

垂直壁を有する氷海構造物に作用する氷荷重について

石川島播磨重工業株式会社 正会員 加藤 一行

1. 緒 言

北極海などの氷海域で使用される海洋構造物（氷海構造物）の設計に際して、構造物と氷との相互作用によって構造物に作用する荷重（氷荷重）を把握することは欠くべからざる要素である。

氷荷重は、氷（板）を破壊するのに必要な力と破壊後の氷片の処理に要する力を合せたものと考えられている。氷（板）を破壊するのに必要な力（破壊荷重）は、ある状態の氷（板）の破壊モードによって定まる。そして、破壊モードは、構造物の形状および相互作用における構造物と氷（板）との境界の条件に左右される（図1）。

氷海域において存在する氷の状態は種々あるが、半無限あるいは無限の広がりを持った均一な氷板と氷海構造物との相互作用を対象とすると生じ得る破壊モードは、理想的には、図2のようになる。すなわち、構造物が傾斜した面を有してその面に氷板との相互作用が生じると、氷板は曲げ破壊を起す。これに対して、構造物が垂直な面を有しているときには、Crushing 破壊か座屈破壊が氷板に生じる。与えられた条件のもとでより小さな破壊荷重を必要とする破壊モードが発生する。

本報では、Crushing 破壊荷重および座屈破壊荷重に関する因子を従来の諸研究をもとに検討し、Crushing 破壊荷重および座屈破壊荷重の性質を定性的に明らかにする。そして特に重要な因子であるアスペクト比について定量的に検討し、垂直壁を有する氷海構造物と氷板との相互作用における破壊モードの発生限界について考察を加える。

2. Crushing 破壊荷重と座屈破壊荷重の

Crushing 破壊荷重 F_c と座屈破壊荷重 F_b は一般的に次式で表わされる。

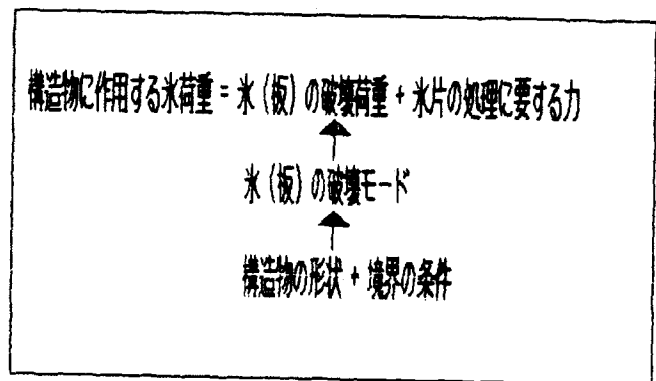


図1 構造物に作用する氷荷重

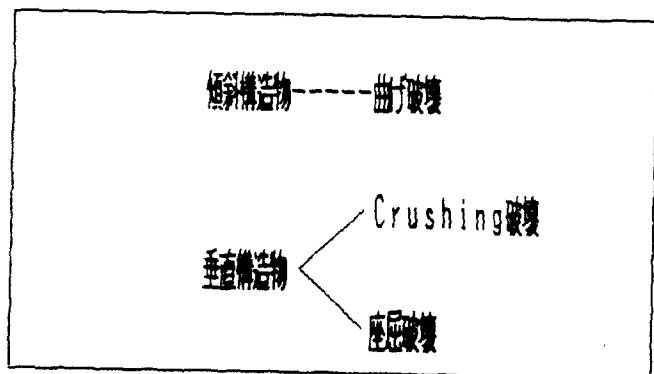


図2 構造物形状と氷板の破壊モード

$$F_c = f(\sigma_c, B, h, B/h, f, v, \dots) \quad \dots(1)$$

$$F_b = g(L, B, B/L, f, v, \dots) \quad \dots(2)$$

各々の式中のパラメータは一般的に重要と考えられている因子である。それらの意味については表1を参照願いたい。

2.1 Crushing 破壊荷重

Crushing 破壊荷重に及ぼす氷板の進行速度 v の影響は、主に圧縮強度 σ_c がひずみ速度によって変わるためである。図3に示されているサロマ湖（北海道）における現地計測〔1〕の例のように、氷の圧縮強度があるひずみ速度の最大の値を示すことは良く知られている。

実際の構造物と氷板との相互作用においては、氷板の進行速度 v とひずみ速度との関係は現在確立されていないが、氷板の進行速度によってひずみ速度も変わるから、氷板の進行速度によってCrushing 破壊荷重も変化する。

構造物表面材料と氷との間の摩擦係数がCrushing 破壊荷重に及ぼす影響については従来無視されて来たが、加藤〔2〕は上界定理に境界面での摩擦係数の効果を組み込んで定量的に考察し、摩擦係数が大きいほどCrushing 破壊荷重が大きくなることを示した。

幾何形状に関わる因子については、下記のAfanasyev et al.〔3〕の実験式を参考にする。

$$F_c = C_s \{ 5(h/B) + 1 \}^{1/2} B h \sigma_c \quad \dots(3)$$

ここで、 C_s は構造物の断面形状によって定まる係数である。図4には石川島播磨重工業㈱「低温試験水槽」で実施した円柱模型を用いた模型実験で得たデータと(3)を比較したものを示している。円柱の場合は $C_s = 0.9$ である。

構造物幅（径） B 、氷厚 h が増大すれば破壊荷重が増大するのは当然であるが、破壊荷重 F_c を $B h \sigma_c$ で除した正規化氷荷重 P_c はアスペクト比 B/h の関数となっている。正規化氷荷重 P_c はアスペクト比が小さいほど、つまり構造物幅に比して氷厚が大きいほど大きくなる。これが、Crushing 破壊荷重の大きな特色である。

他の実験式も提案されている。例えば、Hirayama & Schwarz〔4〕は

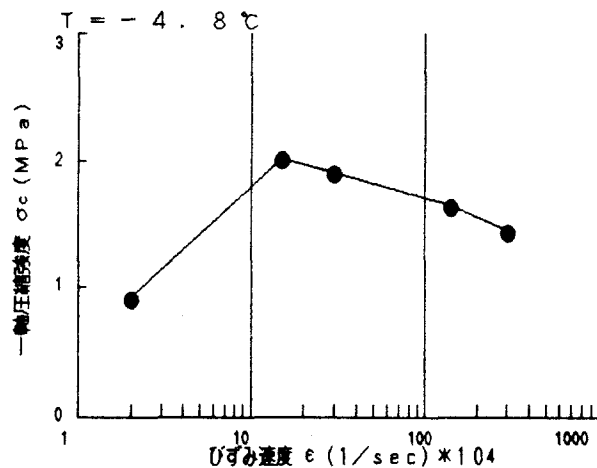


図3 軸圧縮強度とひずみ速度との関係の一例

$$F_c = 3.57 B^{1/2} h^{11/10} \sigma_c \quad \dots(4)$$

(円柱, 単位kg, cm)

を提案し, Saeki & Ono [5]は

$$F_c = 5.0 B^{1/2} h \sigma_c \quad \dots(5)$$

(円柱, 単位kg, cm)

を提案している。これらの実験式は(3)に比べると多少の相違はあるが, 基本的にはアスペクト比が増大すると正規化氷荷重 P_c は減少するという構造を持っている。また, 上界定理を用いた理論解析においても同様のアスペクト比の影響を導びくことができる([6])。

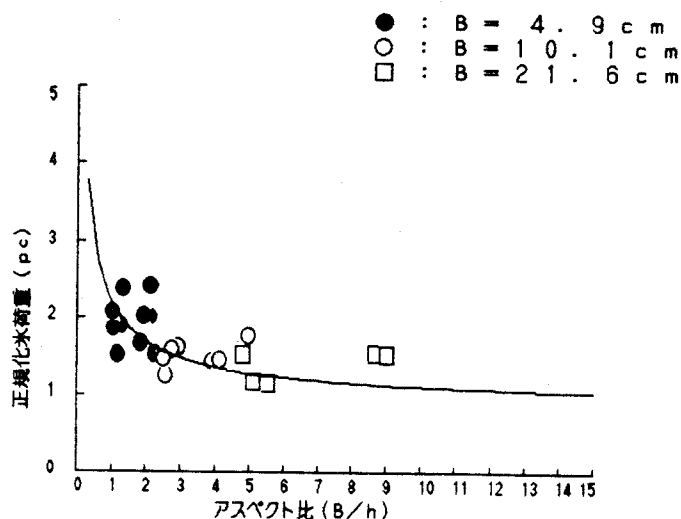


図4 Crushing破壊荷重に及ぼすアスペクト比の影響

2.2 座屈破壊荷重

座屈破壊荷重 F_b に及ぼす氷板の進行速度

の影響は, Sodhi [7]により研究されている。その結果は, 氷板の進行速度 v が大きいほど, 相互作用が生じたときに高次の座屈モードが励起されるために, 座屈荷重が大きくなるというものである。

座屈破壊荷重 F_b に及ぼす摩擦係数の影響については, 加藤[2]が報告している。構造物の表面材料を種々変えて模型実験を行ない, 摩擦係数が大きくなるほど座屈破壊荷重が大きくなることを示している。このことは有限要素解(図5)からも予想できる。

図5は, Sodhi & Hamza [8]が導びいた有限要素解と Kato & Sodhi [9]が行なった円柱模型を用いた実験のデータを比較したものである。図中の実線が有限要素解であり, Frictionlessとあるのは構造物と氷板との境界条件が完全に自由($f = 0$)なときの解であり, Hingedとあるのはその境界で氷板の上下変位が拘束($f = \infty$)されているときの解である。図中の d は円柱の直径であり, 本報では B と記している。

構造物幅(径)が大きくなると座屈破壊荷重 F_b は大きくなるのは当然であるが, 氷厚 h は特性長(Characteristic length) L を介して座屈破壊荷重と関係している。特性長 L は, E を弾性係数, m をポアソン比そして K を水(海水)の単位体積重量として次式で定義される。

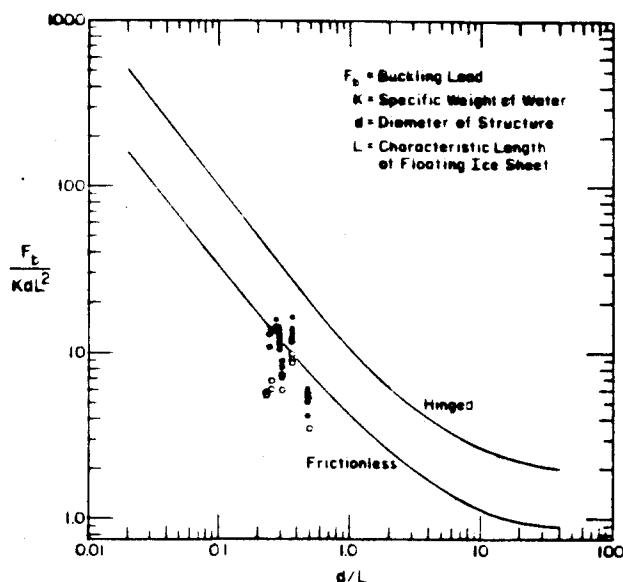


図5 座屈破壊荷重に及ぼすアスペクト比の影響
(From Kato & Sodhi; [9])

$$L = \left\{ \frac{Eh^3}{12K(1-\mu^2)} \right\}^{1/4} \quad \dots(6)$$

特性長 L が大きくなると当然ながら座屈破壊荷重 F_b は大きくなるが、 F_b を KBL^2 で除した正規化座屈荷重は B/L の関数となる（図 5）。この B/L を座屈のアスペクト比と称することがある。正規化座屈荷重は $Crushing$ のときと同様にアスペクト比（座屈の）が大きくなると減少する。

以上の $Crushing$ 破壊荷重および座屈破壊荷重の諸因子に対する増減をまとめたものが表 1 である。

3. アスペクト比による破壊モードの限界

$Crushing$ 破壊荷重と座屈破壊荷重に大きな影響を与える因子はアスペクト比である。本章ではアスペクト比が

$Crushing$ 破壊荷重および座屈破壊荷重に与える影響を定量的に検討し、破壊モードの発生限界について考察する。 $Crushing$ 破壊荷重に及ぼすアスペクト比の影響については、*Afanasyev et al.* の実験式を用いる。ただし本章では構造物の断面形状に関する係数 $C_s = 1$ としている。座屈破壊荷重に関しては、図 5 に示されている *Sodhi & Hamza* の有限要素解を用いることにする。

実際にあり得る座屈アスペクト比 B/L の範囲は 0.1 ～ 5 の範囲であろう。その範囲において図 5 の有限要素解を近似すると、 $Frictionless$ の境界条件に対して、

$$\left(\frac{F_b}{KBL^2} \right)_f = 4.193 \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.904} \quad \dots(7)$$

$Hinged$ の境界条件に対して、

$$\left(\frac{F_b}{KBL^2} \right)_h = 10.514 \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.999} \quad \dots(8)$$

となる。(7)、(8)を(6)の関係式を用いて座屈アスペクト比 B/L をアスペクト比 B/h に直すと次の両式を得る。

$$P_{bf} = \left(\frac{F_b}{Bh\sigma_c} \right)_f = 4.193 C^{2.904} \left(\frac{kh}{\sigma_c} \right)^{0.274} \left(\frac{B}{h} \right)^{-0.904} \quad (Frictionless) \quad \dots(9)$$

表 1 破壊荷重の増減

(*)---正規化したとき

因子	記号	CRUSHING	座屈
圧縮強度	σ_c	増	---
構造物幅	B	増	増
氷厚	h	増	増
アスペクト比	B/h	減(*)	減(*)
進行速度	v	増 or 減	増
摩擦係数	f	増	増
特性長	L	---	増
座屈アスペクト比	B/L	---	減(*)

$$P_{bh} = \left(\frac{F_b}{B h \sigma_c} \right)_h = 1.0514 C^{2.999} \left(\frac{k h}{\sigma_c} \right)^{0.250} \left(\frac{B}{h} \right)^{-0.999} \quad \dots(10) \quad (\text{Hinged})$$

ここに, $C = C_2 / C_1$, $C_1 = \sigma_c / \sigma_f$,

$C_2 = E / \sigma_f$ である。

北極海域の氷板では $h = 2\text{m}$, $\sigma_c = 2\text{MPa}$

$E / \sigma_f = 3000$, $\sigma_c / \sigma_f = 3$ が典型であるから, それらの値を(3), (9)および(10)に代入して正規化氷荷重 P_c , P_b を計算すると図6を得る。与えられたアスペクト比では, 正規化氷荷重の小さい破壊モードが発生するから, Crushing 破壊に対する曲線と座屈破壊に対する曲線の交点が破壊モードの発生限界を表わしている。

実際の構造物と氷板との条件は, Hinged と Frictionless の境界条件の中間にあるから, 破壊モードの発生限界は $B/h = 50$ 程度である。例えばアスペクト比 $B/h = 50$ とすると, 構造物幅(径)は 100m にも達する場合もある。構造物の種々の面から見て, この大きさは氷海構造物の限界に近いと考えられるから, 実際の北極海域においては座屈破壊の発生する可能性は極めて低いといえる。

一方, 模型実験氷では, $h = 2\text{cm}$, $\sigma_c = 100\text{kPa}$, $E / \sigma_f = 1000$, $\sigma_c / \sigma_f = 3$ が一般的である。これらの値を同様に(3), (9)および(10)に代入して計算すると図7を得る。この図から模型実験氷ではアスペクト比 B/h が 10 程度で座屈破壊が発生する可能性が高くなることがわかる。

事実, アスペクト比 B/h が 20 以上で Crushing 破壊を起こしている実験データを見かけることはほとんどない。この座屈破壊を起こし易いという模型実験氷の性質が, Crushing 破壊荷重の性質を研究する上での模型実験の適用性を制限しているように思われる。

4. 結 語

垂直壁を有する氷海構造物に作用する氷荷重については, 近年の諸研究によりかなり明らかになってはいるが, 材料(氷)自体の力学的性質の複雑さ, 現地計測, 模型実験の困難さに起因して, すべての因子を包括した形で

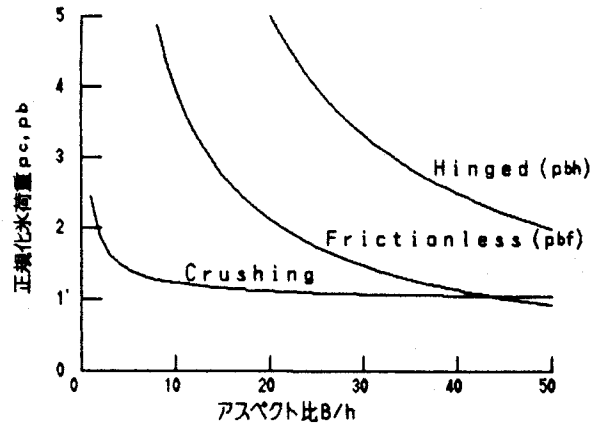


図6 正規化氷荷重とアスペクト比の関係 (海水)

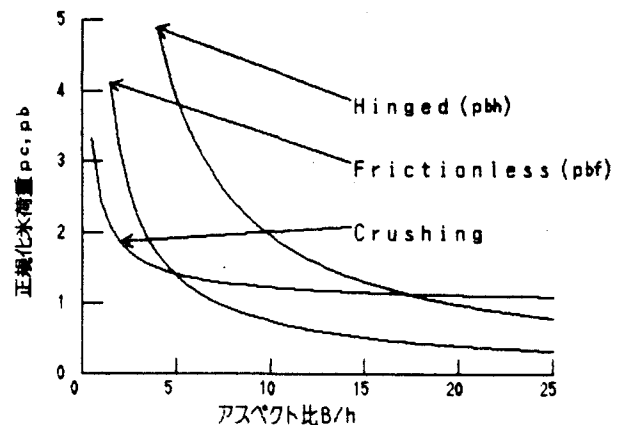


図7 正規化氷荷重とアスペクト比の関係 (模型実験氷)

の表式が完成するまでにはさらに根気のいる研究が必要であると思われる。

本報では、現状を認識するという意味で、垂直壁を有する氷海構造物に作用する氷荷重の性質について概括した。そして氷荷重に影響を与える諸因子のなかで、かなり定量的にその影響が明らかになっている、また支配的因子のひとつであるアスペクト比の影響について検討を加え、Crushing 破壊および座屈破壊とアスペクト比との関係を考察した。

その結果、北極海域における構造物と氷板（無限、半無限）との相互作用においては座屈破壊の発生する可能性は極めて低いことが明らかになった。他の因子、氷板の進行速度、摩擦係数の影響を考慮すれば、その可能性はさらに減少する。そしてさらに、Kry〔10〕によって提唱された複数破壊領域の概念を想起すれば、座屈破壊の発生する可能性はほとんどないとさえ結論できる。

参 考 文 献

1. 柳沢，加藤，小嶋，山下，松島（1984）：構造物に作用する氷荷重，第7回海洋工学シンポジウム，日本造船学会，pp. 265-274.
2. 加藤一行（1985）：垂直構造物に作用する氷荷重に及ぼす摩擦の影響，日本雪氷学会誌雪氷．47巻1号 pp. 39-46.
3. Afanas'yev, V.P., Iu.V.Dolgoplov and Z.I.Shvaysteyn(1972): Ice pressure on separate supporting structures in the sea, Trudy Leningrad, Arkt.i Antarkt. Inst., vol.300, pp. 61-80.
4. Hirayama, K.and J.Schwarz(1974): An investigation of ice forces on vertical structure, IIHR Report No 158.
5. Saeki, H. and A. Ono(1979): Ice forces on piles, P.Ttyde ed., Physics and Mechanics of ice, Springer-Verlag, PP. 342-350.
6. Croasdale, K.R.(1980): Ice forces on fixed, rigid structures, IAHR Working group on ice forces on structures, A State-of-the-Art Report, T.Carstensed., CRREL Special Report 80-26, pp. 107-130.
7. Sodhi, D.S.(1983): Dynamic bucking of floating ice sheet, Proc, 7th Int. Conf. POAC, pp. 822-833.
8. Sodhi, D.S. and H.E. Hamza(1977): Buckling analysis of semi-infinite ice sheet, Proc., 4th Int. Conf. POAC, pp. 593-604.
9. Kato, K. and D.S.Sodhi(1984): Ice action on two cylindrical structures, Trans. ASME, Jour. Energy Resources Technology, vol.106, pp. 107-112.
10. Kry.P.R.(1981): Scale effects in continous crushing of ice, Proc., 5th IAHR Symposium on ice problem, pp. 565-580.