

Unconsolidated layer モデルの強度特性 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF UNCONSOLIDATED LAYER MODEL

安永喜勝¹・木岡信治²・松尾優子³・佐伯浩⁴

Yoshikatsu YASUNAGA, Shinji KIOKA, Yuko MATSUO and Hiroshi SAEKI

¹前田建設工業株式会社(〒102-8151 東京都千代田区富士見二丁目10番26号)

²正会員 工博 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)

³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)

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 shear rate and the ice block size was investigated

Key Words : *unconsolidated layer, shear strength, ice block size, shear rate,*

1. はじめに

Ice ridge は氷盤同士が圧力, せん断作用を受け, 砕けた氷が接触線上に上下方向に押されて一体化したもので, 海氷の形態の一種である. その構造は空中に盛り上がった Sail 部と海中に突出した 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 とその下に氷結せずに寄り集まった 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 の厚さは数十メートルに及ぶものも有り, その大きさから構造物への全体氷荷重の寄与度は大きい. また Ice ridge が浅海域に移動する間に Unconsolidated layer は海底地盤を掘削し(Ice Scour Event), パイプラインなどの埋設構造物にも大きな影響を与える. このようなことにより Unconsolidated layer の強度を推定する手続きは非常に重要であるといえる. Unconsolidated layer は Mohr-Coulomb 材料として取り扱われる場合が多く, 従来から室内・現地ともに断片的な条件での実験が実施されており, 粘着力・内部摩擦角

などの強度定数が定性的に示されている¹⁾²⁾. しかし, 実験結果は大きな差異を示しており, 未だ統一された知見が共有できず, 標準的な試験方法も確立されていないのが現状である.

本研究は室内実験として Unconsolidated layer を Ice block を用いて単純にモデル化し, 実際の想定される Normal stress(拘束圧)の下で主要な因子とされている Ice block(破壊氷片のモデル)のサイズ, せん断変位速度をパラメーターとし変化させることで新たな視点により系統的な一面せん断試験を行い, 過去の研究結果と比較することで Unconsolidated layer における基本的な強度特性を明らかにするのが目的である.

2. 実験方法

Unconsolidated layer の物理特性は海水の存在や破壊氷片の形状, 間隙率といった要因にも影響を受けるといことが報告されている. しかし本研究においては実験制御の困難さなどからそれらを考慮せずに単純化された Unconsolidated layer モデルを作成した. 実験方法及び実験条件を以下に記す.

実験方法

- ① メッシュタイプの四角いフレーム(各メッシュそこに丸い穴のあいた)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、フレームからほぼcubic形のIce blockを取り出す。
- ② Ice blockの氷温、実験装置(図-1)の温度を一定にするため実際の試験時の温度と同じ-3℃の室内で1日放置した。
- ③ Ice block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投入し、上面を平らにする。上箱は両面が空いており水平方向に動くことができる。下箱は上面が空いており固定されている。
- ④ 鉄板(497mm×497mm×25^hmm)をIce blockの上に乗せ、水平に保たれているかレベルで確認する。この鉄板の枚数により拘束圧を制御する。
- ⑤ 油圧ポンプにつながれた油圧ジャッキにより上箱を水平方向に一定速度で動かす。油圧ジャッキの先端にはロードセルを取り付けせん断荷重を測定し、ダイヤルゲージにより上箱の水平変位と鉄板の輪郭より内50mmの隅隅部4点における鉛直変位を測定した。ここで、上箱と下箱の間には接触面の摩擦抵抗を減らすために各実験前に接触部にグリースを塗布した。それと同時に、3回せん断箱を空押しすることにより、予めこの抵抗値を測定し実験値を補正した。

試験後、Ice blockを取り出し破壊したIce blockを排除し新しいIce blockを供給し再投入し、全体をかき混ぜ配列をランダムにすると同時にIce block同士が焼結するのを防いだ。これらの操作を各ケース5回行った。

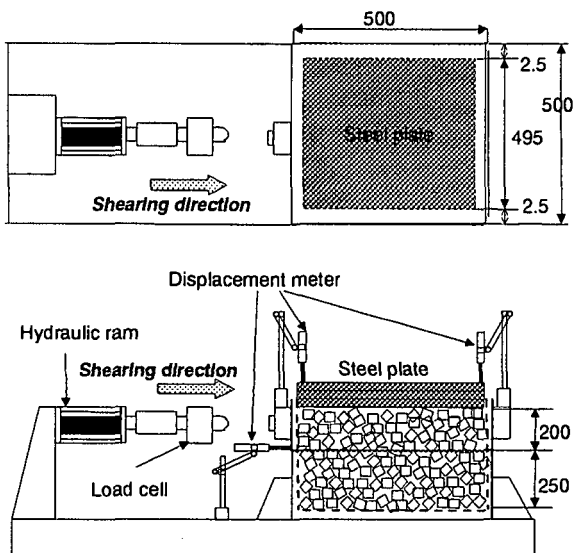


図-1 実験装置

実験条件

実験条件については表-1に示す。表中の均一タイプとは一種類のIce blockから成るUnconsolidated layerモデルのことであり、一方混合タイプは重量比が等しくなるように3種類のサイズのIce blockで構成して

いるUnconsolidated layerモデルのことである。また、Ice blockサイズに関して均一タイプはIce blockの一边の長さで表し、混合タイプは中央粒径で換算した値を示す。

本研究において、Normal stressはUnconsolidated layerのある水平断面の拘束圧を想定しているため、浮遊しているIce ridgeはその水平断面下の浮力に相当する。本実験においては最大の拘束圧はおおよそ30mの深さのUnconsolidated layerを持つIce ridgeに相当している。またこの範囲内で5段階に分けて試験を行った。

せん断変位速度に関しては過去に行われてきた範囲よりも広い範囲で5段階に分けて試験を実施した。せん断変位速度として水平変位が0~40mmの範囲における上箱の平均の水平速度を採用した。

表-1 実験条件

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
タイプ	均一	均一	均一	混合	均一
Ice block サイズ(mm)	22.5	42.5	65	42.5	22.5
Normal stress (kPa)	1.88 ~ 11.2 9	1.88 ~ 11.2 9	1.88 ~ 11.2 9	1.88 ~ 11.2 9	6
せん断変位速度(mm)	1.6	1.6	1.6	1.6	0.1, 0.15, 2.95, 1.61, 24
室温	-3℃				

3. 実験結果及び考察

実測値より、せん断応力、鉛直変位を次のように算出した。

1)せん断応力： σ_s

$$\sigma_s = (F_t - F_s) / S \quad (1)$$

ここで F_t はせん断箱にIce blockが詰まった状態での全体荷重、 F_s はせん断箱が空のときの上箱と下箱の接触部の摩擦抵抗力、 S はせん断箱の面積である。

2)鉛直変位： Δh

Δh は鉄板の輪郭から内5mmにおける隅隅4点の鉛直変位の平均値。

a) 間隙率

間隙率はせん断強度に大きな影響を与えるものとして知られている。表-2は各Ice blockタイプの間隙率を表したものである。Ice blockの形状はほとんどcubic形であるため、均一タイプにおいてはIce blockサイズの違いによる間隙率の差はほとんど見られなかった。また、過去に行われた計測(Sirkov)によると間隙率の平均値は0.35と報告されており、Unconsolidated layerモデルは自然のUnconsolidated layerの間隙率を比較的良く一致していると言える。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が、自然現象の間隙率のバラツキを考慮すれば、あまり差がないと判断できるので本研究では

間隙率の影響を考慮しないこととする。

表-2 各Ice blockタイプの間隙率

実験ケース	Ice blockサイズ (mm)	間隙率
Case1	22.5	0.31
Case2	42.5	0.34
Case3	65	0.37
Case4	42.5	0.29

b) せん断応力・鉛直変位の推移

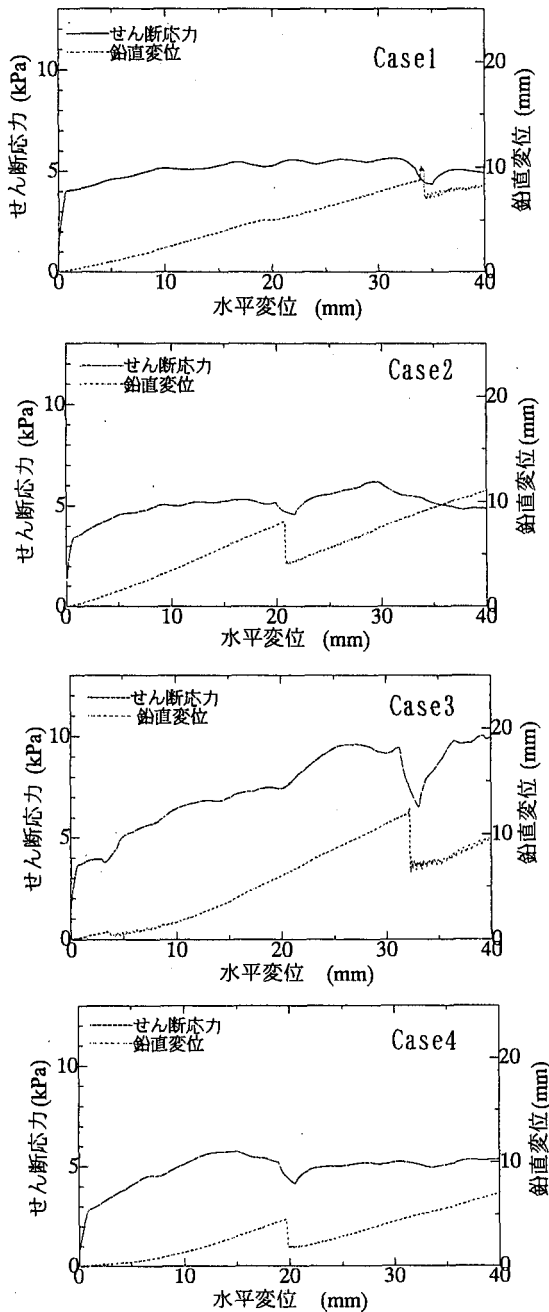


図-2 各Ice blockサイズ毎のせん断応力・鉛直変位推移

図-2にCase1~4における水平変位に対するせん断応力と鉛直変位の挙動の一例を示す。本実験におい

てそれらは水平変位が約70mmまで測定されたが、次の2つの理由から水平変位が0mm~40mmの範囲におけるデータを用いてその範囲の最大のせん断応力をせん断強度とした。

- 1) 水平変位がある程度大きくなると、せん断面積が小さくなりせん断応力の分布が不均一になり進行性破壊とが起りやすくなり、本来のせん断応力と異なってくる。
- 2) 図-2に示すようにほとんどのケースにおいてせん断応力は0mm~40mmの範囲でピークに達した。

鉛直変位に関して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ということが知られている。本研究においてはせん断箱の大きさがIce blockサイズと比較して十分に大きくないため平均的には膨張の傾向が主に目立った。これらの図が示すように、収縮が起こる箇所ではせん断応力は鉛直変位に定数減少傾向を示した。このことからせん断応力と鉛直変位の間にはいくらか相関があると推測される。また、ほとんどの試験において平均的には膨張側で破壊していた。これは互いのIce blockが落ち込むより乗り上げに関する現象の方が卓越するためであると考えられる。

c) Ice blockサイズの強度特性に対する影響

上述したようにUnconsolidated layerはほとんどの場合、モール-クーロン材料として扱われている。そのせん断強度の特徴として一般にクーロンの破壊基準が用いられ、次式で与えられている

$$\tau = c + \sigma_N \tan \theta \quad (2)$$

ここで τ はせん断強度、 c は見かけの粘着力、 σ_N はNormal stress、 θ は内部摩擦角を表している。

図-3は各Ice blockサイズにおけるNormal stressに対するせん断強度をプロットしたものである。図中の直線はこれらの結果から求められた回帰直線でクーロンの破壊基準を表している。この直線の傾きが内部摩擦角を、切片が見かけの粘着力をそれぞれ表している。図-4はIce blockサイズに対する見かけの粘着力と内部摩擦角の推移を示している。内部摩擦角はIce blockサイズが大きくなるにつれ増加傾向にあるが、いずれ漸近するように傾向を示した。一方、見かけの粘着力もIce blockが大きくなるにつれ増加傾向を示した。この結果は他の研究者(Prodanovic,1979)により報告されている結果に類似している。これはIce blockサイズが大きくなるにつれて膨張量が大きくなるので膨張に費やすエネルギーの分だけ強度が増加するためと思われる。また、混合タイプの強度定数はIce blockの中央粒径に換算したサイズの均一タイプとほとんど同じであった。実存するUnconsolidated layerは様々な大きさの破壊氷片で構成されているので、強度定数を求める場合は中央粒径で換算した破壊氷片サイズの値で近似する方法も適用できると考えられる。

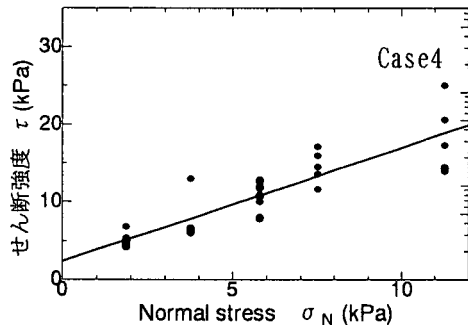
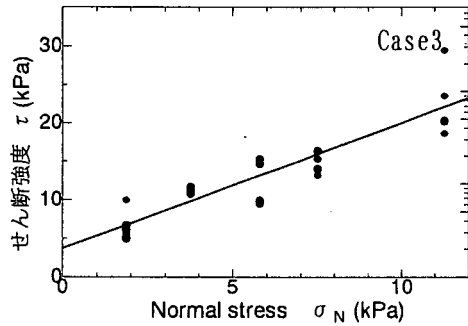
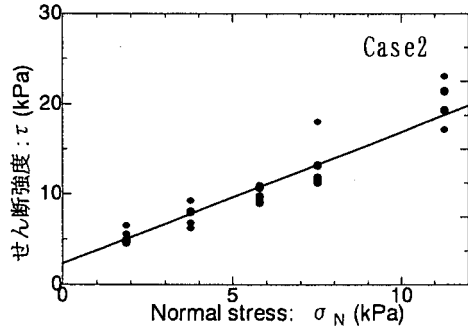
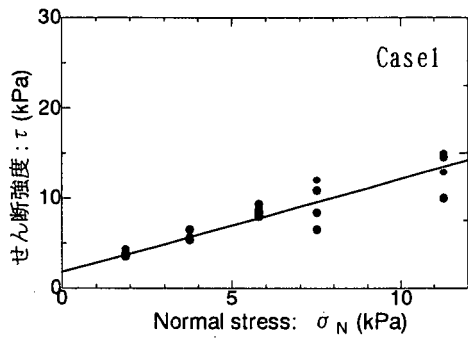


図-3 各Ice blockサイズ毎の Normal stressに対するせん断強度

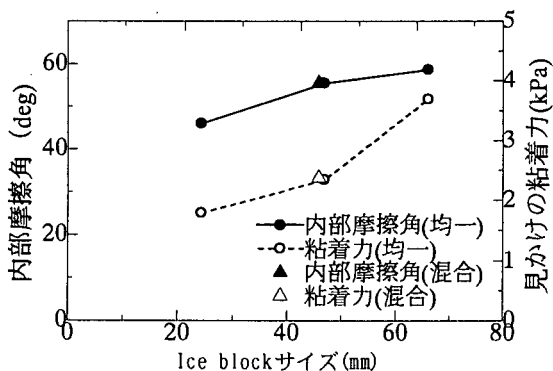


図-4 Ice blockサイズと強度定数の関係

d) せん断変位速度の強度特性に対する影響

せん断変位速度は一定に保たれるように調節したが、少しばらついた。図-5はCase5におけるせん断変位速度に対するせん断応力をプロットしたものである。ただし横軸はせん断変位速度を対数に変換した。せん断強度はせん断変位速度が速くなるにつれ減少し、十分速くなるとせん断強度はあまり変化せず漸近値に近づく傾向を示した。これは他の研究者(Wiss and Wood : 1981)により報告されている結果に類似する結果となった。これはせん断変位速度が大きくなるにつれIce block同士の破壊する確率が大きくなり、ある程度大きくなるとその確率が一定に近づき、衝撃破壊が支配的になるためと思われる。これは試験後のIce blockの状況から推測できた。またIce blockが整列されずにIce block間のインターロッキングが弱いまま、あまり膨張せずにせん断破壊が進行するためとも考えられる。図-6はせん断変位速度毎の水平変位と鉛直変位の関係の代表的な一例を示したものである。この図よりせん断変位速度が大きくなるにつれて膨張は小さくなっていくのがわかる。

しかし、せん断変位速度が遅くなるにつれてもせん断強度は減少し、本研究では0.15mm/s付近でピークに達し、最大値を持つという新しい結果が得られた。ここで、最大値に達するせん断変位速度はIce blockサイズにより異なる可能性もあるので実現象においてあらゆる条件に対応して、最大値を示すせん断変位速度で実験する必要があると考えられる。

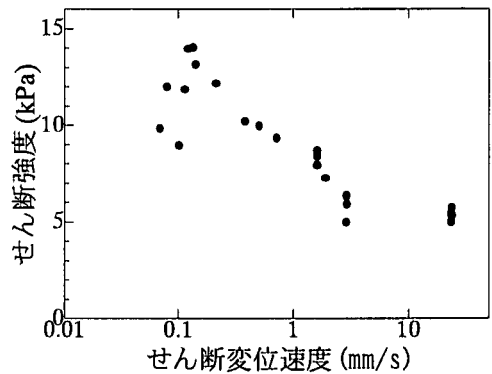


図-5 せん断変位速度とせん断強度の関係

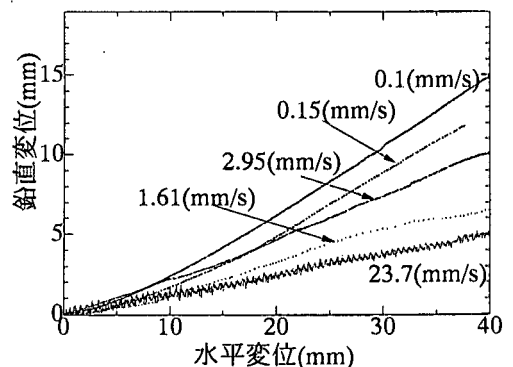


図-6 各せん断変位速度毎の鉛直変位推移

4. まとめ

- 1) せん断応力の挙動は鉛直変位の挙動によく一致しており、急な収縮にตอบสนองしせん断応力も急に減少した。
- 2) ほとんどの試験において平均的には膨張側で破壊していた。
- 3) せん断強度はクーロンの破壊基準を満足した。
- 4) 見かけの粘着力と内部摩擦角の強度定数は両方ともIce blockサイズが大きくなるにつれ増加傾向を呈した。しかし、内部摩擦に関してはある程度大きくなると漸近するような傾向を示した。
- 5) 混合タイプの強度定数は中央粒径で換算されたIce blockサイズの強度定数とほぼ一致していた。
- 6) せん断強度はせん断変位速度が速くなるにつれ減少傾向にあり漸近値に近づいたが、せん断変位速度が減少にするにつれてもせん断強度は減少し、本実験ではせん断変位速度が 0.15mm/s 付近でせん断強度は最大値を呈し、せん断強度が最大値を持つようなせん断変位速度が存在した。

5. 結語

本実験において未だ定性的ではあるので得られたオーダーそのものは現地には適用できないが従来の研究では見出せなかった幾つかの傾向、結論が得ら

れ、Unconsolidated layer の基礎的な強度特性を明らかにすることができた。本研究の目的は、Ice block サイズ、せん断変位速度のせん断強度に対する影響、均一タイプと混合タイプの強度特性の違いを検討することであったので、今後の課題として、更に条件を拡大しIce block の形状、間隙率といった他の重要と思われる要因の影響を調べる必要があると考えられる。

6. 参考文献

- 1) Ettema, R. and Urroz, G. E.: On Internal Friction and Cohesion in Unconsolidated Ice Rubble, Cold Regions Science and Technology, Vol 16, 1989
- 2) Lapparanta, M. and Hakala, R.: The Baltic Sea, Cold Regions Science and Technology, Vol 20, 1992
- 3) J.C.Chao: An Analysis of Ice Rubble Shear Strength Data, International Offshore and Polar Engineering Conference Singapore, 1993
- 4) Urroz, G. E. and Ettema, R., Simple-Shear Box Experiments with Floating Ice Rubble, Cold Regions Science and Technology, Vol 14, 1987
- 5) Prodanovic, A(1979): Model Test of Ice Rubble Strength, Proc. of the 5th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, pp.89-105
- 6) Weiss, R.T., et al(1981): Determination of Ice Rubble Shear Properties, Proc. of the 5th International Symposium on Ice, pp.860-870
- 7) 安永喜勝: Ice Ridge の非固結層部における強度特性に関する基礎的研究, 寒地技術シンポジウム, Vol.17, pp.431-435, 2001