

波浪与渤海近岸海冰流固耦合特性的数值模拟

房河宇¹, 杨春忠¹, 马慧敏¹, 徐晓甫², 刘长根^{1*}

(1. 天津大学 机械工程学院力学系, 天津 300350; 2. 天津渤海水产研究所, 天津 300475)

摘要:在波浪作用下,近岸海冰断裂发生时的极限波高和波长可以为大尺度海冰模型中的参数化提供依据。利用流固耦合数值模拟技术,结合渤海冬季近岸海冰、波浪的相关参数,模拟了波浪与小尺度近岸固定海冰的相互作用过程,得出了波浪作用下海冰的最大主应力、最大主应变和自由端位移峰值随入射波浪要素的变化规律。进一步结合渤海海冰的强度,分析了海冰由于波浪作用而发生断裂的极限波高及极限波长。结果表明:海冰最大主应力的最大值、最大主应变的最大值和自由端位移峰值的绝对值随波高、波长的增加而增大。辽东湾某典型海域,当水深为 5 m,海冰长为 2 m,冰厚为 0.3 m 以及入射波周期为 3 s 时,海冰发生断裂的极限波高为 0.63 m;入射波高 0.6 m 时,海冰断裂极限波长为 15.35 m。

关键词:波浪;海冰;流固耦合;数值模拟

中图分类号:P731.2

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2018)01-0044-11

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2018.01.004

近岸海冰在波浪的作用下可能会断裂,断裂过程又往往伴随着冰块间的重新冻结、重叠和堆积^[1],利用数值方法定量地模拟波浪引起的渤海近岸海冰断裂过程,分析波浪发生断裂时的极限波高或极限波长,有利于为大尺度的海冰模型的参数化提供依据,为进一步分析渤海冬季海-气界面的物质交换提供基础。

针对波浪与海冰作用的问题,已有研究成果^[2-4]多集中于水波在冰下的传播和衰减规律,Broström 等^[2]建立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相互作用的模型,用来计算波浪在海冰下传播的衰减以及伴随的海上浮冰破碎。关于海冰在波浪作用下的断裂问题,Fox 等^[5]在研究波浪斜向入射均匀冰层时,将冰层假定为具有一定刚度、密度与厚度的弹性板。李春花等^[6]认为海冰在波浪作用下发生断裂之前的弹性变形很小,所以分析其运动和受力时可以忽略变形的影响,分析内部应力时可视为弹性梁,随后他们结合渤海海冰特性,通过物理实验模拟了波浪对海冰的冲击过程,研究了海冰受波浪作用的断裂机理。Vaughan 和 Squire^[7]分析了给定入射波的频谱和海冰断裂极限应变下北极海冰断裂的概率。实际上,关于波浪与海冰的作用,理论研究与模型试验及数值模拟发展不协调^[2],理论研究多假定近岸海冰为无限长或半无限长平板,而由于技术条件限制,这难以在物理模型试验或数值模拟中实现,本文则利用流固耦合技术直接求解波浪作用下海冰应力、应变。

波浪与海冰的相互作用在广义上可归结为流固耦合问题。流固耦合数值研究方法的发展经历了从最初的单一计算到解耦计算,从弱解耦计算到强解耦计算的过程^[8-10]。在求解流固耦合问题时,存在欧拉坐标、拉格朗日坐标在耦合界面上的变化问题^[11-12]。采用基于计算流体力学的有限体积方法与有限元方法结合的流固耦合方法,不仅可以对波浪的水动力特性进行研究,而且也能够准确地分析海冰的应力、应变等特性,

收稿日期:2017-02-27

资助项目:天津市水产局青年科技项目——渤海湾人工鱼礁淤积的驱动力与沉降趋势监测实施方案(J2014-05);天津市水产局科研推广项目——渤海湾人工鱼礁空间分布现状调查与评估(J2015-12);天津滨海旅游区海岸修复生态保护项目——天津大神堂海域人工鱼礁流场效应与稳定性的数值模拟研究(J2015-07)

作者简介:房河宇(1993-),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事水波及其与结构物的相互作用方面研究. E-mail: fhyu@tju.edu.cn

* **通讯作者:**刘长根(1972-),男,天津人,副教授,博士,主要从事波浪的数值模拟方面研究. E-mail: lchg@tju.edu.cn

(王 燕 编辑)

因此采用该方法对研究波浪与海冰的作用很有意义。

小尺度近岸固定海冰在波浪作用下会产生变形,根据之前学者对海冰材料在计算中的处理^[5-6],本文将海冰简化为弹性水平板。基于非定常 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)方程的有限体积方法与结构动力学的有限元方法相结合,利用 ANSYS 14.5 进行流固耦合模拟,研究在不同波要素的波浪作用下,波浪与海冰作用的流固耦合特性,并结合渤海海冰的强度来分析海冰的断裂情况。

1 波浪与海冰作用的流固耦合模型及验证

1.1 流体控制方程

数值计算是在三维数值波浪水池中进行的,考虑到大气压对海冰的振动有阻尼作用、水波变化的自由面以及海冰附近可能会出现水汽混合的情况,本文数值波浪水池以多相流(气-液)为基础^[13]。假定空气和水皆为不可压缩黏性流体,其流动控制方程为

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

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

式中, x_i ($i=1,2,3$) 和 x_j ($j=1,2,3$) 为空间坐标系下的坐标分量(x_1, x_2, x_3 分别为空间 x, y 和 z 三个方向的坐标分量); u_i ($i=1,2,3$) 和 u_j ($j=1,2,3$) 为雷诺平均速度(u_1, u_2, u_3 为流体沿 x, y, z 方向的雷诺平均速度); ρ 为流体的密度,且 $\rho = \sum_{q=1}^2 a_q \rho_q$, 其中 a_q 为单元内第 q 相流体的体积分, ρ_q 为单元内第 q 相流体的密度; t, p, ν 分别为时间、压强、流体的运动黏性系数; $-\overline{u'_i u'_j} / \partial x_j$ 为雷诺应力项; f_i ($i=1,2,3$) 为体积力。

考虑到 RNG(Renormalization Group) k - ϵ 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^[13],适合本文研究的问题,故在计算黏性流体运动时使用 RNG k - ϵ 湍流模型。

数值波浪水池自由面的波动是通过 VOF(Volume of Fluid)方法来追踪的,其控制方程为

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

式中, x, y 和 z 表示空间坐标系下的 3 个方向; u, v 和 w 分别表示 x, y 和 z 三个方向上的流体速度; $q=1$ 表示空气相, $q=2$ 表示水相; a_1 和 a_2 分别是空气相和水相的体积分,并定义 $a_q=0.5$ 处为自由面位置。

1.2 结构的运动方程

结构的运动方程为二阶常微分方程,其形式为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t), \quad (4)$$

式中, \mathbf{M} 表示物体的质量矩阵; \mathbf{C} 表示物体的阻尼矩阵; \mathbf{K} 表示物体的刚度矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 表示物体承受的载荷向量; $\ddot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}$ 和 \mathbf{x} 分别表示物体运动的加速度、速度和位移。其中 \mathbf{M} 与海冰的材料(如密度)及单元形状有关, \mathbf{K} 与海冰的材料(如弹性模量)及单元的形状有关,由于水波激励频率远小于海冰固有频率,计算中不考虑海冰的阻尼, $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 是利用 ANSYS 14.5 根据输入的海冰参数和划分的网格情况求出的。通过式(4)中的空间变量进行有限元离散和对时间变量实施有限差分离散化可得到物体时间域动态响应分析^[9]。

1.3 流固耦合数值方法

本文数值模拟是在 ANSYS 14.5 中进行的,利用其中的 Fluent 模块求解流体控制方程并得到流场的计

算结果;利用其中的 Transient Structural 模块求解结构动力方程并得到结构响应的计算结果;利用其中的 System Coupling 模块将 Fluent 模块和 Transient Structural 模块弱耦合在一起,通过流固交界面将流场和结构响应的计算结果(应力、应变、位移等)进行实时双向数据传递,实现流体与固体的耦合模拟计算。

1.4 边界条件及数值算法

数值波浪水池设置如图 1 所示,其中水池左侧为速度入口,利用用户自定义函数设定入射波的波速及波高等特性;水池顶部为压力出口,且出口压力值设置为标准大气压^[14];前后 2 个侧面设置为对称边界条件;将底面和右侧边界设置为无滑移壁面条件;海冰右端根部壁面设置为固支,左端无约束,流体域与海冰相接的 3 个面设置为流固耦合面。压力速度的耦合方式选用 PISO(Pressure Implicit Split Operator)算法,压力方程的空间离散采用 Body Force Weighted 格式,动量方程中对流项的离散采用 QUICK(Quadratic Interpolation for Convective Kinematics)格式。



图 1 波浪-海冰流固耦合模拟图

Fig.1 The schematic diagram of fluid-structure interaction between wave and fixed shore ice

1.5 数值波浪水池的验证

任冰等^[15]通过物理模型试验研究了单向波对位于浪溅区水平板的冲击作用,试验装置的俯视图见图 2,水槽长 50 m,宽 3 m,试验水深 0.5 m,左侧为推板式造波机,试验波浪为正向入射的规则波,波高为 0.075 m,周期 T 分别为 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75 和 2.00 s,可计算出波长 L 分别为 0.88, 1.51, 2.18, 2.83, 3.45 和 4.05 m。平台平板长 0.6 m,宽 0.6 m,厚 0.02 m,平板底面与静水面相平且均匀布置了 16 个压力传感器来测量平板所受冲击力的大小,平板到前后水槽壁的距离为 1.2 m。

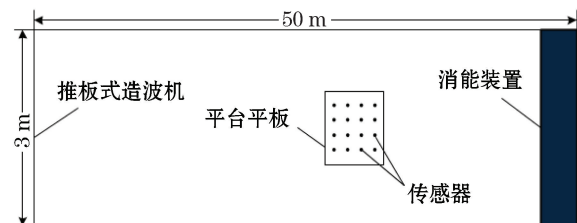


图 2 试验布置图^[15]

Fig.2 The schematic diagram of wave impact on sea ice^[15]

为了验证数值波浪水池在数值造波、数值消波和波浪力计算方面的性能,计算中的入射波浪要素、水深、水槽和平板的尺寸与物理模型试验一致。在数值水池右侧设置消波区^[16]以模拟物理模型试验的消能装置,消波区长为 10 m,数值模拟的边界条件及数值算法参考 1.4 节。

针对入射波周期为 2.0 s(波长 $L=4.05$ m)的组次,选取距离左侧边界分别为 $1L, 3L, 5L$ 处波浪的数值解,并与理论解进行对比,结果见图 3a 至图 3c(横坐标表示时间 t ,纵坐标表示波面 η),可以看出,造波效果较好;选取造波时间 $t=40$ s 时整个波浪水池水位剖面的数值解与解析解进行对比,结果如图 4 所示,可以看出,消波效果良好;选取平板所受正向冲击力最大值的 $1/3$ 平均值(与物理试验统计方法^[15]相同)作为平板所受波浪冲击力的特征值,并与试验值对比,结果如图 5 所示(横坐标表示板长 B 与波长 L 之比,纵坐标表示平板所受冲击力 F),可以看出数值模拟值与试验值基本吻合。因此,利用数值波浪水池进行海冰受波

浪冲击力的数值模拟研究是可行的。

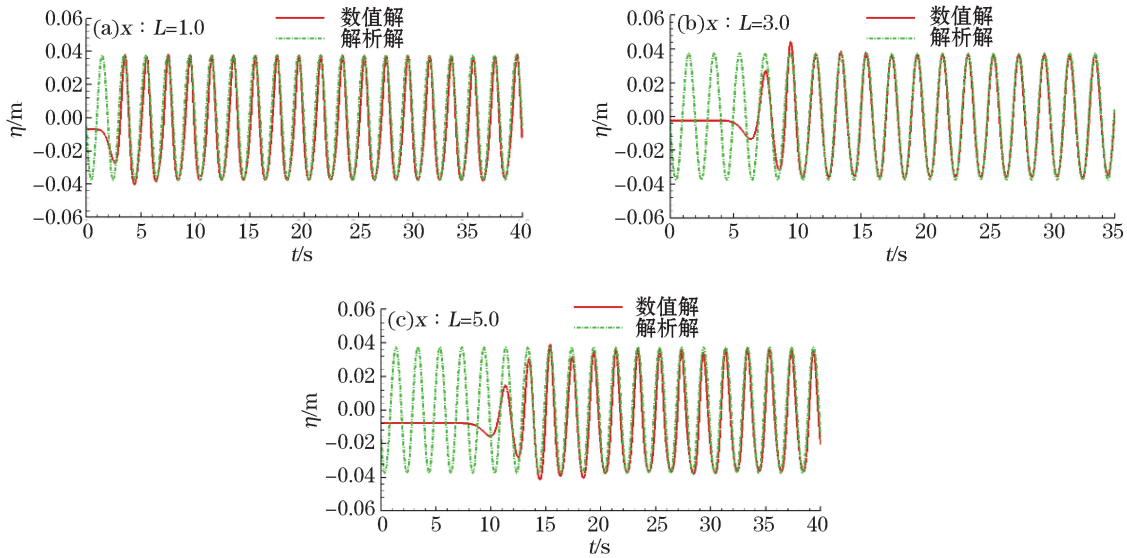


图3 不同水槽波浪数值解与理论解对比

Fig.3 Comparison of numerical simulation and analytic solutions at different locations of the wave flume

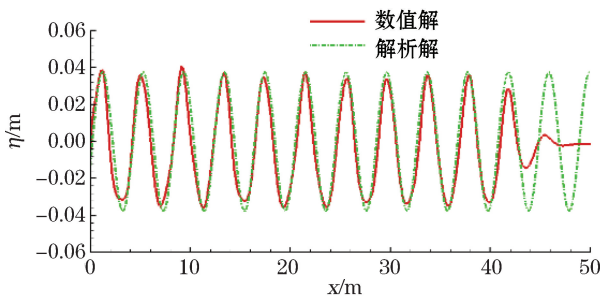


图4 t=40 s时波面数值解与理论解对比

Fig.4 Comparison of numerical simulation and analytic solutions of the wave surface at the time of 40 s

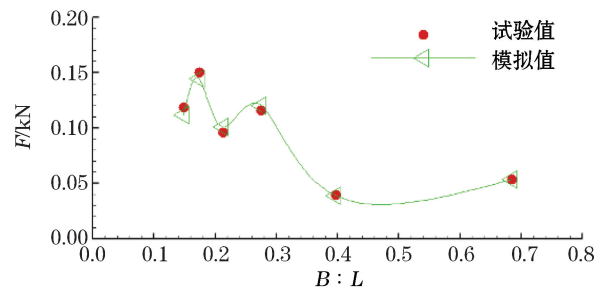


图5 平板冲击力的数值模拟结果与试验值对比

Fig.5 Comparison of numerical and experimental results in plate impact force

1.6 流固耦合模拟方法的验证

Glück 等^[17]和 Liaghat 等^[18]研究了受激励弹性薄板在静止黏性流体中的流固耦合振动问题,其中弹性板长 1 m,宽 0.4 m,厚 0.06 m,弹性模量 2.5 MPa,泊松比 0.35,密度 2 550 kg/m³,固定在流体底边界;流体密度 1 kg/m³,动力黏度为 0.2 Pa·s,如图 6 所示。

整个流体计算域长 50 m,流体域左边界到平板中心距离为 10 m,平板中心到流体域右边界距离为 40 m,流体域高度为 6 m,宽度 0.4 m,在 z 方向选取对称边界条件。经时间无关性检验,选取时间步长为 0.01 s。当 t≤0.5 s 时,将 75 Pa 的均布载荷施加在平板左侧平面上激励弹性板,当 t>0.5 s 时,撤销均布载荷,弹性板在流体的反作用力和剪切力下运动。取平板自由端 B 沿 x 方向的位移随时间变化曲线,与文

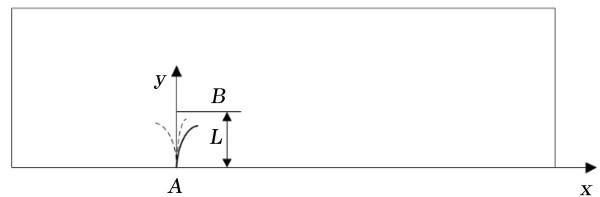


图6 弹性板在黏性流体中振动图

Fig.6 The schematic diagram of oscillation of a elastic plate in viscous fluid

献^[17-18]结果对比,结果见图7(横坐标表示时间 t ,纵坐标表示波面 η),可以看出,计算结果与文献结果吻合。结合1.5节相关内容,说明利用三维流固耦合数值模拟方法研究波浪与海冰相互作用的特性是可行的。

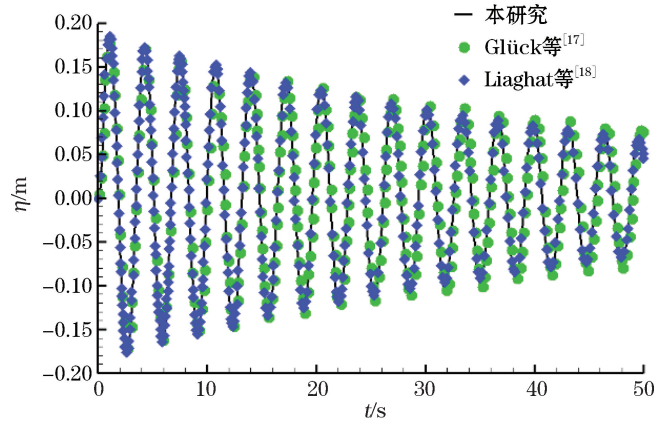


图7 弹性板自由端水平位移随时间变化过程对比

Fig.7 Comparison of the computational result and previous researches in the horizontal displacement of plate's free end

2 结果与分析

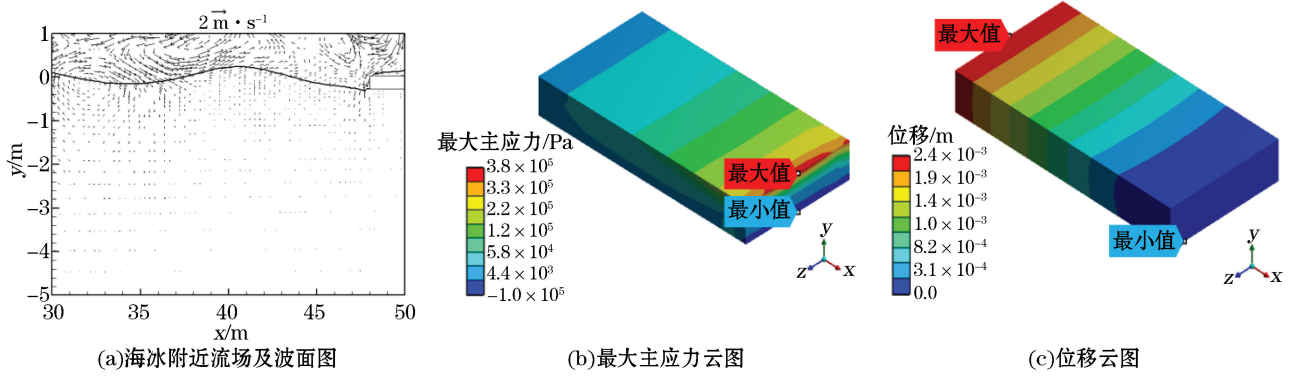
2.1 海冰附近流场及海冰结构响应分析

数值波浪水池计算域长50 m,高10 m,宽1 m,入射波高0.6 m,周期3 s,水深5 m;小尺度近岸固定海冰长2 m,厚0.3 m,宽1 m。选取海水密度为 $1\ 025\ \text{kg/m}^3$,海冰密度为 $914.5\ \text{kg/m}^3$,对海冰在静水中进行垂向受力分析,即重力与浮力平衡,可知海冰浸在水中的高度为0.89倍冰厚,并假设此时海冰根部所受弯矩为0。海冰弹性模量取0.8 GPa,泊松比取0.3^[19]。海冰右端根部设置为固支,左端为自由端,海冰与流体相接触的3个面设置为流固耦合面(图1)。通过对自由液面附近网络加密来捕捉气液交界面,经网格无关性检验,一个波高范围内约有20个网格;经时间无关性检验,选取时间步长为0.01 s。

图8~图11分别为某周期内4个典型时刻($t_0=28.78\ \text{s}$, $t_1=t_0+T/4=29.53\ \text{s}$, $t_2=t_0+T/2=30.28\ \text{s}$, $t_3=t_0+3T/4=31.03\ \text{s}$)的海冰附近流场及波面图、海冰最大主应力云图、海冰位移云图。

对比图8和图10,当 $t=28.78\ \text{s}$ 时,海冰自由端运动到 y 轴负方向极值点,最大主应力处于负峰值;当 $t=30.28\ \text{s}$,海冰自由端运动到 y 轴正方向极值点,最大主应力处于正峰值。由于波浪的振幅大于水面以上的海冰高度,在波浪的越浪作用下,海冰上会有海水存在,在海水的重力作用下, $t=28.78\ \text{s}$ 时海冰最大主应力和最大位移的绝对值要大于 $t=30.28\ \text{s}$ 时海冰最大主应力和最大位移。

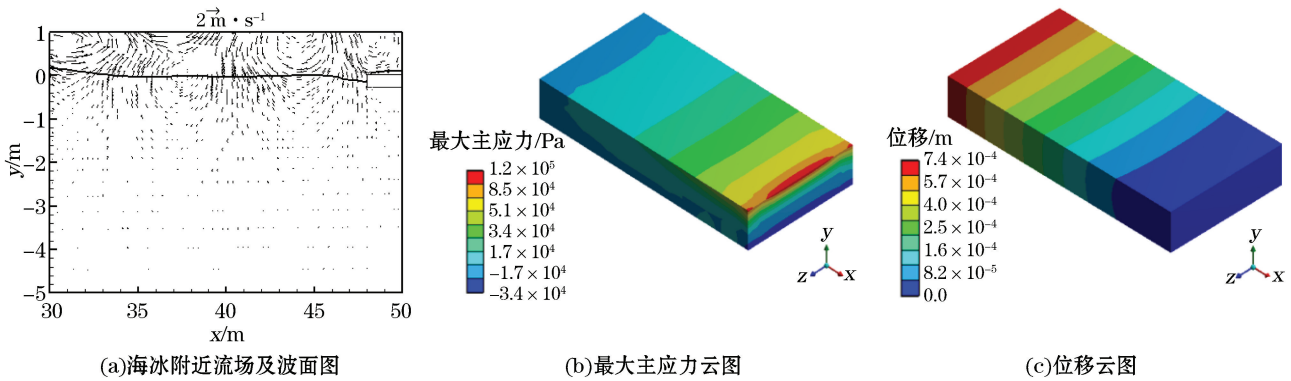
对比图9和图11,当 $t=29.53\ \text{s}$ 时,海冰自由端从 y 轴负方向运动到基本水平位置;而当 $t=31.03\ \text{s}$ 时,海冰自由端从 y 轴正方向运动到基本水平位置。从图中可以看出,由于流体域右边界和海冰皆存在壁面反射的影响,且海冰上表面有海水的存在,因此整个海冰会有应力存在,而不是处于不受力的“松弛”状态;在波浪与海冰作用过程中,海冰的位移很小,其最大主应力的最大值和最小值均出现在海冰根部;最大位移值出现在海冰自由端,最小位移值出现在海冰根部。



注:图 b 和图 c 中,海冰根部为海冰在 x 轴方向最右端壁面,自由端为海冰在 x 轴方向最左端壁面

图 8 $t=28.78$ s 时海冰附近流场及波面图、最大主应力云图、位移云图

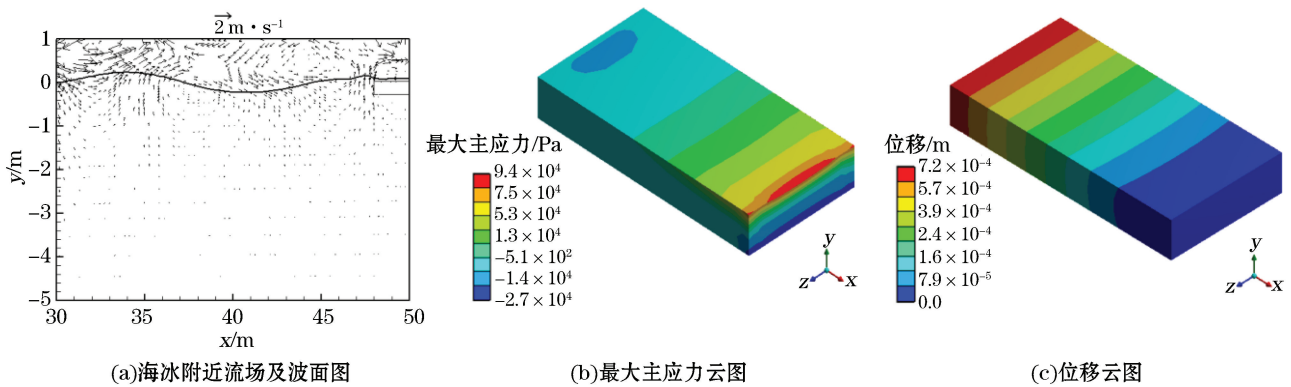
Fig.8 The flow field and wave surface (a), contours of maximum principal stress (b) and displacement (c) at the time $t=28.78$ s



注:图 b 和图 c 中,海冰根部为海冰在 x 轴方向最右端壁面,自由端为海冰在 x 轴方向最左端壁面

图 9 $t=29.53$ s 时海冰附近流场及波面图、最大主应力云图、位移云图

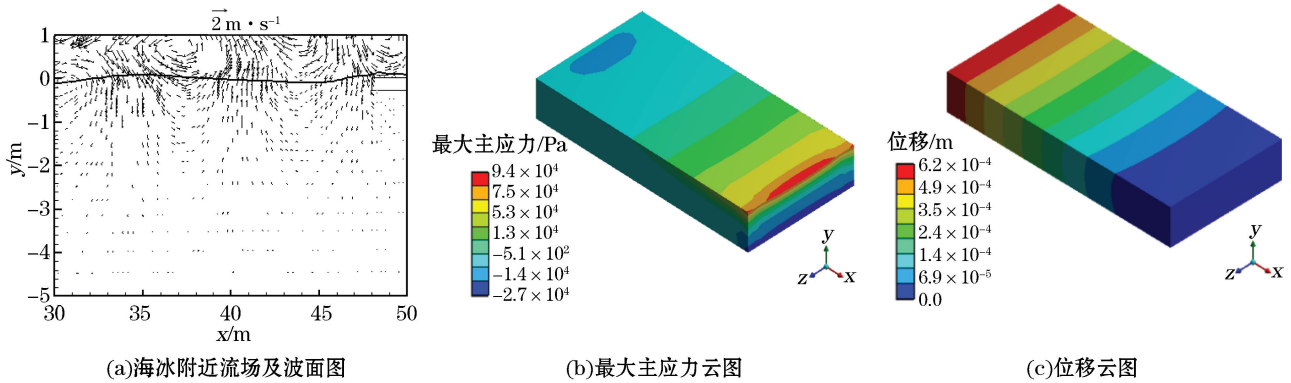
Fig.9 The flow field and wave surface (a), contours of maximum principal stress (b) and displacement (c) at the time $t=29.53$ s



注:图 b 和图 c 中,海冰根部为海冰在 x 轴方向最右端壁面,自由端为海冰在 x 轴方向最左端壁面

图 10 $t=30.28$ s 时海冰附近流场及波面图、最大主应力云图、位移云图

Fig.10 The flow field and wave surface (a), contours of maximum principal stress (b) and displacement (c) at the time $t=30.28$ s



注:图 b 和图 c 中,海冰根部为海冰在 x 轴方向最右端壁面,自由端为海冰在 x 轴方向最左端壁面

图 11 $t=31.03$ s 时海冰附近流场及波面图、最大主应力云图、位移云图

Fig.11 The flow field and wave surface (a), contours of maximum principal stress (b) and displacement (c) at the time $t=31.03$ s

海冰的自由端沿 y 方向位移随时间变化曲线见图 12。可以看出,自由端沿 y 方向的位移值在“0”附近上下波动,且在数值上比较小,为 mm 量级。由于海冰上表面有海水的重力作用,因此位移正峰值小于负峰值绝对值。

沿海冰上表面中线上海冰最大主应力、最大主应变、沿 y 方向位移量的变化过程见图 13。可以看出, $t=28.78$ s 时海冰最大主应力、最大主应变、位移量绝对值均高于其他时刻的值; $t=28.78$ s, $t=29.53$ s 和 $t=31.03$ s 时的最大主应力、最大主应变随着波浪传播距离的增加逐渐增大;各个时刻的位移绝对值随着波浪传播距离的增加均逐渐减小。

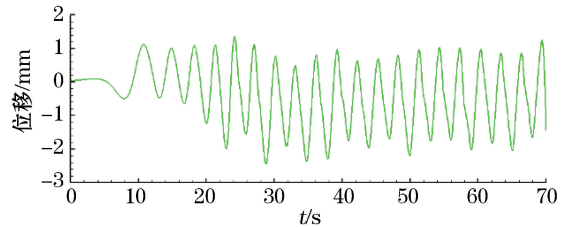


图 12 自由端沿 y 方向位移

Fig.12 The displacement of free-end in the y direction

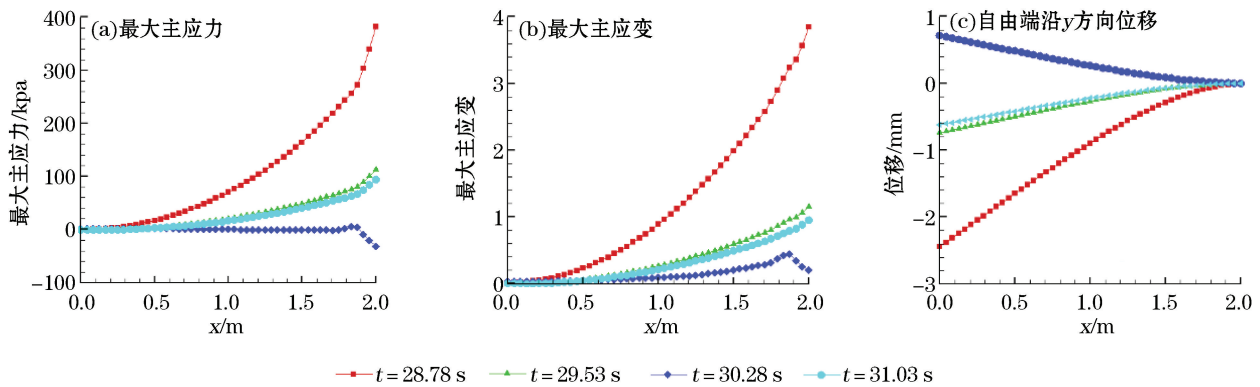


图 13 海冰最大主应力、最大主应变、位移沿波浪传播方向变化曲线

Fig.13 The change of the maximum principal stress (a), maximum principal elastic strain (b) and the displacement (c) along the direction of wave propagation

2.2 波高、波长对海冰结构响应的影响

2.2.1 波高对海冰结构响应的影响

结合渤海沿岸冬季波高变化范围及线性小振幅波理论的适用范围^[20-21],取波浪的入射波高分别为 0.1,

0.2,0.3,0.4,0.5,0.6 和 0.7 m,周期为 3 s,水深为 5 m,小尺度近岸固定海冰长 2 m,宽 1 m,厚 0.3 m。整个海冰最大主应力、最大主应变以及海冰自由端位移的峰值与波高的关系如图 14 所示,其中横坐标 $H:d$ 表示波高水深比。可以看到,3 个变量峰值的绝对值均随波高的增加而增大,并且近似呈线性增加趋势。

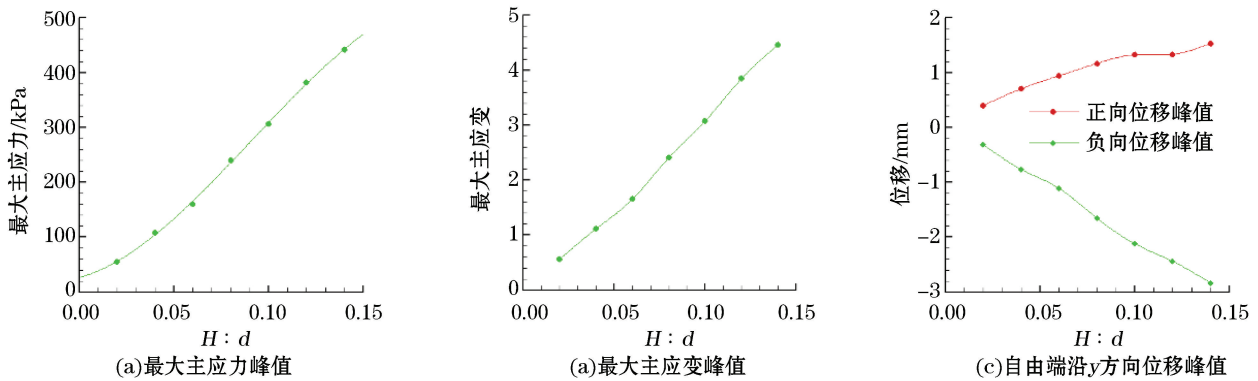


图 14 海冰结构响应峰值随波高变化曲线

Fig.14 The change of response of sea ice structure with wave height

当海冰受波浪持续的冲击后,由于海冰存在材料疲劳现象,海冰会在应力小于海冰强度的情况下发生断裂,研究表明,海冰的疲劳极限约为海冰强度的 60%^[22]。选取位于辽东湾西岸兴城附近的海冰强度平均值作为本文的海冰强度^[23],其值为 670 kPa,则海冰疲劳极限为 402 kPa。通过对这些数值试验点的最大主应力峰值进行插值处理后得到海冰断裂时波高水深比为 0.13,所以海冰断裂极限波高为 0.63 m,断裂位置在海冰根部顶端。

2.2.2 波长对海冰结构响应的影响

取波浪的入射波高为 0.6 m,周期 T 分别为 2.5,2.8,3.0,3.2,3.5 和 3.7 s,水深为 5 m,可计算出波长 L 分别为 9.73,12.11,13.76,15.45,17.99 和 19.69 m,小尺度近岸固定海冰长为 2 m,宽为 1 m,厚为 0.3 m。由整个海冰最大主应力、最大主应变以及海冰自由端位移的峰值与波长的关系(图 15,横坐标 L/L' 表示波浪波长与海冰长度之比)可知,当 $4.850 \leq L/L' \leq 9.804$ 时,3 个变量峰值的绝对值随 L/L' 的增加而增大,即随波长的增加而增大。通过对这些数值试验点的最大主应力的峰值进行插值处理后得到海冰断裂时波长与冰长之比为 7.675,所以海冰断裂极限波长为 15.35 m,断裂位置在海冰根部顶端。

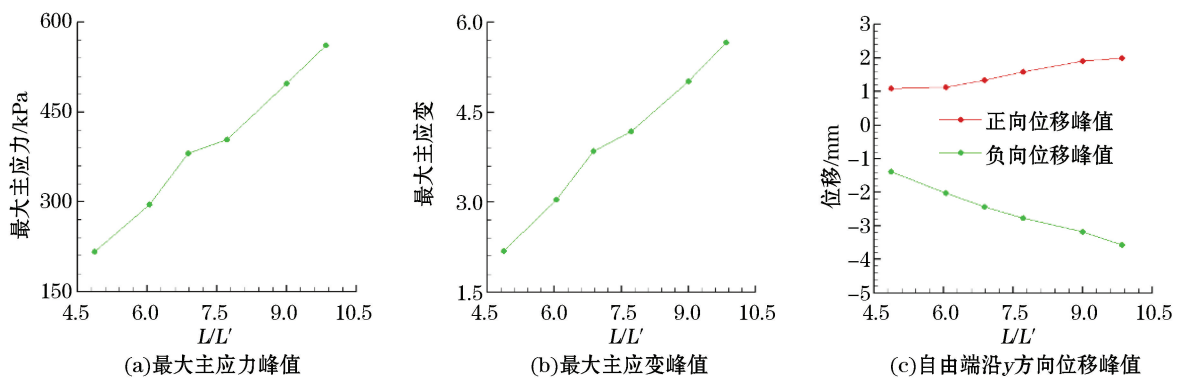


图 15 海冰结构响应峰值随波长变化曲线

Fig.15 The change of response of sea ice structure with wave length

3 结 论

采用基于非定常 RANS 方程的有限体积法与结构有限元模拟方法相结合的一种三维耦合数值模拟方法,对波浪-海冰的水动力及其结构响应等问题进行了研究。通过改变入射波浪的波高、波长,对渤海辽东湾近岸海冰的最大主应力、最大主应变、自由端位移等特性进行了数值模拟分析,得出结论:

小尺度近岸固定海冰最大主应力的最大值出现在海冰根部,海冰的最大位移值出现在海冰自由端,最小位移值出现在海冰根部;因海冰上表面海水的重力作用,海冰自由端沿 y 方向的位移正峰值小于负峰值绝对值;统计的 3 个变量的峰值绝对值随波高的增加近似呈线性增加趋势;当 $4.850 \leq L/L' \leq 9.804$ 时,统计的 3 个变量峰值的绝对值随波长的增加而增加。

对数值试验点的海冰最大主应力的最大值进行插值处理后,得到当波浪周期为 3 s,水深为 5 m,海冰长 2 m,厚 0.3 m 时辽东湾西岸兴城附近的海冰断裂极限波高为 0.63 m;入射波高为 0.6 m,水深为 5 m,海冰长 2 m,厚 0.3 m 时海冰断裂极限波长为 15.35 m。该结论有助于渤海海气交换等数学模型中有关海冰的参数化问题研究。

参考文献(References):

- [1] WANG R X. Numerical simulation of sea ice dynamics and interaction between wave and sea ice[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. 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: 大连理工大学, 2010.
- [2] BROSTRÖM 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] FOX C, SQUIRE V A. On the oblique reflection and transmission of ocean waves at shore fast sea ice[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1994, 347(1682): 185-218.
- [6] LI C H, WANG Y X, XING D L. The break of the sea ice under the action of the waves[C]//Proceedings of the 8th National Conference on Marine Engineering. Chengdu: The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2000: 339-347. 李春花, 王永学, 邢殿录. 海上浮冰块在波浪作用下的断裂[C]//第八届全国海洋工程学术会议论文集. 成都: 中国造船工程学会, 2000: 339-347.
- [7] VAUGHAN G L, SQUIRE V A. Wave induced fracture probabilities for arctic sea-ice[J]. Cold Regions Science & Technology, 2011, 67(1-2): 31-36.
- [8] SHAO X B. Solving fluid-structure interaction question based on ANSYS[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. 邵学博. 基于 ANSYS 的机翼的流固耦合分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [9] XU M, AN X M, CHEN S L. CFD/CSD coupling numerical computational methodology[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 27(1): 33-37. 徐敏, 安效民, 陈士楷. 一种 CFD/CSD 耦合计算方法[J]. 航空学报, 2006, 27(1): 33-37.
- [10] NAMKOONG K, CHOI H G, YOO J Y. Computation of dynamic fluid-structure interaction in two-dimensional laminar flows using combined formulation[J]. Journal of Fluids & Structures, 2005, 20(1): 51-69.
- [11] BAIGES J, CODINA R. The fixed-mesh ALE approach applied to solid mechanics and fluid-structure interaction problems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2009, 81(12): 1529-1557.
- [12] SUGIYAMA K, LI S, TAKEUCHI S, et al. A full Eulerian finite difference approach for solving fluid-structure coupling problems[J]. Journal of Computational Physics, 2011, 230(3): 596-627.
- [13] YANG C Z, LIU C G, FANG H Y. Numerical simulation of wave impact on sea ice in the Bohai sea[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2017, 32(2): 141-147. 杨春忠, 刘长根, 房河宇, 等. 波浪对渤海近岸海冰冲击作用的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2017, 32(2): 141-147.
- [14] LI H W. Wave generating in numerical wave tank[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. 李宏伟. 数值水池造波方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [15] REN B, DING Z Q, WANG Y X. Experimental research on one-way wave impact on three-dimensional structure in splash zone[C]//

- Proceedings of the 13th China Ocean(Shore) Engineering Symposium. Nanjing: China Marine Engineering Society, 2007: 176-184. 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)工程学术讨论会论文集. 南京: 中国海洋工程学会, 2007: 176-184.
- [16] SHAO W J. Numerical simulation of flow field characteristics and stability of artificial fish reef[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. 邵万骏. 人工鱼礁流场特征及稳定性的数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [17] GLÜCK M, BREUER M, DURST F, et al. Computation of fluid-structure interaction on lightweight structures[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(14-15): 1351-1368.
- [18] LIAGHAT T, GUIBAULT F, NENNEMANN B, et al. Two-way fluid-structure coupling in vibration and damping analysis of an oscillating hydrofoil[C]// ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Quebec: American Society of Mechanical Engineers, 2014: 37-41.
- [19] JI S Y. Numerical model of sea ice and its application[M]. Beijing: Science Press, 2011. 季顺迎. 工程海冰数值模型及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [20] ZHAO X. The change of wave dynamic environment in Bohai Bay in thirty years[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2013. 赵鑫. 三十年来渤海湾波浪动力环境的变化[D]. 天津: 天津科技大学, 2013.
- [21] WANG S Q. Wave mechanics for ocean engineering[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2013. 王树青. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013.
- [22] DUMONT D, KOHOUT A, BERTINO L. A wave-based model for the marginal ice zone including a floe breaking parameterization[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116 (C4): 241-253.
- [23] JI S Y, WANG A L, SU J. Experimental studies and characteristic analysis of sea ice flexural strength around the Bohai sea[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 266-272. 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.

Numerical Simulation of Fluid-Structure Interaction Characteristics Between Wave and Bohai Fixed Offshore Sea Ice

FANG He-yu¹, YANG Chun-zhong¹, MA Hui-min¹, XU Xiao-fu², LIU Chang-gen¹

(1. *Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300350, China;*

2. *Tianjin Bohai Sea Fisheries Research Institute, Tianjin 300457, China*)

Abstract: Under the action of the water wave, the critical wave height and length of fixed offshore-sea-ice fracture can provide important information for parameterization in large scale sea ice model. A numerical fluid-structure interaction method is presented to study three-dimensional fluid-structure interaction characteristics between wave and fixed shore-ice on small scale according to the sea-ice and wave parameters in the Bohai Sea. It is obtained how the maximum principal stress, the maximum principal elastic strain and the deformation of sea ice change with wave height; Further with the strength of sea ice in the Bohai Sea, the critical wave height and wave length are analyzed when sea ice fracture occurs. The study shows that the maximum values of maximum principal stress and maximum principal elastic strain and the absolute peak displacement of the sea ice free-end increase as the wave height and wave length increase. When wave period and water depth are set to 3 s and 5 m, respectively, sea ice with length of 2 m and thickness of 0.3 m in the Liaodong bay has critical wave height of fracture of 0.63 m. When wave height is set to 0.6 m and the rest of the conditions remain unchanged, the sea ice has critical wave length of fracture of 15.35 m.

Key words: water wave; sea ice; fluid-structure interaction; numerical simulation

Received: February 27, 2017