

機関番号：3 2 6 1 2

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：1 9 3 6 0 2 0 0

研究課題名（和文） 構造物崩壊過程のモンテカルロ・シミュレーション手法の開発

研究課題名（英文） Development of Monte-Carlo simulation method for structural collapse

研究代表者

小國 健二（OGUNI KENJI）

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：20323652

研究成果の概要（和文）：

本研究では、地震動を受ける構造物が、健全な状態（弾性変形）から塑性変形、終局限界状態を経て崩壊に至る一連の過程をばらつきも含めて予測可能な解析手法を提案した。具体的には、

(1) 破壊現象に適した解析手法、PDS-FEM を三次元動的弾塑性解析ツールとして整備、

(2) 並列化による計算効率の向上、

(3) 崩壊に至る過程のモンテカルロ・シミュレーション、

を行った。また、計算結果の検証のための計測装置として、時刻同期稠密機動センサネットワークを開発した。

研究成果の概要（英文）：

Numerical analysis method for Monte-Carlo simulation of structural collapse has been developed. This method can predict the structural collapse including its variability. More precisely, through this project, the following 3 achievements have been obtained.

(1) Numerical analysis method for failure behavior, PDS-FEM has been enhanced to deal with 3 dimensional dynamic elasto-plastic problems,

(2) Computational efficiency has been enhanced by parallelization,

(3) Monte-Carlo simulation of failure behavior of structures has been performed.

Besides, a dense sensor network system for synchronized acceleration measurement has been developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	4,000,000	1,200,000	5,200,000

研究分野：応用力学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：地震防災，計算力学

1. 研究開始当初の背景

地震外力を受ける構造物が弾性域から塑性域を経て変形する過程は、i) 詳細な構造モデル、ii) 大規模な計算資源、があれば、適切な有限要素解析手法を用いた大規模計算により、高い時空間分解能・精度で予測することが可能である。このような、良く整備された手法の例としては鉄筋コンクリートの弾塑性構成則を用いたコンクリート構造物の動的非線形応答解析などが挙げられる。しかし、構造物の塑性変形が大きくなった後、終局限界状態から崩壊への過程の予測精度は必ずしも高くない。これは、平均化された弾塑性構成則に基づく解析モデルの限界に起因する。

構造物の崩壊過程では、構造物に多数の亀裂が発生し、発生した亀裂の方向・分布の状態の違いにより、最終的な構造物の「崩壊の形」は大きく異なる。ここではもはや、平均化したモデルを用いた解析とそこから得られる塑性領域の分布に、さしたる意味はない。むしろ亀裂の進展方向に大きな影響を与える「空間スケールの小さい乱れ」が支配的な要因となる。

「空間スケールの小さい乱れ」をもつ解析対象の決定論的モデル化は難しく、確率論的な手法を用いざるを得ない。また、確率空間のスペクトル分解をこのような乱れに適用することも難しい。結果的に、材料定数の乱れを確率的に発生させた多数のモデルを個別に解析して解析結果の確率分布を得る、モンテカルロ・シミュレーションが選択肢として残される。

しかし、構造物の確率モデル内で発生する個々の亀裂の進展解析の可能性を考えると、従来の手法の枠組みでは亀裂の進展に応じて要素を作り直すリメッシュ・予め亀裂面を設定するジョイント要素など、計算負荷が大きい(リメッシュ)、一般性がない(ジョイント要素)といった問題を持つ技巧が必要となる。計算負荷の制約から、従来手法を用いたモンテカルロ・シミュレーションはほぼ不可能である。

以上の背景に基づき、構造物の詳細な解析モデルの破壊挙動のモンテカルロ・シミュレーション、の必要性と、これを実現するためには、個々の亀裂の進展方向を簡便かつ高精度に予測する全く新しい解析手法が必要であるとの認識を抱き、PDS-FEM を考案した。PDS-FEM は、いたるところ不連続かつ重なりのない形状関数を用いた特殊な有限要素法と位置づけられる手法であり、通常のFEM と同等もしくはそれ以下の計算負荷で破壊進展問題を亀裂の成長パターンのばらつきも含めて精度よく解析することが可能である。研究開始時点までに PDS-FEM の基

本的な定式化、線形弾性体の脆性破壊の解析、弾塑性問題への拡張、簡単なコンクリート構造物の解析を行い、破壊解析における PDS-FEM の有効性・計算効率の高さの基本的検証を終えていた。

2. 研究の目的

地震動を受ける構造物が、健全な状態(弾性変形)から塑性変形、終局限界状態を経て崩壊に至る一連の過程を、ばらつきも含めて予測可能な解析手法を提案する。具体的には、(1) 破壊現象に適した解析手法、PDS-FEM を三次元動的弾塑性解析ツールとして整備、(2) 並列化による計算効率の向上、(3) 崩壊に至る過程のモンテカルロ・シミュレーション、を行う。

また、計算結果の検証のための計測装置として、時刻同期稠密機動センサネットワークを開発する。

3. 研究の方法

(1) 研究期間の前半(2007年度から2008年度)においては、PDS-FEM を三次元動的弾塑性解析ツールとして整備することに重点を置いて研究を進めた。理論拡張、数値解析コード開発を同時に進めた。そして、最初の解析対象となる構造材料を鉄筋コンクリート(RC)とした。その理由は、RC が弾塑性挙動とひび割れが共に重要な役割を占める構造材料であり、弾塑性問題に拡張される PDS-FEM に最も適した解析対象と考えられるためである。ここでは、研究分担者と緊密に協力し、コンクリート破壊実験、既存の RC 弾塑性挙動解析などコンクリート工学で蓄積されてきた知見と PDS-FEM による解析結果とを詳細に比較検討し、PDS-FEM による RC 破壊挙動解析の信頼性を確保することを目指して、研究を推進した。

また、震動台実験のための、時刻同期稠密機動センサネットワークについては、実機を用いた計測実験を行い、複雑な形状の RC 構造物内部に展開したネットワークでロバストな通信を確保しながら、 100μ 秒程度の時刻同期を確保した加速度データを計測、回収することを目指して、研究を推進した。

以下に、研究期間前半における具体的な研究課題についての研究方法の詳細を述べる。

PDS-FEM の理論拡張

PDS-FEM の理論の拡張・定式化は通常の有限要素法の拡張の方法論にしたがってすすめることが可能であり、PDS-FEM の根幹である粒子的離散化に基づく厳密な定式化のよう

に困難な概念操作の必要はなかった。標準的な手法に基づいて材料非線形問題と動的問題への理論拡張を行った。

数値解析コード開発

理論拡張を行った PDS-FEM を、弾塑性有限要素解析の高速ソルバー、ADVENTURE および ADVENTURE の商用版大規模解析ツール ADVENTURE クラスタに組み込み、RC（鉄筋コンクリート）構造物の中での亀裂進展を最後まで追跡可能な解析ツールとした。PDS-FEM は、数値解析コードの上では、破壊の扱いを除いて通常の FEM と全く同じであるため、（考えている変位場など、理論的には全く異なるが）FEM へのプラグ・インとして開発することが可能である。これは、PDS-FEM の利点のひとつであり、これを活かす方針で研究を進めた。

震動台実験のための時刻同期稠密機動センサネットワーク技術の開発

本研究開始前から別途進めてきた研究により、約 20 個のセンサからなる無線センサネットワークにおいて「数 cm 精度での位置決定」「数ミリ秒精度での時刻同期確保」が実現されていた。この技術を礎とし、さらに多数のセンサを用いた実証試験を行った。また、開発中のセンサ・プラットフォームには任意のセンサを搭載できるようになっているため、震動台実験の計測において必要となるサンプリング・レート、フィルター特性、ダイナミック・レンジを持つ加速度計を選定（設計）し、組み込んだ。

(2) 研究期間の後半(2009 年度)においては、研究期間前半(2008 年度まで)に整備した計算手法と計測技術を用いて、以下の研究を行った。

RC 構造詳細モデルの崩壊過程のモンテカルロ・シミュレーション

動的弾塑性有限要素解析を行えるソフトウェア、ADVENTURE クラスタに PDS-FEM を組み込んで、実際の RC 構造物を模した解析モデルの動的崩壊過程の解析を行った。解析モデルは、RC 内部の鉄筋配置まで表現した構造詳細 CAD モデルに基づいて異なった節点配置を持つ多数の解析メッシュである。

震動台実験のための時刻同期稠密機動センサネットワーク技術の開発

時刻同期稠密機動センサネットワークにより、複雑な形状の構造物上に設置して、無線で時刻同期をとりながら 3 軸加速度計測を行った。実構造物の加速度を計測する実験を行った。

4. 研究成果

研究期間の前半(2007 年度から 2008 年度)においては、破壊現象の解析手法、粒子離散化有限要素法(PDS-FEM)を完成させた。

これを弾塑性有限要素解析の高速ソルバー、ADVENTURE に組み込み、RC（鉄筋コンクリート）構造物の中での亀裂進展を最後まで追跡可能な解析ツールとした。

さらにこれを ADVENTURE の商用版大規模解析ツール ADVENTURE クラスタに組み込んで、50 万要素程度の RC 橋脚モデルの地震動による破壊進展解析を行い、良好な解析結果を得た。一方、震動台実験のための、時刻同期稠密機動センサネットワークについては、実機を用いた計測実験を行い、複雑な形状の RC 構造物内部に展開したネットワークでロバストな通信を確保しながら、100 μ 秒程度の時刻同期を確保した加速度データの計測、回収に成功した。

研究期間の後半(2009 年度)においては、以下の成果を得た。

(1) RC 構造詳細モデルの崩壊過程のモンテカルロ・シミュレーション

動的弾塑性有限要素解析を行えるソフトウェア、ADVENTURE クラスタに PDS-FEM を組み込んで、実際の RC 構造物を模した解析モデルの動的崩壊過程の解析を行った。解析モデルは、RC 内部の鉄筋配置まで表現した構造詳細 CAD モデルに基づいて作成したものである。

(2) 震動台実験のための時刻同期稠密機動センサネットワーク技術の開発

研究期間前半に開発した、時刻同期稠密機動センサネットワークにより、複雑な形状の構造物上に設置して、無線で時刻同期をとりながら 1000SPS 程度のサンプリングレート、16bit の分解能で 3 軸加速度計測を行えるようになった。この装置に、適切にフィルタなどを設計した MEMS 加速度計を実装した。実構造物の加速度を計測する実験を行い、計測・時刻同期・データ回収全てにおいて良好な結果を得た。

2007~2010 年度の 4 年計画で開始した研究であるが、研究計画 3 年目の 2009 年度終了時までに当初予定していた研究をすべて終え、最終年度前申請により、基盤研究 A の新規課題に移行した。

今後の展望として、最終年度前申請により移行した基盤研究 A の新規課題において、センサネットワークによる計測と実空間シミュレーションを統合した研究を推進することを予定している。

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13件)

- (1) 小坂未来, 田中美緒, 小国健二, PDS-FEMを用いた破壊解析のためのFEMモデルの自動生成手法の開発, 応用力学論文集, 査読有, 13, 113-122, 2010.
- (2) 本山紘希, 小国健二, 堀宗朗, PDS-FEMを用いた弾塑性破壊解析, 応用力学論文集, 査読有, 12, 109-116, 2009.
- (3) 澤田茉伊, 志波由紀夫, 小国健二, 加速度計測のための無線センサネットワークの実用的な時刻同期手法の開発, 土木学会地震工学論文集, 査読有, 30, 30-37, 2009.
- (4) Kenji Oguni, M.L.L. Wijerathne, Tomoo Okinaka and Muneo Hori, Crack propagation analysis using PDS-FEM and comparison with fracture experiment, Mechanics of Materials, 査読有, 41, 1242-1252, 2009.
- (5) M.L.L. Wijerathne, K. Oguni and M. Hori, Numerical analysis of growing crack problems using particle discretization scheme, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 査読有, DOI: 10.1001/nme.2620, 2009.
- (6) 沖中知雄, 堀宗朗, 小国健二, 超高速ビデオカメラとX-FEMを用いた平行亀裂の進展経路に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 査読有, 65, 2, 321-334, 2009.
- (7) M. Hori, K. Oguni and T. Ichimura, Integrated simulation for earthquake hazard and disaster prediction, Journal of Earthquake and Tsunami, 査読有, 3, 3, 121-141, 2009.
- (8) N. Kame, S. Saito and K. Oguni, Quasi-static analysis of strike fault growth in layered media. Geophysics Journal International, 査読有, 173, 309-314, 2008.
- (9) M. Saeki, K. Oguni, J. Inoue and M. Hori, Hierarchical Localization of Sensor Network for Infrastructure Monitoring, Journal of Infrastructure Systems, 査読有, 14, 1, 15-26, 2008.
- (10) 小国健二, 佐伯昌之, 井上純哉, 菅野高弘, 堀宗朗, 社会基盤センシングのための階層型センサネットワークの位置同定手法の開発, 土木学会論文集, 査読有, 64, 1, 82-100, 2008.

〔学会発表〕(計7件)

- (1) Kenji Oguni, Muneo Hori, Takeshi Maki, Shigenobu Okazawa and Yoshikazu Takahashi, PDS-FEM Analysis of Reinforced Concrete Pier Subjected to Seismic Loading, WCCM-IX (9th World Congress on Computational Mechanics), Sydney, Australia, 21 Jul, 2010.
- (2) Miki Kosaka, Mio Tanaka, Kenji Oguni and Yoshikazu Takahashi, Monte-Carlo Simulation of Failure Behavior of Concrete using PDS-FEM, WCCM-IX (9th World Congress on Computational Mechanics), Sydney, Australia, 20 Jul, 2010.
- (3) Kenji Oguni, Numerical Analysis of Failure Behavior of Reinforced Concrete Pier, German-Japanese Workshop on Computational Mechanics, Yokohama, March 28, 2010.
- (4) Kenji Oguni, Localization and time synchronization of sensor network for infrastructure monitoring, World forum on smart material and smart structures technology, Chongqing, China, 23 May, 2007.
- (5) M.L.L. Wijerathne, H. Sakaguchi, K. Oguni and M. Hori, 3D-FEM-beta: an efficient numerical method for modeling 3D fracture, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 査読有, Crete, Greece, 14 June, 2007.

〔図書〕(計2件)

- (1) 小国健二, オーム社, 応用例で学ぶ逆問題と計測, 2011, 264ページ.
- (2) 社団法人 土木学会 応用力学委員会 計算力学章委員会 編, 丸善, いまさら聞けない計算力学の常識, 2008, 共著, 小国健二, pp155 - pp164.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小国 健二 (OGUNI KENJI)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号: 20323652

(2) 研究分担者

牧 剛史 (MAKI TAKESHI)
埼玉大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 60292645

マッデゲダラ ラリット
(M.L.L. WIJERATHNE)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
変動観測センター・研究員
研究者番号：20426290

堀 宗朗 (HORI MUNEO)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：00219205

(3)連携研究者
該当なし