

含水微粉精鉱の液状化によるばら積み船の転覆 (その 2)

Shifting of Bulk Mineral Concentrates due to Liquefaction (2nd Report)

浦 環*・岡 安 孝 行**

Tamaki URA and Takayuki OKAYASU

1. はじめに

前報¹⁾では、含水量の多い微粉精鉱を積載したばら積み船は、船体動揺の繰り返しによる精鉱の液状化にともなう荷の移動により、転覆する可能性があることを模型実験で示した。また、液状化の発生基準を決定するために、振動 3 軸試験を行い、液状化特性を求めた。今回は、これら基礎実験の結果を用いて、転覆現象の数値シミュレーションを行い、実験結果と比較する。

2. 荷重の推定

船体運動は横揺れのみを考える。液状化が発生する以前の、横揺れによる精鉱内の応力の変動を解析するに当たっては、精鉱の変形が小さいので、変形に起因する慣性力および減衰力は無視することができ、精鉱を線形弾性体として準静的に解析することができる。作用する力は、横揺れによる慣性力と重力である。図 1 は船体横断面であるが、横揺れ中心を原点とする船体に固定された xy 座標系を考え、水平面と x 軸とのなす角、すなわち横傾斜角を θ とする。座標 (x, y) での x, y 方向の物体力 $(\rho G_x, \rho G_y)$ は

$$\begin{cases} G_x = -g \sin \theta + x \dot{\theta}^2 + y \ddot{\theta} \\ G_y = -g \cos \theta + y \dot{\theta}^2 - x \ddot{\theta} \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta = \theta_0 \sin \omega t \quad (2)$$

で表される。ここで、 ρ, g は密度と重力加速度、 θ_0, ω は動揺振幅と周波数である。

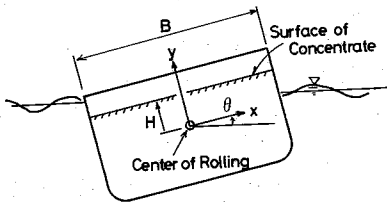


図 1 横揺れするばら積み船

振動 3 軸試験の結果は応力比 $\sigma_{ap}/2\sigma_c$ をパラメタとして表されているが、ここでは応力の不変量に一般化する。偏差応力の 2 次の不変量を J_2 、有効応力の 1 次の不変量を J'_1 とし、 $\sqrt{J_2}$ の変動分と J'_1 との比 $\Delta\sqrt{J_2}/J'_1$ をパラメタとする。すなわち

$$\begin{cases} J_2 = \frac{1}{6} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \\ \quad + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \} \\ J'_1 = \sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z \end{cases} \quad (3)$$

したがって

$$\begin{aligned} \Delta\sqrt{J_2} &\equiv (\sqrt{J_2})_{\max} - (\sqrt{J_2})_{\min} \\ \Delta\sqrt{J_2}/J'_1 &= \frac{2}{3\sqrt{3}} (\sigma_{ap}/2\sigma'_c) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

動揺していないときの精鉱の初期応力状態は

$$\begin{cases} \sigma'_x = \sigma'_z = K_0 \sigma'_y \\ \sigma'_y = (H - y)(\gamma_s + e\gamma_w)/(1 + e) \\ \tau'_{xy} = \tau'_{yz} = \tau'_{zx} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

であり、間隙水圧 p は飽和状態を考え

$$p = (H - y)\gamma_w \quad (6)$$

である。ここで H は精鉱表面の y 座標で、精鉱表面は水平に均されているものとする。 γ_s, γ_w は精鉱および間隙水の比重量で、 e は間隙比、 K_0 は静止土圧係数である。

非排水 3 軸試験により、飽和した重晶石精鉱のヤング率 700 kg/cm^2 、ポアソン比 0.497 が得られ、 $K_0 = 1.0$ として、前報の実験¹⁾に対応するモデル (LBDD = $60 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 17 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm}$) を解析した結果を図 2 に示す。ここでは動揺周期を 1.5 秒とし、動揺振幅を $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ と変えており、 $\Delta\sqrt{J_2}/J'_1$ の等高線が示されている。繰り返し数 N_c および精鉱の密度が条件として与えられると文献 1) の図を用いて液状化の発生する $\Delta\sqrt{J_2}/J'_1$ の値が知れるので、図 2 を用いて、液状化する精鉱の領域を求めることができる。動揺角度をパラメタとして、 $\Delta\sqrt{J_2}/J'_1$ を横軸に、液状化する領域の面積を縦軸にとると図 3 が得られる。図では船倉幅 28 cm で割り液状化の平均深さとして示している。

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

** 三菱重工株式会社

研 究 速 報

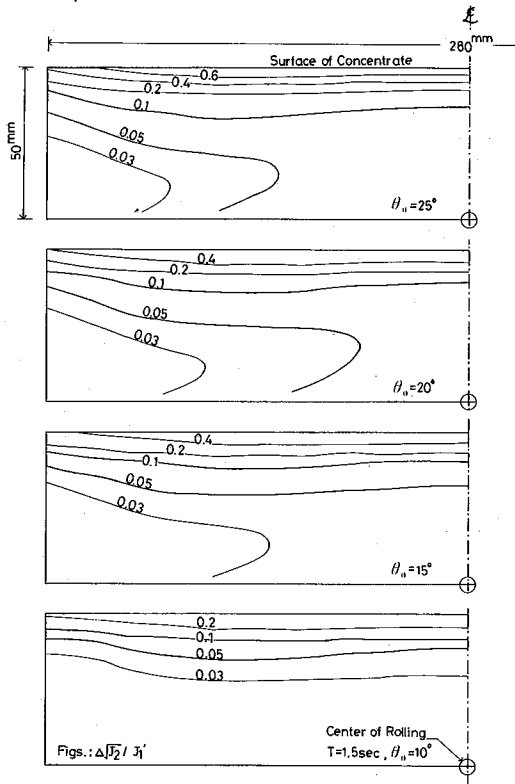


図 2 解析による模型実験の液状化領域

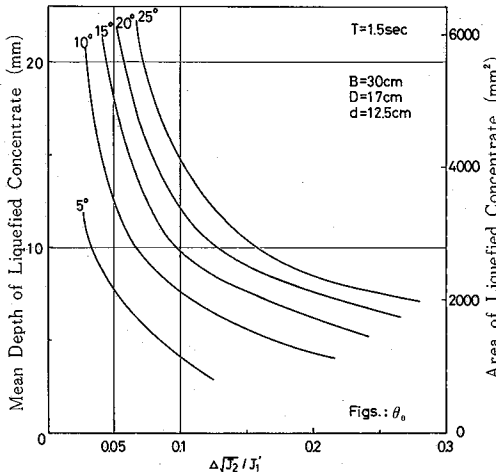


図 3 液状化する領域の広さ

3. 液状化から転覆へ

動揺周期・動揺角度より液状化領域を推定する方法が知れたので、次に液状化した精鉱が荷崩れ的に流れ出し、船を横傾斜させる問題について考える。

液状化した精鉱は、第 1 次近似として粘性係数の大き

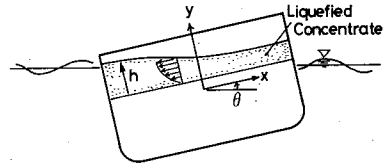


図 4 液状化した精鉱の流動

な線型粘性流体として低速で流動すると仮定できる。また、簡単のために、流動層は同時に液状化し、その底面は平面であるとする。図 4 のように流動層の深さを h 、平均流速を V_0 とする。深さ方向の流速分布を 2 次式で仮定し、自由表面での剪断力と底面の速度をゼロとすれば連続の式より、

$$V_0 = - \int_{-B/2}^x (\dot{h}/h) dx$$

が得られ、NS 方式により、 ν を動粘性係数として

$$\nu \left\{ (\dot{h}/h), x - 3/h^2 \int_{-B/2}^x (\dot{h}/h) dx \right\} + (G_y h), x - G_x = 0 \quad (7)$$

を得る。ここで、 $(\rho G_x, \rho G_y)$ は (1) 式と同様の精鉱に働く物体力であり、船体運動により生じる。

船体運動は、動揺角 θ に関する次の運動方程式を解くことにより得られる。

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = M \quad (8)$$

ここで、 I は付加慣性モーメントを含んだ船の動揺中心まわりの見掛けの慣性モーメント、 C は減衰係数、 $K\theta$ は復元モーメントである。

(7) 式において、 G_x, G_y は θ の関数であり、(8) 式において、 M には荷の移動により生じる Heeling モーメント M^b

$$M^b = L^h (\gamma_s + e\gamma_w) / (1 + e) \int_{-B/2}^{B/2} (h - H^L) (-x \cos \theta + y \sin \theta) dx$$

を含む。ここで、 L^h は船倉の長さ H^L は液状化する領域の深さである。(7)、(8) 式を連立させ、時間積分することにより、液状化した後の船の横揺れに関する運動を解くことができる。

図 5 (a), (b) は模型実験のモデルで、動揺周期を 1.5 秒、動揺角度を 15° および 20° としたとき、液状化の平均深さをパラメタとして、液状化の後の横揺れの繰り返しにより、平均横傾斜角がどのように変化するかを示している。ただし、液状化は $\theta = 0$ のときに一定の深さの領域全てにわたって起こるとしている。ここで、動粘係数は $\nu = 2.7 \times 10^4 \text{ mm}^2/\text{sec}$ であり、船に作用する付加慣性力と減衰力の非線型性は無視して $I = 24.5 \text{ kg} \cdot \text{mm} \cdot \text{sec}^2$, $C = 41.6 \text{ kg} \cdot \text{mm} \cdot \text{sec}$ とし、 $K(\theta)\theta$ は図 6 に示すオ

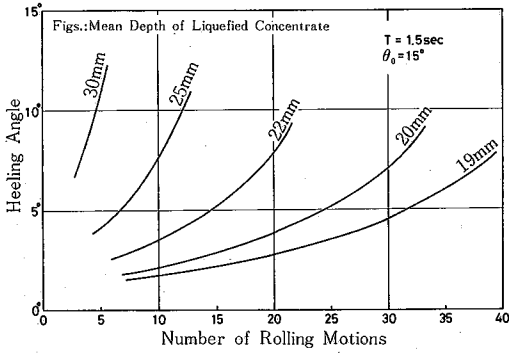


図 5 (a) 液化化後の平均横傾斜角の変化 ($\theta_0=15^\circ$)

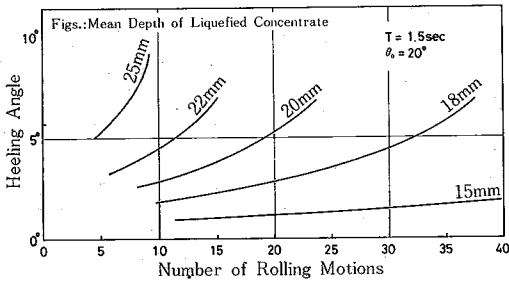


図 5 (b) 液化化後の平均横傾斜角の変化 ($\theta_0=20^\circ$)

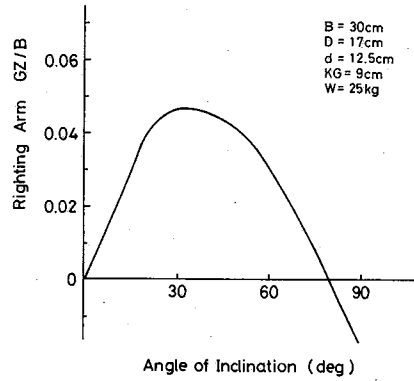


図 6 模型船の復元性

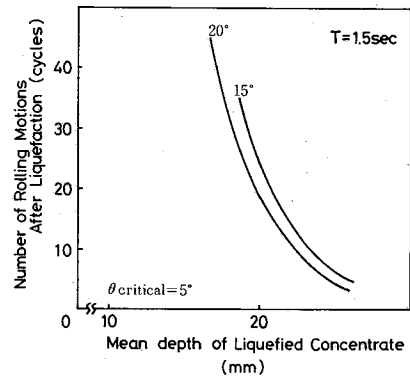


図 7 平均横傾斜角が 5° になるまでの横揺れ繰り返し回数

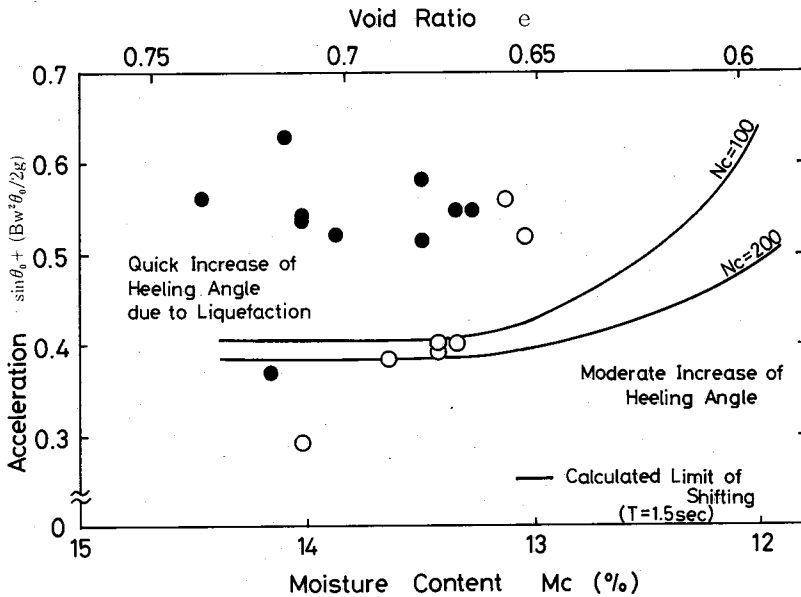


図 8 実験結果と推定曲線の比較

研究速報
 フセットで与えた。

図7は平均横傾斜角が $\theta_c=5^\circ$ を越えるまでの動揺回数と、液状化深さとの関係を表したものである。液状化の領域の広さは、液状化した後の船の挙動に大きく影響することがわかる。また、周期の影響は顕著ではない。

4. 転覆の条件

図7より、このモデル実験では、平均的に約20mmの深さにわたって液状化が起こると、極めて危険な状態になる。この量は復元性などによる動揺特性と密接に関係するので一般的には同様のシミュレーションを行わねば決めることはできない。

一例としてこの模型実験に対する、精鉱の液状化による急激な横傾斜の増加のクライテリアを、 $N_c=100$ 回あるいは200回の動揺の後に、平均20mmにわたって液状化することと設定する。動揺周期による影響を解析では考慮せずに $T=1.5$ 秒の結果を用いることにする。図3および文献1)の図6とを用いることにより、急速な横傾斜の発生する条件を密度と動揺角度に対して求めることができる。先に行われた実験では、図8に示される領域が危険であると計算される。ここで、縦軸は、最大傾斜時での船側における x 方向の加速度と重力加速度の比を取ってある。これは荷重を表すパラメタとして最も支配的なものであり、 $\Delta\sqrt{J_2}/J_1$ は、第1次近似として、これに比例すると考えられる。

推定曲線は実験結果をある程度説明していると考えられる。液状化後の流動を(7)式およびニュートン流体の仮定で推定しているが、実際には、ダイラタンシーにより

剪断強度が回復する現象が起こり、また、浸透の効果もあるので推定曲線は一般に安全側となる。

5. おわりに

ここで示されたように、液状化による荷崩れ、およびそれに引き続く船体の大傾斜は、精鉱が飽和しているときに必ず発生するものではない。動揺による応力変動が小さいときには、液状化は起こらず、また、液状化が発生したときにも、その領域が微であれば船の復元性を損うことは少ない。しかし、波浪や風による動揺が少ないと予測されるからといって、含水量の多い精鉱を輸送することは、自然環境の予測の精度を考えると、非常に危険であると言えよう。したがって、どのような場合であっても、含水量を小さくし、液状化による荷崩れを防がねばならない。

最小間隙における飽和含水量以下にすることは、安全のための一応の目安であるが、より信頼性を高めるには、船体運動による含水量の変化、すなわち、積み込んだ精鉱の圧密特性を検討する必要がある。

(1982年12月13日受理)

参考文献

- 1) 浦 環・岡安孝行：含水微粉精鉱の液状化によるばら積み船の転覆(その1), 生産研究, 第34巻, 7号, (1982.7), pp.34~37
- 2) 浦 環・岡安孝行：微粉精鉱の液状化に関する研究, 第17回土質工学研究発表会講演集, (1982.6), pp.1665~1668