(昭和 50 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

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)

正員 青 木 元 也*	正員 竹 本 博 安*
直 井 保*	正員 遠 藤 久 芳*
正員 橋 爪 豊*	正員 安 藤 文 隆*

Transverse Strength of Ore Carriers

(1st Report Behavior of the Ore Pellets in Cargo Hold)

by Genya Aoki, <i>Member</i>	Hiroyasu Takemoto, <i>Member</i>
Tamotsu Naoi,	Hisayoshi Endo, <i>Member</i>
Yutaka Hashizume, <i>Member</i>	Noritaka Ando, <i>Member</i>

Summary

Recently, several papers have been presented with respect to the behavior of iron ore pellets in cargo holds of ore carriers. However, the property of the behavior of ore pellets is so complicated that studies from various points of view are still thought to be necessary and effective to establish a practical procedure to compute the ore pressure in cargo holds.

In this paper, the behavior of the ore pellets in a hold is experimentally studied by means of two large scaled models of hulls and holds of two different ore carriers. As for the essential property of the stress-strain relations of ore pellets, a series of triaxial compression tests are carried out. A rather simple equation to calculate the ore pressure distribution in a hold after loading is derived using the earth pressure coefficient at rest which is determined according to the results of the triaxial compression tests. A set of nonlinear elastic springs whose characteristics are determined by the triaxial compression tests are introduced as a substitute for the ore pellets to calculate the interaction between the hull and the pellets. They are applied to calculate the increase of the ore pressure induced by wave loads on the side shells, where the hull is replaced by a frame structure.

1 ま え が き

鉱石運搬船に積載された鉱石の挙動に関して、すでにいくつかの研究が発表されている^{1~8)}。しかし、粒状体である鉱石ペレットの力学的性質は非常に複雑であり、また多くの因子によってその挙動は影響される。したがって、実用に供し得る鉱石圧計算法を確立するためには、多方面からのアプローチが必要であると考えられる。この報告では船体の大型構造模型に実際の鉱石ペレットを積載した実験を行ない、主として鉱石圧についての検討を行なった。

2 実験の概要

実験を行なった模型は 2 個であり、6 万トン級鉱石運搬船の中央部分での 1 ウイングタンク長さをとり、縮尺は 1/6.57 である。その主要寸法を図 1 に示す。トランスリングが 6 枚入っており、両端には横隔壁が付いている。この図は縦通隔壁が垂直な模型のものであるが、この他に傾斜したものについても実験を行なっている。そ

* 船舶技術研究所

それぞれのトランスリングの形状寸法を図2および図3に示す。これらの模型に、サイドガーダーの位置で支持した状態で、鉱石ペレット 40 トンを満載し船側から油圧ジャッキによって外荷重を加えた。実験の状況を図4の写真に示す。実験に使用した鉱石は平均直径約 11mm のマルコナ・ペレットである。

また鉱石ペレットの基本的性質を知るために三軸圧縮試験を行なった。その結果を図5に示す。この試験方法はゴムスリーブに入れた試料（直径 150mm, 高さ 350mm）に一定側圧を加えて保持し、次いで軸圧を定ひずみ速度（1.4%/min.）で加えて試料を崩壊に至らしめ、この間の軸圧、軸ひずみおよび体積ひずみを計測したものである。側圧は 0.4 kg/cm^2 から 2.8 kg/cm^2 まで 8 点を取り、各側圧について 3 回程度の実験を行ない、その平均値を図に示してある。この実験から得られた内部摩擦角は 42.3° であった。また別途行なった実験から鋼板との摩擦係数として 0.42 が得られた。三軸圧縮試験の初期状態および模型実験積み込み時における鉱石ペレットの見かけの密度は 2.25 g/cm^3 であった。

次いで、実験において鉱石圧の測定に使用したダイヤフラム型土圧計（外径 100mm, 受圧面径 70mm, 厚さ 20mm）の検定試験を行なった。これはメーカーにおける検定試験の状態とこで行なった実験の状態が異なるため、土圧計の較正係数に差が生ずることが考えられたからである。この結果、メーカーから提示された較正係数に対する修正係数として 0.69 が得られた。この内訳は受圧面以外の部分の出力感度に起因するもの 0.813, 土圧計と鉱石ペレットとの剛性の差によって生ずる応力集中に起因するもの 0.855 である。この後者についての実験結果の例を図6に示す。この図では荷重を 3 回増減させているが、荷重履歴によって応力集中の割合が変わっていることがわかる。しかし、荷重履歴のない場合についての応力集中の割合はほぼ一定とみなせる。上述の値はこの場合についての修正係数である。

3 積み込み時の鉱石圧分布

側壁が静止の状態にあるときの粒状体の横方向圧力は、側壁が変位し始めるときに生ずるいわゆる主働土圧よりもかなり大きいことが確認されている。静止状態における横方向圧力 p_n と垂直方向圧力 p との比 p_n/p を静止土圧係数 K_0 と呼んでいる。この静止土圧係数は粒状体の種類、間げき比等によってかなり異なった値を示し、たとえば砂についての実験から間げき比によって 0.35~0.75 の間の値をとることが報告されている⁹⁾。ここでは、静止状態に対する弾性理論の適用から導かれる次の関係を用いた。

$$K_0 = \nu / (1 - \nu) \quad (1)$$

ここで、 ν はポアソン比である。このポアソン比は三軸圧縮試験の結果から次式⁹⁾を用いて計算される。

$$\nu = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \right\} \quad (2)$$

ここで、 ε および $\Delta V/V$ は三軸圧縮試験における軸ひずみおよび体積ひずみであり、減少を正としている。この両者の関係を示したのが図7であり、これから軸ひずみの小さい範囲では両者の比は側圧 p の関数として次のように表わせる。

$$(\Delta V/V)/\varepsilon = 0.061p + 0.122$$

これを (2) 式に入れて

$$\nu = 0.439 - 0.0305p$$

したがって (1) 式から

$$K_0 = \frac{14.39 - p}{18.39 + p} \quad (3)$$

即ち、静止土圧係数は側圧 p の値に関係している。このことは船倉内に積み込まれた鉱石の表面からの深さによって K_0 の値が変わることを意味するが、以下の計算ではこれを一定として深さの中央における値を用いた。実験模型での鉱石表面と底面とにおけるこの K_0 の値の差は 4% 程度であるので、この近似による誤差は小さいと考えられる。

垂直壁の場合について、深さ h における単位幅の厚さ dh の薄い層に加わる垂直方向の力は図8のように表わせる。ただし、船体の長さ方向には平面ひずみ状態を仮定する。この図で μ は鉱石と側壁との摩擦係数、 γ は鉱石の見かけの密度である。垂直方向の力の釣合いから次式を得る。

$$l dp + 2\mu K_0 p dh = \gamma l dh$$

これを整理して

$$\frac{dp}{dh} + \frac{2\mu K_0}{l} p = r \quad (4)$$

これを $h=0$ において $p=0$ という条件を入れて解くと、

$$p = r \frac{l}{2\mu K_0} \left(1 - e^{-\frac{2\mu K_0}{l} h} \right) \quad (5)$$

側壁に加わる圧力は $p_n = K_0 p$ から求められる。

次に、傾斜壁の場合について、同様に深さ h における厚さ dh の薄い層に加わる力の釣合いを考えてみる。まず、図 9 (c) に示すような壁面に接する 3 角形部分については、

水平方向の釣合いから

$$(1 - \mu \tan \beta) p_n + \tau \tan \beta = K_0 p$$

垂直方向の釣合いから

$$p \tan \beta = \tau + (\mu + \tan \beta) p_n$$

ここで、 β は側壁の垂直からの傾斜角であり、その角度はあまり大きくなく、 $\tau_n = \mu p_n$ が近似的に成立する範囲とする。この両式から

$$p_n = \frac{K_0 - \tan^2 \beta}{1 - 2\mu \tan \beta - \tan^2 \beta} p \quad (6)$$

したがって、壁面から垂直方向に加わる力を R とすると、

$$\begin{aligned} R &= p_n \frac{dh}{\cos \beta} \sin \beta + \tau_n \frac{dh}{\cos \beta} \cos \beta \\ &= \frac{(K_0 - \tan^2 \beta)(\mu + \tan \beta)}{1 - 2\mu \tan \beta - \tan^2 \beta} p dh \end{aligned} \quad (7)$$

図 9 (b) に示すように厚さ dh の薄い層に加わる垂直方向の力の釣合いから、

$$l dp - 2 p dh \tan \beta + 2 R = r l dh$$

これに (7) 式を代入して整理すると、

$$\frac{dp}{dh} + \left\{ \frac{(K_0 - \tan^2 \beta)(\mu + \tan \beta)}{(1 - 2\mu \tan \beta - \tan^2 \beta) \tan \beta} - 1 \right\} \frac{p}{\frac{l_0}{2 \tan \beta} - h} = r \quad (8)$$

ここで、 l_0 は甲板面における船倉幅である。

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

とおき、 $h=0$ において $p=0$ という条件を入れて解くと、

$a \neq 1$ のとき

$$p = \frac{r}{a-1} \left(\frac{l_0}{2 \tan \beta} - h \right) \left\{ 1 - \left(1 - \frac{2 \tan \beta}{l_0} h \right)^{a-1} \right\} \quad (9)$$

$a=1$ のとき

$$p = r \left(\frac{l_0}{2 \tan \beta} - h \right) \log \frac{1}{1 - \frac{2 \tan \beta}{l_0} h} \quad (10)$$

(9) または (10) 式から垂直方向の圧力が求まるから、それを (6) 式に代入して側壁に加わる圧力が得られる。

船倉内に総重量 40 トンの鉱石ペレットを甲板高さまで積込んだときの、船倉長さ方向の中央部分における鉱石圧の分布を図 10 および図 11 に示す。図 10 は垂直壁の場合であり、3 回積込みを行なったときの計測値がそれぞれ示されている。各回での計測値にはかなりの差があるといえるが、土圧とくに静止土圧に関しては微視的な観点からの再現性は困難であることは従来から認められている。ここで行なった計算値を実線で記入してあるが、ほぼ計測値の平均を表わしているとみることができる。点線で示してあるのは寺本らによって導かれた実験式⁶⁾の値であり、ここでの計算値とかなり良く一致している。クーロンの主働圧の値を 1 点鎖線で示してあるが、その値は計測値の 1/2~1/3 程度となっている。破線で示してあるのが液体相当圧で鉱石ペレットの見かけ

の密度に表面からの深さを乗じた値である。内底板上におけるこの値とここで行なった計算式による値との差は側壁に加わる摩擦力によるものである。

傾斜壁の場合についての積込み時圧力分布を図 11 に示す。2 回積込みを行なったときの計測値がそれぞれ示されている。前図同様のバラツキがみられるが、その平均値はここで行なった計算値に近い値を示しているといえる。この実験からは垂直壁および傾斜壁に加わる圧力に関して明確な差は見られない。

4 船側荷重による鉱石圧の増加

鉱石を積載した船舶の船側から荷重が加わった場合、縦通隔壁は倉内鉱石のがわへ変位し、これによって隔壁に加わる鉱石圧は増加する。これを山本らは押込み圧と呼んでいる^{4,6)}。ここで、ある深さにおける鉱石の薄い層と三軸圧縮試験との対応を考えてみる。薄い層に垂直方向に働く圧力は三軸圧縮試験の側圧 p に相当し、また隔壁の変位によって生ずる押込み圧は軸圧力 q に対応し、隔壁の変位と船倉幅との比は軸ひずみ ε に相当する。船倉の長さ方向は平面ひずみ状態と考える。したがって、三軸圧縮試験から得られた応力-ひずみ関係をそのまま船倉内の鉱石に適用することはできないが、松岡は三軸圧縮試験から得られた応力-ひずみ関係において軸ひずみを 1/2 倍すれば、平面ひずみ状態の応力-ひずみ関係に等しくなることを理論および実験によって示している¹⁰⁾。

図 5 に示した応力-ひずみ関係を押込み圧の解析に用いるためにはこれを数式化する必要がある。そこで、前述の松岡の理論を考慮して、図 5 から軸ひずみと軸ひずみ・軸圧力比との関係を側圧 p をパラメーターとしてプロットしてみると図 12 に示すように線型関係にあることがわかる。これらの直線を

$$\varepsilon/q = a + b\varepsilon$$

と表わすと、係数 a 、 b は側圧 p の関数として次のように近似できる。

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1.071 \times 10^{-3}}{p + 0.218} + 0.0909 \times 10^{-3} \\ b &= \frac{0.429}{p + 0.574} - 0.0616 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

上式を用いて

$$\frac{q}{\varepsilon} = \frac{1}{a + b\varepsilon} \quad (12)$$

の関係を側圧 p をパラメーターとして表わしたのが図 13 である。軸ひずみは船倉幅方向に一樣であると仮定し、また隔壁の変位が両側でそれぞれ δ とし、船倉幅を l とすると、 $\varepsilon = 2\delta/l$ となり、これを (12) 式に入れると、

$$\frac{q}{\delta} = \frac{1}{\frac{la}{2} + b\delta} \quad (13)$$

となる。(13) 式は単位変位によって生ずる圧力を表わしており、スプリング係数に相当する。

次にここで行なった押込み圧の計算方法を述べる。図 14 に示すようにトランスリングを骨組構造にモデル化する。2 重底との接合部は 2 重底の曲げ剛性を考慮して回転弾性支持となっている。甲板高さにおけるスプリング係数 K は甲板のせん断剛性および他のトランスリングの位置に加わった荷重による強制変位を考慮して次のように定めた。いま検討するトランスリングの位置における甲板のスプリング係数を K' とし、その位置に荷重 P が加わったときの変位を δ_1 とする。したがって、 $P = K'\delta_1$ となる。また他のトランスリングの位置に同じ荷重 P がそれぞれ加わったときにおける検討中のトランスリング位置の甲板の変位を δ_2 とすると、等価スプリング係数は次のようになる。

$$K = \frac{P}{\delta_1 + \delta_2} = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} K'$$

また、図 14 に $k_1 \sim k_{12}$ として示す鉱石の挙動に等価なスプリング係数は次のようにして定めた。まず、表面からの深さ h に対して垂直方向圧力 p が(5)、(9)または(10)式から計算される。これを(11)式に入れて係数 a 、 b が求まり、さらにそれらを(13)式に代入すれば等価スプリング係数 $k = q/\delta$ が δ の関数として求まる。したがって、図 14 の計算モデルで、空荷の場合の変位 δ を初期値として繰返し計算を行なえば、与えられ

た外荷重に対して、トランスリングの変形および鉍石圧の増加量を計算することができる。

積荷鉍石が船体の動揺、振動等によって積込み当時に較べて締固まってくることが考えられる。締固まってくると上述の等価スプリング係数 k の強さが増すと予想される。この締固まりの影響を実験によって検討した。

図 1 に示す模型に鉍石ペレットを満載し、これを約 1 cm の高さから繰返し落下させ（最大加速度約 1.5 G）、締固まらせた。その結果を図 15 に示す。左下の図は落下回数によって等価スプリング係数が増大していく様子を示している。ここで k_0 は積込んだ直後における値である。40 回程度の落下で最密の状態になっていると考えられる。右上の図に示してあるのは 60 回落下させた後に船側荷重を加えたときの変化の様子であり、外荷重が小さい範囲では締固まりの影響が変化しているが、ある荷重以上では一定値となっているのがわかる。ここでの計算ではこの締固まりの影響が荷重によらず一定であるとした。この一定値となった荷重点に対して、側壁の深さ方向に締固まりの影響を表わしたのが右下の図である。この図からわかるように締固めによって、等価スプリング係数の強さは積込み直後に較べて、ほぼ 4 倍程度増大している。(13) 式または図 13 から k の増加は垂直圧力 p が増加したのと同じ効果によるものと考えられるので、ここでは締固まりの影響を垂直圧力 p の増加として押込み圧の計算を行なった。

上述の鉍石が締固まった状態の模型に船側荷重を加えたときのウイングタンクのフランジ応力および船倉内鉍石圧の増加量を図 16 に示す。計算値と実験値とはほぼ一致しているといえるが、ストラット高さにおける鉍石圧の実験値は計算値の 2 倍程度になっている。これはこの位置における土圧計がストラット基部の相対的に剛性の大きい箇所に取り付けられているため、他の位置における土圧計より大きな応力集中が生じているためではないかと考えられる。

ここで行なった模型実験では船体模型は縮尺されているが、積荷鉍石は実際のものを使用している。したがって積込み時の鉍石圧は実船に較べてかなり小さい。船側荷重による鉍石圧の増加すなわち押込み圧が実船においてどの程度になるかを推定するためには、模型実験における積込み時鉍石圧を実船のそれと同程度にしておく必要がある。この目的のために、ここでは満載された鉍石の上表面から荷重を加えた。このときの側壁における鉍石圧の計測値を図 17 に丸印で示す。実線で示す計算値は (9) 式から実船について求めた値である。この状態に対して船側から荷重を加えたときの応力および鉍石圧の増加を図 18 に示した。(13) 式を適用する際の垂直方向圧力 p は実船についての値を用いている。この場合にも計算値と実験値とはほぼ一致しているといえるが、ストラット近辺の鉍石圧の計測値は計算値よりやはり大きくなっている。

5 あ と が き

ここで行なった大型の船体模型による実験の結果に対して用いた計算方法は、船倉内に加わる鉍石圧の算定についてのひとつの簡便な計算法の指針となると思う。しかし、いっそう直接的に鉍石圧の実態を把握するためには実船における計測データが必要と考えられる。萩原、谷はこれについて貴重な資料を提供しているが¹⁾、ここでの実験結果からわかるように、鉍石圧の計測値にはかなりのバラツキがある。したがって、より実状に合った鉍石圧の計算法を確立するためにはもっと多くの実船計測が必要ではないかと考えられる。また、鉍石ペレットのような粒状体の圧力の測定方法にもまだ多くの問題があり、今後検討しなければならない課題であると思う。

最後に、この報告の実験は日本造船研究協会第 133 研究部会との共同研究として行なったものであり、部会長の東大山本教授を始め貴重なお討議を頂いた委員の方々および関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 萩原、谷：鉄鉍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（昭和 42 年）。
- 2) 八木順吉他：微粉鉄鉍石のスラリーを搭載する船倉の壁面にかかる圧力の研究，日本造船学会論文集，第 130 号（昭和 46 年）。
- 3) 山本善之他：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（昭和 47 年）。
- 4) 山本、清：鉍石船における鉍石押込み圧の理論的研究，日本造船学会論文集，第 134 号（昭和 48 年）。
- 5) 山口勇男他：鉍石圧について，日本造船学会論文集，第 135 号（昭和 49 年）。
- 6) 寺本 晋他：船倉に作用する鉍石の静的圧力の研究，日本造船学会論文集，第 135 号（昭和 49 年）。
- 7) 永元隆一他：船倉に作用する動的鉍石圧の研究，日本造船学会論文集，第 135 号（昭和 49 年）。

- 8) 山本, 浦: 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 (昭和50年).
- 9) 市原, 松沢: 壁変位中における土圧特性と裏込め砂のせん断特性の関連, 土木学会論文報告集, 第176号 (昭和45年).
- 10) Matsuoka, H.: Stress-Strain Relationships of Sands Based on the Mobilized Plane, Sands and Foundations, Vol.14, No.2 (昭和49年).

図1 実験模型の主要寸法

図2 模型のトランスリング(垂直壁)

図3 模型のトランスリング(傾斜壁)

図4 実験状況

図5 三軸圧縮試験

図6 土圧計検定試験

図7 軸ひずみと体積ひずみの関係

図8 鉱石の釣合 (垂直壁)

図9 鉱石の釣合 (傾斜壁)

図10 積込時の鉱石圧分布(垂直壁)

図11 積込時の鉱石圧分布(傾斜壁)

図12 軸ひずみと軸りずみ・軸圧力との関係

図13 軸ひずみと軸圧力・軸りずみとの関係

図14 計算モデル

図15 補固の影響

図16 船舶荷重による鉱石圧の増加(垂直壁)

図 17 実験についての積込み時鉱石圧の推定

図 18 船側荷重による鉱石圧の増加(破斜壁)