石油掘削用氷海構造物(MOLIKPAQ) の氷荷重の推定

——実機計測と模型実験に基づく推定値との比較——

正員 加 藤 一 行* 正員 熊 倉 靖**

Prediction of Ice Forces on Arctic Structure "MOLIKPAQ"
——Comparison between Measured and Experimental Ice Forces——

by Kazuyuki Kato, *Member* Yasushi Kumakura, *Member*

Summary

MOLIKPAQ is a steel-made mobile arctic structure operating year around in the Canadian Beaufort Sea. MOLIKPAQ was fabricated at IHI Aichi Works in 1984 and towed to the Beaufort Sea. The international joint project to conduct an extensive ice force measurements program was organized by the owner, Gulf Canada Resources Inc. Seven companies including IHI have joined the project. In early spring of 1986, MOLIKPAQ experienced many interactions with various ice features at Amauligak I-65 lot in the Canadian Beaufort Sea. The project could acquire many informations about ice-structure interactions. These informations are believed to contribute a better understanding of ice-structure interaction. However, these informations are still unpublished because of confidential agreement of the project.

On the other hand, IHI itself conducted model experiments on MOLIKPAQ in the ice tank. IHI proposed a method called DuPTeM (Dual Parameters Testing and Estimating Method) to estimate ice forces on a structure from model experiments in the ice tank. The DuPTeM was validated by the data acquired at MOLIKPAQ during the spring of 1986. However, since the bending failure was predominant in the model experiments, the comparison was limited to the first year ice interactions, where the bending failure was predominant. The results of comparison was quite promising, even though some extent of uncertainty is involved in both the measurements and the model experiments.

In the paper, the instrumentation on MOLIKPAQ and the error estimation on the data were briefly introduced. the procedure of DuPTeM was also briefly mentioned. Finally, the comparison between measured ice forces on MOLIKPAQ and the estimated ice forces from model experiments was given.

1. 緒 言

MOLIKPAQ は、Beaufort 海で通年供用可能な、世界で最初の、そして唯一の鋼製石油掘削用着底式氷海構造物である。MOLIKPAQ は、1984 年に石川島播磨重工業(株)・愛知工場において竣工し、同年 Beaufort 海に曳航され、以

来数地点において使用に供されている。

所有者である Gulf Canada Resources Inc. (当時) は、当初より国際的な共同プロジェクトとして広範な氷荷重計測を計画しており、その呼びかけに応じて、当社及びアメリカ、カナダ、イギリスの石油会社が参加し、7 社による国際共同プロジェクトとして、MOLIKPAQ の広範な氷荷重計測が実施された。

このプロジェクトの過程で、具体的には Amauligak I-65 地点 (Fig.1 参照) において、1986 年に非常に数多くの、しかも多岐に渡る氷象との相互作用が発生し、数多くの貴重な氷荷重の実測データが取得された。これらの実測データは氷海構造物に作用するであろう氷荷重の推定確度を向

* 石川島播磨重工業(株)技術研究所船舶海洋開発部

** 石川島播磨重工業(株)船舶海洋本部

Fig. 1 Deployed region of MOLIKPAQ

上させるに足る数多くの情報を含んでいるし、また、氷荷重推定に関する研究の方向性を強く示唆する情報も含んでいる。しなしながら、それらの実測データのほとんどは公表に関して強く制限を受けており、本論で述べるところも共同プロジェクトからの許可を得たものである。

一方、石川島播磨重工業(株)では、氷海水槽模型試験から実構造物に作用するであろう氷荷重を推定する手法を提案している。この手法に関しては本論中で概論するが、手法開発に用いた模型が小規模であったために信頼性に疑問があった。模型試験レベル以外の計測値との比較を行うべきであることは強く認識されており、MOLIKPAQの実測データが入手できた時点でその比較を行っていた。今般、共同プロジェクトからのデータの一部公表の許可を得ることができたので、開発した手法に基づく氷海水槽模型試験からの実構造物に作用するであろうと推定される氷荷重とMOLIKPAQで実際に計測された氷荷重を比較した結果を報告する。

本論では、まずMOLIKPAQにおいて観察された氷象の破壊モードを簡単に述べる。次にMOLIKPAQに設置された計測系を紹介し、それらの情報からの全体氷荷重の演繹法を紹介する。次に演繹された全体氷荷重に対する計測系及び演繹法に起因する誤差に関して述べる。最後に、当社で行った氷海水槽模型試験の結果を概説し、その試験から推定された全体氷荷重値と実測データから演繹された全体氷荷重値との比較を行い、検討を加える。

2. MOLIKPAQに設置された計測系

2.1 荷重の計測

荷重の計測には3種の計測装置を準備した。以下それらに関し簡単に述べる。

(1) Medof パネル

Medof パネルは鋼性の外枠に液体(塩化カルシウム水溶液)を閉じこめた構造になっている。内部には多数のネオプレン製のボタンが前後の外板を連結する形で配されており、これらが荷重と比例した変形を起こす。このパネルが荷重を受けると荷重に比例して内部の液体が排出され、そ

の排出量により荷重を算定する。

パネルの大きさは、 $1.195\text{ m} \times 2.775\text{ m}$ で、総計31個のパネルがMOLIKPAQには設置されている。経験的に主要な氷象の進行方向である北と東の側面に、それぞれ4枚、5枚、4枚のブロックを成して計13枚づつ、そして北東の側面に5枚のブロックを一つ配している。

(2) ひずみゲージ

MOLIKPAQの部材に計282個のひずみゲージを配し、部材のひずみを計測している。荷重は数多くの有限要素法による全体解析の結果と計測されたひずみから推定する。

(3) 伸長計

ケーソン自体の変形を測るために計8個の伸長計がところどころに設置されている。計測された変位と有限要素法全体解析の結果を使用して荷重を推定する。

2.2 氷厚の計測

ある相互作用が発生している間の氷厚は目盛りを打った棒をMOLIKPAQの側面に下げて測定した。一部には露出している氷片の側面の長さをMedof パネルと比較して推定したものもある。ときたま氷象が安定しているときに実測を行ったが、そのときの差異は10~15 cmであった。

2.3 氷板の移動速度

基本的にはレーダーを用いて氷象の移動速度と移動方向を計測しているが、MOLIKPAQ付近の局所的な動きは、レーダーで計測した動きと異なることが多かった。そのときは目視によったが、速度は既知の長さ(例えば構造物の一辺の長さ)をある目印が通り過ぎる時間を計測して推定した。

2.4 その他の計測装置

先に述べた諸装置に加えて、MOLIKPAQには次のような計測装置(機器)が設置されている。加速度計(20カ所)、水位計(16カ所)、圧力計(40カ所)、間隙水圧計(83カ所)、傾斜計(31カ所)、温度計(7カ所)。

本節での記述は非公開のプロジェクト報告書を基にしているが、公表された文献としては参考文献1), 2)などがある。

3. 観察された破壊モード

Amauligak I-65地点に設置されたMOLIKPAQの横断面図をFig. 2に示す。1986年には、MOLIKPAQは軟氷(grease ice)から15 mのキール深さを持つ多年ハンモック氷に渡る多種多様な氷象との相互作用を経験しており、これらはBeaufort海におけるすべての氷象を含んでいると言える。

破壊モードは、氷象の種類、移動速度により異なることが観察された。しかし1年性の平坦氷を除くと支配的な破壊モードは、構造物近傍の氷をせん断破壊するクラッシング(Crushing)破壊であった。1年性平坦氷では、氷厚が厚く、移動速度が比較的速い場合はクラッシング破壊が発

Fig. 2 Sketch of cross section of MOLIKPAQ

生するが、典型的には小規模クラッシング破壊→パイルアップの形成→曲げ系破壊 (Flexural Failure)→小規模クラッシング破壊のサイクルを繰り返す。曲げ系の破壊は、構造物に接する氷板が持ち上がり、やや離れたところに (理想的には) 破壊円が生ずる。上記のようなサイクルを繰り返す場合、最大氷荷重は曲げ系の破壊が発生したときに生ずることが多い。

1 年性平坦氷の移動速度が非常に遅い場合は、クリープ的なクラッシング破壊がしばらく継続し、その後全面的な曲げ系の破壊 (座屈的な破壊と報告されている) が発生した例が観察された。この例の場合、同じ氷厚の曲げ系の破壊が発生したときに比べて大きな氷荷重が作用する。

本節の記述も非公開のプロジェクト報告書に依拠している。公表された文献としては参考文献 3) などがある。

4. 作用した氷荷重の推定

MOLIKPAQ に作用した全体氷荷重は模型試験のように直接に測定することはできない。MOLIKPAQ の計測では、上記の 3 種の計測装置を適宜組み合わせることで全体氷荷重を推定している。プロジェクトでは応答速度の関係から、クラッシング系の破壊が起こる相互作用ではひずみゲージからの情報を、曲げ系の破壊が起こる相互作用では Medof パネルからの情報を第 1 義的なものと考えている。

本論で述べる模型試験との比較においては、曲げ系の破壊を対象としているから、本論で述べる MOLIKPAQ での計測値は Medof パネルからの情報を基に推定した全体氷荷重である。

プロジェクトの報告書には、Table 1 に示すように誤差発生要因と誤差の見積りが述べられている。この Table 1 によると、「パネルに封入した液体の漏れ」と「接線方向の力を無視」したことによる誤差は必ず存在し、その範囲は -13% ~ -33% であり、その他の要因による誤差はランダムな誤差であるので、それらの見積誤差の自乗和の平方根をとって $\pm 27\%$ と見積られている。すなわち、計測した全体氷荷重の誤差の範囲は -60% ~ +14% となる。このことは実際の値が計測値に対して +60% ~ -14% の範囲にあることを示している。すなわち、もしも計測値が 300 MN あれば、実際の全体氷荷重は 258 MN ~ 480 MN の範囲にあるというものである。

計測装置に由来する誤差は報告書の推定したものに対し

Table 1 Error sources and estimated error

誤差の要因	見積誤差
パネル内に封入した液体の配管継手部からの漏れ	-1%
パネルのクリープ	$\pm 10\%$
パネル内に封入した液体の熱膨張	$\pm 5\%$
計測器の温度依存性	$\pm 1\%$
データ集録装置の分解能	$\pm 1\%$
キャリブレーション (変換係数)	$\pm 10\%$
部分載荷と氷厚の見積	$\pm 20\%$
パネルでの平均圧力を作用面全体に長さの比分散する	$\pm 10\%$
構造物に作用する接線方向の力を無視する。	-12 ~ -32%

て批判する材料を持っておらずそのまま受け入れざるを得ないが、Medof パネルの計測データから全体氷荷重を算定する論理に関しては一部疑問があり、今後の検討を要する課題である。

報告書では、Medof パネルが覆っている水線面上の長さや氷象の作用している水線面上の長さの比に Medof パネルで計測した荷重の平均値を乗じて全体氷荷重を算定している。そしてこの手法に基づく誤差を $\pm 10\%$ と評価している。しかしながら、最近では、接触面積が大きくなるに従って平均圧力が減少するという考えが主流となっている。クラッシング破壊が発生している場合は接触面積の 1/2 乗に比例して平均圧力が減少する⁹⁾とされている。本論で対象としている曲げ系の破壊では定量的にその減少の割合を表したものが無いが、少なくとも報告書にあるように単に線型倍したのでは過大評価となることは確かである。

Medof パネルが覆っている水線面上の長さや氷象の作用している水線面上の長さの比に Medof パネルで計測した荷重の平均値を乗じて全体氷荷重を算定すると、少なくとも全体氷荷重を過小に評価する可能性は少ないと考えられる。従って、この誤差が正負の誤差ではなく、過大評価側の誤差と考えると、計測した全体氷荷重に対する実際の全体氷荷重の範囲は上限、下限とも氷荷重の小さい側にずれることになる。しかしながら、現状では定量的評価をすることができない。今後とも実際の計測にあたっては、部分に作用した荷重情報から構造物全体に作用する荷重を演繹するという操作を避けて通れないと思われるから、その合理的演繹法の研究が望まれる。

5. 氷海水槽模型試験

5.1 模型試験の概要

石川島播磨重工業 (株)・技術研究所 (横浜) の氷海水槽⁹⁾において模型試験を行った。本論で述べる模型試験の概要とその結果は既に報告⁹⁾してあるので詳細はそちらを参照されたい。

用いた模型は MOLIKPAQ の縮尺比 $\lambda=100$ の模型である。模型の概要図を Fig. 3 に示した。試験では模型を曳引車にロードセルを介して固定し、曳引車を駆動することに

より模型氷板中に入らせ、そのときに模型構造物に作用した3方向の荷重を測定した。3種の進行角（その定義を示す模式図をFig. 4に示す。）に対してDuPTeM（Dual Parameters Testing and Estimating Method）の手法⁷⁾に従い、一連の試験を行った。具体的には、進行Aは進行角45度、進行Bは0度、進行Cは22.5度に対応する。

曳引速度は例外無く10 mm/sであり、曳引距離は2.2 mとした。氷厚は模型が破壊した氷片を約500 mmごとに採取し、それをノギスで測定し、それらの単純平均をその試験における氷厚とした。曲げ強度は試験実施前に数本の浮き片持梁法により測定し、それらの単純平均値をその試験における曲げ強度とした。

DuPTeMでは、氷厚と曲げ強度との積を組織的に変えた一連の試験により次に示す近似式の係数を定めることを基本としている。

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

ここに、 F_h は水平氷荷重で、水平面内の合力である。 $\rho_i g$ は氷板の単位体積重量で、 $9,000 \text{ N/m}^3$ とした。 h は氷厚、 σ_f は曲げ強度である。また、係数 a 及び b を氷荷重係数と称

する。

式(1)は、横軸に $(\rho_i g/\sigma_f h)$ をとり、縦軸に $(F_h/\sigma_f h^2)$ をとると直線となるから、試験結果を上記の座標軸にプロットすることにより得られる近似直線の傾きと y 切片として氷荷重係数 a 及び b を定めることができる。

氷荷重係数は進行角が異なれば当然異なると考えられるので、進行角の関数となると考えられる。すなわち、

$$F_h = a(\theta)\rho_i gh + b(\theta)\sigma_f h^2 \quad (2)$$

と考える。

5.2 試験結果

模型試験では例外無く曲げ系の破壊が起こった。ある試験での水平氷荷重の時刻歴の一例をFig. 5に示した。ま

Fig. 3 Sketch of 1/100 model of MOLIKPAQ

Fig. 4 Definition sketch of intrusion direction

Fig. 5 Load-time history for a model experiment

Fig. 6 Load-time history obtained from an ice event on MOLIKPAQ at Beaufort sea

Fig. 7 Plots of $\rho_i g / \sigma_f h$ and $F_h / \sigma_f h^2$ an example for intrusion direction B

た、MOLIKPAQ で実際に曲げ系の破壊が生じたときの時刻歴を Fig. 6 に示した。氷板の進行速度(試験速度)、氷板進行方向(模型進行方向)、氷厚などが、相似則的には一致していないが、間欠的にピークが現れ、ピーク発生後にしばらくの間低い荷重レベルになるという曲げ系破壊の特徴が両者とも現れている。従って、曲げ系の破壊に限れば、模型試験で実際の氷板の破壊挙動をある程度再現できているのではないかと考える。しかしながら、模型試験では曲げ破壊の発生の前のクラッシング破壊は荷重の時刻歴には現れない。あるいは実際の氷板ではクラッシング破壊が起こるような氷厚に対しても模型試験では曲げ系の破壊が発生しているなどの相違もある。これは模型氷板の曲げ耐力が極端に低下するという模型氷の特質に由来するものと考えられ、模型試験のある種の限界を示している。

横軸に $(\rho_i g / \sigma_f h)$ をとり、縦軸に $(F_h / \sigma_f h^2)$ をとったプロットの一例を Fig. 7 に示した。また、これらのプロットに

Table 2 Ice force coefficients determined by model experiments

	進行角	氷荷重係数 a	氷荷重係数 b	相関係数
進行 A	45°	0.611	9.443	0.927
進行 B	0°	0.871	2.831	0.946
進行 C	22.5°	0.789	7.893	0.937

線型回帰解析を施して求めた氷荷重係数をその近似度を表す相関係数と共に Table 2 にまとめた。この表から、いずれの進行角に対しても式(2)が精度良く適用できることがわかる。

6. 試験からの推定氷荷重と実測氷荷重との比較

式(2)の試験から得た近似式に、Nevel⁸⁾の提案した相似則を適用すれば、次のようになる。

$$F_{hp} = a(\theta) \lambda^2 \rho_i g h_p + b(\theta) \sigma_{fp} h_p^2 \quad (3)$$

ここに、添字 p は実構造物に対応する諸値であることを表す。

実構造物に作用する水平氷荷重の推定値は、式(3)に対応する値を代入すれば良い。プロジェクトの報告書には、それぞれの相互作用に対して、その時の氷厚、氷象の進行方向、破壊の様子及び全体水平氷荷重などが記録されており、その記録に記された値を用いて、その相互作用に対応する試験からの推定値(推定氷荷重)を算定した。

進行方向は南から進行してくる場合を0度とし、時計回りに測った角度が記録されているが、それを図4にその定義を示した進行角に変換した。ある進行角に対する氷荷重係数 $a(\theta)$ と $b(\theta)$ は、Table 2 に示された値を直線で結んで求めた。すなわち、 $0 \leq \theta \leq 22.5^\circ$ に対しては、

$$a(\theta) = a_0 + (a_1 - a_0) \theta / 22.5^\circ \quad (4a)$$

$$b(\theta) = b_0 + (b_1 - b_0) \theta / 22.5^\circ \quad (4b)$$

$22.5^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ に対しては、

$$a(\theta) = a_1 + (a_2 - a_1) (\theta - 22.5^\circ) / 22.5^\circ \quad (5a)$$

$$b(\theta) = b_1 + (b_2 - b_1) (\theta - 22.5^\circ) / 22.5^\circ \quad (5b)$$

より求めた。ここで、添字 0 は $\theta = 0$ (進行 B) に、添字 1 は $\theta = 22.5^\circ$ (進行 C) に、添字 2 は $\theta = 45^\circ$ (進行 A) に対応する氷荷重係数の値であることを表す。

氷厚は報告書に記された数値をそのまま用いた。曲げ強度に関してはそれぞれの相互作用に対して計測することは不可能なので報告書には記載がない。そこで Beaufort 海での典型的な値と言われている 600 kPa を用いた。氷の単位体積重量は模型試験と同じ 9 000 N/m³ を用いた。

このように算定した推定氷荷重は、当然にも、曲げ系の破壊が発生している時にしか適用できないから、比較の対象とした報告書に記されている氷荷重(実測氷荷重)も曲げ系の破壊が生じたときのものを対象としている。ちなみに、これら対象とした相互作用での氷象はすべて1年性の平坦氷であり、氷厚は一例を除いてすべて1 m 以下であっ

Fig.8 Comparison between measured ice forces and experimentally estimated ice forces

た。

このように算定した推定氷荷重と実測氷荷重を比較したものが Fig.8 である。この図では横軸に推定氷荷重を、縦軸には実測氷荷重をプロットしている。図中の直線が完全一致線である。

先に述べたように、実際の氷荷重はこの値の上下にある範囲を持った値であり、推定氷荷重も曲げ強度の仮定、氷荷重係数決定での近似度を考えればある範囲を持った値である。すなわち Fig.8 のプロットは点としてではなく、ある広がりを持った面として与えられる性格を持っているものと考えられる。

そのようなことを考慮しても、実測氷荷重と推定氷荷重は良い対応を示していると言える。実測氷荷重の方が幾分大きめである感はあるが、模型の縮尺比が 100 という小模型であるにも関わらず、良い対応を示している。また、先に述べた全体氷荷重の演繹に関する誤差評価に対する疑問を考慮すると推定氷荷重と実測氷荷重の対応はさらに良くなると考えられる。

7. 結 言

石川島播磨重工業(株)で開発した氷海水槽模型試験から実構造物に作用するであろう氷荷重の推定法(DuPTeM)を MOLIKPAQ での Beaufort 海における実測データを用いて検証を行った。

対象とした MOLIKPAQ でのデータは、1986 年に

Beaufort 海の Amaulikag I-65 地点において計測された数多くの相互作用の中の、一年性平坦氷との相互作用で、しかも曲げ系の破壊が生じた時のものである。

実測氷荷重と推定氷荷重の比較の結果は、双方の値にある程度の不確実性があるものの、実測氷荷重がやや大きめながら良い対応を得ることができた。模型の縮尺比が 100 という小規模模型にも関わらず、このような良い対応が得られたことは、DuPTeM の手法が正当であったと考えられる。もちろん氷板の破壊が曲げ系であるという制限があり、すべての氷海構造物には適用できないが、曲げ系の破壊が支配的である氷海構造物に対しては、この手法により実構造物に作用する氷荷重を十分に推定できると考える。

8. 謝 辞

本論文で言及した MOLIKPAQ の実測データの公表にあたり、共同プロジェクトを代表して快く許可を与えていただいた Gulf Canada Resources Limited の Gray A. Pidcock 博士に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Hnatiuk, J. and Felzien, E. E.: Molikpaq: An Integrated Mobile Arctic Drilling Caisson. Proceedings, 1985 Offshore Technology Conference. Vol. 2 pp. 373-381. (1985) Houston
- 2) Gijzel, T. G., Thomson, R. A. A. and Athmer, J. B. E. M.: Installation of the Mobile Arctic Caisson Molikpaq. Proceedings, 1985 Offshore Technology Conference. Vol. 2 pp. 389-397. (1985) Houston
- 3) Neth, V.: Ice Rubble Formation along the Molikpaq. Proceedings, Port and Ocean Engineering-under Arctic Conditions 1991. Vol. 1 pp. 241-258. (1991) St. John's
- 4) Sanderson T. J. O.: Ice Mechanics-Risks to Offshore Structures. Graham and Trotman, London (1988)
- 5) 堤孝行, 荻原誠功, 溝口純敏, 横田孝次, 加藤一行, 増子章, 伊東章雄, 秋山弘之, 大金英一: IHI の新しい船舶海洋研究設備について, 日本造船学会誌第 745 号 pp. 441-426. (1991)
- 6) Kato, K.: Experimental determination of ice force on artificial islands. Proceedings, International Symposium on Cold Regions Development. vol. 3, pp. 226-235. (1988) Harbin
- 7) 加藤一行: 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 (1987) 清水
- 8) Nevel, D. E.: Ice breaker simulation, US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report 77-16 (1977)