

海洋構造物に作用する局部氷圧力の分布形状

THE DISTRIBUTION OF LOCAL ICE PRESSURE ACTING ON OFFSHORE STRUCTURE

竹内貴弘¹・赤川敏²・中澤直樹³・木岡信治⁴・佐伯浩⁵

Takahiro TAKEUCHI, Satoshi AKAGAWA, Naoki NAKAZAWA, Shinji KIOKA and Hiroshi SAEKI

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

²正会員 Ph. D. 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 工博 システム工学研究所(株) (〒145-0071 東京都大田区田園調布 2-35-13)

⁴正会員 工博 (独) 北海道開発土木研究所港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

⁵フェロー 工博 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)

The distribution of local ice pressure acting on offshore structure in ice-infested sea area is investigated through data obtained by the plane pressure panel sensor in in-situ ice/structure indentation test using sea ice. The local ice pressure is characterized into two types depending on indentation velocity (V) divided by ice thickness (h). This is why ice failure pattern depends on (V/h). In the paper, an approximation curve of the ice pressure distribution is proposed as a multiple of uni-axial compressive strength of sea ice.

Key Words: Local Ice Pressure, Offshore Structure, Ice Strength, Sea Ice

1. 研究目的

各種の目的で結氷海域に海洋構造物を建設する場合には、氷板の移動に伴って構造物に作用する氷荷重の評価が必要である。この場合、構造物全体に作用する水平氷力の評価と同時に、局部氷荷重の評価も構造物の部材や氷による磨耗現象の評価などを検討する上で必要となる。潮汐の影響を受ける場合には、局部氷荷重がある分布形状で鉛直方向に変動しながら作用することとなる。佐伯など(1983)は、サロマ湖の海水を用いた貫入試験において構造物の模型前面に付設された 16 個の歪ゲージ式圧力変換器の圧力データから構造物幅(W)、氷厚(h)、貫入速度(V)の条件に応じて分布形状の概略を示した。そして、海氷一軸圧縮強度(σ_d)の約 4~6 倍の高い氷圧力が主に氷厚の中央部分で発生していることを報告した。若生、泉山(1997)は、この局部氷荷重を検討する上で有効な平面圧力パネルを用いる方法を、初めて氷海水槽試験に適用し、微小領域での局部氷荷重相互間の関係を把握した。このセンサーは、微小領域の多点圧力計測を時刻歴的に評価できるため、局部氷荷重の分布形状を算定する場合には非常に有効である。本研究では、以前報告した(佐伯など, 2000)平面圧力パネルセンサーの較正方法に従い、能取湖の海水を用いて実施した中規模野外試験(例えば、竹内など, 1998)時に付設した平面圧力パ

ネルによる多点圧力データを解析し、局部氷荷重分布の形状パターンを示す近似曲線を検討したのでこれらの内容を報告する。

2. 試験方法と試験条件

今回報告に用いる多点圧力データは、図-1 に示す能取湖で行った中規模野外試験時に構造物模型(幅 $W=1.5\text{m}$)の前面に取り付けた 4 つの平面圧力パネルセンサー(Panel A~D)から得られた値である。1 つの平面圧力パネルセンサーは、測定面積が縦 238mm ×横 238mm で、測定点は縦 44 点×横 44 点の計 1936 点である。このパネルは合成樹脂フィルム上に感圧インクと電極塗料を取り付けたもので、感圧インクの抵抗値が圧力により変化することを利用し、電圧変化から圧力値を計測している。センサー厚は 0.1mm である。また、図に示す様に幅 10cm の独立した 15 個のセグメントが平面圧力パネルの背後にあり、これらには別途 load cell がセットされ、同時に計測された同一面積に作用した荷重値をパネルセンサーから得られた荷重合計値と比較する(同じとする)ことで試験ケース毎に較正を行っている。試験条件と海氷の物性値をまとめたものが表-1 である。

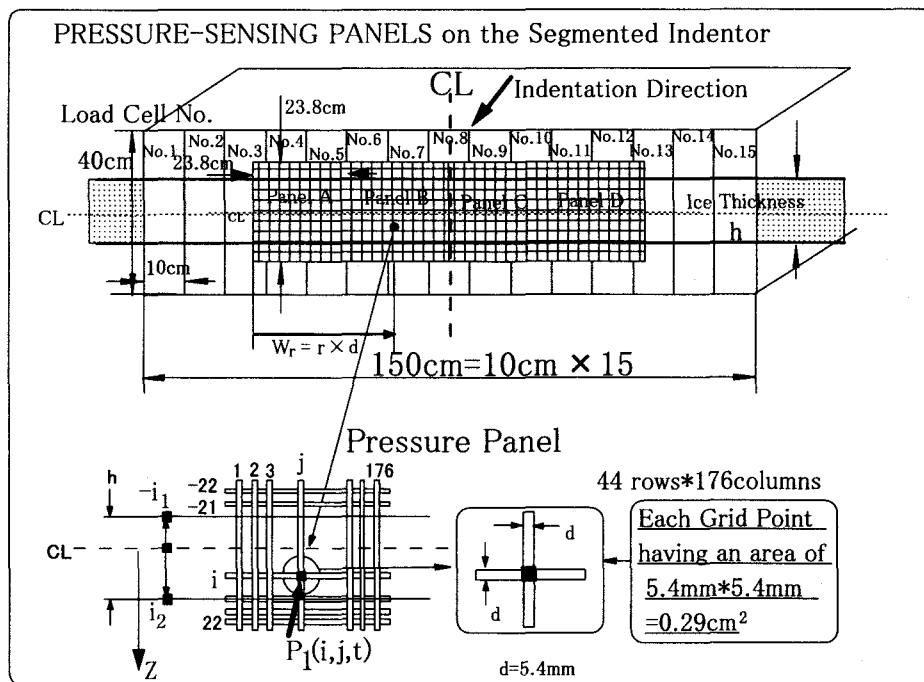


図-1 貫入試験の構造模型と各種計測機器の諸元

表-1 試験条件と海水の物性値

CASE	氷厚 (h) cm	貫入 速度 (V) (cm/s)	V/h (1/s)	一軸圧 縮強度 σ_c (MPa)	密度 ρ (g/cm³)	塩 分量 ppt	氷 温 °C	Ice Type
1	24.1	0.3	0.01245	1.265	0.843	6.2	-2.7	#1
2	24.1	0.03	0.00125	1.265	0.843	6.2	-2.5	#1
3	24.1	0.03	0.00125	1.265	0.843	6.2	-2.5	#1
4	24.1	3	0.12448	1.265	0.843	6.2	-2.6	#1
5	18.6	0.03	0.00161	1.4	0.879	5.9	-1.7	#2
6	23.8	0.3	0.01261	1.52	0.895	5.4	-2.7	#2

#1: Ice sheet composed of snow ice at the top and columnar ice at the bottom.

#2: Ice sheet composed of columnar ice.

3. 試験結果と考察

(1) 局部氷荷重の計算

はじめに、図-1に示す様に平面パネルセンサーの計測開始 t 時間において i 行 j 列の位置に作用する氷圧力を $P_1(i, j, t)$ とする。この氷圧力は $d \times d$ の面積に作用する。

氷と構造物の相互作用形態は、 (V/h) が $3 \times 10^{-3} (1/s)$ より大きい場合 (brittle) と $3 \times 10^{-3} (1/s)$ より小さい場合 (ductile) の2つに分類され、(brittle) の場合には作用する氷圧力は、構造物の幅に依存する傾向を示す。こ

れらを考慮するため、幅 ($w_r = r \times d$) $\times$ 高さ (d) の面積に作用する氷圧力を以下の式(1)の様に計算する。

$$P_2^r(i, t) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r P_1(i, j, t) \quad (1)$$

計測開始 t_1 時間～ t_2 時間の荷重時刻歴から、それぞれ以下の式(2)～(4)の様に、平均値、極値 (平均+3標準偏差) と最大値を計算する。

$$P_2^r(i)_{ave} = \frac{1}{(t_2 - t_1 + 1)} \sum_{t=t_1}^{t_2} P_2^r(i, t) \quad (2)$$

$$P_2^r(i)_{ext} = P_2^r(i)_{ave} + 3 \times \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \sum_{t=t_1}^{t_2} \left\{ P_2^r(i, t) - P_2^r(i)_{ave} \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$P_2^r(i)_{max} = \text{MAX} \left(P_2^r(i, t) : t_1 \leq t \leq t_2 \right) \quad (4)$$

氷厚 (鉛直 ; Z) 方向の氷圧力分布を調べるために、氷厚の中央から距離 (z) の位置を無次元化し、 $\frac{z}{h} = i$ を計算する。さらに、式(2)～(4)を式(5)～(7)の様に (σ_c) で無次元化する。

$$k(i)_{ave} = \frac{P_2^r(i)_{ave}}{\sigma_c} \quad (5)$$

$$k(i)_{ext} = \frac{P_2^r(i)_{ext}}{\sigma_c} \quad (6)$$

$$k(i)_{max} = \frac{P_2^r(i)_{max}}{\sigma_c} \quad (7)$$

以上の計算から、 (z/h) と $k(z/h)$ （平均値、極値、最大値）の関係をそれぞれ (brittle) と (ductile) の場合において検討する。

(2) (V/h) の効果

氷と構造物の相互作用形態においては、(brittle) の場合には氷が構造物前面で非同時的な複数破壊を示し、単一破壊領域の大きさには分布があるもののほぼ氷厚幅 ($W_r=h$) である。この参照面積 ($h \times h$) に作用する荷重と平面パネルがとらえた圧力画像の例を図-2 に示す。また、 (z/h) と $k(z/h)$ の関係を平均値、極値、最大値について計算したものを図-3~5 示す。

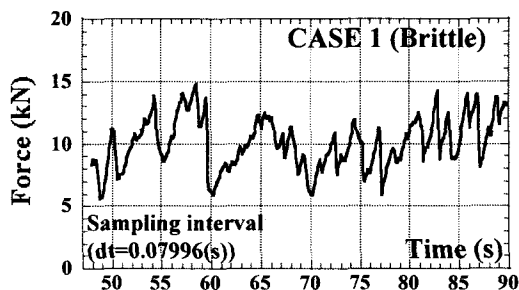


図-2 荷重時刻歴と平面パネルの圧力画像の例
Brittle (CASE 1)

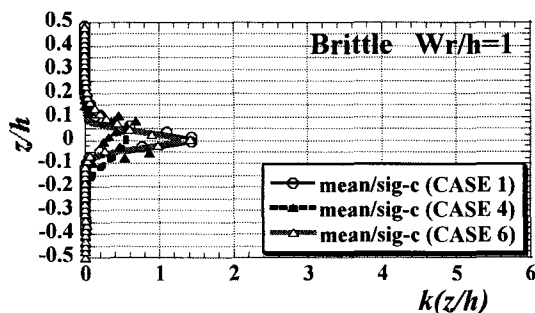


図-3 (z/h) と $k(z/h)$ の関係 Brittle(平均)

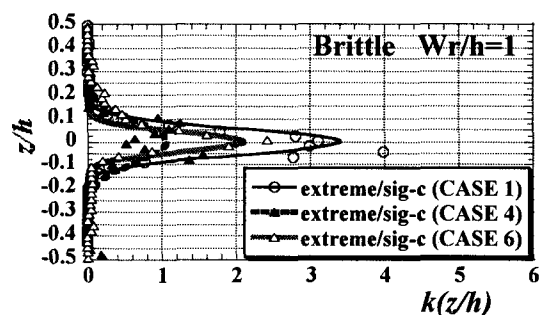


図-4 (z/h) と $k(z/h)$ の関係 Brittle(極値)

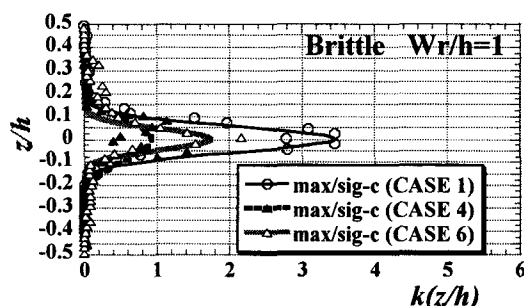


図-5 (z/h) と $k(z/h)$ の関係 Brittle(最大値)

一方、(ductile) の場合には氷が構造物前面でほぼ同時に変形する。比較のため、上記と同様に、参照面積 ($h \times h$) に作用する荷重と平面パネルがとらえた圧力画像の例を図-6 に示す。さらに、 (z/h) と $k(z/h)$ の関係を平均値、最大値について計算したものを図-7~8 示す。

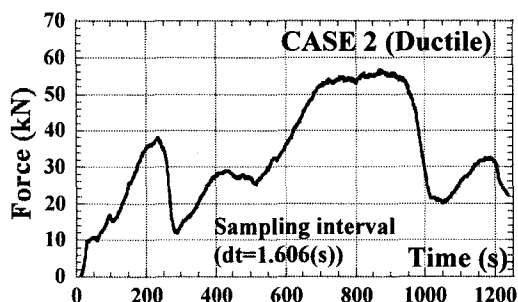


図-6 荷重時刻歴と平面パネルの圧力画像の例
Ductile (CASE 2)

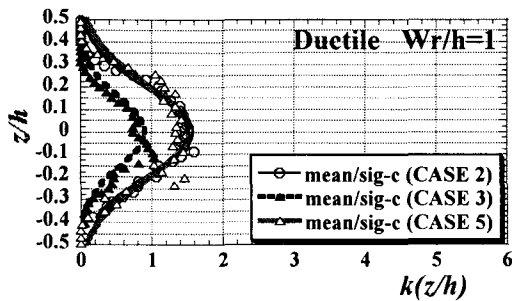
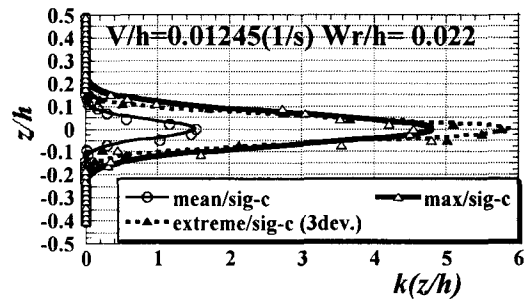


図-7 (z/h) と $k(z/h)$ の関係 Ductile(平均)



(a)

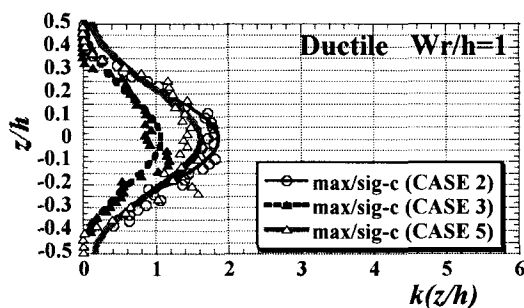
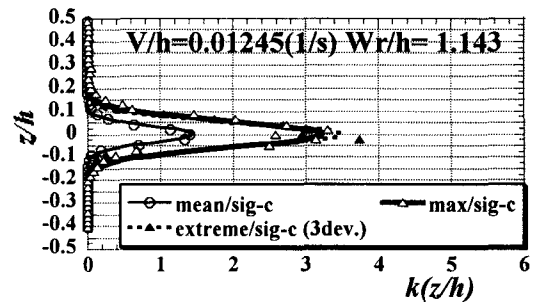
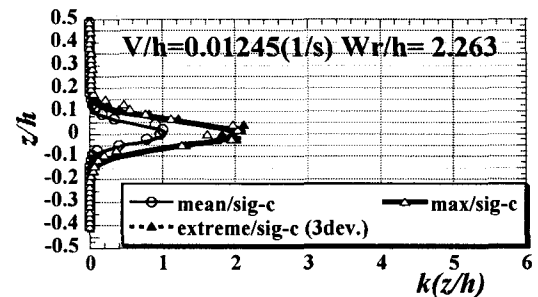


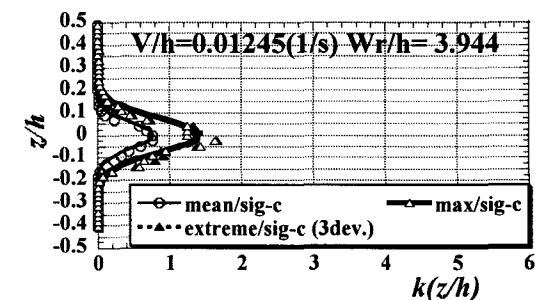
図-8 (z/h) と $k(z/h)$ の関係 Ductile(最大)



(b)



(c)



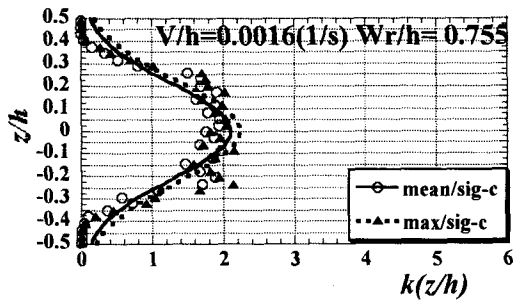
(d)

(brittle) の場合には、圧力の作用する領域は (z/h) がほぼ $-0.2 \sim 0.2$ の領域で、氷厚中央で高いピークを示し、海水一軸圧縮強度(σ_c)の $3 \sim 4$ 倍程度である。一方、(ductile) の場合には、氷厚中央で海水一軸圧縮強度(σ_c)の $1 \sim 2$ 倍程度であるが、圧力の作用する領域は (z/h) がほぼ $-0.45 \sim 0.45$ の広範囲な領域に荷重が作用する。

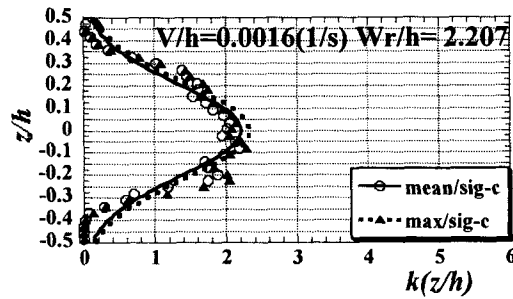
(3) 構造物幅方向(W)の効果

氷が構造物の幅方向で複数破壊を示す (brittle) の場合や同時変形する (ductile) の場合においては、それらの作用面積($W \times h$)によって、式 (1) で計算される氷圧力の時刻歴も変化する。このため、構造物幅方向(W)を氷厚(h)で無次元化した値をパラメータとし、 (z/h) と $k(z/h)$ の関係 (形状) がどう変化するかを示したものが図-9(a), (b), (c), (d) (brittle) と図-10(a), (b), (c), (d) (ductile) である。(brittle) の場合には、氷厚中央のピーク値が (W_r/h) の増加に伴い減少していくことがわかる。(ductile) の場合には、 (W_r/h) の影響がみうけられない。

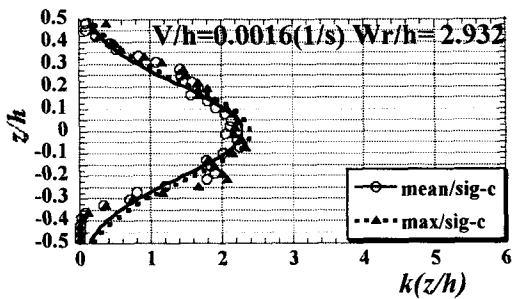
図-9 (z/h) と $k(i)$ の関係 $v/h > 3 \times 10^{-3} (1/s)$



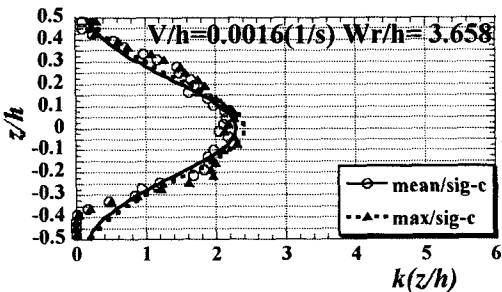
(a)



(b)



(c)



(d)

図-10 (z/h) と $k(i)$ の関係 $v/h < 3 \times 10^{-3} (1/s)$

(4) 氷圧力分布形状の近似曲線

以上に示した図から (z/h) と $k(z/h)$ の関係に関する近似曲線を以下の(8)式で表現する。 (m_1 と m_2 は係数)

$$k(z/h) = m_1 \times \exp\left\{-m_2(z/h)^2\right\} \quad (8)$$

(brittle) の場合には、圧力の作用する領域は (z/h) がほぼ $-0.2 \sim 0.2$ の領域となり、これから m_2 は 100 程度となる。また、 m_1 は氷厚中央部分の氷圧力と関係し W/h の関数となる。 m_1 については氷厚中央部分の氷圧力と関係し、図-11 の様に (W_r/h) の増加に伴い減少傾向を示す。

(ductile) の場合には、圧力の作用する領域は (z/h) がほぼ $-0.45 \sim 0.45$ の領域となり、これから m_2 は 15 程度となる。また、 m_1 は図-12 の様にほぼ一定値の 2.5 程度となる。これらを基に (8) 式から (z/h) と $k(z/h)$ の関係を示す近似曲線の例を図-13 に示す。対象とする海域の海水一軸圧縮強度(σ_c)の値が与えられれば、 (z/h) の位置に $k(z/h)$ 倍することにより氷圧力の分布形状を推定することができる。この場合、歪速度依存性を示す海水の一軸圧縮強度(σ_c)は、それが最大値を示す $10^{-3}(1/s)$ のオーダーの歪速度で得られた値を用いる必要がある。

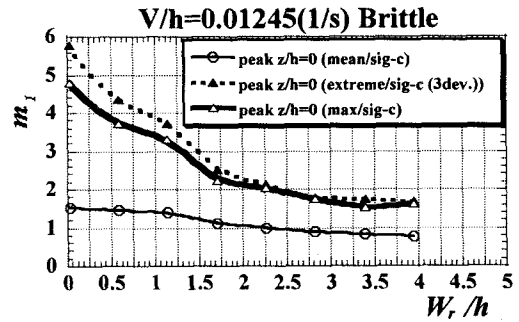


図-11 (W_r/h) と (m_1) の関係 Brittle

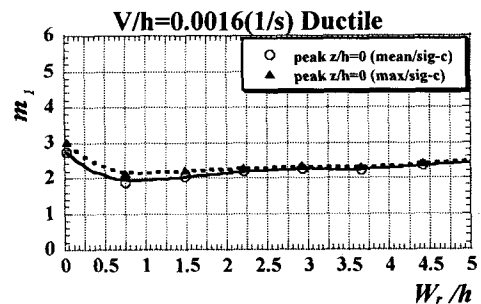


図-12 (W_r/h) と (m_1) の関係 Ductile

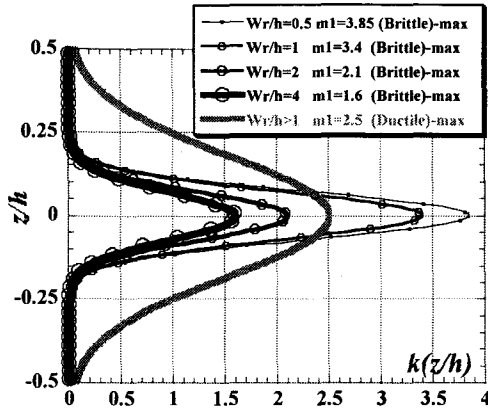


図-13 (z/h) と $k(z/h)$ の近似曲線の例

この局部氷圧力の分布形状を幅 W ($=W_r$) にわたって積分し、氷厚(h)、海水の一軸圧縮強度(σ_c)を与えると、式(9)の様に变形され、全体氷荷重を計算できる。

$$\begin{aligned}
 F_{\max}^r &= \sum_{i=-l_1}^{l_2} \{k(i)_{\max} \sigma_c\} r d^2 \\
 &\approx \int_{-0.5}^{0.5} \{m_1 \times \exp\{-m_2(z/h)^2\}\} d(z/h) \times Wh \sigma_c \\
 &= m_1 \times \left[\frac{2}{\sqrt{m_2}} \int_0^{0.5\sqrt{m_2}} \{\exp(-t^2)\} dt \right] \times Wh \sigma_c \\
 &= m_1 \times \left[\frac{2}{\sqrt{m_2}} \times \text{Erf}(0.5\sqrt{m_2}) \right] \times Wh \sigma_c \\
 &= m_1 \times m_2 \times Wh \sigma_c
 \end{aligned} \quad (9)$$

一方、全体氷荷重の推定式 (Takeuchi et. al, 2002) は、式(10)の様に $Wh \sigma_c$ に係数 f_1, f_2 が掛けられた形となり、 f_1 は接触、氷厚拘束、端部拘束状態に依存する係数で、 f_2 は氷盤幅方向の非同時・同時破壊状態に依存し、*ductile* の場合一定になるのに対して、*Brittle* の場合には (W/h) の関数となる。

$$F_{\max}^r = f_1 \times f_2 \times Wh \sigma_c \quad w/h \geq 1 \quad (10)$$

今回の試験条件を考慮し氷厚拘束、端部拘束の影響を無視すると、 m_2 は主に接触状態によるものであるから f_1 と関係し、*Ductile* と *Brittle* の両場合において氷圧力の作用領域(z/h が *Ductile* で $-0.45 \sim 0.45$ の領域、*Brittle* が $-0.2 \sim 0.2$ の領域) が分かればそれぞれ一定値となる (すなわち、 m_2' は m_2 が与えられると誤差関数と係数の積から一定値)。しかし、 m_1 は氷の破壊現象に因るから f_2 と関係し、*Ductile* の場合には図-12 の様に

(W/h) と無関係にほぼ一定になるのに対して、*Brittle* の場合には図-11 の様に (W/h) の関数となり、その増加に伴い徐々に m_1 は減少傾向を示す。以上より、局部氷圧力分布を与える近似曲線の係数の性質も、全体氷荷重の最大値を与える推定式の傾向と一致する。

4. 結論

(1) 実海水を用いた貫入試験時に取り付けた平面圧力パネルの計測結果から、氷と構造物の相互作用形態を分類するパラメータ(V/h)に応じて局部氷圧力の分布形状を明らかにした。

(2) (V/h) が $3 \times 10^{-3} (1/s)$ より大きい条件下で氷が *Brittle* の性質を示す場合、氷厚(鉛直)方向において圧力はほぼ氷厚の 0.4 倍の領域($-0.2 \leq z/h \leq 0.2$)に集中して作用する。さらに、氷厚中央付近の微小領域においては、海水一軸圧縮強度(σ_c)の 5 倍程度の高い圧力が発生する。

(3) (V/h) が $3 \times 10^{-3} (1/s)$ より小さい条件下で氷が *Ductile* の性質を示す場合、氷厚(鉛直)方向において圧力はほぼ氷厚の 0.9 倍の領域($-0.45 \leq z/h \leq 0.45$)に作用する。

(4) *Brittle* と *Ductile* 両場合における近似曲線を示し、それぞれの係数を与えた。これから、氷厚(h)や海水の一軸圧縮強度(σ_c)が与えられると、構造物幅(W_r)に応じた局部氷圧力の分布形状を推定することができる。

謝辞：

この研究で用いられたデータは、通産省(当時)の JOIA プロジェクト(極限海域における海洋構造物に作用する氷荷重に関する基礎的研究)の中規模野外実験により得られたものである。

参考文献

- 1) 佐伯浩, 田中祐人, 小野敏行, 酒井雅史, 尾崎晃: 直立杭構造物に作用する氷圧力分布と氷盤の破壊周期について, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 653-657, 1983.
- 2) 若生, 泉山: 氷荷重の分布特性について, 寒地技術論文・報告集, Vol. 13, pp. 412-417, 1997.
- 3) 佐伯浩, 木岡信治, 宇佐美宣拓, 竹内貴弘, 佐々木幹夫, 赤川敏: 海洋構造物と氷板の相互作用評価を目的とした平面圧力パネルセンサーの測定精度の検証, 海洋開発論文集 Vol. 16, pp. 157-162, 2000.
- 4) 竹内貴弘, 赤川敏, 河村宗夫, 酒井雅史, 勝井秀博, 松下久雄, 寺島, 貴志, 中澤直樹, 平山健一, 佐伯浩: 氷荷重に関する中規模野外試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 Vol. 14, pp. 423-428, 1998.
- 5) T. Takeuchi, S. Akagawa, H. Saeki, N. Nakazawa and K. Hirayama, "Ice Load Equation for Level Ice Sheet," Jour. of ISOPE, Vol.12, No.3, pp.171-177, 2002.