

Unconsolidated layer modelのせん断 強度特性に関する基礎的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF UNCONSOLIDATED LAYER MODEL

松尾優子¹・Sergey Kochkin²・近藤浩文²・横山 茂²・木岡信治³・佐伯浩⁴
Yuko MATSUO, Sergey KOCHKIN, Hirofumi KONDO, Shigeru YOKOYAMA,
Shinji KIOKA and Hiroshi SAEKI

¹札幌市役所(〒060-8611 札幌市中央区北1条西2丁目)

²学生会員 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 博(工) 北海道開発土木研究所(〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

⁴フェロー会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 教授(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Unconsolidated layer, which is one of the categories of ice ridge structures, is composed mostly of loosely accumulated broken ice pieces. Although its strength is low, it imposes large load on offshore structure when it forms in sufficient size. Also it effects on buried structure due to ice scour event. Since the unconsolidated layer is a threat to many structures in the actual cold sea, it is important to know strength of the unconsolidated layer.

In this study, a simplified unconsolidated layer model was produced, and a series of preliminary experiments was carried out for a wide range for confining stresses acting on unconsolidated layer actually, and then the dependence of the strength of the unconsolidated layer model on the ice block size, the ice block shape and the shear deformation rate was investigated

Key Words : *ice ridge, unconsolidated layer, shear strength, shear deformation rate*

1. はじめに

Ice ridge とは氷盤の相互作用である rafting(のりあげ), 圧力, せん断作用による破壊氷片(ice block, ice rubble)が上下方向にパイルアップして一体化した大規模な変形氷の形態の一種である。その構造は水面上に盛り上がった Sail 部と水面下の Keel 部から構成されており, Keel 部は破壊氷片が再凍結して強固に一体化した Consolidated layer とその下部層の氷片の集合体である Unconsolidated layer に分けられる。氷海構造物の設計荷重はこの Ice ridge の全体氷荷重で与えられることが多く, その算定式は各部の合力で与えられる。Unconsolidated layer はルーズな破壊氷片の集合体であるので強度そのものは大きくない。しかし, その大きさは Consolidated layer に比べて大規模なものが多く, 数十メートルに及ぶ喫水のものも有り, 構造物との干渉による拘束圧によってはこの領域の全体氷荷重に対する寄与度は決して無視できない場合があるものと推察される。また Ice Ridge が浅海域に移動

する際に Unconsolidated layer は海底地盤を掘削し(Ice Scour), パイプラインなどの埋設構造物にも大きな被害を及ぼす恐れがある。この場合の地盤との相互作用に於いても, 拘束圧が増し, 意外にもこの Unconsolidated layer は高いせん断抵抗を有していると言われている¹⁾。事実, first-year ridge (一年性) であっても, アラスカポーフォート海において水深 32m で 3~4.5m の深さにおよぶ海底の掘削跡が報告された例もある²⁾。このようなことから Unconsolidated layer の強度を推定することは非常に重要であるといえる。従来より, Unconsolidated layer は Mohr-Coulomb 材料として取り扱われる場合が多く, 過去に多くの室内および現地実験が実施されている。以下に幾つかの例を示す。

室内実験としては, 一般的には一面(直接)せん断試験が採用される場合が多い。室内実験の実施例は幾つかあるが, いずれも試験法・条件が異なり定性的な結果が得られているに過ぎず, 得られた強度

定数・特性も様々である。まず、Prodanovic(1979)³⁾は厚さ19mm, 38mm, サイズは厚さの2, 4, 8倍のブロックを海水を模擬したice sheetから作成し, 水中でrubbleを浮遊した状態で直接せん断試験を実施している(せん断変位速度0.106mm/s~8.854mm/s, Normal Stress:0~2.71kPa)。それによれば, 19mm, 38mmの場合, それぞれ粘着力と内部摩擦角は, (0.25kPa, 47°), (0.56kPa, 53°)であり, 厚さの大きいブロック程, 強度定数は大きい事を示している。またWeiss et al.(1981)⁴⁾は, ブロックの大きさが76.2~203.2mmで, せん断変位速度が3.048~24.89mmの範囲, それに拘束圧が82.95kPaまでの範囲という条件下で行っている。その大局的な強度定数のオーダーは, 粘着力で1.2~4kPa, 内部摩擦角で9°~34°を得ている。その中で, せん断変位速度が増加すれば, 強度定数は減少し, 同一速度では, 氷片の大きさが大きくなれば強度定数も増加するが, そのうち内部摩擦角はやや増加に陰りが見えるという傾向にある。Wong et al.(1987)⁵⁾は氷をグレインサイズ9.5mm, 4.75mmの粒に粉碎し, 同じく直接せん断試験を行っている(速度2.8, 5.9mm/min, 最大水平変位30mm)が, この条件下ではすべてのケースで明確なピークをもたない事を報告している。その他多数の実施例があるが(例えばHellman, 1984⁶⁾; Keinonen et al., 1978⁷⁾等), 総括的には, 内部摩擦角は10~70°, 粘着力は, 0~20kPaであり, 極めて広い範囲の結果が得られている。これは後にも示すよう, 特にせん断変位速度, ブロックの大きさに大きく依存し, またその他の試験条件の相違も多いためであると考えられる。一方, 現地試験も行われており, これは実在するridgeを用いて行われる場合もある。これには, Punching testとよばれるridge上に油圧ジャッキ据付けて, 鉛直下向きに載荷して, Keel部をせん断するというものである。この場合予めsail部は取り除かれる(例えばLepparanta et al., 1989⁸⁾, Bruneau et al., 1998⁹⁾)。例えばLepparanta et al.(1989)⁸⁾はその試験で1.7-2.4kPaのせん断強度(粘着力, 即ち拘束圧が0の場合のせん断強度と解釈される)を得ている。またHeinonen et al.(2000)¹⁰⁾は粘着力2.3kPa, 内部摩擦角14°を得ている。また, 別の現地試験の方法としてDirect shear testとよばれる, 同じくridge上に2箇所スペースを切り抜き, 一方のスペースには油圧ジャッキを据付けて, その2箇所のスペースの間にある固結層の氷を水平方向に押す試験法である(例えばBruneau et al., 1998⁹⁾)。即ち, 一番浮力の大きい(拘束圧の高い)部分であ

る固層部と非固層部のせん断強度を調べるものである。著者等は, Unconsolidated layer modelとして, 単純化したIce block(破壊氷片のモデル, 以下単にブロックと呼ぶことにする)を用い, 上述した従来行われてきた実験結果を確認するとともに, 幾つかの実験条件の範囲を広げ, 系統的な一面せん断試験を行ってきた(安永等(2002)¹¹⁾)。

本研究では, さらに幾つかの条件を追加し, 特にブロックのサイズ・形状, せん断変位速度, 空中or水中での試験条件がせん断強度に及ぼす影響について検討した。また一連の結果より実際のUnconsolidated layerの強度を推定するための, 実用的な試験方法について幾つかの提案をした。

2. 実験方法

(1) 試験方法

本研究の試験方法については安永等(2002)¹¹⁾に記されているが, 今一度簡単に述べておく。

- ① メッシュタイプのフレームを30%の塩水の入ったコンテナに入れる。ある厚さまで塩水が凍った後, フレームからブロックを取り出す。
- ② ブロックの氷温を一定にするため実際の試験時の温度と同じ-3°Cの室内で1日放置した。
- ③ ブロックを図-1に示すような上箱(500mm×500mm×200^hmm)と下箱(500mm×500mm×250^hmm)で構成されているせん断箱にランダムに投入し, 上面を平らにする。
- ④ 拘束圧として鉄板(497mm×497mm×25^hmm)をブロックの上面に載荷し, 油圧ジャッキにより上箱を水平方向に一定速度で移動させた。油圧ジャッキの先端にはロードセルを取り付け水平荷重を測定するとともに, ダイアルゲージにより上箱の水平変位と, 鉄板の四隅の鉛直変位を測定した。なお, ブロック相互の結合を防ぐために, ブロック投入後すぐに実験を開始した。

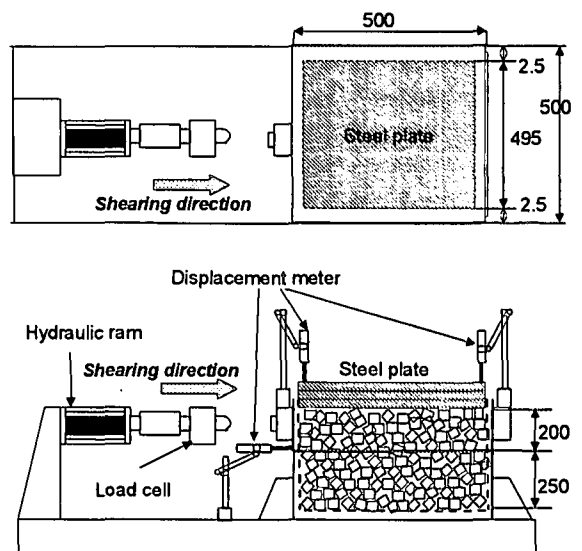


図-1 実験装置

(2) 実験条件

作成された供試体を用いて、表-1の実験条件に従い、一面せん断試験を行った。また、Unconsolidated layer modelとして表-2に示すように、サイズと形状が異なる6タイプのブロックを用いた。ここに、表-1におけるケース1~7の実験目的を以下にまとめる。なお、実験は同一実験条件において複数回(4~5回)繰り返して実施した。

表-1 実験条件

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
ブロックタイプ	均一 (a1,a2,a3)	混合 (a1,a2,a3)	均一 (a2)	均一 (a2,a4,a5)
垂直応力 (kPa)	1.88~ 11.29	1.88~ 11.29	5.8	1.88~ 11.29
せん断変位速度 (mm/s)	1.6	1.6	0.1~24	1.6
室温	-3 (deg.)			

	ケース5	ケース6	ケース7
ブロックタイプ	均一 (a6)	均一 (a5, a6)	均一 (a5) With water
垂直応力 (kPa)	1.88~11.29	5.8	1.88~7.53
せん断変位速度 (mm/s)	1.6	0.1~24	1.6
室温	-3 (deg.)		

表-2 各ブロックタイプ

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	
ブロック形状	立方体	立方体	立方体	直方体	直方体	直方体	
ブロックの1辺の長さ (mm)	a	22.5	42.5	65	42.5	42.5	120
	b	22.5	42.5	65	42.5	42.5	65
	h	22.5	42.5	65	15	25	33
間隙率	0.31	0.34	0.37	0.49	0.45	0.46	

混合タイプのUnconsolidated layer modelに関しては、その中央粒径は42.5mm、間隙率は0.29であった。

ケース1: ブロックが立方体である場合(a1, a2, a3), そのブロックの大きさによるせん断強度の依存性を調べたもの。

ケース2: 様々なサイズを持つブロック(a1, a2, a3)の混合体(各サイズの重量比が同一)の場合、以下、混合タイプとよぶ

ケース3: せん断変位速度によるせん断強度の依存性(a2の場合)

ケース4: 立方体ではなく、形状が異なる場合(直方体とした場合)によるせん断強度の依存性(a2の一辺だけを変化させた場合、a2, a4, a5の比較)

ケース5: 立方体であるa3と体積が同じで形状が異なる場合(直方体とした場合)(a6)

ケース6: せん断変位速度によるせん断強度の依存性(a5, a6の場合)

ケース7: 試験条件が水中の場合(a5)

本来Unconsolidated layerのせん断強度は、マクロ的には主としてインターロッキング(かみ合わせ)の程度、せん断中の構成している氷片自身の破壊の程度、に大きく依存する。さらにそれは、せん断変位速度、初期間隙率、破壊氷片のサイズ・形状・強度、ブロックの結合状態(あるいは表面状態)などの様々な因子に依存するものと考えられる。本研究では、これらのことを鑑み、上記の基本的な実験を実施した。なお、実際にはブロック相互の部分的結合がある場合も存在するが、本研究では、考慮していない。ケース1~3については従来の実験であり、その結果については報告済みである¹¹⁾。今回の実験ではケース4~7を実施した。また、これらの実験条件(ケース1~7)は、いずれも空中条件(水中ではない)であるが、実験の容易さという観点と、水の存在の有無は強度特性にはあまり依存しないと仮定していたからであるが、今回はこれを検証するために、ケース7を実施した。実験方法としては、予め室温(-3℃)と同じ温度をもつ不凍液をせん断箱に注入後、速やかに実験を実施した。

3. 実験結果及び考察

本実験では、破壊条件は次式のクーロンの破壊基準に従うとした。

$$\tau = \sigma_N \cdot \tan \phi + C$$

ここに、 τ :せん断強度、 ϕ :内部摩擦角、 σ_N :垂直応力(拘束圧)、 C :見かけ上の粘着力(海外文献では多くのCohesionと称されている)

過去の実験結果はモール・クーロンの破壊基準を満たしていることが確認でき¹¹⁾、後に示すよう本実験結果においても確認された。

(1) 初期間隙率

述べたように間隙率は、ダイレイタンシー効果という観点からも、せん断強度に影響を与える一つの因子と考えられる。表-2に各ブロックタイプがランダムにせん断箱に投入されたときの初期間隙率を示す。a1, a2, a3については寸法が大きくなるにつれて、間隙率が大きくなっていった。混合タイプに関しては、均一タイプより若干低い値を示した。a4, a5, a6の間隙率は、立方体に近づくほど間隙率が小さくなった。このように、初期の投入方法が同じでもブロックの寸法、形状が異なれば間隙率も異なることが分かった。ゆえに、間隙率の意図的な操作は行っていないが、寸法や形状を変える事によって生じる従属的な間隙率の変化は間接的に考慮していることになる。一方、寸法・形状が同じで、間隙率のみを変化させる場合も考えられるが、①制御が困難であるということと、②上記のように寸法や形状が変わる事による影響の方が大きいと仮定、③初期における水平変位にともなう供試体の鉛直変位やせん断応力の振る舞いは異なる可能性はあるが、後に定義されるせん断強度については大きな変化はないものと

仮定、のもとに、この寸法・形状が同じで間隙率が異なる場合のケースを今回では見送った。

また、現実のものは、その間隙率は 0.3 や 0.4 のオーダーが報告されており、本実験も概ねその範囲をカバーしていると言える。

(2) せん断応力・鉛直変位の推移

本実験において、実験は水平変位が約70mmまで実施されたが、せん断応力（水平荷重をせん断面積で除したものは、多くの場合、0mm~40mmの範囲で漸近値あるいはピークに達したことから、水平変位がその範囲におけるせん断応力のピーク値あるいは漸近値を採用し、せん断強度とした¹¹⁾。一例として図-2にせん断応力と水平変位との関係を示す。

水平変位が十分に大きいとき膨張と収縮が繰り返されることが考えられるが、本実験においては、この水平変位の間では、ほとんど場合、平均的には膨張側で破壊していた（図-2参照）。なお図中の鉛直変位は、鉄板の4隅における変位量の平均値である。これは、ブロックが互いの隙間に落ち込むもうとする現象（収縮）より、乗り上げ（膨張）に関する現象の方が支配的であるためである。この傾向は、すべてのケースに共通していた。

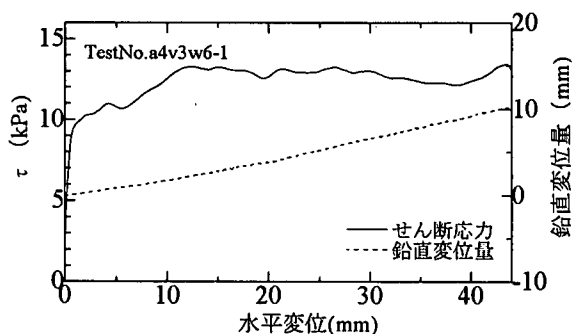


図-2 水平せん断変位によるせん断応力と鉛直変位の推移の一例

(3) ブロックサイズおよび形状が強度特性に及ぼす影響

図-3にケース4(a2,a4,a5)における垂直応力(σ_N)とせん断強度(τ)との関係を示す。述べたようにこのケースは立方体である a2 を基準にその一片だけを変化させ、a5,a4 の順に小さくしたものである。また同一条件で複数回実験を繰り返し行っているが各プロットはその平均値で表示している。図-3より、ほぼ直線関係を呈しており、この条件でもクーロンの破壊基準を満足していることがわかる。また対応する強度定数(C, ϕ)を表示したものが図-4である。図-4の横軸は変化する一片の長さとし残りの正方形の辺長(a2の辺長)との比を表す。これらの図よりCについては大きな変化はないものの、ブロックが薄くなれば、すなわち一片の長さが小さくなれば ϕ も小さくなる傾向にある。これは、①初期間隙率の影響(述べたようブロックが薄くなれば、初期間隙率は大きくなっている)、②ブロックの破碎のし易さ

(せん断後の破碎がブロックが薄くなるほど顕著であった)、③インターロッキングが小さくなる(粒径換算でいえばブロックが薄くなれば、粒径が小さくなる)、などが考えられる。特に③におけるインターロッキングは粒子の大きさ・形状・配列などに依存するものと思われるが、このケースの場合、形状は異なるが、粒子の大きさ即ちブロックの換算粒径(あるいはブロックの体積)が同一でないため、その形状が与える効果は明確でない。そこで、次にケース5の場合、即ち立方体である a3 と体積が同一で、その形状が直方体の場合(a6)との強度の比較を行った。ここに直方体(a6)の3辺の長さの比の根拠は、サハリンにおける実規模の ridge を構成しているブロックの形状の調査結果から、それを直方体換算した場合の統計情報(Surkov et al.

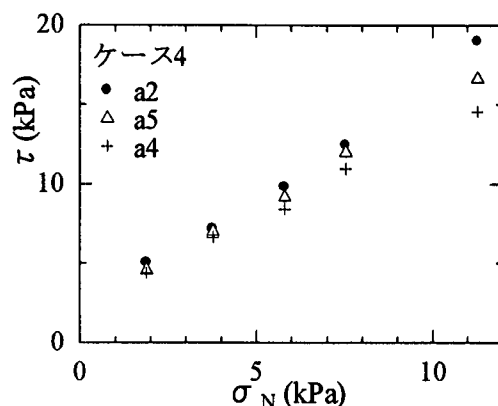


図-3 τ と σ_N との関係 (ケース4)

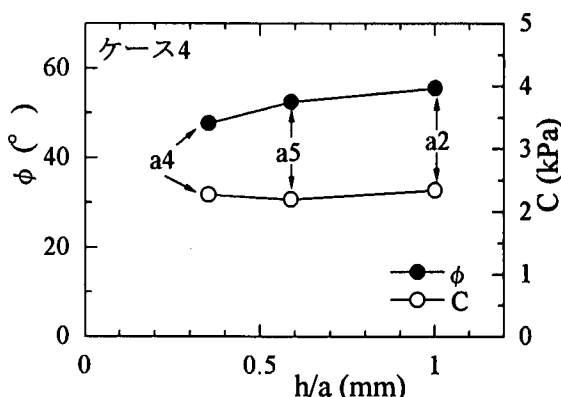


図-4 ϕ , C の推移 (ケース4)

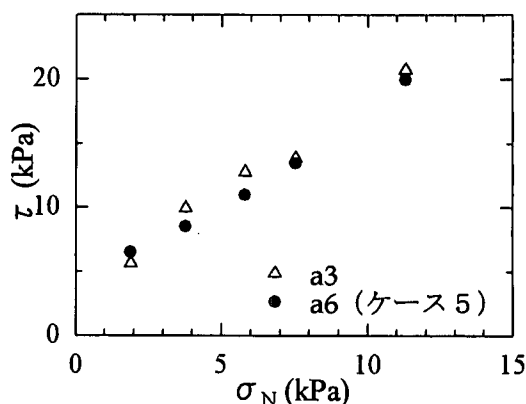


図-5 τ と σ_N との関係 (ケース5)

(1996)¹²⁾) にもとづき決定している。図-5 に a3 と a6 に関する結果を示す。先と同様、立方体と直方体との違いでいえば、a6 の破碎の方がやや目立ち、また初期空隙率は a3, a6 でそれぞれ、0.37, 0.46 であった。しかしながら、図-5 より両者の強度は、概ね同一と見られる。よって、多少乱暴な考え方をすれば、形状が異なっても体積が同一、即ち立方体への換算値（広い意味では粒子径）が同一であれば、強度は同一であると考えることができる。このように考えると、ridge を構成しているブロックの形状を、立方体に換算して実施すれば実験が容易となるという見方も可能である。

次に、上記の結果をケース1も含め、ブロック体積と強度定数の関係にまとめたものを図-6(a)(b)に示す。図より、サイズが異なる立方体のケース1 (a1, a2, a3) におけるブロック体積と強度定数との関係を表す線上に、上記のケース4と5の結果も丁度当てはまっており、ゆえに強度定数はブロック体積のみに依存しているように思われる。ブロック体積すなわちサイズが大きくなれば、強度は大きくなるが、これはインターロッキングが大きくなる、あるいはせん断時に、そのサイズに応じて他のブロックへの乗り上げ量が大きくなり膨張に費やす仕事量だけせん断強さが増大するためと考えられる（ダイレイタンシー効果）。一方、ある程度、ブロックサイズが大きくなれば、寸法効果によって破壊が顕著になって、その強度定数の増加が抑えられるものと

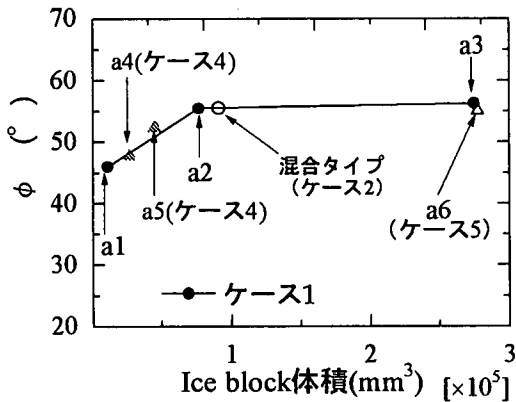


図-6(a) ブロック体積をパラメータとした時のφの推移

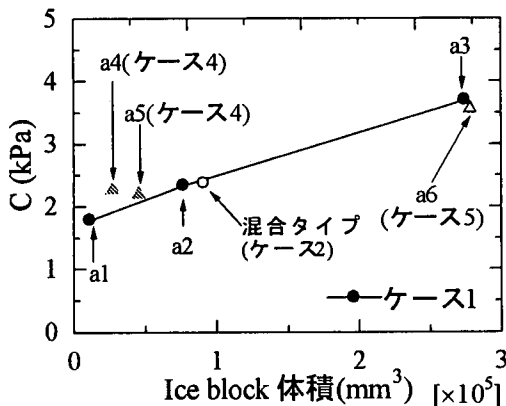


図-6(b) ブロック体積をパラメータとした時のCの推移

思われ、本実験範囲において内部摩擦角φにその傾向が見られる。前述したように、Prodanovic (1979)³⁾, Weiss et al. (1981)⁴⁾ からもブロックのサイズに応じた強度定数の依存性について調べているが、上記と同様な傾向を報告している。

一方、すでに報告済みであるが¹¹⁾、図中の○は混合タイプ (a1, a2, a3 の混合体；重量比が 1:1:1) を示しており（この場合その体積を中央粒径換算値の 3 乗で表している）、その中央粒径換算値が近くなる a2 の強度定数に非常に近い値となっている。

以上より、形状が異なれば初期空隙率や破壊機構は異なるものの、概して強度定数はブロック体積あるいはサイズそのものに依存し、さらにはある程度ブロック体積が大きくなれば、増加率は減少し、一定値に漸近することが予想される。したがって、現地のブロックと同程度の強度を有する氷を用い、ブロックを、寸法効果が生じない程度の大きさをもつ立方体として実験すれば良いものと考えられる。

(4) ブロック表面における水の影響(ケース7)

以上の実験結果は空中条件におけるものであったが、現実では無論ブロックは水中にあり、水中条件で実験を実施することが望ましい。しかしながら、前述したように、①水中条件では実験制御が困難であること、②せん断強度は主にインターロッキングとブロックの破壊状態に依存し、水中条件はブロック表面（表面摩擦など）に影響を及ぼすのみで、せん断強度には大きな影響を及ぼさない、と考えていた。ここでは、これを検証するため、定性的ではあるが、a5 (ケース7) を例に水中条件と空中条件での実験結果を比較した。この結果を図-7に示す。

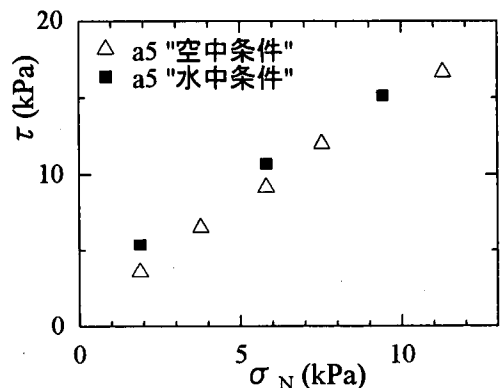


図-7 空中条件と水中条件(ケース7)におけるせん断強度の比較

図より、水中条件におけるせん断強度の方がやや大きくなっている感があるが、内部摩擦角で言えば大きな違いはなく、また水中条件におけるせん断強度の方が大きくなる理由がなく（この場合明らかに過剰空隙水圧が作用しない）、この場合、水中と空中の条件では大差がないと考えるのが妥当であるものと考えられる。よって、実験が容易な空中条件で行っても差し支えないものと考えられる。

(5) せん断変位速度の強度特性に対する影響

図-8にせん断変位速度とせん断強度との関係を示す。なお、この時の σ_N は5.8kPaに固定している。a2については、既に報告済¹¹⁾であるが、今回はa5, a6を追加した。図よりバラツキが大きいもののせん断変位速度が増加すれば、強度が減少し、やがて、漸近するように見受けられる。述べた様に、Weiss et al. (1981)⁴⁾もこの傾向を報告している。これは、速度が速ければ、ブロックが再配列(膨張)する間もなく破壊するためと推察される。事実、速度とともに鉛直変位は低下していた。この場合、0.1mm/s-0.2mm/sでせん断強度はピークをもつとも見て取れるが、さらに標本数を多くして調べる余地はある。

前項では、せん断強度は主としてブロックサイズに依存することを示したが、せん断変位速度も重要な影響因子であることが確認された。

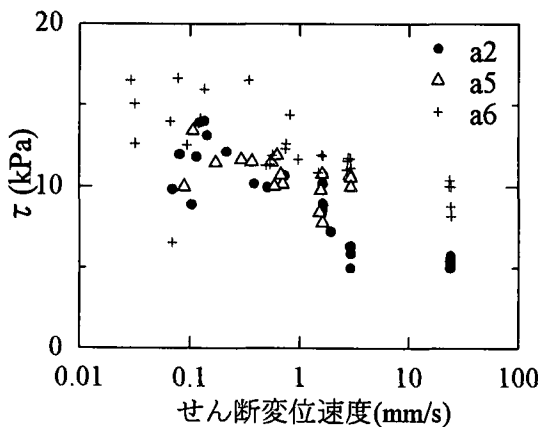


図-8 せん断強度の変位速度依存性

4. 結論

- ① ブロックの形状のみが強度に及ぼす本質的な効果はやや不明瞭であった。しかしブロックの形状が異なれば初期間隙率や破壊機構は異なるものの、結果としてブロックの体積(サイズ)が同一であれば、形状にかかわらず、せん断強度定数はほぼ同一であった。
- ② 全ての形状に関する実験結果をブロック体積とせん断強度定数との関係でまとめると、それらの実験結果が一つの線に乗り、体積が増加すれば、せん断強度は増大傾向にあり、ブロックの形状効果よりも体積(サイズ)そのものに依存することが推察された。またある程度以上体積が大きくなれば、その増加率は減少し、一定値に漸近することが予想された。
- ③ 混合タイプ(a1, a2, a3; 重量比が1:1:1)は、中央粒径換算値が近くなるa2の強度定数に非常に近い値となったが、その換算値の3乗を体積とした場合も上記②の線上に乗ることが確認された。
- ④ 水中条件と空中条件における試験結果は大した違いはなく、試験が容易な空中条件で実施しても差し支えないものと思われる。

- ⑤ せん断変位速度が増大すれば、せん断強度は減少し、ある漸近値に近づく結果となった。またまた、ある変位速度でせん断強度はピークをもつ可能性があることを確認した。

以上の結果より、暫定での試験方法を提案するなら、まず現地のブロックと同等の強度のもつ氷を用い、寸法効果が生じない程度の大きさをもつ立方体で、空中条件で行えば試験は極めて容易となる。さらに強度がピークとなる変位速度を調べ、その条件下で実験を実施すれば、実用的な強度定数が得られるものと思われる。しかし、本研究では、十分な実験条件と標本数であったとは言えず、今後さらに条件(拘束圧の範囲、ブロック自身の強度など)を追加して再検討していく予定である。特に、強度がピークを示すせん断変位速度の存在、またそれは各ブロックサイズに応じて決まるのかなどの確認が今後必要である。また、ブロックサイズが大きくなるとせん断箱の拘束・寸法効果を見逃さず、本実験結果もこの影響がなかったとは言えない。これらの効果も今後あわせて検討していかなければならない。

参考文献

- 1) Blasco, S.M.: Seabed Scouring by Sea-Ice: scouring Process and Impact Rates; Canadian Beaufort shelf, *Proc. of Ice scour and Arctic Marine Pipelines workshop, Hokkaido, Japan. Published by C-CORE*, pp.53-58, 1998.
- 2) Eldred, J., personal communication, ARCO Alaska Inc., Anchorage, Alaska, 1993.
- 3) Prodanovic, A.: Model Test of Ice Rubble Strength, *Proc. of the 5th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, pp.89-105, 1979.
- 4) Weiss, R.T., et al.: Determination of Ice Rubble Shear Properties, *Proc. of the 5th International Symposium on Ice*, pp.860-870, 1981.
- 5) Wong, T.T., et al.: Shear box tests on broken ice, *Proc. of Port and Ocean Engineering Under Arctic Condition (POAC)*, Vol.3, pp.97-10, 1987.
- 6) Hellman, J.H.: Basic investigation of mush ice, *Proc. of IAHR Ice Symposium*, Vol.III, pp.37-55, 1984.
- 7) Keinonen, A. and Nyman, T.: An experimental model-scale study on the compressive, frictional and cohesive behavior of broken ice mass, *Proc. of IAHR Symp. on Ice, Lulea, Pt.2*, pp.335-353, 1978.
- 8) Lepparanta, M. and Hakala, R.: Field measurement of the structure and strength of first-year ice ridges in the Baltic sea, *Proc. of the 8th International conference on offshore mechanics and arctic eng.*, Vol.4, pp.169-174, 1989.
- 9) Bruneau, S.E., et al.: Development of Techniques for Measuring In Situ Ice Rubble Shear Strength, *Proc. of 14th International Symposium On Ice*, Preprint of Papers to be Included in Volume 2 of the Proceedings, 1998.
- 10) Heinonen, J., et al.: Loleif Ridge-Loading Experiments-Analysis of Rubble Strength in Ridge Keel Punch Test, *Proc. of the 15th International Symposium on Ice*, Vol. I, pp.63-72, 2000.
- 11) 安永喜勝, 木岡信治, 松尾優子, 佐伯浩: 「Unconsolidated layer モデルの強度特性に関する実験的研究」海洋開発論文集, Vol.18, pp.773-777, 2002.
- 12) Surkov, G.A et al.: HUMMOCK POROSITY TEST, *the 12th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea ice*, Mombetsu, Hokkaido, Japan, pp.49-52, 1997.