

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04665

研究課題名（和文）津波による構造物の破壊メカニズム解明のための固体流体連成解析手法の構築

研究課題名（英文）Development of a numerical method of fluid-structure interaction for elucidation of fracture mechanism of structure by tsunami

研究代表者

櫻山 和男（Kashiyama, Kazuo）

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：10194721

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、津波の発生・伝播から構造物の亀裂の発生・進展および構造物の破壊までの一連の挙動を高精度に評価可能な固体・流体連成解析システムの構築を行った。津波解析手法としては、沖合は2次元解析手法を構造物周辺は3次元解析手法を用いるハイブリッド手法を適用したことにより効率よく解析を行うことが可能となった。また、コンクリート構造物の解析には、モルタルと粗骨材の界面における脆弱性の考慮を行ったことにより、構造物の亀裂の発生と進展を高精度に行うことが可能となった。なお、大規模計算に対応するため、並列計算手法を導入した。本解析システムの妥当性の検証を既往の実験結果との比較のもとに行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本システムにより、高精度な津波浸水域の予測はもとより、津波により構造物が受ける流体力や、構造物に生じる応力・ひずみ、構造物の破壊・進展過程を精度よく評価することが可能になる。また、コンクリート構造物の設計および津波被害軽減対策の有効なツールとなり得る。さらに、バーチャルリアリティ技術による立体視に基づく可視化を用いているため、津波による破壊メカニズムをわかり易く表示可能なため、防災教育にも有効なツールとなることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a solid-fluid interaction analysis system that can evaluate a series of behaviors from the generation and propagation of tsunami to the generation and propagation of cracks in structures, and the destruction of structures. For the tsunami analysis method, we applied the hybrid method developed by the authors, which uses a two-dimensional analysis method for offshore area and a three-dimensional analysis method for land area. For the analysis of concrete structures, the fragility at the interface between mortar and coarse aggregate is considered in order to simulate the generation and propagation of cracks accurately. Furthermore, in order to realize the large scale simulation, a parallel computational method is introduced. The validity of this system has been verified by comparing with the experimental results.

研究分野：計算力学、応用力学

キーワード：津波 流体構造連成解析 メソスケール 損傷モデル 並列計算

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災を契機として、津波に対する被害予測には従来の浸水域の予測のみでなく構造物の被害予測をも含めたものが求められるようになり、それに伴い三次元流体 - 固体連成解析の構築事例が数多く報告されている。現在構築されている手法は、粒子法または個別要素法などによるものが多い。粒子法は近年急速な進歩を遂げているが破壊解析に必要な圧力の精度に依然として課題があり、また個別要素法は連続体モデルではないので構造物内の応力やひずみの評価が困難である。一方、津波は地震によりプレートが移動・破壊することにより水面変動が発生して、それが地形の影響により浅水変形を伴いながら陸域に侵入し、陸域に到達すると地形や構造物による反射・回折を繰り返し、現象は数時間にも及ぶ。また、沖合では、鉛直方向の加速度は無視できるので2次元の挙動となるが、沿岸域や陸域では3次元の挙動となる。従って、陸上構造物の被害を正確に予測するためには、津波の発生から陸上への伝播・遡上および津波流体力を算定しての固体 - 連成解析をシームレスに行うことが必要不可欠となる。また、解析領域も広領域となるため、対象の都市・地域を正確にモデル化しての計算は超大規模計算になるため効率の良い並列計算手法を用いることも重要となる。

2. 研究の目的

本研究は、津波の発生・伝播から構造物(対象としてはコンクリート構造物)の亀裂の発生・進展および構造物の破壊までの一連の挙動をシームレスにかつ高精度に予測・評価可能な固体 - 流体連成解析システムの構築を行う。固相・気相・液相の三相に対して連続体でモデル化を行い、構造物の微視的構造を考慮した、高精度でかつロバスト性の高いメソスケールの固体 - 流体連成解析システムの構築を行う。また、実規模解析の実現のために、微細メッシュを用いた超大規模計算を効率よく解析可能となる並列計算プログラムを作成する。システムの妥当性評価および構造物の破壊メカニズムの解明にあたっては、実験との詳細な比較検討およびバーチャリアリティ技術に基づく高品質な立体映像の可視化手法を用いる。材料の配合を含めたコンクリート構造物の計画・設計および津波防災対策に対して有効となるツールの開発を目指す。

3. 研究の方法

本研究では研究目的を達成するため、研究内容を以下の5項目に分類して、研究を実施した。

- (1) 流体メソスケール解析システム構築：沖合での津波の発生から遡上までをシームレスに行うために、沖合では浅水長波近似を仮定した2次元解析手法を適用し、浅海域や陸上部については Navier-Stokes 方程式を用いた3次元解析手法を適用するハイブリッド手法を用いる。また、メソスケールレベルに適用可能とするために、表面張力効果および乱流モデルの導入等を行う。
- (2) 固体メソスケール解析システム構築：有限要素法をベースにした損傷モデルを用いたシステム構築を行う。構築にあたり、メソスケールレベルの亀裂進展解析を高度に行うために、骨材とモルタルとの界面における脆弱性の考慮を行う。
- (3) 連成メソスケール解析システム構築：(1)と(2)を統合することでシームレスな連成解析システムを構築する。連成解析手法としては、弱連成解析手法を採用する。
- (4) 超並列解析システムの構築：大規模計算を高速に行うために、並列計算法の導入を行う。大規模計算においては、入力データの読み込み、計算結果の出力に対する時間も膨大なものとなるため、これらの1/0に関しても効率化を行う。
- (5) 全体システムの適用と評価・改良：既往の実験結果等との比較を通じて、全体システムの妥当性の検討を行うとともに、計算手法の改良を行う。また、システムの妥当性の評価には、バーチャリアリティ技術を用いた立体視に基づく可視化手法を用いる。

4. 研究成果

(1) 数値解析手法

流体解析に対しては、支配方程式として沖合での津波の発生から遡上までをシームレスに行うために、沖合では浅水長波近似を仮定した浅水長波方程式を用いた2次元解析手法を適用し、浅海域や陸上部については Navier-Stokes 方程式を用いた VOF 法(VOF 関数と呼ばれるスカラー関数(液体:1、気体:1、界面:0.5)によって界面を表現する手法)に基づく3次元解析手法を適用するハイブリッド手法を用いる。離散化手法としては、空間方向に SUPG/PSPG(Streamline Upwind Petrov Galerkin/Pressure stabilizing Petrov Galerkin)法に基づく安定化有限要素法、時間方向に Crank-Nicolson 法を適用する。また、メソスケールレベルに適用可能とするために、表面張力効果および LES 手法に基づく乱流モデルの導入等を行った。

一方、固体解析においては、弾性体の支配方程式を用いる。破壊挙動を考慮するために、車谷らが考案した損傷モデル(損傷の度合いを表す損傷係数の値は0~1をとる:損傷の判定には、ひずみテンソルをスカラー値へ変換した等価ひずみを用いている。)を用いている。なお、本研究ではコンクリート構造物を対象とするが、センチメートルスケールのメソスケールレベル

の亀裂進展解析を高度に行うために、骨材とモルタルとの界面に存在する脆弱性を有する遷移帯の考慮を行った。また、骨材とモルタルの幾何形状を厳密に再現したメッシュ分割を行うことは、非現実的であるため各材料の体積率を用いたメッシュフリー有限要素法を用いた。

上記の手法を用いて固体-流体連成メソスケール連成解析手法の構築においては、弱連成解析手法を採用した。また、大規模計算に対応するため、領域分割に基づく並列計算手法を導入し MPI を用いて並列プログラムの構築を行った。

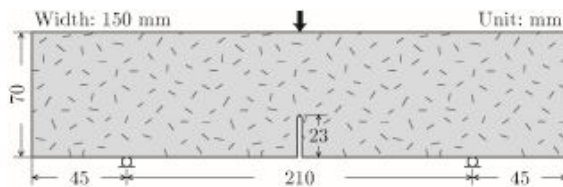
(2) シミュレーション結果

1) 固体のシミュレーション

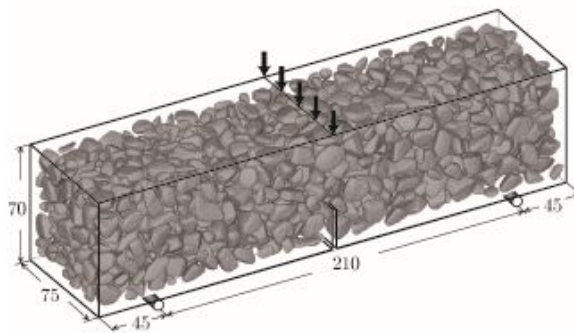
本研究で構築した 3 次元メソスケールの固体解析手法の妥当性を検証するために、実験結果との比較を行った。

解析対象は、図 1(a) に示す中央に切り欠きを有するコンクリートの 3 点曲げ試験である。粗骨材は、実験に用いられた最大寸法を参考に、規則性のない多面体によりモデル化し、乱数を用いて充填させることで図 1(b) に示すような 3 次元メソスケールモデルを作成した。なお、有限要素には 1 次の六面体要素を用いて粗骨材形状とは無関係に生成し、メソスケールモデルと重ね合わせることで、各材料の体積率を求める。また、材料定数は図 1(c) に示す値を用いた。

シミュレーション結果として、図 2 に荷重載荷点における荷重 - 変位関係を示す。図より、実験結果と若干の差異はあるものの、荷重 - 変位応答は概ね一致していることが分かる。また、図 3 ははり内部に形成されたひび割れの 3 次元幾何形状を可視化した結果である。図より、切り欠きの先端から発生したひび割れが粗骨材の界面を通過して、3 次元的に複雑な形状となって進展していく過程が再現されていることが分かる。



(a) Three-point bend test of concrete notched beam



(b) 3D meso-scale model

	E (GPa)	ν	ε	G_f (N/mm)	k
Mortar	15	0.2	0.0003	0.06	10
Aggregate	40	0.2	—	—	—
Interface	15	0.2	0.0001	0.02	10

(c) Material parameters

図 1 コンクリートはりの 3 次元問題

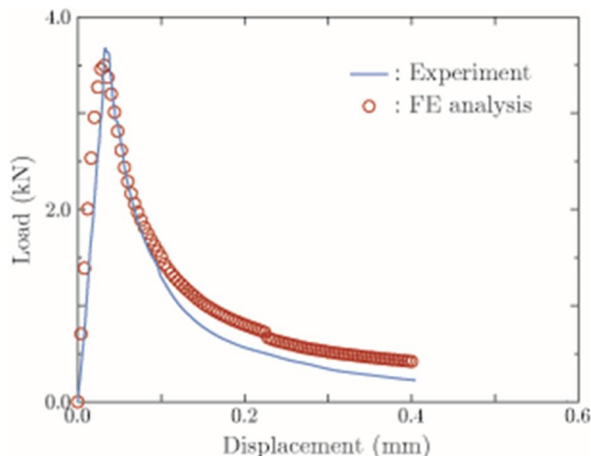


図 2 実験結果との比較 (荷重 - 変位の関係)

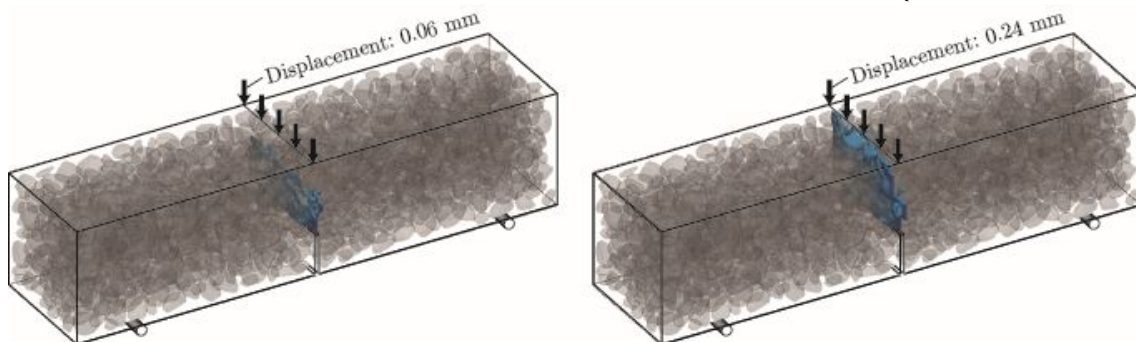


図 3 メソスケール解析における 3 次元ひび割れ分布

2) 固体 - 流体連成解析

固体 - 流体連成解析においては、粘性を考慮せず慣性力のみを考慮した非減衰動的解析手法を用いた。

数値解析例として、図 4 に示す 3 次元の防波堤モデル (高さ 7m) を考える。構造物の材質は一般的なコンクリートを仮定する。初期条件として、段波の津波モデルを仮定して、流体構造連成解析を実施した。図 4 に、3.0 秒後、3.2 秒後、3.4 秒後の計算結果 (左: Mises 応力、右: 損

傷係数)を示す。図より、津波が構造物に衝突することにより隅角部において構造物の損傷が発生し、ひび割れが進展していく様子が確認でき、定性的に妥当な結果が得られていることが分かる。また、損傷した要素には応力が作用していないことも確認できる。実験結果との定量的な比較検討が今後の課題である。

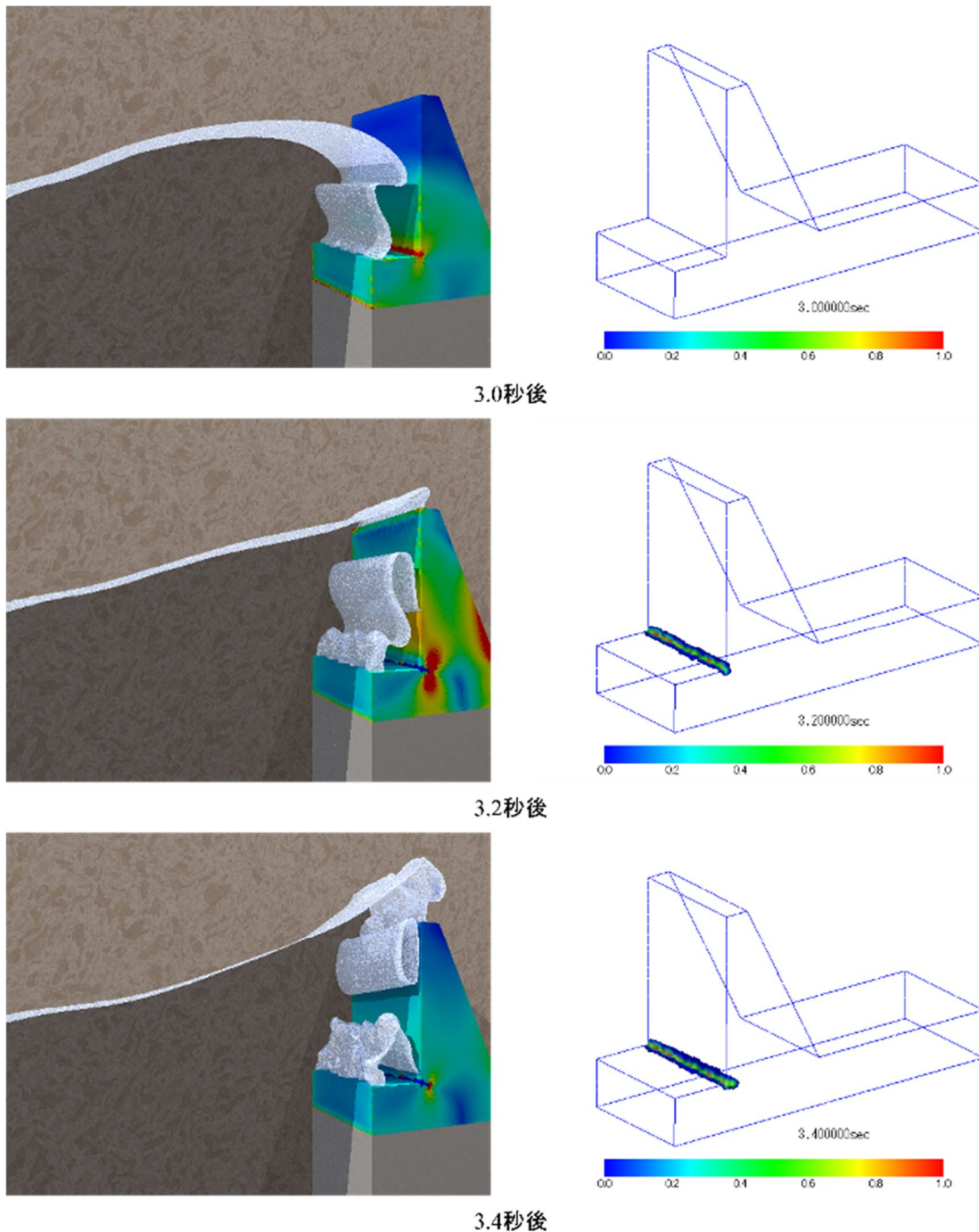


図4 非定常の固体流体連成解析(左:ミーゼス応力、右:損傷係数)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 佐々木浩武, 加藤匠, 車谷麻緒	4. 巻 76/2
2. 論文標題 損傷モデルによるコンクリートの非均質性に関するモンテカルロシミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_163-I_171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 車谷 麻緒, 加藤 匠, 村松 真由	4. 巻 No.20200008
2. 論文標題 フェーズフィールド法によるコンクリートのメゾスケールモデルの作成とその数値実験への適用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 加藤匠, 龍頭正幸, 車谷麻緒	4. 巻 76/1
2. 論文標題 界面の脆弱性を考慮した損傷モデルによるコンクリートのメゾスケール破壊シミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 38-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 相馬悠人, 車谷麻緒	4. 巻 75
2. 論文標題 界面の摩擦接触を考慮した損傷モデルによる鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_165-I_173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 吉田也真都, 榎山和男, 長谷部寛
2. 発表標題 Isogeometric Analysisによるポテンシャル流れ解析
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田也真都, 榎山和男, 長谷部寛
2. 発表標題 IGAによる片持ち梁の三次元動的解析
3. 学会等名 第76回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王博、須藤瑞輝、榎山和男
2. 発表標題 VR 技術に基づく防災教育のための津波避難体験システムの構築
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Kashiyama, I.Kanazawa, M.Ueno, M.Nakamura and H.Okawa
2. 発表標題 Development of Tsunami Experience System for Disaster Mitigation Education
3. 学会等名 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金澤功樹、凌国明、車谷麻緒、樫山和男
2. 発表標題 等方性損傷モデルを用いた三次元流体 - 構造連成解析手法の構築
3. 学会等名 第46回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 王博、金澤功樹、樫山和男
2. 発表標題 インタラクティブなVR津波可視化手法の構築
3. 学会等名 第46回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 I. Kanazawa, G. Ling, M. Kurumatani and K. Kashiya
2. 発表標題 Development of a Fluid-Structure Interaction Model using 2D-3D Hybrid Analysis Method
3. 学会等名 Asian Pacific Congress on Computational Mechanics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小沼慎弥、車谷麻緒、凌国名、樫山和男
2. 発表標題 破壊力学における損傷モデルによる流体力を受けるコンクリート構造物の動的破壊解析
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金澤功樹、凌国明、車谷麻緒、樫山和男
2. 発表標題 2D-3Dハイブリッド解析手法と等方性損傷モデルを用いた流体 構造連成解析
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019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
研究 分担者	有川 太郎 (Arikawa Taro) (00344317)	中央大学・理工学部・教授 (32641)	
研究 分担者	車谷 麻緒 (Kurumatani Mao) (20552392)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授 (12101)	

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
---------	---------