

現地海水氷盤の強度分布特性について

On the distribution of strength of in-situ sea ice sheet

竹内貴弘*、赤川敏*、岩井俊之*

Takahiro Takeuchi, Satoshi Akagawa and Toshiyuki Iwai

Strength of sea ice sheet strongly influences ice load on structure in ice-infested sea area. And, it is also known that strength of natural sea ice sheet has much scatter. The estimation of ice load on structure requires the understanding of the extent of scatter of sea ice strength in-situ. Therefore, both uniaxial compressive strength of and p-wave velocity in sea ice were measured using natural sea ice sample taken from landfast ice sheet in lake Saroma. In this paper, the distribution of strength of ice sheet in horizontal direction is investigated statistically.

Keywords: ice load, p-wave velocity, ice-infested sea area

1 はじめに

氷海構造物に作用する氷荷重は、構造物の幅、構造物の形状、氷厚、氷の強度等、に主に依存する。ここで、特に、構造物が大型になる程（氷盤と構造物の接触面積が増大する程）、構造物に作用する貫入氷荷重が減少する（スケール効果）ことが指摘されている。これは、独立破壊領域における氷盤の非同時的破壊の効果によるとの説明が有力とされ、氷盤貫入試験に基づいたいくつかの報告がある。一方、現地海水氷盤の強度分布には多くのばらつきがあることが既存の報告から知られている（佐伯、1981；平山ら、1989）。また、現地氷盤中にはブラインや空隙により潜在的に強度上（構造上）の欠陥が存在し、これらが上記のスケール効果と関連している可能性がある。しかし、現地海水氷盤のサンプリング位置と強度との関係を把握するための基礎的データが極めて少なく、氷荷重を評価する上でも大きな障害となっている。もし、氷盤の強度変化が位置的な変化に大きく依存する可能性があれば、氷荷重を評価する上でも氷盤の非同時的破壊に加えてその効果を何らかの形で取り込む必要がある。本研究では、直接及び非破壊試験により一様方向における現地海水氷盤の強度分布と強度の確率特性を把握する事を目的とした。

2 実験概要 実験は、北海道の佐呂間湖の氷上で行った。サロマ湖養殖漁業協同組合の数百m沖合いに、簡易実験基地を設け、供試体の採集、実験を行った。現地の氷は、定着氷である。実験を行った時期は2月中旬（1995）である。現地の氷厚は、約40cm以上であった。ここでは、雪氷以深の柱状氷の部分の同一深さにおいて、水平方向にわたり約38m以上にわたり、約15cmの間隔で供試体の採集を行った。供試体は、直径10cmで高さ20cmの円筒形である（Fig.1）。採集した供試体数は、約260以上である。測定項目は、海水の一軸圧縮強度（ σ_c ）、p波速度、塩分量、氷温、密度である。p波速度（ V_p ）は、超音波パルス法により測定した。発信子と受信子の共振周波数は、ASTMを参考にして、振動を伝播させる供試体長さ20cm、予想される弾性波速度と氷の結晶経から推定し作成した〔発信子側（75kHz）、受信子側（83kHz）〕。発信子は、ランジュバン圧電素子を積層し、また、受信子は感度を上げるための配慮を行った。供試体との接触部分は、径32mmであった。ファンクションジェネレーターで矩形波を発生させ、電力増幅器を通じて、デジタルストレージスコープの画面上で、伝播時間を測定した。この伝播時間と伝播距離から、p波速度（ V_p ）、を決定した。一軸圧縮試験時の氷の歪速度は、brittle range（ 10^{-2} （1/sec）オーダー）とした。一軸圧縮試験機は、氷上移動、組立が可能となるように作成した。油圧ジャッキの載加容量は10（tonf）である。試験にあたっては、供試体の氷温を一定に保つためにビニールでラッピングした後に海水中（ -1.7°C 付近）に数時間浸し、超音波パルス試験および、その後の一軸圧縮試験に用いた。

* 正会員 清水建設(株)技術研究所寒地基礎G (135 東京都江東区越中島3の4の17)

3 実験結果

Fig.2は、供試体の採集方向距離と一軸圧縮強度との関係を示している。強度の大きい部分と小さい部分では、かなり強度に差がある。一軸圧縮試験時の供試体の破壊様式は、せん断と縦割れである。平均値は、1.23(MPa)、標準偏差は0.32(MPa)であった。また、変動係数は、約26%であった。参考までに、3月(1994)に測定した結果では、変動係数が約29%であり、それに比較して若干小さめとなった。2月に比較して3月の供試体は、海水中に融解によってできる水道等が存在し気孔が多く存在していた。同様に、Fig.3には、供試体の採集方向距離とp波速度(V_p)との関係を示した。一軸圧縮強度に比較して、ばらつきは小さい。平均値は、2.31(km/sec)、標準偏差は0.186(km/sec)であった。変動係数は、約8%であった。空隙率の変化に対するp波速度(V_p)の変化の割合は、一軸圧縮強度のそれに比較して小さく、平均化されるためと思われる。

Fig.4は、氷の密度に対する一軸圧縮強度の依存性を示している。密度の増大に伴い一軸圧縮強度は増大する傾向を示し、佐伯(1981)の報告と同様の傾向を示す。Fig.5は、p波速度(V_p)と氷の密度の関係を示したものである。密度の増大に伴いわずかではあるがp波速度(V_p)は増大する。

Fig.6とFig.7は、塩分量の変化に対しての一軸圧縮強度とp波速度(V_p)の関係を示している。両図から、一軸圧縮強度とp波速度(V_p)は、塩分量に対する明確な依存性を示していない。

以上、氷の密度、塩分量に対する結果は、既存の報告(佐伯; 1981)と同様の結果となっている。

4 確率分布解析

実際に氷荷重を計算する場合には、通常、氷の強度としては平均値が用いられているが、ここでは、氷の強度のばらつきを取り込むために、一軸圧縮強度の測定データに対する最適な確率分布モデルを検討する。確率量は、採用する確率分布モデルによって異なる計算値が得られる。このため、以下に示す4種類の確率密度関数を用意し、それらの適合性を検定する。一般的に良く用いられている確率密度関数として、正規分布(2母数)、対数正規分布(2母数)、対数正規分布(3母数)、Weibull分布(3母数)をここでは取り扱うこととする。

1) 正規分布 (2母数)

・ 確率密度関数($f_s(x)$)

$$f_s(x) = 1/[(\sigma_x) \cdot (2\pi)^{0.5}] \cdot \exp\{-(x-\mu_x)^2/(2\sigma_x^2)\}$$

・ 母数は、平均値(μ_x)、標準偏差(σ_x)である。

2) 対数正規分布 (2母数)

・ 確率密度関数($f_t(x)$)

$$f_t(x) = 1/[(x \cdot \sigma_y) \cdot (2\pi)^{0.5}] \cdot \exp\{-(y-\mu_y)^2/(2\sigma_y^2)\}$$
$$y = \log(x)$$

・ 母数は、平均値(μ_y)、標準偏差(σ_y)である。

3) 対数正規分布 (3母数)

・ 確率密度関数($f_{tt}(x)$)

$$f_{tt}(x) = 1/[((x-a) \cdot \sigma_y) \cdot (2\pi)^{0.5}] \cdot \exp\{-(y-\mu_y)^2/(2\sigma_y^2)\}$$
$$y = \log(x-a)$$

・ 母数は、平均値(μ_y)、標準偏差(σ_y), (a)である。

4) Weibull分布 (3母数)

・ 確率密度関数($f_{ww}(x)$)

$$f_{ww}(x) = [a/(b-c)] \cdot [(x-c)/(b-c)]^{a-1} \cdot \exp\{-(x-c)/(b-c)^a\}$$

・ 母数は、(a), (b), (c)である。

それぞれの確率密度関数式の母数の推定には、積率法を用いて統一した。一軸圧縮強度の実験データに対しての最適な分布関数を決定するために、実験データを15階級に分類し、度数のヒストグラムと確率密度関数から推定される度数を比較した。また、 χ^2 -検定を行い、数値的に最適な確率密度関数を調べた。

表-1に、それぞれの確率分布モデルに対する母数推定値を示す。また、Fig.8には、実測度数とそれぞれの確率分布モデルから推定された度数の関係を示した。また、確率分布モデルに対する χ_0^2 の計算結果と危険率

(0.05)に対しての χ^2 の値を表-2に示した。 $\chi_0^2 < \chi^2$ を満たすものは、2母数の対数正規分布、3母数の対数正規分布、3母数ワイブル分布であるが、近似度の高いのは3母数の対数正規分布となる計算結果が得られた。

表-1 母数推定値

		圧縮強度 (95年度)
標本全データ数		256
推定母数値	正規分布 (2)	$(\mu_x)=1.230$ $(\sigma_x)=0.320$
	対数正規分布 (2)	$(\mu_y)=0.174$ $(\sigma_y)=0.256$
	対数正規分布 (3)	$(\mu_y)=0.694$ $(\sigma_y)=0.157$ $(a)=-0.796$
	ワイブル分布 (3)	$(a)=2.230$ $(b)=1.319$ $(c)=0.542$

表-2 確率密度関数の適合度検定結果

確率密度関数のタイプ	圧縮強度 (95年度)	
	χ_0^2	χ^2
正規分布 (2)	22.9	21
対数正規分布 (2)	12.4	21
対数正規分布 (3)	9.4	19.68
ワイブル分布 (3)	11.3	19.68

5 まとめ 一様方向に採集した氷供試体を用いた本試験結果から、1) 一軸圧縮強度のばらつきは大きく、変動係数で約26%であった。p波速度のばらつきはそれに比較して小さいが、変動係数で約8%であった。2) 供試体の密度の増大に伴い一軸圧縮強度、p波速度は増大する傾向を示した。塩分量に対しては、明確な依存性を示さなかった。3) 一軸圧縮強度は、用意した確率分布モデルの中では3母数対数正規分布が最も近似度が高かった。これから、構造物に作用する氷荷重の評価に対し、氷の強度のばらつきを入力するときに必要な確率分布モデルを示した。

謝辞 本試験を行うに当たり、サロマ湖漁業協同組合の加藤参事、藤芳研究部長に大変お世話になった。また、北海道大学の佐伯浩教授には、実験全般に関してお世話になりました。記して感謝の意を表します。

参考文献

平山健一、石田宏、堺茂樹、笹本誠、前田智春(1989):氷強度試験条件の効果と試験方法の基準化、海岸工学論文集、第36巻、pp.678-682.

佐伯浩(1981):海水の強度試験方法の確立と強度特性に関する研究、昭和54,55,56年度文部省科学研究費補助金一般研究(B)446137,p.50.

Hunkins,K.(1960):Seismic Studies of sea Ice, Journal of Geophysical Research, Vol.65, NO.10, pp.3459-3472.

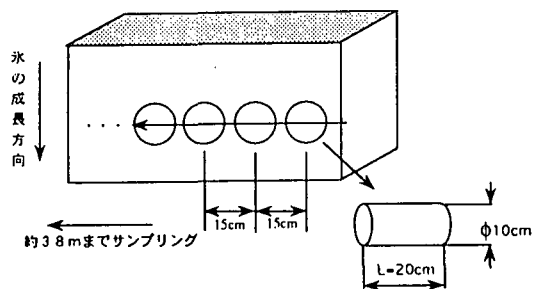


Fig.1 供試体の採集

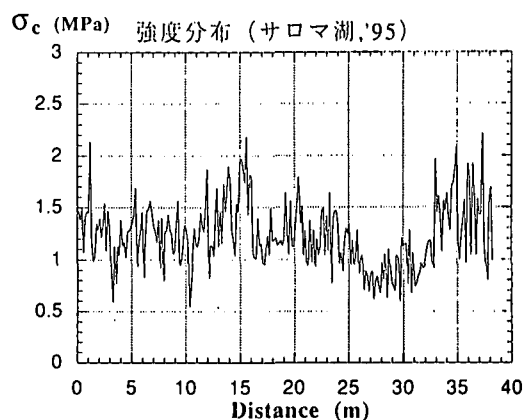


Fig.2 供試体の採集方向距離と一軸圧縮強度との関係

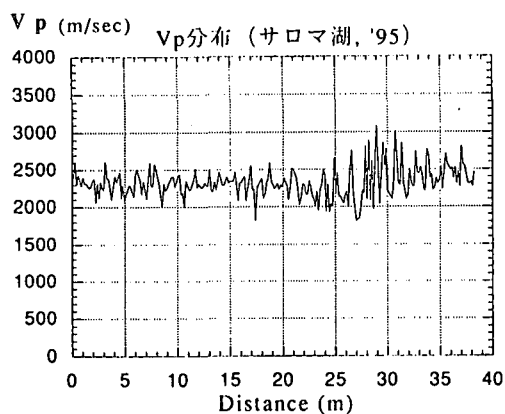


Fig.3 供試体の採集方向距離とp波速度との関係

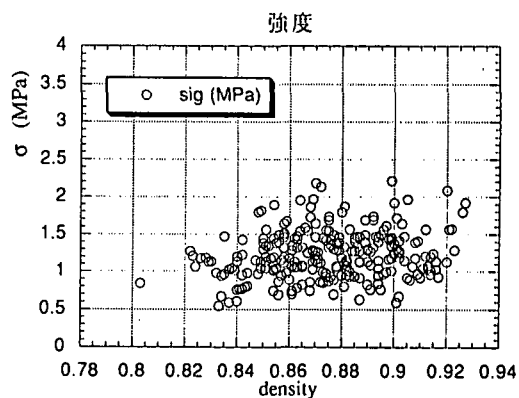


Fig.4 氷の密度と一軸圧縮強度の関係

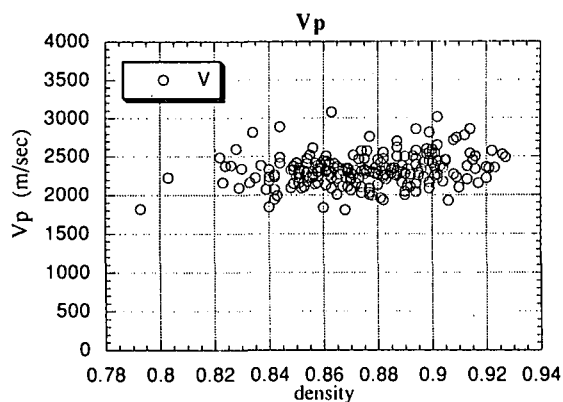


Fig.5 氷の密度とp波速度(Vp)の関係

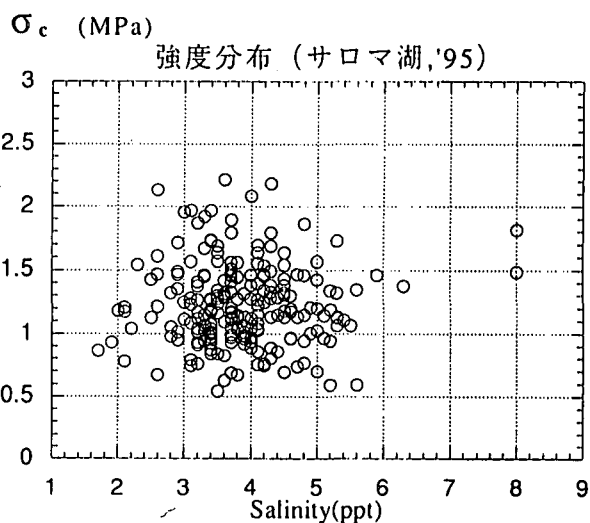


Fig.6 塩分量と一軸圧縮強度の関係

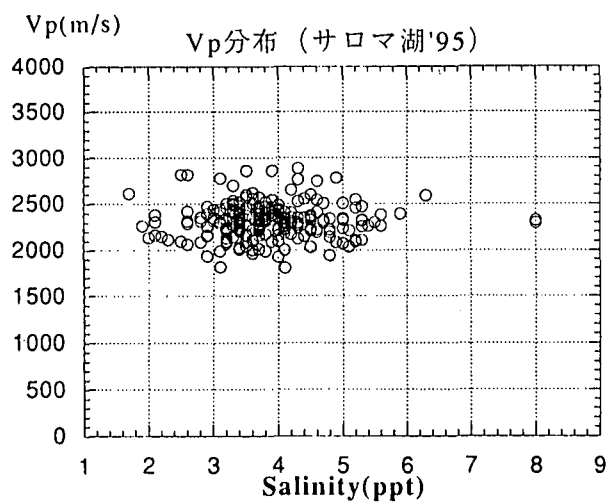


Fig.7 塩分量と p 波速度 (Vp) の関係

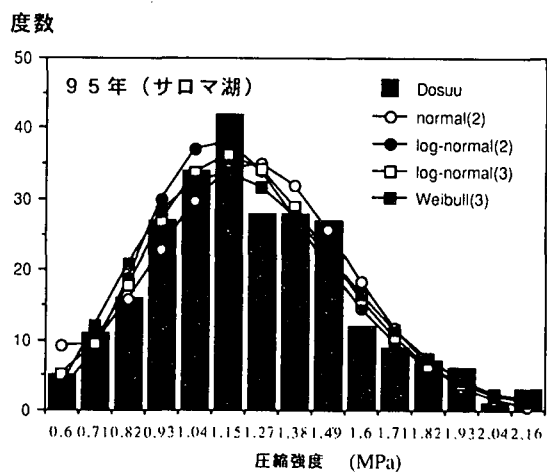


Fig.8 実測度数と確率分布モデルから推定された度数の関係