

円錐脚型多脚氷海構造物に作用する氷荷重

加藤 一行*・岸本 弘晴**・三田 重雄**

1. 結 言

比較的冰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氷海構造物がある。多脚式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形式を示し、従来は垂直な円柱を脚柱とするものがほとんどであった(Blenkarn, 1970)。この形式では脚柱が垂直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 が問題となる。事実、渤海湾におけるこの種の構造物の2例の損傷事故もそれが原因であると考えられている(Xu, 1981)。

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、氷の力学的な特性から、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。氷板が構造物に対して進行して来る方向を特定することは困難であるから、氷板と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のが有利であろうと考えられる。著者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)の定式化を行うための要素的実験(加藤ら, 1989)を行ってきたが、本論ではそれらの結果を踏まえて氷荷重モデルを定式化すると共に、それを検証するために行った正方形配列の4脚 MCLS の模型実験結果と比較して実用的な氷荷重モデルを提案する。

2. 氷荷重モデル

2.1 基本的考え方

この種の構造物に対する氷荷重モデルは、一般的に次のように記述されると考える。

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

ここに、 F はMCLS全体に作用する氷荷重、 $f(s, \theta)$ は各脚柱に最大荷重が同時に発生すると考えたときに脚柱の配列と氷板の相対的な進行方向によって定まる倍率、

R_n は最大荷重発生の非同期性による低減係数である。

F_i は独立した円錐に作用する氷荷重であり、これは実験的にも求めることができるがRalstonの塑性極限解析による解(Ralston, 1977)を用いた方が汎用性が高いと考えられるから、Ralstonの塑性極限解析による解を独立した円錐に作用する氷荷重の推定式とする。

ここで、4脚 MCLS 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発生するなど、場合によっては図-1に示されたものとは必ずしも合致しないこともあるが、その場合は図-1に示されている状況のもとで構造物に作用する氷荷重よりも氷荷重が大きくなることはない。

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、並列する円錐が同時に氷板に貫入するような相互作用(Type A と呼ぶ)、片側に自由辺がある氷板と円錐との相互作用(Type B)、そして両側に自由辺のある氷板と円錐との相互作用(Type C)である。しかしの Type C 相互作用は距離 L_1 が大きい

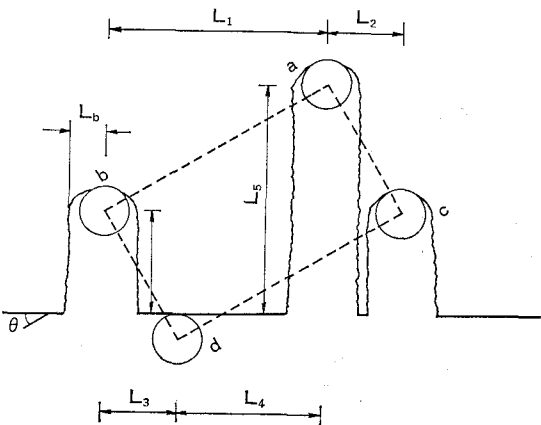


図-1 MCLS と氷板との相互作用の模式図

* 正会員 工博 石川島播磨重工業(株) 技術研究所主任
** 石川島播磨重工業(株) 技術研究所

場合には Type B の相互作用に帰着し、 L_1 が小さい場合には氷荷重は 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良い。

2.2 これまでに行った実験の結果の概要

円錐に限らず傾斜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）と破壊された氷片を移動するのに必要な成分（ライドアップ成分）の和であるから、それらの成分を分離して考察の方が合理的である。これら二つの成分を分離するために DuPTeM と名付けられた手法を開発しており（加藤，1987），本研究でもその手法を用いている。

円錐を対象とすると，DuPTeM は次式を基本としている（Kato, 1986）。

$$F = (D_w^2 - D_i^2) \rho_i g h + b \sigma_f h^2 \quad (2)$$

ここに、 D_w は円錐の水際面での直径、 D_i は円錐の頂面での直径、 $\rho_i g$ は氷の単位体積重量、 h は氷厚、 σ_f は曲げ強度である。係数 a 、 b は氷荷重係数と呼び、(2) 式から $F/\sigma_f h^2$ と $(D_w^2 - D_i^2) \rho_i g / \sigma_f h$ のプロットに対して線型回帰解析を施すことによって得られる。本研究では、ある実験で得られた最大荷重から氷荷重係数を求めた。

一連の実験より得た円錐中心間距離 L_w 、円錐中心から自由辺までの距離 L_f が有限のときの氷荷重係数 a 、 b と L_w 、 $L_f = \infty$ 、すなわち独立した状態での氷荷重係数

a_i 、 b_i の比、 $A = a/a_i$ 、 $B = b/b_i$ を相対距離 $k_w = L_w/D_w$ 及び $k_f = L_f/D_w$ に対してプロットしたものを図—2、図—3 に示した。

2.3 氷荷重倍率

氷荷重倍率は、 L_w 、 L_f が有限のときに円錐に作用する氷荷重 F と L_w 、 $L_f = \infty$ のときのそれ F_i との比であると定義する。すなわち、

$$F = f(k) F_i \quad (3)$$

ここに、 $f(k)$ は氷荷重倍率と呼び、 k は相対距離 k_w あるいは k_f である。

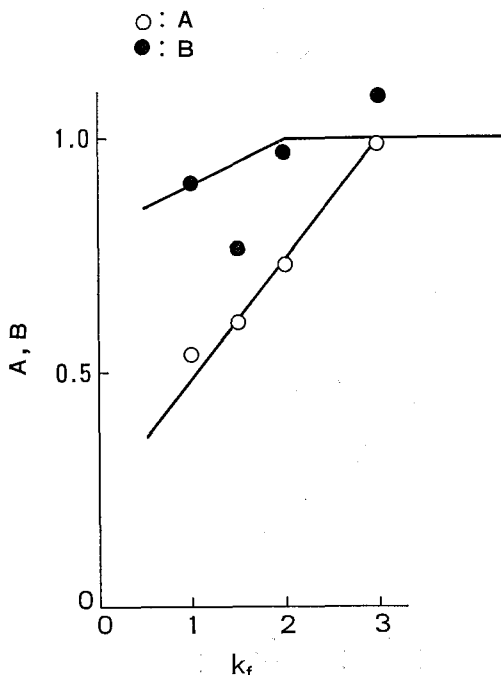
円錐では氷荷重は破壊成分とライドアップ成分の和で表わされるから、

$$f(k) = \frac{F}{F_i} = \frac{F_b + F_r}{F_{bi} + F_{ri}} \quad (4)$$

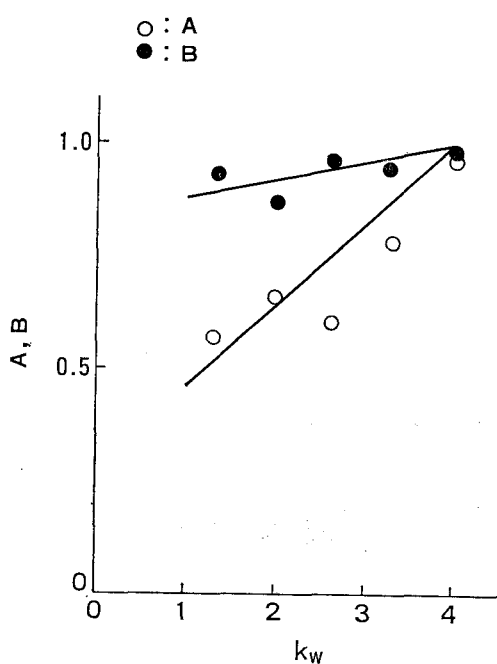
である。ここに、 F_b 、 F_r は L_w 、 L_f が有限のときの破壊成分、ライドアップ成分であり、 F_{bi} 、 F_{ri} は L_w 、 $L_f = \infty$ のときの破壊成分、ライドアップ成分である。(2) 式から(4)式は次式で表わされる。

$$f(k) = \frac{A + B \frac{b_i \sigma_f h}{a_i \rho_i g (D_w^2 - D_i^2)}}{1 + \frac{b_i \sigma_f h}{a_i \rho_i g (D_w^2 - D_i^2)}} \quad (5)$$

氷荷重係数 A 、 B は図—2、図—3 に示された実験の結果を多線型近似して定めた（加藤ら，1989）。また独立した円錐に対する氷荷重係数の比 b_i/a_i は、Type A では 2.431、Type B では 2.416 という結果を得ている。



図—2 氷荷重係数比と相対距離の関係 (Type A)



図—3 氷荷重係数と相対距離の関係 (Type B)

2.4 $f(s, \theta)$ の定め方

MCLS と氷板との相互作用の状況は理想的には図—1 に示されたものとなる。MCLS 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 $\theta = 90^\circ$ のときにしか発生しない。しかし θ が 0° あるいは 90° に近い場合には並列とみなして良いから、本研究では $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ 、及び $75^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ のときに並列状態であると考ええる。

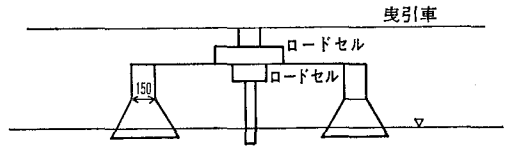
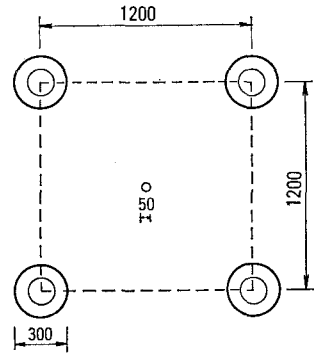
図—1 の各中心間距離は脚柱の配列と進行角との関係から簡単に定めることができる。円錐中心から自由辺までの距離は円錐による氷板破壊の軌跡の幅に関係する。すなわち、円錐中心から自由辺までの距離は対応する中心間距離から破壊軌跡の幅の半分の差を引いたものとなる。破壊軌跡の幅は理想的には円錐との相互作用による氷板の破壊円の直径と同一になる。氷板の破壊円の直径は Ralston の塑性極限解析により見積ることができる。

脚柱の配列が定まり、氷板の進行角が定まったならば、脚柱中心間距離、氷板の破壊円の直径を用いてそれぞれの脚柱に対する氷荷重倍率を定めることができる。MCLS 全体に対する倍率 $f(s, \theta)$ はそれらを加え合わせたものとなる。図—4 に正方形配列の 4 脚 MCLS における $f(s, \theta)$ を進行角に対して求めたものを示した。ここで、各脚柱の円錐の大きさは、 $D_w = 3\text{m}$ 、 $D_t = 1.5\text{m}$ 、傾斜角は 60° としている。また氷板との摩擦係数は 0.1 とした。

2.5 低減係数

$f(s, \theta)$ はある相互作用の過程での最大荷重を基礎として定式化した。各脚柱に作用する氷荷重が一連の過程で同時に最大値を経験する可能性は非常に小さいと考えるのが自然である。

低減係数 R_n はそのような考えをもとに導入したものであるが、本質的には確率論的な量であると考えられ



図—5 正方形配列の 4 脚 MCLS 模型の概略図(単位mm)

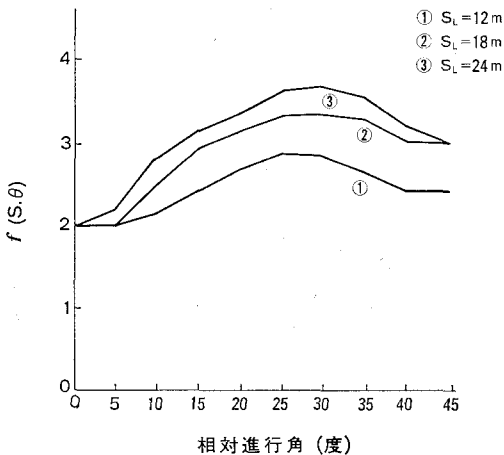
る。本研究では並列円錐の実験から、その特性値を推定すると、平均が 0.664 となったが、この量は脚柱の配列などに強く影響を受けると考えられるので、本論では正方形配列の 4 脚 MCLS の模型実験の結果と $R_n = 1$ とした氷荷重モデルよりの推定値を比較することにより低減係数に考察を加える。

3. 正方形配列の 4 脚 MCLS の模型実験

図—5 にその概略を示した正方形配列の 4 脚 MCLS の模型を用いて IHI 低温試験水槽 (加藤・藤井, 1986) において実験を行った。模型を曳引車に固定し、曳引車を駆動させることにより氷板との相互作用を起こさせる方式の実験を行った。MCLS に作用した氷荷重は模型と曳引車の間に設置した三分力ロードセルにより測定した。また一部の実験では構造物中央部にコンダクタパイプを模した円柱を付加して実験を行った。このときにもパイプに作用した氷荷重を含めて MCLS 全体に作用した氷荷重は上記のロードセルにより測定した。パイプに作用した氷荷重はパイプと MCLS の間に設置した三分力ロードセルにより測定した。

氷板の曲げ強度は、実験終了後直ちに模型が通過することによってできた軌跡のすぐ外側の健全な氷板を用いて測定した。測定方法は片持ち梁法を用い、載荷方向は模型実験での主要な曲げ方向と同一な、供試体の自由端を持ち上げる方向の荷重を負荷した。曲げ強度は $3 \sim 4$ 個の供試体について測定し、それらの単純平均をその実験における氷板の曲げ強度とした。

氷厚は実験によって破壊された氷片を破壊軌跡に沿っ



図—4 正方形配列の 4 脚 MCLS に対する $f(s, \theta)$ の計算例

表一 模型実験より得た氷荷重

進行角 度	パイプ	氷厚 mm	曲げ強度 kPa	F_t N	F_m N	F_p N	注
0	無	25.2	21.4		111		1
0	無	27.8	15.5		100		1
0	無	28.5	8.6		69		1
0	無	28.8	5.9		59		1
0	無	33.0	38.0		225		1
0	無	38.8	22.0		201		1
45	無	27.6	20.3		122		2
45	無	29.7	8.5		153		
45	無	36.1	6.8		170		
15	無	40.4	14.2		276		
15	無	30.2	8.0		118		
30	無	40.2	7.4		265		
30	無	30.0	13.5		139		
0	有	40.4	16.6	246	233	110	3
0	有	28.8	14.6	156	115	76	
15	有	39.6	16.2	256	232	130	
15	有	29.1	15.5	131	125	70	
30	有	40.7	24.1	368	365	35	
30	有	30.3	27.2	229	223	16	

注

- 1) 並列円錐の実験結果 曳引距離 1200mm
- 2) 曳引距離 2000mm
- 3) F_p は F_x のみ

て数ヶ所採取し、ノギスにより直接測定し、それらの測定値の単純平均をその実験における氷厚とした。

模型の進行角(図一1 参照)は0度、15度、30度、45度の4種類とした。個々の実験における曳引距離は一例を除いて 4000 mm とした。

3.1 氷荷重の計測値

模型実験において得た水平氷荷重の履歴の一例を図一6 に示した。水平氷荷重とは水平面内で測定した二方向の荷重の合力であり、この例のように常に変動しているのが普通である。本研究ではその氷荷重履歴における最大荷重を議論の対象とし、単に氷荷重と呼ぶ。

個々の実験における進行角、氷厚及び曲げ強度と共に次に挙げる三種の氷荷重を氷荷重履歴より抜き出して表一1 にまとめた。

F_t : 構造物全体に作用した氷荷重

F_m : 脚柱に作用した氷荷重の合計

F_p : パイプに作用した氷荷重

ただし、パイプがないときには $F_t = F_m$ である。また並列した円錐を用いた実験の結果も進行角0度の条件であるとみなして同表に記した。

3.2 氷荷重と進行角の関係

円錐のような傾斜構造物に作用する氷荷重は前述したように破壊成分とライドアップ成分の和として与えられるから、氷厚と曲げ強度が完全に同一でなければ直接に比較することは困難である。そこで、本研究では独立した円錐に作用する氷荷重により正規化して氷荷重と進行角の関係を調査した。本実験で用いた脚柱部の円錐による、独立した状態での氷荷重は近似的に次式で表せるとの結果を得ている。

$$F_t = 0.138 \rho_i g h + 4.96 \sigma_f h^2 \dots\dots\dots (6)$$

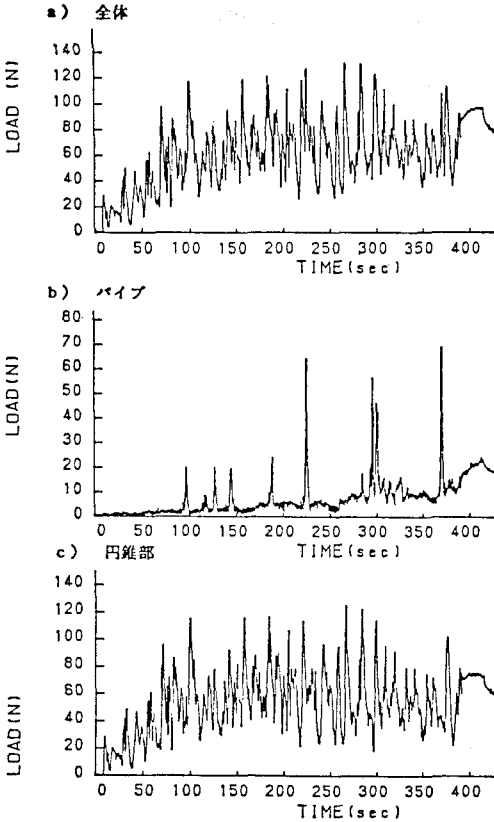
(6) 式によって各実験により得た F_m を正規化し、進行角に対してプロットすると図一6 を得る。当然のことながら、低減係数は一定値でないのばらついているが、全体としては図一4 に示した正方形配列の4脚 MCLS の進行角と $f(s, \theta)$ との関係に似ていることがわかる。

3.3 コンダクタパイプに作用した氷荷重

図一6 に示されている氷荷重履歴でわかるようにコンダクタパイプに作用した氷荷重は、平均値的には小さいが時々比較的大きな氷荷重が作用するのが一般的傾向である。またコンダクタパイプに作用した氷荷重 F_p と MCLS に作用した氷荷重が同期した例は一例もなかった。

進行角が大きくなればなるほどコンダクタパイプに作用して氷荷重は相対的に小さくなったが、これは脚柱とコンダクタパイプとの位置関係から当然の結果であると考えられる。

本実験の結果から、コンダクタパイプに作用する氷荷



図一6 実験での氷荷重履歴の一例

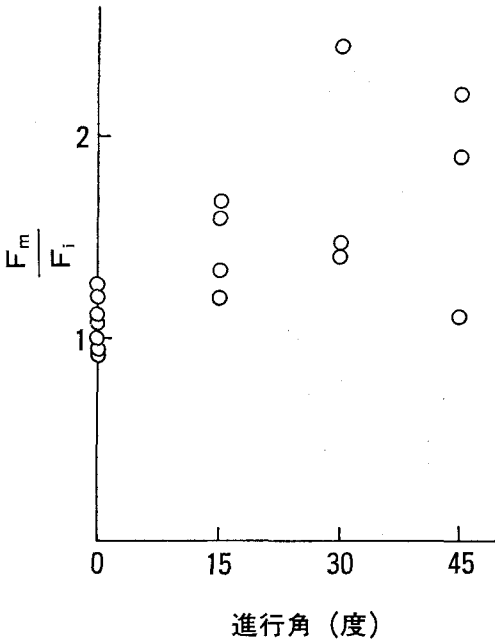


図-7 進行角と氷荷重の関係(実験値)

重は脚柱部分に作用する氷荷重の約50%が最大であると結論できる。

4. 氷荷重モデルと実験から得た氷荷重の比較

氷荷重モデルを用いて、ただし $R_n=1$ とし、各実験条件に対して氷荷重を予測し、実験から得た氷荷重に対してプロットすると図-8 を得る。この図から明らかに $R_n=1$ とした氷荷重モデルより予測された氷荷重は例外なく実験から得た氷荷重よりも大きいことがわかる。すなわち、 $R_n<1$ であることは明らかである。

この結果では、低減係数 R_n の平均値は0.699、標準偏差は0.142となった。 R_n は本質的には確率論的な量であり、本実験の結果からはその関数形を決定するに至らなかったが、 $R_n=1$ とすることにより安全側に正方形配列の4脚 MCLS に作用する氷荷重を推定できることが判明した。すなわち、正方形配列の4脚 MCLS に対しては次式を氷荷重モデルとすれば、設計的には十分である。

$$F=f(s, \theta) F_i \dots \dots \dots (7)$$

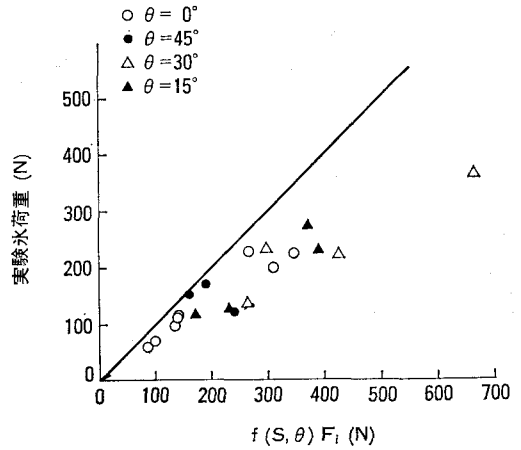


図-8 氷荷重モデルと実験氷荷重との比較

5. 結 語

本研究では、先に行った要素実験の結果を用いて MCLS に対する氷荷重モデルを定式化し、それを検証するために正方形配列の4脚 MCLS の模型実験を行った。その結果、氷荷重モデルにより予測した氷荷重は例外なく模型実験より得た氷荷重よりも大きくなり、氷荷重モデルが安全側の予測をすることが判明した。低減係数を定めるための実験を積み重ねれば氷荷重モデルの推定精度を高めることができる。

参 考 文 献

- 加藤一行・藤井克哉 (1986): 氷海水槽における構造物の氷荷重模型試験, 石播技報, 26 巻, 6 号, pp. 354~359.
- 加藤一行 (1987): 傾斜構造物の氷荷重模型試験法, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 561~565.
- 加藤一行・岸本弘晴・三田重雄 (1987): 円錐脚型多脚氷海構造物に作用する氷荷重の要素試験, 海用開発論文集, Vol. 5, pp. 31~36.
- Blenkarn, K. A. (1970): Measurement and analysis of ice forces on Cook Inlet structure, Proc. OTC'70, pp. 365~378.
- Kato, K. (1986): Experimental studies of ice forces on conical structures Proc. 8th IAHR, pp. 185~196.
- Ralston, T. D. (1977): Ice force design consideration for conical structures, Proc. POAC'77, pp. 741~752.
- Xu, J. (1981): Dynamic response of a jacket platform subjected to ice floe load, Proc. POAC'81, pp. 502~516.