

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240404003

大直径单桩海上风机的风浪效应动力模型试验*

田抒平^{1,2}, 张陈蓉^{1,2}, 陈敬森^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 极端风浪荷载作用下, 海上风机结构动力响应较大, 安全性能遭受严重威胁。以 NREL-5MW 风机为原型, 对极端荷载条件下砂土中大直径单桩基础海上风机进行一系列 1g 动力模型试验研究。采用自主研发的直线电机激振器, 通过自定义输入归一化波形进行单点荷载加载, 实现实际海况条件下环境荷载的随机不规则特性, 对比分析了单独风荷载、单独波浪荷载以及风浪联合荷载作用下风机系统的位移和应力响应特性, 探讨了不同加载条件对风机上部结构和桩基连接处疲劳破坏的影响。试验结果表明, 极端风浪荷载条件下, 风机位移和振荡幅度随荷载增加呈非线性趋势显著增加。波浪荷载是造成风机结构连接处疲劳破坏的主要因素。此外, 单独风荷载和波浪荷载作用位移极值线性叠加明显大于风浪联合荷载条件下结构的耦合动力响应; 而单独风荷载和波浪荷载作用时结构连接处疲劳损伤线性叠加明显小于风浪联合作用的疲劳损伤。分析结果可为海上风机的设计和评估提供一定参考。

关键词: 1g 模型试验; 海上风机; 大直径单桩基础; 风浪联合荷载; 疲劳分析

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0745-09

Dynamic Model Testing of Wind and Wave Effects on Offshore Wind Turbines with Large-diameter Monopile Foundations

TIAN Shuping^{1,2}, ZHANG Chenrong^{1,2}, CHEN Jingsen^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The dynamic response of offshore wind turbines is significant under extreme wind and wave loading, posing a serious threat to their safety. Taking the NREL-5MW wind turbine as a prototype, a series of 1g dynamic model tests were conducted to study the behavior of an offshore wind turbine with a large-diameter monopile foundation in sand under extreme loading conditions. To replicate the random and irregular characteristics of environmental loading under actual marine conditions, a self-developed linear motor exciter was employed to apply single-point loading using customized input normalized waveforms. The displacement and stress response characteristics of the wind turbine system were then comparatively analyzed under wind-only, wave-only, and combined wind-wave loading. Furthermore, the influence of different loading conditions on fatigue damage at the connection joint between the superstructure and the monopile foundation of the wind turbine was investigated. The test

* 收稿日期: 2024-04-04; 修回日期: 2024-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779175)资助

作者简介: 田抒平(1995—), 女, 博士研究生。主要从事桩基工程方面的研究。E-mail: tianshuping95@163.com

通信作者: 张陈蓉(1982—), 女, 副研究员, 博导, 博士。主要从事桩基工程的科研与教学工作。E-mail: zcrong33@tongji.edu.cn

results showed that under extreme wind-wave loading, the displacement and oscillation amplitude of the wind turbine exhibited significant nonlinear growth with increasing loading. Wave loading was the primary factor contributing to fatigue damage at the connection joint of the wind turbine structure. Additionally, the linear superposition of the extreme displacements under separate wind and wave loading was significantly larger than the coupled dynamic response under combined wind-wave loading. Conversely, the linear superposition of fatigue damage at the connection joint under separate wind and wave loading was significantly lower than that under combined wind-wave loading. These findings provide valuable reference for the design and evaluation of offshore wind turbines, demonstrating significant engineering applicability.

Keywords: 1g model test; offshore wind turbine; large-diameter monopile foundation; combined wind-wave loading; fatigue analysis

0 引言

我国具有丰富的近海风力资源,国家十四五规划提出,要积极推动近海海上风电规模化发展,推动海上风电技术的进步^[1-4]。在海上风机服役期间,风机系统承受着风、浪、流等各种海洋环境荷载,尤其在极端恶劣天气条件下,上述荷载会造成系统的复杂动力反应,严重威胁着风机结构的安全稳定。因此,关注极端风浪荷载作用下风机结构的短期动力特性和长期疲劳破坏,对系统的设计和运营评估显得非常必要且有意义^[5-6]。

针对海上风机的动力特性和疲劳破坏,众多学者开展了广泛的物理模型试验研究。由于技术条件的限制,风浪等海洋环境荷载的精确加载是一大难点。目前的加载方法主要有入工造波设备法和作动装置法两种。C.Y.Huan等^[7]和G.Xiong等^[8]采用工业风机作为风模拟系统,采用简单水池产生波浪作为波模拟系统,研究了风机结构的动力特性。然而,简易造波设备生成的风浪荷载品质较差。K.Lin等^[9]利用风洞试验实现了风荷载加载,刘梅梅等^[10]采用波流水槽实现了波浪荷载加载。风洞、浪槽产生的风浪荷载品质相对较好,但造价昂贵,且试验过于复杂,风场对波浪自由面产生影响,容易导致结构的动力响应失真。因此,在以往的研究中,更为广泛使用的是作动装置法,伺服控制加载系统,与风机刚性连接进行加载。D.Lombardi等^[11]和R.Liang等^[12]将不规则风浪荷载简化为均匀谐波循环荷载,开展了一系列风机模型试验研究。然而,低频拟静力加载和高频稳态激振加载,效果粗糙,无法反映真实海况条件下环境荷载的随机不规则特性。

此外,已有研究往往基于常规风浪荷载条

件^[13-14],鲜少考虑极端荷载对其影响。我国是受台风影响较为严重的国家之一,在其发生过程中,空气动力荷载和波浪荷载瞬时幅值达到最大,且脉动性极强,海上风机处于服役期间的极端脆弱状态。

基于此,本文采用可以自定义输入随机不规则波形的加载设备,开展了一系列砂土中大直径单桩基础海上风机的极端风浪荷载效应动力响应模型试验。对比了极端风况和海况条件下单独风荷载、单独波浪荷载、以及风浪联合荷载对风机位移和应力的影响,分析了环境荷载与风机结构间的耦合响应特性。进一步探讨了不同加载条件下风机上部结构和基础连接处的疲劳破坏。

1 模型试验

1.1 试验设备

试验系统由加载设备、量测设备、模型箱和风机缩尺模型构成,如图1所示。加载设备如图2所示,采用螺杆将直线电机激振器与风机模型进行刚性连接,可以实现最高1 000 000个归一化点的自定义输入不规则波形的单点荷载加载,还原真实海况条件下风和波浪等随机环境荷载对风机系统的作用规律,最大加载幅值和频率分别为100 N和100 Hz。量测装置包含力传感器、位移传感器和应变测量系统。其中,力传感器集成于电机激振器内部,控制精度及分辨率为0.1 N,用于监测加载水平;德国wenglor激光位移传感器,精度为8 μm,用于测量风机模型塔顶和桩顶位移;应变测量采用全桥连接的应变片,布置在桩顶处,型号BF1K-3AA,电阻值1 000 Ω、灵敏系数2%。模型箱尺寸为60 cm×40 cm×50 cm,四周及底部布置2 cm厚泡沫层,以消减边界效应。

为测试加载设备的精确性,图3给出了一组输入荷载与输出荷载对比图。如图3所示,输入荷载与输出荷载波形基本一致。

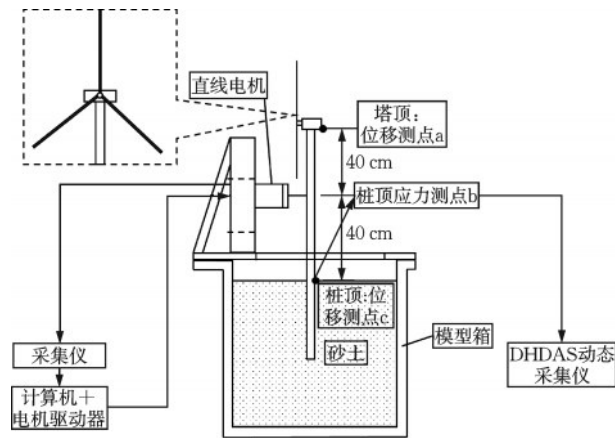


图1 试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of test system

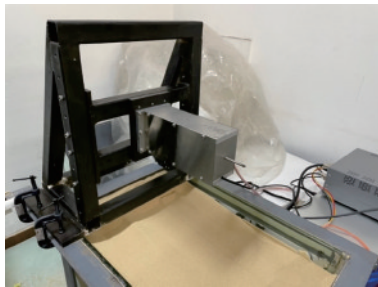


图2 直线电机激振器加载

Fig.2 Linear motor exciter loading

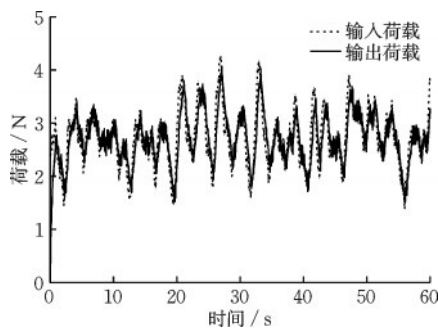


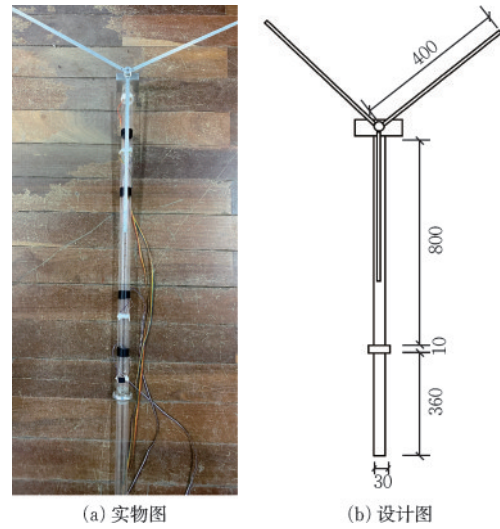
图3 输入与输出荷载对比

Fig.3 Comparison of input and output loading

1.2 风机缩尺模型和地基土制备

试验采用NREL-5MW标准大直径单桩基础海上风机^[15]的几何缩尺模型,几何比尺 n 为1:100,实物如图4所示。模型的主体采用PC材料(聚碳酸酯)制成,具体参数汇总见表1。叶片、轮毂和机舱采用铝合金材料制成。其中,叶片简化为长方形铝

合金片,长度为40 cm,宽度和厚度分别为1 cm和0.1 cm;轮毂和机舱简化为集中质量块。荷载加载点位于塔筒顶部以下40 cm处。



(a) 实物图

(b) 设计图

图4 风机缩尺模型

Fig.4 Scale model of wind turbine

表1 塔筒和桩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of towers and monopiles

结构	长度/m	直径/ m	壁厚/ m	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松 比
塔筒	0.8	0.03	0.001	1 200	2	0.39
桩	0.36	0.03	0.001	1 200	2	0.39

试验采用日本丰浦砂,平均粒径 $d_{50}=0.16$ mm,颗粒比重 $G_s=2.645$,不均匀系数 $C_u=1.6$,最大孔隙比 $e_{\max}=0.916$,最小孔隙比 $e_{\min}=0.609$ 。地基制备时分层铺设,每10 cm碾压一次,控制砂土密度 $\rho=1\,451$ kg/m^3 ,对应相对密实度 $D_r=31.5\%$ 。砂土泊松比0.25,初始剪切模量采用弯曲元波速试验测定。弯曲元埋深25 cm,依据试验结果,得到模型箱内砂土初始剪切模量和弹性模量分别为13和33 MPa。砂土填筑过程中,先填至模型桩底标高处,随后放置风机模型,再继续填土直至桩顶高度。

1.3 试验安排

极端天气下,当来流平均风速高于风机切出风速25 m/s时,风机处于停机状态。本文开展了不同极端风浪荷载工况下的模型试验,选取轮毂中心处平均风速 $v=25$ m/s、30 m/s、35 m/s、40 m/s,波浪的高度由式(1)确定^[16],对应有效波高 $h=6$ m、9 m、12 m、15 m。为对比研究不同荷载条件对风机动力响应和疲劳损伤的影响,每组工况分别对应单独风

荷载、单独波浪荷载、以及风浪联合荷载,试验分组安排见表2,共分为12组。

有效波高与风速关系式如下:

$$h = \frac{2.06}{g^2} v_{19.5}^2 \quad (1)$$

式中, g 为重力加速度; $v_{19.5}$ 为海面以上19.5 m高度处的平均风速。

表2 试验安排

Table 2 Test arrangement			
工况	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	有效波高/ m	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) + 有效波高/m
1	25	6	25+6
2	30	9	30+9
3	35	12	35+12
4	40	15	40+15

2 风浪荷载计算

风速时程包含平均风速与脉动风速两部分。本文基于指数风剖面计算平均风速^[17],基于脉动风速Kaimal功率谱^[18]结合谐波叠加法计算脉动风速时程。进一步地,叶片上的风荷载采用叶素动量理论计算得到,塔筒上的风荷载采用气动导纳函数修正的准定常方法计算确定。

Kaimal脉动风速功率谱的计算式为:

$$\frac{nS_u}{\sigma_u^2} = \frac{21.6f}{(1+33f)^{5/3}} \quad (2)$$

式中, S_u 为高度 z 处的脉动风速谱密度; σ_u 为脉动风速标准差; $f=nz/v(z)$ 为规范化频率, n 为频率, $v(z)$ 为高度 z 处的平均风速。

波浪荷载的计算是基于L.E.Borgman^[19]将线性化的Morison方程与谱分析相结合,建立波高谱与波力谱的联系。波高谱采用参数形式较少的Pierson-Moscowitz谱^[20]。基于波高谱的功率谱密度函数与波浪力的自相关函数,得到波浪力的功率谱密度函数,根据文献[20]所提出由随机过程的谱表示法来模拟波浪力时程,实现随机波浪力连续场的降维模拟。

Pierson-Moscowitz谱表达式如下:

$$S_\eta(\omega) = \frac{\mu g^2}{\omega^5} \exp\left[-\beta\left(\frac{g}{v_{19.5}\omega}\right)^4\right] \quad (3)$$

式中, $S_\eta(\omega)$ 为能量频谱, ω 为角频率; $\mu=0.0081$; $\beta=0.74$ 。

如图5(a)所示,风机所承受的荷载包含等效叶片风荷载 P_1 、等效塔筒风荷载 P_2 和等效波浪荷载 P_3 。

由于试验条件受限,直线电机激振器仅有1台。因此,开展风浪联合加载试验前,需再次对所用荷载进行等效。等效计算如图5(b)所示,其中 y 为地基表面至加载点距离, P 为等效风浪联合荷载水平^[11]。

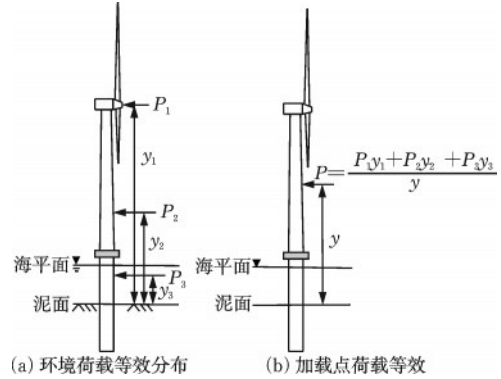


图5 荷载等效

Fig.5 Load equivalence

图6给出了不同工况下的模型试验输入荷载时程曲线。对应频谱曲线如图7所示。可以看到,荷

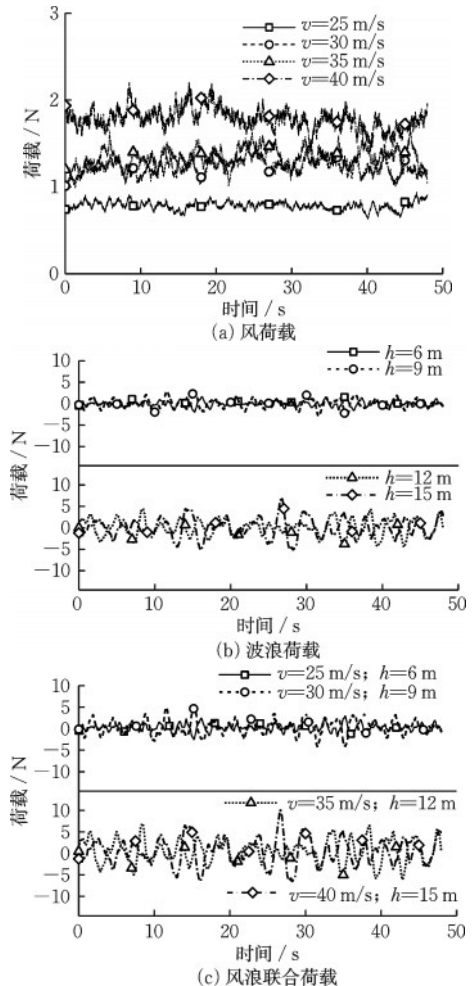


图6 试验输入荷载时程曲线

Fig.6 Time history curves of test input loading

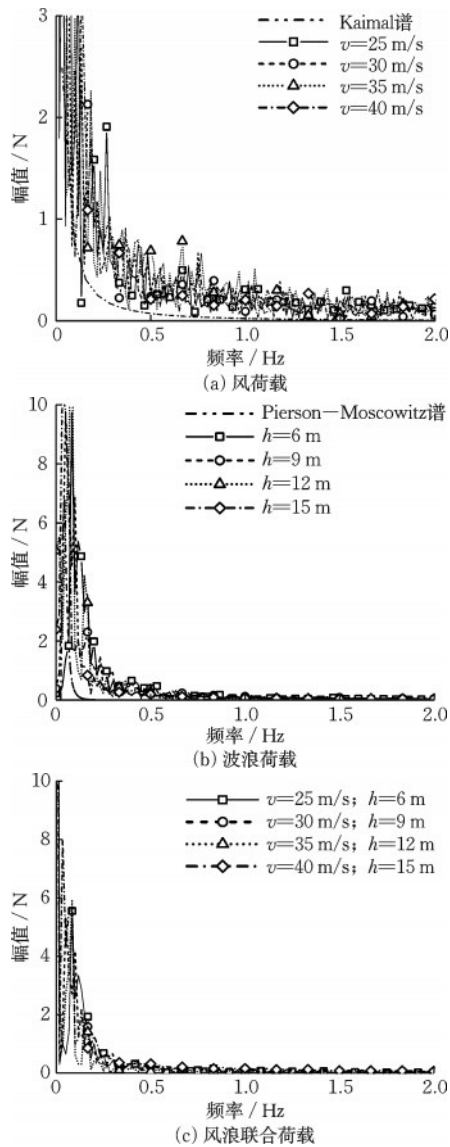


图7 试验输入荷载频谱

Fig. 7 Spectra of test input loading

载谱和目标谱吻合良好。风荷载的主要能量频段为0.25 Hz以下的低频；波浪荷载的主要能量频段在0.1 Hz附近，与波浪谱峰周期相对应；风浪联合等效荷载主要能量频段为0~0.1 Hz，且幅值随着风速和波高的增加而增大。

3 位移响应分析

3.1 单独风荷载

图8给出了单独风荷载作用下塔筒顶部和单桩顶部位移响应时程曲线。如图所示，极端天气条件下，塔顶位移远大于桩顶位移。塔顶和桩顶位移均为正值，与风载方向一致，且随着风速增大呈非线性趋势显著增加。图9为相应位移频数统计分布。

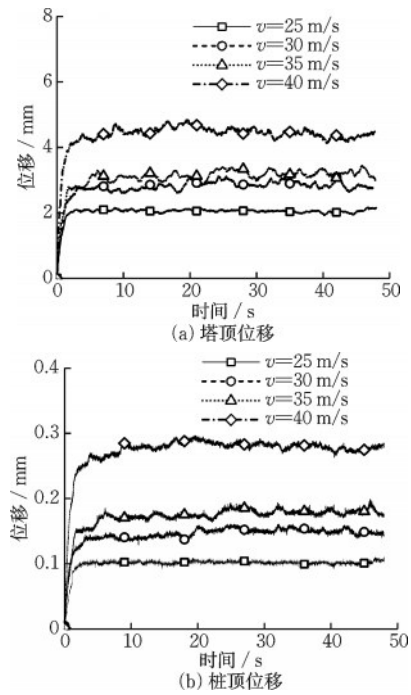


图8 风荷载作用下风机位移时程曲线

Fig.8 Time history curves of wind turbine displacement under wind loading

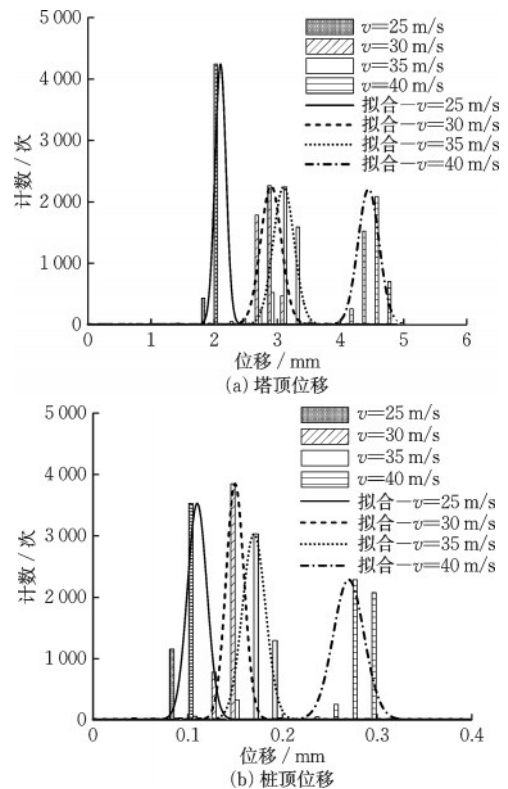


图9 风荷载作用下风机位移统计

Fig.9 Statistics of wind turbine displacement under wind loading

在平均风速 $v=25, 30, 35, 40$ m/s 条件下，塔顶位移标准差分别为0.178、0.296、0.330、0.400 mm。

3.2 单独波浪荷载

图 10 为单独波浪荷载作用下塔筒顶部和单桩顶部位移响应时程曲线。如图所示,与波浪荷载作用方向相同,塔顶和桩顶的位移均在零值上下震荡,非单一方向。同时,随着波高增加,风机位移呈非线性趋势显著增加。图 11 为相应位移频数统计分布图。随着波高增加,风机位移最高频次逐渐减少,而位移震荡幅度显著增加。在波高 $h=6、9、12、15$ m 条件下,塔顶位移标准差分别为 0.460、1.031、2.530、3.319 mm。综合图 6、9 和 11 可以看到,风机位移震荡幅度和荷载变化规律相一致。风浪荷载随着风速或波高增加呈非线性趋势显著增加,且其脉动性随之增加。相应地,风机位移震荡幅度随风浪荷载或波浪荷载的增加而逐渐增加。此外,波浪荷载引起的风机位移振荡幅度远大于风荷载。

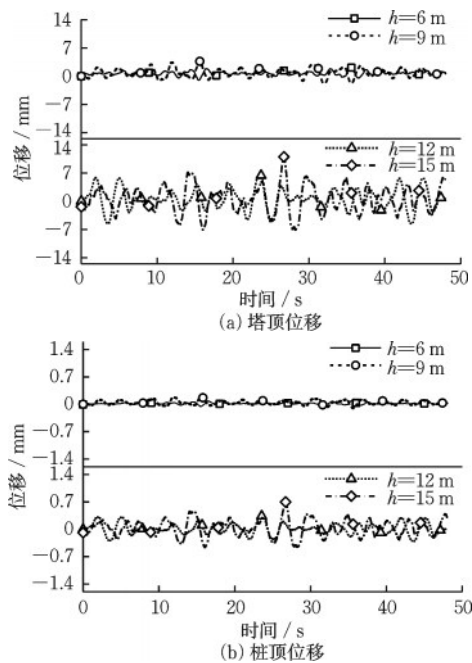


图 10 波浪荷载作用下风机位移时程曲线

Fig.10 Time history curves of wind turbine displacement under wave loading

3.3 风浪联合荷载

图 12 为风浪联合荷载作用下塔筒顶部和单桩顶部位移响应时程曲线。图 13 为相应位移频数统计分布图。在四组风浪联合荷载工况下,塔顶位移标准差分别为 0.657、1.672、3.219、3.621 mm,与单独波浪荷载引起的风机位移振荡幅度相近。

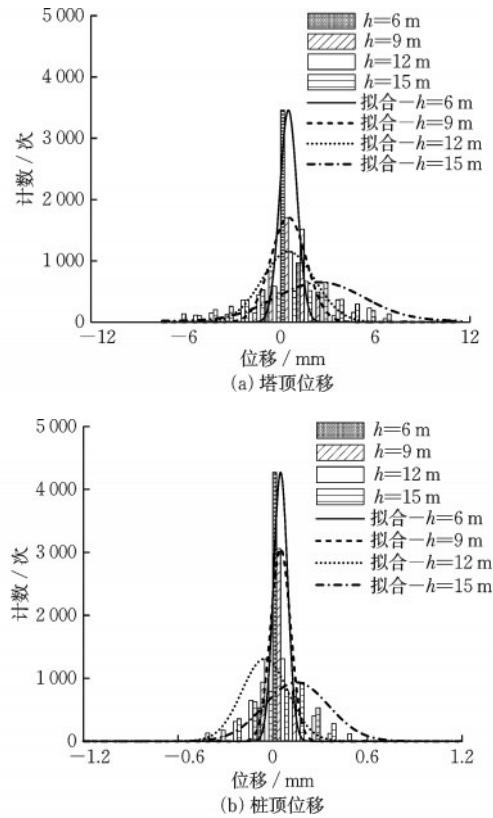


图 11 波浪荷载作用下风机位移统计

Fig.11 Statistics of wind turbine displacement under wave loading

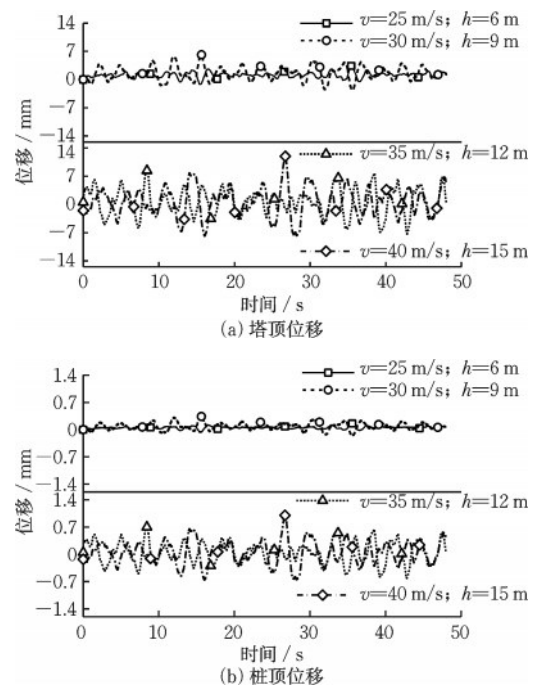


图 12 风浪联合荷载作用下风机位移时程曲线

Fig.12 Time history curves of wind turbine displacement under combined wind-wave loading

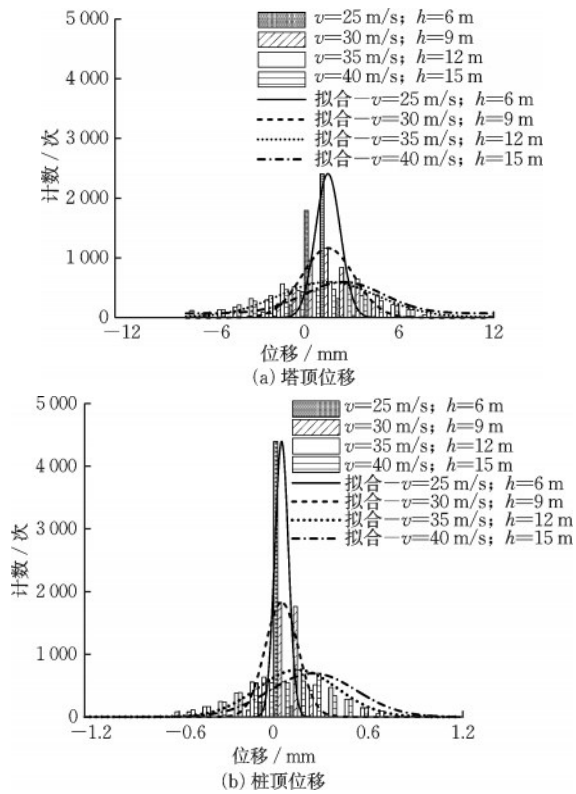


图 13 风浪联合荷载作用下风机位移统计
Fig.13 Statistics of wind turbine displacement under combined wind-wave loading

图 14 对比了不同荷载条件下塔顶位移极值。随着风速或波高增加,塔顶位移极值均呈非线性趋势显著增加。此外,对单独风荷载和单独波浪荷载引起的位移极值进行线性叠加,其结果大于风浪联合荷载条件下结构的耦合动力响应。在四种工况下,线性叠加分别偏高 27%、9%、20%、32%。这是由于风荷载和波浪荷载并非同相位,且土体和风机结构阻尼随着作用荷载增加呈现非线性趋势逐渐

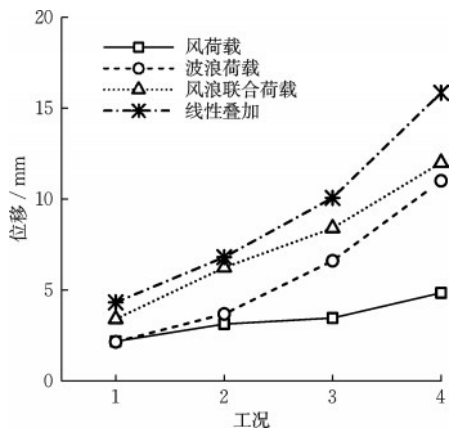


图 14 不同荷载条件下塔顶位移极值对比
Fig.14 Comparison of displacement extremes of tower top under different loading conditions

增加。在实际工程中,对风机系统动力响应分析直接采用位移极值线性叠加的计算方法,会使得设计偏于保守。

4 应力响应及疲劳分析

极端风浪荷载作用下,风机结构会承受高幅度循环往复振动,从而加速疲劳破坏的发生。将加载时间由 50 s 延长至 120 s,图 15 给出了不同荷载条件下上部塔筒结构和桩基连接处的应力时程曲线。由图可见,连接处应力随着荷载水平增加而逐渐增加。此外,需要注意,风速为 30 m/s 和 40 m/s 时单独风荷载作用下测点应力变化规律与风荷载图存在明显差异。这一现象发生,可能是测点应力随荷载变化的呈现非线性关系,也不排除是风机模型

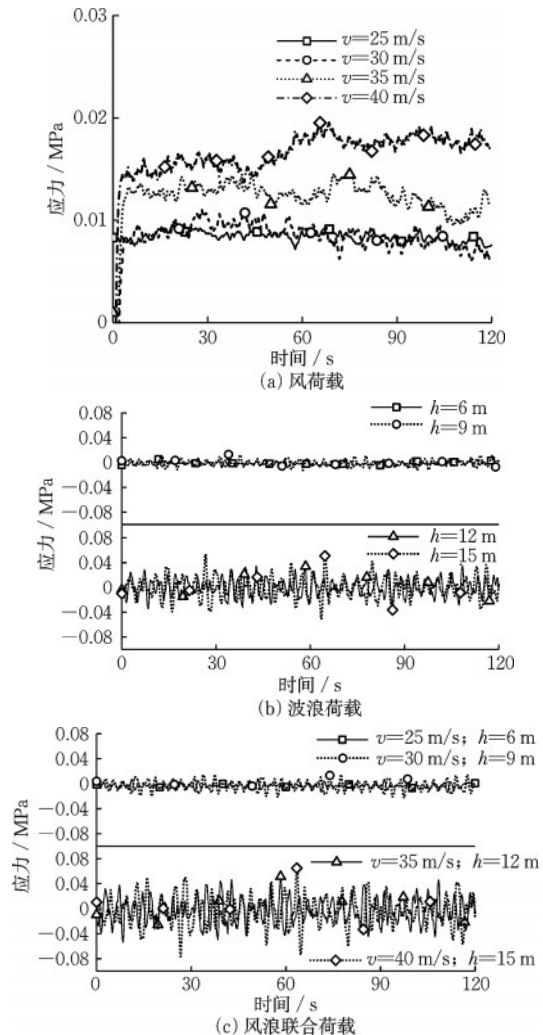


图 15 上部结构和桩基连接处应力响应测量值
Fig.15 Measured stress responses at connection between superstructure and monopile foundation

塔筒底部细微裂缝导致。

基于应力时程曲线,采用雨流计数法统计应力幅值和对应的循环次数,随后进行平均应力修正,借助合适的S-N材料曲线^[21]与Miner线性疲劳累积损伤理论进行疲劳寿命分析。其中,S-N曲线描述的是材料的疲劳性质,即在达到强度破坏应力之前,在该应力循环下,结构所能承受的最大循环次数。根据线性损伤累积理论,结构经受 N_a 次循环的损伤值 $D=N_a/N$,当 $D=1$ 表明结构发生疲劳破坏^[22-23]。

图16给出了基于应力试验测量值得到的疲劳损伤值。如图所示,波浪荷载是上部结构和桩基连接处发生疲劳破坏的主要因素。波浪荷载对连接处产生的疲劳损伤明显大于风荷载,且随着波高增大呈非线性趋势显著增加。此外,对单独风荷载和单独波浪荷载导致的风机结构连接处损伤值进行线性叠加(B),明显小于风浪联合荷载作用下结构的耦合损伤值(A)。风浪荷载联合作用时,风荷载的叠加会加剧波浪荷载对上部结构和桩基连接处的疲劳损伤。因此,在实际工程中,对风机结构连接处疲劳破坏分析直接采用损伤值线性叠加的计算方法,会使得设计偏不安全。表3给出了不同工况下结构连接处损伤值A与B的偏差。可以看到,其偏差范围在39%~68%变化。

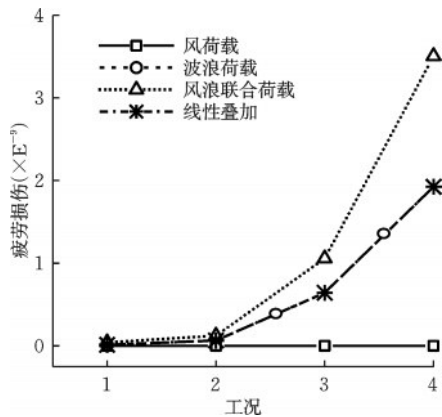


图16 不同荷载条件下连接处疲劳损伤对比

Fig.16 Comparison of fatigue damage at connection under different loading conditions

表3 疲劳损伤偏差

Table 3 Deviation of fatigue damage

工况	(A-B)/A/%
1	68
2	47
3	39
4	45

5 结论

开展了一系列砂土中大直径单桩基础海上风机在极端风浪荷载条件下的动力响应模型试验。所得结论如下:

(1)极端风浪荷载条件下,风机位移和振荡幅度随荷载增加呈非线性趋势显著增加。由于风机上部自由结构高耸,塔顶位移远大于桩顶位移。

(2)单独风荷载和单独波浪荷载引起的位移极值进行线性叠加,其结果大于风浪联合荷载条件下结构的耦合动力响应。在实际工程中,对风机系统动力响应分析直接采用位移极值线性叠加的计算方法,会使得设计偏于保守。

(3)波浪荷载是造成风机上部塔筒结构和桩基连接处疲劳破坏的主要因素。波浪荷载对结构连接处产生的疲劳损伤明显大于风荷载,且随着波高增大呈非线性趋势显著增加。

(4)单独风荷载和单独波浪荷载造成的风机上部结构和桩基连接处损伤值线性叠加,明显小于风浪联合荷载作用下结构的耦合损伤值。在实际工程中,对风机结构连接处疲劳破坏分析直接采用损伤值线性叠加的计算方法,会使得设计偏不安全。

参考文献:

- [1] 戴朴修,刘开富,谢新宇,等.软基中多向受荷大直径单桩桩土相互作用试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2024,58(3):570-578.
Dai P X, Liu K F, Xie X Y, et al. Experimental investigation on pile-soil interaction of monopile under multi-directional load in soft foundation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(3): 570-578. (in Chinese)
- [2] 郑洁,杨淑涵,柳存根,等.海洋可再生能源装备技术发展研究[J].中国工程科学,2023,25(3):22-32.
Zheng J, Yang S H, Liu C G, et al. Development of marine renewable energy equipment and technologies [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 22-32. (in Chinese)
- [3] 于锋,张陈蓉,黄茂松.冲刷作用下两种不同直径的单桩基础循环加载特性[J].防灾减灾工程学报,2020,40(4):623-632.
Yu F, Zhang C R, Huang M S. Comparison of cyclic loading behavior of two piles with different diameters

- under scouring[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 623-632. (in Chinese)
- [4] 张陈蓉, 朱治齐, 于锋, 等. 砂土中大直径单桩的长期水平循环加载累积变形[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1076-1084.
Zhang C R, Zhu Z Q, Yu F, et al. Accumulative displacement of long-term cyclic laterally loaded monopiles with large diameter sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1076-1084. (in Chinese)
- [5] 靳军伟, 杨敏, 王伟, 等. 海上风电机组基础浪致疲劳分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(5): 74-78, 83.
Jin J W, Yang M, Wang W, et al. Analysis on wave-induced fatigue of offshore wind turbine foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(5): 74-78, 83. (in Chinese)
- [6] 王立忠, 洪义, 高洋洋, 等. 近海风电结构台风环境动力灾变与控制[J]. 力学学报, 2023, 55(3): 567-587.
Wang L Z, Hong Y, Gao Y Y, et al. Dynamic catastrophe and control of offshore wind power structures in typhoon environment[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(3): 567-587. (in Chinese)
- [7] Huan C Y, Lu D Z, Zhao S X, et al. Experimental study of ultra-large jacket offshore wind turbine under different operational states based on joint aero-hydro-structural elastic similarities[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 915591.
- [8] Xiong G, Lu D Z, Pan Z X, et al. Experimental study of dynamic characteristics of an ultra-large jacket offshore wind turbine under wind and wave loads using aero-hydro-structural elastic similarities[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 10: 992854.
- [9] Lin K, Xiao S H, Zhou A N, et al. Experimental study on long-term performance of monopile-supported wind turbines (MWTs) in sand by using wind tunnel[J]. Renewable Energy, 2020, 159: 1199-1214.
- [10] 刘梅梅, 包胜利, 于通顺, 等. 海上风电复合筒基波浪荷载试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(9): 182-189.
Liu M M, Bao S L, Yu T S, et al. Experimental investigation of wave loads on the novel composite bucket foundation of offshore wind turbine[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(9): 182-189. (in Chinese)
- [11] Lombardi D, Bhattacharya S, Wood D M. Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 49: 165-180.
- [12] Liang R, Yuan Y, Fu D F, et al. Cyclic response of monopile-supported offshore wind turbines under wind and wave loading in sand[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2021, 39(10): 1230-1243.
- [13] 王文华, 李昕, 孔宪京. 地震作用下固定式海上风机动力模型试验及耦合数值研究[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60(5): 513-529.
Wang W H, Li X, Kong X J. Dynamic model test and coupled numerical analysis of bottom fixed offshore wind turbines under earthquakes[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2020, 60(5): 513-529. (in Chinese)
- [14] 杜越明, 孔德琼, 王思刘, 等. 海上风机导管架基础疲劳分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3639-3652.
Du Y M, Kong D Q, Wang S L, et al. Fatigue analysis of jacket foundations for offshore wind turbines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3639-3652. (in Chinese)
- [15] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Golden, CO (United States): National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2009.
- [16] 刘德顺, 刘子其, 戴巨川, 等. 海上漂浮式风电机组风荷载计算与分析[J]. 中国机械工程, 2016, 27(1): 32-40, 45.
Liu D S, Liu Z Q, Dai J C, et al. Calculation and analysis of wind and wave loads of offshore floating wind turbines[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(1): 32-40, 45. (in Chinese)
- [17] 李万润, 范科友, 杜永峰. 基于最不利塔顶位移相图法的风电塔筒动力屈曲研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(23): 8-20.
Li W R, Fan K Y, Du Y F. Dynamic buckling of wind turbine tower based on most unfavorable tower top displacement phase diagram method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(23): 8-20. (in Chinese)
- [18] Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98(417): 563-589.
- [19] Borgman L E. Spectral analysis of ocean wave forces on piling[J]. Journal of the Waterways and Harbors Division, 1967, 93(2): 129-156.

(本文编辑:周小潭)

(下转第 795 页)