

船舶にかかる氷荷重の評価法の基礎的研究

086685 出雲 太郎
指導教員 鈴木 克幸 教授

The Finite Cover Method (FCM), which is unified analysis method of discrete model and continuum model, is extended for the plate-bending problem for the analysis of progressive failure of sea level ice. The solid element with Wilson Taylor element is employed to avoid the shear locking in Mindlin plate, and good accuracy is obtained especially when the number of element is small. The method to introduce discrete plane in Finite Method to model the failure of ice is shown, and penalty spring is introduced to analyze the progressive failure of ice.

Key words: Finite Cover Method (FCM), Discrete Model, Continuum Model, Ice Crack

1 緒言

氷海域での船舶の安全のためには、船舶と氷板が衝突した際の荷重の予測が重要となる。船体の衝突の際の崩壊挙動を解析的に求める手法に関しては、近年多くの研究が行われているが、氷板の崩壊挙動の解析は、現在でもほとんど実験に依存している。

そこで、氷板の崩壊の挙動を解析するために、有限被覆法⁽¹⁾ (Finite Cover Method, FCM)の不連続体問題への拡張を行う。氷板は、それ自体が不均一な構造物である上に、崩壊の際には曲げにより亀裂が発生し、その進展によって崩壊が進むため、連続体モデルの解析では崩壊挙動を追うことはできず、不連続体モデルの導入が不可欠である。一方、その亀裂が入る位置は弾性的な曲げ応力によって決まると考えられ、連続体としての挙動から、不連続体としての挙動への変換が必要である。FCM は、連続体、不連続体の統合理論をベースとしており、連続体、不連続体を同時に解析することができるため、この種の解析には非常に適した手法であると考えられる。

砕氷船が氷板中を連続砕氷モード(Continuous Mode)で航行する時の砕氷プロセスの概念⁽²⁾は船首が氷板に接触し、局所的破壊を起こしつつ、曲げ破壊を起こしていくつかの三日月状あるいはCusp状の小氷板を形成する。船の進行にともない氷板は回転しながら船首底へ送り込まれ、再び未破壊の氷板に接触して同一のプロセスを繰り返す。

砕氷抵抗は1砕氷サイクル間に船体に作用する氷荷重の進行方向成分の時間平均値と考えられる。これを定量的に評価するためには船首が氷板にどのような荷重分布を与え、破壊に導いているのかというメカニズムを把握することが重要である。

2 有限被覆法

2.1 理論の概要

有限被覆法(FCM)は有限要素法(Finite Element Method: FEM)をより一般化させた解析法と言うことができるが、FCMは解析領域を近似関数空間と物理空間とに分離して扱うという点においてFEMと異なる。ここでは、FEMとの違いを述べながらFCMでの解析領域の捉え方を説明する。

FEMでは、解析対象を「要素」という微小部分領域に分割し、個々の要素において未知数を多項式などの「形状関数」によって近似的に記述して、それを再び系全体の連立代数方程式に組み立て直すというものである。FEMで

はこのような部分領域としての「要素」は次の条件を満たす。

1. 離散化のための基本単位は「要素」である。
2. 近似関数(形状関数)は「要素」において定義される。
3. 要素は支配方程式(釣り合い式、適合条件式・構成方程式)を満たす物理的な空間である。
4. 各要素は互いに共通部分を持たない。

つまり、FEMでは離散化の基本単位となる部分領域はあくまで「要素」であり、同時にその要素はそのまま支配方程式が満たされるべき物理的な部分領域でもある。

一方、FCMの離散化の基本的なコンセプトは、上に述べたようなFEMのものと同様であるが、離散化の単位となる部分領域の捉え方に以下のような違いがある。

1. 離散化のための基本単位は「被覆」である。
2. 近似関数は「被覆」において定義される。
3. 被覆は物理的な空間とは切り離して定義することができ、支配方程式は物体領域において満たされればよい。
4. 被覆は物理領域を覆い尽くすように設置される。
5. 「要素」は物理被覆の共通領域として定義される福産的な単位である。

つまり、FCMでは離散化の単位は「被覆」である。

2.2 各被覆における変位

FCMにおいては、各被覆において、変位は以下のように近似される。

$$u(x) = \sum_i f_i(x) w_i(x) \quad (1)$$

ただし、

$f_i(x)$: 被覆関数

$w_i(x)$: 重み関数

である。

積分を行う必要のある物理領域は2次元の場合は $k=25$ 、3次元の場合は $k=125$ となる。

被覆関数は基本的に任意に設定できるが、これらの関数は、被覆ごとの被覆関数と重み関数の積がお互いに一次独立性を保つように定義しなければならない。

3 不連続面の導入

有限被覆法においては定型被覆を用いるため、各要

素は直方体形状になるが、その直方体に対して亀裂の発生により、図1に示すような不連続面が生成したとする。

この領域は不連続面を境として領域 Ω_A と Ω_B に分かれるものとする。

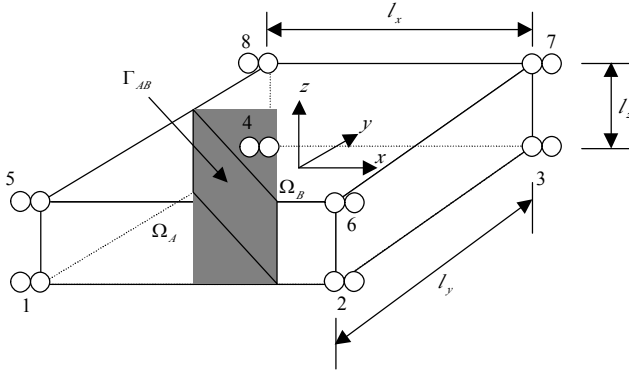


Fig. 1 Finite cover with discrete plane

有限被覆法においては、それぞれの領域の変位を別々の独立な変位関数で定義する。そして、それぞれの変位関数は同じ直方体要素の各節点での変位で表現される。すなわち、各節点において図1に示すように変位が2重に定義される。これらの領域に対して、領域の端から端までのニュートンコッツ積分を行う。また、このとき、各内外判定サンプリングポイントについて、要素内では1、要素外では0を用いて重み付けすることにより、各要素における内外判定を行う。

新たに生じる不連続面として主応力の最大の成分が破壊応力を超えたときに、図2に示すようにその評価点を通り、主応力方向に垂直な面に亀裂が入ったと考え、不連続面を定義する。

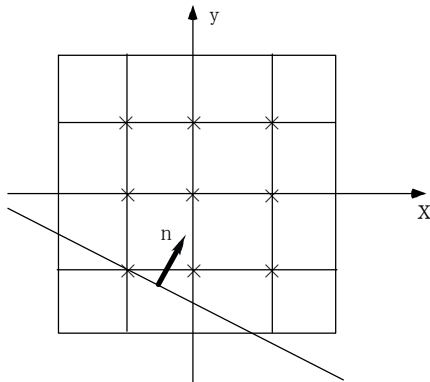


Fig. 2 New crack plane

4 研究内容

本研究では現実問題に近い現象の解析を行うことを目指す。

現実の氷板は潜在的亀裂が基本的に無いと考えられ、また船舶運行の際に海洋上で確認、分析することは不可能であるため、現実問題に即した形にするため、潜在的亀裂の無い氷板の崩壊解析を行う。

5 シミュレーション

潜在的亀裂のない氷板の4辺の角度と変位を固定し、垂直方向下向きの一様荷重を加えると図3に示すような変位を示す。この時の変位は中心部より、上下左右対称になっている。

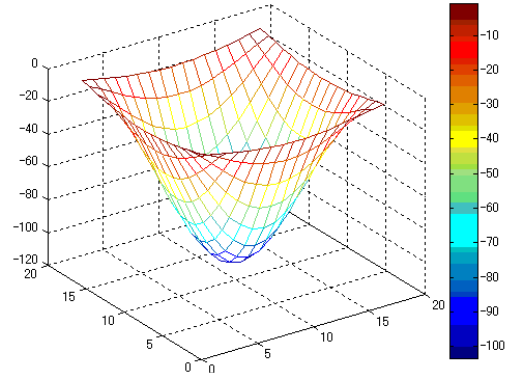


Fig. 3 Ice Plate (Displacement)

この時、氷板を上方向から見ると図4に示すような亀裂が生じる。

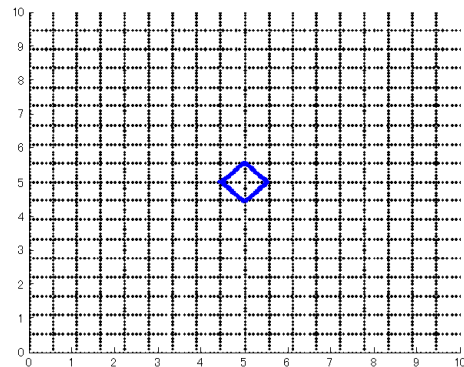


Fig. 4 Ice Plate (crack)1

さらに大きな荷重を加えると図5に示すような亀裂が生じる。

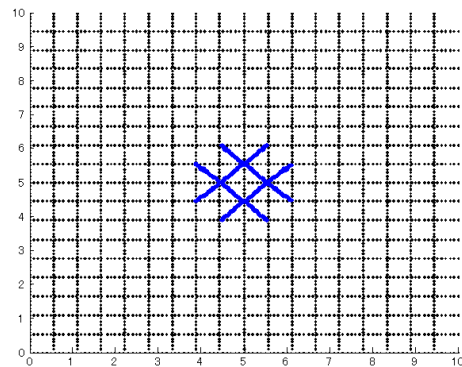


Fig. 5 Ice Plate (crack)2

さらに大きな荷重を加えると図 6 に示すような亀裂が生じる

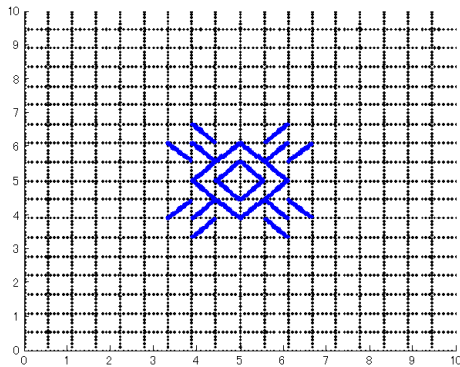


Fig. 6 Ice Plate (crack)3

この時、氷板の中心付近に亀裂が生じている。これは、この部分に応力が集中していることを示している。

また、中心部より、上下左右対称に亀裂が生じていることがわかる。

さらに大きな荷重を加えると図 7 に示すような亀裂を生じる。

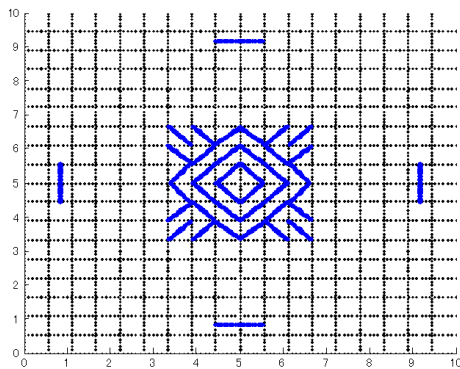


Fig. 7 Ice Plate (crack)4

この時中心部以外に、固定している 4 辺付近にも亀裂が生じた。

また、中心部より、上下左右対称に亀裂が生じている。

さらに大きな荷重を加えると図 8 に示すような亀裂を生じる。

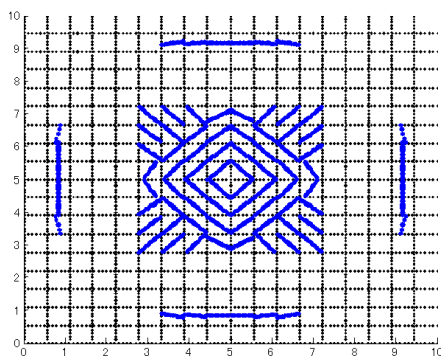


Fig. 8 Ice Plate (crack)5

この時氷板の中心部付近の亀裂、固定されている 4 辺付近の亀裂共に大きく進展している。

またこの時も、中心部より、上下左右対称に亀裂が生じている。

さらに大きな荷重を加えると図 9 に示すような亀裂を生じる。

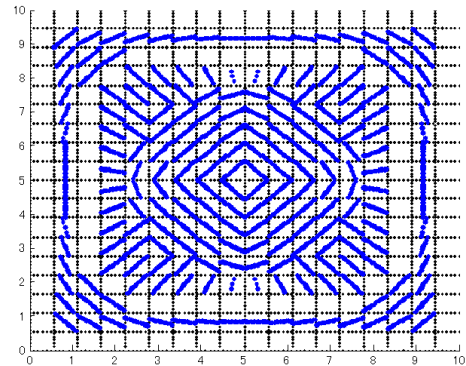


Fig. 9 Ice Plate (crack)6

この時氷板のほぼ全面に亀裂が生じている。

またこの時も、中心部より、上下左右対称に亀裂が生じている。すべての場合において中心部より、上下左右対称に亀裂が生じた。

6 実験

氷板に荷重を加えた場合に起こる現象を再現したシミュレーションと比較するために実験を行う。

・実験 1

図 10、図 11 に示すように氷板の 4 辺を固定し、荷重を加える。

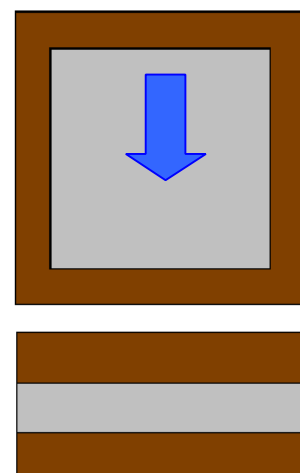


Fig. 10 Ice Plate (Fixed)

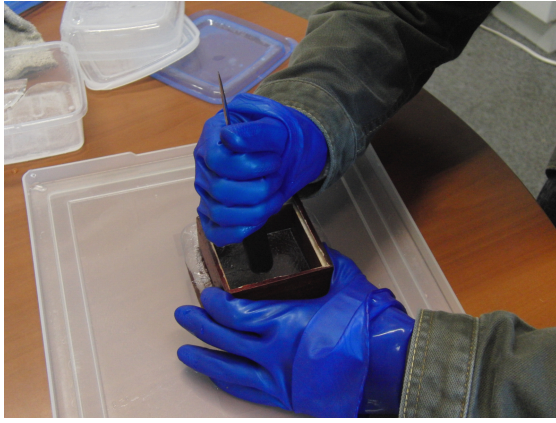


Fig. 11 Ice Plate (Fixed)2

・実験 1-1 集中荷重を想定し、先端が尖ったアイスピックを用いて荷重を加える。

・実験 1-2 ある程度の分布荷重を想定し、直径約 1.5cm の角材を用いて荷重を加える。

・実験結果

アイスピックを用いた集中荷重では、氷板に亀裂が一本入り氷板が 2 片に割れた。

一方、角材を用いた分布荷重では、氷板に放射状に亀裂が入り、氷板がいくつもの細かい氷片に割れた。

・実験 2

水上に浮いた氷に加わる浮力を想定し、図 12 に示すようにやわらかいスポンジの上に氷板を置き、荷重を加える。

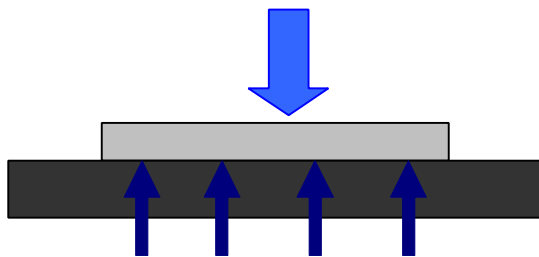


Fig. 12 Ice Plate (Buoyancy)

・実験 2-1 集中荷重を想定し、先端が尖ったアイスピックを用いて荷重を加える。

・実験 2-2 ある程度の分布荷重を想定し、直径約 1.5cm の角材を用いて荷重を加える。

・実験結果

アイスピックを用いた集中荷重では、氷板に亀裂が一本入った。

一方、角材を用いた分布荷重では亀裂が大きく入り、氷板が 4 片に崩壊した。

考察

・実験 1-1 では氷板に亀裂が 1 本入り、2 片に割れたが、実験 2-1 では亀裂が 1 本入ったのみで、氷板が割れること

は無かった。これは下に敷いたスポンジが荷重を吸収したためだと考えられる。

・実験 2-2 では氷板に亀裂が入って、氷板が崩壊したが、実験 1-2 では角材で荷重を加えた部分全体が崩壊し、そこから周りを巻き込むように亀裂が入った。これは実験 1-2 では氷板全体に反力が加わっているのに対し、実験 2-2 では荷重を加えている部分には反力が加わっていないためであると考えられる。

工夫点と問題点

本来であれば薄い氷板を広い水面に浮かべて実験を行うのが良いと考えられるが、薄い氷板はすぐに壊れてしまうなど扱いが難しい。また、水面に浮かべても、境界条件を加えないと荷重を加えても水中に沈むだけになってしまう。

そこで工夫点として今回の実験では氷板を厚くし、スポンジの上に置き、浮力の代わりとなる反力を加え、疑似的に水上に浮かんでいる状態を作り出し、氷板が水中に沈む現象を回避した。また、四角いフレームで氷板の 4 辺を固定することにより、境界条件を与え、氷板が水中に沈む現象を回避した。

問題点として氷板をスポンジの上に置いた実験では、浮力の代わりとなる反力が強すぎたために、荷重を加えた点で通常の破壊が起こり、荷重点から板曲げが起こり、周りの氷板を巻き込むような崩壊現象は起こらなかった。氷板の下に物体を置くと氷板の曲げによる破壊よりも先に通常の破壊が起きてしまう。

またフレームで固定した実験においても氷板が厚かったため、集中荷重を加えた際には通常の破壊が起こり、周りの氷板を巻き込むような崩壊現象は起こらなかった。

問題の解決方法として、薄くて広い氷板を用い、ある程度の分布荷重を加えることが考えられる。

7 結論

今回開発したシミュレーション手法では FCM を用いることにより、亀裂が生じた後の氷板も続けて崩壊挙動の解析を行うことができた。

結果として、荷重を加えた点から上下左右対称の亀裂が生じたが、上下左右条件が同じためこのような解析結果が出たことは正確な解析ができたものと考えられる。

また行ったシミュレーションと条件に近い実験 1-2 ではシミュレーション結果と同様に中心部から周りの水を巻き込む形で氷板の崩壊が起こった。

このことから今回開発した手法が適切であったと考えられる。

文献

- 1) 鈴木克幸, 大坪英臣, 藤井大地, 吉田博俊 : 有限被覆法による板曲げ不連続体解析法の開発, 日本造船学会論文集 第 190 号, pp.649-654, (2001).
- 2) 野澤和男 : 氷海工学, 成山堂書店, (2006).
- 3) 山田知典, 長嶋利夫 : 構造格子を用いたメッシュフリー有限要素解析における境界要素積分法, 日本原子力研究開発機構(2009)