

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2017.02.002

波浪对渤海近岸海冰冲击作用的数值模拟*

杨春忠, 刘长根, 房河宇, 马慧敏

(天津大学力学系, 天津 300350, Email: czyang@tju.edu.cn)

摘 要: 海冰在波浪冲击作用下可能会发生断裂, 通过数值模拟定量地描述波浪引起的海冰断裂对海工结构的运行安全以及分析海冰断裂处海水与大气之间的热交换有重要作用。该文利用建立的三维数值波浪水池, 将海冰视为刚性平板, 结合渤海冬季海冰、波浪的相关参数, 研究海冰受波浪冲击的垂向冲击力、水平冲击力、弯矩和最大弯曲正应力随波高、冰长及冰厚的变化规律; 并结合渤海海冰的弯曲强度, 推断海冰发生断裂的极限参数, 结果表明: 在渤海海域某些特定条件下, 海冰断裂极限波高、冰长和最小冰厚分别为 0.504 m、4.273 m 和 0.098 m。

关 键 字: 波浪; 海冰; 数值模拟; 断裂

中图分类号: P731.22; P75

文献标识码: A

Numerical simulation of wave impact on sea ice in the Bohai sea

YANG Chun-zhong, LIU Chang-gen, FANG He-yu, MA Hui-min

(Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The fracture of sea ice may occur under the effect of wave impact. Describing the fracture of sea ice caused by wave quantitatively with numerical simulation methods is important to ensure the security of coastal structure and analysis the heat exchange between sea water and atmosphere where sea ice's fracture happens. First, a 3D numerical wave flume is developed, sea ice is regarded as rigid plate; then, the change rule is studied when vertical impact force, horizontal impact force, bending moment and maximum bending stress of sea ice changing with wave height, ice length and ice thickness; furthermore, referring to the bending strength of sea ice in the Bohai sea, limit parameters are analyzed when sea ice fracture occurs. The results show that the maximum wave height is 0.504 m, the maximum ice length is 4.273 m and the minimum ice thickness is 0.098 m under given conditions in the Bohai sea.

Key words: wave; sea ice; numerical simulation; fracture

* 收稿日期: 2016-06-12(2016-12-21 修改稿)

作者简介: 杨春忠(1991—), 男, 河北承德人, 硕士研究生。

通信作者: 刘长根, Email: lchg@tju.edu.cn

Received: June 12, 2016 (**Revised** December 21, 2016)

Biography: YANG Chun-zhong (1991—), Male, Master Candidate.

Corresponding author: LIU Chang-gen, Email: lchg@tju.edu.cn

引言

渤海由于水浅热容量小、与外海热交换少,冬季常受亚洲大陆高压活动以及寒潮的影响,热量流失较大,使渤海成为地球上冬季结冰的最低纬度海域之一。冰盖在波浪、风和流的作用下可能会断裂,断裂的海冰又往往伴随着冰块间的重新冻结、重叠和堆积^[1]。

针对海浪与海冰的作用问题,现有研究成果多集中在水波在冰下的传播和衰减规律,其理论基础基于势流理论和水波的辐射理论。Broström 等^[2]研究了波浪在浮冰下传播的散射模型和波浪在冰凌下的传播模型。Williams 等^[3,4]基于波能守恒方程提出了一种在海冰边缘区波浪与海冰的相互作用模型,用来计算海洋表面波在海冰下传播的衰减以及伴随的海上浮冰破碎。

海冰在波浪作用下的断裂问题,目前国内外的研究工作多集中在模型试验以及现场观测。Bennetts 等^[5]通过物模实验研究了海浪经过浮冰的传播规律。李春花等^[6]根据渤海海冰的特点,分析了海冰在波浪作用下的断裂机理,并通过物模试验验证了波浪作用下海冰断裂理论的正确性。王永学等^[7]通过实验室非冻结可破碎模拟冰材料进行了波浪引起冰排断裂的物模试验,试验研究表明冰长 L_i 与波长 L 的比值对有限长海冰断裂时的极限波高有很大的影响。Toyota 等^[8]在威德尔海的西北部现场测量了当地海域浮冰尺寸,结果表明,波浪-海冰的相互作用在决定浮冰尺寸分布上起着重要作用。实际上,关于波浪与海冰的作用,理论研究与模型试验及现场测量发展不协调^[2],理论研究更多将固定冰视为无限长或半无限长平板,这在实验室或数值模拟中很难实现。

近岸固定海冰在波浪作用下产生的变形非常小,可以忽略其对周围流场的影响,可将海冰简化为刚性接岸水平板,而分析内部应力时则将其视为弹性平板考虑。本文基于 FLUENT 软件构造出三维数值波浪水池,利用波浪冲击平板实验,对波浪水池进行验证;研究海冰所受的垂向冲击力、水平冲击力、弯矩和最大弯曲正应力随波高、冰长及冰厚的变化规律,并结合渤海海冰的弯曲强度来分析海冰的断裂情况。

1 波浪与海冰作用的数学模型及验证

1.1 控制方程

数值计算是在三维数值波浪水池中进行的,数

值波浪水池以多相流理论为基础。海冰附近的液气两相为不可压缩黏性流体,其流动控制方程为连续性方程和 RANS 方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + f_i \quad (2)$$

式中: u_i ($i=1,2,3$) 为 x 、 y 和 z 方向的雷诺平均速度;流体的密度 $\rho = \sum_{q=1}^2 a_q \rho_q$, 其中体积分 a_q 为单元内第 q 相流体体积分, 并且有 $\sum_{q=1}^2 a_q = 1$; p 为压强; ν 为流体的运动黏性系数; $-\partial(\overline{u'_i u'_j})/\partial x_j$ 为雷诺应力项; f_i 为体积力。

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型可以有效模拟分布较均匀、湍流结构较小的湍流流动, 适合本文研究的问题, 因此采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型来封闭 RANS 方程。

数值波浪水池自由面的波动是采用 VOF 方法来追踪的, 其方程可写为

$$\frac{\partial a_q}{\partial t} + \frac{\partial (ua_q)}{\partial x} + \frac{\partial (va_q)}{\partial y} + \frac{\partial (wa_q)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中: $q=1$ 为空气相, $q=2$ 为水相; a_1 和 a_2 分别是空气相和水相的体积分, 并定义 $a_q = 0.5$ 处为自由面波形。

1.2 边界条件及数值算法

水池左侧采用速度入口边界条件, 利用用户自定义函数给定入射波的速度以及波面高度表达式, 水池上侧采用压力出口边界条件, 将出口压力值设定为一个标准大气压^[9]; 前后两个侧面采用对称边界条件, 将右侧取为无滑移壁面条件, 底面及平板各壁面也均采用无滑移壁面条件, 如图 1 所示。压力与速度耦合采用 PISO 算法, 压力方程采用 Body Force Weighted 格式, 动量方程采用 QUICK 格式。

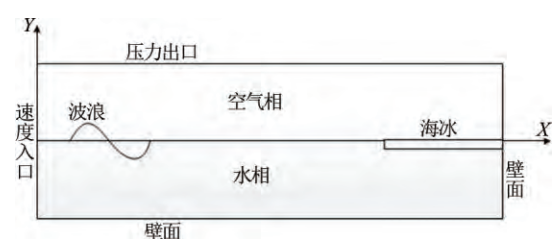


图 1 波浪冲击海冰示意图
Fig.1 The schematic diagram of wave impact on sea ice

1.3 数学模型的验证

任冰等^[10]通过物理模型试验研究了单向波对位于浪溅区的水平板的冲击作用。水槽长 50 m, 宽 3 m, 深 1 m, 试验波浪为规则波, 正向入射, 波高为 0.075 m, 周期 T 分别为 0.75 s、1.0 s、1.25 s、1.5 s、1.75 s 和 2.0 s, 可计算出波长分别为 0.876 m、1.512 m、2.179 m、2.825 m、3.447 m 和 4.054 m, 试验水深 0.5 m。水平板长 0.6 m, 宽 0.6 m, 厚 0.02 m, 平板底面距离静水面的距离为 0, 水平板边缘距离两边水槽壁的距离为 1.2 m, 模型底面布置了 16 个压力传感器来得到波浪冲击水平板的冲击力。图 2 为试验装置的俯视图。

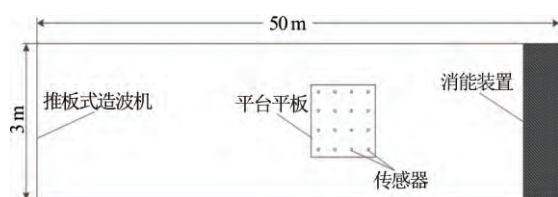


图2 实验布置示意图

Fig.2 The schematic diagram of wave impact on sea ice

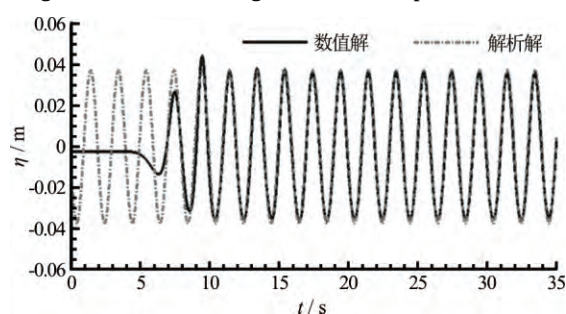


图3 波长 $L = 4.05$ m 时 3 倍波长处波浪数值解与理论解对比

Fig.3 Comparison of simulation results and analytic solution ($x/l = 3.0$) when $L = 4.05$ m

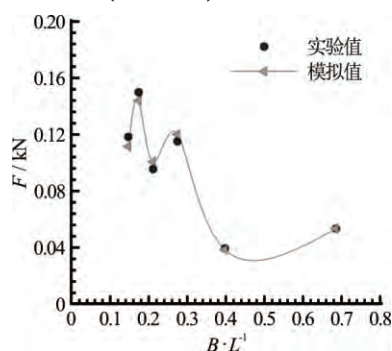


图4 平板冲击力的数值模拟结果与实验值对比
Fig.4 Comparison of plate impact force's simulation results and experiment data

数值模拟的边界条件及数值算法参考 1.2 节, 不同在于模拟过程中水池末端建立消波区, 采用动量方程加阻尼源项的消波方法消除水池末端壁面

反射波^[11]。为验证数值水池的造波效果, 取波长 4.05 m 时距离造波边界处长度 x 为 3 倍波长处的数值解, 其与理论解的对比结果如图 3 所示。由图中可知, 造波效果较好。图 4 为平板所受波浪冲击力数值模拟值与实验值的对比结果, 其中 B/L 为板宽 B 与波长 L 之比, 曲线为对数值试验点的拟合结果。由图中可知, 数值模拟值与实验值基本吻合, 由此验证对海冰受波浪冲击的受力特性进行数值模拟是可行的。

1.4 海冰不同截面弯曲应力分析

海冰与右侧边界相接, 在后续计算中, 因波长不变, 故计算域长度均取 70 m, 约五倍波长, 高度均取 10 m, 计算域和海冰宽度均取单位宽度, 水深均取 5 m。选取海水密度为 1025 kg/m^3 , 海冰密度取 914.5 kg/m^3 , 假设海冰在无波浪时根部所受弯矩为 0, 即重力与浮力平衡, 则海冰浸在海水里的高度为 0.892 倍冰厚。计算域为液-气两相流, 在自由液面处对网格进行加密, 经过网格无关性检验, 一个波高范围内约有 20 个网格, 一个波长范围内约有 30 个网格。经过时间无关性检验, 时间步长取 0.01 s。海冰长 8 m、厚 0.2 m, 波高 0.1 m, 计算域网格划分如图 5 所示。

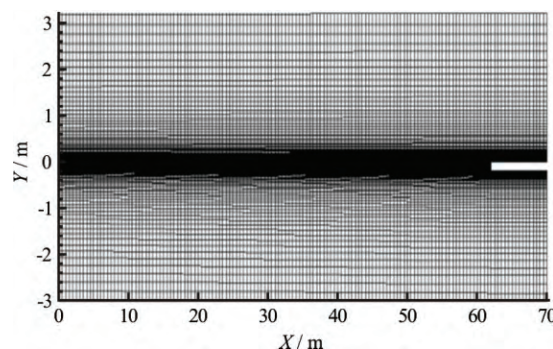


图5 网格划分示意图

Fig.5 The schematic diagram of mesh

依据弹性梁弯曲理论^[6], 海冰弯曲正应力 σ 与弯矩 M 的关系如式 (4) 所示, W_{ice} 为海冰的抗弯截面系数, 对于宽为 b , 高为 h 的矩形截面, $W_{\text{ice}} = bh^2/6$ 。

$$\sigma = \frac{M}{W_{\text{ice}}} \quad (4)$$

取海冰截面坐标为 $x = 63 \text{ m}$ 、 64 m 、 66 m 、 68 m 和 70 m 的截面, 各个截面弯矩、下表面弯曲正应力如图 6 所示。从图中可以看到, 随着截面坐标的增加, 不同截面的弯矩和下表面弯曲正应力逐渐增长, 根部数值最大, 若近岸固定平整海冰在波浪作用下发生断裂, 则根部首先发生断裂。用根部最大

弯曲正应力峰值与海冰弯曲强度比较,若达到海冰弯曲强度,则判定海冰发生弯曲断裂。

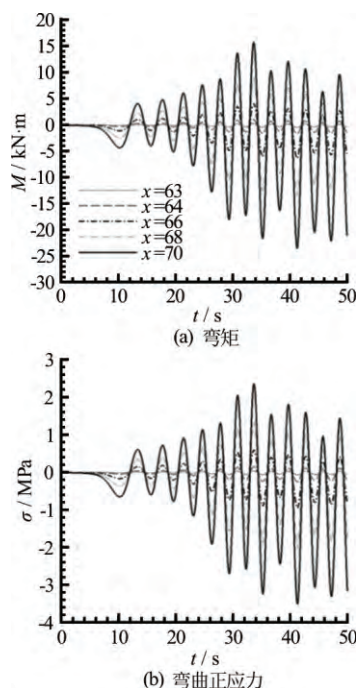


图6 海冰不同截面弯矩、弯曲正应力对比
Fig.6 Comparison of bending moments and bending stresses in different sections of sea ice

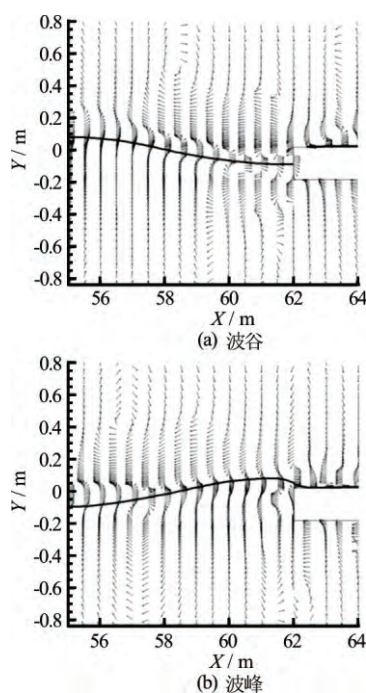


图7 海冰附近波形及速度矢量图
Fig.7 The waveform and velocity vector around the sea ice

2 波浪与海冰作用的计算及结果分析

2.1 海冰附近的流场分析

海冰长 8 m, 厚 0.2 m, 入射波高 0.1 m, 后续

周期均取 3 s, 图 7 (a) 和图 7 (b) 分别表示海冰左端波浪处于波谷和波峰时刻的波形及流场矢量图。从图 7 (b) 中可以看到, 由于海冰露出水面以上部分较小, 波浪很容易冲到海冰上, 所以必须考虑海水对海冰顶部的“下压”作用, 这与波浪对透空式结构的冲击作用略有差异。

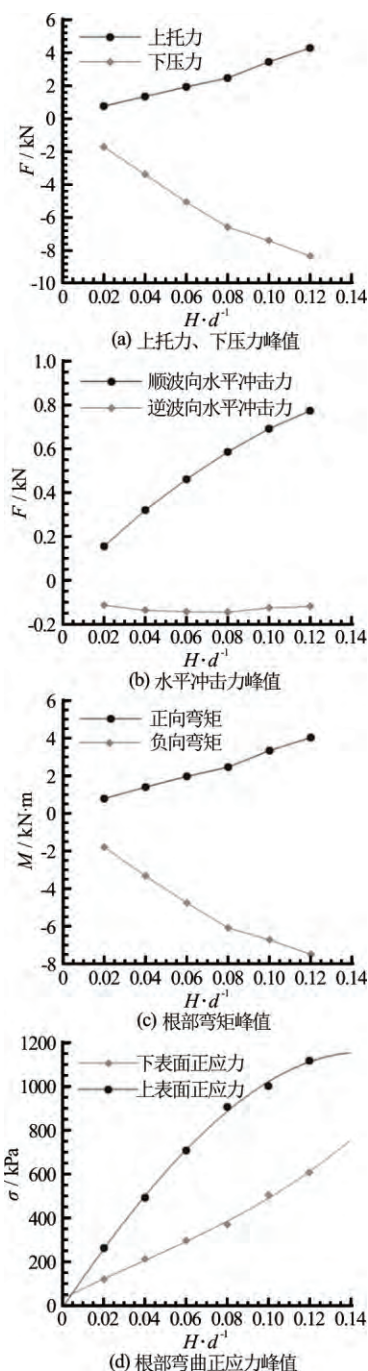


图8 垂向力、水平力、根部弯矩和弯曲正应力峰值随波高变化曲线
Fig.8 The curves of vertical impact force, horizontal impact force, bending moment and bending stress of sea ice changing with wave height

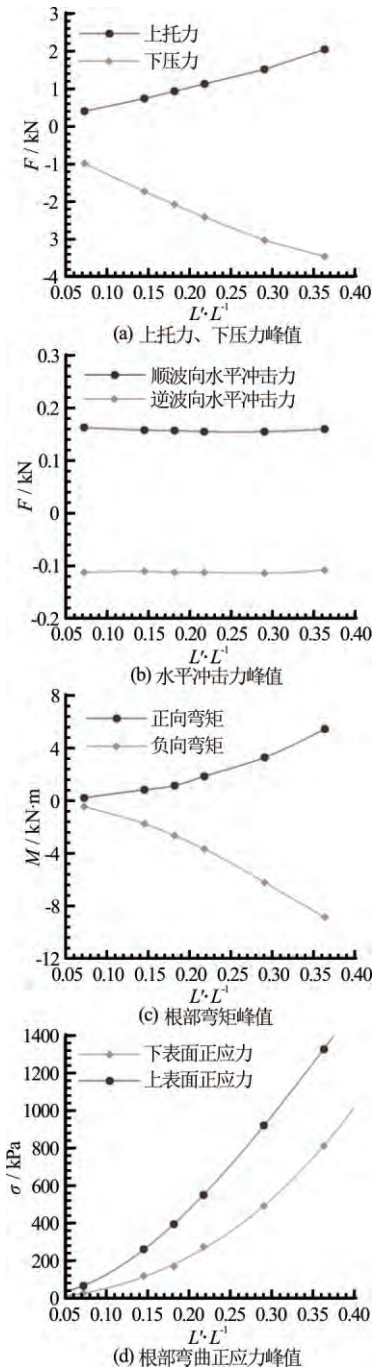


图9 垂向力、水平力、根部弯矩和弯曲正应力峰值随冰长变化曲线

Fig.9 The curves of vertical impact force, horizontal impact force, bending moment and bending stress of sea ice changing with ice length

2.2 波高对海冰垂向力、水平力、根部弯矩和弯曲正应力的影响

结合渤海沿岸冬季波高变化范围^[12], 取海冰长 2 m、厚 0.2 m, 波高分别取 0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m、0.5 m 和 0.6 m。弯矩为正时, 中性轴以下部

分受拉及以上部分受压, 弯矩为负时, 中性轴以下部分受压及以上部分受拉。因 x 轴和 y 轴方向的冲击力以及根部弯矩随时间的变化有正有负, 所以统计了各自正峰值和负峰值, 以及上表面和下表面的弯曲正应力峰值, 并对数值试验点进行样条曲线拟合或多项式拟合。

图 8 表示了上托力和下压力、正水平冲击力和负水平冲击力、正弯矩和负弯矩及根部顶端和底端弯曲正应力的峰值随波高变化过程, 横坐标为波高水深比。由图中可以看到: 上托力小于下压力; 除负水平冲击力峰值随波高增大变化幅度不大外, 其他峰值绝对值都随波高的增大而增大。负水平冲击力绝对值小于正水平冲击力; 因海冰顶部有海水存在, 顶端正应力大于底端正应力, 所以将根部顶端正应力峰值作为海冰所受最大弯曲正应力。

海冰弯曲强度选取位于辽东湾西岸南堡镇的平均值作为本文的海冰弯曲强度^[13], 为 1 030 kPa。通过对这些数值试验点的弯曲正应力进行多项式拟合和插值处理后得到海冰断裂极限波高为 0.504 m, 断裂位置在海冰根部顶端。

2.3 冰长对海冰垂向力、水平力、根部弯矩和弯曲正应力的影响

入射波高为 0.1 m, 海冰厚度 0.2 m, 长度分别为 1 m、2 m、2.5 m、3 m、4 m 和 5 m。图 9 表示了海冰垂向力、水平力和根部弯曲正应力峰值随海冰长度的变化过程, 横坐标表示冰长 L' 与波长 L 之比。由图中可以看到, 除水平冲击力随冰长增大变化幅度不大外, 其他峰值绝对值均随冰长增大而增大。对这些数值试验点的最大弯曲正应力进行多项式拟合和插值处理后, 得到海冰断裂极限冰长为 4.273 m, 起始断裂位置为海冰根部顶端。

2.4 冰厚对海冰垂向力、水平力、根部弯矩和弯曲正应力的影响

渤海盛冰期一般冰厚为 0.1 m - 0.3 m, 最大厚度可达 0.4 m^[1], 数值试验取入射波高 0.1 m, 海冰长 2 m, 厚度分别取 0.05 m、0.1 m、0.15 m、0.2 m、0.25 m、0.3 m 和 0.35 m。图 10 表示了海冰垂向力、水平力、根部弯矩和根部弯曲正应力峰值随海冰厚度的变化过程, 横坐标表示冰厚 δ 与冰宽 w 之比。由图中可以看出, 上托力及下压力峰值绝对值和弯矩峰值绝对值随冰厚增加变化不大, 水平冲击力峰值绝对值随冰厚增加而增大, 根部顶端和底端弯曲正应力峰值随冰厚增加先是迅速减小, 然后减小幅度放缓。对这些数值试验点的弯曲正应力峰值进行样条曲线拟合和插值处理后, 得到海冰断裂最小冰厚为 0.098 m, 起始断裂位置为海冰根部顶端。

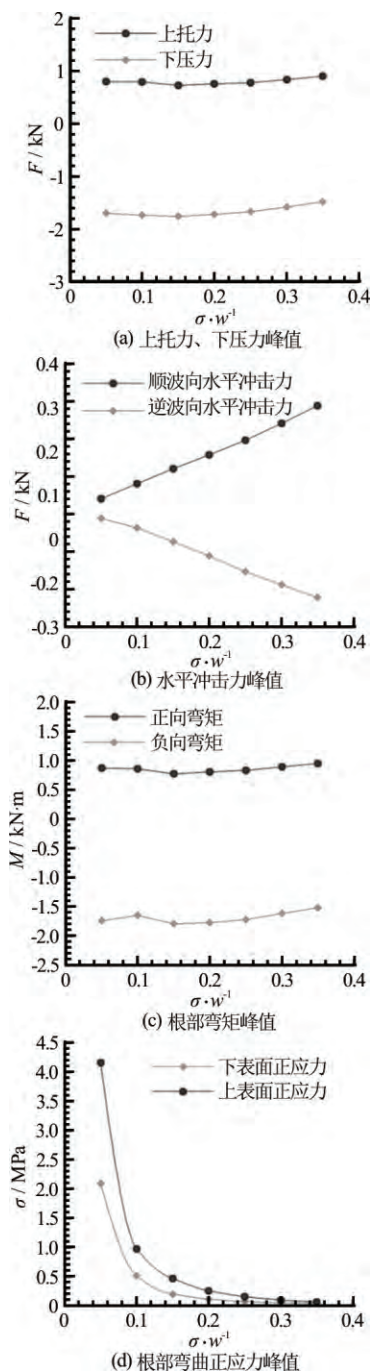


图 10 垂向力、水平力、根部弯矩和弯曲正应力峰值随冰厚变化曲线

Fig.10 The curves of vertical impact force, horizontal impact force, bending moment and bending stress of sea ice changing with ice thickness

3 结论

本文采用边界造波法建立了三维数值波浪水池, 利用验证后的数值水池研究波浪与海冰作用时, 海冰受到的垂向冲击力、水平冲击力、根部弯矩和弯曲正应力峰值与入射波高、冰长及冰厚的关系,

初步分析了海冰断裂与入射波要素的关系, 并且得出以下主要结论:

(1) 上托力和下压力峰值绝对值随波高和冰长的增大而近似呈线性增加趋势, 随冰厚增加变化幅度不大, 上托力小于下压力; 正弯矩和负弯矩绝对值随波高和冰长增加而增大, 随冰厚增加变化幅度很小; 海冰弯曲正应力随波高和冰长增加而增大, 随冰厚增加而减小。

(2) 将根部上表面弯曲正应力峰值作为海冰最大弯曲正应力, 对数值试验点进行曲线拟合和插值处理后, 在特定海域, 当波浪周期为 3 s 时: 海冰长 2 m、厚 0.2 m 时, 海冰断裂极限波高为 0.504 m; 入射波高 0.1 m, 海冰厚度 0.2 m 时, 海冰断裂极限冰长为 4.273 m; 入射波高 0.1 m, 海冰长 2 m 时, 海冰断裂最小冰厚为 0.098 m。

(3) 在数值模拟过程中, 把海冰当成刚体接岸平板, 今后的研究中可以考虑海冰的变形, 将海冰作为弹塑性体, 对波浪与海冰作用进行双向流固耦合研究。

参 考 文 献:

- [1] 王瑞学. 海冰动力学数值模拟及波浪与海冰相互作用[D]. 大连理工大学, 大连, 中国, 2010.
WANG Rui-xue. Numerical simulation of sea ice dynamics and wave-ice interaction[D]. Dalian University of Technology, Dalian, China, 2010.
- [2] BROSTROM G, KAI C. Waves in sea ice[J]. Journal of Physical Oceanography, 2008, 86(2): 279-312.
- [3] WILLIAMS T D, BENNETTS L G, SQUIRE V A, et al. Wave-ice interactions in the marginal ice zone. Part 1: Theoretical foundations[J]. Ocean Modelling, 2013, 71(4): 81-91.
- [4] WILLIAMS T D, BENNETTS L G, SQUIRE V A, et al. Wave-ice interactions in the marginal ice zone. Part 2: Numerical implementation and sensitivity studies along 1D transects of the ocean surface[J]. Ocean Modelling, 2013, 71(4): 92-101.
- [5] BENNETTS L G, ALBERELLO A, MEYLAN M H, et al. An idealised experimental model of ocean surface wave transmission by an ice floe[J]. Ocean Modelling, 2015, 96(14): 85-92.
- [6] 李春花, 王永学, 邢殿录. 海上浮冰块在波浪作用下的断裂[C]. 全国海洋工程学术会议, 成都, 中国, 2000.
LI Chun-hua, WANG Yong-xue, XING Dian-lu. The fracture of ice floe under wave[C]. National Ocean

- Engineering Conference, Chengdu, China, 2000.
- [7] 王永学, 李广伟, 李春花, 等. 波浪作用下海冰断裂的试验研究[J]. 自然科学进展, 2000, 10(6): 549-553.
WANG Yong-xue, LI Guang-wei, LI Chun-hua, et al. Experimental study on sea ice fracture under wave[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(6): 549-553.
- [8] TOYOTA T, HAAS C, TAMURA T. Size distribution and shape properties of relatively small sea-ice floes in the Antarctic marginal ice zone in late winter[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2011, 58(9): 1182-1193.
- [9] 李宏伟. 数值水池造波方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨, 中国, 2009.
LI Hong-wei. Research on wave-generating method of numerical tank[D]. Harbin Engineering University, Harbin, China, 2009.
- [10] 任冰, 丁兆强, 王永学, 等. 单向波对浪溅区三维结构物冲击作用的试验研究[C]. 第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会, 南京, 中国, 2007.
REN Bing, DING Zhao-qiang, WANG Yong-xue, et al. Experimental study on the impact of unidirectional waves on three-dimensional structures in splash zone[C]. The 13th China Ocean (Shore) Engineering Symposium, Nanjing, China, 2007.
- [11] 秦楠, 鲁传敬, 李杰. 数值波流水池构造方法研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2013, 28(3): 349-356.
QIN Nan, LU Chuan-jing, LI Jie. Research on the method of constructing a numerical wave-current flume[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(3): 349-356.
- [12] 赵鑫. 三十年来渤海湾波浪动力环境的变化[D]. 天津科技大学, 天津, 中国, 2013.
ZHAO Xin. The change of wave dynamic environment for Bohai Bay in recent 30 years[D]. Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, China, 2013.
- [13] 季顺迎, 王安良, 苏洁, 等. 环渤海海冰弯曲强度的试验测试及特性分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 266-272.
JI Shun-ying, WANG An-liang, SU Jie, et al. Experimental studies and characteristics analysis of sea ice flexural strength around the Bohai Sea[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 266-272.