

# 裙结构对裙式吸力基础水平承载性能的影响

冯凌云<sup>1,2</sup>, 李大勇<sup>1,2</sup>, 陈延彬<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾重点实验室, 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:**通过饱和细砂中裙式吸力基础的水平单调加载模型试验,探究了裙结构对基础水平承载力及土压力分布的影响。结果表明:不同加载高度下,与传统吸力基础相比,裙式吸力基础水平承载力显著提高,有效控制了基础的水平位移,且基础水平承载力随着裙高、裙宽的增加显著增加;不同条件下基础的归一化荷载-水平位移关系曲线可用同一公式表示。基础周围土压力的发展与基础的水平位移有密切联系,相比于裙宽对土压力分布的影响,裙高的变化对于主筒周围土压力分布的影响更为明显。此外,根据净土压力沿深度方向的分布规律,确定水平荷载作用下基础转动点约位于 0.6~0.7 倍的主筒埋深处。

**关键词:**裙式吸力基础;砂土地基;模型试验;水平承载力;土压力

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)01-0085-07

## Effects of the Skirted Structure on Lateral Bearing Behavior of Skirted Suction Caissons

Feng Lingyun<sup>1,2</sup>, Li Dayong<sup>1,2</sup>, Chen Yanbin<sup>1,2</sup>

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

2. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology,  
Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** Effects of the skirted structure dimensions on lateral bearing capacity and the distribution of earth pressure were investigated through model tests conducted in saturated fine sand. The test results prove that compared with the traditional caisson, the skirted suction caisson can control the deflection more effectively, and its lateral bearing capacity increases to a greater extent with increasing length and width of the skirted structure. A unique relation was established between lateral load and deflection in the normalized form. It shows that there is a good relation between earth pressure mobilized and deflection of caissons, and the earth pressure is more sensitive to the skirt length than the skirt width. In addition, the net earth pressure distribution method was employed to determine the position of rotation center, which is approximately at a depth of 0.6–0.7 times the main structure length.

**Key words:** skirted suction caisson; sand foundation; model test; lateral bearing capacity; earth pressure

吸力基础是一种顶部封闭下端开口的钢制圆筒基础,它利用负压进行施工,成本低廉,安装简捷,并且可以重复利用,通常用来系泊海上浮动式结构物<sup>[1]</sup>,20世纪90年代被作为海洋油、气平台等永久结构的基础<sup>[2]</sup>,近年来也在海上风力发电工程领域得到了实际应用<sup>[3]</sup>。对于吸力基础而言,要求其“下得去、站得稳、起得来”,这其中的“站得稳”是指当海上风机安装完成并投入使用后,在风、波浪、洋流及冰等水平荷载作用

收稿日期: 2013-06-20

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

作者简介: 冯凌云(1988—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事海洋岩土工程方面的研究. E-mail: fenglylove@126.com

李大勇(1971—),男,山东泰安人,教授,博士生导师,主要从事海洋岩土工程方面研究. E-mail: ldydy@163.com

下,能够保持正常工作状态,主要由基础稳定性决定。因此,吸力基础的水平承载力问题是目前的研究热点之一。

目前已有不少关于吸力基础水平承载特性方面的研究成果。Zhu 等<sup>[4]</sup>在粉土中开展了大比尺模型试验,认为水平荷载作用下,基础前侧土压力增量沿深度方向可近似为二次曲线分布,并由土压力分布确定基础转动点位于 4/5 基础高度处。Wu 等<sup>[5]</sup>采用 ABAQUS 有限元软件得到了软粘土中复合加载条件下吸力基础的破坏包络线。刘振纹等<sup>[6]</sup>在软粘土中进行模型试验,得到了水平荷载作用下吸力基础主动区、被动区的土压力分布,并结合有限元分析,采用极限平衡法建立了基础水平静承载力的关系式。施晓春等<sup>[7]</sup>根据试验结果发现被动区的土体抗力分布呈抛物线型,并分析了桶体在水平荷载作用下的变位及其与土的相互作用,阐明了桶体在水平荷载作用下的主要运动形式为转动。已有研究针对粘性土地基居多,而关于砂土地基中的研究,尤其是模型试验研究较少。

裙式吸力基础<sup>[8-9]</sup>是对传统吸力基础的改造形式,即在传统吸力基础上增加了裙结构,以提高基础的水平承载力。李珊珊等<sup>[10]</sup>在中砂中对此种新型基础开展了位移控制式的水平单调加载试验,初步证实了裙式吸力基础具有较高的水平承载力。本研究借鉴传统吸力基础研究方法,通过开展模型试验,研究了饱和细海砂中水平荷载作用下裙式吸力基础的水平承载性能,讨论了裙尺寸及加载高度对水平承载力及土压力分布的影响。

## 1 模型试验方案

试验所用模型箱尺寸为 1 m×1 m×0.8 m。试验所用砂土取自青岛黄海海域金沙滩,其颗粒级配曲线如图 1 所示。物理力学指标为:不均匀系数  $C_u = 1.78$ ,曲率系数  $C_c = 0.997$ ,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  $e = 0.62$ ,相对密度  $D_r = 0.997$ ,试验砂土处于非常密实状态,渗透系数  $k = 0.002$  cm/s。采用砂雨法制备土池,最终模型箱内砂土高度为 60 cm,静止放置 48 h 后进行裙式吸力基础的水平单调加载试验。

裙式吸力基础模型(图 2)采用不锈钢制作,由主桶(也称作传统吸力基础,图 2 模型 II)及裙结构组成。基础尺寸如表 1 所示,其中承台厚 10 mm,主桶壁厚及裙壁厚均为 2 mm。主桶顶板处一侧设有排水孔,用于连接抽水泵,另一侧设有负压传感器连接孔;裙结构顶板处设置永久排水孔,便于基础沉贯。此外,在基础顶板中央设置加载杆,用以施加不同高度的水平荷载,本次试验加载高度  $h/D_1$  分别为 1.5, 2 和 2.5。

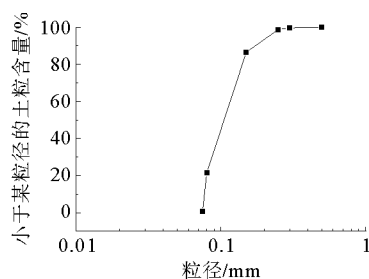


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve



图 2 吸力基础模型图

Fig. 2 Suction caisson models

试验采用量程为 50 mm 的 LVDT (linear variable differential transformer, 线性差动变压器)测量基础加载点处的水平位移,在主桶的前后两侧沿深度方向(埋深 4, 9, 14 和 19 cm 处)各布置 4 支土压力计,量程为 50 kPa,如图 3 所示。规定与基础加载方向一致的一侧为基础前侧,反之为基础后侧。为确保试验具有可重复性,没有考

表 1 吸力基础模型尺寸表

Tab. 1 Dimensions of suction caisson models mm

模型编号	主桶直径 $D_1$	主桶长度 $L_1$	裙宽 $D_2$	裙高 $L_2$
II			0	0
II-1A	120	240	30	0
II-2A			50	0
II-2D			50	90

虑吸力沉贯对基础承载力的影响,而是采用埋入式将基础安装就位,放置 12 h 后开始试验。采用荷载控制式加载方式,通过标准砝码逐级加载,每级荷载约 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(0.012 5 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覆时,即认为基础达到极限承载力,此时停止试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验的可重复性分析

为了保证试验结果的准确性,严格控制每次的试验条件保持一致。根据前期数值模拟结果,每次试验前将模型箱内深度为 1.5 倍主桶长度范围内的砂土整体进行松动,且每个试验工况重复 2~3 次。图 4 给出加载高度  $h/D_1=2.5$  时 II-1A 工况 3 次重复试验得到的荷载-位移关系曲线,从图中可以看出,试验的重复性较好,因此可以认为砂土地基是均匀的,每次试验条件基本一致。

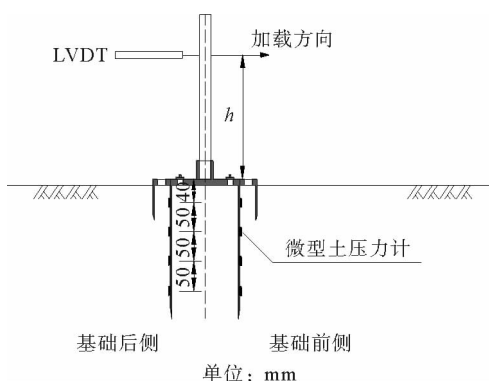


图 3 传感器布置图

Fig. 3 Layout of transducers

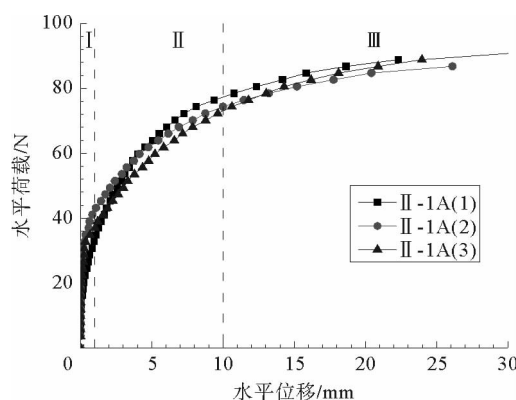


图 4 荷载-位移关系曲线图

Fig. 4 Horizontal load versus deflection

### 2.2 荷载-位移关系曲线

如图 5 所示,不同加载高度下基础的荷载-位移关系曲线趋势一致,均可分为 3 个阶段:初始阶段水平荷载随水平位移线性增加,位移量很小,不足 1 mm;随后荷载继续增加,水平位移逐渐增大,曲线呈非线性;当水平位移约 10 mm 时,基础开始进入破坏阶段,此时荷载保持不变,水平位移持续增加。

从图 5 还可看出,当加载高度  $h/D_1$  从 1.5 增加到 2.5 时,基础的极限水平承载力急剧下降,主桶 II 及裙式吸力基础均呈现此趋势。这是因为加载高度增加,同一荷载水平下,作用到基础顶面的弯矩增大,因此降低了基础的极限承载力。

此外,相同荷载水平作用下,裙式吸力基础水平位移明显减小,其减小程度随裙宽及裙高的增加而增大。不同加载高度下,裙式吸力基础 II-1A, II-2A 和 II-2D 的极限承载力均高于主桶基础 II,且承载力随裙宽、裙高的增加而增大,增幅范围在 5%~57.4%。图 6 更加直观的说明了上述结论。

对不同加载高度下不同尺寸的裙式吸力基础的荷载-位移关系曲线进行归一化,如图 7 所示,发现归一化后基础的水平荷载( $\frac{P}{P_u}$ )和水平位移( $\frac{y}{D_1}$ )可用同一关系式表示:

$$\frac{P}{P_u} = 1.693 \left( \frac{y}{D_1} \right)^{0.254} \quad (1)$$

其中: $P$ —施加的水平荷载, kN;  $P_u$ —极限水平承载力, kN;  $y$ —加载点的水平位移, mm;  $D_1$ —主桶的直径, mm。

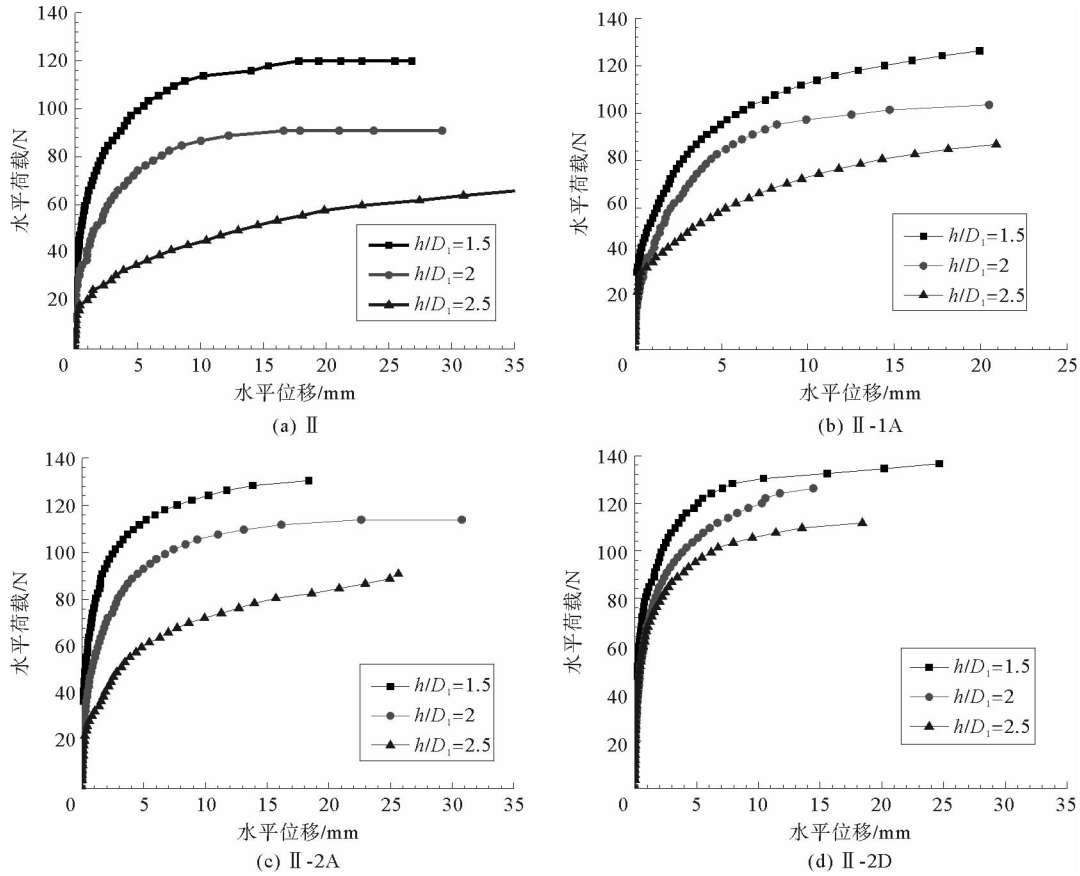


图 5 不同加载高度下基础的荷载-位移关系曲线图

Fig. 5 Horizontal load versus deflection under various loading eccentricities

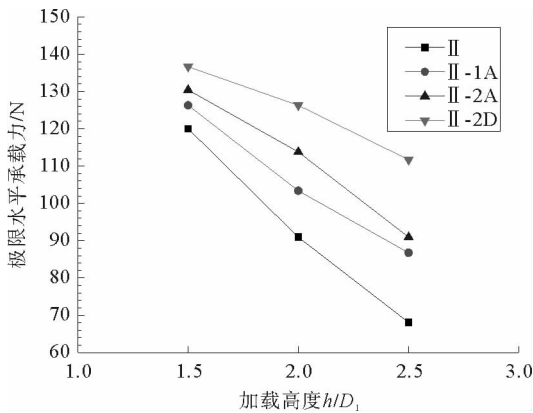


图 6 基础的极限水平承载力图

Fig. 6 Ultimate lateral loading capacity

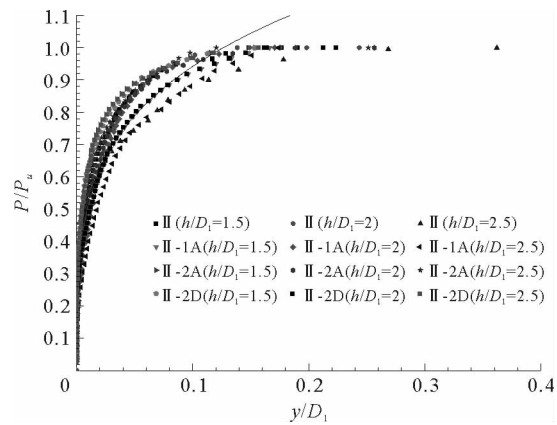


图 7 归一化后的荷载-位移关系曲线图

Fig. 7 Horizontal load versus deflection in the normalized form

### 2.3 土压力分布规律

已有研究成果<sup>[8-10]</sup>表明,水平荷载作用下,吸力基础主要绕某一点转动。转动点以上基础前侧土体位于被动土压力区,后侧位于主动土压力区,而转动点以下基础后侧为被动土压力区,基础前侧为主动土压力区。值得注意的是,对于粘性土地基,由于在水平荷载作用下,基础后侧土体会与基础产生脱离,因此转动点以上基础后侧将不受主动土压力作用;而对于砂土地基,基础与土体始终接触,因此始终受到主动土压力的作用。

将同一埋深处基础前侧与基础后侧的土压力增量值相减得到该深度下基础的净土压力,净土压力为 0 处,即为基础的转动点。图 8 所示为加载高度  $h/D_1=2.5$  时,不同基础沿深度方向土压力的分布规律。

从图 8 可以看出,各测点的土压力随水平荷载的增加不断增大,当达到极限水平荷载时土压力值最大,对应此荷载水平,基础加载点处的水平位移可达到 20 mm 左右。加载初期荷载较小,基础的水平位移很小,此时土压力几乎为 0,可以忽略不计;当水平荷载约为极限承载力的一半时,基础水平位移约 1~3 mm(图 5),土压力也开始有所增加;此后随着荷载的增加,基础位移逐渐增大,土压力也明显增大,直到荷载接近基础的极限承载力时土压力达到最大值,此时基础水平位移高达 20 mm。这说明基础周围土压力的发展和基础的水平位移有密切联系。

此外,从图 8 还可看出不同基础的土压力沿深度方向的分布规律总体一致:土压力先增加到一定深度后开始减小,最后反方向增大。基础前侧最大土压力约位于埋深 9 cm 处,基础后侧最大土压力位于基础底端。根据土压力沿深度方向的分布规律,可确定基础转动点约位于 0.6~0.7 倍的主桶埋深处。

对比图 8 的(a),(b)和(c)可知,II,II-1A 和 II-2A 基础前侧的最大土压力值相差不大,约 14 kPa,而(d)中 II-2D 基础前侧土压力明显小于前三者,约 8 kPa。说明与主桶相比,裙宽(即裙结构的顶板)对土压力的影响较小,裙高(即裙结构的侧壁)减小了作用在主桶壁上的土压力。这是因为,II-2D 基础受水平荷载作用时,大部分土压力由裙壁承担,而主桶和裙结构之间的土体随基础整体移动,自身变形较小,因此主桶壁处的土压力相对较小。

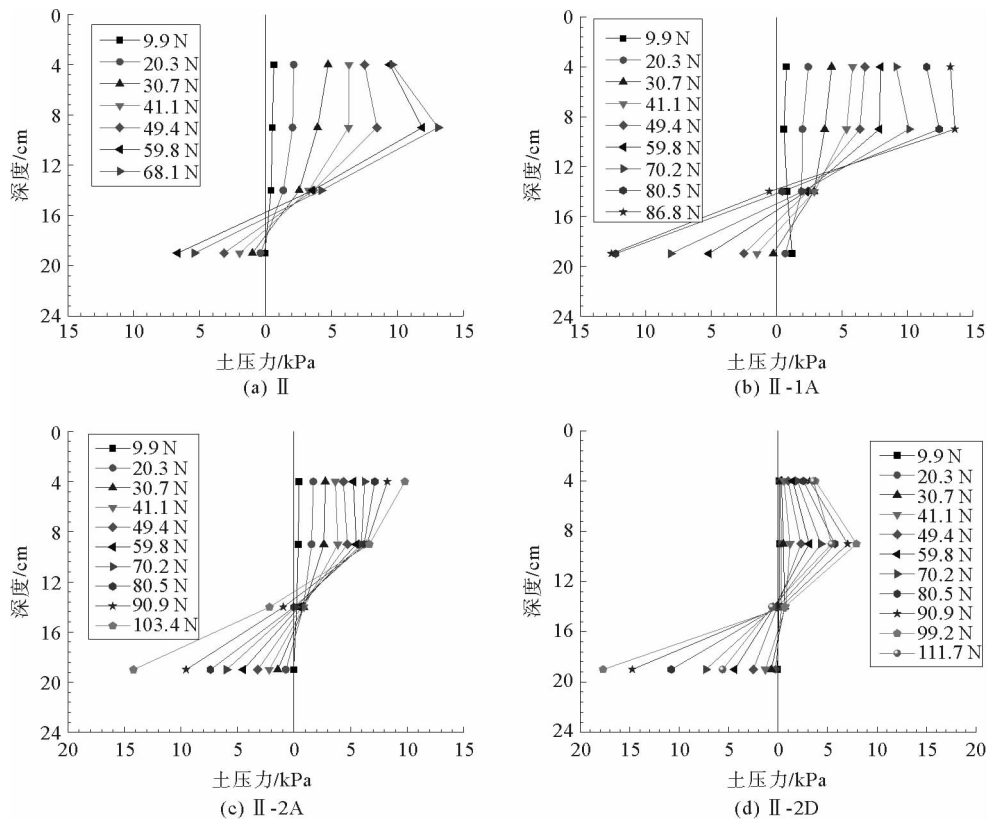


图 8 土压力沿深度方向的变化规律图

Fig. 8 Variation in earth pressure with depth

如前文所述,沿深度方向基础前侧土压力最大值约位于地表以下 9 cm 处。图 9 为埋深 9 cm 处不同基础在不同加载高度下土压力随水平荷载的变化规律。从图中可以看出,随着荷载的增加,各加载高度下土压力也不断增大,总体趋势是一致的。对比不同基础极限荷载时对应的土压力值发现,最大土压力随加载高度

的增加而减小,以基础 II 为例,当加载高度  $h/D_1$  从 1.5 增加到 2.5 时,最大土压力从 29.3 kPa 减小到 13.8 kPa。这可以从转动点的分布规律来解释,从荷载-位移关系曲线可知,不同加载高度下基础达到极限荷载时对应的水平位移几乎相等,随加载高度增加,转动点上移,相同埋深处的土体变形相应减小,根据温克尔理论,土压力与土体变位成正比,可知土压力也随之减小。

此外,当土压力达到最大值时,所需要的水平荷载随加载高度的增加而减小,仍以主桶基础 II 为例,当加载高度  $h/D_1$  从 1.5 增加到 2.5 时,达到最大土压力所需要的水平荷载分别为 122,89 和 68 N。对比图 9 会发现,对于基础 II, II-1A 和 II-2A,相同荷载水平下,土压力随加载高度的增加而增大,而 II-2D 土压力变化不大。这是因为参照荷载-位移关系曲线,相同荷载水平作用下,加载高度越高,基础水平位移越大。因此,相同测点处土体位移增加,土压力也相应增加;而对于 II-2D 基础,虽然随加载高度增加基础位移增大,但是裙壁承担了部分土压力,因此主桶壁的土压力相差不大。

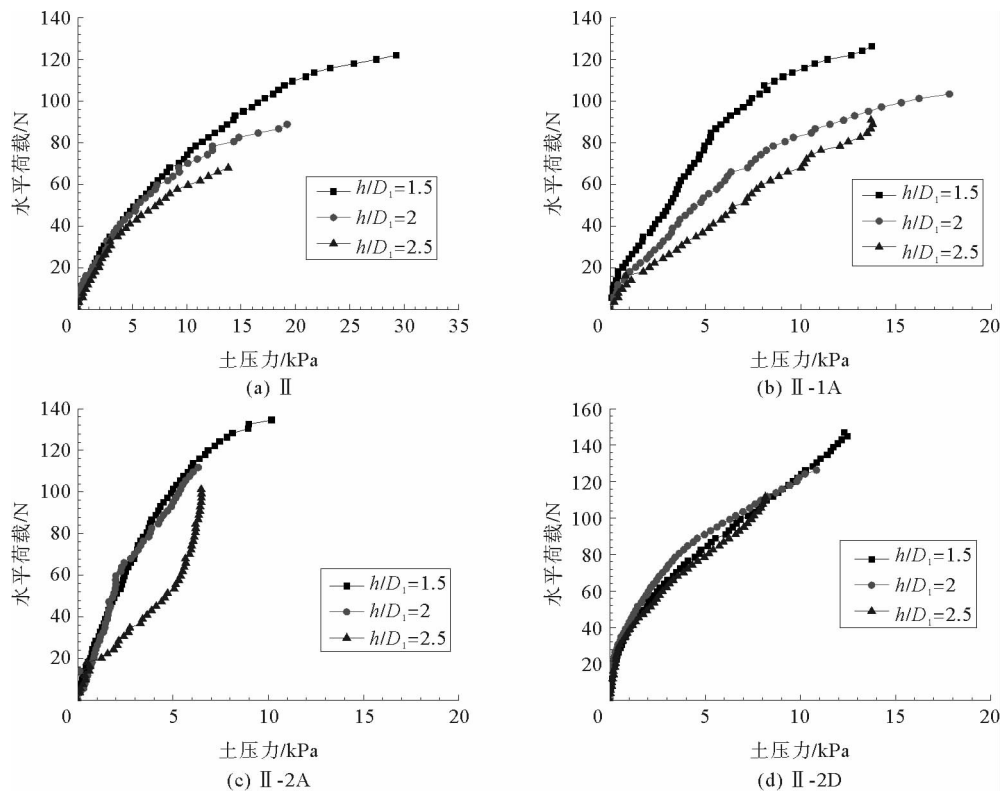


图 9 埋深 9 cm 处水平荷载-土压力关系曲线图

Fig. 9 Horizontal load versus earth pressure at a depth of 9 cm

### 3 结论

通过模型试验,研究了饱和砂土地基中裙式吸力基础的水平承载性能,着重讨论了裙宽、裙高及加载高度对水平承载力及土压力分布的影响,得出以下结论:

1) 与传统吸力基础相比,裙式吸力基础水平承载力显著提高,同时有效控制了基础的水平位移,且基础水平承载力随着裙高、裙宽的增加显著增加(增幅约在 5%~57.4%之间),随加载高度的增加而减小。基础的归一化荷载-位移关系曲线可以用同一公式表示。

2) 基础周围土压力的变化规律与基础的水平位移有密切联系。根据土压力沿深度方向的分布规律得知,水平荷载作用下基础主要绕某点发生转动,转动点约位于 0.6~0.7 倍的主桶埋深处。相比于裙结构的顶板,裙结构侧壁承担了大部分土压力,从而使裙式基础主桶前侧土压力值小于主桶基础前侧的土压力。

3)基础前侧最大土压力约位于埋深9 cm处,其量值随加载高度的增加而减小,达到最大土压力所需的水平荷载同样随加载高度的增加而减小。

#### 参考文献:

- [1]Kwag D J,Cho I H,Bang S,et al. Embedded suction anchors for mooring of a floating breakwater[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,2010,132(2):1603-1605.
- [2]Tjelta T,Hermstal M,Andenaes E. The skirted pile Gullfaks C platform installation[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, May 7-10,1990; Document ID 6473-MS.
- [3]Houlsby G T,Byrne B W. Suction caisson foundations for offshore wind turbines and anemometer masts[J]. Wind Engineering,2000,24(4):249-255.
- [4]Zhu B,Kong D,Chen R,et al. Installation and lateral loading tests of suction caissons in silt[J]. Canadian Geotechnical Journal,2011,48(7):1070-1084.
- [5]Wu K,Luan M T,Fan Q L,et al. Failure envelopes of bucket foundation subjected to combined loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(4):574-580.
- [6]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 Zhenwen,Wang Jianhua,Qin Chongren,et al. Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2000,22(6):691-695.
- [7]施晓春,徐日庆,龚晓南,等. 桶形基础单桶水平承载力的试验研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(6):723-726.  
Shi Xiaochun,Xu Riqing,Gong Xiaonan,et al. Experimental study on horizontal bearing capacity of single bucket foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1999,21(6):723-726.
- [8]李大勇,都浩,孙宗军. 海底裙式吸力锚:中国,ZL200920239914.8[P]. 2010-09-15.
- [9]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 Dayong,Liu Xiaoli,Sun Zongjun. A novel type suction anchors for offshore wind turbines[J]. Ocean Technology,2011,30(3):83-87.
- [10]李珊珊,李大勇,郭彦雪. 中粗砂中裙式吸力基础位移控制式加载试验[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2013,32(4):11-15.  
Li Shanshan,Li Dayong,Guo Yanxue. Displacement-controlled loading tests of the skirted suction foundation in medium-coarse sand[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2013,32(4):11-15.

(责任编辑:吕海亮)