

海水の一軸圧縮試験と強度について

北海道大学工学部 佐伯浩 崎藤修一 浜中達一郎
尾崎晃 小野敏行

1. 結論

オホーツク海は冬季にほぼ全域にわたって結氷し、最南端の北海道のオホーツク海沿岸と北海道東部の太平洋沿岸は、1月上旬～3月下旬にかけて、カラフト東海岸で発生した流氷に覆われる。この間、船舶の航行は、もとより一部の養殖漁業を除いては、全ての海上活動が停止する。この海域が、日本における魚の宝庫であり、また海底エネルギー資源の存在の可能性もあり、その他寒冷地における開発が期待されているところから海水についての研究が重要視されている。オホーツク沿岸に海洋・海岸構造物を建設する場合、当然海水に対処するための設計指針を確立する必要がある。前報において、我々は特に杭構造物に及ぼす海水の氷圧力として、次式を得た。

$$F = f(\sigma_n, D, h, \dots) \quad (1)$$

F : 氷圧力 (kg) , σ_n : 圧縮強度 (kg/cm²)

D : 杭の口径 (cm) , h : 氷厚 (cm)

本研究は、海水の圧縮強度試験の方法の確立と圧縮強度を求めることを目的としている。

2. 海水の圧縮強度と試験方法。

Concrete, steel, asphalt 等の土木材料の種々の試験方法は、かなり詳しく定められているが、氷の強度試験についての試験方法は、海水・淡水氷ともに確立されていないのが実状である。試験方法の違いによる強度への影響は concrete 等の場合においても指摘されている。近年、IAHR の氷の試験のための Task-Committee が大まかな試験基準を提示したにすぎない。この基準について、概略を述べ、我々の試験様式と比較する。

(1) 供試体の採取方法と保存方法について。

海水は、一般に純水中に brine, 気泡, 空隙等が含まれたものである。これらの brine, 気泡・空隙は、必ずしも一様に分布しているわけではなく、また、採氷時間によってもその量が異なる。したがって、試験を採取して保存する場合には、次の事に十分注意すべきである。

(a) Ice bottom の氷温は、その点の海水の塩分量に対する結氷温度と一致する。海水の表面は、一般に雪に覆われており、断熱効果が働くために氷の内部氷温は、外気温と異なる。オホーツク海では、外気温の影響を敏感に受けるのは、せいぜい表面から数 cm の範囲内である。実際の海水の強度試験を調べるには、まず、大きな海水を切り出し、供試体を所定の方法で作製し、すぐに試験を行う。氷温が変化するのは、好ましくなく、また、直射日光にさらすのは、強度の低下をまねき、絶対に避けるべきである。

(b) オホーツク海の海水は、一冬氷である。この一冬氷は、氷厚が 10～15 cm になるまでは、気泡は少ないが非常に多い。20 cm より厚くなると強度も増大し、気泡・空隙も少なく、密度は、純氷に近い。ところが、融氷期（オホーツク海岸では、2月中旬～2月下旬）には、表面を融解した海水が氷の中を通過して、下降する際に、空隙が大きくなり、時には、数センチメートルの径にもなる。この空隙は、海水で満たされ、採氷時にその大部分が抜け落ちて、密度は、低下する。急激に空気にさらすと海水が再結氷して強度に及ぼすので注意を要する。

(c) 海水に振動を与えると、水中の比較的比重の大きな brine が、移動する事と grain の結合がゆるめられるために、海水の結晶構造が変わる。よって、採氷してから試験場所への輸送は、静かにかつ速やかに、短時間で試験を仕上げるのが大切である。我々の試験では、特にこの点に注意を払い、採氷してから試験終了まで、15 ~ 20 分以内になるように努力した。

(2) 供試体の寸法と形。

供試体の形は、今まで、円柱・立方体・角柱で試験され、その寸法は、各研究者により異なる。立方体・角柱の供試体は、円柱供試体に比べ、作製的に困難な面が多く、また角における応力の集中などの事を考えれば、円柱状供試体が望ましい。我々は、1975年の試験では、 10 cm 立の供試体を用いたが、1976年には、円柱状供試体も採用した。この方が、ほかに簡単に作製でき、しかも、短時間に数多くの試験が可能であった。以上の事から我々は、現地の海水を、さきうけ取り大きく切り抜き、それを試験室へ速やかに輸送し、core drill で円柱状コアを抜きとり、所定の高さに整形してから一軸圧縮試験機を改造したもので、供試体を圧縮し、この時加わった力を測定した。

採取してから試験完了まで、おおよそ 15 分以内であった。円柱状供試体の圧縮試験結果も Fig-1 に示す。 ϕ は、供試体の径で、 l は、高さである。 ϕ は、 45 mm 、 100 mm 、 150 mm の 3 種類について行い、それぞれについて l を変化させた。 ϕ については、3 種とも傾向が同じであるため、ここでは、 $\phi = 100\text{ mm}$ についてのみ掲載した。水温 (T)、塩分量 (S)、密度 (ρ)、歪率速度 ($\dot{\epsilon}$) は、図中に示してある。

一般の土木材料と同じく、 l が小さくなるにしたがい、圧縮強度 σ_n が大きくなる事を示している。また、 (l/ϕ) と σ_n の関係を示したものが、Fig-2 である。データに若干のバラツキがあるが、これは、自然の海水を用いているためである。この図から (l/ϕ) が大きくなるにつれて σ_n は、小さくなるが、 (l/ϕ) が 1.0 よりも大きい場合は、その変化率は、小さくなる。 (l/ϕ) が 2.0 付近からは、一定値に近づくことが予想される。 (l/ϕ) が非常に大きいときは、偏心しやすく測定も困難である。海水は、気泡・brine 等が均一に分布していないために、偏心の要因となる。我々は、他の土木材料試験が、 (l/ϕ) として 2.0 を採用し、また、我々の圧縮試験機の能力等から、 $\phi = 100\text{ mm}$ が適当と思われ、 $\phi = 100\text{ mm}$ 、 $l = 200\text{ mm}$ の円柱状コアを標準供試体に選んだ。

(3) 歪率速度 $\dot{\epsilon}$ による σ_n の変化。

圧縮強度は、荷重速度 ($\dot{\sigma}$) あるいは、歪率速度 ($\dot{\epsilon}$) の違いにより、変化する。これは、

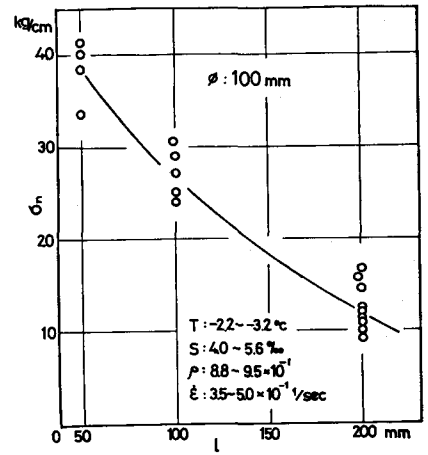


Fig-1 $\phi = 100\text{ mm}$ における σ_n と l の関係。

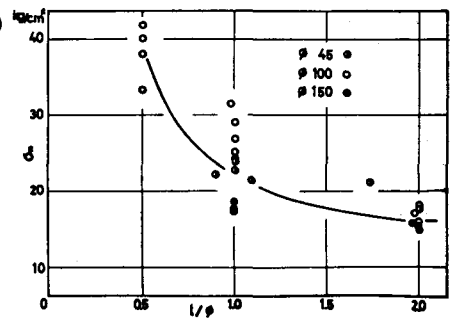


Fig-2 σ_n と l/ϕ の関係。

他の土木材料においても同様なことがいえる。しかし海水の場合は、粘弾性体でありこの歪率速度が特に重要となる。Schwarz は、Baltic 海の海水の σ_n の試験から、歪率速度 $\dot{\epsilon} = 0.003 \text{ sec}^{-1}$ で最大の圧縮強度を示すことも明らかにしたが、データ数等は不明である。Fig-3 に我々の結果と Schwarz の実験結果を示す。 $\dot{\epsilon} \geq 0.003 \text{ sec}^{-1}$ の範囲では、 σ_n はほとんど一定であるが、 $\dot{\epsilon}$ が大きくなるにつれて若干ではあるが、 σ_n は小さくなる傾向にある。これは、Schwarz の結果と一致している。これに対し、Peyton は、荷重速度 $\dot{\sigma} = 2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の時、 σ_n が最大であることも実験により示している。田畑は、 $T = -2^\circ\text{C}$ で $\dot{\sigma} \geq 2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、 $T = -5^\circ\text{C}$ で $\dot{\sigma} \geq 1.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、 $T = -10^\circ\text{C}$ で $\dot{\sigma} \geq 0.6 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の範囲では、海水は完全な弾性体と考えることがわなれと指摘している。我々の結果は、 $\dot{\epsilon} \geq 0.003 \text{ sec}^{-1}$ で、荷重速度 $2 \leq \dot{\sigma} \leq 4 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ であるから、弾性体の範囲にある。以上のことから設計荷重を見積るにあたり、この σ_n の試験は、 $\dot{\sigma} \approx 2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、歪率速度 $\dot{\epsilon} \geq 0.003 \text{ sec}^{-1}$ で測定するのが望ましい。

(4) 荷重方向の違いによる σ_n の変化。
 隠やかな海面下に生長した海水は、一般に鉛直下方向に向か、結晶が成長する。成長軸の違いにより、荷重を加えた場合、その強度に違いがあることは、Peyton や Schwarz により報告されているが Schwarz によれば、 $T \geq -10^\circ\text{C}$ の範囲内では軸による差はあまりないようである。我々の結果を Fig-4 に示す。この結果でも、明確な差は見られるが、成長方向の強度が幾分大きいようである。これは、Lake ice を用いた Butkovich の結果とよく一致している。しかし、南福州鉄道において行なわれた淡水氷の結果とは異なっている。海水の場合、湖水、河川水等と比べて、明確な相違が見られるのは、前述のとおりである。 $T \geq 10^\circ\text{C}$ の範囲では、荷重方向による違いというよりも、測定値そのものに分散が多いためと思われる。明確なことは、今後の実験、研究を待つしかない。

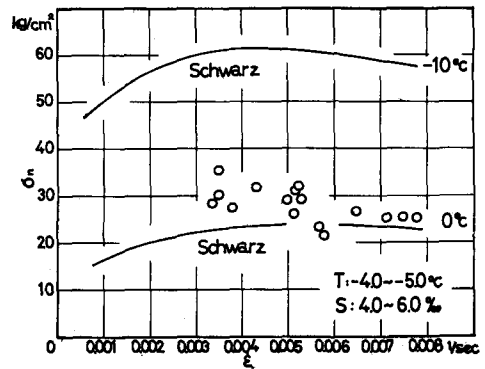


Fig-3. 強度と歪率速度について。

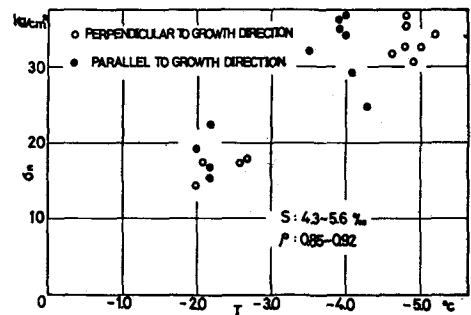


Fig-4. σ_n と荷重方向の違いについて。

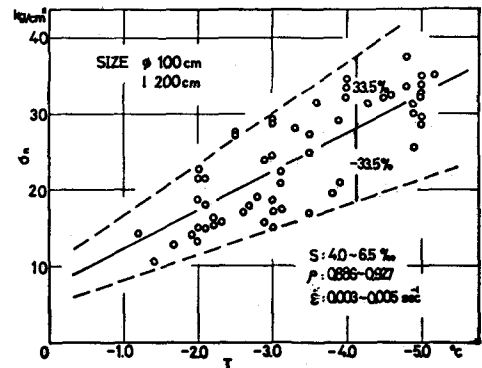


Fig-5. σ_n と T の関係。

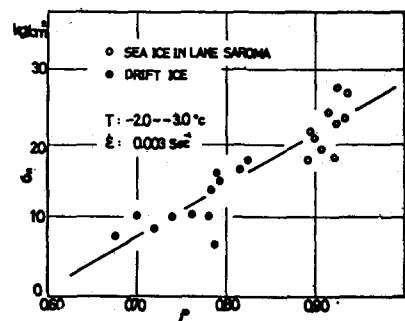


Fig-6. σ_n と ρ の関係。

3. 圧縮強度に及ぼす因子との関係。

海水の圧縮強度に及ぼす因子としては、氷温 (T)、brine 量、気泡量、空隙量、結晶形及び結晶の大きさ等があげられる。我々は、気泡量・空隙量を代表するものとして海水の密度 (ρ)、brine 量の目安として海水の塩分量 (S) を提案した。海水の圧縮強度には、密度 (ρ)、塩分量 (S)、氷温 (T) が影響を与え、特に、密度、氷温の影響が大きいのは、前報のとおりである。

(i) σ_n と T との関係。 Fig-5 に σ_n と T の関係を示す。塩分量 S は、 $4.0 \leq S \leq 6.5\%$ 、密度 ρ は、 $0.886 \leq \rho \leq 0.927$ の範囲である。Butkovich は、 $-50 \leq T \leq 0^\circ\text{C}$ の範囲で圧縮試験を行った。それによると、 σ_n と T とは、直線関係ではないが $-6.0 \leq T \leq -1.0^\circ\text{C}$ の範囲では、近似的に直線で表わせることを示している。我々は、次のような σ_n と T との関係式を得た。

$$\sigma_n = -5.05 \cdot T + 7.45 \quad \dots\dots (2)$$

$$-6.0^\circ\text{C} \leq T \leq -1.0^\circ\text{C} \quad 0.886 \leq \rho \leq 0.927 \quad 0.003 \text{ sec}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 0.004 \text{ sec}^{-1}$$

σ_n : 圧縮強度 (kg/cm^2)、 T : 氷温 ($^\circ\text{C}$)

実験値は、分散が大きい、(2) 式の σ_n の $\pm 33.5\%$ の中に全て含まれる。同一の氷温で σ_n の分散が大きいのは、同一場所から採取した海水で ρ 、 S が少しずつ異なること、供試体中の brine、気泡の分布が一様でない事、海水中の結晶の大きさ等が少しずつ異なることによるものと思われる。

(ii) σ_n と ρ との関係。 Fig-6 に σ_n と ρ との関係を示す。 ρ が大きくなるにつれて σ_n も大きくなり、 $0.7 \leq \rho \leq 0.92$ の範囲ではほぼ直線に近似できる。純氷の場合、密度は、 $0.92 \text{ g}/\text{cm}^3$ であるが、海水は気泡・空隙、brine を含み、特に気泡・空隙が $5 \sim 15\%$ 程度を占めるため、密度は、純氷に比べて、小さくなる。流水は、その生成過程の違いによると思われるが、サロマ湖の海水に比べかなり気泡・空隙量が多く密度も異なる。図中 $\bigcirc$ は、サロマ湖の海水であり $\bullet$ は、流水を用いた試験である。前回と同じ傾向を示すが、気温・氷温も前回より高く、よって、 σ_n は若干小さい。

4. 海水強度と日数との関係。

流水とサロマ湖の海水とは、その塩分量 (S)、密度 (ρ) にかんがりの差がみられる。流水は、11 月下旬 ~ 12 月初旬にかけて、北部オホーツク海で結氷したものが、風と海流によって、南方へ移動し、年にもよる異なるが、大体 1 月初旬 ~ 2 月下旬に北海道オホーツク沿岸に出現する。サロマ湖内の氷は、1 月初旬に結氷が始まり、3 月下旬まで、氷に覆われる。Fig-7 に、結氷から試験するまでのおおよその日数と塩分量との関係を示した。実験は、1975 年と 1976 年とに

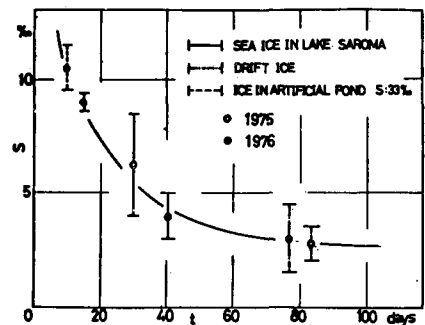


Fig-7. 塩分量と経過日数。

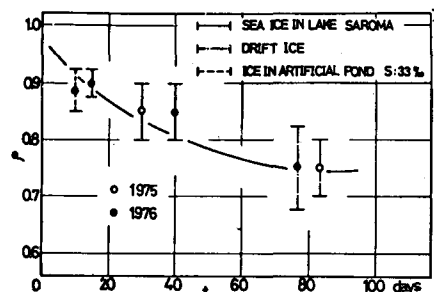


Fig-8. 密度と経過日数。

分けを行ない。また、北大構内で実験した時、流水、サロマ湖の海水と3種類の塩分について実験した。オホーツク海、佐呂間湖内の塩分量は、約33%である。日数が経つに従って、塩分量は小さくなり1ヵ月半または、急速に小さくなることわかる。結氷してから3か月を経過した流水の塩分量は、2.0~4.0%程度であり、それ以上経過しても、大きな変動がないことが予想される。このような海水中の塩分量の脱落は、比重の比較的重いbrineが自然落下するたためなのか、あるいは、福富が指摘しているように、水温の違いによるbrine濃度変化のせいなのか、今後の研究が待たれる。生長し

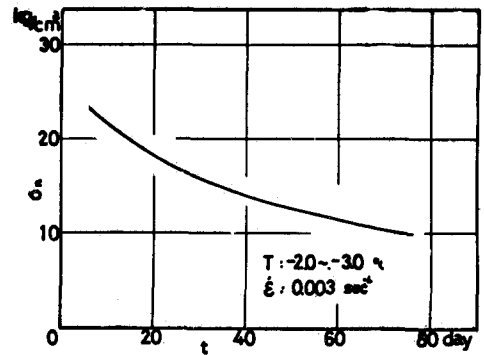


Fig-9 σ_n と日数との関係。

こし、ここからの海水の塩分量減少は、密度低下の原因になることは、前述した。Fig-8は、結氷からの日数と密度について示したものである。結氷初期にはほぼ純氷に近い値(0.92)を示していた海水は、日数が経過するにつれて、網走沿岸の流水(結氷してから2ヵ月半程度)のように、密度は、0.70~0.80まで低下する。以上から、流水とサロマ湖内の海水とは、その性質には全く違いはみられなく、只結氷からの日数が異なるだけといえる。したがって、水温が同じ場合の海水の圧縮強度は結氷からの日数に関係があると思われる。Fig-9に σ_n と日数との関係を示した。ただし、水温は-20~-30℃である。我々は、海水の抗構造物に及ぼす水圧力に、次式を得ている。

$$F = 5.0 \cdot \sigma_n \cdot R \cdot \sqrt{D} \quad \dots (3)$$

F : 水圧力 (kg), σ_n : 圧縮強度 (kg/cm²)

R : 氷厚 (cm), D : 杭の口径 (cm)

上式は、杭の口径が一定のとき、水圧力は、 σ_n と R との積に比例する。従って、海水の海岸、海洋構造物に及ぼす設計外力を見積る場合には、安全側を考慮すれば、 σ_n , R のそれぞれから最大値を求める方法と、 $\sigma_n \times R$ の最大値から求める方法とがある。北大の佐伯、阿部等々、氷厚 R を見積るに当たって、積算寒度を導入した次の実験式を得た。

$$R = 1.31 (\Sigma T)^{0.61} \quad \dots (4)$$

R : 氷厚 (cm), ΣT : 積算寒度 (°C·day)

上式に、1973年度の網走沿岸の気温をモデル化したものがFig-10にある。低温研の田畑らの観測から、この海域の結氷開始時期を1月10日と仮定し、流水の見えなくなる3月下旬までの

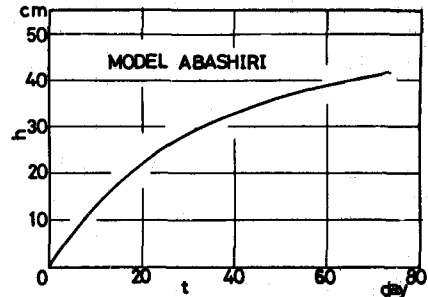


Fig-10. 氷厚と経過日数。

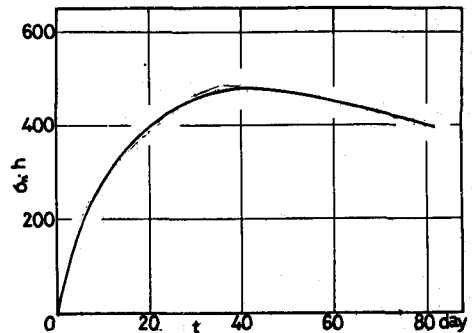


Fig-11. $\sigma_n \cdot R$ と t について。

氷厚変化をプロットした。ただし、気温のデータは、“北海道の気象 昭和48年 日本気象協会”の網走の気温を採り、このグラフは、後志海を緯度45°に選んで、氷厚と日数との関係も理論式より導いた、北大低温研の福富の図とよく一致している。網走沿

岸では、氷厚は、最大 $40 \sim 50 \text{ cm}$ であり、結氷してから 2 か月半～3 か月 要すことがわかる。

Fig-10 は、日数を同じにした場合の Fig-8, Fig-9 の σ_n, R もかき合せて、設計外力算定の最適化を計ったものである。これによると、 $\sigma_n \times R$ は、結氷してから 40 日前後すなわち、2 月中旬頃が最大となり、この時期の海水の圧縮強度、氷厚と対象にして、氷圧力も見積るのがよいと思われる。流水は、氷厚は、大きいが、密度が非常に小さくしたから、圧縮強度は小さい。しかし、流水は移動するため、その時々気温がわからなければ、氷厚を求めることはできない。流水については、今後、もっと詳細に研究しようと思う。

最後に、この実験を行うにあたり、多大の御援助・御協力を戴いた北海道庁網走土木現業所、佐呂間漁業組合及び常呂漁業協同組合の皆様方に深甚なる謝意を表します。また、実験に協力して戴いた、東海大学の泉沢利先生、鹿島建設の佐田徹氏、最後まで実験をサポート戴いた当時、東海大学の文川氏、斉藤氏には、厚く厚く、御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 佐伯・斉藤・栗中 海岸構造物に作用する海水の力に関する研究 (1) 第22回
海岸工学論文集 1975
- (2) 佐伯・斉藤・渋谷 海岸構造物に作用する海水の力に関する研究 (2) 第23回
海岸工学論文集 1976
- (3) 佐伯・栗中・阿部 海水の生成と氷厚について 土木学会 第31回 年次講演
概要集 第2部 1976
- (4) 田畑 沿岸海洋開発と流水 土木学会水理委員会 1975
- (5) 福富 海水の研究 (第3報) 沿岸海水の生成について理論的考察。
低温科学