

# 全船構造解析のための粒状貨物による倉内圧の設定法

正会員 松井 貞興\*

Study on Internal Pressure Induced by Granular Cargo for Whole Ship Structural Analysis

by Sadaoki Matsui, Member

Key Words: Granular Cargo, Whole Ship Structural Analysis

## 1. 緒言

ばら積み船や鉱石運搬船などの粒状貨物を扱う船体の構造強度を評価するためには、粒状貨物による倉内圧を正しく扱うことが必要とされる。先行研究では、実験及びシミュレーションによる粒状貨物荷重の検討が数多く実施されており<sup>1)2)3)</sup>、現行のバラ積み船に対する構造規則CSR-BC&OT編<sup>4)</sup>では、田中らによる静止土圧論に基づく推定式<sup>3)</sup>によって倉内荷重が定義されている。

しかしながら、倉内圧の積分値と貨物重量並びに慣性力との釣り合いに着目した報告の例は少ない。船体の部分構造モデルを用いた構造解析では、ハルガーダ断面力を境界条件で調整することができるため、倉内圧の積分値が大きな問題になることはない。一方で、全船構造解析においては、倉内圧の積分値がハルガーダ断面力の大きさに直接影響を及ぼすため、これが貨物重量並びに慣性力と一致するかが構造強度評価の信頼性に大きく関わると考えられる。

粒状貨物には内部摩擦が存在するため、倉内壁面に対して垂直方向に働く直圧力に加え、水平方向に働くせん断力が生じる。このような複雑な荷重状態を詳しく推定するには有限要素法や個別要素法等の数値シミュレーションに依る必要がある<sup>5)6)</sup>が、実構造設計においては荷重状態は簡便かつ陽な式で示されていることが好ましい。

以上のような背景のもと、著者は、倉内圧の積分値が貨物重量並びに慣性力と一致し、かつ荷重状態を簡便に表すためには、粒状貨物内の応力テンソル場を陽に定義する方法が都合が良いと考えた。本論文では、現行の構造規則における粒状貨物による倉内圧の考えを基に、倉内圧の積分値と貨物重量並び荷慣性力との釣り合いを満足する動的応力テンソル場の検討を行った。

## 2. 応力テンソル場による粒状貨物荷重の定義

本章では、応力テンソル場を用いた粒状貨物荷重の定義方法を示し、その利点について説明する。以降、 $x, y, z$ は船体固定座標で、それぞれ船首方向、左舷方向、上方向を正とする。これらは必要に応じて $x_i (i = 1, 2, 3)$ と表し、ベクトル及びテンソルの成分の添え字も対応する番号とする。また、応力は引っ張りを正とする。

いま、応力テンソルを次のように定義する。

$$\boldsymbol{\sigma} = \sigma_{ij} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j \quad (2.1)$$

ここで、 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ はそれぞれ $x, y, z$ 方向の単位ベクトル $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ である。以上の応力テンソルから、倉内の任意の板に作用する応力ベクトル $\mathbf{t}$ は次式によって得られる。

$$\mathbf{t} = -\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} \quad (2.2)$$

ただし、 $\mathbf{n}$ は倉内板のホールドから見た単位外向き法線ベクトルである。以上の応力ベクトルは、一般に $\mathbf{n}$ 方向に作用する垂直応力成分に加え、板と平行な方向に作用するせん断応力成分が存在する。また、ホールド全体が受ける積載荷重ベクトル $\mathbf{F} = F_i \mathbf{e}_i$ は、倉内板に作用する応力ベクトルの積分値であるから

$$\mathbf{F} = \int_S \mathbf{t} \, dS = - \int_S \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} \, dS \quad (2.3)$$

と与えられる。式(2.3)最右辺にテンソル場におけるガウスの発散の定理を適用することで

$$\mathbf{F} = - \int_V \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\nabla} \, dV \quad (2.4)$$

との表現も得られる。ここで、 $\boldsymbol{\nabla}$ は微分演算子を表し、 $\boldsymbol{\nabla} = \partial/\partial x_i \mathbf{e}_i$ と定義される。 $V$ 及び $S$ はそれぞれ粒状貨物の体積領域及び表面領域を意味する。

以上のことから、応力テンソルの各成分 $\sigma_{ij}$ を陽に定義することができれば、式(2.2)によって一義的に応力ベクトルを得る事ができ、部材ごとに別々の定義を与える必要がないことが分かる。これは倉内荷重を定義するプログラムにおける自動化の観点から、極めて都合の良い性質である。また、式(2.4)によって、全船構造解析において特に重要となる倉内圧の積分値を比較的容易に調べることができる。

## 3. 現行の構造規則の倉内荷重

本章では、現行の構造規則であるCSR-BC&OT編において定義される粒状貨物荷重について説明する。

### 3.1 構造規則の静的倉内圧

静止土圧論に基づき、粒状貨物内の静的応力テンソル $\boldsymbol{\sigma}^s(x, y, z)$ の成分を次式のように仮定する。

$$[\sigma_{ij}^s] = -\rho_c g (z_c - z) \begin{bmatrix} K_0 & 0 & 0 \\ 0 & K_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ここで、 $\rho_c$ は粒状貨物の嵩密度、 $z_c(x, y)$ は貨物高さの $z$ 座標、 $K_0$ は静止土圧係数で、ここでは内部摩擦角 $\phi$ [rad]を用いて

\* 海上技術安全研究所

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (3.2)$$

と表される Jaky による実験式を用いることにする。

式(3.1)を式(2.1)、(2.2)に代入することで、倉内の任意の板に作用する静的応力ベクトル $\mathbf{t}^s$ が得られる。例えばピルジホッパータンク等の、Fig. 1 中の $y$ 方向に $\alpha$ [rad]傾斜している斜板を考えた場合、 $\mathbf{n} = \sin \alpha \mathbf{e}_y - \cos \alpha \mathbf{e}_z$ として

$$\mathbf{t}^s = \rho_c g (z_c - z) (K_0 \sin \alpha \mathbf{e}_y - \cos \alpha \mathbf{e}_z) \quad (3.3)$$

という応力ベクトルが生じる。この場合、斜板の法線 $\mathbf{n}$ 方向成分 $t_n^s$ と斜板と平行な $\mathbf{l}$ 方向（下方向を正）成分 $t_l^s$ が存在する。 $\mathbf{l} = -\cos \alpha \mathbf{e}_y - \sin \alpha \mathbf{e}_z$ より、それぞれ以下で与えられる。

$$t_n^s = \mathbf{t}^s \cdot \mathbf{n} = \rho_c g (z_c - z) (K_0 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) \quad (3.4)$$

$$t_l^s = \mathbf{t}^s \cdot \mathbf{l} = \rho_c g (z_c - z) (1 - K_0) \sin \alpha \cos \alpha \quad (3.5)$$

ここで、

$$K_C = K_0 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \quad (3.6)$$

とおくと、式(3.4)、(3.5)はそれぞれ

$$t_n^s = \rho_c g (z_c - z) K_C \quad (3.7)$$

$$t_l^s = \rho_c g (z_c - z) \frac{1 - K_C}{\tan \alpha} \quad (3.8)$$

と表す事ができる。また、式(3.5)において $\alpha = 0, \pi/2$ を代入すると分かるように、壁面及び内底板には垂直応力しか生じないことが分かる。以上の式は、CSR-BC&OT 編 1 編 4 章 6 節 2.4 に示されている静圧及び静的せん断荷重の表現と一致する。即ち、構造規則において暗に定義されている静的応力テンソルは静止土圧論に基づいた式(3.1)であることが分かる。

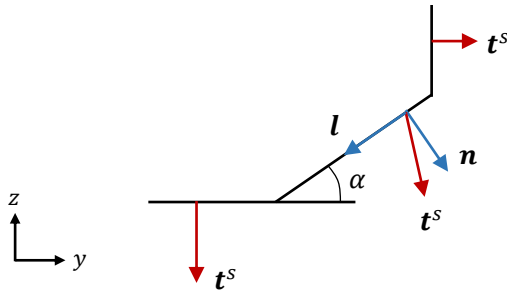


Fig. 1 Stress vector acting on hold plates

### 3.2 静的倉内圧の積分値

倉内圧の積分値は、静水中では積載重量

$$\mathbf{F}^s = -\rho_c V g \mathbf{e}_z \quad (3.9)$$

と一致する必要がある。ただし、 $V$ は粒状貨物の体積を表し、 $g$ は重力加速度とする。式(3.1)の応力テンソルを式(2.4)に代入することで、構造規則によって定義される静的倉内圧の積分値は次式によって表される。

$$\begin{Bmatrix} F_x^s \\ F_y^s \\ F_z^s \end{Bmatrix} = \int_V \rho_c g \begin{Bmatrix} K_0 \frac{\partial z_c}{\partial x} \\ K_0 \frac{\partial z_c}{\partial y} \\ -1 \end{Bmatrix} dV \quad (3.10)$$

貨物高さ $z_c$ が $x, y$ に依存しない場合は式(3.9)の $\mathbf{F}^s$ に一致する事が確かめられる。しかしながら、実際に、そして構造規則においても $z_c$ は定数ではなく、山なりに分布しており、式(3.1)の応力テンソルでは、一般には $F_x^s, F_y^s$ は0とはならず、不平衡力が生じる。この理由は、例えば Fig. 2 のように粒状貨物が壁面に積載されているとき、本来は壁面に作用する荷重の反力として内底板にせん断応力が作用するはずであるが、式(3.1)の応力テンソルでは3.1節で示したように内底板には垂直応力しか生じないからである。構造規則における荷姿 $z_c$ は、長手方向の荷姿の変化は考慮せず ( $\partial z_c / \partial x = 0$ ) かつ左右対称に設定されているため、ホールド形状が左右対称の時は $F_x = F_y = 0$ となり、多くの場合は不平衡力が問題になる事は無い。しかしながら、ホールド形状が左右非対称である場合には $F_y = 0$ とはならないことに注意が必要である。

また、構造規則では、式(3.1)の応力テンソルでは考慮することのできない、所謂アーチ効果による斜板にかかる荷重の増加の影響、並びに壁面のせん断荷重による内底板にかかる荷重の減少の影響を、実際の荷姿とは異なる強度用の貨物高さ $z_c$ を定義することで考慮している<sup>34)</sup>。

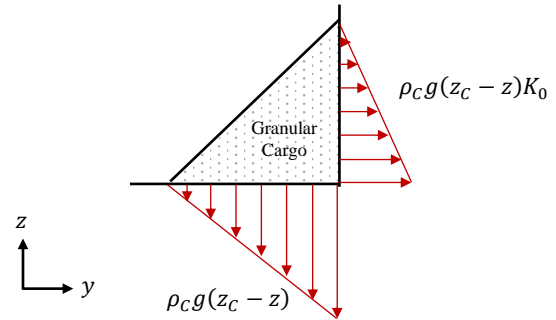


Fig. 2 Stress vector acting on hold plates in condition when head line inclines

### 3.3 構造規則の動的倉内圧

動的応力ベクトルを $\mathbf{t}^d$ とすると、構造規則の動的垂直応力 $t_n^d$ は

$$t_n^d = \rho_c \{ 0.25 a_x (x_G - x) + 0.25 a_y (y_G - y) + K_C a_z (z_c - z) \} \quad (3.11)$$

と定義されている。但し、 $x_G, y_G$ はホールド重心の $x, y$ 座標である。一方で、動的せん断応力は、 $z$ 方向加速度に起因する成分は静的せん断応力と同様の扱いがされているが、 $x, y$ 方向加速度に起因する成分は内底板にのみ定義されており、 $x, y$ 方向せん断応力 $t_x^d, t_y^d$ が次のように定義されている。

$$\begin{aligned} t_x^d &= -0.75 \rho_c a_x (z_c - z) \\ t_y^d &= -0.75 \rho_c a_y (z_c - z) \end{aligned} \quad (3.12)$$

これらの式は田中らによる実験式<sup>3)</sup>に基づいており、物理的に存在し得る状態を表しているわけではない。よって、

以上の応力ベクトルに対応する動的応力テンソルを定義することはできない。

また、動的倉内圧の積分値は、慣性力

$$\mathbf{F}^d = -\rho_c V \mathbf{a} \quad (3.13)$$

と一致する必要がある。ただし、 $\mathbf{a}$ はホールドの加速度ベクトルである。構造規則による動的倉内圧の積分値と慣性力 $\mathbf{F}^d$ の差については、応力テンソルが定義できないため3.2節のように一般的な議論をすることはできず、一般のホールド形状に対しては必ずしも一致しないことが想定される。

#### 4. 動的応力テンソルの提案

3章で述べたように、既存の構造規則では、静的倉内圧に関しては、ホールド形状が左右対称の時には重量と釣り合うが、動的倉内圧に関しては必ずしも慣性力と一致しない。そこで本章では、式(3.1)の静止土圧論に基づく応力テンソルを基に、ホールド形状が左右対称の時に動的倉内圧の積分値が慣性力と一致するような動的応力テンソルを提案する。

##### 4.1 応力テンソルの導出

ホールドに重力加速度及び加速度が作用しているときの応力テンソルを考える。簡単のため、本論文ではホールド内の至る所で $\mathbf{a}$ が一定となる並進運動のみを考える。また、加速度 $\mathbf{a}$ には、船体が傾斜する事による船体固定座標系における重力ベクトルの変動の影響も含まれていると考える。

今、式(3.1)の静的応力テンソルを基に、動的応力テンソルを次のように仮定する。

$$[\sigma_{ij}^d] = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^d & 0 & \sigma_{13}^d \\ 0 & \sigma_{22}^d & \sigma_{23}^d \\ \sigma_{13}^d & \sigma_{23}^d & \sigma_{33}^d \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

ここで、対角成分を

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^d &= -\rho_c \{a_x f(x_G - x) + a_y f K_{0h}(y_G - y) + a_z K_{0v}(z_C - z)\} \\ \sigma_{22}^d &= -\rho_c \{a_x f K_{0h}(x_G - x) + a_y f(y_G - y) + a_z K_{0v}(z_C - z)\} \\ \sigma_{33}^d &= -\rho_c \{a_x f K_{0h}(x_G - x) + a_y f K_{0h}(y_G - y) + a_z(z_C - z)\} \end{aligned} \quad (4.2)$$

と置く。ここで、 $f, K_{0h}, K_{0v}$ は実験等によって決定されるべき0以上1以下の係数である。非対角成分 $\sigma_{13}^d, \sigma_{23}^d$ は、式(2.4)に示した慣性力と動的倉内圧の釣り合いの式

$$\mathbf{F}^d = - \int_V \boldsymbol{\sigma}^d \cdot \nabla dV \quad (4.3)$$

から決定する。式(4.3)に式(4.2)並びに(3.13)を代入し、変形すると、

$$\int_V \left\{ \frac{\partial \sigma_{13}^d}{\partial z} - \rho_c a_z K_{0v} \frac{\partial z_C}{\partial x} \right\} dV = \rho_c V a_x (1-f) \quad (4.4)$$

$$\int_V \left\{ \frac{\partial \sigma_{23}^d}{\partial z} - \rho_c a_z K_{0v} \frac{\partial z_C}{\partial y} \right\} dV = \rho_c V a_y (1-f) \quad (4.5)$$

$$\int_V \left\{ \frac{\partial \sigma_{13}^d}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{23}^d}{\partial y} \right\} dV = 0 \quad (4.6)$$

となる。ここで、構造規則と同様に $\partial z_C / \partial x = 0$ かつ $z_C$ 及びホールド形状が左右対称の場合考えると、式(4.4)及び(4.5)の左辺第2項は0となる。よって、式(4.4)及び(4.5)を満たす $\sigma_{13}^d, \sigma_{23}^d$ が以下のように得られる。

$$\sigma_{13}^d = -\rho_c a_x (1-f)(z_C - z) \quad (4.7)$$

$$\sigma_{23}^d = -\rho_c a_y (1-f)(z_C - z) \quad (4.8)$$

ただし、 $z = z_C$ で $\sigma_{13}^d = \sigma_{23}^d = 0$ という境界条件を課している。これらは $z$ 方向の釣り合い式(4.6)を確かに満たす。よって、式(4.2)、(4.7)、(4.8)の動的応力テンソルを用いることで、粒状貨物表面の応力の積分値と慣性力は一致する。

しかしながら、以上の粒状貨物表面の積分領域には、貨物上表面も含まれていることに注意を要する。構造解析において構造に荷重を作用させる事ができるのは、上表面を除いた構造と接する表面だけであるから、上表面における積分値の寄与が不平衡力となる。即ち、粒状貨物表面 $S$ を上表面 $S_t$ とそれ以外 $S_b$ に分け、それぞれの領域における応力の積分値を

$$\mathbf{F}_t^d = - \int_{S_t} \boldsymbol{\sigma}^d \cdot \mathbf{n} dS \quad (4.9)$$

$$\mathbf{F}_b^d = - \int_{S_b} \boldsymbol{\sigma}^d \cdot \mathbf{n} dS \quad (4.10)$$

と定義すると、構造解析において構造が受ける倉内圧の積分値は

$$\mathbf{F}_b^d = \mathbf{F}^d - \mathbf{F}_t^d \quad (4.11)$$

であるから、 $-\mathbf{F}_t^d$ の不平衡力が生じることになる。以下に、 $\mathbf{F}_t^d$ の値を具体的に求める。式(4.9)に式(4.2)、(4.7)、(4.8)の動的応力テンソルを代入し、上表面を $z = z_C$ と見做すことで、 $S_t$ 上では常に $(z_C - z) = 0$ であることを考慮すると、 $\mathbf{F}_t^d$ の $x, y, z$ 成分は次式で表せる。

$$\begin{Bmatrix} F_{tx}^d \\ F_{ty}^d \\ F_{tz}^d \end{Bmatrix} = \rho_c f \int_{S_t} \begin{Bmatrix} [a_x(x_G - x) + a_y K_{0h}(y_G - y)] n_x \\ [a_x K_{0h}(x_G - x) + a_y(y_G - y)] n_y \\ [a_x K_{0h}(x_G - x) + a_y K_{0h}(y_G - y)] n_z \end{Bmatrix} dS \quad (4.12)$$

ここで、 $\partial z_C / \partial x = 0$ であることを考えると $S_t$ 上では $n_x = 0$ であるから、 $F_{tx}^d = 0$ となる。また、 $n_z$ は $x$ に関して一様、 $y$ に関して偶関数であり、 $(x_G - x), (y_G - y)$ がそれぞれ $x, y$ に関して奇関数であることを考慮すると、領域 $S_t$ の図心 $x, y$ 座標が $x_G, y_G$ に一致する場合 $F_{tz}^d = 0$ となる。一般的なホールド形状に対しては近似的に $F_{tz}^d = 0$ と考えても差し支えない。しかし、 $F_{ty}^d$ に関しては、ガウスの発散の定理を適用することで

$$\begin{aligned} F_{ty}^d &= \rho_c f \int_{V_t} \frac{\partial}{\partial y} \{a_x K_{0h}(x_G - x) + a_y(y_G - y)\} dV \\ &= -\rho_c f a_y V_t \end{aligned} \quad (4.13)$$

となり、0とはならない事がわかる。ただし、 $V_t$ はFig. 3に示す、粒状貨物上表面の山になっている部分の体積を表す。上表面が平らな場合や、閉領域などの上表面がない場合は $V_t = 0$ である。結局、 $\mathbf{F}_b^d$ は、式(4.11)より、 $x, z$ 方向は慣性力 $\mathbf{F}^d$ と一致するが、 $y$ 成分に関しては

$$F_{by}^d = -\rho_c a_y (V - fV_t) \quad (4.14)$$

となり、 $y$ 方向慣性力 $-\rho_c a_y V$ よりやや小さめの値となってしまう。そこで、 $y$ 方向加速度を

$$a_y \rightarrow \frac{V}{V - fV_t} a_y \quad (4.15)$$

と修正することで、式(4.14)を $y$ 方向慣性力と一致させることにする。

結局、 $\partial z_c / \partial x = 0$ 、かつ $z_c$ 及びホールド形状が左右対称の場合に、倉内圧の積分値が慣性力と釣り合う動的応力テンソルとして、次式を提案する。

$$[\sigma_{ij}^d] = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^d & 0 & \sigma_{13}^d \\ 0 & \sigma_{22}^d & \sigma_{23}^d \\ \sigma_{13}^d & \sigma_{23}^d & \sigma_{33}^d \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

ここで、各応力成分は次式の通り。

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^d &= -\rho_c \{a_x f(x_G - x) + a_y \beta f K_{0h}(y_G - y) + a_z K_{0v}(z_C - z)\} \\ \sigma_{22}^d &= -\rho_c \{a_x f K_{0h}(x_G - x) + a_y \beta f(y_G - y) + a_z K_{0v}(z_C - z)\} \\ \sigma_{33}^d &= -\rho_c \{a_x f K_{0h}(x_G - x) + a_y \beta f K_{0h}(y_G - y) + a_z(z_C - z)\} \\ \sigma_{13}^d &= -\rho_c a_x (1 - f)(z_C - z) \\ \sigma_{23}^d &= -\rho_c a_y \beta (1 - f)(z_C - z) \end{aligned} \quad (4.17)$$

ただし、

$$\beta = \frac{V}{V - fV_t} \quad (4.18)$$

とされている。以上の応力テンソルは、 $a_x = a_y = 0$ 、 $a_z = g$ かつ $K_{0v} = K_0$ としたとき、式(3.1)の構造規則における静的応力テンソルと一致する。

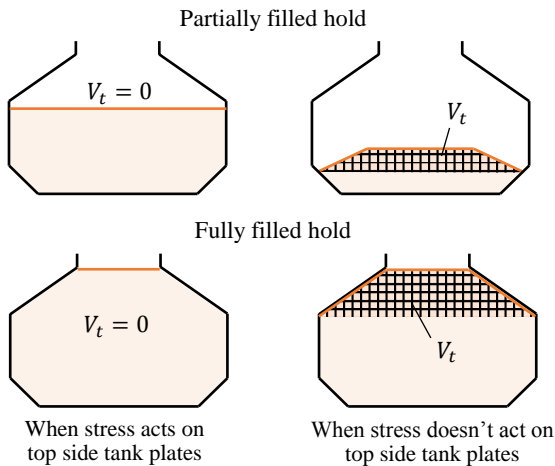


Fig. 3 Definition of  $V_t$

## 4.2 斜板に作用する応力

3.1 節と同様の手順で、式(4.17)の動的応力テンソルによって $y$ 方向に $\alpha$ [rad]傾斜した斜板に作用する動的垂直応力及び動的せん断応力が以下のように求められる。

$$\begin{aligned} t_n^d &= \rho_c \{a_x f(x_G - x) + a_y \beta f K_{Ch}(y_G - y) + a_z K_{Cv}(z_C - z) \\ &\quad - a_y \beta (1 - f)(z_C - z) \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} t_l^d &= \rho_c \{a_z(z_C - z) \frac{1 - K_{Cv}}{\tan \alpha} + a_y \beta f(y_G - y)(K_{Ch} - 1) \tan \alpha \\ &\quad + a_y \beta (1 - f)(z_C - z) \cos 2\alpha \} \end{aligned} \quad (4.20)$$

ただし、次のようにおている。

$$K_{Cv} = K_{0v} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \quad (4.21)$$

$$K_{Ch} = \sin^2 \alpha + K_{0h} \cos^2 \alpha \quad (4.22)$$

ここで、 $\alpha = 0$ とすると、内底板に生じる垂直応力及び $y$ 方向せん断応力は、Fig. 1 より $t_l^d|_{\alpha=0} = -t_y^d$ であるから

$$t_n^d = \rho_c \{a_x f(x_G - x) + a_y \beta f K_{Ch}(y_G - y) + a_z K_{Cv}(z_C - z)\} \quad (4.23)$$

$$t_y^d = -\rho_c a_y \beta (1 - f)(z_C - z) \quad (4.24)$$

となる。 $f = 0.25$ 、 $K_{0v} = K_0$ 、 $K_{0h} = 1$ とすると、 $\beta$ を無視すれば構造規則の動的垂直応力(3.11)及び動的せん断応力(3.12)と一致する事がわかる。

以上は2次元的に $y$ 方向のみに傾いた斜板を示したが、3次元的に傾斜した斜板に対する表示式はやや煩雑になる。構造モデルに作用させる倉内圧を定義するにあたっては、垂直応力とせん断応力に分離せず、応力テンソル(4.17)を用い、 $z < z_c$ の倉内パネルに対して式(2.2)によって応力ベクトルを計算する方が簡便である。

## 5. 提案した動的倉内圧の構造規則との比較

本章では、4章で提案した動的応力テンソル(4.17)による動的倉内圧を、現行の構造規則 CSR-BC&OT による値と比較し、またそれぞれの積分値についても比較する。両者は $z$ 方向加速度に起因する成分に関しては一致するため、垂直方向加速度に起因する成分のみを比較する。

### 5.1 動的垂直応力及びせん断応力分布の比較

$y$ 方向加速度 $a_y = 0.4g$ を与えたときの、動的垂直応力及び動的せん断応力の $y$ - $z$ 平面の分布の比較を、light cargo を想定したホールド満載状態と、heavy cargo を想定した積付高さが低い状態の2種類に対して行った。light cargo の動的垂直応力及び動的せん断応力の分布をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5 に、heavy cargo の動的垂直断応力分布及び動的せん断応力分布をそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に示す。安息角および内部摩擦 $\phi$ は $30^\circ$ 、また提案式においては $f = 0.25$ 、 $K_{0v} = K_0$ 、 $K_{0h} = 1$ としている。図中の線は、ホールド外側にある場合を正としており、応力の値は $\rho_c g$ で除している。垂直応力はホールド外向きを正、せん断応力は図中の矢印の向きを正としている。なお、貨物高さ $z_c$ に関しては、CSR-BC&OT では実際の荷姿とは異なる強度用の荷姿を用いているが、本検討においては実際の荷姿による値を計算している。

Fig. 4 及び Fig. 6 より、垂直応力に関して、提案手法は内底板及び垂直な側壁に関しては構造規則と殆ど一致している一方、斜板に対して大きな応力が生じている。この差は、式(4.19)で $\alpha = 45^\circ$ としたときに残る右辺第 4 項に依る影響であり、応力テンソル(4.17)の $\sigma_{23}^d$ 成分が $45^\circ$ 傾斜した板に対しては垂直応力に変換されることによるものである。Fig. 5 及び Fig. 7 より、せん断応力に関して、提案手法は構造規則と内底板では殆ど一致している一方で、側壁では構造規則では 0 だが、提案手法は若干のせん断応力が若干生じている。この差は、式(4.20)で $\alpha = 90^\circ$ としたときに残る右辺第 2 項に依る影響であり、これも応力テンソル(4.17)の $\sigma_{23}^d$ 成分に起因している。

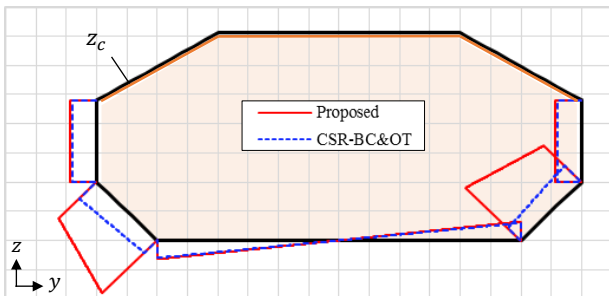


Fig. 4 Comparison of dynamic normal stress (light cargo)

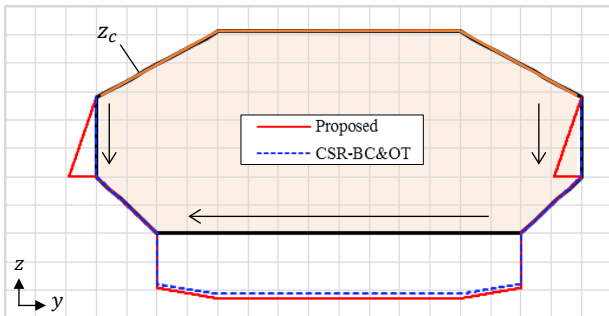


Fig. 5 Comparison of dynamic shear stress (light cargo)

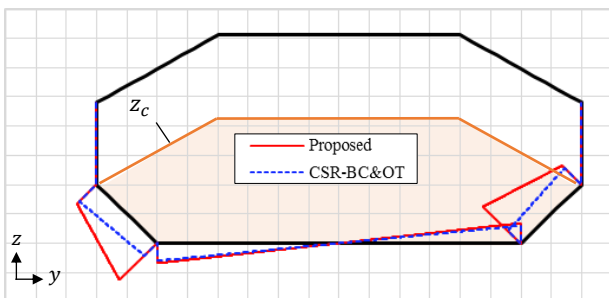


Fig. 6 Comparison of dynamic normal stress (heavy cargo)

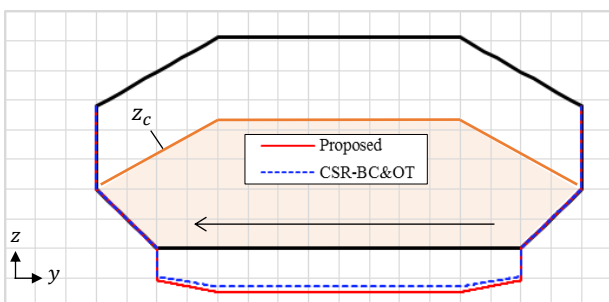


Fig. 7 Comparison of dynamic shear stress (heavy cargo)

田中ら<sup>3)</sup>によると、「粒状貨物の水平方向加速度による変動垂直圧は液状貨物の 25%程度になるが、慣性力の残りの 75%は内底板の摩擦力として分担される」と考察されている。これを認めた場合、 $45^\circ$ 傾斜した斜板に対しては内底板に生じる摩擦力がそのまま垂直応力になるため、ビルジホッパータンクに対しては必然的により厳しい垂直応力が作用していることになる。実際が規則と提案手法のどちらに近いかを確かめるには、実験あるいはシミュレーションに依る必要がある。

## 5.2 積分値の比較

Fig. 8 に、5.1 節で計算した light cargo 及び heavy cargo を想定した積付状態における動的倉内圧の積分値の y 方向成分の比較を示す。値は y 方向慣性力 $-\rho_c a_y V$ で正規化しており、また上表面の積分の寄与の補正を無視した、即ち $\beta = 1$ とした値も記載する。提案手法は慣性力と一致している一方で、規則による値は慣性力の 8 割程度、また $\beta = 1$ とした値はその中間になっている。規則の値が低い理由は、ビルジホッパータンクの斜板に対して内底板のせん断応力に相当する垂直応力が作用しておらず、かつ上表面の積分の寄与の影響を考慮していないためである。

全船解析における倉内圧の積分値は、ハルガーダ荷重に直接影響を及ぼすため、慣性力と一致する事が重要になる。本検討により、本提案手法の有用性が確かめられた。なお、応力の積分値の z 方向成分は、いずれのケースにおいても 0 となることが確認された。

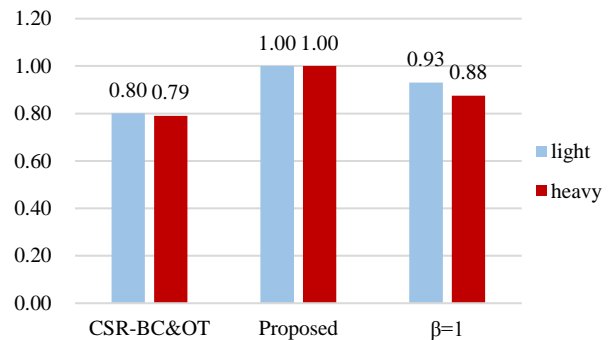


Fig. 8 Comparison of integrated value of dynamic stress normalized by inertia force

## 6. 結 言

本論文では、全船解析において特に重要となる倉内圧の積分値に主眼をおき、慣性力と一致する動的倉内圧の実用的設定法を提案した。主な結論は以下の通りである。

- 1) 粒状貨物内の応力テンソル場 $\sigma(x, y, z)$ を陽に定義することができれば、式(2.2)によって倉内の任意の板に作用する応力を一義的に計算することができる。また、式(2.4)によって任意形状のホールドに対して倉内圧の積分値を比較的容易に調べることができる。
- 2) ばら積み船に対する現行の構造規則 CSR-BC&OT 編において暗に定義されている静応力テンソルは式(3.1)である。また、現行の構造規則では、ホールド形状が左右非対称の場合、倉内圧の積分値の船幅方向成分が 0 にならない。
- 3) 構造規則の応力テンソルを基に、ホールド形状が左

右対称であることを前提に、倉内圧の積分値が慣性力と一致する陽な形の動的応力テンソル式(4.17)を示した。

- 4) 船幅方向加速度を与えた時の倉内圧の動的変動成分を規則による値と比較した結果、概ね一致しているが、ビルジホッパータンクの斜板における垂直応力が増大する結果となった。
- 5) 倉内圧の積分値は、提案手法では慣性力と一致する事が確かめられた一方で、現行規則では、本検討で想定したホールド形状に対しては、慣性力の0.8倍程度となることがわかった。

本研究の今後の課題は以下の通りである。

- 1) 実験や数値シミュレーションとの比較による妥当性の検証を行う。
- 2) 本検討では、調整代パラメータ $f, K_{ov}, K_{oh}$ の値は規則算式に即するよう設定したが、実験等から決定する必要がある。これとあわせて、強度用荷姿 $z_c$ の検討も行う。
- 3) 提案手法では角加速度による回転慣性力を考慮していないため、影響調査を行い、必要であればこれを考慮した動的応力テンソルを検討する。

#### 参 考 文 献

- 1) 倉本美男, 川本要次, 橋本州史: 鉦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) 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, 1999, pp.445-453
- 3) 田中義照, 佐久間正明, 安藤孝弘, 重見利幸, 原田実, 船越正泰: 粒状貨物による倉内圧の実験的検討(その2), 日本造船学会論文集, 第192号, 2002, pp.713-722
- 4) 日本海事協会: 鋼船規則 CSR-B&T 編 ばら積貨物船及び油タンカーのための共通構造規則, 2017
- 5) 山本義之, 浦環: 鉦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, 1975, pp.196-201
- 6) 吉川孝男, 前田正広, 江藤哲好: 個別要素方を適用した鉦石圧の数値解析的研究, 日本船舶海洋工学会講演解論文集, 第5W号, 2007, pp.53-56