

文章编号: 0254-0096(2020)06-0047-06

船舶撞击下海上风电复合筒基础裂纹扩展研究

王海军^{1,2}, 周小日^{1,2}, 练继建^{1,2}

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘 要: 为研究海上风电复合筒基础遭遇船舶撞击下的开裂情况, 采用 ABAQUS 软件, 运用扩展有限元方法 (XFEM) 模拟分析 5000 t 船舶以不同速度撞击复合筒基础过渡段时结构混凝土裂纹扩展变化状态。结果表明: 5000 t 船舶以 2 m/s 的速度撞击时, 该实验复合筒基础结构安全; 碰撞持续的时间和最大接触力随速度的增大而增加; 该方法可较为准确地预测基础过渡段在冲击荷载下的裂纹扩展情况, 可为海上风力发电机组基础结构设计提供参考依据。

关键词: 海上风电; 船舶撞击; 扩展有限元; 数值模拟; 复合筒基础; 裂纹扩展

中图分类号: P752

文献标志码: A

0 引 言

海上风电是开发潜力巨大的可再生能源。在中国近海风能可开发量达 5 亿 kW, 相当于约 22 个三峡工程。《可再生能源发展十三五规划》强调十三五重点是加快风电开发, 到 2020 年海上风电开工建设 1000 万 kW^[1], 可见海上风能开发与利用已成为中国能源未来转型的重要途径。针对中国近海海域地质与风能资源条件, 练继建等^[2]提出一种新型的海上风电复合筒基础及相关的施工技术。复合筒基础由弧形钢筋混凝土过渡段、预应力钢绞线、钢筋混凝土筒顶盖、下部分舱筒体等构成, 如图 1 所示。海上工程的环境复杂, 尤其是航

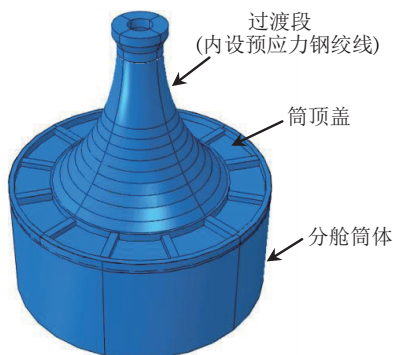


图1 海上风电复合筒基础

Fig. 1 Composite bucket foundation for offshore wind turbine

道附近易遭受船舶的撞击导致工程事故。因此深入研究船舶撞击下复合筒基础过渡段的裂纹扩展情况, 对复合筒基础的长期安全运行至关重要。

目前研究船舶撞击海上风力发电机组基础破坏的文献较少。朱斌等^[3]开展了水平静荷载和撞击荷载作用下高桩基础的 1g 大比尺模型试验研究, 获得了桩顶水平静动力作用力及响应。郝二通等^[4]采用 LS-DYNA 软件从能量变化、最大撞击力等角度对海上风电单桩基础受船舶撞击过程进行了研究。丁红岩等^[5]采用 ABAQUS 显示算法分析了复合筒在船舶撞击下的混凝土部分的塑性区发展。本文在上述研究基础上, 运用扩展有限元方法 (XFEM) 模拟分析船舶撞击复合筒基础混凝土过渡段部位的响应, 研究该部位的混凝土开裂过程。

1 撞击与开裂扩展机理

1.1 碰撞理论

德国的 Woisin 开展了一系列高能动态船舶碰撞模型试验, 试验结果表明碰撞船舶的运动及其同周围水体的相互作用可通过引入水动系数加以考虑^[6]。Minorsky^[7]提出船舶碰撞过程中的动能损失公式, 并对撞击角度、撞击位置和撞击速度等因素进行了探

收稿日期: 2017-12-05

基金项目: 创新方法工作专项(2016IM030100); 天津市科技计划项目(16PTGCCX00160); 高等学校学科创新引智计划(B14012)

通信作者: 王海军(1978—), 男, 博士、副教授, 主要从事水利工程科学方面的研究。bookwhj@163.com

讨。Pedersen 等^[8]提出了基于刚体碰撞力学的一般理论,分析了船舶碰撞过程中的能量耗散问题。王君杰等^[9]针对刚性壁情况和 2 个工程实例进行了船舶撞击力的仿真计算,并与各国规范公式作对比以及进行分析评述。

1.2 开裂破坏模型

扩展有限元法(XFEM)通过加强常规有限元来逼近裂纹扩展,其位移近似函数为^[10-12]:

$$u_{xfem}(x)=\sum_{i\in N}u_iN_i(x)+\sum_{j\in N^{disc}}N_j(x)H(x)a_j+\sum_{k\in N^{tip}}\left[N_k(x)\left(\sum_{\alpha=1}^4F_{\alpha}(x)b_{k\alpha}\right)\right]$$

(1)

式中, N ——所有单元节点的集合; N^{disc} ——完全被裂纹贯穿单元节点的集合; N^{tip} ——含裂尖单元节点的集合; $H(x)$ ——裂纹面的间断跃阶函数; $N_i(x)$ 、 $N_j(x)$ 、 $N_k(x)$ ——节点 i 、 j 、 k 的形函数; u_i ——节点 i 位移向量的连续部分; a_j ——节点 j 与阶跃函数相关的节点加强自由度; $F_{\alpha}(x)$ ——裂纹尖端应力裂尖函数; $b_{k\alpha}$ ——裂尖节点加强自由度。

沿裂纹面的间断跃阶函数^[10-12] $H(x)$:

$$H(x)=\begin{cases}1, & (X-X^*)\cdot n\geqslant 0 \\ -1, & \text{其他}\end{cases}$$

(2)

式中, X ——单元积分内的高斯点; X^* ——位于裂纹上距离 X 最近的点; n ——裂纹的外法向量。

对于各向同性弹性体,用水平集函数构造的裂尖函数:

$$[F_{\alpha}(r,\theta),\alpha=1-4]=\left[\sqrt{r}\sin\frac{\theta}{2},\sqrt{r}\cos\frac{\theta}{2},\sqrt{r}\sin\frac{\theta}{2}\sin\theta,\sqrt{r}\cos\frac{\theta}{2}\sin\theta\right]$$

(3)

式中, (r,θ) ——以裂尖为坐标原点的局部坐标系。

表 2 土体参数
Table 2 Soil parameters

土层	厚度/m	浮密度/kg·m ⁻³	压缩模量/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉土	4.1	980	9.0	0.3	11.0	29.0
淤泥质粉质粘土	6.8	780	3.1	0.4	14.0	12.1
粉砂	10.6	1030	13.1	0.2	4.4	33.5
粉质粘土	—	890	3.8	0.4	21.8	13.7

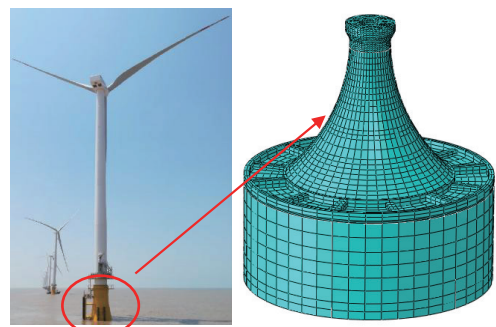
断裂能是计算模型中一个重要的参数。于晓中等^[13]通过实验得到水灰比为 0.5、抗压强度 23.8 MPa 的混凝土断裂能为 140.4 N/m。混凝土作为一种具有明显

通过该方法可较好模拟碰撞情况下的钢筋混凝土开裂过程。

2 船舶撞击精细模拟

2.1 模型及参数

实验复合筒基础下部筒体直径 30 m,高度为 12 m,筒裙为钢结构,壁厚 20 mm;过渡段高 19.8 m,顶部外直径 6.1 m,壁厚为 600 mm,为预应力钢筋混凝土,钢绞线均匀布置 48 束,钢筋体积配筋率约 2%,如图 2 所示。钢绞线直径为 15.2 mm,屈服强度为 1320 MPa,混凝土材料参数见表 1。



a. 样机照片 b. 结构网格模型
图 2 复合筒基础模型

Fig. 2 Composite bucket foundation model

表 1 混凝土材料参数
Table 1 Concrete parameter

抗压强度 f_c /MPa	抗拉强度 f_t /MPa	密度 ρ / kg·m ⁻³	弹性模 量 E /GPa	断裂能 G_f /N·m ⁻¹
38.5	2.85	2500	36	160

地基部分水平方向模拟范围 150 m,高度方向 50 m。主要的土体参数见表 2。设计水深 13.34 m,50 年一遇的波浪要素:有效波高 $H=4.87$ m,平均周期 $T=8.63$ s,波长 $L=85.7$ m。

尺寸效应的准脆性材料,其断裂能在 100~200 N/m 之间^[14]。本文未作混凝土材料断裂能实验,根据上述范围取 160 N/m。

约束条件:筒壁及筒顶盖与土设置接触作用,其中切向方向设置摩擦接触,法向方向设置硬接触。土层的侧面边界条件为约束水平方向(X 、 Z 向)位移,土层底面设置固定约束。网格全部采用实体单元,模型整体单元数量约为 33000 个。

2.2 风浪流荷载计算

风荷载,结构上风荷载可参考 API 规范风力计算:

$$F=0.5C_d\rho_aDHU^2 \quad (4)$$

式中, C_d ——形状系数, ρ_a ——空气密度; D ——构件直径; H ——构件高度; U ——风速。

浪流荷载,计算中忽略波浪的绕射的影响,采用 Morrison 方程:

$$F=\rho_w\frac{\pi D^2}{4}C_Ma(x,t)+\frac{1}{2}C_D\rho_wDu(x,t)|u(x,t)| \quad (5)$$

式中, ρ_w ——海水密度; D ——构件直径; C_M ——惯性力系数,取值为 2.0; C_D ——拖拽力系数,取值为 1.2; u ——流速。

2.3 撞击力

海洋工程结构物应当具备抵抗 5000 t 船舶以 2 m/s 的速度撞击的能力^[15]。假定一艘 5000 t 船舶,船满载排水量为 6200 DWT,附连水系数取 1.05,船只以 2 m/s 正向撞上筒型基础的过渡段。以此验算复合筒基础在船舶撞击下是否安全。多个文献和规范给出了船舶最大撞击力的不同计算公式,计算结果存在较大差异。以上述船舶为例计算船舶最大撞击力,具体值比较见表 3,各计算公式来源于文献[6]。

表3 最大撞击力公式计算结果对比

Table 3 Comparison of different maximum impact force formula

计算公式来源	最大撞击力/MN
Woisin公式	42.5
修正的Woisin公式	28.0
Pedersen公式	30.0
AASHTO规范公式	19.8
欧洲规范公式	19.7
中国《铁路桥涵设计基本规范》	6.8
中国《公路桥涵设计通用规范》	5.2

实际碰撞过程的时间通常难以准确估计,需采取合理的碰撞时间。从表 3 可知,采用中国规范计算值相对偏小,美国规范、欧洲规范和修正的 Woisin 公式算出

的最大撞击力相当,而用 Pedersen 公式和 Woisin 公式算出的值偏大,这与文献[6]结论一致。根据比较结果选定修正的 Woisin 公式计算船舶撞击最大撞击力: 1) 船速 2 m/s 时,最大撞击力是 28 MN; 2) 船速 3 m/s 时,最大撞击力是 36 MN; 3) 船速 4 m/s 时,最大撞击力是 44 MN。

撞击处水深 13.34 m,有效波高 4.87 m。由于船舶的类型繁多,发生撞击的位置可能是船艏、球鼻艏等多个部位。在此假定撞击作用点 1 位置为 15.80 m(到海床面的距离),撞击作用点 2 为 16.75 m(到海床面的距离)。以船舶撞击这 2 个作用点来分析不同撞击位置对复合筒结构的影响。上部传递到基础的荷载值:轴向荷载 $V=4930.9$ kN, 横向荷载 $H=646$ kN, 弯矩荷载 $M=49215$ kN·m。风力发电机组基础所承受的荷载主要由风力发电机组和塔架自重作用下的竖向力,风轮受到风作用时的气动推力,塔架表面受到的分布风荷载等组成。

2.4 预应力

本设计对筒型基础预应力加载采用降温法,即在预应力钢绞线上施加温度荷载,使预应力钢绞线收缩,从而使混凝土获得预应力。钢绞线初始预应力设置为 1190 MPa。

3 数值模拟结果与分析

3.1 作用点1撞击分析

船舶撞击的模拟结果见图 3、图 4。作用点 1 离泥面高度为 15.8 m。计算分为 2 个阶段,第 1 阶段为风力发电机组正常运行时结构的响应,设置 50 个扩展步;第 2 阶段为船舶撞击时结构响应,设置 50 个扩展步: 1) 第 1 阶段在风浪流及塔筒等自重作用下,过渡段颈部两侧的混凝土同在第 25 扩展步时出现裂纹,裂纹影响长度约 0.16 m,随后裂纹随着扩展步的增长而逐渐扩展,裂纹影响深度可达 10 cm。由于自重和惯性力作用,裂纹并非沿水平向扩展。最终颈部裂纹影响长度约 0.25 m 为并趋于稳定。由此可知过渡段颈部属于相对薄弱环节。该处是几何形状变化较大区域,连接承台和弧形过渡段,出现一定程度的应力集中。2) 第 2 阶段以 2 m/s 速度冲击下,扩展步 34 步时过渡段下部开始出现裂纹;同样以 3、4 m/s 的速度冲击下,分别在扩展步 26 步、21 步产生裂纹,具体开裂情况见表 4 及图 3。

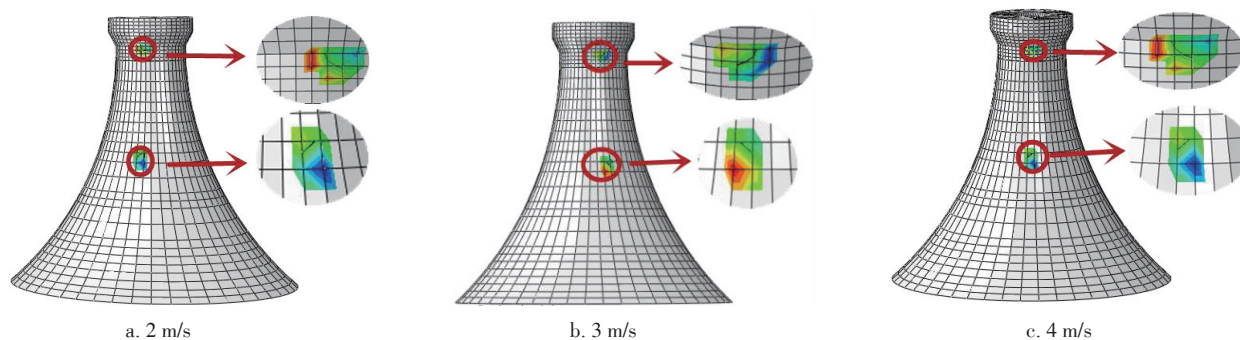


图3 不同撞击速度下结构的开裂图(作用点1)

Fig. 3 Cracking figure under different impact velocity (application point 1)

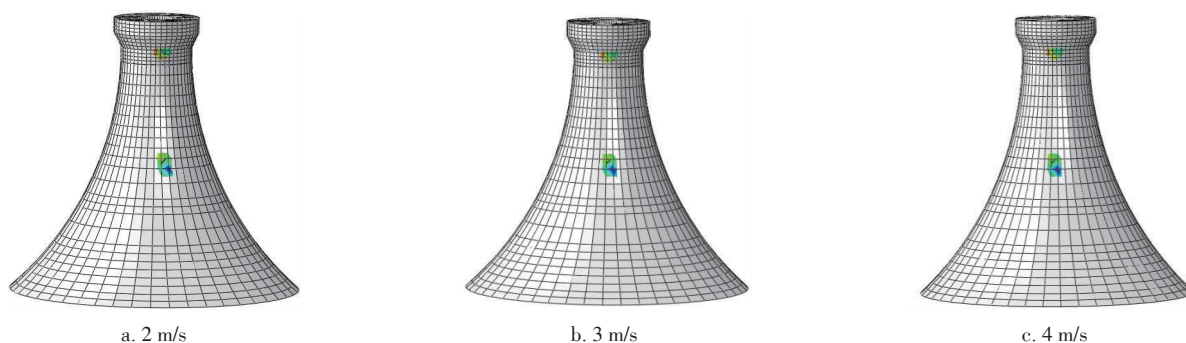


图4 不同撞击速度下结构的开裂图(作用点2)

Fig. 4 Cracking figure under different impact velocity (application point 2)

从表4可知,撞击速度越快,复合筒基础过渡段开裂时间越早,裂缝的影响区域越大。在撞击速度为3、4 m/s时,过渡段混凝土壁存在裂缝影响深度为0.6 m。开裂后下部混凝土易遭受海水侵蚀,加速内部钢筋锈蚀,应及时对裂纹采取修复措施,如灌浆法、填补法等,确保结构安全。

表4 不同撞击速度下结构的开裂情况(作用点1)

Table 4 Cracking status under different impact velocity (application point 1)

撞速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	开裂扩展步	开裂影响
2	34	下部裂纹扩展影响 长度约0.70 m,深度约0.40 m
3	26	下部裂纹扩展影响 长度约0.97 m,深度约0.60 m
4	21	下部裂纹扩展影响 长度约1.20 m,深度约0.60 m

3.2 作用点2撞击分析

为分析船舶不同撞击位置对结构撞击后的影响,选取作用点2进行分析,不同撞击速度下结构的开裂情况如表5所示。

表5 不同撞击速度下结构的开裂情况(作用点2)

Table 5 Cracking status under different impact velocity (application point 2)

撞速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	扩展步	开裂影响
2	24	下部裂纹扩展至 长度约0.80 m,深度约0.55 m
3	18	下部裂纹扩展影响 长度约1.15 m,深度约0.60 m
4	15	下部裂纹扩展影响 长度约1.32 m,贯深度约0.60 m

3.3 作用点1、作用点2不同速度开裂特征情况对比

Statusxfem 是表征开裂情况状态的指标,取值范围在0~1之间,Statusxfem 值为0时,表示结构内部无裂纹,参数值为1时代表该结构裂纹开展完全。介于0~1之间表示部分损坏或裂纹。从图5可知,在正常运行载荷作用下,结构颈部裂纹扩展完全并趋于稳定(第1阶段已完成)。过渡段下部的裂纹是在船舶撞击载荷作用下很快产生的,但裂纹并未发展完全,Statusxfem 最终稳定在0.4。对比相同撞击速度不同水面高度的作用点1、作用点2情况,撞击点越高,过渡段裂纹产生裂纹扩

展步越早。相同位置, 撞击速度越大, 过渡段产生裂纹相隔也越短。

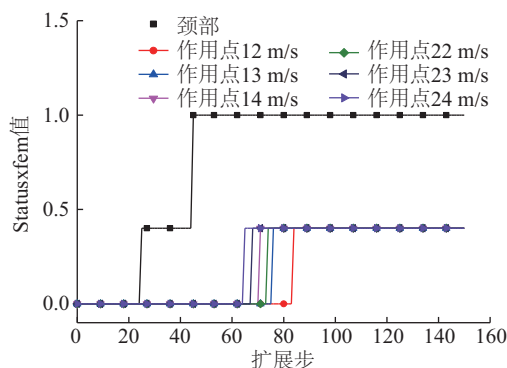


图5 船舶撞击下裂纹扩展情况

Fig. 5 Crack propagation under ship collision

4 结 论

采用 ABAQUS 软件, 运用 XFEM 模拟分析了 5000 t 船舶以不同速度撞击复合筒基础过渡段时结构混凝土裂纹扩展变化状态, 得出:

1) 5000 t 级船舶以 2 m/s 速度撞击复合筒基础过渡段时, 撞击点附近将产生裂缝, 但不影响结构的整体性, 基础结构整体安全。

2) 随着船舶速度的增大、撞击点的位置升高, 撞击部位的裂缝影响范围和深度增加。

[参考文献]

- [1] 国家发展改革委. 可再生能源发展十三五规划[Z]. 2016, 12.
National Development and Reform Commission People's Republic of China. The 13th five-year plan for the development of renewable energy[Z]. 2016, 12.
- [2] 练继建, 陈飞, 杨旭, 等. 海上风机复合筒基础负压沉放调平[J]. 天津大学学报, 2014, 47(11): 987-993.
LIAN J J, CHEN F, YANG X, et al. Suction installation and leveling of composite bucket foundation for offshore wind turbines[J]. Journal of Tianjin University, 2014, 47(11): 987-993.
- [3] 朱斌, 孔令刚, 郭杰峰, 等. 高桩基础水平静载和撞击模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1537-1545.
ZHU B, KONG L G, GUO J F, et al. Model tests on elevated piles subjected to lateral static and impact loading[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(10): 1537-1545.
- [4] DING H Y, ZHU Q, ZHANG P Y. Dynamic simulation

on collision between ship and offshore wind turbine[J]. Transactions of Tianjin University, 2014, 20(1): 1-6.

- [5] 郝二通, 柳英洲, 柳春光. 海上风机单桩基础受船舶撞击的数值研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 7-13.
HAO E T, LIU Y Z, LIU C G. Numerical simulation of monopole foundation of an offshore wind turbine subjected to ship impact[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(3): 7-13.
- [6] 黄志斌, 罗旗帜. 船桥碰撞力的评述和展望[J]. 佛山科学技术学院学报, 2007, 25(5): 36-38.
HUANG Z B, LUO Q Z. Review and prospect of ship collision force[J]. Journal of Foshan University, 2007, 9, 25(5): 36-38.
- [7] MINORSKY V U. An analysis of ship collisions with reference to protection of nuclear power plants[J]. Ship research, 1958, 3(2): 1-4.
- [8] PEDERSEN P T, ZHANG S. On impact mechanics in ship collisions[J]. Marine structures, 1998, 11(10): 429-449.
- [9] 王君杰, 颜海泉, 钱华. 基于碰撞仿真的桥梁船撞力规范公式的比较研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(2): 68-73.
WANG J J, YAN H Q, QIAN H. Comparisons of design formula of ship collision for bridges based on FEM simulations[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2006, 23(2): 68-73.
- [10] 张社荣, 王高辉, 孙博, 等. 基于 XFEM 的强震区砼重力坝开裂与配筋抗震措施研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 137-142.
ZHANG S R, WANG G H, SUN B, et al. Seismic cracking and reinforcement analysis of concrete gravity dam based on XFEM[J]. Journal of vibration and shock, 2013, 32(6): 137-142.
- [11] 董玉文, 任青文. 基于 XFEM 的混凝土开裂数值模拟研究[J]. 重庆交通大学学报, 2009, 28(1): 36-40.
DONG Y W, REN Q W. Study on numerical simulation of crack growth of concrete based on XFEM[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2009, 28(1): 36-40.
- [12] 靳旭, 董羽惠. 重力坝开裂过程扩展有限元数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(33): 9100-9104, 9109.
JIN X, DONG Y H. Finite element numerical simulation for propagation of gravity dam crack process[J]. Science technology and engineering, 2012, 12(33): 9100-9104, 9109.
- [13] 于晓中, 张玉美, 郭桂兰, 等. 混凝土断裂能 G_F [J]. 水

- 利学报, 1987, 18(7): 32-39.
- YU X Z, ZHANG Y M, GUO G L, et al. Fracture energy of concrete[J]. Journal of hydraulic engineering, 1987, 18(7), 32-39.
- [14] 郑安兴. 基于XFEM的重力坝裂纹开展数值分析研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010, 6.
- ZHENG A X. Study on numerical simulation of crack growth of gravity dam based on XFEM [D]. Kunming: Kunming Univserty of Science and Techonology, 2010, 6.
- [15] DNV-RP-C204, Design against accidental loads[S].

RESEARCH ON CRACK PROPAGATION OF COMPOSITE BUCKET FOUNDATION FOR OFFSHORE WIND TURBINES IMPACTED BY SHIP

Wang Haijun^{1,2}, Zhou Xiaori^{1,2}, Lian Jijian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The concrete part of a composite bucket foundation for offshore wind turbine may engender crack when a ship hit it. In this paper, the extended finite element method (XFEM) of ABAQUS software is adopted to simulate the structural crack propagation of the composite bucket foundation when a 5000 t vessel at different speeds impacts its transition section. The results show that the experimental composite bucket foundation is safe when it is impacted by a 5000 t ship at a speed of 2 m/s. The duration of collision and maximum contact force increase with the velocity. The method can accurately predict cracks propagation of the foundation under different impact load. It is helpful for the design of the infrastructure.

Keywords: offshore wind power; ship impact; XFEM; numerical simulation; composite bucket foundation; crack propagation