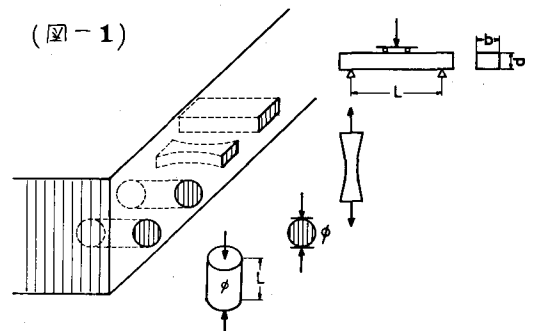


II-18 海氷の強度試験方法に関する研究

北大工 正員 ○佐伯 浩
〃 小野 敏行
東京都庁 正員 野村 俊夫
北大工 正員 尾崎 晃

§1. 緒論 海氷に限らず、淡水氷に対しても、まだ、強度試験方法は確立していないのが現状である。これは海氷に関する工学的な研究が少なかつた事と、海氷の影響を強く受ける海域で、海洋、海岸構造物を建設する必要がなかつた事によるものと思われる。しかし最近になって、北極海等寒冷地の海洋、海岸での人間の活動が活発になってくるにつれて、海氷に関する工学的な研究も次第に進展してきた。そのような状況の中で、1970年にアイスランドのレイキャビクで IAHN の第1回の氷に関する国際シンポジウムが開かれたし、続いて、1971年には POAC (Portland Ocean Engineering in Arctic Condition) の第1回の国際会議が開かれ、氷に関する国際的な学会活動が活発になってきた。研究の国際化が進むなかで、氷の強度試験の方法の基準化の必要が生じてきたわけであるが、とくに、1975年に開かれた IAHN の氷問題に関するシンポジウム (Hanover U.S.A.) において、氷の試験方法の基準化に関するレポートが IAHN の氷委員会において発表された。これは主に、一軸圧縮試験方法と引張試験の方法について述べたものであるが、細部まで決めたものではなく、おおまかな、強度試験方法に関する指針といった程度のものである。

我々は過去千年間、海氷の強度試験方法の確立をめざして実験を行なってきたが、本研究では、引張強度試験方法および曲げ強度試験方法について述べるとともに、それぞれによって決められた試験方法によって強度についても

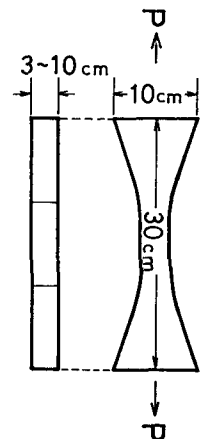
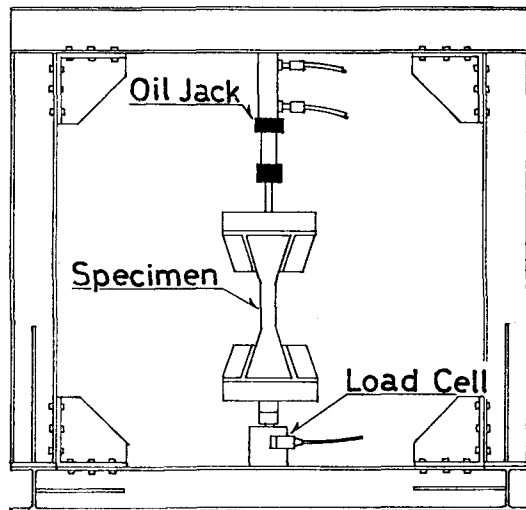


(図-1)

(図-3)

調べた。また一軸圧縮強度試験方法及びその強度については、以前に発表した研究を見ただけでは事足りる。

§2. 試験装置 実験は全て、実際の海氷を用いて行なわれた。実験は佐呂間湖の常呂漁港で行ない、佐呂間湖の海氷と常呂海岸で採取した流氷を用いた。採氷された海氷は時間とともに、その性質が変化するため、強度試験は採氷地点の近くで行なうのが望ましい。なお、本研究で用いた各強度試験の技



試体の採取状態(図-1)に示す。

(1) 引張強度試験

海氷の引張強度試験方法については、直接引張試験と圧裂強度試験の2種類に分けて行なわれた。直接引張強度試験については(図-2)に示すように鋼製フレームにオイルジャッキを取り付け、これにより供試体を直接引張るよう設計されている。引張力はLoad Cellにより測定される。供試体の形は(図-3)に示すような形で、厚さは最大10cmまでとれる。供試体には曲げモーメントが生まれ圧け作用しないように供試体固定金具は全てUniversal Jointによって接続されている。荷重速度は油圧ポンプの油量を調節することにより変える事ができる。直接引張強度試験の供試体はdumbbell形が良いが、海氷の強度が弱いので、供試体の固定が困難な事と供試体作製のための大型機械が必要なる事、供試体作製に時間が必要なため、(図-3)のような形にした。圧裂試験はBrazilian Testとも呼ばれているもので、(図-4)のような試験装置を用いた。供試体は(図-1)に示すように円筒形である。荷重速度(stress rate)は、アーリーを取りかえる事と無段変速アーリーによった。

(2) 曲げ強度試験

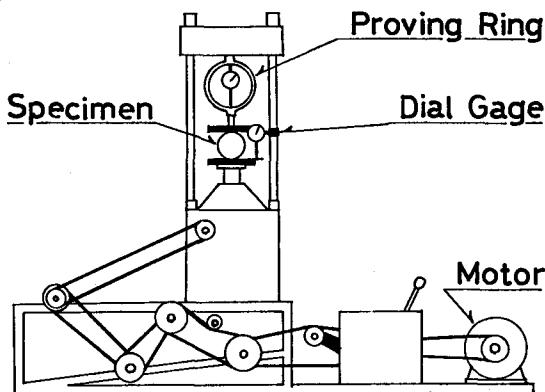
曲げ強度は(図-5)に示すように、直接引張試験に用いた鋼フレームを用い、strain gage付きのProving Ringにより強度を測定した。供試体は矩形断面の形で行なわれ、桁のspanは30~50cm変化できる。また荷重のかけ方は、3等分点載荷法にしている。また桁高は20cm、桁幅は15cmまで試験可能である。

§ 3. 引張強度試験

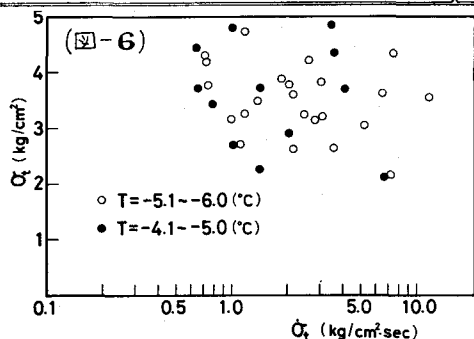
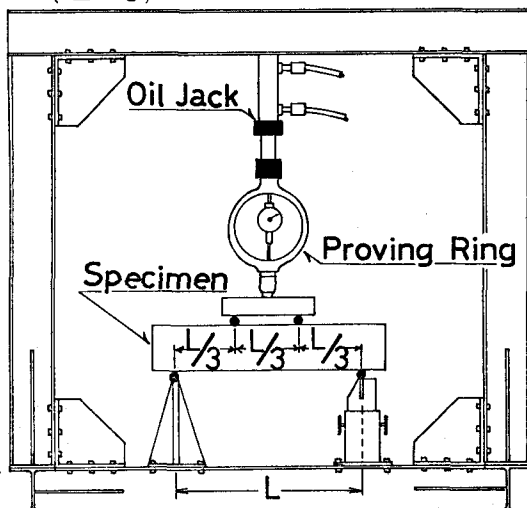
土木材料、例えばコンクリートの引張強度を求める試験方法には、直接供試体を引張る事によって引張強度を求める方法とRing TestあるいはBrazilian Testと呼ばれる圧裂試験のように、円筒供試体を(図-4)のように側方から圧縮することによって求める方法があるが、我々の試験においても、この両方法を用いた。しかし圧裂試験により正確な引張強度を出す条件としては、荷重が線荷重とならねばならない。しかし実験を行くと、載荷板に接する部分は、海氷の強度によって異なるが、数mm程度変形して面荷重となり、理論的には、正確な引張強度を示さない事になる。しかし、この試験方法の特徴は供試体の作製が非常に楽で迅速にできる事、試験が簡単である事である。

(1) 直接引張試験法 (O7)

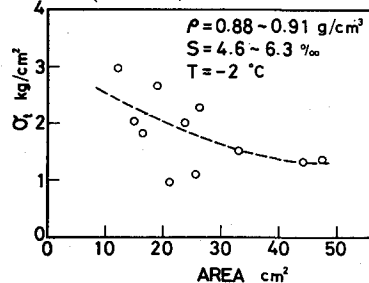
海氷は粘弾性体の性質を有して



(図-5)



(図-7)

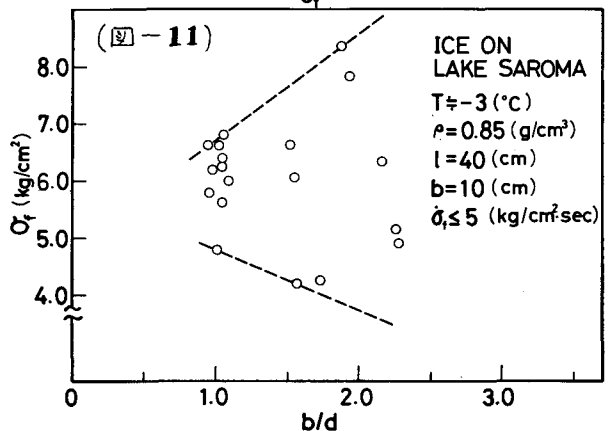
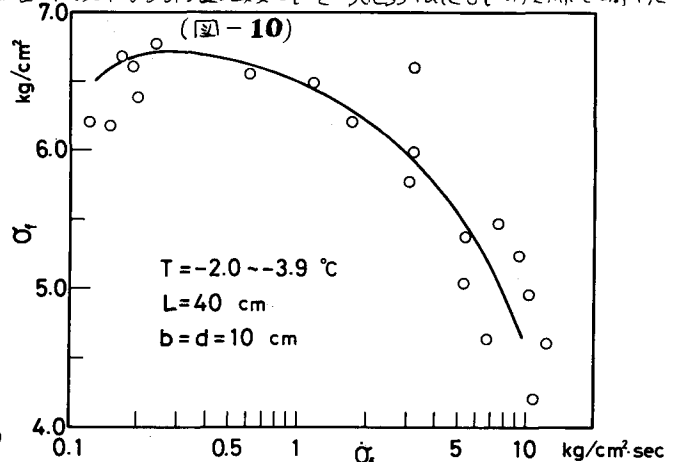
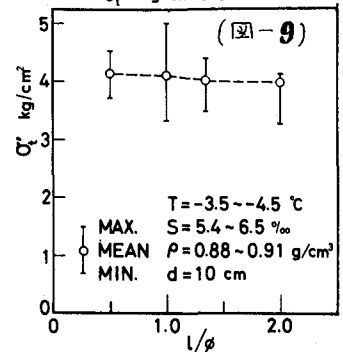
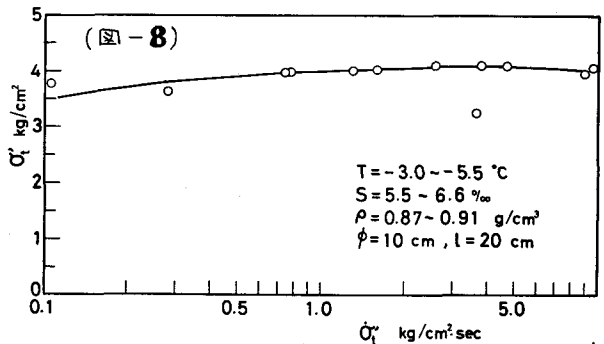


いるため、強度試験においては、stress rate ($\dot{\sigma}_t$)
 や strain rate の影響を受ける。まず stress rate $\dot{\sigma}_t$ と
 直接引張強度 σ_t の関係を調べたものが(図-6)であ
 る。 $\dot{\sigma}_t$ が $1 \sim 10 \text{ kg/cm}^2\text{-sec}$ の範囲では、 σ_t の影響は
 あまり明確でない。考えられる。圧縮強度においては
 我々や Payton の実験から荷重速度が $\dot{\sigma}_c \div 2 \text{ kg/cm}^2\text{-sec}$
 付近で強度が最大となるが、直接引張の場合は、 σ_t
 は図-6から σ_t は一定値を示す。実験値のバラツ
 キは大きい。圧縮強度の場合と同じく、平均値の
 まわりに $\pm 30\%$ の程度である。この直接引張方式試験において、供試
 体の作製と供試体の setting には充分注意を払ったが、これは供試体
 に偏心荷重がかかり曲げて折れる事があるからである。次に断面積の
 効果を調べたものが(図-7)である。実験値にバラツキはあるものの、断面積
 が大きくなるにつれて引張強度 σ_t が小さくなる傾向がみられるが、 40 cm^2
 以上になると、どの断面積効果も小さくなる事を示している。この供試体
 の断面積の増大による強度が低下する現象は、海氷やコンクリートの
 圧縮強度の場合にもみられる。

(2) 圧裂強度試験法 (σ'_t)

海氷の圧裂試験による引張強度 σ'_t と stress rate $\dot{\sigma}_t$ の関係を調べた

ものが(図-8)である。これにより stress
 rate $\dot{\sigma}_t$ の変化による σ'_t の変化極めてゆる
 やかであり、 $\dot{\sigma}_t$ は $\dot{\sigma}_t = 0.7 \sim 6 \text{ kg/cm}^2\text{-sec}$
 の範囲では σ'_t の影響を受けず、また最大値を
 示す事が明らかになった。直接引張強度 σ_t
 及び圧裂強度 σ'_t とともに、stress rate
 の影響を受けようとして、この性質は一軸圧
 縮強度 σ_c の性質とかなり異なるようである。
 次に供試体の寸法効果を調べたものが(図
 -9)である。円筒供試体の径中 $d=10 \text{ cm}$
 として、高さ l を変化させて実験を行なったもの
 である。 (l/d) が小さくなると、 σ'_t は若干大きくなる
 が、 $(l/d) \geq 1.3$ では (l/d) の速に比例せず、ほぼ
 一定値を示す。よって圧裂試験の実験におい
 ては、これからさき、stress rate は $0.7 \leq \dot{\sigma}_t \leq 5.0$
 $\text{kg/cm}^2\text{-sec}$ の範囲で、供試体の寸法は $d=10$
 cm , $l=20 \text{ cm}$ で実験を行う事にする。さきにも
 述べたように、この圧裂試験の条件は荷重速度か
 ける事であるが実際には面荷重となる。よって供
 試体に圧縮強度もかかる事になり、 σ'_t は σ_t よ
 りも大きい値を示す事である。この σ_t と σ'_t
 の関係については後節で述べる事にする。

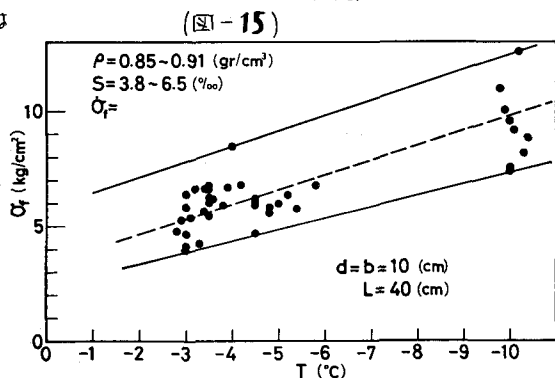
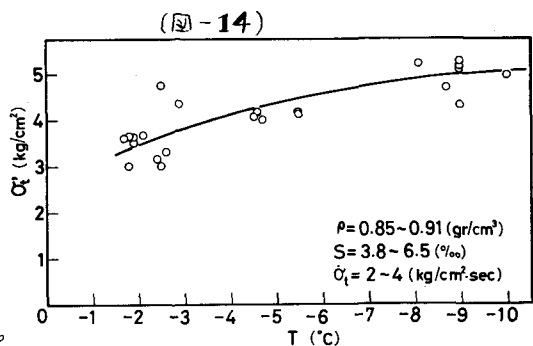
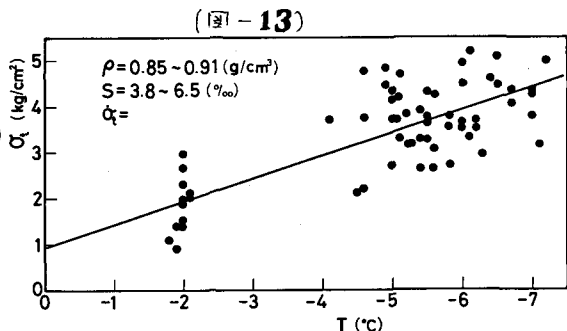
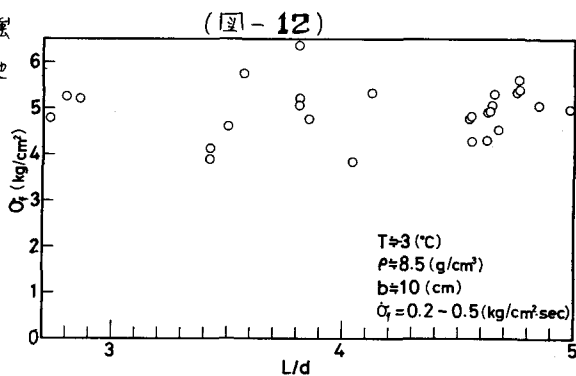


§ 4. 曲げ強度試験 (Of) 海水の曲げ強度

度については Tabata 等による室内実験および、現地氷野での Cantilever Test が行なわれている。この曲げ強度試験方法については、Stress rate $\dot{\sigma}$ の効果と折る寸法効果について調べた。試験は 3 等分点載荷法により行なわれた。Stress rate $\dot{\sigma}$ と曲げ強度 σ との関係を図 10 に示す。これによると、 $\dot{\sigma}$ が $3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ より大きくなると急に σ は小さくなり、 $0.2 < \dot{\sigma} < 2.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の範囲で peak を持っているようである。これは Tabata の研究においても同様の結果を得ている。図中の b は矩形断面桁の桁幅を示し、 d は桁高を示す。L は span 長を示す。(図-10) より、以下の実験結果では $0.2 < \dot{\sigma} < 2.0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の範囲で実験した。次に折る寸法効果を調べた。span 長 $L=40 \text{ cm}$ 、桁幅 $b=10 \text{ cm}$ とし、桁高 d の効果と調べたものが (図-11) である。桁高 d が小さくなるにつれて、実験値の分散が大きくなる事示しているが、これは曲げ強度 σ が矩形断面桁の場合 d^2 に比例するので、 d が小さくなると、氷中の air bubble や brine の量や分布が大きく影響してくるものと思われる。次に span 長 L と桁高 d の比 (L/d) と σ の関係、を調べたものが (図-12) である。この実験では、桁幅 $b=10 \text{ cm}$ と一定で、 $L=30, 40, 50 \text{ cm}$ と変化させ、桁高 $d=5 \sim 12 \text{ cm}$ の範囲で変化させて実験を行なった。これによると、(L/d) $= 2.7 \sim 5.0$ の範囲では、 σ は (L/d) の値にほぼ等しく一定値を示す。以上の寸法効果の実験より、曲げ強度 σ の試験には、桁幅 $b=10 \text{ cm}$ 、桁高 $d=10 \text{ cm}$ 、span 長 $L=40 \text{ cm}$ が適当と判断した。この曲げ強度試験には、3 等分点載荷法を用いたが、これは海水中には air bubble や brine を含んでいて、その分布は必ずしも一様でないために採用したもので、3 等分点荷重を破壊した時のデータのみで採用した。ほとんどの試験で、この値は破壊した。

§ 5. 各強度と氷温の関係

曲げ強度 σ には最も大きな影響を及ぼす因子は氷温 $T(^{\circ}\text{C})$ と氷の密度 $\rho (\text{g/cm}^3)$ であるが、今回の σ 、 σ' とともに σ の実験においては密度 ρ の範囲が $0.85 \sim 0.91 \text{ g/cm}^3$ と狭いため、その効果は明確ではなかった。このため、 σ 、 σ' と T との関係を図 13 に示す。これは σ と T の関係、(図-14) には σ' と T の関係、ともに (図-15) に σ と T の関係

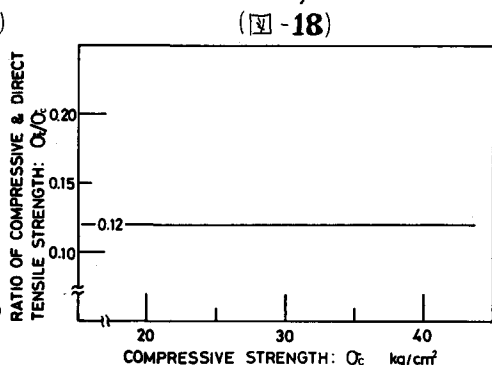
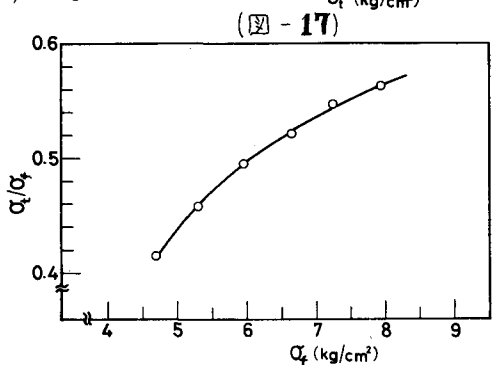
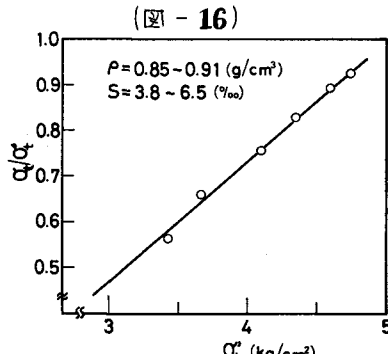
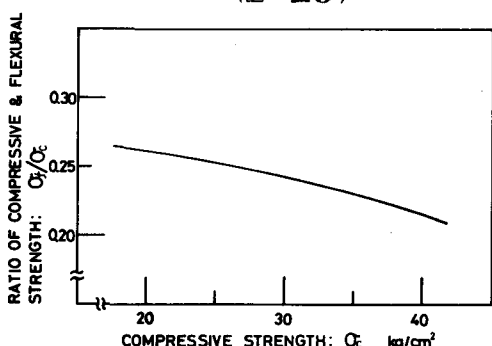
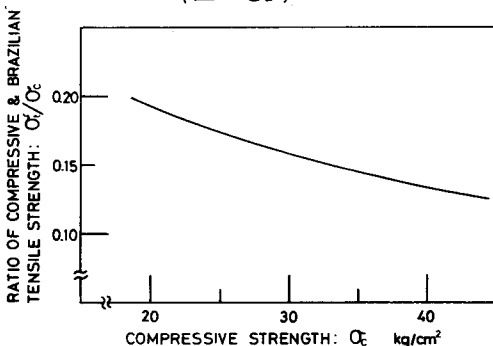


係を示す。とよとよ実験値には多量のバラツキが見えるが、 σ_c と σ_f は両方とも氷温下の低下とともに直線的に増大する事が明らかとなった。これに対して σ_c' は氷温下の低下とともにゆるやかな曲線で増大する。(図-13) と (図-14) より、 σ_c と σ_c' をその T に対する平均曲線とて比較してみると、同一の氷温では σ_c' の方が σ_c より大きな値を示す。これは前にも述べたように、圧型試験で荷重となり、圧縮もかかるため、大きな引張強度を示す事になる。そこで、この両平均値の曲線より

(σ_c/σ_c') と σ_c' の関係を示したものが(図-16)である。これによると、(σ_c/σ_c') は σ_c' の値が大きくなる程、つまり氷温が低下する程 1.0 に接近する。これは水の強度が大きくなると、圧型試験において、荷重に近い荷重条件になつてくると思われる。(図-16) は、試験の簡単な圧型試験による強度 σ_c' が判れば、氷温の引張強度 σ_c を知ることになる。次に(図-17)に σ_c と σ_c' の関係を示す。これによると、 σ_c は σ_c' よりかなり小さい値を示しているが、これは Concrete 等でも同じ性質を持っているが、これは折の応力分布において引張側で直線分布となり事による。また、 σ_c の比である (σ_c/σ_c') は σ_c' が増大する程、増大する傾向がある。この性質も Concrete の場合と同一の性質である。また、 σ_c は氷温下の低下とともに直線的に増大するが、これは Voigt kovskii による淡水氷の場合と同じ傾向を持っている事になる。次に一軸圧縮強度 σ_c と σ_c' 、 σ_f の間の関係を図示したものが(図-18)

(図-19) と (図-20) である。まず(図-18)の (σ_c/σ_c') と σ_c' の関係を見れば、 σ_c' の変化に対する、(σ_c/σ_c') は 0.12 と一定値を示している。これは Concrete における Gonnerman の結果とよく一致している。Concrete の場合、(σ_c/σ_c') は 0.10 となっている。次に(図-19)の (σ_c/σ_c') と σ_c' の関係は、 σ_c' の増大にも関わらず、(σ_c/σ_c') は低下する。また (σ_c/σ_c') の最大値は、ほぼ 0.20 であるが、Concrete の場合とよく一致している。また、(図-20)の (σ_f/σ_c)

と σ_c の関係は σ_c が増大するにつれて (σ_f/σ_c) は直線的に低下する。



Concrete の場合, Graf の実験結果によると, (σ_f/σ_c) の最大値が 0.25 となり, σ_c の増加とともに, (σ_f/σ_c) は直線的に低下している事から, 海氷の場合と Concrete の場合よく一致している事が明らかとなった。以上述べたように海氷の強度の相対値は Concrete に較べ、非常に小さいが, 海氷の各強度間の関係は Concrete の場合のそれと非常に似かよった性質を有している事が明らかとなった。これは Concrete がセメントと粗骨材と細骨材によってなるのに対し, 海氷が純氷、brine、air bubble からなる複合材である事と, Concrete 自身も visco-elastic な性質を有しているからであると思われる。Concrete の場合は、一般に一軸圧縮強度が、Concrete の強度を示す一番簡単な指標となっているが、本研究において一軸圧縮強度 σ_c と σ_t , σ_t' とともに σ_f との関係が得られた事で、 σ_c は「測定のし易さ」他の強度は推定できる事となる。

おわりに

本研究をするに当り、至極的にお協力戴いた佐呂間漁業協同組合および佐呂間湖養殖漁業協同組合の各位に謝意を表するとともに、実馬舎を手伝って戴いた、斎藤浩司氏および西谷一典氏に深甚なる謝意を表する。また本研究の費用は、文部省科学研究、一般研究 C「寒冷地における海洋海岸構造物の効率的設計技術的研究」による事を付記する。

参考文献

- 1) IAHR Committee on Ice Problems; Report of Task-Committee on Standardizing Testing Method for Ice, IAHR Symposium on Ice Problems, Hanover, U.S.A, 1975
- 2) Weeks W.F. & A. Assur; Fracture of Lake and Sea Ice, CRREL Research Report 269, Sep. 1969.
- 3) 近藤泰夫, 坂 静太郎; コンクリートハンドブック, 朝倉出版, 1957
- 4) Gonnerman, H. F. and E. C. Shuman; Compression, Flexure and Tension Tests of Plain Concrete, Proc. of ASTM Vol. 28, Part II, 1928
- 5) Sakai, H. et al; Experimental Study on the Compressive Strength of Sea Ice and The Ice Forces on an Isolated Circular Pile, Coastal Engineering in Japan, Vol. 19, 1976
- 6) 佐伯 浩, 斎藤修一; 海氷の一軸圧縮強度試験と強度について, 土木学会北海道支部論文集 1975
- 7) Sakai, H., T. Nomura and A. Ozaki; Experimental Study on the Testing Methods of Strength and Mechanical Properties for Sea Ice, IAHR Symposium on Ice problems, Luleå, Sweden, 1978