(昭和 46 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

微粉鉄鉱石のスラリーを塔載する船倉の 壁面にかかる圧力の研究

正員 八 木 順 吉* 網 干 壽 夫**
 正員 佐々木 芳 夫*** 正員 笹 井 裕 史***
 正員 船 岡 宏 一 郎*** 福 田 昭 三****
 正員 松 野 善 之**** 正員 松 尾 元 敬*****
 正員 堺 由 輝*****

Pressure Distribution on Hold Wall of Ore-Slurry Carrier

By Junkichi Yagi, *Member* Hisao Aboshi
 Yoshio Sasaki, *Member* Yuuji Sasai, *Member*
 Kōichiro Funaoka, *Member* Shozo Fukuda
 Yoshiyuki Matuno, *Member* Motonori Matsuo, *Member*
 Yoshiteru Sakai, *Member*

Summary

The pressure distribution on hold wall of ore-slurry carrier was experimentally studied under the following conditions :

- (1) Ore slurry to be taken on board at slurry consistency of 60% through 75% by weight.
- (2) Ore slurry to be subjected to the acceleration of 0.02 g through 0.3 g corresponding to the ship's vibration and motion.

The investigation shows that

- (1) Ore slurry shows the behavior of homogeneous liquid during loading.
- (2) After loading, ore gradually precipitates, and consolidates within a certain limit of acceleration of ship's motion and vibration and shows soil characteristics.
- (3) But so called phenomenon of liquefaction, that is, it loses shear strength and becomes in a state of liquid, is clearly observed above some acceleration limit.

The conclusion reaches that the ore slurry should be treated as homogeneous liquid when calculating the pressure distribution on hold wall and examining the ship's stability.

1 緒 言

最近、鉄鋼原料輸送費低下を目的として、大型の微粉鉄鉱石スラリー船が出現する気運にあるが、この種のスラリー船の設計に当つて船倉壁面に作用する圧力の大きさおよび分布が明確でないため、船倉の適確な設計ができない状態にある。

これは微粉鉄鉱石スラリー船は、タンカーやバラ積み船と異なり、次のような特殊な条件があるためである。

* 大阪大学 工学部
 ** 広島大学 工学部
 *** 三菱重工業(株) 長崎造船所
 **** 三菱重工業(株) 長崎研究所
 ***** 日本鋼管(株) 船舶基本設計部
 ***** 川崎重工(株) 基本設計部

(1) 重量比で 60~75% の微粉鉄鉱石を含有するスラリーは積荷の過程で、その微粉鉄鉱石が水と分離して船倉下部に沈降し、船倉壁面の圧力がスラリー流体圧から漸次、土圧に変化して、船倉下部の圧力が相対的に低くなる可能性があると考えられる。そのため船倉の設計圧力をいかに定めるべきかが明らかでないこと。

(2) 航海中に沈降したスラリーが船体振動、動揺等の動的効果によつて、船倉壁面の圧力分布に与える影響が明確でないこと。

このような疑問点を明らかにし、スラリー船の船倉設計指針を得る目的で、25 万トン級スラリー船の 1/20 模型船倉等を用い、スラリーの積荷後の挙動、船体振動、動揺の影響について諸試験を行つた。本稿は、これらの諸試験結果に基づいて、微粉鉄鉱石スラリー船の計画設計法につき考察を加えたものである。

2 研究 内 容

試験事項は大別して、スラリーの土質的性状を求めるための土質試験、スラリー積み込み時の挙動を対象とした静的試験および航海時の挙動を対象とした動的試験の 3 ケースに分けられる。これら諸試験の試験項目およびそれらの概略内容は次のごとくである。

(1) 土 質 試 験

沈降後、鉄鉱石スラリーは土質的性状を示すと考えられるため、その土質的な基礎性状を求めることを目的とした試験。

(2) 静 的 試 験

(i) 沈降圧密試験。船倉に荷積みしたスラリーの沈降圧密状況経時変化を知るため、スラリーを直径 0.6 m、高さ 10 m のパイプに塔載して、沈降および側圧の経時変化等を求めることを目的とした試験。

(ii) 船倉積荷試験。25 万トン級スラリー船の 1/20 模型船倉により積荷時および沈降時の船倉壁面に作用する圧力（主として側圧）の経時変化を求めることを目的とした試験。

(3) 動 的 試 験

(i) 振動試験。25 万トン級スラリー船の 1/20 模型で沈降終了後のスラリーに加速度 $0.02\text{ g} \sim 0.3\text{ g}$ の振動を与え、船倉壁面各部の圧力変化を明らかにすることを目的とした試験。

(ii) 動揺試験。前述 1/20 模型で沈降終了後のスラリーに動揺角 20° 周期 $2 \sim 7\text{ sec}$ の横揺を与え、動揺運動による船倉壁面各部の圧力変化を明らかにすることを目的とした試験。

3 土 質 試 験

試験に用いた微粉鉄鉱石は、通常ペレットフィードと呼ばれ鉄鉱原料の中では最も粒径が小さく容易にスラリー化しうるものである。スラリー積荷時の船倉側圧変化等を考える上で必要なスラリーの沈降圧密特性等を把握するため、三軸圧縮試験を含む諸土質試験を行つた。得られた諸性状の中から、おもな結果のみを次に示す。

- ・ 真 比 重 : 4.97
- ・ 液性限界値 : $10.7 \sim 10.8\%$
- ・ 塑性限界値 : $7.0 \sim 7.3\%$
- ・ 塑性指数 : $3.4 \sim 3.8$
- ・ 粒度分布 : 礫分 ($1.0 \sim 5.0\text{ mm}\phi$) 0%
- 砂分 ($0.05 \sim 1.0\text{ mm}\phi$) 22%
- シルト分 ($0.01 \sim 0.05\text{ mm}\phi$) $76 \sim 77\%$
- 粘土分 ($0 \sim 0.01\text{ mm}\phi$) $1 \sim 4\%$
- 最大粒径 0.25 mm

・ スラリー流化密度 : $2.8 \sim 2.9\text{ ton/m}^3$

・ $e=0.851$ において

$k=0.634 \times 10^{-5}\text{ cm/sec}$ 但し k : 透水係数

$C_v=0.591\text{ cm}^2/\text{sec}$ C_v : 圧密係数

$m_v=0.0107\text{ cm}^2/\text{kg}$ m_v : 体積圧縮係数

・ $e=1.16$ において

$k=3.473 \times 10^{-5}\text{ cm/sec}$

$C_v=0.137\text{ cm}^2/\text{sec}$

e : 間隙比

なお間隙比 e の定義は次の通り

$$e = \frac{V_v(\text{空隙の体積})}{V_s(\text{土粒子部分の体積})}$$

$$m_v = 2.53 \text{ cm}^2/\text{kg}$$

・ 3 軸圧縮強度

粘 着 力 $0.15 \sim 0.20 \text{ kg/cm}^2$

内部摩擦角 $e = 0.8$ において

39.5° (排水), 37.6° (非排水)

$e = 1.1$ において

26.0° (排水), 21.3° (非排水)

ただし、非排水時の内部摩擦角には、一部不飽和の影響があつたことも考えられる。

4 沈 降 圧 密 試 験

(1) 試 験 方 法

スラリー積荷時およびその後の船倉側面に作用する圧力の経時変化およびスラリーの沈降状況を知るためには、スラリーの積荷高さを極力実船のそれに近い状態で試験を行うことが望ましい。そのために直径 0.6 m、高さ 10 m の鋼管を用い、積荷速度、積荷濃度を実船の状況に合わせ、積荷高さを変えて試験を行つた。表 1 に、これらの試験条件をまとめて示す。

また、本試験計測項目、計測方法を表 2 に示す。図 1 には試験装置および側圧計測用土圧計の装着位置を合せ示している。

なお、上述のように直径 0.6 m のパイプを使用する場合、実船の船倉と比較して側壁の影響が大きいと懸念されるが、この種の沈降圧密現象においては、側壁効果により最終圧密値は異なるが、経時変化はほぼ同一となる。したがって、上述のごとき方法によつて今回の研究の目的は、充分達成可能と考えられる。

(2) スラリーの沈降圧密についての考え方

積荷されるスラリーの沈降圧密の挙動を積み込み中、積み込み完了後に分けて解析する。

(i) 積み込み中のスラリーの沈降圧密

この場合のスラリーの層厚変化状況等については Gibson の層厚漸増時の圧密解²⁾を適用しようと考えられる。Gibson によつて得られた時間係数と平均圧

表 1 沈降圧密試験の種類

積み込み速度 (m/min)	積み込み濃度 (%)	積み高さ (沈降後の値) (m)	備 考
0.084	62	4.4	積み込み速度は、次の実船における積荷条件より定めた
0.068	68	3.8	スラリー濃度 系統 積み込み速度
			60% 2 0.0912m/min
			70% 2 0.066m/min
0.131	71	0.62	70% 1 0.133m/min
			75% 2 0.056m/min
0.027	78	4.6	但し、微粉鉄鉱石積荷量を全量で、10,000 ton/hr とする

表 2 沈降圧密試験における計測項目及び計測方法

計 測 項 目	計 測 方 法
管 壁 側 圧	土 圧 計
スラリー層の水分	サンプリング及び中性子水分計
積み込みスラリー濃度	サンプリング

図 1 沈降圧密試験装置

図2 堆積過程および堆積後の粘土層の平均圧密度
Gibson (1958)

図3 堆積する過程での粘土層の圧密

密度の関係を図2に示す。ここで時間係数および平均圧密度は、それぞれ経過時間および圧密の進行度を無次元であらわしたものであるが、同図から明らかな様に時間係数が100近くもしくはそれ

以上の条件で積荷を行なった場合、平均圧密度はほぼ零に近いから積荷中、沈降圧密はほとんど進行しないことになる。

(ii) 積み込み後のスラリーの沈降圧密

積荷終了後のスラリーの圧密状況が、図5に示されているが、図5から明らかなごとく、この圧密では沈降をとまらなため、スラリー層厚の時間変化が通常の沈降をとまらな圧密に比較すると非常に大きい。また、このような圧密では、その過程で、透水係数や体積圧縮係数が著しく変化するため、通常の圧密とは様相を異にする。このような圧密に関しては、三笠の理論⁹⁾の適用が妥当と考えられる。この方法によつて得られた時間係数と圧密度の関係を図4に示すが、時間係数の平方根値と圧密度の関係は、ほぼ直線的になっている。

(3) 試験結果およびその検討

表1に示す諸試験の中の代表的な結果につき検討を行つてみる。図5にスラリー層厚の経時変化を、図6、図7にスラリー積荷時の側圧経時変化および側圧分布を、また、図8にはスラリー層底部における水分の経時変化をそれぞれ示す。

まず、図6、図7より側圧変化状況を見ると、次の結果が明らかである。すなわち (i) スラリー積み込み終了までは管側面には一様スラリーの流体圧が作用する。(ii) 積み込み終了後、スラリー層厚の変化に並行して、側圧はスラリーの流体圧から土圧に変化し、漸次減少して行く、そこで、前述の図2について、鉄鉱石スラリー積荷時の時間係数を求めてみる。表1の試験条件から、 $m=0.068 \text{ m/min}$ 、 $mt=h=7.55 \text{ m}$ (積荷終了直後のスラリーの高さ) また、土質試験結果より、圧密係数 $Cv=0.35 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とすると、 $T=246$ となる。したがつて、

図4 圧密度と時間係数の関係 ($\sqrt{T}$ 目盛り) (三笠, 1963)

図5 スラリー沈降圧密の経時変化

図6 沈降圧密試験における圧力の経時変化状況

図7 沈降圧密試験時の圧力分布状態

図8 沈降圧密試験における水分の経時変化

図9 沈降圧密試験における層厚の経時変化

図10 一次元圧密 ($u_1 = u_0 = \text{一定}$) のアイソクロン (Schiffman, 1960)

なお、表1に示すごとく、この沈降圧密試験は実船で想定される範囲で、積荷速さを変化させて行っているが、積荷速さによりスラリー層厚の時間的な変化および圧密層の水分変化にほとんど差異はみられない。

5 船倉積荷試験

スラリー積荷時の側圧変化については、4の沈降圧密試験によって、その考え方はほぼ明らかになっている。ここでは、スラリー積荷時の船倉各部の圧力分布および船倉形状（主として側壁傾斜角）と圧力分布の関係を明確にする目的で、図11に示す25万トンスラリー船の1/20船倉模型によりスラリーの積荷時の船倉側面圧力分布の変化を求めている。表3に試験条件を示す。

なお、図11に示す船倉模型は実船の船倉と幾何学的に相似であることは無論であるが、壁面の剛性も実船とほぼ相似とし、土圧の測定精度を極力あげるように配慮してある。図11には、船倉壁における土圧計装着位置があわせ示されている。また、実船におけるスラリー荷積み時の状況を考慮してスラリーを二回積みする場合もあわせ試験を行っている。これは荷積み時に体積濃度で70%を越える水分を鉄鉱石が沈降分離した後に排除し、さらに増積みする積荷方法を対象としたものである。

このような条件で行った試験結果につき図12～図16に側壁傾斜角 $8^\circ 30'$ での圧力経時変化および圧力分布を、図17に傾斜角 23° での圧力分布を、また、図18、図19には二回積み時の圧力分布を示す。これらの諸試験結果を見た場合、積荷時およびその後の沈降圧密に関しては、前述沈降圧密試験で既に検討を行っているが、本試験の結果もそれと同様な結果になっているので、ここではそれ以外の項目についての考察を行う。

このような積荷条件では積荷中は圧密は、ほとんど進行しないことになるから、上述の積荷中管側面が一様スラリーの流体圧になる現象が充分理解できる。

したがって、微粉鉄鉱石スラリーではスラリー積みした直後の側圧は一様スラリーの流体圧と考えておく必要がある。これは後述の船倉模型による試験からも同様な結果が得られている。

図5中の2つのケースにつき前述の三笠の理論に基づき、スラリー層厚の時間変化を求め図9に示す。さらにこの結果から圧密係数を求めて図9に示したが、それぞ

れ2つのケースにおけるスラリー層厚変化時の圧密係数は比較的近い値となり、鉄鉱石スラリーの沈降圧密に関しては、三笠の理論が充分に適用できることがわかる。

また、この層厚の変化と関連して図8に示す圧密層の水分変化を見ると、積荷直後におけるスラリー面の沈降速度がかなり大きいことに比較して管底近くの層では積荷直後は圧密の進行が極めてゆるやかである。これは図10に示すTerzaghiの圧密理論の解を見ると明らかな様に堆積層の底面部ではその初期において、圧密がなかなか進行しないが、この結果と定性的に良く一致している。

図 11 船倉模型図

図 12 船倉積荷試験における圧力の経時変化 (その 1)

図 13 船倉積荷試験における圧力の経時変化 (その 2)

図 14 船倉積荷試験における圧力の経時変化 (その 3)

表 3 船倉積荷試験の種類

積み込み速度 (m/min)	積み込み濃度 (%)	積み高さ (沈降後の値) (m)	備 考
0.06	60	0.75	側壁傾斜角=8°30'
0.058	68	0.76	"
0.11	70	0.77	"
0.055	73	0.81	"
0.053	65	0.67	側壁傾斜角=8°30' 2回積み試験
0.086	71	0.86	側壁傾斜角=23°

図 15～図 17 の結果から側壁傾斜角と土圧係数の関係を求めて図 20 に示している。図 21 には側壁傾斜角と Coulomb 主働土圧係数 (次式参照) の計算値と実測値の比較を示している。

$$P_A = \frac{1}{2} K_A \gamma H^2$$

ただし

P_A = Coulomb 主働土圧

γ = スラリー堆積層の密度

H = スラリーの堆積高さ

K_A = Coulomb の主働土圧係数

これらの結果を見ると、(i) 土圧係数は側壁傾斜角 23° で 0.68 である。(ii) 実測値は Coulomb 主働土圧よりも大きい。これらの中で(ii)については、荷積み後のスラリーはその変形が充分進んでいないため、主働土圧に至らず静止土圧に近くなっているためと考えられる。

図 15～図 16 に隔壁および底面の圧力分布を示す。これらの結果を見ると船倉底面の側壁および隔壁に近い位置では積荷終了後の圧力変化が側壁の圧力変化と同じ傾向を示している。これはこれらの部分における圧力変化が側壁面等

図 15 船倉積荷試験時の圧力分布 (その 1)

図 17 船倉積荷試験時の圧力分布 (側壁傾斜角 23°)

船体振動がスラリー層の圧密および船倉壁面におよぼす圧力に与える影響を調べるために、図 11 に示す船倉模型を図 23 に示す振動台に載せ、振動試験を行った。表 4 にその試験条件を示す。この試験では、振動の加速度がそのおもな試験条件となるが、これは後述するような理由によつて実船の場合よりも大きな値を採用している。

図 24, 図 25 に加速度 0.1 g, 図 26 には 0.18 g での圧力分布を、また、図 27 には加速度での側壁圧力の経時変化を示している。これらの諸結果を見ると、振動の加速度が 0.18 g 以上では、側壁圧が著しく増大している。これは明らかにスラリー層が振動によつて流砂現象を起しているものと考えられる。それは図 26 で、加速度 0.18 g における倉内圧力が一様スラリーの流体圧にほぼ等しくなっていることから充分裏づけられる。このように流砂現象を生じると倉内圧力が土圧から一挙に流体圧に増大する。また、航海中 0.18 g 程度の加速度は船体の諸運動を考えると、生じ得る可能性があり、実船の計画にあつては、流砂現象を生じる限界加速度

図 16 船倉積荷試験時の圧力分布 (その 2)

における摩擦によるアーチ効果の影響を受けているためと考えられる。

図 18, 図 19 の二回積みの場合の船倉壁圧は各回におけるスラリー圧、土圧を重ねたものに等しくなっている。したがつて、二回積み時の壁圧は荷積みの条件が明らかになつていれば、計算により求めることができる。

図 22 には船倉深さ方向のスラリー密度 (スラリー濃度) を数値積分によつて求めた結果が試験値と比較して示されているが、これらの両者は、ほぼ一致している。このように静的な圧密過程では、スラリー濃度の船倉深さ方向の分布の概略値が計算によつて比較的容易に求められる。

以上の諸結果を用いれば、スラリーの土質的基础性状、積荷条件、船倉形状が既知の場合、スラリー積み込み時およびその後における船倉各部の壁面圧力分布および水分分布が計算によつて容易に求め得ることになる。

6 振動試験

船体振動がスラリー層の圧密および船倉壁面に

図 18 船倉積荷 2 回積み試験における側圧経時変化

図 19 船倉積荷試験時の圧力分布 (2 回積み時)

図 20 船倉側壁傾斜角と土圧係数の関係

図 21 側壁圧実測値とクーロン土圧の比較

図 22 船倉積荷試験における船倉内水分分布

図 26 振動試験における圧力分布の経時変化

図 27 振動試験における圧力分布状態
($\alpha = 0.18g$)

図 28 振動の加速度と側圧の関係

図 29 動揺試験装置図

た場合の船倉壁面圧力分布変化、荷崩れの有無を調べる目的で、図 11 の模型船倉を用いて動揺試験を行った。図 29 にその試験装置を、表 5 に試験条件を示す。本試験では実船の運動への対応条件として、動揺加速度と振幅を考慮している。横揺角としては実船で考えられる最大値に近い 20° を、横揺周期は動揺の加速度が実船と同一になる様に、次式により、試験範囲を約 2~7 sec と定めた。

$$L_s/T_s^2 = L_M/T_M^2$$

ただし L : 船倉長さ

T : 横揺周期

S : 実船を示す Suffix

M : 模型船を示す Suffix

なお、25 万トン級のスラリー船の横揺周期を推定すると約 15 sec 前後であるが、その場合の模型の動揺の周期は前式により 3.35 sec となつて前述の試験範囲に充分含まれることになる。

図 30 動揺試験における最大圧力経時変化 (その 1)

図 31 動揺試験における最大圧力経時変化 (その 2)

表 5 動揺試験の種類

積み込み高さ (m)	周期 (sec)	備 考
0.79	2	船倉傾斜角= $8^\circ 30'$ 動揺の振幅= 20° (片振幅)
0.82	4	"
0.67	6.7	"

試験結果として、図 30、図 31 に動揺運動中の船倉壁各部分における圧力の経時変化を、図 32、図 33 には船倉各位置での動揺運動による圧力変化状況を示す。これらの諸結果を見ると動揺により、船倉側壁の圧力は静止時の約 2 倍近い値を示している。一方、船倉隔壁および底部の圧力変動は側壁にくらべ小さい。そこで、このような結果が生じた原因について考えてみる。

この動揺試験は前述の振動試験と同様に模型船倉にスラリーを積み込んだ後、微粉鉄鉱石が沈降し各部の土圧がほぼ一定値に落着いた状態で上水を抜き行っている。そのような状態で動揺を与えるとスラリーは表面から見たところ、ほぼ一様に流動化して、あたかも全体が均一な高粘性流体であるかのごとき性状を呈してくる。そのため、流動化したスラリーの自由表面は動揺により時間的に変化する。このような場合、船倉に働く圧力として次のものが考えられる。

- (i) 船体静止時に船倉に働く静水圧
- (ii) 船体動揺により自由表面の形状が変化することによる変動静水圧
- (iii) スラリーの慣性力による変動動水圧

図 32 に (i) および (ii) による圧力の計算結果を示している。計算値と計測値とを比較すると、計測値が若干大きい、近似的には良い一致をみている。

したがって、一応の目安として沈降圧密が終了したスラリーが動揺を受けた場合、船倉壁面の圧力分布は積荷が完全に流動化したと考え、自由表面の変化に伴う積荷高さの変化を考慮して求めることができる。しかし、動揺時の側圧測定値がこの様な静的な値よりも多少大きいので、次に、上記 (iii) による変動圧力に関し検討を加えてみる。今、動揺運動によつて流動化したスラリーを密度が高い様な完全流体とみなすと、SR 部会報告書 62 号⁴⁾ により動揺時の側壁圧変化を計算することができる。図 34 において船倉が点 O を中心にして動揺すると考えその動揺角を θ とすると、

$$\theta = \Theta \sin \omega t$$

Θ : 最大振幅 ω : 円振動数

また、速度ポテンシャルを ϕ 、圧力を P とすると、Bernoulli の方程式より次の関係が得られる。

$$P/\rho = \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} q^2 - gy - F(t)$$

ここで ρ : 液体の密度

q : 流速

$F(t)$: 積分定数で時間のみの関数

上式より次の結果が得られる。

$$P/\rho = P_1 - P_2 \sin \omega t - P_3 \sin \omega t$$

ここで P_1 : 初期静水圧

P_2 : 傾斜静水圧

P_3 : 流動水圧

上式の最終項 P_3 が前述の変動圧を示しているが、この P_3 の値を具体的に計算している。

$$P_3 = \frac{1}{2} \rho h \Theta \omega^2 \left[\frac{1}{2} + \eta + \frac{K-H}{h} - \frac{\pi}{4} \frac{\sinh \lambda(\eta_0 + \delta) + \sinh \lambda\left(\frac{1}{2} - \delta\right)}{\frac{\lambda}{2} \cosh \frac{\lambda}{2}} \right]$$

上式によつて求めた P_3 の値を静水圧と共に表 6 にまとめて示す。この表 6 の結果を見ると明らかに流動水圧は動揺周期が大きい場合には無視しうるオーダーであるが、動揺周期が小さくなると全圧力の 10% におよぶこともある。なお、表 6 には、前式によつて求めた全圧 P と計測圧を比較しているが、両者はほぼ一致している。

図 33 動揺試験における圧力分布 (その 2)

図 32 動揺試験における圧力分布 (その 1)

図 34 動揺運動計算の記号

表 6 動揺運動時に船倉側面に作用する圧力

壁圧測定位置	初期静水圧 +傾斜水圧 (kg/cm ²)	流動水圧 (kg/cm ²)	初期静水圧 +傾斜静水圧 +流動水圧 (kg/cm ²)	実側値 (kg/cm ²)	動揺周期×積荷高さ ×動揺の加速度
10	0.253	0.014	0.267	0.264	2 sec×0.79 m×0.23 g
11	0.199	0.024	0.223	0.212	
12	0.144	0.026	0.170	0.146	
13	0.090	0.027	0.117	0.100	
10	0.265	0.003	0.268	0.250	4 sec×0.82 m×0.06 g
11	0.211	0.005	0.216	0.201	
12	0.156	0.006	0.162	0.140	
13	0.102	0.006	0.108	0.098	
10	0.218	—	0.218	0.180	6.7 sec×0.67 m×0.02 g
11	0.164	0.003	0.167	0.164	
12	0.109	0.003	0.112	0.104	
13	0.055	0.003	0.058	0.044	

(注) ○位置 10～13 は船倉側面上の位置を示すが、その位置については図 11 参照
 ○上記加速度は船倉底コーナー部での値を示す。(図 30 参照)

以上に述べた動揺運動時の諸現象は、積荷したスラリーの静的沈降が一応終了した後上水を除去した状態で動揺を与えた結果、得られたものであるが、実船においても出航後ほどなく（まだ動的圧密が進まない状態で）台風等に遭遇し、船が動揺運動を行なうとこれと全く同様な現象が生じると考えられる。したがって、実船の設計にあたっては、この動揺時の側圧増加および荷崩れによる船の安定性等を充分考慮する必要がある。

8 鉄鉱石スラリー船の計画設計について

以上の諸試験結果をもとにして微粉鉄鉱石スラリー船の計画設計方針をまとめると次のようになる。

(1) 復原性

既存のスラリー船における輸送では、航海中に圧密脱水が進行し、固体の性状を示したといわれている。一方、本試験によるとスラリーにて積み込みを行つた微粉鉄鉱石は積み込み沈降完了後、上澄水を抜いた後でも動的圧密が進行していない状態で、時化に遭遇すると、再流動化して液体の性状を示すことが明らかとなった。したがって、復原性の検討はこの結果を加味し、スラリー比重をもつ流体として行うべきであると考ええる。

(2) 船殻強度

今回の実験結果から、船倉に働く外力は次の二つが考えられる。

(i) 積荷時：積み込み時の比重で水頭を船倉頂部まで取り液体圧で計算

(ii) 航海中：スラリー沈降後、上澄水を除去した状態での比重を有する液体圧+運動による増分で計算

これらの外力のどちらが大きくなるかは、個々の設計船の積荷方法（追積みの有無）船倉形状および船の運動性能により異なると考えられ、さらに設計条件としては、これらの状況に対する許容応力を入れて判断する必要がある。しかしながら、

- 1) 今回の実験結果からもうかがわれるように通常の適当に設計されたスラリー船では、外力は (i) の方が大きく (ii) は (i) でほとんどカバーできる。
- 2) また、液荷重の場合、各国の船級協会のルールは (i) をベースに決められており、(ii) の変動荷重による影響は各部材のルール算式にある程度考慮されている。

したがって、現段階では設計条件としては、外力として上記 (i) を採用し、比重の大きな液体を塔載する船の設計という見地より、各国船級協会の Tanker or Deep Tank Rule を準用すれば良いと考える。

9 結 言

微粉鉄鉱石のスラリーを塔載する船倉強度の考え方を明らかにする目的で、スラリー積荷時の船倉壁面に作用

する圧力分布の過渡的变化状況および船体振動、動揺の船倉壁面圧力分布におよぼす影響を知るべく、25 万トン級実船の 1/20 大きさ模型船倉等を用いた一連の模型試験を行つた。その結果をまとめると次のごとくである。

(1) 微粉鉄鉱石は真比重 4.97、粒度はシルト分が 70% で比較的小さい。また、塑性指数は 3.4~3.8 で土質的には粘土よりも砂に近い。

(2) スラリーの積荷開始から積荷終了までは、沈降圧密はほとんど進行せず、船倉側壁部には一様スラリーの流体圧が作用する。

(3) 積荷後のスラリーの沈降圧密による沈下量は経過時間の平方根にはほぼ比例し、三笠の理論を適用することができる。

(4) スラリーの沈降圧密が進行して壁面に作用する圧力が、ほぼ一定値の土圧になつた時の土圧係数は側壁傾斜角に比例して増大する。側壁傾斜 $8^{\circ}30'$ で、その値は約 0.54 になる。この値は Coulomb の主働圧係数の 1.65 倍である。

(5) 沈降圧密の終了したスラリーに約 0.16 g 以上の加速度の上下振動を与えるとスラリーは流砂現象をおこし船倉側壁圧は静止土圧から一挙に流体圧へ変化する。

(6) 船体動揺による加速度が 0.2 g 程度になると、沈降圧密が終了したスラリーは再流動し、船倉側壁圧は流体圧になる。

(7) 鉄鉱石スラリー船の計画設計にあつては、試験結果から

(a) 動揺運動による流動化については留意する必要があるが、一般に適当に設計されたスラリー船では外力として積荷時の一様スラリーの流体圧をとり、Tank or Deep Tank Rule に準じて設計すれば良いと考える。

(b) 動揺運動時の流動化を考慮して、復原性の検討を行う必要がある。

なお、以上の諸結果は鉄鉱石スラリー船と類似の構造を有するサンドキャリアーにもそのまま応用し得るが、特に流砂現象については、全く同様な現象が生じ得ると思われるので、その設計にあつては、これら諸結果を充分参考にする必要がある。

最後に本研究の実施にあつて、種々ご指導ご討議頂いた三菱重工岡部博士に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Monden, H. (1969) : Characteristics of Side Friction in the One-dimensional Consolidation, Soils and Foundations, 9—1—11.
- 2) Gibson, R. E. (1958) : The Progress of Consolidation in a Clay Layer Increasing in Thickness with Time, Geotechnique, 8—171.
- 3) 三笠正人 (1963) : 軟弱粘土の圧密, 鹿島出版会.
- 4) SR 62 号「長大油槽における荷油の運動および制水隔壁の効果に関する研究」.