

円錐型海洋構造物に加わる氷荷重について

泉 山 耕*

1. はじめに

わが国北方のロシア・サハリン島沖における資源開発は、一部鉱区で昨年夏から原油の商業生産が開始されているほか、近い将来における生産開始を目指す多数のプロジェクトが展開している。衆知のように、この海域を含み、北海道沿岸までに至るオホーツク海は、冬季には流水に覆われる。このような氷海域における資源開発等を目的とした海洋構造物は、安全並びに油流出事故等による環境汚染防止の観点から、周囲の水から受ける荷重、氷荷重に十分に耐え得るよう設計される必要がある。海洋構造物に働く氷荷重は、構造物の形式によりその強度・挙動等が異なることが知られているが、構造物外壁面が傾斜した形式の構造物は、鉛直壁を有する形式に比較して、氷荷重が軽減されるという利点がある。特に、円錐型構造物は、氷との干渉の方向による氷荷重の偏差が無いことから、氷海域用構造物としての有利さがあり、サハリン海域においてもその使用が検討されている。本研究では、円錐型海洋構造物と氷板の干渉についての模型実験を行うとともに、これにより得られた知見に基づいて、この形式の構造物に働く氷荷重の数値計算法の開発を行った。

2. 実験による現象の理解

本研究では、まず、円錐型海洋構造物と氷板との干渉現象に関する理解を深めることを目的として、模型実験を実施した。実験は、運輸省船舶技術研究所の氷海水槽において実施した。実験手法の概要図を図-1に示す。実験には母線の傾きが水平線から60度の円錐型模型を用い、この模型を検力計を介して計測台車に取り付け、氷板中を運動させるときに模型に働く荷重を計測した。実験では、氷板の厚さ・強度、円錐の水線径を実験条件として変化させ、模型に働く氷荷重を計測するとともに、模型の上部に設置したVTRカメラにより、氷板の破壊に伴うクラックの発生、砕氷片の挙動について観測した。円錐型海洋構造物と氷板の干渉現象については比較的研究数多くの研究があり、現象が以下に示す3過程より成る

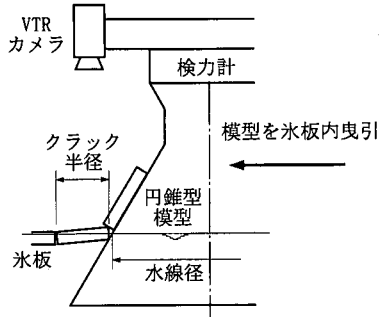


図-1 模型実験概要図

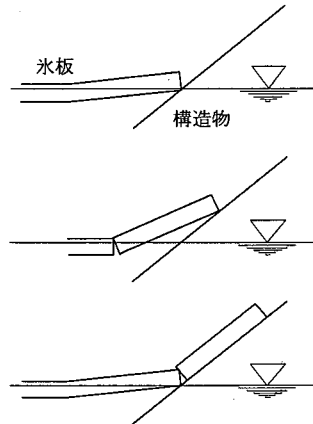


図-2 円錐型構造物と氷板の干渉過程

ことが示されている (図-2)

- ・破壊 (breaking, 図-2 上図)

氷板と構造物が接触することにより氷板が変形し破壊。

- ・回転 (rotation, 図-2 中図)

破壊された氷片が回転しながら押し上げられる。

- ・乗り上げ (ride-up, 図-2 下図)

後続の氷板に押しされ、氷片が構造物表面に乗り上げる。今回の模型実験においても、実験時の観察並びに VTR 画像からもこれらの現象が確認された。

模型実験結果の解析にあたっては、現象に対するさら

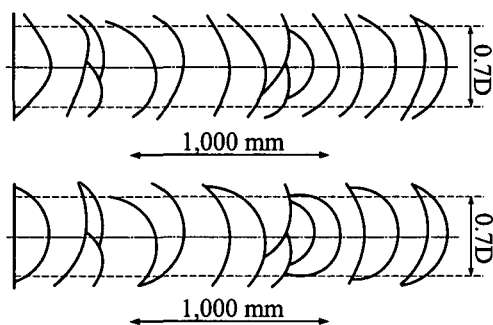


図-3 氷板に発生する円弧状クラック

に定量的理解を得ることを目的として、模型に働く荷重ばかりではなく、氷板内に発生するクラックに注目して解析を行った。円錐型構造物と氷板との干渉により氷板内に発生するクラックは、円錐と氷板との接触点から放射状に発生する放射状クラック (radial crack) と接触点を中心として扇形状に発生する円弧状クラック (circumferential crack) により特徴付けられる。本研究では、模型上部から撮影した VTR 画像を用いて円弧状クラックについて解析した。図-3 に円弧状クラックの解析結果の一例を示す。図-3 上図は VTR 画像により観測された円弧状クラックを時間的に重ね合わせた図である。本解析では、これらのクラックを円弧の一部により近似し (図-3 下図)、その半径をクラックサイズに対するデータとした。

円錐型構造物との干渉により氷板に発生するクラックは、氷の曲げ破壊によるものであり、氷板が上方向へ持ち上げられることと下方向へ押し下げられることとの違いはあるものの、基本的には船舶が水中を航行するときには発生するクラックに類似したものとなる。Tatinclaux (1986) は単純な模型の透明な船首部模型を用いて、これを平坦水中を曳航する水槽実験を行い、このときに氷板内に発生するクラックのサイズを計測した。この計測結果を用いて彼は、氷板に発生するクラックサイズと、氷の曲げ強度 σ_F 、厚さ h 、水の密度 ρ 及び重力加速度 g により計算される長さとの間に良い比例関係があることを示した。本論文では、便宜上この長さを「破壊長さ」呼び、 l_{BR} と記述するものとする。破壊長さは次式で与えられる。

$$l_{BR} = \sqrt{\frac{\sigma_F h}{\rho g}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

本模型実験において計測された円弧状クラックの半径の各実験における平均値 R と破壊長さ l_{BR} との関係を図-4 に示す。本実験結果においてもクラックサイズと破壊長さとの間に良い比例関係があることが判る。

円錐型構造物に働く氷荷重についての研究は多いが、

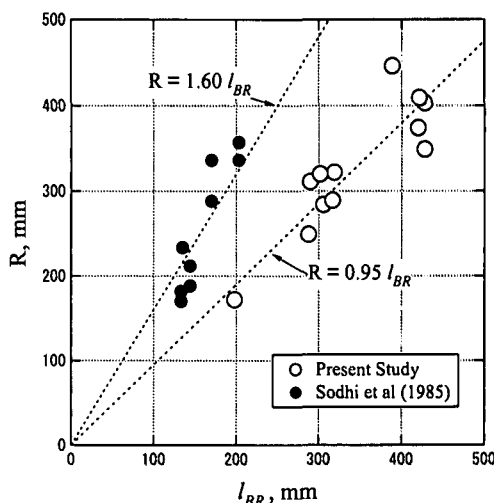


図-4 円弧状クラックの半径と破壊長さ

クラックサイズについて本研究のような詳細な解析をした例は限られている。Sodhi ら (1985) は、氷荷重の周波数解析に基づいて氷板の破壊の間隔を論じているが、図-4 には彼らのデータを本研究の形式で再解析した結果も示した。本実験と Sodhi らの実験は異なる結果を与えるが、これは、クラックサイズの定義によるところもあるだろうが、両実験における模型氷の特性の違いによるものと考えられる。氷海水槽において実験に用いられる模型氷の曲げ強度は、一般に、荷重方向による差異があり、氷試料の下側が引っ張り側となるような曲げを加えた場合の強度 (上曲げ強度: σ_U) と上側が引っ張り側の場合 (下曲げ強度: σ_D) とでは前者が後者を下回る。この両実験とも、上曲げ強度をもって氷板の曲げ強度としているが、本実験で用いた EG/AD 氷では $\sigma_U/\sigma_D = 0.7$ 程度と両者の差が比較的小さいのに対し、Sodhi らの実験において用いられた尿素氷の場合はこれが 0.4 程度と低い。後述するように円錐型構造物による氷板の曲げ破壊時には上曲げばかりではなく、下曲げも起こることから、上曲げ強度を用いて計算した破壊長さは、Sodhi らの実験に対しては過小な値を与えている可能性がある。しかしながら、いずれの場合においても破壊長さとはクラックサイズとの間には良い比例関係が認められ、破壊長さがクラックサイズを評価する上で適当な量であることが示されている。

3. 現象のモデル化及び計算手法

(1) 氷荷重計算の概念

実験時の観察により、円錐型構造物と氷板との干渉過程は、前述の、破壊、回転、乗り上げの 3 現象から成り、氷板の運動に伴って、これらが繰り返されながら現象が

進行することが示された。氷荷重の数値計算手法の開発にあたっては、上記の3現象を1セットとしたイベント（以下、単位イベント）を考え、これの発生を時間的に重ね合わせることで全氷荷重を計算することとした。この手法の概念を図-5に示す。計算にあたってはまず、単位イベントによる氷荷重を、破壊、回転、乗り上げによる荷重の和として与え（図左段）、これを発生の時間順に重ね合わせて全体荷重を求める（図右段）。

(2) クラック発生シミュレーション

単位イベントにおける荷重の計算には氷との接触点の位置、氷板内に発生するクラックの位置・長さ、氷板の破壊により形成される氷片のサイズ等の情報が必要である。また、各イベントの発生時刻及び継続時間の計算には氷板の破壊により変化する氷縁位置に関する情報が必要となる。これらの情報は、氷板内での円弧状クラックの発生をシミュレートすることにより求めた。このシミュレーション手法の概念を図-6に示す。本シミュレーションでは、氷板を一定ステップ間隔で円錐に向けて運動させ、氷縁が円錐に接触した時、すなわち計算上においては氷縁のいずれかが円錐水線に入った場合、に接触点を中心とする円弧状のクラックを発生させる。シミュレーションは直線状の氷縁が円錐水線と接している状態から開始し、この接触点を中心として第1のクラックが入る（図-6左上図）。これにより新たに形成された氷縁が円錐へ向かって運動し、新たな接触点において第2、第3のクラックが発生する（同、左下図）。これを連続することにより多数の円弧の連続した氷縁が形成され（同、右上図）、新たな接触とクラックの発生が続く（同、右下図）。各接触により発生するクラックの半径 R は、模型実験結果に対する考察に基づき、次のように与える。

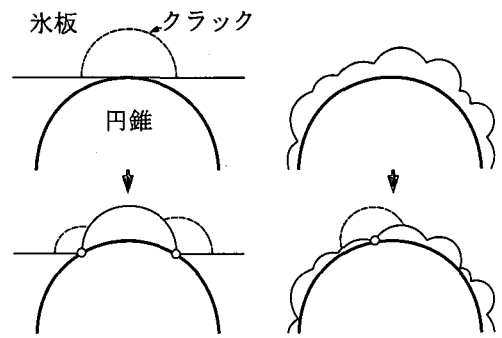


図-6 クラック発生シミュレーション

$$R = A l_{BR} Z \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 A は定数、 Z は1を平均値とする乱数である。これらの係数の具体的な与え方については後述する。

(3) 荷重計算

円錐に働く荷重は、破壊、回転、乗り上げの各段階においてそれぞれ異なるメカニズムにより発生する。氷板の破壊時に働く荷重についてはRalston (1977)の理論を修正した理論式により求めた。Ralstonは円錐との接触による氷板の変形場に対して塑性限界理論を適用することにより、円錐に働く荷重を求めた。本計算においても同様の手法を用いたが、想定する氷板の変形が図-7に示すようにRalstonの理論とは異なる。Ralstonの理論解では、円錐の前全面全体にわたって氷が接触し、この外縁部の氷板全体が変形するような状態（図-7左図）を仮定しているのに対し、本計算では氷板の一部が接触点を中心とする半円錐状の変形を起こす状態（図-7右図）を考えている。Ralstonの理論では、氷板の曲げについて、円錐中心から半径方向軸周りの曲げと円弧状クラック周りの曲げを考え、これに要する力を求めている。本数値計算においても同様の考え方を適用し、氷板の破壊が引っ張り側において起こると考えると、氷板の破壊時に円錐との接触点に加わる鉛直力 F_{BZO} として次式を得る。

$$F_{BZO} = k^2 (\sigma_D + \sigma_U) \Phi / 6 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Φ は円弧状クラックの中心角である。上式に含まれる下及び上曲げ強度が、半径方向軸周りの曲げと円弧状クラック周りの曲げによる寄与をそれぞれ表している。また、氷片の回転及び乗り上げ時については、それぞれ、氷片の重量と浮力及び氷片の重量に対する反力が円錐に対する荷重として与えられる。

以上の荷重は全て鉛直荷重として与えられるが、これらに対応する荷重の水平成分を求めるためには円錐上における着力点に関する情報が必要である。このため、本

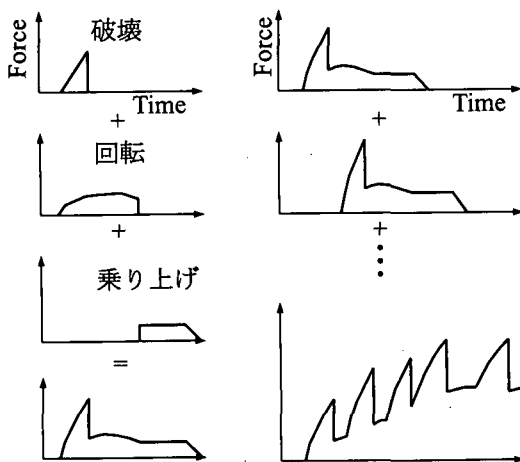


図-5 氷荷重計算手法の概念

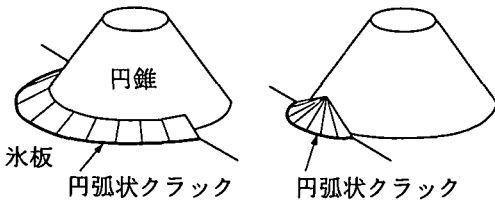


図-7 氷板の破壊時の変形

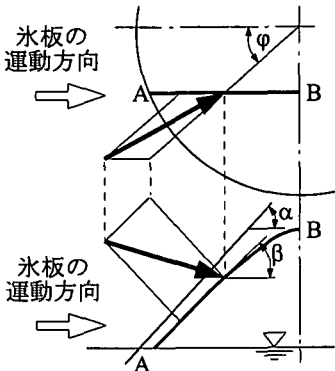


図-8 着力点の移動経路

計算では図-8に示すように、氷板の運動方向に平行な鉛直面と円錐の表面との交線AB上を荷重の着力点が移動するものとする。摩擦力は着力点における曲線ABの接線方向に働く。荷重の氷の運動方向成分 F_x 、横方向成分 F_y 、及び鉛直方向成分 F_z の関係は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{F_x}{F_z} &= \frac{\sin \alpha \cos \varphi + \mu \cos \beta}{\cos \alpha - \mu \sin \beta} \dots\dots\dots (4) \\ \frac{F_y}{F_z} &= \frac{\sin \alpha \sin \varphi \cos \beta}{\cos \alpha - \mu \sin \beta} \end{aligned}$$

ここに、 α 、 β 及び φ は、図-8に示されるように、それぞれ、円錐の母線の傾き、着力点における曲線ABの接線の傾き及び着力点の円錐中心に対する開き角である。また、 μ は氷と円錐表面との間の動摩擦係数である。

(4) 全体のフロー

計算全体の流れを図-9に示す。計算の内容は大きく二つのフェーズに分かれ、第1フェーズでは氷板内におけるクラックの発生がシミュレートされ、第2フェーズでは第1フェーズにおいて得られたクラックに関する情報に基づいて構造物に働く荷重が計算される。

4. 計算結果

本計算手法は、その他の氷荷重推定式等とは異なり、氷荷重の経時変化を計算できる点に特徴がある。図-10は、本計算により得られた荷重曲線の例とこれに対応する模型実験結果との比較を示したものである。同図は円

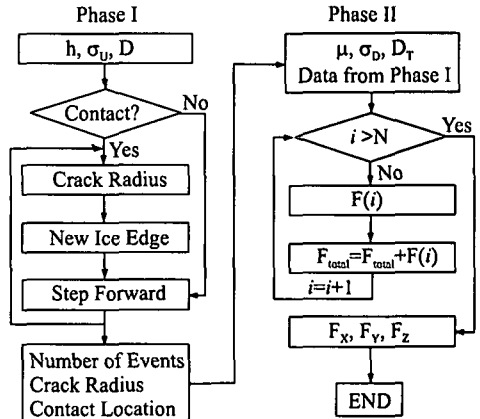


図-9 計算の流れ

錐に加わる水平方向成分 F_x を氷板の運動距離の関数として示したもので、上図が実験結果、下図が計算結果である。両者はいずれも図-6左上図のように直線状の水縁を初期状態とするもので、氷板の移動が進むにつれて荷重が増大し、ある距離以降はほぼ一定のレベルの周囲を荷重が上下する状況が実験、計算両者において見られる。本計算手法の妥当性を定量的に検討するために、さらに広範な模型実験結果との比較を行った。本研究における実験に加え、前出のSodhiらによる実験及びKatoら(1997)による実験も比較・検討の対象とした。これらの模型実験における実験条件の概要を表-1に示す。本計算においては、氷の厚さ及び曲げ強度から計算される破壊長さを用いて式(2)のようにクラックサイズを与えて計算が行われる。それぞれの実験に対する係数Aは図-4に基づき、Sodhiの実験については1.60を、本実験については0.95をそれぞれ採用した。Katoらによる実験については、実験に使用している模型氷がSodhiの場合と同様に尿素氷であることから、これについても1.60を採用した。また、乱数Zについては、本実験におけるクラックサイズの計測結果に基づき、平均1、標準偏差0.94の正規分布に従う乱数を発生させ、計算を行った。

図-11に円錐型構造物に働く氷荷重について計算結果と実験結果との比較を示す。表-1に示されるように、これらの実験の対象には45及び60度の2種類のことなる母線傾斜角 α を持つ円錐が含まれ、また円錐の水線径D及び氷厚hも実験毎に大きく異なる。このため氷荷重のレベルも、本実験及びKatoらによる実験における100N近傍から、Sodhiらによる実験の1000N近傍までと幅が広い。このように条件及びスケールの異なる実験との比較であるが、計算結果と実験結果との一致は良い。また、図には氷荷重の水平方向成分 F_x ばかりではなく、鉛

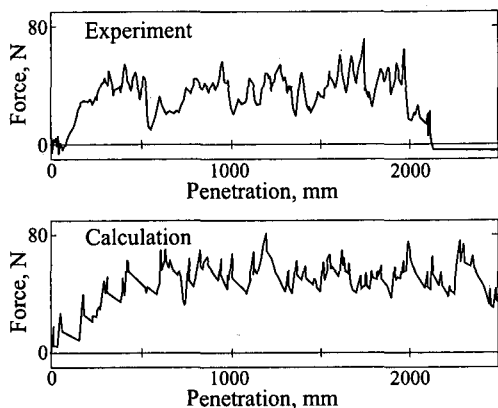


図-10 荷重の曲線の例

表-1 比較実験の条件の概要

	α (degree)	D (m)	h (mm)
Sodhi, 1985	45	1.5	51.8-73.0
Kato, 1997	45, 60	0.5	18.5-33.4
Present Test	60	0.50, 0.60, 0.75	19.1-47.1

直方向成分 F_z についても結果を示したが、両者とも計算結果と実験結果の一致は良い。これは、図-8 に示した着力点の移動経路及び式(4)による荷重計算が妥当であることを示すものである。図-11 は、本計算手法の妥当性・普遍性を示したものとえよう。

5. おわりに

本論文では、円錐型海洋構造物と平坦氷が干渉する場合に構造物に働く氷荷重について、模型実験結果並びにこれに基づいて構築した数値計算プログラムについて述べた。模型実験結果では、氷板内に発生する円弧状クラックのサイズを計測し、これが氷板の厚さ及び曲げ強度から計算される「破壊長さ」と良い比例関係にあることを

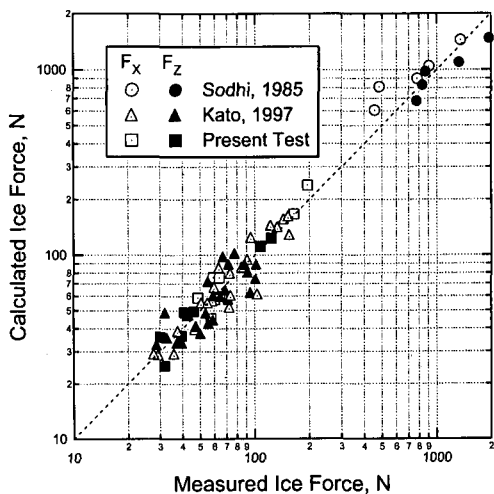


図-11 計算結果と実験結果との比較

示した。数値計算プログラムではこの結果を取り入れてクラック発生をシミュレートするとともに、各クラックに伴う荷重を時間的に重ね合わせることで、全氷荷重を計算するアルゴリズムを開発した。本計算では、円錐に働く氷荷重の荷重曲線を求めることができる。計算結果を3種類の模型実験と比較した結果、本計算手法の妥当性・普遍性が示された。

参考文献

- Kato, K. and Izumiyama, K. (1997): Simulation of Ice loads on a conical shaped structures: Comparison with experimental results, Proc. of 7th ISOPE, Vol. 2, pp. 360-367.
- Ralston, T. (1977): Ice force design consideration for conical offshore structures, Proc. of the 4th POAC, pp. 741-752.
- Sodhi, D., Morris, C. and Cox, G. (1985): Sheet ice forces on a conical structure: An experimental study, Proc. of the 8th POAC, Vol. 2, pp. 643-655.
- Tatinclaux, J.-C. (1986): Ice floe distribution in the wake of simple wedge, Proc. of 5th OMAE, Vol. 4, pp. 622-629.