

海氷強度の変動特性と構造物に作用する氷荷重に関する研究

Study on Characteristics of the strength variation of sea ice and ice force loading on the structures

正木 孝治* 本田 秀樹* 竹内 貴弘** 河村 宗夫** 松下 久雄*** 酒井 雅史**** 佐伯 浩*****

Takaharu Masaki, Hideki Honda, Takahiro Takeuchi, Muneo Kawamura, Hisao Matsusita, Masashi Sakai, Hiroshi Saeki

It is important to define the relation between the unconfined compressive strength of sea ice and the indentation pressure in estimating the ice force loading on structure. However, as variance the value of the strength of sea ice and the ice force becomes large, it is effective method to use probability and statistics. In this study, the authors, the authors understand between the strength of sea ice and ice force, and relate them. Further, the author study the effect of scale factor to simulate ice pressure corresponding to relation ice strength and ice force.

Key words: ice force, unconfined compressive strength, scale factor

はじめに

現在、全世界で巨大油田など天然資源が開発され尽くした現状においては、今後は厳しい条件下での開発に移行せざるをえなくなっているが、そのなかでも氷海地域の開発に注目が集まっている。このような氷海地域において建設される港湾や海洋資源開発のための各種施設の設計にあたって、設計条件の一つとして考慮されるものとして氷荷重の検討が重要なものとなってきた。直立構造物に氷盤が貫入していく際（継続氷荷重領域）の氷荷重は、スポーリング破壊と圧縮破壊の連続である場合が最も高い氷荷重を継続し続けることから、氷荷重の推定においては海氷の一軸圧縮強度特性を把握した上で貫入氷荷重との関連性を明確に位置付けることが重要である。しかし、海氷の一軸圧縮強度は強度を規定する因子が数多く、その分散も大きいなどから、適当な確率統計量をもって氷荷重との比較と行うことが有効な手段である。そこで本研究では一軸圧縮強度と独立破壊領域内の氷圧力の統計的性質を把握、両者の最適な確率分布モデルを検証する。次に、両者を氷盤貫入試験および一軸圧縮強度試験の結果から関連づけ、各独立破壊領域の氷圧力時系列の線形重ねあわせにより、受圧面積と氷圧力影響を評価する。また海氷の一軸圧縮強度の分散にみあった貫入氷圧力を模擬発生することにより海氷の分散特性が氷圧力に与える影響を明らかにした。

1. 研究方法

本研究を進めるにあたって、(社)日本海洋開発産業協会（通称：JOIA）の「海洋構造物及ぼす氷荷重に関する研究」による平成7年度に網走・能取湖で実施された中規模野外実験、および平行して行われた海氷の物理試験の実験データを主に使用した。中規模野外実験は構造物と氷盤との受圧面積の増大に伴って単位面積当たりの氷圧力が減少するというスケール効果を調査し、その原因を明らかにすることを目的としている。氷盤貫入試験とは模型貫入杭を一定速度（有効歪み速度が（貫入速度／2×貫入幅）＝ 10^{-3}sec^{-1} となるような貫入速度）で直角方向へ貫入させることにより、実際の氷盤の水平移動

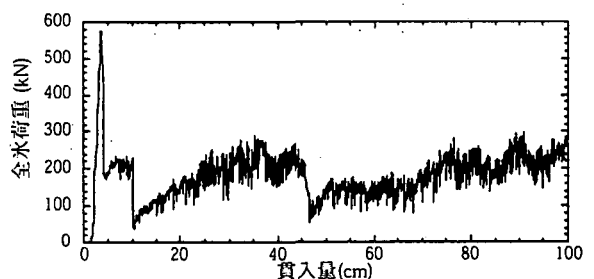


図-1 一般的な全体氷荷重の時系列

- * 学生会員 北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻（〒001 札幌市北区北13条西8丁目）
- ** 正会員 清水建設（株）技術研究所
- *** 三井造船（株）
- **** 正会員 大成建設（株）
- ***** 正会員 北海道大学工学部

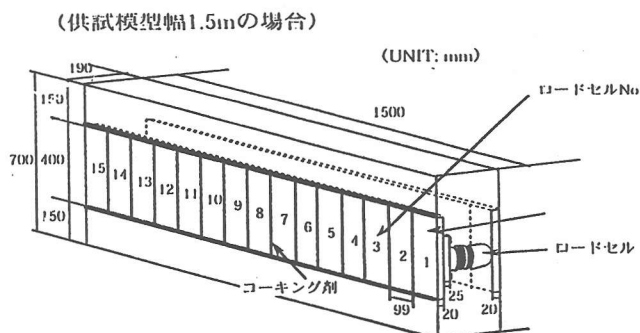
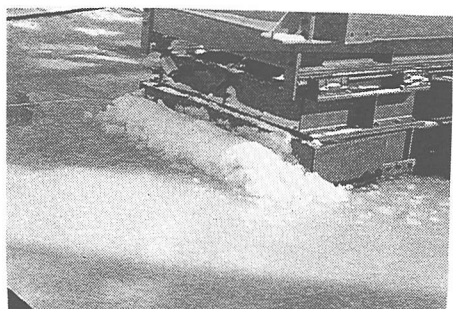


図-2 供試模型と各パネルの配置

に伴う垂直構造物に及ぼす氷荷重を評価するものである。この実験の貫入機はジャッキ先端部に供試模型を取り付け、護岸で反力をとって供試模型を試験氷盤に水平方向に貫入させることにより実際の氷盤移動に伴う氷荷重を推定するものである。供試模型には幅 10 cm のパネルが取り付けられ、個々のパネルの後ろにロードセルを取り付け、その値を局部氷荷重と定義して計測してある（図-2）。局部氷荷重を計測する目的は供試模型幅方向の独立破壊領域の推定と、領域内の氷荷重特性を調べるためである。全氷荷重で初期に顕著なピークが発生すると同時に、各局部氷荷重もピークを迎える。その後、一旦、荷重が落ち込み、継続氷荷重領域に入ると局部氷荷重のランダムピークは独立に発生し、供試模型前面で非同時破壊が起こっている。

2. 一軸圧縮強度と局部氷荷重強度の確率分布について

海氷の一軸圧縮強度はばらつきの度合いが大きく、その評価が氷荷重の推定にあたって重要になると考えられる。そのばらつきを取り込むために最適な確率分布モデルを取り入れようとする試みにおいて、竹内らは圧縮強度を 4 種類の確率分布関数（正規分布、対数正規分布（2 母数と 3 母数）、ワイブル分布）との適合度の検定をした結果、対数正規分布（3 母数）

$$f(x) = \frac{1}{(x-a)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right\}$$

ここで $y = \log(x-a)$

母数は平均値 (μ_y)、標準偏差 (σ_y)、係数 (a) である。

との適合度が高いという結果を得ている。前回の著者らの報告（1996 年）では、上記の能取湖での強度試験とサハリン東岸の Truskov らの研究の相対強度について対数正規分布（3 母数）との適合性を検定をし、北海道オホーツク海沿岸である能取湖の海氷ばかりでなく、サハリン東岸の海氷についても対数正規分布（3 母数）はよい一致をしていることを示した（図-3）。

ここで、継続氷荷重についての確率分布特性について述べる。各パネルで計測した約 1 万 5 千毎の局部継続氷荷重について、それぞれのパネルの平均値で除すことにより相対化した平均値からの分散度合いを度数分布にした（図-4）。竹内らの報告で 1 パネル（10cm、氷厚付近）はほぼ独立破壊領域の大きさに等しいと考えられるので、この度数分布は独立破壊領域内の局部継続氷荷重の度数分布と同様であると考えられる。よって、独立破壊領域内に作用する氷圧力の度数分布は、一軸圧縮強度の確率分布モデルと同様な対数正規分布との適合度が高い事が分かった。

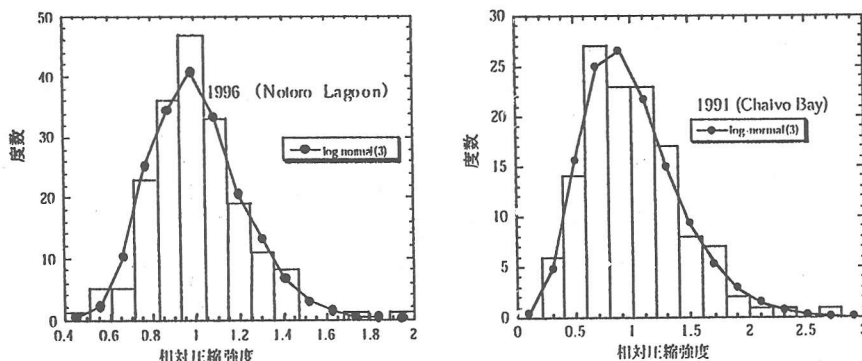


図-3 海氷の一軸圧縮強度の実測度数と理論度数の関係

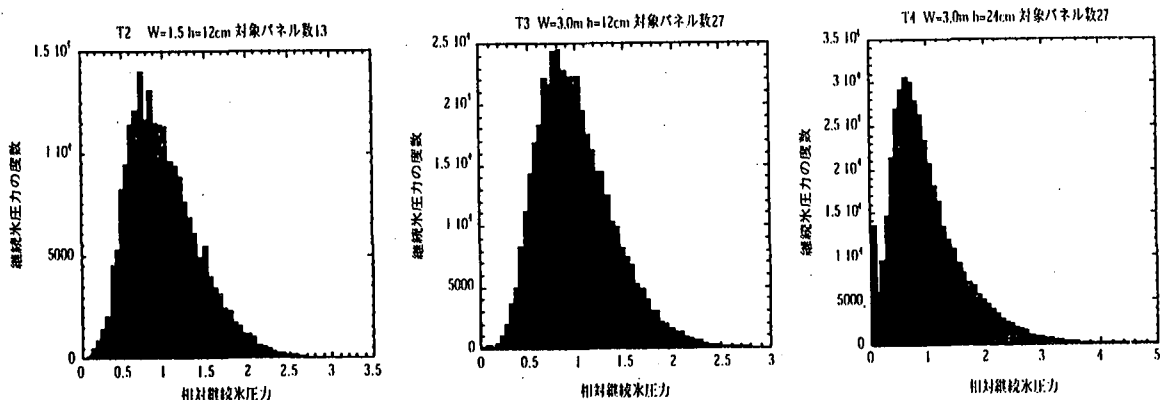


図-4 局部継続氷圧力の実測度数ヒストグラム

3. 一軸圧縮強度と局部氷荷重との比較

一軸圧縮強度特性と貫入時の局部氷荷重特性との関係について、その試験結果から比較を行う。まず、初期ピーク時において、各試験ごとに行った 16 本の圧縮強度試験の平均値と各パネルの初期ピークとの関係を示した結果が図-5 であり、それぞれの変動係数との関係を示したものが図-6 である。両図とも、ここでは明確な相関関係は見られない。これは供試模型幅方向において初期ピークをもたらず破壊は同時に起こっていても、その拘束条件などの違いにより破壊の性質は一様なものでなく、このことが同時破壊の直後すぐに非同時破壊に移行していく原因であると思われる。

しかし、継続氷圧力との関係においては、初期ピークがただ一点のみの比較だったのに対して継続氷荷重は統計的に有為な多くのデータサンプル数が存在しており、より明確にその特徴を捉えることが期待できる。結果は平均値、分散度合いの指標となる変動係数のどちらも明確な相関関係が認められた (図-6)。変動係数の比較については圧縮強度の変動係数が大きくなるにつれ、パネル間の変動係数の値のばらつきも大きくなってきており、パネル貫入方向だけでなく、供試模型幅方向についてもばらつきの影響を受けることがわかった。これにより貫入時の局部継続氷圧力特性と一軸圧縮強度特性との関係は非常に強いことが明らかとなった。

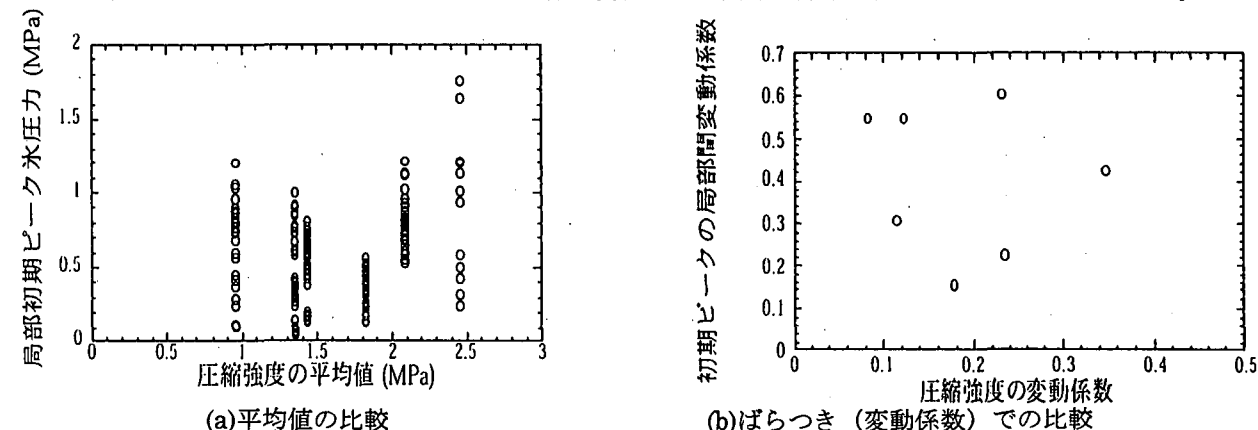


図-5 一軸圧縮強度と初期ピーク時の局部氷圧力の比較

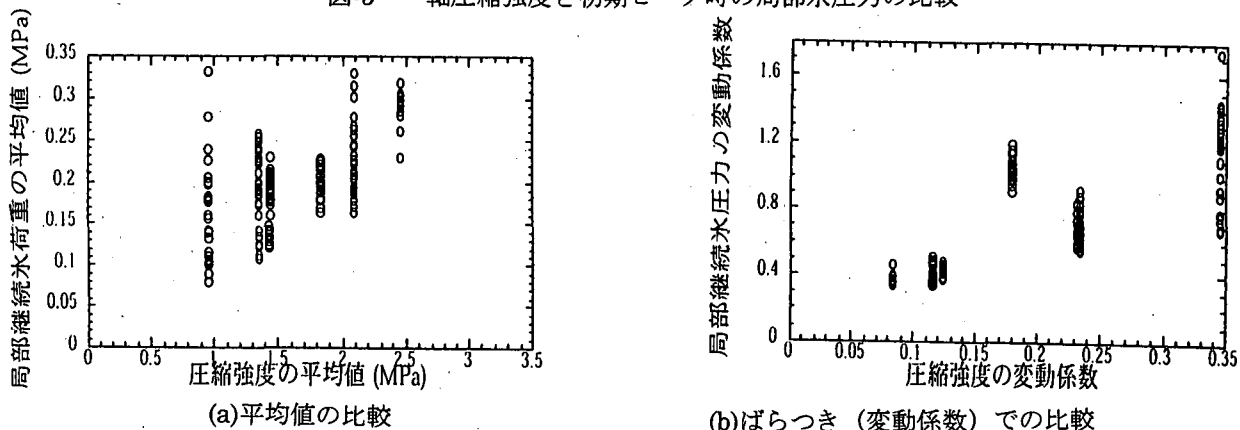


図-6 一軸圧縮強度と継続氷荷重発生時の局部氷圧力の比較

4. 局部氷荷重の強度分布特性とスケール効果との考察

竹内らは上記貫入試験において考慮するパネル幅を変化させ参照する面積（受圧面積）に作用する氷圧力と受圧面積の関係を評価し、この結果、局部氷荷重の極値（1%超過確率値）、最大値の場合、受圧面積の増大に伴い継続氷圧力は減少するという寸法依存性の傾向を示すことを明らかにしている。ところで全章で述べたように、独立破壊領域内で受ける局部継続氷圧力は一軸圧縮強度の確率特性と明確な相関関係があること、また、確率分布モデルとして対数正規分布関数との適合度が高いことなどから、ここで正規分布、対数正規分布に従う乱数を各独立破壊毎（パネル毎）に1000個発生させることにより、強度特性にみあった局部継続氷荷重データを模擬発生を試みる。実際の実験値から求めた係数をもとに発生させたデータを線形重ねあわせの方法により実験値との比較を行ったものが図-7である。模擬発生値は実験値より若干低めに評価をしているが、これはまったく独立であると仮定した独立破壊領域間にもある程度の従属性があり、そのために低く評価しているものと思われる。ところで海氷の圧縮強度の分散特性は位置的な影響を受け、離れたサンプリングほどばらつきが大きいということは前報告（1996年）で述べたとおりである。そこで、貫入距離が長かったり、構造物が大型でばらつきの大きい海水氷が接触、破壊することを考慮して海水氷強度の分散が大きい場合の氷荷重の模擬データを発生、比較したものが図-8である。

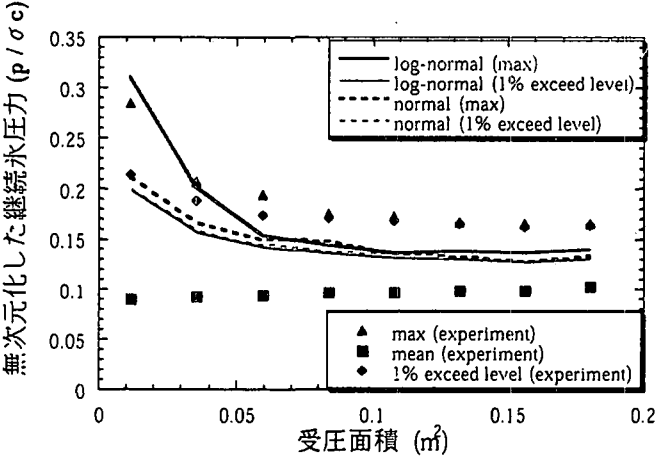


図-7 受圧面積の変化に伴う氷圧力の実測値と模擬発生値との比較

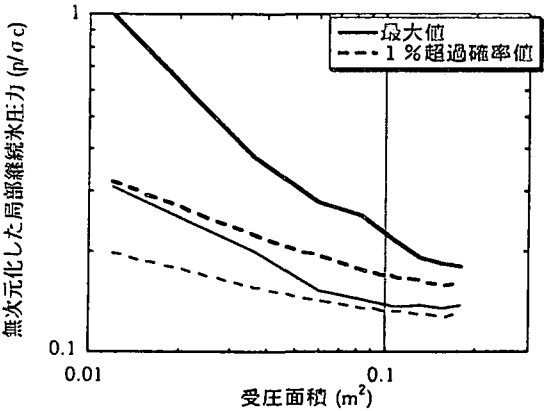


図-8 模擬発生値の変動係数を2倍とした場合（太線）との比較

5. 主要な結論

- (1) 独立破壊領域内に作用する氷圧力の度数分布は、一軸圧縮強度の確率分布モデルと同様な対数正規分布との適合度が高い事が分かった。
- (2) 矩形断面の貫入試験の局部氷圧力の統計的性質は、その海水氷盤の一軸圧縮強度の統計的性質（平均値、変動係数）と定性的な関係がみられた。
- (3) (1)の結果より正規分布、対数正規分布に従う乱数を発生させることにより、強度特性にみあった局部継続氷荷重データを模擬発生を試み、実験値とのスケール効果に対する比較を行った。さらに現実の一軸圧縮強度のばらつきの影響が大きい場合の受圧面積と氷圧力の関係を明らかにした。

<参考文献>

- 1) 竹内貴弘、岡本智、国松靖、田淵浩文、佐伯浩：「海水氷強度の空間分布と供試体の採取方法」、寒地技術シンポジウム講演論文集 Vol.8 p400-405, 1992
- 2) G.A.Surkov and P.A.Truskov : "Analysis of Spatial Heterogeneity of Ultimate Ice Compressive Strength", ISOPE Proc. of 3rd, p596-599, 1993
- 3) 岡本智：「氷の強度特性に関する実験的研究」、平成4年度北海道大学大学院修士論文 第1章
- 4) 竹内貴弘、赤川敏、岩井俊之：「現地海水氷盤の強度分布特性について」、海洋開発論文集 vol.11 p241-245, 1995
- 5) 竹内貴弘、青島正和、松下久雄、中沢直樹、寺島貴志、赤川敏、酒井雅史、佐伯浩：「氷荷重に関する中規模野外実験における構造物と氷盤の相互作用について」、海洋開発論文集 vol.12 p379-p384, 1996