

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240228001

考虑SSI效应的吹填岛礁场地风机地震 响应研究*

蒲武川^{1,2}, 田永强^{1,2}, 朱泽奇³

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学海南研究院, 海南 三亚 572000; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 吹填珊瑚岛礁是我国南海疆域的重要陆地屏障, 风机作为岛礁场地的供电设施, 确保其地震安全性具有十分重要的意义。珊瑚砂的力学性质与一般陆相沉积物有明显区别, 珊瑚砂土与风机结构的相互作用是影响风机结构地震响应的潜在因素之一, 但目前还缺乏相关研究。本文采用Matasovic本构模型开发珊瑚砂的动力非线性本构, 建立局部成层的三维吹填岛礁场地和NREL 5MW风机的非线性地震反应分析模型, 设计刚性基础风机模型和考虑土-结构相互作用(Soil-Structure-Interaction, SSI)的风机-基础-地基整体模型, 按持续时间和卓越频率选取四条代表性地震动, 基于有限元模型对比分析不同地震动作用下风机的动力响应。计算分析表明: 包含显著高频分量的地震动引起的吹填岛礁自由场的加速度响应更为显著, 短持时的近断层地震动水平加速度放大系数平均为3.8, 长持时的远断层地震动的平均放大系数为1.7; 珊瑚岛礁和风机基础之间的SSI效应会增大风机的动力响应, 在设防地震作用下, 考虑SSI效应的塔筒位移最大增加0.24倍, 应力增大0.87倍, 剪力增大1.54倍, 弯矩增大0.45倍, 轴力增大0.23倍。吹填岛礁场地的风机地震响应分析应考虑SSI效应, 以实现更可靠的抗震性能评估。

关键词: 珊瑚砂; 吹填岛礁; 风机; 土-结构相互作用; 场地地震效应

中图分类号: TU39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0754-11

Seismic Response of Wind Turbines on Hydraulically Reclaimed Island Sites Considering SSI Effect

PU Wuchuan^{1,2}, TIAN Yongqiang^{1,2}, ZHU Zeqi³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hainan institute, Wuhan University of Technology, Sanya 572000, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Hydraulically reclaimed coral islands are important land barriers in China's South China Sea territory. As wind turbines are essential power supply infrastructure on these islands, ensuring their seismic safety is of great significance. The mechanical properties of coral sand are significantly different from those of common terrestrial sediments. The interaction between coral sand and wind turbine structures is a potential factor influencing their seismic response, yet it remains insufficiently studied. This study used the Matasovic constitutive model to develop the dynamic nonlinear constitutive relationship of coral sand. A locally layered three-dimensional hydraulically reclaimed island site and an

* 收稿日期: 2024-02-28; 修回日期: 2024-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178504)资助

作者简介: 蒲武川(1980—), 男, 教授, 博士。主要从事结构抗震与控制研究。E-mail: puwuchuan@whut.edu.cn

NREL 5MW wind turbine were established, and a rigid foundation wind turbine model and an integrated wind turbine-foundation-subsoil model considering soil-structure interaction were designed. Four representative ground motions were selected based on duration and dominant frequency, and the dynamic responses of the wind turbine were comparatively analyzed under different ground motions using the finite element model. The calculation analysis showed that seismic motions with significant high-frequency components induced more pronounced acceleration responses in the free field of the hydraulically reclaimed islands. The average horizontal acceleration amplification factor was 3.8 for short-duration near-fault ground motions and 1.7 for long-duration far-fault ground motions. The SSI effect between the coral islands and the wind turbine foundation increased the dynamic response of the wind turbine. Under design-level earthquakes, considering the SSI effect, the maximum increases in tower displacement, stress, shear force, bending moment, and axial force were 0.24, 0.87, 1.54, 0.45, and 0.23 times, respectively. The seismic response analysis of wind turbines on hydraulically reclaimed island sites should consider the SSI effect to achieve more reliable evaluation of seismic performance.

Keywords: coral sand; hydraulically reclaimed island; wind turbine; soil-structure interaction; site seismic effect

0 引言

在海洋强国战略下,我国南海海域的安全与经济战略地位越来越突出。南海人工岛礁建设主要利用珊瑚砂吹填,珊瑚砂具有多孔隙、棱角度高、易破碎、易胶结等特点,力学性质不同于一般陆相沉积物^[1-3]。南海位于环太平洋地震带和大巽他群岛等强震区,历史上海洋岛屿多次发生7级以上的地震^[4],岛礁及岛上建筑均发生严重破坏。岛礁区域的地震风险高,岛上建筑建设及维护难度大,确保岛礁及岛上工程的地震安全性极为重要。

针对珊瑚岛礁场地地震响应和珊瑚砂土力学特征,已有不少学者开展了相关研究。崔永圣^[5]根据南海岛礁现场勘察资料,总结了珊瑚岛礁的形成过程和地貌特征。陈国兴等^[6]开展了16组饱和珊瑚砂动三轴试验,发现修正Matasovic本构能较好模拟珊瑚砂的动剪切模量的衰减和阻尼比的增长特性,并给出了相应的模型参数。梁珂等^[1]分析了围压和相对密度对饱和珊瑚砂和阻尼比特性的影响。宋可^[7]研究了深海岛礁场地灯塔的动力响应。张巍等^[8]基于南海岛礁建立了海水-岛礁-地震耦合模型,研究了场地地震反应规律。X. Bao等^[9]考虑珊瑚砂非线性,基于人工边界子结构的地震输入波动方法,研究了三维岛礁场地的地震反应。卫仁杰等^[10]为解决南海岛礁加固材料难以获取的问题,提出一种可利用吹填珊瑚砂制得的加固材料。这些

研究揭示了珊瑚砂土及珊瑚岛礁的关键力学性质,为岛礁工程结构抗震性能分析提供了基础。

风力发电机是吹填岛礁的重要的发电基础设施,通过风能发电为岛上经济生产活动提供能源。风机顶部质量较大,自振频率较低,且土-结构相互作用(Soil-Structure-Interaction, SSI)是风机的地震响应的重要影响因素之一。F. Santangelo等^[11]提出了NREL 5MW陆上风机在地震和风荷载作用下的解耦方法,并采用P-Y弹簧法来考虑SSI效应。戴靠山等^[12]采用有限元中接触模拟方法来研究风机的SSI效应,其模型中叶片和机舱均简化为偏心质量点。H. R. Zuo等^[13]使用有限元模拟研究5 MW风机在SSI效应下的风浪联合作用分析,采用P-Y弹簧法模拟SSI效应。G. W. Cao等^[14]对比了P-Y弹簧法和土体单元法的条件下海上风机的动力响应,结果表明P-Y法会高估风机塔顶的顶部位移,土体单元法能模拟大直径桩和土体的相互作用,更真实的反映风机的动力响应。霍涛^[15]采用弹簧-阻尼模型考虑SSI效应,分析了长周期地面运动对风机动力响应的影响。李万润等^[16]采用土体单元法模拟SSI效应,发现SSI效应会降低风机自振频率,并增大风机的动力响应。杜鹃等^[17]考虑SSI效应后,发现地震作用下风机塔顶的频率变化复杂,高阶模态更加显著。

既有研究中风机的土-结构相互作用多采用简化弹簧模型,该模型难以模拟动力响应中土体和桩体间的脱开和滑移现象,因此不能完全反映土体与结构间相互作用和土体性质的影响^[18-19]。Win-

kler地基模型局限于土与结构的接触部分,无法考虑地震波在不同土层中传播时的波形变化。目前代表性的风机计算软件FAST^[20]适用于弹性动力分析,难以考虑SSI作用和系统的非线性响应。鉴于此,本文利用ABAQUS有限元软件,以珊瑚岛礁场地的NREL 5MW陆上风机为对象,建立“叶片-机舱-塔筒-基础-土体”一体化的有限元模型,采用接触模型模拟吹填岛礁场地和风机的相互作用,考虑不同类型的地震动激励,通过数值分析揭示SSI效应对珊瑚岛礁场地风机地震响应的影响规律。

1 珊瑚砂土的本构模型

结合地质调查研究资料^[6, 21],可知人工吹填岛礁场地由振冲加固珊瑚砂和礁灰岩组成,因此,本文建立局部成层的吹填岛礁场地模型,其中珊瑚砂非线性动力本构是准确模拟吹填岛礁地震响应的关键。

修正的Matasovic本构可以模拟珊瑚砂的动剪切模量的衰减和阻尼比的增长特性,Matasovic的骨架曲线表达式为:

$$\tau_s(\gamma) = \frac{G_{\max}\gamma}{1 + \beta\left(\frac{\gamma}{\gamma^*}\right)^s} \quad (1)$$

式中, τ_s 和 γ 分别为骨架曲线的剪应力和剪应变; G_{\max} 为初始剪切模量; γ^* 为参考剪应变; β 和 s 分别是无量纲的拟合参数。对式(1)求微分,得到骨架曲线的时变切线剪切模量为:

$$G_s(\gamma) = G_{\max} \frac{1 + \beta(1-s)\left(\frac{\gamma}{\gamma^*}\right)^s}{\left[1 + \beta\left(\frac{\gamma}{\gamma^*}\right)^s\right]^2} \quad (2)$$

Matasovic本构模型的滞回曲线采用Masing准则的2倍法构造,即:

$$\tau_m(\gamma, \gamma_c) = \tau_c + \frac{G_{\max}(\gamma - \gamma_c)}{1 + \beta\left(\frac{\gamma - \gamma_c}{2\gamma^*}\right)^s} \quad (3)$$

式中, τ_m 为基于Masing准则的滞回曲线剪应力; τ_c 和 γ_c 分别为转折点的剪应力和剪应变。对式(3)中的 $(\gamma - \gamma_c)$ 求导可得到滞回曲线的时变切线剪切模量:

$$G_m(\gamma, \gamma_c) = G_{\max} \frac{1 + \beta(1-s)\left(\frac{|\gamma - \gamma_c|}{2\gamma^*}\right)^s}{\left[1 + \beta\left(\frac{|\gamma - \gamma_c|}{2\gamma^*}\right)^s\right]^2} \quad (4)$$

采用基于Masing准则的不规则循环荷载下的加卸载准则^[22]来描述土体在往复荷载下的加卸载行为,如图1所示,修正后的路径即为0→1→2→3→4→5→6→7→8→9,避免了高应力状态。

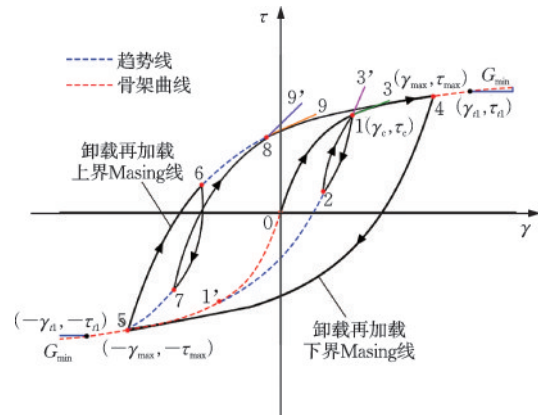


图1 不规则加卸载准则示意

Fig.1 Schematic diagram of irregular loading and unloading criteria

参照庄海洋等^[23]的处理方法,利用八面体剪应变 γ_{oct} 将三维应力-应变关系映射至一维空间,从而确定当前时刻的切线剪切模量:

$$\gamma_{\text{eq}}^{t+\Delta t} = \gamma_{\text{eq}}^t + \text{sign} \cdot |\Delta\gamma_{\text{oct}}^{t+\Delta t}| \quad (5)$$

式中, γ_{eq} 为等效剪应变; $\Delta\gamma_{\text{oct}}$ 为八面体剪应变增量,加载时, $\text{sign}=1$,卸载时, $\text{sign}=-1$ 。

由式(3)和式(4)可知,计算 $t+\Delta t$ 时刻的切线剪切模量只需得到当前时刻与加卸载转折点处的应变差值 $\gamma^{t+\Delta t} - \gamma_c$,故以转折点为基准,计算增量应变的方法判定加卸载^[22, 24]。记转折点处应变和 t 时刻应变分别为 ϵ_{ij}^c 和 ϵ_{ij}^t ,则以转折点为基准的增量应变为:

$$\epsilon_{ij}^{\text{inc},t} = \epsilon_{ij}^t - \epsilon_{ij}^c \quad (6)$$

同理,计算 $t+\Delta t$ 时刻增量应变为:

$$\epsilon_{ij}^{\text{inc},t+\Delta t} = \epsilon_{ij}^{t+\Delta t} - \epsilon_{ij}^c \quad (7)$$

利用 t 时刻和 $t+\Delta t$ 时刻的增量应变计算八面体剪应变 γ_{oct}^t 和 $\gamma_{\text{oct}}^{t+\Delta t}$:

$$\Delta\gamma_{\text{oct}}^{t+\Delta t} = \gamma_{\text{oct}}^{t+\Delta t}(\epsilon_{ij}^{\text{inc},t+\Delta t}) - \gamma_{\text{oct}}^t(\epsilon_{ij}^{\text{inc},t}) \quad (8)$$

当 $\Delta\gamma_{\text{oct}}^{t+\Delta t} > 0$,为加载;当 $\Delta\gamma_{\text{oct}}^{t+\Delta t} < 0$,发生卸载。

通过以上方法,可将岩土介质的三维应力—应变关系映射至一维空间,即可通过修正的Matasovic本构应力—应变关系,得到当前时刻的动剪切模量。基于ABAQUS有限元分析软件,通过FORTRAN语言编写动力隐式UMAT材料子程序,由

此实现珊瑚砂本构的调用。

本文考虑的吹填岛礁的土层分布和材料参数见表1^[6,21],礁灰岩层的阻尼比取为5%。根据表1的土体参数,得到珊瑚砂的剪切模量与滞回阻尼比随剪应变的变化趋势如图2所示。

表1 吹填岛礁场地材料参数

Table 1 Material parameters of hydraulically reclaimed island sites

土层名称	厚度/m	剪切波速/(m·s ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	β	S	$\gamma^*(\times 10^4)$
珊瑚砂	5	500	2 000	0.4	1.00	1.15	10.391
礁灰岩1	15	500	2 000	0.4	-	-	-
礁灰岩2	45	1 800	2 400	0.4	-	-	-

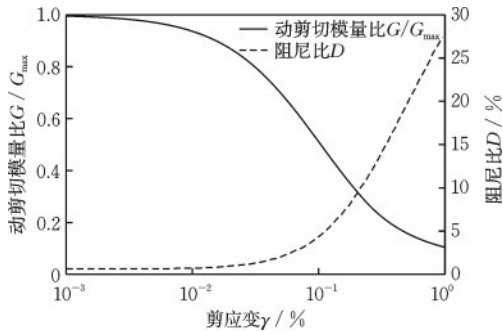


图2 珊瑚砂的 G/G_{max} 和 $D-\gamma$ 曲线

Fig.2 G/G_{max} and $D-\gamma$ curves of coral sand

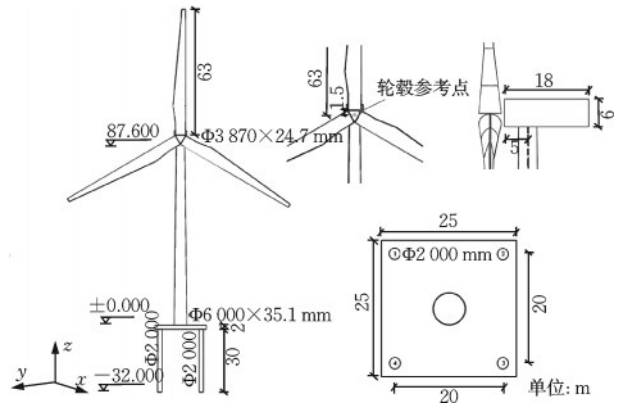


图3 NREL 5 MW 陆地风机结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of NREL 5MW onshore wind turbine structure

2 风机与岛礁场地的有限元模型

2.1 风机模型

本文选用NREL 5MW陆地风机模型,该模型为美国可再生能源试验室^[25]设计和发布的高功率、三叶片和逆风式基准风机模型,广泛用于风机的研究。模型基本参数见表2。风机采用高桩承台混凝土基础^[11],图3给出了风机的详细尺寸。

风机塔筒采用一体化壳单元建模,塔筒厚度沿

表2 NREL 5MW 风机基本参数

Table 2 Basic parameters of NREL 5MW wind turbine

风力发电机基本参数	
类型	水平轴风机
功率	5 MW
叶片直径	126 m
轮毂高程、轮毂直径	90 m, 3 m
轮毂中心外挑长度	5 m
叶轮质量	110 000 kg
机舱质量	240 000 kg
塔筒质量	347 460 kg

高度均匀减小,并对塔筒表面设置自接触^[26],精确模拟塑形铰的形成和发展,单元类型为S4R。叶片采用NREL提供的气动参数,考虑翼型、弦长、扭转角等因素,采用壳单元放样法建模^[13]。机舱采用等效质量法计算密度。通过将叶片和机舱通过轮毂参考点建立运动耦合连接^[14],考虑叶片、轮毂和机舱对风机塔筒动力响应的影响。风机材料参数见表3。

研究表明风机在运行状态时,结构阻尼比为2%~5%,而在受到如地震作用和暴风等极端荷载时,叶片会紧急停机,此时风机的材料阻尼比会比运行时有所降低^[11],本文取风机结构阻尼比为1%。

表3 风机模型的材料参数

Table 3 Material parameters of wind turbine model

部件	材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
叶片	玻璃纤维	1 850	38	0.3
机舱	-	-	210	0.3
塔筒	Q345钢材	8 500	210	0.3
基础	混凝土	2 400	31	0.2

2.2 土—结构相互作用模型

为消除地震波在土体截断边界处产生的反射和折射,土体模型取为圆柱体,直径取为5倍承台长度,为125 m,深度取2倍桩长和承台高度,为65 m。本文中土—结构相互作用模型可假设为一个封闭系统,因此采用振动法输入地震加速度,土体侧边界采用竖向固定边界,仅可发生横向变形,底边界采用固定边界。

在模拟土—结构相互作用时,桩—土接触面处于允许分离的非粘结状态。为了更加准确地模拟桩—土接触作用,在ABAQUS接触面设置主从接触算法,即允许桩—土接触面发生少量相对位移。在承台底面和侧面、桩周与土体之间设置接触,定义法向约束为硬接触,切向为库伦摩擦接触,摩擦系数取为0.3。在地基土沉降固结后,施加地震动。为使接触更易收敛,提高求解速度,加细桩—土接触处的网格,并使网格节点一一对应,建立的有限元模型如图4所示。

2.3 风机模态分析

为了验证有限元模型,基于多体动力学软件FAST^[20]和ABAQUS有限元软件,分别计算结构的振型和固有频率。其中FAST模型仅计算地表以上风机结构的模态,ABAQUS模型分别计算了不考虑SSI和考虑SSI效应的风机模态。表4给出了系统的X和Y向前2阶模态信息,表中 $R_1=(f_i-$

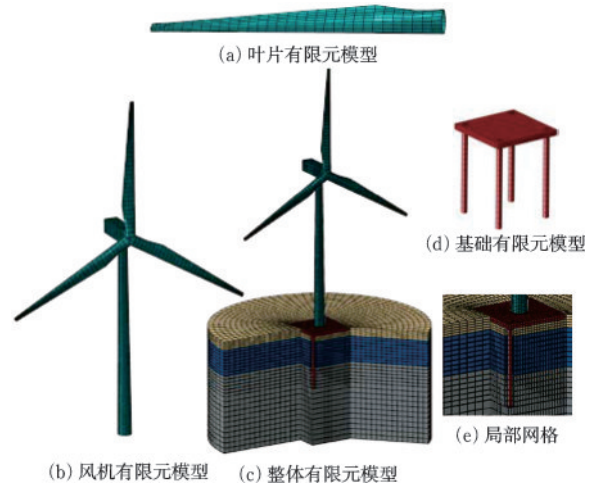


图4 考虑SSI效应的风机有限元模型

Fig.4 Finite element model of wind turbine considering SSI effect

$f_a)/f_a$ 表示两种软件的模态频率的相对差值, $R_2=(f_a-f_s)/f_s$ 表示有无SSI效应的模态频率的相对差值。对不考虑SSI的风机结构,ABAQUS与FAST模型计算结果基本吻合,表明本文采用的风机建模方法以及建立的风机结构数值模型是合理的。

研究表明,风机在地震作用下,多为塔筒的屈服和倒塌所致^[27],选取风机塔筒振动的一、二阶模态与考虑SSI效应后进行对比,可以发现考虑SSI效应后,风机模态频率有所降低。但吹填岛礁场地因其土层剪切波速较大,场地较硬,风机自振频率降低较小,频率降低最高为2.7%。

表4 NREL 5MW 风机的模态分析结果

Table 4 Modal analysis results for NREL 5MW wind turbine

	1阶塔筒前后(x向)	1阶塔筒侧向(y向)	2阶塔筒前后(x向)	2阶塔筒侧向(y向)
未考虑SSI				
考虑SSI				
振动形态	1阶塔筒前后(x向)	1阶塔筒侧向(y向)	2阶塔筒前后(x向)	2阶塔筒侧向(y向)
FAST (f_i /Hz)	0.324	0.312	2.900	2.936
ABAQUS (f_a /Hz)	0.311	0.312	2.994	3.045
相对差值 R_1	5%	0	3.1%	3.6%
SSI (f_s /Hz)	0.305	0.306	2.916	2.975
考虑SSI后 R_2	2%	2%	2.7%	2.3%

3 地震波的选取

假定吹填岛礁场地位于我国的海南省三沙市,根据《建筑抗震设计规范》^[28],该地区抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度为 $0.2g$ 。由于目前还缺乏我国南海海域的强震观测记录^[29-30],从PEER和K-net数据库选择地震动用于分析,取 $0.1g$ 作为界限值计算括号持时,括号持时大于和小于 50 s

别定义为长持时和短持时地震动,主频率大于和小于 1 Hz 分别定义为短周期和长周期地震动,由此确定长周期短持时、长周期长持时、短周期短持时和短周期长持时四类地震动,分别用LPSD、SPSD、SPLD和LPLD表示。选出表5所示四条代表性地震动,将所选地震动的峰值加速度调幅至 $0.2g$,其加速度时程和傅里叶频谱如图5所示。考虑场地珊瑚砂为吹填形成,分析中将所选地震波视为基岩地震动输入系统。

表5 输入地震动

Table 5 Input ground motions

年份	地震/矩震级	台站	括号持时/s	断层距/km	地震动类型
1979	Imperial Valley/6.53	EC County Center FF	18.42	7.31	长周期、短持时(LPSD)
1979	Imperial Valley/6.53	Calexico Fire Station	17.96	10.45	短周期、短持时(SPSD)
2000	Miyakejima, Japan/6.5	KNG201	53.78	85.00	短周期、长持时(SPLD)
2000	Tottori, Japan/6.61	FKO006	90.18	328.88	长周期、长持时(LPLD)

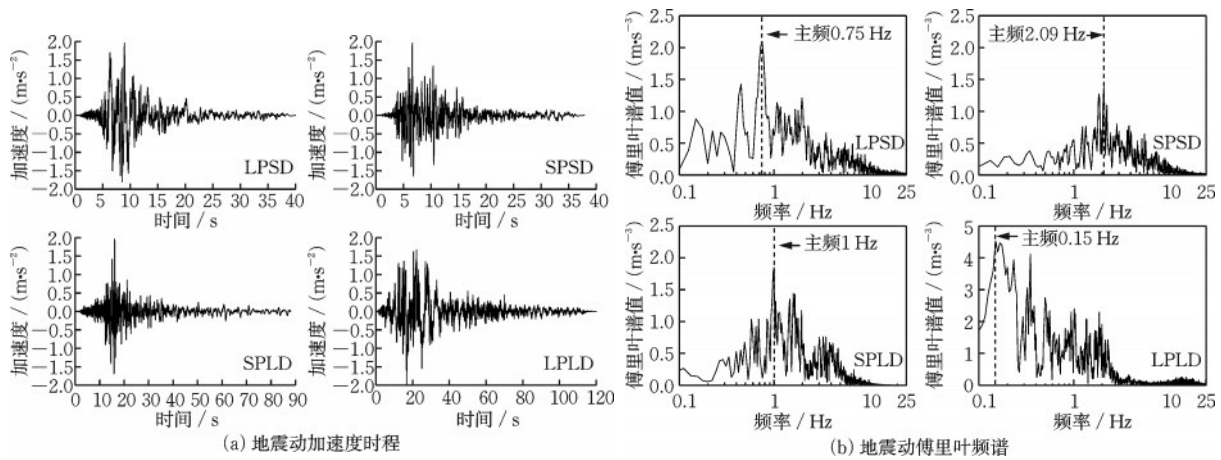


图5 四类地震动的加速度时程和傅里叶频谱

Fig.5 Acceleration time histories and Fourier spectra of four types of ground motions

由表4所示的风机模态分析结果可知,风机塔筒的一阶和二阶自振周期分别是 3.2 s 和 0.33 s (分

别为 X 和 Y 向振型周期的平均值)。图6给出地震动的按周期和按频率表示的加速度反应谱。从图

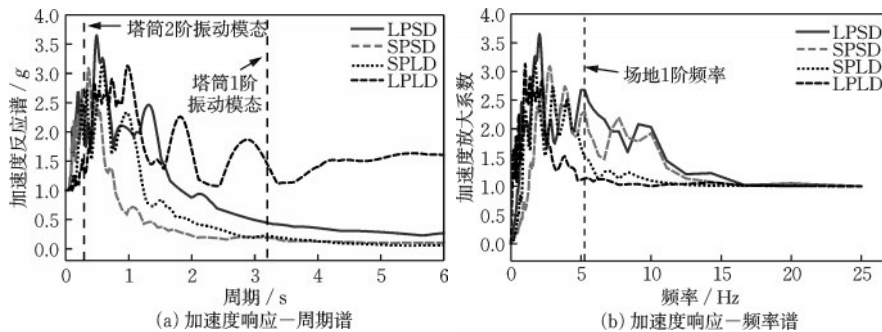


图6 地震动的加速度反应谱

Fig.6 Acceleration response spectra of ground motions

6(a)可以看出,风机一阶模态周期对应的长周期长持时地震动加速度反应谱值较高。

4 考虑SSI效应的风机地震响应分析

为研究吹填岛礁场地及土-结构相互作用对风机地震反应的影响,进行下列两种模型的地震反应计算:(1)采用刚性基础假定,进行风机上部结构的地震响应分析;(2)考虑吹填岛礁场地效应和土-结构动力相互作用,进行吹填岛礁-风机结构系统的地震反应分析。将上述模型分别称为:刚性基础风机模型(模型A)、考虑土-结构相互作用的整体模型(模型B)。

4.1 吹填岛礁自由场地响应

通过模型计算得到吹填岛礁自由场的一阶自振频率为5.26 Hz。将四条地震动输入吹填岛礁场地,得到自由场地的动力响应。图7(a)为吹填岛礁自由场在加速度幅值为0.2g、不同频率的简谐波作用下,自由场在0、2.5、12.5、42.5 m四种深度处的加速度放大系数(峰值加速度比值)。图7(b)为加速度峰值0.2g的四类地震动作用下,岛礁自由场沿深

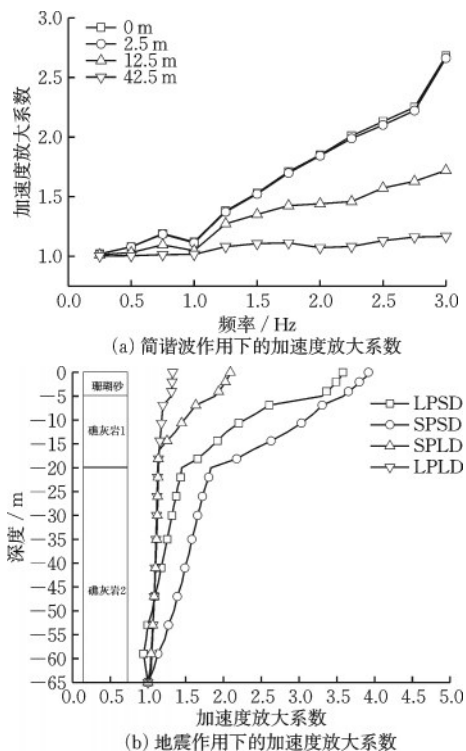


图7 岛礁自由场不同深度处的水平加速度放大系数
Fig.7 Horizontal acceleration amplification factors at different depths in free field of islands

度的水平加速度放大系数。

由图7(a)可知,岛礁场地对基岩加速度具有显著的放大作用,在分析的频率范围内,随着频率增加放大系数越大,上层土体加速度放大系数增长更快。其次,吹填岛礁的一阶固有频率对应的近断层的短持时地震动加速度反应谱值均较高,经岛礁场地传播后,LPSD和SPSSD地震动的地表平均加速度放大系数为3.8;其次SPLD地震动的高频响应也较大,LPLD地震动最小,为1.33。可见,地震波在吹填岛礁场地传播的场地放大效应明显,同时与地震波的频谱和持时特征密切相关。

4.2 风机位移响应

4.2.1 塔顶位移时程

对模型A和模型B进行时程响应分析,得到风机的地震响应。图8为塔筒顶部的X向位移时程。由图8可知,两个模型的振动趋势基本一致,但考虑SSI效应后系统频率降低,模型B的塔顶位移较模型A位移的振动略微滞后,尤其时程中后期更加明显。考虑SSI效应后,塔顶位移峰值不同程度被放大,其中在LPSD地震动作用下,风机塔顶最大位移增幅最大,增加了0.24倍。

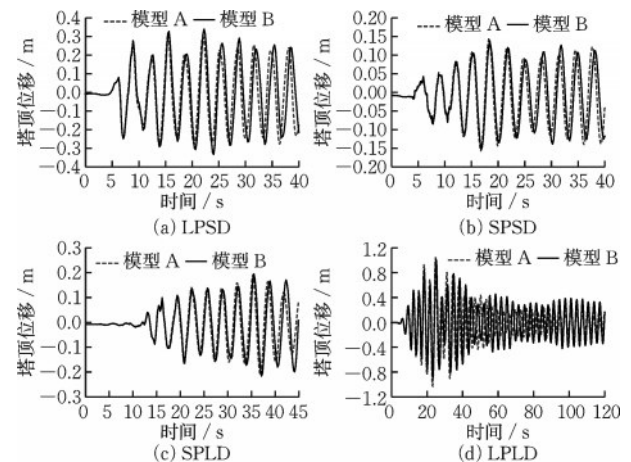


图8 塔顶相对位移时程

Fig.8 Time histories of relative displacement at tower top

4.2.2 塔筒位移包络曲线

图9为风机塔筒的X向相对位移的包络图。对于LPSD地震动,模型B中风机整体的相对位移相对于模型A有明显增加。而对于其他三类地震动,考虑SSI效应没有引起位移包络线的明显变化。说明SSI效应可能引起塔筒整体位移的变化,但增幅受到地震动特征的影响。

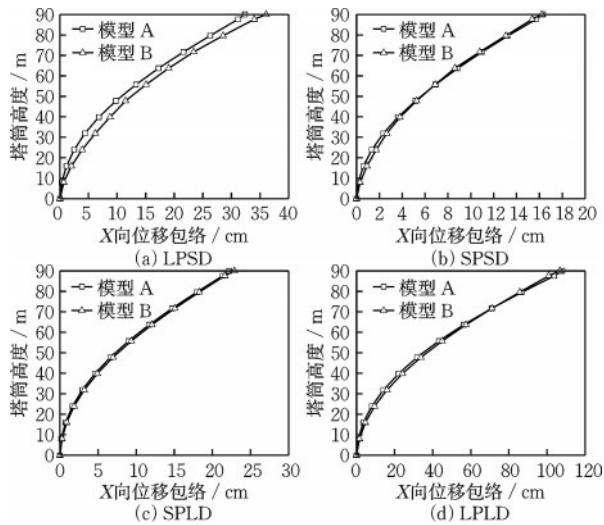


图9 塔身相对位移包络曲线

Fig.9 Envelope curves of relative displacement of tower

4.3 风机加速度响应

图10对比了模型A和模型B的塔顶加速度时程及其傅里叶频谱,结果显示模型B的塔顶加速度

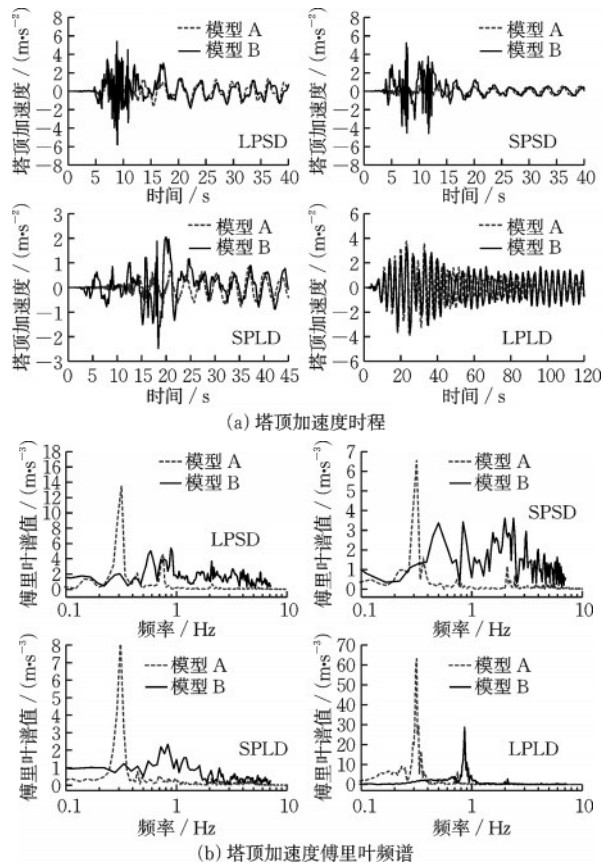


图10 塔顶的加速度时程和傅里叶频谱

Fig.10 Acceleration time histories and Fourier spectra at tower top

峰值更大。4.1节的分析表明,由于场地效应四类地震动在地表处的加速度均有不同程度的放大,其中SPSD地震动的加速度放大了3.92倍。SPSD、LPSD、SPLD地震动均包含大量高频成分,系统高阶振型在振动初期被激励而产生较大加速度。而对于LPLD地震动,考虑SSI效应后,塔顶加速度在振动的中后期得到放大。

4.4 风机应力响应

风机局部应力状态也是结构安全性的重要参考指标。图11和图12分别为模型A和模型B的Mises应力云图。可以发现SSI效应显著改变了塔筒的最大应力及其出现位置,SPSD和SPLD地震动,最大Mises应力位置出现在风机背面。此外,SSI效应改变了最大Mises应力的出现时刻,在SPSD地震动作用下,模型A的最大应力出现在15.68s,模型B最大应力出现在6.80s。考虑SSI效应后,在LPSD、SPSD、SPLD和LPLD地震动作用下,塔筒最大Mises应力分别增大了0.44倍、0.87倍、0.16倍和0.07倍。

图13为塔筒沿高度的Mises应力包络图。LPSD、SPSD和SPLD地震动在经过岛礁场地传播后,高频分量得到放大,塔筒整体Mises应力幅值及分布形式发生了显著改变。LPLD作用下,两个模型的最大应力的分布形式无显著差异。

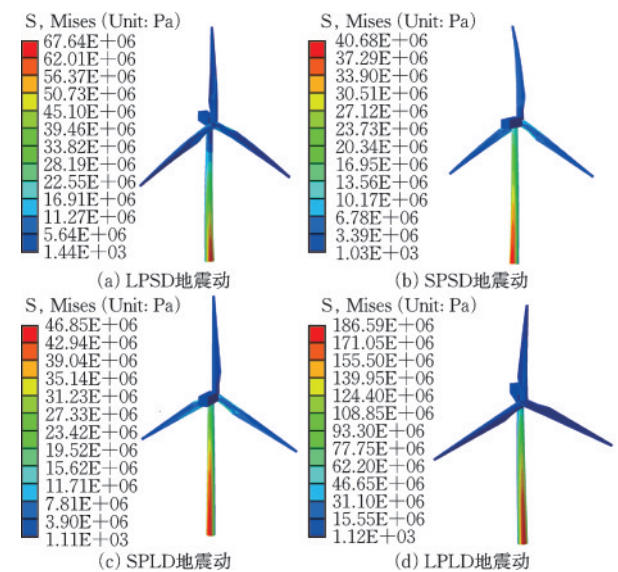


图11 不考虑SSI风机结构最大Mises应力云图

Fig.11 Maximum von Mises stress contour maps of wind turbine structure without considering SSI

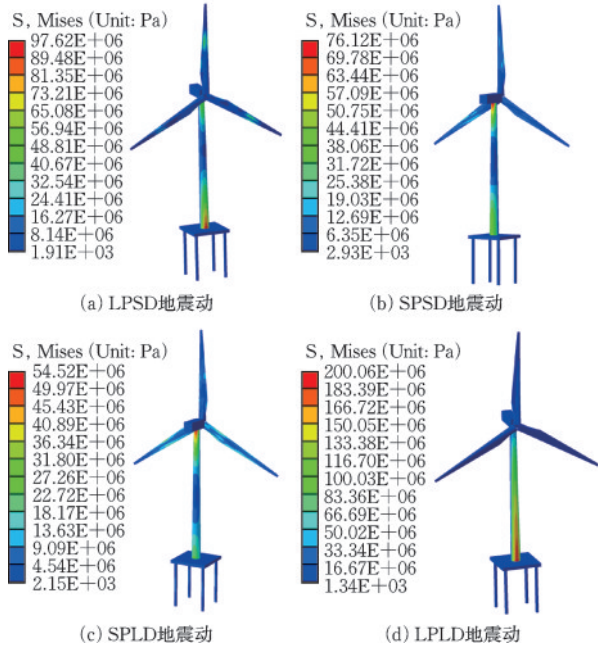


图 12 考虑 SSI 风机结构最大 Mises 应力云图

Fig.12 Maximum von Mises stress contour maps of wind turbine structure considering SSI

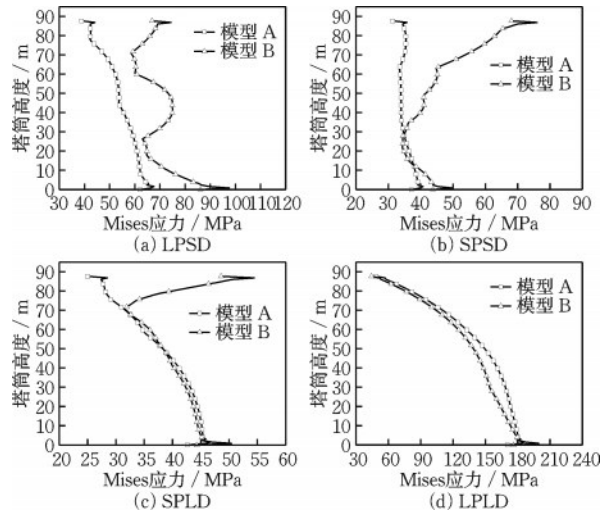


图 13 风机塔筒最大 Mises 应力包络

Fig.13 Envelope curves of maximum von Mises stress in wind turbine tower

4.5 风机内力分布

图 14 给出了风机沿塔高的地震动作用方向的剪力、弯矩和轴力的包络图。可以看出,除了 LPLD 地震动外,其他三条地震动对应的模型 B 的剪力显著增大。

其中,在 LPSD、SPSD、SPLD 和 LPLD 地震动作用下,相对模型 A,模型 B 的塔底 X 向剪力分别增大了 1.5 倍、1.54 倍、0.97 倍和 0.04 倍;塔底 Y 轴弯矩分别增大了 0.45 倍、0.26 倍、-0.02 倍和 -0.02 倍;

塔底轴力分别放大了 0.23 倍、0.18 倍、0.11 倍和 0.02 倍,且剪力、弯矩和轴力的最大值均出现在塔底。

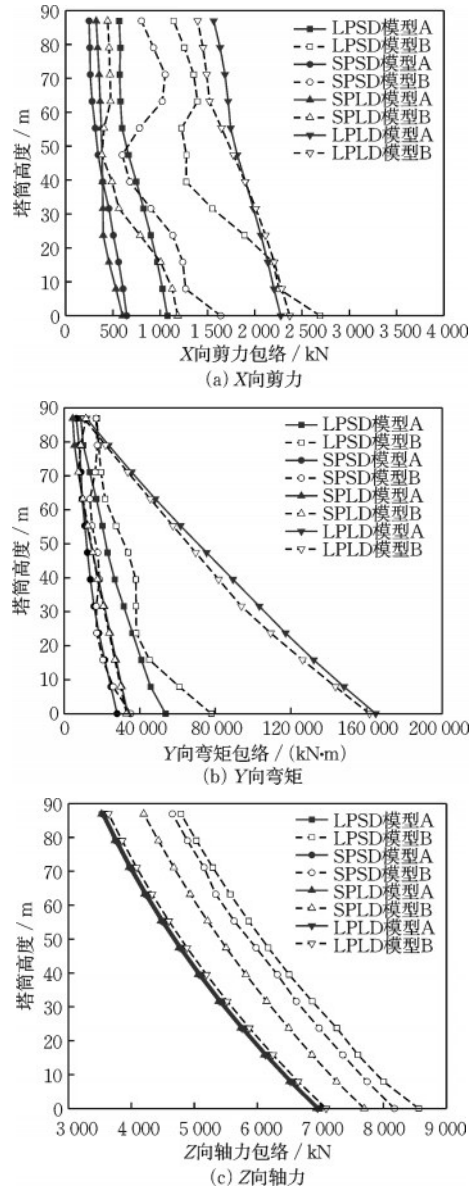


图 14 风机塔筒的内力包络图

Fig.14 Envelope curves of internal forces in wind turbine tower

5 结论

(1) 珊瑚砂非线性会增大吹填岛礁场地和上部结构的动力响应,吹填岛礁自由场的一阶自振频率为 5.26 Hz,对于高频成分显著的地震动,岛礁场地的加速度响应会比低频为主的地震动表现更为强烈,尤其两条短持时近断层地震动的地表平均加速度放大系数为 3.8,而长周期长持时地震动对场地的加速度放大系数最小,地表加速度放大系数为 1.33。

(2)考虑SSI效应的风机的自振频率略微降低,但岛礁土体的非线性特征和风机基础与土体的相互作用会显著增大风机的地震响应,在四类地震动作用下,考虑SSI效应后,位移最大增加了0.24倍,应力增大0.87倍,X向剪力增大1.54倍,Y轴弯矩增大0.45倍,轴力增大了0.23倍。

(3)风机结构的动力响应受到地震动的周期和持时特性的显著影响,在长周期地震动作用下,风机的动力响应相比短周期地震动作用时更大,地震动的长持时特性会进一步增大风机的动力响应。本文选取的长周期长持时地震动对应的风机动力响应显著大于其他三类地震动。

(4)在进行吹填岛礁场地建筑物的抗震设计和分析时,不考虑土—结构相互作用会低估建筑结构和土体的动力响应,对于像吹填岛礁这类具有重要意义的特殊场地,岛上工程结构的安全性至关重要,在结构地震响应分析中应充分考虑SSI效应。此外,本文仅研究了风机叶片紧急停机状态下的地震动力响应,后续可释放叶片的转动自由度,研究叶片运行状态对风机动力响应的影响。

参考文献:

- [1] 梁珂,何杨,陈国兴.南沙珊瑚砂的动剪切模量和阻尼比特性试验研究[J].岩土力学,2020,41(1):23-31.
Liang K, He Y, Chen G X. Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio characteristics of coral sand from Nansha Islands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 23-31. (in Chinese)
- [2] 张钰,丁选明,彭宇,等.珊瑚碎屑颗粒内孔隙特性微观试验研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(3):497-503.
Zhang Y, Ding X M, Peng Y, et al. Experimental study on inner pore morphology of coral clastic particles [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 497-503. (in Chinese)
- [3] 马启锋,刘汉龙,肖杨,等.高应力作用下钙质砂压缩及颗粒破碎特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(6):1020-1025.
Ma Q F, Liu H L, Xiao Y, et al. Compression and particle breakage features of calcareous sand under high stress [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 1020-1025. (in Chinese)
- [4] 詹文欢,刘以宣,钟建强,等.南海南部活动断裂与灾害性地质初步研究[J].海洋地质与第四纪地质,1995(3):1-9.
Zhan W H, Liu Y X, Zhong J Q, et al. Preliminary analysis of the active faults and hazard geology in the south of the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1995(3): 1-9. (in Chinese)
- [5] 崔永圣.珊瑚岛礁岩土工程特性研究[J].工程勘察,2014,42(9):40-44.
Cui Y S. Study on geotechnical characteristics of coral reef [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(9): 40-44. (in Chinese)
- [6] 陈国兴,朱翔,赵丁凤,等.珊瑚岛礁场地非线性地震反应特征分析[J].岩土工程学报,2019,41(3):405-413.
Chen G X, Zhu X, Zhao D F, et al. Nonlinear seismic response characteristics of a coral island site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 405-413. (in Chinese)
- [7] 宋可.深海岛礁钢筋混凝土灯塔结构抗震安全性研究[D].北京:清华大学,2020.
Song K. Study on seismic safety of a reinforced concrete lighthouse structure on the reef in deep-sea area [D]. Beijing: Tsinghua University, 2020. (in Chinese)
- [8] 张巍,孙锐,袁晓铭.珊瑚岛礁海域场地地震反应分析[J].地震研究,2020,43(3):576-581.
Zhang W, Sun R, Yuan X M. Seismic response analysis of a coral island in sea area [J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3): 576-581. (in Chinese)
- [9] Bao X, Liu J B, Li S T, et al. Nonlinear seismic response analysis of reef-coral sand site in the South China Sea [J]. Ocean Engineering, 2023, 281: 114966.
- [10] 卫仁杰,彭劫,陈泳,等.MICP结合南海岛礁资源加固珊瑚砂的方法及效果研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(6):1255-1265.
Wei R J, Peng J, Chen Y, et al. Study on methods and effects of coral sand reinforcement by MICP combined with reef resources in South China Sea [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1255-1265. (in Chinese)
- [11] Santangelo F, Failla G, Santini A, et al. Time-domain uncoupled analyses for seismic assessment of land-based wind turbines [J]. Engineering Structures, 2016, 123: 275-99.
- [12] 戴靠山,毛振西,张玉林,等.考虑土—结构相互作用的运转状态风电塔抗震分析[J].工程科学学报,2017,39(9):1436-1442.
Dai K S, Mao Z X, Zhang Y L, et al. Seismic response analyses of a wind turbine under operating conditions considering soil-structure interaction [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(9): 1436-1442. (in Chinese)
- [13] Zuo H R, Bi K M, Hao H. Dynamic analyses of operating offshore wind turbines including soil-structure interaction [J]. Engineering Structures, 2018, 157: 42-62.
- [14] Cao G W, Chen Z X, Wang C L, et al. Dynamic responses of offshore wind turbine considering soil nonlin-

- earity and wind-wave load combinations [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 108155.
- [15] 霍涛. 长周期地面运动和SSI效应对风机动力响应的影
响[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(1): 142-150.
Huo T. Effects of long-period ground motion and SSI ef-
fect on dynamic response of wind turbine [J]. *Journal of*
Vibration and Shock, 2021, 40(1): 142-50.(in Chinese)
- [16] 李万润, 吴王浩, 范科友, 等. 考虑土—结构相互作用
的大型风电结构地震响应分析[J]. *土木工程学报*,
2022, 55(增1): 39-48.
Li W R, Wu W H, Fan K Y, et al. Seismic response
analysis of large wind turbine considering soil-structure
interaction [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022,
55(Sup1): 39-48.(in Chinese)
- [17] 杜鹏, 杨阳, 成伟, 等. 基于监测数据和拟静力方法
的海上风机地震动力响应分析[J]. *防灾减灾工程学报*,
2024, 44(3): 561-567.
Du P, Yang Y, Cheng W, et al. Seismic response of
offshore wind turbines based on monitoring data and
quasi-static calculation [J]. *Journal of Disaster Preven-*
tion and Mitigation Engineering, 2024, 44(3): 561-567.
(in Chinese)
- [18] 周晓洁, 李娜, 卢力强, 等. 水平循环荷载下大直径单
桩承载变形特性有限元分析[J]. *防灾减灾工程学报*,
2021, 41(6): 1279-1286.
Zhou X J, Li N, Lu L Q, et al. Finite element analysis
on bearing and deformation behaviors for large-diameter
monopile under lateral cyclic loads [J]. *Journal of Disas-*
ter Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41
(6): 1279-1286. (in Chinese)
- [19] 张小玲, 徐英铎, 王丕光, 等. 端承桩—土动力相互
作用的频域子结构分析方法[J]. *防灾减灾工程学报*,
2023, 43(4): 701-711.
Zhang X L, Xu Y D, Wang P G, et al. A frequency do-
main substructure analysis model for dynamic interac-
tion between end bearing piles and soil [J]. *Journal of*
Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023,
43(4): 701-711. (in Chinese)
- [20] Jonkman J M, Buhl J R M L. Fast user's guide—updated
august 2005 [R]. Golden, Colorado: National Renew-
able Energy Laboratory, 2005.
- [21] 宝鑫. 岛礁—海水系统地震反应研究[D]. 北京: 清华
大学, 2020.
Bao X. Research on the seismic response of the
reef-seawater system [D]. Beijing: Tsinghua Universi-
ty, 2020. (in Chinese)
- [22] 赵丁凤, 阮滨, 陈国兴, 等. 基于Davidenkov骨架曲线
模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其
验证[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(5): 888-895.
Zhao D F, Ruan B, Chen G X, et al. Validation of
modified irregular loading-unloading rules based on Da-
videnkov skeleton curve and its equivalent shear strain
algorithm implemented in ABAQUS [J]. *Chinese Jour-*
nal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (5) :
888-895. (in Chinese)
- [23] 庄海洋, 陈国兴, 梁艳仙, 等. 土体动非线性黏弹性模
型及其ABAQUS软件的实现[J]. *岩土力学*, 2007, 28
(3): 436-442.
Zhuang H Y, Chen G X, Liang Y X, et al. A devel-
oped dynamic viscoelastic constitutive relations of soil
and implemented by ABAQUS software [J]. *Rock and*
Soil Mechanics, 2007, 28(3): 436-442. (in Chinese)
- [24] 杨喻声, 禹海涛, 袁勇. 地下结构抗震分析中若干土
层模拟方法对比研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019,
39(2): 244-249.
Yang Y S, Yu H T, Yuan Y. Comparative study on
several soil ground simulation schemes in seismic analy-
sis of underground structures [J]. *Journal of Disaster*
Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39 (2) :
244-249. (in Chinese)
- [25] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition
of a 5MW reference wind turbine for offshore system de-
velopment [R]. Golden, Colorado: National Renew-
able Energy Laboratory, 2009.
- [26] Xu Y Z, Ren Q Q, Zhang H, et al. Collapse analysis of
a wind turbine tower with initial-imperfection subjected
to near-field ground motions [J]. *Structures*, 2021, 29:
373-382.
- [27] Ren Q Q, Xu Y Z, Zhang H, et al. Shaking table test
on seismic responses of a wind turbine tower subjected
to pulse-type near-field ground motions [J]. *Soil Dynam-*
ics and Earthquake Engineering, 2021, 142: 106557.
- [28] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京: 中国
建筑工业出版社, 2010.
- [29] 孙业君, 何奕成, 王俊, 等. 海上风电平台地震监测实
验站记录的南黄海M3.8地震初探[J]. *防灾减灾工程
学报*, 2022, 42(6): 1351-1353.
Sun Y J, He Y C, Wang J, et al. A preliminary investi-
gation of an M3.8 earthquake in the South Yellow Sea
recorded by an experimental offshore wind power plat-
form based seismic station [J]. *Journal of Disaster Pre-*
vention and Mitigation Engineering, 2022, 42 (6) :
1351-1353. (in Chinese)
- [30] 宫杰, 孙业君, 郑江蓉, 等. 江苏海洋地震台站建设与效
能分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(3): 614-625.
Gong J, Sun Y J, Zheng J R, et al. Construction and ef-
ficiency analysis of Jiangsu marine seismic stations [J].
Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineer-
ing, 2023, 43(3): 614-625. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)