

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

On the Applicability of Plane Pressure Panel Sensor to Ice/Structure Interaction

佐伯浩¹・木岡信治²・宇佐美宣拓³・竹内貴弘⁴・佐々木幹夫⁵・赤川敏⁶

Hiroshi SAEKI, Shinji KIOKA, Norikatsu USAMI, Takahiro TAKEUCHI,

Mikio SASAKI, and Satoshi AKAGAWA

¹ 正会員 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)

² 正会員 工修 北海道大学大学院工学研究科博士課程 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

³ 正会員 工修 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 正会員 工博 八戸工業大学土木工学科助教授 (〒031-8501 八戸市妙大開 88-1)

⁵ 正会員 工博 八戸工業大学土木工学科教授 (〒031-8501 八戸市妙大開 88-1)

⁶ 正会員 Ph. D. 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)

The plane pressure panel sensor has the capability of measuring many pressures inside a small area, and has recently been applied to evaluation of ice pressure in ice/structure interaction. However, it is not clear how the sensor responds to various test conditions. The purpose of this paper is to examine the characteristics of the plane pressure panel sensor under various test conditions through loading tests, and evaluate its applicability to ice strength measurements.

Key Words: Ice Strength, Plane Pressure Panel Sensor, Ice

1. 研究目的

海洋構造物に作用する氷荷重の最大値は、氷板が破壊するときに発生する。しかし、構造物が大きくなると、構造物に接触した氷板は空間的に非同時に破壊することが知られている。そのため、構造物と氷板との接触面積が大きくなるにつれて氷圧力は減少傾向を示す。海洋構造物に作用する氷荷重および局部氷荷重を明らかにするためには、最近開発された平面圧力パネルによる計測法が非常に有効であり、既に氷海水槽実験において若生、泉山 (1997) や JOIA の中規模野外実験 (竹内ら, 1998) における使用実績がある。このセンサーは、微小面積下での多点圧力計測が可能であり、氷荷重の要因である氷板の破壊現象を多点圧力計測値を通して把握できる点でこれまでにない利点を有している。このパネルから得られる圧力データの絶対値が評価できると、さらに、その有効性が増大することになる。本研究ではシート厚さ、

供試体の硬さ (弾性係数)、環境温度、鉛直・水平載荷速度、荷重変動、載荷方法などを変化させた室内載荷実験を実施し、平面圧力パネルセンサー測定精度の検証と較正方法を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法と実験条件

本実験で用いた平面圧力パネルセンサー (Tekscan 社製) は、測定面積が縦 238mm×横 238mm 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となる (図-1)。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。また、センサー厚は 0.1mm で、時間変化に応じ接触面での空間的圧力分布を測定し、それを積分することにより全荷重の時間変動が計測できる。実験では、氷の代替え材料として海水の圧縮

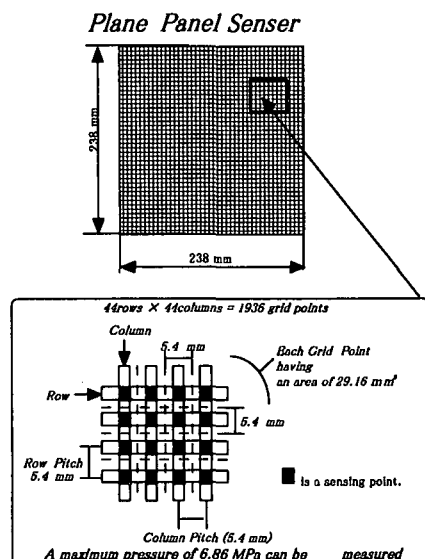


図-1 使用した平面パネルセンサー

弾性係数(佐伯,1983)を参考に、圧縮弾性係数を大きい順から人工ゴム(A、90°)、(B、70°)、(C、50°)の3種類を用いた。材料の寸法は、直径10cm、高さ3cmの円筒形供試体で、周囲が90°で内部が(70°、50°、30°)のものや、周囲が70°で内部が(50°、30°)のものも用意した。実験は、載荷方法に応じて2種類に分けられる。1つは図-2(a)に示す圧縮試験で、2つ目の試験は図-2(b)に示すように圧縮荷重を受けた状態で下面が水平に移動する滑動実験である。これは、海洋構造物前面の海水が破壊する時の挙動に合わせたものである(図-3)。荷重計測は、Calibrationのために、ロードセルによる測定も実施した。更に、載荷速度を算定するために、時間当たりの変位量も計測した。

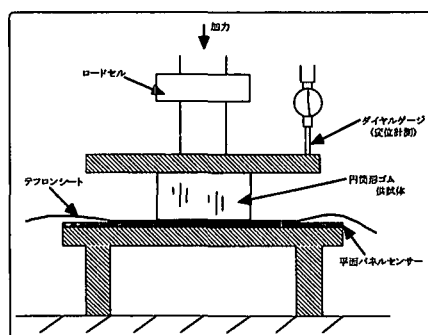


図-2(a) 圧縮試験

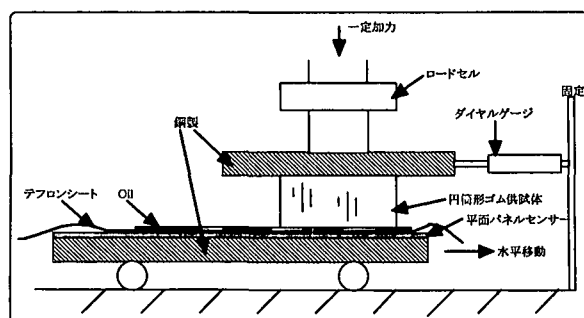


図-2(b) 滑動試験

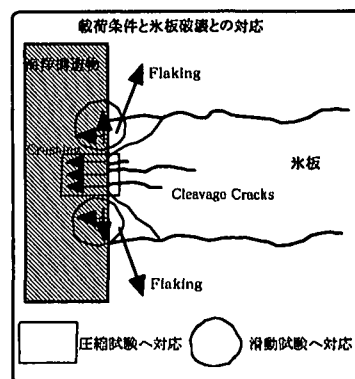


図-3 氷板と構造物の相互作用

3. 実験結果と考察

(1) 荷重の較正について

初めに、平面パネルセンサーによる測定では、それぞれ1936点における計測値が0-255の範囲の値で出力されるため、これらを積分することにより全体荷重 F (kN)が計算できる。製品として $\pm 10\%$ の精度で保証されているのは、出力値(55)が0.686MPa、出力値(255)が6.86MPaでそれらは直線で近似される。さらに、出力値(0-55)は保証されていないため、図-4に示す原点を通る直線を仮定する。これにより計算される全体荷重 F_p (kN)と別に計

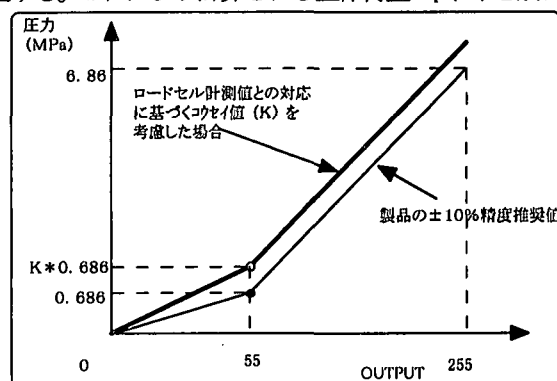


図-4 平面パネルセンサー出力値と圧力の関係

測されたロードセルの全体荷重計測値 FL (kN)を比較する。 F_p (kN)の方が大幅に小さい値を与えていたため、図-4に示す様な較正係数値(K)を考慮することとし、較正係数値(K)に応じ、出力値(0-55)では直線の勾配を変化させ、出力値(55-255)では平行移動させた。この時の較正係数値(K)は、 $K=1$ で計算される F_p (kN)と FL (kN)の最大値の比から評価している(図-5)。また、出力値(0-55)の範囲を、4種類の曲線($X^{1/3}$ 、 $X^{1/2}$ 、 X^2 、 X^3 ; $X=OUTPUT$)を用いて比較検討したが、この場合の K の決定が難しく、ここでは直線近似のbi-linearで較正した。

(2) 再現性について

鉛直載荷での同一試験条件下(供試体の硬さ、載荷速度、温度、シート厚)における実験を2度毎に実施し、それぞれを比較(経過時間に対する F_p (kN)の変化)した

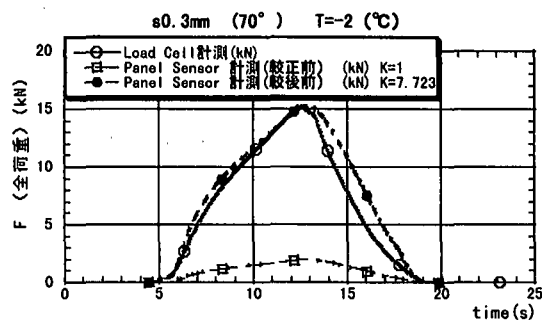


図-5 全体荷重の計測例

結果を図-6(a), (b), (c)に示す。同一条件下であっても、載荷荷重の最大値とその載荷時間が異なるため、荷重上昇部分のみ時間を併せて表記する。これから分かる様に、同一試験条件下では載荷時間に対する荷重上昇傾向、勾配から荷重減少傾向の再現性が確認できる。

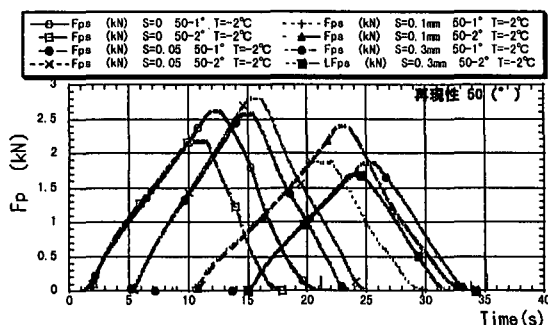


図-6(a) 平面パネルセンサーによる全体荷重

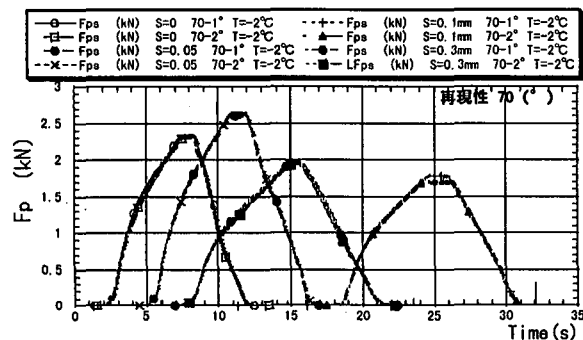


図-6(b) 平面パネルセンサーによる全体荷重

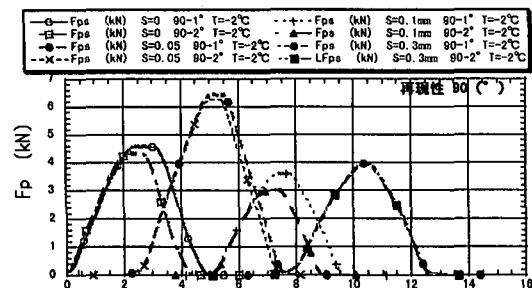


図-6(c) 平面パネルセンサーによる全体荷重

(3) シート厚さの影響について

パネルセンサーを実用的に使用するには、一枚のシートの使用回数(耐久性)が重要となる。このため供試体端部にさらに厚さ S (mm)のシートを敷き、0, 0.05, 0.1, 0.3mmと4種類変化させてそれらの影響を調べた。 F_p (kN)、 F_p (kN)から平均圧力(MPa)を計算し、時間当たりの計測変位量から、応力-歪み曲線が得られる。これから、それぞれ弾性係数 E_p , E_L を計算しそれらの比(E_p/E_L)とシート厚さ(S)の関係を示したものが図-7である。シート厚さ(S)が増大しても、弾性係数の比(E_p/E_L)に変化はみられない。また、(E_p/E_L)は1より小さく、パネルセンサーから得られる弾性係数 E_p は、その値を小さく評価することになる。

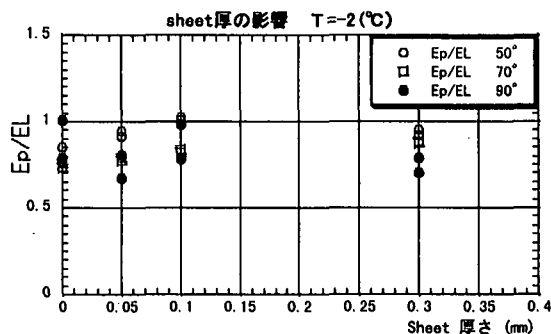


図-7 シート厚と弾性係数の比(E_p/E_L)の関係

(4) 供試体の硬さの影響について

供試体の硬さを変化させ、同様に弾性係数の比(E_p/E_L)との比較を行なった。供試体硬さは、材料が一樣に変化(50°、70°、90)する場合と、円筒供試体の端部が90°でその中央部分が(30°、50°、70°)、さらに、円筒供試体の端部が70°でその中央部分が(30°、50°)の8種類である。横軸に供試体の硬さ(°)を、縦軸に弾性係数の比(E_p/E_L)をとりシート厚さ(S)毎に比較したものが、図-8(a), (b)である。供試体の硬さが増大しても、弾性係数の比(E_p/E_L)の変化は少ない。同様に、(E_p/E_L)は1より小さく、パネルセンサーから得られる弾性係数 E_p は、その値を小さく評価する。

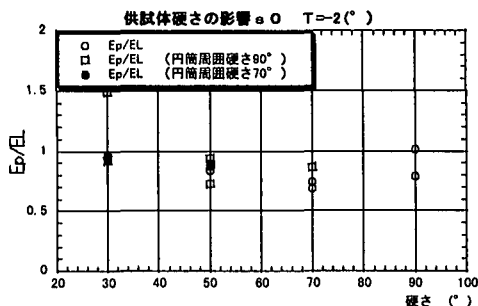


図-8(a) 供試体硬さと弾性係数の比の関係

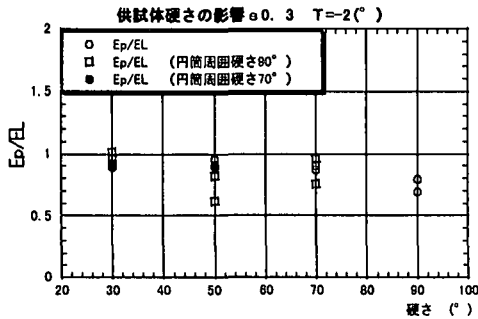


図-8 (b) 供試体硬さと弾性係数の比の関係

(5) 供試体の直径の影響について

供試体の直径を、4種類(20 cm、10 cm、5 cm、3 cm)に変化させ、その影響を調べた。縦軸に弾性係数の比 (E_p/EL)、横軸に供試体の直径をとり比較したものが図-9である。弾性係数の比 (E_p/EL) は、ほぼ1に近い値であるが、直径が大きくなるにつれ、小さくなる傾向が見られた。これは、平面圧力パネルによる出力値が(0-55)の範囲内にあり、比較的校正精度の低い出力値の領域にあったことが原因と思われる。

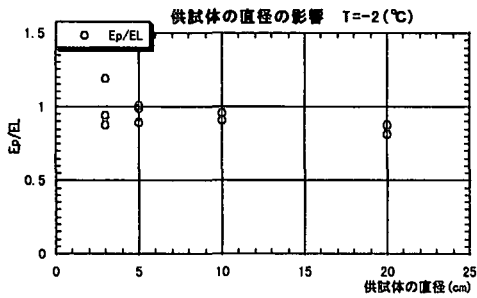


図-9 供試体の直径と弾性係数の比の関係

(6) 環境温度の影響について

環境温度(T)を変化させ、同様に弾性係数の比(E_p/EL)との比較を行なった。環境温度(T)を3種類(-10°C 、 -2°C 、 15°C)に変化させ、横軸に環境温度(T)、縦軸に弾性係数の比(E_p/EL)をとり、シート厚さ(S)毎に比較したものが図-10である。環境温度(T)の変化に対する弾性係数の比の変化は小さい。環境温度(T)の変化は、供試体の硬さを変化させることにもなるが、供試体の硬さの影響と同様な傾向を示し、その影響は見られない。

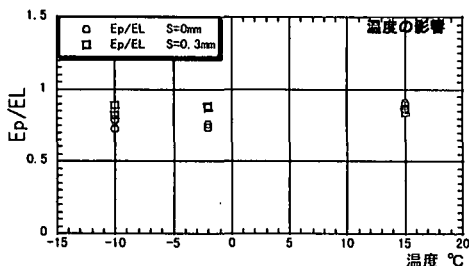


図-10 環境温度と弾性係数の比の関係

(7) 鉛直载荷速度の影響について

鉛直载荷速度を変化させ、その影響を調べた。縦軸に弾性係数の比 (E_p/EL)、横軸に鉛直载荷速度 (mm/s) をとり、シート厚さ (S) 毎に比較したものが、図-11である。鉛直载荷速度の変化に対する、弾性係数の比の変化はほぼ一定で、その影響は見られない。また、弾性係数の比は1よりわずかに小さく、平面圧力パネルから得られる弾性係数 E_p は、その値を小さく評価している。

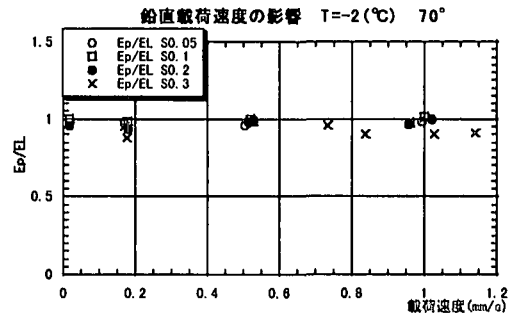


図-11 鉛直载荷速度と弾性係数の比の関係

(8) 荷重変動の影響について

海洋構造物と氷板の相互作用時には、氷板破壊に応じて氷荷重が変動する。このため、圧縮試験時に圧縮荷重の増大、減少を繰り返すその応答を調べた。図-12(a)、(b)に、シート厚さ $S=0$ 、 0.3mm 時の载荷時間と荷重変動の関係を示した。ここでは、校正係数 (K) を初期のピーク

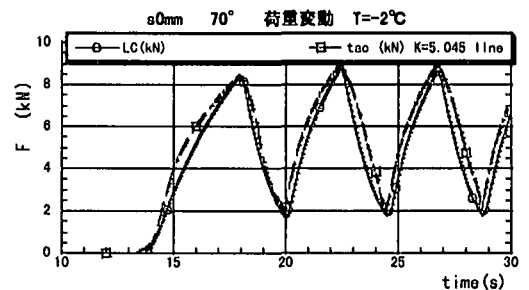


図-12(a) 荷重変動時の全体荷重

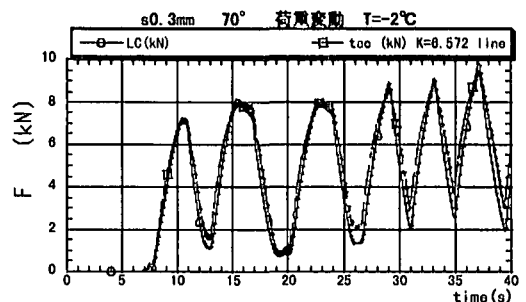


図-12(b) 荷重変動時の全体荷重

荷重($F_p=FL$ の関係)から決定した。初期のピーク荷重後の凸側の変曲点と凹側の変曲点の荷重の比(F_p/FL)を調べたものが図-13である。凸側変曲点の比(F_p/FL)がほぼ

1に近い値を与えるのに対して、凹側変曲点の比(F_p/FL)が1.5まで変動し F_p は過大評価となる。氷荷重の算定では、氷板の破壊時の荷重すなわち、凸側の変曲点（ピーク）が重要となるために、この点に関しては平面パネルセンサーによる荷重評価は適していると思われる。

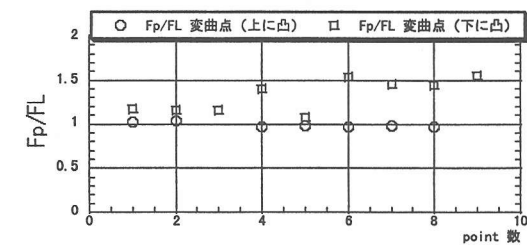


図-13 荷重変動変曲点と F_p/FL の関係

(9) 滑動試験について

海洋構造物前面の海水が破壊する時の挙動を考慮し、圧縮荷重を受けた状態で下面が水平に移動する滑動実験を水平速度と圧縮荷重をそれぞれ変化させて実施した。図-14(a), (b), (c)には、全荷重と載荷時間の関係を速度の大きさ毎に、圧縮荷重と併せて試験結果を示している。

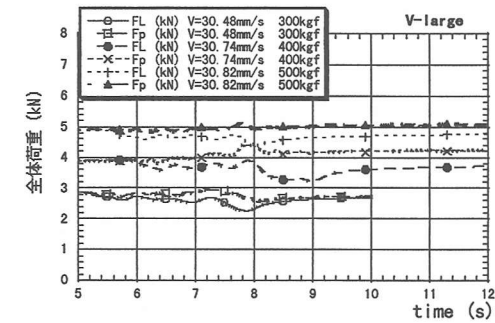


図-14(a) 全体荷重計測(水平速度大の場合)

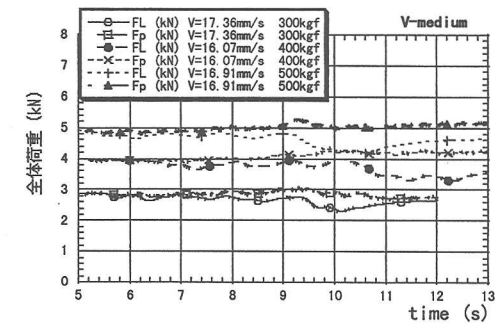


図-14(b) 全体荷重計測(水平速度中の場合)

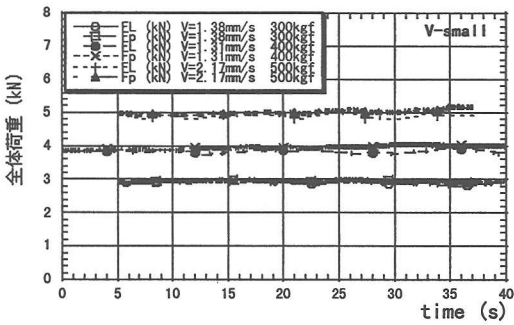


図-14(c) 全体荷重計測(水平速度小の場合)

F_p と FL の大小に対する圧縮荷重の大きさの影響は少ないが、速度が大きい場合には小さい場合に比較して F_p と FL の差が大きくなる傾向があり、図-15(a), (b)には、速度の小さい場合の平面パネルセンサーの圧力分布を時間 $T=7\text{sec}$ (水平移動開始前) と $T=30\text{sec}$ (水平移動開始後) において示した。これらの圧力分布はほぼ一様と判断される。しかし、速度の大きい場合 (図-16(a), (b)) の圧力分布は、時間 $T=5.5\text{sec}$ (水平移動開始前) ではほぼ一様な状態であるのに対し、 $T=8.5\text{sec}$ (水平移動開始後) では、移動側の圧力分布が大きくなりさらに変形し、 F_p は FL に対して過大評価となる。さらに、水平速度と荷重の比(F_p/FL)の関係を調べると (図-17)、速度が大きい場合

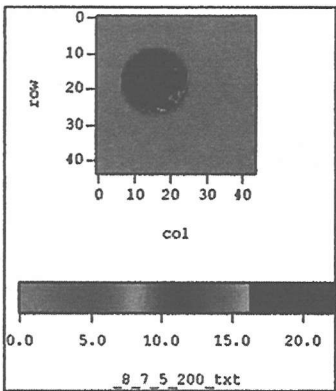


図-15(a) 圧力分布($T=7\text{sec}$, $F=500\text{kgf}$)

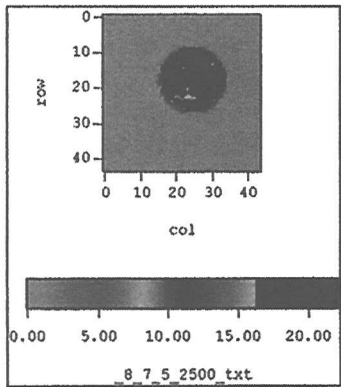


図-15(b) 圧力分布($T=30\text{sec}$, $F=500\text{kgf}$)

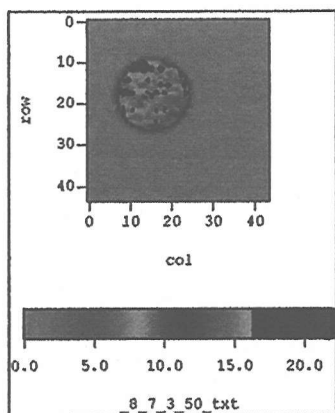


図-16(a) 圧力分布(T=5.5sec, F=400kgf)

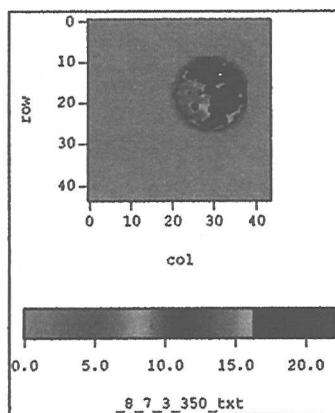


図-16(b) 圧力分布(T=8.5sec, F=400kgf)

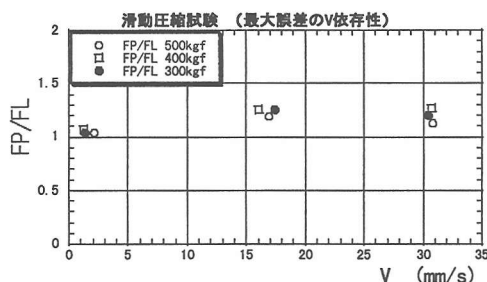


図-17 水平速度と F_p/FL の関係

には F_p は FL に対して 25%程度の過大評価の傾向を示し

ている。これは、面積の補正が必要なことや出力値が(0-55)にあり精度が比較的劣ることに起因していると推測される。

4. 結論

上記の試験結果から、海洋構造物に作用する氷荷重評価における平面圧力パネルセンサーの特性と較正方法を検討し、使用に当たっての問題点を把握した。

ロードセルによる荷重計測と平面パネルセンサーによる計測結果を最大値の比較より較正係数(K)値を推定し、平面パネルセンサーの出力値を bi-linear 型で圧力へ変換した(図-4)。これから、平面パネルセンサー計測の再現性を確認し、シート厚さ・環境温度・供試体の硬さ・鉛直載荷速度が全荷重へ与える影響が小さいことを確認した。しかし、荷重変動の場合には、凸側変曲点の誤差は小さいが、凹側変曲点では誤差が大きくなる傾向があった。また、供試体サイズの変化や圧縮荷重作用下において接線方向の移動速度が大きくなると、圧縮荷重計測の誤差が大きくなる傾向があった。

今後は、較正精度の低い出力値(0-55)に対しての bi-linear 型の較正方法に検討を加え推定精度を高めること、及び、上記検討結果に計測接触面積誤差の影響を考慮することなどの検討が必要である。

謝辞：

本実験を実施するに当たり、試験装置の一部を清水建設(株)よりお借りした。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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)。
- 2) 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 Vol. 14, pp. 423-428, 1998.
- 3) 佐伯浩：海岸・海洋構造物の耐氷設計法、博士論文、1998.