

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420870

研究課題名(和文) ニッケル鉱等の粒状貨物の液状化挙動の解明に関する研究

研究課題名(英文) A study on liquefaction behavior of granular cargo such as nickel ore

研究代表者

前田 正広 (MAEDA, MASAHIRO)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70173713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：船体動揺時に水分を含有する粒状貨物の流動化挙動を把握するために、砂を搭載した水槽を用いて流動化の再現実験を行った。次に、粒状貨物の流動化をシミュレーションするために、間隙水の移動による水圧変化の影響を考慮できる解析手法の定式化を行い、これまでに構築した個別要素法プログラムの改良を行った。間隙水と粒子の挙動を連成させた個別要素法により、動揺運動による過剰間隙水圧の変化を捉えることができた。液状化現象を定量的に評価するには、パラメータの設定などに問題を残しているが、船体動揺が粒状貨物の液状化に及ぼす影響を明らかにするために、個別要素法は有効な手法であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In order to confirm the fluidization behavior of granular cargo containing moisture under rolling motion of hull, it was confirmed fluidized by performing the experiment using a tank containing sand containing water. Next, in order to simulate the fluidization of granular cargo, the analysis method which considered influence of a hydraulic change by movement of water of a gap was formulated. And the distinct element method (DEM) program which was being made so far was improved. It was performed to calculate the liquefaction using DEM that combines pore water and particles. Result of the calculation, it was possible to capture the change of the excess pore water pressure caused by rolling motion. To quantitatively capture the liquefaction, it has left the issue to such as setting parameters. But, in order to clarify the effect of rolling motion of hull to be related to the liquefaction of granular cargo, DEM was found to be an effective technique.

研究分野：構造強度

キーワード：液状化 粒状貨物 個別要素法

1. 研究開始当初の背景

主にニッケル鉱を積載運行中に、貨物が液状化したことによる復元力の喪失が主な原因とみられる貨物船の転覆・沈没した海難事故が相次いで発生し、「液状化する恐れのある貨物」の運送に対する関心が国際的にも高まっている。液状化する恐れのある貨物は、船体運動や振動等により貨物が締め固められることにより貨物粒子空隙間の水圧増加により貨物のせん断強度が低下し、そのことにより貨物の流動性が増し、いわゆる液状化が生じて大きな貨物移動を引き起こす危険性がある。また、船体の一方向への横傾斜と貨物液状化によって、貨物が倉内の片舷側に流れた場合、完全な液体貨物とは異なり、次に反対舷側へ横傾斜した場合でも、貨物の粘着性により貨物は完全に戻ろうとしない。結果として船舶は次第に危険な傾斜に達し、急激な転覆を引き起こす恐れがある。

「液状化する恐れのある貨物」を積載した船舶の海難事故が、倉内に積載された貨物の航海中の「液状化」や「荷崩れ」などの説が唱えられていることから、船舶復元性及び船体強度要件の適切な基準を提唱するに当たっては液状化する恐れのある貨物の不安定な貨物の挙動を正確に把握することが不可欠と考えられる。

2. 研究の目的

以上のような背景のもと、本研究では船体動揺時の粒状貨物の液状化現象をシミュレートできる数値解析手法を開発し、粒状貨物の液状化性、粘着性などによる液状化や荷崩れの不安定な貨物挙動を実験及び解析により把握し、液状化する恐れのある貨物の液状化や荷崩れ等の不安定な貨物の挙動を明らかにする。

3. 研究の方法

動揺下における貨物粒子の流動化挙動を把握するために、小規模水槽を用いて流動化が起こる条件について調べた。砂そう(槽)に粒状体(海砂)を充填し、砂槽を動揺試験装置に設置し、含水比、動揺角度や動揺周期等の各条件下における砂粒子の実験前後における状態を観察した。

船体動揺時に水分を含有する粒状貨物の流動化挙動を数値計算を用いて把握する手法を構築するために、これまで構築してきた2次元個別要素法(DEM)に間隙水モデルを導入し、繰り返し動揺下における間隙水と粒子の挙動を連成させた個別要素法プログラムの開発を行った。

間隙水の移動の計算を行う際、間隙水が粒子の間隙間を移動する状況、程度を把握するために、砂粒子の透水性を定量的に評価するために透水係数計測試験を実施した。本研究で採用した2次元個別要素法では、円形粒子を用いている。しかし、実際の砂は円形ではなく、また、粒径分布も実際とは異なる。そ

のため透水係数計測実験において計測した透水量と個別要素法解析における透水量が一致するように、個別要素法解析に用いる透水係数の補正値を求めた。

以上より、2次元個別要素法に間隙水モデルを導入し、繰り返し動揺下における間隙水と粒子の挙動を連成させた個別要素法プログラムを用いてシミュレーションにより、動揺運動が粒状貨物の液状化に及ぼす影響を明らかにすることが可能となる。

4. 研究成果

(1) 間隙水圧のDEMへの導入

本研究では奥行き方向に単位長さを考えた2次元解析を行っている。間隙水を考慮した場合、粒子をモデル化した円形要素には粒子間の接触力に加えて新たに間隙水圧が作用する。間隙水圧は静水圧と過剰間隙水圧(動水圧)に分け、さらに間隙は飽和状態として取り扱う。まず、静水圧について、DEMの各粒子に作用する力の重力の項から粒子に作用する浮力を除外して解析を行う。

次に、過剰間隙水圧(動水圧)を求める。水の体積変化は圧力のみにはかよらないと仮定して、Fig.1に示すように、ある間隙kの体積、その中に閉じ込められている水の水量、過剰間隙水圧をそれぞれ A_k 、 W_k 、 U_k とおくと、水の体積弾性率 E_w および水の体積ひずみ $\epsilon_V = ([W_k]_t - [A_k]_t) / [W_k]_t$ を用いて次式が成り立つと仮定する。

$$U_k = E_w * \epsilon_V \quad (1)$$

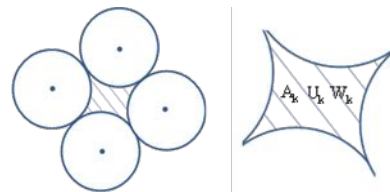


Fig.1 間隙の面積, 圧力, 水量

$W_k = A_k$ のとき(初期安定状態) $U_k = 0$ であり、粒子が力を受け運動するにつれて A_k が変化し、間隙間に水圧差が生じると後述するように水が移動し W_k が変化し、それとともに U_k も変化する。 U_k は二次元的に働く等方性線荷重であるとし、各要素に働く力に分解する。Fig.2に U_k が要素 i に作用する様子を示す。要素 i に間隙 k から作用する水圧の x 成分、 y 成分の合計値 $F_{x_i}^k$ 、 $F_{y_i}^k$ は式(2.2)で計算できる。式(2)の各力によって個別要素法の粒子への作用力は式(3)、式(4)のように修正される。

$$F_{x_i}^k = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} -U_k r_i \cos \theta d\theta = -U_k r_i (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)$$

$$F_{y_i}^k = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} -U_k r_i \sin \theta d\theta = U_k r_i (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (2)$$

$$[F_{x_i}]_t = \sum_j \left\{ -[f_n]_t \cos \alpha_{ij} + [f_s]_t \sin \alpha_{ij} \right\} + \sum \left\{ [F_{x_i}^k]_t \right\} \quad (3)$$

$$[F_{y_i}]_t = \sum_j \left\{ -[f_n]_t \sin \alpha_{ij} - [f_s]_t \cos \alpha_{ij} \right\} + \sum \left\{ [F_{y_i}^k]_t \right\} + (\rho - \rho_w) \pi r_i^2 g \quad (4)$$

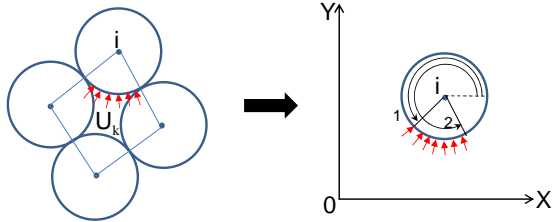


Fig.2 間隙kの間隙圧が粒子iに作用する様子

ここで、 \sum_j は粒子 i に接触する全ての粒子 j に関する総和を、 \sum は粒子 i まわりの全ての間隙に関する総和を表す。式(3)、(4)を用いて時刻 t における加速度が計算でき、t に関して積分すると間隙水圧を考慮したときの時刻 t における速度増分および変位増分が求められる。

粒子の移動に伴って隣接する間隙同士に圧力差が生じ、間隙から隣接する間隙へと水量が移動する。ある時刻において間隙 i と間隙 j の間に水圧差が生じて、間隙水の一部 W' が間隙 i から間隙 j に流れるとする。間隙の体積 A は一定であるとし、その結果として、ある時刻において水圧 U_i' 、 U_j' が等しくなると仮定すると(5)式が成立する。これを解くと、水量 W' は(6)式のように表せる。

$$\frac{U_i'}{E_w} = \frac{W_i - W' - A_i}{A_j W_i - A_i W_j} = \frac{U_j'}{E_w} = \frac{W_j + W' - A_j}{A_j W_i - A_i W_j} \quad (5)$$

$$W' = \frac{A_i + A_j}{A_j W_i - A_i W_j} \quad (6)$$

透水係数を用いて間隙 i から間隙 j に流れる水の流量 q_{ij} は次式で表されるものとする。

$$q_{ij} = k_e * W' \quad (7)$$

ここで、透水係数は流路断面積と粒子間の距離の逆数に比例するものとして次式が得られる。 S_{kl} は粒子間距離、 r_k 、 r_l は各粒子半径、 k は透水係数を表す。

$$k_e = \frac{S_{kl}}{r_k + r_l} k \quad (2.8)$$

以上より、時刻 t におけるある間隙 i の水量 W' は次式で与えられる。ここで、 \sum_j は間隙 i の周りの全ての間隙 j に関する総和を表す。

$$[w_i]_t = [w_i]_{t-\Delta t} + \sum q_{ij} \Delta t \quad (9)$$

(2) 透水係数の算定

本研究では砂を2次元円形粒子でモデル化しているが、実際の砂粒子は円形ではなく、また粒径分布も実際とは異なる。そのため、透水係数計測実験において計測した透水量と個別要素法解析における値が一致するように、個別要素法解析に用いる透水係数を補正する必要がある。そこで、透水係数計測実験(Fig.3)を行い、そのシミュレーションを個別要素法を用いて行い、等価な透水係数を求める。

実験では容器上部に水圧 1.37×10^{-3} [MPa] を与えて上部から下部へ水が流れるようにしている。解析では、平均粒子半径を 2 [mm] とし、粒径の 10 [%] の粒径分布を与えて解析を行い、間隙間の流れが安定したところから透水量を計算している。計算で求めた透水量と時間の関係を Fig.4 に示す。今回の実験で得られた透水量と一致するように解析における透水係数を求めると、実際の透水係数に 0.94 倍の補正係数を乗じ、間隙間を水が流れるにくくする必要があることが分かった。

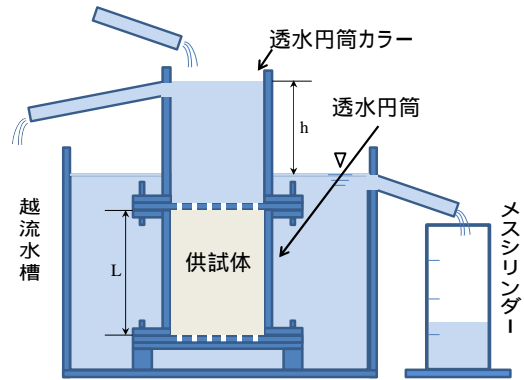


Fig.3 透水係数計測実験概要図

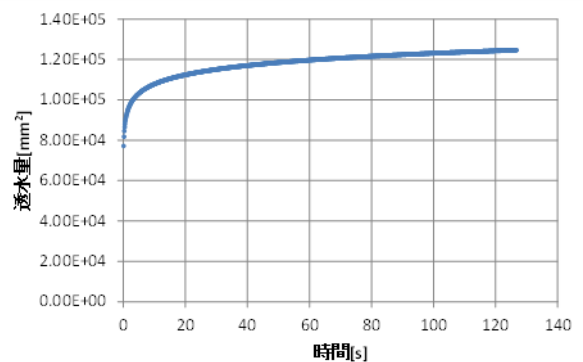


Fig.4 透水量と時間の関係

(3) 流動化再現実験

流動化の知見を得るため小規模水槽を用いて流動化が起こる条件を調べることを目的として本実験を行った。模型水槽はアクリル製で、幅 400 [mm]、高さ 290 [mm]、奥行き

200[mm]であり, Fig.5 と 6 に模型水槽と動揺装置の設置状態を示す. 砂を搭載した水槽に, 含水比, 動揺周期, 傾斜角を変えて動揺実験を行った. Fig.7 に含水比 25%, 傾斜角 30°, 動揺周期 1 秒の場合の動揺前後の砂の状態を示す. 含水比が 23%以下では流動化は生じなかった. 含水比が 28%程度では動揺時には水が表面に浮き出し, スロッシング現象に近い挙動を示した. 含水比が 25%程度の場合は表面に水が浮き出ることなく, 動揺を開始した直後に砂粒子間の空隙が減少し, 水が表面にわずかに浮き出る程度であった. 動揺試験を行うと, 表面の砂粒子が左右に動き, 最終的に片側へ留まる様子も確認できた. 流動化現象が生じた際, 傾斜角が大きいほど動揺後の左右の粒子の傾斜角が大きくなる傾向がみられている.

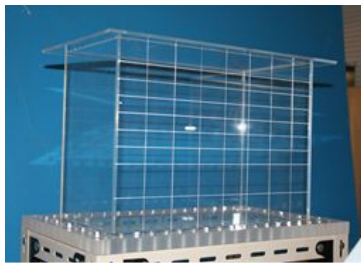


Fig.5 模型水槽

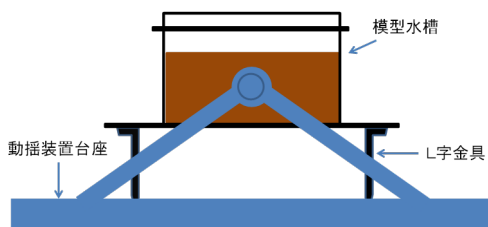


Fig.6 動揺装置への設置状態



Fig.7 動揺前後の砂の状態

(4) 繰り返し動揺下の流動化挙動

これまでに DEM に船体動揺時の粒子への影響を運動方程式に取り入れた個別要素法プログラムを開発済みである. 本研究では, この解析プログラムに空隙水モデルを導入して, 繰り返し動揺下における空隙圧と粒子挙動の解析を行った. 解析で用いた粒子数は 518 個であり, 各粒子の初期配置を Fig.8 に示す. 100[mm] × 50[mm] の寸法の水槽モデルに粒子を充填して解析を行った. 解析に要する時間を考慮し, 砂粒子モデルの要素数, 粒径を用いており解析に用いた諸数値を Table 1 に示す. 水の体積弾性定数は実際の値より小さな値を使用しているが, 限られた解析時間で, 砂粒子の流動化のシミュレーションに重点を置くために材料定数には特にこだわらずに, 解の安定性, 収束性を得るために設定している. Fig.9 に示すように, 5.0[mm] × 5.0[mm] のブロックで水槽モデル内を分割し, 各ブロックに含まれる空隙の水圧の平均値をとっている. 粒子表面付近のブロックの圧力を 0 として透水の計算を行った. 解析では動揺周期を 3[sec], 動揺角度 10[deg] として解析を行った.

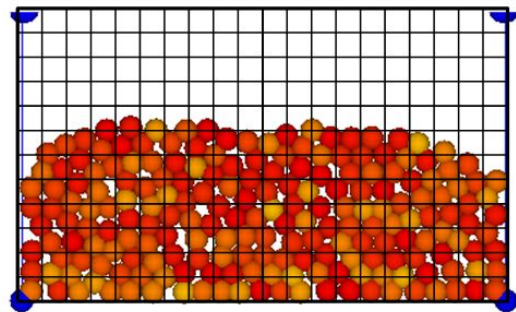


Fig.8 解析に用いた粒子の初期配置

Table 1 解析に用いたモデルの諸数値

粒子の粒径[mm]	4
粒子の密度[g/mm ³]	2.5 × 10 ⁻⁹
水の密度[g/mm ³]	1.0 × 10 ⁻⁹
水の体積弾性定数[MPa]	2.19 × 10 ⁻²
透水係数[mm/s]	0.56
時間刻み[sec]	1.0 × 10 ⁻⁶

Fig.9 に示すようなブロック箇所において, 空隙圧の圧力変化を計算した結果を Fig.10, Fig.11 に示す. それぞれ Fig.9 の赤いブロックの縦方向のブロック箇所と横方向箇所のブロック箇所の空隙圧の変化を示している. これらから, 各ブロックの空隙圧は動揺を開始した直後に急激に高くなることから, 動揺による流動化再現実験においても動揺

を開始した直後に粒子の移動がみられたため、解析において実験に近い挙動が再現できる可能性がある。Fig.10において中央のブロック位置よりも壁側のブロック位置の間隙圧の方がより大きい値を示している。今回の解析では、粒径4[mm]の粒子のみで解析を行っているために、粒子の初期充填状態において中央付近の粒子が密に詰まっており、壁側の粒子は緩く詰まっている状態であった。そのため、動揺下において中央の粒子よりも壁側の粒子の方が移動量は大きくなり、間隙の面積が変化しやすく圧力が大きく変化したと考えられる。また、粒子は密に詰まるように移動したため、間隙の面積が小さくなり間隙圧が大きくなったと考えられる。Fig.11において底部付近のブロックの間隙圧ほど圧力が大きく、表面付近に近づくにつれて圧力が0に近づいていることが分かる。

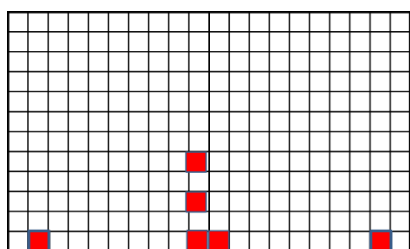


Fig.9 解析対象の圧力ブロック位置

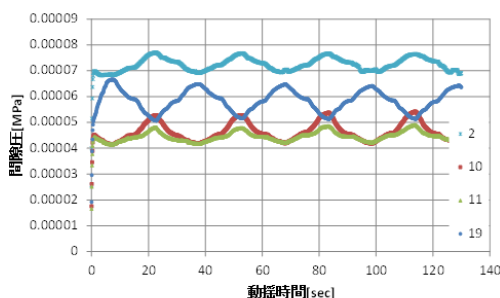


Fig.10 横方向の各ブロックにおける圧力と時間との関係

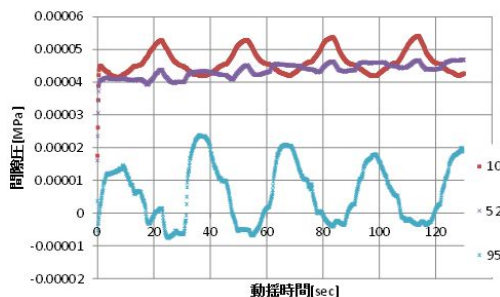


Fig.11 縦方向の各ブロックにおける圧力と時間との関係

動揺下における鉱石粒子の流動化挙動を把握するため、まず砂を搭載した水槽を用いて積荷の流動化現象を実験で確認した。また、

動揺下における鉱石の流動化挙動を数値計算を用いて把握する手法を構築するために、これまでに構築した個別要素法 (DEM) プログラムに間隙水の移動による水圧変化の影響を考慮できる解析手法の定式化を行った。

砂粒子を2次元円形粒子でモデル化することによる水の流れへの影響を考慮するために、透水係数計測実験とシミュレーション解析を行い、シミュレーションにおける透水係数の補正係数を求めた。

動揺模型実験を行い、含水比や動揺周期等の各条件下における砂粒子の実験前後における状態を確認した。適切な含水比において、動揺角度や動揺周期に関係なく流動化現象が起きることを確認した。

間隙水と粒子の挙動を連成させた個別要素法により、動揺運動による過剰間隙水圧の変化を捉えることができた。液状化現象を定量的に捉えるには、粒子数、大きさなど各種パラメータの設定などに問題を残しているが船体動揺運動が粒状貨物の液状化に及ぼす影響を明らかにするために、個別要素法は有効な手法であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2件)

越迫健一郎, 前田正広, 吉川孝男; 繰り返し動揺下の鉱石の締め固まり挙動に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第18号, pp.519-522, 2014, 査読無

Kenichiro Koshizako, Masahiro Maeda, Takao Yoshikawa; Proceedings of the 28th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, Vol.28, pp.267-275, 2014, 査読無

〔学会発表〕(計 2件)

越迫健一郎, 繰り返し動揺下の鉱石の締め固まり挙動に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会, 2014年5月26日, 仙台市

Kenichiro Koshizako; The 28th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, 2014年10月14日, イスタンブール(トルコ)

6. 研究組織

(1)研究代表者

前田正広 (MAEDA MASAHIRO)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 70173713

(2)研究分担者

吉川孝男 (YOSHIKAWA TAKAO)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 50380572