

文章编号:1005-9865(2018)02-0083-09

大直径单桩风机基础冰荷载模型试验研究

武海斌, 黄 焱, 李 伟

(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:针对渤海某海域以单桩结构为支撑的海上风电系统, 对大直径直立桩风机基础进行了一系列静冰荷载模型试验研究。首先, 针对目标海域海冰调研结果确定多个冰速工况, 对 3 MW 及 4 MW 装机功率对应的两种不同直径的单桩基础开展静冰荷载模型试验; 随后在试验现象及试验结果的分析中重点关注了冰排在大直径结构前的破坏模式及破坏特点; 最终, 通过对比模型试验冰力极值试验结果与多规范冰荷载计算结果, 确定大直径直立桩静冰荷载计算规范的合理选择, 并根据试验结果对直立桩静冰荷载计算方法进行了经验参数修正。得出的相关结论可为渤海海域大直径单桩式风机基础冰荷载的工程估算提供参考。

关键词:单桩式风机基础; 静冰荷载; 冰排; 海上风电; 渤海

中图分类号:TK89 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2018.02.010

Experimental study on the ice load of large-diameter monopile wind turbine foundations

WU Haibin, HUANG Yan, LI Wei

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

Abstract: The static ice load model tests for large-diameter offshore monopile wind turbine structure in Bohai Sea were carried out. Firstly, the multiple ice speeds were selected as the test conditions according to the sea conditions of target sea area. The model tests were conducted using two different pile diameters corresponding to 3MW and 4MW installed power. Secondly, the analysis of experiment phenomena and test results focused on the failure modes and failure features of the ice sheet before the large-diameter monopile structure. Finally, the comparison of the maximum ice load results of the model tests and the calculated results of several standards directed the reasonable selection of the evaluation standards about static ice load on large-diameter vertical cylinder. Furthermore, an empirical parameter of the selected norm was amended according to the test results. The conclusions presented in this paper will be meaningful to engineering estimation of ice load on large-diameter monopile wind turbine foundation in Bohai Sea.

Keywords: offshore monopile wind turbine foundation; ice loads; ice sheet; offshore wind power; Bohai Sea

随着不可再生能源的日益减少及环境污染带来的压力增加, 发展可再生能源已经越来越受到世界各国的重视。其中, 风力发电已成为继水力发电之后最具开发前景的可再生能源^[1]。相对于陆上风力发电, 海上风力发电风能资源更加丰富, 质量更高, 且不易涉及土地征用、噪音扰民的问题, 因而开发潜力巨大。渤海海域是我国风能条件优越的海域之一, 具备可观的风电开发前景^[2]。然而, 渤海海域地处高纬度地区, 冬季受西伯利亚强冷空气影响存在结冰期, 海上风电机组将受到海上大面积漂移冰排的持续作用。冰排在风机基础结构前发生连续破坏, 产生持续的冰荷载作用在结构上, 对风机结构的抗倾覆性能及风机安全作业提出

收稿日期:2017-08-23

基金项目:国家重大科技专项资助项目(2016ZX05058-004-002);国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51621092)

作者简介:武海斌(1994-), 女, 山西人, 硕士研究生, 从事船舶与海洋工程方面的研究。E-mail: whbjj@tju.edu.cn

通信作者:李 伟。E-mail: lw0822@tju.edu.cn

了更为严峻的挑战。

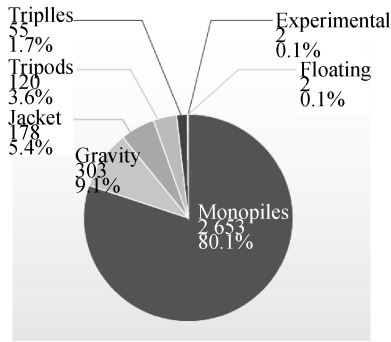


图 1 各结构型式风机基础在实际应用中所占比重^[3]

Fig. 1 The proportions of each type of wind turbine foundation in practical application^[3]

在现有的各种风机基础结构型式中,由于单桩式基础结构具有受波浪载荷作用小、结构连续性好的特点,在近岸水深小于 30 m 的区域,是应用最为广泛、研究最为集中的风机基础结构型式。根据欧洲风能协会对各结构型式风机基础在实际应用中所占比重的统计(如图 1 所示),到 2015 年单桩式风机基础在工程应用中所占比重最高,达到 80.1%^[3]。国际上从 20 世纪 80 年代起,丹麦、芬兰和挪威等北欧国家就已开展大规模的海上风能资源评估及冰区海上风电结构研究工作^[4]。此后,Anne Barker^[5]等人在 2004 年前后针对丹麦海域 Nysted 近海风场开展了一系列单桩式风机基础的冰载荷响应研究。我国海上风电产业发展历史较短,对于冰区海上风电结构的研究更

加有限,黄焱^[6]等对于寒区海域单柱三桩式风电基础结构进行了时域下冰激振动的数值模拟,并定义了描述冰与风电结构相互作用进程的控制因子。

我国渤海海域现有海上风电场水深均小于 30 m,装机功率在 3MW 至 5MW 之间,多采用单桩式基础结构型式。同时,为了捕获尽可能多的风能,海上风电结构通常具有巨大的叶轮和高耸的塔筒结构,重心高且柔性大,叶轮承受的风载荷以及风机的重力载荷将对下部基础产生巨大的弯矩作用。因此,为提升风机结构的抗倾覆能力,单桩式风机基础通常设计为直径 5~8 m 的大直径结构。然而,目前对于渤海海域大直径单桩风机基础所受冰载荷的估算多沿用油气开采行业和港口行业的经验做法,对海冰与大直径结构相互作用下的冰载荷特点及极限挤压冰力计算并未有针对性的有效计算规范^[7]。在上述背景下,以渤海某海域 3MW 和 4MW 装机功率对应的两种直径大小的单桩风机基础为试验原型,进行一系列直立桩风机基础结构静冰力模型试验研究,并重点分析不同冰载荷计算规范对于大直径风机基础结构的适用性。

1 模型试验

1.1 试验设施条件

模型试验测试工作是在冰力学与冰工程实验室内完成,实验室场景如图 2 所示。实验室低温空间面积达 320.0m²,用于容纳冰水池并进行模型试验,冰水池长 40.0 m,宽 6.0 m,深 1.8 m,制冰能力在 1.0~30.0 cm。实验室制冷系统主要设备包括压缩机组、冷风机,并通过精心设计的均压送风顶棚对低温冰池室内的空气降温,从而可使试验中的制冰温度在 0°C~-25°C 范围内进行精准的调节控制。



图 2 冰工程实验室

Fig. 2 Ice mechanics and engineering laboratory

试验中采用第二代低温模型冰—尿素冰^[8]。模型冰通过喷雾引晶的方式生成初始晶体均匀覆盖水体表面,并在-22°C 的稳定低温环境下持续生长,在模型冰盖生长至目标厚度后,采用回温监控的方法控制模型冰的强度特征。依据这一方法制备的模型冰在晶格方向、生长过程上均与渤海地区当年生海冰保持一致,模型冰中所含尿素类似于原型海冰中的盐水泡,可促使冰融化,从而加大孔隙率,降低冰强度,以更好地满足

模型冰的要求。实验室制备的模型冰 σ_c/σ_f 的比值在 2.5~3.2 左右, E/σ_f 在 2 000~3 500 左右,这一比例为大多数冰池所接受。

1.2 相似准则及模型比尺

与其它模型试验相比,冰工程模型试验是一种相当特殊的试验,因为它同时具有流体模型试验和材料试验两种试验的双重性。在本文的试验研究中,需要模拟冰排在结构前的破坏和运动模式,在这一过程中惯性力、重力和弹性力的作用占主导地位。因此,试验中遵循弗汝德相似准则和柯西相似准则对原型结构进行缩尺^[9]。详细的各物理参数在原型与模型间的相似比尺关系见表 1,本文模型试验所采用的缩尺比为 $\lambda = 1:20$ 。

表 1 主要物理量的比尺
Tab. 1 Scale of the basic physical quantity

物理量	比尺	物理量	比尺
长度	λ	冰强度	λ
时间	$\lambda^{1/2}$	冰厚	λ
速度	$\lambda^{1/2}$	弹性模量	λ
质量	λ^3	力	λ^3

1.3 试验模型及试验工况

在静冰力试验中,由于冰排在风机基础结构前的破坏进程以及冰荷载作用水平不受上部风机塔筒结构的影响,因此模型仅包括下部基础结构。模型顶部的中心位置预设了测力传感器安装孔,其通过测力传感器与一个刚度很大的支撑臂相连接,支撑臂安装在试验主拖车上。测试通过驱动拖车至设定的速度,并拖曳模型在冰排内行驶的方式对现实海冰作用情况进行模拟,试验场景如图 3 所示。

图 4 展示了 3MW、4MW 两结构在平均水位及设计高水位下的示意图,可以发现其结构型式在垂向位置并未发生较大变化,只是桩径略微增大,因此不同水位的试验现象较为一致,讨论仅选择平均水位展开。试验模型在平均水位、设计高水位下桩径大小如表 2 所列。此外,由于单桩式风机基础结构物通常带有靠船构件,而本文讨论重点在于大直径单桩结构所受静冰载荷的大小,因而为避免靠船构件迎冰对试验结果产生影响,靠船构件设置在背冰面一侧。

表 2 试验模型桩径大小
Tab. 2 The diameter size of experimental model

水位	桩径/m	
	3MW 模型	4MW 模型
设计高水位	5.00	5.77
平均水位	5.30	5.83

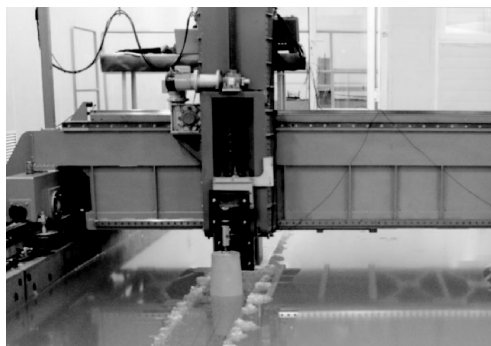


图 3 3MW 模型静冰力试验场景

Fig. 3 Static ice load experiment scenario of 3MW test model

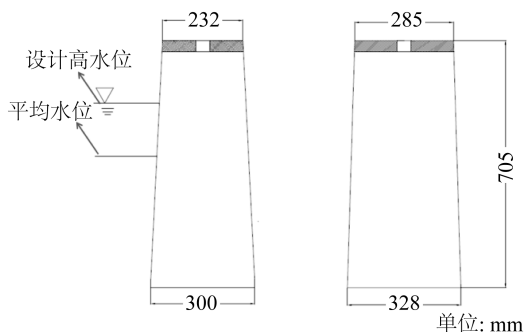


图 4 模型结构示意图

Fig. 4 The sketch map of test model structure

根据目标海域 50 年一遇的海冰参数,可确定试验中需要模拟的冰条件为:冰厚 40 cm,弯曲强度 600 kPa,挤压强度 2.06 MPa,冰速范围 0.05~1.2 m。依据相似比尺得到试验目标模型冰厚为 2.0 cm,目标冰弯曲强度为 30 kPa,目标冰挤压强度为 105 kPa,试验冰速为 11~268 mm/s。为了能够准确捕捉到冰力极值,静冰力试验共设置 6 组冰速,工况设置情况见表 3。

表 3 静冰力模型试验工况设置

Tab. 3 Test conditions of static ice load model tests

水位	编号	冰厚/cm	试验冰弯曲 强度/kPa	试验冰挤压 强度/kPa	试验冰速 /(mm·s ⁻¹)	原型冰速 /(m·s ⁻¹)
平均水位	1	2.0	35.2	109.2	11	0.05
	2	1.9	29.2	107.0	67	0.3
	3	2.1	30.2	105.4	100	0.45
	4	2.0	28.6	99.0	134	0.6
	5	2.3	30.9	98.2	201	0.9
	6	2.0	33.2	106.1	268	1.2
设计高水位	7	2.1	30.2	103.2	11	0.05
	8	2.0	29.2	103.1	67	0.3
	9	2.0	30.2	103.5	100	0.45
	10	2.0	30.6	103.2	134	0.6
	11	2.1	30.2	102.4	201	0.9
	12	2.2	29.2	104.2	268	1.2

2 试验现象及结果

2.1 试验现象

通过观察两个直立桩的试验现象可以发现,冰排在两个直立桩前的破坏模式并无较大差异,因而本文对于试验现象的描述仅以 3MW 模型为例进行展开。

在低冰速工况下,冰排呈现出明显的延性破坏特征,主要发生压屈破坏。但值得注意的是,在本文所涉及的大直径桩柱情况下,压屈主要表现为两种模式:整体压屈破坏与局部压屈破坏。当发生整体压屈破坏时,基本特征是冰排与桩柱模型接触后开始呈现向上隆起的缓慢变形,随着作用进程的推进,隆起变形发展至一定水平时冰排突然折断。在这种模式下,冰排通常表现为较大范围的破坏,致使结构前出现一段敞水区域,直至冰排与结构再次接触。而试验中更为常见的则是局部压屈破坏,此时,冰排沿桩柱表面的隆起变形与后续破坏表现为一系列并不同步的局部事件,这样每个局部事件所引发的冰排破坏范围就大幅缩小,致使破坏后的冰排在结构前形成一系列小尺寸的碎块。在这种模式下,就很难观察到结构前出现明显的敞水区域。图 5 展示了试验中出现的典型整体压屈破坏场景,可以看到,在距离与桩柱接触位置的远端冰排上出现了一条连续的环状裂纹,该裂纹将引发后续的整体压屈破坏。图 6 展示了典型局部压屈破坏场景,可以看到,在结构前有大量的小尺寸碎冰块,这些碎冰块则是冰排发生局部压屈破坏的产物。

在中、高冰速工况下,冰排在结构前的破坏始终呈现出压屈与挤压并存的特征。如图 7 所示,冰排在结构前不再频繁的出现隆起变形现象,而破坏后的冰体中也混杂了压碎后的粉末状冰絮。与此同时,从图 7 中还可以观察到桩前存在一部分向上隆起的小尺寸碎冰块,这一试验现象与局部压屈破坏相对应。通常在小尺寸桩柱结构前,冰排在高冰速下会表现出持续的挤压破坏状态,但本文所进行的试验表明,大直径桩体促使冰排更易发生压屈破坏,进而在高冰速条件下仍能够观察到压屈破坏现象。

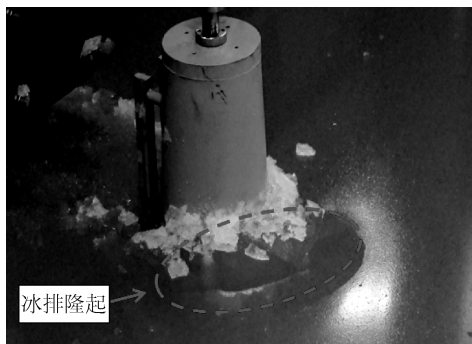


图 5 平均水位整体压屈破坏试验场景(冰速 11 mm/s)

Fig. 5 Experiment scenario of global buckling failure at mean water level at 11 mm/s ice speed

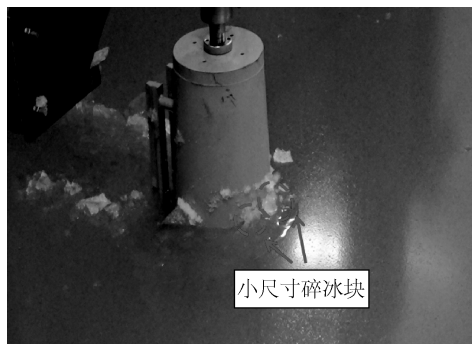


图 6 平均水位局部压屈破坏试验场景(冰速 11 mm/s)

Fig. 6 Experiment scenario of local buckling failure at mean water level at 11 mm/s ice speed

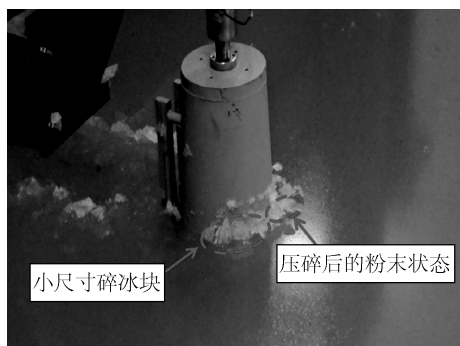


图 7 平均水位挤压-压屈破坏试验场景(冰速 268 mm/s)

Fig. 7 Experiment scenario of crushing-buckling failure at mean water level at 268 mm/s ice speed

2.2 试验结果

通过绘制冰力时程曲线发现,上述随冰速变化的试验现象均能在冰力时程中找到对应的波动特征。图 8~9 展示了 3MW 和 4MW 模型冰速为 11 mm/s 的冰力时程,两组曲线中均能观察到明显的整体压屈破坏与局部压屈破坏特征。正如图中所标示的,在整体压屈破坏发生时,冰力将呈现出缓慢加载—快速卸载的波动轨迹,并具有一个较长时间的空载段(与整体破坏后的敞水环境相对应)。而两组曲线中占比更大的则是局部压屈破坏所导致的短暂空载或部分卸载特征,这进一步说明,在大直径桩柱前冰排的整个破坏进程具有显著的非同时破坏效应。

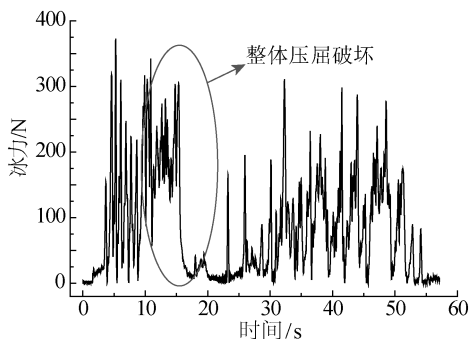


图 8 3MW 模型冰速 11 mm/s 冰力时程曲线

Fig. 8 Time history of ice load on 3MW model at 11 mm/s ice speed

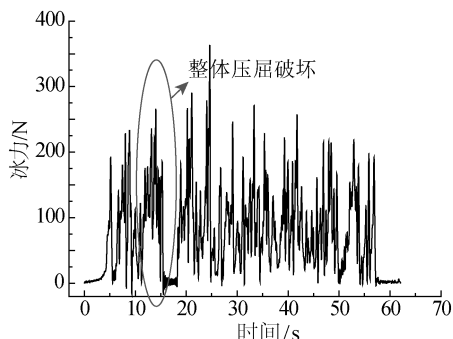


图 9 4MW 模型冰速 11 mm/s 冰力时程曲线

Fig. 9 Time history of ice load on 4MW model at 11 mm/s ice speed

图 10 与图 11 分别展示了 3MW 和 4MW 模型冰速为 134 mm/s 的冰力时程曲线,冰力时程曲线呈现出挤压-压屈的混合破坏模式。具体来说,当发生压屈破坏时,曲线波动特征与上述低冰速下的描述较为一致。

致,这里不再赘述;当发生挤压破坏时,冰力时程表现为一定水平上持续且快速的波动迹象,且冰载荷不完全卸载。随着冰速的进一步提高,由于冰排在高应变速率下主要发生脆性破坏,可以观察到挤压破坏所占比例明显增加。需要指出的是,与径厚比(D/h)较小的单桩结构不同^[10],大直径单桩结构在高冰速下冰力时程曲线(如图 12 与图 13 所示)中仍存在局部压屈破坏的特点,即冰力出现短暂空载或部分卸载特征,这表明此时仍然具有一定比例的压屈破坏。

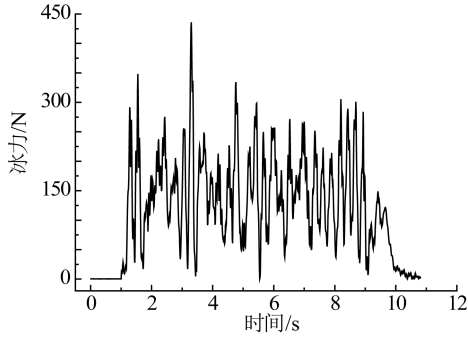


图 10 3MW 模型冰速 134 mm/s 冰力时程曲线

Fig. 10 Time history of ice load on 3MW model at 134 mm/s ice speed

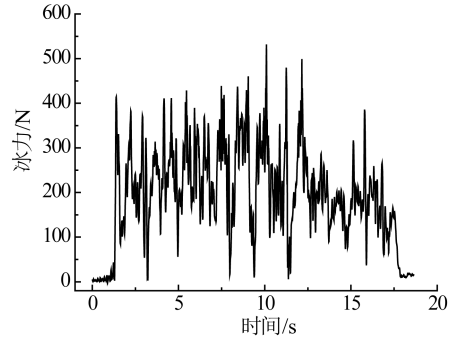


图 11 4MW 模型冰速 134 mm/s 冰力时程曲线

Fig. 11 Time history of ice load on 4MW model at 134 mm/s ice speed

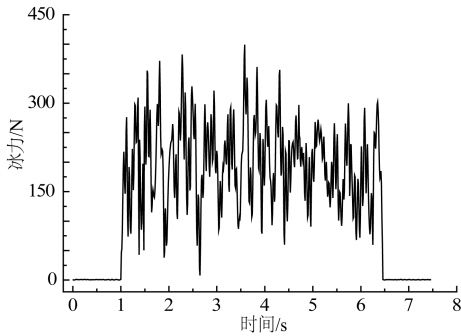


图 12 3MW 模型冰速 268 mm/s 冰力时程曲线

Fig. 12 Time history of ice load on 3MW model at 268 mm/s ice speed

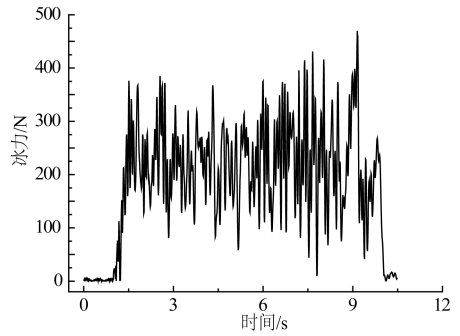


图 13 4MW 模型冰速 268 mm/s 冰力时程曲线

Fig. 13 Time history of ice load on 3MW model at 268 mm/s ice speed

综合上述不同模型以及不同冰速的冰力时程曲线分析可以发现,大直径直立桩前的冰载荷作用水平受冰速变化的影响较为显著。在低冰速下,主要以整体压屈和局部压屈破坏为主,而随着冰速的增大,压屈破坏在冰排破坏所占的比重逐渐下降,挤压破坏所占的比重逐渐上升。

对两个直立桩模型每组试验的冰力曲线进行冰力极值统计,并将试验得到的结果通过模型比尺(1:20)和模型律进行换算,可得到结构所受到的原型冰力。表 4 列出了各冰速下结构所受到的原型冰力极值。

表 4 各工况下单桩基础结构受到的原型冰力极值

MN

Tab. 4 The maximum ice load of prototype monopile foundation structure in various conditions

MN

试验模型	冰速/($m \cdot s^{-1}$)					
	0.05	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2
3MW 模型	2.97	3.73	3.89	3.49	3.40	3.19
4MW 模型	2.90	3.11	3.68	4.25	4.05	3.76

3 分析与讨论

3.1 计算规范比较

对于寒区海上结构来说,静态极限冰载荷是造成结构在短时间内倾覆的决定性因素,是海洋工程结构设

计的主要控制荷载。《中国海冰条件及应用规定 QHS 3000-2002》、《海上风力发电机组设计要求》、《ISO 19906: Petroleum and natural gas industries-Arctic offshore structures》等规范均给出了直立桩柱冰力计算的估算公式。

国内现行的工程计算中多采用《中国海冰条件及应用规定 QHS 3000-2002》^[11]规范对海上直立桩结构冰力极值进行估算。然而,根据这一规范的技术背景可知,该规范理论上只考虑了直立桩前的挤压冰力,适用于直径小于 2.5 m 的直立桩结构挤压冰载荷计算。由于大直径桩柱径厚比较高,冰排的非同时破坏效应相对显著,因而在大直径风机基础结构前会发生局部的压屈破坏,此时该规范对于仅考虑极限挤压冰力的估算是否适用有待验证。

根据《中国海冰条件及应用规定 QHS 3000-2002》规范,作用在直立桩柱上的极限挤压冰力 F 按下式计算:

$$F = m \cdot I \cdot f_c \cdot \sigma_c \cdot D \cdot h \quad (1)$$

式中: m 为桩冰面的形状系数,圆形截面取 0.9; σ_c 为海冰无侧限压缩强度,为 2.06 MPa; D 为桩柱的直径; h 为冰厚; I 为嵌入系数; f_c 为接触系数。嵌入系数 I 和接触系数 f_c 的乘积,规范中给出了推荐计算公式。代入相关参数可得到两直立桩模型冰力极值规范计算结果,在表 5 中列出。

国际上现行的《IEC 61400-3:2009 海上风力发电机的设计要求》规范^[12]中也给出了直立桩静态极限挤压冰力计算公式:

$$H_d = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot h \cdot D \cdot \sigma_c \quad (2)$$

式中: k_1 为基础形状投影到冰撞击侧面上的形状因子,圆形截面取 0.9; k_2 为冰接触基础的接触因子,当冰连续运动时取 0.5; k_3 为冰厚度和基础直径间的比率因子, $k_3 = \sqrt{1 + 5h/D}$; h 为冰厚; D 为水位线处的基础直径; σ_c 为冰的破碎强度,为 2.06 MPa。代入上述参数计算得到两模型的 IEC 规范冰力极值计算值。

目前国际现行的 ISO 规范中所提供的直立桩前的挤压冰力计算公式为:

$$P_c = C_R \cdot (h/h_1)^n \cdot (w/h)^m \quad (3)$$

$$F_G = P_c \cdot w \cdot h \quad (4)$$

式中: h 为冰厚; w 为桩柱的直径; h_1 为参考冰厚 1 m; m 为一经验参数,ISO 推荐取值为-0.16。 n 为一经验参数,对于冰厚小于 1 m 的情况,其推荐值为 $(-0.5 + h/5)$;对于冰厚大于等于 1 m 的情况,其推荐值为-0.30。 C_R 为冰强度参数,取值为 2.06 MPa。表 5 汇总了上述三种规范冰力极值计算结果。

表 5 平均水位直立桩最大原型冰力极值与规范计算值的比较

Tab. 5 Comparison between the maximum prototype ice load and the calculated value of norms at mean water level

模型	模型直径/m	直立桩冰力极值/MN			
		试验值	海冰规范	IEC 规范	ISO 规范
3MW 模型	5.30	3.89	1.57	2.31	4.24
4MW 模型	5.83	4.25	1.73	2.51	4.60

由于规范中冰力极值的计算不考虑冰速的影响,采用不同冰速下冰力极值的最大试验值与规范进行比较。绘制两模型在不同冰速下冰力试验极值与各个规范冰力计算值的比较结果如图 14、15 所示,可以发现海冰规范及 IEC 规范的冰力极值计算值均远小于试验值,因此可以初步判定,国内海冰规范及国际 IEC 规范对于单桩式风机基础结构的冰力极值计算适用性较差。

由前文分析可知,国内海冰规范计算公式仅考虑直立桩前的极限挤压冰力,对于径厚比较高的大直径直立桩前冰排压屈破坏冰力并未充分考虑。因此,该规范主要针对桩径较小的海洋平台结构,即只能计算桩径在 2.5 m 以下的情形。而 IEC 规范计算公式虽然考虑了径厚比的影响,但该系数的计算公式来源于 Afanasev 公式^[13],实质上仅适用于径厚比 $1 < D/h < 6$ 的情况。本文中的直立桩风机基础结构直径已接近 6 m,径厚比达到了 15,因此采用 IEC 规范计算渤海海域大直径单桩风机基础冰载荷也是不恰当的。与此相比,ISO 规范公式中充分考虑了桩柱径厚比的影响,对于大直径直立桩前的压屈破坏具有充分的考量。因此,对大直径单桩结构的冰载荷计算具有较好的适用性。

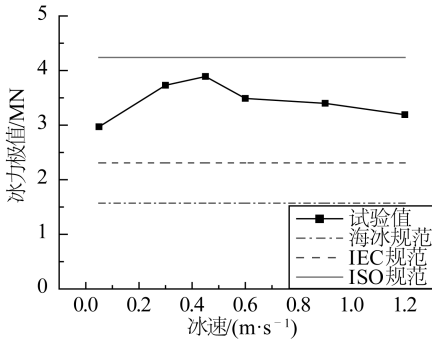


图 14 3MW 模型冰力试验值与规范计算值比较

Fig. 14 Comparison between test values of ice load and calculated values of norms (3MW model)

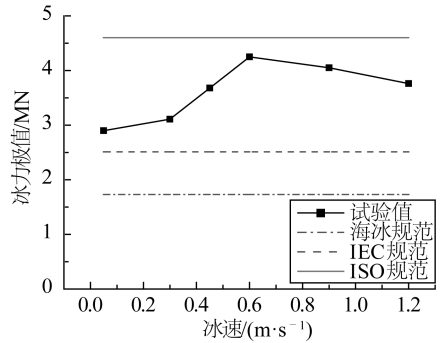


图 15 4MW 模型冰力试验值与规范计算值比较

Fig. 15 Comparison between test values of ice load and calculated values of norms (4MW model)

3.2 ISO 规范参数修正

进一步分析图 14、15 可知,ISO 规范的计算值仍略大于试验冰力极值。考虑到规范中经验参数的取值大多根据北美加拿大北海地区的冰情条件分析确定,并不完全适用于渤海海域的冰情条件,因而计算值与试验值存在一定差异。由上述对试验现象以及结果的分析可知,大直径单桩的径厚比相对较大,破坏模式与小直径单桩结构相比差异较明显,进而影响冰载荷极值,因而根据试验结果对 ISO 规范中与径厚比相关的经验参数 m 进行修正。

在 ISO 计算公式中 C_R, h_1, h, n 计算参数保持恒定的情况下,仅改变单桩直径大小,可得到一系列冰力建议计算值,绘制 ISO 建议计算值曲线如图 16 实线所示。同时,为了使试验结果修正的经验参数 m 更加可靠,对设计高水位进行了补充试验,以得到该水位下的冰力极值,并在图 16 中列出两个水位下的试验结果。代入不同的 m 值进行计算,选取使得试验结果到修正曲线的平均几何距离最小的 m 值作为规范修正结果,此时 m 取 -0.19 ,如图 16 虚线所示。具体试验结果及规范修正计算结果汇总于表 6。

表 6 模型冰力试验值与修正规范计算值比较

Tab. 6 Comparison between the experimental ice load prototype values and the calculated values of amended norm

水位	模型	直立桩桩径/m	冰力试验极值/MN	冰力规范计算值/MN
设计高水位	3MW 模型	5.00	3.65	3.75
	4MW 模型	5.77	4.18	4.20
平均水位	3MW 模型	5.30	3.89	3.93
	4MW 模型	5.83	4.25	4.24

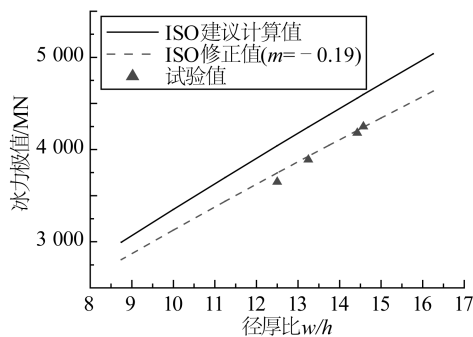


图 16 ISO 规范经验参数拟合修正

Fig. 16 Empirical parameter fitting and amendment of ISO norm

因此,在采用 ISO 规范计算大直径单桩风机基础在渤海海域内所受冰载荷极值时,对经验参数 m 的取值推荐采用 -0.19 。

4 结 语

基于渤海某海域直立桩风机基础的静冰力模型试验测试结果,通过分析试验各个组次的冰力时程曲线,得到不同冰速下的冰力极值,并与不同规范得到的计算值进行比较,主要得到以下结论:

1)通过对单桩基础结构的静冰载荷及试验现象进行分析后发现,冰排在大直径直立桩前的破坏模式与冰在一般直立桩前的破坏模式大致相同,均表现为低速下的压屈破坏和高速下的挤压破坏特征。但是,由于大直径桩的径厚比较大,在高冰速条件下的冰排仍存在一定比重的压屈破坏;

2)通过规范公式计算并与试验测试值进行比较分析发现,《中国海冰条件及应用规定 QHS 3000-2002》及《IEC 61400-3:2009 海上风力发电机的设计要求》不适用于渤海海域大直径直立桩前冰力计算,而《ISO 19906: Petroleum and natural gas industries-Arctic offshore structures》规范对渤海海域大直径直立桩柱冰力计算具有较好的适用性,建议工程设计人员在估算冰载荷时选取这一规范;

3)通过计算分析并进行验证试验后发现,对于本文研究的渤海海域 3MW 和 4 MW 大直径直立桩风机基础结构,ISO 规范中的经验系数 m 的取值建议修正为-0.19。

对单桩风机基础结构开展的静冰力模型试验工作,可为工程上在渤海海域内评估直立桩式风机基础结构极限冰载荷提供参考。

参考文献:

- [1] 苏明军. 风力发电—中国重要的后续能源[J]. 能源环境保护, 2005, 19(6):12-14. (SU M J. Wind-power electricity generation—the important follow up energy in China[J]. Energy Environmental Protection, 2005, 19(6):12-14.(in Chinese))
- [2] 王仲颖, 时璟丽, 赵勇强. 中国风电发展路线图 2050[R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2011. (WANG Z Y, SHI J L, ZHAO Y Q. Roadmap of wind power development in China 2050[R]. Beijing: Energy Research Institute National Development And Reform Commission, 2011.(in Chinese))
- [3] The European offshore wind industry key trends and statistics 2015[R]. The European Wind Energy Association Report, 2015.
- [4] AHMAD HEMAMI. 风力发电机组技术与应用[M].北京: 机械工业出版社, 2013. (AHMAD HEMAMI. Wind turbine technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.(in Chinese))
- [5] BARKER A, TIMCO G, GRAVESEN H, et al. Ice loading on Danish wind turbines: part 1; dynamic model tests[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 41(1): 1-23.
- [6] 黄焱, 马玉贤, 罗金平, 等. 渤海海域单柱三桩式海上风电结构冰激振动分析[J]. 海洋工程, 2016, 34(5):1-10. (HUANG Y, MA Y X, LUO J P, et al. Analyses on ice induced vibrations of a tripod piled offshore wind turbine structure in Bohai Sea[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(5):1-10.(in Chinese))
- [7] 周旋. 冰区海上风机基础设计中的冰荷载研究初探[J]. 能源与节能, 2014, (5): 62-64. (ZHOU X. Ice loading research on offshore wind turbine foundation in ice region[J]. Energy and Conservation, 2014, (5): 62-64. (in Chinese))
- [8] 黄焱, 史庆增. 一种控制尿素模型冰晶体生长结构的方法: CN2013105769044[P]. 2013-11-14. (HUANG Y, SHI Q Z. Method for controlling urea model ice crystal growth structure; CN2013105769044[P]. 2013-11-14.(in Chinese))
- [9] ISO 19906. Petroleum and natural gas industries-arctic offshore structures. international organization for standardization[S]. Geneva, Switzerland, 2010.
- [10] HUANG Y, SHI Q, SONG A. Model test study of the interaction between ice and a compliant vertical narrow structure[J]. Cold Regions Science & Technology, 2007, 49(2):151-160.
- [11] Q/HS 3000-2002. 中国海冰条件及应用规定[S]. 2002. (Q/HS 3000-2002, Regulations for offshore ice condition & application in China sea[S]. 2002.(in Chinese))
- [12] IEC 61400-3. Wind turbines, Part 3: Design requirements for offshore wind turbines[S]. IEC, 2009.
- [13] 史庆增. 孤立桩柱上冰压力的经验公式计算法及试验验证[J]. 海洋工程, 1993(1): 3-13. (SHI Q Z. A method of calculating the ice forces on isolated pile by using empirical equations and modeling tests verification [J]. The Ocean Engineering, 1993(1): 3-13.(in Chinese))