极端波浪条件下深水导管架基础结构波浪总力试验研究

易建军[1,2], 沈雨生[3], 吴建军[1], 邹国良[3]

（1. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518172；
2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 213022；
3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024）

摘　要：波浪力对海上风电深水导管架基础结构的稳定性和安全性至关重要。通过波浪物理模型试验对极端波浪条件下深水导管架基础结构的波浪总力进行了试验研究，试验水深包括 50 m 和 70 m 两种，在 1 000 a 一遇波浪条件下，分别分析了深水导管架结构所受的波浪总水平力和垂直力。研究结果表明：相同重现期极端波浪作用下，70 m水深情况下的导管架结构波浪总水平力小于 50 m 水深的结果，但是 70 m 水深的导管架结构波浪总水平力弯矩大于 50 m 水深的结果；相同水深、水位和波浪条件下，导管架结构受到的波浪总垂直力明显小于波浪总水平力；在相同重现期极端波浪作用下，低水位情况时 70 m 水深的导管架结构波浪总垂直力与 50 m 水深的结果差别不大，但是在高水位时，由于在 70 m 水深的极端波浪条件下波峰可冲击作用到上部平台底面，70 m 水深的导管架结构波浪总垂直力明显大于 50 m 水深的结果。

关键词：海上风电；深水导管架；极端波浪；物理模型试验；波浪总力

中图分类号：TV139.2+5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-3682(2023)01-0044-08

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220328001

引用格式：易建军, 沈雨生, 吴建军, 等. 极端波浪条件下深水导管架基础结构波浪总力试验研究[J]. 海岸工程, 2023, 42(1)：44-51. YI J J, SHEN Y S, WU J J, et al. Experimental study on wave total force subjected by deepwater jacket foundation structure under the extreme wave condition[J]. Coastal Engineering, 2023, 42(1)：44-51.

风力发电已经成为全球可再生能源发电的重要方式之一。近年来，我国海上风电迅猛发展，随着近海浅水资源的开发殆尽，海上风电正由近浅海向深远海发展。导管架基础具有很好的刚度和承载能力，对水深和地质条件的适应性较广，是未来我国海上风电走向深远海域发展的趋势。

在导管架结构的稳定性计算中，结构的波浪力是主要荷载之一。目前，对于作用于小尺度圆柱上的波浪力，国内外已有比较成熟的研究成果和计算方法[1-4]，即采用 Morison 方程和相应的速度力系数和惯性力系数进行计算，我国《港口与航道水文规范》(JTS 145—2015)[4] 即采用该方法。对于作用于导管架结构上的波浪力，国内外已有一些研究成果，采用的研究方法主要包括理论计算分析、数值模拟和物理模型实验。例如：在国内，吴家鸣等[5] 根据 Morison 方程逐一计算组成桁架式结构的每一杆件的波浪力，并对这些单一杆件的波浪力进行叠加得到结构物的整体波浪荷载，进而对导管架结构的动力响应进行了数值模拟；黄怀州等[6] 采用 Airy 线性波理论和线性化的 Morison 方程，计算了作用在导管架结构上的波浪力谱，并通过数值模拟对导管架结构进行了动力响应及疲劳可靠性分析；李绍武等[7] 对导管架竖直和水平杆件上的波浪力进行了试验研究，得到了惯性力系数及绕流阻力系数的关系式；沈忠辉等[8] 对导管架塔架转接段受到的波浪冲击荷载进行了试验研究，研究表明波浪冲击过程具有明显的随机性。在国外，Jose 等[9] 采用物理模型试验对导管架结构杆件受到的波浪冲击力进行了研究，分析了冲击力及冲击力系数随波浪参数的变化规律；Jose 等[10] 采用物理模型试验对破碎波浪作用下的导管架结构波浪冲击力进行了研究，研究表明破碎波浪冲击力受波浪破碎波高、波形不对称性和波浪破碎位置影响，当波形不对称性高和波浪破碎发生在结构前沿时，波浪冲击力更大。Jose 等[11] 基于 Navier-Stokes 方程建立了导管架结构波浪力的三维数

收稿日期：2022-03-28

作者简介：易建军(1972—)，男，高级工程师，主要从事核电工程、海上风电工程海洋环境条件方面研究. E-mail：yjjdc@163.com

（王　燕　编辑）

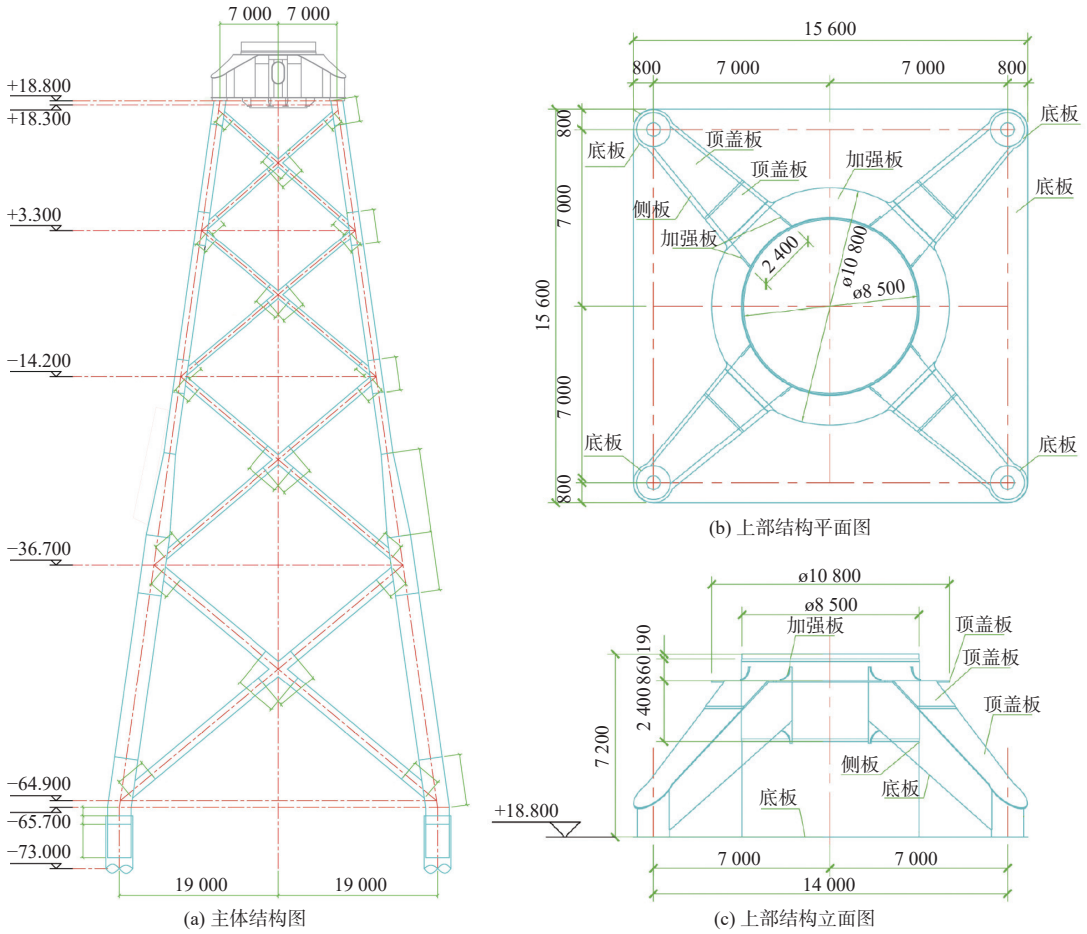
值模型，并对其进行了敏感性分析；Jose 等[12] 通过三维数值模型导管架结构杆件波浪冲击力的系数进行了评估，并得到了波浪冲击力系数在结构上的分布。Tu 等[13-14] 分析了导管架结构波浪总力物理模型试验结果，引入了峰值力、持续时间、冲量、上升时间、左冲量和右冲量六个参数来描述每个力的时间序列，以揭示砰击力的特性，并研究了这些参数的变化、相关性和分布特征，强调了波浪冲击力的不确定性，基于 2 个指数参数和 3 个波相关参数还建立了导管架结构波浪冲击力模型；Chew 等[15] 开展了传统四腿型导管架结构和新型三腿型导管架结构对不同载荷情况、载荷方向性和风波错位效应的动态响应性能的敏感性分析，结果表明三腿型导管架结构是可行的。可见，以往对导管架在波浪作用下的研究主要针对的是结构的动力响应(波浪力通过概化计算得到)以及总结构、各个杆件或者部件的受力，对深水导管架结构在极端波浪条件下受到的总波浪力的试验研究较少。

本文依托广东沿海某风电场项目，对深水导管架结构的总波浪力进行了物理模型试验研究，试验水深包括 50 m 和 70 m 两种，波浪重现期为 1 000 a 一遇极端波浪，分析了深水导管架结构所受的波浪总水平力和垂直力。深水导管架结构的总波浪力特征，为相关工程设计安全提供了重要的参考。

1　工程概况

1.1　导管架结构

深水导管架结构见图 1。深水导管架下部(−33.3 m 高程以下)主体管桩直径为 2.8 m，上部(−23.3 m



注：图中数据单位为 mm。

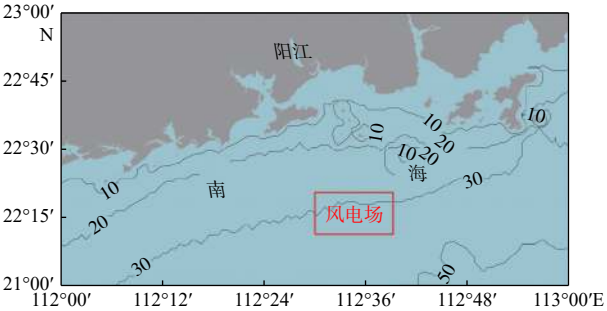
图 1　导管架结构

Fig. 1　Diagram of the jacket foundation structure

高程以上）主体管桩直径为 1.41 m，中间为过渡渐变段。主体管桩中间采用直径分别为 1.20 m、0.90 m、0.73 m 和 0.70 m 的导管进行连接，导管共包括 4 层，管架顶高程为 18.8 m。

1.2 水深和波浪条件

研究区域位于阳江市粤西沿海，场址最近端离陆岸 55 km，最远端离陆岸 82 km，用海面积 320 km^2，水深 40～50 m（图 2）。工程海域位于季风区，风向风速季节变化明显。冬季盛行偏北风，春、秋季以东风为主，夏季以西南风为主。多年平均风速为 4.7 m/s，历年最大风速为 36.3 m/s。外海台风浪计算和分析表明，场址海域外海大浪主要出现在 NE—ENE—E—ESE—SE—SSE 方向，各方向中 E—ESE 向台风浪波高最大①。



注：等深线数据单位为 m。

图 2 研究海域

Fig. 2 Location of the study area

本次试验针对深水导管架结构进行了 1 000 a 一遇波浪条件下的波浪力试验，试验水位包括极端高水位（100 a 一遇）3.78 m、设计高水位 2.07 m、设计低水位−0.53 m 和极端低水位（100 a 一遇）−1.52 m。本次试验采用同种导管架结构分别在 50 m 和 70 m 水深条件下进行试验。试验波浪要素见表 1。

表 1 导管架试验波浪要素

Table 1 Wave parameters for the jacket foundation structure test

水深/m	波浪重现期/a	水位/m	波浪要素				
			H_{max}/m	$H_{1\%}$/m	$H_{4\%}$/m	$H_{13\%}$/m	T/s
50	1 000	3.78	29.39	22.44	19.53	16.33	16.5
		2.07	28.82	21.97	19.13	16.01	16.5
		−0.53	27.86	21.21	18.48	15.48	16.5
		−1.52	27.50	20.93	18.24	15.28	16.5
70	1 000	3.78	31.5	—	—	17.5	16.5
		2.07	31.5	—	—	17.5	16.5
		-0.53	31.5	—	—	17.5	16.5
		−1.52	31.5	—	—	17.5	16.5

注：—表示无数据。

2 物理模型试验方法

2.1 试验仪器设备

深水导管架波浪力物理模型试验在南京水利科学研究院河流海岸研究所宽波浪水槽中完成，宽水槽总长 52 m、宽 3.0 m、高 1.6 m，水槽一端安装有造波机，另一端设有消浪设施。造波机的造波系统可产生不同谱型的不规则波。

① 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司，中广核阳江南鹏岛海上风电场工程可行性研究报告，2017.

2.2　模型设计

试验采用正态模型，按重力相似模型设计。根据结构物尺度、水深和波浪条件、场地设备条件，50 m 水深处试验采用 1∶55 的模型比尺，70 m 水深处试验采用 1∶60 的模型比尺。根据重力相似定律，水深、时间和总力的模型比尺分别为 $\lambda_h=\lambda_l$、$\lambda_T=\lambda_l^{1/2}$ 和 $\lambda_F=\lambda_l^3$，其中 λ_h 和 λ_l 分别为水深比尺和平面几何比尺，λ_T 和 λ_l 分别为时间比尺和平面几何比尺，λ_F 和 λ_l 分别为总力比尺和平面几何比尺。

2.3　试验方法

物理模型试验中按照几何相似原理采用钢管制作导管架结构模型，整个结构按刚性结构制作。试验中波浪按不规则波浪（Jonswap 谱，谱峰因子 γ 为其平均值 3.3）进行模拟。

波浪力试验需测量不同工况下的导管架结构所受的波浪总水平力和垂直力。导管架结构所受的波浪总力采用 S 型总力传感器进行测量，该总力传感器的量程为 300 N（30 kg），可在水下工作。进行总力测量时，在导管架结构模型顶部和后部安装总力（拉压力）传感器，各结构不相互接触，保证结构在波浪作用下除和总力传感器接触外不受其他外力作用。总力传感器用铁架和金属螺杆固定住。模型试验照片见图 3。

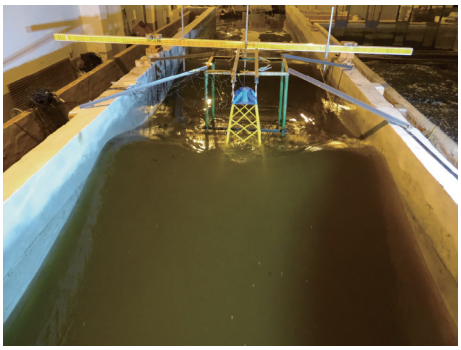


图 3　导管架模型试验照片

Fig. 3　Photograph of the model test of the jacket foundation structure

3　结果与分析

3.1　波浪总水平力

导管架波浪总水平力试验结果见表 2，表中包含了波浪总水平力最大值及累积频率 13% 大值。对比水深 50 m 处与 70 m处的导管结构波浪总水平力，可得如下结果（图 4）。

1）在 1 000 a 一遇波浪作用下，3.78 m、2.07 m、−0.53 m 和−1.52 m 水位下，50 m 水深导管架结构波浪总水平力最大值分别为 24 752 kN、25 173 kN、25 640 kN 和 26 434 kN，波浪总水平力弯矩最大值分别为 1 072 720 kN·m、1 058 939 kN·m、1 046 132 kN·m 和 1 043 649 kN·m；70 m 水深导管架结构波浪总水平力最大值分别为 20 608 kN、21 601 kN、23 221 kN 和 23 957 kN，波浪总水平力弯矩最大值分别为 1 175 222 kN·m、1 207 328 kN·m、1 258 177 kN·m 和 1 282 769 kN·m。相同水深和相同重现期极端波浪作用下，本次试验范围内低水位下的波浪总水平力略大于高水位下的波浪总水平力，不同水位下的波浪总水平力弯矩差别不大。

2）在 1 000 a 一遇波浪作用下，50 m 和 70 m 水深条件下的导管架结构波浪总水平力最大值分别为 26 434 kN 和 23 957 kN；波浪总水平力弯矩最大值分别为 1 072 720 kN·m 和 1 282 769 kN·m。50 m 和 70 m 水深条件（相同导管架结构）下的导管架结构波浪总水平力对比（图 4）表明，相同重现期极端波浪作用下，70 m 水深情况的导管架结构波浪总水平力小于 50 m 水深的结果，但是 70 m 水深下的导管架结构波浪总水平力弯矩大于50 m 水深下的结果。这是由于一方面，50 m 水深条件下波浪的非线性影响明显，波峰面高度相对更大；另一方面，50 m 水深条件下水面附近的导管架结构桩径和结构总宽度较宽，所以 50 m 水深条件下导管架结构波浪总水平力相对较大。70 m 水深条件下，由于波浪总水平力的合力作用点位置相比 50 m 水深条件下较高，所以 70 m 水深条件下导管架结构波浪总水平力弯矩相对较大。

表 2 导管架波总水平力试验结果

Table 2 Tested results of wave total horizontal force subjected by the jacket foundation structure

水深/m	波浪重现期/a	水位/m	波浪要素		波浪总水平力最大值		波浪总水平力 13% 大值	
			H_{max}/m	$H_{13\%}$/m	水平力/kN	水平力弯矩/(kN·m)	水平力/kN	水平力弯矩/(kN·m)
50	1 000	3.78	29.39	16.33	24 752	1 072 720	6 816	233 586
		2.07	28.82	16.01	25 173	1 058 939	6 920	231 208
		−0.53	27.86	15.48	25 640	1 046 132	7 058	227 038
		−1.52	27.50	15.28	26 434	1 043 649	7 278	230 906
70	1 000	3.78	31.5	17.5	20 608	1 175 222	5 821	261 764
		2.07	31.5	17.5	21 601	1 207 328	6 033	265 381
		−0.53	31.5	17.5	23 221	1 258 177	6 375	270 979
		−1.52	31.5	17.5	23 957	1 282 769	6 503	272 915

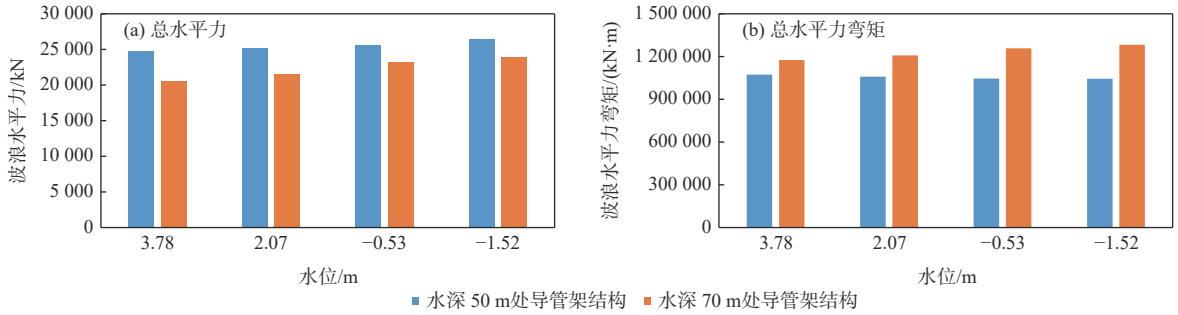


图 4 水深 50 m 处与 70 m 处的导管结构波浪总水平力

Fig. 4 The wave total horizontal force subjected by the jacket foundation structure at the water depth of 50 m and 70 m

3.2 波浪总垂直力

导管架波总垂直力试验结果见表 3，表中包含波浪总垂直力最大值及累积频率 13% 大值。对比水深 50 m 处与 70 m 处的导管结构波浪总垂直力，可得如下结果(图 5)。

1)在 1 000 a 一遇波浪作用下，50 m 和 70 m 水深条件下的导管架结构波浪总垂直力最大值分别为 5 301 kN 和 11 903 kN；波浪总垂直力弯矩最大值分别为 19 212 kN·m 和 30 313 kN·m。相同水深、水位和波浪条件下，导管架结构受到的波浪总垂直力明显小于波浪总水平力。对于波浪作用不到导管架上部平台的情况(50 m 水深条件下及 70 m 水深条件低水位下)，导管架结构受到的波浪总垂直力约是波浪总水平力的 1/4～1/5。

2)50 m 和 70 m 水深条件(相同导管架结构)下的导管架结构波浪总垂直力对比(图 4)表明，相同重现期极端波浪作用下，在低水位下，70 m 水深的导管架结构波浪总垂直力与 50 m 水深的结果差别不大。但是，在高水位下，70 m 水深的导管架结构波浪总垂直力明显大于 50 m 水深的结果。这是由于 70 m 水深及高水位条件下，静水位距离导管架的上部平台底面较近，在 1 000 a 一遇极端波浪作用下，波列中大浪的波峰能够冲击到上部平台底面，且冲击作用较强，此时导管架结构受到的波浪总垂直力除了包括桩柱及杆件的垂直力，还包括上部平台底面受到的波浪冲击浮托力，所以 70 m 水深的导管架结构波浪总垂直力明显大于 50 m 水深的结果。

表 3　导管架波总垂直力试验结果

Table 3　Test results of total vertical wave force on jacket foundation structure

水深/m	波浪重现期/a	水位/m	波浪要素		波浪总水平力最大值		波浪总水平力 13% 大值	
			H_{max}/m	$H_{13\%}$/m	水平力/kN	水平力弯矩/(kN·m)	水平力/kN	水平力弯矩/(kN·m)
50	1 000	3.78	29.39	16.33	4 775	14 440	1 350	3 002
		2.07	28.82	16.01	4 911	15 735	1 373	3 314
		−0.53	27.86	15.48	5 150	17 984	1 490	3 842
		−1.52	27.50	15.28	5 301	19 212	1 491	4 184
70	1 000	3.78	31.5	17.5	11 903	30 313	3 486	6 949
		2.07	31.5	17.5	9 096	24 694	2 737	5 586
		−0.53	31.5	17.5	6 451	18 760	1905	4 156
		−1.52	31.5	17.5	5 376	16 210	1 588	3 542

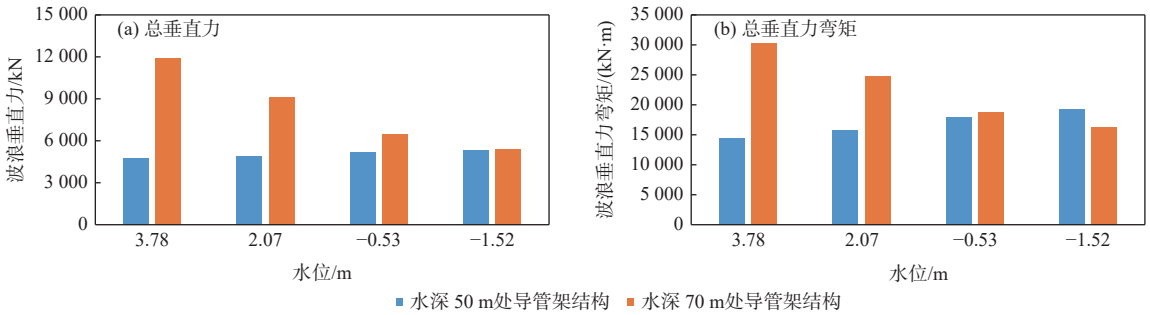


图 5　水深 50 m 处与 70 m 处的导管结构波浪总垂直力

Fig. 5　The wave total vertical force subjected by the jacket foundation structure at the water depth of 50 m and 70 m

4　结　语

本文通过波浪物理模型试验对极端波浪条件下深水导管架基础结构的波浪总力进行了研究，得出如下主要结论。

1)相同水深和相同重现期极端波浪作用下，本次试验范围内低水位下的波浪总水平力略大于高水位下的波浪总水平力，不同水位下的波浪总水平力弯矩差别不大。在相同重现期(1 000 a)极端波浪作用下，70 m 水深下的导管架结构波浪总水平力小于 50 m 水深下的结果，但是 70 m 水深下的导管架结构波浪总水平力弯矩大于 50 m 水深下的结果。

2)相同水深、水位和波浪条件下，导管架结构受到的波浪总垂直力明显小于波浪总水平力。对于波浪作用不到导管架上部平台的情况(50 m 水深条件下及 70 m 水深条件低水位下)，导管架结构受到的波浪总垂直力约是波浪总水平力的 1/4～1/5。

3)相同重现期极端波浪作用下，在低水位下，70 m 水深的导管架结构波浪总垂直力与 50 m 水深的结果差别不大。但是，在高水位下，由于在 70 m 水深的极端波浪条件下波峰可冲击作用到上部平台底面，70 m 水深的导管架结构波浪总垂直力明显大于 50 m 水深的结果。

深水导管架结构的总波浪力大小和特征，可以作为海上风场工程风机导管架基础设计的参考依据，为海洋工程安全提供重要的保障。

参考文献 (References):

[1] 李玉成, 王凤龙, 康海贵. 作用于小尺度圆柱上的波浪、水流力[J]. 海洋工程, 1993, 11(3): 46-59. LI Y C, WANG F L, KANG H G. Wave-current forces on slender circular cylinders[J]. The Ocean Engineering, 1993, 11(3): 46-59.

[2] 李玉成, 何明. 小尺度圆柱上不规则波流力的极值分布[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 1993, 8(增刊): 609-616. LI Y C, HE M. The statistical distribution of extreme values of wave-current forces acting on slender circular cylinder in irregular waves[J]. Journal of Hydrodynamics, 1993, 8(Suppl.): 609-616.

[3] 赵海涛, 滕斌, 李广伟, 等. 竖直截断圆柱一阶波浪力的实验研究[J]. 中国海洋平台, 2003, 18(4): 13-18. ZHAO H T, TENG B, LI G W, et al. An experimental study of first-harmonic wave force on vertical truncated cylinder[J]. China Offshore Platform, 2003, 18(4): 13-18.

[4] 中华人民共和国交通运输部. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of hydrology for harbor and waterway: JTS 145—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[5] 吴家鸣, 郁苗, 朱良生. 桁架式近海结构物整体波浪载荷分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 1-6. WU J M, YU M, ZHU L S. Analysis of integral wave load acting on truss-type offshore structure[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(11): 1-6.

[6] 黄怀州, 洪明, 迟少艳. 随机波浪载荷作用下导管架平台动力响应及疲劳可靠性分析[J]. 船舶力学, 2006, 10(4): 65-71. HUANG H Z, HONG M, CHI S Y. Dynamic response and fatigue reliability analysis of jacket platform under wave loads[J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(4): 65-71.

[7] 李绍武, 张琳琳, 夏陆军. 导管架杆件波浪力试验研究[J]. 水运工程, 2015, 6: 7-16. LI S W, ZHANG L L, XIA L J. Experimental study on wave forces exerting on jacket structure' element[J]. Port & Waterway Engineering, 2015, 6: 7-16.

[8] 沈忠辉, 魏凯, 邓鹏. 海上风电导管架塔架转接段波浪冲击试验及冲击载荷概率模型[C]//吴有生, 邵雪明, 王军. 第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议文集. 北京: 海洋出版社, 2019: 434-440. SHEN Z H, WEI K, DENG P. Wave impact experiment and probability model of impact loads on transition piece (Deck) of offshore wind turbines (OWT) supported by Jackets[C]//WU Y S, SHAO X M, WANG J. The 30th national conference on hydrodynamics & Proceedings of the 15th national congress on hydrodynamics. Beijing: China Ocean Press, 2019: 434-440.

[9] JOSE J, PODRAĪKA O, GUDMESTAD O, et al. Characteristics of the wave slamming forces on jacket structures under plunging breaking waves based on experimental data[C]//Proceedings of ASME 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Trondheim, Norway, 2017.

[10] JOSE J, PODRAĪKA O, GUDMESTAD O, et al. Detailed study on breaking wave interactions with a jacket structure based on experimental investigations[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2017, 140(2): 021301-1-021301-14.

[11] JOSE J, CHOI S, GUDMESTAD O. Sensitivity study on a 3D numerical model for estimating breaking wave forces on a jacket structure[C]//Proceedings of 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. San Francisco, California, 2017.

[12] JOSE J, CHOI S. Estimation of slamming coefficients on local members of offshore wind turbine foundation (jacket type) under plunging breaker[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2017, 9(6): 624-640.

[13] TU Y, CHENG Z S, MICHAEL M. Global slamming forces on jacket structures for offshore wind applications[J]. Marine Structures, 2018, 58: 53-72.

[14] TU Y, CHENG Z S, MICHAEL M. A global slamming force model for offshore wind jacket structures[J]. Marine Structures, 2018, 60: 201-217.

[15] CHEW K H, NG E Y K, TAI K, et al. Offshore wind turbine jacket substructure: a comparison study between four-legged and three-legged designs[J]. Journal of Ocean and Wind Energy, 2014, 1(2): 74-81.

Experimental Study on Wave Total Force Subjected by Deepwater Jacket Foundation Structure Under the Extreme Wave Condition

YI Jianjun[1,2], SHEN Yusheng[3], WU Jianjun[1], ZOU Guoliang[3]

（1. *China Nuclear Power Design Co.*, *Ltd. (ShenZhen)*, Shenzhen 518172, China；
2. *College of Hydrology and Water Resources*, *Hohai University*, Nanjing 213022, China；
3. *Nanjing Hydraulic Research Institute*, Nanjing 210024, China）

Abstract: Wave force is crucial to the stability and safety of deep-water jacket foundation structure of the offshore wind power. By wave physical model tests, the wave total force subjected by the deep-water jacket foundation structure under the extreme wave condition is experimentally studied, including the total horizontal force and vertical force. The water depth for the experiment is 50 m and 70 m respectively and the wave return period is once in 1 000 years. The results show that under the action of the extreme waves with the same return period, the wave total horizontal force subjected by the jacket structure at a water depth of 70 m is less than that at a water depth of 50 m, but the bending moment of the total horizontal force at the water depth of 70 m is greater than that at the water depth of 50 m. Under the case of the same water depth, water level and wave conditions, the wave total vertical force subjected by the jacket structure is significantly less than the wave total horizontal force. Under the action of the extreme waves with the same return period, the wave total vertical force subjected by the jacket structure at the water depth of 70 m has no big difference from that at the water depth of 50 m at low water level. At high water level, however, the wave total vertical force at the water depth of 70 m is significantly greater than that at the water depth of 50 m because at the water depth of 70 m the wave crests can impact to and act on the bottom surface of the upper platform under the extreme wave condition.

Key words: offshore wind power；deepwater jacket；extreme wave；physical model test；wave total force

Received: March 28, 2022