

海水と海岸・海洋構造物

佐 伯 浩

まえがき

海水の影響を受ける海域は、全海洋面積の10%程度と云われている。しかしこの海水の影響を受ける海域は当然、寒冷地であるため、今までは結氷時期は、ほとんど全ての人間の活動が停止するのが常であった。そのため海水に関する研究も海水の物性面から取り扱い、あるいは地球規模の気象に及ぼす海水の効果等主に理学の面からの研究が主であった。これに対して淡水氷に対する工学的な研究については古くからソビエト、カナダ、アメリカ合衆国等においてなされていた。しかし最近になって海水に対する工学的な研究が世界各国で非常に活発になってきているが、その背景には次のような目的があるためと思われる。(1)最近のエネルギー危機に対応して、寒冷地の海岸・海洋底にその存在が確認されている石油・ガスの採掘装置あるいはそのような地下資源の探査装置の海水に対する設計法を確立する事及び海水に対してより有効で経済的な構造物の開発のため。(2)寒冷地の開発にともなう航路維持のためと、寒冷地国の経済活動の国際化にともなう物資輸送に対する航路維持のため、砕氷船・砕氷貨物船・耐氷船等の効果的設計法を確立するため。(3)海水盤を氷土滑走路・氷上軌道・氷上貯蔵基地等のように交通施設あるいは貯蔵施設等に利用するため。(4)ある限られた海域の海水の動きを養殖漁業等の保護のため制御する必要があるため。ここでは特に海水強度、氷盤の耐荷力それに構造物への氷圧力を取り扱う。

1. 海水の強度

海岸・海洋構造物に作用する海水の力を一般に氷圧力 (ice pressure) あるいは氷力 (ice force) と呼ぶ。海水の強度は構造物の材料強度 (鋼・コンクリート等) に較べてかなり弱いので、構造物に及ぼす海水の力は、海水自体が破壊する時に最大値を示す。このため、海水が構造物に及ぼす力を明確にするためには、海水そのものの強度を知る必要がある。ここでは海水の組成と種々の強度について述べる。

1) 海水の組成

海水は一般に、純氷 (Pure ice)、ブライン (brine) それに気泡 (air bubble) より成り立っている。また一年氷では春の融解期になると氷盤 (ice floe) に融解孔ができて tubular ice となる。このように海水は淡水氷とは異なり、非常に複雑な組成をしているうえ、その性質も結氷開始から解氷するまで時間とともに変化する。ここでは、海水の氷温、単位体積重量、塩分量、空気量、ブライン量の関係について述べる。

海水の供試体の体積、重量、氷温および単位体積重量をそれぞれ、 V (cm³), W (gr), T (°C), それに ρ (gr/cm³) とし、純氷; 気泡, ブライン, ブライン中の塩類, ブライン中の氷それぞれの体積を V_i (cm³), V_A (cm³), V_B (cm³), V_S (cm³), V_w (cm³) とする。また純氷, 氷それに塩類の密度を ρ_i (gr/cm³), ρ_w (gr/cm³) それに ρ_s (gr/cm³) とする。塩類の重量比を r とし, S を海水全体の塩分量 (%) とする。

$$V = V_i + V_B + V_A \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$W = V_i \rho_i + V_w \rho_w + V_S \rho_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$r = V_S \rho_s / V_w \rho_w \quad \dots\dots\dots (3)$$

氷温と τ との間には次の関係が得られている。

$$T = \alpha \cdot \tau \quad \dots\dots\dots (4)$$

この α については、Assur¹⁾が Nelson と Thompson の結果を整理して $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ が析出する $T > -8.2^\circ\text{C}$ までは $\alpha = -54.11$ で示される。

$$V_B = V_w + V_s \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$V_s \cdot \rho_s = 0.001 \cdot S \cdot W \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\rho_i = 0.91680 - 0.00014 \cdot T \quad \dots\dots\dots (7)$$

上式より、 V_A および V_B は次式の如く得られる。

$$\frac{V_B}{V} = S \cdot \rho \left(\frac{\alpha}{\rho_w T} + \frac{1}{\rho_s} \right) \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{V_A}{V} = 1 - \frac{\rho}{\rho_i} + S \cdot \rho \left\{ \frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_s} + \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w} \right) \frac{\alpha}{T} \right\} \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (9)$$

上式中で $\rho_w = 1 \text{ gr/cm}^3$, $\rho_s = 2.17 \text{ gr/cm}^3$, $\alpha = -54.11$ であるので、 V_B/V , V_A/V は T , S および ρ の関数となる事が判る。ところで海水の強度は純水の部分のみが受け持つ事から、 $V_A + V_B$ の量が増すと強度が低下する事になるが、これは間接的には T , ρ , S が強度に影響を及ぼす事になる。

2) 海水の構造

図-1 は海水の構造の典型的な図²⁾である。一般に海水の表面は雪で覆われる事が多いし、また結氷時に降雪があると、それを取り込んで結氷する。そのため図中の Infiltrated Snow Ice と呼ばれる領域は結晶構造が粒状をなし、この氷のことを普通 granular ice と呼んでいる。また columnar zone の氷は海水が下方に向かって成長するため、すじ状をなしている。またこの成長の方向は必ずしも完全な鉛直下方とは限らず、種々の方向を持って下方に成長する。水平断面図からも明らかなように同一の成長方向を持ち、

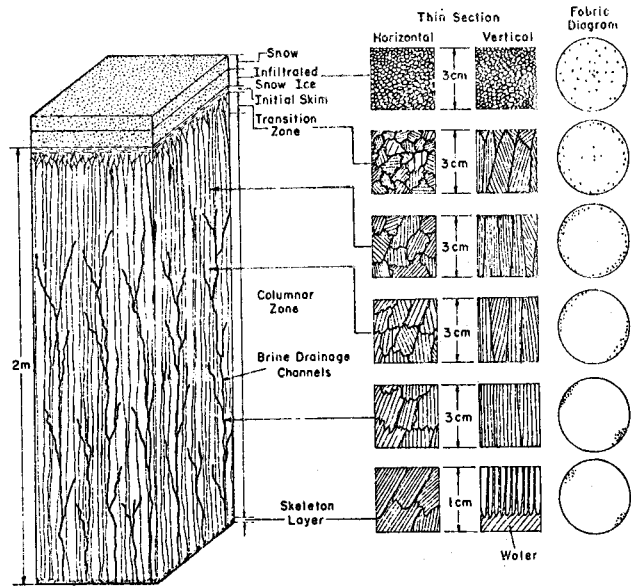


図-1 海水の構造 Schwarz (1977)

結晶軸がそろっているものが一つの束を形成しているがこれを grain と呼び、このような断面を持つ氷を mosaic ice と呼んでいる³⁾。図-2 はオホーツク海の海水の鉛直断面の写真で上層が granular ice , 下層が columnar ice であり区別がはつきりしている。またこの columnar zone の水平断面の写真が図-3 であり、グレインがはっきりしていて、mosaic ice と呼ばれる。氷盤の最下面是氷厚の増加時には、結晶が成長中で、細い針状の氷が数センチの長さに伸びているが、この領

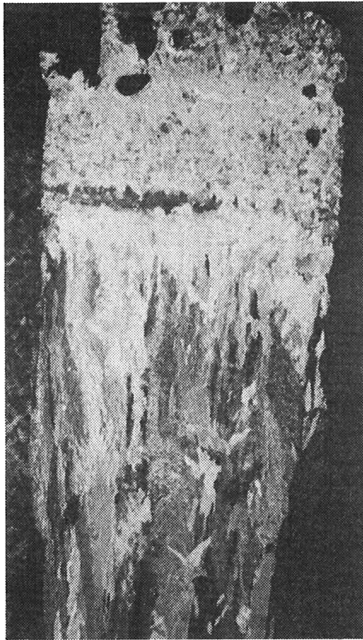


図-2 海水の鉛直断面

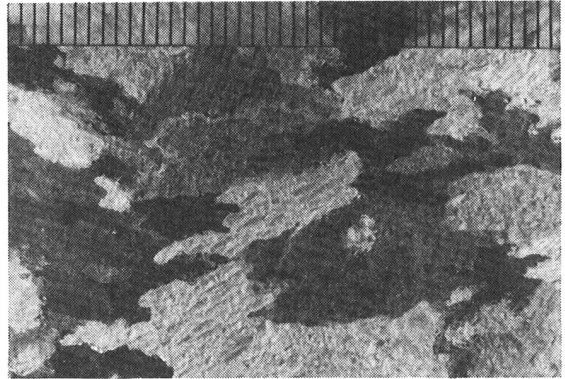


図-3 海水の横断面（モザイク氷）

域（skeleton layer）は空隙率が大きく、海水の強度にはほとんど寄与しない領域であるので、現地実験の氷厚の測定には注意を要する。また図中の drainage channel は氷盤の表面の融解によってできる水みちであり、直径が 1 cm 程度である。

3) 一軸圧縮強度

氷に対する標準強度試験方法が決められていないため、各研究者によって供試体の形、大きさそれに試験方法が異なっているのが実状であるが、1975 年の IAHR の氷に関するシンポジウム⁴⁾において、IAHR の氷の試験方法に関する委員会が一軸圧縮強度及び引張強度の試験方法に対する基本的な考えを示した。それによると一軸圧縮強度試験については、円筒供試体が適当で、その径は 7 ～ 10 cm で、高さは径の 2.5 倍程度が適当としている。また新しい方法として荷重板を硬質ウレタン⁵⁾がよりよい結果を示すとの報告をしている。以下に海水の強度特性について述べる。

（a）海水の一軸圧縮強度 σ_c は stress rate $\dot{\sigma}_c$ や strain rate $\dot{\epsilon}$ によって変化する事が知られている。これは淡水氷についてはより古くから Gold や Frederking⁶⁾の実験により知られていた。海水については Schwarz^{2) 7)}が Baltic 海の氷を用いて実験を行っているし、佐伯等もオホーツク海の海水を用いて実験を行っている。Schwarz の結果を図-4 に示し、図-5 は佐伯等⁸⁾の結果である。

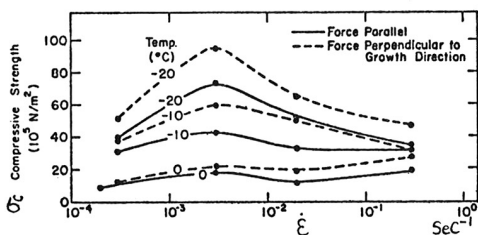


図-4 歪速度と σ_c の関係 Schwarz (1977)

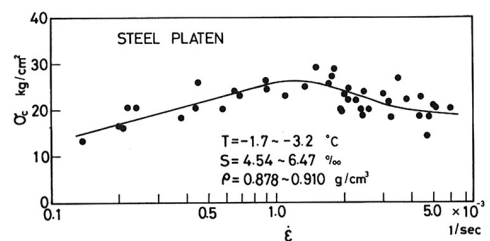


図-5 歪速度と σ_c の関係 Saeki et al (1978)

両実験結果より、海水においては $\dot{\epsilon} \div 10^{-8} \text{sec}^{-1}$ 程度の時 σ_c は最も強い強度を示す。Michel⁹⁾等は Indentation test を行い、図-6 に示すように $\dot{\epsilon} < 4 \times 10^{-4} \text{sec}^{-1}$ の範囲を Ductile Region, $\dot{\epsilon} > 10^{-2} \text{sec}^{-1}$ の範囲を Brittle Region と名づけ、この2領域にはさまれる領域を Transition Region としている。この Test でも peak は $\dot{\epsilon} \div 10^{-3}$ 程度となっている。次に Stress rate $\dot{\sigma}_c$ と強度の関係について Peyton¹⁰⁾ 及び佐伯等⁸⁾ によって実験がなされている。図-7 に Peyton の結果を示すが、 $\dot{\sigma}_c$ によって σ_c が大きく変化する。最大の強度は $\dot{\sigma}_c \div 2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の時に発生するが佐伯等の実験では、これほど明瞭なピークは見られない。以上述べたように $\dot{\epsilon}$ や $\dot{\sigma}_c$ の変化に対して σ_c がピークを持つのが氷の強度の特徴といえる。

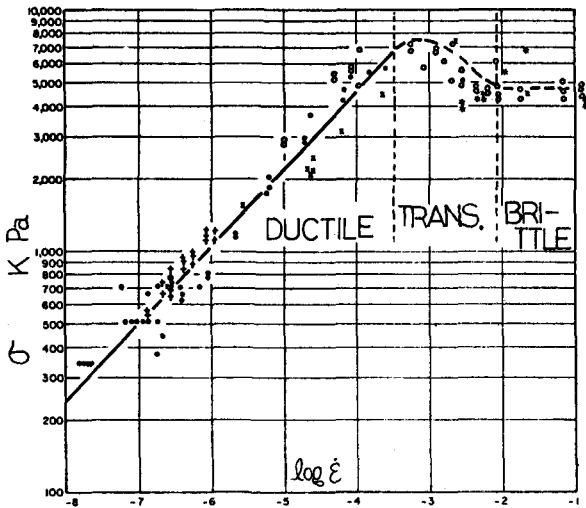


図-6 Indentation Test における歪速度の効果
Michel (1977)

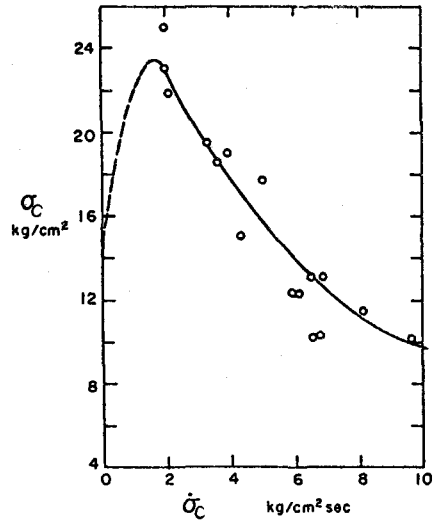


図-7 荷重速度とσ_cの関係
Peyton (1966)

b) 海水の組成の所でも述べたように、海水の強度に直接寄与するのは、純水の部分である。また水温も結晶間の強度に影響を与える事から、 σ_c に影響する因子は次式で与えられる。

$$\sigma_c = f\left(\frac{V_i}{V}, T\right) = f\left(\frac{V_A + V_B}{V}, T\right) = f(S, \rho, T) \quad \dots\dots\dots (10)$$

一般に密度の大きい海水の強度については、ブライン量が最大の影響因子である事はよく知られている。図-8 に Peyton¹⁰⁾ の結果を示す。図中の σ_R と一軸圧縮強度 σ_c の間には次の関係がある

$$\sigma_c = \sigma_R \cdot (\dot{\sigma}_c)^{0.22} \quad \dots\dots\dots (11)$$

高密度の海水では、試験方法が同一条件であるならブラインの体積のみで決まる事を示している。これに対して佐伯等は drainage channel の発達した、密度の小さい海水に対

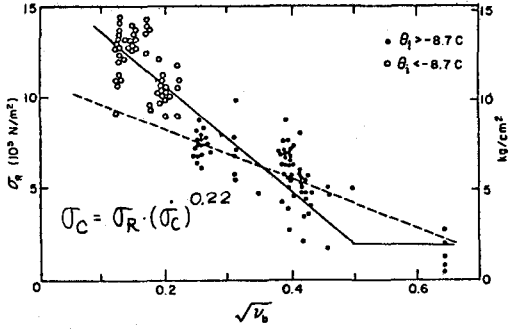


図-8 ブライン量とσ_Rの関係
Peyton (1966)

しては図-9に示すように、 σ_c が T と ρ で表わされる事を示したが、この領域では T と V_A/V あるいは $(V_A + V_B)/V$ でも表わされる。なお σ_c が V_B のみで表わされるのは $V_B/V_A > 2.2$ の範囲に限られるようである。

4) 曲げ強度

海水の曲げ強度 σ_f は、氷盤の耐荷力を求める場合や、Cone 型構造物や斜杭に作用する水圧力を求める場合に是非必要である。この曲げ強度についての標準試験方法は未だ決められていない状態であるが、現場試験法と

しては実験の氷盤を□の字型に切り取って Cantilever として試験する方法があるし、より精度の高い試験方法としては、実際の氷盤より氷を切り出し、Cantilever あるいは単純桁として試験する方法が今まで行われてきた。海水の曲げ強度 σ_f も Stress rate $\dot{\sigma}_f$ の影響を受ける事が知られているが、田畑¹¹⁾等は現場の Cantilever test から σ_f と $\dot{\sigma}_f$ の関係を得ている。その結果を図-10に示す。これによると、 $\dot{\sigma}_f < 1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ では σ_f は一定値を示すが、 $\dot{\sigma}_f > 1.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ では σ_f の増大とともに σ_f は増大している。しかし、この試験では $\dot{\sigma}_f$ が大きくなると海水が仮想質量力を受ける事により σ_f が増大するものとも考えられる。佐伯等のごく最近の実験によると $\dot{\sigma}_f$ のかなり広い範囲にわたって σ_f はほぼ一定値を示す事が明らかとなった。過去の実験結果をまとめたものが図-11である。この σ_f もブライン量と強い相関がある事が判る。 $\sqrt{V_b} \geq 0.33$ の範囲では $\sigma_f \div 2 \text{ kg/cm}^2$ である。この他 Dykins¹²⁾は氷厚 2.4 m の氷盤を用いて試験を行っているし、佐伯等は単純桁で曲げ強度試験を行い、供試体の寸法効果、強度特性を調べている。次に図-8と図-11より $\dot{\sigma}_c = 2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の時の σ_c と σ_f の関係を調べたものが図-12である。これに

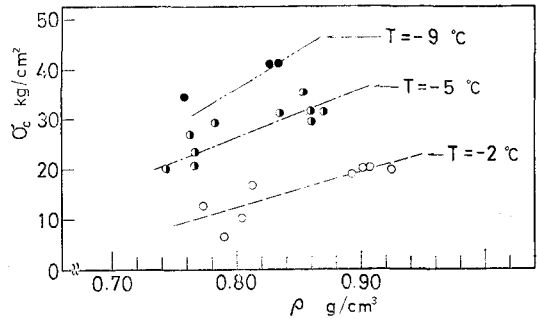


図-9 σ_c と ρ と T の関係 Saeki et al (1978)

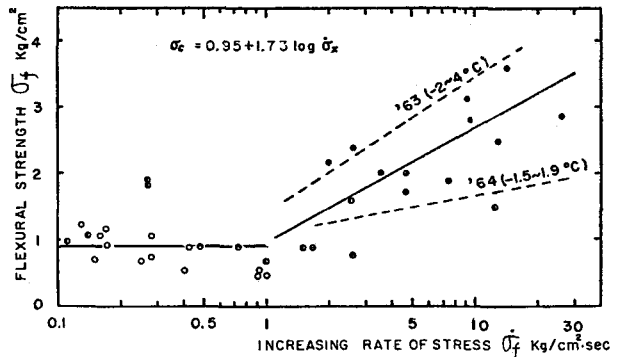


図-10 荷重速度と σ_f の関係 田畑 (1966)

図-11は、 σ_f がブライン量と強い相関がある事が判る。 $\sqrt{V_b} \geq 0.33$ の範囲では $\sigma_f \div 2 \text{ kg/cm}^2$ である。この他 Dykins¹²⁾は氷厚 2.4 m の氷盤を用いて試験を行っているし、佐伯等は単純桁で曲げ強度試験を行い、供試体の寸法効果、強度特性を調べている。次に図-8と図-11より $\dot{\sigma}_c = 2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の時の σ_c と σ_f の関係を調べたものが図-12である。これに

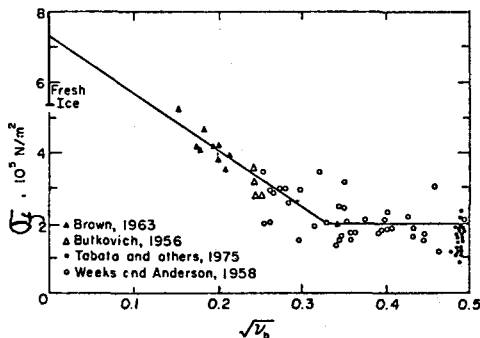


図-11 ブライン量と σ_f の関係 Schwarz (1977)

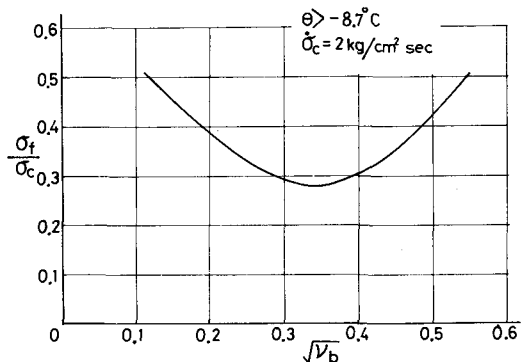


図-12 σ_f/σ_c とブライン量の関係

よると σ_f/σ_c は0.23～0.4の範囲となるが、低密度の海水に対する佐伯等の結果では $\sigma_f/\sigma_c \div 0.25$ となっている。

5) 海水の弾性定数

海水の物性値のうち、我々にとって重要なヤング率 E およびポアソン比 ν について述べる。これらの物性値は海水盤の弾性解析には是非とも必要な値である。

(a) ヤング率 E ヤング率の測定には振動法による動的測定法と単純桁か片持梁に荷重をかけて、その荷重と撓み量から求める方法、それに圧縮強度試験における荷重強度と歪の関係から求める方法がある。図-13にAnderson¹³⁾が振動法によって求めた結果を示す。これによると E はブライン量に関係している事が判るが、 E の値は $E = 10^{10} \sim 10^{11}$ dyne/cm² = $10^4 \sim 10^5$ kg/cm²である。田畑¹⁴⁾は E を ρ と V_A/V で示しているが、これによると、 $E = 5 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$ kg/cm²となっている。海水の構造の複雑さから E の値はかなり変動するが、石田¹⁵⁾の実験から明らかなように試験方法によっても E の値は異なった値を示すが、一般に振動法による E の値が静的な方法により求めた E より大きい値を示す。

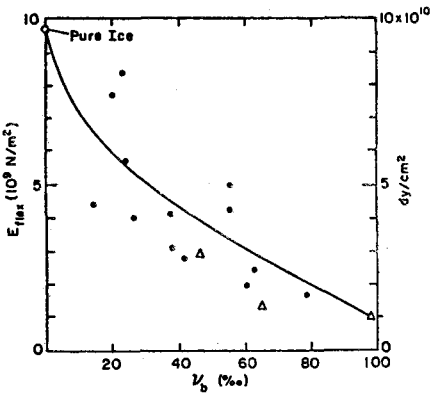


図-13 ブライン量とヤング率の関係
Anderson(1958)

(b) ポアソン比 ν 海水のポアソン比を求める事は非常に困難を伴うが、Oliver¹⁶⁾等は $\nu = 0.32 \sim 0.37$ の値を得ているし、Peschansky は $\nu = 0.29$ 程度の値を得ている。その他、石田¹⁷⁾は $\nu = 0.38$ と云う値を現地実験から得ている。しかしこのポアソン比は海水の構造や水温に依存する事が Linkov²⁾や Weeks²⁾の研究から明らかにされているので今後の研究に待つところが大であるが、実用上は $\nu = 1/3$ としてかまわないと思われる。

(c) 海水と構造材料間の摩擦

海水と構造材料間の摩擦

表-1 海水の摩擦係数 Schwarz(1977)

係数は特に砕氷船、Cone

型構造物それに斜杭の設計

には重要である。今までの

実験結果をSchwarz²⁾が表

-1のようにまとめている。

佐伯¹⁸⁾等も海水の摩擦係数

について詳細な実験を行っ

ているが、それによると動

摩擦係数、静止摩擦係数と

もに材料表面の粗さと海水

の強度によって決まる事を

示している。

Investigator	Friction coefficient		Test material	Test temperature °C
	Static	Kinetic		
Arnol'd-Alyab'yev (1938)	0.15-0.25	0.100-0.200	sea ice—stainless steel	—
	0.30-0.35	0.200	sea ice—painted steel	—
Jansson (1956)	0.25	0.100-0.150	sea ice—steel	—
	0.25	0.200	"polar" ice—steel	—
Milano (1962)	0.30-0.50	0.100-0.200		—
Ryvlin and Petrov (1965)	0.15-0.20		sea ice—rusted steel	—
	0.03-0.04		sea ice—wet smooth steel	0
Enkvist (1972)		0.025-0.045	brackish ice (0.9%)—smooth steel	-5
		0.110	brackish ice (0.9%)—rough steel	
		0.090-0.190	snow—smooth steel	
		0.310	snow—rough steel	
		0.030-0.100	wet snow—smooth steel	
		0.140	wet snow—rough steel	
Finke (1972)		0.045-0.065	sea ice—steel	-4.5
Airaksinen (1974)	0.40-0.70	0.070-0.250	sea ice—steel	—
Grothues-Spork (1974)	0.30-0.50	0.120-0.230	sea ice—steel cone	-7

2. 氷盤の耐荷力

氷盤を交通や物資貯蔵に利用する事は古くから行われていた。特にソ連においては冬期河川、湖沼が結氷すると氷上に軌道をしき交通の便に供していたし、第2次世界大戦中、湖水を物資運搬の道路 (Ice-Road) として用いる事によりレニングラード防衛に成功した。また氷盤を航空機の滑走路として用いる事も盛んになってきているし、最近では寒冷地海岸・海洋での石油等の掘削にからんでこの種の研究が非常に活発になってきている。我が国においても、戦前南満州鉄道において久保義光氏^{19), 20)}を中心として氷上軌道に関する膨大な研究がなされた事があるし、北海道のオホーツク沿岸においては冬期の港湾工事において氷盤上に陸上用の重機を乗せて工事を行った例がある。ここでは過去に発表された氷盤の耐荷力に関する研究をまとめた Kerr²¹⁾の研究を中心にして述べる事にする。

1) 無限浮氷盤の耐荷力

液体上に浮んだ等方・等質の弾性板に静的な鉛直方向力 q が図-14 のように作用する時の基本式は次式で示される。

$$D \nabla^4 w + r w = q \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで w は (x, y) 点における板の撓み, r は液体の単位体積重量, D は次式で示される板の曲げ剛性である。また h は板厚である。

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

浮氷盤に鉛直荷重が作用する場合、その盤の破壊の機構は、まず載荷点から数本の放射方向のクラック (radial crack) がはいるがこれを first crack と呼びこの時の載荷荷重を P_{cr} とし、そのあと荷重を増すと載荷点を中心とした同心円状のクラック (circumferential crack) が発生して載荷点近傍が完全に破壊する。この時の載荷荷重を P_f とする。図-14 の状態に対しては Bernshtey²¹⁾ が次のような解を得た。

$$P_{cr} = \sigma_f \cdot h^2 / 3 (1+\nu) C(\alpha) \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中の $C(\alpha)$ は図-15 に示されるもので、 $\alpha = a/\ell$, $\ell = (D/r)^{1/4}$ である。また $q = P/\pi a^2$ である。また同一の問題を久保, Wyman 等が解いているが, Wyman²²⁾ によると (14) 式の $C(\alpha)$ は次式で示される。

$$C(\alpha) = \text{Kei } \alpha / \pi \alpha \quad \dots\dots\dots (15)$$

また, Golushkevich²¹⁾ は辺長 b の正方形に単位面積当り q の荷重が作用する時の P_{cr} を求めているが、その結果は (14) 式に非常に近い値を示しているので、矩形の場合には $a = b/\sqrt{\pi}$ の半径の円と仮定して P_{cr} を求める事ができる。なお Shulman²¹⁾ は同問題に対して近似式を得ている。

$$\left. \begin{aligned} P_{cr} &= 0.375 \sigma_f \{ h^2 + 7.8 \cdot a \cdot (r/E)^{1/4} \cdot h^{5/4} \} \\ 0.07 &< \alpha < 0.65 \quad \nu = 0.3 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

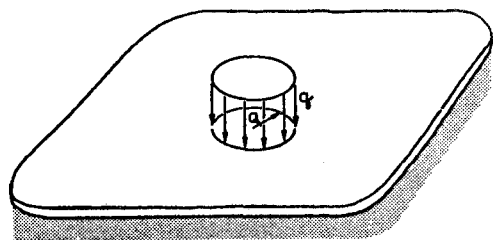


図-14 荷重条件

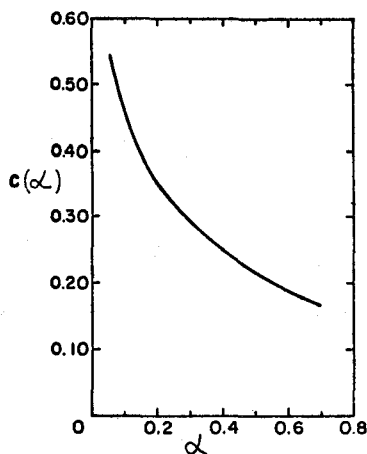


図-15 $C(\alpha)$ のグラフ Kerr(1976)

Shulman と同様に Panfilov²¹⁾ は、 $0.07 < \alpha < 0.65$ の範囲で次の近似式を得ている。

$$P_{cr} = 0.375 (1 + 4.1 \cdot \alpha) \cdot \sigma_f \cdot h^2 \dots\dots\dots (17)$$

2) 半無限浮氷盤の耐荷力

図-16 に状態、すなはち氷盤の edge に載荷した時の耐荷力については, Shapiro & Golushkevich²¹⁾ それに Zylev によって解かれているが, Zylev の解には誤がある事が Kerr によって指摘されている。Shapiro 等による解は次式で示される。

$$P_{cr} = S(\alpha) \cdot \sigma_f \cdot h^2 \dots\dots\dots (18)$$

(18)式 中で $\nu = 0.36$ の時の結果が図-17 で示さる。これに対して Panfilov²¹⁾ は $0.07 < b/\ell < 1.0$ の範囲で次の近似式を示した。

$$P_{cr} = 0.16 \{ 1 + 2.30 \cdot b/\ell \} \sigma_f \cdot h^2 \dots\dots\dots (19)$$

Panfilov は無限、半無限氷盤の耐荷力をそれぞれ $(P_{cr})_{inf.PL.}$ 、 $(P_{cr})_{semi.inf.PL.}$ とする時、図-18 のように近似的に示している。

$$\frac{(P_{cr})_{inf.PL.}}{(P_{cr})_{semi.inf.PL.}} \div 2.45 \dots\dots\dots (20)$$

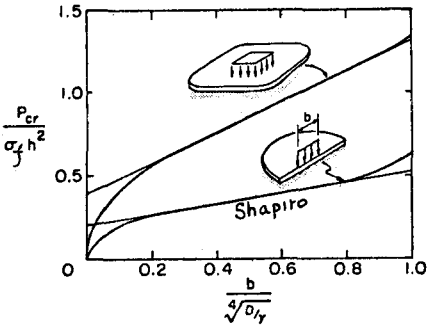


図-17 半無限氷盤と無限氷盤の比較
Kerr(1976)

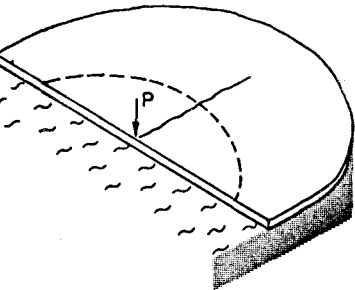


図-16 荷重条件 (edge load)

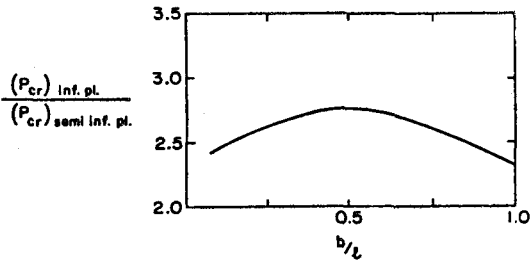


図-18 無限氷盤の P_{cr} と半無限氷盤の P_{cr} の比
Kerr(1976)

3) 載荷時間による耐荷力の変化

海水は粘弾性体であるため、長時間載荷する事により変形を起こし、最終的には破壊する。このように海水盤を粘弾性体として耐荷力を求める試みはなされてはいるが、未だみるべき結論は得られていない。この問題について Panfilov は実験を行っているがその結果を図-19 に示す。図中の $P_f(0)$ は短時間載荷の場合の耐荷力で、 $P_f(t)$ は t 時間載荷後破壊する耐荷力を示す。図-19 の例は短時間載荷の場合の耐荷力の 4 割の荷重でも載荷後 6 時間で氷盤が破壊する事を示している。実際には、海水盤の粘弾性の特性は水温、ブライン量等によって変化する事から図-19 に示される関係が常に成立するわけではない。しかし氷盤上に長時間載荷する場合には、充分な安全率をとる必要がある事を

示している。

4) 実験と理論の比較

無限及び半無限氷盤の耐荷力については、Panfilov²¹⁾が詳細な室内実験（-10℃）とFieldでの試験を行っている。載荷から破壊まで5～20秒で、短時間に破壊させた事に相当し $P_f(0)$ の値を求めた事になる。実験では P_f および P_{cr} が測定されたし、淡水氷及び塩氷（5，10%）について実験された。室内実験では氷厚は $h = 7 \sim 30$ mmで、Fieldではより厚い氷厚で実験された。氷の曲げ強度はCantilever Testによって求められて

いる。無限浮氷盤の耐荷力の実験結果が図-20である。図中のⅠの曲線は(14)式で示されるBernshteynの解である。図中のⅡはPanfilovが求めた実験式を意味しているが工学的に意味がない事が指摘されている。実験値の上限及び下限にsuffix U, Lをつけて式化したものが次式で示されるものである。

$$(P_f/\sigma_f \cdot h^2)_U = 1.5 + 1.1 \cdot (b/\ell) \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$(P_f/\sigma_f \cdot h^2)_L = 1.0 + 1.2 (b/\ell) \quad \dots\dots\dots (22)$$

工学上安全な載荷重 P は次式で示される範囲であるべきである。

$$P < \{ 1.0 + 1.2 (b/\ell) \} \cdot \sigma_f \cdot h^2 \quad \dots\dots\dots (23)$$

このPanfilov 実験結果から次の関係が得られる。

$$(P_f^{test})_L \approx 2 P_{cr} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$P_{cr}^{test} \approx \left(\frac{2}{3}\right) P_f^{test} \quad \dots\dots\dots (25)$$

この両式から次の関係が得られる。

$$P_{cr}^{test} \approx \left(\frac{4}{3}\right) P_{cr} \quad \dots\dots\dots (26)$$

この理由は、 σ_f の求め方によるものでCantilever Testで下方に向かって荷重をかけているので表面の σ_f を用いている事と、氷盤内の応力分布を直線と仮定している事によるものである。

次に半無限浮氷盤のedgeに載荷された時の耐荷力についてのPanfilovの結果を図-21に示す。図中のⅠはShapiro等の求めた理論値である。実験値の上・下限の式は次式で示される。

$$(P_f/\sigma_f \cdot h^2)_U = 0.58 + 0.27 (b/\ell) \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$(P_f/\sigma_f \cdot h^2)_L = 0.35 + 0.39 (b/\ell) \quad \dots\dots\dots (28)$$

よって工学上安全な耐荷力 P は次式で示される。

$$P < \{ 0.35 + 0.39 (b/\ell) \} \sigma_f \cdot h^2 \quad \dots\dots\dots (29)$$

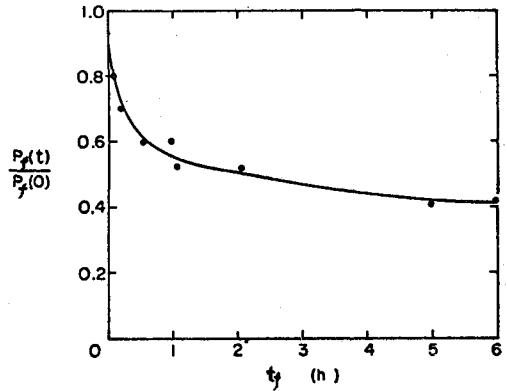


図-19 載荷時間と破壊荷重の関係
Panfilov(1961)

なお (23) , (29) 式で示される安全な耐荷力も、短時間載荷の場合であるので、長時間載荷の場合には十分な安全率をとる必要がある。

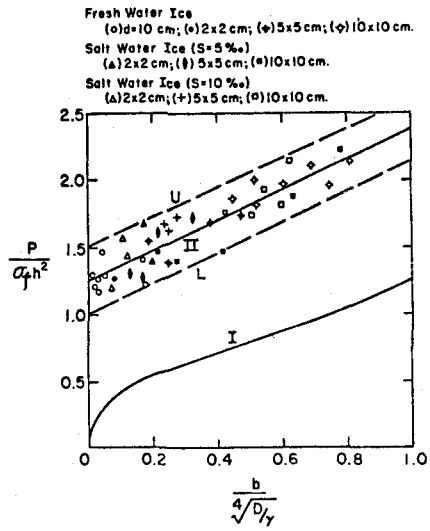


図-20 無限氷盤の耐荷力の実験結果
Panfilov (1960)

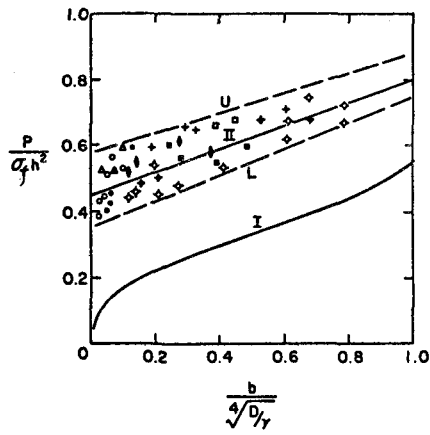


図-21 半無限氷盤の edge に載荷する時の耐荷力の実験結果 Panfilov (1960)

3. 杭構造物に作用する氷圧力

海中に独立して立っている構造物に作用する海水の力については多くの研究者によって氷圧力公式が提案されている。構造物に作用する氷力は一般に氷盤や氷塊 (ice berg) が風や流れによって構造物に押しつけられる事によって構造物に力を及ぼすが、この時は密氷野か非常に大きな氷盤の場合に限られるが、波動や強い流れが存在する場合には、氷盤の大きさがそれ程大きくなくても衝撃力として構造物に作用する事になる。また構造物の形式によっても氷圧力の作用形態が変わる。²³⁾

1) 経験公式

一般に海水であれ、淡水氷であれ、その強度は構造物の材料の強度に較べて非常に弱いため、構造物に及ぼす最大の力は氷が破壊する時に発生する事になる。そのような考えから氷圧力公式が得られている。ここで、これから用いる記号について説明する。

F : 構造物に作用する氷圧力 (kg) W : 杭幅 (cm) D : 杭径 (cm) h : 氷厚 (cm)

τ_s : 氷のせん断力 (kg/cm²) σ_c : 氷の一軸圧縮強度 (kg/cm²)

$$F = \sigma_c \cdot W \cdot h \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= f \cdot \sigma_c \cdot W \cdot h \\ 0.3 \leq f &\leq 0.7 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (31)$$

(30) 式は AASHO で示されている橋脚に作用する氷圧力であり、 σ_c は適当な強度を用いる事になっているし、形状等にも無関係に用いられる事になっているし、 σ_c の試験方法についても決められていない。また、この式はカナダの bridg code でも用いられていて、 $\sigma_c = 28 \text{ kg/cm}^2$ を用いる事になっている。(31) 式は A . P . I . で使用をすすめている式で、係数 f は杭の形状や構造物と氷の相対速度によって決まるとされているが、その決定法については決められていない。この 2 つの式は実

際的设计に用いられているが、氷の構造物への接触面積 ($W \times h$) に氷の強度 σ_c を乗じたものと解釈できる。(30)式については、Neill²⁵⁾はカナダの河川での実測結果から、過大の氷圧力を示す事を確かめている。また(31)式は f の決定法は明確ではないが、いくつかの実測結果から(30)式が過大である事から係数 f を導入したものであると思われる。以上の事から、この2つの式を使用する事には疑問が残る。

2) 半実験氷圧力公式

これは理論と関連する実験結果から氷圧力公式を導びいたもので、この種の研究の草分けはKorzavin^{9) 26)}である。Korzavin は河水を用いて Indentation Test を行い、一軸圧縮強度と Indentation Test による強度の比較実験を行い、また形状効果、接触状況も考慮して次式を得た。

$$F = I \cdot m \cdot K \cdot \sigma_c \cdot W \cdot h \quad \dots\dots\dots (32)$$

この式中 I は貫入係数、 m は形状係数、 K は接解係数と呼ばれている。この I は杭径と応力の分布幅に関するものであり、幅のせまい構造物の場合には $I = 2.5$ 、広い幅の場合には $I = 1.0$ をとっているが、Croasdale²⁷⁾はアスペクト比 (W/h) = 1.0 程度で $I = 2.5$ 、それよりはるかに大きいアスペクト比の時は $I = 1.0$ とするのが適当である事を報告している。また形状係数については表-2のように決めているし、接触係数については表-3のように与えられている。この式では、アスペクト比が大きい場合には、(30)式により小さい氷圧力を示す事になる。また(32)式の特徴は氷が速い速度で衝突する時には、接触係数が小さくなるため氷圧力は、ゆるやかに氷が貫入する場合より小さな氷圧力を示す事である。またソ連においては、水理構造物に作用する氷圧力式は、Korzavin の式を簡単化した次式を用いている。

$$F = A \cdot m \cdot \sigma_c \cdot W \cdot h \quad \dots\dots\dots (33)$$

A はソ連国内の気候を考慮した気候係数で 0.75 ~ 2.25 の値を持つ。 m はKorzavin の示した表-2で示される形状係数である。

表-2 形状係数 (Korzavin) Michel (1970)

		
$m=1.0$	$m=0.95$	$60^\circ < \theta < 120^\circ$ $m=0.85 \sqrt{\sin \frac{\theta}{2}}$

表-3 接触係数 (Korzavin) Michel (1970)

Pier width (ft)	Velocity of ice floes, ft/sec		
	1.6	3.3	6.6
10-17	0.70	0.60	0.50
20-27	0.80	0.50	0.40

3) 理論氷圧力公式

Morgenstern²⁷⁾等は杭に接した部分から、45°の楔状のはく離が起こり、これがせん断破壊と仮定して次式を得た。

$$\left. \begin{aligned} F &= N_c \cdot \tau_s \cdot h \cdot W \\ N_c &= 2.0 + 0.707 \cdot (h/W) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (34)$$

これは一般に Danish formula と呼ばれるもので、アスペクト比が小さい場合に適当とされている。佐伯等は、強度試験から次式を得ているので、²⁸⁾(34)式は(36)式のごとく変形される。

$$\tau_s = 0.213 \sigma_c \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$F = 0.213 \{ 2.0 + 0.707 (h/W) \} \sigma_c \cdot W \cdot h \quad \dots\dots\dots (36)$$

佐伯等の実験から、氷盤の破壊は必ずしもこの仮定のようなセン断破壊するとは限らない。また、Tryde²⁹⁾は、これと同じような model を仮定して理論氷圧力公式を求めている。

$$F = 0.8 \{ 1 + 1.5 (h/W) \} \cdot \sigma_c \cdot W \cdot h \quad \dots\dots\dots (37)$$

この (36), (37) 式はセン断破壊を仮定して式を求めているが、最近塑性解析によって氷圧力を求める研究が、Croasdale et al.³⁰⁾, Reinicke³²⁾ それに Ralston³¹⁾ によってなされた。解析の容易さから3つの研究とも矩形断面杭の場合を扱っている。Croasdale 等と Reinicke 等の得た理論氷圧力式の計算結果を図-22に示す。図中の Upper Bound 及び Lower Bound は、Drucker 等によって確立された理論によって2つに分けられる事による。これらの塑性解析から得られる理論においては次式で示すように無次元氷圧力はアスペクト比 (W/h) のみの関数となる。

$$F/W \cdot h \cdot \sigma_c = f(W/h) \quad \dots (38)$$

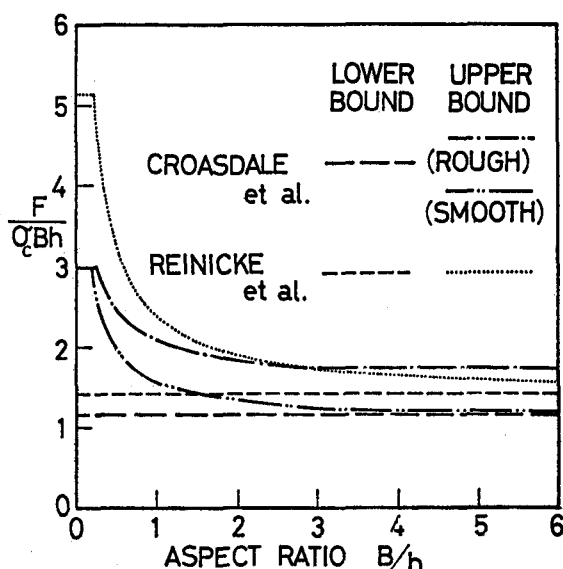


図-22 塑性理論解の比較 佐伯(1979)

4) 氷圧力に関する実験式

直立単独杭に作用する氷圧力に関する詳細な実験は、Afanasyev²⁹⁾, Hirayama³³⁾ & Schwarz, Saeki et al³⁴⁾ によってなされている。Hirayama 等は水槽に淡水氷を張らせ、台車に杭をとりつけて氷盤に貫入させる方法で杭に作用する氷圧力を求めている。実験では氷厚・杭径が小さいため、氷の結晶径を小さくするため Water Spray Method により、結晶径 $D_{cr} = 0.04\text{cm}$ としている。得られた実験式は次式で示される。

$$F = 3.57 D^{\frac{1}{2}} h^{\frac{11}{10}} \sigma_c \quad \text{但し} \quad \frac{D}{h} \leq 12 \quad \dots\dots\dots (39)$$

これに対して佐伯等は、氷圧力測定装置を開発し、それに実際の海氷盤を切り出して、円断面、矩形断面それに交角 90° の楔形断面の杭に作用する氷圧力を測定した。また矩形断面杭に対しては、杭幅 $W = 20, 50, 80\text{cm}$ で Field 試験を行った。その結果を図-23, 24に示す。得られた実験式は次式で示される。

$$F = C \cdot \sqrt{W} \cdot h \cdot \sigma_c \quad \dots\dots\dots (40)$$

ここで C は形状による係数で、矩形断面では 6.8, 円断面杭では 5.0, 交角 90° の楔形では 4.5 とな

り ($\text{cm}^{\frac{1}{2}}$) の次元を有する。式中の σ_c は高さ 20 cm, 径 10 cm の円筒形の供試体で stress rate $\dot{\sigma}_c = 2 \sim 4 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ あるいは, Strain rate $\dot{\epsilon} = 0.001 \sim 0.004 \text{ sec}^{-1}$ での一軸圧縮強度。

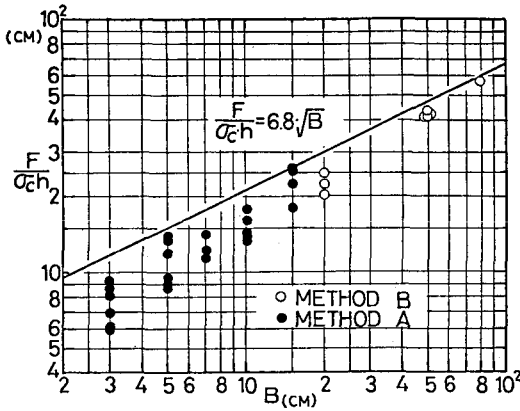


図-23 矩形断面杭に作用する氷力
佐伯 (1977)

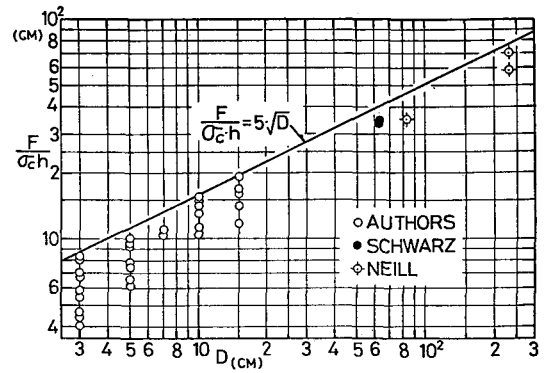


図-24 円断面杭に作用する氷力 佐伯 (1977)

5) 各氷圧力公式と実験値との比較

まず, 実験より得られた Hirayama & Schwarz 等の式と佐伯等の式を比較したものが図-25である。この実験により得られた両式が示す氷圧力はほとんど同一の F を示し, $h > 37 \text{ cm}$ の範囲では Schwarz 等の氷圧力の方が若干大きめの氷圧力を示す。次に佐伯等の実験式と合衆国やカナダで用いられている (30), (31) 式と比較したものが図-26である。 $D > 25 \text{ cm}$ の範囲では AASHO の式は実験式より大きくなり, 杭径が大きくなる程ますますその差は大きくなる。次に図-22 で示される塑性解析から得られる理論式と実験式との比較したものが図-27である。傾向は理論式と非常によく一致しているが特に Croas - dale の smooth な場合の Upper Bound に近い値を示している。しかし図からも明らかなように氷厚の厚い Field Test の値は小さい値を示している。(40) 式を変形すると次式が得られる。

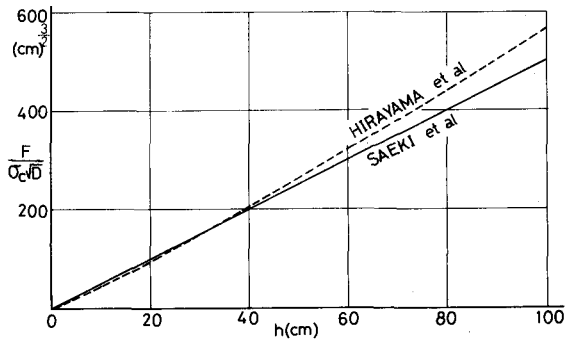


図-25 氷圧力式の比較

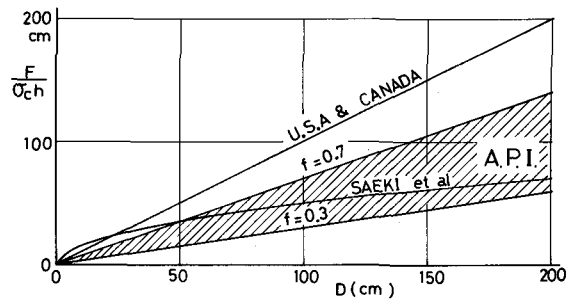


図-26 氷圧力公式の比較

$$F/\sigma_c W h = C \cdot (W/h)^{-\frac{1}{2}} \cdot h^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (41)$$

この式から明らかなように無次元氷圧力は塑性理論により得られる解と違って、アスペクト比と氷厚の絶対値により決まる。同一のアスペクト比でも氷厚が厚い程、無次元氷圧力は小さくなる事を示しているが、これについては実験によって確かめられている事から、塑性理論解も未だ不完全と云える。

6) 衝撃力

氷盤が波浪等によって高速で構造物に衝突する時衝撃力が生じる。Korzhavinの式においては衝突速度が速くなると接触面積が減りFは小さくなる。また Neillは実際の河川の橋脚を利用しての測定結果を得ているが、その時の氷の強度が得られていないので明確ではないが、氷の衝突時のモーメントには無関係となっている。佐伯等は特殊な装置で衝撃力試験を行っているが、その結果を図-28に示す。この時の衝突速度は7.4 m/secである。図からも明らかなように、低速度で得られた場合の氷圧力より若干小さめの氷圧力を示している。これは、海水の一軸圧縮強度がstrainrateの変化に対して、あるいはstress rateの変化に対してPeakを持つ事と高速での衝突時の接触面積に関係していると思われるがより大規模の実験が望まれる。

4. Cone 型構造物に作用する氷圧力

海水の強度については、曲げ強度が圧縮強度に較べて弱いため、海水氷盤を曲げて破壊させるようなタイプの構造形式が設計上有利となる。北欧、カナダ等の海中燈台、河川燈台には、このタイプの構造形式が非常に多い。また、この形式では氷盤と構造物間の摩擦係数も重要な意味を持ってくる事になる。この Cone 型構造物に作用する氷圧力については、未だ実験結果も少なく今後に残された問題も少なくない。

1) 単純な2次元理論

図-29のように Coneの法角を θ とし、摩擦係数を μ とし、水平分力を F_H 、鉛直方向分力を F_V とすると次式が得られる。²⁷⁾

$$F_H = N \sin \theta + \mu N \cos \theta \dots\dots\dots (42)$$

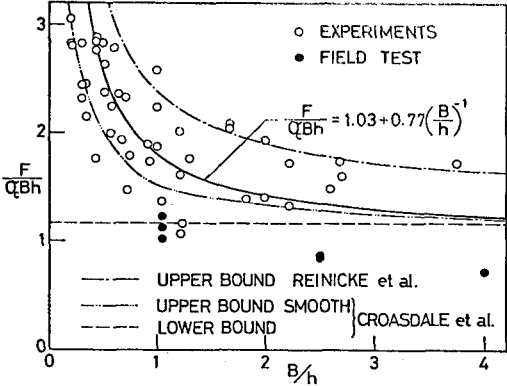


図-27 塑性理論解と実験値の比較

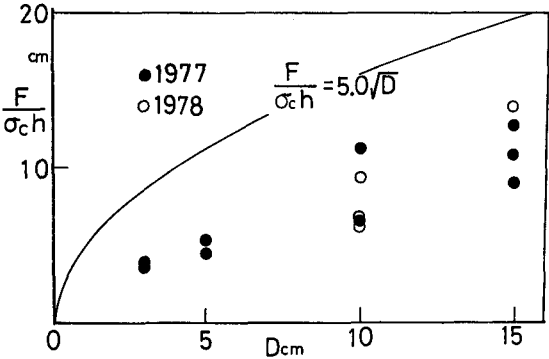


図-28 杭に作用する衝撃力 佐伯(1978)

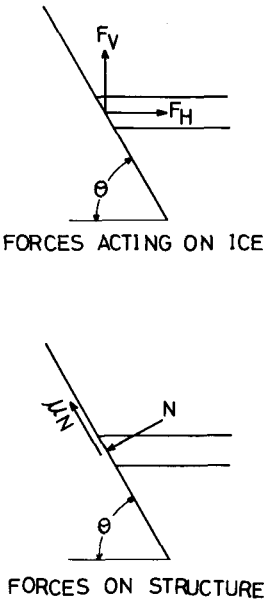


図-29

$$F_V = N \cos \theta - \mu N \sin \theta \quad \dots\dots\dots (43)$$

よって F_H と F_V の間には次のような関係がある。

$$F_H = F_V \left(\frac{\sin \theta + \mu \cos \theta}{\cos \theta - \mu \sin \theta} \right) \quad \dots\dots\dots (44)$$

ここで最大の F_V は半無限氷盤の耐荷力と考えられる。厳密には F_H の軸力も考慮せねばならないが、ここでは無視する。耐荷力は (27) 式で示される事から次式を得る。

$$F_V = \left\{ 0.58 + 0.27 \frac{b}{\ell} \right\} \sigma_f \cdot h^2 \quad \dots\dots\dots (45)$$

よって F_H は次式の如くなる。

$$F_H = \left\{ 0.58 + 0.27 \frac{b}{\ell} \right\} \sigma_f \cdot h^2 \left(\frac{\sin \theta + \mu \cos \theta}{\cos \theta - \mu \sin \theta} \right) \quad \dots\dots\dots (46)$$

2) Ralston^{27) 34)} は Cone 型構造物に作用する氷圧力を塑性解析から次式のような解を得た。

$$F_H = A_4 \{ A_1 \sigma_f h^2 + A_2 \rho_w g h D^2 + A_3 \rho_w g h (D^2 - D_T^2) \} \quad \dots\dots (47)$$

$$F_V = B_1 \cdot F_H + B_2 \rho_w g h (D^2 - D_T^2) \quad \dots (48)$$

式中で、 D は氷盤接触点の径、 D_T は構造物 TOP の径であり、 A_1 と A_2 は $(\rho_w \cdot g \cdot D^2 / \sigma_f \cdot h)$ の関数であり、 A_3 、 A_4 、 B_1 、 B_2 は、 θ と μ のみの関数であり図-30～34に示す。この式には Cone 上に ride up する事による効果も含まれている。この Ralston の式によると、氷盤を破壊する事による力と ride up 等に起因する力は、ほぼ同じオーダーの大きさである。

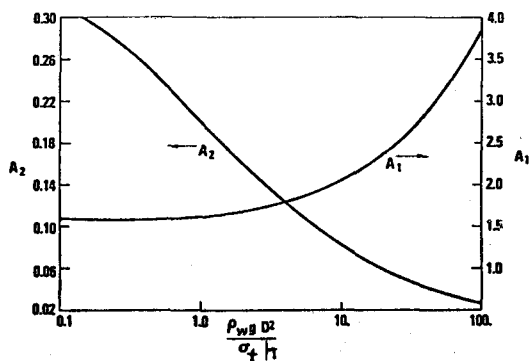


図-30 Ralston(1977)

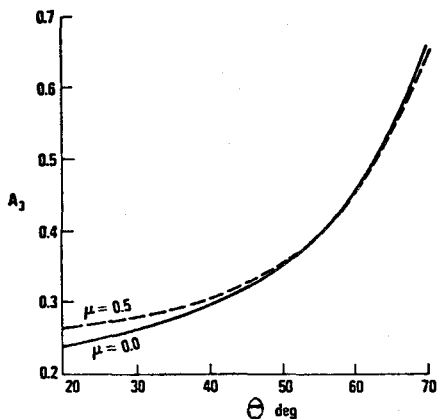


図-31 Ralston(1977)

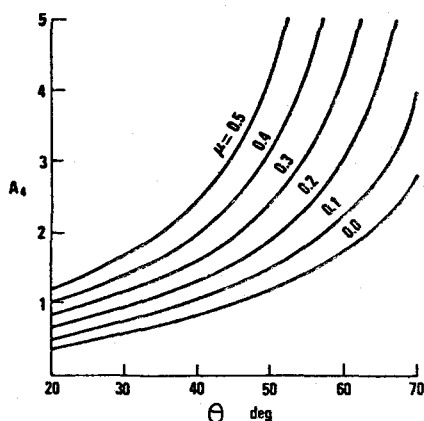


図-32 Ralston(1977)

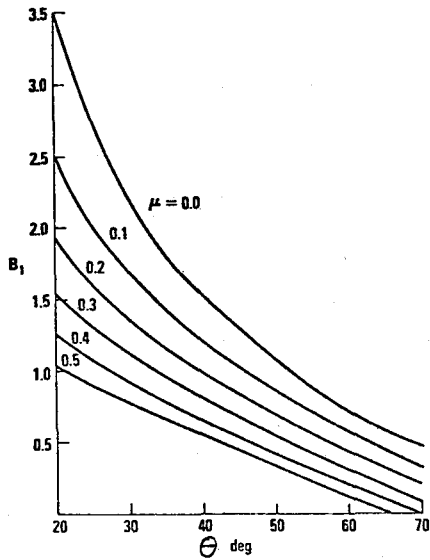


図-33 Ralston(1977)

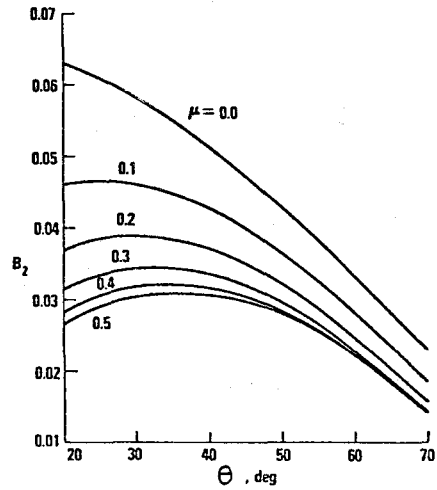


図-34 Ralston(1977)

3) Cone 型構造物に作用する氷圧力の実験式

この種の実験は Croasdale のグループと Afanasev³⁴⁾ のグループによってなされている。その結果 Croasdale²⁷⁾等は次の実験式を $\theta = 45^\circ$ の場合に対して求めた。

$$F_H = 1.6 \sigma_f \cdot h^2 + 6.0 \rho g \cdot D \cdot h^2 \quad \left. \vphantom{F_H} \right\} \dots\dots\dots (49)$$

$\theta = 45^\circ \quad \mu = 0.05$

この式の右辺第1項は氷盤を破壊する力であり、第2項は破壊された氷盤を押し出しながら氷盤が移動する時に構造物に及ぼす力である。これに対して Afanasev は弾性理論と実験結果とを結びつけて次式を得ている。

$$F_H = \sigma_f \cdot h^2 \cdot \tan \theta \cdot S_x \quad \dots\dots\dots (50)$$

式中の S_x は Circumferential Crack の長さで次式で示される。

$$S_x = 1.76 \{ (D/2) + (\pi \ell / 4) \} \quad \dots\dots\dots (51)$$

以上、実験式、理論式等を示したが、現在のところ実規模での測定結果が得られていないのが現状で、どの式が適合度が良いか明確でない。

参 考 文 献

- 1) Assur, A. : Composition of Sea Ice and Its Tensile Strength. In Arctic Sea Ice, NAC-NRC-598, 106~136, 1958
- 2) Schwarz, J., W. F. Weeks : Engineering Properties of Sea Ice. Journal of Glaciology Vol.19 No.81, 499~530, 1977

- 3) 田畑忠司, 小野延雄: 海水の構造について, 低温科学 Ser. A. 16, 197~210, 1957
- 4) IAHR Committee on Ice Problems : Report of Task-Committee on Standardizing Methods for Ice. Proc. IAHR International Symposium on Ice Problems. 607~618, 1975
- 5) Haynes, F.D., M. Mellor : Measuring The Uniaxial Compressive Strength of Ice, Journal of Glaciology. Vol. 19, No 81, 213~223, 1977
- 6) Frederking, R.M.W. : Preliminary results of plane strain compression tests on columnar-grained ice. IAHR Symposium. ice and its action on hydraulic structures, 26~29, 1972
- 7) Schwarz, J. : The pressure of floating ice-fields on Piles. IAHR Symposium on Ice Problems, 1970
- 8) Saeki, H., T. Nomura, A. Ozaki : Experimental Study on the testing methods of strength and mechanical properties for sea ice. Proc. IAHR Symposium on ice problems. 135~150, 1978
- 9) Michel, B., T. Toussaint : Mechanisms and theory of indentation of ice plate. Journal of Glaciology, Vol. 19, No 81, 285~300, 1977
- 10) Peyton, H.R. : Sea ice strength, UAGR-182 Geophysical Institute, University of Alaska, 1966
- 11) 田畑忠司: 海水の力学的研究 IX 一現場における曲げ強度の測定 (3) 一, 低温科学 Ser. A. 24, 259~268, 1966
- 12) Dykins, J. E. : Ice Engineering- material properties of saline ice for a limited range of conditions. U. S. Naval Civil Engineering Laboratory. Technical Report. R720, 1971
- 13) Anderson, D.L. : Preliminary results and review of sea ice elasticity and related studies. Trans. of the Engineering Institute of Canada Vol. 2, No 3, 116~122, 1958
- 14) 田畑忠司, 藤野和夫: 海水の力学的性質の研究 Ⅲ, 一現場における曲げ強度の測定 (2) 一, 低温科学, Ser. A. 159~165, 1965
- 15) 石田 完: 海水中の音速度, 低温科学, Ser. A. 17, 99~107, 1958
- 16) Oliver, J., A.P. Crary, R. Cotell : Elastic waves in arctic pack ice. Trans. American Geophysical. Union, Vol. 35, 282, 1954
- 17) 石田 完: 海水中の弾性波の測定, 低温科学, Ser. A, Vol. 18, 157~169, 1959
- 18) 佐伯 浩, 中沢直樹, 小野敏行: 海水の摩擦係数に関する研究, 第34回土木学会年次学術講演会, 1979 (投稿中)
- 19) 久保義光: 自然結氷の耐荷力について, 雪氷, Vol. 20, No 3, 11~14, 1958
- 20) 久保義光: 自然結氷の耐荷力について, 雪氷, Vol. 20, No 4, 97~104, 1958
- 21) Kerr, A.D. : The bearing capacity of floating ice plates subjected to static or quasi-static loads, Journal of Glaciology, Vol. 17, No 76, 229~268, 1976
- 22) Wyman, M. : Deflections of an infinite plate, Canadian Journal of Research, Ser. A, Vol. 28, 293~302, 1950
- 23) Saeki, H., S. Saito, K. Hamanaka, A. Ozaki : Experimental study on the compressive strength of sea ice and the ice forces on an isolated circular pile, Coastal Eng. in Japan, Vol. 19, 73~87, 1976
- 24) American Petroleum Institute : Planing, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, 7th edition, 1976
- 25) Neill C.R. : Ice pressure on bridge piers in Alberta, Canada, IAHR ice symposium,

6.1, 1970

- 26) Michel B. : Ice pressure on Engineering structures, U. S. C. R. R. E. L. Pt. III, Sect. Bib., 1970
- 27) Croasdale, K. R. : Ice forces on fixed rigid structures, A report prepared for the Working Group on Ice Interaction on Hydraulic Structures, Committee on Ice Problems, IAHR, 1978
- 28) Saeki H., T. Ono, A. Ozaki, S. Abe : Estimation of sea ice forces on pile structures, Proc. IAHR Symposium on ice problems, 495~508, 1978
- 29) Tryde P. : Ice forces. Journal of Glaciology, Vol. 19, No 81, 257~264, 1977
- 30) Croasdale, K. R., N. R. Morgenstern, J. B. Nuttle : Indentation tests to investigate ice pressures on vertical piers. Journal of Glaciology, Vol. 19, No 81, 301~312, 1977
- 31) Ralston T. D. : An analysis of ice sheet indentation, Proc. IAHR Symposium on ice problems, 13~32, 1978
- 32) Reinicke, M. K., R. Remer : A procedure for the indentation of ice forces, Proc. IAHR Symposium on ice problems, 217~238, 1978
- 33) Hirayama K., J. Schwarz, H. C. Wu : An investigation of ice forces on vertical structures, Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa (I I H R Report No 158), 1974
- 34) Saeki H, K. Hamanaka, A. Ozaki : Experimental study on ice force on a pile, Proc. 4th International conference on port and Ocean Engineering under arctic conditions, 1977
- 35) Ralston T. D. : Ice force design consideration for conical offshore structures, Proc. 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under ^A arctic Conditions, 741~752, 1977