

氷強度試験条件の効果と試験方法の基準化

平山 健一*・石田 宏**・堺 茂樹***
笹本 誠****・前田 智春*****

1. はじめに

結氷海域に計画・建設される 海岸護岸、港湾の諸施設、海洋構造物の設計において、氷の強度は、氷の形態、氷の厚さと共にもっとも支配的な設計条件の一つである。

氷の力学的性質は、その成長過程、試験方法などに関した多くのパラメーターに依存することが知られている。

これまでの数多くの氷強度の試験は不統一な様々の試験方法で行われており、試験結果には大きなバラつきが生じ、これらの結果から、その氷の強度を標準的に判断し、各氷海域の氷強度を比較することは困難な状況である。本研究では、各パラメーターが氷強度に与える影響を明らかにし、種々の試験結果を総括するための手法の開発を目的としている。

2. 研究・実験の概要

氷の圧縮強度および曲げ強度に及ぼす気泡量、塩分量、氷温、歪速度、供試体寸法、載荷方向などの効果を、青森県小川原湖水、岩手県岩洞湖水、四十四田ダム湖水、及び人工雪氷による室内試験を行い実験的に調べた。

また北半球の結氷水域で実施されたこれまでの氷の圧縮強度試験、曲げ強度試験の結果を整理し、併せて本実験結果と比較検討し、各パラメーターの効果を数値的に明らかにしている。さらに標準的強度試験法を決定する条件をまとめる。

著者らの氷強度試験方法の概要は、圧縮強度試験については現場の水を採取し、低温実験室に運搬・保管し、試験片を整形の上、所定の試験条件のもとで圧縮試験機を用いて試験を行っている。氷の運搬は発泡スチロールの容器に氷塊を収納して融解など結晶構造の変化、損傷を防いだ。氷塊は実験予備室の室温を -10°C に保って保管し、試験用供試体は、角柱型については、バンドソ

ーで整形し、円筒型については電動コアドリルで抜き取り、両端をバンドソーで平行に切りそろえた。圧縮試験機は、氷用に試作したもので、最大荷重 10 tf 載荷板の速度は $0.0232\sim 3.208\text{ mm/sec}$ の範囲である。

曲げ強度試験は、水面に張った氷板をその場で、チェンソーでコの字型に切り、片持ち桁とし、その先端に載荷して曲げ試験を行う、いわゆる in-situ 試験と、単純桁を切り出し水面から引き上げ曲げ試験機を用いて行う単純桁 1 点載荷試験、2 点載荷試験を行った。これらの試験の荷重の測定は Push-pull 荷重測定機、CBR 試験機用荷重リングを用いた。実験室の水槽でも同様に試験をすることが出来る。野外の試験では、氷温の変動を十分に把握するため、試験片と同じ環境にダミーの氷片を置き温度の観測を経時的に行った。

3. 実験結果および考察

著者らの試験を含むこれまでの試験結果を総括し、各パラメーターが氷強度に与える効果は次のようにまとめられる。

3.1 圧縮強度試験について

圧縮強度については、歪速度、氷温、ブライン体積、載荷方向、供試体高さと直径の比、結晶径と供試寸法の比、供試体形状の効果について調べた。

(1) 歪み速度の効果

歪み速度 ($\dot{\epsilon}$) と強度 (σ) の関係を図-1 に示す。図において歪み速度が約 $1.0\times 10^{-3}\sim 4.0\times 10^{-3}(\text{sec}^{-1})$ の範囲で、強度は最大となる。これより小さい範囲では延性破壊が、大きい範囲では脆性破壊が卓越することが知られている。また、脆性破壊が生ずる範囲の歪み速度で、強度は一定となる傾向が見られる。従って標準的には脆性破壊の範囲で強度を測定するのが望ましいと考えられる。著者らは $4\sim 7\text{ cm}$ の大きな複雑な形状の結晶を持つ氷について最大強度となる時の歪み速度の値が上記よりも小さく、結晶径が $1\sim 2\text{ mm}$ で気泡の均一に分布した人工雪氷では、ほぼ上記の値に近い歪み速度となることを見いだした。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、強度が最大となる歪み

* 正 員 Ph. D 岩手大学教授 工学部土木工学科

** 正 員 工博 岩手大学助教授 工学部土木工学科

*** 正 員 工博 岩手大学助手 工学部土木工学科

**** 正 員 岩手大学 工学部土木工学科

***** 学生員 岩手大学 工学部土木工学科

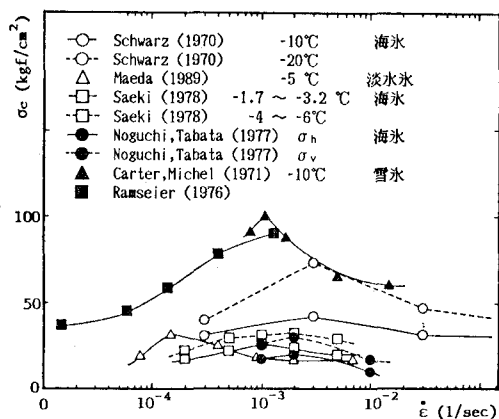


図-1 歪み速度と圧縮強度の関係

速度は氷結晶径により変化することが明らかになった。

(2) 氷温の効果

氷温 $T(^{\circ}\text{C})$ とその時の強度を $T = -10^{\circ}\text{C}$ の時の強度で無次元化した強度比の関係を図-2 に示す。図によると、 $0.06/^{\circ}\text{C}$ 程度の増加率で強度比は増加する。

(3) 供試体高さ と直径の比の効果

円柱供試体高さ L と直径 d の比 L/d と $L/d=2$ の時の強度で無次元化した強度比の関係を図-3 に示す。 L/d が増加すると強度は減少するが、2.0 程度の値以上になるとほぼ一定の値に近づく。氷と比較するためにコンクリートの例を示したがほぼ同様の傾向を示している。 L/d 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の欠陥の確率増加のためと考えられる。よって標準的試験の L/d は2.0~3.0の範囲を用いることが望ましいと考えられる。

(4) 結晶径に対する供試体寸法の効果

圧縮強度は供試体寸法だけではなくむしろ結晶径と供試体寸法の比に依存することが知られている。供試体中に含まれる結晶数が多い程、結晶粒界に沿ってクラックが伝達し、逆に結晶数が限界値以下の時はクラックは結晶内部で形成されるため大きな応力が必要とされる。結晶径 d_{cr} と供試体寸法 d の比 d/d_{cr} と $d/d_{cr}=25$ の時の強度で無次元化した強度比の関係を図-4 に示す。

図より d/d_{cr} が20より大きくなると強度は一定値に漸近し、寸法効果の影響を除くことが出来る。

(5) ブライン体積の効果

淡水氷にはない海水特有の結晶構造にブラインがある。ブラインは海水の結氷の過程で塩水が海水内に濃縮されて取り残されたもので、その分布は材料としての欠陥となる。ブラインの配列間隔、大きさは温度、塩分濃度、冷却速度により変化することがわかっている。

ブライン体積 v_b と $v_b=0$ の時の強度の無次元化した

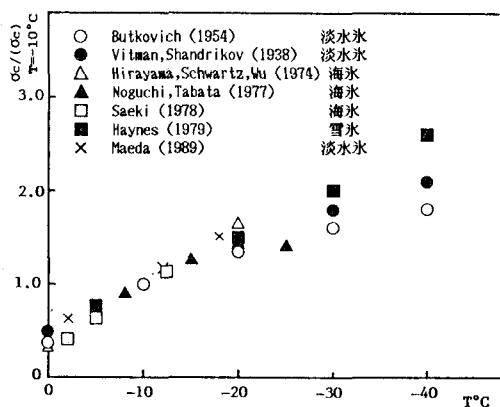
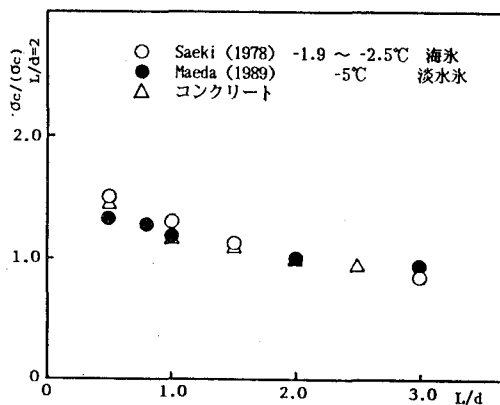
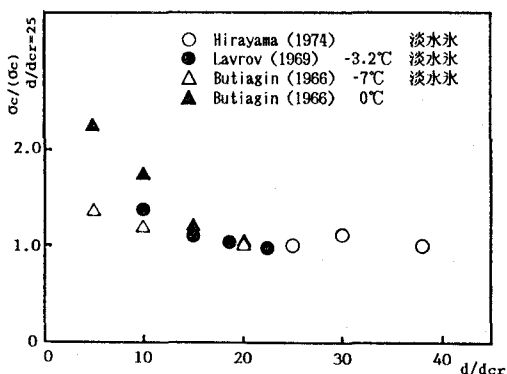


図-2 氷温と圧縮強度比の関係

図-3 L/d と圧縮強度比の関係図-4 d/d_{cr} と圧縮強度比の関係

強度比の関係を図-5 に示すが、強度比はブライン体積の平方根に比例して減少する。

(6) 载荷方向の効果

载荷方向を氷の成長方向とそれぞれ平行、垂直にして

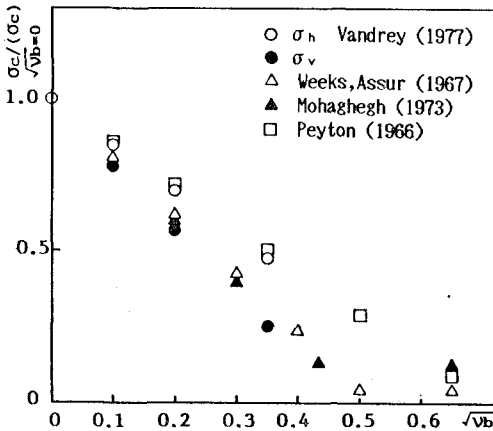


図-5 ブライン体積と圧縮強度比の関係

表-1 荷重方向と圧縮強度比の関係

測定者 (測定年)	$\sigma_v : \sigma_H$
Butkovich (1959)	3 : 1
Peyton (1966)	3 : 1
Hirayama (1974)	1.2 : 1
Vaudrey (1977)	2 : 1
Schwarz (1970)	0.8 : 1
Noguchi, Tabata (1977)	2 : 1
Carter, Michel (1971)	2 : 1
Lavrov (1969)	1.24 : 1
Maeda (1989)	1.28 : 1

 σ_v : 氷板面に対し垂直方向に荷重 σ_H : 氷板面に対し垂直方向に荷重

試験し得られた強度を σ_v, σ_H とすると両者の比は表-1 のようになる。通常、氷は成長方向に柱状の構造を持つため、柱の長手方向の強度が大きくなる。

これまでの試験結果では σ_H と σ_v の比は 1 : 1.1 ~ 3.0 の範囲であり、 σ_v の方が一般に大きい、氷質によりバラツキがあり、Schwarz (1970) の結果のように σ_H の方が大きい場合も見られた。

(7) 供試体形状による効果

同一断面積の円柱供試体と角柱供試体の強度比は 1 : 0.93 であり、コンクリートの場合と、ほぼ同じ結果が得られた。角柱供試体は、円柱供試体に比べ、供試体内部に応力集中が発生し易いことが推定される。

3.2 曲げ強度試験について

これまでに行われた曲げ試験結果より、曲げ強度に与えるパラメーターとして桁の長さ L と氷厚 h の比、桁の幅 b と氷厚 h の比、氷温、ブライン体積、荷重速度、片持ち桁と単純桁、荷重方法などについて次のようにまとめられる。

(1) 桁の長さ L と厚さ h の比の効果

桁の長さ L と厚さ h の比 L/h と $L/h=5$ の平均強度で無次元化した強度比の関係を図-6 に示す。IAHR Ice Committee 提案によれば桁長を厚さの 7~10 倍とし

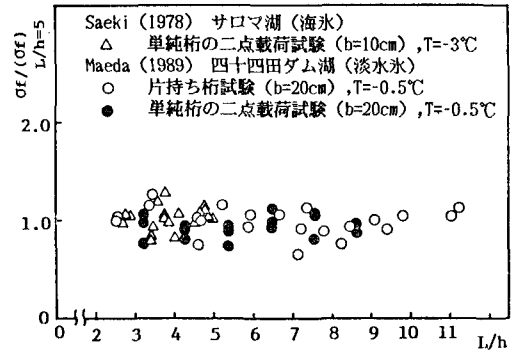
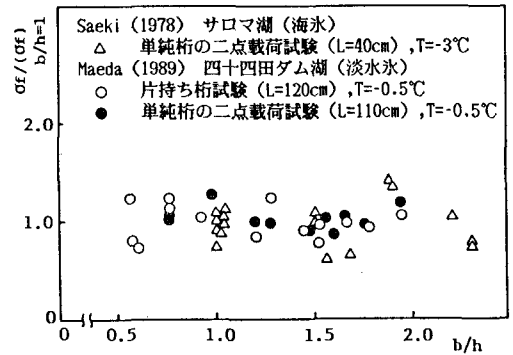
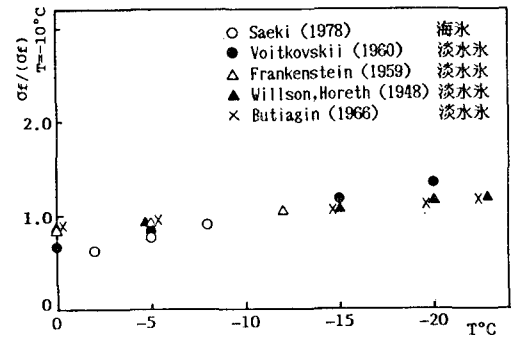
図-6 L/h と曲げ強度比の関係図-7 b/h と曲げ強度比の関係

図-8 氷温と曲げ強度比の関係

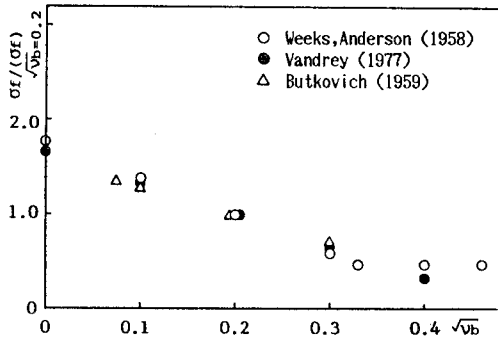
ているが、 $L/h=2.5 \sim 11$ の範囲で強度に有為な差が認められなかった。

(2) 桁の幅と厚さの比の効果

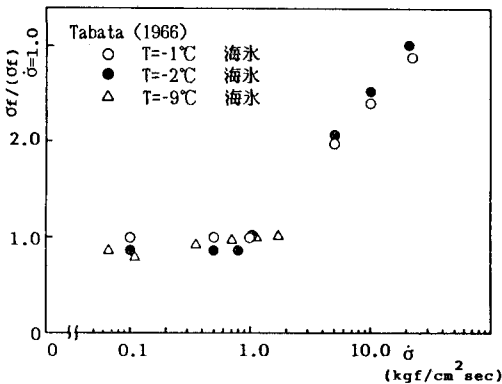
桁の幅 b と厚さ h の比 b/h と $b/h=1.0$ の平均強度で無次元化した強度比の関係を図-7 に示す。これによると $b/h=0.5 \sim 2.3$ の範囲ではほぼ一定であった。

(3) 氷温の効果

氷温と氷温が -10°C の時の強度で無次元化した強度比を示したものが図-8 である。氷温の低下とともに強度比は増加するが、増加率は約 $0.03/^\circ\text{C}$ となり、圧縮強



図—9 プライン体積と曲げ強度比の関係



図—10 荷重速度と曲げ強度比の関係

度に比較しその増加率は小さいことが認められた。

(4) プライン体積の効果

PLAIN体積と $\sqrt{V_b}=0.2$ の時の強度で無次元化した強度比を図—9に示す。

PLAIN体積が増加すると強度はその平方根に比例して減少する傾向は、圧縮強度試験の場合と同様であるが、曲げ強度の場合、強度比の減少の割合は小さく、 $\sqrt{V_b}=0.3$ 以下ではほぼ一定の強度比となっている。

(5) 荷重速度の効果

荷重速度が $1 \text{ kgf/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の時の強度比と荷重速度の関係を図—10に示す。荷重速度が $1 \text{ kgf/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 以下ではほぼ一定であるが、その以上の場合には荷重速度に依存することが見いだされている。

(6) 試験方法の効果

岩手県四十四田ダムにおける現場試験結果など片持ち桁と単純桁による曲げ試験の比較、単純桁で1点載荷、2点載荷試験の比較のための資料を表—2に示す。

(a) 片持ち桁試験、(b) 単純桁1点載荷試験、(c) 同2点載荷試験による比較では、どの場所の供試体も(b)による強度は大きめとなり、(a)と(c)はほぼ同じ値がえられた。

表—2 試験方法と曲げ強度の関係

供試体採取場所	試験方法	供試体数	平均強度 (kgf/cm^2)	標準偏差 (kgf/cm^2)
四十四田ダム	片持ち桁試験	13	3.13	0.35
	単純桁の一点載荷試験	6	3.51	0.80
	単純桁の二点載荷試験	5	2.91	0.46
Seeding ice	片持ち桁試験	29	7.81	2.27
	単純桁の一点載荷試験	23	12.59	2.63
	単純桁の二点載荷試験	18	8.71	0.85
小川原湖 (姉沼)	片持ち桁試験	23	4.96	1.39
	単純桁の一点載荷試験	10	6.18	0.88
小川原湖 (上北)	片持ち桁試験	35	7.20	1.38
	単純桁の一点載荷試験	52	7.94	1.79

測定強度の標準偏差は、(c)が小さく、(b)が大きい傾向が見られている。Lavrov(1969)は片持ちの桁試験の測定強度は単純桁1点載荷測定強度よりも小さくなる事を明らかにしており、Gow(1977)は片持ち桁と単純桁の一点載荷試験の比較によって強度比が1.5~2.0を得ているが、上記の試験結果と同様な傾向である。

本結果より曲げ試験に最も適した試験方法は、桁の中央部に一定の曲げモーメントを生じ、さらにこの部分はせん断応力が自由な状態となる単純桁の2点載荷試験が標準的と考えられる。また、測定強度が前記の試験法に近く、試験の簡便さ、温度分布が実際に近い点では片持ち桁試験が推薦される。

4. おわりに

氷の圧縮強度は歪速度、氷温、供試体高さや直径の比、結晶径と供試体寸法、PLAIN体積、試験片の形状などのパラメーターの関数として表示され、曲げ強度に対する桁の長さや厚さの比、桁の幅と厚さの比、氷温、PLAIN体積、荷重速度、載荷方法などの効果が明らかになった。これらの結果を用いれば異なった試験条件で行われた氷強度試験結果の比較が可能である。

また氷の試験においては本報告で検討した各パラメーターを記録することが重要である。今回の検討では試験機の載荷可能容量の制約から供試体断面積の効果について検討が不足しているが、今後の課題である。

参 考 文 献

- 納口恭明・田畑忠司 (1977): 海水の圧縮強度. 北海道大学低温科学研究所 低温科学物理篇, 第35巻
- 前田智春 (1989): 氷圧縮強度試験結果の比較研究. 東北支部技術研究発表会講演概要 P. 194~195.
- Anderson, D. L. (1958): A model for determining sea ice properties. In Arctic sea ice. U. S. Nat. Academy of Science, Nat. Res. Council, Publication 598, P. 148~152.
- Brown, J. H. (1963): Elasticity and strength of sea ice. In ice and snow-processes, properties, and applications, Cambridge, Mass: MIT Press, p. 79~103,

- Butiagin, I. P. (1966 a): Strength of ice and ice cover(R). Izdatel'stvo "Nauka" Sibirskoe Otdelenie pp. 1~154.
- Butkovich, T. R. (1954): Ultimate strength of ice, SIPRE Research Report 11, pp. 1~12.
- Butkovich, T. R. (1955): Crushig strength of ice. SIPRE Research Report 15, pp. 1~5.
- Butkovich, T. R. (1959 a): On the mechanical properties of sea ice, Thule, Greenland, SIPRE Res. Rep. 54, pp. 1~11.
- Butkovich, T. R. (1959 b): Some physical properties of ice from the TUTO tunnel and ramp, Thule, Greenland SIPRE Reseach Report 47, pp. 1~17.
- Carter, D., and B. Michel, (1971): Laws and mechanisms of apparent brittle fracture of river and lake ice (Lois et mecanismes de l'apparente fracture fragile de la glace de riviere et de lac) (In French). Faculte des Sciences, Universite Laval, Quebec, Report S-22.
- Frankenstein, G. (1959): Strength data on lake ice. SIPRE Technical Report 59, pp. 1~6.
- Frankenstein, G. (1961): Strength data on lake ice, Part II SIPRE Technical Report 80, pp. 1~18.
- Gow, A. J. (1977): Flexural strength of ice on tempokll lakes. Journal of Glaciology, Vol. 19, no. 81, pp. 247~256.
- Haynes, F. D. (1979): Temperature effect on the uniaxial strength of ice. In POAC 1979, Vol. 1, pp. 667~681.
- Hirayama, K., Schwartz, J. and Wu, H. C. (1974): An Investigation of Ice Forces on Vertical Structures. Iowa Inst. of Hydraulic Research, Univ. of Iowa, IIHR Report No. 158.
- Korzavin, K. N. (1982): Action of ice on engineering structures. Izdatel'stvo "Nauka" Sibirskoe Otdelenie, pp. 1~220.
- Lavrov, V. V. (1969): Deformation and strength of ice, Arctic and Antarctic Scientific Research Institute (Leningrad 1969) Israel Prag. for Scientific Transl., a971.
- Mellor, M. and Hawkes, I (1971): Mearurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli Engineering Geology, 5(3), pp. 173~225.
- Mohagegh, M. M. (1973): Detemining the strength of sea ice sheet. AIDJEX, Bulletin No. 18, Feb, 1973, pp. 96~109.
- Peyton, H. R. (1963): Some mechanical properties of sea ice. in ice and snow-processes, properies, and applications Cambridge, MIT Press, pp. 107~113.
- Peyton, H. R. (1966): "Sea ice strength". Geophysical Institute, Univ. Alaska, Report UAG 182, 187 p.
- Ramseier, R. O. (1976): Growth and mechanical properties of river and lake ice Ph. D, dissertation, Faculty of Science Department of Civil Engineering, Laval. Univ. Quebec.
- Saeki, H. (1978): Experimental study on the testing methods of strength and mechanical properties for sea ice pp. 135~149.
- Schwarz, J. (1970): The pressure of floating ice fields, Proceedings of 1st IAHR Sympoium on Ice and its Action on Hydraulic Structures, Reykjavic, 1970.
- Vaudrey, K. D. (1977): Ice Engineering study of related properties of floating sea ice sheets and summary of elastic and viscoelastic analyses. Technical Report, Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California.
- Tabata, T. (1965): Studies of the mechanical properties of sea ice VIII. Measurement of the flexural strength in situ. Low Temperature Science, Vol. A23, pp. 157~166.
- Tabata, T. (1966): Studies on the mechanical properties of sea ice IV. Measurent of the flexural strength in situ. Low Temperature Science, Vol. A24, pp. 259~268.
- Tabata, T. (1967): The flexural strength of small sea ice beam. Inphysics of snow and ice, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Vol. 1, No. 1, pp. 481~497.
- Vitman, F. F. and Shandrikov, N. P. (1938): Some investigations of the mechanical strength of ice. Tr. Arktic heskogo Instituta, Vol. 110, Leningrad, pp. 83~100.
- Voitkovskii, K. F. (1960): The mechanical propertier of ice (r). Izdatel'stvo Adademii Nauk SSSR, 100 p.
- Weeks, W. F. and Anderson, D. L. (1958): An spexperimantal study of the strength of young sea ice. Tran. Am. Geophys. Un. 39, pp. 641~647.
- Weeks, W. F. and Assur, A. (1967): The mechanical properties of sea ice. U. S. Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) II-C3, Hannover.
- Wilson, J. T. and Horeth, J. M. (1948): Bending and shear tests on lake ice. Transactions of fhe Geophysical Union, vol. 29, pp. 209~212.
- Wu, H. C., Chang, K. J. and Schwartz, J. (1976): Fracture in the compression of colomnar grained ice. Engineering Fracture Mechanics 1976, vol. 18, pp. 365~372.