

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560794

研究課題名（和文） 個別要素法を用いた鉱石圧の評価技術の構築に関する研究

研究課題名（英文） Study on construction of the evaluation technology of the ore pressure using the distinct element method

研究代表者

前田 正広（MAEDA MASAHIRO）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：70173713

研究成果の概要（和文）：

個別要素法（DEM）と有限要素法（FEM）を用いて鉱石粒子の運動と船体構造の変形を連成させた解析プログラムを開発した。実際の鉱石粒子の挙動は DEM に限界回転モーメントを導入することによって再現することができ、静的鉱石圧は DEM を用いて正確に算出することができることを確認した。動揺下での鉱石圧を正確に評価するためには鉱石の荷崩れ、締め固まりの影響を考慮する必要がある、船体構造の変形が鉱石圧に影響を与えることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

The calculation program considering the coupling effect of ore particle motion and the ship structure deformation utilizing DEM and FEM is developed. The behavior of actual ore particle is able to reproduce by introducing the critical rotation moment in DEM. The static ore pressure is able to calculate accurately by utilizing DEM. It is necessary to consider the effects of tightening and condensing of ore particles under cyclic rolling motion in order to evaluate the ore pressure accurately. The deformation of hull structure affects on the ore pressure at certain level.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：鉱石圧、個別要素法、連成解析、荷崩れ

1. 研究開始当初の背景

ばら積み貨物船の構造強度を正確に評価するためには、船倉内に作用する鉱石圧の推定精度を向上させ、作用荷重を正確に評価す

る必要がある。これまで、有限要素法による解析や土圧の算定式により鉱石圧を推定し、これを模型試験と比較した研究などが行なわれ、ヤンセンの式を改良した安全側の評価

式が船級規則にも採用されている。研究成果から、静的な圧力に関しては比較的实验値と一致した算定式が得られているものの、動的圧力に関しては実験のばらつきも見られ、必ずしも精度の良い算定式が提案されているとは言えない。また、船体運動などの動的荷重による鉱石の締め固まりの影響や船体構造の変形との連成効果による鉱石圧の変化なども考慮できていない。このため、2006年4月に発行されたばら積み船に関する世界共通構造規則 (CSR ; Common Structural Rule) においては、荷重推定精度の不確実を考慮しつつ安全性確保の観点から、鉱石圧に過大と思われる荷重を設定している。しかしながら、船体の重量増加の一因となり、ひいては船舶からのCO₂排出量の増大や、経済効率の低下など社会的な問題となる懸念がある。

2. 研究の目的

以上のような背景のもと、本研究では個別要素法を用いて、鉱石圧を精度よく推定する解析技術を構築し、実際の鉱石の挙動を実用的な計算時間で計算できるプログラムを開発し、さらに、動的荷重下での鉱石の締め固まり挙動を追跡し、船体に作用する荷重を推定するとともに、船体の変形と鉱石の変形の連成の影響についても解析的に評価する手法を構築する。また、実験との比較により、計算精度の検証を行う目的で研究を実施した。

3. 研究の方法

個別要素法という手法を用いて鉱石圧を数値計算で精度よく求める。個別要素法では、鉱石を円形あるいは球状にモデル化して、鉱石間の接触、離反等の挙動を動的に追跡する手法である。一般に鉱石は扁平であるが、これを円形でモデル化することは、回転運動が実際の鉱石に比べて生じ易くなり鉱石の重要な物性値である安息角が実際と合わず、鉱石圧の評価精度が低下する。そこで、隣接する粒子との相対位置や関係に応じた限界回転モーメントを導入し、粒子の回転運動を制御し回転運動の精度を向上させ、粒子半径と鉱石の安息角の関係を求めるとともに、粒子の大きさの違いによる鉱石の挙動、鉱石圧の変化について調べる。

船体運動などの動的荷重により鉱石には荷崩れ、締め固まりが起こると考えられる。鉱石の荷崩れ、締め固まりなどの鉱石の挙動を追跡するために、個別要素法を用いてシミュレーション計算を行なって鉱石の挙動、鉱石圧の変化を明らかにする。

船体の傾斜とともに鉱石圧が変化するが、これに伴って船殻構造も変形する。これを正確に評価するには、鉱石の挙動と船殻構造の

変形を連成させて計算する必要がある。鉱石の挙動は個別要素法を用い、船体の変形解析には有限要素法を用いた船体構造と鉱石の運動との連成解析手法の開発を行なう。

船殻構造の変形が鉱石圧に及ぼす影響を試験的に調べるため、および連成解析手法の検証を目的に、弾性変形する船倉モデルを用いて試験を行ない船殻構造の弾性変形が鉱石圧に及ぼす影響をについて明らかにする。

以上より、ばら積み貨物船の船倉内に作用する鉱石圧の推定精度を向上させ、作用荷重を精度よく求めれば、ばら積み貨物船の構造強度を正確に評価することができる。動的荷重下での鉱石の締め固まり挙動や鉱石の変形挙動が船体構造の変形挙動に及ぼす影響が個別要素法を改良した手法を適用することにより解明でき、これまで不明であった航行中の鉱石圧が精度よく推定できることになる。

4. 研究成果

(1) 個別要素法による安息角の計算

鉱石を円形粒子にモデル化する個別要素法を用いた計算では、粒子の回転運動が実際の鉱石に比べて生じ易くなり鉱石の重要な物性値である安息角が実際と合わず、鉱石圧の評価精度が低下する。そこで、粒子の回転運動を制御するために、粒子の回転慣性に比例した限界回転モーメントを導入した。限界回転モーメントと粒子間摩擦角を変化させて計算した場合の安息角の変化を図1に示す。個別要素法に限界回転モーメントを導入することにより安息角の操作が可能となり、鉱石の安息角に応じた圧力の計算が可能となった。安息角の計算を実船モデルについて実施し、平均粒子半径においても実際の安息角が形成されることを確認した。

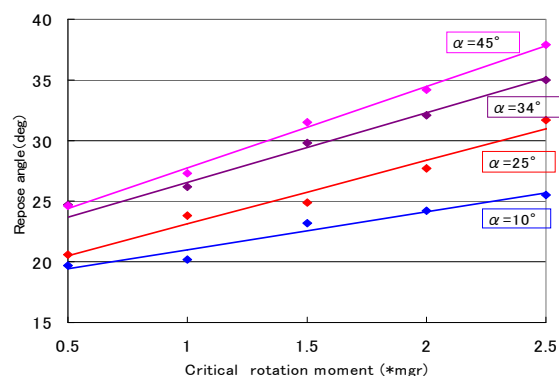


図1 限界回転モーメントと安息角の関係

(2) 個別要素法による鉱石圧の計算

① 静的鉱石圧計算

標準的なパナマックス型のバルクキャリアを想定した実船モデルで個別要素法による静的鉱石圧計算を行なうために計算精度、

計算時間の両要素を考慮し計算に用いる最適鉱石平均粒子径を 100mm とした。実船モデルに粒子を充填したときの静的鉱石圧の個別要素法による計算精度を確認するために、CSR の式によって得られる鉱石圧との比較を行なった結果を図 2 に示す。どの壁面に対しても、ほぼ同じ傾向を示している。また、理論式では捉える事の出来ない、船体底壁コーナー部の鉱石圧の減少を確認した。

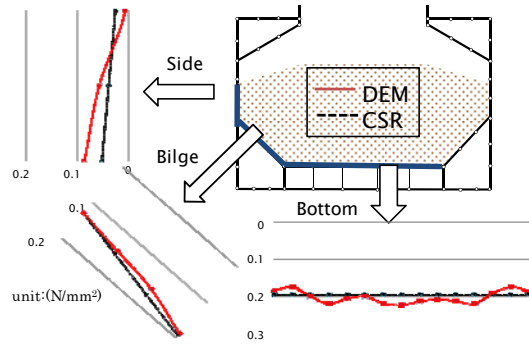


図 2 DEM と CSR の静的圧力の比較

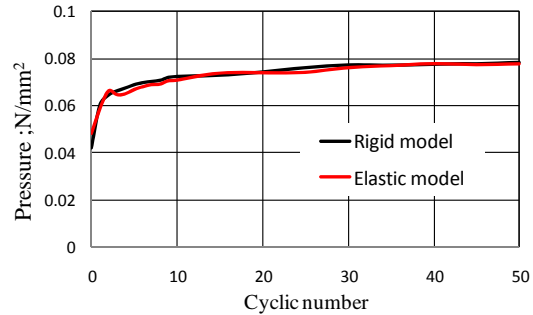
②動的鉱石圧計算

鉱石圧が船体に作用したとき、荷重によって船体に変形する。また、船体動揺運動のように船体に作用する圧力が交互に変化する場合、船体変形が鉱石圧分布に大きく影響する。

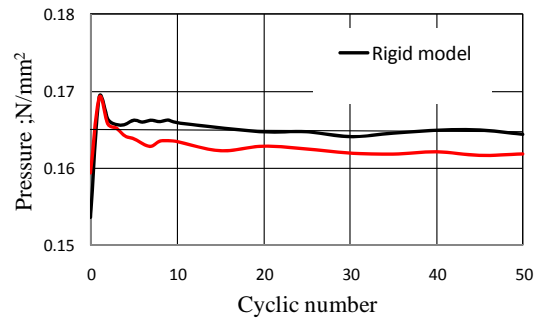
上記の場合の鉱石圧を正確に計算するためには、鉱石の運動と船体変形を同時に再現する必要がある。本研究では FEM (梁要素, バネ要素) による船体構造のモデル化と DEM による鉱石のモデル化によって船体変形と鉱石の挙動の連成計算を行なうプログラムを作成した。

静的圧力状態から船体を動揺運動させた際の圧力変化を調べるために動揺周期は 13 秒 (実船相当) として、左右に 15 度傾斜させた。①で使用した剛体壁モデルと弾性壁モデルの船体動揺時 (50 周期) の各壁に作用する圧力を比較した結果を図 3 に示す。

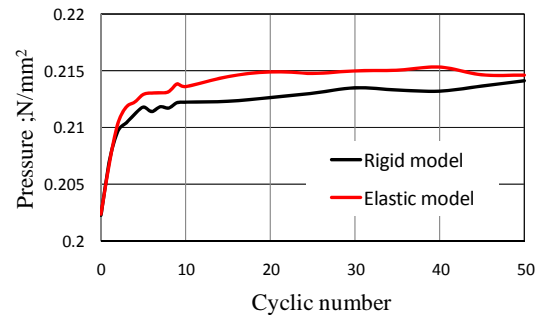
初期状態 (0 周期) と比較して動揺を繰り返すにつれて圧力が増加する傾向にある。これは、充填した粒子の荷崩れと締め固まりによるものである。また、剛体モデルと弾性壁モデルを比較すると、side shell と bilge hopper において弾性壁モデルがやや低い圧力を示すのに対して inner bottom plate では弾性壁モデルが大きい値を示している。これは、弾性壁モデルの底壁が鉱石の荷重によって撓み、動揺を繰り返すにつれて粒子が下方に変位し side shell の摩擦力が低下し inner bottom plate に作用する圧力が増加したものと考えられる。



(a)Side Shell



(b)Bilge Hopper Slant Plate



(c)Inner Bottom Plate

図 3 剛体壁と弾性壁の鉱石圧の比較

(3) 鉱石荷重試験

個別要素法の計算結果の検証を行うために、船倉モデルを作成し鉱石荷重試験を実施した。模型作製に際しては、鉱石圧作用下における船体の弾性変形の影響を考慮するため、船倉モデルの寸法と変形の比率が実船の寸法と変形の比率と一致するような板厚とした。

①単純荷重試験

鉱石圧の計測値と個別要素法により計算された鉱石圧を各壁について比較した結果を図 4 に示す。この図より各壁に関して、実験による鉱石圧は個別要素法の鉱石圧分布とほぼ同じ傾向を示していることがわかる。

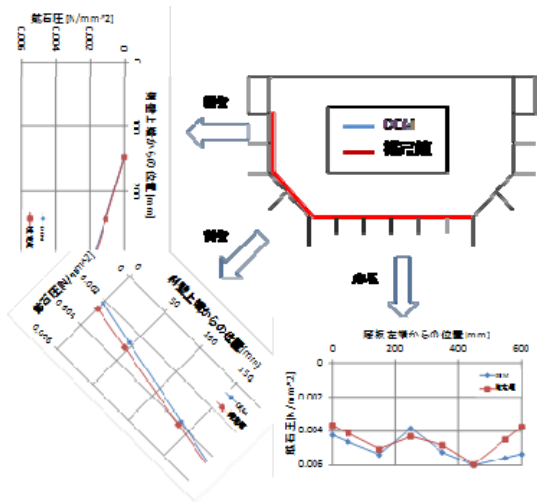
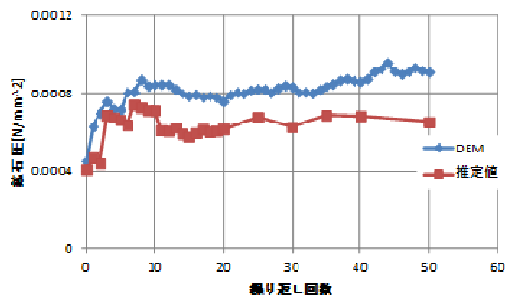


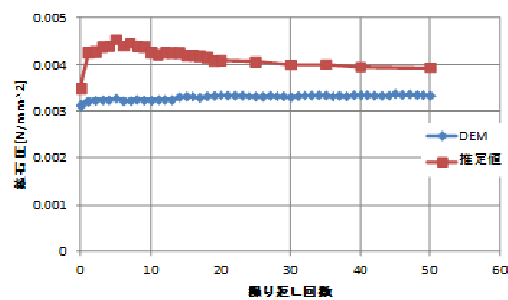
図4 静的鉄石圧の比較

②繰返し動揺試験

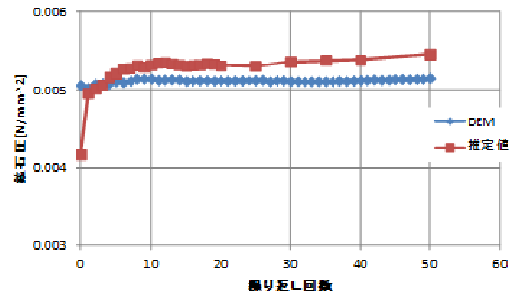
鉄石載荷後の船倉モデルを動揺させることにより船体変形が鉄石圧に与える影響や締め固まりによる鉄石圧の変化を計測した。図5に各壁面で計測された鉄石圧を実験値(図中の推定値)と計算値を比較して示す。いずれの壁面においても、動揺前の初期状態と比較して動揺を繰返すにつれて圧力が増加する傾向にある。これは充填した粒子の荷崩れと締め固まりによるものである。図5に示したシミュレーション結果は壁面を剛体として計算した結果である。したがって鉄石の運動と船体変形との連成が考慮されていないためDEMの値が側壁では実験値より高く、斜板と底板では低い値になったと考えられる。



(a) 側壁



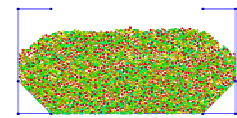
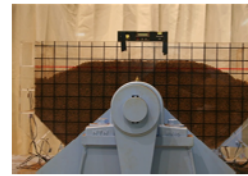
(b) 斜板



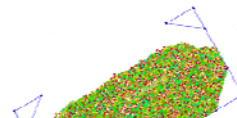
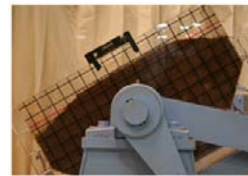
(c) 底板

図5 各壁で計測された圧力

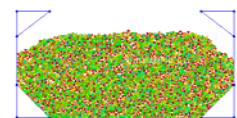
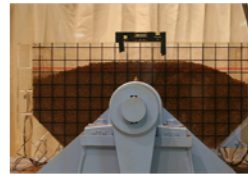
また、鉄石載荷後から1周期経過するまでの荷崩れの様子を実験結果とシミュレーション結果を比較して図6に示す。荷崩れの様子が実験とシミュレーションとでよく一致しており、個別要素法は鉄石の荷崩れの挙動をよくシミュレーションできていることが分かる。



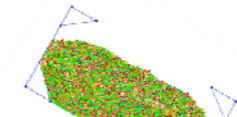
(a) 初期状態



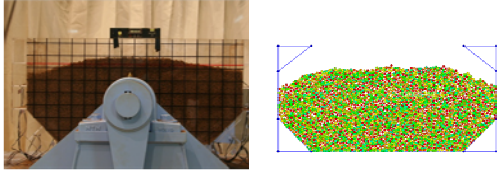
(b) 左30度傾斜時



(c) 中立位置



(d) 右30度傾斜時



(e) 1周期後

図6 動揺時の荷崩れの様子

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)

①前田正広, 森茂博, 篠崎なつみ, 吉川孝男, 船体横揺れ時の鉱石の荷崩れ, 締め固まりが鉱石圧に与える影響, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第14号, 2012年, pp.279-282, 査読無

②Takao Yoshikawa, Masahiro Maeda, Numerical study of ore pressure considering coupling effect of hull deformation, Proceedings of the twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. IV, 2011, pp. 795-802, 査読有

[学会発表] (計 2件)

①前田正広, 船体横揺れ時の鉱石の荷崩れ, 締め固まりが鉱石圧に与える影響, 日本船舶海洋工学会講演会, 2012年5月17日, 神戸市

②Masahiro Maeda, Numerical study of ore pressure considering coupling effect of hull deformation, The twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference, 2011.6.22, Maui, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 正広 (MAEDA MASAHIRO)
九州大学・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・工学研究院・教授
研究者番号：50380572