

基于离散元-有限元模型的冰激锥体 海洋平台结构振动分析

邵 帅¹, 周国丰², 王帅霖¹, 季顺迎^{*1}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024; 2. 中科华核电技术研究院, 深圳 518124)

摘 要:冰荷载是影响海洋平台结构及其上部设备作业安全的重要因素。针对海洋平台与海冰相互作用的动力过程,采用具有粘接-破碎性能的离散元方法(DEM)对海冰的破碎特性进行分析,采用有限元方法(FEM)对海洋平台结构的动力响应进行计算;同时考虑海冰与海洋平台结构的耦合作用,将海冰的离散元方法与海洋平台结构的有限元方法相结合,建立了冰激海洋平台结构振动的 DEM-FEM 模型,并由此计算海冰作用下海洋平台结构的振动响应以及冰荷载特性。

关键词:有限元;离散元;耦合模型;海洋平台;冰荷载

中图分类号: P751; O347 文献标志码: A doi: 10.7511/jslx201505014

1 引 言

在寒区海域,海洋平台结构长期服役在复杂的海洋环境中并受到多种环境荷载的作用。冰激海洋平台结构的强烈振动是影响平台结构安全,以及导致其累积损伤和疲劳寿命的重要因素。在我国渤海,为降低冰激平台结构的振动响应,在水面处安装了具有良好抗冰性能的正倒锥体。它使海冰由直立腿平台结构上挤压破坏模式转变为锥体平台结构上的弯曲破坏模式。这不仅明显地降低了冰力幅值,更有效地避免了直立结构的稳态振动现象^[1-3]。在海冰与锥体平台结构的耦合作用过程中,海冰的破碎模式是影响冰荷载幅值和频率的重要因素^[4-6]。受海冰物理力学性质、海冰动力学以及平台结构特性等因素的影响,海冰与平台结构之间的耦合作用极为复杂。

虽然海冰与海洋平台结构存在强烈的动力耦合作用,但由于该耦合作用的复杂性,一般在冰荷载问题研究中将海洋平台视为刚体结构,而在分析海洋平台结构的动力特性时则采用简化的冰力函数处理冰荷载^[7-9]。随着冰激海洋平台结构振动的

深入开展,需要进一步研究海冰与海洋平台结构之间的动力耦合作用,揭示海冰的破坏机理,更合理地确定冰荷载的动力特性。

由于海冰在与海洋平台结构的作用过程中不断发生破碎,并呈现为由连续体向散体转变的特性。为此,离散元方法在模拟海冰破碎现象方面具有很强的优势^[10-13]。采用具有粘接-破碎功能的颗粒单元,并建立适用于海冰材料的破坏准则,可有效地计算海冰的破碎规律。对于海洋平台结构的动力特性,则可采用有限元模型进行数值计算^[9,14]。当考虑海冰与海洋平台结构的耦合作用时,可将海冰离散元模型与海洋平台结构的有限元模型相结合,建立相应的离散元-有限元(即 DEM-FEM)耦合模型。自 20 世纪 90 年代 DEM-FEM 模型不断发展和完善,目前已应用于岩土工程和化学过程等领域,是一种有效处理颗粒材料与工程结构和连续介质耦合作用的多尺度数值方法^[15-17]。

由此,本文分别采用离散元和有限元模型分析海冰的破碎和锥体海洋平台结构的振动现象,并通过 DEM-FEM 模型分析海冰与海洋平台间的耦合作用,从而有效确定动冰力特性并揭示冰激结构振动的内在机理。

2 海冰与海洋平台结构耦合的 DEM-FEM 模型

2.1 海冰离散元模型

为分析海冰与海洋平台作用过程中的破碎特

收稿日期: 2014-08-15; 修改稿收到日期: 2015-05-18.

基金项目: 国家自然科学基金(41176012); 国家海洋公益性行业科研专项(201105016, 201205007); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130041110010)资助项目.

作者简介: 邵 帅(1987-), 男, 博士生;
季顺迎*(1972-), 男, 博士, 教授
(E-mail: jisy@dlut.edu.cn).

性,本文采用具有粘接-破碎功能的球体颗粒单元构造平整冰。将等粒径的球形颗粒规则地排列形成平整冰,每个粘接单元间具有一定的粘结强度以传递两个单元间的作用力和力矩;当接触力超过粘结强度时,粘接单元则发生断裂。海冰离散单元排列细节以及相邻颗粒间粘结如图 1 所示。粘接单元间的法向和剪应力可由弹性梁在组合荷载下的拉伸、扭转和弯曲理论进行计算,即^[7,18]

$$\sigma_{\max} = \frac{F_n}{A} + \frac{M_s R}{I}, \tau_{\max} = \frac{F_s}{A} + \frac{M_n R}{J} \quad (1)$$

式中 A, J 和 I 为粘接区域横截面的面积、极惯性矩和惯性矩, F_n 和 F_s 为单元粘接面上的法向和切向作用力, M_n 和 M_s 为粘接区域横截面的扭矩和力矩, R 为粘接面半径。

粘接颗粒之间的失效模式采用考虑累积损伤的线性软化模型^[10,19,20],其失效准则如图 2 所示,并可表示为

$$f = k_{nf} u_n = (1 - \omega) k_n u_n \quad (2)$$

式中 k_{nf} 为法向弹性损伤模量, ω 为损伤变量。其中 $\omega = 0$ 代表单元间是完全粘结的或已经发生断裂但没有进一步扩展; $0 < \omega < 1$ 代表单元间发生了断裂且得到了进一步扩展。 ω 可表示为

$$\omega = [\phi(u_n) - 1] / \phi(u_n) \quad (3)$$

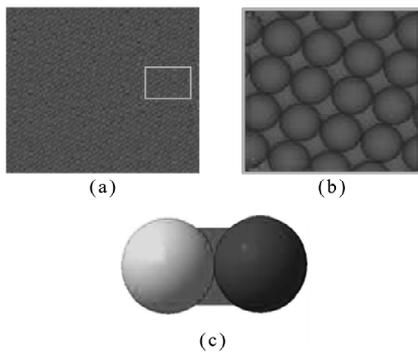


图 1 海冰的离散元模型

Fig. 1 Discrete element model of sea ice

式中 $\phi(u_n)$ 为法向相对位移 u_n 的函数,可表示为

$$\phi(u_n) = \begin{cases} 1 & (u_n \leq u_0) \\ \frac{k_n^2 u_n}{k_{ns} n_b + k_n n_b - k_{ns} k_n u_n} & (u_0 \leq u_n \leq u_{\max}) \\ \infty & (u_{\max} \leq u_n) \end{cases} \quad (4)$$

式中 n_b 为法向拉伸强度。

2.2 锥体海洋平台结构的有限元模型

本文对辽东湾 JZ20-2 MUQ 锥体海洋平台的冰激结构振动进行分析。该平台结构主要由三部分组成,即上部模块、导管架和桩基,如图 3 所示。该平台为四桩腿锥体结构,水深为 13.5 m,水线处桩腿间距为 14 m,甲板下部高度为 16.0 m,上部质量为 1700 t。4 个直径为 4 m 的破冰锥安装于水平面上的桩腿处。每个破冰锥的质量为 4t。导管架部分为钢管焊接的空间梁结构,横截面为圆环形,其为有限元模型的主体。上部结构包括上部梁格、甲板及各种作业设备。为简化计算,将上部结构简化为四个梁单元,其对应的海洋平台有限元模型如图 4 所示。导管架平台的钢材弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7800 kg/m³。本文建立的海洋平台结构有限元模型共有 116 个单元,68 个节点,每个节点在空间有 6 个自由度。

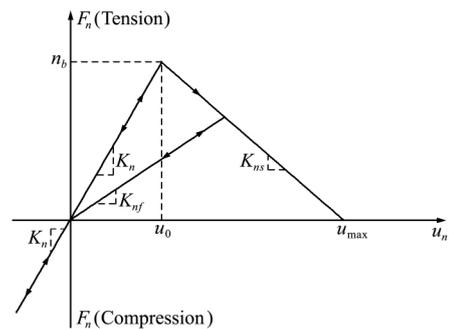


图 2 粘接单元断裂的线性软化模型

Fig. 2 Linear softening model of bonded element breaking process



图 3 渤海 JZ20-2 MUQ 锥体导管架海洋平台

Fig. 3 JZ20-2 MUQ conical jacket platform in the Bohai Sea

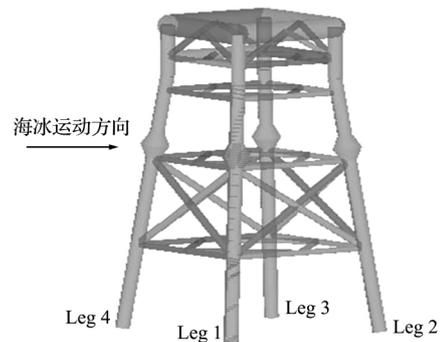


图 4 JZ20-2-MUQ 锥体平台的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of JZ20-2-MUQ conical jacket platform

2.3 冰激海洋平台结构振动的 DEM-FEM 模型

在采用离散元方法分析海冰运动及破碎特性时,将海冰单元对海洋平台结构的载荷作为力边界条件传递到有限元模型,由此计算海洋平台的动力响应,再进一步将更新后的平台位移作为离散元的位移边界条件。通过海冰与海洋平台结构的接触判断及等效节点力的计算实现海冰与平台结构的相互作用。在海冰与海洋平台结构的作用过程中,海冰与平台结构接触的位置是随机的,为此需确定海洋平台在冰载荷作用下的等效节点载荷。

在局部坐标系下,假定单元的两端固定如图 5 所示,由静力平衡可求得固定端的反力为

$$R_A = -\frac{(3a+b)Pb^2}{L^3}, R_B = -\frac{(3b+a)Pa^2}{L^3} \quad (5)$$

式中 R_A 和 R_B 为梁两端的反力, P 为外载荷, L 为单元长度, a 为距离 A 点的长度, b 为距离 B 点的长度。在由单元固端力计算单元的等效结点载荷时,将固端局部坐标下的内力转换到整体坐标。

在海洋平台结构的有限元计算中,结构振动响应采用逐步积分法中的 Newmark 方法计算。在保证离散元和有限元边界条件传递的基础上,时间步长的选取直接影响 DEM-FEM 耦合算法的实现。一般离散元的时间步长要远小于有限元的时间步长。

对于采用线性接触模型的离散元方法,其时间步长一般取颗粒间二元接触时间的 $1/20 \sim 1/50$ 。该二元接触时间定义为

$$T_{bc} = \pi / \sqrt{(2k_n/M)(1 - \zeta_n^2)} \quad (6)$$

式中 T_{bc} 为颗粒二元接触时间, M 为颗粒的有效质量, k_n 为颗粒法向刚度系数, ζ_n 为法向阻尼系数。

有限元计算的时间步长选取与系统的最小自振周期有关。

$$\Delta t \leq T/20 \quad (7)$$

式中 Δt 为有限元的时间步长, T 为系统的最小自振周期。

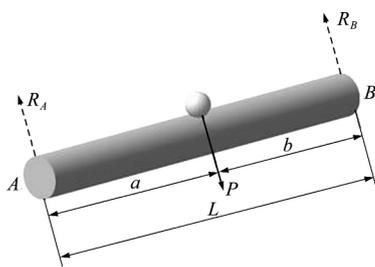


图 5 梁单元等效力简化模型

Fig. 5 Simplified model of equivalent force for beam element

为获得准确的计算结果,本文采取统一的时间步长,即用离散元时间步长。在以后工作中,还需要进一步改进有限元和离散元模型在不同时间步长下的参数传递问题,从而在保障计算稳定性条件下提高整体的计算效率。

3 冰激平台结构振动的数值计算

本文采用 Fortran 语言编写了海冰与海洋平台耦合作用的计算程序,在当前计算规模下(离散元共 13800 个颗粒;有限元共 116 个单元,68 个节点;共 278 万步)共耗时 24 h。在海冰与平台结构耦合作用的 DEM-FEM 计算中,主要参数列表 1。本文海冰的粘接强度为温度和盐度的函数,其由海冰物理力学性质试验确定^[21]。由此计算的不同时刻海冰与锥体海洋平台结构相互作用过程如图 6 所示,可以看出平整冰在锥体作用下的破碎情况,海冰在桩腿切割下发生弯曲破坏并形成两条明显的水道。图 7 为海冰与平台结构作用时的现场监测情况和数值模拟结果,可以发现其具有很强的相似性。

计算得到海洋平台结构在水平方向的加速度和位移如图 8 和图 9 所示。在海冰与海洋平台相互

表 1 海冰与海洋平台结构耦合作用主要计算参数
Tab. 1 Computational parameters in the interaction of sea ice and offshore platform structure

参数	数值	参数	数值
海冰密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	920	平整冰尺寸/m	20×24
颗粒直径/mm	200	颗粒单元数目	13800
冰厚/m	0.2	冰速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.35
颗粒间摩擦系数	0.10	颗粒间回弹系数	0.80
颗粒-桩腿摩擦系数	0.10	颗粒-桩腿回弹系数	0.50
颗粒法向粘接强度/MPa	0.6	颗粒法向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	8.0×10^7
颗粒切向粘接强度/MPa	0.6	颗粒切向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	4.0×10^7

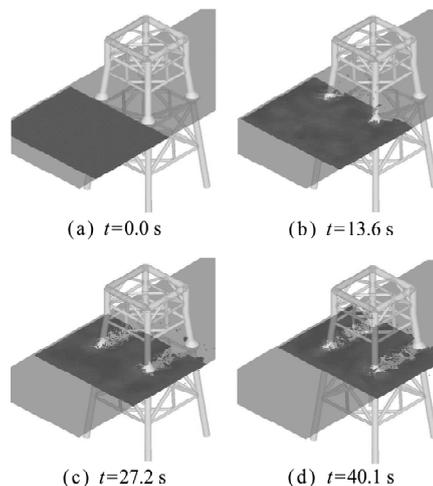


图 6 DEM-FEM 模拟的海冰与锥体平台相互作用过程

Fig. 6 Interaction process between sea ice and conical platform structure simulated with DEM-FEM



图 7 海冰与锥体平台相互作用时的断裂现象

Fig. 7 Breakage of ice cover during the interaction between sea ice and conical jacket platform

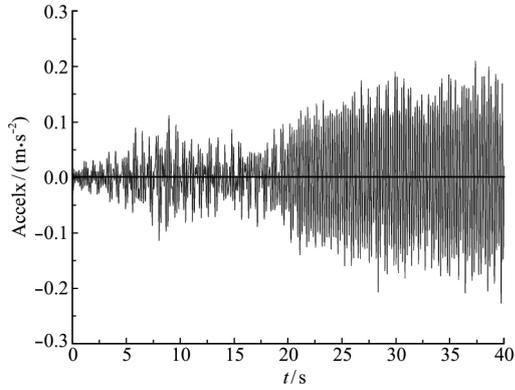


图 8 海洋平台在水平方向上的冰激振动加速度
Fig. 8 Ice induced acceleration of jacket platform in horizontal direction

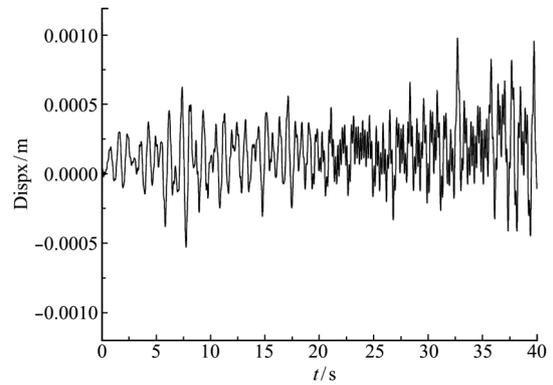
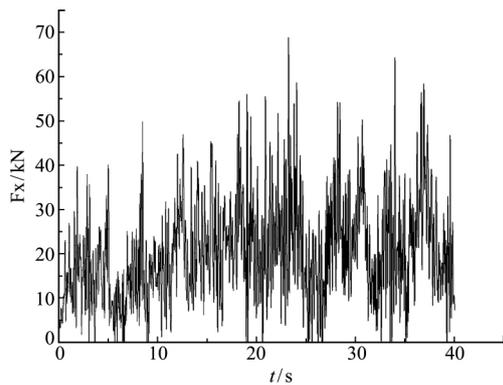
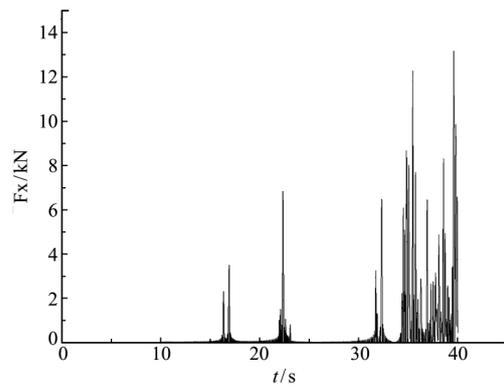


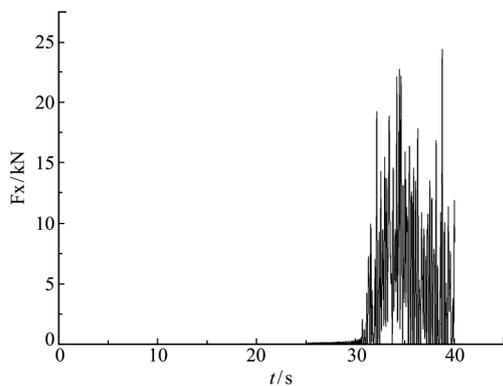
图 9 海洋平台水平方向上的冰激振动位移
Fig. 9 Ice induced displacement of jacket platform in horizontal direction



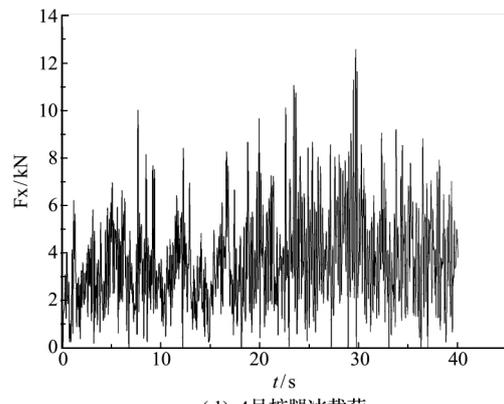
(a) 1号桩腿冰载荷
(a) Ice load on leg 1



(b) 2号桩腿冰载荷
(b) Ice load on leg 2



(c) 3号桩腿冰载荷
(c) Ice load on leg 3



(d) 4号桩腿冰载荷
(d) Ice load on leg 4

图 10 海洋平台桩腿在水平方向上的冰载荷

Fig. 10 Ice force on legs of jacket platform in horizontal direction

作用的初始阶段(0 s~18 s),海洋平台受冰载荷作用振动缓慢增加,此时平台最大加速度为 0.12 m/s^2 ,最大位移为 0.63 mm 。随着海冰的持续作用(18 s~40 s),海洋平台的振动逐渐稳定,稳定后的最大加速度为 0.23 m/s^2 ,最大位移为 0.98 mm 。

计算得到的海洋平台四个桩腿在水平方向的动冰力时程如图 10 所示。其中 1 号和 4 号桩腿位于迎冰面,其与海冰持续作用。从冰载荷时程中可以发现,这两个桩腿上的冰载荷呈现多个峰值,并具有很强的随机性。在海冰与锥体海洋平台的相互作用过程中,冰排呈现出初次断裂、爬升、二次断裂和清除的过程,并由此引起交变动冰力^[2,3]。冰排的断裂长度是决定冰载荷大小和周期的重要因素,并受海冰强度、厚度、速度以及锥角、锥径等因素的影响。这两个桩腿上的最大冰力峰分别为 62.8 kN 和 68.8 kN 。2 号和 3 号桩腿位于平台结构后侧,由于受前侧桩腿的影响呈现明显的多桩腿遮蔽效应,其冰力值明显低于迎冰面桩腿。

5 结 论

在海冰与海洋平台结构的相互作用中,海冰呈现出由连续体向散体转化的持续破碎过程,海洋平台结构在海冰作用下具有明显的振动现象。本文采用具有粘接-破碎特性的离散元方法模拟海冰的破碎过程,采用梁单元有限元方法分析海洋平台结构在海冰作用下的振动特性。在此基础上将海冰离散元和海洋结构有限元相结合,建立了冰激海洋平台结构振动的 DEM-FEM 耦合方法。采用该耦合方法对多桩锥体平台结构的冰激振动进行了数值分析,确定了相应的动冰力和冰振响应。在以上研究的基础上还需要对 DEM-FEM 耦合方法进一步完善,并通过海冰现场监测的实测数据进行模型检验和计算参数确定。

参考文献(References):

[1] Qu Y, Yue Q, Bi X, et al. A random ice force model for narrow conical structures[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, **45**:148-157.
 [2] Yue Q, Qu Y, Bi X, et al. Ice force spectrum on narrow conical structures[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, **49**:161-169.
 [3] Xu N, Yue Q, Qu Y, et al. Results of field monitoring on ice actions on conical structures[J]. *Journal of Ocean Mechanics and Engineering*, 2011, **133**:041502.

[4] 岳前进,毕祥军,于 晓,等. 锥体结构的冰激振动与冰力函数[J]. *土木工程学报*, 2003, **36**(2):17-19. (YUE Qian-jin, BI Xiang-jun, YU Xiao, et al. Ice-induced vibration and ice force function of conical structure [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, **36**(2):17-19. (in Chinese))
 [5] Browne T, Taylor R, Jordaan I, et al. Small-scale ice indentation tests with variable structural compliance [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, **88**:2-9.
 [6] Tian Y, Huang Y. The dynamic ice loads on conical structures[J]. *Ocean Engineering*, 2013, **59**:37-46.
 [7] 季顺迎,狄少丞,李 正,等. 海冰与直立结构相互作用的离散单元数值模拟[J]. *工程力学*, 2013, **30**(1):463-469. (JI Shun-ying, DI Shao-cheng, LI Zheng, et al. Discrete element modeling of interaction between sea ice and vertical offshore structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, **30**(1):463-469. (in Chinese))
 [8] Liu X, Li G, Oberlies R, et al. Research on short-term dynamic ice cases for dynamic analysis of ice-resistant jacket platform in the Bohai gulf[J]. *Marine Structures*, 2009, **22**(3):457-479.
 [9] 季顺迎,王安良,车啸飞,等. 锥体导管架海洋平台冰激结构振动响应分析[J]. *海洋工程*, 2011, **29**(2):33-39. (JI Shun-ying, WANG An-liang, CHE Xiao-fei, et al. Analysis of ice-induced structure vibration of offshore jacket platform with ice breaking cone[J]. *The Ocean Engineering*, 2011, **29**(2):33-39. (in Chinese))
 [10] 狄少丞,季顺迎. 海冰与自升式海洋平台相互作用 GPU 离散元模拟[J]. *力学学报*, 2014, **46**(4):562-571. (DI Shao-cheng, JI Shun-ying. GPU-based discrete element modeling of interaction between sea ice and jack-up platform structure[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, **46**(4):562-571. (in Chinese))
 [11] Lau M, Lawrence K P, Rothenburg L. Discrete element analysis of ice loads on ships and structures[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2011, **6**(3):211-221.
 [12] Polojärvi A, Tuhkuri J. On modeling cohesive ridge keel punch through tests with a combined finite-discrete element method[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, **85**:191-205.
 [13] Sun S, Shen H H. Simulation of pancake ice load on a circular cylinder in a wave and current field[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, **78**:31-39.

- [14] 段忠东,欧进萍,周道成,等. 导管架海洋平台结构冰致强迫振动分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, **41**(10):1-6. (DUAN Zhong-dong, OU Jin-ping, ZHOU Dao-cheng, et al. Analysis of ice-induced forced vibration for offshore jacket platform structure[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, **41**(10):1-6. (in Chinese))
- [15] Chung Y C, Ooi J Y. Linking of discrete element modeling with finite element analysis for analysing structures in contact with particulate solid[J]. *Powder Technology*, 2012, **217**:107-120.
- [16] Latham J P, Munjiza A, Garcia X, et al. Three-dimensional particle shape acquisition and use of shape library for DEM and FEM/DEM simulation [J]. *Minerals Engineering*, 2008, **21**:797-805.
- [17] Zang M, Gao W, Lei Z. A contact algorithm for 3D discrete and finite element contact problems based on penalty function method[J]. *Computational Mechanics*, 2011, **48**:541-550.
- [18] Potyondy D O, Cundall P A. Abonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, **41**:1329-1364.
- [19] Yang B, Jiao Y, Lei S. A study on the effects of microparameters on macroproperties for specimens created by bonded particles[J]. *Engineering Computations*, 2006, **23**(6):607-631.
- [20] Tarokh A, Fakhimi A. Discrete element simulation of the effect of particle size on the size of fracture process zone in quasi-brittle materials[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, **62**:51-60.
- [21] Ji S, Wang A, Su J, et al. Experimental studies on elastic modulus and flexural strength of sea ice in the Bohai Sea [J]. *ASCE Journal of Cold Regions Engineering*, 2011, **25**(4):182-195.

Ice induced vibration of concial offshore platform structure based on discrete element model-finite element model

SHAO Shuai¹, ZHOU Guo-feng², WANG Shuai-lin¹, JI Shun-ying^{*1}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen 518124, China)

Abstract: Ice force is an important factor which affects the operating safety of jacket platform structure and its equipment. According to the dynamic interaction process between sea ice and offshore structure, the discrete element method (DEM) is employed to analyze the breaking process of sea ice, and the finite element method (FEM) is used to simulate the dynamic response of jacket platform. Considering the interaction between sea ice and jacket platform, the DEM-FEM numerical method is proposed to analyze the ice-induced vibration of jacket platform and the dynamic ice loads.

Key words: finite element method; discrete element method; coupled model; jacket platform; ice load