粒状貨物による艙内圧の実験的検討

正 員 田 中 義 照*
安 藤 孝 弘*

佐久間 正 明*

Experimental Study on Pressure Loads Induced by Granular Cargo

by Yoshiteru Tanaka, *Member* Masaaki Sakuma
Takahiro Ando

Summary

The some model tests on pressure loads induced by granular cargo were carried out. This paper describes the properties of static and dynamic pressure distributions measured on panels of the tank model. And a simplified method to estimate the pressure loads applied by granular cargo to the bottom plates and side walls of cargo holds is proposed.

The findings obtained from the present investigation are as follows:

- (1) The new measuring method¹⁾ without soil pressure gage was useful for measuring the granular cargo pressure.
- (2) The static component of granular cargo pressure acting on side walls and bottom plates of hold increases according to tightening of granular cargo, but the dynamic component of the pressure caused by vertical or horizontal acceleration decreases in tightened condition.
- (3) The formulation based on the Janssen's theory²⁾ which estimates both static and dynamic granular cargo pressure distributions adequately was proposed.
- (4) The pressure loads estimation has been performed for the simple full-scale hold loading granular cargo, and the validity and usefulness of the proposed method have been demonstrated through the comparison with the measured value of Kuramoto's full-scale tests¹⁾ and the estimated value of ABS SAFEHULL method³⁾.

1. 緒 言

近年、ばら積み貨物船の損傷事故が多発し、疲労設計に基づく船体構造の合理的設計、あるいは、経年船の寿命評価に対する高精度化が求められるようになってきた。ばら積み貨物船、鉱石運搬船等の疲労寿命を精度良く推定するためには、苛酷な使用環境が予想される船倉に作用する荷重の推定精度の向上が必要となる。このうち、波浪変動圧⁴⁾、および、

液体貨物圧⁵⁾については種々の検討がなされており、精度の高い推定法が論じられているが、ばら積み貨物に代表される粒状貨物圧については、これといった推定法がないのが現状である。

粒状貨物による艙内圧（静的圧力、動的圧力、押込み圧など）に関する研究は、1960年代後半から1970年代にかけて数多く実施された。

萩原らは、鉄鉱石専用船を用いた実船試験を行い、縦隔壁の防撓材上、および、板上に貼付したひずみゲージから、鉄鉱石による静的圧力、および、航行時の変動圧を計測した。その結果、静的圧力については縦隔壁下部で圧力が低下する傾向があること、動揺による鉱石の締め固まりにより航海後の圧力が防撓材上では大きくなり板上では減少すること、また、航行中の変動圧波形は roll 角波形との相関が強いこと

* 運輸省船舶技術研究所

原稿受理 平成 11 年 7 月 8 日

秋季講演会において講演 平成 11 年 11 月 18, 19 日

を示した^{6,7)}。

山本らは、粒状体を連続な弾性体に置き換え、dilatancy現象(剪断を加えると見掛けの体積が増大する現象)を示す非線形の弾性応力-ひずみ関係を導き、有限要素法を用いて粒状体内の応力分布を求める方法を提案した⁸⁾。さらに、この解析をDrucker-Pragerの降伏関数を用いて弾塑性領域にまで拡張し、模型実験による静的な押込み圧について検討した⁹⁾。また、鉱石をバネとして考慮し⁹⁾、鉱石と船体構造を一つの構造系として考える必要があることを指摘するとともに、鉱石の初期応力状態は土圧係数 K を用いて表されると仮定した¹⁰⁾。

山口らは大型円筒容器に鉱石ペレットを積み込み、圧力分布、側壁の影響を計測した。また、ペレットの集合体を非線形の応力-ひずみ関係をもつ連続体とみなし、有限要素法によりその挙動を求める方法を示し、計測結果と比較した。計算によって得られた応力-ひずみ関係は試験結果の性質をよく表しているが、土圧計の指示値は測定すべき真の圧力より大きな値を示すことが確認されている¹¹⁾。

寺本らは、船倉模型に鉱石ペレットを積載し、側壁に作用する静的圧力、船倉傾斜時の圧力変化、および、静的押込み圧の計測を土圧計により行った¹²⁾。また、永元らは、同様の模型を用いて、船体振動および船体動揺による圧力増加、水平加速度を受ける場合の慣性力による変動圧、および、壁面の変形による動的押込み圧について検討を行い、有効質量係数を導入して側壁に作用する動的鉱石圧推定式を示した¹³⁾。

青木らは、大型構造模型に実際の鉱石ペレットを積載し、静的圧力分布、および、静的押込み圧について検討した。静的圧力分布については、静止土圧計数を導入し壁面との摩擦を考慮した推定法を、静的押込み圧については、鉱石を等価な圧縮バネに置き換える方法を示し、計測結果と良く一致することを示した^{14,15)}。

倉本らは、ばら積み貨物船による実船試験を行い、載荷時の静的圧力、および、航行中の変動圧を計測した。圧力計測には船倉の防撓材にひずみゲージを4枚貼付し、曲げひずみから圧力に変換する方法を用いた。計測の結果、内底板およびホッパー斜板の静的圧力は γH で、内底板の変動圧は $\gamma H \alpha_v / g$ (γ : 嵩比重量、 H : 積み深さ、 α_v : 鉛直方向加速度、 g : 重力加速度) でほぼ近似できることが示された¹⁾。

以上の研究における鉱石圧の検討においては、模型実験、実船計測、あるいは、粒状体を弾性体や塑性体と仮定した理論計算により圧力を推定するもので、圧力計測には実船計測ではひずみゲージが、模型実験では土圧計が用いられた。この土圧計による圧力計測には、受圧面の直径/突出量が小さくなるにつれて指示値が小さくなること¹⁶⁾、受圧面が小さいため局所的な圧力を計測しているにすぎないこと、あるいは、

取付け部の剛性によって圧力値が変化すること等の問題があり、計測データの信頼性に疑問が残る。そこで、本研究では、防撓材付きタンク模型により、土圧計によらない圧力計測法を採用し、乾燥砂を用いて粒状貨物圧計測実験を行った。また、実験結果に基づき粒状貨物圧推定法を提案し、これまでに示されている推定法等による計算値と比較、検討し、その妥当性を検証した。

2. 供試粒状体の性状試験

本研究では、タンク模型と供試粒状体の相対的な関係を考慮し、模型実験に乾燥砂を用いた。乾燥砂では、粒子の相互移動は剪断力が粒子間の摩擦力を超過する瞬間に始まる。しかし、すべりは各粒子ごとに全くばらばらに起こるため、常に混合された「弾性-塑性」状態が起こる。従って本研究では、取り扱いを簡単にするため、船内の粒状体を弾性体と仮定し、粒子の集合体としての基本的性状を明らかにした上で粒状貨物圧を検討する。

2.1 供試砂の性状試験結果

供試砂(平均粒径 $d = 0.38 \text{ mm}$ 、安息角 $\phi_0 = 33 \text{ deg}$)の真比重量は $\gamma_s = 2.67 \text{ gf/cm}^3$ 、嵩比重量は $\gamma = 1.47 \text{ gf/cm}^3$ 、間隙比は $e = \gamma_s / \gamma - 1 = 0.816$ であった。粒径分布を Fig. 1 に示す。

また、一面剪断試験を行った結果、供試砂の粘着力 $c = 33.7 \text{ gf/cm}^2$ 、剪断抵抗角 $\phi = 41.3 \text{ deg}$ を得た(内部摩擦角 ϕ_i は剪断抵抗角 ϕ にほぼ等しいとされている)。

さらに、壁面摩擦試験を行い、供試砂と鋼板(船舶用塗装を施したもの)との間の壁面摩擦角 $\phi_w = 30.0 \text{ deg}$ を得た(参考: 石炭約 35 deg 、鉄鉱石約 18 deg)。

2.2 円筒引抜き試験

粒状体の静止土圧係数 K_0 (直圧力と側圧力の比)は、本来3軸圧縮試験から求めるべきものであるが、本研究では、模擬的に円筒引抜き実験により求めた。すなわち、円筒(直径の異なる3種を使用)に砂を充填し、内蓋を介して重錘に

Fig. 1 Diameter distribution of grain for testing

Fig. 2 Relation between vertical and horizontal stress of sand in a cylinder

より直圧力を負荷し、この状態で円筒のみを引き上げるのに要する荷重 P を計測した。円筒壁面と砂との摩擦係数 F と壁面摩擦係数 ϕ_0 から直圧力 σ_z が作用している状態における側圧力 σ_y が求められる。結果は Fig. 2 に示すとおり、両者はほぼ直線関係にあり、後述する模型実験程度の直圧力下における静止土圧係数は、 $K_0 = 0.35 \sim 0.60$ であることが確認された。

3. 粒状貨物圧計測実験

3.1 供試模型

落下・水平衝突実験用タンク模型Ⅰ、および、スロッシング試験装置用タンク模型Ⅱの形状、寸法をそれぞれ、Fig. 3 および Fig. 4 に示す。模型の材質は軟鋼板で、大きさは実船の約 1/30 に相当する。圧力を検出するパネルの位置、および、加速度計の取付位置(タンク模型重心)、計測点番号を同図に併せて示す。

3.2 実験装置および実験方法

落下実験は、門型フレームにワイヤーを介してタンク模型を吊り、種々の高さから自由落下させた。また、水平衝突実験は、ワイヤーで吊ったタンク模型を水平方向に移動させ、

壁面に衝突させることにより模型に水平方向加速度を与えた。

sway、および、roll 実験を行ったスロッシング試験装置の写真を Fig. 5 に示す。なお、roll の回転中心はタンク模型重心と一致させた。

3.3 計測方法

圧力センサーは各パネルの中央部に 2 枚、防撓材近傍に 1 枚ずつの 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曲げひずみを検出するものとした¹⁾。また、圧力への変換係数は、タンク模型に水を満載したときの各パネル位置における平均水圧と曲げひずみの出力値から求めた。計測データはデータレコーダに集録し A/D 変換した後、パソコンにより解析した。

落下および水平衝突実験では、切り離し後の無負荷状態での圧力値と最大圧力値との差で整理した。一方、sway および roll 実験では、実験における変動圧および加速度の計測を、1 ケースあたり 120 秒とし、計測データを peak to peak 最大値(倍振幅)で整理した。

4. 実験結果および考察

以下に実験結果を示すが、Fig. 6-7 および Fig. 10-12 には、実験結果と併せて 5 章において述べる推定値も示すこととする。

Fig. 3 Tank model I (unit:mm)

Fig. 4 Tank model II (unit:mm)

Fig. 5 Test setup

4.1 静的圧力

タンク模型Ⅰ、Ⅱに砂を静かに満載した直後に各パネルに生じる静的圧力の一例を Fig. 6、7 に示す。同図は砂による静的圧力を、液体貨物と仮定して計算した静的圧力 γD (D : 積み深さ) で無次元化している。この状態では側壁

面との摩擦により、底面に作用する直圧力 σ_z は γD の 70% 程度となっている。また、模型Ⅰのパネル③、⑥、および、模型Ⅱのパネル②、⑤の側圧力 σ_y は γD の 30% 程度であり (底板近傍での静止土圧係数 $K_0 \approx 0.4$ に対応)、前述の円筒引き抜き実験で得られた K_0 が妥当な値であることが分

Fig. 6 Comparison between measured and estimated value of static pressure (tank model I)

Fig. 7 Comparison between measured and estimated value of static pressure (tank model II)

Fig. 8 Relation between vertical acceleration and dynamic pressure

Fig. 9 Relation between horizontal acceleration and dynamic pressure

Fig. 10 Comparison between measured and estimated dynamic pressure distributions (vertical acceleration)

Fig. 11 Comparison between measured and estimated dynamic pressure distributions (horizontal acceleration)

Fig. 12 Comparison between measured and estimated dynamic pressure distributions (horizontal acceleration)

かる。静的圧力計測は供試砂の積み換えを数回行い、圧力分布の再現性を確認した。静的圧力は後述する落下／水平衝突実験、あるいは、動揺実験を繰り返した後は、砂の締め固まり（壁面との摩擦の解放）によって底面の直圧力 σ_z が γD の90%程度まで増加し、定常状態となる。

4.2 落下および水平衝突による変動圧（模型－Ⅰ）

供試砂を満載したタンク模型－Ⅰの落下実験における鉛直方向加速度 α_v と各パネルの変動圧の最大値との関係を Fig. 8 に示す。また、水平衝突実験結果における水平方向加速度 α_H と各パネルの変動圧の最大値との関係を Fig. 9 に示す。同図から明らかなように、衝突側のパネル⑥では、変動圧が α_H に比例して増加しているが、非衝突側のパネル③では、 $\alpha_H/g > 1.8$ で頭打ちになっている。これは、パネル③の圧力が静的圧力分には減少しないこと、すなわち、負圧を生じないことを示している。 $\alpha_v/g = 1$ および $\alpha_H/g = 1$ における各パネルの砂による変動圧の計測値 Δp_s を、液体貨物と仮定して SR207-B 法¹⁷⁾で計算した推定値 Δp_w で無次元化して Fig. 10、および、Fig. 11 に示す。

4.3 スロッシング試験装置を用いた sway、roll 実験による変動圧（模型－Ⅱ）

供試砂を満載したタンク模型－Ⅱの sway および roll 実験（水平方向と比較して、ごく小さい鉛直方向の加速度も作用するが、これを無視して）により得られた変動圧分布を Fig. 12 に示す。同図 (a) は砂を静かに搭載した直後、図 (b) はタンク模型に動揺 (sway 6000 回、roll 3000 回) を与え、砂の締め固まりによって定常状態になった後の変動圧である。計測された水平方向の変動圧 Δp_s は、初期状態で SR207-B 法¹⁷⁾による推定値 Δp_w の30%程度、定常状態で20%程度であり、締め固まりに従い静的圧力は増加するが、変動圧は減少することがわかる。

5. 粒状体貨物圧推定法の提案

前述の実験結果は、以下に述べるように粒状貨物による静的圧力、および、変動圧ともに Janssen の方法²⁾および青木の方法^{14,15)}を基にした推定値と良い相関がある。ここで、

粒状貨物による変動圧は、水平方向加速度が側圧力 σ_y を減少させる方向に作用する場合、圧力が負にならないため、負側の変動圧は静的圧力分には減少しない。このため、静的圧力についても予め把握しておくことが重要となる。

本研究で提案する推定法では、変動圧は鉛直および水平方向加速度がタンク重心に作用する場合を基準としている。動揺 (roll、pitch) による変動圧は静的傾斜の影響のみを考慮し、タンク重心の鉛直および水平方向加速度成分の変化に分解するものとする¹⁸⁾。

5.1 静的圧力の推定

5.1.1 Janssen の理論による推定

Fig. 13 に示すように、長さ a 、幅 b の直方体タンクの積み深さ z の位置の薄い層 dz に作用する力の釣り合いから ($\mu = \tan \phi_w$: 壁面摩擦係数)、次式のように直圧力 σ_z 、側圧力 σ_y が求められる。

$$\sigma_z = \frac{\gamma}{C_1 K_0} \{1 - \exp(-C_1 K_0 z)\} \quad (1)$$

$$\sigma_y = K_0 \sigma_z \quad (2)$$

ここに、

$$C_1 = \frac{2(a+b)\tan \phi_w}{ab}$$

5.1.2 模型実験結果との比較

供試砂の嵩比重量を $\gamma = 1.47 \text{ gf/cm}^3$ 、模型タンク壁面（塗装）との摩擦角を $\phi_w = 30 \text{ deg}$ 、静止土圧係数を $K_0 = 0.4$ とする。タンク模型－Ⅰ、および、タンク模型－Ⅱに供試砂を満載した場合の、(1)、(2)式より求めた静的圧力を、実験結

Fig. 13 Janssen's theory (static pressure)

果と併せて Fig. 6 および Fig. 7 に示す。側壁および底板の静的圧力とも Janssen の方法による推定値は、計測値と良い相関を示している。

5.2 鉛直方向加速度を受ける粒状貨物の変動圧

5.2.1 鉛直方向加速度を受ける場合の変動圧推定法

Fig. 10 に示されるように、鉛直方向加速度を受けるタンク模型に生じる変動圧分布は、Fig. 6 に示した静的圧力分布に類似している。このことは、鉛直方向加速度を受ける場合の変動圧推定も、静的圧力の場合と同様に Janssen の方法に基づいて推定できることを示している。従って、船倉（長さ a 、幅 b の直方体タンクとする）に鉛直方向加速度 α_v が作用する場合、底板に生じる直圧力 σ_z 、および、側壁に生じる側圧力 σ_y は、比重量が見かけ上 $\gamma \cdot \alpha_v / g$ に変化したとして、(1)、(2)式より求めることができる。

5.2.2 模型実験結果との比較

5.2.1 項と同様の積載条件で、タンク模型—I に供試砂を満載した場合の(1)、(2)式より求めた変動圧の推定値を、実験結果と併せて Fig. 10 に示す。砂による変動圧 (ΔP_s) を液体貨物と仮定した SR207-B 法による推定値 (ΔP_w) により無次元化した。また、計測値は種々の落下条件で行った実験結果をもとにして、直線近似で得られた $\alpha_v / g = 1$ に対する変動圧であるが、側壁および底板の変動圧とも提案手法による推定値と良い相関を示している。

5.3 水平方向加速度を受ける粒状貨物の変動圧

5.3.1 水平方向加速度を受ける場合の変動圧推定法

Fig. 14 に示すように、長さ a 、幅 b の直方体タンクに嵩比重量 γ の粒状貨物を深さ D だけ積載する場合、幅方向の中心線から y だけ離れた薄い層 dy に作用する静的圧力は、(1)、(2)式から求められる (y 方向に $K_0 \sigma_z$ 、 z 方向に $|\sigma_z|_{z=D}$ 、ただし、 σ_z は z の関数)。この状態で水平方向加速度 α_H を受けるとき、微小幅 dy に高さ方向に一樣な側圧力 σ_y 、側圧力の発生に伴って底板に生じる直圧力 $K_0 \sigma_y$ 、底板およびタンク前後面の摩擦力、および、微小部分の質量に対する慣

性力が生じる。水平方向の力の釣り合いにより、側圧力の変動分 σ_y 、および直圧力の変動分 σ_z は次式で求められる。

$$\sigma_y = \frac{C_3}{C_2} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{C_2 \gamma \tan \phi_w}{aD} \right) \right\} \quad (3)$$

$$\sigma_z = K_0 \sigma_y \quad (4)$$

ここに、

$$C_2 = K_0(a + 2D)$$

$$C_3 = \left(\frac{2}{C_1} - a \right) \sigma_z|_{z=D} - \gamma D \left(\frac{2}{C_1} - \frac{a}{\tan \phi_w} \frac{\alpha_H}{g} \right)$$

$$\int_0^D \sigma_z dz = \frac{1}{C_1 K_0} (\gamma D - |\sigma_z|_{z=D})$$

$$|\sigma_z|_{z=D} = \frac{\gamma}{C_1 K_0} \{ 1 - \exp(-C_1 K_0 D) \}$$

5.3.2 模型実験結果との比較

5.3.1 項と同様の積載条件で、タンク模型—I およびタンク模型—II に供試砂を満載した場合の(3)、(4)式より求めた変動圧推定値を、実験結果と併せて Fig. 11 および Fig. 12 に示す。砂による変動圧 (ΔP_s) を液体貨物と仮定した SR207-B 法による推定値 (ΔP_w) により無次元化した。また、計測値は種々の衝突条件で行った実験結果をもとにして、直線近似で得られた $\alpha_H / g = 1$ に対する変動圧であるが、側壁および底板の変動圧とも提案手法による推定値と良い相関を示している。なお、Fig. 12 の図(a)は初期状態として $K_0 = 0.35$ を、図(b)は定常状態として $K_0 = 0.40$ を用いて計算した。

6. 他の推定法との比較

6.1 倉本らの実船試験結果との比較

倉本ら¹⁾は 62,600 DWT ばら積み貨物船により内底板等に生じる鉱石圧(積載時および航行中)の実船計測を行った。積載貨物の性状は以下のとおりである。

鉱石：ボーキサイトペレット 嵩比重： $\gamma = 1.23 \text{ tonf/m}^3$

内部摩擦角： $\phi_i = 34 \text{ deg}$ 壁面摩擦角： $\phi_w = 16.7 \text{ deg}$

6.1.1 静的圧力

ボーキサイトペレット積載時の静的圧力(・印)を提案手法、および、 γD で推定した値とともに Fig. 15 に示す。図中の提案手法による推定値(静止土圧係数を $K_0 = 1 - \sin \phi_i$ より求め¹⁰⁾、(1)、(2)式より計算)は、船舶に搭載された粒状貨物全体を弾性体と仮定して圧力を評価するため、壁面との摩擦力を大きめに見積もるため、計測値(ロワースツールおよびホッパーを除く内底板上の圧力値)よりやや小さめの値を与えており、壁面摩擦力の影響範囲を明らかにする必要がある。

6.1.2 変動圧

倉本らの実船計測による、ホールド中央部(積み深さ $D = 10.2 \text{ m}$)の変動圧 Δp を鉛直方向加速度 α_v に対して

Fig. 14 Application of Janssen's theory for dynamic pressure induced by horizontal acceleration

Fig. 15 Comparison between full-scale measurements (Kuramoto) and estimated value (static pressure)

Fig. 16 Comparison between full-scale measurements (Kuramoto) and estimated value (dynamic pressure)

Fig. 16 に示す(・印)。計測値は、粒状貨物の締め固まりによる圧力応答の変化、あるいは、加速度の水平方向成分による圧力変動を含むためかなりばらつきが大きい。Fig. 16 中

Fig. 17 Comparison between calculated value by ABS SAFEHULL and estimated value by proposed method

に提案手法による推定結果を破線で示すが、この推定値は静的圧力の場合と同様、液体貨物を仮定した SR207・B 法による推定値(図中の実線)よりやや小さい値を示すが、計測値と概ね相関がある。

6.2 ABS SAFEHULL SYSTEM の方法との比較

ABS SAFEHULL SYSTEM では、一般的なばら積み貨物船の粒状貨物による艙内圧に対して、貨物比重量の大きさ、積載方法、波との出会い角等により 10 種類の Load Case を設定し、各圧力成分を求めた結果に Load Case に応じた相関係数を乗じるという方法を採用している。

各圧力成分の考察は、横隔壁、および、側壁の場合(船底板も含む)に分けて、船体運動(縦揺れ、横揺れ、上下・左右・前後加速度)が同時に作用する場合を取り扱っているが、両者は面の方向が 90 度違うだけで全く同様に取り扱うことができるので、ここでは、船倉の横断面、すなわち、底板および側壁に作用する粒状貨物圧について比較・検討する。

6.2.1 静的圧力

船倉に嵩比重量 γ 、安息角 ϕ_0 の粒状体を深さ D だけ積載する場合に、水平面とのなす角が β の平面に作用する静的圧力の垂直方向成分 P_m を次式で与えている。

$$P_m = \gamma D \{ \cos^2 \beta + (1 - \sin \phi_0) \sin^2 \beta \} \quad (5)$$

(5) 式によれば、安息角 $\phi_0 = 30 \text{ deg}$ 、ビルジホッパー斜板の傾斜角 $\beta = 45 \text{ deg}$ とした場合、底板上には γD 、斜板上には $0.75 \gamma D$ 、側壁上には $0.5 \gamma D$ の静的圧力が作用することになる。

6.2.2 変動圧

船の運動によるピッチ角を ϕ 、ロール角を θ 、鉛直方向加速度を α_v 、水平方向加速度を α_h とすると、水平面とのなす角が β の平面に作用する変動圧の垂直方向成分 P_{dm} を次式で与えている ($K_c = 0.4 \sim 1.0$: 相関係数)。

$$\begin{aligned} p_{dn}/K_c = & \gamma D \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \left\{ \cos^2(\beta - \theta) + (1 - \sin \phi_0) \sin^2(\beta - \theta) \right\} - P_m \\ & + \gamma D \frac{\alpha_v}{g} \cos^2 \beta + 0.33 \gamma \frac{b}{2} \frac{\alpha_H}{g} \sin^2 \beta \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式は、変動圧 P_{dn} が船体傾斜による静的圧力の変動分(第1項)、鉛直方向加速度による変動圧(第2項)、および、水平方向加速度による変動圧(第3項)の総和として求められることを示している。

6.2.3 提案手法との比較

長さ $a = 50 \text{ m}$ 、幅 $b = 50 \text{ m}$ 、深さ $D = 25 \text{ m}$ の直方体タンクに嵩比重量 $\gamma = 1.5 \text{ tonf/m}^3$ の粒状貨物を満載する場合を想定する(壁面摩擦角 $\phi_w = 30 \text{ deg}$ 、静止土圧係数 $K_0 = 0.4$ 、安息角 $\phi_0 = 30 \text{ deg}$ とする)。静的圧力、鉛直方向加速度および水平方向加速度を受ける場合の変動圧分布を、液体貨物を仮定した SR207 の方法(従来法)、ABS SAFEHULL SYSTEM の方法、および、提案手法により推定した結果を、それぞれ、Fig. 17 (a)~(c)に示す。

液体貨物を仮定した SR207 の方法は、静的な場合および鉛直方向加速度を受ける場合の底板に生じる圧力を除いて、現実的でない推定値を与えることになる。

また、ABS SAFEHULL SYSTEM の方法によると、鉛直方向加速度を受ける場合の側壁の変動圧、および、水平方向加速度を受ける場合の底板の変動圧は無視される。しかし、これらの場合を除いて、提案手法による推定値と ABS SAFEHULL SYSTEM の推定値は、ほぼ同等の圧力値を与えている。

7. 結 言

乾燥砂を搭載した防撓材付きタンク模型実験により、粒状貨物圧に関する基本的性質が把握できた。本研究によって得られた知見を以下の通りまとめる。

- (1) 粒状貨物圧の計測においても、曲げひずみを圧力に換算する方法が有効である。
- (2) 粒状貨物による静的圧力は、動揺による壁面摩擦力の解放や締め固まりによって増加するが、同一加速度に対する変動圧の応答量は締め固まり後は減少する。
- (3) 水平方向加速度 α_H を受ける場合の粒状貨物による変動圧は、圧力が増加する方向に α_H が作用する場合 α_H に比例して増大するが、圧力が減少する方向に α_H が作用する場合、静的圧力分以上には減少しない。
- (4) 模型実験における粒状貨物による静的圧力は、Janssen の理論により精度良く推定できる。
- (5) 鉛直、あるいは、水平方向加速度を受ける場合の粒状貨物による変動圧についても、Janssen の理論に基づく推定法が適用できる。この場合、粒状貨物の物性値として、嵩比重量、壁面摩擦係数、および、静止土圧係数が必要となる。前2者については、簡単な試験で計測可能であるが、後者については

については3軸圧縮試験を行う必要がある。ただし、簡易的に静止土圧係数を求めるためには、円筒引抜き試験により求めることも可能である。

(6) 提案手法を用いて推定した実船規模の粒状貨物圧は、倉本らの実船試験結果、および、ABS SAFEHULL SYSTEM による推定値と良い相関があった。

また、今後の検討課題として以下の点が残された。

- (1) 実験に使用された粒径が比較的均一な砂と異なり、実船に積載する石炭や鉱石のように、不均一な粒状体の場合にもそのまま提案手法が利用可能かどうかを確認する必要がある。
- (2) 模型実験結果からは、各パネルに作用する平均的な粒状貨物圧は得られるが、アーチ効果等による局所的な圧力集中は計測できない。そのためには、より実船に近いサイズのタンク模型を使用して、圧力センサーとなるパネルを細分化して貨物圧を計測する必要がある。
- (3) ビルジホッパーやロワースツールなど斜板に対する貨物圧についても検討する必要がある。

謝 辞

本研究は日本造船研究協会、第228研究部会(平成8~10年度)¹⁸⁾との共同研究として行われたものであり、富田康光教授、角洋一教授、および、藤野正隆教授をはじめとする委員各位に多大のご協力、ご助言をいただきましたことに対し、厚く御礼申し上げます。また、船舶技術研究所機関動力部太田進蒸気動力研究室長には、供試材料の性状試験において多大のご協力をいただき、厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 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、(1987)、pp. 276~283。
- 2) 山本善之、浦環、松原典宏、太田垣由夫、信原真人：航行中のバラ積み貨物の挙動について、日本造船学会誌、第558号、(1975)、pp. 17~21。
- 3) ABS SAFEHULL SYSTEM、pp. 3-15~3-29
- 4) 例えば、深沢塔一：大型船の疲労強度検討のための船側変動圧に関する研究、日本造船学会論文集、第171号、(1992)、pp. 157~175。
- 5) 遠山泰美、明石委子：船体運動によるタンク内変動圧の計算法について、関西造船協会誌、第229号、(1998)、pp. 131~136。
- 6) 萩原孝一、谷昭夫：鉄鉱石によって船倉囲壁に加えられる荷重、三菱重工技報、Vol. 4、No. 6、(1967)、pp. 73~77。
- 7) 萩原孝一：鉱石圧力の実船計測について、西部造船学会報、第34号、(1967)、pp. 151~162。
- 8) 山本善之、浦環、松原典宏、信太明人：粒状体の弾性挙動に関する基礎的研究、日本造船学会論文集、第132

- 号、(1972)、pp. 249～256.
- 9) 山本善之、浦環：鉱石船における鉱石押込み圧の理論研究、日本造船学会論文集、第 134 号、(1973)、pp. 223～231.
- 10) 山本善之、浦環：鉱石ペレット積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、(1975)、pp. 196～201.
- 11) 山口勇男、本間康之、平岡善博、佐藤信雄：鉱石圧について、日本造船学会論文集、第 135 号、(1974)、pp. 191～203.
- 12) 寺本晋、川崎哲郎、森正浩、萩原孝一：船倉に作用する鉱石の静的圧力の研究、日本造船学会論文集、第 135 号、(1974)、pp. 205～214.
- 13) 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、(1974)、pp. 215～228.
- 14) 青木元也、竹本博安、直井保、遠藤久芳、安藤文隆：鉱石運搬船の横強度（第 1 報 貨物倉の鉱石ペレットの挙動について）、日本造船学会論文集、第 138 号、(1975)、pp. 305～313.
- 15) 青木元也、山本善之：鉱石運搬船の横強度（第 4 報）—玄側タンクの崩壊強度—、日本造船学会論文集、第 149 号、(1981)、pp. 120～133.
- 16) U. S. Waterways Experimental Station: Soil Pressure Cell Investigation, Technical Memorandum No. 210-1, (1944).
- 17) 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).
- 18) 日本造船研究協会 第 228 研究部会：波浪中の船体構造の安全性評価の研究、平成 9 年度報告書、(1998)、pp. 321～329.
-