

令和元年5月31日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03143

研究課題名（和文）シミュレーションとセンシング技術を融合した防災拠点建物の地震対策支援ツールの開発

研究課題名（英文）Development of seismic countermeasure assistant tools for disaster management facilities using combination of simulation and sensing technologies

研究代表者

齊藤 大樹（Saito, Taiki）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：00225715

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：防災拠点施設にIT強震計を設置し、独自開発のシミュレーション技術と組み合わせることで、地震後に建物の健全性を即時に診断できるシステムを開発し、豊橋市庁舎西館および東館、豊橋市中消防署、新城市庁舎に実装した。このシステムでは、強震計の観測記録をリアルタイムにインターネットクラウドに保存し、建物外部からモニタリングすることで、1) 地震波の抽出、2) 耐震診断の実行命令、3) 診断結果のメール配信の3つのプロセスを自動化した。耐震診断は、地震直後の1次診断に多質点系建物モデル、2次診断に骨組系建物モデルを用いる2段階診断とし、診断結果の迅速な通知と精度の向上を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発されたリアルタイム耐震診断システムは、建物にIT強震計を設置し、地震波が検知された場合に、ただちに建物解析による損傷診断を行い、診断結果を建物管理者らに送るものである。本研究期間で、豊橋市庁舎西館および東館、豊橋市中消防署、新城市庁舎にシステムを実装した。すでに複数の地震でシステムが稼働して、自治体の初期対応に生かされている。今後、豊川市役所、田原市役所、蒲郡市役所など、東三河地域の他の自治体の防災拠点建物への実装計画があり、着実に研究成果の普及が進んでいる。

研究成果の概要（英文）：In this research, a system that can diagnose the soundness of a building immediately after an earthquake was developed by installing an IT strong motion sensors at disaster prevention base facilities and combining with our original simulation techniques. The system has been implemented to the West and East buildings of the Toyohashi City Hall, the Toyohashi Fire Station and the Shinshiro City Hall buildings. In this system, firstly, observation records of strong motion sensors are stored in real time in the Internet Cloud and monitored from the outside of the building. Secondly, the processes of 1) extraction of seismic waves, 2) execution of seismic diagnosis and 3) mail delivery of diagnostic results are automated. The developed seismic diagnosis has a two-stage diagnosis system; the primary diagnosis using a lumped mass building model and the secondary diagnosis using a 3D frame building model, which enables prompt notification of diagnosis results and improvement of accuracy.

研究分野：建築構造

キーワード：地震被害 防災拠点建物 耐震診断 モニタリング シミュレーション解析

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災の発生を受けて、近い将来に発生することが確実な南海トラフ地震に対する被害想定が、国・自治体等で進められている。また、強震動に対する学術研究、構造物応答評価や耐震性能向上のための技術開発等が進められているが、現時点では、個別的な例題に対する検討に留まっている。この予備検討を通じて、南海トラフ地震による防災拠点建物群の地震対策を支援する焦眉の研究課題として、下記が同定された。

①構造物の地震応答について、地盤との連成による減衰性能の評価、部材塑性域での繰り返しの揺れに対する安全性等に関する知見が欠如しており、解析シミュレーションによる損傷評価の精度に限界がある。

②地震による建物の損傷同定では、建物に強震計を設置して観測記録から健全性評価を行う地震時モニタリング技術の普及が進んでいるものの、建物の揺れの最大値や周期変化等から損傷程度を推定するもので、損傷部位を同定する精度はない。

③被災度の現地調査では、外観調査は建物の1階部分に限定されること、内部調査は余震による建物倒壊の危険性があるなどの問題がある。

④防災施策においては、管轄地域内の防災拠点建物群の被害程度を即時に把握できるツールが欠けている。そのため、被害の全体像を捉えた効果的な初期対応が難しい。

2. 研究の目的

東海地域では、南海トラフ巨大地震の際に最悪のケースで震度7の揺れが想定されており、現行の耐震基準で建設された建物でも、ある程度の被害を免れない。学校や市庁舎のように地震時に地域の防災拠点として機能すべき公共建物については、想定される被害を予測し、事前に対策を講じる必要がある。また、実際に地震が起きた際には、いち早く建物の被害程度を分析し、建物が余震で安全かどうかを診断する必要がある。研究代表者らは、建物の地震時挙動シミュレーション・ソフトウェアを独自に開発・公開し、建物管理者が迅速に建物の耐震性を評価できる環境構築を進めている。本研究は、建物の揺れや損傷を検知するセンシング技術を融合させることで、シミュレーションの精度を向上させ、被害箇所の同定などを可能とする地震対策支援ツールの開発を行い、防災拠点建物群への実装を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

サブテーマ1：センシング技術を融合した高精度シミュレーション技術の開発

建物の部材レベルの弾塑性応答解析の精度向上を目的に、センシング結果を用いて、アダプティブにモデルを最適化するシミュレーション技術を開発する。

サブテーマ2：センシング技術を活用した安全かつ効率的な被災度判定技術の開発

解析と強震観測だけでは実被害の様相を正確に把握することは難しい。そこで、画像処理アルゴリズムに基づくひび割れ検出技術を用いて、スマートフォン等による安全かつ効率的な被害建物の損傷調査技術とシミュレーション解析による損傷評価と組み合わせることで、高精度の被災度判定技術を開発する。

サブテーマ3：防災拠点建物群の耐震性能データベースの構築と地震対策支援ツールの開発

自治体と連携し、複数の防災拠点建物の構造図書の調査、振動計測等による地震応答解析のための詳細な構造モデルの構築を進め、被害予測結果とともにデータベース化する。

4. 研究成果

サブテーマ1：センシング技術を融合した高精度シミュレーション技術の開発

防災拠点の被害を高精度に予測するために、研究代表者が開発した解析ツール「建物の立体地震応答プログラム STERA_3D」を拡張した。主な追加機能は、

- 地盤と建物の相互作用効果を解析するための地盤ばねの実装
- 骨組モデルから多質点系モデルの自動構築
- 長周期地震動に対応するために免震部材に繰り返し耐力・剛性劣化性状を実装

である。とくに、地震直後の1次診断に多質点系モデル、2次診断に骨組モデルを用いる2段階診断とすることで、診断結果の迅速な通知と精度の向上を可能とした。

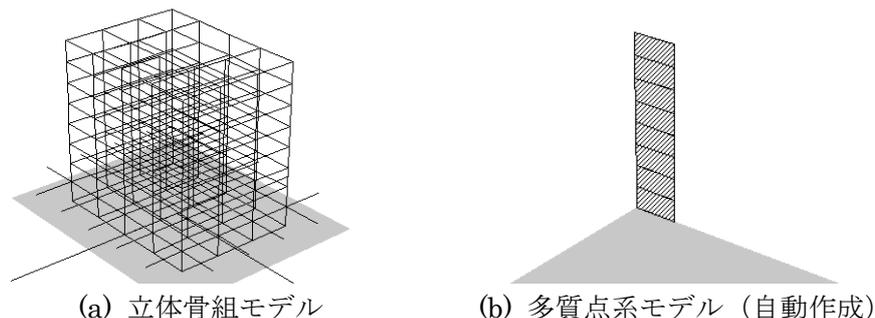


図1 中消防署の解析用建物モデル

サブテーマ2：センシング技術を活用した安全かつ効率的な被災度判定技術の開発

ひび割れ等の損傷度検出アルゴリズムを組み込んだスマートフォン・アプリを開発した。Canny 法のエッジ検出機能を組み込み、解像度等を画面上で調整できるようにした。また、建物の地震応答解析を行い、建物の被害箇所や建物が使い続けられるかどうかの情報を建物の管理者に通知するシステムを構築した。1次診断は、多質点系モデルを用いた解析であり、各層の最大応答から表1の JSCA（日本構造技術者協会）メニューを用いて診断を行う。診断結果は、安全・要注意・危険の3段階で表した。2次診断は、骨組モデルを用いた詳細診断であり、各階の部材の損傷位置と状況を PDF ファイルとしてメール送信するシステムを開発した（図2）。

表1 JSCA メニュー

対象	性能評価項目	損傷限界	安全限界 余裕度 I	安全限界 余裕度 II	安全限界 余裕度 III
建物挙動	層間変形角 (rad)	1/200	1/150	1/100	1/75
構造部材	部材の塑性率 μ_m	1.0	$\mu_m/2.0$	$\mu_m/1.33$	μ_m
建物の「目標とする状態」		機能維持 無被害 修復不要	主要機能 確保 軽微な被害 軽微な修復	指定機能 確保 小破 小規模修復	人命保護 限定機能確保 中破～大破 中～大規模修復

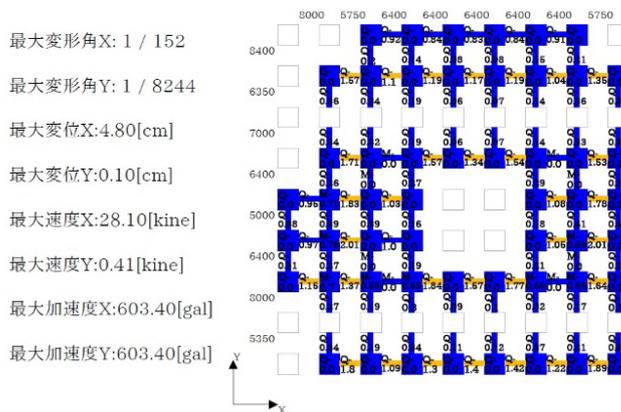


図2 2次診断結果の PDF ファイルの例

サブテーマ3：防災拠点建物群の耐震性能データベースの構築と地震対策支援ツールの開発

平成 28 年度に豊橋市庁舎西館および東館、平成 29 年度に豊橋市中消防署、平成 30 年度に新城市庁舎に IT 強震計を設置し、建物の振動観測を開始した。観測記録はリアルタイムにインターネットクラウドに保存され、建物外部からモニタリングすることができる。さらに、Ruby プログラム言語を用いて、1) 地震波の抽出、2) 耐震診断の実行命令、3) 診断結果のメール配信の3つのプロセスを自動化するシステムを開発した。すでに、2018年6月18日の大阪府北部地震（マグニチュード 6.1）を含む複数の地震においてシステムが稼働し、地震発生から数分後に豊橋市危機管理課の担当者に診断結果をメールで配信した。図3にリアルタイム耐震診断システムの運用フローを示す。

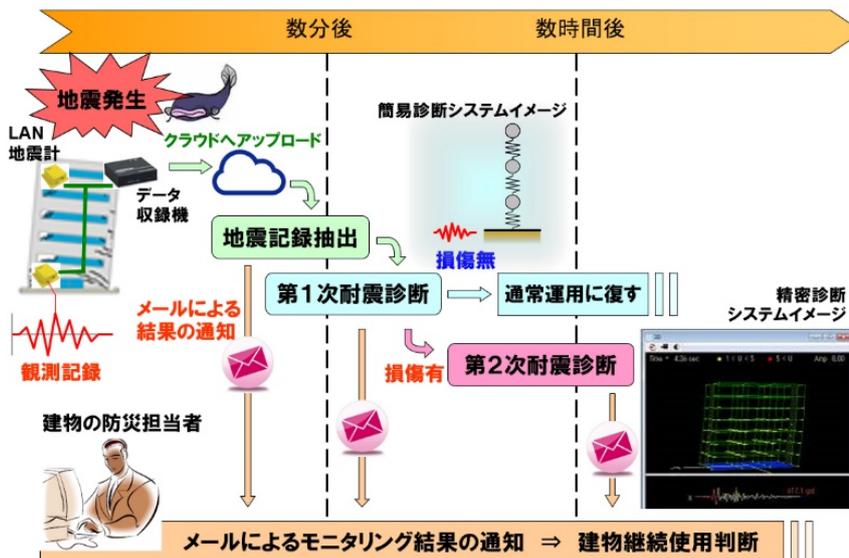


図3 リアルタイム耐震診断システムの運用フロー

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Kazuhiro Hayashi and Taiki Saito, “Implementation of Real-time Seismic Diagnostic System on Emergency Management Center Buildings: In Case of the 2018 Osaka earthquake”, International Journal of Structural and Civil Engineering Research, Volume 8, No. 2, May 2019、査読有
- ② Taiki Saito, “Simulation and monitoring tools to protect disaster management facilities against earthquakes”, AIP Conference Proceedings 1892, 020002 (2017)、査読有

[学会発表] (計2件)

- ① Anne P. Gozali, Taiki Saito and Kazuhiro Hayashi, “Real-Time Seismic Monitoring System of Toyohashi City Hall Buildings”, 日本建築学会大会学術講演梗概集、2018.9
- ② 大槻琢磨、齊藤大樹、林和宏：豊橋市役所の地震応答モニタリングシステムの構築、日本建築学会大会学術講演梗概集、2017.8

[その他]

ホームページ等

- ① TUTResearch
Taiki Saito, Making buildings safer by preemptively visualizing earthquake damage
<https://www.tut.ac.jp/english/newsletter/contents/2017/08/features/features.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

- ① 研究分担者氏名：章 忠
ローマ字氏名：Zhong Zhang
所属研究機関名：豊橋技術科学大学
部局名：大学院工学研究科
職名：教授
研究者番号 (8桁)：50254579
- ② 研究分担者氏名：松本 幸大
ローマ字氏名：Matsumoto Yukihiro
所属研究機関名：豊橋技術科学大学
部局名：大学院工学研究科
職名：准教授
研究者番号 (8桁)：00453447
- ③ 研究分担者氏名：林 和宏
ローマ字氏名：Hayashi Kazuhiro
所属研究機関名：豊橋技術科学大学
部局名：大学院工学研究科
職名：助教
研究者番号 (8桁)：40725636

※科費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。