

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18129

研究課題名(和文) 港湾構造物における減災・防災対策のための数値設計法の革新

研究課題名(英文) Study on the numerical wave flume with multi-scaling technique for violent multiphase free-surface flows

研究代表者

鶴田 修己 (Tsuruta, Naoki)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・研究官

研究者番号：30747861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：従来の設計基準では想定されていない超巨大台風直下での高潮氾濫発生時には、極値的高波浪による越流に加えて堤体地盤の洗掘や吸い出し現象等、従来よりも複雑な被災プロセスが伴う。しかし、こうした各現象間でのスケール問題を解決するための数値波動水槽におけるマルチフィジクスへの展開は進んでいない。本研究では、激流の高精度計算に不可欠な高精度粒子法を基礎とする複雑な移動境界条件に対応する解像度可変型固液混相流モデルの開発を進めた。本研究成果は、各分野での固液混相現象の詳細な機構の理解に資するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：For effective design of breakwaters against huge tsunamis, complicated damage process, e.g. sliding of a caisson, scouring of the mound, drifting of blocks should be considered comprehensively. The numerical wave flume is expected to approach this challenging issue, however, this kind of phenomenon comprises prudent scaling effects under the violent flows, and as a result, it is difficult to treat them with a practical computational cost. In this study, improved boundary models are introduced into the so-called accurate particle method in order to resolve this problem. The proposed model includes DEM-MPS coupling model and a multi-resolution scheme so as to develop the comprehensive, accurate and stable framework for violent solid-liquid multiphase flows.

研究分野：海岸工学

キーワード：粒子法 固液混相流モデル 境界条件 高精度粒子法 解像度可変 DEM MPS

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災の巨大津波の来襲以来、防波堤などの海岸保全施設では既往設計の想定を越える最大クラスの津波に対して、その崩壊過程を含む靱性・延性を有した粘り強い構造が求められており、崩壊過程に伴う越流や洗掘過程等のより動的なメカニズムを解した設計手法の確立が急がれている。これら被災メカニズムの解明には、越水に伴う構造物周りの地盤やマウンド砕石等の周囲環境の変動を周囲流れ場・構造物との相互作用を考慮しつつ追跡する必要であるが、水理実験には、コストや計測精度の問題から、複雑移動境界問題を包括的に取り扱うことが可能な高度な数値波動水槽の開発が求められている。

数値シミュレーションの導入に際し、越波・越流現象を前提とした防波堤・防潮堤設計の鍵となるのが、『1.越波現象に伴う砕波現象の再現』、『2.構造物周囲の環境変動に対するリアルタイム補足すなわち高精度な移動境界条件の取り扱い』、『3.構造物や波流れ、基礎地盤等の各現象規模に対応した広範なマルチスケールリンクシステム』の3つの課題である。上記課題3のスケール問題に関する対応策としては、計算機ハードを根拠とする計算高速化によるアプローチが挙げられるが、マクロ・ミクロの混在する極端にスケールの異なる複合現象に対しては、計算コストの観点から同一解像度による統一的な取り扱いは計算規模から依然として非現実的であり、また、計算機ハードについて各研究機関の設備状況に依存するため、実務的な使用を想定すると不適切な選択となりうる。理想的には、各現象スケールに対応した解像度可変型の統一解析手法の導入が求められるが、現状として流れ場の状況に応じたダイナミックな解像度の変動を可能とする計算の枠組みは数値波動水槽において未開発なままにある。

粒子法は、砕波を含む複雑水面形の追跡に優れた完全 Lagrange 型の流体解析手法であり、複雑な界面情報を解き得る計算エンジンとしての妥当性と拡張性に期待が持て、近年では計算手法の高度化とそれに基づく数値波動水槽への適用事例が増えつつある。申請者はこれまで、粒子法を用いた自由水面を含む固液混相流現象の高解像度計算手法の構築に継続的に取り組んでいるが、粒子法では界面の再現に粒子径程度の凹凸を生じることから、非物理的な圧力擾乱を誘発する可能性が明らかとなり、今後、界面形状をより忠実に再現する境界条件モデルの開発が必須である。また、従来型の粒子法では、計算安定性のために計算粒子径を均一に設定する必要があるため、マクロ・ミクロの混在する極端にスケールの異なる複合現象に対しては、計算コストの観点から混合粒径すなわち解像度可変型スキームへの展開が必須である。

2. 研究の目的

港湾内へ流入出する非定常な波・流れや構造物周囲の砕波現象、固相粒子スケールによる地盤マウンド周囲の複雑流など、取り扱いが困難なスケールの極端に異なる複合的な現象を包括的に取り扱うための数値計算手法の革新を目指す。具体的には、粒子法を用いた移動境界条件モデルの高度化と、空間解像度の可変型スキームの開発を目標とする。以下3点を重要項目として研究を進めた。

- 1) 高精度移動境界条件モデルの構築
- 2) 固液混相流モデルの再現性の検討
- 3) 解像度可変型スキームへの展開

3. 研究の方法

本研究では、解像度可変型スキームを適用した高精度固液混相流モデルの開発から、粒子法によるマルチフィジクスへの展開を目標としており、1) 高精度移動境界条件モデルの構築、2) 高精度固液混相流モデルの開発および既往実験との比較検討、3) 解像度可変型スキームの開発を以下の手法で進めた。

1) 砕波現象に伴う水面の大変形においては、水表面の高精度化が必須課題である。粒子法における従来手法では、水表面の境界条件の設定として、水表面近傍の流体粒子に対して強制的に圧力ゼロを付与することで圧力のポアソン方程式が解かれていたが、上記アルゴリズムでは境界粒子の連続式が厳密に解かれず、圧力擾乱の原因となっていた。本研究では、仮想粒子を水表面近傍に設定することで、全流体粒子の連続式が満足される高精度自由表面境界条件モデル (Space Potential Particles: SPP スキーム) を導入するとともに、MPS の標準型カーネル関数にのみ対応していた従来形式から高次型カーネル関数 (Wendland kernel) にも対応した汎用型スキームとして改良を施し、移動境界条件に対する圧力擾乱の改善を図った。提案モデルの再現性の向上については、スロッシング現象を対象とするベンチマークを通して確認を行った。また、SPP の応用から、移動・固定両境界条件に対応する高精度壁面境界条件モデル (WPP スキーム) を新たに構築した。

2) 従来型の粒子法でも、混合粒径粒子を用いた計算の枠組みは提案されているが、非均一粒径による局所平均操作の乱れや、幾何学的に生じる粒子間に生じる乱雑な空隙によって、従来型手法では計算の安定性の確保が困難であった。また、粒子径の動的変更については、重合格的に大小粒子を重複・結節させて、見かけ上の解像度を引き上げる手法は提案されているものの、砕波現象などで粒子の相対位置関係が乱雑となる空間においては、粒子の相対位置関係が固定される本手法では粒子の運動が実質的に制限され、ラグランジュ型手法としての利点が生かせない欠点を抱えている。本研究では、高精度自

由表面境界条件モデル (SPP) を用いて、従来では対応が困難であった異粒径粒子間に生じる不規則な空隙の配列すなわち離散点の欠落を解消するための混合粒径モデルを構築し、重厚格子的なアルゴリズムを組むことなく、粒子径を任意の断面で動的かつ安定的に変更させるための、自粒子の密度ポテンシャルを新たに考慮し直した高解像度化スキームを構築した。

3) スケールの小さい減少 (漂流砂相田の流体挙動など) を追跡するため、固相粒子よりも細かい液相粒子を用いて、開発した高精度自由表面境界条件モデル (SPP スキーム) の適用から固相粒子間の空隙における運動の自由度を確保した新たな固液混相流モデルを構築した。また、既往の実験結果との比較からモデルの再現性を検討した。

4. 研究成果

1) 開発した改良型 SPP スキームを用いて、Kishev et al.(2006)のスロッシング実験を対象に、粒子法による再現計算 (図-1 参照) を実施した。図-2 に、数値シミュレーションにおける $3.0 < t < 12.0$ s での全計算ステップを対象に抽出した圧力計測点での圧力の時系列を示す。なお、水理実験における基準時刻 ($t=0.0$ s) についての詳細が得られなかったため、数値シミュレーション結果の時系列データは水理実験における衝撃波力発生時刻 $t=0.39$ s に一致するようにプロットした。図からは、kernel 関数の高次化 (Wendland kernel) および SPP の導入の両方で、圧力の再現性が大きく改善されることが確認できる。特に、Wendland kernel と SPP を同時に導入した場合、全計算ステップにおいて極端なインパルスノイズが生じないことは劇的な改善と言える。一方、衝撃圧については過小評価となる傾向を取るが、これは水表面近傍粒子間の相互作用力が適切に評価されたことで水表面粒子の水中からの離脱が抑制され、壁面の流体の噴き上げ高さ (水位) が低下したためと考えられる。これについては、表面張力モデルの導入など、水表面追跡の更なる高精度化からの改善が期待される。

次に、開発した高精度壁面境界条件モデル WPP スキームを用いて、ダムブレイク現象を対象に数値シミュレーションを実施し、従来壁面モデルによる計算結果との比較を実施した。図-3 に、各数値シミュレーション結果における代表的な時刻における圧力分布図を示す。従来モデルでは、設置された壁面粒子との接触により、非物理的な圧力の擾乱が砕波状況に無い条件においても発生していたが (図中時刻 $t=0.26$ s), WPP スキームを導入することで、常在する壁面近傍の圧力ノイズが効果的に抑制されていることが確認できる。また、砕波条件下 (図中時刻 $t=0.66$ s) においても、WPP 導入によって圧力ノイズが汎用的に改善されていることが確認できる。

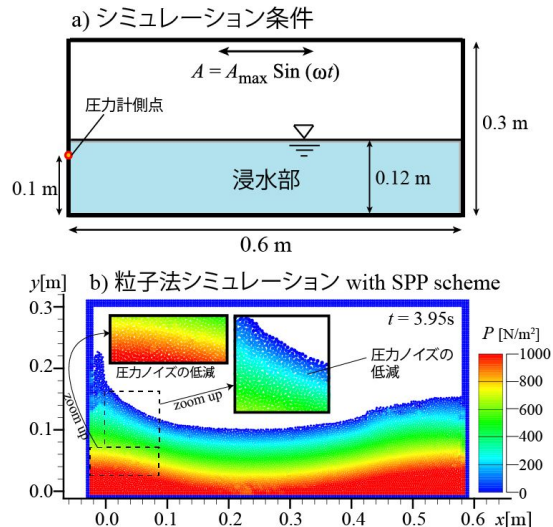


図-1 スロッシングテストの概要及び計算結果

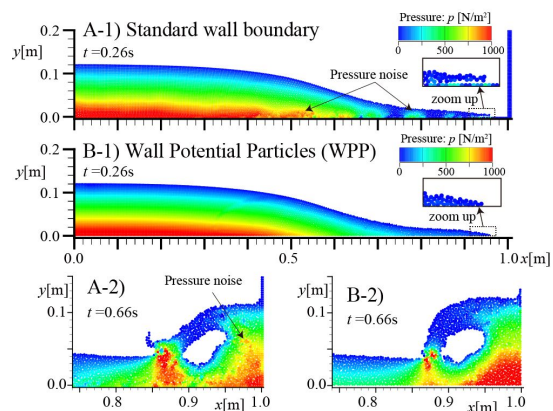


図-2 スロッシングテストの圧力の時系列

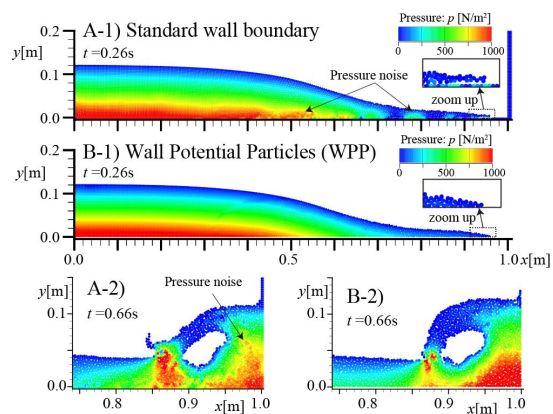


図-3 WPP スキームを用いたダムブレイクテストの圧力分布図

2) 粒子法において固相要素周りの流体挙動を高解像度に追跡する場合には、流体粒子を剛体連結させ、疑似的に巨大固相要素を構築する手順が広く採用されているが、上記手順では、固相表面に不自然な凹凸が生じるため、圧力擾乱の原因となっていた。また、上記手順では、結果的に計算点として取り扱う粒子径が固定されるため、解像度可変型スキーム

に対応する、粒子径に対してより柔軟な固液混相流モデルの開発が必要である。本研究では、固相及び液相粒子を異なる離散化空間で取り扱うオーバーラップ型の固液混相流モデルを開発し、固相・液相間の粒子径に対して柔軟な計算の枠組みを構築した。図-4 に、Zhang et al. (2009)による水中シリンダー群のダムブレイクテストを対象とした開発モデルの数値シミュレーション結果のスナップショットを示す。従来型モデルでは、シリンダー間の小さな間隙には、シリンダーに阻まれて流体粒子が流入できず、流体力の再現性に問題を抱えていた。しかし、オーバーラップ型の開発モデルでは、流体粒子はそれら微小間隙にも充填が可能で、かつ自由に運動が可能であるため、高い再現性を確保しつつ、安定的に固液混相流シミュレーションが可能である。シリンダー輸送の挙動の正確性に加え、碎波地点近傍においても圧力の擾乱が小さく、計算の安定性が高いことが図からは確認できる。

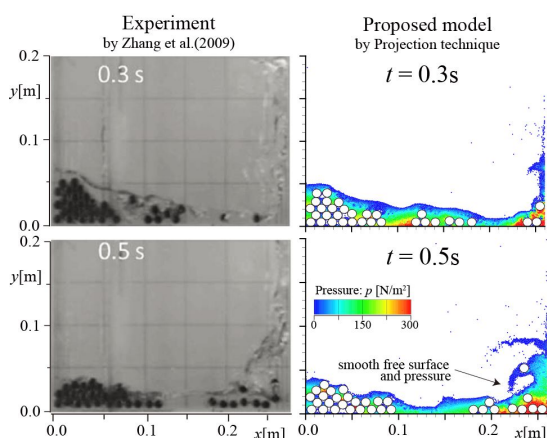


図-4 水中シリンダー群のダムブレイクテストにおける圧力分布図

3) 従来型の粒子法においても、混合粒径粒子を用いた計算の枠組みは提案されているが、非均一粒子径による局所平均操作の乱れや、幾何学的に生じる粒子間に生じる乱雑な空隙によって、計算の安定性確保は困難であった。また、粒子径の動的変更については、重合格子的に大小粒子を重複・結節させて、見かけ上の解像度を引き上げる手法は提案されているが、碎波現象などで粒子の相対位置関係が乱雑となる空間においては、粒子の相対位置関係が固定される本手法では、粒子の運動が実質的に制限され、ラグランジュ型手法としての利点が生かせない欠点を抱えていた。本研究では、高精度自由表面境界条件モデル (SPP) を用いて、従来では対応が困難であった異粒径粒子間に生じる不規則な空隙の配列すなわち離散点の欠落を解消するための混合粒径モデルを構築し、重厚格子的なアルゴリズムを組むことなく、粒子径を任意の断面で動的かつ安定的に変更させるための、自粒子の密度ポテンシャルを新たに考慮し直した高解像度化スキームを構築

した。

図-5 のダムブレイクテストでは、断面 $x=0.1\text{m}$ を境に、粒子を強制的に4分裂させているが、従来型の非均一粒子径取り扱いモデルでは、流体の非物理的な局所的な増大 (水表面の盛り上がり) が発生した。従来型の手法では、粒子間に生じる幾何学的な空隙まで考慮されていないため、密度分布が時間的に不連続となっている。その結果、圧力擾乱を引き起こし得る粒子数密度の局所的な増大が発生している。一方、密度ポテンシャルを導入した開発モデルでは、こうした不自然な水表面の盛り上がりは解消され、粒子数密度の均一的な分布を見せており、体積保存性の向上が確認できる。

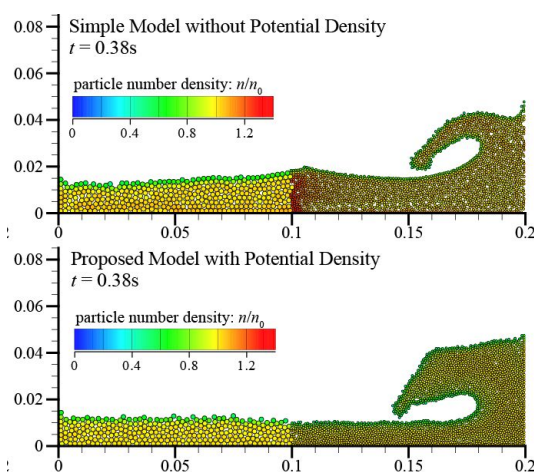


図-5 改良型解像度可変型モデルを用いたダムブレイクテストの粒子数密度分布

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 6件)

鶴田修己, 後藤仁志, 鈴木高二朗, Abbas KHAYYER, 下迫健一郎, 五十里洋行: 高精度自由表面境界モデルを用いた粒子法のスロッシング現象への適用, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.B2-72, No.2, pp.1_49-1_54, 2016.

鶴田修己, 後藤仁志, 鈴木高二朗, 下迫健一郎, Abbas KHAYYER, 五十里洋行: 高精度粒子法を用いた数値波動水槽のための開放境界条件モデルの構築, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.B2-71, No.2, pp.1_13-1_18, 2015.

[学会発表](計 13件)

Tsuruta, N., Harada, H. and Gotoh, H.: 3D simulation of a debris flow by accurate DEM-MPS method, *Proceedings of THESIS-2016*, Tokyo, Japan, 2016.

Tsuruta, N., Gotoh, H. and Khayyer, A.: A novel refinement technique for projection-based particle methods,

*Proceedings of the 11th SPHERIC
International Workshop, Munich, Germany,
2016.*

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鶴田 修己 (TSURUTA, Naoki)

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術

研究所 港湾空港技術研究所 海洋研究

領域 耐波研究グループ・研究官

研究者番号：30747861