含水微粉精鉱の移動性に関する基礎研究

松 尾 俊 彦*

A Fundamental Study on the Shifting of Concentrates

Toshihiko MATSUO

Abstract

Recently there have been reported on casualties caused by the shifting of their cargoes in conventional vessels carrying concentrates in bulk. IMO has been considering the conventional vessels should carry concentrates having a moisture content not in excess of the transportable moisture limit.

In this connection, the author prepared the Pyrite in test box fixed on a shaking table and measured the soil pressure, the change of moisture content. And some fundamental results on the shifting of concentrates were obtained through these experiments.

As a result, the shift of concentrates may occur due to the liquefaction and the movement of moisture contained in their cargoes by consolidation which is generated by ship's vibration and motions.

1. は じ め に

近年一般船舶による含水微粉精鉱 (Concentrates) のばら積み輸送中における海難がみられ、この多くの原因は、その水分値 (含水比) によるものとされている。我が国においては、この水分値は「穀類その他の特殊貨物船舶運送規則」の第2章において規制されているが、IMOのB. C. Codeにおける「運送許容水分値 (Transportable Moisture Limit : T. M. L.)」の概念の導入を検討中である。

含水微粉精鉱の移動性に関する報告としては、渡辺⁽¹⁾が波浪衝撃等の影響により含水微粉精鉱の水分が貨物表面上に遊離するものとして論じているものがあるが、この方面の研究は非常に数少ない。

このような観点から本研究は、まず取り扱い易い Iron Sand を用いて予備実験を行ない、この結果をもとに含水微粉精鉱の一つである Pyrite を用いて、水平・垂直振動および動揺装置による Rolling 加速度を与え、土中の水分変化、また内部土圧の変化を測定することにより、その移動性について検討を加えたものである。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験試料

実験に用いた Iron Sand と Pyrite の基礎的性状と粒径加積曲線をそれぞれ表1、図1に示す。なお Pyrite の F. M. P. (Flow Moisture Point) および T. M. L. は、IMO の F. M. P. test ⁽²⁾ による実測結果である。

この二つの試料における粒度組成を見ると、Iron Sand が 0.42~0.074mm の粒子が全体の86%を占めるのに対し、Pyrite ではその73%が 0.074~0.005mm のシルト分であることから、それらの透水性に大きな隔りがあると思われる。

2.2 実験装置

水平振動装置および垂直振動装置をそれぞれ図2、図3に示す。加速度の変化は、無段変速モータの回転数を

* 正会員 東京商船大学 (東京都江東区越中島2-1-6)

表1 資料の基礎的性状

	Iron Sand	Pyrite
比重 (Gs)	4.88	4.52
均等係数 (Uc)	2.20	2.12
曲率係数 (Uc')	0.95	0.79
最大粒径 (単位: mm)	2.000	0.420
60%粒径 (D_{60})	0.185	0.036
30%粒径 (D_{30})	0.120	0.022
10%粒径 (D_{10})	0.084	0.017
2 ~ 0.42 ^{mm} の粒子	8	0
0.42 ~ 0.074 ^{mm} の粒子	86	22
0.074 ~ 0.005 ^{mm} のシルト分	6	73
0.005 ^{mm} 以下の粘土分		5
F. M. P. (%)	—	7.9
T. M. L. (%)	—	7.1

図2 水平振動装置

図4 動揺装置

変化させることにより行ない、その範囲は水平が52~1,304 gal, 垂直が22~806galである。振幅はそれぞれ固定振幅であり、水平が1 cm, 垂直が0.2 cmである。

水平・垂直振動に加え、Rolling による加速度を与えるため動揺装置の動揺台に水平・垂直振動装置を載せて実験を行なったが、その動揺装置の概要を図4に示す。

図5に今回実験に使用した土圧計を示す。測定には背圧を検出しないように、土圧計と同径の丸形受台を作成

図1 粒径加積曲線

図3 垂直振動装置

図5 土圧計

図6 資料箱と土圧計の位置

し、これを土圧計に取り付けた。また図6に試料箱と土圧計の設置位置を示す。ただし Iron Sand については、水平用土圧計は底面から5cmと8cmのところに設置した。また垂直用土圧計は水平用土圧計と同位置に取り付けるべきであるが、その相互影響を考慮して5cmほど離して測定した。試料箱はアクリル製で、実験中の試料の変化を目視観測できるようにした。

2.3 実験方法

片田ら⁽⁹⁾の報告によれば、砂層地盤が軟化あるいは液状化すると、内部に大きなひずみ応答がみられることを塩ビパイプを用いることで指摘しているため、本研究では土圧計を試料内部に設置し、試料が加速度による圧密を受けた際の土圧の変化をビジグラフに記録した。

試料に与える加速度は、船体振動がプロペラの回転によるものと考え、その回転数を毎分100回転、翼の枚数を5枚とし、その振動の振幅を0.1~0.5cmとすると、加速度は274.2~1,370.8galとなるため、この範囲内とした。

試料については、予め含水比を測定したものを用意し、これを試料箱にできるだけ均一となるように入れ、重量等から間ゲキ比を求め、これを一つの目安として各実験の試料の均一化を計った。

Iron Sand の水平振動実験では、試料の厚さを10cmとし、底面から5cmの位置に水平・垂直土圧計を設置し、それぞれ水平土圧 σ_h 、垂直土圧 σ_v を測定した。また同じ深さの試料箱側面に直径1cmの穴をあけ150メッシュの金網を取り付けて、水圧計（土圧計を利用）を設置した。この水圧は、間ゲキ水圧ではないが、試料が不飽和であるため、飽和した際の一つの目安とした。Iron Sand を用いたもう一つの実験は、試料の厚さを12cmとし、試料表面から4cmの深さの水平土圧 σ_2 、7cmの深さの水平土圧 σ_1 を測定した。

Pyrite による実験では、実船にばら積みされる含水微粉精鉱の含水比が、野積みされたものからいくつかの Sampling を行ない、それらの含水比の平均値を用いていることから、船倉内の含水比が不均一であり、内部に比較的含水比の高いものがあることを想定し実験を行なった。したがって、Pyrite の含水比は10.5%前後のものと、5%前後のものを用意し、これらを6cmずつの二層に分けて積み付け、試料表面から3.5cmの表層部の水平土圧 σ_2 と、7cmの深さの水平土圧 σ_1 を測定した。なお垂直土圧については、Iron Sand の実験により大きな変化がみられないことにより、また水圧については透水性が悪いことにより、水平土圧のみを測定した。したがって、最初に Iron Sand 同様水平振動実験を行ない、次に動揺装置の動揺台に水平振動装置および垂直振動装置を載せ、試料表面に平行な加速度 a_i 、試料表面に垂直な加速度を a_n とすると、 a_i/a_n ができるだけ等しくなるように、Roll 角 $\theta_r=12.0^\circ$ 、動揺周期 $T_r=3.33\text{sec}$ を合成して試料に与え、その際の水平土圧 $\sigma_1 \cdot \sigma_2$ を測定した。これと平行して、試料の厚さを12cmとし、水平・垂直振動加速度を3時間与えて含水比の変化も測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 Iron Sand の水平振動実験

図7は、含水比11.8%の試料を間ゲキ比1.29の状態に準備し、これに水平加速度759.4galを与えた結果であるが、水平土圧 σ_h と水圧 p の上昇に相関のあることがわかる。これは試料が水平加速度により圧密を受け飽和した際、軟化あるいは液状化が発生し、有効応力が減少したためにセン断強さも減少し、 σ_h が上昇したと思われる。しかし、Iron Sand の透水性が非常に良いため、短時間に過剰間ゲキ水圧は上方へ逸散し、有効応力の回復とともに σ_h は下降し一定値に落ち着いている。

図8は、含水比12.9%の試料を間ゲキ比1.16として、水平加速度を最初438.7gal、途中から621.7galとした結果である。438.7gal では、水平土圧 σ_h は

図7 Iron Sand の水平振動実験

図8 Iron Sand の水平振動実験

下降して一定値となり、水圧 p も零であるのに対し、621.7 gal では図7と同様の傾向がみられる。

図9, 図10は、試料の厚さを 12cm として、試料表面から 7cm の深さの水平土圧 σ_1 と水圧 p , 4cm の深さの σ_2 を測定した結果である。図9の σ_2 は図7・図8と同様に p の上昇とともに上昇している。ただし最大値が図7と比較すると少し低いのは、土圧計の位置が表面から 1cm 浅いためと思われる。

σ_1 は加振後減少して一定値となっているが、これを見る限り σ_1 の計測位置では液状化の発生はみられない。一般に、液状化は粒子間応力の低い表層から下層に進行し、過剰間ゲキ水圧の逸散とともに下層から安定していく。したがって、図9の場合、Iron Sand の比重が大きいことや透水性が良いため、 σ_1 の計測位置まで液状化が進行しなかったものと思われる。

図10は、最初 621.7 gal の加速度を与え、途中から 759.4 gal の加速度を与えた結果である。621.7 gal の加速度では σ_1 ・ σ_2 の上昇はみられないが、759.4 gal で液状化が発生したことがわかる。また σ_1 も上昇しており、この場合は中層部まで液状化が進行したものと思われる。

このように土圧計を用いることで、振動中の試料の液状化の発生を判断できるため、これを Pyrite に適用した。

3.2 Pyrite の振動実験

図11は、含水比 5.1% の Pyrite を 12cm の厚さとし、438.7 gal と 621.7 gal の水平加速度を与えた結果である。含水比が F. M. P. 以下という低い状態であったため、 σ_1 ・ σ_2 の土圧はほぼ一定な値で、軟化あるいは液状化に伴う上昇はみられない。目視観測においても移動は認められなかった。

図12は、含水比 10.5% の Pyrite を 12cm とし、438.7 gal の水平振動加速度を与えた結果である。表層部の水平土圧 σ_2 にやや上昇部分がみられるが、目視観測では加振後約 20 秒で表面が軟化し始め、これが徐々に下層に進行した。加振後約 21 分で σ_1 と σ_2 の値が逆転しているが、目視観測でもこの時間で軟化が σ_1 の土圧計附近に達した。この実験終了後、直ちに表面・中層・下層と Sampling を行ない含水

図9 Iron Sand の水平振動実験

図10 Iron Sand の水平振動実験

図11 Pyrite の振動実験 (水平)

図12 Pyrite の振動実験 (水平)

図13 Pyrite の振動実験 (水平)

比を測定したところ、表面が10.7%，中層が10.5%，下層が10.3%であった。したがって、圧密により間ゲキ水は表層部へ移動したことがわかる。

図13は下層を10.1%，上層を4.8%の含水比の二層に分け、438.7galの水平加速度を与えたが、ほとんど変化が見られないので17分後から621.7galに加速度を増加した場合の結果である。 $\sigma_1 \cdot \sigma_2$ とも621.7galの加速度で大きく上昇しており、その後徐々に減少している。目視観測では、621.7galにして40秒後より上層が下層との境界を滑動面として層的な移動を始めた。 σ_1 については、621.7galの加速度により下層の上部が軟化あるいは液状化により移動したため大きく上昇し、その後圧密によって移動しにくくなったために減少したものである。また σ_2 は、上層と下層との境界部が軟化あるいは液状化することにより、その部分のせん断強さが減少し、その境界部を滑動面として層的な移動を生じたために大きく上昇したものである。したがって、このような σ_2 の上昇に着目して実験を進めた。

図14・図15は下層の含水比が高く、上層の含水比が低い状態において、438.7galの水平加速度を与えた結果であるが、 σ_2 についてはIron Sandの場合と似かよったものとなった。図14の場合、目視観測では加振後約1分で上層が下層との境界面を滑動面として層的な移動を始め、この時間は σ_2 が上昇し始める時間とほぼ一致した

図14 Pyrite の振動実験 (水平)

図15 Pyrite の振動実験 (水平)

ものとなった。また図15についても同様な結果となった。表2は下層の含水比が10.5%，上層が5.2%のものに438.7galの水平加速度を3時間与えた後、含水比の変化を測定したものであるが、下層が圧密され、間ゲキ水が上昇したために上層の下部が約2倍の含水比となっている。このような間ゲキ水の移動時に生じる液状化の発生が、図14・図15のように σ_2 の上昇を誘引し、上層の含水比が低いものでも層的な移動を生じるものと思われる。ただし図14の場合、上層が移動中に土圧計附近でひび割れを生じたため約1,000Paと小

表2 水平振動(438.7gal)による水分の移動

		振動前	振動後
上 層	表面	5.2	5.2
	下部		10.1
下 層	上部	10.5	8.2
	底部		10.0

(単位: %)

さな値で落ち着いたものとなっているが、図15の場合はひび割れを生じなかったため $5,000 P_a$ くらいとなった。したがって σ_2 の上昇が問題となり、減少してからの土圧の値は、移動中の上層の状態に大きく影響されることに留意しなければならない。

図16 Pyrite の振動実験 (水平)

図17 Pyrite の振動実験 (水平)

図16・図17は下層の含水比を低く、上層の含水比を高くし、438.7 galの水平加速度を与えた結果である。 σ_1 ・ σ_2 とも大きな上昇は見られず、またその値も $3,000 P_a$ 以下となった。これまでの結果からすると移動していないように見えるが、目視観測では、加振後試料表面は直ちに軟化し移動を始めた。下層は実験終了まで移動は認められなかった。ただし、下層の含水比が高い場合の上層の移動が層的な、いわゆる塑性的な移動であったに対し、この場合の移動は弾性的な移動のように見られ、これが σ_2 の値を小さいものに留めていると思われる。この土圧の大きさから見れば、下層の含水比が高い場合の方が、その移動性については規模の大きなものと考えられる。

次に、水平振動装置および垂直振動装置を動揺装置の動揺台に載せ、水平、垂直加速度に Rolling 加速度を合成して Pyrite に与えた。

表3にその加速度を示す。

図18は下層を9.8%、上層を5.4%の含水比のPyriteに水平加速度440 galとRolling加速度を与えた結果である。Rolling加速度を途中止めてみたが、下層の含水比が9.8%とやや低いものであったため、 σ_1 ・ σ_2 とも大きな変化は見られず目視観測においても変化は認められなかった。

図19は下層を10.5%、上層を5.4%の含水比とし、水平加速度とRollingを加えた結果である。 σ_2 は約1分後より大きく上昇してお

表3 動揺装置による加速度

	水平振動	垂直振動
	440.0 gal	588.0 gal
動揺半径 (cm)	247.2	251.5
動揺角 (deg.)	12.0	12.0
動揺周期 (sec.)	3.33	3.33
a_t (gal)	50.8	45.1
a_n (gal)	177.2	183.8
a_t/a_n	0.287	0.245

a_t : 土圧計上部の試料表面に平行に加わる加速度

a_n : 垂直

図18 Pyrite の振動実験 (水平+Rolling)

図19 Pyrite の振動実験 (水平+Rolling)

り、やはり液状化によるものと思われるが Rolling 加速度による顕著な影響はみられない。これは前述したように、上層が移動中にひび割れを起こすためと思われるが、もし試料箱が大きい場合は、粒状貨物の移動のように一方舷に大きく移動し、 σ_2 の値も Rolling により大きな値を示すのではないかとと思われる。 σ_1 については、やや Rolling の影響が見られる。

図20 Pyrite の振動実験 (水平+Rolling)

図21 Pyrite の振動実験 (水平+Rolling)

図20は下層を10.4%，上層を5.4%の含水比とした場合の結果であるが、 σ_2 については図19の場合よりは Rolling の影響が見られるものの、やはり大きな変化はしていない。 σ_1 については Rolling 加速度により約50%大きな値となっている。

図21は下層を5.4%，上層を10.4%の含水比とした場合の結果である。図1・図17と比較すると、 σ_1 については Rolling 加速度の影響が若干見られるものの顕著な変化はない。 σ_2 については、図16・図17が2,000~3,000 P_a であるのに対して、Rolling 加速度が加わったことで約5,000 P_a となっているが、図19・図20のような大きな値にはなっていない。やはり弾性的な移動によるものと思われる。

図22は下層を10.4%，上層を5.4%の含水比とし、垂直加速度588.0 gal と Rolling 加速度を与えた結果である。また図23は、上層と下層の含水比を逆にした結果である。図23では、 σ_2 が約6分で σ_1 と逆転しているが、

図22 Pyrite の振動実験 (垂直+Rolling)

図23 Pyrite の振動実験 (垂直+Rolling)

両図とも $\sigma_1 \cdot \sigma_2$ の値は2,000 P_a 以下と小さく、また目視観測においてもほとんど変化は認められなかった。したがって、今回の実験における移動性については、垂直加速度より水平加速度の方が影響が大きいと思われる。

4. お わ り に

これまで含水微粉精鉱の荷崩れについては、船倉内の含水比が高く、波浪衝撃あるいは船体振動によって貨物が圧密され、間ゲキ水が貨物表面上に遊離し、その自由水の影響や、貨物表面が比重の高い液体状となるために

生じるものと考えられてきたが、今回の実験により、このような状態になる前、すなわち間ゲキ水が貨物上部へ移動する過渡の状態でも移動し得ることが明らかとなった。今回知り得たことを要約すると次のようになる。

(1) 下層の含水比が高く、上層の含水比が低い場合、水平加速度により下層が圧密され、軟化あるいは液状化が発生した場合は、上層の移動は層的な移動で、その移動開始時間は水平土圧 σ_2 の上昇時間とほぼ一致する。

(2) 上層の含水比が高く、下層の含水比が低い場合、軟化は表面から下層へ進行し、その移動は弾性的であり、水平土圧 σ_2 は(1)の場合より小さい。

(3) 試料が同一の状態の場合、その移動性に関しては、垂直加速度より水平加速度の方が影響が大きい。

(4) 今後は、含水微粉精鉱の T. M. L. ・ 間ゲキ比等と振動加速度の関係を明らかにする必要がある。

最後に、本研究に当り御助言いただいた東京商船大学西山安武教授、実験に際し御協力いただいた東京商船大学平野勇氏、また試料提供に御協力いただいた同和工業、辰巳倉庫様に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 渡辺恵弘：自由表面補正の力学的意義と粘性流動貨物運搬船の不安定について，造船協会誌第419号，昭和39年7月
- (2) IMO : Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes, London, 1980
- (3) 片田敏行，伯野元彦：液状化過程における地中構造物の動的挙動に関する実験的研究，土木学会論文報告集第306号，1981年2月