

海冰与海洋结构耦合作用的离散元高性能计算分析软件

使用说明

编写人：季顺迎

李 正

狄少丞

王宇新

霍运理

大连理工大学

2014年1月22日

目 录

第一部分 软件简介	3
1.1 软件名称	3
1.2 软件行业	3
第二部分 使用说明	5
2.1 主界面及功能项	5
2.2 前处理	5
2.2.1 海冰建模:	6
2.2.2 结构建模:	12
2.2.3 单元参数:	15
2.3 计算模型	17
2.3.1 离散单元模型:	17
2.3.2 GPU 计算模型:	20
2.4 后处理	21
2.4.1 计算结果三维动态显示:	23
2.4.2 计算结果数值分析:	25

第一部分 软件简介

在冰区的油气开发过程中，海冰作为主要的环境荷载对工程结构的安全有着重要的影响。因此，冰区海洋工程结构的设计，需要对冰荷载问题有着明确的了解，例如冰的类型，冰与结构作用时的破坏模式及冰力情况等。本软件基于离散元方法计算海冰与海洋结构相互作用过程，为冰区海洋结构的安全运行和结构设计提供借鉴作用。IceDEM 可以实现不同类型海冰、不同类型海洋结构模型的建立，海冰与结构相互作用时海冰破坏、堆积及冰荷载的数值计算和计算结果的动态显示等功能，并通过采用 GPU 高性能计算的方式大幅提高计算效率。

本软件主要包括三大模块：建模模块，力学计算模块和结果分析模块。建模模块可通过采用具有粘接-破碎功能的球形离散单元构造出不同类型海冰模型（包括平整冰、浮冰、冰脊和碎冰等），通过三角形单元及锥体单元组合的方式构造出不同类型的海洋结构（例如自升式海洋平台）。力学计算模块可通过搜索、接触判断、内力迭代等方式获得海冰破坏过程、结构冰荷载等结果。结果分析模块可实现海洋结构与海冰相互作用计算结果的动态显示。

1.1 软件名称

中文：海冰与海洋结构耦合作用的离散元高性能计算分析软件 简称 IceDEM

英文：Computational and Analytical software of Coupling interaction between Sea Ice and Offshore Structures Based on Discrete Element Method

1.2 软件行业

适用行业：海洋结构物冰荷载及安全性评估，冰区海洋结构设计。

软件用途：海冰与海洋结构相互作用受多方面因素的共同影响，包括海冰类型、海洋结构类型。IceDEM 集成了建模模块，计算模块和结果分析模块，可用于不同类型海冰对不同类型海洋结构作用的模拟仿真。对冰与结构作用时冰的破坏过程，冰荷载的变化情况有着准确的模拟。该软件可为冰区海洋结构的安全运行和结构设计提供借鉴作用。

软件功能：

(1) 海冰与海洋结构的离散元建模

海冰建模：采用具有粘接-破碎功能的球形离散单元构造出不同类型海冰模型（包括平整冰、浮冰、冰脊和碎冰等），通过调整颗粒的排列方式、颗粒性质参数的方法，实现对不同类型海冰性质的模拟。海冰参数可在建模模块中给定。

结构建模：通过三角形单元及锥体单元组合的方式构造出不同类型的海洋结构（例如自升式海洋平台）。海洋结构的参数可在建模过程中添加。

(2) 海冰与海洋结构的离散元数值计算

通过搜索、接触判断、内力迭代等方式获得海冰破坏过程、结构冰荷载等结果。计算过程考虑了海流及波浪的影响。

(3) 模拟结果的显示与分析

IceDEM 软件可海冰与海洋结构的作用结构进行三维动态显示。其具有旋转、缩放、透视等功能。可直观的观察冰力等情况，并对局部冰力进行分析。也可对冰力时程、结构振动等结果实时绘制出动态曲线。

软件特点：

- (1) 集成了建模模块，计算模块和结果分析模块，集前处理与后处理于一体。
- (2) 通过 GPU 计算，大幅提高计算效率。
- (3) 对模拟海冰的离散破坏有着先天的优势。
- (4) 建模、结果分析方便直观。

第二部分 使用说明

2.1 主界面及功能项



图 2.1.1 IceDEM 主窗口

主界面主要包括三个选项：

Preprocess 用于打开前处理建模界面； **Postprocess** 用于打开后处理结果分析界面；

Help(H) 显示帮助文件。

2.2 前处理

单击 **Preprocess**，进入前处理界面，如图 2.2:

前处理主要包括三个部分：

Sea Ice	Structure	Element
---------	-----------	---------

海冰建模，海洋

结构建模及单元参数的设定。软件默认首先进入海冰建模的界面，即图 2.2.1 所示。

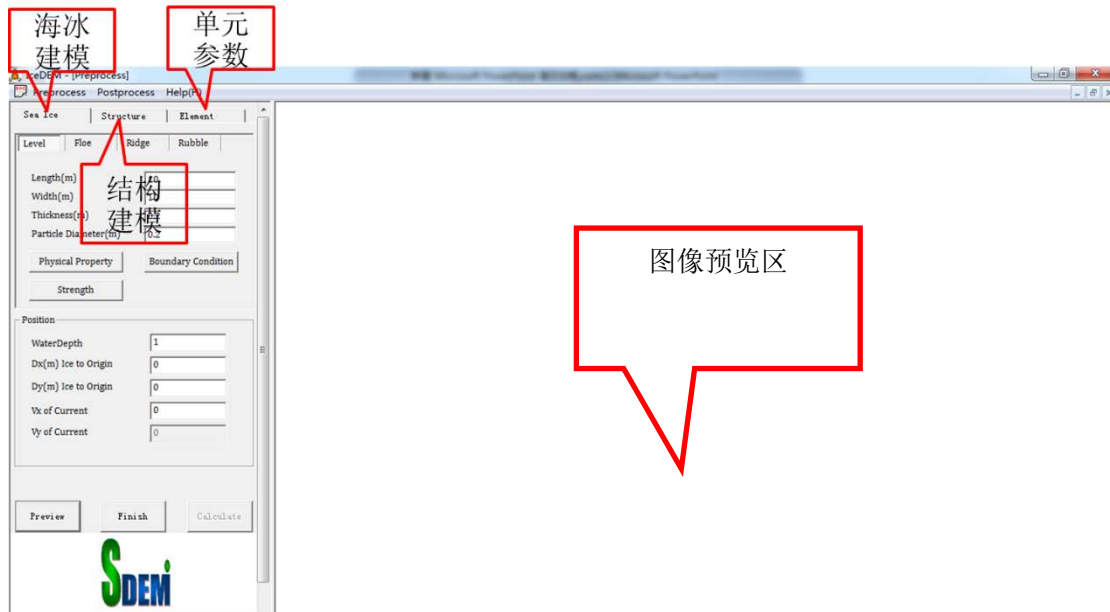


图 2.2.1 IceDEM 前处理界面

2.2.1 海冰建模:

通过改变单元的排列方式，海冰建模可以建立不同类型的海冰。目前包括三种海冰类型：平整冰，浮冰及冰脊。对应于 **Level** **Floe** **Ridge** 三个标签的参数设置界面如图 2.2.2。

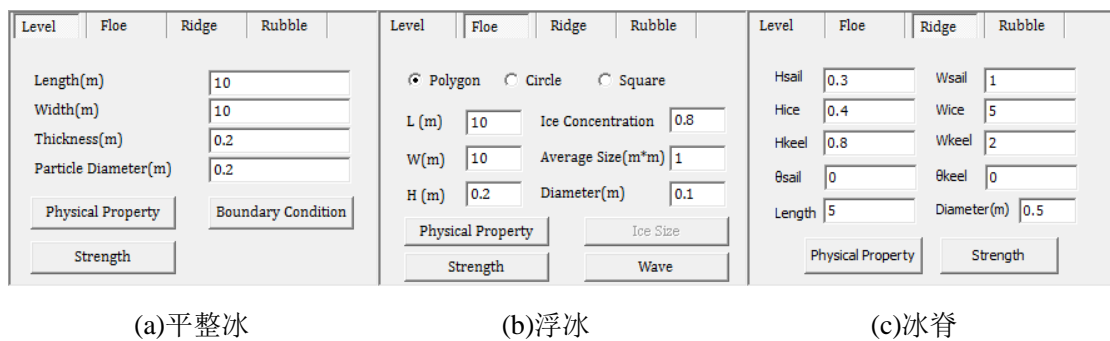


图 2.2.2 Level ice, Floe ice, Ice Ridge 的建模参数

参数含义:

(a) 平整冰

Length, Width, Thickness: 设置平整冰的长、宽和厚度。

Particle Diameter: 设置组成平整冰的颗粒的直径。

按钮 **Physical Property** , **Strength** 可以设定海冰的物理性质和力学性质, 单击后弹出如图 2.2.3 所示对话框。参数包括 T 海冰温度、S 海冰盐度、Ice Density 海冰密度、Seawater Density 海水密度; Compressive Strength 海冰压缩强度、Flexural Strength 海冰弯曲强度。物理性质和力学性质只需设定其中一项, 另一项参数可由此推算。

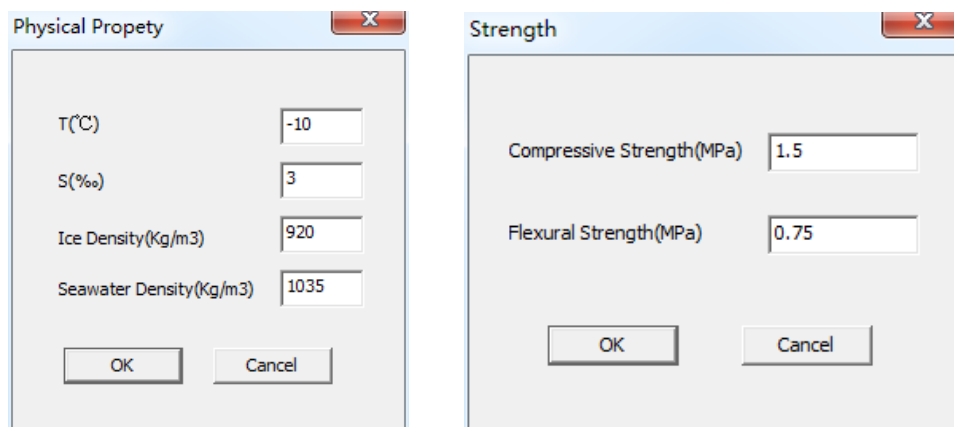


图 2.2.3 海冰物理力学参数设定

Boundary Condition 按钮用于设定平整冰的边界条件, 单击后如图 2.2.4. V 设定冰块的速度。Kb/Kn 用于设定模拟有限平整冰 ($Kb/Kn=0$) 或者无限平整冰 ($Kb/Kn=1$)。

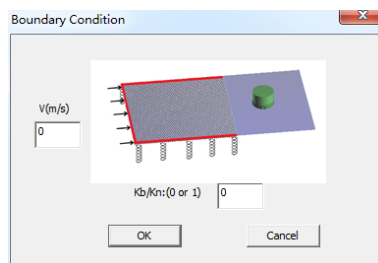


图 2.2.4 平整冰边界条件设定

参数设定后, 单击 **Preview** 按钮, 在图像预览区, 就会绘制出相应的模型。图 2.2.5 给出平整冰建模示例, 由于图形的显示效率问题, 在绘制球形单元时, 会占用较多的内存, 故在颗粒较多时, 软件自动绘制块体替代球形颗粒显示以提高显示效率。

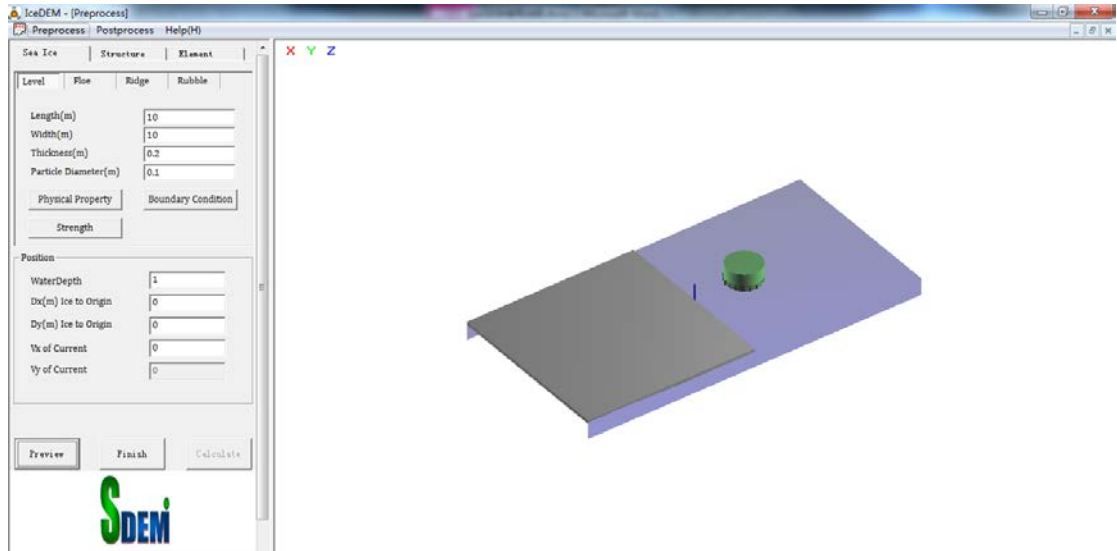
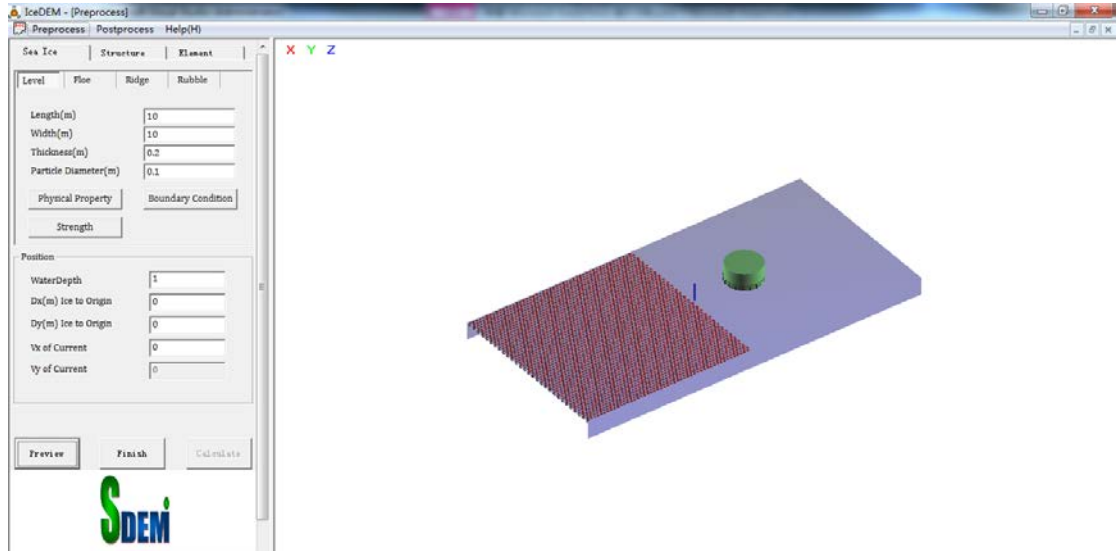


图 2.2.5 平整冰模型

(b) 浮冰

浮冰可以建立三种浮冰类型，包括：多边形浮冰，圆形浮冰及矩形浮冰，图 2.2.6 红框内选项用于选择浮冰类型。

L, W: 设定浮冰分布区域的长，宽。

H: 设定多边形浮冰的厚度，只在 Polygon 中起作用。

Ice Concentration: 设定浮冰在区域内的密集度。

Average Size: 设定单块浮冰的平均尺寸，只在 Polygon 中起作用。

Diameter: 设定构成浮冰的单元直径。

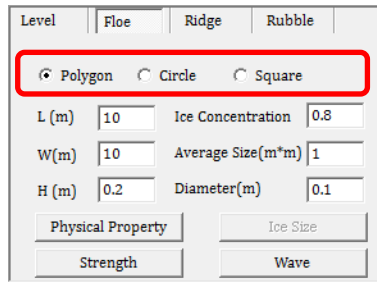


图 2.2.6 浮冰模型参数设定

按钮 **Physical Property** , **Strength** 与平整冰中的参数及作用相同。

按钮 **Ice Size** 用于调整圆形浮冰、矩形浮冰的尺寸，单击后弹出对话框如图 2.2.7。

Normal Size 可以设定浮冰的尺寸，并符合正态分布，**mean** 为平均值，**variance** 为方差。

Thickness 可以设定浮冰的厚度，同样符合正态分布。

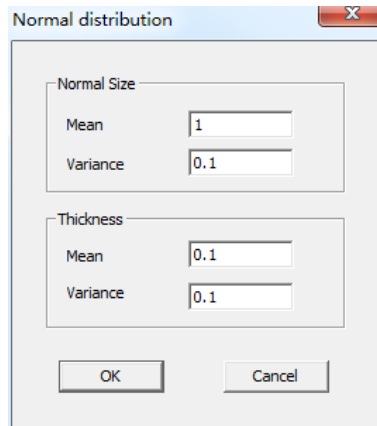


图 2.2.7 圆形冰、矩形冰尺寸设定

按钮 **Wave** 用于设定波浪条件，单击后对话框如图 2.2.8。

Wave Length: 波长

Wave Height: 波高

波浪周期由波长波高依据经验公式计算得出。

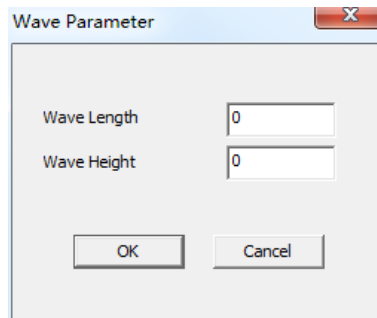


图 2.2.8 波浪条件

图 2.2.9 给出三种浮冰的示例：

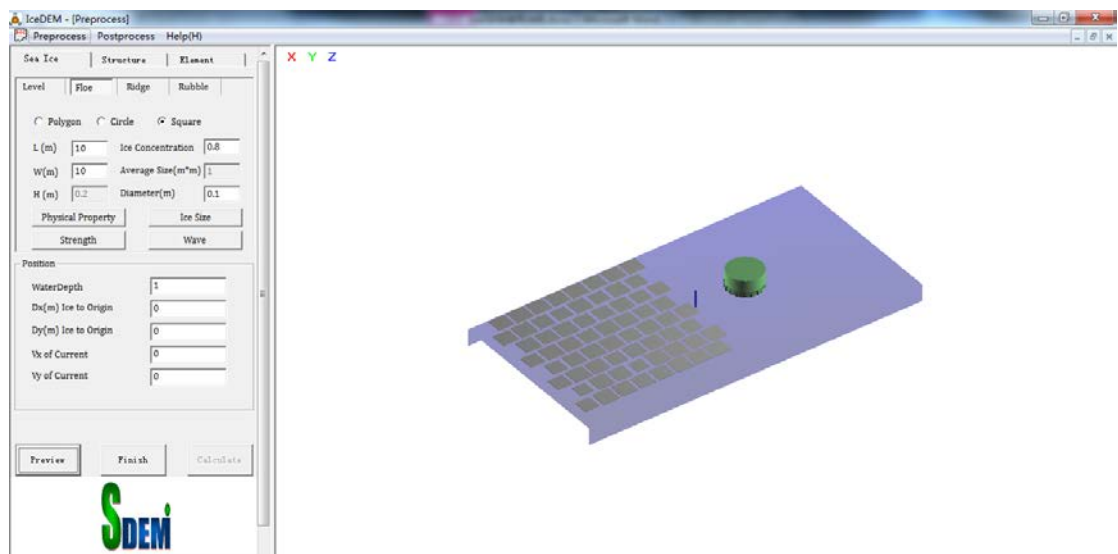
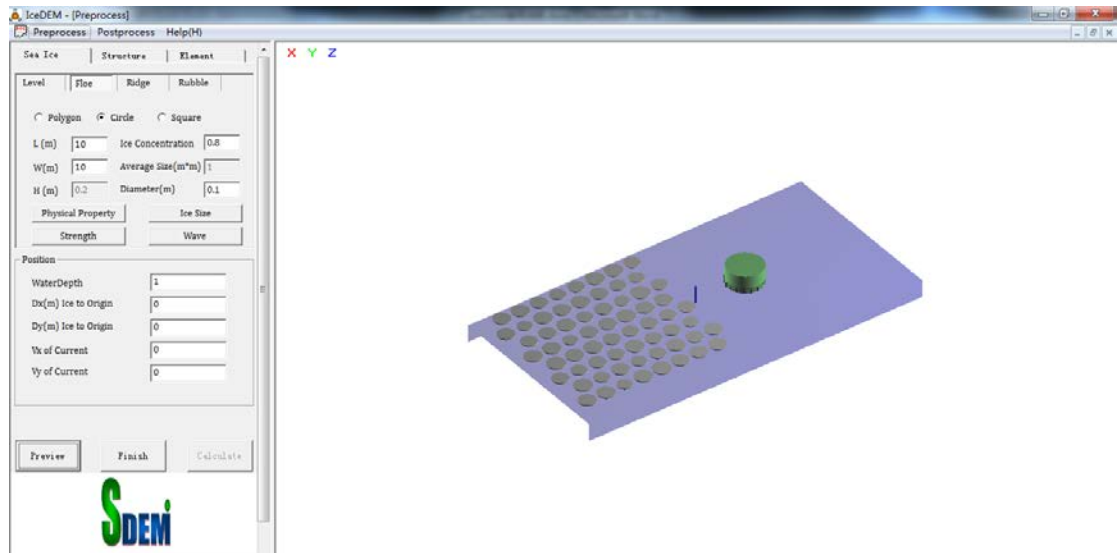
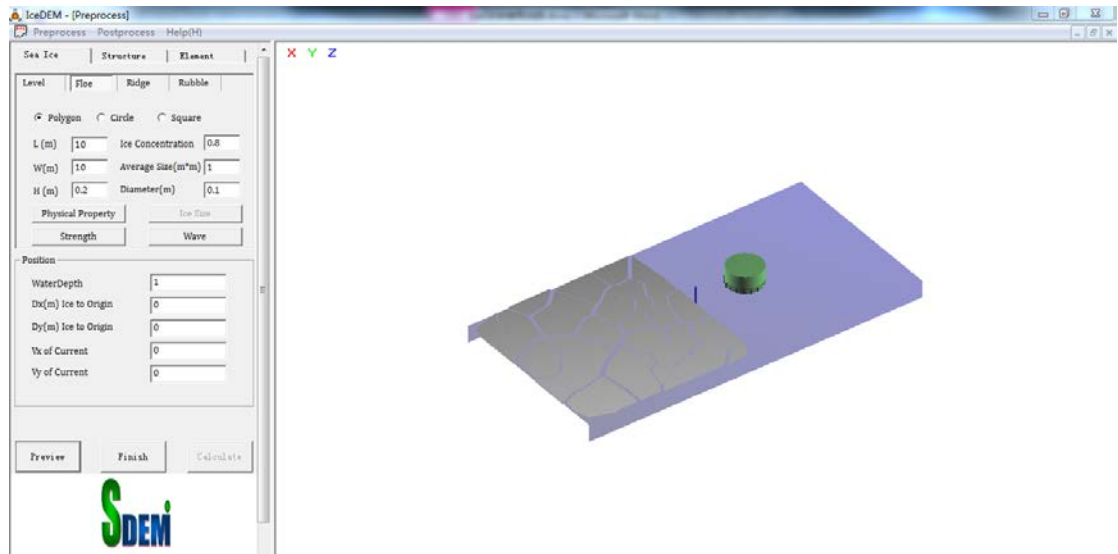


图 2.2.9 多边形浮冰、圆形浮冰、矩形浮冰示例

(c) 冰脊

冰脊可以建立一年冰脊模型。冰脊模型如图 2.2.10。设置参数如图 2.2.2 (c)。各个参数代表的含义与图 2.2.10 标示相对应。

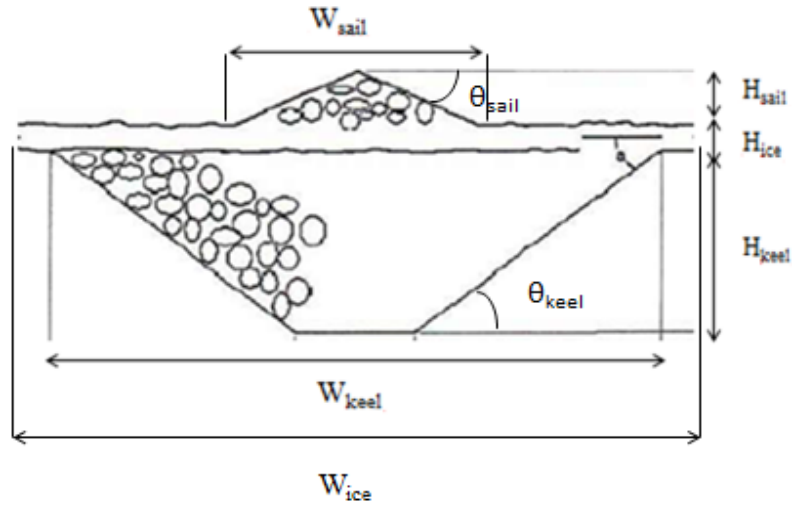


图 2.2.10 冰脊模型

Length: 冰脊纵向长度

Diameter: 单元颗粒直径

Physical Property : 与平整冰、浮冰参数及作用相同

Strength : 单击按钮，会弹出冰脊强度设定对话框，如图 2.2.11。由于冰脊有三部分组成：龙骨，固结层及冰帆，所以各部分的强度需分开定义。龙骨部分，采用摩尔-库伦强度准则进行定义，包括 **Cohesion** 粘结力，**Friction** 摩擦角，**Porosity** 孔隙率。固结层类似平整冰，直接定义海冰的压缩强度 **Strength**。

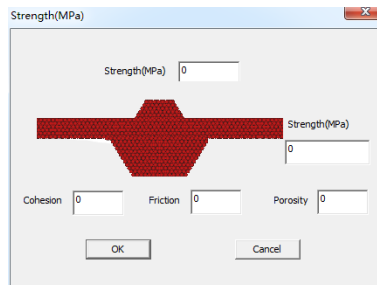


图 2.2.11 冰脊强度设定

图 2.2.12 给出冰脊模型示例。

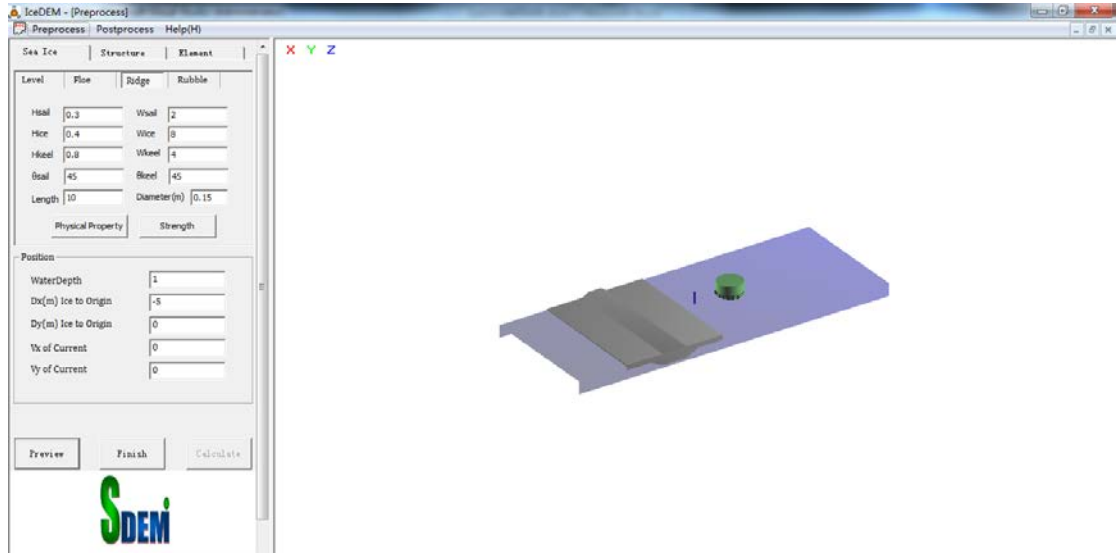


图 2.2.12 冰脊模型示例

2.2.2 结构建模:

单击最上方的 **Structure** 按钮，就进入了结构建模菜单。如图 2.2.13。菜单包括四个部分：结构尺寸参数，局部力网格划分，结构位置及结构物理力学参数。

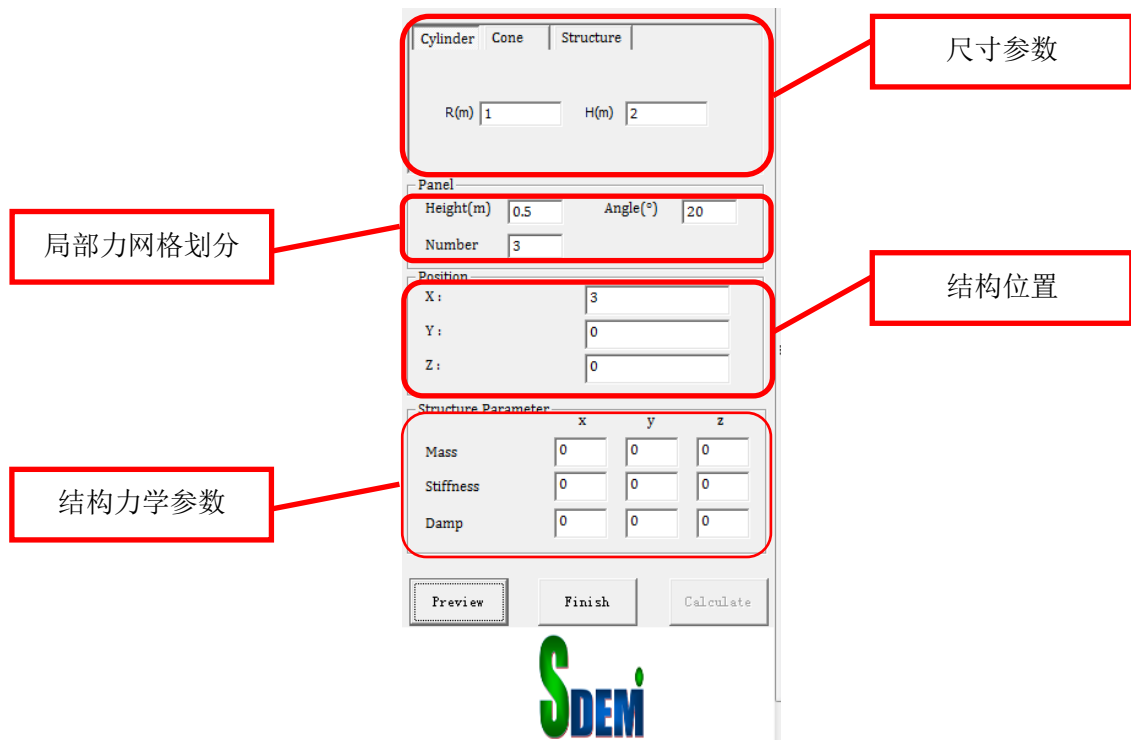


图 2.2.13 结构建模菜单

结构尺寸：可以选择三种类型的结构，包括直立体结构、锥体结构及复杂结构。所对应的菜单如图 2.2.14 所示。

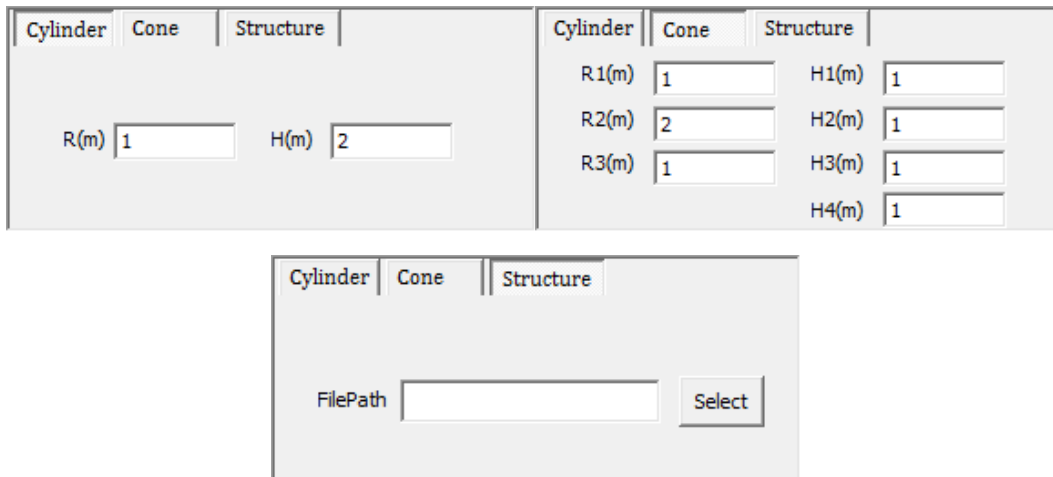


图 2.2.14 结构尺寸参数

参数含义:

在 Cylinder 中, R 设定直立腿半径, H 设定直立腿高度。

在 Cone 中, 各个参数所代表的含义与图 2.2.15 相对应。

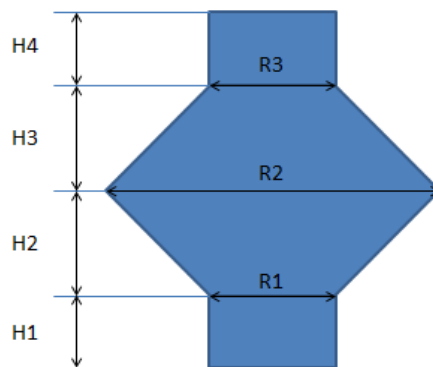


图 2.2.15 锥体结构参数

在 Structure 中, 前处理可读取手工建立的复杂模型, 模型由三角形单元构成, 文件格式如图 2.2.16。

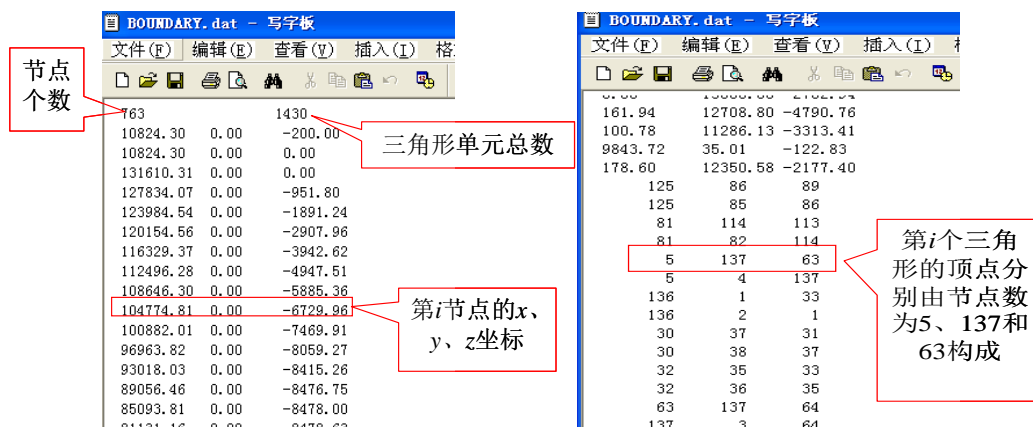


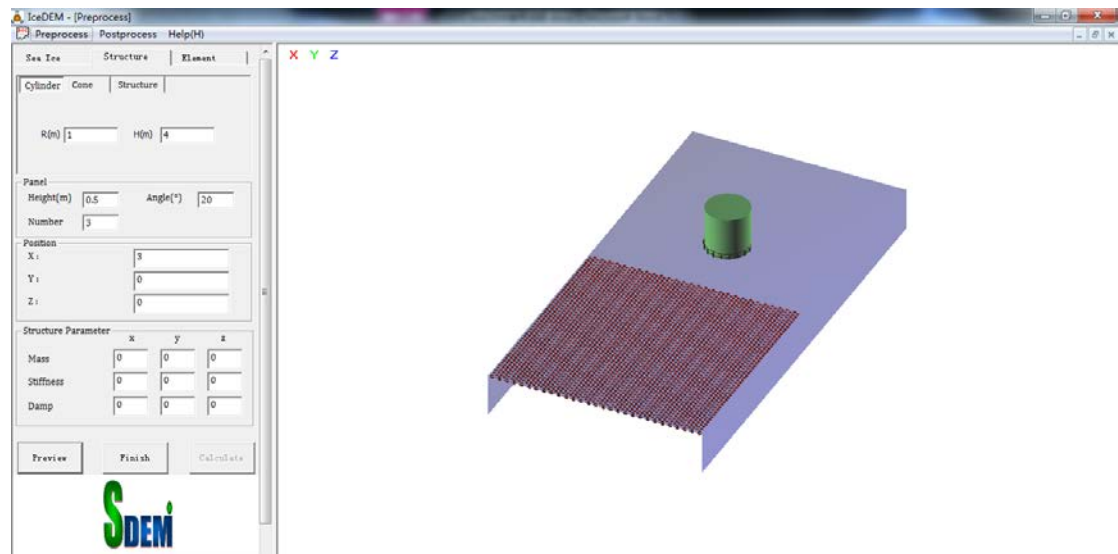
图 2.2.16 复杂模型文件格式

局部力网格划分：Height 网格高度，Number 纵向网格数量，Angle 单个网格中心角。

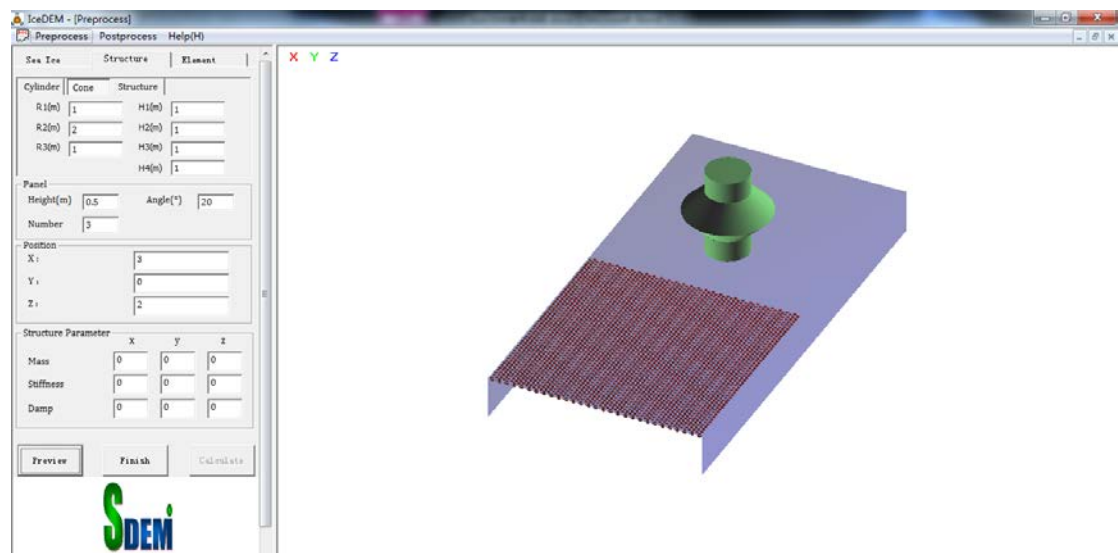
结构位置：x, y, z 设定结构在坐标系内的位置

结构力学参数：Mass 设定结构质量，Stiffness 设定 x, y, z 三个方向结构的刚度，Damp 设定 x, y, z 三个方向的阻尼。

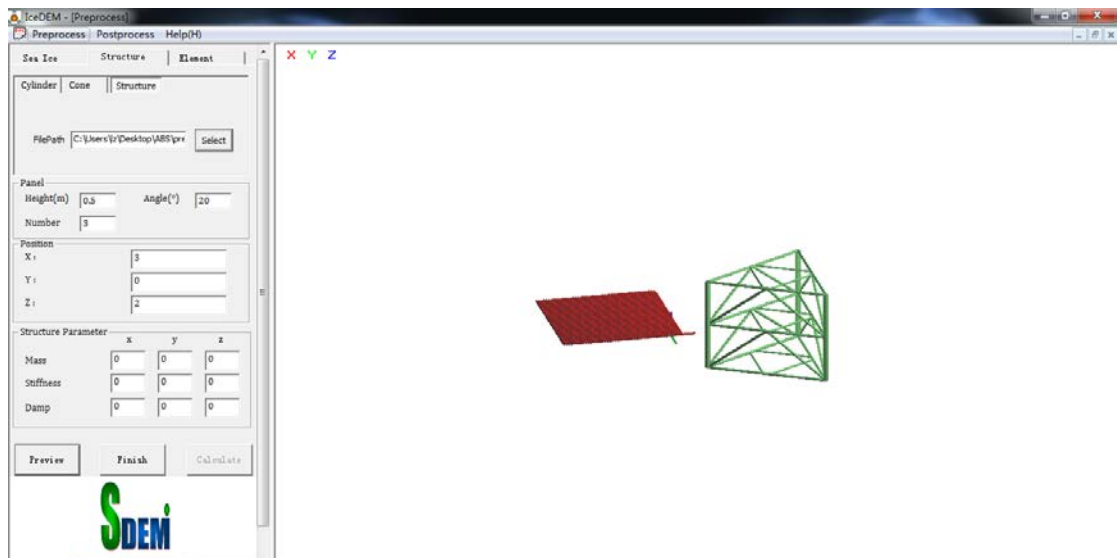
结构模型示例如图 2.2.17 所示。



(a)直立体



(b)锥体



(c)复杂结构

图 2.2.17 结构模型示例

2.2.3 单元参数:

主要用于设定球形颗粒单元的微观性质。菜单参数如图 2.2.18 所示。

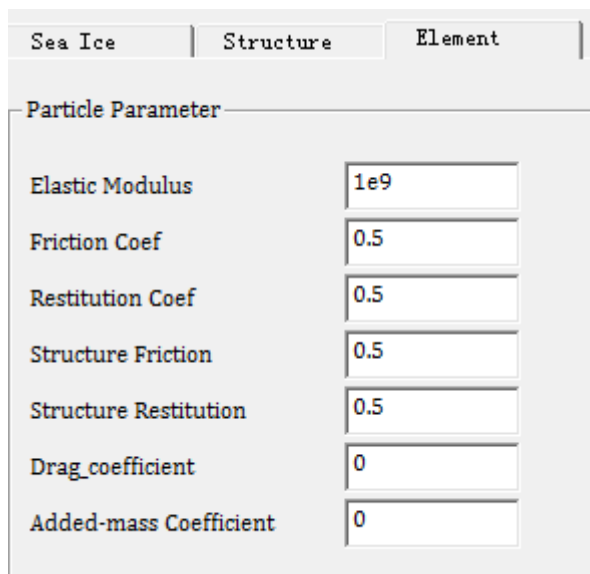


图 2.2.18 单元参数菜单

各参数含义如下:

Elastic Modulus: 颗粒间弹性模量

Friction Coef: 颗粒间摩擦系数

Restitution Coef: 颗粒间回弹系数

Structure Friction: 颗粒与结构之间的摩擦系数

Structure Restitution: 颗粒与结构之间的回弹系数

Drag coefficient: 水流对颗粒的拖曳系数

Added-mass coefficient: 波浪作用时颗粒的附加质量系数

2.3 计算模型

2.3.1 离散单元模型:

在采用离散单元模型计算海冰的动力作用及破碎过程中,将海冰离散为具有一定质量和大小的颗粒单元,单元间具有相应的粘接作用。这里对海冰离散元模型中的接触力模型、粘接模型及粘接强度的设定进行介绍。

(a) 单元间的接触力模型

在颗粒相互作用过程中,一般考虑单元间因相对速度和弹性变形而引起的粘弹性作用力,并采用 Mohr-Coulomb 摩擦定律计算剪切力^[16-17],如图 1 所示。其中, M_A 和 M_B 为颗粒 A 和 B 的质量, K_n 和 K_s 分别是法向和切向刚度系数, C_n 和 C_s 是法向和切向阻尼系数, μ 是摩擦系数。

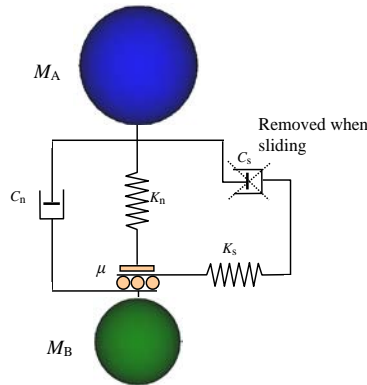


图1 两个单元间的接触力模型

Fig. 1 Contact force model between two elements

单元间法向力包括弹性力和粘滞力两部分,即

$$F_n = K_n x_n - C_n \dot{x}_n \quad (1)$$

式中, x_n 和 \dot{x}_n 分别为颗粒的法向变形和应变率。

单元间的切向力也由弹性和粘滞两部分组成,且满足 Mohr-Coulomb 摩擦定律,有

$$F_s^* = K_s x_s - C_s \dot{x}_s \quad (2)$$

$$F_s = \min(F_s^*, \text{sign}(F_s^*) \mu F_n) \quad (3)$$

式中, x_s 和 \dot{x}_s 分别为颗粒的切向变形和应变率。

球单元 A 和 B 碰撞的法向有效刚度系数为

$$K_n = \frac{2k_n^A k_n^B}{k_n^A + k_n^B} \quad (4)$$

式中, k_n^A 和 k_n^B 分别为球单元 A 和 B 的刚度系数。

法向阻尼系数按下式计算, 即

$$C_n = \zeta_n \sqrt{2MK_n} \quad (5)$$

这里无量纲法向阻尼系数为

$$\zeta_n = \frac{-\ln e}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}} \quad (6)$$

式中, M 为两颗粒单元的有效质量, e 为回弹系数。切向和法向刚度、阻尼系数有如下关系: $K_s = \alpha K_n$, $C_s = \beta C_n$, 这里取 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.0$ ^[16-17]。

在线性接触模型中, 计算步长一般取时间步长为二元接触时间的 1/50。该二元接触时间定义为

$$T_{bc} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{2K_n}{M}(1-\zeta_n^2)}} \quad (7)$$

式中, T_{bc} 为二元接触时间, 即两个球单元从碰撞到分离的接触时间。在线粘弹性模型中, 它是一个与颗粒大小和材料性质相关的常数。

(b) 平行粘接模型

考虑单元间的冻结作用, 应建立颗粒的粘接模型。粘接模型可以分为两种: 接触粘接和平行粘接。接触粘接的粘接仅发生在接触点上, 并且只能传递力; 平行粘接将两个球体胶粘在一起, 不仅可以传递力, 还可以传递力矩。本文采用平行粘接模型以更合理地模拟海冰单元间的粘接作用。

在平行粘接中, 两个粘接颗粒单元间设定一个弹性粘接圆盘, 如图 2 所示。圆盘可以传递两个单元间的作用力和力矩, 即拉力、剪力、弯矩和扭矩。并且, 力和力矩都可以分解为法向分量和切向分量

$$\vec{F}_i = \vec{F}_i^s + \vec{F}_i^n \quad (8)$$

$$\vec{M}_i = \vec{M}_i^s + \vec{M}_i^n \quad (9)$$

式中, \vec{F}_i^n, \vec{M}_i^n 和 \vec{F}_i^s, \vec{M}_i^s 分别是法向分量和切向分量。

在平行粘接模型中，粘接圆盘上的最大拉应力和剪应力依据梁的拉伸、扭转和弯曲理论有

$$\sigma_{\max} = \frac{-\bar{F}^n}{A} + \frac{|\bar{M}_i^s|}{I} \bar{R} \quad (10)$$

$$\tau_{\max} = \frac{|\bar{F}_i^s|}{A} + \frac{|\bar{M}^n|}{J} \bar{R} \quad (11)$$

式中， A 、 J 和 I 分别为平行接触圆盘的面积、极惯性矩和惯性矩，有 $A = \pi \bar{R}^2$ ， $J = 1/2 \pi \bar{R}^4$ ， $I = 1/4 \pi \bar{R}^4$ ，其中 \bar{R} 为粘接圆盘的半径。当最大拉应力和剪应力超过其拉伸强度和剪切强度时粘接单元将断开。

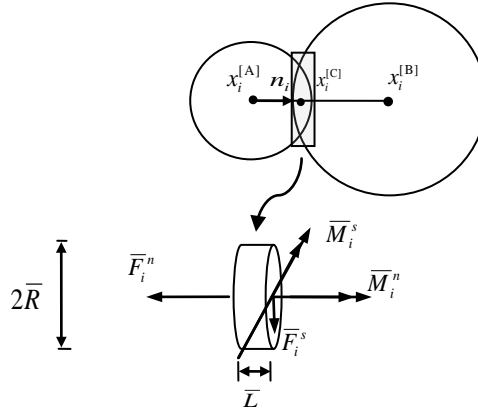


图2 两个单元间的平行粘接模型

Fig. 2 Parallel bond between two elements

(c) 粘接强度的确定

在海冰材料的离散单元模型中，海冰单元的粘接强度是影响计算结果的关键参数。考虑计算中颗粒单元的大小对粘接力的影响，这里设定颗粒间的粘接强度为

$$\sigma_b = \frac{F_n^c}{A} \quad (12)$$

式中， σ_b 为粘接强度， F_n^c 为粘接单元破碎时的最大拉力。

试验结果表明，海冰单轴压缩强度是海冰卤水体积(温度、盐度)、加载速率等因素的函数^[6,18]。在主要考虑卤水体积影响的情况下，可将海冰单元间的粘接强度用单元间最大粘接强度 σ_b^{\max} 表示，即

$$\sigma_b = \beta(v_b) \sigma_b^{\max} \quad (13)$$

式中， $\beta(v_b)$ 为卤水体积 v_b 影响下的海冰强度折减系数。海冰单元间的最大粘接强度 σ_b^{\max} 可通过海冰单轴压缩强度的敏度分析进行确定。考虑海冰的压缩和弯曲强度与卤水体积有相似的对对应关系^[19]，则有

$$\beta = e^{-4.29\sqrt{v_b}} \quad (14)$$

式中， v_b 可设为海冰温度和盐度的函数^[20]，即

$$v_b = S(0.532 + \frac{49.185}{|T|}) \quad (-0.5^\circ\text{C} \geq T \geq -22.9^\circ\text{C}) \quad (15)$$

式中， T 为海冰温度($^\circ\text{C}$)， S 为海冰盐度(‰)。

2.3.2 GPU 计算模型：

2.4 后处理

在主界面中，单击 **Postprocess** 按钮，将弹出如下对话框。后处理可以读取计算得到的三维动画数据 ANIMATION_3D.DAT，数据格式如图 2.4.2。具体输出格式要求，可以在主界面的 **Help (H)** 选项中查看。

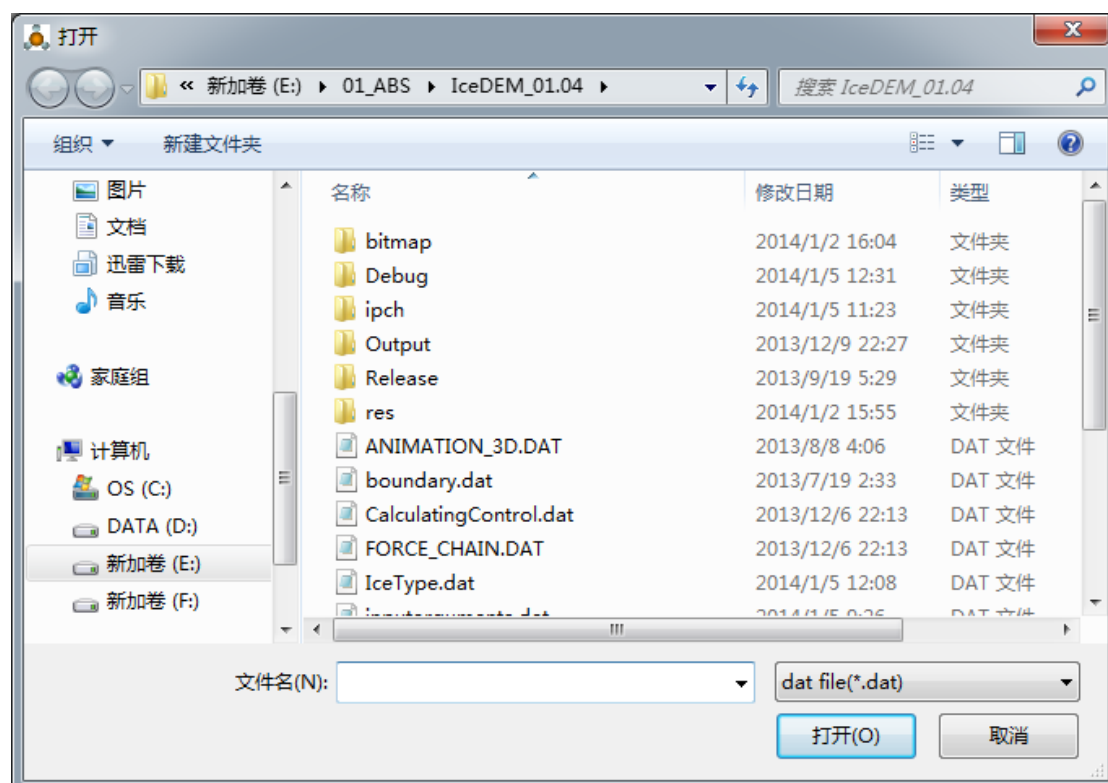
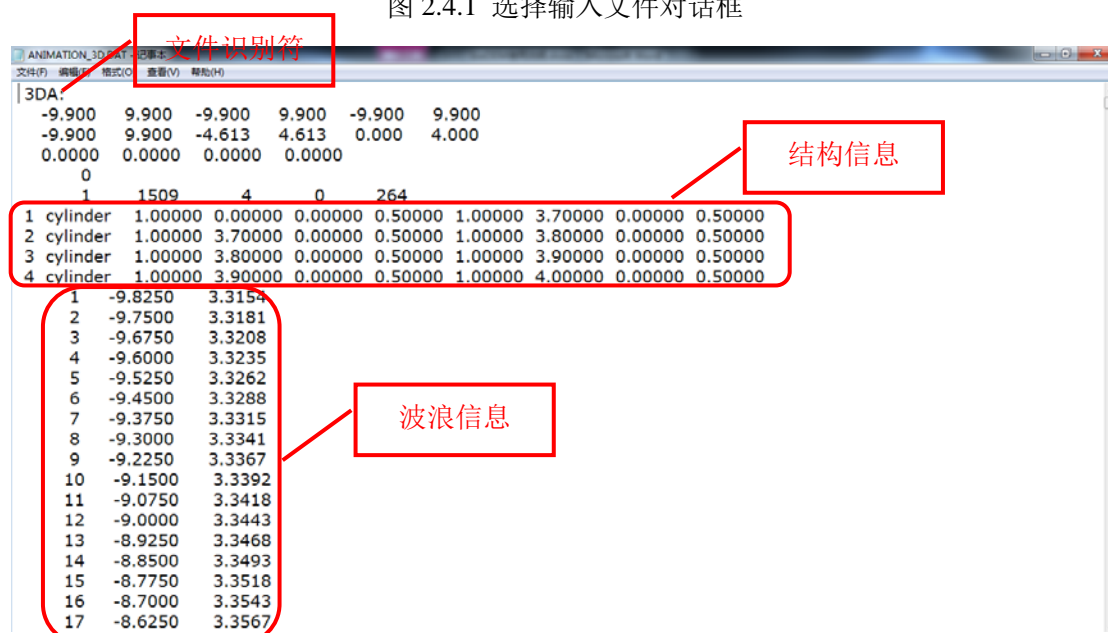


图 2.4.1 选择输入文件对话框



Particle ID	X	Y	Z	U	V	W	U _{rot}	V _{rot}	W _{rot}	U _{trans}	V _{trans}	W _{trans}
255	9.2250	3.3367										
256	9.3000	3.3341										
257	9.3750	3.3315										
258	9.4500	3.3289										
259	9.5250	3.3262										
260	9.6000	3.3235										
261	9.6750	3.3209										
262	9.7500	3.3182										
263	9.8250	3.3154										
264	9.9000	3.3127										
1	-0.2000	2.4384	-4.2402	0.2000	40.0178	-0.0305	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	-0.2000	2.4384	-3.8938	0.2000	40.0007	-0.0601	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	-0.2000	2.4384	-3.5474	0.2000	39.9831	-0.0296	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	-0.2000	2.4384	-2.1617	0.2000	40.0002	-0.0611	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	-0.1000	2.4384	-1.9885	0.2000	40.0007	0.0601	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	-0.2000	2.4384	-1.8153	0.2000	40.0002	-0.1202	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	-0.1000	2.4384	-1.6421	0.2000	40.0007	0.0601	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	-0.2000	2.4384	-1.4689	0.2000	40.0002	-0.1202	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	-0.1000	2.4384	-1.2957	0.2000	40.0178	0.0305	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	-0.2000	2.4384	0.2631	0.2000	40.0015	-0.0023	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	-0.2000	2.4384	0.6095	0.2000	39.9997	-0.0018	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	-0.2000	2.4384	2.3416	0.2000	40.0002	0.0591	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	-0.1000	2.4384	2.5148	0.2000	40.0007	-0.0601	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	-0.2000	2.4384	2.6880	0.2000	40.0002	0.1202	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	-0.1000	2.4384	2.8612	0.2000	40.0007	-0.0601	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16	-0.2000	2.4384	3.0344	0.2000	40.0002	0.1202	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

颗粒单元信息

图 2.4.2 三维动画文件格式

单击选择输入文件，并单击 **打开(O)** 按钮，软件将对输入文件进行解析。如果输入文件比较大，则用户需要耐心等待一会。输入文件解析完成后界面如图 2.4.3 所示。界面分为三部分，菜单区，控制区及显示区域。

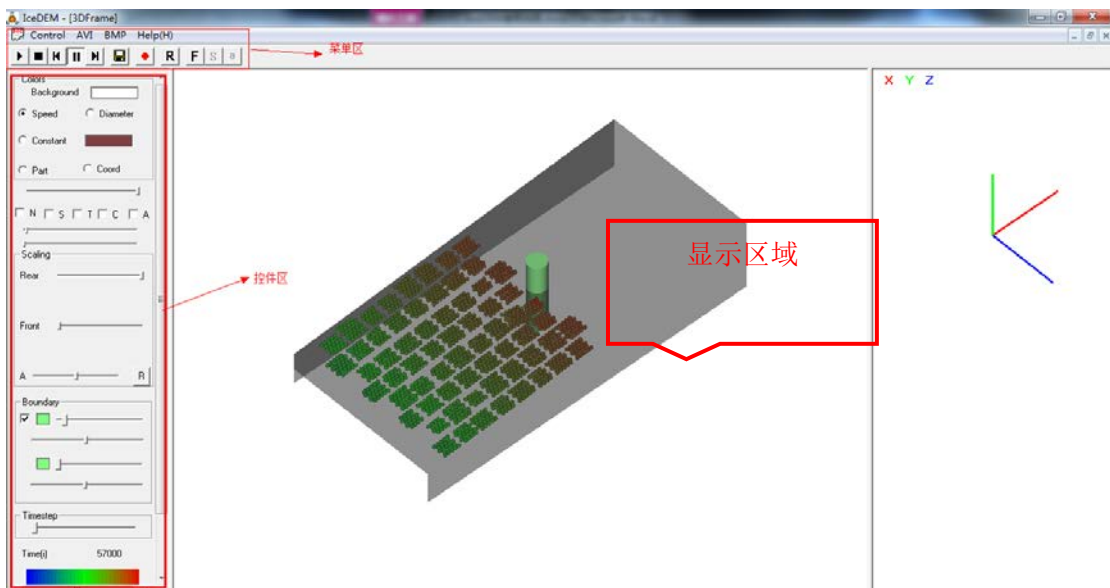



图 2.4.3 后处理工作界面

菜单区  的按键功能分别对应：动画播放，动画复位，动画快退，动画暂停，动画快进，保存当前画面图片（jpg，bmp 格式），保存动画视频（avi 格式），动画自动旋转，冰力结果时程曲线，结构位移时程曲线及结构振动时程曲线。

2.4.1 计算结果三维动态显示:

控件区各部分功能如图 2.4.4 标注所示。

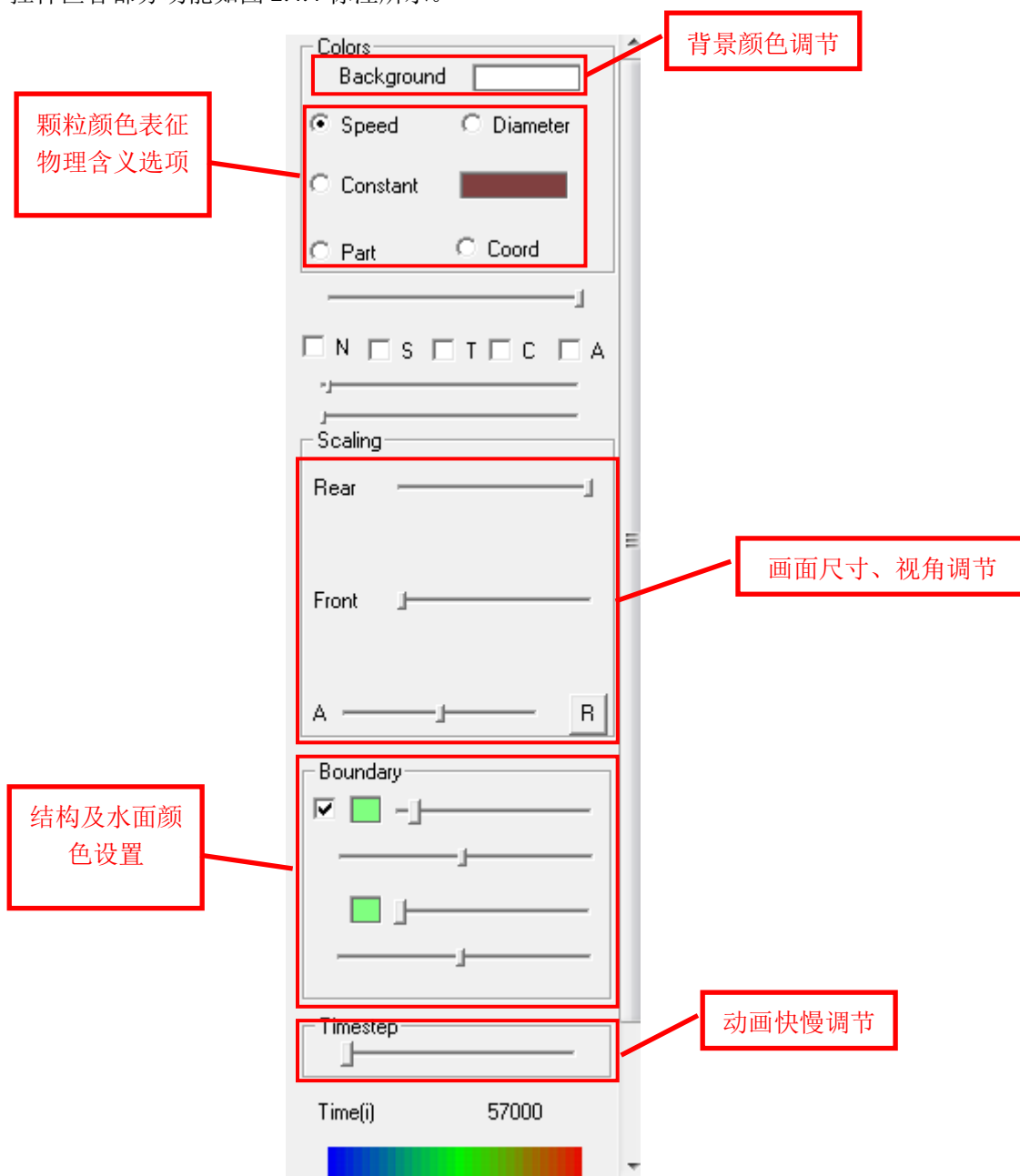
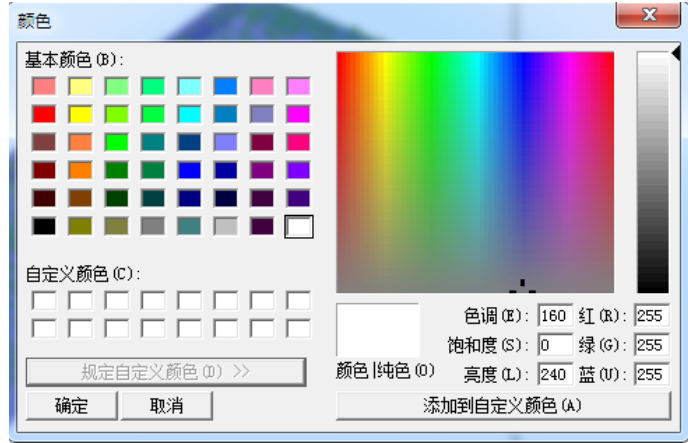


图 2.4.4 控件区标注

Color 区: **Background** 可调整整个画面的背景颜色, 单击 **Background** 右边的颜色块将弹出【颜色】对话框, 用户可自行选择合适的颜色, 若是颜色不合用, 可单击 **规定自定义颜色 (Q) >>** 按钮, 将弹出如图 2.4.5 所示的【颜色】对话框, 用户可以鼠标单击调色板区域, 添加自定义颜色。一个实际应用情况如图 2.4.6 所示。



(a) 颜色选择对话框



(b) 自定义颜色对话框

图 2.4.5 背景颜色选择项

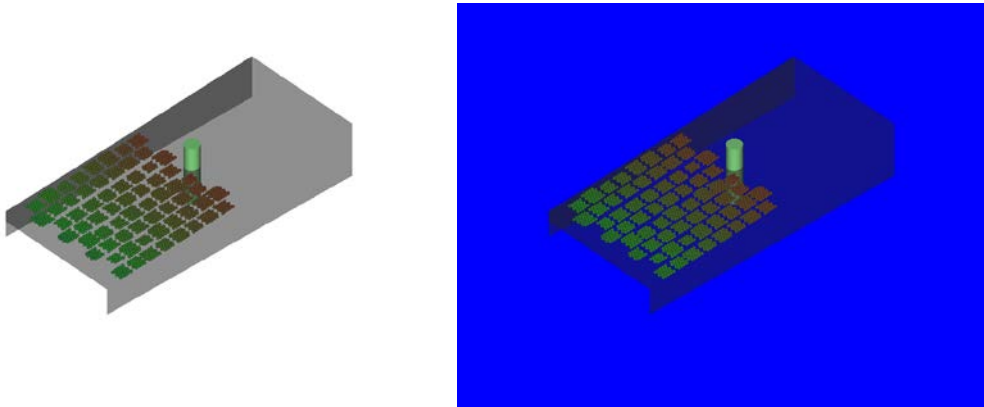
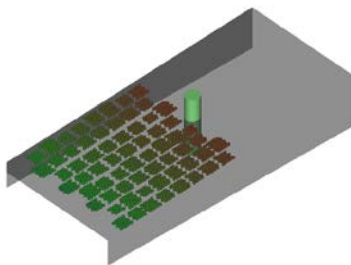
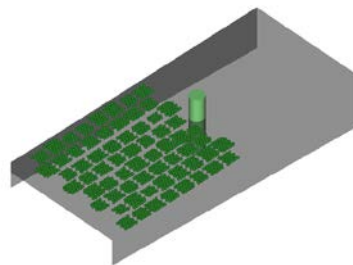


图 2.4.6 不同背景下的显示效果

对于颗粒颜色所代表的物理意义，Speed 表示速度，Diameter 表示颗粒直径，Constant 将颗粒统一绘制成同一颜色，part 显示用户自定义物理量，在输出文件颗粒信息最后一列给出。颗粒颜色代表数值的大小，具体趋势，如图 2.4.4 最下方颜色渐变条所示，颜色越偏向红色，所代表的数值越大。不同选项的效果如下图。



(a) speed



(b) diameter

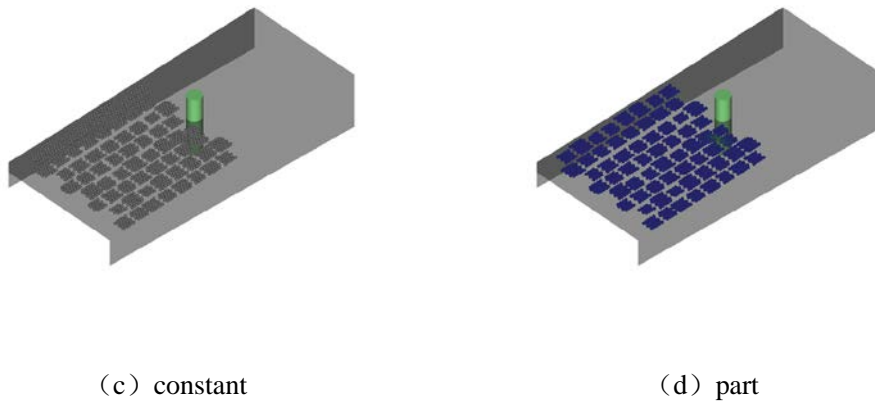


图 2.4.7 不同选项下的显示效果

Boundary 区：可以调整结构的颜色和水面的颜色，上面选项用于调整结构的颜色及透明度，下面的选项用于调整水面的颜色及透明度。不同设置的效果如图 2.4.8。

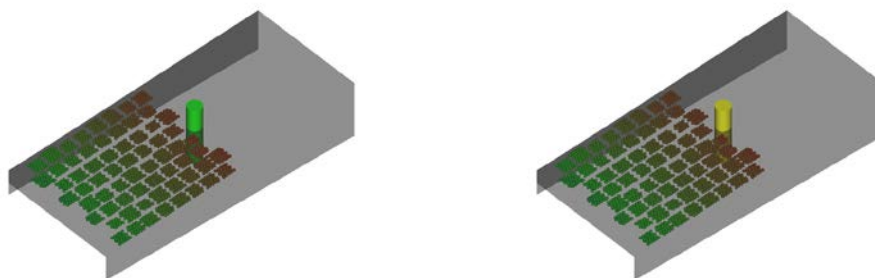


图 2.4.8 不同结构颜色选项下的显示效果

2.4.2 计算结果数值分析：

对于计算数值结果的显示，单击菜单区的 **F** **S** **a** 三个按钮，可分别得到冰力、结构位移、结构振动的时程曲线，结果如图 2.4.9 所示。

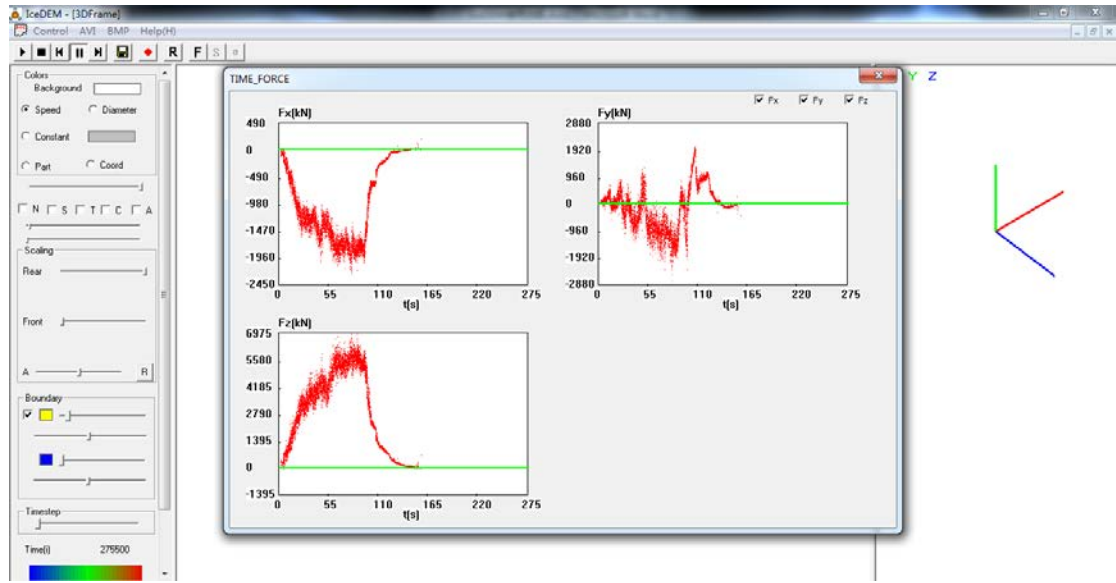


图 2.4.9 冰力时程曲线