

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.10.002

带分舱板海上风电筒型基础承载特性试验研究

练继建, 贺蔚, 吴慕丹, 王海军

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为正确评估分舱对于海上风电筒型基础承载特性的影响, 对有、无分舱板的相同钢筒进行室内模型对比试验, 分别得出在水平荷载及弯矩共同作用下和竖直荷载作用下的荷载-位移曲线, 及筒内外侧壁土压力及顶盖土压力的分布规律, 同时进行有限元分析模拟。试验和计算结果表明: 在竖向荷载作用下, 分舱板使基础的极限承载力略有提高, 分舱板分担了筒顶盖和筒壁的竖向承载, 降低了顶盖的承载比例; 在水平荷载和弯矩共同作用下, 分舱板为筒型基础提供了较大的抗拔承载力, 使筒型基础在水平和弯矩荷载作用下的极限承载力提高了 20.2%, 降低了极限状态下的水平位移和倾角。总之, 分舱板不但可以提高海上风电基础施工浮运过程的稳定性, 还可以提高基础运行时的极限承载力。

关键词: 筒型基础; 分舱板; 海上风电; 模型试验; 有限元模拟

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 10-2746-07

Experimental study of bearing characteristic of bucket foundation of offshore wind turbine with bulkheads

LIAN Ji-jian, HE Wei, WU Mu-dan, WANG Hai-jun

(State key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to evaluate the influence of bulkheads on the bearing capacity of bucket foundation, a series of comparative model experiments is conducted on two identical steel buckets, one with bulkheads and the other without. The load-displacement curves under the combined action of horizontal load and bending moment or under vertical load, the distribution of the soil pressure on the inner, outer and upper walls of the bucket are obtained by the experiment individually. Finite element simulation is performed at the same time. The experimental and numerical results show that under vertical load, the bearing capacity of bucket foundation with bulkheads is a slightly higher than that of the foundation without bulkheads. The bulkheads share the vertical loads from the cover and sidewall, cutting the load applied on the cover. Under combined action of horizontal load and bending moment, the bulkheads provide large pulling resistance for the foundation, improving the ultimate bearing capacity by 20.2%, and reducing the ultimate horizontal displacement and angle. In a word, bulkheads can not only improve the stability during towing, but also increase the ultimate bearing capacity of offshore wind turbine foundation during the operation.

Keywords: bucket foundation; bulkheads; offshore wind turbine; model experiment; finite element simulation

1 引言

在淤泥、粉细砂等复杂恶劣海洋地基环境中建造的海上风电筒型基础具有抗倾覆能力、施工费用低和可重复利用等诸多优势, 具有广阔的应用前景^[1]。由于筒型基础直径大, 在拖航和施工下沉的过程中不易控制平衡, 需要对筒体进行分舱, 实现

对各个舱体的独立控制, 分舱既增强了气浮拖航过程中的稳定性^[2-3], 同时也是施工下沉中实现精细调平控制的基础。

筒型基础设计时通常不考虑分舱板对地基承载力的影响, 但分舱板的存在对于筒型基础的承载能力和承载特性是存在一定影响的。关于筒型基础的承载力问题已有很多学者进行研究, 在理论方法、

收稿日期: 2015-01-12

基金项目: 国家国际科技合作专项(No. 2012DFA70490); 国家创新研究群体科学基金(No.51021004); 高等学校学科创新引智计划资助(No. B14012)。This work was supported by the International Science & Technology Cooperation Program of China (2012DFA70490), the Funds for Creative Research Groups of China (51021004) and 111Project (B14012).

第一作者简介: 练继建, 男, 1965年生, 博士, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 主要从事近海风电研究。E-mail: tju_luntan@126.com

通讯作者: 吴慕丹, 女, 1990年生, 硕士, 主要从事近海风电基础研究。E-mail: debbiwu@qq.com

数值模拟和模型试验方面均积累了很多宝贵经验^[4-10]，但关于分舱板对筒型基础的承载特性影响研究较少。乐从欢等^[11]运用有限元软件分析研究了带分舱板筒型基础的受力特性和承载特性，在极端条件下，带分舱板的混凝土筒型基础将具有更大的安全储备。练继建等^[12-13]针对分舱的复合式筒型基础，建立三维数值计算模型，分析了分舱板对渗流场和临界负压的影响，发现分舱板使得筒内土体水力梯度增大，土体更容易发生渗透破坏。但目前对于带分舱筒型基础的承载特性分析，仍缺乏模型试验方面的支撑。

本文对有、无分舱板的相同钢筒进行室内模型对比试验，分别得出竖直荷载和水平和弯矩荷载作用下的荷载-位移曲线，及筒内外侧壁土压力及顶盖土压力的分布规律，分析比较了有、无分舱的筒型基础承载特性的区别，并与有限元分析模拟结果进行对比分析，研究得到分舱板对基础承载力特性的影响和作用机制。

2 试验方案

本试验在天津大学自行研制的海上风电基础模型实验室中进行。内有 4 m×4 m 的方池，池中装有 1.5 m 厚的中砂，浸在水中，土面以上高度为 6~8 cm。土层预制过程：将砂土分层撒入土槽中，并适当压实，填至一定厚度后，打开土槽旁的阀门，向槽中放水，使水通过槽底管道自下而上使土层饱和，土面以上保持 6~8 cm 水深，待土层养护好，抽样进行土工试验，测定土体参数。

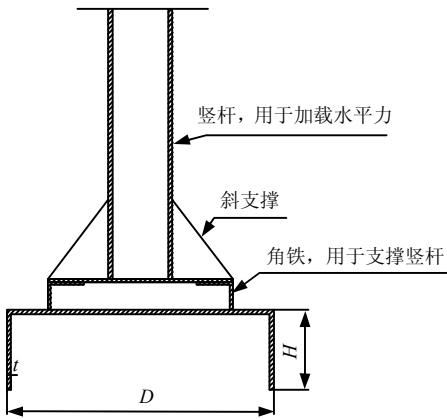
每做完一组试验需要用振捣棒振捣养护，待土质养护均匀后再继续做另一组。通过直剪试验、固结试验等土工试验测量土参数，土质参数如表 1 所示。

表 1 土质参数							
Table 1 Parameters of soil							
土体	含水率	孔隙比	有效	内摩	黏聚力	弹性	
土质	深度		重度 γ'	擦角	c/kPa	模量	
	h/m	$w/\%$	e	$\gamma'/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$\varphi/(\text{^\circ})$	E/MPa	
中砂	1.5	26	0.61	20.5	33.3	1.1	27.9

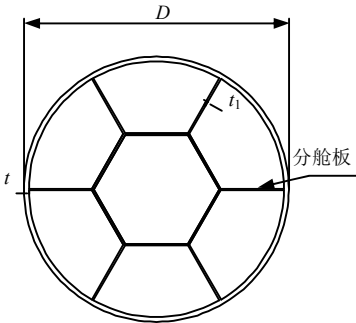
为方便下沉，实际工程筒型基础为钢材，且基础在正常运行过程中不能发生屈曲破坏，因此，模型基础也采用钢材。为研究分舱板对承载力的影响，试验模型共分为 2 种形式：一种不设分舱板，具体尺寸如表 2 所示；另一种设分舱板，7 个舱，共 12 块分舱板，分舱板亦为钢材，厚度为 0.05 cm，具体形式见图 1，设分舱板试验模型见图 2。

表 2 模型尺寸表

Table 2 Dimensions of model					
模型	材料	直径 D/cm	高度 H/cm	厚度 t/cm	分舱板厚度 t_1/cm
1 [#]	钢材	50	15	0.8	
2 [#]	钢材	50	15	0.8	0.3



(a) 筒型基础模型示意图



(b) 分舱板示意图

图 1 模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of model



图 2 模型分舱板布置图

Fig.2 Arrangement of bulkheads

试验设备如图 3 所示，包括：①土压力盒，用于测量土体作用于结构上的土压力，压力为 0 说明筒与土分离；②输出外力传感器和位移传感器，用于得到筒型基础在外荷载作用下的荷载-位移曲线 (p - s)；③倾角仪，主要测量筒型基础在水平荷载和

弯矩作用下, 筒型基础倾斜程度, 以及达到破坏时的倾斜角; ④信号采集设备。为了研究筒型基础在竖向、水平荷载和弯矩作用下, 筒型基础内、外土体与筒之间的相互作用, 在筒壁及顶盖上均匀布置土压力盒, 测量几个特征点的土压力情况, 由于土压力传感器长期在水中浸泡会缩短使用寿命, 加之反复使用, 使用过程中损坏的可能性很大。为防止土压力传感器进水, 用石膏将传感器周围密封在筒壁及顶盖上, 背部用强力胶固定, 为防止筒壁处传感器接线被拉断, 在侧旁开槽引线, 并用薄片固定。土压力盒间距应限定在 6 cm 以上, 距离太近, 相互间有扰动, 影响试验结果。土压力盒布置情况如图 4 所示。

竖向加载试验中, 压力传感器固定在传力架顶端, 位移传感器固定在液压系统上, 拉杆端与传力架顶端接触, 液压缸向下缓慢压传感器, 并通过传力架将力传到模型筒上, 此时得到荷载与位移的关系曲线。

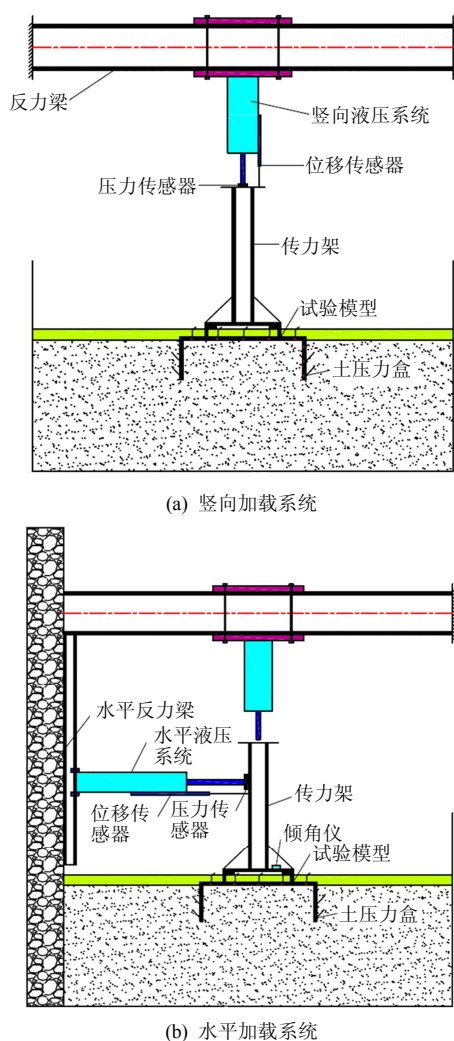


图 3 承载力试验模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of bearing capacity experiment

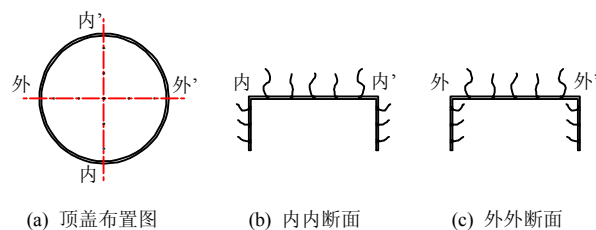


图 4 模型土压力盒布置

Fig.4 Arrangement of earth pressure cells

水平荷载和弯矩加载试验中, 压力传感器固定在传力架的侧部, 并与水平液压缸相对, 拉杆式位移传感器固定在水平液压系统上, 端部与传力架固定, 倾角仪固定在筒顶盖上部 (避免与水接触), 水平加载过程中, 同时记录荷载、位移、土压力及倾角仪的读数, 最终得到荷载-位移-倾角变化曲线, 同时也可得到内、外、顶盖土压力的分布情况。

3 有限元模拟

有限元模型的尺寸完全按照实际试验模型来确定, 含分舱板的筒中部舱体为正六边形, 结构示意图见图 5。土体采用摩尔-库仑本构模型, 结构与土体均采用 8 节点减缩积分实体单元 (C3D8R) 进行单元网格划分, 基础与土体之间采用接触 (contact) 约束, 筒土间的摩擦符合库仑摩擦定律。在有限元计算结果中, 应力集中主要出现在模型筒体边缘, 故对靠近筒壁和筒下端土体的网格进行加密划分, 从近到远网格逐渐稀疏。土体计算区域沿径向取 6 倍筒径, 即 0.3 m, 沿深度方向取 10 倍筒高, 即 0.15 m。筒型基础结构为普通钢材, 弹性模量和泊

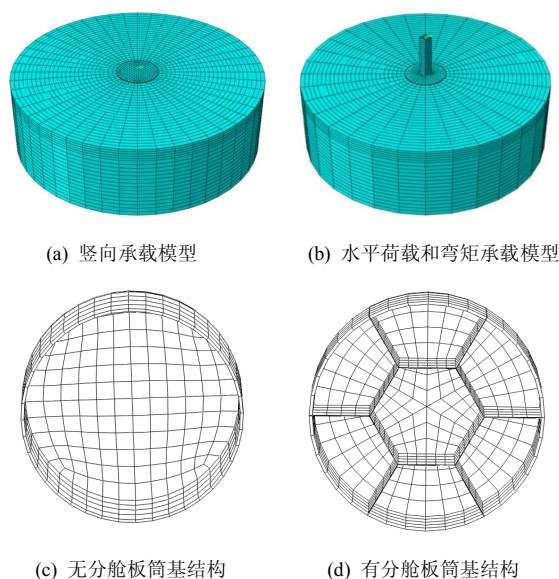


图 5 有限元模型

Fig.5 Finite element models

松比分别为 200 GPa 和 0.3。竖向承载力计算中,荷载或位移施加在筒顶盖中心处的参考点上,水平荷载和弯矩计算中,筒顶盖上建一刚性竖杆,并在竖杆顶部中心处设一参考点,用于施加水平(弯矩)荷载或位移。

4 试验及有限元拟合结果分析

4.1 竖向承载特性

从图 6 中可以看出,在松散的砂土中筒型基础主要发生冲剪破坏,筒外侧土体没有隆起,随着筒型基础下沉,边缘土体随之向下滑落,出现凹陷区,由此可看出,竖向荷载作用下,变形主要集中在模型筒端下方及内外两侧土体。

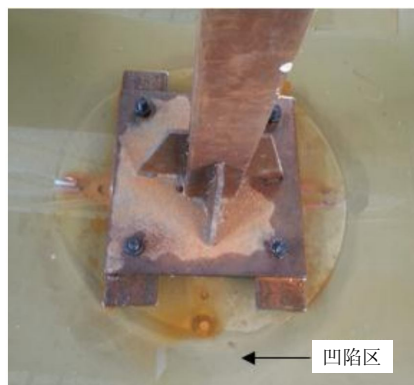


图 6 竖向荷载作用下筒型基础失效图
Fig.6 Failure of bucket foundation under ultimate vertical load

图 7 为有、无分舱板情况下,竖向加载时,有限元和试验对比的位移荷载($p-s$)关系曲线。由图可以看出,分舱板的存在提高了竖向极限承载力,但幅度不大,仅为 8.8%,但有限元结果显示,竖向承载曲线变化很小,出于试验精确度的考虑,可认为分舱板对筒形基础竖向承载力提高并不明显。因为分舱板并未改变竖向承载时的地基破坏形式,两种基础都是在筒底形成连贯的勺型破坏区,故竖向承载力提高并不明显。

图 8 为竖向加载情况下,有、无分舱板的模型筒筒壁内、外侧土压力分布的有限元拟合与试验对比情况。其中,纵坐标为归一化高度。有限元分析中,将接触面上的法向压力视为筒-土相互作用的土压力。由图可知,有、无分舱板的筒壁外侧土体压应力随埋深增加而减小,是由于筒端下方土体受到极大的压力,在压缩过程中,拉扯近筒端处附近土体,使得土体弱化,从而导致压应力较小;而分舱板的存在将筒内土体切割成 7 部分,破坏筒内土的完整性,加大了土压力随埋深而减小的趋势。两个

模型筒壁内侧土体压力均随埋深增加而增大,因为内部土体随筒基一起下沉,随着深度的增加,筒壁对内部土体紧箍作用加强,导致近筒端处土压应力增大。但分舱板切割筒内土体,增加了内部的摩阻力,分担了筒内壁的承载,故有分舱板的筒内侧压力小于无分舱板的内侧压力。由于试验中土压力盒布置较少,有限元分析结果不能很好地与试验结果完全对应,但有限元结果中的分布情况与试验结果大体趋势是相近的。

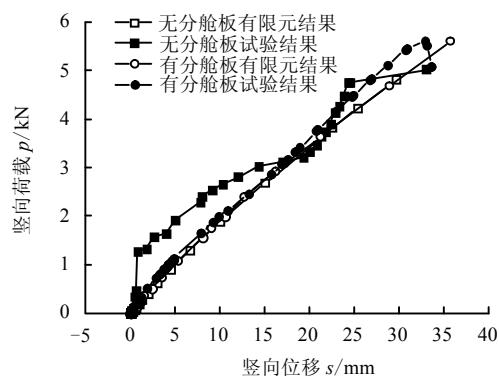


图 7 竖向荷载-位移($p-s$)关系曲线
Fig.7 Vertical load-displacement curves

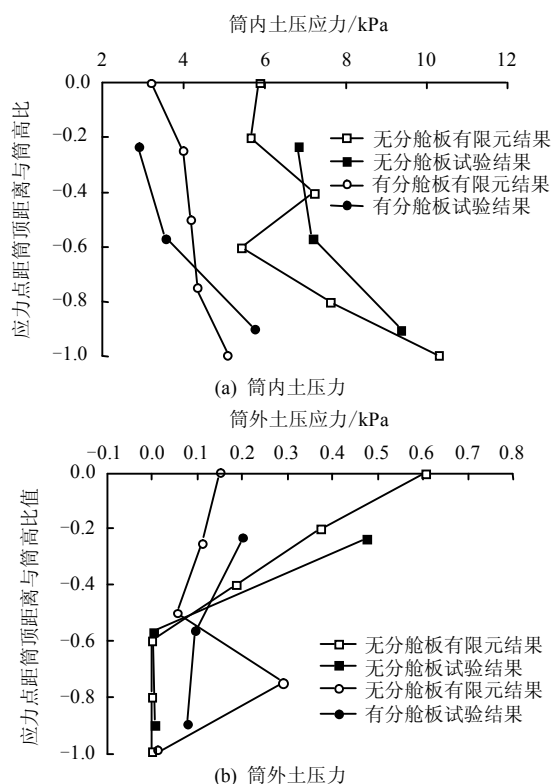


图 8 筒侧壁土压力分布
Fig.8 Distribution of earth pressure on the sidewall

表 3 为筒型基础模型在竖向荷载作用下,各部分承担荷载的比例分配情况。试验结果中,内、外摩阻力主要通过筒壁上测得的土压力,采用线性内

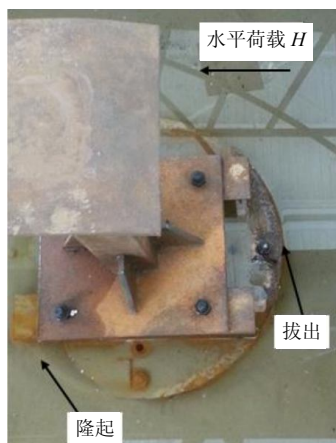
插法,得到面上的土压力,再乘以摩擦系数,得到内、外摩阻力;筒端及分舱板摩阻力则由总荷载减去顶盖阻力、内、外摩阻力得到。结果表明:分舱板不仅增大筒端的面积,也提供了更多的摩阻力,明显分担了筒顶盖及筒内外壁的承载。

表3 试验筒基各部分承载比例
Table 3 Bearing proportion of every part of bucket foundation in experiment

工况	筒顶盖阻力/%	筒壁外摩阻力/%	筒壁内摩阻力/%	筒端及分舱板摩阻力/%
无分舱板	49.7	2.7	18.3	29.3
有分舱板	38.2	2.1	10.1	49.6

4.1 水平(含弯矩)承载特性

从试验后筒基的失稳破坏图(见图9)可以看出,水平荷载和弯矩作用下,当筒型基础达到极限状态时,筒后部分拔出,被动区一侧的土体产生了隆起,基础周围的土体与基础相比刚度很弱,所以,基础的水平失稳模式以产生较大的刚体转动为主,同时伴随少量的整体水平位移,即地基破坏时基础被动区土体发生了较大的剪切变形,主动区土体与筒体发生分离。分舱板的加入并未改变筒基的承载模式,但其增加了被动土压力区的范围,分担了筒前被动土的压力,同时为筒基提供了更大的抗拔摩阻力。



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图9 筒基失稳破坏

Fig.9 Failure of bucket foundation

在水平荷载作用下,分舱板对筒型基础转动变形和极限承载力的影响分析有限元和试验结果如图10所示。其中试验结果总结见表4。对比分析可知,在水平荷载和弯矩作用下,分舱板的影响较为明显。试验数据显示,有分舱板的筒型基础极限承载力提高了20.2%,基础刚度明显增大,极限承载力对应的倾角和水平位移大幅减小。

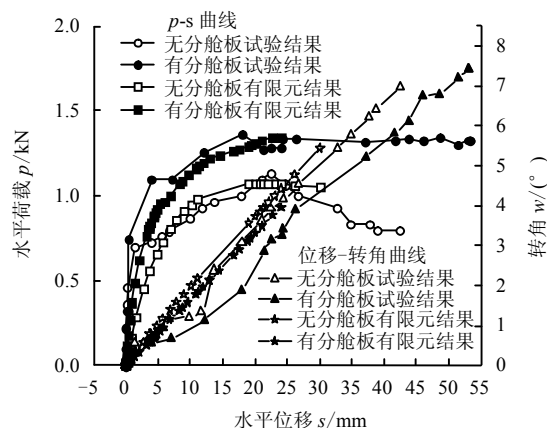


图10 水平荷载和弯矩共同作用下荷载、转角及位移关系曲线

Fig.10 Load/angle-displacement curves under horizontal load and bending moment

表4 水平承载试验结果对比

Table 4 Comparison of experimental results under horizontal load

工况	最大水平承载力/kN	对应水平位移/mm	对应转角/(°)	提高比例/%
无分舱板	1.131 6	22.4	3.93	20.2
有分舱板	1.360 8	11.0	1.29	

图11为有、无分舱板时,极限水平荷载和弯矩作用下,筒顶及筒内、外壁的土压力分布图。由图发现,筒顶土压力有接近一半为0,这说明在极限荷载作用下,筒顶有脱开;筒后外侧土压力随高度的变化不大,到达一定深度后(近筒端处),压力开始迅速增大,这也说明圆筒临载面底部出现挤土现象。作用于前侧外筒壁和后侧内筒壁上的被动土压力均表现出随埋深先增大后减小的趋势,同时前侧内筒壁上的主动土压力表现出随深度先减小后增大的趋势,说明在水平荷载(含弯矩)作用下,筒体主要发生转动,因此,筒后外侧与筒前内侧基点以下部位为主动区,筒后内侧与筒前外侧基点以上部位为被动区。有限元模拟结果吻合较好,整体趋势相似,最大值的数值和部位相近。由于有限元模拟筒裙效应及挤土效应较差,故导致有限元结果的最大值略小于试验结果。

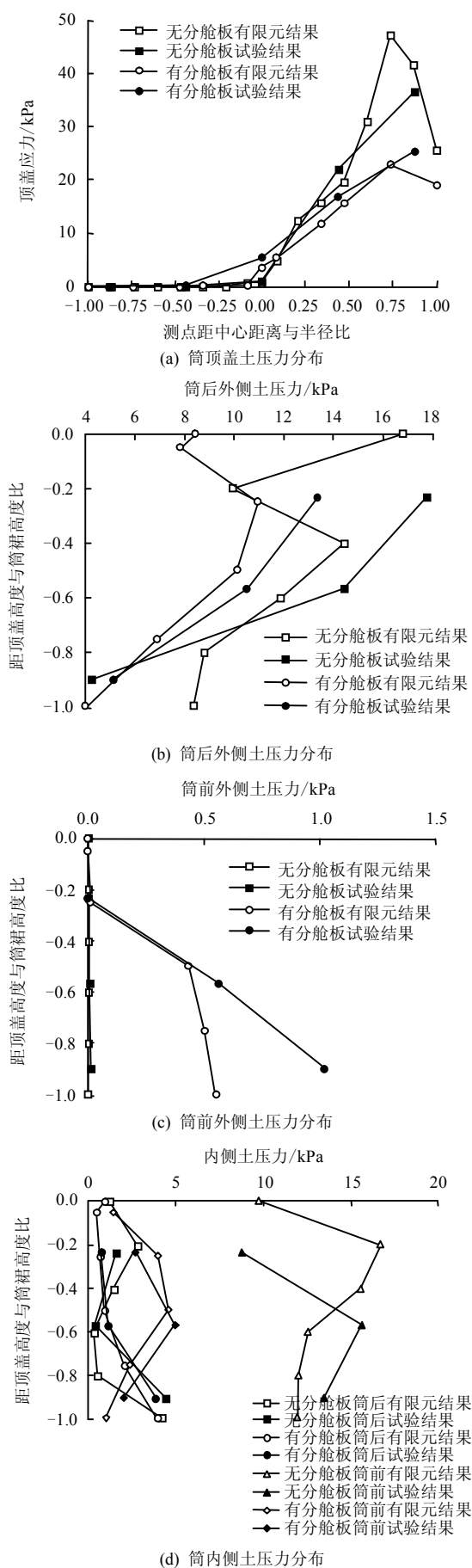


图 11 筒顶及筒侧土压力分布

Fig.11 Distributions of earth pressure of sidewall and cover

从图 11 中也可以看出,有分舱板的筒与无分舱板的筒相比,筒顶土压力有一定变化,有分舱板的筒顶盖土压力为正值范围增大,即极限状态下筒顶脱开率降低,而筒前、后的主动土压力增大,被动土压力减小。总体来看,是由于有分舱板的筒体抗弯承载力大幅提高,减小了基础的转动角度,致使筒顶脱开率降低,筒前外侧和筒后内侧被动土压力值都增大,筒前内侧和筒后外侧主动土压力降低。

图 12 为极限水平荷载和弯矩下,有无分舱板筒型基础的位移矢量图。从中可明显看出,有分舱板的筒型基础破坏模式和无分舱板的筒型基础一样,仍是倾覆失稳破坏。同时也发现,有分舱板的筒型基础转动趋势明显减小,水平位移更为明显,这证明了之前关于土压力变化的机制的正确性。

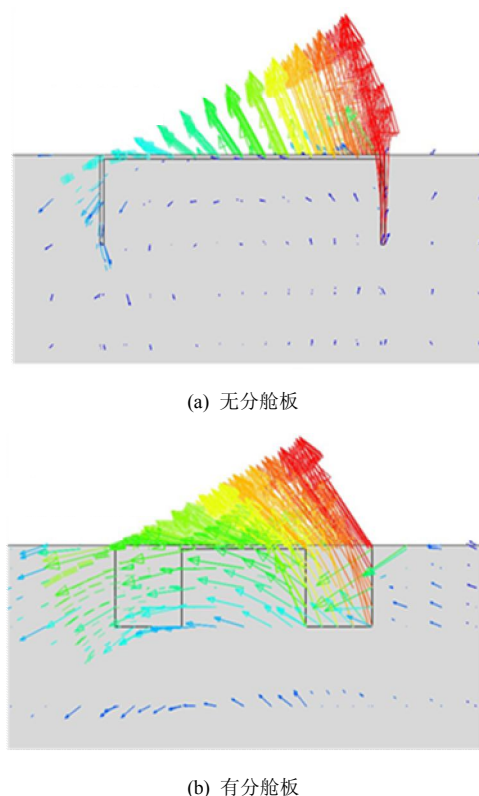


图 12 极限水平荷载和弯矩下基础位移矢量图

Fig.12 Displacement vectorgrams of foundation under horizontal ultimate load and bending moment

5 结 论

(1) 在竖向荷载作用下,分舱板并未改变筒型基础竖向加载情况下的破坏模式,但使基础的极限承载力提高了 8.8%,并分担了筒顶盖和筒壁的竖向承载,降低了顶盖的承载比例。

(2) 在水平荷载和弯矩作用下,有无分舱板的筒型基础都主要发生转动位移,极限状态下都出现

失稳破坏,但分舱板为筒型基础提供了更大的抗拔承载力,使筒型基础在水平荷载和弯矩作用下的极限承载力提高了 20.2%,降低了极限状态下的水平位移和倾角。

(3) 分舱板为筒型基础提供了较大的抗拔承载力,有分舱板的筒体抗弯承载力大幅提高,基础的转动角度减小,致使筒顶脱开率降低,筒前外侧和筒后内侧被动土压力值都增大,筒前内侧和筒后外侧主动土压力降低。

参考文献

- [1] LIAN Ji-jian, SUN Li-qiang, ZHANG in-feng, et al. Bearing capacity and technical advantages of composite bucket foundation of offshore wind turbines[J]. **Transactions of Tianjin University**, 2011, 17(2): 132—137.
- [2] 别社安, 徐元锡, 祝业浩. 增强结构气浮稳性的分舱法及优化分析[J]. 中国港湾建设, 2003, 23(1): 1—4.
BIE She-an, XU Yuan-xi, ZHU Ye-hao. Optimization and analysis of cabin method to improve air floating stability[J]. **China Harbour Engineering**, 2003, 23(1): 1—4.
- [3] HUANG S. Stability analysis of the heave motion of marine cable-body systems[J]. **Ocean Engineering**, 1999, 26(6): 531—546.
- [4] ZHAN Yun-gang, LIU Fu-chen. Numerical analysis of bearing capacity of suction bucket foundation for offshore wind turbines[J]. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, (2): 633—644.
- [5] 刘润, 祁越, 李宝仁, 等. 复合加载模式下单桩复合筒型基础地基承载力包络线研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1486—1496.
LIU Run, QI Yue, LI Bao-ren, et al. Failure envelopes of single-pile composite bucket foundation of offshore wind turbine under combined loading conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(5): 1486—1496.
- [6] 刘梅梅. 海上风机复合筒型基础承载力及优化设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
LIU Mei-mei. Bearing capacity and optimization design of composite bucket foundation for offshore wind turbine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [7] LIU Mei-mei, YANG Min, WANG Hai-jun. Bearing behavior of wide-shallow bucket foundation for offshore wind turbines in drained silty sand[J]. **Ocean Engineering**, 2013, 82: 169—179.
- [8] ZHAN Yun-gang, LIU Fu-chen. Numerical analysis of bearing capacity of suction bucket foundation for offshore wind turbines[J]. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, (2): 633—644.
- [9] ACHMUS M, AKDAG CT, THIEKEN K. Load-bearing behavior of suction bucket foundations in sand[J]. **Applied Ocean Research**, 2013, 43(5): 157—165.
- [10] 闫澍旺, 霍知亮, 孙立强, 等. 海上风电机组筒型基础工作及承载特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 36(7): 2036—2042.
YAN Shu-wang, HUO Zhi-liang, SUN Li-qiang, et al. Study of working mechanism and bearing capacity behavior of bucket[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 36(7): 2036—2042.
- [11] 乐丛欢, 丁红岩, 张浦阳. 分舱板对海上风机混凝土筒型基础承载模式的影响[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 429—434.
LE Cong-huan, DING Hong-yan, ZHANG Pu-yang. Influences of bulkheads on the bearing mode of concrete bucket foundation for offshore wind turbine[J]. **Engineering Mechanics**, 2013, 30(4): 429—434.
- [12] 练继建, 陈飞, 杨旭, 等. 海上风机复合筒型基础负压沉放调平研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(11): 987—993.
LIAN Ji-jian, CHEN Fei, YANG Xu, et al. Research on suction installation and leveling of composite bucket foundation for offshore wind turbines[J]. **Journal of Tianjin University (Science and Technology)**, 2014, 47(11): 987—993.
- [13] 杨旭, 陈飞, 练继建, 等. 考虑挤土效应的筒型基础沉放阻力数值分析及试验验证[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3585—3591.
YANG Xu, CHEN Fei, LIAN Ji-jian, et al. Numerical analysis and test verification of penetration resistance for bucket foundation installation considering effect of soil squeezing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(12): 3585—3591.