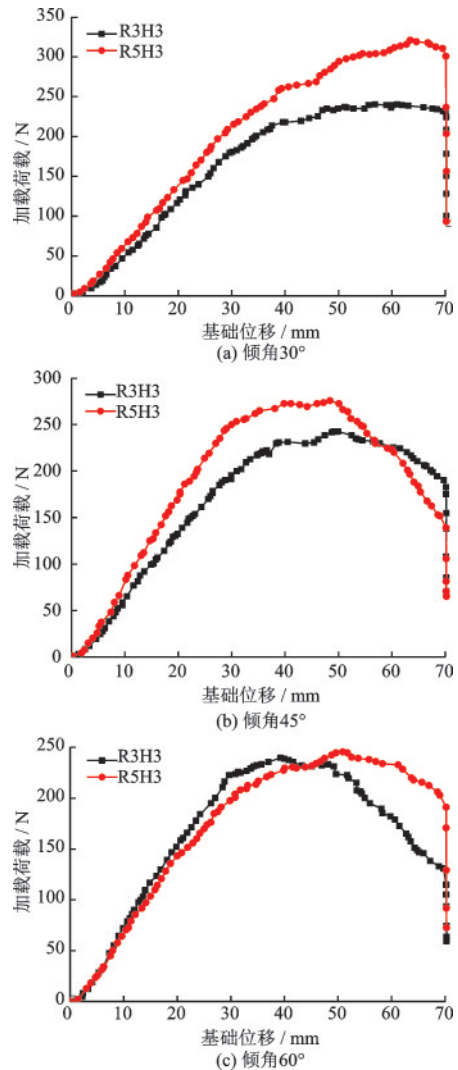


图 6 裙式吸力基础荷载位移曲线
Fig. 6 Uplift load versus vertical displacement

承载力的改变还与加载时的速度有关,其他裙高为 60 mm、90 mm 时,裙宽的改变对承载力的改变与裙高为 30 mm 时基础承载力的变化一致。

2.2 加载角度对基础承载力的影响

以 R3H6 与 R5H6 两种裙式吸力基础在加载速度 $v=5$ mm/s 的情况为例,对比阐述加载角度对基础承载力的影响。

如图 7 所示,随着荷载作用角度不断增大,裙式吸力基础的承载力减小。由此可推断,加载角度与水平方向夹角越小,裙式吸力基础的极限承载力越大;当加载角度与水平方向夹角越大,即趋近于垂直时,基础承载力越小。由图 7(a)可知,R3H6 的裙式吸力基础三种角度作用下达达到极限承载力时对应的位移在 35~50 mm;由图 7(b)可知,R5H6 的裙式吸

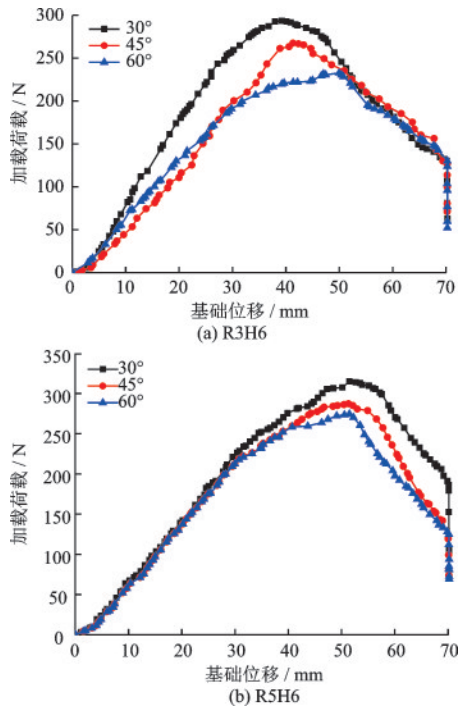


图7 裙式吸力基础荷载位移曲线

Fig.7 Uplift load versus vertical displacement

力基础三种角度作用下达到极限承载力对应的位移要大于R3H6的裙式吸力基础三种角度作用下达到极限承载力时对应的位移,在45~60 mm之间。

表3给出加载速度 $v=5$ mm/s时,三种加载角度下两种裙式吸力基础的极限承载力值。由表3可知,当加载速度 $v=5$ mm/s时,随着加载角度的不断增大,裙式吸力基础的极限承载力逐渐减小。R3H6型号的吸力基础加载角度由 30° 增大为 60° 时,吸力基础的极限承载力减小26.1 N、61.7 N;R5H6型号的吸力基础加载角度由 30° 增大为 60° 时,吸力基础的极限承载力减小28 N、40.7 N。纵向比较可以看出,增大裙宽,裙式吸力基础极限承载力增大。

表3 裙式吸力基础极限承载力

Table 3 Ultimate bearing capacity of modified suction caissons

加载角度	30°	45°	60°
R3H6	293.7 N	267.6 N	232.0 N
R5H6	315.2 N	287.2 N	274.5 N

2.3 加载速度对基础承载力的影响

以裙宽为50 mm的吸力基础为例来说明加载速度对基础承载力的影响。

图8给出四种加载速度下R5H6型号吸力基础

的荷载位移曲线。如图8所示,吸力基础受倾斜荷载作用时,加载速度对吸力基础的承载力影响显著,随着加载速度的增大,裙式吸力基础极限承载力增大。加载角度为 30° 时的加载速度 $v=10$ mm/s的试验中,吸力基础在上拔过程中荷载位移曲线呈线性增加;其他试验中基础上拔初期,裙式吸力基础承载力近似呈线性增加,随着基础上拔位移的不断增大,吸力基础承载力增长放缓,在达到极限承载力后又逐渐减小。由图8(c)可知,随着加载速度由0.25 mm/s增长到10 mm/s,四种加载速度达到极限承载力时的基础位移分别为39.7、42.8、51.5、58.0 mm,加载速度不断增大,吸力基础达到极限承载力时对应的位移增大。当加载速度 $v=10$ mm/s时,分析三种荷载作用角度下基础达到极限承载力时对应的位移可知,加载角度为 30° 时基础达到极限

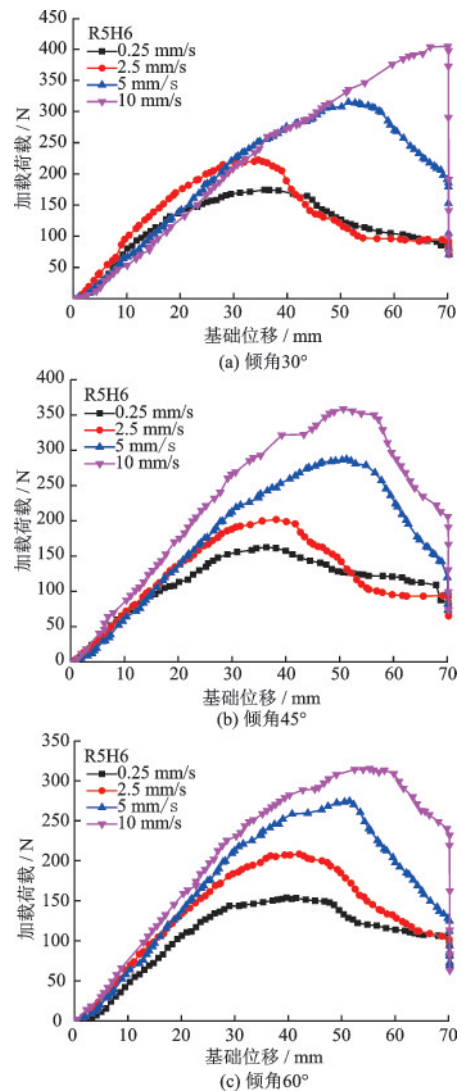


图8 裙式吸力基础荷载位移曲线

Fig.8 Uplift load versus vertical displacement

承载力对应的位移要大于加载角度为45°、60°时基础达到极限承载力对应的位移。

表4和5分别给出四种加载速度、三种加载角度作用下,R3H3和R5H6型号的吸力基础的极限承载力值。由表4可知,随着加载速度不断增大,R3H3型吸力基础受倾斜荷载作用下的极限承载力不断增大。当荷载作用角度为30°时,加载速度为2.5、5、10 mm/s时的基础极限承载力相较于加载速度为0.25 mm/s时的极限承载力分别增大36.6%、67.9%、105.6%。荷载作用角度为45°、60°时,加载速度改变对极限承载力的影响规律同上。纵向比较可知,加载角度由30°增大到60°,吸力基础极限承载力值逐渐减小。

表4 不同加载角度和加载速度下R3H3基础极限承载力
Table 4 Ultimate bearing capacities of the R3H3 caisson under various loading angles and rates

加载角度	加载速度/(mm·s ⁻¹)			
	0.25	2.5	5	10
30°	143.1 N	195.4 N	244.3 N	294.7 N
45°	134.3 N	187.3 N	242.4 N	284.7 N
60°	131.5 N	166.6 N	239.7 N	268.6 N

表5 不同加载角度和加载速度下R5H6基础极限承载力
Table 5 Ultimate bearing capacities of the R5H6 caisson under various loading angles and rates

加载角度	加载速度/(mm·s ⁻¹)			
	0.25	2.5	5	10
30°	174.3 N	222.1 N	315.2 N	404.8 N
45°	162.3 N	208.2 N	287.2 N	358.8 N
60°	153.3 N	201.8 N	274.5 N	315.1 N

对比表4和5可知,由于裙宽、裙高的增大,随着加载速度的不断增大,吸力基础的极限承载力增大更为明显。当荷载作用角度为30°时,加载速度为2.5、5、10 mm/s时的基础极限承载力相较于加载速度为0.25 mm/s时的极限承载力分别增大49.1%、81.2%、132.7%。

3 倾斜荷载作用下裙式吸力基础吸力变化规律

3.1 裙结构尺寸对主桶以及裙内吸力的影响

图9给出了加载速度 $v=0.25$ mm/s,裙宽为

30 mm时,裙高变化下裙式吸力基础吸力-位移曲线。主桶及裙结构内吸力同为正值,为了便于表示方便分析,将主桶及裙结构内吸力展示在同一幅图中。

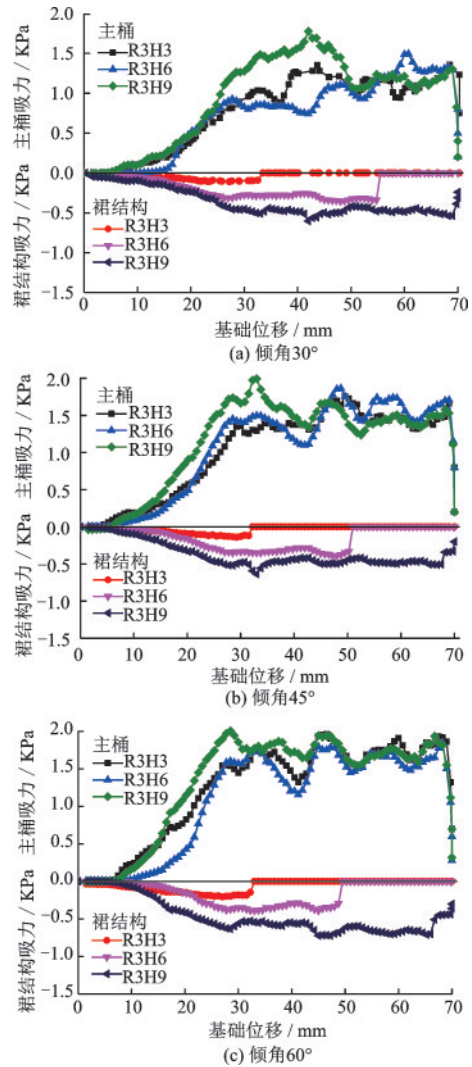


图9 裙式吸力基础桶内吸力与基础位移关系
Fig. 9 Negative pressure versus vertical displacement

如图9所示,裙宽一定,裙高变化影响吸力基础主桶及裙结构内部吸力,且随着裙高增大,吸力基础主桶及裙结构内部吸力增大,裙高的大小影响裙结构内部吸力大小及吸力存在的位移范围。如图9(a)可知,吸力基础主桶内吸力逐渐增大直至稳定,由于裙高的差别,裙高较小的R3H3与R3H6型号基础裙结构被拔出水面,裙结构内部吸力陡降为零,由于加载速度较小,裙结构未有土塞产生,而R3H9型号的吸力基础由于裙结构未被拔出,内部吸力从始至终一直存在。从图9还可以看出,基础受倾斜荷载作用发生位移时,主桶内部吸力是一个

动态变化的过程,当主桶内部吸力达到极限值时,裙结构内部吸力也同时达到极限值。当裙结构被拔出内部吸力陡降为零,主桶内部吸力也会发生陡降。观察 R3H3 与 R3H6 型号基础裙结构都被拔出水面后的吸力-位移曲线走势可知,两条曲线走势及大小基本一致,这也就说明,裙结构未被拔出水面之前,主桶内部吸力与裙结构吸力是相互影响的,且随着裙高的增大,裙高较大的主桶内吸力要大于裙高较小的主桶内的吸力。

图 10 给出加载速度 $v=0.25 \text{ mm/s}$,裙高为 60 mm 时,两种裙宽变化下裙式吸力基础吸力-位移曲线。

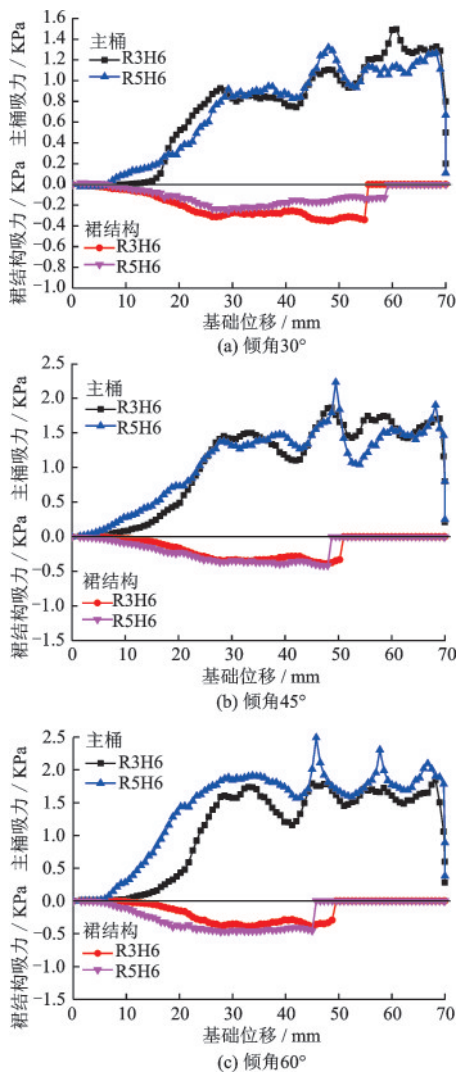


图 10 裙式吸力基础桶内吸力与基础位移关系
Fig. 10 Negative pressure versus vertical displacement

由图 10 可知,两种吸力基础吸力-位移曲线走势基本一致,裙宽的变化对于裙结构内部吸力影响不大,但裙宽改变使得 R5H6 型号吸力基础主桶内部吸力要大于 R3H6 型号吸力基础主桶内部吸力。

图 10(a)可知,两种基础裙结构被拔出水面裙内吸力突变为 0 时基础的位移在 55~60 mm;图 10(b)可知,两种基础裙结构被拔出水面裙内吸力突变为零时基础的位移在 47~52 mm;图 10(c)可知,两种基础裙结构被拔出水面裙内吸力突变为零时基础的位移在 45~50 mm;随着角度的增大,裙结构拔出水面时对应的基础位移不断前移。

3.2 加载角度对主桶以及裙内吸力的影响

图 11 给出加载速度 $v=2.5 \text{ mm/s}$ 时,不同加载角度下 R3H6 与 R5H6 两种型号吸力基础的吸力-位移曲线。由图 11 可知,当裙高为 60 mm 时,加载角度的改变,不仅影响着吸力基础主桶内吸力与裙结构内吸力的大小,还影响裙结构被拔出水面时基础的位移。裙高为 60 mm 时,随着加载角度的不断增大,基础主桶内吸力增大,且裙结构被拔出时的基础位移前移。

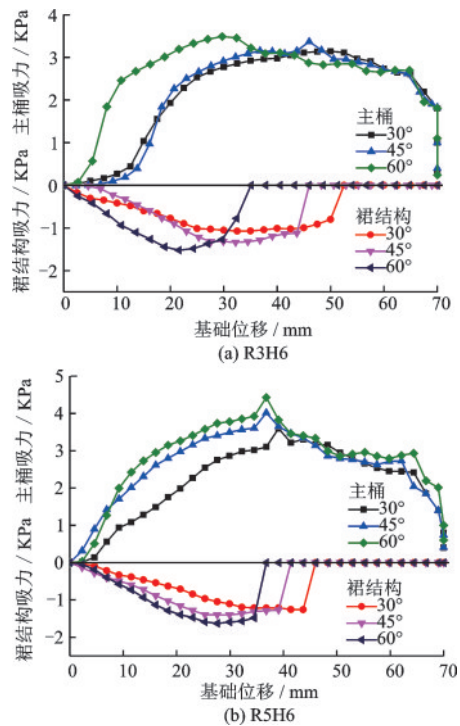


图 11 裙式吸力基础桶内吸力与基础位移关系
Fig. 11 Negative pressure versus vertical displacement

表 6 给出加载速度 $v=2.5 \text{ mm/s}$ 时,三种加载角度下 R3H6 型号吸力基础主桶及裙结构内极限吸力值。

由表 6 可知,随着加载角度的不断增大,吸力基础主桶及裙结构内吸力不断增大,主桶内吸力要远大于裙结构内吸力。加载角度由 30°增大为 60°时,

表6 R3H6型号吸力基础的极限吸力($v=2.5\text{ mm/s}$)

Table 6 Ultimate negative pressure of modified suction caissons($v=2.5\text{ mm/s}$)

加载角度/(°)	主桶内吸力/kPa	裙结构内吸力/kPa
30	3.14	1.07
45	3.34	1.34
60	3.49	1.52

主桶内吸力增大6.4%、11.2%，裙结构内吸力增大25.2%、42.1%，裙结构内吸力增量百分比要大于主桶吸力增量百分比。

表7给出加载速度 $v=2.5\text{ mm/s}$ 时，三种加载角度下R5H6型号吸力基础主桶及裙结构内极限吸力值。

表7 R5H6型号吸力基础的极限吸力($v=2.5\text{ mm/s}$)

Table 7 Ultimate negative pressure of modified suction caissons($v=2.5\text{ mm/s}$)

加载角度/(°)	主桶内吸力/kPa	裙结构内吸力/kPa
30	3.59	1.26
45	4.01	1.40
60	4.43	1.63

由表7可知，加载角度由 30° 增大为 60° 时，主桶内吸力增大11.7%、23.4%，裙结构内吸力增大11.1%、29.4%。对比表6与表7可知，R5H6型号的吸力基础主桶及裙结构内吸力要大于R3H6型号吸力基础，这是由于裙宽的增大及裙结构存在影响主桶内吸力的变化。

3.3 加载速度对主桶以及裙内吸力的影响

图12给出三种荷载作用角度时，不同加载速度下R3H3型号吸力基础的吸力—位移曲线。由图12可知，加载速度对于吸力基础吸力影响显著，加载速度增大，吸力基础吸力增大。三种荷载角度作用下，R3H3型号吸力基础由于裙高较小，吸力基础裙结构内吸力在位移 $0\sim 30\text{ mm}$ 范围不断增大，且加载速度越大，裙结构内部吸力越大，基础位移超过 30 mm 后，裙结构拨出水面，吸力急剧下降为0。

从图12(a)可以看出，当加载速度 $v=0.25\text{ mm/s}$ 时，主桶内吸力呈现逐渐增大，随后稳定的状态，而裙结构内吸力很小，最高仅为 0.1 kPa ；当加载速度 $v=2.5\text{ mm/s}$ 和 5 mm/s 时，主桶内吸力呈现先增大，达到极限吸力后逐渐减小，裙结构内吸力在

$0.3\sim 0.6\text{ kPa}$ ；当加载速度 $v=10\text{ mm/s}$ 时，主桶内吸力不断增大，在基础位移达到 $65\sim 70\text{ mm}$ 时稳定，主桶内吸力达到极限值时的基础位移会后延。观察图12(b)、(c)可知，当加载速度 $v=0.25\text{ mm/s}$ 时，两种加载角度下的主桶吸力仍是逐渐增大随后稳定；加载速度 $v=10\text{ mm/s}$ 时主桶吸力走势与 $v=2.5\text{ mm/s}$ 和 5 mm/s 时主桶吸力走势一致，主桶内吸力先增大后减小，这说明不同加载角度会影响主桶内达到极限吸力时的基础位移。图12还可以看出，随着加载速度的不断增大，主桶及裙结构内达到极限吸力时的基础位移会不断增大。

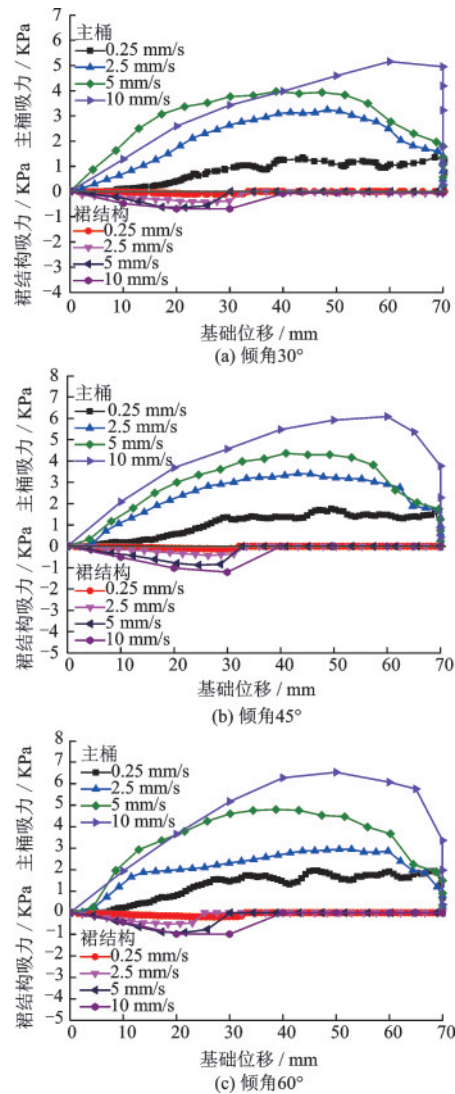


图12 裙式吸力基础桶内吸力与基础位移关系

Fig. 12 Negative pressure versus vertical displacement

表8给出荷载加载角度 60° 时，不同加载速度下R3H3型号吸力基础主桶内及裙结构内吸力极限值。

表8 R3H3型号吸力基础的极限吸力(60°)

Table 8 Ultimate negative pressure of modified suction caissons (60°)

加载速度/(mm·s ⁻¹)	主桶内吸力/kPa	裙结构内吸力/kPa
0.25	1.96	0.21
2.50	2.95	0.52
5.00	4.79	0.92
10.00	6.5	0.99

由表8可知,随着加载速度的增大,R3H3型号吸力基础主桶及裙结构极限吸力值增大。随着加载速度的增大,加载速度为2.5、5、10 mm/s时主桶极限吸力相较于加载速度为0.25 mm/s时主桶内极限吸力增大50.5%、144.4%、231.6%;随着加载速度的增大,加载速度为2.5、5、10 mm/s时裙结构极限吸力相较于加载速度为0.25 mm/s时裙结构内极限吸力增大147.6%、338.1%、371.4%,吸力增大明显。

4 结论

研究倾斜荷载作用下裙式吸力基础在饱和砂土地基中的承载特性。针对不同裙结构的组合分析裙结构对基础承载力的影响,探讨了倾斜荷载作用下裙宽、裙高、加载角度、加载速度的改变对基础承载力的影响,同时分析了裙式吸力基础主桶内及裙结构内吸力的变化规律。得出以下结论:

(1)增大裙结构的裙宽和裙高,基础承载力增大。裙宽为30 mm的吸力基础达到极限承载力时对应基础位移在0.2D~0.3D,裙宽为50 mm的裙式吸力基础达到极限承载力时对应基础位移要稍后一些,在0.25D~0.33D。

(2)加载速度的不断增大,吸力基础受倾斜荷载作用下的极限承载力不断增大。随着加载速度的不断增大,裙式吸力基础达到极限承载力时对应的基础位移值增大。

(3)随着裙高增大,吸力基础主桶及裙结构内部吸力增大,裙高的大小影响裙结构内部吸力大小及吸力存在长短。裙结构未拔出水面之前,主桶内部吸力与裙结构吸力是相互影响的,随着裙高的增大,裙高较大的主桶内吸力要大于裙高较小的主桶内的吸力。

(4)随着加载角度的不断增大,吸力基础主桶内吸力与裙结构内吸力增大。增大裙高,会影响裙

结构出水时的基础位移,同时会影响裙结构内吸力。加载速度增大,吸力基础吸力增大。

参考文献:

[1] 贾宇. 关于海洋强国战略的思考[J]. 太平洋学报, 2018,26(1):1-8.
Jia Y. On China's maritime power strategy[J]. Pacific Journal,2018,26(1):1-8. (in Chinese)

[2] 薛万东. 浅海桶形基础平台抗拔力与抗倾稳定分析[J]. 黄渤海海洋,2001,19(3):87-92.
Xue W D. Analysis of resistance to pullout and stability against tilting for shallow water bucket foundation platform[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2001,19(3):87-92. (in Chinese)

[3] 徐冰. 倾斜荷载作用下吸力式沉箱抗拔性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学,2008.
Xu B. The small scale model test study on inclined load-capacity of suction caisson[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2008. (in Chinese)

[4] Aubeny C, Han P S W, Murff J D. Inclined load capacity of suction caissons[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003, 27(14):1235-1254.

[5] Bang S, Jones K D, Kim K O, et al. Inclined loading capacity of suction piles in sand[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(7): 915 - 924.

[6] Bang S, Cho Y. Ultimate horizontal loading capacity of suction piles[J]. Journal of Offshore and Polar Engineering, 2002, 12(1): 1-8.

[7] Jones K D, Bang S, Cho Y. Pullout capacity of embedded suction anchors in sand[J]. Ocean Engineering, 2007, 34: 2107 - 2114.

[8] Gharbawy S E, Olson R E. Laboratory modeling of suction caisson foundations [C]//Proceeding 8th international Offshore and Polar Engineering. Conference, Montreal, Canada, 1998:537-542.

[9] Gharbawy S E, Iskander M G, Olson R E. Application of suction caisson foundations in the gulf of Mexico[C]. Offshore Technology Conference. OTC, 1998: 531-538.

[10] 李大勇, 王梅, 刘小丽. 离岸裙式吸力基础在砂土地基中沉贯性研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(1): 111-115, 148.
Li D Y, Wang M, Liu X L. Behavior of installation of offshore skirted suction foundation in sand [J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(1): 111-115, 148. (in Chinese)

[11] 李大勇, 张雨坤, 高玉峰, 等. 中粗砂中吸力锚的吸力

- 沉贯模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2277-2283.
- Li D Y, Zhang Y K, Gao Y F, et al. Model tests on penetration of suction anchors in medium-coarse sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2277-2283. (in Chinese)
- [12] 李大勇, 冯凌云, 张雨坤, 等. 饱和细砂中裙式吸力基础水平单调加载模型试验——承载力及变形分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2030-2037.
- Li D Y, Feng L Y, Zhang Y K, et al. Model tests on lateral bearing capacity and deformation of skirted suction caissons in saturated fine sand under horizontal monotonic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2030-2037. (in Chinese)
- [13] 李大勇, 吴宇旗, 张雨坤, 等. 砂土中桶形基础吸力值的设定范围[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 985-992, 1002.
- Li D Y, Wu Y Q, Zhang Y K, et al. Determination of suction range for penetration of suction caissons in sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 985-992, 1002. (in Chinese)
- [14] 白云, 李大勇, 吴宇旗, 等. 倾斜荷载作用下裙式吸力基础承载特性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(1): 205-211.
- Bai Y, Li D Y, Wu Y Q, et al. Study on bearing capacity of modified suction caisson (MSC) foundation under inclined loads [J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2018, 43(1): 205-211. (in Chinese)
- [15] 李大勇, 亓义崧, 张雨坤. 组合荷载作用下裙式吸力基础承载特性数值分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(4): 1369-1377.
- Li D Y, Qi Y S, Zhang Y K. Numerical modelling of bearing capacities of skirted suction caissons under combined loads [J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2017, 42(4): 1369-1377. (in Chinese)
- [16] El-Sherbiny R M. The pullout capacity of suction caisson foundations [D]. Austin: The University of Texas, 1999.
- [17] 刘晶磊, 王建华. 软土中张紧式吸力锚破坏标准模型试验与有限元分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2508-2513.
- Liu J L, Wang J H. Model tests and finite element analysis of failure criterion of suction anchors with taut mooring systems in soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2508-2513. (in Chinese)
- [18] Byrne B W. Investigations of suction caissons in dense sand [D]. Oxford: University of Oxford, 2000.

(本文编辑:周小潭)