

円錐脚型多脚氷海構造物に作用する氷荷重の要素試験

石川島播磨重工業（株） 正会員 加藤 一行
 同上 岸本 弘晴
 同上 三田 重雄

1. 緒言

比較的水象条件がマイルドな氷海域で使用される氷海構造物として多脚式の構造物がある。多脚式の構造物とは複数本の脚柱により上部構造を支持している構造物であり、従来の形式は垂直な円柱を脚柱とするものがほとんどであった¹⁾。その形式の構造物に作用する氷荷重の評価法は既に提案されている²⁾。しかし、上部構造を支持する脚柱が円柱であるために、主要な氷板の破壊様式が Crushing 破壊となり、いわゆる Ice induced vibration が問題になる。事実、渤海湾におけるこの種の構造物の二例の破損事故も Ice induced vibration が原因であると考えられている³⁾。

上部構造を支持する脚柱に傾斜構造物を採用すれば、主要な氷板の破壊様式は曲げ破壊となり、氷の力学的特性から、氷荷重を軽減できるばかりか、Ice induced vibration を問題にする必要がなくなる。脚柱に傾斜構造物を採用することは、明らかに円柱を採用するよりも氷荷重の面からみればメリットが大きいから、そのような概念の構造物に作用する氷荷重を推測するための基礎的研究を行うことは将来的には意味がある。

氷板が構造物に対して進行しきる方向を特定することは困難であるから、氷板との相互作用を生ずる部分の形状は方向性のない円錐形とする方が有利であろうと考えられる。本論では、脚柱の氷板が作用する付近の形状が円錐（台）形をした多脚構造物、すなわち円錐脚型多脚氷海構造物（MCLSと略記する）に作用する氷荷重の推定式（氷荷重モデル）を設定するために行った基礎的検討について報告している。

2. 基本的な考え方

この種の構造物の氷荷重モデルは、一般的に次のように記述されると考える。

$$F = f(s, \theta) R_n F_i \quad (1)$$

ここに、 F : MCLSに作用する氷荷重

$f(s, \theta)$: 最大荷重が同時に発生すると考えたときの脚柱の配列と氷板進行方向によって定まる倍率

R_n : 最大荷重発生非同期性による低減係数

F_i : 独立した円錐構造物に作用する氷荷重

独立した円錐構造物に作用する氷荷重は、実験的にも求めることができるが、Ralston の塑性極限解析⁴⁾による解を用いた方が汎用性が高いと考えられるから、Ralston の塑性極限解析の解を独立した円錐構造物に作用する氷荷重の推定式とする。

ここで、4本の脚柱により支持されている構造物を考えると、氷板が構造物に十分貫入したときの状況は、理想的には図1に示されたようになると考えられる。各脚柱が破壊した氷板の軌跡の幅は円錐の形状と氷板の諸性質によって決まるが、脚柱が近接している場合には氷板の破壊が二つの脚柱にまたがって同時に生ずるなど、状況によっては図1に示されたものとは必ずしも合致しない場合もある。しかしその場合は図1に示されている状況の基で構造物に作用する氷荷重よりも大きくなることはないから、図1の状況に対する氷荷重を考慮すれば安全側である。

図1に示されている状況が発生したとすれば、脚柱と氷板との相互作用はさらに3種の相互作用に分解することができる。すなわち、並列する脚柱が同時に氷板に貫入するような相互作用（Type A と呼ぶ、図2参照）、片側に自由辺がある氷板に脚柱が作用する（Type B と呼ぶ、図3参照）、そして両側に自由辺がある氷板に脚柱が作用する（Type C と呼ぶ）、である。しかし、Type C の相互作用は距離 L_1 が大きい場合には Type B の相互作用に帰着し、 L_1 が小さいときには Type B の相互作用による氷荷重よりも大きくなることはないから、結局 Type A と Type B の相互作用の組合せを考慮すれば安全側の配慮となる。

本論では、Type A と Type B の相互作用の状況を I H I 低温試験水槽⁵⁾において人工的に作りだし、円錐中心間距離 L_w 及び円錐中心と自由辺までの距離 L_f が氷荷重に及ぼす影響を調べた実験の結果を報告すると共に、その結果を用いて、(1) 式の $f(s, \theta)$ の定め方について考察を加えた。

3. 実験の概要

実験は、I H I 低温試験水槽で実施した。図 2 (Type A)、図 3 (Type B) に示されているように円錐模型を配置し、模型氷板を調整した後、模型を固定した曳引車を駆動し模型を氷板中に貫入する形式の実験を行った。氷荷重は模型と曳引車の間に配置した三分力ロードセルにより測定した。水平面での 2 方向の氷荷重の合力を水平氷荷重とした。

用いた模型は、Type A の実験では水線面での直径 $D_w = 300$ mm、円錐の頂部での直径 $D_t = 150$ mm、傾斜角 60 度であり、摩擦係数は測定しなかったが、これまでの経験から推定して 0.07 前後であると考えられる。主要なパラメータとして 5 種の構造物中心間距離を用いた。すなわち、 $L_w = 400, 600, 800, 1000, 1200$ mm である。これを円錐構造物の水線面での直径で除した相対距離 $k_w = L_w / D_w$ で表すと $k_w = 4/3, 2, 8/3, 10/3, 4$ である。

Type B の実験では、水線面での直径 $D_w = 400$ mm、円錐の頂部での直径 $D_t = 227$ mm、傾斜角 60 度の模型を用いた。円錐中心と自由辺までの距離は $L_w = 400, 600, 800, 1200$ mm の 4 種を用いた。相対距離 $k_f = L_f / D_w$ で表すと $k_f = 1, 1.5, 2, 3$ である。摩擦係数に関して Type A と同様である。また、双方の実験とも比較のために独立した円錐構造物の模型実験も行った。用いた模型構造物は全く同一のものである。

模型実験は、氷厚と曲げ強度の積をパラメータとして、同一の中心間距離に対して 6 ~ 8 回行った。氷厚は試験終了後に直ちに、その模型試験によって破壊された氷片を採取し、ノギスにより直接測定した。曲げ強度は事前に行った測定により求めた曲げ強度の特性曲線⁶⁾を基に推定した。用いた模型氷は E G I である。I H I 低温試験水槽における E G I の特性については既に詳しく報告してある⁶⁾。

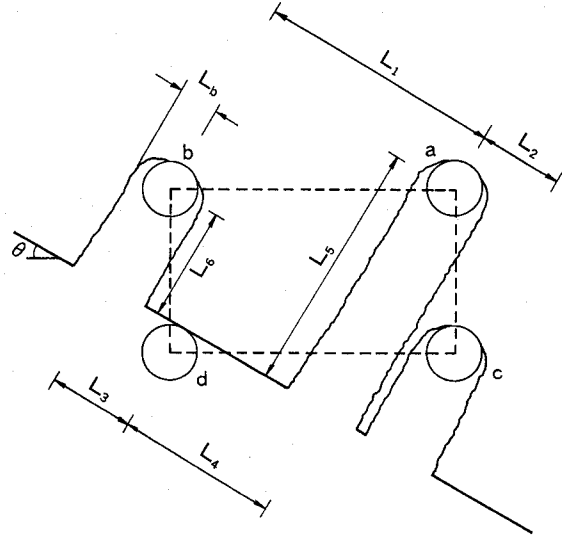


図 1 理想化された MCL S と氷板との相互作用

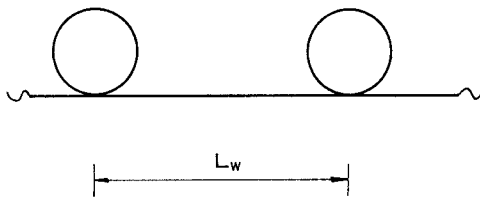


図 2 Type A の実験の概要図

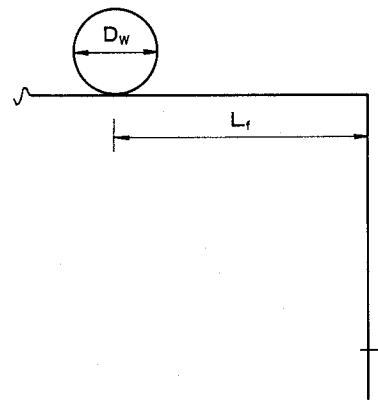


図 3 Type B の実験の概要図

4. 実験結果

円錐構造物に限らず氷板との相互作用面が傾斜している形式の構造物に作用する氷荷重は、氷板を破壊するのに必要な成分（破壊成分）と破壊された氷板と移動するのに必要な成分（ライドアップ成分）の和であると考えられるから、それらの成分を分離して考察する方が合理的である。二つの成分を分離するために D u P T E M と名付けられた手法を開発してある⁷⁾。本実験の結果も D u P T E M の方法に基づいて整理している。

円錐構造物を対象とすると、D u P T E M は次式を基本としている⁸⁾。

$$F = (D_w^2 - D_t^2) a \rho_{ig} h + b \sigma_f h^2 \quad (2)$$

ここに、F：氷荷重

ρ_{ig} ：氷の単位体積重量

h：氷厚

σ_f ：氷板の曲げ強度

係数 a, b（氷荷重係数）は（2）式が、

$$\frac{F}{\sigma_f h^2} = a \frac{(D_w^2 - D_t^2) \rho_{ig}}{\sigma_f h} + b \quad (3)$$

となるから、 $F / \sigma_f h^2$ と $(D_w^2 - D_t^2) \rho_{ig} / \sigma_f h$ のプロットに対して線形回帰解析を施すことによって得られる。

氷荷重係数は、ある試験において得られた最大荷重を対象として、上記の方法により求めた。線形回帰解析の一例が図4に示されている。

一連の実験により得た L_w, L_f が有限のときの氷荷重係数 a, b と $L_w, L_f = \infty$ のときの氷荷重係数 a_i, b_i の比、 $A = a / a_i, B = b / b_i$ を相対距離 k_w 及び k_f に対してプロットしたものをそれぞれ図5、図6に示した。

Type A の実験の結果から（図5）、並列した円錐構造物に作用する氷荷重は、円錐中心間距離が円錐の水線面での直径の4倍になると独立した円錐構造物に作用する氷荷重と変わらなくなると結論できる。また、Type B の実験の結果から（図6）、片側に自由辺を持つ氷板と円錐構造物との相互作用による氷荷重は、円錐中心から自由辺までの距離が円錐直径の3倍になると独立した円錐構造物に作用する氷荷重と変わらなくなると結論できる。

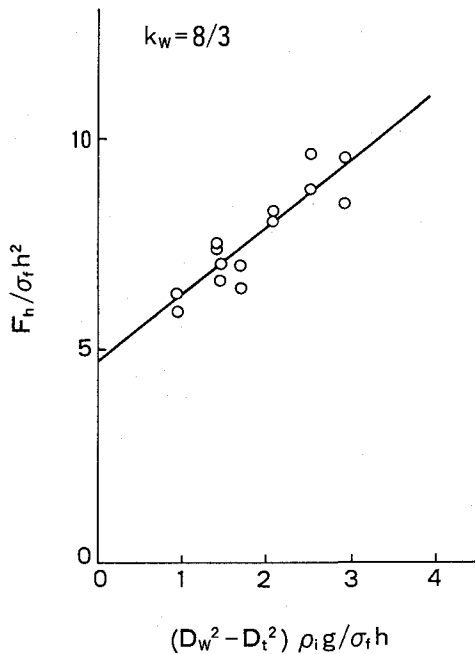


図4 線形回帰解析の一例（ $k_w=8/3$ ）

5. 氷荷重倍率

氷荷重倍率は、 L_w, L_f が有限の時の構造物に作用する氷荷重と $L_w, L_f = \infty$ のときに構造物に作用する氷荷重の比であると定義する。すなわち、 L_w, L_f が有限の時の氷荷重を F として、 $L_w, L_f = \infty$ 、すなわち独立している時の氷荷重を F_i とすると、

$$F = f(k) F_i \quad (4)$$

ここに、 $f(k)$ ：氷荷重倍率、k の関数と仮定する。

k：相対距離、 k_w あるいは k_f

と定義する。さらに、円錐構造物では氷荷重はライドアップ成分と破壊成分の和で表されるから、

$$f(k) = \frac{F}{F_i} = \frac{F_r + F_b}{F_{r_i} + F_{b_i}} \quad (5)$$

ここに、 $F_{r_i} : L_w, L_f = \infty$ のときのライドアップ成分

$F_{b_i} : L_w, L_f = \infty$ のときの破壊成分

$F_r : L_w, L_f = \text{有限}$ のときのライドアップ成分

$F_b : L_w, L_f = \text{有限}$ のときの破壊成分

となり、さらに次のように記述することができる。

$$\begin{aligned} f(k) &= \frac{\frac{F_r}{F_{r_i}}}{1} + \frac{\frac{F_b}{F_{r_i}}}{\frac{F_{b_i}}{F_{r_i}}} \\ &= \frac{A + B \frac{b_i}{a_i} \frac{\sigma_f h}{\rho_i g (D w^2 - D t^2)}}{1 + \frac{b_i}{a_i} \frac{\sigma_f h}{\rho_i g (D w^2 - D t^2)}} \end{aligned} \quad (6)$$

氷荷重係数の比 A, B は図5、図6に示された実験の結果を多線型近似して(7)～(10)式のように定めた。
また、独立した円錐構造物に対する破壊成分とライドアップ成分に関する氷荷重係数の比 b_i/a_i は、Type A では $b_i/a_i = 2.431$ 、Type B では $b_i/a_i = 2.416$ という結果を得ている。

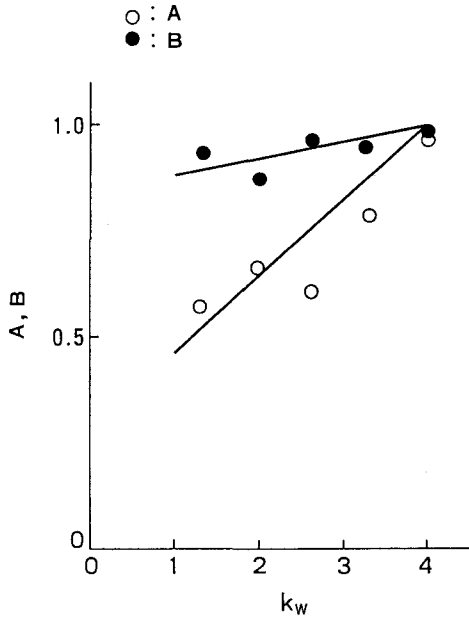


図5 氷荷重係数比と k_w の関係

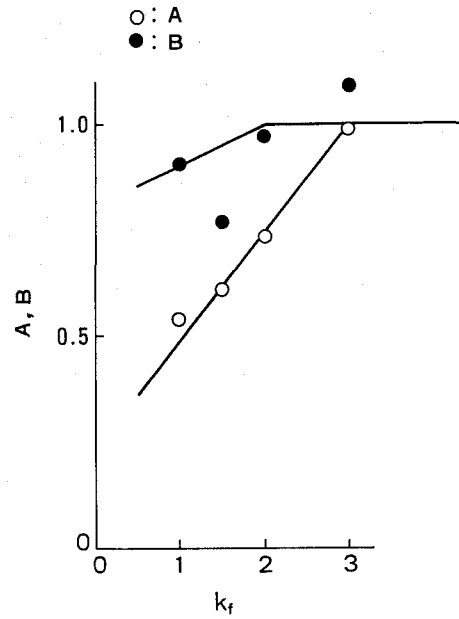


図6 氷荷重係数比と k_f の関係

Type A の相互作用では、

$$\begin{aligned} A &= 0.462 + 0.180 (k_w - 1) & 1 \leq k_w \leq 4 \\ A &= 1 & k_w > 4 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B &= 0.88 + 0.04 (k_w - 1) & 1 \leq k_w \leq 4 \\ B &= 1 & k_w > 4 \end{aligned} \quad (8)$$

Type B に対しては、

$$\begin{aligned} A &= 0.45 (k_r + 0.5) & -0.5 \leq k_r < 0.5 \\ A &= 0.36 + 0.194 k_r & 0.5 \leq k_r \leq 3.0 \\ A &= 1 & k_r > 3.0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} B &= 0.85 (k_r + 0.5) & -0.5 \leq k_r < 0.5 \\ B &= 0.8 + 0.1 k_r & 0.5 \leq k_r \leq 2.0 \\ B &= 1 & k_r > 2.0 \end{aligned} \quad (10)$$

6. $f(s, \theta)$ の定め方

MCL S と氷板との相互作用の状況は理想的には図 1 に示されたようなものになる。いま、構造物と氷板との相対進行角 θ を図 1 のように定義すると、完全な並列状態は $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 90^\circ$ の時にしか発生しない。しかし、 θ が 0 に近い場合、あるいは 90° に近い場合は並列であると考えても十分な近似である。そこで本論では、 $0 \leq \theta < 15^\circ$ 、及び $75^\circ \leq \theta < 90^\circ$ のときに並列状態であると考ええる。

図 1 の各中心間距離は脚柱の配列と相対進行角 θ との幾何学的関係によって簡単に定めることができるからここでは省略するが、問題は構造物（円錐）中心から自由辺までの距離である。円錐構造物による氷板の破壊の軌跡の幅は、一般に円錐構造物の水線面での直径よりやや大きくなる。すなわち、構造物中心から自由辺までの距離は対応する中心間距離から破壊軌跡の幅の半分を差し引いたものである。この軌跡の幅は理想的には円錐構造物との相互作用による氷板の破壊の円の直径と同じになる。氷板の破壊円 D_b の直径は Ralston の塑性極限解析⁴⁾によって見積ることができる。

脚柱の配列が定まり、氷板の相対進行角が定まったならば、まず脚柱 a 、 b （図 1 参照）に対して並列と考えられるか否かを判断して、並列と考えられる場合には中心間距離 L_1 を用いて (7), (8), (6) 式から、並列と考えられない場合には $L_1 - 1/2 D_b$ を用いて (9), (10), (6) 式から、それぞれに対応する倍率を求める。並列であるならば、脚柱 a 、 b に対する倍率は等しいが、並列でないならば、脚柱 a に対する倍率は独立した円錐構造物と等しいから 1 であり、脚柱 b に対する倍率を求めれば良い。脚柱 c に対しては $L_2 - 1/2 D_b$ を用いて (9), (10), (6) 式から、対応する倍率を求める。さらに脚柱 d に対しては $L_3 - 1/2 D_b$ 及び $L_4 - 1/2 D_b$ の小さな方を用いて (9), (10), (6) 式により倍率を計算する。

構造物全体に対する倍率、すなわち $f(s, \theta)$ はそれらを加え合わせたものとなる。図 7 に正方形配列の 4 脚 MCL S の $f(s, \theta)$ を相対進行角に対して求めたものを、図 8 には長方形配列の 4 脚 MCL S に対するそれを図示した。ここで、各脚柱の円錐の大きさは、水線面の直径が 3 m、円錐頂部の直径が 1.5 m、傾斜角 60 度としている。また、氷板との摩擦係数は 0.1 とした。

正方形配列の構造物に対しては、中心間距離が 12 m, 18 m, 24 m の 3 種について計算したが、当然のことながら中心間距離が小さいほど $f(s, \theta)$ は小さくなる。また、いずれの場合においても相対進行角が $25^\circ \sim 30^\circ$ で $f(s, \theta)$ は最大となる。長方形配列の構造物に対しては、短い方の中心間距離を 12 m とし、長い方の中心間距離が 12 m, 18 m, 24 m の 3 種について計算を行った。総体的には長辺の距離が長いほど $f(s, \theta)$ が大きくなるが、 $f(s, \theta)$ が最大となる相対進行角は長辺の長さによって異なる。

7. 結言

本論では、MCL S に作用する氷荷重の推定式を定式化するために並列した円錐構造物と片側に自由辺のある氷板と円錐構造物との相互作用における氷荷重に関する模型実験を行い、円錐中心間距離及び円錐中心と自由辺までの距離が氷荷重に及ぼす影響を、独立した円錐構造物に作用する氷荷重と比較する形で調査した。この実験の結果、並列した円錐構造物に作用する氷荷重は、円錐中心間距離が円錐の水線面での直径の 4 倍になると独立した円錐構造物に作用する氷荷重と変わらなくなるとの結論を得た。また、片側に自由辺を持つ氷板と円錐構造物との相互作用による氷荷重は、円錐中心から自由辺までの距離が円錐直径の 3 倍になると独立した円錐構造物に作用する氷荷重と変わらなくなるとの結論を得た。この結果を用いて複数の脚柱に同時に最大荷重が作用すると考えたときの MCL S に作用する氷荷重の求め方を 4 脚 MCL S を対象として例示した。同様の考え方は 4 脚 MCL S 以外の構造物にも適用できる。

しかしながら、各脚柱に作用する氷荷重は同期しておらず、最大荷重の発生も同時ではないから、この最大荷

重発生の非同期性を考慮しない限り、過大評価になる。すなわち、(1) 式の R_n を考慮しなければ MCL S に作用する氷荷重を過大に評価してしまうことになる。本研究の次の課題は R_n の定式化である。

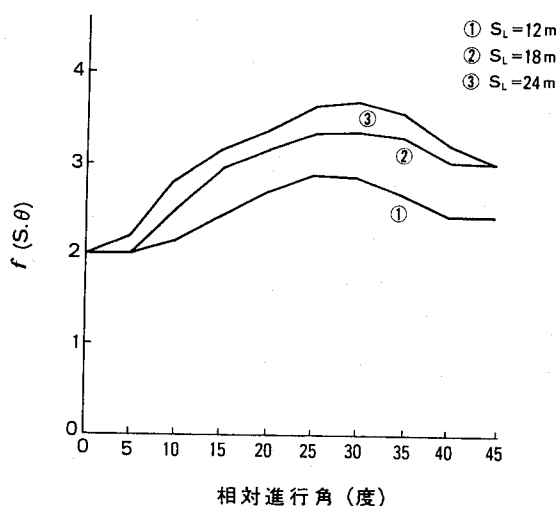


図7 $f(s, \theta)$ の計算例 (正方形配列)

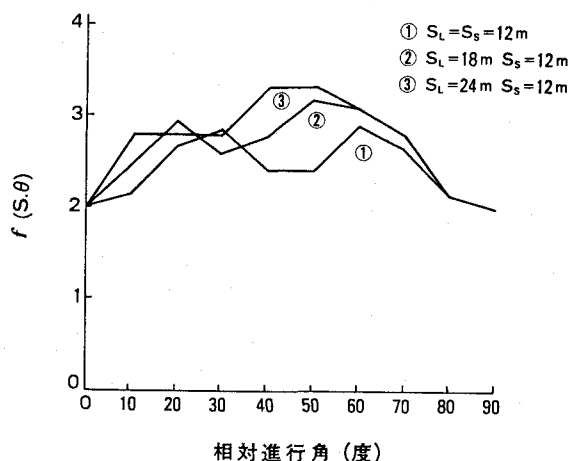


図8 $f(s, \theta)$ の計算例 (長方形配列)

参考文献

- 1) Blenkarn, K.A. (1970): Measurement and analysis of ice forces on Cook Inlet structures.
Proc. OTC'70 PP.365-378 Houston Texas, USA
- 2) Kato, K. (1988): The design ice force estimating system for a structure level ice sheet interaction. Proc. 9th IAHR Ice Symp. vol.1 pp.361-370 Sapporo, Japan
- 3) Xu, J. (1981): Dynamic response of a jacket platform subjected to ice floe loads.
Proc. POAC'81 vol.1 pp.502-516 Quebec City, Canada
- 4) Ralston, T.D. (1977): Ice force design consideration for conical structures.
Proc. POAC'77 vol.2 pp.741-752 St.Jhon's, Canada
- 5) 加藤、藤井 (1986): 氷海水槽における構造物の氷荷重模型試験. 石川島播磨技報 第16巻第6号
pp.354-359
- 6) 加藤、岸本、三田 (1988): IHI低温試験水槽におけるEGIの力学的特性. 第4回寒地技術シンポジウム
講演論文集 pp.283-288 札幌
- 7) 加藤 (1987): 傾斜構造物の氷荷重模型試験法. 第34回海岸工学講演会講演論文集
pp.561-565 清水
- 8) Kato, K. (1986): Experimental studies of ice forces on conical structures.
Proc. 8th IAHR Ice Symp. vol.2 pp.185-196 Iowa City, USA