

|         |     |       |
|---------|-----|-------|
| 岩手大学工学部 | 正会員 | 平山健一  |
|         | 正会員 | 笹本 誠  |
| 建設省東北地建 |     | 斉藤 巧  |
| 岩手大学工学部 | 学生員 | ○前田智春 |
| 飛島建設    | 正会員 | 坂本典正  |

## 1 緒言

アラスカ大陸棚における石油、ガス資源の探査、生産、輸送やオホーツク海沿岸の漁場の保全、北海道の結氷河川の水利構造物の耐氷対策など、人間生活の広域化によって氷の影響を考慮すべき問題が身近になり、土木、造船、地球物理などの分野に関連した氷工学と呼ばれる新しい工学的境界領域が形成されている。氷工学は、氷の発生成長、分布、氷の物性の調査、研究を基礎的分野として、氷のコントロール、耐氷設計法などの応用的分野を含んでいる。

耐氷構造物の設計において、もっとも支配的な要因の一つである氷の力学的性質は、氷の結晶構造、気泡量、塩分量、氷温などの氷の成長過程に関連した要因や、歪み速度、断面積、高さなどの供試体寸法、氷の成長方向に対する載荷方向等、試験方法によるパラメータに依存することが知られている。

本研究では、氷の力学的性質に関する上記のパラメータの効果を実験的に明らかにし、これまでの多くの研究結果を比較検討し各結氷水域の氷の強度特性を明らかにすることを目的としているが、その第一段階として圧縮強度をとり、比較的大きな径をもつ柱状の結晶構造の淡水氷を用いて供試体形状、寸法、氷温、載荷方向、歪み速度が強度に及ぼす影響について実験的に検討した。

## 2 氷の採取、運搬、保管方法

氷の強度試験では、人工の氷を用いる場合と自然の氷を使用する場合がある。本試験では、実際の設計に直接役立ち、冬期には氷が入手しやすく、また供試体の寸法を出来るだけ大きくとれるように自然氷を用いた。

氷は岩手県玉山村の山間部に位置する岩洞湖（図1参照）の淡水氷を利用した。この地域は、本州で最も気温が低い地域として知られており、年平均気温は 5.7℃、厳冬期（12月～3月）における平均気温は -5.5℃（S52～S62）で、氷の成長は、他の湖沼と比べて著しく大きくなっている。

氷は湖面に張った氷を、チェーンソーで切り出し、その断面を観察して、比較的成長が一定で、気泡などの分布が様な氷層を選び、円柱形供試体については、現場において二種類の直径をもつコアドリルにより採取した。

供試体の円柱主軸は、氷の成長方向に直角に採る場合を主体としているが、平行方向の試料も比較のため準備されている。

氷は、発泡スチロールの容器に格納され車で、現場より約20kmの位置にある岩手大学の試験室へ運搬され、低温室で -10℃ の温度で保管された。

## 3 氷の種類

岩洞湖は、比較的降雪が少なく気温が低い。このため氷結晶は急速に発生し結晶は種々の形状を持ち 3～7cm の大きさであることが偏光板による観察であきらかとなった（図2参照）。氷層は柱状構造をなす Michel and Ramseier の分類によれば S1 氷（主たる結晶軸方向が垂直の柱状氷）と判定された。

氷中には、気温の寒暖によって成長速度の違いから氷中に取り込まれた気泡の不均一な分布が形成されており、氷質の比較的一様な氷層の厚さは最大十数センチであり、これにより供試体の最大径が制約された。

今回の試験は、淡水氷を対象としている。塩水から発生する海水には、ブラインといわれる濃縮した塩水のセルが氷中に規則的に分布し、その大きさは温度により変化し、氷の力学的特性に影響を与えるため、淡水の氷とはこの点で異なっている。淡水氷の使用による海水との相違点については、今後、ブラインの効果について検討する必要があるが、純氷強度の温度特性、供試体寸法の影響等の調査項目については、十分な基礎的データをを得ることができる。

## 4 試験方法

低温室に保管された氷は、試験時、供試体両端をバンドソーで、再度、整形したうえ、予め温度を試験温度に保たれた別の試験室に 24 時間以上保管し、サーミスタ温度計で氷内部の温度が設定温度に到達するのを確認した後試験した。

圧縮試験機は 10t のロードセルを有し、荷重及び歪みはレコーダーに記録され、また、クロスヘッドの載荷速度は、インバーターによるモーターの回転数の調整と減速器のギヤ比を変えることにより制御され可変となっている。クロスヘッドの上昇速度は  $0.5 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^0$  (mm/sec) の範囲である。

試験は以下に示す 6 つのパラメーターをそれぞれ変化させて行なった。

1) 歪み速度 2) 氷温 3) 供試体の高さ 4) 載荷方向 5) 供試体の断面積 6) 供試体の形状  
試験条件を表-1 に示す。

表において、H: 供試体の高さ D: 直径 T: 氷温  $\dot{\epsilon}$ : 歪み速度を示す。

載荷方向は図-3 のように氷の成長方向に垂直 ( $\sigma_H$ ) と水平 ( $\sigma_V$ ) の 2 方向とした。4)、5) の試験については氷厚の大きい氷が得られなかったため供試体高さを約 8 cm としている。

また、予め行った試験により本氷に対する圧縮強度の基準となる標準試験条件を  $D = 8$  cm,  $H = 16$  cm,  $T = -5^\circ\text{C}$ ,  $\dot{\epsilon} = 6.08 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  載荷方向は氷の成長方向に水平、供試体は円柱で行い、各パラメーターを替えた場合の強度との比較検討を行っている。

## 5. 試験結果

### 5. 1 歪み速度の効果

歪み速度 ( $\dot{\epsilon}$ ) と強度の関係を図 4 に示す。図において  $\dot{\epsilon}$  が  $1.52 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  の時に強度が最大となり、これより大きい範囲では脆性破壊 (BRITTLE FAILURE) が、小さい範囲では延性破壊 (DUCTILE FAILURE) が卓越した。図 5 に参照されるように脆性破壊においては、荷重は短時間で最大に達し、その後、急に減少するが、延性破壊では、荷重の増加はゆっくりであり、最大値に達したあとの減少も緩慢である。この最大強度に対応する歪み速度は、これまでの雪氷や柱状氷に関する試験結果の報告では  $10^{-3} \text{ sec}^{-1}$  程度の歪み速度でとされているが、結晶径の大きな氷を用いた本試験ではこれより小さい値が得られ氷質によりこの値が変化する事が示された。供試体内部の歪みは、結晶粒界が重要な役割をなすと考えられるが、本氷は、雪氷等に比べて結晶径が大きく、また形状も複雑であるため歪みに対して抵抗力が大きい材料と考えられる。又、歪み速度がある値より大きくなるとほぼ一定の強度となることも観察された。延性破壊から脆性破壊への遷移域で最大強度を示し更に歪み速度が大きくなると強度はかえって減少し一定値になる結果は、他の文献にも与えられている性状と類似している。本試験の結果より、本報告の他の試験では、ほぼ一定の強度となる BRITTLE FAILURE の範囲に相当する  $\dot{\epsilon} = 6.08 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  を用いて試験を行っている。

### 5. 2 氷の温度の効果

氷温変化 (T) と強度 ( $\sigma$ ) の関係を図 6 に示す。図において T の減少とともに  $\sigma$  は増加傾向にあることがわかる。温度による強度の増加は、本試験結果について  $-1.6 \text{ kg/cm}^2/^\circ\text{C}$  となっている。雪氷による脆性破壊領域での試験結果は、Carter and Michel, Haynes に与えられているが、これらによれば、強度の増加率は、それぞれ  $-5 \text{ kg/cm}^2/^\circ\text{C}$ ,  $-3.2 \text{ kg/cm}^2/^\circ\text{C}$  であり、また 佐伯のサロマ湖氷にたいする実験結果も、約  $4 \text{ kg/cm}^2/^\circ\text{C}$  であり本試験結果より大きい。Hirayama はこれまでの試験結果をまとめて  $-5^\circ\text{C}$  から  $-30^\circ\text{C}$  の範囲で増加率を  $-4.2 \text{ kg/cm}^2/^\circ\text{C}$  を得ている。温度の低下に伴う強度の増加は、氷の材料的弱点となる供試体中の結晶粒界の存在の効果も大きいと考えらるが、本試験で用いられた氷の結晶径が大きく、粒界の長さが比較的短いことを考慮すれば、上記文献の結果との違いが理解される。

海水に対するこれまでの研究では、温度が強度に及ぼす効果についてはブライン体積の大きさをパラメーターとして表示されているが、これは氷内部の空隙の大きさと氷自体の強度の増加の両方の効果を表すものである。上記の結果は後者の影響を示しており海水に適用するためには、更に与えられるブライン体積  $v$  の増減による有効断面積の算定が必要である。

### 5. 3 供試体の高さや直径の比の効果

供試体の高さや直径の比 ( $H/D$ ) と強度 ( $\sigma$ ) の関係を図 7 に示す。図において○印は平均値、エは標準偏差の幅を示している。これより  $H/D$  の増加に伴い  $\sigma$  は減少傾向がみられる。また、表-2 では  $H/D = 2$  を基準とした強度の比 ( $\alpha$ ) を示し ( $\alpha$ : 割増し係数)、さらに  $\alpha$  と  $H/D$  との関係を示したもの

が図8の実線部分である。これと比較するためにコンクリートの場合の円柱供試体における高さと直径の比と強度との関係を示したものが破線部分である。これらより両者はほぼ同じ結果を示し、 $H/D$ の値が小さくなるほど圧縮強度の増加の割合が大きくなり、 $H/D$ が大きくなるほどほぼ一定値に近づくという共通点が見られる。

この高さと直径の比の増加による強度の減少は、供試体両端部における氷とクロスヘッドの間の摩擦、供試体内部に含まれる材料的欠陥の確率的増加のためと思われる。一般に圧縮試験では、鉄製の荷重端が直接試料の両面に接触し、その摩擦のために試料の両端では半径方向の伸びが制限され、その付近での応力は三軸状態となることが知られている。また、その摩擦の影響を最小限にするために、ラバーやテフロン等の特別のキャッピングを用いたり、試料を十分に長くし中央部では両端の摩擦の影響がないようにすることが良い試験結果を得るのに望ましいとされている。本試験結果によれば、 $H/D$ が 2.0 ～ 2.5 程度が望ましいと判断される。

#### 5. 4 荷重方向の効果

荷重方向と氷の成長方向をそれぞれ平行、垂直にして得られた圧縮強度を比較すると、 $\sigma_H$ の方が $\sigma_V$ より強度は大きく約 1.28 倍であった。CarterとMichel (1971) は、S2 氷の強度における荷重方向の影響について試験を行い -10 °C においては $\sigma_H$ は $\sigma_V$ よりも約 2 倍大きくなっていることを示し、また、V.V.Lavrov によると、-3.2 °C の淡水氷の場合、 $\sigma_H$ と $\sigma_V$ の比は約 1.24 倍となっている。これは氷の成長方向に円筒状に存在する気泡の投影面を考えた場合、 $\sigma_H$ の場合、氷の実面積が大きいことや、平行荷重の場合、結晶粒界の影響が小さいことなどが原因として挙げられる。

#### 5. 5 断面積の効果

供試体の直径を変えた試験では、直径 8 cm の方が 15 cm のよりも強度は大きくその比は約 1.20 倍であった。つまり断面積が約 3.5 倍の時、強度は約 0.8 倍となった。

V.V.Lavrov によると淡水氷において  $T = -3.4$  °C、高さ  $H = 4$  cm、荷重時間  $t = 3.5$  sec、断面積  $S = 18.0$  cm<sup>2</sup> の時  $\sigma = 70.0$  kg/cm<sup>2</sup> であり、断面積  $S = 24.0$  cm<sup>2</sup> の時は  $\sigma = 65.2$  kg/cm<sup>2</sup> となった。これより断面積が約 1.3 倍の時、強度は約 0.93 倍である。これらの結果はいずれも断面積の大きいほうが強度は小さくなるということを示しており、直径の大きい程、供試体断面に含まれる結晶数が多いため境界面での破壊が生じ易いためと考えられる。

本実験に用いられた供試体直径は、氷の結晶径に比べ、十分大きいとはいえないので結晶径および結晶構造の影響については、今後、大型の供試体を用いた試験や、更に小さい結晶径の氷を用いた試験を実施する必要がある。

#### 5. 6 供試体形状の効果

ほぼ同一の断面積を持つ角柱と円柱供試体の強度は、円柱供試体の方が大きく円柱供試体の強度を基準にした場合、角柱の供試体の強度の比は 0.92 となった。これは供試体の形状の変化により、供試体内部の応力分布が異なり、角柱供試体の方が応力集中が発生し易いことが推定される。コンクリートではこの比は 0.93 となっている。

### 6 結論

本研究により、圧縮強度は水温、歪み速度、供試体高さや直径の比の関数として表示され、また、円柱供試体と直方体供試体の強度の換算係数、氷の成長方向と荷重方向の関係が明らかとなり、異なった試験条件で行われた氷強度試験結果の比較検討に有用な結果が得られた。国際水理学会 Committee on Ice Problems の研究小委員会で検討された、氷の標準試験方法によれば、圧縮試験では、供試体の高さや直径の比を 2.0 ～ 3.0 にすることなどを推薦しているが、本試験の結果からも、妥当な値であることが示されている。

しかしながら、本報告で得られた種々の比較や係数は、結晶径が大きく、結晶形状も不揃いの氷についての結果である。今後、雪氷や結晶径の小さな柱状氷についての試験や、大型の供試体による圧縮試験を実施して行く必要がある。また、圧縮強度ばかりでなく曲げ強度など構造物設計に重要な氷の物性についても試験方法の違いによる測定強度への影響について検討が必要と考えられる。

# 参考文献

- [1] V.V.Lavrov : Deformation and Strength of Ice, 1969
- [2] B.Michel : Ice Mechanics, Les Presses de l'Universite Laval, 1978
- [3] G.D.Ashton : River and Lake Ice Engineering, Water Resources Publications, 1986
- [4] W.F.Weeks and A.Assur : Fracture of Lake and Sea Ice, CRREL Research Report 269, 1969
- [5] E.P.Pounder : Physics of Ice, Pregamon Press, 1965
- [6] 佐伯 浩他 : 海洋構造物に作用する海水の力に関する研究、第22回海岸工学講演論文集、1975
- [7] K.Hirayama J.Schwarz and H.C.Wu : An Investigation of Ice Forces on Vertical Structures, IIHR Report, 1974



Fig.1 Location of Lake Gandou

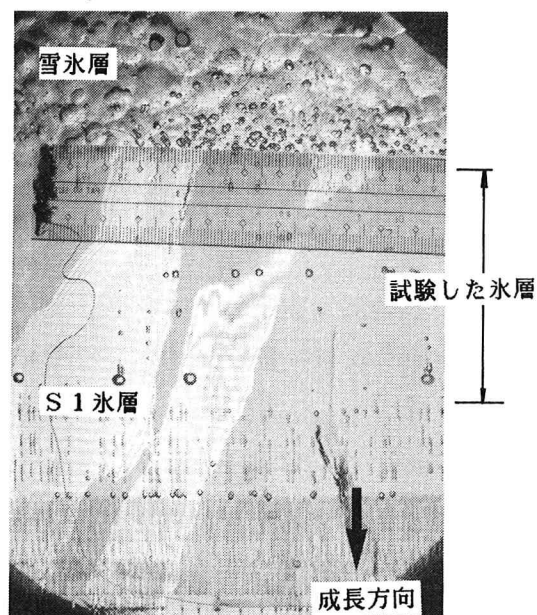


Fig.2 Crystal Structure of the Ice used for testing.

|   | H (cm) | D (cm) | T (°C) | 方向    | $\epsilon$ (s <sup>-1</sup> )                       | 形状    |
|---|--------|--------|--------|-------|-----------------------------------------------------|-------|
| 1 | 16     | 8      | -5     | 水平    | $7.604 \times 10^{-5}$<br>$\sim 7.2 \times 10^{-3}$ | 円柱    |
| 2 | 16     | 8      | -2~-18 | 水平    | $6.08 \times 10^{-4}$                               | 円柱    |
| 3 | 4~24   | 8      | -5     | 水平    | $6.08 \times 10^{-4}$                               | 円柱    |
| 4 | 8      | 8      | -5     | 水平・垂直 | $6.08 \times 10^{-4}$                               | 円柱    |
| 5 | 4.75   | 8~15   | -5     | 水平    | $6.08 \times 10^{-4}$                               | 円柱    |
| 6 | 8.7    | 16     | -5     | 水平    | $6.08 \times 10^{-4}$                               | 円柱・角柱 |

Table 1 Experimental Conditions

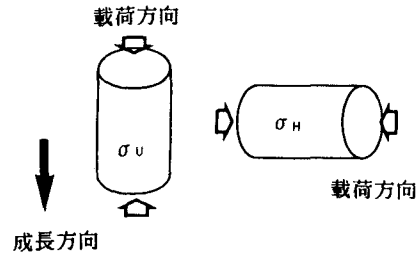


Fig.3 Preparation of Specimen and Loading Direction

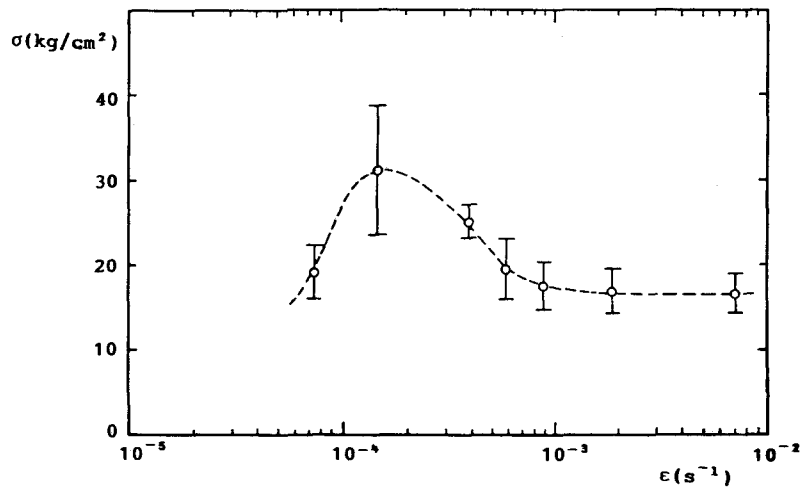


Fig.4 Compressive Strength vs Strain Rate

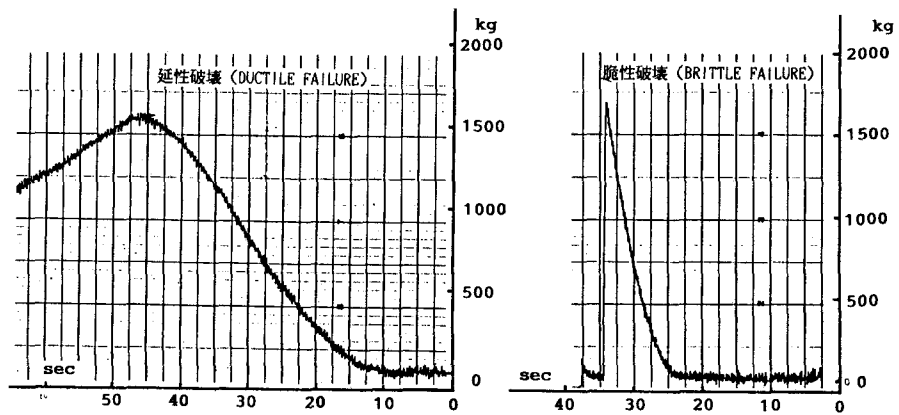


Fig.5 Force vs Time Curves for Ductile and Brittle Failure

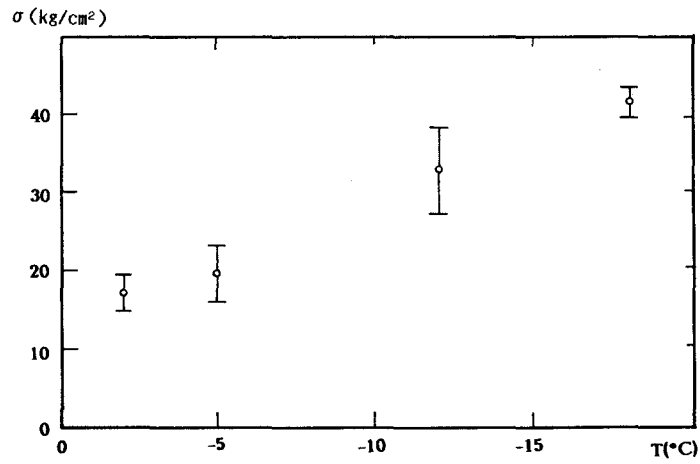


Fig.6 Compressive Strength vs Temperature

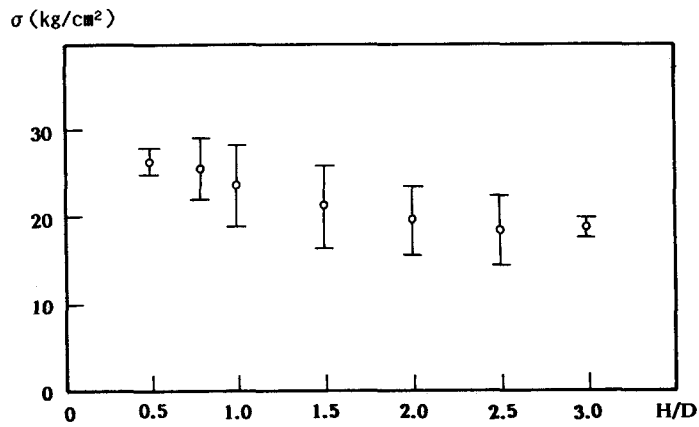
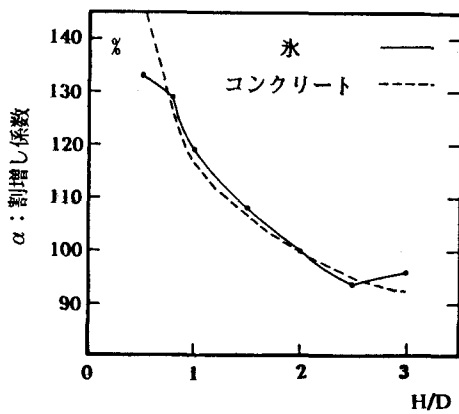


Fig.7 Compressive Strength vs Ratio of H/D



| H/D | 0.5  | 0.8  | 1.0  | 1.5  | 2.0  | 2.5  | 3.0  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| α   | 1.33 | 1.29 | 1.19 | 1.08 | 1.00 | 0.94 | 0.96 |

Table 2 α- values for various H/D

Fig.8 Comparison of α for ice and concrete