

野外実験における一年氷の基本強度特性について

STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE ICE SHEET (FIRST - YEAR SEA ICE) IN FIELD INDENTATION TESTS

酒井雅史¹・松下久雄²・高脇 透³・河村宗夫⁴・寺島貴志⁵・竹内貴弘⁶・佐伯 浩⁷

Masafumi SAKAI, Hisao MATSUSHITA, Toru TAKAWAKI, Muneo KAWAMURA, Takashi TERASHIMA, Takahiro TAKEUCHI and Hiroshi SAEKI

¹正会員 工修 大成建設株式会社 技術研究所 自然環境部 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²工博 三井造船株式会社 船舶艦艇事業部 技術開発部 (〒290-0067 市原市八幡海岸通1)

³株式会社三造試験センター 東部事業部 (〒290-0067 市原市八幡海岸通1)

⁴正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-0044 東京都江東区越中島3-4-17)

⁵正会員 工博 パシフィックコンサルタンツ株式会社 北海道支社 (〒060-0807 札幌市北区北7条西1丁目2-6)

⁶正会員 工博 八戸工業大学 工学部 土木工学科 (〒031-0814 八戸市妙大開88-1)

⁷正会員 工博 北海道大学 工学部 土木工学科 (〒001-0013 札幌市北区北13条西8丁目)

Estimation of an ice load exerted on offshore structures in an ice-covered sea area, requires understanding of the strength characteristics of the sea ice in - situ. In this paper, the strength of first-year sea ice at Notoro lake in Hokkaido is discussed in terms of mechanical properties (compression σ_c , bending σ_b , tensile σ_t and shear τ), correlation of those properties and statistical characteristics. The compressive strength ranged from 0.5 to 3.0 MPa, the ratios of each strength to compressive strength are as follows; $\tau / \sigma_c = 0.31$, $\sigma_b / \sigma_c = 0.27$, $\sigma_t / \sigma_c = 0.16$. The probabilistic distribution deduced in the experiment well follows a log-normal distribution (three population parameters) or a Weibull distribution (three population parameters). In addition, the influences of an aspect ratio on the ratio of the first peak value of an ice load over compressive strength on a vertical wall structure model was investigated.

Key Words : First-year sea ice, mechanical properties, statistical characteristics, log-normal distribution, Weibull distribution

1. はじめに

氷海構造物に作用する氷荷重は主に構造物幅、形状、氷厚、氷の強度等に依存し、構造物の設計を行う上で重要な課題となる。特に、強度は荷重推定の指標的な要素として必要不可欠である。しかし、現地氷板には空隙やブラインにより潜在的に構造上の欠陥が存在するため、強度分布にはばらつきがあり、これらが貫入時の氷荷重に影響を及ぼすと考えられる。したがって垂直壁構造物に氷板が作用する時の氷荷重の検討には、氷板の基本強度(圧縮、曲げ、割裂、せん断)特性を把握しておく必要がある。

本研究はオホーツク海沿岸において、自然氷を利用した氷板貫入試験を野外で実施し、発生氷力に対する氷板の破壊現象、氷板の歪領域および氷板の基本的強度特性との関連性に関して現地データを1996～1998年冬期の3カ年に渡り取得してきた。ここでは野外実験で求めた一年氷の基本強度の特性を明らかにし、氷荷重評価手法確立のための基礎データを取りまとめた。

2. 研究の内容

野外実験は3ヶ年にわたり冬季間、北海道網走市能取湖、能取漁港(二見ヶ岡地区)の港内で行われ、貫入試験前に同一氷板より採取した試験氷塊から試験体を成形し、基本的な強度特性試験を実施した。

氷板の破壊状況を模式化すると構造物の貫入に伴い、氷板先端部には氷板圧縮および氷片のくさび状の剥離(せん断)、氷厚に対して氷板のほぼ中央部に割れ(割裂)および氷板全体に曲げが発生する(図-1)。

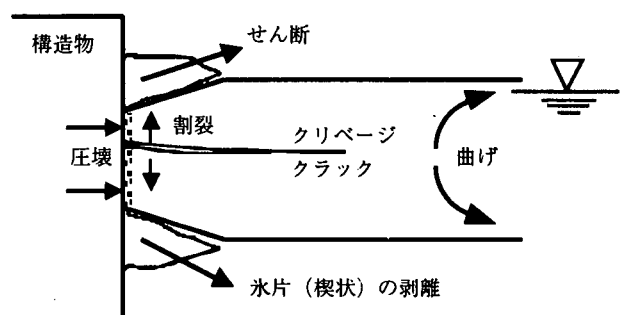


図-1 氷板の破壊様式と発生強度との関係(横断面)

したがって氷板の破壊特性を詳細に検討するための基本強度試験として、1996年、1997年は圧縮、曲げ試験を、1998年は圧縮、曲げに加え、せん断、割裂試験を行った。

計測結果から、圧縮強度の歪速度への依存性、基本強度間の相関関係および圧縮強度の統計的性質を明らかにした。

3. 物理特性

図-2 に海水の密度と塩分量との関係を示す。自然水の密度は0.72から0.89g/cm³の範囲にある。一方、試験水（港内の自然水を取り除き新たに再結水させた海水）の密度は0.85から0.92g/cm³の範囲にあり、自然水よりも大きい。塩分量は両者とも同程度の値（3.2～9.0%）である。このように能取湖の海水が密度、塩分量で大きなばらつきを示すのは、この水域の海水が一年水で短期間で形成されるため、成長過程にあり、結晶組織がまだ強固に固まっていない初生水であるためと考えられる。再結水した試験水の結晶組織は、図-3 に示すように、上方が粒状結晶、中間部および下方が柱状結晶である。一方、自然氷は上方から雪氷、粒状結晶、柱状結晶で構成されている。

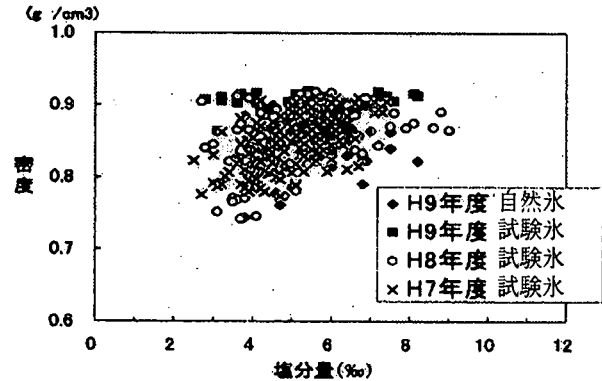


図-2 海水密度と塩分量の関係

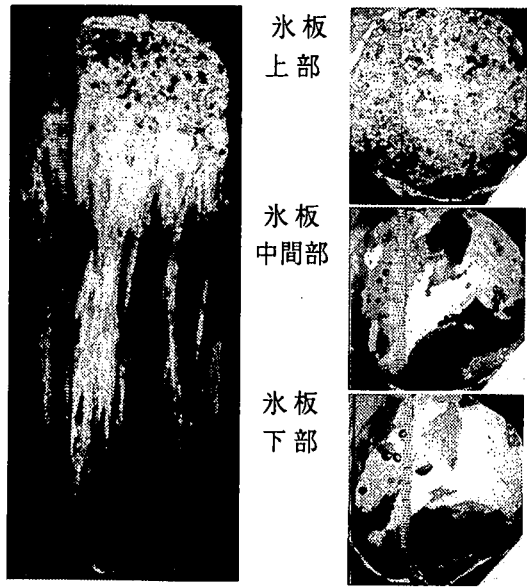


図-3 氷板の結晶構造

4. 基本強度特性

(1) 供試体

海水の基本強度として、圧縮強度（一軸圧縮強度）、曲げ強度、割裂強度、せん断強度を求めた。

各試験体は、図-4 に示すように貫入実験前の試験海水の中央で柱状結晶部分から採取した。試験片形状及び寸法は表-1 に示す通りである。

圧縮強度試験、曲げ強度試験および割裂強度試験には圧縮・曲げ試験機を、せん断強度試験には一面せん断試験機を用いた。また、試験時の供試体温度は、貫入試験時の試験水塊が海水中にあることから海水温度（-3℃）を保った。

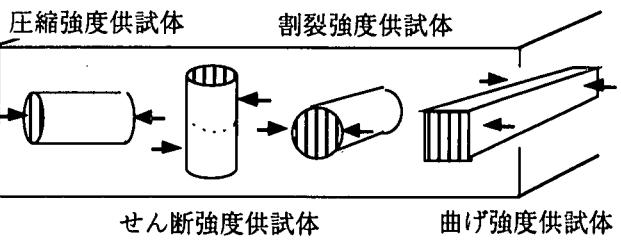


図-4 各種強度供試体の採取状況

表-1 各種供試体の形状、大きさ、本数
(1998年冬期)

供試体	形 状	大きさ(cm)	本 数
圧縮強度	円筒形	直径7.5 x 長さ15	199
せん断強度	円筒形	直径7.5 x 長さ20	30
割裂強度	円筒形	直径7.5 x 長さ10	27
曲げ強度	矩形	7.5角x長さ85 (中央径間長75)	21

(2) 強度への歪速度の影響

既往の研究より、供試体の強度は载荷速度の影響を受けることが明らかとなっている¹⁾。ここでは圧縮強度と歪速度の依存性を把握し、最大荷重の発生領域を確認するために歪速度を10⁻⁴～10⁻² (1/sec)の範囲で変化させて圧縮試験を行った(1997, 1998年試験)。試験結果より、圧縮強度は歪速度が10⁻³ (1/sec) 領域で最大値を示す。また、計測された圧縮弾性率は歪速度に影響されず、100～400MPa (平均200MPa) を示した(図-5)。

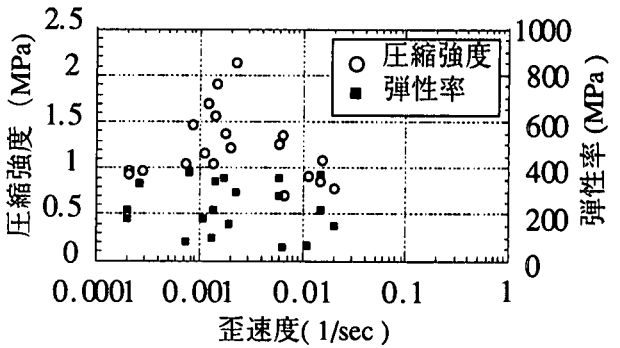


図-5 圧縮強度と歪速度の関係

この計測値は一般的な海水の弾性率約1,000MPaより大幅に小さく、能取湖海水の特性といえる。圧縮試験における最大荷重と最大荷重発生後の氷板破壊荷重は歪速度により変化傾向が異なる(図-6)。歪速度が 10^{-3} および 10^{-2} (1/sec)領域では、最大荷重発生後の破壊荷重は急激に減少するが、歪速度が 10^{-4} (1/sec)の場合はほとんど変化がなく、氷板の破壊抵抗が大きい。

この理由は海水の結晶構造に起因する。初生海水の結晶組織はすでに固まっている結晶粒と固まりつつある結晶粒界とで構成される。圧縮方向の外力がゆっくり負荷された状態(歪速度が遅い状態)では、結晶粒が押され結晶粒界がマイクロクラック等である程度変形できる範囲では連続的に全体的な変形が起こる(図-7(a))。

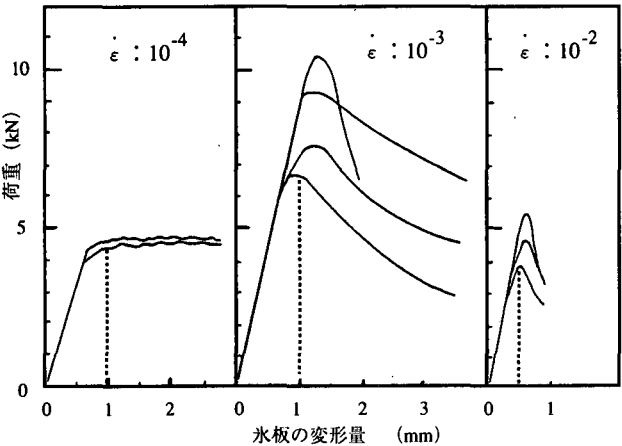


図-6 圧縮試験での荷重と変位の関係

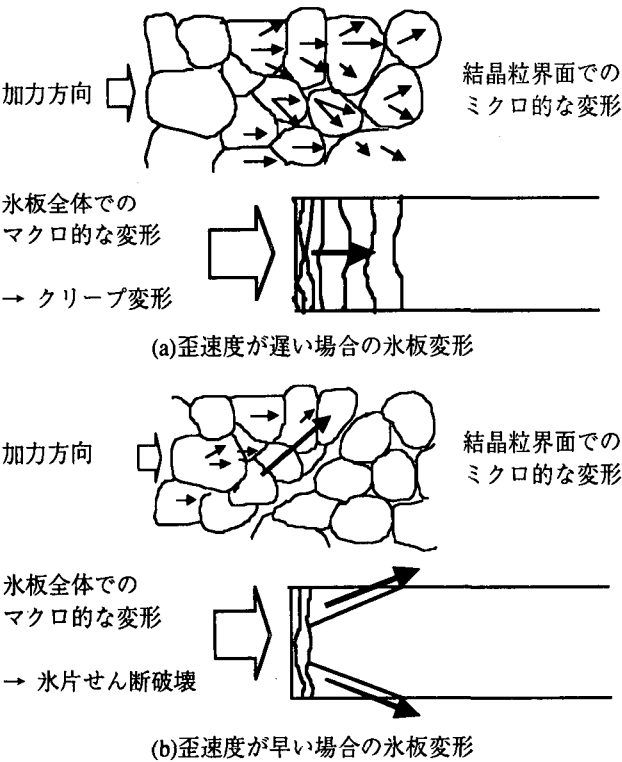


図-7 歪速度による氷板結晶破壊状況の違い

しかし、外力が早く負荷されて結晶粒界の変形が追いつけなくなった場合には、氷板全体が十分に変形する前に、氷板表面がせん断破壊し、くさび状に剥離する(図-7(b))。

一方、せん断強度は、中沢ら²⁾の研究で得られた結果では、歪速度の影響は小さく、ほぼ一定値を示す。圧縮強度は歪速度に大きく依存するが、せん断強度は、特定の断面で強制的にせん断破壊が生じた場合の強度であるため、圧縮強度のようにミクロ的な組織全体の変形挙動が関与する割合が少ないためといえる。

この結果より、 10^{-3} (1/sec)領域が圧縮強度の遷移領域であり、既往の研究成果とも一致することが確認できた。したがって各試験での載荷速度は、最大荷重が発生する歪速度 10^{-3} (1/sec)で一定となるように設定した。

(3) 各強度と圧縮強度との相関

表-2に圧縮強度 σ_c 、曲げ強度 σ_b 、割裂強度 σ_t およびせん断強度 τ の平均値(各供試体数:3~5本)と各強度の圧縮強度との比を示した。一例として、圧縮強度と曲げ強度を比較した結果を図-8に示す。各強度の関係は、 $\sigma_c > \tau \geq \sigma_b > \sigma_t$ の順になっており、各強度と圧縮強度との比は以下のように示される。

$\tau / \sigma_c = 0.31$, $\sigma_b / \sigma_c = 0.27$, $\sigma_t / \sigma_c = 0.16$ (1)
圧縮強度は0.5から3.0MPaの範囲であった。この結果は、既往の研究結果と比較して妥当な値といえる。

表-2 海水の各種強度

試験 ケース	圧縮強度 σ_c (Mpa)			割裂強度 σ_t (Mpa)		せん断強度 τ (Mpa)		曲げ強度 σ_b (Mpa)	
	平均	標準偏差	変動係数	平均	σ_t / σ_c	平均	τ / σ_c	平均	
1	1.09	0.56	0.51	0.12	0.11	0.28	0.26	0.39	
2	1.40	0.31	0.22	0.17	0.12	0.38	0.27	0.33	
3	1.73	0.40	0.23	0.47	0.27	0.55	0.32	0.35	
4	1.56	0.27	0.17	0.24	0.15	0.61	0.39	0.45	
平均	1.445	0.385	0.28	0.25	0.16	0.46	0.31	0.38	

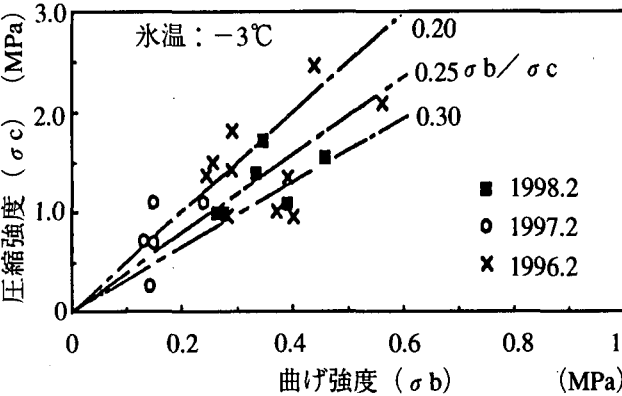


図-8 圧縮強度と曲げ強度の関係

(4) 圧縮強度の統計的性質

氷荷重を算定する場合には、基準強度として平均強度を用いる場合が多い。ここでは氷板の強度のばらつきを考慮し、測定値から最適な氷荷重の確率分布モデルを検討した。適用モデルとしては、正規分布、2母数、3母数対数正規分布および2母数、3母数ワイブル分布の5種類の確率密度関数の適合性を検討した。一軸圧縮強度の計測値に対して、最適な分布関数を決めるために、強度計測値を10階級に分類し、供試体数のヒストグラムと確率密度関数から推定される値を比較した。また、 χ^2 検定により数値的に最適な分布モデルを求めた。カイ2乗値が小さいほどその分布関数への適合性は高い。表-3に各確率分布関数の母数推定値を示す。また、図-9に1998年冬の圧縮強度の頻度分布を示した。さらに表-4に確率分布関数に対するカイ2乗判定結果を示した。この表-4から、3シーズンの結果を総合的に考えると、能取湖海水の圧縮強度分布は3母数対数正規分布、3母数ワイブル分布とよく適合することがわかる。なお、サハリン東側海岸(Chaivo Bay)やサロマ湖での自然氷の圧縮強度分布が3母数対数正規分布と良く適合することが正木³⁾、竹内⁴⁾により報告されている。圧縮強度のばらつきの原因としては、氷の結晶組織の不均一性、結晶粒大きさのばらつき、密度や塩分量に関連した空隙やブライン量のばらつきが考えられる。

表-3 各年の圧縮強度の統計分布結果

試験時期		1996年冬期	1997年冬期	1998年冬期
供試体数		159	139	199
正規分布	平均(Mpa)	1.5	0.81	1.28
	標準偏差(MPa)	0.55	1.28	0.43
2母数対数正規分布	平均(Mpa)	0.34	-0.31	0.2
	標準偏差(MPa)	0.35	0.44	0.11
3母数対数正規分布	平均(Mpa)	1.12	0.4	1.25
	標準偏差(MPa)	0.17	0.24	0.01
2母数ワイブル分布	a	-1.61	-0.73	-2.23
	b	2.19	1.73	2.38
3母数ワイブル分布	a	1.69	0.91	1.45
	b	2.13	1.82	2.44
3母数ワイブル分布	a	1.64	0.91	1.41
	c	0.39	0.05	0.3

正規分布： $f(x)=1/(S*(2\pi)^{0.5}*\exp(-(x-m)^2/(2S^2)))$
 3母数対数正規分布： $f(x)=1/(((x-a)*S)*(2\pi)^{0.5}*\exp(-(x-m)^2/(2S^2)))$
 3母数ワイブル分布： $f(x)=(a/(b-c))*((x-c)/(b-c))^a-1*\exp(-(x-c)/(b-c)a)$
 m：平均値、S：標準偏差、a,b,c：パラメータ

表-4 カイ2乗判定結果

試験時期	供試体数	χ^2 値				
		正規分布	対数正規分布		ワイブル分布	
			母数		母数	
			2	3	2	3
1996	159	41	28	30	38	25
1997	139	235	41	12	19	13
1998	199	40	30	18	34	18

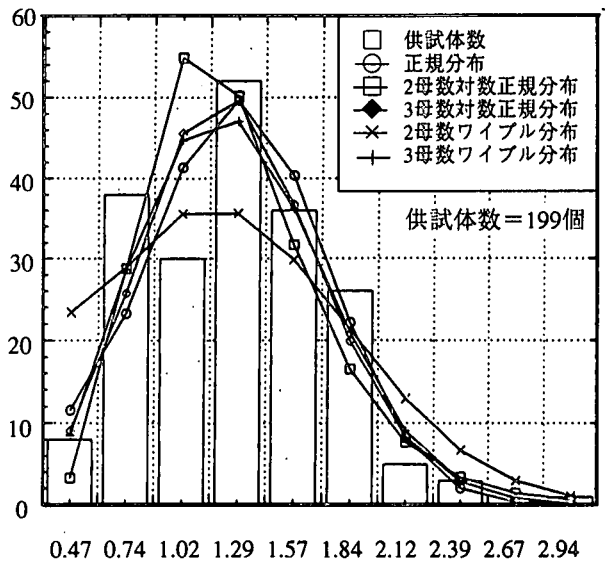


図-9 圧縮強度の頻度分布(1998年冬期試験結果)

5. 貫入試験の初期最大氷力と圧縮強度との関係

表-5に貫入試験結果を示す。図-10に貫入試験での初期最大氷力を圧縮強度で無次元化した値： $\alpha = P_i/(W h \sigma_c)$ とアスペクト比(構造物幅W/氷厚h)との関係を示す。アスペクト比が10以下では圧縮強度を基準とした無次元値 α は1~2程度を示す。アスペクト比10以上では無次元値は1以下となる。アスペクト比が小さくなると無次元値 α が大きくなる理由は、幅に比して氷厚が大きくなると構造物の貫入方向への氷板変形に対して横(水平)方向の変形拘束が大きくなり、貫入板端部でも氷板への応力集中が顕著になるためと考えられる。

表-5 貫入試験結果

Year	W (cm)	h (cm)	V (cm/s)	W/h	P _i (Mpa)	σ_c (MPa)	P _i / σ_c
1996.2	150	12.0	0.30	12.5	0.25	1.36	0.18
	300	12.0	0.60	25.0	0.35	1.89	0.19
	300	24.0	0.60	12.5	0.8	1.82	0.44
1997.2	450	16.0	0.96	28.1	0.45	1.21	0.37
	600	13.3	1.28	45.1	0.56	0.72	0.78
	600	27.0	1.24	22.2	0.8	0.97	0.82
1998.2	150	24.1	0.30	6.2	0.79	1	0.79
	60	45.1	0.30	1.3	2.34	1.11	2.11
	150	23.8	0.30	6.3	2.84	1.56	1.82

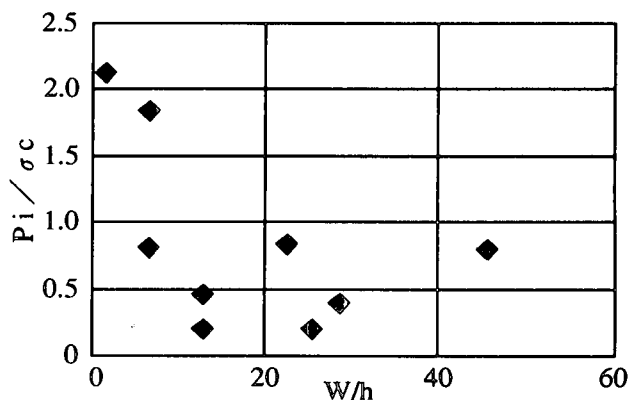


図-10 無次元氷力とアスペクト比の関係

6. まとめ

現地計測結果に基づき、能取湖海水（一年氷）の物理特性、基本強度特性および垂直壁構造物モデルでの貫入時の初期最大氷力と圧縮強度の比に対するアスペクト比の影響を明らかにした。以下に主な結果をまとめて示す。

- (1) 能取湖の一年氷は密度、塩分量とも大きなばらつきを持ち、密度は $0.72 \sim 0.92 \text{ g/cm}^3$ 、塩分量は $3.2 \sim 9.0 \%$ を示した。
- (2) 圧縮強度 σ_c は既往の研究¹⁾と同様に歪速度 $=10^{-3}$ (1/sec)領域で最大値が発生した。この領域は氷板破壊の遷移領域であり、歪速度が 10^{-3} (1/sec)より小さければ氷板はクリープ変形を生じ、 10^{-3} (1/sec)以上であればクラックが瞬間的に発生し、氷板は脆性的に破壊する。
- (3) 能取湖海水(一年氷)の基本強度特性を明確にした。曲げ強度 σ_b 、割裂強度 σ_t 、せん断強度 τ の各強度の大小関係は $\sigma_c > \tau \geq \sigma_b > \sigma_t$ の順である。また圧縮強度を基準とした場合の各強度間の関係は以下ようになった。
$$\tau/\sigma_c \doteq 0.31, \sigma_b/\sigma_c \doteq 0.27, \sigma_t/\sigma_c \doteq 0.16$$
基準となる圧縮強度 σ_c は0.5から3.0 MPaの範囲であった。この結果は既往の研究と比較しても妥当な値である。
- (4) 圧縮強度の確率密度分布は「3母数対数正規分布」や「3母数ワイブル分布」で近似できる。この結果は正木らの報告³⁾や竹内らによるサロマ湖海水に対する現地試験⁴⁾と同様の傾向を示した。
- (5) 貫入実験での初期最大氷力を圧縮強度で無次元化した値： $\alpha = P/(Wh\sigma_c)$ は、アスペクト比（構造物幅 W /氷厚 h ）が約10以下では2程度であるがアスペクト比が約10以上では α 値は1以下となった。

したがって、構造物に作用する氷荷重の評価において指標となる海水強度は、強度のばらつきを考慮した最適な確率分布モデルの適用と基本強度の相関関係を把握することにより、推定することが可能となる。

謝辞

本研究は（社）日本海洋開発産業協会（JOIA）の「海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究」のもと平成7年度～平成9年度に渡り、現地での中規模野外実験において実施されたものであり、ここに関係各位に対して謝辞を表するものである。

参考文献

- 1) 平山, 石田, 堺, 笹本, 前田: 「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, 1989年11月, pp. 678 - 682.
- 2) Saeki H., Ono T., Niu En Zong and Nakazawa N., Experimental Study on Direct Shear Strength of Sea Ice, *Annals of Glaciology* 6, 1985, pp. 218 - 221.
- 3) 正木, 竹内, 松下, 酒井, 佐伯: 「海水の一軸圧縮強度について」, 第12回寒地技術シンポジウム, 1996年11月, pp. 516 - 521.
- 4) 竹内, 赤川, 岩井: 「現地海水板の強度分布特性について」 海洋開発論文集vol.11, pp. 241 - 245, 1995.

(1999.4.19受付)