水利水运工程学报
HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

考虑冲刷深度的海上风机地震易损性研究

李芬，王屹之，洪子博，胡丹

Seismic fragility of offshore wind turbine considering scour depth

LI Fen, WANG Yizhi, HONG Zibo, HU Dan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12170/20210630001

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于桩筒复合基础海上风机振动特性分析
Analysis of vibration characteristics of offshore wind turbine with pile-tube composite foundation
水利水运工程学报. 2017(5): 103 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.015

基于位移的高桩码头地震易损性分析
Seismic vulnerability analysis of pile-supported wharves based on displacement
水利水运工程学报. 2019(3): 76 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.010

考虑土体强度空间变异性的单桩水平承载力研究
Study on the horizontal bearing capacity of single pile foundation considering spatial variability of soil strength
水利水运工程学报. 2020(6): 108 https://doi.org/10.12170/20200424001

考虑土性参数空间变异性的单桩竖向承载力分析
Analysis of vertical bearing capacity of single pile foundations considering spatial variability of soil parameters
水利水运工程学报. 2019(5): 85 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.011

流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响
New trends of river channel evolution of the Yangtze River estuary under the influences of inflow and sediment variations and human activities
水利水运工程学报. 2021(2): 1 https://doi.org/10.12170/20200313001

海上筒型基础的筒壁土压力计算
Earth pressure calculation for bucket wall of offshore bucket foundation
水利水运工程学报. 2018(3): 65 https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.009

DOI:10.12170/20210630001
李芬, 王屹之, 洪子博, 等. 考虑冲刷深度的海上风机地震易损性研究 [J]. 水利水运工程学报, 2022(4): 123-130. (LI Fen, WANG Yizhi, HONG Zibo, et al. Seismic fragility of offshore wind turbine considering scour depth[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(4): 123-130. (in Chinese))

考虑冲刷深度的海上风机地震易损性研究

李　芬, 王屹之, 洪子博, 胡　丹
(武汉理工大学 船海能动学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 在地震和波浪等复杂环境荷载作用下, 海上风机的桩周冲刷和地震动水压力会显著影响海上风机的动力响应。建立了考虑地震动水压力及桩周冲刷效应的海上风机非线性动力计算模型, 首先基于场地相关反应谱选取了 34 条地震动记录, 通过多条带分析方法获取了不同工况下海上风机的地震易损性曲线, 进一步讨论了地震动水压力和冲刷深度对海上风机地震易损性的影响。研究表明: 在一般设防烈度下, 冲刷深度对海上风机受到地震荷载作用时能否正常工作有显著影响, 对风机发生永久性破坏概率的影响较小; 而动水压力对海上风机 4 种极限状态下的地震易损性的影响均较小。海上风机易损性分析可为海上风机的抗震设计提供一定的理论指导, 并具工程应用价值。

关　键　词: 冲刷; 地震动水压力; 桩基础; 地震易损性; 海上风机
中图分类号: TU473　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-640X(2022)04-0123-08

我国海上风力发电逐步进入快速化发展、规模化开发的阶段, 海上风电场多建设在我国沿海地区, 而我国地处欧亚地震带和环太平洋地震带交汇处, 地震活动频繁, 在过去几十年间, 渤海、黄海、东海和东南沿海区域的 6 级以上强震达 50 多次, 最大震级可达 7.5 级[1]。目前海上风机发展的主要趋势为单机容量和机身的大型化, 对风机的抗震性能提出了更高的要求。

地震易损性分析能够有效表征结构物在地震荷载作用下的安全裕度, 已有大量学者针对桥梁[2-4] 和建筑物[5-6] 的地震易损性展开了研究, 而有关海上风机的地震易损性研究较少。Nuta[7] 基于 IDA 法建立了加拿大地区风机钢塔架结构的地震易损性曲线; Patil 等[8] 针对 1.65 MW 的风机塔架结构进行了地震易损性分析, 研究表明地基倾覆极限状态最为关键且近场地震更容易引起风机的破坏。苑晨阳[9] 基于 MSA 法对停机状态下和正常运行状态下的风机进行了地震易损性分析, 结果表明风机在停机状态下遭遇地震时更容易发生破坏。以上研究均假设风机塔筒底部直接固定在地面上, 忽略了风机基础与土体的相互作用。De Risi 等[10] 采用非线性 Winkler 地基梁模型、阻抗函数和固定约束分别模拟海上风机的桩-土相互作用, 研究表明采用阻抗函数或固定约束考虑桩-土相互作用时会低估风机在地震作用下的破坏概率。Kim 等[11] 采用非线性 Winkler 地基梁模型对海上风机进行地震易损性分析, 指出仅采用弹簧较难模拟地震荷载作用下桩-土之间复杂的动力相互作用。

综上所述, 现有的海上风机地震易损性研究中大多对风机基础进行了简化, 未能精确模拟风机基础与海床的动力相互作用。近年来, 冲刷对海上风机动力响应的影响引起了国内外众多学者的广泛关注, 如刘红军等[12-13] 研究表明冲刷深度会显著增加风机的动力响应, 冲刷深度对海上风机地震易损性的影响仍需进一步研究。此外, 根据 Mo 等[14] 的研究, 动水压力对风机地震易损性的影响也不可忽视。

本文以江苏响水沿海某风电场的 1.5 MW 风机结构为依托[15], 建立了考虑地震和冲刷联合作用的海上

收稿日期: 2021-06-30
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(WUT2021IVA009)
作者简介: 李　芬(1974—), 女, 福建浦城人, 教授, 博士, 主要从事海洋岩土工程研究。E-mail: jessilifen@126.com
通信作者: 胡　丹(E-mail: hudan1989.happy@163.com)

风机模型，讨论冲刷深度及动水压力对海上风机地震易损性的影响。

1 基于 MSA 的地震易损性分析

地震易损性分析是一种基于概率的结构抗震性能评估方法。易损性曲线表示在对应地震动强度指标(I_M)下结构破坏或达到某一极限状态的概率，一般采用地震动峰值速度(Peak Ground Velocity, PGV)、地震动峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)和对应结构基本周期的谱加速度(S_a)作为指标。根据所选的强度指标，假设在对应I_M下结构破坏的概率服从对数正态分布[16]，即$\ln(x/\theta)/\beta \sim N(0,1)$，结构易损性方程表示为：

$$p_f(I_M = x) = \Phi\left(\frac{\ln\frac{x}{\theta}}{\beta}\right) \tag{1}$$

式中：$p_f(I_M = x)$为某地震波的地震动强度指标$I_M = x$时结构发生破坏的概率；$\Phi()$为标准正态分布的累计分布函数；θ为易损性方程的中值，即破坏概率为 50% 时地震动强度指标I_M的值；β为$\ln I_M$的标准差。

在多条带分析法(Multiple Stripe Analysis)中，易损性方程参数估计是在离散的I_M值下获取的，对应每一个I_M值会输入一系列不同的地震波进行结构分析，统计得到该I_M值水平下输入地震波导致结构破坏或超过某一设定极限状态的地震波数量，并假设每条地震波导致结构破坏或超过某一设定极限状态的概率是相互独立的。因此，可以假设在$I_M = x_j$时输入n_j条地震波，其中z_j条地震波导致结构破坏或超过某一极限状态的概率服从二项分布，可表示为：

$$P_j = \binom{n_j}{z_j} p_j^{z_j}\left(1 - p_j\right)^{n_j - z_j} \tag{2}$$

式中：p_j为$I_M = x_j$时某一条地震波导致结构发生破坏的概率，即易损性方程(1)。根据结构分析的计算结果，采用最大似然估计法估计易损性方程的参数θ、β，进一步得到使结构发生最大破坏概率的易损性方程，似然函数表示为：

$$L(\theta,\beta) = \prod_{j=1}^{m}\binom{n_j}{z_j} p_j^{z_j}(1 - p_i)^{n_j - z_j} \tag{3}$$

代入式(1)可得：

$$L(\theta,\beta) = \prod_{j=1}^{m}\binom{n_j}{z_j}\Phi\left(\frac{\ln\frac{x_j}{\theta}}{\beta}\right)^{z_j}\left[1 - \Phi\left(\frac{\ln\frac{x_j}{\theta}}{\beta}\right)\right]^{n_j - z_j} \tag{4}$$

式中：m 为地震动强度指标I_M的数量；$\prod$表示连乘，由于$\ln L(\theta,\beta)$与$\ln L(\theta,\beta)$有相同的最大值点，θ、β的最大似然估计为：

$$\left\{\hat{\theta},\hat{\beta}\right\} = \arg\max_{\theta,\beta}\sum_{j=1}^{m}\left\{\ln\binom{n_j}{z_j} + z_j\ln\left[\Phi\left(\frac{\ln\frac{x_j}{\theta}}{\beta}\right)\right] + \left(n_j - z_j\right)\ln\left[1 - \Phi\left(\frac{\ln\frac{x_j}{\theta}}{\beta}\right)\right]\right\} \tag{5}$$

2 海上风机数值模型与地震动选取

2.1 数值模型与动水压力计算

Patil 等[8]研究表明，将机舱、轮毂和叶片整体进行简化对结构物前 25 阶模态的模态质量参与系数影响很小，可忽略不计。因此，将风机的数值模型简化为机舱、塔筒和桩基础 3 部分，其中将风机塔顶的机舱、轮毂和叶片整体简化为 4 m×4 m×9 m 的实体，通过质量等效方式将风机叶片和轮毂的质量附加在机舱的等效实体上；将塔筒简化为变截面的实心圆柱，分为上、中、下三段，详细参数见表 1。 桩基础采用大直径钢

管桩, 桩径为 4 m, 壁厚 0.045 m, 桩总长 70 m, 入土深 60 m, 进入持力层深度为 42 m, 上覆软黏土 18 m, 桩与土层参数见表 2。已有研究[17] 表明在冲刷坑的尺寸参数中, 冲刷深度的影响最大, 而冲刷坑坡度通常为 30°~44°[18], 因此, 本文将主要研究冲刷深度对海上风机地震动力响应的影响, 取冲刷坑底部宽度为 0, 坡角取 30°。为了同时满足计算精度和计算效率的需求, 土体水平方向的长度取 140 m, 桩底以下持力层深度为 50 m, 土层总厚度为 110 m, 并对桩周网格进行加密, 土体底部及边界的网格密度成比例递减。在模型底部输入地震波加速度时程曲线模拟地震荷载, 采用附加质量法计算地震引起的动水压力。地震和冲刷联合作用海上风机数值模型如图 1 所示, 模型单元数为 13 536, 节点数为 14 645。机舱、塔筒和桩基础采用弹性本构, 桩-土的接触面采用 Coulomb 摩擦模型。采用无质量地基地震动输入, 在土体侧向施加自由场边界, 底部直接施加应力时程。以瑞利阻尼叠加滞后阻尼模拟土体特性, 瑞利阻尼参数为 0.05 和 4.74, 滞后阻尼使用 sig4 模型。

在考虑动水压力时, 结构物的动力平衡方程可表示为:

$$\boldsymbol{M}\ddot{x}+\boldsymbol{C}\dot{x}+\boldsymbol{K}x=-\boldsymbol{M}\ddot{x}_g-M_{\mathrm{W}}(\ddot{x}+\ddot{x}_g) \tag{6}$$

式中: $\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$ 分别为结构质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\dot{x}$和$\ddot{x}$分别为弹性运动速度和加速度; $\ddot{x}_g$为刚性振动加速度; $M_{\mathrm{W}}=(C_{\mathrm{M}}-1)\rho V$, C_{M} 为惯性力系数, ρ 为水的密度, V 为分析柱体的单位体积。

表 1　风机构件参数

Tab. 1　Parameters of turbine

序号	构件名称	尺寸	等效密度/(kg·m^{-3})
1	机舱	4 m×4 m×9 m	720
2	塔筒(上段)	φ (3.4~2.6) m×30 m	180
3	塔筒(中段)	φ (4.0~3.4) m×30 m	173
4	塔筒(下段)	φ 4.0 m×10 m	264

表 2　数值模型的材料参数

Tab. 2　Material parameters of numerical model

材料名称	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/kPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/°
Q345钢	7 850	2.06×10^8	0.27	–	–
黏土	724	2.18×10^3	0.38	10	2.4
粉砂	1 130	8.00×10^4	0.33	0	22

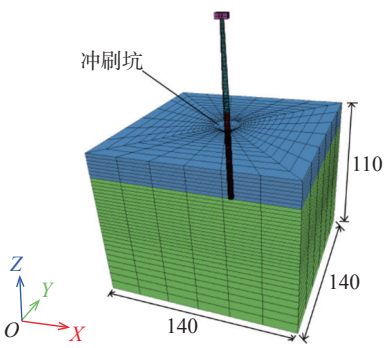


图 1　地震和冲刷联合作用海上风机数值模型(单位: m)

Fig. 1　Numerical model of offshore wind turbine under earthquake load and scour conditions (unit: m)

由于模型在空间上为离散单元, 可将动水压力的等效附加质量M_{W}沿高度方向离散为$M_{i\mathrm{W}}$, 并作用在相应的结构物节点i上, 且假设相邻节点之间水与结构物的相对速度不变, 即节点i上的附加质量为相邻单元附加质量一半之和, 即

$$M_{i\mathrm{W}}=\sum_{i-1}^{i+1}\frac{1}{2}(C_{\mathrm{M}}-1)\rho A_i l_i \tag{7}$$

式中: C_{M}取 2.0; A_i为节点i处的横截面积; l_i为将结构物沿高度方向划分的单元长度。

在海上风机的地震易损性研究中, 其在地震作用下极限状态的定义尚未达到统一的标准。参考以往研究[7-8,10,14,19], 并综合现有的海上风机地震易损性分析[7-12], 本文中 4 种极限状态对应的临界响应值见表 3, 其中第四极限状态计算材料为 Q345 钢。

表 3　极限状态指标

Tab. 3　Index of the limit state

极限状态代号	极限状态标准	临界响应值
DS_1	塔顶最大位移超过1.25% 塔身高度	0.925 m
DS_2	桩顶转角超过0.5°	0.5°
DS_3	震后塔顶最大位移超过1%塔身高度	0.74 m
DS_4	材料超过弹性极限对应的截面弯矩	158 MN·m

2.2　地震波选择与工况组合

由于场地条件、震级和震源等因素的不确定性, 地震荷载是一种具有极大随机性的荷载形式。Elnashai 等[20] 指出选取地震波的震级波动范围应在

0.6 内且震源深度应在 20~40 km; Hancock 等[21] 认为在进行结构地震动响应分析时，选取的地震波应与场地目标谱相匹配。本文根据 DNV 规范[22] 和 ISO 19901 规范[23] 中的规定，场地等级取 E，并按 ISO 19901 规范中给出的重现期为 1 000 年的中国近海地震谱加速度地图，分别取$S_{\mathrm{a,map}}(0.2)=0.25g$和$S_{\mathrm{a,map}}(1.0)=0.1g$，由式(8)计算近海软弱黏土场地条件的设计反应谱。

$$S_{\mathrm{a,site}}(T)=\begin{cases}(3T+0.4)C_{\mathrm{a}}\times S_{\mathrm{a,map}}(0.2) & T\leqslant 0.2\\ C_{\mathrm{a}}\times S_{\mathrm{a,map}}(0.2) & 0.2<T\leqslant T'\\ C_{\mathrm{v}}\times S_{\mathrm{a,map}}(1.0)/T & T'<T\leqslant 4.0\\ 4C_{\mathrm{v}}\times S_{\mathrm{a,map}}(1.0)/T^2 & T>4.0\end{cases} \tag{8}$$

式中：T为周期，可表示为$T=\dfrac{C_{\mathrm{v}}S_{\mathrm{a,map}}(1.0)}{C_{\mathrm{a}}S_{\mathrm{a,map}}(0.2)}$，$S_{\mathrm{a,map}}(0.2)$和$S_{\mathrm{a,map}}(1.0)$分别表示振动周期为 0.2 s 和 1.0 s 时的地震加速度谱峰值，C_{a} 和 C_{v} 为场地系数，根据场地等级 E 分别取 1.0 和 1.8；T'为临界周期，表示为 $T'=C_{\mathrm{v}}\times S_{\mathrm{a,map}}(1.0)/T$。

为了模拟地震动的随机性，在进行地震易损性分析时需要选取大量的地震波，而现有研究表明在地震波数量达到 32~36 条时，基于 MSA 法的海上风机易损性分析即可达到一定精度[9]。因此，本文根据计算得到的设计反应谱，以及震源深度、震级波动范围，在太平洋地震工程研究中心(Peer)网站[24] 上选取了 34 条地震记录，取比例因子为 0.6，使得选取地震记录的平均加速度响应谱符合目标谱，对比结果如图 2 所示。

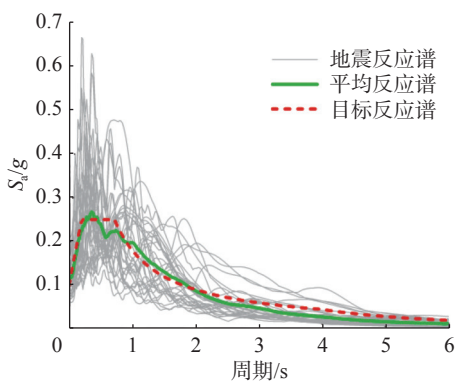


图 2 目标反应谱与平均反应谱

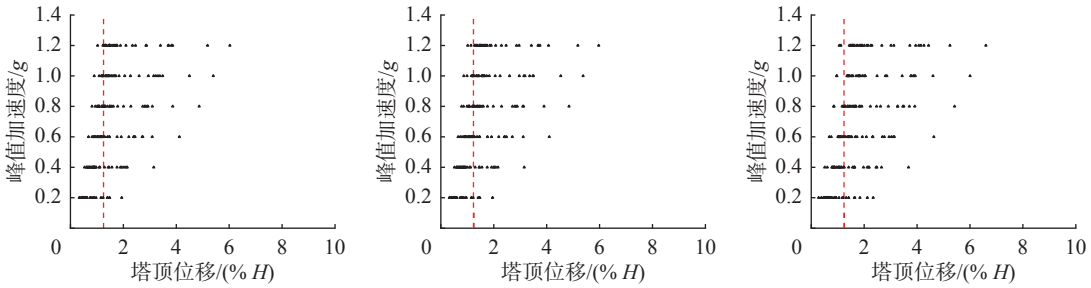
Fig. 2 Target response spectrum and average response spectrum

选取不同的水深和冲刷深度，讨论动水压力和冲刷深度对地震易损性的影响。选取 2 倍桩径为极限冲刷深度[12]，3 种工况组合如下：工况 1 的水深和局部冲刷深度 S_{d} 均为 0；工况 2 的水深和局部冲刷深度 S_{d} 分别为 10 和 0 m；工况 2 的水深和局部冲刷深度 S_{d} 分别为 10 和 8 m。

3 海上风机地震易损性分析

将选取的 34 条地震波分别调整其峰值加速度为 0.2g、0.4g、0.6g、0.8g、1.0g 和 1.2g，在对应峰值加速度下分别计算不同工况的海上风机地震动响应，并记录对应的塔顶位移、桩顶转角、风机最大弯矩及震后累计位移，对比得到的目标响应和极限状态指标，并将分析结果代入式(5)。以第一强度指标为例，如图 3 所示为海上风机在不同峰值加速度幅值的不同地震波作用下的塔顶最大位移响应。其中红色虚线为 DS_1 对应的塔顶位移，当塔顶位移超过红色虚线时，则风机达到第一极限状态，即发生“破坏”。易损性参数如表 4 所示。建立各极限状态指标下风机的地震易损性曲线，如图 4 所示。

以塔顶最大位移超过 1.25% 的塔身高度为第一强度指标，由图 4(a) 可知在考虑冲刷深度影响时，海上风机的破坏概率显著增加，如 PGA 达到 0.5g 时，破坏概率达到了 60%。根据 ISO 19901-2 规范[23] 中对场地类别的划分，对 3 类和 4 类场地，即设防烈度为 0.26g 至 0.45g 的场地，考虑冲刷时，风机破坏概率的增幅超过了 11%。然而动水压力对海上风机易损性的影响较小，如 PGA 小于 0.4g 时，风机破坏概率增幅仅 0.7%；当 PGA 达到 0.8g 时，风机破坏概率的增幅最大，达到 1.41%。



(a) 工况 1　(b) 工况 2　(c) 工况 3

图 3　第一极限状态 DS_1 下不同工况的 MSA 分析结果

Fig. 3　MSA analysis results of the first limit state DS_1 under different working conditions

以桩顶转角超过 0.5°为破坏指标时, 由图 4(b) 可知在 PGA 达到 1.0*g* 时, 冲刷深度对风机破坏概率影响最大, 增幅达 14.41%。对于 3、4 类的场地, 即设防烈度为 0.26*g*~0.45*g* 时, 风机破坏概率的增幅超过 7%。然而随着 PGA 的增加, 动水压力对风机破坏概率的影响逐渐增加, 在 PGA 为 1.5*g* 时最大增幅为 0.9%。

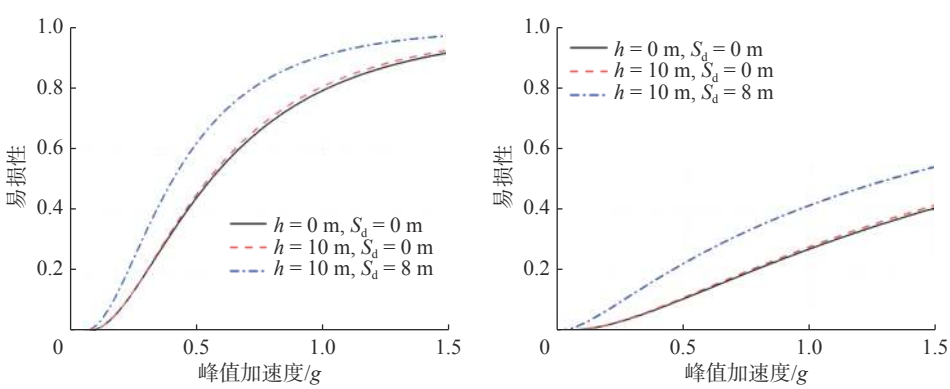
以震后塔顶最大位移超过 1% 塔身高度为极限状态指标时, 图 4(c) 表明对于一般设防烈度的场地, 即设防烈度小于 0.5*g* 时, 考虑冲刷深度或动水压力对海上风机的易损性无明显影响。在 PGA 为 1.5*g* 时, 同时考虑冲刷深度和动水压力影响使得风机的破坏概率增加了 6.7%; 仅考虑动水压力时, 风机的破坏概率增加了 0.08%。

以材料超过弹性极限对应的截面弯矩为极限状态指标时, 由图 4(d) 可知考虑动水压力前后的易损性曲线几乎没有区别, 这可能是由于风机达到第四极限状态时的概率太小, 数值试验还无法反映出动水压力对地震易损性的影响。然而考虑冲刷深度时, 随着 PGA 的增加风机破坏概率逐渐增加, 当 PGA 小于 0.5*g* 时, 冲刷深度对破坏概率的影响不显著, 最大为 1.42%; PGA 大于 1.5*g* 时, 最大增幅为 15.61%。

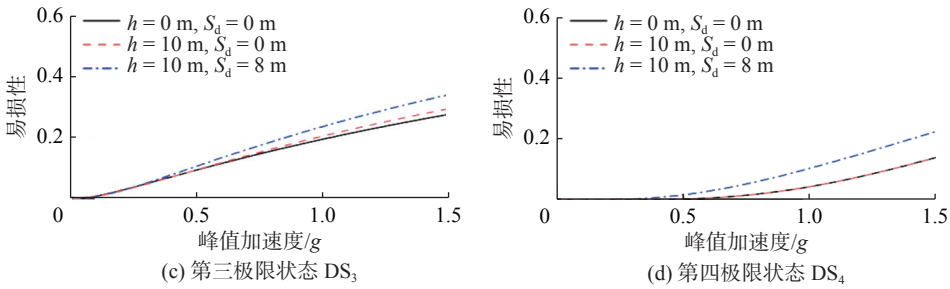
表 4　海上风机地震易损性参数

Tab. 4　Seismic vulnerability parameters of offshore wind turbine

极限状态	工况	θ	β
塔顶最大位移超过1.25%塔身高度	1	−0.59	0.72
	2	−0.61	0.71
	3	−0.90	0.69
桩顶转角超过0.5°	1	0.64	1.07
	2	0.64	1.07
	3	0.27	1.25
震后塔顶最大位移超过1%塔身高度	1	1.32	1.53
	2	1.18	1.43
	3	0.95	1.32
材料超过弹性极限对应的截面弯矩	1	1.76	1.12
	2	1.10	0.65
	3	1.43	1.14



(a) 第一极限状态 DS_1　(b) 第二极限状态 DS_2



(c) 第三极限状态 DS_3 (d) 第四极限状态 DS_4

图 4 4 种极限状态下海上风机地震易损性曲线

Fig. 4 Seismic fragility curves of offshore wind turbine under four limit states

4 结 语

本文建立了考虑地震动水压力及桩周冲刷效应的海上风机非线性动力计算模型，使用 MSA 法分析了冲刷深度和动水压力对海上风机地震易损性的影响，在本文提出的 4 个极限状态下，动水压力对海上风机地震易损性均无显著影响，但要注意以下 2 种情况：(1)风机不能正常工作时，即以塔顶最大位移超过 1.25% 塔身高度的第一极限状态和以桩顶转角超过 0.5°的第二极限状态下，冲刷深度对风机易损性有显著影响，如在一般地震设防烈度下，即 PGA 小于 0.5g 时，冲刷深度引起风机破坏概率的增加非常显著，增幅达到 17.85% 和 14.41%；(2)风机发生永久性损坏时，即以震后塔顶最大位移超过 1% 塔身高度的第三极限状态和以材料超过弹性极限对应的截面弯矩的第四极限状态下，冲刷深度对风机易损性有一定影响。在一般地震设防烈度下，冲刷深度的影响较小。对罕遇强地震，即当 PGA 达到 1.0g 以上时，冲刷深度对风机破坏概率的影响显著增加。

参 考 文 献：

[1] 彭艳菊, 孟小红, 吕悦军, 等. 我国近海地震活动特征及其与地球物理场的关系[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(5): 1377-1388. (PENG Yanju, MENG Xiaohong, LÜ Yuejun, et al. The seismicity of China offshore seas and its relationship with geophysical fields[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(5): 1377-1388. (in Chinese))

[2] 庞于涛, 王建国, 欧阳辉, 等. 采用钢纤维混凝土的连续钢构桥地震易损性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(4): 687-694. (PANG Yutao, WANG Jianguo, OUYANG Hui, et al. Seismic fragility analysis of a continuous rigid frame bridge made from steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(4): 687-694. (in Chinese))

[3] 陈伟, 王冠, 杜彦良, 等. 高速铁路连续梁桥近断层地震易损性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 212-218. (CHEN Wei, WANG Guan, DU Yanliang, et al. Vulnerability analysis of the continuous high-speed railway bridge under near-fault earthquake[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(2): 212-218. (in Chinese))

[4] 郭军军, 钟剑, 袁万城, 等. 考虑桥台性能影响的连续梁桥地震易损性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(4): 532-537. (GUO Junjun, ZHONG Jian, YUAN Wancheng, et al. Seismic fragility analysis of a continuous bridge considering the performance of abutments[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(4): 532-537. (in Chinese))

[5] 冯云芬, 高树飞. 基于位移的高桩码头地震易损性分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(3): 76-84. (FENG Yunfen, GAO Shufei. Seismic vulnerability analysis of pile-supported wharves based on displacement[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(3): 76-84. (in Chinese))

[6] 王秀振, 钱永久, 邵长江, 等. 考虑楼层相关性的框架结构地震易损性分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(1): 202-209. (WANG Xiuzhen, QIAN Yongjiu, SHAO Changjiang, et al. Seismic vulnerability analysis of frame structure considering floor correlation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(1): 202-209. (in Chinese))

[7] NUTA E. Seismic analysis of steel wind turbine towers in the Canadian environment[D]. Toronto: University of Toronto,

2010.

[8] PATIL A, JUNG S, KWON O S. Structural performance of a parked wind turbine tower subjected to strong ground motions[J]. Engineering Structures, 2016, 120: 92-102.

[9] 苑晨阳. 大型风机结构振动的结构—机电智能控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.（YUAN Chenyang. Study on the structure-BCS intelligent control methods for mitigating the vibration of large-scale wind turbines[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.（in Chinese））

[10] DE RISI R, BHATTACHARYA S, GODA K. Seismic performance assessment of monopile-supported offshore wind turbines using unscaled natural earthquake records[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 109: 154-172.

[11] KIM D H, LEE S G, LEE I K. Seismic fragility analysis of 5 MW offshore wind turbine[J]. Renewable Energy, 2014, 65: 250-256.

[12] 刘红军, 杨奇. 局部冲刷对风机支撑系统承载性能的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 722-727.（LIU Hongjun, YANG Qi. Influence of local scour on bearing performance of wind turbine supporting system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 722-727.（in Chinese））

[13] 宋波, 赵伟娜, 双妙. 冲刷深度对海上风电塔地震动力响应的影响分析[J]. 工程科学学报, 2019, 41(10): 1351-1359.（SONG Bo, ZHAO Weina, SHUANG Miao. Analysis of the influence of scour depth on the dynamic response of offshore wind turbine towers under earthquake action[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(10): 1351-1359.（in Chinese））

[14] MO R J, KANG H G, LI M, et al. Seismic fragility analysis of monopile offshore wind turbines under different operational conditions[J]. Energies, 2017, 10(7): 1037.

[15] 田树刚, 张爱军, 任文渊, 等. 基于流–固耦合的近海风电基础地震反应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 155-165.（TIAN Shugang, ZHANG Aijun, REN Wenyuan, et al. Analysis of seismic response of offshore structure of wind turbine and foundation considering fluid-structure coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 155-165.（in Chinese））

[16] IBARRA L F, KRAWINKLER H. Global collapse of frame structures under seismic excitations[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2005: 323-325.

[17] 林城, 韩杰, BENNETT C, 等. 冲刷作用下砂土地层中桩的侧向力学性质分析[J]. 南方能源建设, 2018, 5(2): 24-36.（LIN Cheng, HAN Jie, BENNETT C, et al. Analysis of laterally loaded piles in sand considering scour hole dimensions[J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(2): 24-36.（in Chinese））

[18] RICHARDSON E V, DAVIS S R. Evaluating scour at bridges[R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2001.

[19] ASAREH M A, SCHONBERG W, VOLZ J. Fragility analysis of a 5-MW NREL wind turbine considering aero-elastic and seismic interaction using finite element method[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2016, 120: 57-67.

[20] ELNASHAI A S, DI SARNO L. Fundamentals of earthquake engineering[M]. New York: Wiley & Sons, Ltd. , 2008: 365-367.

[21] HANCOCK J, BOMMER J J, STAFFORD P J. Numbers of scaled and matched accelerograms required for inelastic dynamic analyses[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(14): 1585-1607.

[22] DET NORSKE VERITAS. Design of offshore wind turbine structures: DNV-OS-J101[S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2010.

[23] ISO. Petroleum and natural gas industries-specific requirements for offshore structures—part 2: seismic design procedures and criteria: ISO 19901-2[S]. Switzerland: ISO, 2017.

[24] MAZZONI S. PEER ground motion database[DB/OL]. [2021-06-28]. https://ngawest2.berkeley.edu.

Seismic fragility of offshore wind turbine considering scour depth

LI Fen, WANG Yizhi, HONG Zibo, HU Dan

(*School of Transportation*, *Wuhan University of Technology*, *Wuhan* 430063, *China*)

Abstract: The geological conditions in the eastern coastal areas of China are complex, and the saturated soft clay around the offshore wind turbine foundation may be affected by the local erosion and dynamic water pressure conditions around the pile under the cyclic action of earthquake and waves. In this study, a nonlinear dynamic model of offshore wind turbine considering earthquake hydraulic pressure and scour effects was established. A total of 34 earthquake records were selected based on the site target response spectrum. Based on the multi-band analysis method, the seismic vulnerability curves of offshore wind turbine under various working conditions were obtained, and the influence of earthquake hydro-dynamic pressure and scour depth on the seismic vulnerability of offshore wind turbines was discussed further. The results indicate that under the seismic fortification intensity, the scour depth has a significant impact on the normal operation of offshore wind turbine under seismic load, but has marginal effect on the permanent failure of wind turbine. By comparison, the hydrodynamic pressure has little effect on the seismic vulnerability under different limit states. The vulnerability analysis of offshore wind turbine can serve as a guidance for the seismic design of offshore wind turbine.

Key words: scour; hydrodynamic pressure; pile foundation; seismic fragility; offshore wind turbine