

サハリン沖における1年性リッジの形状と その設計氷荷重に対する影響

MORPHOLOGY OF A FIRST-YEAR RIDGE AND ITS INFLUENCE ON DESIGN ICE LOADS AT OFFSHORE SAKHALIN

加藤 一行¹
Kazuyuki KATO

¹正会員 工博 石川島播磨重工業(株) 技術研究所 (〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1)

To establish a rational design ice load estimating system for the offshore Sakhalin, morphological parameters including statistical characteristics of a first-year ridge in the said area are determined tentatively by literature survey. A design ice load estimating system based on the Monte Carlo simulation is developed and some sensitivity analysis are conducted using the determined morphological parameters. It is concluded that the thickness of consolidated layer predominantly influences on the estimated design ice load and also that the probability of hit affects remarkably on the return period - ice load relation. Those findings result in the recommendation that the statistical studies on the morphology and strength of consolidated layer and probability of hit of first-year ridge should be conducted with the highest priority.

Key Word: Design ice load, offshore Sakhalin, first-year ridge, return period, ice load model

1. 緒言

極地(Beaufort海など)や亜極地(サハリン沿岸域など)で石油・ガス田の開発に使用される海洋構造物=氷海構造物の設計に際して、氷荷重は重要な位置を占める。一般的には、ある再現期間(超過確率)に対応する氷荷重を算定し、それに安全率、あるいは最近の傾向^{1),2)}では荷重係数を乗じて、実際の設計に用いる。従って、ある再現期間に対応する氷荷重=設計氷荷重の推定精度は、その氷海構造物の経済性に大きな影響を持つ。

著者らは、設計氷荷重推定システムの開発に取り組んでいる。図1にその基本的な流れを示した。この手法は、まず考慮する海域において、どのような氷象がいかなる条件で相互作用を起こすか特定する(シナリオの特定)。次にそのシナリオ(複数)に対応する氷象の形状、力学的性質、運動などを調査し、それらの統計的な特性を備えたデータベースを構築する。同時に、そのシナリオが特定した氷象と対象とすべき構造物の相互作用において作用する氷荷重を、決定論的に算出する数式=氷荷重モデルを定める。データベースからの情報と氷荷重モデルから、モンテカルロシミュレーションを行ない、氷荷重の確率分布を求める。シナリオで特定した氷象と構造物との遭遇確率を求め、それを基に再現期間と氷荷重の関係を求める。これをすべてのシナリオについて行ない、ある指定された再現期間に対して最大となる氷荷重を設計氷荷重とする。

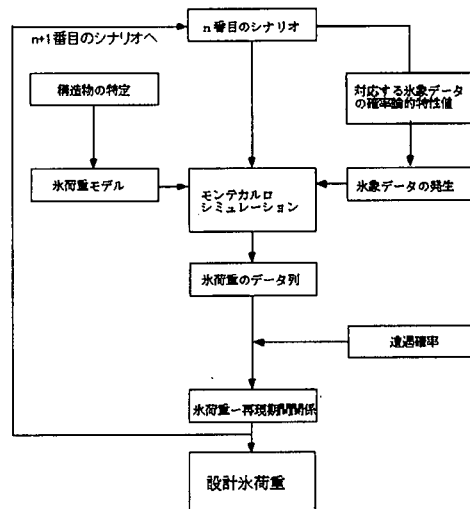


図1 設計氷荷重推定システムのフロー

以上が考えている設計氷荷重推定システムの流れであるが、その推定精度はデータベースと氷荷重モデル両方の精度にかかっている。本研究は、サハリン沿岸域において、推定精度の高い設計氷荷重推定システムの構築を最終目標としている。先行する検討において、サハリン沿岸域では1年性リッジとの相互作用による氷荷重が支配的である可能性が高いことが判明している。その知見を受けて1年性リッジに関するデータベースの構築に取り組んでいる。その構築には非常に多くの情報(環境データ)を収集・分析する必要があり、設計氷荷重を推定するという見地から、それらの情報に対して優先順位を付

け、研究資源を集中することが必要と考えている。

本論では、公表されている文献を調査・分析して、サハリン沿岸域での1年性リッジモデルを定め、その1年性リッジモデルと著者らが過去に定めた1年性リッジの氷荷重モデルを用いて設計氷荷重推定システムを構築し、仮想的な構造物を対象として、一種の感度解析を行なった。その結果を総括して、設計氷荷重推定システムの高精度化のために優先的に取り組むべき課題を論じた。

2. サハリン沿岸域における1年性リッジモデル

1年性リッジの形状は実際は千差万別であるが、図2に示されたものが伝統的に1年性リッジの形状モデルとして用いられている。それに従い、図に示された諸元について検討を加え、それらを定めた。

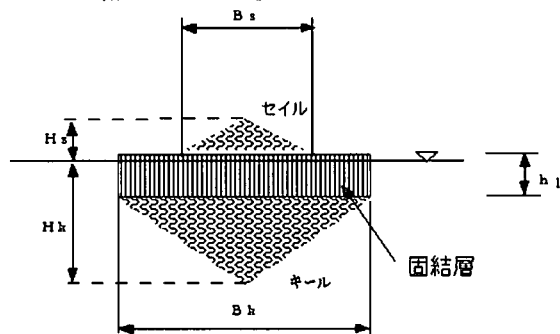


図2 1年性リッジモデル

サハリン沿岸域における氷象の情報は、1990年以前はロシア国外に公表される事がなかったが、1990年代に入ってから、徐々に公表されるようになってきた。しかしながら、用語が同じでも定義がこれまで(西側)と異なっている、データの背景となる諸条件の記述があいまいであったり、全く記されていないなど、その取り扱いには注意を要する。

本論では、Beketsky³⁾ら、Surkov⁴⁾のサハリン沿岸域での実測結果を取りまとめた文献を基に、Timco & Burden⁵⁾が取りまとめた極地及び亜極地の1年性、多年性リッジに関するデータを参考として、1年性リッジモデルを定めた。

(1) 平均的1年性リッジモデル

a) セイル高、 H_s

$$H_s = 4.7\sqrt{h_0} \quad (1)$$

ここに、 h_0 はリッジを構成する氷片の氷厚である。

b) キール深さ、 H_k

$$\left(\frac{H_k}{H_s}\right) = 4 \quad (2)$$

c) セイル幅、 B_s

$$(B_s) = 6.3(H_s) \quad (3)$$

d) キール幅、 B_k

$$\left(\frac{H_k}{B_k}\right)_{mean} = 0.257 \quad (4)$$

e) セイル角、 θ_s 、キール角、 θ_k

$$\theta_s = 20^\circ \quad (5)$$

$$\theta_k = 25^\circ \quad (6)$$

f) 固結層厚さ、 h_l

$$h_l = 1.03H_s \quad (7)$$

(2) 1年性リッジの統計的特性値

本節では、1年性リッジの諸元の統計的特性値を定める。ただし、現状では情報不足は否定できず、今後の情報の集積により見直されるべきものである。

a) セイル高、 H_s

1年性リッジはハンモックフィールドと呼ばれる表面の乱れた氷原に存在し、どれを1年性リッジのセイルと判断するかにより、その統計的特性値は相当異なる。本論では、比較的薄い平坦氷が破壊(座屈)することにより1年性リッジが生成されるというメカニズムを考慮して式(1)を用いる事にした。

リッジを構成する氷片の氷厚 h_0 に関する統計的情報は無いので、次に様な仮定を設けることにする。ただし、今後の実測データの集積により見直されるべきと認識している。Beketsky³⁾によればサハリン沿岸域では h_0 は60cmが上限であり、さらにセイル高が1.5m以下はリッジとは認識しないと考えると h_0 の下限は10cmである。正規確率密度関数を仮定し、さらに上記の上限及び下限が95%値に対応すると仮定すると、セイル高の平均は2.78m、5%超過確率値3.64mとなる。

b) キール深さとセイル高の比、 H_k/H_s

Beketsky³⁾の論文にはヒストグラムが与えられているが、階級が粗くまた特性値も与えられていない。Timco & Burden⁵⁾は変動係数0.41の対数正規確率密度関数で近似できると報告している。本論ではTimco & Burden⁵⁾の報告を採用することにする。

c) セイル幅、 B_s

(3)式はBeketsky³⁾の論文に記されていた関係式である。この関係式を導いたデータは11点しかなく、確率密度関数を見出す事は困難である。それらのプロットを見る限り関係式からの隔たりは小さい。従って、暫定的に(3)式を確定値と考えることにする。

d) キール深さとキール幅の比、 H_k/B_k

Surkov⁴⁾は、明確には述べていないがヒストグラムから判断する限り、変動係数0.33の対数正規確率密度関数と報告している。他に報告はなく、従って現状ではSurkov⁴⁾の報告を採用せざるを得ない。

e) 固結層厚さ、 h_l

固結層の厚さは決して一定ではなく、あるリッジ内においての相当変化に富んだものである。Timco & Burden⁵⁾の報告によれば最大と最小の比が2を越えることも希ではない。また、固結層の厚さはリッジが形成されてからの時間に依存する。(7)式はBeketsky³⁾が提案したリッジが十分に年を取った状況に対応した式である。ここで考慮しなくてはならないのは、設計氷荷重を算定する場合に、どのような期間を考えるかによって確率密度関数が異なっ

てくる可能性があることである。すなわち全結氷期間を考慮するか、氷象が盛んに運動する期間のみを考慮するかによって固結層厚さのヒストグラムの形が大きく異なる。(Beketsky⁷⁾)。そこで、本論では、氷象が盛んに運動する期間を対象と考えることにする。すなわちリッジは十分に年を取ったものとする。Beketsky ら⁸⁾はセイル高との関係で固結層厚さの統計的性質を論じておらず、現状では(7)式を確定値として採用せざるを得ない。

セイル角、キール角に関しては後述する氷荷重モデルでは用いないので、検討を行なわなかったが、Timco & Burden⁵⁾の報告によればいずれも対数正規確率密度関数で近似できる。

3. 氷荷重モデル

氷荷重モデルは、氷象の形状、強度、運動などの条件が特定されたときに確定論的に対応する氷荷重を算定するものである。当然にも氷荷重モデルは対象とする構造物形状によって異なる。そこで、本論では垂直壁からなる構造物—垂直構造物を想定する。これまでの考えは、次式のように表せる。

$$F_r = F_c + F_{ks} \quad (8)$$

リッジによる荷重 F_r は固結層の破壊による荷重 F_c と非固結層の破壊による荷重 F_{ks} の足しあわせにより表現できるとしている。前述したように固結層厚さは同じリッジ内でも一定ではなく、何らかの固結層—非固結層の相互作用を考えるのが自然である。しかしながら、その検討は、必要性は認識されているが、将来の課題として残されているのが現状である。従って、本論でも(8)式を用いることにする。

(1) 非固結層の破壊荷重

非固結層の破壊荷重に関して、これまでに多くの算定式が提案されている (Timco, et al.⁸⁾)。それらは例外無く、非固結層を Mohr-Coulomb 材料と仮定して算定式を組み立てている。それら多くは小規模な実験や観察と良く合うと報告されているが、同じ条件で計算すると 10 倍以上の差が出てくることもある。当然の事ながら、合理的な算定式が望まれているのが現状である。本論ではその中で、内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ 、粘着力 $c = 1kPa$ 及び $c = 10kPa$ で平均的値を与える Croasdale & Cammaert の算定式⁹⁾を用いることにする。

$$F_{ks} = \left(\frac{W_R D_e H_k}{2} + \frac{W_R H_k^2}{3} \right) \gamma_e \tan \phi \quad (9)$$

ここに、 W_R はリッジ幅、 D_e は構造物の有効直径である。 γ_e は有効単位体積重量で、次式で定義される。

$$\gamma_e = (\rho_w g - \rho_i g)(1 - n) \quad (10)$$

ここに、 $\rho_w g$: 水 (海水) の単位体積重量

$\rho_i g$: 氷の単位体積重量

n : 非固結層の間隙率

彼らは、セイル部の貢献を考えていないから、 $W_R = B_k$ である。

(2) 固結層の破壊荷重

固結層は厚さが一定と仮定しているから、破壊荷重は平坦氷と垂直構造物の相互作用による算定式を用いる事ができる。この種の算定式は数多くこれまでに提案されているが、近年の氷の破壊メカニズムの詳細な研究により見直しを迫られているのが現状である。また、目的とする大規模な構造物に作用する氷荷重を小規模な実験などから演繹するときの縮尺効果に関しても盛んに議論が行なわれているのが現状である。それらの研究の成果を待つところが大きい。本論では著者が過去に提案した式¹⁰⁾を暫定的に用いることにする。

$$F_c = K_c K_i K_m D_e h_l \sigma_c \quad (11)$$

ここに、

$$K_c = 0.3$$

$$K_i = 0.54 \frac{h_l}{D_e} + 1$$

$$K_m = 0.58 \sqrt{1 + 1.97 \frac{h_l}{D_e}}$$

σ_c は参照強度で、ひずみ速度が $10^{-3}(1/sec)$ のときの一軸圧縮強度である。この式は Korzavin の式¹¹⁾を世襲しているが、係数 K_m により Kry の複数破壊領域の概念¹²⁾による効果を表現しようとしている。

4. 1 年性リッジの強度

前章の氷荷重モデルを参照すると、必要な強度定数は、非固結層の内部摩擦角及び間隙率と固結層の参照圧縮強度である。本節ではこれらを定める。しかし、繰り返しになるが、情報は圧倒的に不足しており、情報の収集・分析による見直しが必要である。

(1) 非固結層の内部摩擦角

地盤工学で行なわれる三軸圧縮試験の実施は期待できない。従って、これまでに報告されているのは、いわゆるパンチング・シェア試験からの推定値か室内でミニチュア化したせん断箱を用いた試験の結果である。当然にも内部摩擦角を推定するのに多くの仮定が設けられおり、ミニチュア化に際しての寸法効果も十分に検討されていない。しかし、報告されている値は 30 度～40 度がほとんどである。従って、本論では “rule of thumb” を適用して 35 度とした。

(2) 非固結層の間隙率

Surkov ら実測¹³⁾によれば、非固結層の間隙率 n_{ks} はリッジを形成する氷片の長さ l と厚さ h_0 の比の関数として次式で表される。

$$n_{ks} = 0.09051 \cdot \ln \left(64.701 \frac{l}{h_0} \right) \quad (12)$$

氷片の長さ l と厚さ h_0 の比は当然ある分布を持つが、平均値を用いれば十分であると考えられる。

平均値は 3.56 と Surkov らにより報告されている。

(3) 固結部の参照圧縮強度

これまでの議論でわかるように、リッジを構成する氷片はかなり大きいので有為な試験を行なうためには非常に大きな供試体が必要である。従って、これまでに報告されているリッジ固結部の強度はリッジから抜き出した標準的な大きさコアサンプルを用いた試験かミニチュア化した固結部を供試体とした試験であり、評価が難しい。

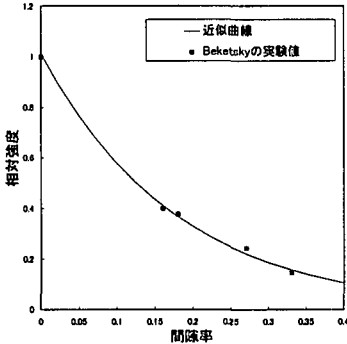


図 3 間隙率の関数としての相対強度

またさらに、固結層の強度は 1 年性リッジを取り囲む平坦氷の強度と同様である (Beketsky⁶⁾) と言う議論と固結層は周囲の平坦氷よりも間隙率が高く、しかも多く欠陥を含んでいるから周囲の平坦氷よりも強度が低いはずであるという議論もあり、定まっていない。著者は後者に組する考えから間隙率の関数として強度を推定する手法を推奨する。

Beketsky³⁾らは室内でリッジと同じ氷片分布を持つ再凍結供試体を生成し、間隙率を変えた実験を行っている。間隙率ゼロのときの強度で除した相対強度 σ_r を間隙率 n に対してプロットすると図 3 を得る。Beketsky らは近似曲線を求めていないが、それを求めると次式を得る。

$$\sigma_r = 1.0143 \times \exp(-5.64n) \quad (13)$$

固結部の間隙率に関しては、断片的な情報しか見出す事ができない。Beketsky ら⁶⁾は間隙率は基本的にはゼロとしているが、Surkov ら¹³⁾は代表的な値として 0.2 を考えている。

間隙率がゼロのときの強度も評価が難しい。氷は基本的に高濃度塩水 (ブライン) を含み、さらに幾分かの空気を含んでいるのが普通である。従って、Beketsky⁶⁾らの言う間隙率ゼロと言うのはそれらを考慮しない巨視的な空隙と解するべきであろうと考える。従って、間隙率ゼロの強度は典型的な平坦氷の強度の測定結果を用いるべきと考える。

サハリン海域における平坦氷の圧縮強度に関しては Truskov ら¹⁴⁾が報告しているが、用いた供試体の温度、塩分濃度あるいは試験時のひずみ速度に関する記述が無く、わかりにくいデータである。Truskov はそれらを基に、次式を提案している。

$$\sigma_{c0} = -7.42 - 0.1404T + 0.1458S + 1157845\rho_g - 0.847\frac{S}{|T|} \quad (14)$$

ここに σ_{c0} : 参照一軸圧縮強度 (MPa)

S: 氷の塩分量 (ppt)

T: 氷温 (°C)

ρ_g : 氷の単位体積重量 (gf/cm^3)

情報不足は否定できないが、現状では固結部の参照圧縮強度 σ_c として、次式を用いる。

$$\sigma_c = \sigma_{c0} \times \sigma_r \quad (15)$$

設計氷荷重推定システムに用いる固結部の参照強度としては、さらに次のような仮定を設けて発生させた値を個々の試行に用いる。

間隙率 0~0.2 で一様分布

塩分量 3~7 ppt で一様分布

氷温 -2~-10°C で一様分布

単位体積重量 0.78~0.91g/cm³ で一様分布

これらの仮定を用いて実際にシミュレーションを行なった結果を図 4 に示す。

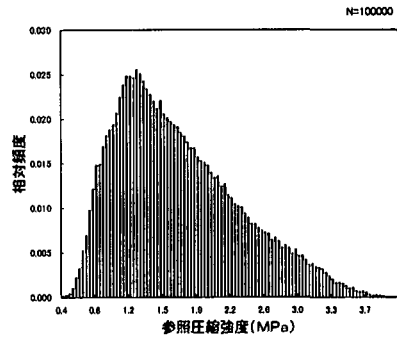


図 4 参照強度の相対頻度 (Case A)

5. 試計算—感度解析

前節までに述べた諸数値、諸式及び氷荷重モデルを用いて N=100000 回のシミュレーションを行ったときの相対頻度を図 5 に示した。この図からは非固結層の寄与が小さいことがわかる。用いた氷荷重モデルは、提案された氷荷重モデルの中で中間的な値を与えるものであるから、どんな氷荷重モデルを用いても、非固結層に由来する氷荷重の寄与はそんなに大きくないと推定できる。

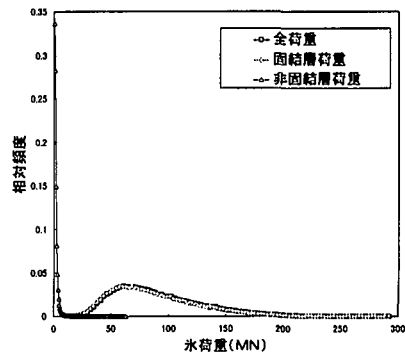


図 5 氷荷重の相対頻度分布 (Case A)

非固結層に由来する氷荷重の寄与は大きくないから、主にセイルの高さによって表現される 1 年生リッジの形状に関する諸関係式やそれらの分布を表

す統計的特性値が多少曖昧であっても、全氷荷重には大きな影響を与えないと結論できる。

しかしながら、セイル高さは固結層の厚さも規定しており、この量の確率分布形状は全氷荷重に大きな影響を与えると推定される。そこで、試行回数 $N=100000$ で、以下の計算を行った。

- Case A：平均 2.78m 標準偏差 0.43m (標準)
- Case B：平均 2.78m 標準偏差 0.86m
- Case C：平均 2.78m 標準偏差 0.21m

これらの試計算の結果を累積相対頻度(非超過確率)で表すと図 6 を得る。Case B ではセイル高さが負になる場合があり、その結果を除外してある。

当然ではあるが、標準偏差が大きいほど同じ累積相対頻度に対する全氷荷重の値が大きくなっており、特に累積相対頻度が大きい領域で差が大きくなっている。従って、セイルの高さの確率密度関数の推定精度は再現期間と氷荷重の関係に大きな影響を与えることがわかる。

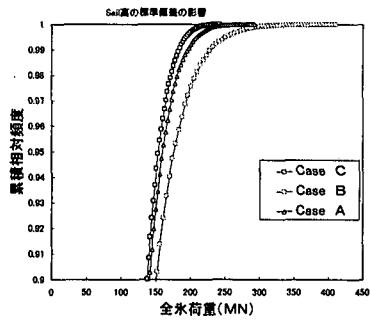


図 6 セイル高の確率密度関数の影響

次に強度の影響を検討する。非固結層の強度(内部摩擦角)はほとんど影響を与えないことはこれまでの検討で明らかなので、固結層の参照強度に関して検討する。氷荷重モデル(式(11))で明らかのように参照強度と固結層に由来する氷荷重は線形関係にある。従って、その確率密度関数がシミュレーション結果に大きな影響を与えることは明らかである。本検討では、式(14)により参照強度を算定するが、そのときに必要な量は、水温、氷の塩分濃度、氷の単位体積重量及び間隙率である。後三者に関しては前章で与えた値は、リッジが十分に成長した季節と、時期を限定すると、ほぼ考えられる範囲をカバーしているが、水温に関しては季節を限定したとしても、考慮する海域によって異なる可能性を有している。

そこで、水温の確率密度関数に関する感度解析を行った。行った試計算は、

- Case A：一様分布 $-1.8 \sim -10^{\circ}\text{C}$
- Case D：一様分布 $-1.8 \sim -20^{\circ}\text{C}$
- Case E：一様分布 $-1.8 \sim -5^{\circ}\text{C}$

の3種である。これらの計算において算定された参照強度の相対頻度を図 7 に示した。また、全氷荷重の累積相対頻度を図 8 に示した。限られた実測値と比較すると、Case D は強度が大きい部分が多すぎるくらいはあるが、水温の確率密度関数も再現期間と氷荷重の関係に大きな影響を与えると考えられる。

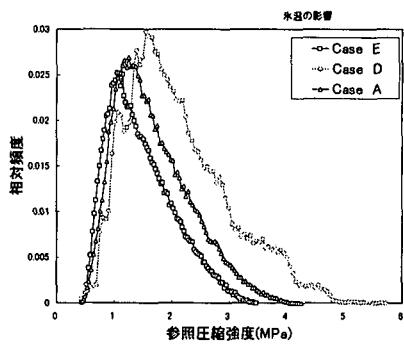


図 7 シミュレーションに用いた参照強度の分布

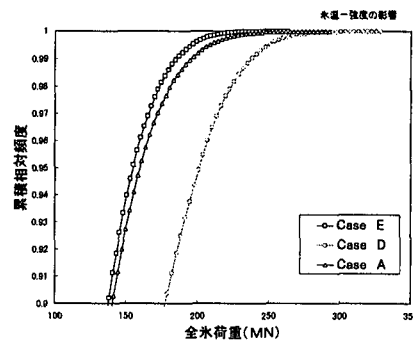


図 8 参照強度分布の影響

これまでに定義を与えずに再現期間という用語を用いてきたが、再現期間 R は次式より定義される。

$$R = \frac{1}{p(F \geq F_0) \mu} \quad (16)$$

ここに、 $p(F \geq F_0)$ は荷重が F_0 より大きくなる確率、 μ は年あたりの遭遇回数である。

標準のケース (Case A) に対して、再現期間と氷荷重の関係を、 μ をパラメータとして描くと図 9 を得る。この場合、 μ の大きさを考慮して $N=1000000$ の試行を行った。式(16)からも明らかであるが、年あたりの遭遇回数は再現期間と氷荷重の関係に大きな影響を及ぼすことが図から見て取れる。

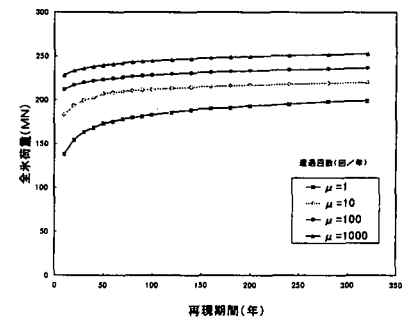


図 9 遭遇回数の再現期間-氷荷重関係への影響

6. 優先的取り組むべき課題

前章の試計算で明らかのように、1 年性リッジに対する設計的水荷重において固結層の破壊に由来する荷重が支配的である。本研究で用いた非固結層の

氷荷重モデルは数ある氷荷重モデルの中で中間的な値を与えるものであり、固結層に対する氷荷重モデルは伝統的な Korzhavin の式に比べると、仮定した構造物に対しては約半分の荷重を与える氷荷重モデルである。従って、どのような氷荷重モデルの組み合わせを用いようとも、上記の結論には変更は無いと考える。

上記の結論から、設計的氷荷重推定の高精度化に向けて優先的に取り組むべき課題としては、次に挙げる項目が考えられる。

(1) 固結層の氷荷重モデル精密化

この課題に関しては、J O I A プロジェクトで強力に取り組んでおり、近い将来に完成すると期待されている。

(2) 固結層厚さの確率密度関数の精密化

本研究では、セイル高と固結層厚さが式(7)により決定論的に関係し、セイル高さは正規確率密度関数で表現できるとしたが、これを裏付ける実測データは十分とは言えない。実測データの集積により、精度の高い固結層厚さの確率密度関数の定式化が必要である。

(3) 固結層の強度の確率密度関数の精密化

本研究では、参照強度を水温、氷の塩分濃度、氷の単位体積重量の関数として決定論的に表現できるとして、それらの変数が一様確率密度関数で表現できるとして、参照強度の確率分布を求めた。数は少ないが実測データと比べた場合、範囲はほぼ合っており、分布形状も報告されているものに近い。しかしながら、やはり裏付けとなる実測データが不足していることは否定できない。特に固結層に対する実測値はほとんど無く、それらに裏付けられた確率密度関数の精密化が必要である。

(4) 遭遇確率の推定精度の精密化

遭遇確率に関しては、平均的なリッジと構造物が一年間にどれだけの面積を覆うかを算定し、リッジの平均密接度を乗じて年あたりの遭遇回数を算定するのが一般的な方法である。サハリン沿岸域においては、その重要性がロシアの研究者に認識されていないという面があり、リッジの密接度に関する公表されたデータが皆無の状況にある。この遭遇確率は上記の3項目よりも大きな影響を設計的氷荷重に与える可能性が高いと考えられるので、合理的な算定手法の確立とそれに必要なデータ、特に密接度、の充実が必要である。

これらの課題は、一言でいえば、現状ではデータ不足である、と言っているに過ぎないと思われても致し方ないが、厳然たる事実である。それらのデータを自ら収集することは非常に困難と考えられ、国外にその源を求めなくてはならないのが現状である。データを求めるときに、上記した優先的な課題を考慮すれば、有償、無償を問わず、有利に作用するのではないかと考える。

謝辞

本研究は、(社)日本海洋開発産業協会(J O I A)が組織する「氷荷重基礎研究委員会」の活動の一環として行ったものである。著者はJ O I Aに対し、この貴重なプロジェクトに参画する機会を与えられたことを深く感謝する。

参考文献

- 1) API: Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Structures and Pipelines for Arctic Conditions, API Recommended Practice 2N, 1995
- 2) CSA: General Requirements, Design Criteria, the Environmental, and Loads, CAN/CSA-S471-92, 1992
- 3) Beketsky, S.P. and Astafiev, V.N.: Morphology of Hummocks in the Sea of Okhotsk, 第12回オホーツク海と流氷に関する国際シンポジウム講演要旨集, pp.42-47 紋別 1997
- 4) Surkov, G.A.: Probabilistic Model for Drifting Ice Ridges of the Sakhalin Offshore, Proc. ISOPE-98, Vol.2, pp.344-348, 1998
- 5) Timco, G.W. and Burden, R.P.: An analysis of the shapes of sea ice ridges, Cold Regions Science and Technology, Vol.25, pp.65-77, 1997
- 6) Beketsky, S.P., Astafiev, V.N. and Truskov, P.A.: Design Parameters for Hummocks and Grounded Hummocks in the Sea of Okhotsk, Proc. ISOPE-97, Vol.2, pp.487-493, 1997
- 7) Beketsky, S.P.: Thickness distribution of consolidation hummock layer offshore Sakhalin, Ice in Surface Water, H.-T. Shen Ed., Kluwer, Rotterdam, pp.357-359, 1998
- 8) Timco, G.W., Frederking, R., Kamesaki, K. and Tada, H.: Pre-prints, Rational Estimation of Ice Forces on Structures (REIFS'99), 1999
- 9) Croasdale, K.R. and Cammaert, A.B.: An improved method for the calculation of ice loads on sloping structures in first-year ice, Proc. Conf. Exploration of Russian Arctic Offshore, pp.161-168, 1993
- 10) Kato, K.: The equation to estimate an ice force on a vertical arctic structure in a continuous crushing failure mode. Proc., Techno-Ocean '92, Vol.2, pp.817-824, 1992
- 11) Korzhavin, K.N.: Action of Ice on Engineering Structures, CRREL Draft Translation No.260, 1962
- 12) Kry, P.R.: A Statistical prediction of effective ice crushing on wide structure, Proc. 5th International IAHR Conference, pp.33-47, 1978
- 13) Surkov, G.A., Astafiev, S.V., and Polomoshnov, A.M.: Hummock Porosity Tests, 第12回オホーツク海と流氷に関する国際シンポジウム講演要旨集, pp.49-52 紋別 1997
- 14) Truskov, P.A., Astafiev, V.H. and Surkov, G.A.: Problems of Choice of Sea ice Cover Parameters Design Criteria, 第7回オホーツク海と流氷に関する国際シンポジウム講演要旨集, pp.21-25 紋別 1992

(1999.4.19 受付)