

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

李大勇^{1,2}, 冯凌云^{1,2}, 张雨坤^{1,2}, 郭彦雪^{1,2}

(1. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学土木建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 海上风电资源的开发和利用是当今世界关注的热点问题, 作为其塔架的基础, 主控荷载是水平荷载。裙式吸力基础具有更高的水平承载能力和控制水平位移的能力, 故非常适合作为海上风电塔架的基础。通过饱和细海砂中裙式吸力基础的水平单调加载模型试验, 探究基础水平承载力的影响因素及转动点位置的变化规律, 并分析了地基土的变形影响范围及规律。研究发现: 与传统吸力基础相比, 裙式吸力基础的水平承载力提高显著, 且能有效控制水平位移; 水平承载力随基础的裙高、裙宽的增加而增大, 随加载高度的增加而减小; 在水平荷载作用下基础主要是绕某一点(即转动点)发生转动, 转动点位于主桶长度的 0.45~0.7 倍之间; 达到极限荷载时, 地表隆起范围远远大于沉降范围, 沿加载轴线方向, 隆起范围约为 2.5 倍主桶直径。

关键词: 裙式吸力基础; 饱和细砂; 模型试验; 水平极限承载力; 单调加载; 变形分析

中图分类号: TU441; P751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)11-2030-08

作者简介: 李大勇(1971-), 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程等方面的研究。E-mail: ldy@sdust.edu.cn

Model tests on lateral bearing capacity and deformation of skirted suction caissons in saturated fine sand under horizontal monotonic loading

LI Da-yong^{1,2}, FENG Ling-yun^{1,2}, ZHANG Yu-kun^{1,2}, GUO Yan-xue^{1,2}

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

Abstract: Applications of offshore wind energy are increasingly attracting world attention. Horizontal loads play a predominant role in the foundation design. The skirted suction caisson, as a novel type of foundation, is capable of providing greater lateral bearing capacity and limiting the horizontal displacement, especially suitable for foundations of offshore wind turbines. A series of model tests are conducted to investigate the behaviors of skirted suction caissons under monotonic lateral loading in saturated marine natural fine sand. The test results show that the horizontal bearing capacity of the skirted suction caisson is significantly improved compared with that of the traditional suction caisson, and its horizontal displacement is effectively controlled. The bearing capacity increases with the increasing size of the skirted structure, and decreases with the increase of the loading eccentricity. The skirted suction caisson mainly rotates with a rotation center which locates approximately at a depth of 0.45~0.7 times the main structural length. When the ultimate load is reached, toward the loading direction, the range of ground surface have is approximately 2.5 times the main structural diameter away from the edge of caissons.

Key words: skirted suction caisson; saturated fine sand; model test; horizontal bearing capacity; monotonic loading; deformation analysis

0 引言

能源枯竭、环境污染及温室效应问题是当今全球面临的三大危机, 为了解决这些问题, 人们不得不改变原有能源结构, 寻求新型清洁、可再生能源进行开发和利用。风能作为太阳能的一种形式, 得到了世界各国的关注, 海上风电由于其资源丰富、风速稳定、不占用陆地、具有零污染和零排放等优点, 得到了海

洋国家的高度重视^[1]。欧洲已成为全球海上风电的先导, 仅 2011 年上半年就有 348.1 MW 的海上风电运行并网, 11 个在建海上风场总装机将达 2844 MW。2012 年上半年, 欧洲海上风电装机 132 台, 装机容量达

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078227); 山东省自然科学基金项目(ZR2009FM003); 教育部留学回国人员科研启动基金项目
收稿日期: 2013-03-25

523.2 MW, 另有 13 个风场在建, 建成后将达 3762 MW。中国是煤炭利用大国, 同时也是风电消费大国, 然而风电所占比例不到整个能源结构的 1%, 风力发电前景可观。数据显示, 海上风力发电机的基础投资占总花费的 35%, 而上部结构主要承受风荷载、波浪荷载、洋流荷载和冰荷载, 这些荷载大多作用在水平方向。因此, 必须有效提高基础的水平承载能力和控制其水平位移, 以确保风机安全、经济、高效的运营。

吸力基础在海洋工程中的应用可追溯到 20 世纪 80 年代^[2], 通常用来系泊海上浮动式结构物^[3]; 20 世纪 90 年代, 被用作海洋油、气平台等永久结构的基础, 如挪威的 Gullfaks C 重力式平台是世界上第一个使用吸力基础的永久海洋平台^[4]; 近年来, 吸力基础也在海上风力发电工程中得到了实际应用^[5], 引起了国内外的关注。

吸力基础在中国已开展了较多的工程实践, 如 1999 年 10 月首次在胜利油田埕北 CB20B 海洋平台应用吸力基础^[6], 南海 JZ20-2 油田采用了单点系泊吸力锚基础。目前, 虽然还没有应用吸力基础的海上风电工程, 但广东珠海已经开展了这方面的科研工作; 另外, 2011 年 12 月中国首个使用大直径吸力基础的测风塔, 在山东昌邑海域建成, 这将对我国海上风电吸力基础的发展起到积极的推动作用。

当海水深度超过 20 m 时, 采用桩基施工异常困难, 主要表现在难以控制夯力大小和保持桩身垂直度, 而吸力基础却能很好地弥补这一不足。此外吸力基础具有施工简单, 速度快, 造价经济和可重复利用(通过向基础内注水, 即“吸力”施加的逆过程, 可方便拔出)等优点。例如: 胜利油田埕北 CB20B 吸力基础, 直径 4 m, 穿入土中 4 m, 4 h 内即完成沉贯, 足见其施工速度之快。吸力基础在深海中使用优势更加突出(现已在 2500 m 深的海域中得到成功应用)。

吸力基础承载性能研究一直备受国内外学者的关注, 涉及静力或循环荷载作用下的竖向承载力^[7]、水平承载力^[8]、抗拔承载力研究^[9]及水平、竖向和弯矩组合荷载作用下的承载性能分析^[10]。采用的研究方法有楔体极限平衡理论方法^[11]、有限元数值方法^[12]、离心模型试验^[13]及 1g 模型试验方法^[14]。涉及到的地基土有粉土、黏性土和砂土, 但黏性土中的研究多于砂土。

传统吸力基础水平承载力研究取得了一系列研究成果。Huang 等^[15]通过三维有限元对不排水条件下的黏性土中吸力基础水平承载力进行了研究, 认为水平承载力与 L/D 有关, 当 $L/D < 0.5$ 时, 水平承载力提高速率线性增加, 而当 $L/D > 0.5$ 时, 提高速率降低, 并

定性认为基础转动点位置随 L/D 的增加而下移。朱斌等^[16]在粉土中进行了大比尺水平加载模型试验, 探究了土压力的分布规律, 认为基础转动点位于桶顶中心以下 $4/5$ 倍桶基长度处。张建红等^[17]进行了粉砂条件下吸力基础静、动承载力离心模型试验, 发现随荷载增加基础转动中心逐渐下移, 但没有涉及加载高度对承载力的影响。孙曦源等^[18]发现水平荷载作用下饱和和软黏土地基中吸力基础发生转动破坏, 提出了一种合理考虑转动中心位置及土体剪切效应的极限平衡求解方法。刘振纹等^[19]在软黏土中进行模型试验, 得到了水平荷载作用下吸力基础主动、被动区的土压力分布, 结合有限元分析, 采用极限平衡法提出了水平静承载力的计算公式。

裙式吸力基础^[20]是在传统吸力基础上增加了裙结构, 故能有效提高基础水平承载力和减少其侧移, 特别适合作为海上风力发电机的基础。笔者提出的这种基础形式, 与澳大利亚西澳大学 Bienen 等^[21]、天津大学 Li 等^[22]的思路不谋而合, 预示这种基础型式的研究和应用将有广阔前景。

综上所述, 传统吸力基础在水平荷载作用下基础转动点问题的研究还需进一步深入。裙式吸力基础是一种新型基础形式, 对它的认识和研究也刚刚起步, 但传统吸力基础的研究方法对研究裙式吸力基础有很好的借鉴作用。采用模型试验, 考虑裙式吸力基础不同几何尺寸, 在相同试验条件下, 进行基础的水平单调加载试验, 得到了裙高、裙宽及加载高度对基础水平承载力的影响规律; 确定了裙式吸力基础转动点的位置; 分析了地基土的影响范围及变形规律。

1 模型试验

1.1 试验装置

(1) 模型箱

如图 1 所示, 钢制模型箱尺寸为长×宽×高=1 m×1 m×0.8 m, 其尺寸能够消除边界条件对试验过程的影响; 模型箱侧面采用方钢加固, 控制侧向变形。



图 1 试验装置

Fig. 1 Model test setup

(2) 裙式吸力基础模型

裙式吸力基础模型(图2)主桶直径 D_1 为120 mm,主桶长度 L_1 为240 mm,其余尺寸见表1。其中承台厚10 mm,主桶壁厚及裙壁厚均为2 mm。基础顶板中央设置加载杆端头,一侧设有直径为1 cm的连接孔,另外在裙顶部分别对称预留4个永久排水孔,以利于沉贯。模型试验已证实传统吸力基础能穿越中粗砂^[23],也能从理论角度和模型试验方面证实裙式吸力基础能更好地穿越细砂以下土类^[24]。

表1 裙式吸力基础尺寸 ($L_1/D_1=2$)

Table 1 Dimensions of skirted suction caissons ($L_1/D_1=2$)

基础模型编号	裙宽 D_2 /mm	裙高 L_2 /mm
II	0	0
II 3-0	30	0
II 3-3	30	30
II 3-6	30	60
II 3-9	30	90
II 5-0	50	0
II 5-3	50	30
II 5-6	50	60
II 5-9	50	90

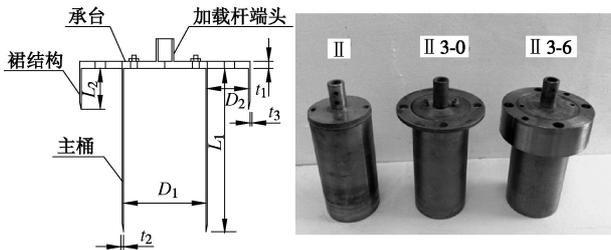


图2 裙式吸力基础模型
Fig. 2 Skirted suction caissons

(3) 测试仪器

沿加载杆高度方向布置2支LVDT,量程为50 mm,精度为0.0125 mm。2支LVDT分别标记为LVDT1和LVDT2,其中LVDT1测量加载点水平位移;2支LVDT间隔12 cm,通过LVDT1和LVDT2测得的位移可以计算转动点的位置。在基础的前后两侧沿深度方向各布置4支应变式微型土压力计,量程为50 kPa。此外,沿加载方向,在基础的前侧布置了8支竖向位移计(量程为30 mm,精度为0.02 mm),以测量加载时地基土表面的隆起量,如图3所示。

1.2 试验用砂

试验砂土取自青岛黄海域金沙滩,颗粒级配如图4所示,其物理参数为:不均匀系数 $C_u=1.78$,曲率系数 $C_c=0.997$,平均粒径 $D_{50}=0.097$ mm,比重 $G_s=2.69$,最大孔隙比 $e_{max}=0.903$,最小孔隙比 $e_{min}=0.61$,天然孔隙比 $e=0.62$,相对密实度 $D_r=0.997$,

渗透系数 $k=0.002$ cm/s。试验用砂为非常密实状态的细海砂。

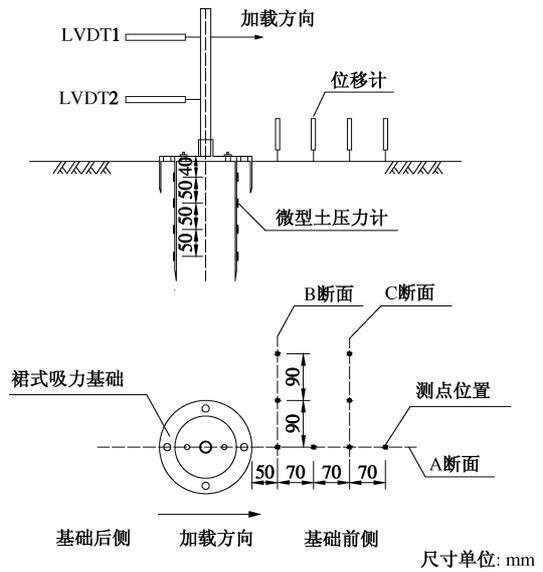


图3 传感器布置

Fig. 3 Layout of transducers

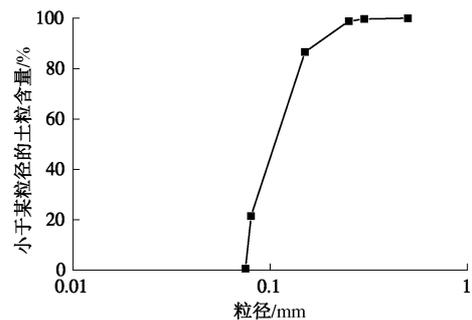


图4 颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle-size distribution curve

1.3 试验过程

模型箱底部铺设一层10 cm厚砾石垫层作为排水层,保证模型箱内水位在排水过程中均匀下降,确保砂土均匀饱和和固结。垫层之上铺设一层土工布作为反滤层,防止模型箱排水过程中砂土颗粒被水流带走。土工布铺设完毕后向模型箱内注水,采用砂雨法分层撒砂。为确保试验结果的可靠性和可重复性,严格控制每次试验条件,使其具有一致性,并且每个试验工况至少重复3次。为此,每次试验,将模型箱内深度为1.5倍主桶长度范围内的砂土整体进行松动,然后挖开模型箱中部的砂土(这些过程中,砂要始终处于水面下,以保证其完全饱和),把基础及微型土压力计埋入预定位置,注入10 cm高度的水,随后排水加速砂土固结,水位降至2 cm,重复上述两次注水排水固结过程。排水固结完毕后刮平砂土表面,架设加载装置及量测装置,继续静止放置12 h后开始试验。试验

分为 4 个不同的加载高度 $H=12, 18, 24, 30$ cm。采用荷载控制式加载方式, 由标准砝码实现逐级加载, 每级荷载约为 2.1 N, 当某级荷载作用下 LVDT 读数无变化或者以每 5 min 变化一个刻度 (0.0125 mm) 时再加下一级荷载; 当某级荷载作用下 LVDT 读数持续增加直至基础失稳倾斜, 此时已达极限承载力, 试验结束。

2 试验结果及分析

裙式吸力基础水平单调加载试验过程如图 5 所示。图 6 给出 II 5-6 工况下, 3 次重复试验得到的荷载 - 位移关系曲线, 水平极限荷载误差在 5% 以内, 可判定每次试验条件基本一致。

另外, 图 6 表明加载过程可分为 3 个阶段: 首先是弹性变形阶段, 此时基础位移量很小, 地基表面没有明显的变形迹象 (图 5 (a)); 继而转向塑性变形阶段, 基础开始明显倾斜, 水平位移随荷载的增加不断增大, 此时加载点处水平位移达 10 mm, 沿加载方向基础前侧土体向上隆起, 而后侧土体沉陷, 并且沉陷区域逐渐加宽、加深, 水中的砂土具有一定的自立性, 说明砂土发生剪胀作用 (图 5 (b))。此外, 试验中发现, 在基础后侧沉陷区域之外, 部分区域砂土有明显的隆起现象; 最后土体进入破坏阶段, 荷载保持不变而基础位移量急剧增大, 直至土体破坏, 基础失稳 (图 5 (c))。



图 5 试验过程
Fig. 5 Test processes

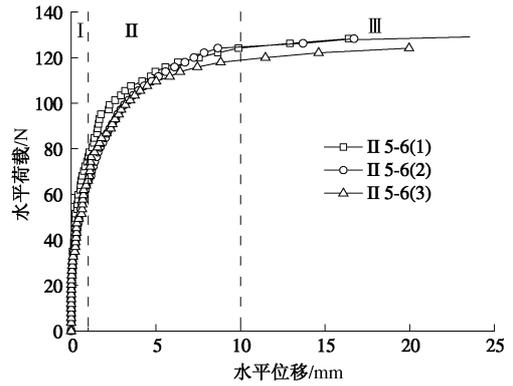


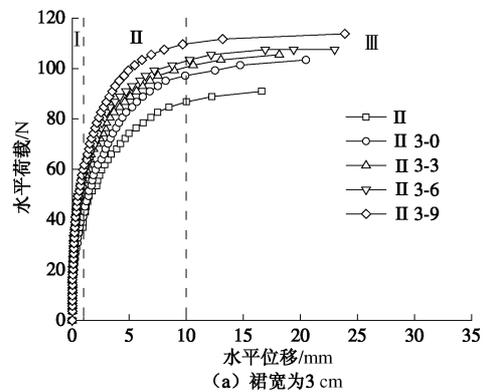
图 6 荷载 - 位移关系曲线

Fig. 6 Relationship between horizontal loading and displacement

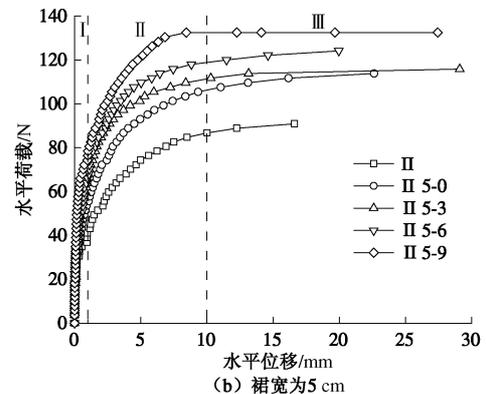
2.1 裙尺寸对水平承载性能的影响

以加载高度为 24 cm ($H/L_1=1$) 的裙式吸力基础水平加载试验为例, 对比阐述不同裙高和裙宽对基础水平承载性能的影响。

对于不同几何尺寸的裙式吸力基础, 其荷载 - 位移关系曲线的趋势基本一致, 均可分为如前文所述的 3 个阶段。从图 7 得出: 与传统吸力基础 (即没有“裙”结构, 以下简称主桶基础) 相比, 裙式吸力基础水平承载力平均提高约 26%, 具体增长比例如表 2 所示; 同一裙宽下, 其水平承载力随着裙高的增加不断增大; 同一荷载等级作用下 (以 90 N 为例), 裙式吸力基础的水平位移较主桶基础而言大幅度减小, 最大减小幅度为 86%, 如表 3 所示。



(a) 裙宽为 3 cm



(b) 裙宽为 5 cm

图 7 水平荷载 - 位移关系曲线

Fig. 7 Relationship between horizontal loading and displacement

表2 水平极限承载力增长比

基础编号	增长比例/%	基础编号	增长比例/%
II 3-0	13.7	II 5-0	25.1
II 3-3	15.9	II 5-3	27.4
II 3-6	18.3	II 5-6	36.6
II 3-9	25.1	II 5-9	45.7

表3 裙式吸力基础的水平位移 (90 N)

基础编号	水平位移/mm	基础编号	水平位移/mm
II	13.4	II	13.4
II 3-0	6.8	II 5-0	4.4
II 3-3	5.6	II 5-3	2.6
II 3-6	4.4	II 5-6	2.2
II 3-9	3.4	II 5-9	1.8

主桶基础II和裙式吸力基础的水平极限承载力如图8所示,其中虚线表示主桶基础的水平极限承载力。此图直观的说明了裙宽及裙高对水平承载力的影响:随着裙宽的增加,基础的水平极限承载力不断增大,与裙宽为3 cm的基础相比,裙宽为5 cm的基础的水平极限承载力平均提高了约12.9%。

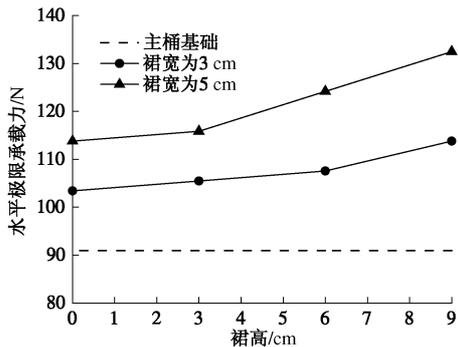


图8 裙高和裙宽对水平极限承载力的影响

Fig. 8 Horizontal bearing capacities for various skirted structures

综上所述,裙结构的设置一方面增加了基础的顶面积和侧面积,增大了基础与土体的摩擦力和土抗力,极大提高了水平承载能力;另一方面也提高了基础的刚度,有效减小了其在水平荷载作用下的水平位移。此外,裙结构也减小了海水直接冲刷海床给基础造成的不利影响,从而保证了基础的承载能力并延长了使用寿命,特别适合用作海上风力发电机的基础。

2.2 转动点的分布规律

由试验观察以及试验结果分析可知,基础在水平荷载作用下主要围绕某点发生转动。因此,确定转动点的位置对研究裙式吸力基础的承载性能、基础与土体之间的响应及基础的破坏机理意义重大。通过设置在加载杆上的两只LVDT所测得的数据即可计算出转动点的位置。下面以加载高度为24 cm ($H/L_1=1$)的裙式吸力基础为例进行阐述。

图9为水平荷载与转动点位置关系曲线,结果表明随着荷载的增加,基础转动点开始向基础埋深方向

移动,当接近基础水平极限承载力时趋于一定值。图10为基础水平位移与转动点位置关系曲线,从图中也可以看出,当加载点水平位移达为10 mm左右时基础转动点位置保持不变,对照荷载-位移关系曲线可知,此时,基础开始进入失稳阶段。

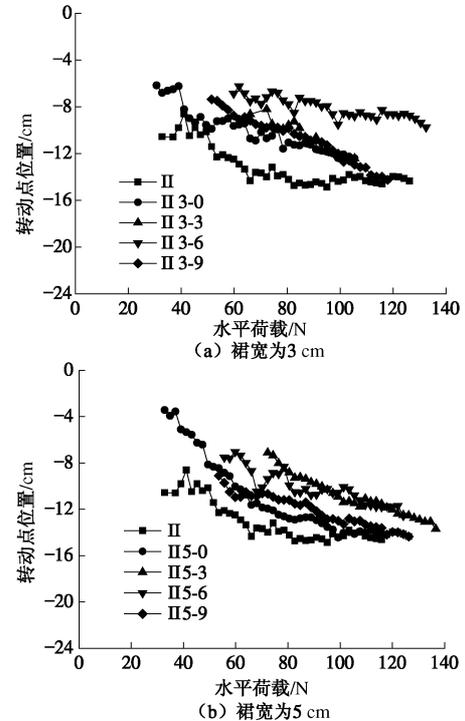
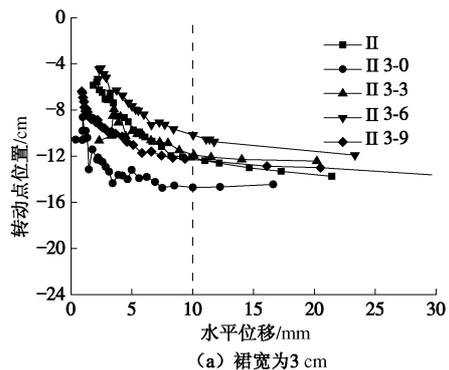


图9 水平荷载-转动点关系曲线 ($H/L_1=1$)

Fig. 9 Relationship between horizontal loading and rotation center ($H/L_1=1$)

裙式吸力基础的转动点分布如图11所示。由图11分析可知,相对于主桶基础,裙式吸力基础的转动点略有上移,此趋势在图9,10中体现的更为明显。不同尺寸基础的转动点分布虽略有不同,但大都集中在0.45~0.7倍主桶长度范围内。

以裙宽为5 cm的裙式吸力基础为例,说明加载高度 ($H/L_1=0.5, 0.75, 1, 1.25$)对裙式吸力基础转动点分布的影响(如图12所示)。从图12中可以看出:不同几何尺寸的裙式吸力基础,其转动点分布随加载高度的变化不显著,大多分布在0.45~0.7倍的主桶长度范围内。



(a) 裙宽为3 cm

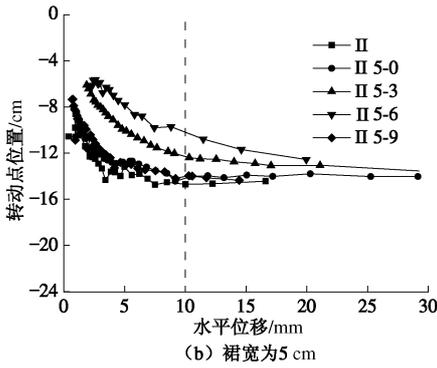


图 10 水平位移 - 转动点关系曲线 ($H/L_1=1$)

Fig. 10 Relationship between horizontal deflection and rotation center ($H/L_1=1$)

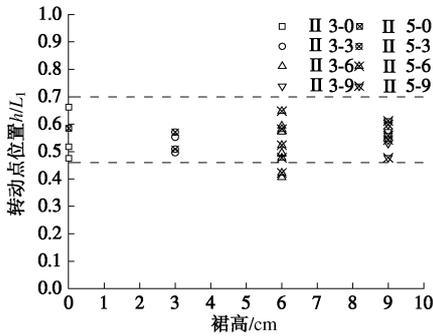


图 11 转动点分布 ($H/L_1=1$)

Fig. 11 Distribution of rotation center ($H/L_1=1$)

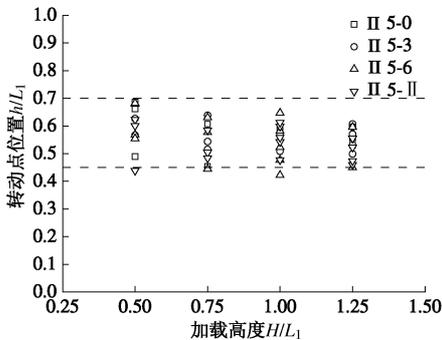


图 12 加载高度 - 转动点关系曲线

Fig. 12 Relationship between loading eccentricity and rotation center

2.3 加载高度对水平承载力的影响

对裙宽为 5 cm 的吸力基础, 分别进行 4 个加载高度 ($H/L_1=0.5, 0.75, 1$ 和 1.25) 的单调加载试验, 得到水平极限承载力 - 加载高度关系曲线 (图 13)。从图 13 中可知裙式吸力基础的水平承载力随加载高度的增加而减小, 当加载高度从 0.5 增加到 1.25 时, 基础的水平承载力分别降低了约 21%, 38%, 5%。这是因为加载高度增加, 作用于基础顶面的倾覆力矩增大, 从而降低了基础的水平承载力。此外, 在此图中针对一个固定的加载高度, 可以直观地看出随着裙高的增加, 基础的水平极限承载力也随之增加。

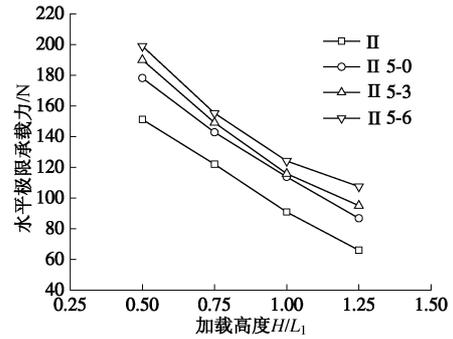


图 13 水平极限承载力 - 加载高度关系曲线

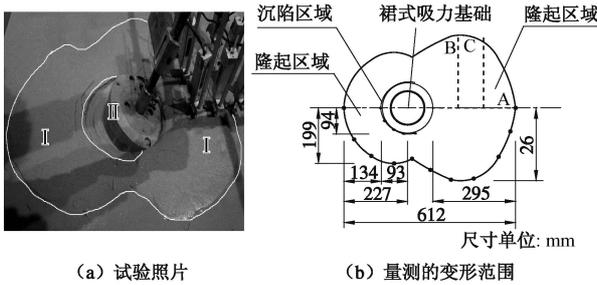
Fig. 13 Relationship between horizontal ultimate bearing capacity and loading eccentricity

3 砂土地基变形分析

确定裙式吸力基础水平荷载作用下地基的影响范围, 可以为基础水平承载力解析模型的建立提供依据。通过观察试验现象, 发现基础受水平荷载作用时, 沿加载方向基础前侧土体向上隆起, 后侧土体发生沉陷, 沉陷范围之外, 伴随隆起现象, 且地基的变形沿加载轴线具有对称性。因此, 沿加载方向在基础的一侧布设了 8 支竖向位移计用于测量砂土表面的隆起量 (布设方案见 1.1 节), 另一侧则用于观察试验现象及确定变形范围。在某一级荷载作用下, 根据位移计读数及观察到的地基的变形, 沿变形边界插上标签棒, 并量测其坐标, 便可得到该级荷载作用下地基的隆起及沉陷范围。最后一级荷载作用下量测的范围作为地基的最终变形范围。以加载高度为 24 cm ($H/L_1=1$), II 3-0 工况试验数据进行阐述。

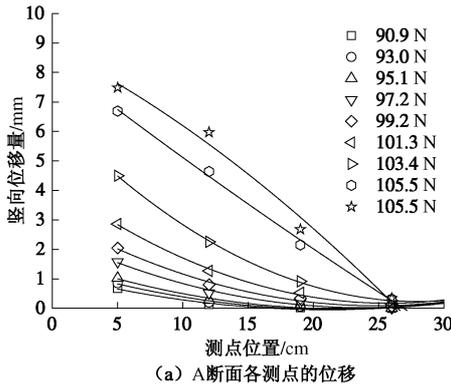
图 14 所示为基础失稳时周围砂土表面变形区域的试验观测及量测范围。图 14 (a) 中, I 表示砂土表面隆起区域, II 表示砂土表面沉陷区域; 图 14 (b) 中虚线所示为采用位移计读数拟合的断面隆起范围。由图 14 (b) 可得, 基础前侧与后侧沿加载轴线方向隆起范围分别为 29.5, 13.4 cm, 约为 2.5 倍和 1.1 倍主桶直径; 基础后侧沿加载轴线方向沉陷范围距基础初始位置边缘为 3 mm。

对各隆起断面量测数据采用二次多项式进行拟合, 得到不同荷载作用下各断面的竖向位移量如图 15 所示。试验结果表明: ①沿加载轴线方向, A 断面位移计量测的地基最大隆起量约为 7.5 mm, 由拟合曲线可知距基础边缘为 30 cm 处隆起量基本为 0, 影响范围约为 2.5 倍的主桶直径, 与图 14 中量测的隆起范围 29.5 cm (距离基础前侧边缘) 基本一致。②在 B、C 断面上, 位于加载轴线处的地基隆起量最大, 分别为 7.5, 2.7 mm, 距加载轴线约 25 cm 处隆起量基本为 0, 与图 14 中量测的范围一致。

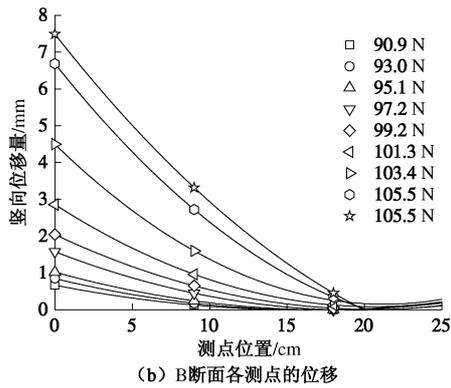


(a) 试验照片 (b) 量测的变形范围
图 14 地基表面变形范围

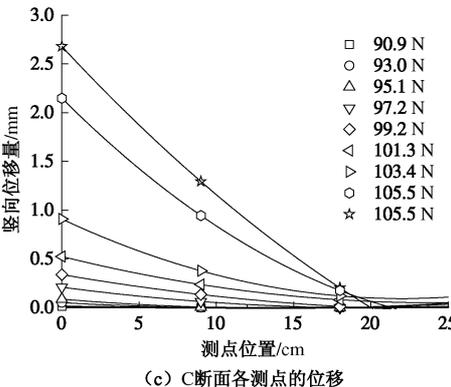
Fig. 14 Deformation of ground surface



(a) A断面各测点的位移



(b) B断面各测点的位移



(c) C断面各测点的位移

图 15 II 3-0 各断面的竖向位移

Fig. 15 Vertical displacements of skirted suction caisson II 3-0

4 结 论

本文通过模型试验研究了饱和细砂中裙式吸力基础在水平单调加载条件下的承载性能及变形特性，得

出以下 3 点结论。

(1) 与传统吸力基础相比，裙式吸力基础的水平承载力提高显著，同时有效控制了基础的位移。例如 90 N 时，其水平位移最大减小了约 86%。此外，基础的水平承载力随裙高、裙宽的增加而增大，但随加载高度的增加而减小。

(2) 相比于主桶基础，裙式吸力基础的转动点略有上移。不同几何尺寸基础的转动点位置虽略有不同，但大都分布在主桶长度的 0.45~0.7 倍之间。

(3) 基础极限荷载条件下，沿加载轴线方向，地基隆起范围约为 2.5 倍主桶直径，沿与加载轴线相反方向，地基隆起范围约为 1.1 倍主桶直径。相比于地基隆起范围，基础后侧砂土沉降范围较小。

需要注意的是，上述结论是基于小比尺模型试验得到的，虽然与现场实际工程会存在一定差别，但是其普遍规律对于实际工程仍具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 李大勇, 刘小丽, 孙宗军. 海上风电塔架基础的新型吸力锚研发[J]. 海洋技术, 2011, 30(3): 83 - 87. (LI Da-yong, LIU Xiao-li, SUN Zong-jun. A novel type suction anchors for offshore wind turbines[J]. Ocean Technology, 2011, 30(3): 83 - 87. (in Chinese))
- [2] TJELTA T. Suction piles: Their position and application today[C]// Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, 2001: 1 - 6.
- [3] KWANG J, CHO H, BANG S, et al. Embedded suction anchors for mooring of a floating breakwater[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2010, 132: 1 - 5.
- [4] TJELTA T, HERMSTAL M, ANDENAES E. The skirted pile Gullfaks C platform installation[C]// Offshore Technology Conference, OTC 6473. Houston, 1990.
- [5] BYRNE B W, HOULSBY G T, MARTIN C. Suction caisson foundations for offshore wind turbines[J]. Wind Engineering. 2002, 26(2): 145 - 155.
- [6] ZHANG Shi-hua, ZHENG Quan-an, LIU Xia-nan. Finite element analysis of suction penetration seepage field of bucket foundation platform with application to offshore oilfield development[J]. Ocean Engineering, 2004, 31: 1591 - 1599.
- [7] VILLALOBOS F, BYRNE B W, HOULSBY G T. Model testing of suction caissons in clay subjected to vertical loading[J]. Applied Ocean Research, 2010, 32: 414 - 424.
- [8] BANG S, JONES K D, KIM K O, et al. Inclined loading

- capacity of suction piles in sand[J]. *Ocean Engineering*, 2011, **38**: 915 - 924.
- [9] 黎冰, 郑翔, 高玉峰, 等. 砂土中吸力式沉箱基础抗拔承载特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(5): 902 - 907. (LI Bing, ZHENG Xiang, GAO Yu-feng, et al. Model tests on pull-out capacity of suction caisson foundation in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(5): 902 - 907. (in Chinese))
- [10] BRANSBY M F, RANDOLPH M F. Combined loading of skirted foundation[J]. *Géotechnique*, 1998, **48**: 637 - 655.
- [11] ZHANG J H, CHEN Z Y, LI F. Three-dimensional limit analysis of suction bucket foundations[J]. *Ocean Engineering*, 2010, **37**: 790 - 799.
- [12] 施晓春, 龚晓南, 徐日庆. 水平荷载作用下桶形基础性状的数值分析[J]. *中国公路学报*, 2002, **15**(4): 49 - 52. (SHI Xiao-chun, GONG Xiao-nan, XU Ri-qing. Numerical analysis of properties of bucket foundation under horizontal forces[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2002, **15**(4): 49 - 52. (in Chinese))
- [13] 鲁晓兵, 王义华, 张建红, 等. 水平动载下桶形基础变形的离心机实验研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(7): 789 - 791. (LU Xiao-bing, WANG Yi-hua, ZHANG Jian-hong, et al. Centrifuge test on the deformation of bucket foundation under horizontal vibration load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(7): 789 - 791. (in Chinese))
- [14] EL-SHERBINY R M. Performance of suction caisson anchors in normally consolidated clay[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2005.
- [15] HUANG L C, KIM S R. Evaluation of vertical and horizontal bearing capacities of bucket foundations in clay [J]. *Ocean Engineering*, 2012, **52**: 75 - 82.
- [16] ZHU B, KONG D Q, CHEN R, et al. Installation and lateral loading tests of suction caissons in silt[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**: 1070 - 1084.
- [17] 张建红, 林小静, 鲁晓兵. 水平荷载作用下张力腿平台吸力式基础的物理模拟[J]. *岩土工程学报*, 2007, **27**(1): 77 - 81. (ZHANG Jian-hong, LIN Xiao-jing, LU Xiao-bing. Physical modelling of suction foundations of TLPs under horizontal loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **27**(1): 77 - 81. (in Chinese))
- [18] 孙曦源, 栾茂田, 唐小微. 饱和软黏土地基中桶形基础水平承载力研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(2): 667 - 672. (SUN Xi-yuan, LUAN Mao-tian, TANG Xiao-wei. Study of horizontal bearing capacity of bucket foundation on saturated soft clay ground[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(2): 667 - 672. (in Chinese))
- [19] 刘振纹, 王建华, 秦崇仁, 等. 负压桶形基础地基水平承载力研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(6): 691 - 695. (LIU Zhen-wen, WANG Jian-hua, QIN Chong-ren, et al. Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(6): 691 - 695. (in Chinese))
- [20] 李大勇, 都浩, 孙宗军, 等. 海底裙式吸力锚: 中国, ZL200920239914.8[P]. 2010-09-15. (LI Da-yong, DU Hao, SUN Zong-jun. Offshore skirted suction anchors: China ZL200920239914.8[P]. 2010-09-15. (in Chinese))
- [21] BIENEN B, GAUDIN C, CASSIDY M, et al. Numerical modeling of a hybrid skirted foundation under combined loading[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, **45**: 127 - 139.
- [22] LI Y, YANG S, ZOU X. Advanced concept design and numerical study of suction caisson bucket foundation in deep ocean[J]. *Ocean Engineering*, 2012, **54**: 142 - 149.
- [23] 李大勇, 张雨坤, 高玉峰, 等. 中粗砂中吸力锚的负压沉贯模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(12): 2277 - 2283. (LI Da-yong, ZHANG Yu-kun, GAO Yu-feng, 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))
- [24] 刘小丽. 海上风电裙式吸力锚基础沉贯及渗流规律研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011. (LIU Xiao-li. Behavior of installation and seepage law of offshore skirted suction foundation for offshore wind turbines[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese))