

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14256

研究課題名（和文）衝撃砕波力のスケール効果とその数値モデルに関する研究

研究課題名（英文）Study on scale effect of impulsive breaking wave force for numerical simulation

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・研究グループ長

研究者番号：30747861

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：実スケールによる検証が可能な数値波動水槽では、台風下の高波で問題となる衝撃砕波力の再現に、計算コストを抑えつつ構造物周囲の砕波状況を高精度に解くための、より高度な数値モデルの開発が求められている。

本研究では、粒子法を対象に複雑な水面変形を高精度に解くための安定化スキームと、それを高速に解くための解像度可変スキームを開発した。さらに、消波ブロックの間隙構造を解析し、その定量データを基に砕波状況を再現する境界条件モデルを構築した。いずれもベンチマークテストから砕波への適用性の高さが示され、砕波帯の必要な解像スケールに合わせて適切な計算粒子を設置する汎用性のある数値波動水槽の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年巨大化する台風とそれによる海岸・港湾施設の被害増大から、高波に伴う衝撃砕波力の高精度な予測ツールの開発が求められているが、衝撃砕波発生時の流体挙動・力学的機構については、十分な知見が得られていないのが現状である。この解決手段として、数値波動水槽の活用が期待されるが、海岸土木の広大な計算領域を対象とする条件下で複雑な水面変形を伴う砕波現象を十分安定的に解くための計算スキームの開発は未だ十分とは言えない。本研究では、こうした需要に応えるべく砕波を安定的かつ高速に解析が可能な各種計算スキームを開発して、その適用性を示した。これにより、今後、衝撃砕波に関する検討が大きく進むことが期待される。

研究成果の概要（英文）：During typhoons, there is a problem of high waves with impact pressure caused by wave breaking. Numerical wave tanks are expected to reproduce this phenomenon accurately, however, practical and accurate simulations have not been achieved due to the large computational domain and the huge amount of time required for coastal engineering problems.

In this study, a particle-based numerical wave tank is improved for this problem. First, a stabilizing scheme is developed to accurately and stably treat the breaking waves. In addition, a multi-resolution technique is developed for more efficient simulations. Furthermore, a simplified boundary condition model is developed from a geometric analysis of voids between stacked dissipative blocks to reproduce complex wave breaking states effectively. Their good performances are shown through some benchmarks. The versatility of the numerical wave tank has been successfully improved.

研究分野：数値流体力学

キーワード：粒子法 ISPH 砕波 安定化スキーム 解像度可変 消波ブロック 消波境界 数値波動水槽

1. 研究開始当初の背景

巨大台風下の高波は、極端な波高の増大によって砕波状態へと移行し易く、波高相当の静水圧の数倍から数十倍となる衝撃砕波力として防潮堤や防波堤に作用し、大きなダメージを与え得る。この衝撃砕波力の精度良い算定は喫緊の課題となっているが、その力学的特性は十分に明らかとはなっていない。海岸・港湾土木工学の課題に対する数値波動水槽の課長では、計算領域の広さや対象時間の長さから、砕波時に内包される気泡群の断熱圧縮を追跡し得る高い計算解像度による気液二相流計算の実用化は現実的ではない。そのため、計算コストを抑えつつ構造物周囲の砕波状況を高精度に解くための数値シミュレーションモデルの構築が新たに必要である。

2. 研究の目的

未だ十分な把握が進んでいない海岸・港湾構造物周りの高波による砕波状況を精度よく再現するための新しい数値シミュレーションモデルの構築を本研究の目的とする。構造物周囲の砕波を含む複雑な波流れは、飛沫や水面形の大変形を安定的に取り扱うための高精度な安定化スキームと、それらを効率よく追跡するための高速計算のためのアルゴリズムが必要で、更には砕波を誘発する構造物周囲の消波工の適切なモデル化或いは境界条件の設定が肝要である。本研究では、海岸土木工学という広域・長時間の計算対象を前提に、各モデルの改良を進めて、その算定精度の向上を狙う。

3. 研究の方法

本研究では、粒子法型数値波動水槽を対象に、以下4つの手順より、構造物周囲の砕波状況の再現性を高め、理論解や水理模型実験の結果との比較から各モデルの妥当性を検証する。

- 1) 水表面境界をより安定的かつ精度よく解くための高精度スキームの開発。
- 2) 複雑な水面変形を高精度かつ高速に効率よく追跡するための解像度可変型スキームの開発
- 3) 海岸構造物に用いられる消波工の形状解析
- 4) 気泡の混入や水粒子速度等を含む複雑な砕波状況を再現するため簡易な物理モデルを構築し、粒子法型数値波動水槽へ境界条件モデルの一部として導入する

4. 研究成果

1) 高精度安定化スキームの開発

数値波動水槽では計算の安定性と精度の向上が常に求められており、特に砕波は圧力擾乱が顕在化しやすい現象であるため、何らかの安定化スキームが導入されることが一般的であるが、基礎方程式に反する例外処理は計算精度の低下に繋がる恐れがある。粒子法でも、従来型圧力勾配モデルに、粒子の重複を防ぐための人工斥力が半経験的な値として陰的に含まれていたため、計算精度の向上にある種の制限が課されていた。これに対し、圧力勾配項に対して人工斥力項を切り分け、その寄与率を必要最小限に抑えることで計算の安定性と精度を同時に向上させた。本スキームの前身に当たる DS スキームでは、人工斥力が粒子間座標のみを根拠に定義されていたため、斥力が過大となり得たが、本研究では、粒子間の座標に加えて接近速度を考慮することで、より安定かつ精度の高い安定化スキーム(Advective Dynamic Stabilization: 以下, ADS)を開発した。接近速度は、kernel 関数による重みの変動値を利用し、圧力のポアソン方程式(PPE)のソース項に用いられる速度発散モデルと関連付けることで適切な斥力が得られた。また、複数のベンチマークテストを実施し、従来型スキームの DS との比較から数値ノイズの除去効果の向上や、エネルギー保存性の改善を確認した。図1及び2は、引張力を含む自由水表面の大変形の基本的なテストである液滴の回転変形を対象とした再現テストであり、圧力及び速度発散において発生する数値ノイズが ADS によって劇的に改善されることが示され、エネルギーの保存性も確認された。

2) 解像度可変型スキームの開発

数値波動水槽の一つである粒子法では、各計算点(Lagrange 粒子)で局所平均操作を介した粒子間相互作用力が導かれるが、

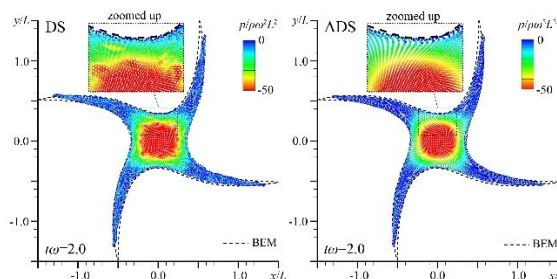


図1 DSとADSの圧力分布の比較
(A rotating Square Patch test. 左: DS, 右: ADS)

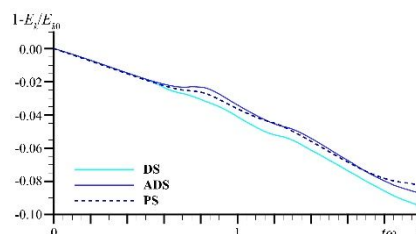


図2 運動エネルギーの比較
(DS vs. ADS vs. PS)

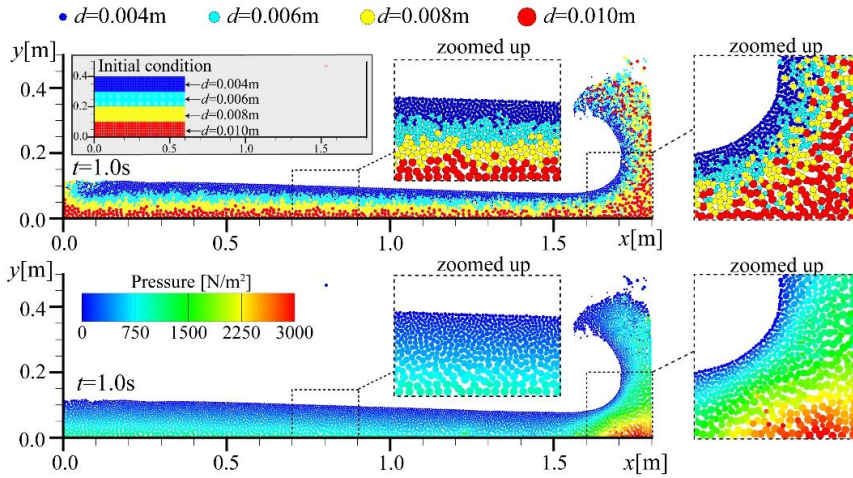


図 3 混合粒径モデルによるダム崩壊計算

局所平均操作に影響を及ぼす混合粒径の導入は計算安定性の観点から未だ対応が難しい。近年では、重合格子法のように粒径毎に分けられた複数の離散化空間を重ね合わせる形で混合粒径を導入するモデルも開発されているが、必要となる計算解像度が時々刻々変化する非定常流場への適用には慎重な運用が求められる。この解決に、本研究では kernel 関数の離散化過程を見直し、単一の離散化空間に混合粒径の流動粒子を配置可能な案断的なスキームを新たに開発した。開発に当たって、kernel 評価での規格化に用いられるパラメータを Dynamic 化し、さらに従来の近傍粒子の体積を kernel 内に組み込み、積分操作を介したより高次の kernel 評価を可能とする枠組みを構築した。開発したモデルを用いた、異相界面及び自由界面を対象としたベンチマークテストでは、時間経過とともに変形する界面・自由表面に対して、高解像度粒子（小粒子）が柔軟に追従することで界面近傍の解像度が常に高いまま維持されている様子が確認できた。また、衝撃波力の発生時においても、顕著な圧力ノイズは見当たらず、各粒径の複雑な混合状態でも滑らかな圧力分布が再現された（図 3, 4 参照）。これにより、碎波帯の必要な解像スケールに合わせて適切な粒子を効率よく設置できる枠組みが構築できた。

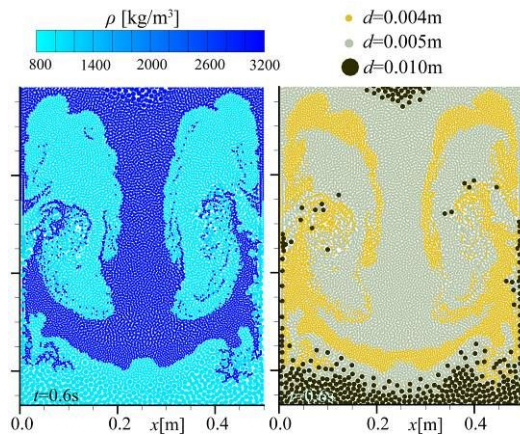


図 4 混合粒径モデルによる混相流計算

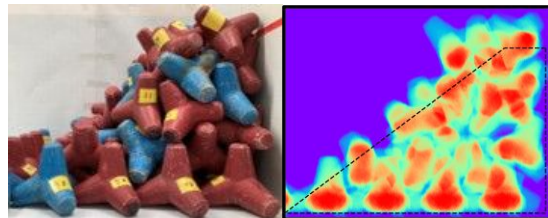


図 5 消波ブロックの内部構造の解析

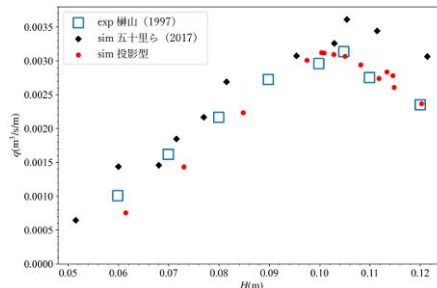


図 6 改良型消波境界による越波流量の再現

(3) 消波工間隙の解析と境界モデルの改良

従来のポラスモデルでは、主に碎石や人工粒子を用いた透水実験を通じて、半経験的な実験定数が透水域全域で均一的に適用されるが、消波ブロックによる消波過程では慣性力が卓越するため、複雑流を生み出す間隙流路の複雑性すなわち構造の非均一性を反映することこそが肝要である。そこで本研究では、ブロックの透水機構を再検討すべく、乱積みした消波ブロック模型の3次元データを3Dスキャンによって取得・解析し、これまで明らかでなかった、人工粒子による一様なポラス体との明確な差を可視化した（図 5 参照）。さらに、得られた解析データから、消波ブロック間隙の内部特性を反映した2次元数値波動水槽に適した新しい消波ブロック境界を作成した（図 4 参照）。これにより、従来の流体抵抗を均一的に与えるポラスモデルでは表現が出来なかった、消波ブロック内部の高速流や複雑な渦構造が再現できた。さらに、碎波を含む高波下において、これまで再現性の確保が困難であった越波流量についても、水理模型実験結果に対して高い精度で再現する事に成功した（図 6 参照）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsuruta Naoki, Khayyer Abbas, Gotoh Hitoshi	4. 巻 266
2. 論文標題 Development of Advective Dynamic Stabilization scheme for ISPH simulations of free-surface fluid flows	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 106048 ~ 106048
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compfluid.2023.106048	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Tsuruta, N., Khayyer A. and Gotoh, H.
2. 発表標題 Modified Dynamic Stabilization scheme for ISPH simulations
3. 学会等名 SPHERIC 2022 International Workshop（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsuruta, N., Khayyer A. and Gotoh, H.
2. 発表標題 Development of an improved free-surface boundary model for ISPH simulation
3. 学会等名 The 15th SPHERIC International Workshop（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsuruta, N., Dongfang, Liang., Khayyer A. and Gotoh, H.
2. 発表標題 Lagrangian Multi-Resolution Technique for ISPH
3. 学会等名 The 18th SPHERIC International Workshop（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鶴田修己・Dongfang Liang・Abbas Khayyer・後藤仁志
2. 発表標題 粒子法における非重合型解像度可変計算のための混合粒径モデルの改良
3. 学会等名 土木学会海岸工学講演会（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鶴田修己・Abbas Khayyer・後藤仁志
2. 発表標題 粒子法における圧力擾乱抑制のための安定化スキームの改良と碎波現象への適用
3. 学会等名 土木学会海岸工学講演会（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsuruta, N., Khayyer A. and Gotoh, H.
2. 発表標題 Development of Wavy Interface model for wave generation by the projection-based particle methods
3. 学会等名 土木学会海岸工学講演会（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	University of Cambridge			