

文章编号:1673-2049(2015)02-0035-07

考虑潮位及动水压力影响的在役海上风电塔地震响应分析

宋 波^{1,2}, 李吉人^{1,2}, 王海龙^{1,2}, 林懿翀^{2,3}

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 强震区轨道交通工程抗震研究北京市国际科技合作基地, 北京 100083; 3. 中国港湾建设有限公司, 北京 100027)

摘要:为了准确评价潮间带海上在役风电塔结构在地震作用下的动力特性,以某1 000 MW近海及潮间带风电场的风电塔为研究对象,考虑潮位和动水压力影响,对其进行了地震响应分析。基于附加质量法建立了风电塔有限元模型,对平均水深条件和极端高潮位条件下的风电塔结构进行了动力分析,并研究了冲刷效应影响下风电塔结构的自振特性。结果表明:仅考虑潮位变化引起的动水压力对结构的动力响应影响并不大,各项动力性能指标变化均在5%以内;冲刷导致的海床上覆土层的变化将影响到结构的自振周期,进而可能导致风电塔附加振动。

关键词:地震响应;海上风电塔;潮位;动水压力;附加质量法;潮间带

中图分类号:TU473.1

文献标志码:A

Earthquake Response Analysis of In-service Offshore Wind Towers Considering Effects of Tide Level and Hydrodynamic Pressure

SONG Bo^{1,2}, LI Ji-ren^{1,2}, WANG Hai-long^{1,2}, LIN Yi-chong^{2,3}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing International Cooperation Base for Science and Technology on Aseismic Research of Rail Transit Engineering in Strong Motion Area, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. China Harbour Engineering Company Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: In order to assess the dynamic characteristics of the in-service wind tower structures in intertidal zone under earthquake action, taking a 1 000 MW offshore wind tower in intertidal zone as study object, the earthquake response of the wind tower was analyzed by considering tide level and hydrodynamic pressure. The finite element model of wind tower was established, and the dynamic analyses of structure in mean water depth condition and extreme high tide level condition were carried, and the natural vibration characteristics of wind tower effected by scouring effect were analyzed. The results show that the dynamic response of the structure caused by hydrodynamic pressure is not obvious. The changes of dynamic performance indicators are within 5%. The scour will cause the change of soil thickness and lead to the change of dynamic characteristics, which may affect additional vibration of wind towers.

Key words: earthquake response; offshore wind tower; tide level; hydrodynamic pressure; added mass method; intertidal zone

收稿日期:2014-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51178045)

作者简介:宋 波(1962-),男,山东招远人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:songbo@ces.ustb.edu.cn。

0 引言

中国沿海地区滩涂面积广阔,海岸滩涂可分为潮上带、潮间带以及潮下带。对于建于潮间带的海上风电塔,由于大多位于淤泥场地,其服役环境较陆上恶劣,受波浪、潮流以及地震荷载激励下动水压力等各种因素的影响,因此保障海上风电设施结构的安全性成为制约海上风电发展的关键问题。

近年来,大型化已成为风电塔结构发展的重要趋势。由于海上风电塔处于复杂的环境区域,并受诸多因素的共同影响,导致了结构整体的附加振动,改变了结构的自振周期,使得地震作用下海上风电塔结构体系的破坏现象与损伤机理更为复杂。

围绕动水压力作用下结构基础地震响应、动力相互作用以及计算理论方法等,各国学者开展了理论分析与数值模拟仿真等相关研究。杨万理等^[1]研究了动水压力对连续刚构桥梁地震响应的影响。张国明等^[2]研究了动水压力对深水桥梁性能设计的影响。杨庸^[3]建立了嘉陵江大桥的连续刚构设计方案有限元模型,基于 Morison 修正公式,用附加质量模拟动水压力,对比了不同工况下桥梁的自振特性,研究表明,动水压力对高桩承台深水墩连续刚构桥梁影响较大,不可忽略。Chopra 等^[4-5]在考虑土、水与结构相互作用的基础上,提出了水平地震作用下计算塔式结构动水附加质量的有效方法。白志刚等^[6]基于水动力学模型模拟了风、浪、流的耦合作用。李富荣等^[7]分析了地震动作用下动水压力对单柱式桥墩的墩顶相对墩底位移、加速度、剪力和弯矩反应的影响,并探讨了水位对单柱式桥墩地震反应特性的影响。田树刚等^[8]考虑流固耦合效应,采用有限元方法对近海风电支撑体系的自振频率和振型进行了计算分析。

波浪对桩柱式结构的作用机理非常复杂,桩柱波浪力分布直接影响到海上风力发电结构的安全和稳定。张陆陈等^[9]通过水力学模型试验研究了圆柱基础桩群潮汐水动力脉动特性。荣冰等^[10]基于离心模型试验,重点分析了桩身的响应及桩周围土体的变形特点。李凯文等^[11]以南通沿海风电塔为研究对象,利用数值模拟和现场实测手段,研究了海上风电塔在风-波浪联合作用下的结构动力响应以及不同水深对风电机系统振动频率的影响,研究结果表明,考虑流固耦合效应与风电塔整机模型分析所得到的计算结果与实测结果较一致,波浪荷载对海上风电塔的动力响应存在一定的影响。

对于在役风电塔结构的地震响应与荷载组合效应研究,日本学者针对海上风电塔的服役中的振动与地震发生时的荷载组合问题开展了研究,并以实际工程破坏实例为背景,研究了风电塔基础结合部的破坏机制^[12-13]。Kim 等^[14]通过在桩-土之间建立非线性弹簧接触单元,进行了 Pushover 分析。戴靠山等^[15-17]从随机理论出发,在考虑等效平稳持时对低阻尼比反应谱影响的基础上,提出了适用于风电塔抗震设计的低阻尼反应谱的阻尼比修正系数。陈阳等^[18-20]采用 2 种数值计算方法对塔筒结构进行了研究,分析了风-地震动作用下塔体结构的受力差异,并研究了不同地震动输入方向的结构响应。公常清等^[21]基于风电塔结构单自由度简化体系并结合数值分析,定量明确了地震动摇摆分量对风电塔结构的影响程度。在对在役风电塔结构的安全评估研究方面,为了避免风电塔结构自振频率接近电机运行时的振动频率而发生共振,Alhamaydeh 等^[22]针对阿拉斯加不同地区多个风电塔结构,分析了采用不同基础形式对结构自振频率的影响。张德文等^[23]基于一维波动方程和概率分析的桩基抗震性能实用分析方法,提出了桩基础抗震性能的简易评价方法。可以预计,对于冲刷环境下在役风电塔来说,桨叶-塔体结构-基础-海床及潮流等的动力耦合相互作用影响因素将增多,其作用机理复杂,各方面研究有待深入。

本文选取高度为 88.5 m 的海上风电塔结构,在考虑潮位对风电塔结构影响的基础上,进一步研究动水压力对结构各项动力性能指标的影响规律,为今后深入的理论研究提供参考。

1 工程概况

某 1 000 MW 近海及潮间带风电场位于江苏省如东县海岸线以东的南黄海内陆架海域,在地貌上属于南黄海辐射沙脊群南翼。根据工程中提供的可行性研究报告,确立风电塔结构的基本计算数据(表 1)。参考国家标准《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2001),该区地震动峰值加速度为 0.10g(g 为重力加速度),相当于地震基本烈度为Ⅶ度。

表 1 上部结构参数

Tab. 1 Parameters of Superstructure

轮毂高度/m	风轮直径/m	上部结构质量/t	塔筒质量/t	塔顶直径/m	塔底直径/m
88.50	115.00	199.71	227.47	3.07	4.50

根据工程勘察资料,地面下 20 m 范围内各土

层的等效剪切波速 V_{se} 平均值均在 $140 \sim 150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010),工程场地土的类型属于中软场地土。沿着桩

身方向向下,土层类型分别为粉砂层、粉土层、粉砂层、层状粉土层、粉质粘土层以及粉细砂层。土的参数如表 2 所示。

表 2 土层及设计参数

Tab. 2 Soil Layers and Design Parameters

土层编号	场地土类型	深度/m	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	q_{sik}/kPa	$m/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-4})$	$\phi/(^{\circ})$	c_u/kPa	ϵ_c	y_c/mm
1	粉砂	4	9.8	15	1 400	32.0			
2	粉土	3	10.0	30	1 600	30.7			
3	粉砂	6	10.0	60	4 000	32.6			
3-夹	层状粉土	6	8.2	32	2 000	28.5			
4	粉质粘土	3	9.5	52	4 500		32	0.009	112.5
6-3	粉细砂	12	10.0	84	6 000	34.1			

注: γ 为土体有效重度; q_{sik} 为极限侧阻力标准值; m 为地基土水平抗力系数的比例系数; ϕ 为内摩擦角; c_u 为不排水剪切强度; ϵ_c 为实验室进行不扰动土样的不排水压缩试验时,出现 1/2 最大应力时的应变; y_c 为土体达到极限土抗力时的侧移值, $y_c=2.5\epsilon_c D$, D 为塔筒直径。

2 考虑动水压力影响的地震响应分析

本文基于 Morison 动水理论,忽略结构对水的影响,假设水对结构的作用是由未受扰动的加速度场和速度场引起的,故作用于结构上的动水力 F 由动水惯性力项和动水阻力项两部分组成,计算表达式为

$$F=F_1+F_D=(C_M-1)\rho V(\dot{u}-\ddot{x})+\frac{1}{2}C_D\rho A_p(u-\dot{x})|u-\dot{x}| \tag{1}$$

式中: F_1, F_D 分别为动水惯性力和动水阻力; ρ 为水的密度; V 为水下结构的体积; A_p 为结构截面面积; u, \dot{u} 分别为水的绝对速度和绝对加速度; \dot{x}, \ddot{x} 分别为结构的相对速度和相对加速度; C_M 为动水惯性力系数; C_D 为动水阻力系数。

由于忽略了结构对水的影响,因此结构运动不会产生水的运动,水质点的速度和加速度均为 0,故作用在单位高度圆柱体上沿 x 轴方向深度 z 的总动水力 f_1 可表述为

$$f_1=(C_M-1)\rho A_p(\dot{u}-\ddot{x})_z+(C_D-1)\rho \frac{\pi D^2}{4}(\dot{u}-\ddot{x})_z \tag{2}$$

由于式(1)右端阻力项为非线性,在具体计算中较为困难,因此采用拟线性化的近似计算,即

$$\dot{x}|\dot{x}|=x_{rms}\sqrt{\frac{8}{\pi}}\dot{x} \tag{3}$$

式中: x_{rms} 为速度的均方根。

经过线性化的动水力表达式可写为

$$F=-(C_M-1)\rho V\ddot{x}-\frac{1}{2}C_D\rho A_p\dot{x}|\dot{x}| \tag{4}$$

因而,整个水-结构相互作用体系在地震作用下的动力运动方程可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{\ddot{M}\ddot{x}}+\mathbf{\dot{C}\dot{x}}+\mathbf{Kx}=-\mathbf{\ddot{M}\ddot{x}}_g-(C_M-1)\rho V(\ddot{x}+\ddot{x}_g)- \\ \frac{1}{2}C_D\rho A_p x_{rms}\sqrt{8/\pi}(\dot{x}+u_g) \end{aligned} \tag{5}$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{C} 为阻尼矩阵; \mathbf{K} 为刚度矩阵; \ddot{x}_g 为地震动结构的相对加速度; u_g 为地震动水的绝对速度。

同时,地震作用下,除了发生共振的柔性结构以外,作用于结构上的动水附加阻力与动水附加惯性力相比很小,可以忽略不计^[14]。因此,在计算动力荷载作用于结构上的动水力时可忽略动水阻力项,而只考虑动水附加惯性力项,故整个桩基结构在地震作用下的动力方程可表示为

$$\mathbf{\ddot{M}\ddot{x}}+\mathbf{\dot{C}\dot{x}}+\mathbf{Kx}=-\mathbf{\ddot{M}\ddot{x}}_g-(C_M-1)\rho V(\ddot{x}+\ddot{x}_g) \tag{6}$$

采用有限元法计算动水力,结构动力响应模型如图 1 所示。假定结构两相邻单元之间水与结构的相对速度不变,并且作用在结构第 i 个节点的作用力为与 i 点相连单元受力总和的 1/2,故节点 i 处水的等效附加质量 M_{iw} 为

$$M_{iw}=\sum(C_M-1)\rho V l_{ij} \tag{7}$$

式中: j 为与节点 i 相邻单元的节点; l_{ij} 为第 ij 单元有效长度的 1/2。

因而整个结构体系在地震作用下的动力方程可以表示为

$$\mathbf{\ddot{M}\ddot{x}}+\mathbf{\dot{C}\dot{x}}+\mathbf{Kx}=-\mathbf{\ddot{M}\ddot{x}}_g-\mathbf{M_w}(\ddot{x}+\ddot{x}_g) \tag{8}$$

式中: M_w 为等效附加质量。

由此,在计算地震作用下动水对结构动力反应的影响时计算将得到较大程度的简化。求解出的动水附加惯性力项得以直接转化为附加质量的形式应用于水中结构动力运动方程的求解中,进而可以进行考虑动水作用下风电塔模型的地震响应分析。

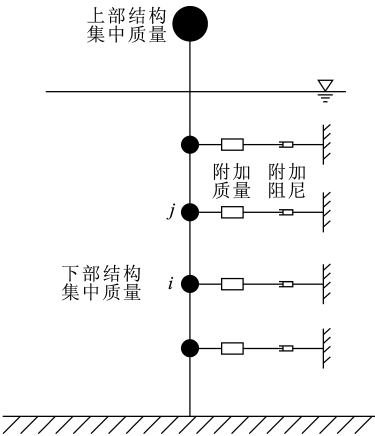


图 1 结构动力响应模型

Fig. 1 Structural Dynamic Response Model

2.1 基于附加质量法的有限元模型建立

利用 ANSYS,选取 Beam188 单元模拟整体风电塔结构,对于上部叶片、机舱,采用均质材料理性化模拟,并对风轮叶片进行刚性设置,总之,上部结构的建立仅起到附加质量的作用。对于桩周的水体,以附加质量的形式采用 Mass21 单元模拟。桩基础与土体的相互作用采用 Combin14 单元模拟,同样为 x,y,z 三个方向,竖向弹簧的间距为 1 m。整体结构的有限元计算模型如图 2 所示。

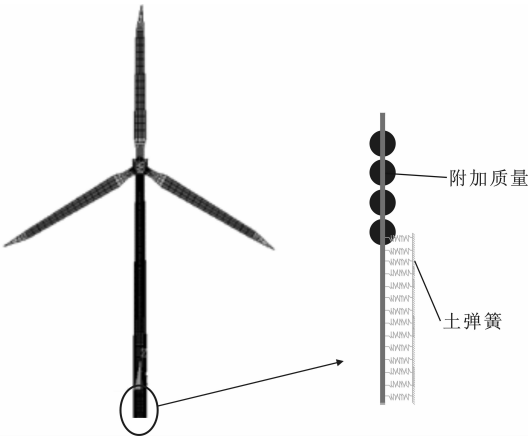


图 2 结构整体有限元模型

Fig. 2 Finite Element Model of Whole Structure

2.2 平均水深条件下结构动力分析

为了探究动水压力对结构的影响,在研究水深 2 m 状态的基础上,进行无水状态下结构的动力计算,并与平均水深条件下的动力响应进行对比分析。表 3 对比了无水、水深 2 m 两种条件下支撑结构不同高度上的位移、加速度和弯矩值。

从两者的各项数据对比来看,以附加质量的形式考虑动水压力时,水体的质量导致了桩基部分质

表 3 水深 2 m 与无水条件下结构动力响应的比较

Tab. 3 Comparison of Structural Dynamic Response Under 2 m Water Depth and Anhydrous Conditions

支撑结构 高度/m	位移/m		加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	
	无水	水深 2 m	无水	水深 2 m	无水	水深 2 m
75	1.348	1.351	7.104	7.126	8 421	8 509
65	1.049	1.051	5.702	5.718	19 420	19 490
55	0.793	0.794	5.243	5.297	31 070	31 170
45	0.588	0.589	6.013	6.109	42 870	42 990
35	0.399	0.400	5.925	6.042	53 650	53 770
25	0.254	0.254	4.944	5.038	64 650	64 760
15	0.151	0.151	3.643	3.741	77 800	77 890
0	0.050	0.050	1.619	1.689	99 980	100 100
-15	0.004	0.004	0.202	0.224	122 200	122 600
-45	0.000	0.000	0.000	0.000	67	68

量的增加,从而增大了结构在地震作用下的荷载效应,但其增大效应并不显著。与无水条件进行比较,2 m 水深引起的最大位移值仅增大了 0.003 m,最大加速度值增大了 $0.022 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,最大弯矩值相差 $400 \text{ kN} \cdot \text{m}$,差值变化率都在 5% 以内。

对于本文采用的实际工程研究对象,风电塔的轮毂高度达到了 88.5 m,结构的总质量(包括上部结构、塔筒、桩基础)为 735 t,因此,由 2 m 水深引起的动水压力对结构的动力响应影响并不大。

2.3 极端高潮位条件下结构动力分析

由上述分析可知,2 m 水深引起的动水压力对结构的动力响应并不显著,为了进一步探讨动水压力的影响,在平均水深条件分析的基础上,研究 50 年一遇极端高潮位(5 m)下结构的动力响应,探讨结构在极端设计条件下的受力性状。

表 4 列出了水深 2,5 m 条件下不同高度的位移、弯矩值。对 2 种水深下的位移和弯矩值进行对比分析可知:支撑结构塔筒顶部的最大位移值分别为 1.351,1.359 m;在位于土层深度 6 m 左右时(泥面标高为 -9 m),结构的弯矩值达到最大,分别为 122 600,123 900 $\text{kN} \cdot \text{m}$,此处的位移值已减小至 0.004~0.005 m,随着基础埋深的增加,弯矩和位移值都将迅速减小。此外,从对应数据的比较中可知,当风电塔结构所处的水深由 2 m 增加到 5 m 时,地震作用下支撑结构的动力响应值仅增大了不到 5%,且与无水条件下的差值变化率也在 5% 以内。

综上所述可知,对于位于海上潮间带、高度为 88.5 m 的风电塔结构,浅水深引起的动水压力对结构的动力响应影响并不大。

表 4 不同水深条件下结构位移、弯矩比较

Tab. 4 Comparison of Structural Displacement and Bending Moment Under Different Depths of Water

支撑结构 高度/m	位移/m		弯矩/(kN·m)	
	水深 2 m	水深 5 m	水深 2 m	水深 5 m
75	1.351	1.359	8 509	8 768
50	0.687	0.693	36 640	36 930
25	0.254	0.264	64 760	65 140
0	0.050	0.054	100 100	100 400
-15	0.004	0.005	122 600	123 900
-30	2.221×10^{-4}	2.247×10^{-4}	10 400	10 570
-45	0.000	0.000	68	68

3 考虑冲刷效应影响的结构自振特性分析

由于桩基局部冲刷受到动力压力、土层地质条件、桩径等众多因素的影响,问题十分复杂。在考虑动水压力的基础上,采用数值分析方法重点考察风电塔支撑结构以及下部钢管桩基础的动力特性,分析下部桩基不同冲刷深度条件下支撑结构的模态特性,研究基础冲刷对海上风电塔支撑系统动力特性的影响,揭示结构动力特性随桩基冲刷深度的变化规律。不同冲刷深度的计算模型如图 3 所示。

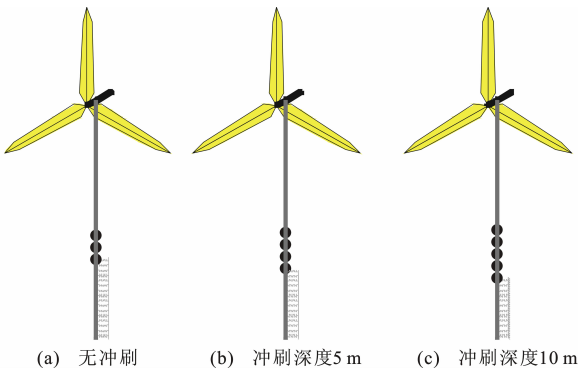


图 3 不同冲刷深度的计算模型

Fig. 3 Calculation Models of Different Scour Depths

3.1 基本冲刷条件的确定

在中国桩基局部冲刷的经验公式中,公式(9)是最为常用的计算公式之一,本文采用该公式计算小直径圆柱周围的局部冲刷,即

$$\frac{h_b}{h} = 17.4k_1k_2\left(\frac{B}{h}\right)^{0.326}\left(\frac{d_{50}}{h}\right)^{0.167}Fr^{0.628} \quad (9)$$

式中: h_b 为潮流作用下基础的局部冲刷深度; h' 为全潮最大水深; B 为全潮最大水深条件下的平均阻水宽度,即为桩径; d_{50} 为河床泥沙的平均中值粒径; Fr 为水流 Froude 数, $Fr = u' / \sqrt{gh'}$, u' 为全潮最大流速; k_1, k_2 分别为基础桩平面系数、垂直布置系数。

本文考虑基础的局部冲刷效应,选取水深分别为 2,5 m,局部冲刷深度分别为 5,10 m,考虑不同的水深和冲刷深度的组合,对结构的动力特性进行计算和分析。

3.2 不同冲刷条件下风电塔支撑结构的自振分析

在研究考虑局部冲刷条件下风电塔支撑结构的动力响应之前,对结构的自振特性进行研究,不同基础局部冲刷深度下支撑结构的自振频率列于表 5,水深取为 2 m。

表 5 不同冲刷深度条件下结构自振频率对比

Tab. 5 Comparison of Structural Natural Frequencies Under Different Scour Depths

阶次	无冲刷时 频率/Hz	冲刷深度 5 m		冲刷深度 10 m	
		频率/Hz	降幅/%	频率/Hz	降幅/%
1	0.306	0.301	1.66	0.291	5.15
2	0.311	0.305	1.97	0.295	5.42
3	0.916	0.906	1.10	0.890	2.92
4	1.225	1.205	1.66	1.172	4.52
5	1.460	1.406	3.84	1.361	7.27
6	3.095	2.942	5.20	2.715	14.00
7	3.223	2.985	7.97	2.774	16.19
8	7.017	5.819	20.59	5.683	23.47
9	7.061	6.560	7.64	6.002	17.64
10	8.186	6.597	24.09	6.124	33.67

注:降幅为不同冲刷深度时自振频率相对无冲刷时的下降幅度。

由表 5 可知:在无冲刷的条件下,风电结构的 1 阶振动模态反映了桩基础以上塔筒结构的弯曲变形,对应频率为 0.306 Hz;2 阶频率为 0.311 Hz,其振型仍为上部结构的弯曲变形振动;从第 3 阶开始,结构的振型频率明显增大,为 0.916 Hz,结构开始出现塔筒结构的二阶弯曲与下部桩基础的组合变形振动;水深为 2,5 m 条件下结构的自振频率相差不大。

随着冲刷深度的增加,结构的振动频率开始下降。冲刷深度为 5 m 时,支撑结构的 1 阶、2 阶模态频率分别为 0.301 Hz 和 0.305 Hz,对应塔筒结构的弯曲变形振动;冲刷深度为 10 m 时,支撑结构的前 2 阶模态频率分别减小到 0.291,0.295 Hz。

通常为了避开风机叶轮激振频率,风电塔结构第 1 阶频率应处于 1 倍到 3 倍的风机叶轮激振频率之内,以避免共振的影响。海上冲刷及潮流等因素会改变各级风电塔的自振频率,为避免可能产生不良的共振现象,应对冲刷作用予以关注。

4 结 语

(1)基于附加质量法考虑动水压力,由于水体引

起了结构质量的增加,从而增大了结构的动力响应,对于本工程结构而言,增大效应并不明显,当风电塔结构所处条件分别为无水、平均水深 2 m、极端高潮位 5 m 时,地震作用下支撑结构的动力响应差值率在 5% 以内。浅水深引起的动水压力对本文高度为 88.5 m 风电塔结构的动力响应影响不大。

(2)通过对 3 种不同冲刷条件下结构的模态分析可知,综合考虑桩-土相互作用、动水压力,冲刷深度由 0 m 增加到 10 m,结构的同一阶频率最大降幅达到 30%,冲刷效应对高阶频率产生较大的影响。当基础的冲刷深度越大时,土层对结构的约束作用越小,结构的整体刚度减小。

(3)对于风电塔结构动力特性的研究,本文只对冲刷作用下结构的自振特性进行了分析,对于冲刷引起的结构自振周期变化可能导致的风力发电机组振动耦合效应以及考虑桨叶振动、冲刷作用耦合效应的风电塔结构整体安全性能评价等还需进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 杨万理,李 乔. 动水压力对连续刚构桥梁地震响应的影响[J]. 西南交通大学学报,2012,47(3):373-378.
YANG Wan-li, LI Qiao. Effects of Hydrodynamic Pressure on Seismic Response of Continuous Rigid-Framed Bridge [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2012,47(3):373-378.
- [2] 张国明,宋 波. 动水压力对深水桥梁性能设计的影响[J]. 北京科技大学学报,2009,31(9):1086-1094.
ZHANG Guo-ming, SONG Bo. Effect of Hydrodynamic Pressure on Performance-based Design of a Deepwater Bridge[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2009,31(9):1086-1094.
- [3] 杨 庸. 动水压力对深水高墩大跨度连续刚构动力特性的影响[J]. 四川建筑,2014,32(2):168-171.
YANG Yong. Influence of Hydrodynamic Pressure on Dynamic Characteristics of Deepwater High-pier and Long-span Continuous Rigid Frame[J]. Sichuan Architecture,2014,32(2):168-171.
- [4] CHOPRA A K,GOYAL A. Simplified Earthquake Analysis of Intake-outlet Towers[J]. Journal of Structural Engineering,1991,117(3):767-788.
- [5] LIAW C Y,CHOPRA A K. Dynamic of Towers Surrounded by Water [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,1974,3(1):33-49.
- [6] 白志刚,裴 丽,阳 磊. 潮间带风电场水动力数值模

拟[J]. 港工技术,2012,49(3):1-4.

BAI Zhi-gang, PEI Li, YANG Lei. Hydrodynamic Numerical Simulation for Wind Farm in Intertidal Zone [J]. Port Engineering Technology,2012,49(3):1-4.

- [7] 李富荣,陈国兴,王志华. 考虑动水压力影响的单柱式桥墩地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(2):114-121.

LI Fu-rong, CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua. Seismic Responses of Single-column Pier Considering the Effects of Hydrodynamic Pressure [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008,28(2):114-121.

- [8] 田树刚,陈清军. 考虑流固耦合的近海风电支撑体系自振特性分析[J]. 力学季刊,2014,35(3):473-481.

TIAN Shu-gang, CHEN Qing-jun. Analysis of Dynamic Characteristics of Offshore Wind Power Foundation with Consideration of Fluid-structure Interaction [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2014, 35 (3):473-481.

- [9] 张陆陈,骆少泽. 近海风力发电机基础桩群潮汐水动力脉动特性试验研究[J]. 工程力学,2010,27(增1):236-239.

ZHANG Lu-chen, LUO Shao-ze. Study on Tidal Flow Fluctuating Pressure Properties of Offshore Wind Generators Pile Group Foundation [J]. Engineering Mechanics,2010,27(S1):236-239.

- [10] 荣 冰,张 嘎,张建民. 水平荷载作用下风电机组基础的离心模型试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(2):428-432.

RONG Bing, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Centrifuge Model Tests for Pile Foundation of Wind Power Generation Under Horizontal Loads [J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(2):428-432.

- [11] 李凯文,宋 波,黄 帅. 考虑流固耦合效应的海上单桩式风电塔动力响应研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(4):318-324.

LI Kai-wen, SONG Bo, HUANG Shuai. Dynamic Response Analysis of Offshore Wind Tower Founded on Monopile Considering FSI [J]. Journal of Building Structures,2014,35(4):318-324.

- [12] 棚邊隆,飯田泰彦,増田博,等. 風力発電設備の動的特性と耐震設計の基礎的考察[J]. NKK 技報,2002 (177):64-69.

TANABE Takashi, IIDA Yasuhiko, MASUDA Hiroshi, et al. A Fundamental Study on Dynamic Characteristics and the Seismic Design of Wind Turbine Generator Systems [J]. NKK Technical Report, 2002 (177):64-69.

- [13] 佐野健彦,石原孟.非線形 FEM 解析に基づく風車無筋ペデスタルの耐力評価式の提案[J].構造工學論文集,2014,60:134-143.
SANO Takehiko, ISHIHARA Takeshi. Design Formulae on Concrete Capacity of Wind Turbines Pedestal Based on the Non-linear FEM Analysis[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 60: 134-143.
- [14] 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.
- [15] 戴靠山, 公常清, 黄益超, 等. 适用于风电塔抗震设计的低阻尼反应谱[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 40-46.
DAI Kao-shan, GONG Chang-qing, HUANG Yi-chao, et al. Response Spectra for Seismic Design of Low Damping Wind Turbine Towers[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(6): 40-46.
- [16] 戴靠山, 王健泽, 毛日丰, 等. 新型风电塔减振器的概念设计和试验初步验证[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增1): 90-95.
DAI Kao-shan, WANG Jian-ze, MAO Ri-feng, et al. Conceptual Design and Shaking Table Test of a New Passive Damper for Wind Turbine Towers[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S1): 90-95.
- [17] 高春彦, 李斌, 史治宇. 钢管混凝土风电塔架节点非线性有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增1): 140-146.
GAO Chun-yan, LI Bin, SHI Zhi-yu. Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete-filled Steel Tubular Wind Turbine Tower Joints[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S1): 140-146.
- [18] 陈阳, 宋波, 韦伟, 等. 在役风电塔结构的最不利风-震组合作用响应分析[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(7): 941-947.
CHEN Yang, SONG Bo, WEI Wei, et al. Dynamic Response Analysis on the Structure of Wind Power Towers Under the Most Unfavorable Wind-earthquake Combination Action[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(7): 941-947.
- [19] 张鹏林, 曹力, 刘九道, 等. 风电塔筒在三种工况下的静动态研究[J]. 机械设计与制造, 2013(10): 200-202.
ZHANG Peng-lin, CAO Li, LIU Jiu-xiao, et al. Research on Wind Turbine in the Three Conditions of Static and Dynamic[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(10): 200-202.
- [20] 宋波, 曾洁. 风电塔非线性地震动力响应规律与极限值评价[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(10): 1382-1389.
SONG Bo, ZENG Jie. Nonlinear Seismic Dynamic Response and Critical Value Evaluation Based on Limit States of Wind Turbine Tower Structures[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(10): 1382-1389.
- [21] 公常清, 戴靠山, 任晓崧. 随机地震动摇摆分量对风电塔结构地震响应影响的分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增1): 275-280.
GONG Chang-qing, DAI Kao-shan, REN Xiao-song. Seismic Analysis of Wind Turbine Towers Under Rocking Earthquake Components[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 276-280.
- [22] ALHAMAYDEH M, HUSSAIN S. Optimized Frequency-based Foundation Design for Wind Turbine Towers Utilizing Soil-structure Interaction[J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, 348(7): 1470-1487.
- [23] 张德文, 张建民. 桩基础抗震性能的简易评价方法[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 69-83.
ZHANG De-wen, ZHANG Jian-min. Simplified Method for Evaluating Seismic Performance of Pile Foundation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 69-83.
- [24] 赖伟, 郑铁华, 雷勇. Morison 方程中动水阻力项对桥梁桩柱地震反应的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(4): 163-168.
LAI Wei, ZHENG Tie-hua, LEI Yong. The Effect of Hydrodynamic Drag Force in Morison Equation on the Seismic Response of Piles[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(4): 163-168.