

粒状貨物荷重の推定方法

海上安全研究領域 構造安全性研究G * 田中 義照、佐久間正明、安藤 孝弘
(財)日本海事協会 重見 利幸、原田 実、船越 正泰

1. まえがき

鉄鉱石、石炭、穀物等の粒状貨物を積載するばら積み貨物船、あるいは、鉱石運搬船の貨物倉に生じる倉内荷重の設定方法を検討するため、粒状貨物圧計測実験を実施した。

大型ばら積み貨物船の船体中央貨物倉を想定した基準船倉模型(ビルジホッパー斜板角度 45度)の他、側壁斜板角を 60度、75度、90度に変えた模型を製作し、水道水および乾燥砂を積載したときの静的圧力、並びに静的傾斜時および水平動揺時の変動圧力を計測した。実験結果に基づき、各条件下における粒状貨物圧推定方法を提案した。

2. 実験方法

2.1 船倉模型

標準的な Cape size ばら積み貨物船(L×B×D × d = 280×45×24×17.6m)の船体中央貨物倉を対象として、約 1/20 縮尺の船倉模型を軟鋼板(SS400)で製作した(Model-45 と称する)。この模型を基準として、側壁斜板角を 60度、75度、90度に変えた模型を 3 体製作した(それぞれ、Model-60、Model-75、Model-90 と称する)。船倉模型の計測用側壁の反対側の側壁は、底板に対して 90度に統一した。製作した船倉模型の概略図を図 - 1 に示す。

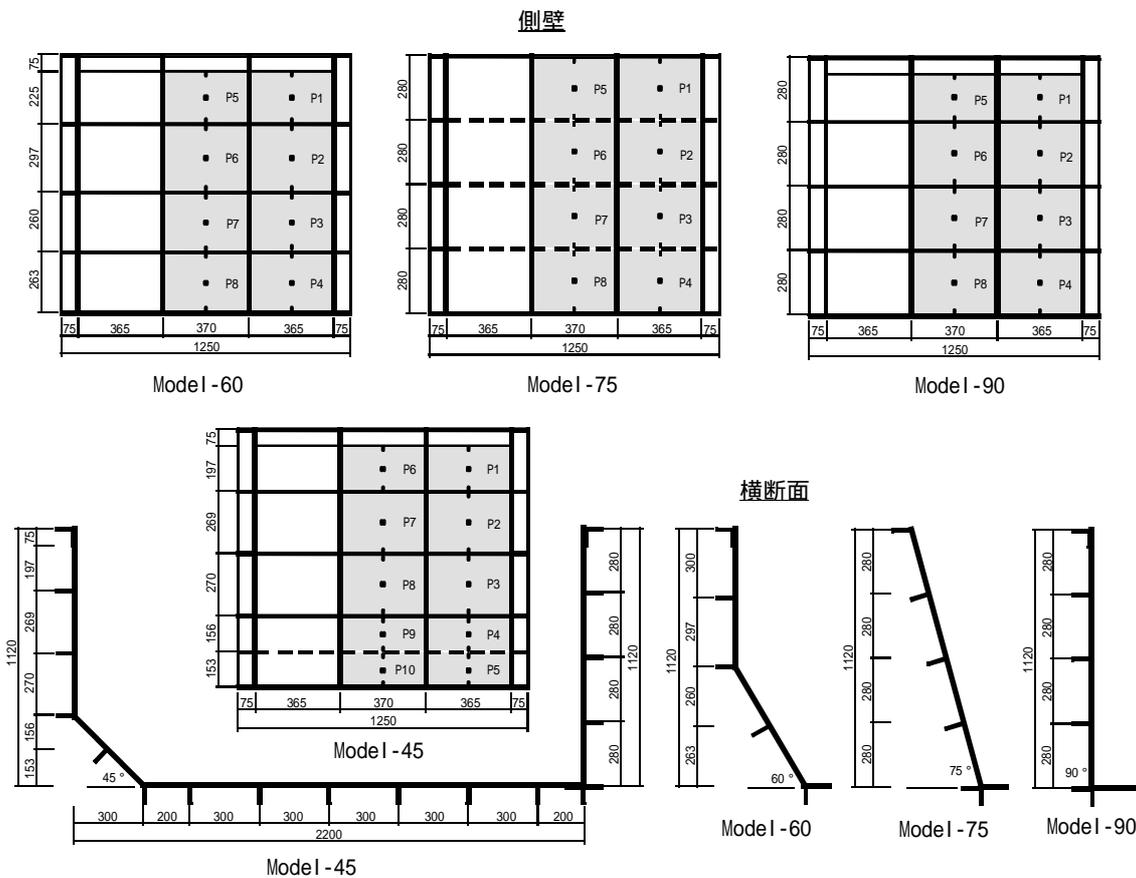


図 - 1 船倉模型概略図

2.2 実験方法

船倉模型それぞれについて、水道水または乾燥砂積載時に静的圧力によってパネルに発生する曲げひずみ、並びに水平動揺および静的傾斜時の曲げひずみ応答を計測した。水平動揺実験では、アクチュエータの設定振幅を±70mm、設定周波数を0.6~0.7Hzで加振した。静的傾斜実験では、船倉模型を最大で±15度傾斜させた。

2.3 乾燥砂の物理的性状

実験に使用した乾燥砂の性状は、別途試験を行い、平均粒径 $d=0.38\text{mm}$ 、安息角 $\theta=33\text{度}$ 、真比重量 $s_0=2.67\text{gf/cm}^3$ 、嵩比重量 $s=1.47\text{gf/cm}^3$ 、間隙比 $e=0.816$ 、粘着力 $c=33.7\text{gf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi_i=41.3\text{度}$ 、塗装鋼板との摩擦角 $\phi_w=30.0\text{度}$ を得た。水の比重量は $w=1.0\text{gf/cm}^3$ とする。

2.4 計測項目および計測方法

船倉模型の計測用側壁の各パネルに4枚のひずみゲージを貼付した(図-1に■印で示す位置)。パネル上下の防撓材近傍各1点と中央2点の1軸ひずみゲージによりブリッジを組み、圧力によって生じるパネルの曲げひずみを計測した。計測点番号を図-1中にP1,P2,...で示す。パネルに発生する曲げひずみを液体と粒状体の場合で比較することにより、各実験条件に対する粒状貨物圧を検討した。この他、各模型の幅方向中心線上の上端、下端および模型中央位置で水平方向加速度を計測した。

各パネルに発生する曲げひずみ応答および水平方向加速度の出力電圧は、増幅器(共和電業製CDV-230B)により増幅後、AD変換ボードを介してパソコンにデジタルデータとして直接集録した。また、実験におけるサンプリング周波数は1kHzとした。

3 実験結果

3.1 静的圧力

各船倉模型に水および砂を満載(110cm積載)したときに生じる、板の法線方向の静的圧力をそれぞれ、 p_{nw} および p_{ns} とする。両者の関係を図-2に示すが、横軸 p_{nw} は嵩比重量の違いを考慮

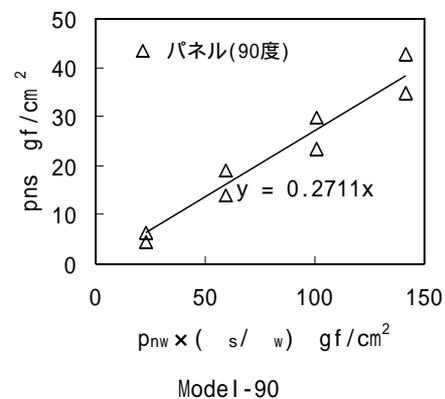
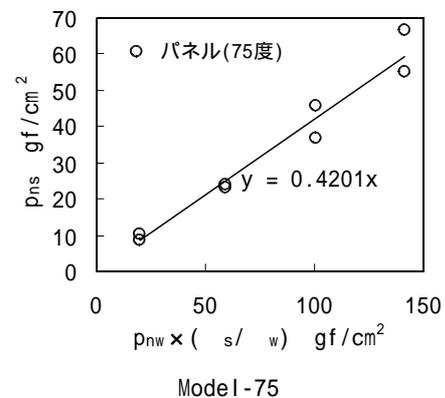
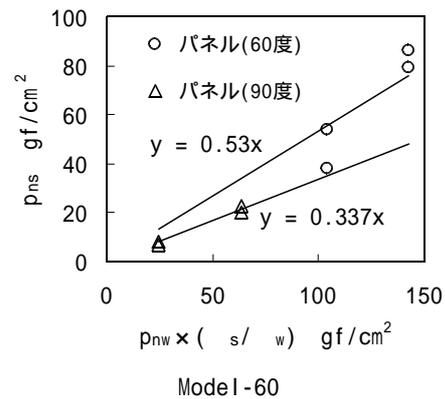
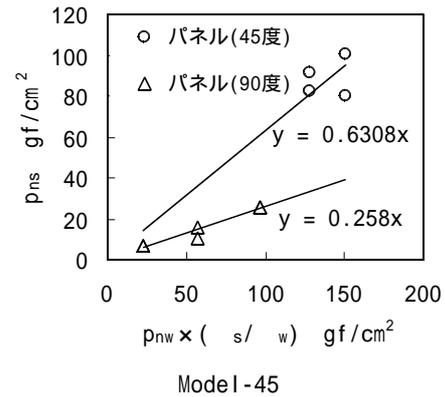


図-2 静的圧力計測結果

して圧力を s/w 倍している。パネル傾斜角大きくなるに従い、最小二乗近似による直線の傾き、すなわち粒状体と液体による静的圧力の比が小さくなるのがわかる。

3.2 水平動揺実験

水平動揺により水(満載状態で模型上部を鋼製蓋により密封)、または砂(60%積載で、初期状態および締め固まり後の定常状態)によって生じる変動圧力 p_w および p_s を比較して図-3に示す。ただし、図-3は各模型に生じた水平加速度振幅1Gに対する変動圧力振幅である。両者の間にはばらつきが大きく、相関はあまり見られないが、水平動揺による変動圧力の両者の比は、初期状態で約25%以下(図中の実線)、定常状態で約15%以下(図中の破線)である。

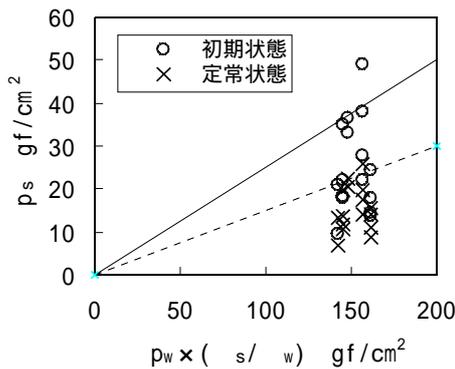


図-3 水平動揺実験結果

3.3 静的傾斜実験

各船倉模型に水または砂をそれぞれ満載し、模型両端部を交互に3回ずつ吊り上げることにより、静的傾斜させたときに生じる変動圧力 p_w および p_s を比較して図-4に示す。ただし、図-4は各模型における傾斜角変化30度(±15度)に対する変動圧力振幅を示したものである。表面に近いパネルを除き、第1回目の傾斜で最も大きい応答を示し、第2回目以後は締め固まりにより応答が減少する。

4. 考察

4.1 静的圧力に及ぼす側壁傾斜角の影響

静止土圧状態にある粒状体中の微小立方体に作

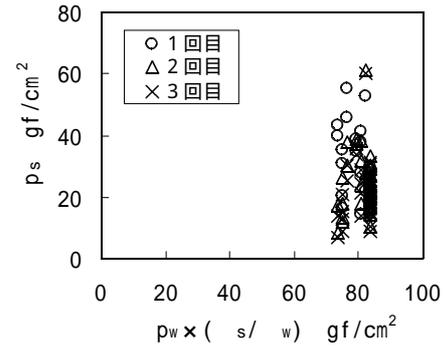


図-4 静的傾斜実験結果

用する鉛直方向の圧力 z 、水平2方向の圧力 x 、 y の関係は、静止土圧係数 K_0 を用いて $x = y = K_0 z$ と仮定できる。この状態において粒状体内部の任意の傾斜面(水平面とのなす角 α)の法線方向に作用する圧力 p_n は、微小体の釣り合い条件より次式で求められる。

$$p_n = K_c \sigma_z \quad (1)$$

$$K_c = \cos^2 \alpha + K_0 \sin^2 \alpha \quad (0 \leq \alpha \leq 90^\circ) \quad (2)$$

この K_c を見かけの静止土圧係数と呼ぶことにする。無限に広い嵩比重量 γ の粒状体内部の深さ z の位置における直圧力 σ_z は、 z にほぼ等しいと推測されるが、本研究で使用したような船倉模型の場合、壁面摩擦のため σ_z は z より小さいと考えられる。したがって、実験結果から K_c を検証するためには、Janssen 理論¹⁾等により σ_z を推定する必要がある。

図-2に水および砂をそれぞれ満載した場合に

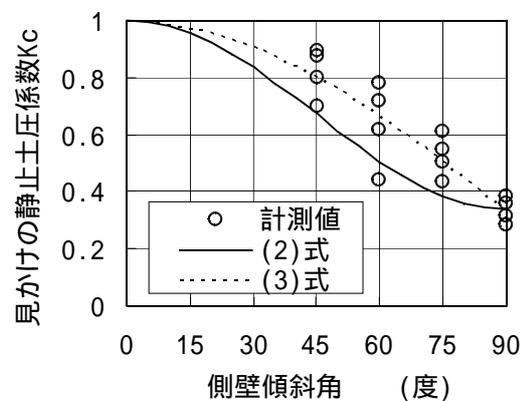


図-5 K_c の計測値と推定値の比較

傾斜壁に生じる静的圧力の関係を示したが、比較的大きな静的圧力が作用する(誤差の割合が小さい)と考えられる各模型の下方4枚の計測パネルについて、静止土圧係数を $K_0 = 0.34$ (Jáky : $K_0 = 1 - \sin \alpha$ による)と仮定して z を推定し、見かけの静止土圧係数 K_c を計算した結果を、側壁傾斜角(側壁斜板と底板とのなす角) に対して図 - 5 中に印で示す。

また、計測値を最小二乗法により近似すると、

$$K_c = 0.66 \cos \alpha + 0.34 \quad (3)$$

が得られるが(図 - 5 中の破線)、(2)式による計算結果(図 - 5 中の実線)よりやや大きめであることがわかる。これは、模型の下方4枚の計測パネル近傍の砂の静止土圧係数 K_0 が、上層の砂の重量により押し込まれ、内部摩擦角 α から推定する Jáky の式による 0.34 より大きくなっているためと推定される。

4.2 船倉模型に対する Jánsssen 理論の適用

図 - 1 に示した船倉模型に生じる静的圧力を推定するには、鉛直壁と傾斜壁の部分に分けて考える必要がある。

(1) 鉛直壁

鉛直壁部分の粒状体に生じる直圧力 z および側圧力 $y (= p_n)$ を求める。深さ方向の圧力変化を計算するため、鉛直壁部分を水平方向に n 層に分割する。図 - 6 に示すように第 i 層上面に $i-1$ が作用している状態で、第 i 層上面からの深さ z_i の位置における薄い層 dz_i に作用する力の釣り合いを考えると、

$$\frac{d\sigma_{zi}}{dz_i} + C_i K_0 \sigma_{zi} = \gamma_s \quad (4)$$

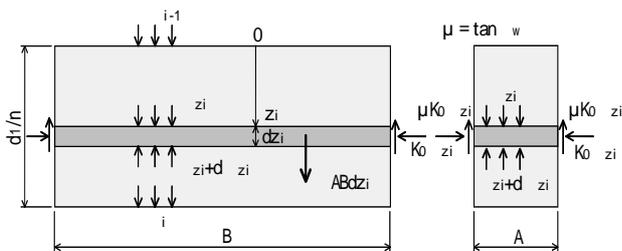


図 - 6 鉛直壁部分への Jánsssen 理論の適用

が得られる。したがって、深さ z_i の面に発生する直圧力 z_i および側圧力 y_i は、

$$\sigma_{zi} = \frac{\gamma_s}{C_i K_0} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{C_i K_0}{\gamma_s} \sigma_{i-1} \right) \exp(-C_i K_0 z_i) \right\} \quad (5)$$

$$\sigma_{yi} = K_0 \sigma_{zi}$$

ここに、

$$C_i = \frac{2(A+B) \tan \phi_w}{AB}$$

で求められるので、第1層から順に $z_i = d_i/n$ および $i-1$ を(5)式に代入して、第 n 層下面の直圧力 n まで計算する。

(2) 傾斜壁

次に、ビルジホッパー斜板を含む部分の粒状体に生じる直圧力 z 、斜板に生じる圧力の板の法線方向成分 p_n 、および、板に平行な方向成分(摩擦力) $(= \mu p_n)$ を求める。(1)項と同様に、この

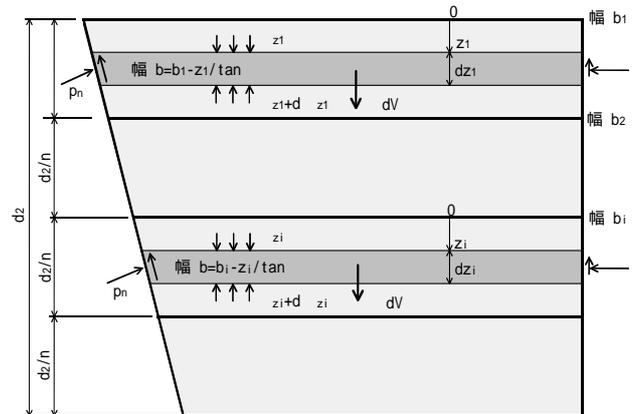


図 - 7 傾斜壁部分への Jánsssen 理論の適用

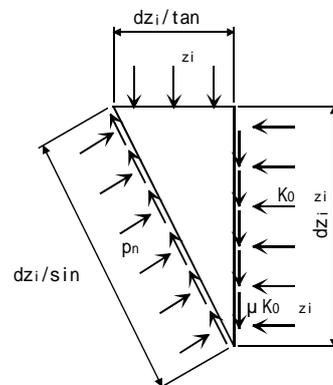


図 - 8 三角柱部分の力の釣り合い

部分の粒状体を深さ方向に n 層に分割し、第 i 層の上面から深さ z_i の位置における薄い層 dz_i に作用する力の釣り合いを考える(図 - 7 参照)。傾斜角 $= 0^\circ$ のとき $p_n = z_i$ および $\tau = 0$ 、 $= 90^\circ$ のとき $p_n = K_0 z_i$ および $\tau = \mu K_0 z_i$ であるから、図 - 8 に示すように、第 i 層のビルジホッパー斜板に接する三角柱部分については、図に示すような圧力が作用すると仮定できる。したがって、鉛直および水平方向の力の釣り合いから、それぞれ、

$$p_n + \tau \tan \alpha = (1 + \mu K_0 \tan \alpha) \sigma_{z_i}$$

$$p_n - \tau / \tan \alpha = K_0 \sigma_{z_i} \quad (0 \leq \alpha \leq 180^\circ, \alpha \neq 90^\circ) \quad (6)$$

が得られる。両式より p_n および τ を求めると、

$$p_n = \frac{1 + \mu K_0 \tan \alpha + K_0 \tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} \sigma_{z_i}$$

$$\tau = \frac{\tan \alpha (1 + \mu K_0 \tan \alpha - K_0)}{1 + \tan^2 \alpha} \sigma_{z_i}$$

となる。 $p_n = K_0' z_i$ および $\tau = K_0'' z_i$ とおき、図 - 7 に示すように、薄い層 dz_i に加わる鉛直方向の力の釣り合いから、2 次の微小項を無視すると、

$$\frac{d\sigma_{z_i}}{dz_i} + \frac{\sigma_{z_i}}{b_i \tan \alpha - z_i} = \gamma_s \left\{ K_0' + K_0'' \tan \alpha + 2\mu K_0 \tan \alpha \left(\frac{1}{2} + \frac{b}{A} \right) - 1 \right\} \quad (7)$$

が得られる。(7)式において b は、薄い層 dz_i の幅であり、 $b = b_i - z_i / \tan \alpha$ であるから、(7)式は解析的に解けないので、各層における模型の縦横比 b/A の平均値を用いて数値的に σ_{z_i} を求める。

$z_i = 0$ において、 $\sigma_{z_i} = \sigma_{z_{i-1}}$ であるとすると、

$$\sigma_{z_i} = \frac{\gamma_s}{C_i - 1} (b_i \tan \alpha - z_i) \left\{ 1 - \left(1 - \frac{z_i}{b_i \tan \alpha} \right)^{C_i - 1} \right\} + \sigma_{z_{i-1}} \left(1 - \frac{z_i}{b_i \tan \alpha} \right)^{C_i} \quad ; C_i \neq 1 \quad (8)$$

$$\sigma_{z_i} = \gamma_s (b_i \tan \alpha - z_i) \ln \frac{1}{1 - \frac{z_i}{b_i \tan \alpha}} + \sigma_{z_{i-1}} \left(1 - \frac{z_i}{b_i \tan \alpha} \right) \quad ; C_i = 1 \quad (9)$$

ここに、

$$C_i = K_0' + K_0'' \tan \alpha + 2\mu K_0 \tan \alpha \left(\frac{1}{2} + \frac{b}{A} \right) - 1$$

$$K_0' = \frac{1 + \mu K_0 \tan \alpha + K_0 \tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha}$$

$$K_0'' = \frac{\tan \alpha (1 + \mu K_0 \tan \alpha - K_0)}{1 + \tan^2 \alpha}$$

となるので、第 1 層から順に $z_i = dz/n$ および $\sigma_{z_{i-1}}$ を(8)式または(9)式に代入して、第 n 層下面の直圧力 p_n まで計算する。

4.3 静的圧力の計測値と計算値の比較

各船倉模型における静的圧力の計測値と 4.2 節に示した方法による計算値(静止土圧係数 K_0 を 0.34 として計算)を比較して、図 - 9 に示す。ややばらつきはあるが、両者は良い相関を示しており、前述の静的圧力推定法が妥当であることがわかる。

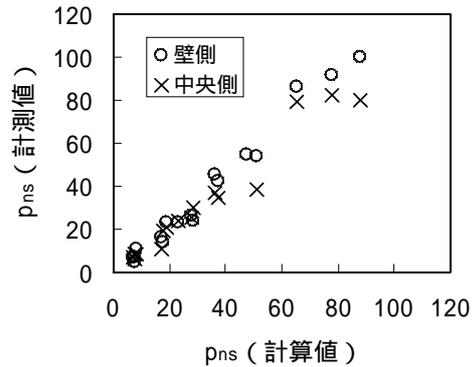


図 - 9 静的圧力の計測値と計算値の比較

4.4 静的傾斜による変動圧力

水および砂を満載した場合に船倉模型各パネルに生じる静的圧力をそれぞれ p_{nw} および p_{ns} 、傾斜時変動圧力をそれぞれ p_w および p_s とすると、 p_s/p_{ns} と p_w/p_{nw} には図 - 10 に示すように比例関係があるため、次式が成り立つ。

$$\Delta p_s = p_{ns} \cdot (\Delta p_w / p_{nw}) \quad (10)$$

したがって、傾斜静水圧 p_w を SR207-B 法²⁾を準用して求め、4.1 ~ 4.2 節で述べた方法により粒状体による静的圧力 p_{ns} を求めれば、(10)

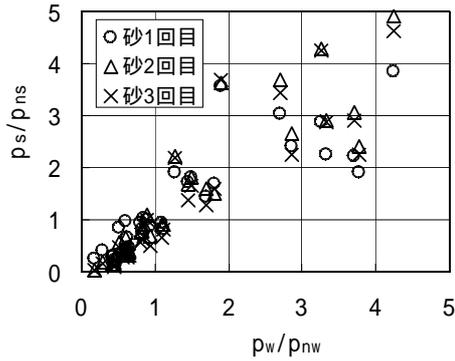


図 - 10 傾斜時変動圧力と静的圧力の関係

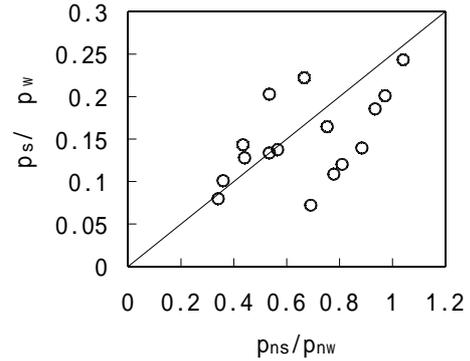


図 - 12 水平動揺時変動圧力と静的圧力の関係

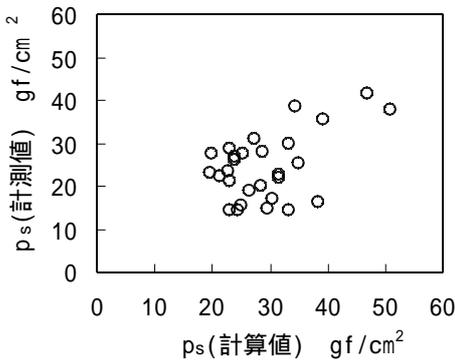


図 - 11 傾斜時変動圧力の計算値と計測値比較

式により粒状体の静的傾斜時変動圧力 p_s を推定することができる。

見かけの静止土圧係数 K_c として(3)式を用いて、(10)式により推定した全計測パネルの傾斜時変動圧力を計測値と比較して図 - 11 に示す。ただし、計測値は締め固まりのない第 1 回目の傾斜時の結果を示した。

4.5 水平動揺による変動圧力

水および砂(動揺による締め固まり後の定常状態)の水平動揺による変動圧力(p_w 、 p_s)、および締め固まり状態における静的圧力(p_{nw} 、 p_{ns})について、それぞれ両者の比で整理して図 - 12 に示す。図 - 12 より変動圧力と静的圧力の関係が、次式により近似できる。

$$\Delta p_s / \Delta p_w = 0.25 p_{ns} / p_{nw}$$

したがって、粒状体による水平動揺時の変動圧力 p_s は、4.4 節と同様に次式により推定することができる。

$$\Delta p_s = 0.25 p_{ns} \cdot (\Delta p_w / p_{nw}) \quad (11)$$

(10)式と(11)式を比較すると、粒状体による水平動揺時変動圧力が静的傾斜時変動圧力の 25% 程度であることがわかる。

5.まとめ

粒状貨物圧計測実験を 4 種類の船倉模型により行い、計測結果を分析するとともに、各条件下における粒状貨物圧推定手法を検討した。得られた知見を以下のとおりまとめる。

- (1) 傾斜角を有する側壁に生じる静的圧力を推定する方法として、見かけの静止土圧係数を定義するとともに、Jánssen の理論をもとに推定法を示した。
- (2) 静的傾斜によって粒状体に生じる変動圧力推定法を示した。
- (3) 水平動揺によって粒状体に生じる変動圧力推定法を示した。この変動圧力は、静的傾斜による変動圧力の 25%程度と推定され、船体運動においても水平方向加速度は横揺れ、あるいは縦揺れに対して小さいと考えられることから、実船の荷重設定においては無視できると考えられる。

参考文献

- 1) 田中義照、佐久間正明、安藤孝弘：粒状貨物による倉内圧の実験的検討、日本造船学会論文集、第 186 号、pp.445-453(1999)。
- 2) 日本造船研究協会第 207 研究部会：船殻構造の強度評価と管理目標の定量化の調査研究、総合報告書(1993)。