

## 石炭貨物の液状化に関する研究 (その 1)

## ——振動 3 軸圧縮試験結果——

Liquefaction Characteristics of Coal Transported in Bulk (1st Report)

——Cyclic Triaxial Compression Test——

浦 環\*・坂 巻 隆\*・加 藤 剛\*\*

Tamaki URA, Takashi SAKAMAKI and Tsuyoshi KATO

## 1. は じ め に

石油ショック以来、火力発電所で使用する燃料炭として、石炭の輸送量が増加している。揚げ地で即座に燃焼できるように、これら燃料炭は数mm以下の粒度の粉炭あるいは微粉炭として船舶輸送される(図1参照)。粉炭には石炭固有の水分ではなく、粉炭の製造過程あるいは貯蔵過程で加わる水分を石炭粒子の間に保有する。付着水分が多いと、輸送中の船体運動や振動により貨物が液状化し、船の復原性を損ない、最悪の場合には沈没に至る。この現象は含水した粉体貨物に特有のもので、特に微粉精鉱に関して極めて顕著である。その輸送方法は、国際的にはIMO(国際海事機構)のBCコードにより、国内法では「穀類その他特殊貨物船舶運送規則」により規制されている。これまでは、数mmの粒度をもつ粉炭では間隙水がビルジに排水され、液状化の危険性はないとされてきた。しかし、近年の研究あるいは海難事故例により、炭種によっては輸送中に液状化がおこる危険性があることが指摘されている。

粉体貨物の液状化の特性は振動 3 軸試験により計測さ



図1 釧路港から積み出される粉炭

\*東京大学生産技術研究所 第2部

\*\*美田建設工業(株)

れる<sup>1,2)</sup>。しかし、石炭では砂などの液状化とは異なり、

- ・飽和することは少なく、不飽和である
- ・粒子が柔らかく、壊れやすい

という性質を持つ。粒子が壊れやすいことから、粒子構造の再構成が起こりやすくなり、不飽和であっても、液状化しやすいと考えられる。本研究ではこの点を留意し、不飽和および飽和粉炭の液状化特性を振動 3 軸試験により検討したので報告する。

## 2. 振動 3 軸試験装置

以下の項目を満たす振動 3 軸試験装置<sup>4)</sup>を試作した。

- セル圧：2 kgf/cm<sup>2</sup>
- 静的な最大軸応力：10 kgf/cm<sup>2</sup>
- 静的な最大軸荷重：1 tonf
- 最大応力比：0.5
- 動的な最大軸応力：4 kgf/cm<sup>2</sup>
- 周波数：0.2 Hz

軸荷重は、発振器からの電圧出力を空電変換器で空気圧

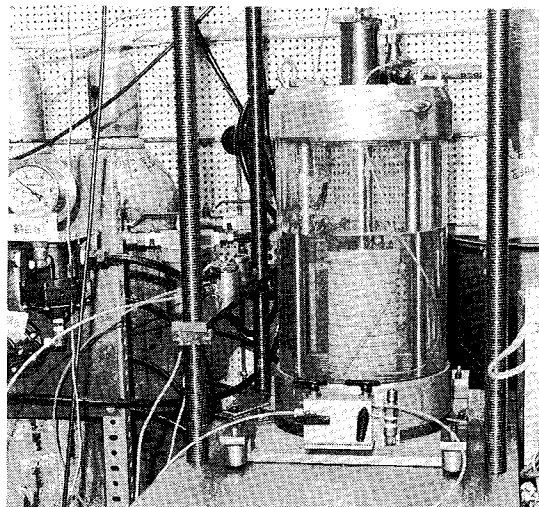


図2 試作した 3 軸試験装置

表 1 A 粉炭の工業分析結果

水 分 (%)	1.3	比 重 量 (A1202)	1.31
灰 分 (%)	8.4	燃 料 比	1.26
発 揮 分 (%)	39.9	全 硫 黄 (%)	2.17
固 定 炭 素 (%)	50.4	発 熱 量 (kcal/kg)	7740

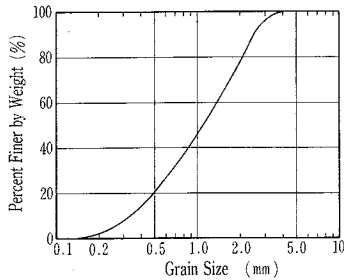


図 3 A 粉炭の粒度分布 (粒径加積曲線)

に変え、ペロフラムシリンダーで加えた。計測量は軸荷重、軸変位、間隙水圧、間隙空気圧ほかである。供試体の上面はろ紙とポーラスストーンとし、キャップにはグラスファイバークロスをはり、空気圧のみが伝わるようにした。下面はセラミックス板をはり、水圧だけが伝わるようにした。供試体寸法は、直径が75~100mm、高さが150~200mmを標準とし、それに応じたセルを試作した (図 2 参照)。

### 3. 粉 炭

試験の対象とした粉炭は九州産出の燃料炭 (以後 A 粉炭と呼んでおく) で、その工業分析の結果<sup>9)</sup>および諸物性を表 1 に、粒度分布を図 3 に示す。A 粉炭は浮選産物が入っているため粒度の細かい部分が多い。

粉炭が含む水分は

- ・ 粒子間に保持される間隙水 (付着水分)
- ・ 粒子内部にある水分 (固有水分)

に分けられる。それらの計測法は JIS M8811 に規定されている。A 粉炭の固有水分値は約 2% (重量%) でほぼ一定であり、その性質上、固有水分値と液状化特性とは直接的には結び付かない。しかし、含水量の計測の便を考えて、以下では粉炭が含む水分の量を次に定義される全水分値  $w$  で表す。

$$w = \frac{(\text{付着水分の重量}) + (\text{固有水分の重量})}{(\text{含水粉炭の湿重量})} \quad (1)$$

### 4. 試 験 結 果

図 4 ~ 8 に全水分値 16~19% および飽和した A 粉炭の

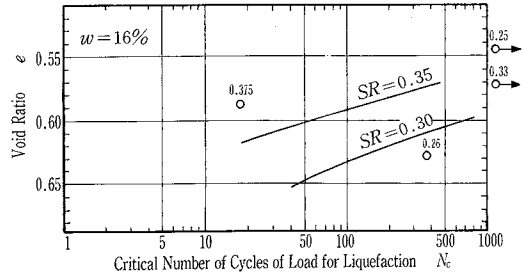


図 4 全水分値 16% の液状化特性試験結果

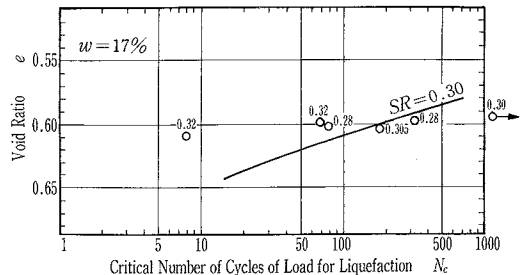


図 5 全水分値 17% の液状化特性試験結果

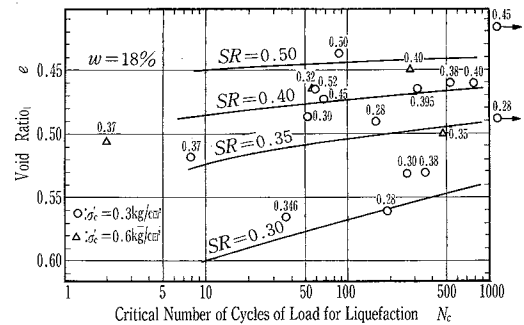


図 6 全水分値 18% の液状化特性試験結果

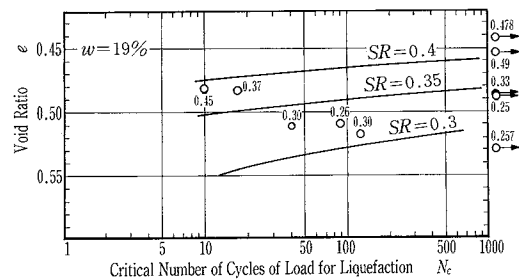


図 7 全水分値 19% の液状化特性試験結果

研究速報

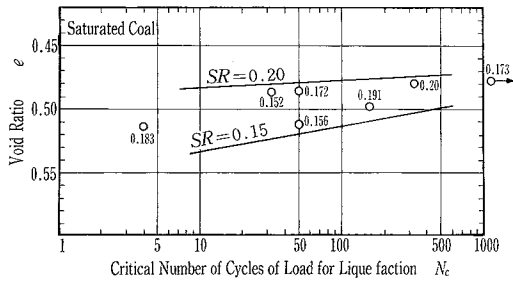


図8 飽和した場合の液状化特性試験結果

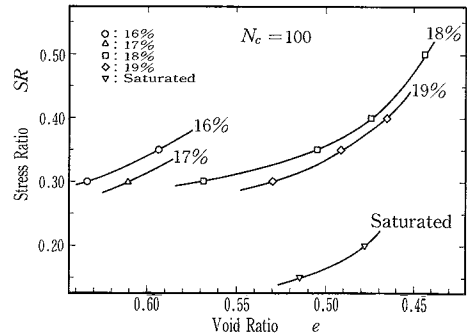


図9  $N_c=100$ としたときのA粉炭の液状化特性

試験結果を示す。試験体は試料を10層にわけてタンピング法により作成した。飽和の場合にはセル圧と間隙空気圧との差を $0.3\text{kgf/cm}^2$ に保った状態でセル圧を負圧( $-0.5\text{kgf/cm}^2$ )にし、間隙空気圧を同時に下げて空気を抜き、その後ろに水で飽和させて試験体を作成した。粒子に作用する直応力の影響を考えて、試験するときのセル圧(有効直応力)は $0.3\text{kgf/cm}^2$ とした。ただし、全水分値18%の場合には比較のためにセル圧 $0.6\text{kgf/cm}^2$ についてもあわせて行っている。

図において縦軸は間隙比である。表1の粒子の比重はJIS A1202を用いて計測した値であり、この比重を用いて間隙比を計算している。間隙には粒子内の割れ目や空隙も含まれている点に注意しておく。横軸は液状化が発生する荷重の繰り返し数 $N_c$ である。液状化の判断は軸歪 $\pm 4\%$ とした。試験は1000回の繰り返し数で打ち切っている。試験点の上に記入してある数字は

$$SR = \sigma_{dp} / 2\sigma'_c \quad (2)$$

$\sigma_{dp}$ : 繰り返し変動軸応力振幅 (片振幅)

$\sigma'_c$ : 有効直応力

で定義される応力比であり、作用させた剪断応力の無次元量である。図中には試験結果より得られる等応力比線を記入してある。

これらの試験結果より、荷重の繰り返し数のクライテリアとして

$$N_c = 100 \quad (3)$$

を取り、各水分値による間隙比(密度)と応力比 $SR$ との関係を求めると、図9を得る。

5. 考 察

燃料炭であるA粉炭の液状化特性を含水量をパラメータとして求めた。図9より次のことが明らかになった。

- (1) 16~19%では応力比 $SR=0.3$ 程度に液状化が起こる下限値がある。
- (2) 同じ水分値では間隙比による液状化強度の差は大きくない。実現される間隙比が水分値により限定される点に注意を要する。
- (3) 飽和した場合には応力比 $SR=0.15$ でも液状化が起こる。

また、

- (4) 19%以上で飽和までの水分値は、間隙水が粒子間に保持されず、その状態は現実には生じない。
- (5) 輸送中の船倉内貨物の応力解析をすることにより、変動応力すなわち応力比 $SR$ の分布が求められる。したがって、液状化する可能性のある貨物量の推定が可能となった。この場合、水分値だけでなく、貨物の密度の推定が必要になることに注意しておく。

本研究を行うにあたり、本所第5部龍岡文夫助教授、同研究室佐藤剛司技官に種々ご教示、ご指導を賜った。ここに篤く感謝の意を表します。また、本研究の一部は本所選定研究費を使用しておこなったものである。

(1987年5月18日受理)

参 考 文 献

- 1) 浦, 岡安, 能勢, 田中: 液状化による含水精鉱の荷崩れ, 日本造船学会論文集, Vol. 154, (1983.11), pp. 176-182
- 2) 浦, 能勢, 岡安: 精鉱運搬船に起こる荷の移動に関する研究, 日本航海学会論文集, Vol. 70, (1983.10), pp. 199-206
- 3) 浦, ほか: 液状化する貨物の安全輸送基準に関する調査研究報告書, 日本造船研究協会, (1987. 3), pp. 55-93
- 4) 阿部, 龍岡, 佐藤: 土質せん断試験機的设计と制作—不飽和土サクシヨンの制御と測定—, 地質と調査, 1985年第1号, pp. 481-486