

海水の剪断強度及び付着力に関する研究

A Study on the Shearing Strength and Adhesive Strength of Sea Ice

松下久雄^{*1} ・ 高脇 透^{*2} ・ 竹内貴弘^{*3} ・ 酒井雅史^{*4} ・ 寺島貴志^{*5} ・
Hisao Matsushita, Toru Takawaki, Takahiro Takeuchi, Masafumi Sakai, Takashi Terashima,
本田秀樹^{*6} ・ 正木孝治^{*6} ・ 西畑昭史^{*6} ・ 花田真州^{*6} ・ 佐伯 浩^{*7}
Hideki Honda, Takaharu Masaki, Akifumi Nishihata, Masakuni Hanada, Hiroshi Saeki

In constructing an offshore structure in a sea area covered with ice it is necessary to understanding the ice load exerted by drift ice. To determine the adhesive and the shearing strengths, and their relation to the bending strength, we used the first-year ice of Notoro lagoon. To define the stress distribution of shear strength of the test specimen, we employed FEM elastic stress analysis. The adhesive strength test specimen kept outdoors separated at the attached surfaces, yielding an adhesive strength of 50 kPa. The shearing strength test specimen ruptured in bending. The shearing strength was found 0.2 - 0.3 MPa.

Keywords : sea ice , shearing strength, adhesive strength, FEM analysis

1. はじめに

氷海構造物にかかる氷力を正確に求めるためには、海水の種々の強度特性を明らかにしておく必要がある。今まで、海水（一年氷）の圧縮強度や曲げ強度特性は明らかにされてきた^{1) - 3)}が、破碎した流水やそれらが固まり氷丘となった場合の海水強度に大きな影響を与える海水同士の付着力や剪断強度に関する研究は少ないように思われる。そこで、能取湖の海水を用いて、野外に放置したり - 20℃で冷凍した場合の海水の付着力や剪断強度を約1ヶ月の経時変化で調べた。また、FEM弾性応力解析を行い試験片の応力分布を明らかにし、破壊発生部での強度を詳細に検討した。これらの結果から、付着力の経時変化、付着力や剪断強度と曲げ強度との関係等を考察した。以上から氷力算定のための海水強度特性に関する基礎データを得た。

2. 試験

2. 1 試験方法

試験に用いた海水は能取湖の天然氷（一年氷）で二見が丘漁港の岸壁から沖合約15m離れた位置から採取したものの中核部分（水平方向）である。

試験片は、図1に示す形状寸法の付着力試験片（A試験片）、剪断強度試験片（S試験片、SN試験片（切欠を付けたもの））及び曲げ試験片B（三点曲げ、幅45X厚45X支持点間200mm）と圧縮試験片C（直径75X長さ150mm）である。各試験片の負荷方向は同一とした。ここで、A試験片は、海水のプ

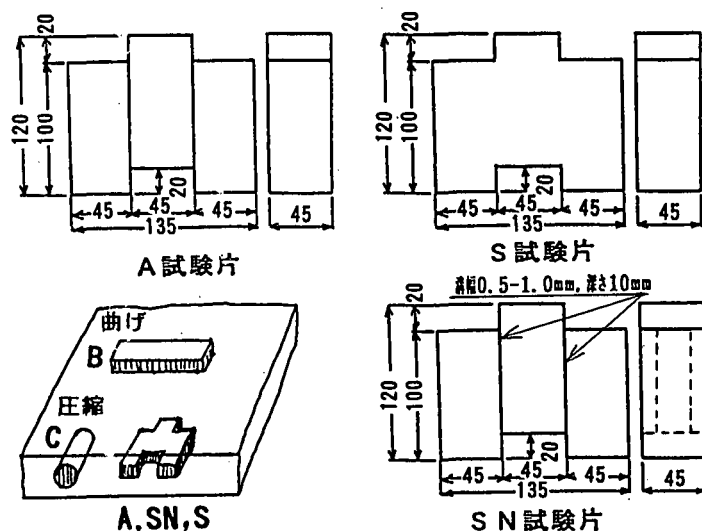


図1 試験片形状・寸法

^{*1} 正会員 三井造船株式会社 船舶艦艇事業本部技術開発部（290 市原市八幡海岸通り1番地）

^{*2} 株式会社三造試験センター

^{*3} 正会員 清水建設株式会社

^{*4} 正会員 大成建設株式会社

^{*5} 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社

^{*6} 学生会員 北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻（研究当時）

^{*7} 正会員 北海道大学工学部土木工学科

ロック（幅45X厚さ45X長さ100mm）を3つ重ね、海水に浸した雪で付着させて製作した（図2参照）。S試験片は、海水から直接切り出し、また、SN試験片は、S試験片に鋸で溝幅0.5～1.0mm、深さ10mmの切欠きを試験片両面に加工したものである。

A試験片については、そのまま日の当たらない位置（図3参照）に9日間及び16日間放置したもの、さらにそれぞれ9、16日間野外に放置後冷凍庫（-20℃）内に9日間保管したもの、及び製作後すぐに冷凍庫に保管したものを用意した。S、SN試験片及び結晶組織観察用サンプルは、製作後すぐに冷凍庫に保管した。

試験は、モーター駆動の一軸圧縮試験機を用い、歪み速度 10^{-3} で行った。図4に試験状況を示す。



図2 付着力試験片製作状況

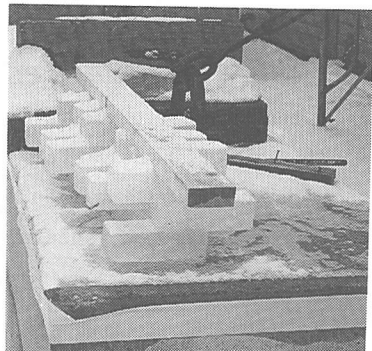


図3 付着力試験片の野外放置状況

2. 2 換算式

付着力及び剪断強度は、（1）式を用いて計算した。

$$\tau = P / 2A \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Pは荷重、Aは付着部断面積（SN試験片では切欠部分の実断面積）

2. 3 試験結果

図5に野外放置した場合の付着力を示す。この図から以下のことが分かる。尚、破壊はすべて付着部分の剥れ破壊であった。

- （1）付着力は野外放置日数（9日間、16日間）にかかわらず、数十kPa（氷温-3℃）である。
- （2）野外放置後9日間冷凍すると、ばらつきはあるが付着力は0.1MPa程度（氷温-3℃）になる。

図6に製作後すぐに冷凍した場合の剪断強度や曲げ強度の経時変化を、図7に各試験片の破壊経路を纏めたものを、図8に冷凍10日後の付着部の結晶構造写真を、それぞれ示す。

これらから、以下のことが分かる。

- （1）A試験片の場合、10日間以上冷凍すると付着部は強固になり、破壊は付着した部分に限らず、S試験片の場合と同様、試験片下部（凹部）から発生し（図7参照）、S試験片と同様の剪断強度を示す（図6参照）。剪断強度は0.2-0.3MPa（氷温 -20℃付近）。

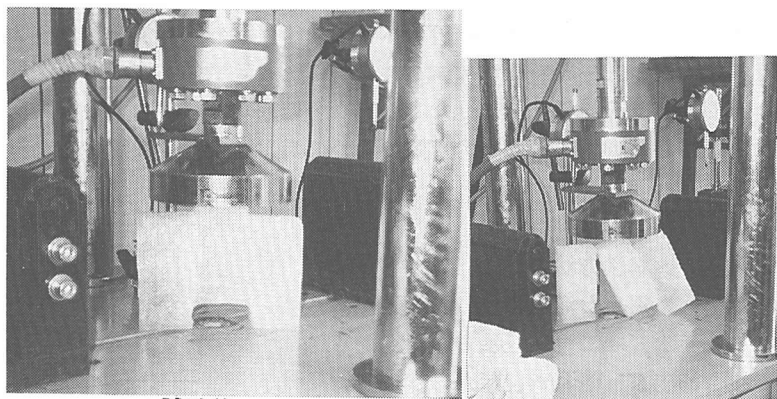


図4 試験状況（付着力試験片）

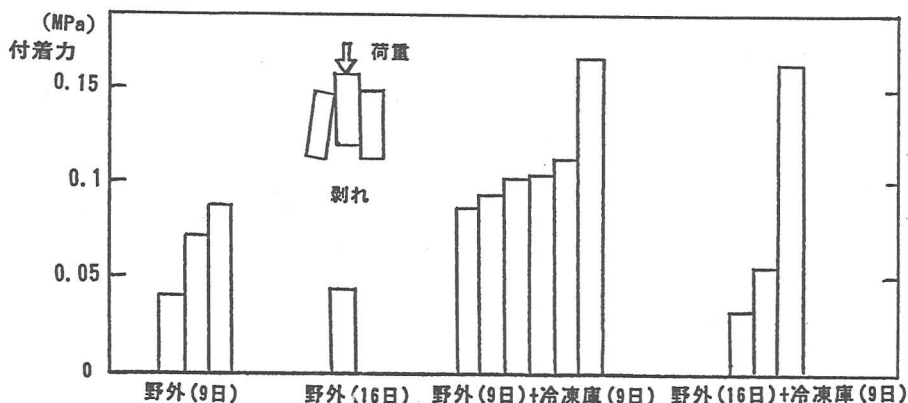


図5 野外放置の付着力試験片の付着力

(2) 各試験片の強度は、冷凍期間（10～29日間）にかかわらずほぼ一定である。曲げ強度は、0.5MPa（水温-20℃）前後で-2℃の値(0.28MPa)の約2倍。尚、圧縮強度は、2.5MPa（水温-20℃）前後で-0.3℃の値(0.4MPa)の約6倍。

(3) SN試験片の場合には、試験片下部（凹部）コーナーの切欠端部が破壊発生位置である。

(4) 剪断強度は曲げ強度よりも小さい。また、切欠を付けた場合、ない場合に比べ、剪断強度は若干大きくなる。

表1に実験結果を纏めて示す。

尚、(3)、(4)については、後述するように、今回の試験片形状による影響が大きいことからさらに検討する必要があるものと考ええる。

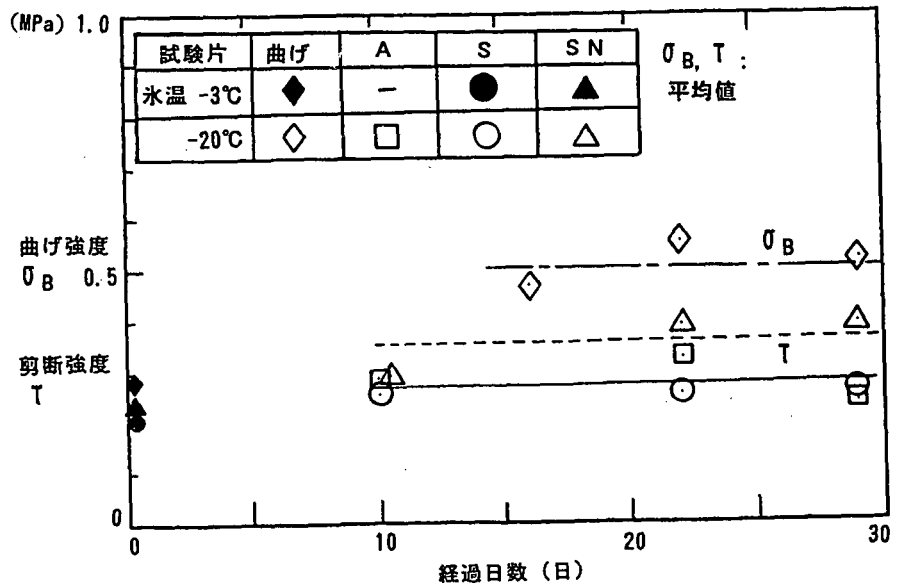
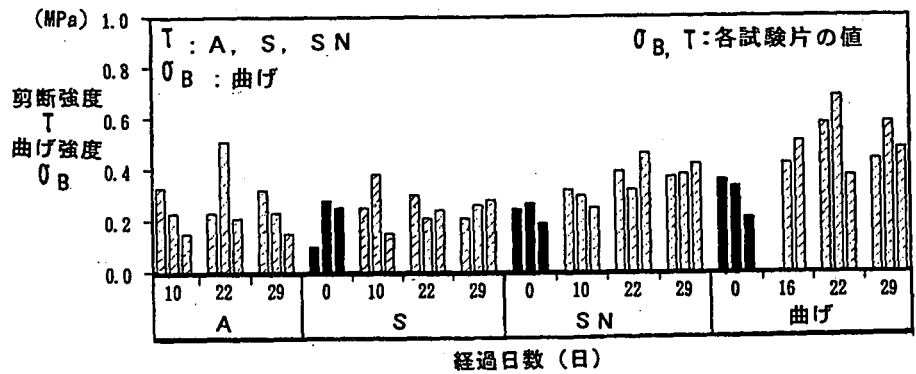


図6 製作後すぐに冷凍した場合の各試験片強度の経時変化

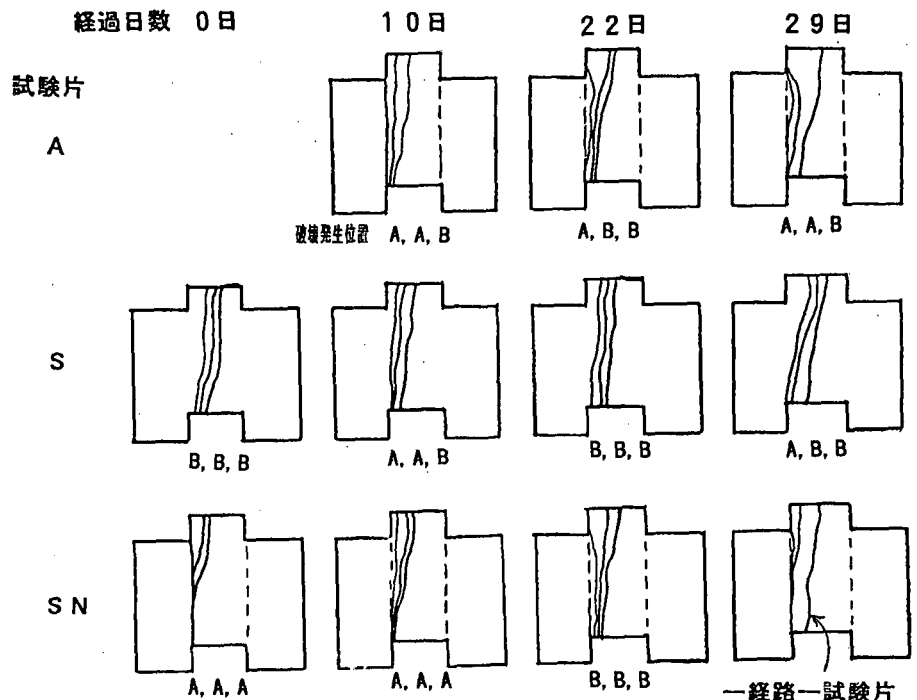


図7 各試験片の代表的な破壊経路（纏めたもの） A, A, B

表1 試験結果の纏め (付着力、剪断強度)

付着試験片 (A)				* 剥がれ破壊 発生位置
試験片製作	野外放置	冷凍		
T (MPa)	9日間 0.069 (A*)	16日間 0.045 (A*)	9日間 0.114 (A*) 0.085 (A*)	試験片下部 (凹部)
(試験時水温)	(-3℃)	(-3℃)	(-3℃)	A コーナー部 B 平坦部
剪断試験片 (S)				
試験片製作	冷凍	10日間	22日間	29日間
T (MPa)	冷凍0日 0.21(B)	0.23(B)	0.26(A,B)	0.25(B)
(試験時水温)	(-8℃)	(-8℃)	(-17℃)	(-17℃)
剪断試験片 (SN)				
試験片製作	冷凍	10日間	22日間	29日間
T (MPa)	冷凍0日 0.23(A)	0.29(A)	0.39(B)	0.39(A,B)
(試験時水温)	(-3℃)	(-17℃)	(-17℃)	(-20℃)

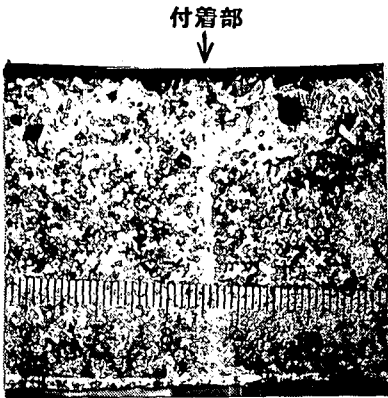


図8 付着部の結晶写真
(-20℃で10日間保持)

3. FEM解析

3.1 解析条件

図9にFEM弾性応力解析に用いたSN試験片のモデル図を示す。解析には、ヤング率=300MPa, ポアソン比=0.3を用いた。

3.2 解析結果

図10に得られたS, SN各試験片の剪断応力分布図(負荷応力=1MPaの場合)を示す。この図から、FEM解析から求められた付着部断面での平均剪断応力 τ_F, τ_{NF} は、S試験片の場合(2)式で、また、SN試験片の場合(3)式でそれぞれ近似的に計算される。

$$\tau_F = 0.22 \times \sigma_0 \quad \dots (2)$$

$$\tau_{NF} = 1.0 \times \sigma_0 \quad \dots (3)$$

ここで、 σ_0 は負荷応力: P/A_0 、

A_0 は負荷部面積である。

S試験片の場合、(1)式での τ 値は、

τ_F 値よりも若干大きい値であること:

$$\tau / \tau_F = (P / (45 \times 80 \times 2)) / (0.22 \times P / (45 \times 45)) = 1.3$$

また、SN試験片の場合、 τ 値は、切欠効果による応力集中が加味されないため、 τ_{NF} 値の約半分となること:

$$\tau / \tau_{NF} = (P / (25 \times 80 \times 2)) / (1.0 \times P / (45 \times 45)) = 0.5$$

がわかる。

図11に、FEM解析によるS, SN各試験片でのY軸方向の応力分布をそれぞれ示す。これらの図から以下のことが分かる。

(1) S試験片では、試験片下部(凹部)に引張応力 σ_{T1} が発生しその最大値は σ_0 の約0.5倍である。

(2) SN試験片では、試験片下部(凹部)コーナー部の切欠による応力集中が存在するため、 σ_{T1} は σ_0 の1倍強になる。

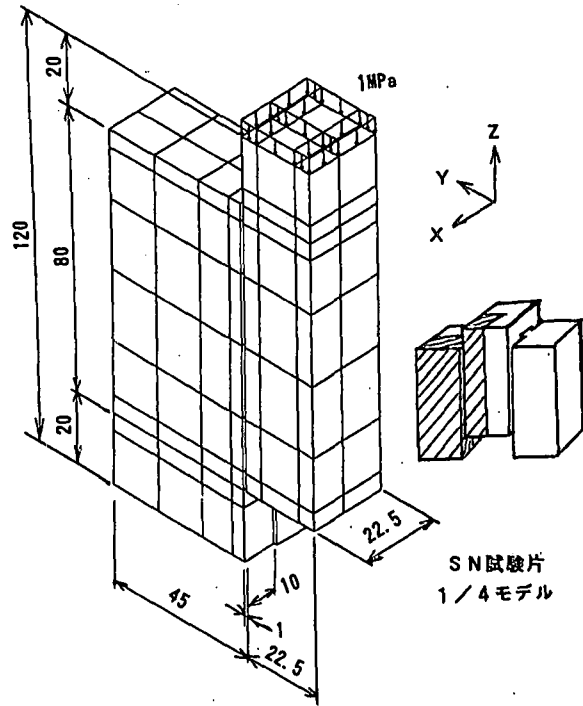


図9 FEM弾性応力解析モデル

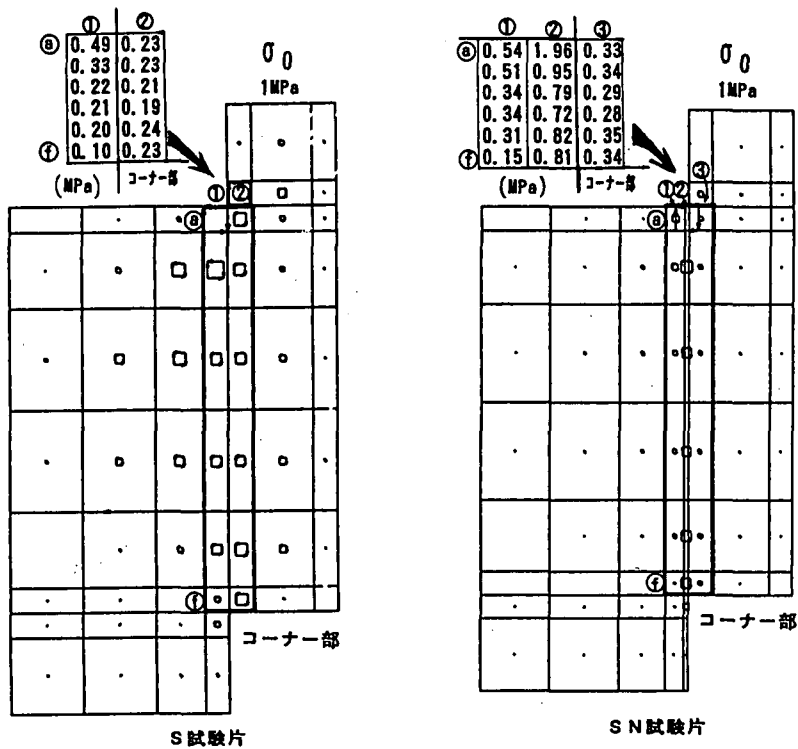


図 10 FEM弾性応力解析結果 (剪断応力分布図)

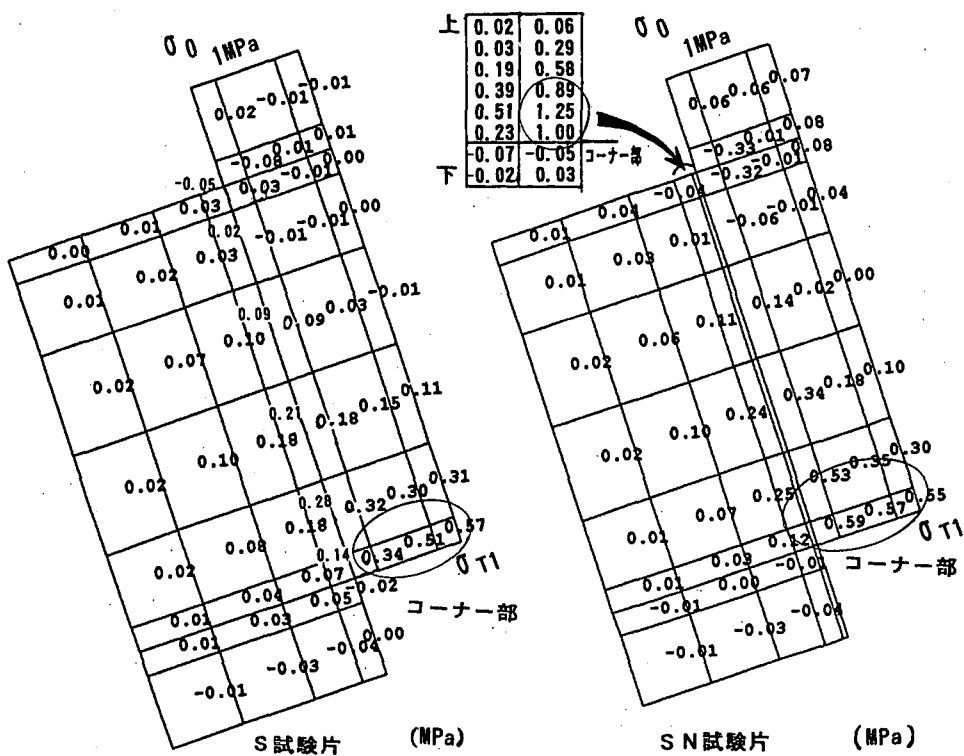


図 11 FEM弾性応力解析結果 (Y軸方向応力分布図)

4. 考察

図12に各試験片の破壊発生時の負荷応力 σ_{of} と曲げ強度 σ_B との関係を示す。図中には、 $K\sigma_o$ ($K=0.3\sim1.0$)の線図も示す。この図から、曲げ強度に対応する K 値は、A、S試験片では0.4～0.6の範囲に、SN試験片では0.6～0.8の範囲になる。この結果は、 σ_{T1} の最大値付近の K 値：S試験片($K=0.34\sim0.57$)、SN試験片($K=0.55\sim1.00$) (図11参照)にほぼ対応している。また、破壊発生位置の観察結果 (図7参照) とFEM解析結果 (σ_{T1} の最大値発生位置、図11参照) とほぼ一致している。これらのことから、S、SN試験片とも試験片下部 (凹部) で、 σ_{T1} が曲げ強度に達した場合に破壊すると仮定することが可能と思われる。

以上から、今回の試験片では、付着が強固な場合には、曲げ強度で決まる割れ破壊が試験片下部 (凹部) から発生することが分かる。ここに、野外に放置した場合には、付着部の海水が減少しブロー等剥れの起点が存在しやすくなることから剥れやすくなるが、付着部に海水が多く存在する状態で冷凍した場合には海水がすぐに冷凍されるためにブロー等剥れの起点が存在しなくなり、このことから付着が強固になり、試験片形状で決まる応力集中部から破壊することになるものと考えられる。本実験結果から、海水や雪が海水同士の間が存在する状態で -20°C に数日 (10日以内) 保持されると海水同士の付着力は急激に上昇することがわかる。

今後は、さらに10日以内の付着力増加の経過過程を調べたい。

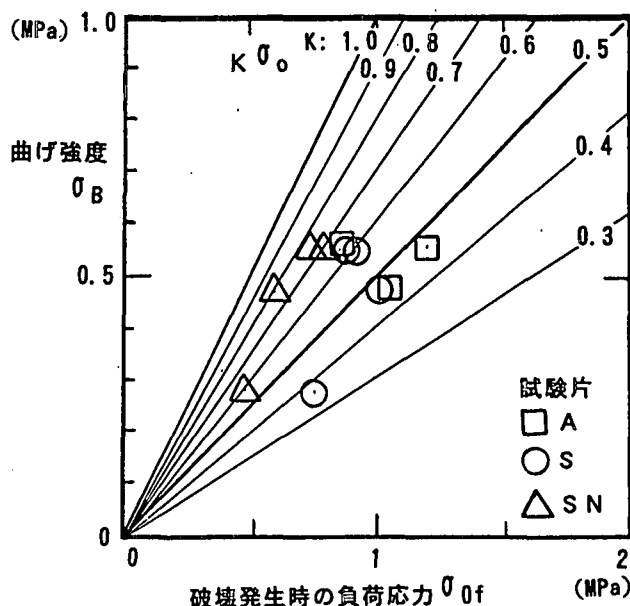


図12 破壊発生時の負荷応力 σ_{of} と曲げ強度 σ_B との関係

5. まとめ

一年氷の海水の付着力や剪断強度を明らかにした。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 雪と海水で接着した海水同士の付着力は、北海道の冬期 (2月中) 野外保管 (16日間まで) の環境で、50kPa 程度、さらに -20°C の冷凍庫内で9日保管した場合は0.1MPa程度 (氷温 -3°C) である。
- (2) 海水同士を雪と海水で接着した後 -20°C の冷凍庫内で8日間以上保管した場合は付着部からの剥がれ破壊ではなく試験片形状で決まる応力集中部からの割れ破壊が支配的になる。この時の破壊条件は、“局所引張応力が曲げ強度に達した時”と考えられる。

本研究は (社) 日本海洋開発産業協会 (通称: JOIA) の「海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究」 (委員長 佐伯浩北大教授) のもとで行われたものである。本実験実施に際し島田建設 (株) 成田主任殿はじめ多くの方々及び東京農業大学の学生小林君、松浦君、野中君の協力を得たので記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 松下久雄、正木孝治、竹内貴弘、酒井雅史、佐伯 浩；海水の一軸圧縮強度について、寒地技術論文・報告集、Vol. 12, No. 1, pp. 516-521, 1996. 11.
- 2) 松下久雄、高脇 透、平山健一、正木孝治、西畑昭史、花田真州、本田秀樹、佐伯 浩；垂直壁構造物の氷荷重に関する天然氷を用いた野外実験－能取湖海水の圧縮強度と曲げ強度－、寒地技術論文・報告集、Vol. 12, No. 1, pp. 522-529, 1996. 11.
- 3) H. Matsushita, T. Takawaki, T. Masaki, M. Hanada, A. Nishihata, H. Saeki and K. Hirayama, “MEDIUM SCALE FIELD INDENTATION TESTS - PHYSICAL PROPERTIES AND STRENGTH OF THE ICE SHEET -”, ISOPE97, 1997. 5. 投稿中 他