

Study on dynamic analysis method of structures that are subjected to impact action through fluid materials

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/37373

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学 位 論 文 要 旨

学位論文題名

(邦 題)

流動体を介して衝撃的作用を受ける構造物の動的応答解析手法に関する研究

(英文題名)

Study on dynamic analysis method of structures that are subjected to impact action through fluid materials

所 属：金沢大学大学院自然科学研究科環境科学専攻

氏 名：渡 辺 高 志

Abstract

In this study, the evaluation method of impact action through fluid materials and the numerical analysis method of dynamic response of structures subjected to the impact action are investigated. Finite Element Method (FEM) is generally suitable for the analysis of continuous structure with high rigidity. On the other hand, the particle type method is thought suitable for fluid and/or particles problems with free surface. Therefore, the coupled analysis of both methods is considered useful for the explication of the complicated behavior and the design of related structure.

In this study, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Method and Distinct Element Method (DEM) were adopted and developed as a numerical analysis method of fluid materials. DEM was applied to the analysis of impact behavior of the sand cushion that is often utilized to the protective structure as a shock absorber. Also, SPH method was applied to the sloshing problem and dam break problem. Accuracy of SPH method had been validated. Coupling with SPH and FEM had been made possible. The expression method of wall boundary calculation function using triangular patch was introduced in the both methods. Finally, it was also shown that coupled analysis method in this study gave a success by concrete application to the problem of dynamic sloshing response occurs in tank.

学 位 論 文 要 旨

1. 序 論

土木構造物の設計では想定される様々な荷重に耐え得るように、一般には設計示方書で与えられる荷重条件に対して応力を照査する許容応力度設計が用いられている。しかし、このような仕様規定型の構造設計は衝撃荷重を主たる設計荷重とする防護構造物では合理性と経済性に問題がある。局所的に作用する衝撃力の推定や、構造物の動的応答の予測は一般に困難であり、性能照査型設計法へ移行する上での問題となっている。特に落石覆工のような防護構造物には緩衝機構を設けることが多く、これらを介した衝撃力と構造物の動的応答の把握は困難な問題である。

また、地震等の災害発生時には想定を上回る荷重を生じることがあり、構造物に甚大な被害を及ぼすことも多い。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では大津波が発生し、多くの防波堤は想定外の波力によって破壊し、押し寄せた津波により沿岸部に甚大な被害を生じたことは記憶に新しい。また、長周期地震動は広い範囲に渡って構造物を揺さぶり、タンクの貯蔵液体にスロッシングを生じさせた。石油タンクのような大型タンクのみならず、建物屋上や上水道施設の給水タンクに被害を生じ、被災地においてライフライン上の問題を生じた。

これらの地震等の災害によって生じる、津波やスロッシング、土石流などは流動体を介する複雑な現象であり、防護構造物の緩衝材の問題と同様に、流動体を介することで構造物にかかる荷重を推定することは重要な問題となっている。本研究では、流動体と構造物の動的応答と相互作用を推定し、構造物の性能照査型設計へ役立てるための数値解析手法の検討と開発を行った。

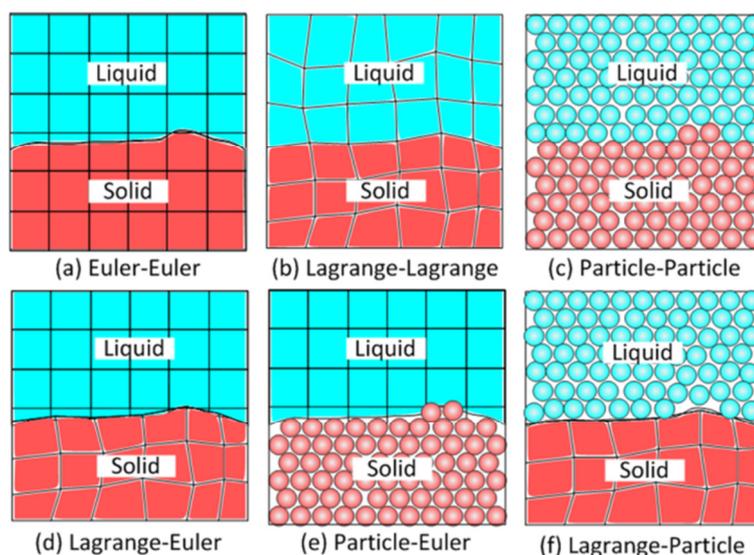


図.1 運動の記述法に着目した流動体と固体の連成解析法の分類

流動体の解析手法には様々なものがあり、Euler 記述による有限差分法や有限体積法が気液の流動解析によく用いられている。また、Lagrange 記述による有限要素法も自由表面のある流れ問題では用いられており、流体-構造連成を行った既往の研究例も多くみられる。Lagrange 記述

のメッシュ型解法では、流動による大変形によってメッシュの破綻や精度の低下が問題となっており、メッシュ依存の問題の生じない SPH 法や MPS 法に代表される粒子法が流動体の数値解析に用いられている。また、流動化する粉体などの離散体集合を対象とする計算手法としては個別要素法が知られており、これらのメッシュを用いない Lagrange 記述の Particle 型解法は大変形問題への適用性が高い手法であり、本研究では離散体流動の解析に個別要素法を、液体流動の解析に SPH 法を適用した。また、既往の流動体と構造物の連成問題へは流動体を Euler 記述、構造を Lagrange 記述で扱ったものや、Lagrange-Lagrange 型のものが多い。これに対し、本研究では個別要素法と SPH 法に三角形パッチで構成する壁面境界の計算手法を導入し、図.1 の(f)に示すような Lagrange-Particle 型の連成解析手法を開発した。

2. 個別要素法の解析理論

個別要素法 (DEM) は Cundall らによって開発され、土粒子や岩盤などの不連続性をもつ問題に適用されてきた解析法である。本研究では個別要素法を流動体に適用し、多量の要素を取り扱うことから接触判定の容易な球形要素モデルを採用した。図.2 に示すように個別要素法では、接触過程にある 2 つの球要素間にばねとダッシュポットからなる Kelvin-Voigt モデルの作用力伝達系を挿入し、発生した作用力を運動方程式の陽的時間差分式に代入することで要素運動を計算する。

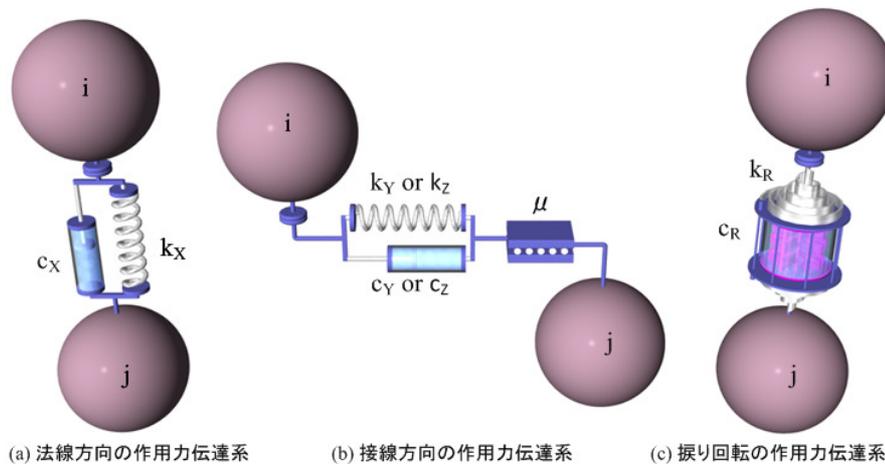


図.2 運動の記述法に着目した流動体と固体の連成解析法の分類

球形要素を用いた解析では、簡便であるため壁境界を固定球要素でモデル化することが多いが、境界面に球形状による凹凸が生じることや、構造変形を考慮したメッシュ型解法との連成において問題となることから、本研究では三角形壁面要素の導入を行った。

2.1 球要素と壁面要素の接触判定と作用力計算

球要素と壁面要素の接触判定は次の手順で行うことができる。

- ① 面の方程式より球要素中心と壁面要素を包含する平面との最短距離を計算する。
- ② 最短距離が球要素半径より小さければ以降の処理を行い、大きければ非接触とする。
- ③ 球要素中心を平面に投影した座標が壁面要素の三角形領域内に含まれるか計算する。
- ④ 領域内に含まれない場合は辺接触と点接触の判定を追加で行うことで最終的に判定する。作用力計算は通常の球要素間の場合と同様に計算を行った。本手法を用いることによって滑

らか表面を持つ壁境界の考慮が可能となり、また FEM などのメッシュ型解法と連成界面としての利用を可能とした。

2.2 任意形状の剛体計算

個別要素法において任意形状の剛体を扱うため、田中らが MPS 法に導入した球要素を連結して作成する任意形状の剛体計算手法を導入した。本手法は剛体姿勢を四元数で記述し、運動に応じて更新し、回転行列に変換して利用することで剛体回転や慣性テンソルの更新を行う手法である。本研究では本手法を三角形パッチで構成する多面体ブロックの剛体計算に応用し、滑らかな表面を持つ任意形状剛体の計算手法として導入した。球要素を連結する剛体も多面体ブロックも構成要素に生じた作用力を合算し、重心位置に作用させて運動を計算した。

表.1 に本研究で用いた個別要素法の計算手法をまとめた。また、本章で導入した個別要素法を用いた解析手法は 3 章の敷砂の動的応答解析に用いた。

表.1 本研究で用いた個別要素法の計算手法のまとめ

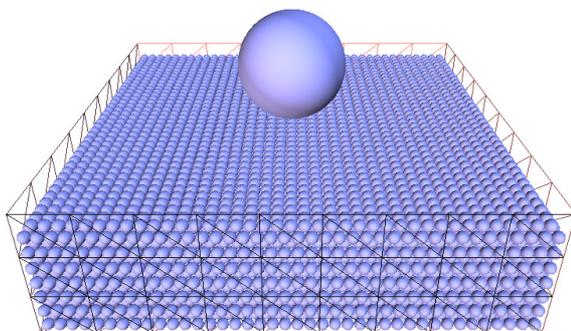
個別要素法の機能項目	本研究で採用した計算手法
3次元計算における成分変換	回転行列を用いた吉田らによる手法
運動方程式の時間積分法	Euler法 / Leapfrog法による陽解法
壁面境界の取り扱い	開発した三角形壁面要素を用いた計算手法(粒子壁も利用可能)
任意形状の粒子集合剛体計算	田中らによる手法を採用し剛体姿勢は四元数で取り扱う
任意形状の多面体剛体計算	粒子集合剛体の手法を多面体に適用(接触判定は未導入)

3. 個別要素法による敷砂の動的応答解析

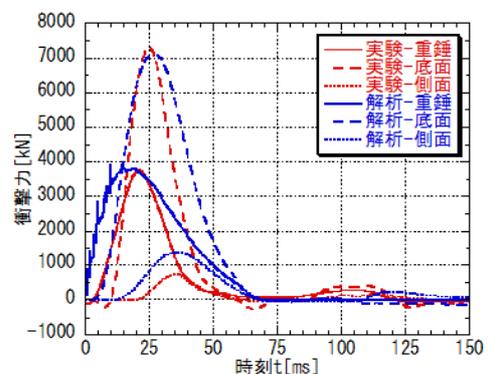
落石等の作用によって流動化した砂粒子の飛散や、落下飛翔体の砂層への貫入を特別な仮定を用いることなく計算できる個別要素法を用い、本研究では重錘落下実験を対象とした数値解析を行った。

3.1 実物大サンドクッションの解析

実物大の斜め入射実験を対象とした解析では、重錘形状は考慮せず大径球要素でモデル化し、砂槽は単一径の球要素による最密配列による規則配置とした。図.3 に解析モデルと鉛直落下ケースの解析結果の例を示す。ばね定数をパラメトリックに設定することによって、衝撃力波形をある程度再現することができる。しかし、衝撃力波形の立ち上がりや減衰過程を実験と一致させるためには、より高精度なモデル化が必要であることを確認した。



(a) 解析モデル例



(b) 解析結果より衝撃力時刻歴波形の例

図.3 実物大サンドクッションの解析

3.2 粒子径分布を考慮した敷砂の衝撃応答解析

底面形状の異なる2種類の重錘を用いた重錘落下実験を対象とした解析では、解析モデルの高精度化を図り、砂槽はある程度粒径分布を考慮したランダム配置によるモデル化を行った。また、重錘形状を再現するため任意形状の粒子集合剛体を用いたモデル化を行った。図.4に解析モデルと平底重錘ケースを対象とした解析結果の例を示す。図示した解析結果はものであるが、前節の解析結果と比較して衝撃力波形の立ち上がりや減衰過程の再現性が向上していることを確認できた。

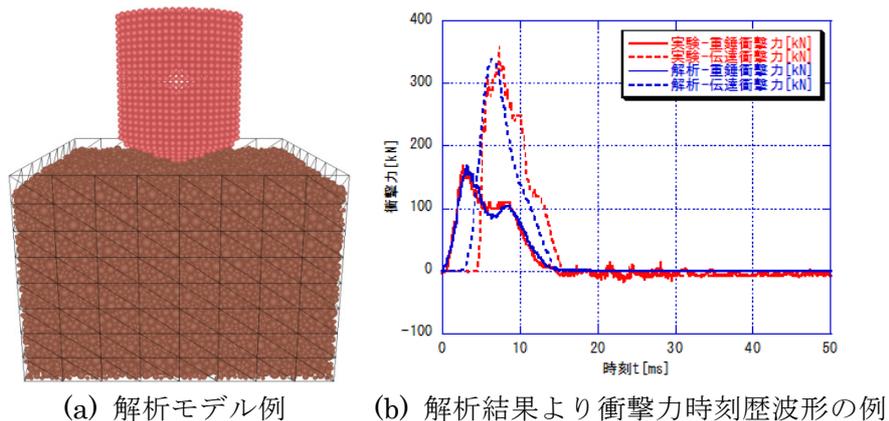


図.4 2種類の重錘を用いた重錘落下実験の解析

4. 粒子法の解析理論

SPH法は宇宙物理学分野における圧縮性流体解析手法として、1977年に Lucy および Gingold と Monaghan によって開発された粒子法である。SPH法では影響半径内の粒子点値から着目粒子の状態量を補間するカーネル近似を行う。従って、離散化に要素-節点関係のような幾何構造を必要としない。また、影響半径内の粒子は粒子運動とともに時々刻々と更新され、これは FEM などのリメッシング処理と同様の処理を毎ステップ実行していることに相当する。メッシュが破たんすることなく計算を継続できることから大変形問題に向いている手法である。

4.1 SPH法を用いた解析手法

SPH法は宇宙物理の分野における圧縮性流体の解析から研究が始まっており、本研究においても Monaghan によって導入された圧縮性の小さい流体を対象とした解析手法を最初に導入した。越塚による MPS 法の提案以降は、粒子法解析に射影法に基づく圧力と速度の分離解法が導入され、本研究では越塚らの手法と同様に、圧力のポアソン方程式の解から圧力勾配項を計算し、非圧縮条件を満たす解法を導入した。圧力のポアソン方程式の生成項の計算手法は幾つか提案されており、本研究ではこれらの手法を導入して検討した結果、近藤らが提案した手法を5章で報告する非圧縮性流体の解析に適用した。その他、安定化のために Monaghan が提案した人工粘性や近藤らが開発した表面張力計算手法を導入した。また、作用反作用の法則から DEM 粒子と SPH 粒子間で相互作用力を計算し、図.5に示すような解析を可能とする DEM-SPH 連成による流体-構造連成計算手法を導入した。

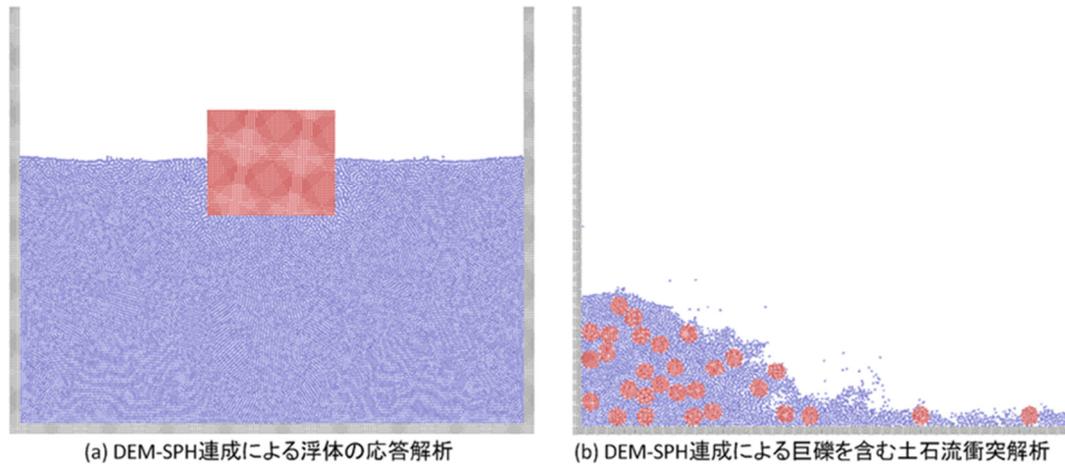


図.5 DEM-SPH 連成による解析の例

4.2 三角形パッチを用いた壁境界の SPH 法への導入

本研究では、個別要素法に導入した壁面境界と同様の壁境界の計算手法を SPH 法に導入した。同様の粒子法壁境界の既往研究には原田らの研究と佐々木らの研究があり、これらの手法では壁面要素の変形を考慮することができない。本研究では粒子型解法とメッシュ型解法の連成解析を実現するため、変形を考慮可能な計算手法の開発を行った。

原田らは図.6 に示すように格子配列の仮想粒子を壁境界面に下に仮定し、解析実行前に粒子法の積分計算を仮想壁粒子に対して実行し、壁面からの距離の関数テーブルとして利用する手法を提案した。本研究においてもこの手法を利用し、解析実行前に必要な SPH カーネルの積分値は全て関数テーブルとして作成した。この関数値は壁面境界が平面である場合の値であるため、実際の壁境界計算においては近傍曲率を考慮した体積補正が必要となる。本研究では変形を考慮することから原田らと同様の曲率計算手法は適用できないため、Meyer らによる離散三角形パッチの曲率計算手法を採用した。

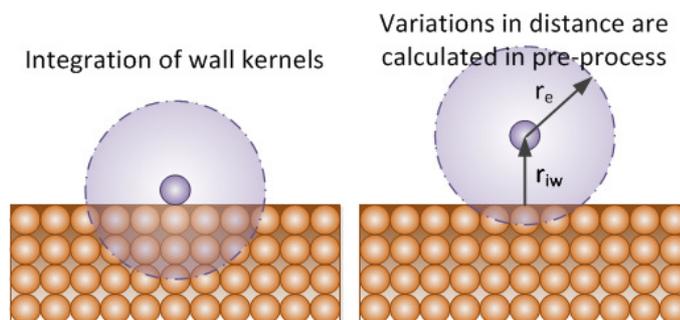


図.6 壁カーネル関数の計算方法

表.2 に本研究で用いた SPH 法の計算手法をまとめた。また、本章で導入した SPH 法を用いた解析手法は 5 章と 6 章の解析で用いた。

表.2 本研究で用いた SPH 法の計算手法のまとめ

SPH法の機能項目	本研究で採用した計算手法
カーネル関数	Morrisらによる5次のスプライン関数
ラプラシアン分散化	MorrisらによるTaylor展開近似(極座標の2階微分も利用可能)
圧縮性流体の解析法	Monaghanによる状態方程式モデルを用いた陽解法
非圧縮性流体の解析法	射影法に基づく半陰解法
圧力のポアソン方程式生成項	近藤らの手法に基づく(本章で述べた全ての手法が利用可能)
自由表面判定手法(閾値)	密度基準を採用し越塚らに従い材料密度の0.95~0.97倍を使用
壁面の粘着条件(粘性項計算)	陽解法ではMorrisらによる手法を採用し陰解法も使用可能
人工粘性	Monaghanによる人工粘性を導入
表面張力計算	近藤らの手法に基づく(接触角も取り扱える)
人工斥力モデル	越塚ら, 岩本らの手法に基づきばね-ダッシュポット系を採用
DEM連成手法	作用反作用の法則に基づく
壁面境界のモデル化	開発した三角形壁面要素を用いた計算手法(粒子壁も利用可能)
壁面境界の曲率計算手法	Meyerらによる手法を採用

5. SPH 法による流体の動的応答解析

地震時に発生する流動体を介する代表的な現象として津波やスロッシング、液状化などの流体の運動量と圧力の上昇によって発生し、構造物に被害を与える問題がある。本章ではこのような動的問題を取扱い、SPH法の流体解析に対する適用性を検討した。

5.1 矩形タンクのスロッシング解析

酒井らが電力中央研究所で行った溢流を伴う矩形タンクのスロッシング実験を対象に、本研究で開発した SPH 法解析手法を適用し、実験との比較による精度確認を行った。2003 年十勝沖地震の強震記録より作成した入力条件による解析結果より、図.7 に 35 秒経過時における溢流発生時の圧力と速度の分布を示す。実験と解析は波高応答と溢流量の両方で良く一致していることが確認できた。

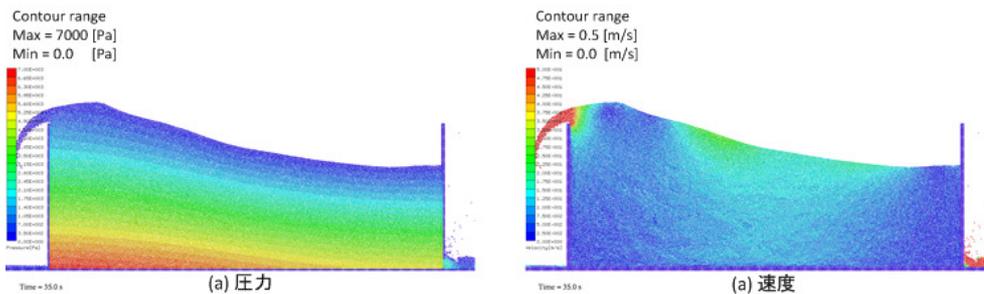


図.7 スロッシング解析結果より圧力と速度の分布 (35 秒経過時)

5.2 水柱崩壊問題における動水圧評価

Kleefman らが行った矩形水槽を用いた水柱崩壊実験を対象に SPH 法解析を実施した。実験水槽内には障害物として小箱が固定されており、流体衝突による複雑な流れを生じており、図.8 に 0.5 秒経過時における圧力分布を示す。本研究で開発した SPH 法解析手法による解析結果と実験結果は良い一致を示した。

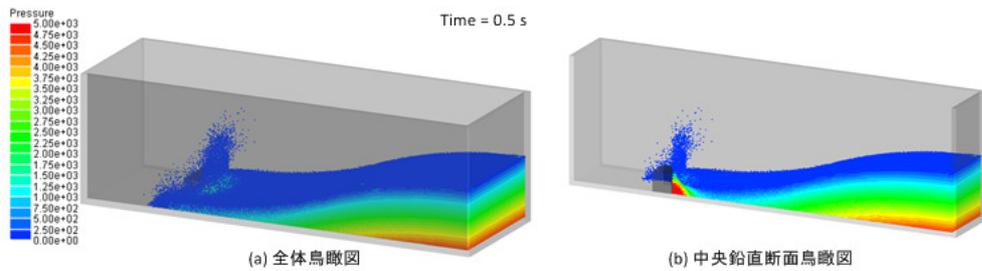


図.8 水中崩壊問題の圧力分布 (0.5 秒経過時)

5.3 大変形を考慮した壁境界モデルを用いた流動解析

4 章で開発行った壁面境界を用いた解析の精度検証として円筒タンクの静水解析および高粘性流体のせん断試験解析を行い、理論解と比較した。良い一致が得られたため、球形の境界面が大変形する条件下の貯水の動的応答問題に適用した。図.9 に壁境界の変形速度の異なる 2 ケースの 0.5 秒経過時における水圧分布を比較して示す。このように本研究で開発した壁境界は大変形を考慮した解析を行うことができる。

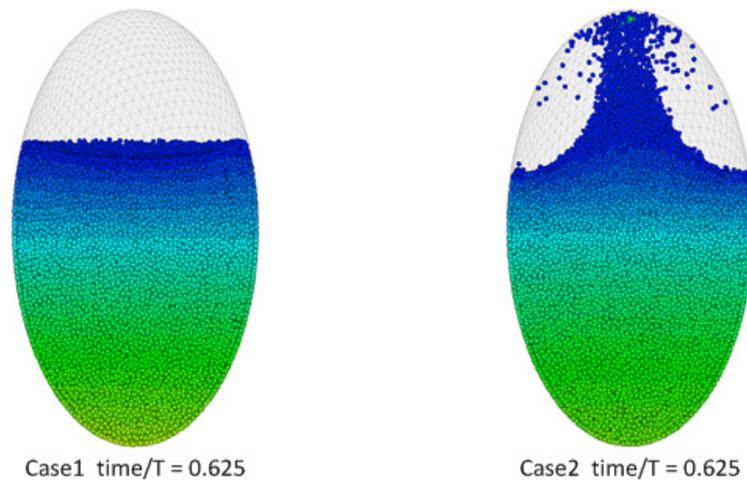


図.9 球形状境界が変形する条件下での中央鉛直断面の圧力分布

6. 流体-構造連成解析

本研究では、2 章や 4 章で開発した粒子型解法による流動体解析手法と、壁面境界計算手法を組み合わせ、メッシュ型解法である FEM との連成解析を行った。連成解析は MPI を用いたプロセス間通信によって、DEM-SPH 連成コードと FEM コード間で連成境界面の荷重ベクトルと変位ベクトルを交換する、逐次時差解法による双方向弱連成手法とした。開発した連成コードは静水解析を行うことで動作検証し、固定屋根式円筒タンクのスロッシング解析に適用した。入力加速度として 1 次モードのスロッシング固有周期と 100gal の振幅を設定した正弦波を入力し、屋根部への流体衝突が発生するスロッシング問題の解析を行った。図.10 にタンク側壁面に最大変位が発生した時刻における、中央鉛直断面の流体の圧力分布とタンクの変位分布を示す。入力波の周期と定点の圧力履歴および変位履歴の周期はほぼ一致しており、加振開始直後の線形的な応答が徐々に非線形的な応答へ変化する過程が確認できた。

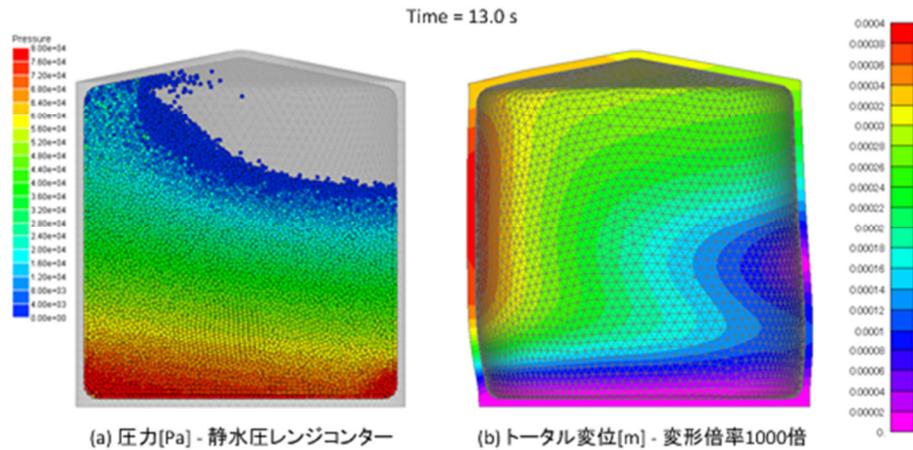


図.10 最大変位発生時刻の中央鉛直断面の圧力と変位分布

7. 結論

本研究で得られた主な結論を以下にまとめて述べる。

- 1) 本研究ではサンドクッションの衝撃応答解析に個別要素法を適用し、重錘形状やクッション材のモデル化精度を向上することで、解析結果が改善することを確認した。土槽は開発した三角形壁面境界でモデル化し、滑らかな表面を再現できる他、メッシュ型解法との連成に役立てることが可能である。
- 2) スロッシングや流体衝突問題を対象に、SPH法による非圧縮性流体解析の精度確認を行った。SPH法による解析結果は実験結果や理論解と良い一致を示した。
- 3) メッシュ型解法との連成問題へ適用するために、変形を考慮することが可能であるSPH法の三角形壁面境界を開発した。また、球形境界が変形する条件下での内部流体の動的応答解析を行い、大変形問題への適用性を確認した。
- 4) 三角形壁面要素を連成界面とする双方向弱連成による流体-構造連成手法を開発し、固定屋根式円筒タンクのスロッシング問題に適用した。屋根部への流体衝突を生じる激しいスロッシング現象を安定して解けることが確認できた。

学位論文審査結果の要旨

本学位申請論文に対して、審査委員全員で口頭試問を行って論文の内容を検討し、7月31日開催の口頭発表及び同日開催の審査委員会にて協議の結果、以下の通り判定した。

本研究は、流動体と接することで構造物に生じる衝撃荷重と構造物の動的挙動を予測し、設計に資するための数値解析手法の構築を行っている。対象とする流動体が自由表面を有して集散分離を生じる非線形性が大きいことに着目し、数値解析手法としてはメッシュに依存しない粒子型解法を適用している。砂層などの離散体集合については個別要素法を、液体に対しては粒子法の1つであるSPH法を選択して、有限要素法に代表されるメッシュ型解法と連成するための効率的で精度ある境界面の取扱方法を開発している。そして開発した手法を防護構造物に設けられる敷砂や堤体への流体衝突やタンク内流体のスロッシング問題などに適用し、その有効性を確認している。さらに、その手法を発展させ有限要素法との双方向連成による動的応答解析へ応用している。

本論文の成果は、自然災害時に流動体により衝撃作用などを受ける各種構造物の動的大変形挙動の解析手法の発展に大きく寄与するものであり、工学上有用な知見を与えるものと認められる。よって、本論文は博士（工学）論文に値すると判定する。