

傾斜構造物の氷荷重模型試験法

加 藤 一 行*

1. 緒 言

氷海域で使用される海洋構造物の設計に際して氷と構造物との相互作用により構造物に作用する荷重（氷荷重）は重要な要素である。氷荷重を合理的に予測するためにこれまで多くの理論的・実験的研究が行われており、その成果があがりつつある。しかしながら、構造物の形状が単純でない場合には理論的に氷荷重を予測することは難しく、氷水槽における模型試験から推定するのが現状では唯一の方法であると考えられている。

従来の模型試験による氷荷重予測法は相似則¹⁾を満足する模型氷板（以下氷板）を生成することを条件として、模型試験で得た氷荷重を縮尺比の三乗倍するものであるが、相似則を完全に満足する氷板を生成することは一般的に困難であり、そのずれを何らかの方法で修正して実構造物に作用する氷荷重を推定している。

氷板と相互作用を生ずる面が傾斜している構造物（傾斜構造物）では、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）との和であるから、単純な修正ではその目的を果たせないことは明白である。

本研究は、傾斜構造物を対象として、破壊成分が氷板のモーメント耐荷力に関係し、ライドアップ成分が構造物の載せ得る氷の重量に関係することに着目し次式により実験氷荷重を表現できるという仮定を出発点とした。

$$F = a\rho_i gh + b\sigma_f h^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 F は氷荷重、 $\rho_i g$ は氷の単位体積重量、 h は氷厚、 σ_f は氷板の曲げ強度である。係数 a 、 b は氷荷重係数と称し、構造物の形状、氷と構造物間の摩擦係数及び相対速度に依存すると仮定した。

ある模型構造物に対し一連の模型試験を行って氷荷重係数を定めることができ、また種々の模型試験で得た氷荷重係数が構造物形状等の相異に対し合理的に挙動すれば式 (1) の適用性を確認することができる。

本論では上記の目的のために行った模型試験の概要を述べ、それらの模型試験で得た氷荷重が式 (1) で近似

できること、そして氷荷重係数が構造物形状の相異などに対し合理的に挙動することを示した。また、この結果を踏まえて、氷水槽における傾斜構造物の氷荷重模型試験法及びその結果に基いた実構造物に作用する氷荷重予測法の提案を行っている。

2. 模型試験の概要

模型試験はすべて石川島播磨重工業㈱技術研究所（横浜）にある低温試験水槽²⁾で実施した。本章ではすべての模型試験に共通した事項について述べ、個々の模型試験に特有な事項は関連する部分に記述した。

2.1 模型氷板

氷板は重量比 1% の尿素水溶液を所定の環境温度で所定の時間凍結させて生成した。環境温度及びその保持時間は所要の氷厚により異なるが、典型的には -10°C の環境温度を 18 時間保持することによって得られる氷厚は約 22 mm である。

2.2 氷厚、曲げ強度

氷板の氷厚及び曲げ強度は常に変化するので個々の試験の直前か直後に測定した。氷厚はその試験で破壊した氷片を模型の片側から少なくとも 1 個採取してノギスで測定した。曲げ強度は片持梁法³⁾を用いて測定したが、その試験での氷板の主要な曲げ方向の荷重を載荷した。

2.3 試 験

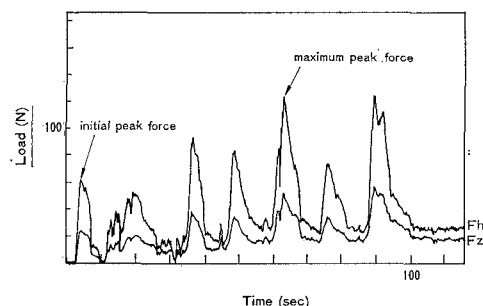
模型を検力計を介して曳引車に固定し、曳引車を駆動して模型を氷板中に貫入する方式を用いた。氷板への貫入量は船舶砕氷抵抗試験を除いて Sodhi et al⁴⁾の研究に準拠して模型の有効幅（水平断面の外接円の直径）の 3 倍以上とした。模型の曳引速度は船舶砕氷抵抗試験を除いてすべて 10 mm/s とした。

2.4 氷荷重

氷荷重は模型と曳引車の間に設置した三分力検力計により測定した。模型進行方向の荷重を F_x 、それと水平面内で直交する荷重を F_y 、 F_x と垂直面内で直交する荷重を F_z としたが、氷荷重としては F_x と F_y の合力である水平氷荷重 F_h と F_z と等しい垂直氷荷重 F_v を考慮の対象とした。

氷荷重履歴の一例をに図—1に示した。本研究ではこ

* 正会員 工修 石川島播磨重工業(株) 技術研究所海洋部



図—1 氷荷重履歴の一例

のような氷荷重履歴を基に5種の氷荷重を考慮の対象としている。氷板の最初の破壊による F_i , 最大値 F_{max} , 大きい方から三番目までのピーク値の平均値 F_m , 定常的に現象が進行している区間での平均値 F_a , F_a と同じ区間での荷重頻度分布近似曲線の面積の99%で与えられる荷重値 F_n を考慮の対象としているが, 本論では船舶砕氷抵抗試験を除いて最大氷荷重 F_{max} のみを扱っている。他の氷荷重についても量的な差こそあれ定性的には同じ議論が成り立つ。

3. 模型試験結果

(1) 式は次のように変形できるから,

$$F/(\sigma_f h^2) = a \rho_i g / (\sigma_f h) + b \quad \dots\dots\dots (2)$$

試験で得た氷荷重を基に $F/\sigma_f h^2$ と $\rho_i g / \sigma_f h$ をプロットし, そのプロットに対して線型回帰解析を施すことにより(1)式の有効性を検証できるし, 氷荷重係数を定めることができる。

3.1 円錐構造物模型試験⁵⁾

傾斜角の異なった4種の円錐(台)模型を用いて試験を行った。模型の寸法は表—1にまとめられている。

図—2に(2)式に対する線型回帰解析の結果の一例を示した。近似度を表わす相関係数は0.82から0.98の範囲にあり, 十分ではないが満足できる水準にあった。

氷荷重係数を傾斜角に対してプロットしたものが図—3である。Ralstonの塑性極限解析⁶⁾を参照すると氷荷重係数と傾斜角には定性的に次の関係がある。破壊成分(係数b)は垂直氷荷重に対して傾斜角が増大すると緩やかに減少し, 水線面の直径が増大すると緩やかに増加する。水平氷荷重に対しては水線面の直径の増加による増大は同様であるが, 傾斜角の増大に対しては正接曲線的に増加する。ライドアップ成分(係数a)は垂直氷荷重に対しての傾斜角の効果は破壊成分と同様であるが, この場合表面積が大きくなると増大する。水平氷荷重に対しては表面積が大きくなると増大するのは同様であるが, 傾斜角に対しては正接曲線的に増大する。

これらの円錐模型は水線面の直径, 表面積が統一され

表—1 円錐模型の寸法 (単位: mm)

傾斜角	頂面の直径	底面の直径	水線面の直径	高さ
45°	140	500	342	180
60°	225	512	400	250
70°	220	420	336	235
80°	290	380	349	255

ていないので図—3を考察する場合それらの効果を考慮しなくてはならないが, それらを考慮すると模型試験結果はRalstonの塑性極限解析から導かれる定性的傾向と一致すると結論できる。

3.2 八角錐及び四角錐構造物模型試験⁵⁾

3種の異なった傾斜角を持つ八角錐(台)及び四角錐(台)模型を用いて試験を行った。模型の傾斜角は45°, 60°, 75°の3種である。四角錐模型の場合氷板に対する進行方向により相互作用面の形状が異なるので2種の進行方向について試験を行った。水平断面の頂角を先頭として進行するのを進行A, 辺部を先頭とするものを進行Bとした。模型の寸法は6種の模型すべて水線面での外接円での直径が400mm, 水線面上の高さが150mmである。

(2)式に対する線型回帰解析の結果の一例を八角錐模型に対しては図—4に, 四角錐模型に対しては図—6に示した。相関係数は両模型とも傾斜角75°に対するものがやや低かったが, それらを除くとすべて0.9以上であり, 満足できる水準であった。

氷荷重係数と傾斜角の関係をプロットしたものが八角錐模型に対しては図—5に, 四角錐模型進行Bに対しては図—7に示されている。氷荷重係数の傾斜角に対する挙動は円錐模型におけるそれと同様であり, 定性的には不合理なものではないと結論できる。

3.3 人工島模型試験

3種の移動型重力式人工島(Molikpaq, SHADS, MAL-3)の1/100模型を用いて試験を行った。紙数の関係上これらの模型の概略図は省略するが, MolikpaqとSHADSの断面形状は四辺形に近く, 2種の進行方向について試験を行った。進行方向の定義は四角錐模型と同様である。

図—8, 図—9に(2)式に対する線型回帰解析の結果を示したが, いずれの模型に対しても相関係数は0.9以上であり満足できる近似度であると結論できる。またこの試験の場合パイルアップが発生したが, その場合にも(1)式が適用できたことを特筆しておく。

3.4 船舶砕氷抵抗試験

(1)式は原理的には船舶砕氷抵抗にも適用できる可能性が予想され, それを検証するために10万DWT砕氷タンカー⁷⁾の1/113模型を用いて試験を行った。

曳引速度は0.07m/s, 0.14m/s, 0.28m/sの3種で

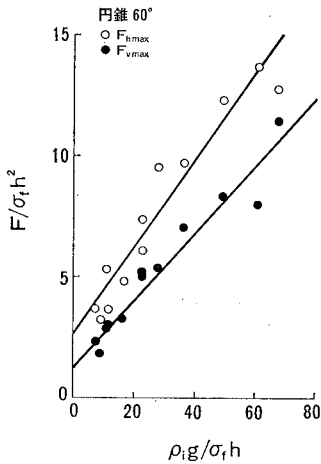


図-2 試験結果の一例 (円錐)

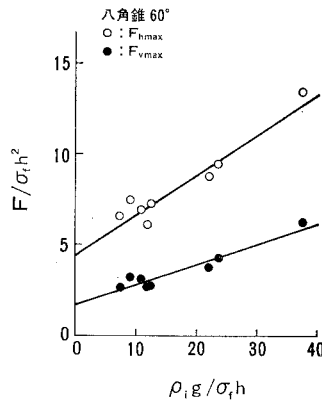


図-4 試験結果の一例 (八角錐)

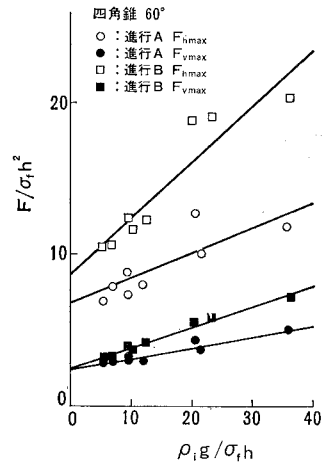


図-6 試験結果の一例 (四角錐)

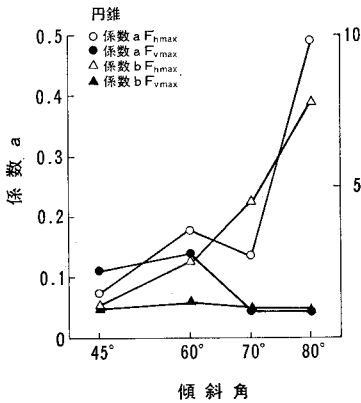


図-3 氷荷重係数と傾斜角の関係 (円錐模型)

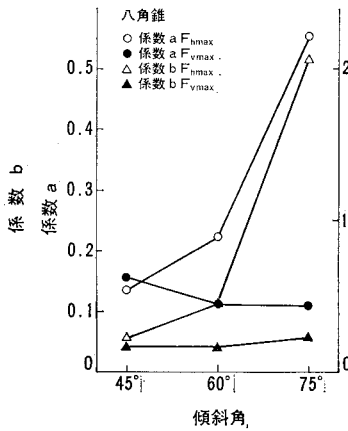


図-5 氷荷重係数と傾斜角の関係 (八角錐模型)

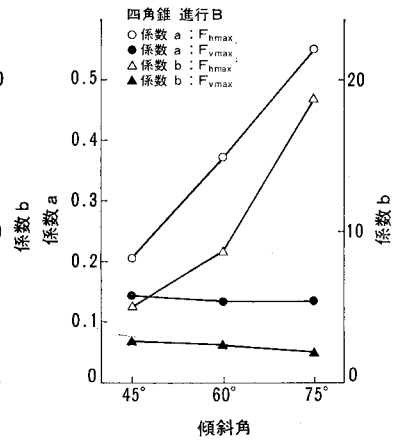


図-7 氷荷重係数と傾斜角の関係 (四角錐模型)

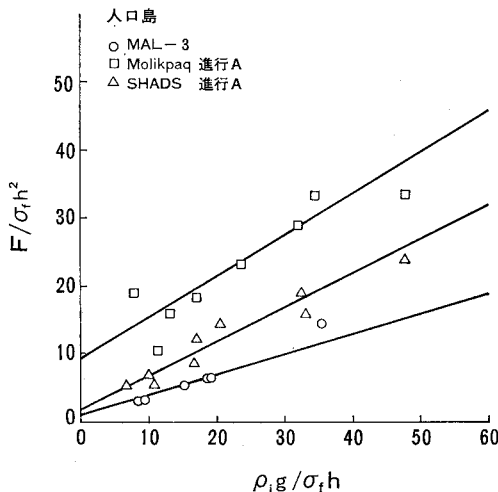


図-8 人工島模型に対する線型回帰解析結果 (1)

ある。これらは実船相当でそれぞれ 1.47 ノット, 2.93 ノット, 5.88 ノットである。

図-10 に (2) 式に対する線型回帰解析の結果を示したが、この場合氷荷重 (砕氷抵抗) F は平均荷重 F_a である。相関係数はいずれの曳引速度に対しても 0.9 以上であり、満足できる水準であると結論できる。

4. 氷荷重模型試験法

本論で述べた氷荷重模型試験は単純な形状の構造物から出発して複雑な形状の構造物あるいは船舶をも含んでおり、主目的とした (1) 式の模型試験結果への適用性の検証に関してはいずれの模型試験の結果も肯定的であり、(1) 式は試験結果を近似度良く表現できると結論できる。

上記の結論を踏まえると、傾斜構造物の氷荷重模型試験は (2) 式の複合量 $\rho_i g / \sigma_t h$ を線型回帰解析を施すの

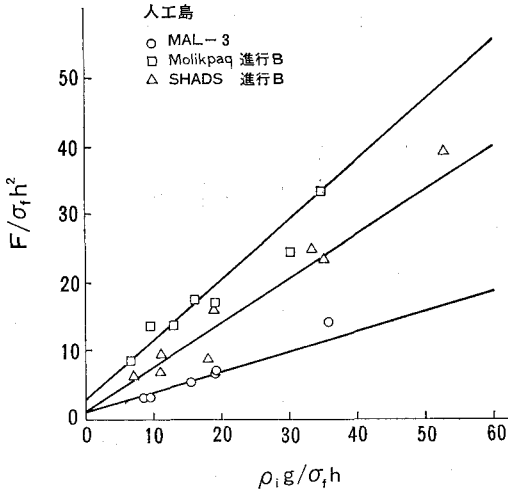


図-9 人工島模型に対する線型回帰解析結果(2)

に都合の良いように選んだ一連の試験を行い、その結果得た氷荷重に対し氷荷重係数を定めるという手法が推奨できる。ある模型に対して氷荷重係数を定めるには、経験的には、最低6回の試験が必要である。従来のように σ_f と h を縮尺比だけ落とした試験を行えば回数は少なく済むように思えるが、そのような氷板を生成することは困難であり、その修正のための試験が必要である。また本論で推奨している方法は原理的にはあらゆる σ_f と h の組み合わせに適用できるから、広い範囲の氷板条件に対して試験を行わなくてはならない場合は試験回数の中で従来の方法に比べて有利である。

5. 実機に作用する氷荷重の推定法

伝統的相似則は、氷の材料としての非線型性、摩擦係数の評価のあいまいさを考慮すると再検討の余地はあるが、それが適用できるとすると実機に作用する氷荷重は次式である。

$$F_p = a \lambda^2 \rho_i g h_p + b \sigma_f p h_p^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、添字 p は実際(設計)の値であることを表わす。 λ は模型の縮尺比であり、係数 a , b は模型試験で得た氷荷重係数である。

10万 DWT 砕氷タンカーの開発に際して模型試験を Wärtsilä 社(フィンランド)の氷水槽で実施している。同社はその模型試験を基に独自の方法で実船相当砕氷抵抗を算出している⁷⁾。図-11は3.4で述べた模型試験で得た氷荷重係数を用い(3)式により得た実船相当砕氷抵抗を Wärtsilä 社が算出した値と比較したものである。これは実測値ではないが Wärtsilä 社の推定値は彼らの長期にわたる経験に基いた方法により導かれたものであり、数多くの実船計測に裏打ちされている。これと比

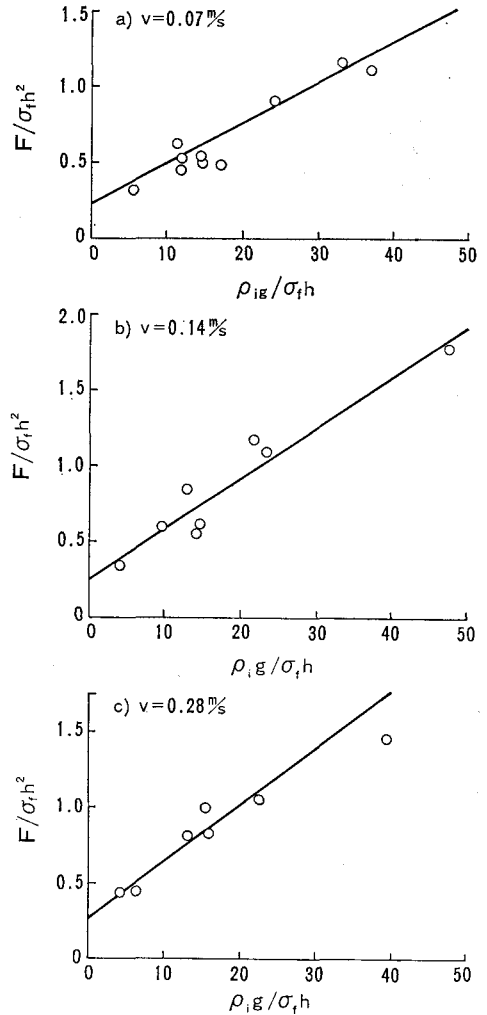


図-10 船舶砕氷抵抗試験の線型回帰解析結果

べると推奨している氷荷重試験法の妥当性がわかる。

6. 結 語

本論で推奨している氷荷重模型試験法を DuPTeM (Dual Parameters Testing and Estimating Method) と呼んでいる。DuPTeM は氷厚 h と氷板の曲げ強度 σ_f の関数として氷荷重を表現できるので模型試験結果を評価するときには種々の利点がある。図-11に示したように氷荷重を氷板の条件をパラメータとして連続的に得られることはその利点の一例である。

また DuPTeM は、構造物形状の氷荷重に対する優劣を判断する材料として有効に用いることができる。模型の縮尺比を同一とすれば、氷荷重係数を比較するだけで氷荷重に対する優劣を判断できる。例えば、図-8, 9から MAL-3 が他の構造物に対し氷荷重の面では有利

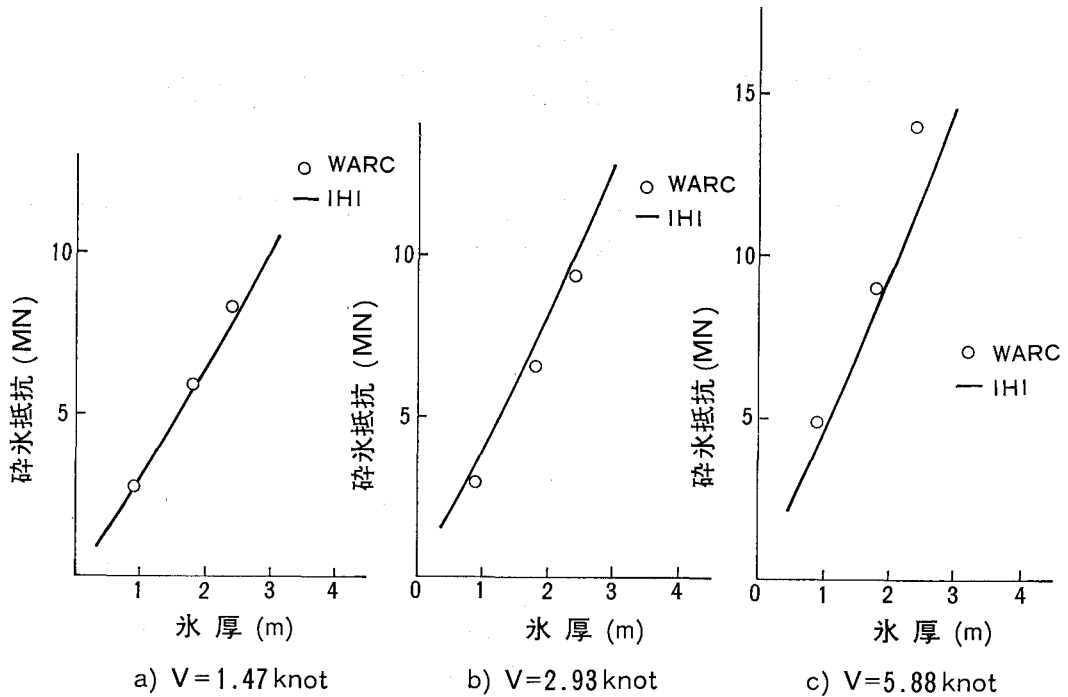


図-11 実船相当砕氷抵抗 (Wärtsilä 社推定値との比較)

であることが簡単にわかる。

また、四角錐構造物のように氷板との相互作用を起こす角度により氷荷重が異なる構造物では数種の進行方向について DuPTeM を適用して進行角と氷荷重係数の関係を求めれば、近似的にはあるが任意の進行角に対する氷荷重を求めることができる。

同一の形状で摩擦係数の異なる模型を数種用意して DuPTeM を適用すれば、同様に任意の摩擦係数に対する氷荷重を求めることができる。

参 考 文 献

- 1) Nevel, D.: Ice breaker simulation, US Army CRREL Rep. 77-16, 1977.
- 2) 加藤一行・藤井克哉: 氷海水槽における構造物の氷荷重模

型試験法, 石川島播磨技報, 第28巻, 6号, 1986.

- 3) Kato, K. and D. Sodhi: Ice action on two cylindrical structures, Trans. ASME, Jour. Energy Res. Tech., Vol. 106, pp. 107~112, 1984.
- 4) Sodhi, D., C. Morris and G. Cox: Sheet Ice forces on conical structures, Proc. 8th Int. Conf. Port Ocean Eng. Arctic Cond., Vol. 2, pp. 643~655, 1985.
- 5) Kato, K.: Experimental studies of ice forces on conical structures, Proc. IAHR Symp. on Ice 1986, Vol. 1, pp. 185~196, 1986.
- 6) Ralston, T.: Ice force design considerations for conical structures, Proc. 4th Int. Conf. Port Ocean Eng. Arctic Cond., pp. 741~752, 1977.
- 7) Motozuna, K., T. Kimura, T. Katagiri, Y. Okumoto, H. Soininen and P. Kannari: Study on 100,000 DWT icebreaking tanker, Proc. 8th Int. Conf. Port Ocean Eng. Arctic Cond., Vol. 2, pp. 861~879, 1985.