垂直構造物に作用する氷荷重に及ぼす摩擦の影響

加 藤 一 行*

要 旨

垂直な壁面を有する氷海構造物に作用する氷荷重に対して氷と構造物境界での摩擦係数の影響について理論的および実験的研究を行なった。従来摩擦が問題とされていなかった圧壊時の氷荷重については、極限解析の上界定理を用いて摩擦係数の効果を定式化し、表面材料を種々変えた模型実験で得た氷荷重と比較してほぼ良好な対応を得た。

座屈破壊時の氷荷重に関しては、数値解析が得られている自由境界と上下変位拘束境界という実際の境界条件の両極端の境界条件に対する解を結び付けるものとして、氷板と構造物との境界での摩擦抵抗を考え、実験的に摩擦係数が大きいほど氷荷重(座屈荷重)が大きくなることを示した。

以上の結果により、垂直な壁面を持つ構造物に対しても、傾斜面を有する構造物同様に、氷荷重は氷板と構造物の境界での摩擦の影響を受けることが判明した。それゆえ、氷板と構造物との摩擦を低減することにより、氷荷重を低減できることが、垂直壁を有する構造物に対しても明らかとなった。

1. 結 言

北極海域における石油資源開発は、その地域の特殊な気象条件により、他の地域での石油資源開発とは異なった多くの問題を含んでいる。他の地域では生じない問題のひとつは、各種の基地として使用される海洋構造物、あるいは各種の輸送手段としての船舶と、氷との相互作用が生ずることである。そのために、氷海域で使用される船舶(氷海船舶)は、氷海中での航行性能が船舶の設計における要件となる。また、このような船舶は氷との相互作用によって船舶に作用する荷重—氷荷重に十分耐える構造を有しなければならない。

氷海域で使用される海洋構造物(氷海構造物)についても事情は同じであり、氷海構造物は氷荷重に十分に耐え得る構造を持たなくてはならない。

氷荷重に耐え得る氷海構造物を造るには、まずもって、氷荷重そのものの性質を把握しなくてはならないことは当然である。氷荷重は、構造物と氷との相互作用が生じたときに、ある条件のもとにおける氷の破壊によって規定されるから、氷荷重の性質を把握することは、氷の破壊の性質を把握することである。

実際に考え得る氷の状態は多岐にわたり、それら全てに対して構造物との相互作用の状態を明らかにすることが氷荷重の研究の最終目的ではあるが、現状では、大き

な広がりを持った厚さの均一な氷板と構造物との相互作用が除々に明らかになりつつある段階であり、本論文で対象とする氷もそのような状態の氷である。

氷板と構造物との相互作用を考えると、氷板に作用する力は、構造物の形状によって異なる。氷板が作用する部分が傾斜している構造物、たとえば、円錐形構造物では、氷板には面外方向の力、すなわち海面に垂直な方向の力が作用する。面外方向の力により氷板内部に発生する曲げ応力が氷の破壊強度を越えると氷板は破壊する。

氷板が作用する部分が垂直な面を持っている構造物では、力は氷板の面内方向すなわち海面と平行な方向に作用する。この面内方向の力により氷板は圧壊するか、座屈破壊を生ずる。氷板が圧壊するか、座屈破壊するかは、氷板と構造物との相互作用の条件により決まるが、一般に構造物の幅(円柱型構造物であれば直径) d と氷板の厚さ h との比 d/h が大きくなると座屈破壊が生じやすくなる(加藤, 1984)。以下 d/h をアスペクト比 (aspect ratio, Croasdale, 1980) と称する。

従来の研究によれば、氷板を曲げ破壊するような傾斜した面を持つ構造物では、氷板と構造物との境界面での摩擦が、構造物に作用する氷荷重を理解する上で重要な因子であるとされている(たとえば, Bercha and Danys, 1976; Ralston, 1977)。一方、氷板に面内力を与えるような垂直な面を持つ構造物においては摩擦による影響を、特に圧壊の場合には、考慮に入れないのが普通である

* 石川島播磨重工業(株)技術研究所

(たとえば, Afanas'yev, et al., 1971; Kato and Sodhi, 1983).

しかしながら, Nevel et al. (1977) によって行なわれた円柱模型構造物を用いた実験の報告に依れば, 氷板と構造物とが付着していた場合には, 付着していない場合に比べて大きな氷荷重を記録している. この原因は, 氷板と構造物との付着によって, 氷板と構造物の相互作用が発生したときの構造物付近の氷板の拘束状態が異なるという面もあるが, 主に氷板と構造物との間の付着力を断ち切るために余分な仕事が必要であったためと考えられる. 付着力を断ち切るために必要な仕事は構造物の面に平行に, すなわち, 氷荷重の方向とは垂直な方向に費やされるから, Nevel et al. の実験は構造物の面に平行な方向の抵抗が構造物面に垂直な方向に作用する力(氷荷重)に影響を及ぼすことを示唆していると考えられる.

氷板と構造物が付着していない場合には, 構造物面と平行な方向に作用する可能性のあるのが, 摩擦抵抗である. Nevel et al. の実験は氷板が圧壊を起すときの摩擦抵抗の影響を示唆しているが, 氷板が座屈破壊を起すときも, 摩擦抵抗が座屈荷重に影響を与えることは明らかである. 理論的考察によれば (Sodhi et al., 1983), 実際

に起り得る氷板と構造物との相互作用においては, 氷板と構造物境界面での条件は, 理論的に考えられる二つの極端な境界条件, すなわち境界面で拘束がない自由境界条件と垂直変位を拘束するが回転は自由な境界条件の中間にあると考えられ, その両極端の境界条件に対する解を結びつける因子が摩擦係数であると考えられる.

本論文においては, 氷板が圧壊する場合には, 摩擦抵抗を極限解析の上界定理 (Hodge, 1959) に組み込んで, 摩擦係数の氷荷重に及ぼす影響を理論的に導出した. そしてこの理論で得た氷荷重と模型試験で得た氷荷重との比較検討を行なった.

座屈破壊荷重については, 模型試験結果を紹介して, 理論解 (Sodhi and Hamza, 1977) との比較検討を行なった.

2. 圧壊時の氷荷重

—摩擦係数を組み込んだ理論解の誘導—

本章では, 摩擦係数を組み込んだ圧壊時の氷荷重の理論解を導びく. 用いる手法は極限解析の上界定理である. 上界定理の概要は次の様に説明される (Hodge, 1959). 考え得るすべての許容速度場 (破壊メカニズム) において最少の運動学的許容倍率 (Kinematically admissible multiplier) を与えるものが運動学的許容速度場となる. この許容速度場に対する許容倍率が, 極限荷重の正解であるいは極限荷重の上限值 (上界) を与える. この上界定理を用いて導びいた解を上界解と呼ぶ. 具体的には, ある破壊メカニズムを仮定し, その破壊メカニズムに対して外力によってなされる仕事の速度と内部で消費されるエネルギーの消散速度とを求め, それらを等しいと置くことにより運動学的許容倍率を求める. この操作を考え得る全ての破壊メカニズムに対して行ない, 最小の運動学的許容倍率を求める. この最小の運動学的許容倍率から得られる荷重が極限荷重の上界を与える. 本章で

インデントー

a) 正面図

b) 平面図

図 1 仮定した破壊メカニズム

写真 1 実験の 1 例 (フレーキング型の破壊を示している)

は、垂直な壁面を持つ構造物（インデント）を対象として上界定理により極限荷重を求める。

考え得る破壊メカニズムは無数にあるが、Croasdale (1980) の考察により図 1 に示された破壊メカニズムが上界解を与えることがわかっている。この破壊メカニズムは、インデントからの力により 2 つの氷のクサビを作るようにすべり面が形成されるとするものである。図 1 の a) はその氷のクサビを海面と平行な視点から見た図であり、b) は上から、すなわち空中から見た図である。もしも海底から見たとすると b) と同様の面を見ることができ、その面は CDD'C' で構成される面である。

この様な破壊メカニズムが連続して発生すると破壊された氷は粉状となりインデントの周囲にたまる。このような破壊をフレーキング (flaking) 型の破壊 (Kry, 1981) という。フレーキング型の破壊が生じている実験の例を写真 1 に示した。

上界定理においては、内部エネルギーはすべり面のみで消費されると考えるから、内部エネルギーの消散速度はすべり面の面積とすべりに対する抵抗（せん断強度）およびすべり面での変位速度の積で表わすことができる。また摩擦抵抗をすべりに対する抵抗と考えると、摩擦抵抗によって消費されるエネルギー速度もせん断強度を摩擦抵抗に置き換えることによって同様に求めることができる。

外力によってなされる仕事の速度 D_e は、氷の進行速度を V とすると次式で表わされる。

$$D_e = F \cdot V = p d h V \quad (1)$$

ここに、 F : 氷板に作用するインデントからの力
= 氷荷重

d : インデントの幅

h : 氷板の厚さ

p : 平均圧力 $p = F/dh$

一方、氷板内部でのエネルギー消散速度 D_i は三成分に分けて考えることにする。第一の成分は、図 1 の面 OBB'O' と面 ODD'O' をすべり（せん断）破壊するために消費されるエネルギー速度である。せん断強度を τ とすると、これらの面を破壊するのに必要なせん断力は、すべり面がインデント壁面と成す角度を θ とすると $\tau \cdot dh / \cos \theta$ である。このすべり面の変位速度は、 $V \operatorname{cosec} \theta$ であるから、これらの面で消費されるエネルギー速度 D_{i1} は次式となる。

$$D_{i1} = \frac{dh}{\cos \theta} \tau V \operatorname{cosec} \theta \quad (2)$$

第 2 の成分は、氷のクサビの側面を形作る面、すなわ

ち、面 OAB、面 OCD、面 O'A'B' および面 O'C'D' でのすべり破壊によって消費されるエネルギー速度である。この成分 D_{i2} は D_{i1} と同様にそれらの面でのせん断力と変位速度から次式で表わされる。

$$D_{i2} = \frac{h^2 \tan \theta}{2} \tau V \operatorname{cosec} \theta \quad (3)$$

第 3 の成分は、インデントと氷板との境界面で摩擦抵抗として消費されるエネルギー速度である。インデントと氷板の境界面での摩擦角を μ とすると、この面でのすべり速度は $V \cot \theta$ であるから、摩擦抵抗によって消費されるエネルギー速度 D_{i3} は次式である。

$$D_{i3} = d h p \tan \mu V \cot \theta \quad (4)$$

摩擦角 μ と摩擦係数 f とは、

$$f = \tan \mu \quad (5)$$

なる関係にある。

氷板内部でのエネルギー消費速度 D_i は式 (2) ~ (4) を加え合せることによって得られる。

$$\begin{aligned} D_i &= D_{i1} + D_{i2} + D_{i3} \\ &= \left(\frac{dh}{\cos \theta} + \frac{h^2 \tan \theta}{2} \right) \tau V \operatorname{cosec} \theta \\ &\quad + d h p \tan \mu V \cot \theta \end{aligned} \quad (6)$$

氷は与えられた拘束条件のもとで異なった強度を示すことは良く知られており、その破壊条件は他の材料に比較すると複雑な表式となる (Reinicke, 1979; Ralston, 1978)。しかしながら本解析では簡単のために、von Mises の破壊条件式を仮定することにする。応力の静水圧成分が小さい場合には、Reinicke らの条件式と von Mises の条件式の差はわずかである。

von Mises の条件式を用いると、

$$\tau = \frac{\sigma_0}{2} \quad (7)$$

となるが、 σ_0 は無限に大きなインデントを用いたときの圧縮強度、すなわち、供試体の側面を拘束した圧縮強度とする。この強度は Frederking (1977) の提案した type A test によって得られる強度であり、当然、供試体を全く拘束しない通常の単軸圧縮強度とは異なる値を示す。

式 (7) を式 (6) に代入して、式 (1) で表わされる外力によって費やされた仕事の速度 D_e と等しいと置いて、整理すると次式を得る。

$$\frac{p}{\sigma_0} = \frac{1}{\cos^2 \theta (\tan \theta - \tan \mu)} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{h}{d} \right) \sin \theta \right\} \quad (8)$$

上式が運動学的許容倍率を与える式である。さて式 (8) はすべり面の角度 θ の関数となっているから、求めるべ

き運動学的許容倍率は、式(8)を最小とする θ に対する値である。式(8)を最小とする θ は次式によって求めることができる。

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{p}{\sigma_0} \right) = 0 \quad (9)$$

式(9)を満たす θ によって計算した最小の運動学的許容倍率 p/σ_0 を以後正規化圧力と称する。

たとえば、摩擦係数 $f=0$ 、アスペクト比 $d/h=1$ の場合の正規化圧力は、式(9)を実行すると $\theta=41^\circ$ となって、これを式(8)に代入すると、

$$\frac{p}{\sigma_0} = 1.34 \quad (10)$$

となる。よって氷荷重 F は、

$$F = 1.34 d h \sigma_0 \quad (11)$$

となる。

正規化圧力は、摩擦係数とアスペクト比の関数となっているから、それらの個々の組合せに対して正規化圧力を計算して、摩擦係数をパラメータとして図示すると図2を得る。従来の結果（たとえば、Croasdale, 1980）と同様にアスペクト比が大きくなると正規化圧力は小さくなる。本解析の目的である摩擦係数の効果は、予想されたことではあるが、摩擦係数が大きくなるほど正規化圧力は大きくなる。

図2 正規化圧力に及ぼす摩擦係数 f の影響 (理論解)

表1 実験に用いた模型構造物表面材料の摩擦係数

材 料	動摩擦係数
ス テ ィ ール	0.075
テ フ ロ ン	0.073
コ ン ク リ ート	0.20
ゴ ム	0.14
試 験 室 温 度	-2.2°C
試 験 速 度	0.0292m/s(平均)

3. 模型実験

模型試験は、US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (以下 CRREL) の試験氷水槽 (Ice Test Basin) において実施した。模型構造物下部を水槽底部に固定し、その模型構造物に試験電車をを用いて氷板を押し付けて氷板を破壊し、その時に構造物に作用する荷重（氷板の破壊荷重）を測定した。この模型実験システムに関しては Haynes et al. (1983) が詳しく報告している。模型構造物は写真1に示されているような矩形模型であり、この矩形の幅の狭い方の面に氷板が作用する。

模型構造物の氷板が作用する面は交換可能であり、本実験では、スチール、テフロン、コンクリート及びゴムの4種類の材料を用いた。それらの表面材料と実験用氷板との間の摩擦係数は、模型実験を実施したのと同じの試験室温度で測定した (Haynes et al., 1982)。それらの摩擦係数の測定値は表1にまとめられている。

実験用の氷板は、重量比 0.95% の濃度の尿素水溶液を用いて生成した。具体的には、水槽内の溶液をその氷点（約 -0.3°C ）近くまで冷却し、 -12°C の環境温度のもとで水滴を空中に散布して、氷核を空中で形成し、その氷核を水面に自由落下させて、シーディングを行なった。シーディングによって生成された氷板を、所定の温度のもとで成長させた。CRREL の氷水槽における実験用氷については Hirayama (1983) が詳しく報告している。

所定の氷厚に達したならば、試験室温度を -2.2°C に昇温し数時間これを保ち、氷温を -2.2°C に近づける。この昇温操作 (Warm-up) は、実験用の氷板の強度を低下させるためで、所定の強度に達するまで続けるのが普通である。本実験では時間的制約に依り強度の設定は行なわなかったため、氷板の強度は、氷板ごとに異なるし、同一氷板であっても実験を実施した時刻によっても異なった。

氷板の強度は時々刻々と変化するから、模型実験を実施する上で肝要なことは、模型実験を行なう氷板の強度を既知であるということである。それ故に、氷板の強度の測定は模型実験を実施する直前か、直後に行なわなくてはならない。そのためには、強度の測定手法は手軽でかつ迅速に行なえるものでなくてはならない。

本模型実験を実施するにあたり、原位置において圧縮強度（単軸圧縮強度）を測定する手法が検討され、実用化された。その手法は、上記の必要性を十分に満足し得るものである。その手法と背景となる理論は Kato et al. (1982) によって詳しく報告されている。

原位置で測定された圧縮強度は、原位置単軸圧縮強度 σ_u と称するが、この強度は第2章の式(8)に用いられている σ_0 とは異なるものである。 σ_u と σ_0 の関係は、CRREL での他の実験研究 (Kato and Sodhi, 1984) によって、

$$\sigma_0/\sigma_u=2.33 \quad (12)$$

と定められている。

模型実験は原位置単軸圧縮試験を実施した直後に行なった。ただし、模型実験を連続して行なった場合は、一連の模型実験の直前に行なった試験で得た σ_u をそれらの模型実験で用いた氷板の σ_u とした。

模型実験では、氷板の端面を模型の面と平行になるように整えたあと、試験電車を駆動して氷板を模型構造物に押しあてた。各実験において氷板が模型構造物に接触するときの氷板の速度を一定とするために、氷板と模型とが接触する直前まで近づけてから、新ためて試験電車を始動して実験を行なった。解析の条件と合わせるために、最初の氷板の破壊が生じた後に試験電車を停止した。さらに氷板の端面を整え、同様の操作を繰り返し行なった。

4. 模型実験結果及び考察

(1) 圧壊時の氷荷重

模型実験の結果で圧壊を生じたものをまとめたものが表2である。表中の正規化圧力は、実験で得た氷荷重を模型構造物の幅 d 、氷厚 h で除した平均圧力 p を実験直前に測定した原位置単軸圧縮強度 σ_u から式(12)の関係をを用いて σ_0 を算出して、その σ_0 をを用いて正規化したものである。

理論値を各実験での条件によって式(8)と式(9)を用いて計算して、正規化圧力の理論値に対して実験値をプロットしたものが図3である。図3中の実線は、理論値と実験値が完全に一致することを示す線であり、その線か

らの隔たりが理論値と実験値との不一致の目安となる。この線よりもプロットが上にあるときには、理論値が実験値よりも大きいことを示しており、理論値が実験値よりも小さい場合はプロットはこの線の下方にある。

図3中のプロットは、実験で得た正規化圧力の大きい2点を除いてほぼ良好に理論値と実験値が対応していることを示している。

理論値と実験値の隔たりの大きい2つの実験結果は、片方はインデンタ表面がテフロンであり、もう一方はゴム板であるので、表面材料が原因となって理論値と実験値が相違したのではないと考えられる。これら2つの実験結果に共通していることは、これらの実験は相前後して実施されており、他の実験に比較してアスペクト比が小さい(表2参照)ことである。原位置単軸圧縮強度の測定が失敗してしまい、強度の見積りが小さ過ぎたという可能性は否定できないが、アスペクト比が小さいということが理論値と実験値との不一致の主な原因であると

図3 正規化圧力の理論値と実験値の比較

図4 Hill 型の破壊メカニズム

表2 模型実験で得た圧壊時の氷荷重

表面材料	氷厚 (cm)	アスペクト比 d/h	氷荷重 (KN)	正規化圧力 p/σ_0
ス テ ィ ー ル	3.2	2.78	4.2	0.90
テ フ ロ ン	3.3	2.69	2.2	0.85
ゴ ム	3.5	2.54	3.2	1.25
コンクリート	3.5	2.54	3.2	1.15
テ フ ロ ン	3.5	2.54	3.2	1.15
ゴ ム	4.5	1.98	8.3	1.56
コンクリート	4.5	1.98	5.9	1.10
テ フ ロ ン	5.7	1.56	5.6	2.40
ゴ ム	5.7	1.56	6.1	2.62

考えられる。

本論で導いた理論で仮定した破壊メカニズムは、フレーキング型の圧壊を想定したものであるが、一般に、アスペクト比が小さくなると図4に示した Hill 型の破壊メカニズムが発生する可能性が高くなると言われている。フレーキング型の破壊がインデンタの近傍で氷板を斜めにせん断破壊するのに対し、Hill 型の破壊はかなり広い範囲にわたって氷板にすべり面が形成される。そのすべり面は氷板を垂直に貫いているとする破壊メカニズムである。

Ralston (1978) は Hill 型の破壊メカニズムが発生した場合の正規化圧力を本論文と同様に極限解析の上界定理に依って解析している。Ralston の解析に依ると、アスペクト比 $d/h=1.5$ で $p/\sigma_0=3$ 程度となる。実験では必ずしも Hill 型の破壊メカニズムは観察できなかったが、理論値と実験値の相違の原因として、破壊メカニズムの相違を可能性として挙げることができると考える。

実験におけるアスペクト比の最大値は $d/h=2.78$ であったので、さらに大きいアスペクト比については理論値と実験値との比較は行えなかったが、アスペクト比が大きいと、破壊メカニズムは理論を導出するのに用いたフレーキング型になるから、実験で用いたアスペクト比での結果から類推して、理論値と実験値とは良好な対応関係を示すであろうと考えられる。

構造物と氷板との界面の摩擦係数が、構造物に作用する氷荷重に影響を与えることが明らかになったが、一般に実際の構造物と海水との摩擦係数の見積りは困難な場合が多い。その場合、設計上は、安全側の配慮から大きめの摩擦係数を仮定する必要がある。あるいは、限界状態を想定するのが設計上はより良い配慮かも知れない。

構造物と氷板との関係で限界状態と考えられるのは、

図5 正規化座屈荷重に及ぼす構造物表面材料の影響

氷板が構造物に完全に付着している状態である。この状態においては、付着力を断ち切るという内部仕事が必要であると仮定すると、2章で述べた理論で摩擦抵抗を付着力に置き換えれば良いことになる。付着強度の上限は氷自体のせん断強度であるから、付着強度をせん断強度と等しいとして、2章で述べた手順を実行すると、正規化圧力は、

$$\frac{p}{\sigma_0} = \frac{1}{2} \sec \theta \operatorname{cosec} \theta + \frac{h}{d} \frac{\tan \theta \operatorname{cosec} \theta}{4} + \frac{\cot \theta}{2} \quad (13)$$

という式の θ に関する微分が0になるような θ に対する値となる。

(2) 座屈破壊時の氷荷重

座屈破壊荷重 F_b は、氷板と構造物との境界の条件により大きく変化する。Sodhi and Hamza (1977) は、半無限氷板の座屈荷重を有限要素法により求め、氷板と構造物との間の境界条件が座屈荷重を決定する上で重要な要素であることを示した。

実際の構造物と氷板との相互作用で起り得る境界条件の限界として、氷板が構造物との境界で何の拘束も受けずに自由に変形できる条件 (Frictionless)、また氷板は構造物との境界で回転に関する拘束を受けないが、変位に関しては完全に拘束されている条件 (Hinged) の2種類の境界条件を考えると、実際に起り得る氷板と構造物との相互作用での境界条件はその中間にあると考えられる (Sodhi and others, 1983)。

Hinged の境界条件が座屈荷重の上限を、Frictionless の境界条件が下限を与えるが、これら両極端の境界条件の間は、氷板の上下方向の変位に対する抵抗の大小に関係すると考えられる。考え得る唯一の上下方向の変位に対する抵抗は、摩擦抵抗と考えられる。すなわち、氷板と構造物との境界面での摩擦係数が大きい程、座屈荷重は Hinged の境界条件で与えられる座屈荷重に近づくと考えられる。

図5にテフロン、コンクリートおよびゴムの3種のインデンタ表面材料を用いた実験で得た座屈荷重をプロットした。図においては、座屈荷重 F_b をインデンタの幅 d 、氷板の特性長 (characteristic length) L の2乗および水の単位体積重量 K で正規化した座屈荷重をプロットしている。以後座屈荷重 F_b を dKL^2 で正規化したものを正規化座屈荷重 (Normalized Buckling Load) と称する。

図5中の実線は、Sodhi et al. (1983) が有限要素法を用いて得た数値解であり、上の線が Hinged の境界条件に対応する解を表わし、下の線は Frictionless の境界条件に対応する解を表わしている。実験で得た正規化座屈

荷重は、テフロン、コンクリート、ゴムという順に大きくなっている。摩擦係数は、テフロン、ゴム、コンクリートの順で大きくなっているの、前述の予測と矛盾している。

この矛盾はゴムが、他の材料に比べて柔らかいことに起因していると考えられる。氷板に押されたゴム板は著しく変形する。このため、氷板の上下方向の動きが境界面で強く拘束され、その結果として、氷板と構造物との境界での状態は Hinged の境界条件に近づくために正規化座屈荷重が大きくなったものと思われる。

摩擦係数を測定したときに接触面に作用した圧力は高々 16 kPa であり、ゴム板の変形は観察されなかったが、この実験では、接触面の平均圧力は約 3 MPa であった。ゴム板が変形するほど大きな圧力を作用して摩擦係数を測定したのであれば、見かけ上コンクリートより大きな摩擦係数が測定されたであろうと考えられる。

ゴムを使用したときには、材料の性質により Hinged の境界条件に近づいて、正規化座屈荷重が大きくなってしまったと考えると、実験の結果は前述の予測と適合すると考えられる。氷板と構造物との間に存在する摩擦による抵抗を摩擦係数と関連付けて明らかにできれば、Sodhi et al. (1983) の有限要素解をそのまま適用して摩擦係数の座屈荷重に及ぼす影響を数値的に求めることも可能であると考えられる。

5. 結 語

従来から円錐型構造物等の傾斜を持った氷海構造物において、氷板が作用する面の氷と構造物表面材料間の摩擦が構造物に作用する氷荷重に影響を及ぼすことは良く知られていたが、円柱型構造物のように氷板の作用する面が垂直な構造物に作用する氷荷重についてはあまり考慮されていなかった。

本論では、垂直な壁面を持つ構造物に作用する氷荷重に対する摩擦の影響について理論的、実験的考察を行ない次の結論を得た。

- (1) 氷板が圧壊する場合の氷荷重は、氷板と構造物との境界での摩擦係数が大きいほど大きくなる。その摩擦係数の効果は、極限解析の上限定理を用いて、アスペクト比の小さな範囲を除いて、ある程度の評価が可能である。
- (2) 氷板が座屈破壊する場合の氷荷重も氷板と構造物との境界での摩擦係数が大きい程、大きくなると考えられる。この点に関しては、Sodhi の有限要素解に境界力として摩擦係数を取り込むように工夫すれば数値的に評価することは可能であると考えられる。

以上の結論を踏まえれば、構造物に作用する氷荷重を低減する手法として、構造物の表面材料に氷との摩擦係数の小さい材料（主にコーティング材料）を選択するのが有効な手段のひとつであろうと考えられる。その意味において、局所的な高圧力に耐えて、しかも安価なコーティング材料の研究開発が望まれる。

文 献

- Afanas'yev, V. I., Dolgoplov, I. V. and Shvayshten, Z. I., 1971: Ice pressure on separated supporting structures in the sea. CRREL TL 346, 20 pp.
- Bercha, F. G. and Danys, J. V., 1976: Investigation of ice forces on a conical offshore structure. Ocean Eng., 3, 365-380.
- Croasdale, K. R., 1980: Ice forces on fixed rigid structures. Int. Assoc. Hydraul. Res., Work. Group on Ice Forces on Struct., A State-of-the-Art-Rep., ed. T. Carstens, CRREL Spec. Rep. 80-26, 146 pp.
- Frederking, R. M. W., 1977: Plain-strain compressive strength of columnar-grained and granular snow ice. J. Glaciol., 18, 505-516.
- Haynes, F. D., Hirayama, K., Kato, K. and Sodhi, D. S., 1982: Friction tests on model ice. CRREL Intern. Rep. 744, 35 pp.
- Haynes, F. D., Sodhi, D. S., Kato, K. and Hirayama, K., 1983: Ice forces on model bridge piers. CRREL Rep. 83-19, 11 pp.
- Hirayama, K., Schwarz, J. and Wu, H.-C., 1974: An investigation of ice forces on vertical structures. IIHR Rep. No. 158, Iowa Inst. Hydraul. Res., Univ. Iowa, 164 pp.
- Hirayama, K., 1983: Properties of urea doped ice in CRREL test basin. CRREL Rep. 83-3, 44 pp.
- Hodge, P. G., 1959: Plastic analysis of structures. New York, McGraw-Hill, 364 pp.
- Kato, K., Sodhi, D. S., Haynes, F. D. and Hirayama, K., 1982: Uniaxial in-situ compressive strength of model ice; A theoretical and experimental study. CRREL Inter. Rep. 775, 23 pp.
- Kato, K. and Sodhi, D. S., 1984: Ice action on pairs of cylindrical and conical structures. CRREL Rep. 83-25, 35 pp.
- Kato, K. and Sodhi, D. S., 1984: Ice action on two cylindrical structures. J. Energy Res. Technol.,

106, 107-112.

加藤一行, 1984: 氷板の座屈荷重. 第7回海洋工学シンポジウム講演論文論, 255-264.

Kry, P. R., 1981: Scale effects in continuous crushing of ice. Proc. IAHR 5th Symp. on Ice Probl., Quebec, II, 565-580.

Nevel, D. E., Perham, R. E. and Hogue, G. B., 1977: Ice forces on vertical piles. CRREL Rep. 77-10, 9 pp.

Ralston, T. D., 1977: Ice force design consideration for conical offshore structures. Proc. 4th Intern. Conf. POAC, St. John's, 741-751.

Ralston, T. D., 1978: An analysis of ice sheet in-

dentation. Proc. IAHR 4th Symp. on Ice Probl., Lulea, 13-31.

Reinicke, K. M., 1979: Analytical approach for the determining of ice forces using plasticity theory. Physics and Mechanics of Ice, ed. P. Tryde, IUTAM Symp., Copenhagen, 325-341.

Sodhi, D. S. and Hamza, H. E., 1977: Buckling analysis of semi-infinite ice sheet. Proc. 4th Intern. Conf. POAC, St. John's, 593-604.

Sodhi, D. S., Haynes, F. D., Kato, K. and Hirayama, K., 1983: Experimental determination of the buckling loads of floating ice sheet. Ann. Glaciol., 4, 260-265.

Some effects of friction on ice forces subjected to structures with vertical faces

Kazuyuki KATO

The Research Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries, Co., Ltd., Yokohama 235

Abstract: Theoretical and experimental studies were performed to clarify some effects of the frictional coefficient on ice forces on Arctic marine structures having vertical faces. Ice forces generated during a crushing mode of ice sheet failure were formulated using the upper bound theorem of limit analysis to take the effect of the frictional coefficient into account. Model tests were carried out in order to examine the ice forces calculated from the theory. The theoretical ice forces were in good agreement with the experimental ice forces with a few exceptions. Model tests were also performed with various surface materials to obtain the effects of frictional coefficient on ice forces when ice sheets failed in a buckling mode. As a result of the model tests, one can consider the frictional coefficient as a parameter which links the numerical solutions with the extreme boundary conditions. There is a tendency for buckling load to increase when the frictional coefficient increases.

It can be concluded that the frictional resistance affects the ice force on a structure with either vertical or sloping faces. It is suggested that use of low friction materials or surface coating would reduce the ice force on an Arctic marine structure.

(1984年8月10日受付, 12月10日改稿受理)