

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760357

研究課題名(和文)津波による流体力と漂流物による衝突力を受けるコンクリートの動的破壊挙動の解明

研究課題名(英文)Fracture behavior of concrete subjected to Tsunami impact

研究代表者

車谷 麻緒 (Kurumatani, Mao)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：20552392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：津波に対するコンクリート構造物の安全性を評価するには、精度と効率性を備えた津波シミュレーションとコンクリート構造物の破壊シミュレーションを構築する必要がある。本研究では、まず破壊力学を考慮したコンクリートの損傷モデルを定式化し、これを応用した鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション手法を開発した。実験と解析を比較し、実験結果を精度よく再現できることを確認した。津波のモデル化には、水面を効率的にモデル化できる方法を適用し、従来の方法と同程度の精度を確保しつつ、計算負荷を約半分に低減させた津波シミュレーション手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Computational methods for simulating Tsunami and concrete fracture are required to evaluate the safety of concrete structures for Tsunami impact. In this study, a damage model based on fracture mechanics for concrete is formulated, and the crack propagation method with the damage model is developed. The comparison between numerical and experimental results shows that the proposed method is capable of simulating fracture behavior of concrete with high accuracy. A method which is capable of effectively modeling free surface flow is applied to the computational modeling of Tsunami flow. The comparison with the experimental result available in a literature shows that the proposed method can simulate 3-D water flow with moderate accuracy and low computational costs.

研究分野：土木工学における数値シミュレーション

キーワード：破壊シミュレーション 損傷モデル 鉄筋コンクリート 津波シミュレーション 一般化有限要素法

1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震による沿岸部の津波災害により、防波堤などのコンクリート構造物も大きな被害を受けた。その原因として、津波による流体力が甚大であったことが挙げられるが、流体力を受けた際のコンクリートの詳細な動的破壊挙動が未解明である、あるいはコンクリートの詳細な動的破壊挙動のモデル化が未完成であることも同時に指し示している。

一般に、コンクリートの破壊挙動をモデル化するには、多量にかつ複雑に発生・進展するひび割れ考慮する必要があり、数値解析でひび割れ進展挙動を3次元で再現するのは非常に困難である。現在は、主に限られた条件での実験と、ひび割れ進展を正しく考慮していない簡易な解析により、コンクリート構造物の力学挙動が評価されている。津波等の動的な荷重の規模によっては、安全と思われている構造物が危険にさらされている可能性がある。

コンクリート構造物に対する津波災害を評価するには、当然ながら破壊のモデル化と構造-流体連成解析を融合させて、高精度なシミュレーション技術を構築し、その一部始終を可視化することが必要である。しかし、構造物の破壊と構造-流体連成解析の両方を研究している例は非常に稀で、作用する流体力や衝突力、構造物の動的な破壊挙動など未解明な点が多いばかりか、それを評価するシミュレーション技術そのものが未完成であると言わざるを得ない。

2. 研究の目的

本研究では、流体力を受けるコンクリートの動的破壊挙動を数値的に再現し、破壊メカニズムを明らかにするために、研究内容を次の3つに分類する。

- コンクリートの破壊挙動のモデル化
- コンクリートの動的破壊挙動の再現
- 構造-流体連成解析への応用

コンクリートは材料内部において、弾性限界を過ぎると、非均質構造特性に起因して微細ひび割れが発生・進展した後、巨視ひび割れに成長し、崩壊に至るとされている。その中でも、微細ひび割れ挙動が巨視的な強度や靱性に大きく寄与していると考えられている。本研究では、コンクリートと鉄筋の構造を可能な限り詳細に再現し、材料の力学挙動をモデル化することにより、可能な限り無用な近似を使うことなく、コンクリートの破壊力学挙動をありのままに再現する。つまり、微細ひび割れの形成から、巨視ひび割れへの成長と崩壊挙動までを統一して表すことにより、コンクリートに代表的なメソスケールの破壊挙動を明らかにする。

コンクリートは、ひずみ速度に依存した破壊挙動を示すことが実験的に確かめられている。しかし、これを微視的な非均質性とそれに起因するひび割れ挙動と関係付けて体

系的に行っている研究はほとんど存在しない。本研究では、コンクリートの非均質構造特性が、ひずみ速度に応じた微細ひび割れを発生させ、これが原因で巨視的な破壊に至ると仮定し、コンクリートの破壊のモデル化を動的破壊にも適用する。既往の実験研究において、ひずみ速度に応じて見かけの強度が変化するだけでなく、コンクリート供試体に生じるひび割れモードも異なることが報告されているので、これを再現することにより高精度な動的破壊解析法の構築を目指す。

津波による流体力を評価して、コンクリート構造物の破壊シミュレーションを行うには、構造-流体連成解析への応用が必要である。剛体と流体を連成させる解析は広く行われているが、詳細な破壊挙動を解析できるツールと流体解析を組み合わせた例はほとんどなく、津波災害に対して早急な解析技術の開発が求められる。本研究では、流体力を受けるコンクリートの変形・破壊挙動を詳細にシミュレートし、大規模可視化装置を用いて、その一部始終を再現することを目指す。

3. 研究の方法

まず、コンクリートの準静的な破壊をシミュレートするための解析手法を開発する。コンクリートの材料の非均質構造特性を考慮して、3次元のひび割れ進展を再現できる解析手法の開発を検討する。本研究では、可能な限り無用な近似を使うことなく、コンクリートのメソスケールでの破壊力学挙動をありのままに再現することを意図している。検用例として、まずメソスケールでの微細ひび割れが開口や閉口を繰り返し、自然に巨視ひび割れへと成長する数値実験を行う。適切にモデル化が行われ、破壊解析に拡張されていれば、コンクリートに特有の破壊時の軟化現象や寸法依存挙動を再現可能であり、これを数値実験により確認する。既往の実験結果と比較し、開発した方法の妥当性について検討する。

土木構造物の多くは、鉄筋コンクリートである。津波災害に対する構造物の安全性を評価するには、鉄筋コンクリートの破壊挙動を精度よく再現できる解析手法が必要である。先に開発するコンクリートの破壊解析手法に、鉄筋の塑性モデルを組合わせて、鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション手法へと拡張する。鉄筋コンクリートの破壊形態は、せん断補強筋の数によって異なる。せん断補強筋の数が少ないと脆性的なせん断破壊となり、せん断補強筋の数が多くと延性的な曲げ破壊となる。せん断補強筋の異なる鉄筋コンクリートはりの曲げ試験を行い、開発する破壊シミュレーション手法の結果と比較することにより、破壊形態の相違を再現できるか検証することにより、解析手法の妥当性を検討する。

構造物の数値解析には有限要素法を用いるため、津波シミュレーションにも同様に有

限要素法の適用が望まれる。しかし、流体解析の多くは差分法が用いられている。そこで、流体解析用に拡張が施された安定化有限要素法を津波シミュレーションに適用することとする。さらに、流れのオイラー解析における自由表面流れ解析を効率化させるために、一般化有限要素法を流体解析に応用する。流体解析から得られる流体力を構造物に作用させ、構造物の動的解析に繋げることにより、津波を受ける構造物の動的破壊シミュレーションへと発展させる。

4. 研究成果

コンクリートの破壊のモデル化と離散化解析手法に関して、2つの方法を検討した。ひとつは、材料の微細組織を粒子群に離散分割し、それらを構造要素でつなぎ、変形と破壊をモデル化する方法である。破壊のモデル化と構成モデルの導入が容易であり、コンクリートの破壊挙動を詳細に再現することができた。

もうひとつの方法として、準脆性材料の破壊力学を考慮した損傷モデルを独自に定式化し、これを有限要素法に応用したコンクリートのひび割れ進展解析手法を開発した。破壊力学を考慮した定式化であるため、コンクリートの基本的な破壊挙動を精度よく再現することができ、有限要素法との相性もよく、拡張性・汎用性のあるひび割れ進展解析手法である。この方法を鉄筋コンクリートにおける内部ひび割れ進展問題に適用した結果、実験で確かめられている内部ひび割れの進展挙動を3次元で詳細に再現できることを示した。津波シミュレーションとの連成を考えると、構造解析は有限要素法が適しているため、後者の損傷モデルによるひび割れ進展解析手法を鉄筋コンクリートに応用することとした。

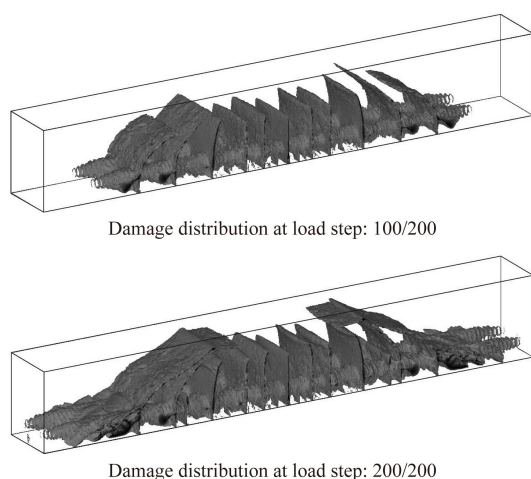


図1 鉄筋コンクリートの破壊解析の結果

鉄筋コンクリートの破壊を解析するために、非線形有限要素法に基づく鉄筋コンクリ

ートの破壊シミュレーション手法を開発した。具体的には、独自に定式化した修正 von-Mises 損傷モデルをコンクリートの材料モデルに適用し、von-Mises 塑性モデルを鉄筋の材料モデルに適用した。開発した解析手法の基本性能を検証したのち、RC はりの4点曲げ試験に対して、実験結果と解析結果を比較したところ、提案手法による破壊シミュレーションは、実験結果を定量的に再現でき、かつ RC 部材におけるせん断補強筋の効果を評価可能な解析手法であることを示した。図1は開発した手法を用いて、鉄筋コンクリートはりの破壊シミュレーションを行った例です。この図に示されるように、鉄筋コンクリートに生じる複雑なひび割れ進展挙動を3次元で詳細に再現できていることがわかる。また、デジタル画像解析を用いて、ひび割れ進展を計測し、破壊シミュレーションの結果と比較した結果、実験結果とほぼ同様のひび割れ進展を再現できることも確認した。

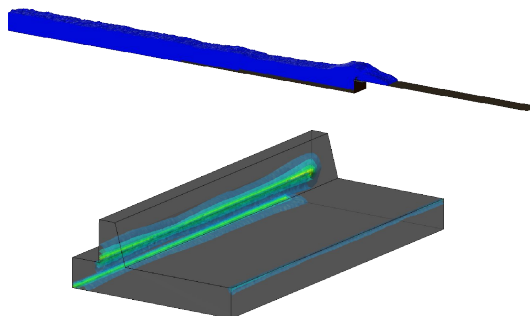


図2 津波と構造物の数値解析結果

津波を受けるコンクリート構造物の安全性を評価するには、構造物に作用する荷重を計算する必要がある。構造物の数値解析には有限要素法を用いるため、本研究では流体解析にも有限要素法を適用した。具体的には、安定化有限要素法を用いて、津波シミュレーション手法を構築した。津波シミュレーションにおける自由表面流れのモデル化には一般化有限要素法を用いて、数値解析の効率化を行った。数値実験を行った結果、文献で示されている実験結果と同様の流体力を得ることができ、また計算時間を約50%短縮することができた。有限要素法による構造物の動的解析手法を構築し、津波シミュレーションから得られた流体力を構造物に与えて動的解析を行った。図2の結果の一例を示す。静的解析との比較を行い、津波を受ける構造物の動的応答を評価した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

車谷麻緒, 松浦遵, 根本忍, 呉智深, 『コ

ンクリートのひび割れ進展計測のための画像解析手法に関する基礎的研究』, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, 70 巻, I_135-I_144, 2014.

車谷麻緒, 根本優輝, 岡崎慎一郎, 廣瀬壮一, 『異形鉄筋周辺のコンクリートに形成する内部ひび割れモードの再現シミュレーション』, 日本計算工学会論文集, 査読有, 2014 巻, 20140008, 2014.

神野真弥, 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 櫻山和男, 『微細ひび割れの形成と接触を考慮した準脆性材料の圧縮破壊シミュレーション』, 日本計算工学会論文集, 査読有, 2014 巻, 20140006, 2014.

車谷麻緒, 神野真弥, 寺田賢二郎, 『粗骨材の幾何学的非均質性に着目したコンクリートの圧縮破壊シミュレーション』, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, 69 巻, I_115-I_123, 2013.

車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 櫻山和男, 『コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価』, 日本計算工学会論文集, 査読有, 2013 巻, 20130015, 2013.

車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 加藤準治, 櫻山和男, 『破壊シミュレーションのための構造要素を用いた離散体解析法』, 日本計算工学会論文集, 査読有, 2013 巻, 20130010, 2013.

[学会発表] (計 9 件)

車谷麻緒, 相馬悠人, 根本優輝, 『非線形有限要素法によるせん断補強筋の異なる RC はりの 3 次元破壊シミュレーション』, 第 18 回応用力学シンポジウム, 2015.5.16, 金沢大学 (石川県・金沢市).

高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 小山直輝, 金子賢治, 車谷麻緒, 加藤準治, 京谷孝史, 『構造物の破壊を考慮した有限被覆法に基づく構造流体連成解析』, 第 18 回応用力学シンポジウム, 2015.5.16, 金沢大学 (石川県・金沢市).

遠藤重紀, 車谷麻緒, 『安定化有限要素法による 3 次元津波シミュレーションの効率化と構造物の動的応答に関する基礎的研究』, 第 42 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2015.3.5, 東海大学 (神奈川県・平塚市).

車谷麻緒, 『コンクリートの破壊力学を考慮した損傷モデルの提案とひび割れ進展解析への応用』, 第 4 回計算力学シンポジウム (招待講演), 2014.12.1, 日本学術会議 (東京都・港区).

阿部俊逸, 車谷麻緒, 渡邊義仁, 『一般化有限要素法による自由表面流れ解析に関する研究』, 第 69 回土木学会年次学術講演会, 2014.9.10, 大阪大学 (大阪府・豊中市).

M. Kurumatani, Y. Nemoto, S. Okazaki, 『Simulation of 3D internal cracks

formed in concrete around deformed tension bars using isotropic damage model』, 10th World Congress on Computational Mechanics, 2014.7.23, Barcelona (Spain).

渡邊義仁, 遠藤重紀, 阿部俊逸, 車谷麻緒, 『一般化有限要素法による自由表面流れ解析に関する研究』, 第 19 回計算工学講演会, 2014.6.13, 広島国際会議場 (広島県・広島市).

S. Endo, Y. Watanabe, S. Abe, M. Kurumatani, S. Takase, S. Moriguchi, M. Asai, K. Terada, K. Kashiya, 『Fundamental study of free surface flow analysis using PU-based finite element method』, Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems 2014, 2014.4.15, 仙台国際センター (宮城県・仙台市).

M. Kurumatani, S. Kamino, K. Terada, 『A method for compressive failure simulation in concrete using elasticity-spring network』, Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems 2014, 2014.4.14, 仙台国際センター (宮城県・仙台市).

[その他]

ホームページ

<http://www.civil.ibaraki.ac.jp/strc/mao/k/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

車谷 麻緒 (KURUMATANI MAO)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号: 20552392

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し