

氷圧力について — 海水の圧縮強度 —

北大工	正員	佐伯 浩
北大工	学生員	青藤 修一
北大工		小野 敏行
北大工	正員	浜中 建一郎
北大工	正員	尾崎 晃

§1. 諸論 海水の力学的性質についてはアメリカ合衆国、カナダ、ソ連、北欧の各国で長い間研究されてきた。また我が国においては北大の低温研において数多くの業績をあげている事は周知の事実である。近年海底のエネルギー資源の確保のため、寒冷地の海岸・海洋において海洋・海岸構造物建設の必要性からこの海水の研究が非常に活発になつてきた。我が国においては、海岸・港湾の海水の結氷する範囲は、船舶の航行に支障が出る範囲に限ると北海道のオホーツク海に面した海岸に限られる。また北海道のオホーツク海沿岸は、オホーツク海北部で結氷した海水が冬季の季節風し、流れに乗って移動する流氷によって完全に覆われる。この時期は年によって異なるが、ほぼ1月下旬から2月初旬にかけてである。我が国における海水による海岸・港湾構造物の被害は、それ程多くはない。しかし、これは海水の作用を一番受け易い抗構造物がオホーツク海沿岸ではほとんど用いられていないからである。昭和49年1月、佐呂間湖内に流入した海水は湖内を動き回り、養殖漁業施設に多大の被害を与えた事から海水のもたらす影響が改めて見直されてきた。本研究は海水が海岸・海洋構造物に及ぼす力を見積るに当たり、特に問題となる海水の圧縮強度を調べたものである。

§2. 海水が海岸・港湾構造物に及ぼす力。

一般に海水が構造物に及ぼす力は、大きく分けて次の3つである。

- i) 氷圧力 : 流氷野・流氷盤が風等の力によって構造物を押しつける力で、比較的ゆっくりと長時間作用する。この時の海水は、塑性体あるいは塑性体と弾性体の中間的な性状を示す。
- ii) 衝撃力 : 流れや波浪運動によって、動く海水が構造物に衝突する時に及ぼす力で、衝撃的で作用時間は短い。この時は、弾性体的な性状を示す。
- iii) 熱応力 : 半分閉じた港湾等において、海水の水温変化のために膨張・収縮する事により構造物に力及ぼす。一般に夜明時の水温急変時に力及ぼすが、①海水がレオロジー的性質を持っている。②海水の表面が雪にふちわれているとき、雪が断熱効果を持っているため海水の水温はそれほど急変しない。③海水が潮汐によって上下動する事により周囲の構造物との間にクラックが生じていて必ずしも周辺が固定されている場合が多いため、この熱応力はそれほど大きいものではない。

以上の事から海水が構造物に及ぼす力としては、主として(i)の氷圧力と(ii)の衝撃力であるが本質的には、この二つの力は、破壊速度が異なるだけであって、同じものと考えられる。よってこの(i) (ii)の力をひとくくめて氷圧力 (ICE PRESSURE) と呼ぶ事にする。

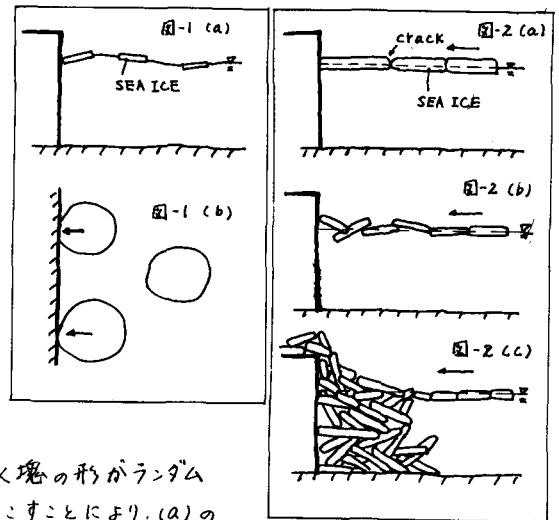
§3. 構造物の違いによる氷圧の作用の仕方

一般に海岸構造物をタイプ別に分類すると次の三つに分けられる。

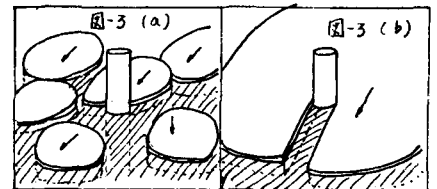
- I) 防波堤・防潮堤・導流堤・防砂突堤等 海水を遮蔽する構造物。
- II) フルソン・橋脚・SEP・海中固定灯標等 海中に孤立した構造物。
- III) (I)と(II)の中間的な構造物で離岸堤等。

上記の三つの構造物のType によって氷圧力の作用の仕方がかなり異なる。

山の防波堤に代表される海水を遮断する構造物に対しては図-1、図-2の如く単純化して考える事ができる。図-1の場合、海水がバウケという状態で波動により氷塊が構造物に衝突する場合であるが、衝突した瞬間では、海水と構造物の接触面積は小さい。一般にこれらの構造物が一体となった構造となる、このため、材料の強度が非常に弱くない限り、滑動・転倒は起こりにくいし、現実のオホーフ海に面した港湾・漁港の防波堤がそのような力のために被害を受けたことはない。次に図-2のように氷圧力による海水が構造物に押しつけられるような場合には、現実には氷塊の形がランダムな事と、たとえ大氷盤があつたとしてもバウリングを起こすことにより、(a)の状態から(b)のように overlap し、ついにはバウバウに壊れた海水が(c)のように防波堤の上に山のようになり重なる。この現象を ICE PILING あるいは PILING UP 現象と言うが、この PILING UP を起こす事により、実際に構造物に作用する力は極めて小さいものになる事が予想される。



以上のように海水を遮断するような構造物では、実際に海水が構造物に及ぼす力は大きいものではない。オホーフ海に面した我が国の港湾・漁港の防波堤の設計外力は波圧のみを考慮して海水圧は無視しているが、冬期海水による防波堤が壊れた事がないのは、以上のような事によるものと思われる。(II)の孤立した構造物は一般杭構造物に代表されるが、これを図-3に示す。図-3の(a)はバウケた海水が杭構造物に衝突する場合で、個々の海水塊が小さい場合のため杭に衝突しても方向を変えただけである。構造物と海水の接触面積も小さいため、それ程大きな力とはならない。(b)の場合は大きな氷盤が衝突する状態である。図の如く杭に食い込んで方向を変える事なく杭に力を作用する。このような場合が構造物にとって一番危険なのである。



§4. 氷が杭構造物に及ぼす式の検討。今までに氷(海水・淡水氷)が構造物に衝突する時作用する力(F)に関する式が幾つか提案されている。その各々の式について検討を加えてみる。

氷が構造物に及ぼす力: F (kg) , 構造物の代表径: D (cm)

氷の厚さ: R (cm) , 氷の圧縮強度: σ_n (kg/cm²)

$$i) F = \sigma_n \cdot D \cdot R \cdots \cdots (1) \quad \sigma_n = 28 \text{ kg/cm}^2$$

これは、Canada Bridge Code で示されているもので、橋脚に作用する氷圧力を求める式である。

$$ii) F = [0.33 \{ \sigma_{wb} + 0.35 \alpha (t_L - t_w) \} + 12.5 (R/D - 0.15)] \cdot D \cdot R \cdots \cdots (2)$$

σ_{wb} は氷温 0°C で、変形速度 $S = 0.003$ /sec の F での氷の強度, α : 温度係数
海水の場合 $2.5 \text{ kg/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, t_L : 過去 24 時間の気温 $^\circ\text{C}$, t_w : 氷温 $^\circ\text{C}$

この式は、西ドイツの J. Schwarz により求められたもので、 $\{ \sigma_{wb} + 0.35 \alpha (t_L - t_w) \}$ は、ある氷温の変形速度 $S = 0.003$ /sec での圧縮強度を示す。よってこの式を単純化すると

$$F = [0.33 \sigma_n + 12.5 (R/D - 0.15)] \cdot D \cdot R \cdots \cdots (3) \text{ で表わされる。}$$

$$iii) F = \sigma_n \cdot D \cdot R \cdots \cdots (4)$$

これはアフリカ合衆国で用いられている式で σ_m には条件に適合した氷の圧縮強度を用いる。

$$IV) F = N (\dot{u}/D)^\alpha \cdot D \cdot R \cdots \cdots (5)$$

$\dot{u}$: 氷と構造物の相対的移動速度 (cm/sec) , N : 温度効果による係数

α : 係数 約 0.25

この式は Canada の Gold によって提案された式で、 D の小さい構造物に氷が作用する場合
にはあまり適当でないといわれている。また海水の強度の効果が入っていない事と問題である。

$$V) F = N_c \cdot \sigma_m \cdot D \cdot R \cdots \cdots (6)$$

(6) 式は Denmark の Danish が求めた式で $N_c = 2.0 + 0.7 R/D$... 接触係数

の値とる。これは $0 \leq R/D \leq 2.0$ の範囲で有効である。よって (6) 式を書き換えると

$$F = (2.0 + 0.7 R/D) \cdot \sigma_m \cdot D \cdot R \cdots \cdots (7) \quad 0 \leq R/D \leq 2.0$$

$$VI) F = 3.57 \sigma_m \cdot D^{1/2} R^{1/2} \cdots \cdots (8)$$

(8) 式は Hirayama 等が求めた式である。これは $D \leq 48 \text{ cm}$, $R \leq 3.0 \text{ cm}$ の範囲で得られた結果であるが、Schwarz が実験から得た値は (8) 式に一致している。

その他、Korglavin 等らの求めた式がある。以上の 6 つの式のうち (iv) を除いては、 F は氷の圧縮強度 σ_m と構造物の径 D と氷厚 R で表わされる。

$$F = f(\sigma_m, D, R) \cdots \cdots (9)$$

(i)・(3) 式は得られた根拠は明らかではないが、氷の強度が構造物の材料(コンクリート・鋼)に較べて非常に弱いために直感的に得られた式と思われる。そのため Neil 等が指摘しているように、 $D > 80 \text{ cm}$ 以下の構造物に対しては (i) 式がよく適合しない事と実験により示している。(ii) の Schwarz の式は現地観測から求めたものであるが、資料数が少ない事と与えて示したように構造物にどのような形で氷が作用したかが不明である。

(vi) の Hirayama 等の式は小規模の実験から得られたものであるが、Schwarz 等の結果とも一致する事から一番妥当性がある。今回の我々の研究は以上の結果から、海水の圧縮強度を求める事を主目的とした。

5. 海水の圧縮強度試の問題点。海水の圧縮強度測定にあたって次の四点に特に注意した。

(1) 海水の圧縮強度測定のための供試体の Size の決定。(2) 試験のための海水を採取し、供試体を作成するに当たり、長時間空中にさらす事により昇華現象と気温の変化による氷温の変化により海中にある場合と異なった力学特性を示す。(3) 海水中には気泡・気孔・Brain 等が存在し、その分布が一様でないため載荷試験を行なう時に偏心荷重となりやすい。(4) 測定器を寒中にさらすことによる測定器の耐寒性と精度。

(1) については海水の強度試験の標準供試体の寸法は決まていない。Schwarz 等は、すべて同じ長さにして高さをその 2.5 倍とした角柱で断面積を $1 \sim 100 \text{ cm}^2$ に変化させて、fresh water Ice の Size effect について実験を行なっているが断面積が 40 cm^2 以下では圧縮強度はほぼ一定値であり、それより大きくなると強度が落ちる事を示している。一般に海水には、気泡・気孔・Brain が含まれていて、その分布は一様ではない。よって供試体の寸法が小さければ等方性が満足できない。実際の構造物の設計をささるに出来るだけ大きな供試体が適当と考えられる。我々は供試体作製の困難さと、載荷試験機の能力から $10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}} \times 10^{\text{cm}}$ の立方体で試験を行ない、一般土木材料の標準供試体の寸法が $\phi 150^{\text{mm}} \times 300^{\text{mm}}$ の円柱形であるので、A.C.I の Manual より、 10^{cm} 立方の供試体の圧縮強度を 1.25 倍に標準供試体の強度に換算した。海水の供試体の Size effect に関しては今後の課題としよう。(2) については、海中に没している海水は、気孔の一部が海水で満たされておるため、海水を切り出すと海水中からかなりの海水が流れ出てくる。海水は、氷底では、 $-1.5 \sim -1.7^\circ \text{C}$ で、ごく表面の近くでは気温に近い。表面下 10^{cm} より深部では氷温は、 $-2 \sim -4^\circ \text{C}$ と云われている。切り出した海水をビニール袋に入れて長時間放置しておくと気孔に残った海水が結氷し、その力学的特性は著しく変化する。

以上の事から我々の試験においては採氷してから完了まで二時間以内になるよう努力した。(3)については、海水が等方性でないために、一軸圧縮試験機で荷重をかける時に非常に偏心やすく、海水が滑動するため、試験機の台座と Pressure-Plate には滑り止めとして、高さ 4 mm の鋼棒を取り付けた。今回の実験の結果から、供試体のすばは水平方向の長さに対して高さが高くなりすぎる試験には向いていないことがわかった。(4) については(2)で述べたように、採氷後直に、供試体作成と試験を行うための施設は満足なものではない。お低温であるから精密測定器の使用に問題があり、変位の測定は全てダイヤルゲージ(1/100 mm)を用いた。

§ 6. 試験方法と装置 試験は 1975 年 2 月にサロマ湖の富士エで行った。試験に用いた海水はサロマ湖内から 5ヶ所、常呂海岸の流水を採取した。装置は最大 3.5t 能力の一軸圧縮試験機であり、荷重速度も変化させることが出来る。センサーで $60 \times 40 \times 40$ mm の海水を絞り出し、ビニル袋に入れて変質するのを防ぐため、下駄に試験室へ運搬し、それを 10 mm 立方の供試体へ整形した。破壊して海水の内部の氷温(T)を測定し、同時に広口ビンの中に保存し、後ほど電気伝導度針による塩分量(S)を求めた。田畑や Peyton の実験結果から海水の強度に及ぼす因子としては、供試体の大きさや形、Brain 量、気泡量、気孔量、氷温、荷重速度、荷重方向等が考えられるが、Brain 量と代表するものとして塩分量(S)、気泡量・気孔量を代表するものとして密度 ρ を測定した。

§ 7. 海水の塩分量(S)と密度(ρ)の関係。
海水の氷厚が 40 mm 前後であったため、表面・氷底 3~4 mm を取り除き、残った部分を上・中・下の 3 層にして試験を行った。その結果、密度が大きくなるに従って塩分量もふえ、上層ほどその変化は著しい。低層では塩分量は 3~7% であった。流水と 24 時間放置した海水とは、塩分量・密度とも 1~2% ほど 3~5%・0.70~0.80 g/cm³ 程度である。これは、田畑等も指摘しているように、海水の生成条件と生成からの経過時間に関係しているようである。サロマ湖の氷は、1月中旬頃から結氷開始ののに対して、ホホフク海北部から極動してくる流水は、11月頃から結氷始めていると云われる。生成からの経過時間の長い流水等は、比重の重い Brain 細胞が下方に押しやられるために塩分量は少なく、またその一部は氷の外に押し出されるため密度も小さいと考えられる。佐呂間湖内の海水の塩分量は約 3.2% であり、ホホフク海の塩分量にほぼ等しい。

§ 8. 海水の圧縮強度(σ_c)と氷温の関係。
海水は、その表面近傍では気温と一致して温度も氷底では結氷温度に近い値を示す。気温が上がれば、Brain 細胞による氷を融解し、逆に下がれば氷を析出するから、海水に限らず河川氷においても氷温が圧縮強度に関係するのは十分に考えられる。図-4 に氷温(T)と圧縮強度(σ_c)の関係を示す。氷温が低下するにつれて圧縮強度は大きくなり、その関係はほぼ直線に近似できる。上層は下層に比べて強度は小さい。これは上層部は降雪等の影響を受け、他の結晶構造に違いがあるからである。上層部は Granular Ice であり、下層部は Mosaic Ice と呼ばれている。24 時間放置した試料はどれ氷温が低く、強度は大きい。これは室内の温度が夜間には -20℃ に達し、またその変化も大きいので、再結晶が生じていると思われる。海水の 90% は海中に没しているため、海水の氷温の影響を強く受ける。海水の結氷温度は、

$$T = -0.054 \cdot S \quad S: \text{海水の塩分量 } \% \quad \dots (10)$$

Zubov によって示されているから $S = 3.2\%$ とすれば、氷底の結氷温度は -1.7℃ 前後となる。尚、北大の低温研の調査によれば海中の氷温は -1.5 ~ -4.0℃ であり、表面近傍では -4.0℃ 以下になることもあるが、強度は他層に比べて弱いため、海水全体の氷温としては、安全側をとって -4.0℃ としてよいことになる。参考として、図-5 にヤング率

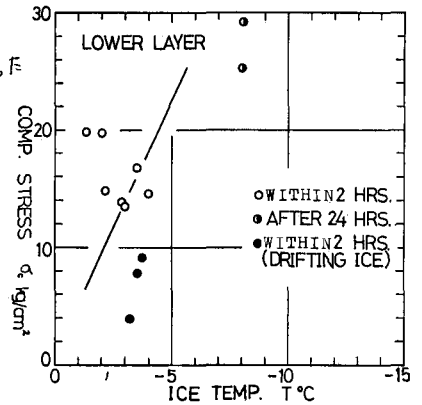


図-4 (a) 圧縮強度-氷温

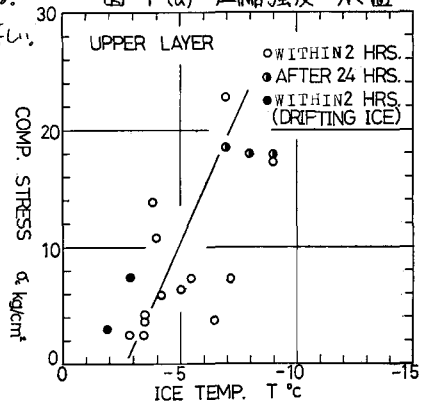


図-4 (b) 圧縮強度-氷厚

と氷温の関係を示す。図中○は北大低温研究所の田畑・小野等の結果のうち密度が $0.81 \sim 0.88$ のものを Plot したものである。圧縮強度とヤング率との間には、比例関係が成立するから、ヤング率と氷温との間にもやはりこの関係が見られる。採取に25の時間、実験方法、氷量等の違いを考慮すれば、同じ order であり、大体同じぐさの値をとることがわかる。

§9. 海水の圧縮強度 (σ_c) と密度 (ρ) の関係。

図-6 に σ_c と ρ の関係を示す。図中破線は、氷温が $-2 \sim -5^\circ\text{C}$ の試料の平均を示し、実線はその最大と思われる値を示している。 ρ と σ_c とは直線関係にあり、密度が大きくなれば、強度も大きくなる。

このことは低温研の報告と一致している。純氷の場合、気泡量の全くなきときの密度は 0.92 g/cm^3 である。

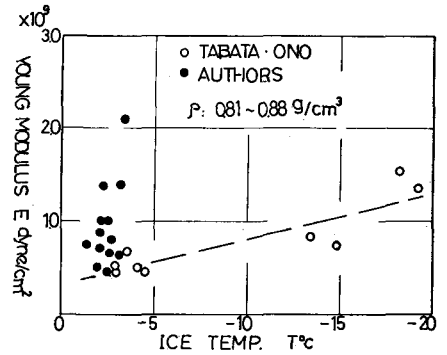


図-5 ヤング率-氷温

海水は、気孔・気泡・Braine を含み、全空隙量が $5 \sim 15\%$ を占めるため、密度は純氷より小さい。図によれば、海水の密度は 0.80 g/cm^3 以上であり、流水は生成過程の違いにより、空隙量が大きく、 0.75 g/cm^3 程度である。上層部で強度が小さいのは、前述したように結晶構造が違うからである。海水の平均

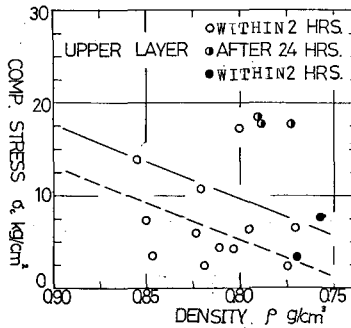


図-6 (a)

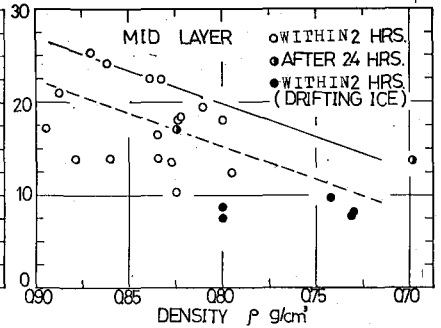


図-6 (b)

密度は全体の 90% を占める海中部分とを考えれば、 0.87 g/cm^3 が適当と思われる。流水は最大で 0.80 g/cm^3 となる。

図-7 にヤング率と密度との関係を示す。氷温は全て、 $-1 \sim -5^\circ\text{C}$ のものを選び、○印は田畑・小野等の結果であり、●印は我々の結果である。我々ののは、全て大きめの値であるが、実験方法による。ヤング率の order が異なることを考慮すれば、両者よく一致しているといえよう。図-5 と考え合わせれば、ヤング率は、大きく見積ると $1.5 \times 10^9 \text{ dyne/cm}^2$ 程度である。

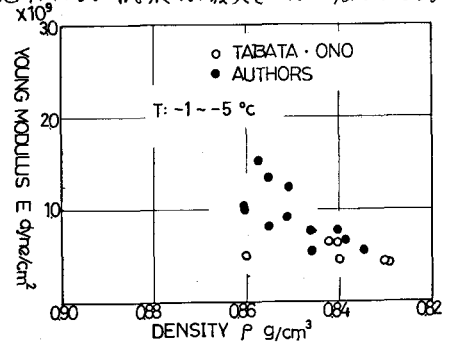


図-7 ヤング率-密度

§10. ひずみ速度と圧縮強度の関係。

海水は、粘弾性体であるから、変形速度によって圧縮強度が変化することが予測できる。図-8 は、ひずみ速度と圧縮強度との関係を示す。ひずみ速度は、圧縮破壊時の歪量を破壊に至る時間を割った値である。圧縮試験の上昇速度を 0.308 cm/sec , 0.425 cm/sec , 0.610 cm/sec の三種類に変えて試験を行っている。用いた試体はサロマ湖の同地点から採取し、氷温 $0 \sim 1^\circ\text{C}$, 塩分量 $5.6 \sim 7.7\%$, 密度 $0.802 \sim 0.840 \text{ g/cm}^3$ であり、ひずみ速度は $0.0002 \sim 0.002 \text{ 1/sec}$ の範囲にある。図中曲線は、Schwarz が Baltic 海の海水を用いて、試験を行った時の結果であるが、データ数 S , P は不明である。Schwarz は、ひずみ速度を広範囲に変えて試験し、氷温が -10°C 以下では最大

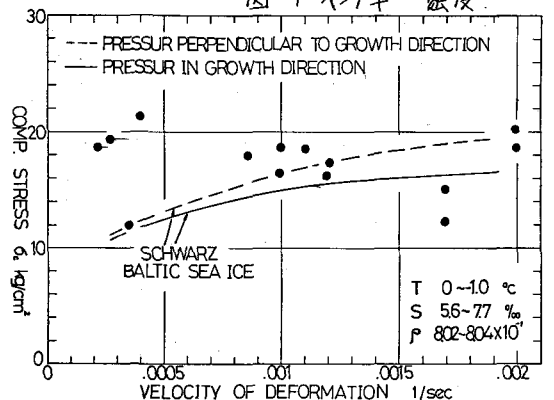


図-8 ひずみ速度-圧縮強度

圧縮強度は、ひずみ速度 0.003 1/sec の時であり、 T がそれ以上 F とひずみ速度と無関係であると報告しているが、これは我々の結果とよく一致している。海水の平均温度は低く見積つて -4°C であるから、ひずみ速度は、圧縮強度 σ_c にほとんど影響を与えないと考えてよいであろう。 -4°C より高い海水については、前述のように衝撃力と氷圧力は同じものと考えてよいことになる。

§11. 結晶軸に対する荷重方向の違いによる圧縮強度 σ_c

以上おのの実験は、全 C 軸（サロマ湖の場合は鉛直方向と一致する）と同じ方向に荷重をかけたものである。

Peyton・Schwarz は、 C 軸方向と C 軸と直角方向に荷重をかけた場合の比較を行ない、後者の方向に荷重を加えた方が σ_c は若干大きいことを示している。

しかし、氷温が -10°C より高く、ひずみ速度が 0.003 1/sec 以下では、その差はほとんどない。図-9 は、氷温が $0 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 、密度 $0.805 \sim 0.825 \text{ g/cm}^3$ 、塩分量 $6.7 \sim 7.7\%$ の時のサロマ湖内同一地点の結果を荷重方向をかえて試験したものである。図の如く、荷重方向による違いは、ほとんど見られず、Schwarz 等の結果とよく一致しているということがわかる。

§12. 結論

海水の圧縮強度は、密度・氷温・塩分量の影響を受け、特に密度と氷温に強い相関がある。また圧縮強度は、歪速度・荷重方向の違いによっても若干の変化はあるが、ほとんど相関関係は見られない。よって海水の圧縮強度は、図-4 から -4°C のとき 20 kg/cm^2 、図-6 から平均密度 0.87 g/cm^3 のとき、 25 kg/cm^2 となり、安全係数をとれば、 25 kg/cm^2 となる。

流水の最大圧縮強度は両図から、 9 kg/cm^2 である。これらの供試体は 10^{cm} 立方であるので、A.C.I. の Manual より $\phi 150^{\text{mm}} \times 300^{\text{mm}}$ の標準供試体に換算すると、サロマ湖の海水の圧縮強度としては、 31 kg/cm^2 、流水は 11 kg/cm^2 となる。よって海水が海洋構造物に及ぼす力は、次式で示される。

$$\text{サロマ湖の海水に対して} \quad P = 31 \cdot D \cdot R \quad \cdots \cdots (11)$$

$$\text{流水に対して} \quad P = 11 \cdot D \cdot R \quad \cdots \cdots (12)$$

尚、この式は前述のように氷圧力、衝撃力のどちらにも使えることになる。

最後に、本試験に協力して戴いた、北大工学部の佐田 徹氏と東海大学の泉 剛氏の両氏に謝意を表するとともに、試験に便宜をはから戴いた、北海道庁網走土木現業所および佐呂間漁業協同組合の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田畑・小野：海水の力学的特性 I，低温科学物理篇 第17，昭33年。
- 2) Schwarz, J: The Pressure of Floating Ice-Fields on Pile, I.A.H.R. ICE SYMPOSIUM 1970
- 3) Bruun, P.M.; Johannessen, P.: The Interaction Between Ice and Coastal Structures, Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions.
- 4) Peyton, H.R.: Sea Ice Strength, Geoph. Inst. of the Univ. of Alaska 1966.
- 5) Zubov, H.H.: 北氷洋の水，1945.
- 6) 田畑・小野：海水の構造について，低温科学物理篇 第16，昭32年。
- 7) 田畑：海水の力学的性質 II，低温科学物理篇 第17，昭33年。
- 8) 小野：海水の熱的性質の研究 IV，低温科学物理篇 第26，昭43年。

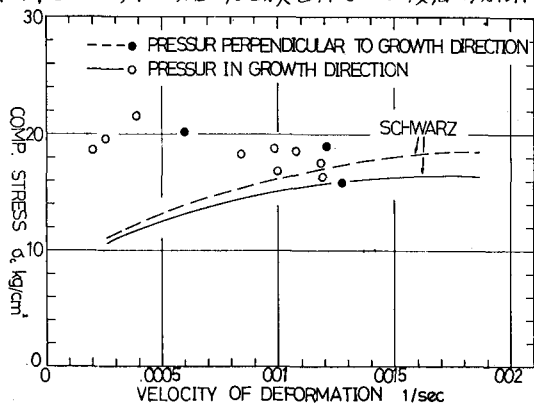


図-9 荷重方向の違いによるひずみ速度-圧縮強度