

変形氷固結層が海洋構造物に与える氷荷重 についての実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ICE LOAD ACTING ON OFFSHORE STRUCTURE BY CONSOLIDATED LAYER OF DEFORMED ICE

竹内貴弘¹・三浦一夫²・佐々木幹夫¹

Takahiro TAKEUCHI, Kazuo MIURA, and Mikio SASAKI

¹ 正会員 工博 八戸工業大学大学院工学研究科教授 (〒031-8501八戸市妙大開88-1)

² 工修 八戸工業大学大学院工学研究科 (〒031-8501八戸市妙大開88-1)

Ice load acting on offshore structures in ice-covered areas is one of items of great importance for their design. Deformed ice such as ice ridge with consolidated layer of ice may give a larger load because of its larger thickness of ice. However, an ice indentation test mainly has been conducted by using level sheet ice (undeformed ice). Therefore, to make consolidated layer model ice as a test sheet ice, ice blocks with various size were made in cold room, and they were mixed with water close to its freezing temperature. The ice sheet used for an indentation test was made of freshwater, so that ice failure could be observed. An indentation velocity (V) and ice block size (a) were varied as parameters, and their effects on ice load were investigated with comparing their trend to that of undeformed ice.

Key Words ; deformed ice, consolidated layer, ice ridge, ice load, offshore structure

1. 研究目的

氷海域における沖合の海洋構造物に作用する氷荷重を検討する場合、多年氷が発生しない海域においては、first-year ice ridgeやhummock iceの移動に因り発生する外力を推定することが平坦氷の場合とともに重要となる。first-year ice ridgeは、未固結層のsail部分とkeel部分、さらに、固結層のconsolidated layerと呼ばれる破壊氷片が再凍結している部分から構成され、特に、固結層は平坦氷の厚さの2～3倍と云われている^{1)～3)}。この変形氷固結層をモデル化した室内強度試験によれば、その圧縮強度は平坦氷のそれより若干小さな値を示す⁴⁾。さらに、オホーツク海域における海氷下面形状の現地計測結果も報告され、変形氷の存在による氷厚のばらつきやそれら模擬データの発生法も提案されてきた⁵⁾。

本研究では、室内においてモデル化した変形氷固結層の供試体を用いた氷板貫入試験を行い、固結層を形成するice block size (a) や貫入速度 (V) が氷荷重に与える影響、およびそれらを平坦氷の場合と比較することにより、変形氷固結層が構造物へ与える効果を

実験的に検討した。

2. 実験方法と実験条件

固結層供試体の作成法は木岡ら⁴⁾の方法に従った。今回は相互作用時の氷板の破壊状況を観察し易いように、氷板貫入試験では淡水氷を用いた。すなわち、①淡水を入れた所定の容器にメッシュ状の型枠を入れ所定の厚さまで凍らせた後型枠から取り外し、ほぼcubic型のice block(代表長さ a)として所定の量を取り出す。②淡水を所定の製氷水槽(100cm×90cm×45cm)に入れ、凝固点付近($T=0^{\circ}\text{C}$ 付近)まで冷却させる。③上記の淡水が凝固点付近になれば、あらかじめ取り出したice blockを入れた製氷水槽に淡水を入れ、目標氷厚まで凝固すれば水槽から試験氷板として取り出し、水平となるように氷板貫入試験装置(図-1)に移し、周囲3辺を固定する。④試験氷板の氷厚方向に温度計測を行うためのK型熱電対を埋める。氷温は実際のhummock iceを考慮し今回は $T=-4^{\circ}\text{C}$ を目標に低温室に保管する。⑤試験氷板の氷厚を計測し、平面圧力パネルセンサー(図-2)を取り付ける。⑥変位計とload cell(120kN)を測定

機器につなぐ。⑦電動ジャッキの速度を設定し、貫入を開始する。ストロークは最大50cm程度である。⑧試験においては、構造物模型の貫入状況、氷と構造物模型の境界面形状を観察し、同時に、ビデオ撮影も実施した。1ケースの試験には準備を含めると約1週間を要した。また、平面圧力パネルセンサー（図-2）は、測定面積が縦112mm×横112mmで、測定点は縦44点×横44点のマトリックスで同時に計1936点の圧力測定が可能で、接触面での空間的圧力分布の時間変動が計測できる。それぞれの実験諸元を表-1 に示す。

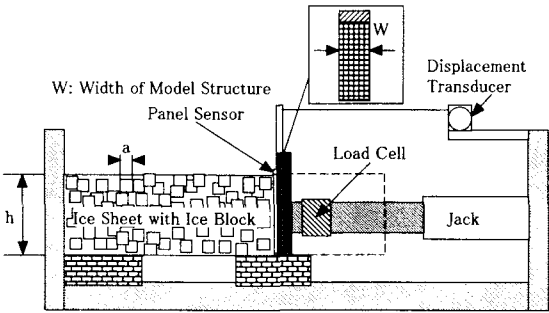


図-1 室内氷板貫入試験装置

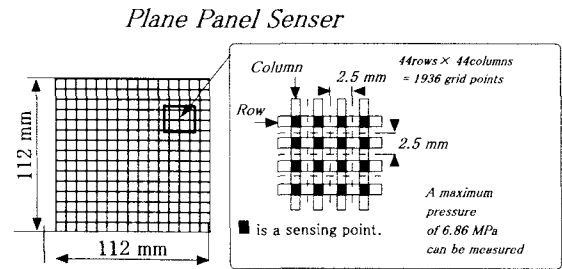


図-2 平面圧力パネルセンサー

表-1 実験諸元

CASE no.	Width of Structure W(cm)	Ice Thickness h(cm)	Indentation Velocity V (cm/s)	Block size a (cm)	Ice Temp. T(°C)
F1	15	7.4	0.20	no	-4.5
F2	15	10.8	0.20	3	-4.5
F3	15	10.9	0.20	3	-4.5
F4	15	10.4	2.00	3	-4.5
F5	15	10.1	2.00	3	-4.4
F6	15	9.4	0.02	3	-4.4
F7	15	11.0	0.02	3	-4.9
F8	15	10.8	0.20	6	-5.0
F9	15	11.1	0.20	6	-4.5

3. 実験結果と考察

(1) 荷重時刻歴特性

図-3～5は、貫入量に伴う氷荷重の時刻歴である。 $V=0.2\text{cm}$ ($V/a>3\times10^{-3}\text{ 1/s}$) の場合には、ブロックの有無にかかわらずbrittleなflaking破壊に対応して荷重

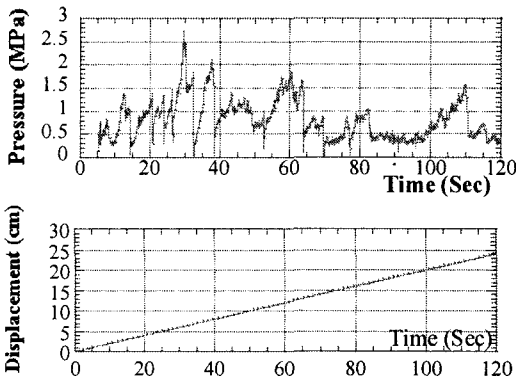


図-3 荷重と変位の時刻歴の例 (F1)
 $V=0.2\text{cm/s}$ ブロック無

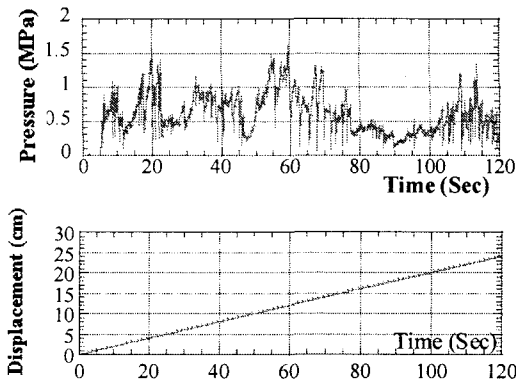


図-4 荷重と変位の時刻歴の例 (F2)
 $V=0.2\text{cm/s}$ ブロック有 $a=5\text{cm}$

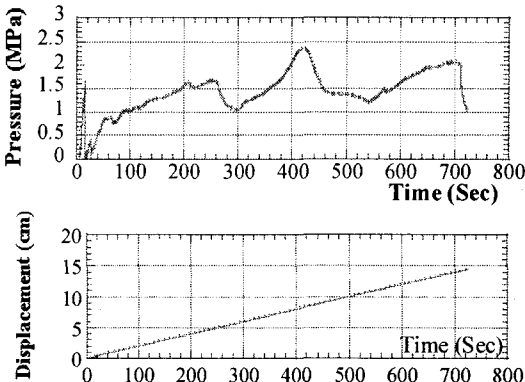
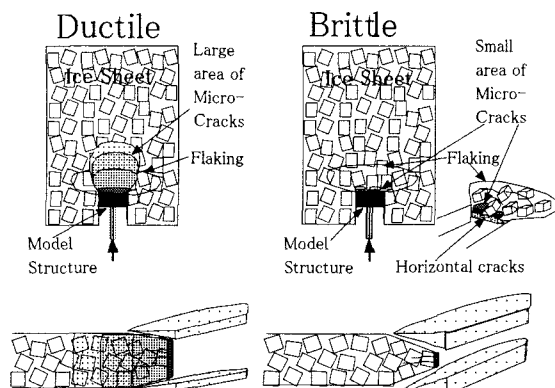


図-5 荷重と変位の時刻歴の例 (F6)
 $V=0.02\text{cm/s}$ ブロック有 $a=5\text{cm}$

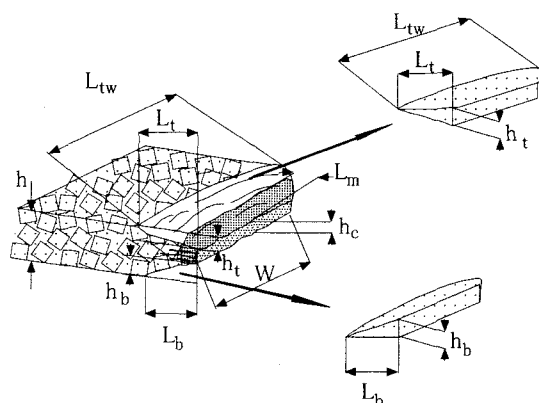
が変動する。それに対して、 $V=0.02\text{cm}$ ($V/h \approx 3 \times 10^{-3}$ 1/s) でブロック有りの場合には、マイクロクラックの形成される範囲が大きくなり、ductileな状態となって brittle と比べて大きな荷重変動が見られない。

(2) 氷盤の破壊形状と破壊氷片サイズ

ブロックを含む場合の貫入後の氷の破壊状態を図-6(a)に示す。 (V) が 0.2 cm/s を基準として、それより大きい場合には brittle flaking, 複数の微小領域でのマイクロクラックさらに水平クラックで特徴づけられ、構造物模型と氷との実際の接触域は小さい。同様に、それより小さい場合には比較的大きな領域でマイクロクラックの発生、構造物模型と氷との実際の接触域が増大し、水平クラックも発生する。以上は、平坦氷の貫入試験の場合とほとんど同様と考えられる^{6) 7)}。さらに、図-6(b)は、破壊氷片サイズの模式図を示したものである。さらに、ice block size (a) が一定の場合におけるこれらの寸法と (V/h) との関係を示したものが図-7(a), (b), (c)である。 (V/h) が小さくなると特にマイクロクラックの貫入方向長さ (L_m) や接触率 (h_c/h) が大幅に増加する。また、 (V) が一定 ($V=0.2\text{ cm/s}$) として、 (a/h) との関係を示したのが図-8(a), (b)である。 (a/h) が大きくなると特に貫入方向の flaking 長さ (L_p, L_b) が僅かに減少する傾向を示している。

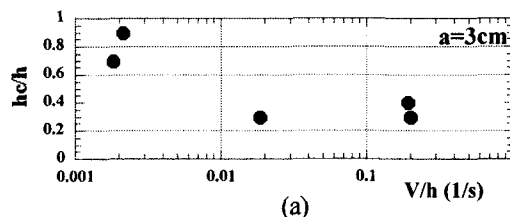


(a) 貫入後の氷の破壊状態についての模式図

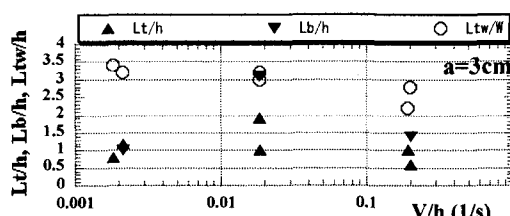


(b) 破壊氷片サイズの定義

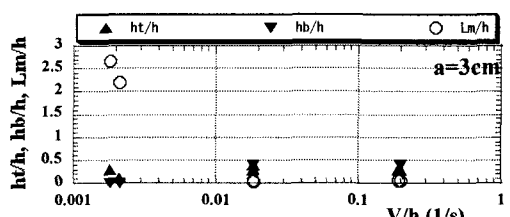
図-6 氷の破壊様式と破壊氷片サイズ



(a)

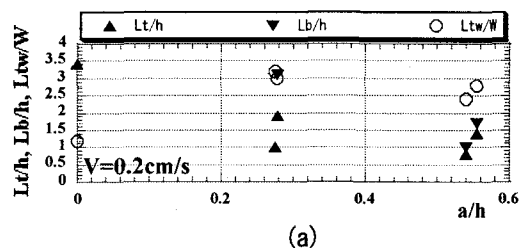


(b)

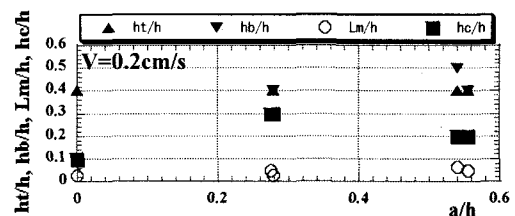


(c)

図-7 破壊氷片サイズと (V/h) の関係
(ice block size (a) が一定)



(a)

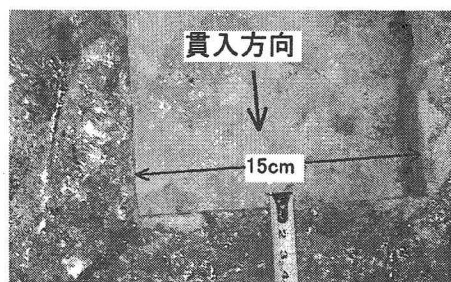


(b)

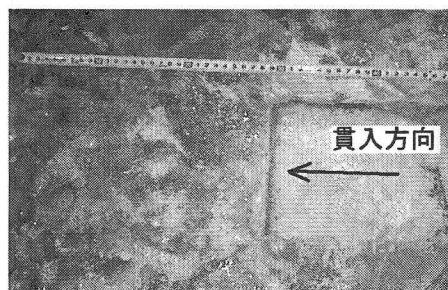
図-8 破壊氷片サイズと (a/h) の関係
(貫入速度 (V) が一定)

また、貫入試験後の構造物模型と氷との接触部分における氷の破壊状態を図-9(a)~(d)に示す。貫入速度 (V) により、明らかに破壊形態が異なる。図-9(a)では微小

なマイクロクラックやflaking破壊となる。図-9(b)も同様ではあるが、flaking破壊面の凹凸からflawとしてブロックの存在の影響が現れている。それに対して図-9(c)ではマイクロクラックの発生する領域の拡大が図の白い領域として確認でき、構造物との接触部分がplane-likeに増加する。一方、図-9(d)では、接触状態がline-likeとなっている様子が分かる。以上の(V)に応じた破壊形態は、平坦氷のそれと基本的には同様と理解できる。



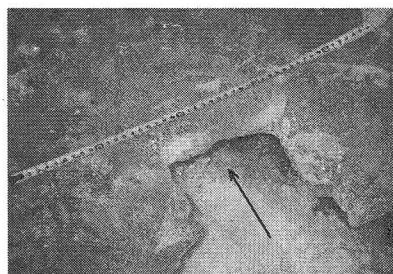
(a) ブロック無, $V=0.2\text{cm/s}$ (F1) の場合



(b) ブロック有($a=3\text{cm}$), $V=0.2\text{cm/s}$ (F3) の場合



(c) ブロック有($a=3\text{cm}$), $V=0.02\text{cm/s}$ (F6) の場合



(d) ブロック有($a=3\text{cm}$), $V=2\text{cm/s}$ (F5) の場合

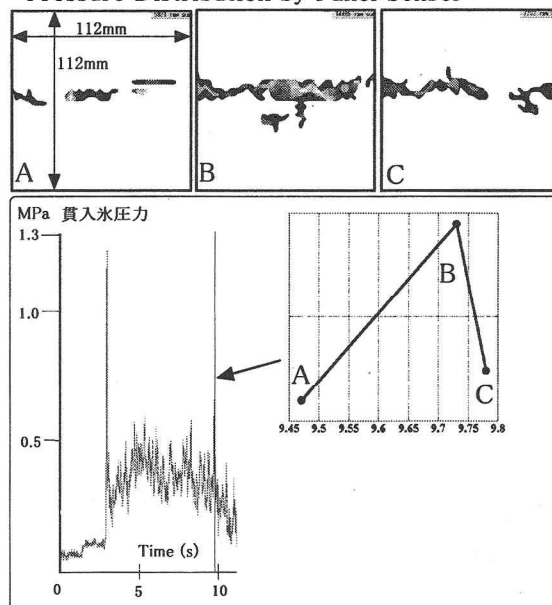
図-9 氷盤の破壊状態

(3) 圧力分布特性

平面圧力パネルによる計測結果を荷重時刻歴とともに示したものが図-10 (a), (b)である。圧力の発生している箇所が色のある部分で示され、その色が薄い場合には圧力が高い。そして、それらの部分が接触域と考えると、図-9 (c) に対しては図-10 (b) に対応しplane-likeになる。また、図-9 (d) に対しては図-10(a) に対応しline-likeになり、荷重時刻歴のピーク値前後の画像からflaking破壊と判断でき、それらのサ

F4 $V=2\text{cm/s}$ $h=10.4\text{cm}$ $a=3\text{cm}$

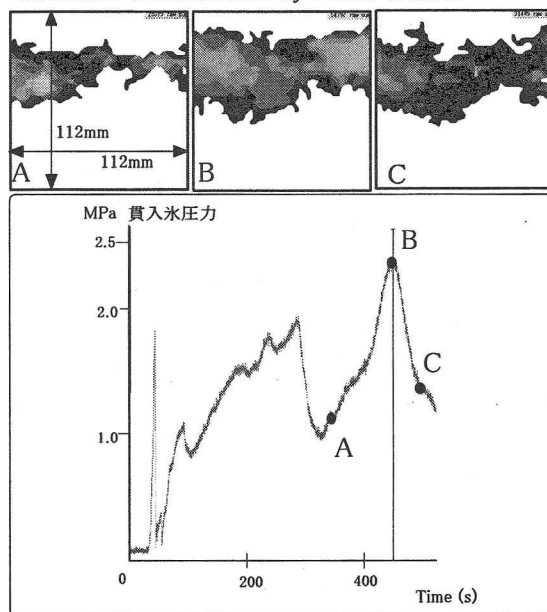
Pressure Distribution by Panel Sensor



(a) brittleの場合

F6 $V=0.02\text{cm/s}$ $h=9.4\text{cm}$ $a=3\text{cm}$

Pressure Distribution by Panel Sensor



(b) ductileの場合

図-10 平面圧力パネルによる接触圧力計測結果

イズも平面圧力パネル計測から様々となる。以上、いずれの場合にも平坦氷のそれと基本的には同様と理解できる。また、貫入速度の低下に伴う接触面積の増加は、荷重の増加につながっている。

(4) (V/h) の効果

次に、固結層氷において混入したice block size(a)を一定とし、貫入氷圧力と (V/h) の関係を示したものが図-11である。 (V/h) の増加に伴い、貫入氷圧力は減少する。これは、破壊の形態で示した様に、マイクロクラックの発生領域の大きさや構造物との接触面積の大きさと関係しており、 (V/h) が小さい場合には破壊に多くの力を要する。これは、平坦氷の関係と同様であり brittle と ductile の遷移域ともほぼ対応していると推定される⁷⁾。

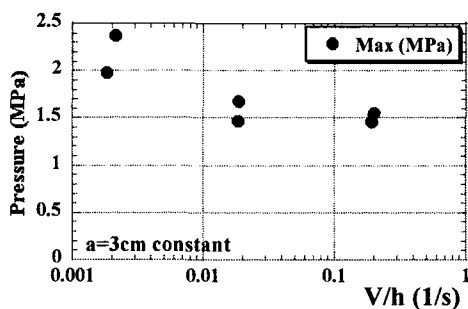


図-11 貫入圧力と (V/h) の関係
(ice block size (a) が一定)

(5) Ice Block Size の効果

次に、固結層氷において貫入速度(V)が一定($V=0.2\text{cm/s}$)の brittle の場合で、混入したice block size(a)の影響を調べるために、貫入氷圧力と (a/h) の関係を示したものが図-12である。 (a/h) の増加に伴い、貫入氷圧力の平均、極値、最大値ともに減少する。これは、図-8(a)にあるように、 (a/h) が大きくなると特に貫入方向のflaking長さ(L_v, L_b)が僅かに減少し、破壊に要する力が減少することに対応すると思われる。

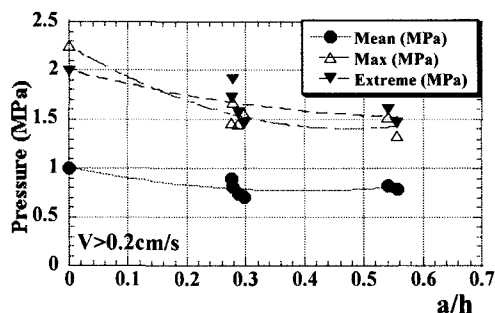


図-12 貫入圧力と (a/h) の関係 (brittleの場合)

(6) Flaw Size としての検討 (brittleの場合)

次に、貫入速度(V)が一定($V=0.2\text{cm/s}$)の brittle の場

合では、 (a/h) の増加に伴い、貫入氷圧力の平均、極値、最大値ともに減少する傾向を示す。これは、ある体積の氷の強度を考えた場合には、その強度自体が減少するものと考えられ、ice block size (a)をflaw size と仮定し、圧縮かつbrittle条件下における氷の強度(圧縮) σ の変化を調べるために以下の近似式⁹⁾を用いて検討を行う。この場合、図-13に示すようなflaw size(a)、および、それらの代表的な距離 d_f をとる。 K_{ic} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)は氷の破壊靱性値である。

$$\sigma \approx 3.5 \frac{K_{ic}}{a} \sqrt{\frac{d_f}{2}} \quad (1)$$

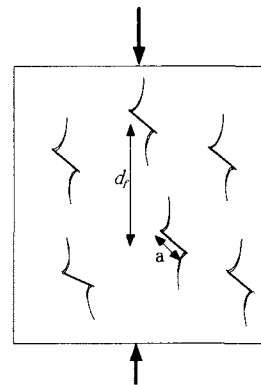


図-13 圧縮载荷時のFlaw model

さらにS-2タイプの氷では $a=0.65d_f$ や $d_f=d$ (ここで d は「レイナイズ」である) との関係が報告⁹⁾されている。本研究の場合、均一氷を $d=0.01\text{m}$ 、また、 K_{ic} を一定とし、flaw size(a)をice blockの一辺と仮定する。さらに、ice block相互間の距離は非常にバラツキがあるとして、条件①を $d_f=1.54 \times a$ (均一氷と同様の関係)、条件②を $d_f=1 \times a$ として均一氷との強度比 r (均一氷の場合1)を計算すると図-14のようになる。flaw size(a)の増加に伴い強度比(r)は徐々に減少する傾向を示す。これらの計算はflawをクラックとしているが、本研究の場合ではブロックとその周りの氷との間には付着強度があり、

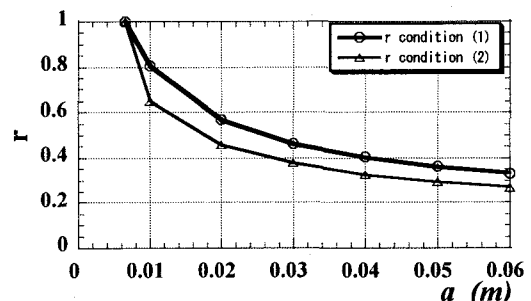


図-14 強度比(r)と a の関係

必ずしも条件が一致するとは限らない。このため、強度比(r)の低減割合が図-12の場合に比較して大きくな

ると考えられ、ブロックとその周りの氷との界面が強度低下に影響を与えていると推定される。

4. 結論

(1) モデル化した変形氷固結層を用いた氷板貫入試験を行い、固結層を形成するice block size (a) や貫入速度 (V) が貫入氷圧力に与える効果を示した。氷の破壊形態は、(V/h)により変化し基本的には平坦氷の場合と同様である。

(2) (V/h)が小さいductileの場合には、構造物と氷との接触面積の増加やマイクロクラックの発生領域の拡大などが原因となり、貫入氷圧力は増加する。この条件が卓越した氷荷重を与える可能性があるため、変形氷固結層を用いたクリープ特性の評価が今後必要と考えている。

(3) (V/h)が大きいbrittleの場合には、(a/h)の増加に伴い貫入氷圧力は僅かに減少する。これは、木岡ら⁴⁾の強度試験結果と対応する。氷ブロックとその周りの氷との界面が、flawとして作用することに因り、強度の低下に影響を与えていると推定される。

参考文献

- 1) Beketsky, S.P., Astafiev, V.N. and Truskov, P.A., "Design Parameters for Hummocks and Grounded Hummocks in the Sea of Okhotsk, Proc. Of ISOPE, Vol.2, pp.487-493, 1997.
- 2) Truskov, P.A., Surkov, G.A. and Beketsky, S.P., "STRENGTH PARAMETERS OF HUMMOCKS: FIELD OBSERVATIONS AND LABORATORY TESTS," Proc. of 8th Int. Symp. on OKHOTSK SEA & SEA ICE, pp.82-95, 1993.
- 3) Timco, G.W. and Goodrich, L.E., "Ice Rubble Consolidation," Proc. Of IAHR Ice Symposium, pp.427-438, Sapporo, 1988.
- 4) 木岡信治, 安永善勝, 松尾優子, 佐伯浩, "Ice Ridge強度に関する統計的研究", 寒地技術シンポジウム論文報告集, Vol. 16, pp. 191-198, 2000.
- 5) Kioka, S., Yamamoto, Y., Honma, D., Sakikawa, M. and Sakai, S., "ANALYSIS AND SIMULATION OF SEA ICE DRAFT PROFILE ON OKHOTSK SEA COAST OF HOKKAIDO", Proc. 17th Int. Symp. on Ice (IAHR), Saint Petersburg, pp.191-198, 2004.
- 6) Sacki, H. and Ozaki, A., "Ice Forces on Piles", *Physics and Mechanics of Ice*, Springer-Verlag, pp.342-350, 1980.
- 7) 竹内貴弘, 赤川敏, 河村宗夫, 酒井雅史, 勝井秀博, 松下久雄, 中沢直樹, 寺島貴志, 平山健一, 佐伯浩, "氷荷重に関する中規模野外実験における構造物と氷盤の相互作用について(その3)", 海洋開発論文集(土木学会), VOL. 14, pp. 423-428, 1998.
- 8) Cooksley, S.D., "Yield and fracture surfaces of brittle solids under multi-axial loading", Ph.D. Thesis, Cambridge University, 1984.
- 9) Sanderson, T.J.O., "Ice Mechanics risks to offshore structures", Graham & Trotman, 1988.