

II—37 低温域における海氷の強度について

北海道大学工学部 (学) 竹内貴弘・酒井雅史
前田建設工業 (正) 五十嵐晴美
北海道大学工学部 (正) 佐伯 浩

1. 緒 論

ここ十年くらい前から、寒冷地における海洋開発が盛んに行われるようになった。その背景には、オイルショック以来のエネルギー危機に対応し、存在が確認されている石油・ガスがサハリン北部沿岸・北極海それに渤海などの寒冷地の海岸・海洋であることによる。我が国においても、オホーツク海沿岸では、養殖漁業のために海氷の動きの制御が必要となってきた。このために、寒冷地における海洋構造物の設計法の確立が重要である。その設計にあたっては、海氷の強度及び氷厚が明らかにされなければならない。しかし、現在のところ海氷に対する構造物の設計基準のみならず、海氷の強度試験すら確立していない状態である。研究の歴史が浅いながらも、寒冷地の海洋構造物の設計法の確立を目的として、本研究では、サロマ湖や本学の開発科学研究所の低温室を用いて作った氷を利用して、海氷の強度（一軸圧縮強度、引張強度、曲げ強度、せん断強度etc.）のうち、一軸圧縮強度 σ_c について触れることにした。それは、コンクリート工学の場合と同様に一軸圧縮強度 σ_c が最も一般的であり、この値が与えられれば、他の強度の概略値も推定可能となるからである。

2. 一軸圧縮強度 σ_c と今回の試験方法について

1) 一軸圧縮強度 σ_c

コンクリート、土の強度試験の場合と同じように、海氷の場合も供試体の寸法、砂状それに、荷重速度 $\dot{\sigma}$ (stress rate)、歪速度 $\dot{\epsilon}$ (strain rate)、載荷条件によって強度が異なることは知られている。特に、海氷の場合には、その組成が複雑である事と、歪速度 $\dot{\epsilon}$ 、応力速度 $\dot{\sigma}$ に強度が強く依存している。海氷の強度に及ぼす因子として、氷温 T 、塩分濃度 S 、単位体積重量 ρ 、供試体の形状・寸法、載荷方法といったものを考慮すべきであることが過去の研究成果から知られている。そこで今回は、一軸圧縮強度 σ_c に及ぼす影響として、氷温 T 、供試体の寸法と形状について触れることとし、過去の実験結果と比較して、特に、低温領域について述べる。

2) 実験装置及び供試体について

実験装置としては、図-1に示す通りである。供試体は、実験室内の大型低温室内において塩分濃度を30%の塩水を用いて作製した。供試体の採取方向は、図-2に示す通りである。氷の成長方向に平行な円柱供試体を(VERTICAL)、成長方向に垂直な円柱供試体のことを(HORIZONTAL)とした。本実験においては円柱供試体の径を10cmとし、高さ h を5cm、10cm、15cm、20cm、25cm、28cmの6種類について行ない、氷温 T は -5°C 、 -20°C 、 -40°C の3種類とした。海氷の荷重 P は、図-3の

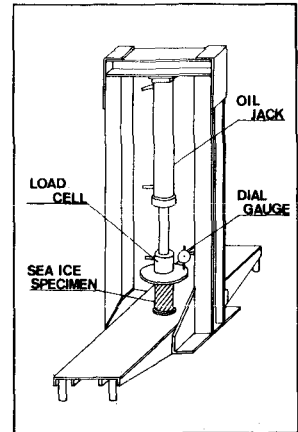


図-1

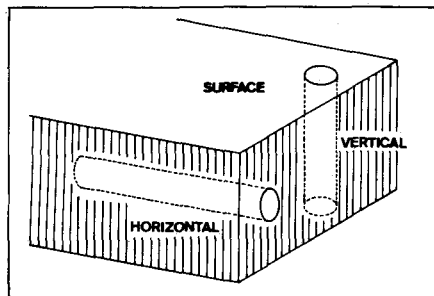


図-2

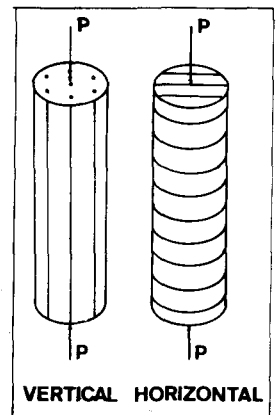


図-3

2通りとする。

3) 実験方法

一軸圧縮強度 α が、歪速度 $\dot{\epsilon}$ によって影響を受けることは、過去の実験から分っている。それによると、 $1 \times 10^{-3} \leq \dot{\epsilon} \leq 5 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ 程度の時、最大の一軸圧縮強度を示す。Schwarzによるバルト海の海氷の実験結果から $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ で最大の圧縮強度を示す事が報告され、淡水氷でもKorshavinやCarter等が同様に $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ で圧縮強度が最大となる事を報告している。本研究では、以上の結果をもとに、 $1 \times 10^{-3} \leq \dot{\epsilon} \leq 3 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ で行なうことにした。

3. 一軸圧縮強度 α と氷温 T について

図4~6は、すべて供試体 $\phi = 10 \text{ cm}$ 、 $l = 20 \text{ cm}$ となっており、塩分濃度、単位体積重量には若干の違いはある。図4は1979年から1980年の3ヶ年にかけて得られたデータの平均的な値を用いて書いたグラフである。応力速度 $\dot{\epsilon}$ は $5 \sim 20 \text{ kg/cm}^2 \text{ s}$ であり、最大の一軸圧縮強度を示す条件で行っている。図からも明らかのように $T > -8^\circ \text{C}$ の範囲では氷温 T と一軸圧縮強度 α との間にはほぼ直線的な関係がある。この $T = -8^\circ \text{C}$ 付近は、 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ が析出する温度でもある。また、供試体はすべて(Horizontal)なものをを用いている。傾きは多少異なっているが、塩分濃度、単位体積重量が変わっているからではないか。また、図5は、1976年の結果であるが、 $-6.0^\circ \text{C} \leq T \leq -1.2^\circ \text{C}$ の温度範囲の結果が詳しく出ていて、データがたいめか分散が大きいがこの場合も直線近似出来る。

$$\alpha = -5.05 \cdot T + 7.45 \quad (-6.0^\circ \text{C} \leq T \leq -1.2^\circ \text{C})$$

$\pm 33.5\%$ というのは、特別な数字ではなく、数多くのデータをとったために、その範囲にはばらついているということである。同一の場所から採取した氷でも、密度、塩分量、気泡の分布が少しずつ違っているからではないか。この場合の供試体も(Horizontal)である。次に、図-6は、1983年の実験室の結果であって、図中の(Horizontal)に注目すると、 $-40^\circ \text{C} \leq T \leq -5^\circ \text{C}$ という広い温度範囲のときもほぼ直線となることがわかる。過去のデータに比べて強度が低下したのは、塩分量が $6.0 \sim 15.0\%$ と範囲が広がったことや、実験室の氷を使ったことが影響しているのかもしれない。Schwarzは、 $\dot{\epsilon} = 3 \times 10^{-3}$ の時の一軸圧縮強度と氷温の関係を示していて、氷温が $0^\circ \text{C} \sim -20^\circ \text{C}$ の範囲で、氷温の低下とともに一軸圧縮強度が直線的に増大し、

$$\alpha = -3.8 \cdot T + 22 \quad (0^\circ \text{C} \leq T \leq -20^\circ \text{C})$$

という式をえている。値が大きいのは、 10 cm 立方体を用いたのと、密度の差によるものと思われる。このように、過去のデータによると、(Horizontal)供試体の場合、氷温が -10°C くらいまでは、強度が直線的に増大するとしていたが、今回の実験によって、それ以降は、氷温の低下に対する圧縮強度の増大が小さく、なおも直線的に

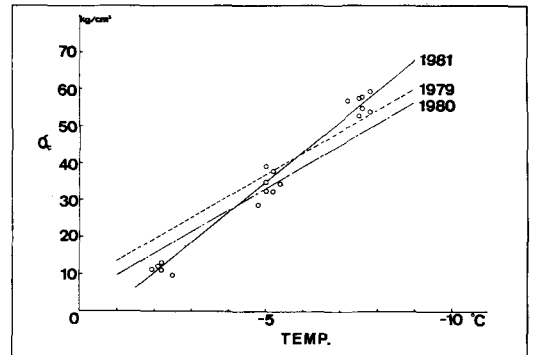


図-4

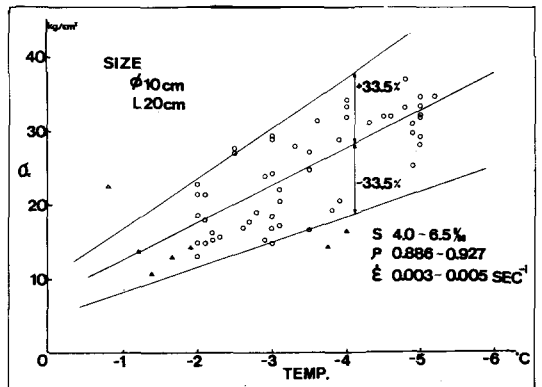


図-5

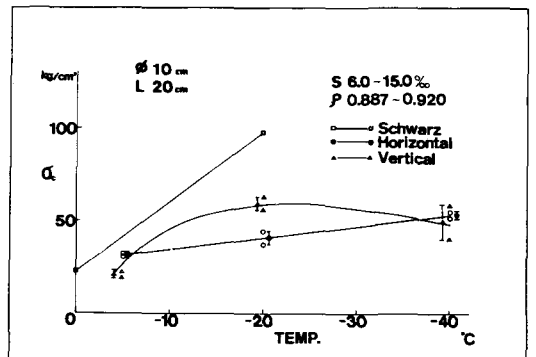


図-6

変化することがわかった。しかし、(Vertical) 供試体の時は、図-6 からわかるが、 -40°C の時の方が -20°C の時より σ_c が低くなっている。詳しい理由はわからないが、海氷の氷自体が硬くなりすぎ、整形が少しでもまづいと偏心の影響を強くうけ、局部的に破壊が起きってしまうからではないか。次に、図-7 においては、(Horizontal) 供試体の σ_c を σ_{ch} 、(Vertical) 供試体の σ_c を σ_{cv} とし、その比と氷温 T との関係性を求めたグラフで、径 $\phi=10\text{cm}$ であるが高さを 5cm 、 10cm 、 15cm 、 20cm 、 25cm と変化させている。氷温 T が -20°C の時は、すべて (Vertical) の方が強くなっている。また、 $l=5, 10\text{cm}$ のように低い供試体も (Vertical) の方が強くなっている。しかし、 $15\text{cm} \leq l \leq 25\text{cm}$ では、 -5°C のとき $\sigma_{cv} < \sigma_{ch}$ という現象が起き、氷温の変化 ($-5 \leq T \leq -40^{\circ}\text{C}$) に応じて、 σ_{cv}/σ_{ch} の変化も大きい。それは、供試体が高い程、(Vertical) の方の塩分濃度が上下で均一でなかったことを表しているのではないが。

4. 一軸圧縮強度 σ_c と供試体の寸法について

供試体の形としては、立方体、直方体、円柱によって断面積でも強度が異なる。本研究では、立方体、直方体は隅角部に応力集中が発生し易いことや、端面を正確に整形することが難しく時間もかかり易いことから円柱供試体を用いることとし、また、コアドリルによって短時間に整形出来るからである。今回は、すべて径を 10cm とし、高さを 5cm 、 10cm 、 15cm 、 20cm 、 25cm 、 28cm に変化させた。図-8 は、過去の 1977 年のサロメ湖での実験結果である。供試体は、(Horizontal) であり、図-9 の室内実験と同様である。図-8 では氷温 T が $-1.9^{\circ}\text{C} \sim -2.5^{\circ}\text{C}$ であるのに対して、図-9 では $-5^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ である。しかし、両方ともほとんど似た傾向を示している。 $\phi/\phi > 2$ では、 ϕ/ϕ の増加に対して σ_c の減少が激しいが、 $\phi/\phi > 2$ になると σ_c の変化率も小さくなり、ほぼ一定値を示すようになる。また、特に図-9 では $\phi/\phi = 1.0$ が曲がる点になっている。より低温であっても、図-8 と図-9 の両方を比べることにより、寸法は温度には影響しなく似た傾向を示すことがわかる。図-9 と図-10 は、同様に低温域ではあるが、(Horizontal) と (Vertical) の違いである。グラフの形としては似かよっているが、(Vertical) は、ばらつきが目立つ。また、 -20°C と -40°C において、 $\phi/\phi > 1.25$ では一軸圧縮強度に逆転がみられる。とにかく、(Vertical) の方は、塩分量が上下で違うこともあり、特に ϕ/ϕ が大きい

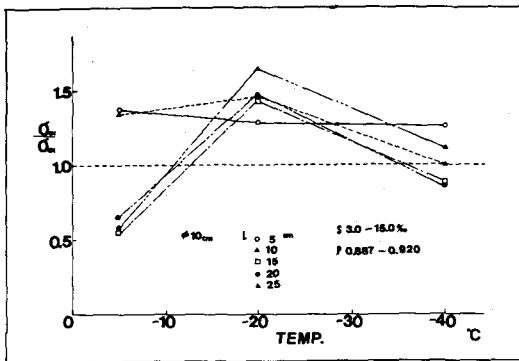


図-7

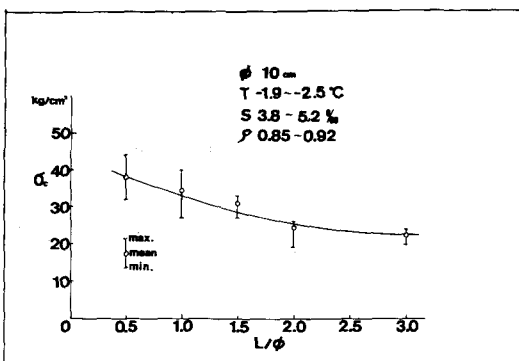


図-8

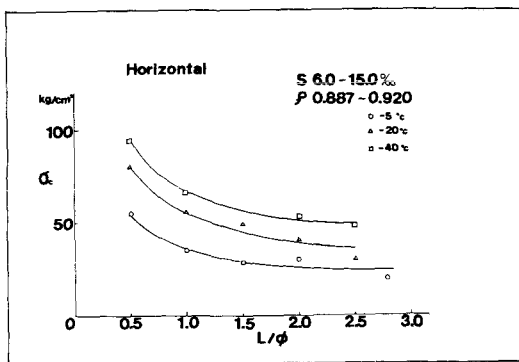


図-9

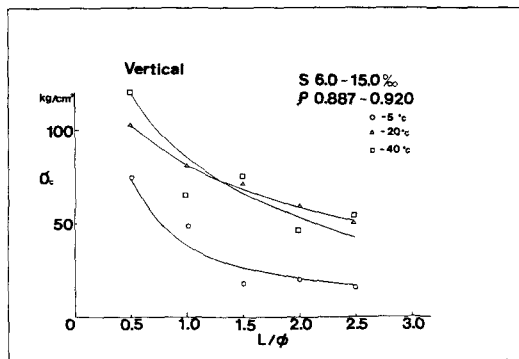


図-10

くなるにつれてその傾向が増大し、端面の變形に大きく作用したり、偏心が起り荷重がうまく水平面全体に均等に働かなくなる。以上から供試体の寸法は $\phi/d=2.0$ という値に注目し、 $\phi=10\text{cm}$ 、 $l=20\text{cm}$ にとるのが適当と思われる。この実験によって、低温域でもこの供試体のsizeを用いても何ら今までと変わらないことがわかる。

5. まとめ

1) 軸圧縮強度 σ_c と T については、(Horizontal) 供試体の時には水温の低下とともに σ_c が直線的に増大することがわかり、その温度範囲が -40°C にまで広げられた。また、(Vertical) 供試体の時には、 -40°C くらいになるとえって強度の低下がみられる。これは、今回のデータが少なくはっきりしたことは言えないが、実験が困難な点もあって、今後の実験に期待するところである。

2) 軸圧縮強度 σ_c と寸法については、過去の水温よりもかなり低い -40°C くらいのときにも、過去と同じ傾向が得られ、寸法効果は温度には影響をうけないことがわかる。

《参考文献》

- 1) 佐伯浩：海氷の強度特性と海岸・海洋構造物の耐氷設計法に関する研究 1983
- 2) 佐伯・斎藤・渡谷・渡中・尾崎：海岸構造物に作用する海氷の力に関する研究(2) 第23回海岸工学講演会論文集 1976
- 3) 佐伯・斎藤・渡中・尾崎・小野：海氷の一軸圧縮試験と強度について 土木学会北海道支部第33号 1977
- 4) 佐伯・小野寺・中沢・小野・尾崎：海氷の弾性諸定数について 土木学会北海道支部第32号 1982
- 5) Schwarz, J: The pressure of floating ice-field on piles, IAHR symposium, ice and its action on hydraulic structure 1970