

PS-23 Non-smooth DEM による全体氷荷重推定 シミュレーションと氷海水槽試験

海洋開発系 *長谷川 賢太、所長 宇都 正太郎
流体設計系 下田 春人、若生 大輔、松沢 孝俊

1. はじめに

北極圏において豊富な石油・天然ガス資源の存在が明らかとなり¹⁾氷海域での資源開発に対する関心が高くなっているが、海氷や氷山による脅威から開発はあまり進んでいない。掘削等に用いられる浮体式構造物はその位置を保持する必要があるため、その周囲で砕氷船が海水を細かく砕く作業（アイスマネージメント）を行うことがある。アイスマネージメントにより生成された氷盤はマネージドアイスと呼ばれ、これまで氷海工学で中心に研究されてきた大氷盤群中における船舶の抵抗推定性能推定や小氷盤群中における航行に必要な主機出力推定等と異なり、本分野では多数の氷盤干渉と氷盤の破壊を考慮した氷荷重推定が必要となる。本研究では、氷海域における掘削の実績もあるモノコラムハル型構造物に作用する全体氷荷重について氷海水槽試験と物理エンジンを利用した Non-smooth DEM (Discrete Element Method: 個別要素法) による数値シミュレーションを実施し、比較検討を行った。

2. 氷海水槽試験

当所の氷海船舶試験水槽(図-1)において、マネージドアイス環境を再現し抵抗試験を実施した。水槽は長さ 35m, 幅 6m, 水深 1.8m で模型氷の強度(主に曲げ)や弾性率、密度を模型スケールへ縮尺するためにプロピレングリコールを水に溶解させテンバリングや気泡を氷の中に閉じ込める等の方法により製氷されている。模型氷の曲げ強度と弾性率を計測するために、製氷毎に片持ち梁試験と PDM (Plate De-

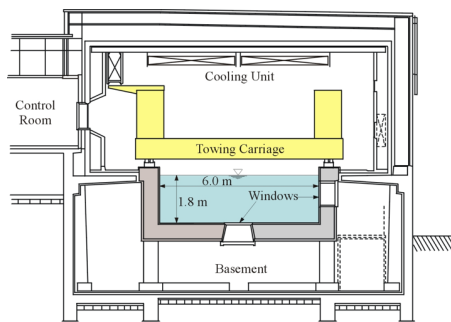


図-1 氷海船舶試験水槽の概略図

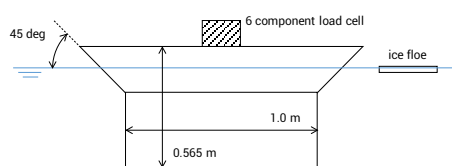


図-2 モノコラムハル型構造物模型

flection Method) を実施した。製氷された 1 枚の大きな模型氷(母氷板)を 60cm 角にカットし、氷密接度が 75% になるように模型氷をランダムに配置した。水槽壁には母氷板を残して氷と氷の干渉が生じるようにしている。モノコラムハル型構造物模型(図-2)は逆円錐のような形状を有し、水槽の曳航台車に 6 分力計を介し固定される。曳航速度 0.07m/s の一定速度で上記の氷板群中を走行し、開水面での抵抗値を引いて氷荷重を計測した。

3. 数値シミュレーション

多数の氷板干渉を取り扱うために計算コストの低い Non-smooth DEM を用いたオープンソースライブラリの物理エンジンである Bullet²⁾を衝突判定や拘束力の計算等に利用した。表-1 に主な計算条件を示す。曲げ強度と弾性率は実験で得た値を使用し、圧縮とせん断強度はそれぞれ曲げ強度の 4 倍と 2 倍の値³⁾とした。氷板モデルの初期配置は、実験で撮影した模型氷の初期配置映像から watershed アルゴリズム⁴⁾等を用いて個々の氷板位置や回転を取り出し数値シミュレーション上で再現した(図-3)。氷海水槽試験と同様に構造物モデルの運動を拘束し、一定速度で surge 方向に氷板群中を移動する際に生じる接触力を表面積分し、全体氷荷重として計算した。構造物周りの流れは単純化したポテンシャル流れを仮定して個々の氷板モデルに流体力を与えている。各氷

表-1 計算条件

ITEM	UNIT	VALUE
Ice floe		
length × breadth	m	0.6 × 0.6
thickness	m	0.033
density	kg/m ³	930.0
bending strength	kPa	36.4
compressive strength	kPa	145.6
shear strength	kPa	72.8
elastic modulus	MPa	60.0
Coef. of friction		
ice-ice	-	0.7
ice-structure	-	0.3
Timestep	sec	0.02

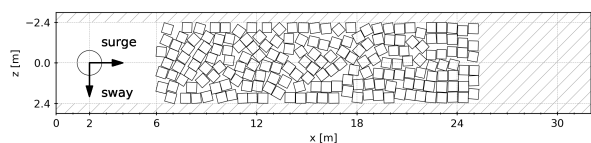


図-3 氷板モデルの初期配置

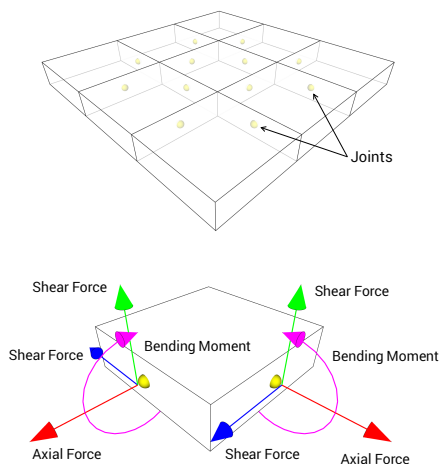


図-4 氷板モデルの全体（上）と要素（下）イメージ

板モデルに働く流体力は没水体积や相対流速，相対流速に対する投影面積等から浮力，圧力抗力，摩擦抗力，回転方向の抵抗を各時間ステップで計算し外力として与えた。氷板破壊は図-4に示すように剛体要素を結合し，結合箇所に加わる力が氷板強度から算出した基準値を上回った場合に要素間の結合を破断させることで表現している。

4. 結果と考察

図-5に全体氷荷重の氷海水槽試験と数値シミュレーション結果の時系列データおよびボックスプロットを示す。数値シミュレーションでは，60cm角の氷板モデルを3種類のサイズの剛体要素（ $Le=60/20/15\text{cm}$ ）で結合し計算した結果を示している。 $Le=60\text{cm}$ は氷板モデルの破壊をシミュレーション上で考慮しない条件となる。構造物が氷板と最初に接触した時間を0secとし，約2船長分進んだ40secから統計処理を行った。時系列データから不規則にピーク荷重が発生していることが分かる。構造物と接触した氷板は，まず水平方向へ逃げようとするが他の氷板が障害となり水平方向に動けなくなると鉛直方向（水中）へ流れ構造物の周りから排除される。更に構造物の周辺に氷板が堆積してくると上記のような氷板の排除に起因する荷重が増加し，その堆積が緩和されると荷重も減少する。平均値や四分位範囲はいずれのシミュレーション結果も試験結果と同程度の値となったが， $Le=60\text{cm}$ では発生しているピーク荷重が大きく最大氷荷重は試験結果の2倍以上となっている。これは氷板の破壊に起因する荷重が排除のものより小さく，氷海水槽試験では氷板が構造物模型と接触し排除される過程で氷板破壊（図-6）が生じたためである。小さい破片は排除に要する力も小さくなり，ピーク荷重が低下する。氷板モデルの破壊を考慮した数値シミュレーション結果において， $Le=20\text{cm}$ と 15cm で大きな差は見られなかった。今回の試験で製氷された模型氷はPDMの結果から特性長が約35cmであり，それよりも小さい剛体要素であることが一つの要因と考えられる。同時期に実施した30cm角の氷板で実施した同様の氷海水槽試験では氷板の破壊は発生しなかった。

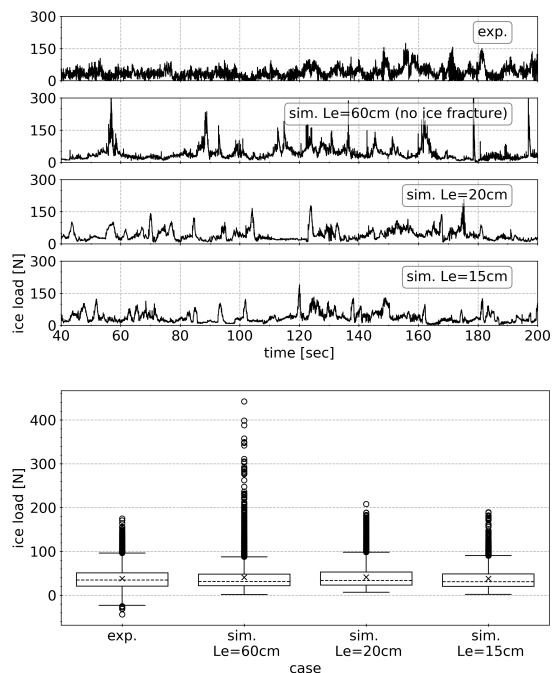


図-5 全体氷荷重の試験およびシミュレーション結果
（上：時系列，下：ボックスプロット）

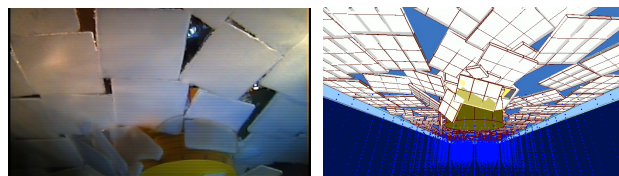


図-6 模型前方下の氷板の様子（左：試験，右：シミュレーション）

5. まとめ

実施した氷海水槽試験を Non-smooth DEM による数値シミュレーション上で再現し，全体氷荷重や氷板の挙動を比較した。模型氷の特性長よりも小さい剛体要素から成る氷板モデルを用いて，全体氷荷重の平均値やばらつき，最大値が良く合っているのを確認した。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP17K14890の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Gautier, D.L. & Moore, T.E., 2017. Introduction to the 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal (CARA) Professional Paper. The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper, 1824, 9p.
- 2) Coumans, E., 2017. Bullet Physics Library version 2.86, [Online] Available at: <http://bulletphysics.org/>.
- 3) Schwarz, J. & Weeks, W.F., 1977. ENGINEERING PROPERTIES OF SEA ICE, Journal of Glaciology, 19(81), pp. 499-531.
- 4) Meyer, F., 1992, Color image segmentation, Proceedings of the International Conference on Image Processing and Its Applications, 303-306.