粒状貨物による倉内圧の実験的検討

—その2 粒状貨物荷重の設定法について—

正員 田 中 義 照* 佐久間 正 明*
 安 藤 孝 弘* 正員 重 見 利 幸**
 正員 原 田 実** 正員 船 越 正 泰**

Experimental Study on Internal Pressure Induced by Granular Cargo — second report: Estimation Methods of Bulk Cargo Pressure —

by Yoshiteru Tanaka, *Member* Masaaki Sakuma
 Takahiro Ando Toshiyuki Shigemi, *Member*
 Minoru Harada, *Member* Masayasu Funakoshi, *Member*

Summary

The improvement of the estimating accuracy of bulk pressure acting on a cargo hold is indispensable for evaluating the strength of a bulk carrier exactly. Though various researches about earth pressure or granular cargo pressure have been performed, no established method for ship structures is yet found. In such an environment, authors carried out the measuring tests of granular cargo pressure with scaled hold models and showed the estimation method based on Janssen's theory in the previous paper¹⁾.

In this paper, authors derived the equation to be applicable for the estimation of static pressure acting on an inclined wall on the basis of Janssen's theory and confirmed its validity through the comparison of calculated value and experimental results.

Furthermore, authors proposed the simple and practical equation to estimate static and dynamic pressure due to bulk cargo. On static pressure, the fact was taken into consideration that the static pressure acting on inner bottom plates was not equal to the value of $\gamma \times h$. That is, the new estimation method was proposed by modifying the cargo profile. And the coefficients of earth pressure were improved based on the experimental results. As for dynamic pressure, vertical acceleration and rolling were considered as predominant motions for ship structures. Simple methods were proposed by introduction of apparent acceleration for dynamic pressure due to vertical acceleration and application of SR207²⁾ method for dynamic pressure induced by roll motion.

1. 緒 言

バルクキャリアの構造強度を正確に評価するためには、倉内荷重として加わる粒状貨物荷重の推定精度の向

上が不可欠である。しかしながら、粒状貨物はバラスト、貨物油などの液体やコンテナ、木材などの固体とは異なり、粒状体相互の内部摩擦を考慮した力の釣合いにより貨物荷姿を形成していることから、粒状貨物内部に働く圧力や粒状貨物が船体構造に与える圧力は考慮する位置において、また、粒状貨物の物性の違いにより複雑な分布となる。

粒状体による圧力（土圧）については、主に土木の分野で古くから様々な推定手法が提案され、船舶の分野でも利用されてきたが、船舶のように粒状貨物が閉囲され

* 独立行政法人海上技術安全研究所
 ** 財団法人日本海事協会

たホール드에積載され、さらに船体が不規則に運動すると共に弾性変形するような場合については、未だ十分に確立された手法は見当たらない。

著者らは前報¹⁾で船倉模型による粒状貨物圧計測実験を行い、水平および鉛直板に作用する静的および動的圧力の特性を把握するとともに、Janssen 理論を適用した粒状貨物圧推定法を示した。

本研究では、より実船に近い形状の側壁斜板角度を変えた船倉模型を製作し、乾燥砂を用いた粒状貨物圧計測実験を実施した。初めに、傾斜板に生じる静的圧力を Janssen 理論に基づいて推定する手法を示し、この推定法で求まる圧力と実験結果との比較により、推定法の有効性を確認した。次に、実験、Janssen 理論に基づく推定、および、土圧に関する文献調査の結果を参照し、粒状貨物による静的圧力および変動圧力の実用的な簡易推定算式を提案した。すなわち、静的圧力については強度用荷姿の導入、変動圧力については見かけの加速度および液体貨物の変動圧推定法の準用による粒状貨物荷重設定手法を示した。

2. 粒状貨物圧計測実験

2.1 船倉模型

Fig.1 Hold models

船倉模型を製作する際に対象とした船舶は、標準的なケープサイズのバルクキャリア(L×B×D×d=280×45×24×17.6m)である。この対象船の船体中央船倉の約1/20縮尺の船倉模型を軟鋼板(SS400)で製作した。この模型を Model-45ST と称する。この模型を基準として、ショルダータンクのない斜板角度 45°、60°、75° および 90° の模型を各 1 体製作した。これらの模型をそれぞれ Model-45、Model-60、Model-75 および Model-90 と称する。これらの船倉模型の概略図を Fig.1 に示す。すべての船倉模型の計測用側壁と反対側の側壁角度は、底板に対して 90° に統一した。

2.2 実験方法

実施した実験は、以下に示す水道水および乾燥砂を用いた静的圧力および変動圧力計測実験である。

(1) 静的圧力計測実験

各模型に水道水および乾燥砂を積載して、静的圧力によるパネルのひずみ応答を計測した。

(2) 静的傾斜実験

クレーンで模型端部を吊り上げるにより、船倉模型を水平→+15°→水平→-15°→水平(計測は 5°刻み)に静的傾斜させた。実験は一度の積付に対して 3 回

繰り返した。

(3) 水平動揺実験

水平動揺試験装置を用い、アクチュエータの設定振幅を±70 mm、設定周波数を0.6~0.7 Hzで加振することにより船倉模型に水平動揺を与えた。動揺は、変動圧力が砂の締め固まりにより定常状態となるよう約1時間継続させた。

圧力の計測点は、パネルの中心位置 (Fig.1 中に●印で示す) とし、計測に際しては、あらかじめ水道水に対して曲げひずみと圧力の相関を求めた上で、乾燥砂について得られる曲げひずみ応答を圧力に換算した (曲げひずみは、上下の防撓材近傍各1点と中央2点のひずみゲージでブリッジを組み計測した)。

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 $d_0=0.38\text{mm}$ 、安息角 $\psi_0=33.0^\circ$ 、真比重 $\gamma_{so}=2.67\text{gf/cm}^3$ 、嵩比重 $\gamma=1.47\text{gf/cm}^3$ 、間隙比 $e=0.816$ 、粘着力 $c=33.7\text{gf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi_i=41.3^\circ$ 、塗装鋼板との壁面摩擦角 $\phi_w=30.0^\circ$ を得た。

3. 粒状貨物圧の推定

粒状体により鉛直壁に生じる静的および変動圧力を、Janssen 理論に従って推定する方法については前報¹⁾で示した。本報では、静的圧力に及ぼす傾斜壁の影響および静的傾斜または水平動揺によって生じる変動圧力の推定法を示す。さらに、推定値を実験結果と比較することにより、推定法の有効性を確認する。

3.1 静的圧力

各船倉模型に乾燥砂を満載したときに生じるパネルの法線方向の静的圧力 P_s を γh (h : 積み高さ) で無次元化して、各パネルの傾斜角に対して Fig.2 中に◆印で示す。パネル傾斜角が大きくなるに従い、粒状体による静的圧力 P_s と液体貨物を仮定したときのその位置における鉛直方向圧力 γh の比 (以下、見かけの静止土圧係数 K と称する) が小さくなることわかる。

次に、Fig.1 に示した船倉模型あるいはビルジホッパー斜板のような傾斜壁を有する船倉に粒状貨物を積載したときに生じる静的圧力の推定法を示す。傾斜壁を含む部分の粒状体の底板に平行な層の厚さを d とし、Fig.3 に示すように深さ方向に n 分割する。上から第 i 番目の層の上面から深さ z_i の薄い層 dz_i に生じる直圧力を σ_{zi} 、斜板に生じる圧力の板の法線方向成分を P_s 、および、板に平行な方向成分(摩擦力)を $\tau (= \mu P_s)$ とし、薄い層 dz_i に作用する力の釣合いを考える。傾斜角 $\alpha=0^\circ$ のとき $P_s = \sigma_{zi}$ および $\tau=0$ 、 $\alpha=90^\circ$ のとき $P_s = K_0 \sigma_{zi}$ および $\tau = \mu K_0 \sigma_{zi}$ であるから、第 i 層のビルジホッパー斜板に

Fig.2 Comparison of apparent coefficient of earth pressure

接する三角柱部分については、Fig.3 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合いから、それぞれ、

$$P_s + \tau \tan \alpha = (1 + \mu K_0 \tan \alpha) \cdot \sigma_{zi} \quad (1)$$

$$P_s - \tau / \tan \alpha = K_0 \sigma_{zi} \quad (2)$$

(ただし、 $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$)

が得られる。両式より P_s および τ を求めると、

$$P_s = \frac{1 + \mu K_0 \tan \alpha + K_0 \tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} \cdot \sigma_{zi} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\tan \alpha (1 + \mu K_0 \tan \alpha - K_0)}{1 + \tan^2 \alpha} \cdot \sigma_{zi} \quad (3)$$

となる。 $P_s = K_0' \sigma_{zi}$ および $\tau = K_0'' \sigma_{zi}$ とおき、Fig.3 に示すように、薄い層 dz_i に加わる鉛直方向の力の釣合い

Fig.3 Application of Janssen's theory for an inclining wall

から、2次の微小項を無視すると、

$$\frac{d\sigma_{zi}}{dz_i} + \frac{\sigma_{zi}}{b_i \tan \alpha - z_i} = \gamma$$

$$\left\{ K'_0 + K''_0 \tan \alpha + 2\mu K_0 \tan \alpha \left(\frac{1}{2} + \frac{b}{A} \right) - 1 \right\} = \gamma \quad (4)$$

が得られる。(4)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、(4)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_{zi} を求める。 $z_i=0$ において $\sigma_{zi} = \sigma_{i-1}$ であるとする、

$$\sigma_{zi} = \frac{\gamma}{C_i - 1} (b_i \tan \alpha - z_i) \left\{ 1 - \left(1 - \frac{z_i}{b_i \tan \alpha} \right)^{C_i - 1} \right\} + \sigma_{i-1} \left(1 - \frac{z_i}{b_i \tan \alpha} \right)^{C_i} ; C_i \neq 1 \quad (5)$$

$$\sigma_{zi} = \gamma (b_i \tan \alpha - z_i) \ln \frac{1}{1 - \frac{z_i}{b_i \tan \alpha}} + \sigma_{i-1} \left(1 - \frac{z_i}{b_i \tan \alpha} \right) ; C_i = 1 \quad (6)$$

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 $z_i = d/n$ および σ_{i-1} を(5)式または(6)式に代入して、第 n 層下面の直圧力 σ_n まで計算することにより静的圧力分布を計算できる。なお、本手法は、船体構造のように幅方向に対称な場合においても、三角柱部分を両側に考慮することにより応用できる。

各船倉模型における静的圧力の計測値と計算値 (Jaky の静止土圧係数 K_0 を(9)式により計算) を比較して Fig. 4 に示す。実験結果にややばらつきは見られ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有効であることを示している。

3.2 静的傾斜による変動圧力

静的傾斜実験は、各船倉模型に砂を満載にした状態で、 $\pm 15^\circ$ の静的傾斜を連続して3回与え、各パネルに生じる応答振幅を計測した。両振幅 30° の静的傾斜に伴う水または砂による変動圧力 P_{dw} および P_{ds} を、それぞれ満載時の静的圧力 P_{sw} および P_{ss} で無次元化して Fig. 5 に示す。静的傾斜実験結果から得られた P_{ds}/P_{ss} と P_{dw}/P_{sw} には Fig. 5 に示すように、ほぼ比例関係が認められるた

Fig. 4 Comparison of estimated and measured static pressure

め、次式が成り立つと仮定できる。

$$P_{ds} = P_{ss} \cdot (P_{dw} / P_{sw}) \quad (7)$$

したがって、静的傾斜によって生じる粒状貨物の変動圧力 P_{ds} は、等しい大きさの静的傾斜によって発生する傾斜静水圧 P_{dw} を SR207 の方法²⁾等を適用して求め、

Fig. 5 Relation between P_{ds}/P_{ss} and P_{dw}/P_{sw} (static inclination)

Fig. 6 Comparison of estimated and measured dynamic pressure due to static inclination

粒状貨物による静的圧力 P_{ss} を 3.1 で示した方法等により計算することによって推定することが可能である。

後述する静止土圧係数 K_0 および見かけの静止土圧係数 K として、それぞれ(9)および(11)式を用い、(7)式により推定した全計測パネルの静的傾斜時変動圧力を計測値と比較して Fig.6 に示す(計測値は第1回目の傾斜による)。実験結果にややばらつきが大きい、計測値と推定値は比較的良好な相関を示している。

3.3 水平動揺による変動圧力

水平動揺実験は試験機能力の制約から、砂については Fig.1 に示すように 60%積載の状態を実施し、各船倉模型の 60% line より下方のパネルの応答を計測した。両振幅 1G の水平加速度によって生じる水または砂の変動圧力 P_{dw} および P_{ds} (動揺による締め固まり後の定常状態)を、それぞれ 60%積載時の静的圧力 P_{sw} および P_{ss} で無次元化して Fig.7 に示す。水平動揺実験結果から得られた P_{ds}/P_{ss} と P_{dw}/P_{sw} には Fig.7 に示すように、ほぼ比例関係が認められるため、次式が成り立つと仮定できる。

$$p_{ds} = 0.25 p_{ss} \cdot (p_{dw} / p_{sw}) \quad (8)$$

Fig.7 Relation between P_{ds}/P_{ss} and P_{dw}/P_{sw} (horizontal oscillation)

したがって、水平動揺によって発生する粒状貨物の変動圧力 P_{ds} も、静的傾斜の場合と同様の方法により推定することが可能である。

(7)式および(8)式を比較すると、静的傾斜によって生じる重力加速度の水平方向成分と水平動揺による水平加速度振幅が同程度であっても、粒状貨物による動的圧力を比較すると、後者が前者の 25%程度であることがわかる。

4. 粒状貨物荷重の設定法の提案

3.1 で示した Janssen 理論による推定手法を用いることにより、高精度な粒状貨物圧の推定が可能となるが、この算式は複雑であり、また数値解法が必要となるため、設計で用いるには現実的でない。そこで、より実用的で簡便な粒状貨物荷重の設定法をここでは提案する。

4.1 静的圧力

4.1.1 静止土圧係数

半無限水平地盤での土圧係数は、一般に静止土圧係数と呼ばれ 0.2~1.0 程度の値をとることが知られており³⁾、粒状体中の微小立方体に作用する鉛直方向圧力 σ_z と水平方向圧力 σ_x および σ_y の比として次式の K_0 により与えられる。

$$\sigma_x = \sigma_y = K_0 \sigma_z$$

Jaky は、粘性のない砂質土の静止土圧係数に関して、

$$K_0 = 1 - \sin \varphi_i \quad (9)$$

なる内部摩擦角 φ_i を用いた実験式を提案している⁴⁾。また、Rankine は塑性土圧論に従い静止土圧係数として、

$$K_0 = \tan^2(\pi/4 - \varphi_i/2) \quad (10)$$

なる式を提案している。ここでは、船倉模型による静的圧力計測結果をこれらの実験式と比較検討するとともに、傾斜板に対する土圧係数の考え方を提案する。

(1) 静止土圧係数

各船倉模型の計測パネルのうち、鉛直のパネルに生じる静的圧力を γh (h : 積み高さ)で除した値を便宜的に静止土圧係数 K_0 とし、 h に対して Fig.8 に◆印で示す。また、静止土圧係数として Jaky ((9)式) および Rankine ((10)式) を採用した結果を Fig.8 中に併せて示す。粒状体中の直圧力 σ_z は、壁面摩擦の影響により γh よりやや小さく、厳密な意味での静止土圧係数 K_0 の計測値は Fig.8 よりやや大きいと考えられるため、Jaky の算式を適用した方が Rankine の算式に比べ実験結果との

Fig.8 Comparison of coefficient of earth pressure at rest

相関が良く安全側でもある。したがって、静止土圧係数 K_0 として(9)式の Jaky の算式の採用を提案する。

(2) 見かけの静止土圧係数

Jaky の静止土圧係数は、鉛直方向の圧力と水平方向の圧力の比であり、垂直な壁面に作用する圧力しか推定できないため、ビルジホップ斜板など任意の角度をもった板の法線方向圧力を求める際には、静止土圧係数 K_0 と斜板の角度 α をパラメータとする見かけの静止土圧係数 K の推定式が必要となる。そこで、粒状体内の任意微小体の力の釣り合い条件より任意の角度に対する見かけの静止土圧係数 K を求めると次式のとおりとなる。

$$K = \cos^2 \alpha + K_0 \sin^2 \alpha \quad (11)$$

(11)式による K の計算に静止土圧係数 K_0 として Jaky (9)式および Rankine(10)式の算式を用いた結果、並びに現行 NK 規則の K の値を Fig.2 に併せて示す。図中の横軸は壁面と水平面とのなす角度 α 、縦軸は見かけの土圧係数である。Fig.2 より実験値にはばらつきが見られるものの、全体的傾向としては静止土圧係数として Jaky の算式を適用した方が任意の角度の板に対して実験結果との相関が良いことがわかる。なお、Fig.2 に示した Jaky または Rankine の式による計算では、実験に用いた供試砂と同じ内部摩擦角 $\phi=41.3^\circ$ を用いている。

4.1.2 静的圧力計測値との比較

満載積付に対し、実験における各パネルの静的圧力計測値と Jaky および Rankine の式を用いた見かけの静止土圧係数 K を適用した γhK の計算値を比較して Fig.9 に示す。

Fig.9 より一般的に Jaky の式による推定値の方が Rankine の推定値より実験結果との相関性が良いことが重ねて確認される。なお、Janssen 理論に基づく推定結果との比較から、更なる精度の向上に向け簡便な γhK

Fig.9 Comparison of measured and estimated static pressure

の算式を用いたまま、壁面摩擦の影響を考慮して荷姿を修正する方法については 4.1.3 に述べる。

4.1.3 静的圧力設定法の提案

(1) Light Cargo の静的圧力

貨物の上面が上甲板まで達するような嵩比重が比較的小さい貨物 (Light Cargo) の場合、壁面摩擦を考慮する Janssen 理論に基づく算式で粒状貨物による静的圧力を計算すると、直圧力として内底板に加わる圧力は γhK の約 80~90% 程度となる。この壁面摩擦による影響を、簡便な γhK の算式を適用した上で、貨物の荷姿を修正することにより考慮することとする。すなわち、Light Cargo の場合には、Fig.10 に示すとおり貨物の重量はそのまま、トップサイドタンクを無視して均した荷姿を強度用の荷姿として適用することにより、壁面摩擦分を考慮する方法を提案する。

提案する荷姿を用いて γhK により推定した結果と Janssen 理論を適用して推定した結果の比較を Fig.11 に示す。Fig.11 には修正しない荷姿を用いた γhK による推定値も参考として併記している。

Fig.11 より、船側およびビルジホップ斜板部に加わる圧力に関しては、強度用の荷姿を用いることにより Jan-

Fig.10 Cargo profile for strength assessment (Light Cargo)

Fig.11 Comparison of present method and Janssen's theory (Light Cargo)

Janssen 理論による推定結果を精度良く再現できることがわかる。

また、内底板に加わる圧力に関しては、Janssen 理論による推定結果と比較して若干大きめの値を与えている。これは、壁面摩擦による影響を荷姿の修正のみで考慮し、安全側の配慮として壁面摩擦による荷重分担を無視し、貨物の重量がそのまま直圧力として加わると仮定したことによる。あえて壁面摩擦による荷重分担を無視した理由は、船舶のように粒状貨物が閉鎖されたホルドに積載され、さらに船体が不規則に運動すると共に弾性変形するような場合については、未だ不確実な面も残されていることから、ここでは安全側の配慮をしたためである。

(2) Heavy Cargo の静的圧力

鉄鉱石のように積付高さが低い比較的高比重の大きい貨物 (Heavy Cargo) に対しても Light Cargo の場合と同様に、実際の荷姿を強度用の荷姿に修正することにより、内底板に作用する直圧力に対する壁面摩擦の影響を考慮することとする。強度用の荷姿としては Fig.12 に示すとおり、貨物の重量はそのまま安息角を実際の安息角の 1/2 に修正する方法を提案する (Fig.12 中の B は船の幅(m)である)。

Fig.12 Cargo profile for strength assessment (Heavy Cargo)

Fig.13 Static bulk pressure in a hold³⁾

Fig.14 Comparison of present method and Janssen's theory (Heavy Cargo)

なお、Fig.13 に示すとおり、山本、浦³⁾の研究においても、船側外板位置においては積付高さの平均高さに相当する位置を貨物上面とする旨の提案がなされている。これらの傾向は、斜板位置では主に粒状体間の摩擦やかみあいによってアーチ構造の支持ポイントとなることから斜板の圧力は増加するためであると考えられる。

提案する荷姿を用いて $\gamma h K$ により推定した結果と Janssen 理論を適用した結果の比較を Fig.14 に示す。Fig.14 には修正しない荷姿を用いた $\gamma h k$ による推定値も参考として併記している。

Fig.14 より、船側およびビルジホップ斜板部に加わる圧力に関しては、実際の荷姿を用いた場合に比べ強度用の荷姿を用いることにより Janssen 理論による推定結果に近づいている。しかし、Janssen 理論による推定結果に対しては未だ若干小さめの値となっている。これは Light Cargo の場合と同様に均一に均した荷姿に修正することにより Janssen 理論による推定結果に合わせることは可能であるが、反面、内底板に加わる圧力が減少することを配慮し、内底板に加わる圧力を安全側に設定することを優先したためである。このため、内底板に加わる圧力は、Janssen 理論による推定結果と比較して若干大きめの値を与えている。内底板の圧力を安全側に見積もる理由としては、Light Cargo において述べた理由に加え、Heavy Cargo を均等積みする場合には荷姿の関係上、壁面摩擦の影響は小さく、ほとんどの荷重が内底板に加わることに配慮したためである。

4.2 変動圧力

4.2.1 考慮すべき加速度成分

船体の並進および回転運動により貨物には6種類の慣性力が生じる。このうち、構造強度に対して支配的な加速度成分として「タンカーの構造強度に関するガイドライン」⁵⁾と同様に、ピッチおよびロールの角加速度並び

にヒープによる上下方向加速度とロールによる静的傾斜成分を考慮する。なお、左右方向の併進運動であるスウェイについては前述3.3の水平動揺の実験結果から無視できるレベルであると考えられる。さらに、代表的なバルクキャリアに対する直接荷重解析結果から左右方向の加速度自体も非常に小さい値であることを確認している。特に、ロールが最大となる瞬間のスウェイによる加速度はほぼゼロとなっている。

ロールによって生じる変動圧力は、角加速度成分と静的傾斜成分に分けることができる。このうち、角加速度成分に関しては永元らの模型タンクでの実験⁶⁾で述べられているとおり、動揺時の鉱石圧の増加は動揺による船体傾斜に基づく圧力増分を考慮する必要があるが、動揺の加速度による変動圧力は無視できると考えられるため、ロールによって生じる変動圧力は静的傾斜分のみを考慮することとする。

4.2.2 上下方向加速度による粒状貨物の変動圧力

まず、粒状貨物が積載されるホールド重心における上下方向加速度と粒状貨物による変動圧力の関係について考察する。

一般に、ホールド重心に一定の上下方向加速度が生じた場合、粒状貨物により生じる慣性力はその上下方向加速度に粒状貨物の質量を乗じた値よりも小さくなると考えられる。これは、粒状体の性質から粒状体の粒子はすべての粒子がお互いに完全密着しているわけではなく、点で接しているだけであるので、系に一定の加速度(エネルギー)を与えても、粒子と粒子の間に微妙な隙間がある場合にはすべてのエネルギーを伝達することはできないためと考えられる。

そこで、粒状貨物に対して上下方向加速度による慣性力を実用的に推定するために、上述の影響を考慮した見かけの加速度を用いることとした。見かけの加速度としては倉本らの実験結果⁷⁾を参照して算定した。

倉本らの実船計測結果を Fig.15 に示す。Fig.15 は、62,600 重量トンのバルクキャリアを試供船として、実船計測によりホールド中央部の鉱石の変動圧力と上下方向加速度の相関を示したものである。Fig.15 より、鉱石による変動圧の計測値はかなりばらつきがあるものの、全体的に鉱石の変動圧力は上下方向加速度の増加に対して1対1の対応をしていないことがわかる。

この実船実験の傾向から見かけの加速度をホールド重心における上下方向加速度の75%とした。

以上より、上下方向加速度による粒状貨物の変動圧力 Δp_v について、次式を提案する。

$$\Delta p_v = 0.75 K \rho a_v h \quad (12)$$

Fig.15 Relation between fluctuation of ore pressure and vertical acceleration⁷⁾

ここで、 K は土圧係数、 ρ は粒状貨物の嵩比重(t/m^3)、 a_v は船体の上下方向加速度(m/sec^2)、 h は強度用荷姿の頂部から検討位置までの垂直距離(m)である。

4.2.3 静的傾斜による粒状貨物の変動圧力

満載状態の液体による傾斜静水圧(静的傾斜による静水圧の変動分)の推定に当たっては、Fig.16 に示す SR207 の B 法²⁾が適用できる。

ここで、SR207 の B 法は液体貨物に対する推定法であるため、粒状貨物に対する修正係数を仮に C として SR207 の B 法を準用すると、粒状貨物の変動圧力 Δp_t は以下のとおり表せる。

$$\Delta p_t = \rho a_t y_c C \quad (13)$$

ここで、 ρ は粒状貨物の嵩比重(t/m^3)、 y_c は船体中心から検討位置までの水平距離(m)、 θ はロール角度(rad)、 a_t は左右方向加速度(m/sec^2)である。

さらに、粒状貨物に対する修正係数 C を静的傾斜実験の結果を用いて設定する。 Δp_t (傾斜角度 15°) を実験の計測値、 y_c を模型重心から計測パネルまでの水平距離

Fig.16 Schematic distribution of dynamic pressure by SR207-B method

として、すべてのパネルの係数 C を $C = \Delta p_t / (\rho a_t y_c)$ として求め、Fig.17 に示した。図の横軸はパネルの角度、縦軸は C の値である。Fig.17 より、 C の値を Up(+15° 傾斜)と Down(-15° 傾斜)の変動値の平均とすると、 C は 0.25 程度の値となる。また、平均値の C はパネルの角度によらず一定であることも分かる。このことから、液体の変動圧力と比較すると、粒状貨物の場合には左右方向の慣性力の約 75% が内底板などの壁面での摩擦力として分担されていると考えられる。ここで、 $a_t = g \theta$ であることから、ロール傾斜による粒状貨物の変動圧力の推定式は以下のとおりとなる。

$$\Delta p_t = 0.25 \rho a_t y_c \quad (14)$$

また、提案式による推定値と静的傾斜実験の結果を比較して Fig.18 に示す。Fig.18 より、実験結果には計測上のばらつきがあるものの、全体的には提案式による推定値は実験値を概ね良く推定していると考えられる。

Fig.17 Coefficient C calculated by results of static inclination tests

Fig.18 Comparison of estimated value by present method and experimental results due to static inclination

5. 結 言

船倉模型を用いて粒状貨物圧の計測実験を実施し、土圧係数や変動圧力の推定等、粒状貨物による圧力推定に必要な貴重なデータを取得した。得られた知見を以下に示す。

- (1) Janssen 理論に基づく推定法を傾斜板に生じる静的圧力推定にも適用できるように推定式を導いた。この推定式で求まる圧力と実験結果の比較により、推定法の有効性を確認した。
- (2) 実験結果、Janssen 理論に基づく推定法および土圧に関する文献調査結果などを参照して、粒状貨物による静的圧力および変動圧力の実用的な簡易推定算式を提案した。
- ・静的圧力に関しては、実験結果を考慮して静止土圧係数 K_0 および土圧係数 K を見直した。さらに、粒状貨物の壁面摩擦の影響により、底板の圧力が比重×積付高さにならないことを考慮して、積付高さを修正することにより精度良く、かつ、簡便に圧力を推定できる新たな算式を提案した。
- ・変動圧力に関しては、船体構造に支配的な加速度成分として、上下方向加速度およびロールによる変動圧を考慮した。上下方向加速度による変動圧は見かけの加速度を導入し、ロールによる変動圧は液体の推定法を粒状貨物に適用することにより、簡便に推定できる算式を提案した。

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)。
- 3) 山本善之、浦環：鉱石ペレット積み込み時に船倉壁面に加わる圧力分布、日本造船学会論文集、第 137 号、pp.196-201、(1975)。
- 4) 山内豊聰、安原一哉：粘性土の静止土圧係数に関する一考察、土質工学会論文報告集、Vol.14、No.2、pp.113-117、(1974)。
- 5) 日本海事協会：タンカーの構造強度に関するガイドライン、(2001)。
- 6) 永元隆一、福田昭三、船岡宏一郎、清家弥十郎、野原富安：船倉に作用する動的鉱石圧の研究、日本造船学会論文集、第 135 号、pp.215-228、(1974)。
- 7) 倉本美男、川本要次、橋本州史、永元隆一：鉱石圧力の実船試験と設計荷重の考察、日本造船学会論文集、第 162 号、pp.276-283、(1987)。