

令和元年6月11日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03124

研究課題名(和文) 建築物の構造解析と避難解析との双方向評価によるキーエレメントデザイン

研究課題名(英文) Key Element Buildings Design Method with Bidirectional Evaluation between Structural Analysis and Evacuation Analysis

研究代表者

永野 康行 (Nagano, Yasuyuki)

兵庫県立大学・シミュレーション学研究科・教授

研究者番号：00410374

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：「構造シミュレータ」と「避難シミュレータ」の双方向検証に基づく人的被害軽減のための定量的評価のために、本研究で取組んできた非構造材の「損傷シミュレータ」を組み込んだ統合シミュレーションを実施するための可視化ツールを作成した。「損傷評価オブザーバ」機能と「損傷制御オペレータ」機能の妥当性について、統合シミュレーションの結果に基づき検証を行った。構造シミュレータの解析結果に基づきこれとリンクさせた「損傷シミュレータ」からの損傷度評価を初期条件として、「避難シミュレータ」による避難障害検証を連続して行った。その結果より「損傷制御オペレータ」機能により、キーエレメントを特定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、避難シミュレーションの結果を積極的に、建物の家具配置、内外装の仕上げ材の仕様決定に活用できるよう、構造シミュレータと避難シミュレータの付帯機能を複合化することで、非構造材の損傷シミュレータを構築した点で意義がある。さらに本研究で開発した損傷シミュレータは、今後、災害時の火災や煙などによる2次災害を防ぐために、安全な避難経路をリアルタイムで評価し、万一の場合には代替経路を滞在者に提示するような、オンラインでのサバイバル型避難誘導システムの実装開発を検討していく際にも、有効に応用できるものと考えている。

研究成果の概要(英文)：For quantitative evaluation for human damage reduction based on two-way verification of "structure simulator" and "evacuation simulator", integrated simulation incorporating "damage simulator" of non-structural materials that has been addressed in this research Created a visualization tool to implement. The validity of the "damage assessment observer" function and the "damage control operator" function was verified based on the result of integrated simulation. Evacuation hazard verification by "Evacuation Simulator" was continuously conducted with damage evaluation from "Injury Simulator" linked with this based on the analysis result of the structural simulator as initial condition. As a result, the "damage control operator" function identified the key element.

研究分野：建築構造学、耐震工学

キーワード：キーエレメント 構造解析 避難解析 FEM解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超高層建築物や大架構建築物のような大規模な建物においては、非常に多くの利用者(以下、「滞在者」)が建物内で活動・生活しており、大地震の発生時には安全、かつ迅速に非難を完了できることが人的被害の低減・防止のために重要である。そのためには、建物の安全性評価のための構造シミュレーション、ならびに、非常時の人間心理・行動パターンをモデル化した避難シミュレーションが、防災計画上の主要な両輪を担っている。学術的に見ると、建物の地震応答評価、群衆の避難行動評価に関する解析的研究は、汎用スーパーコンピュータの高容量・高速化を背景に、より複雑かつ詳細な条件設定を扱うことが可能となり、それぞれ高度なモデル解析による高精度な予測システム環境が整備されつつある。

一方、災害時における人的被害や避難障害の直接的要因に目を向ければ、建物に構造的な破壊を生じさせないだけでなく、ガラス窓や壁、天井などの内外装材(以下、「非構造材」)などの損傷や家具や什器の移動・転倒などが滞在者を負傷させないこと、かつこれらが避難経路を閉塞しないことが人的被害回避の鍵となる。この点を踏まえれば、実際の大地震時の人的災害の定量的予測のためには、1 建物の構造的な動的応答、2 建物の非構造材や家具の損傷度、3 避難経路や誘導方法の機能性、についての各評価レイヤーを統合したシミュレーションが必要となる。しかしながら、2 の非構造材については、一般的に緻密な構造設計が行われず施工精度にもばらつきがあり、現状では、損傷解析の高精度化の検討がなされておらず、1~3 の評価レイヤーでの解析を統合させても、非構造材の挙動やその影響に関する信頼性の高い予測精度が期待できない。

構造シミュレータによる数値実験：近年、建築構造物のような巨大な複合構造物を非常に細密な有限要素単位でモデル化し、スーパーコンピュータで対象モデルの挙動を隅々まで詳細に計算する取組みがなされている。本研究課題の実施担当者らも、大型振動台でも実大実験が実施できない規模の高層建築物の地震時挙動を大規模超詳細モデルにより、隅々まで「丸ごと」解析する研究に取組んできた。こうした建築物の詳細構造解析は国際的にみても、世界最大の「実大三次元震動破壊実験施設」を有する日本が研究を先行させている。一方、建物の構造解析に比べて、非構造材の損傷解析の取組みは著しく立ち遅れている。本研究では、想定する大地震時の建物隅々までの応答解析ができる構造シミュレータを有効に応用し、建物各部での非構造材の損傷度を定量的に評価することで、新たに人的被害や避難障害の予測を行う避難シミュレータとの統合的活用を行う意義に着眼した。

避難シミュレータによるリスク評価として、2001年のテロによるWTCの崩落崩壊、2011年の東日本大震災の津波被害など、建物や市街地における滞在者の迅速な避難行動が実現できなかったために多大な人命を失った被害の教訓から、避難シミュレーションをより現実的な条件設定のもとで、より厳密な人間行動・心理モデルにより、高精度化する取組みがなされている。本研究課題の実施担当者らも、地震や火災発生時の避難シミュレーションとその可視化に関する多くの研究実績がある。日本に限らず欧米においても避難シミュレーションは、オフラインでのリスク評価ツールにとどまらず、避難誘導や情報通信の装置と連動したオンラインでのサバイバル型デザインの研究開発に展開されつつある。一方、建物内で発生する避難障害の原因事象である非構造材の損傷について、現状では避難シミュレーションの結果に基づき損傷発生要因を再評価し、人的被害を積極的に低減するには至っていない。本研究では、避難解析により非構造材の耐損傷性の重要度が高いと判定される箇所、ならびに構造解析により非構造材の損傷の発生可能性が高いと判定される箇所とのクロス検定により、非構造材の必要仕様を決めるキーエレメントデザインの考え方を新たに提案する意義に着眼した。

2. 研究の目的

大地震の発生時に建築物の中から全ての利用者(滞在者)が負傷せずに安全に退避できるように、正確なシミュレーションに基づく避難計画が重要である。一方、人的被害や避難障害は、直接的には建物に付属する什器や内外装材(非構造材)等の損傷に起因している。ところが、非構造材の挙動はばらつきが大きく、数値モデル化した損傷シミュレーションを行っても現象を正確に予測できない問題がある。そこで、本研究では非構造材の損傷リスクを構造解析と避難解析による双方向視点から相補的に評価し、人的被害回避のための非構造材のキーエレメントデザインを提案する。具体的には、構造解析による損傷評価オブザーバ、避難解析による損傷制御オペレータ機能を実装したスーパーコンピュータ・詳細モデルシミュレーションにより、厳密な評価が難しい非構造材の損傷シミュレータを構築し、建物内での人的被害リスクの定量的検証に取り組んだ。

3. 研究の方法

本研究では、大地震時の人的災害の定量的予測のために、1 建物の構造的な動的応答、2 建物の非構造材や家具の損傷度、3 避難経路や誘導方法の機能性、についての各評価レイヤーを統合したシミュレーション解析を実施することを目指した。そのために、学術的観点から、「構造解析」、「非構造材を含む」建築部材設計、「避難解析」、「データの可視化」に関する研究分担を担える研究実績を有するメンバーによる研究チームを組織した。

(1) 建築物の詳細解析(1 構造シミュレータ)の実施に関しては、本研究課題の研究分担者(向井洋一) 研究分担者(水島靖典)らにより、実大振動台実験で行われた鉄骨試験体の再現解析

の実績がある。本研究では、検証用建築物の詳細構造解析モデルを先ず作成しスーパーコンピュータにより建物各部の「丸ごと」構造解析を行うとともに、建物の局所応答の可視化により精度検証を行う必要がある。その上で、非構造部材の「損傷評価オペレータ」機能の装備のために、これら建物内の各部に生じる局所応答に基づき、適切に非構造部材の損傷度分布を表示できるシステム構築に取り組んだ。

(2) 非構造材の損傷解析(2 損傷シミュレータ)の構築については、本研究課題の研究代表者(永野康行)は、天井材の実物大部分架構の振動台実験に参加し、マクロなモデル解析により実験データの再現性検証を進めている。また、研究分担者(多賀謙蔵)は、耐震天井の低コスト化のための補強システムの開発設計とその研究に取り組んでいる。さらに、両研究担当者は、詳細モデル化による鋼製天井のテストシミュレーション解析を開始しており、非構造材のモデルの精密化と解析精度の向上に関する問題点の検証を行った。本研究では、非構造材の損傷箇所や範囲を精密に判断できるような詳細モデル化によるシミュレーション解析を前提としつつも、品質のばらつきが損傷解析結果の発散を生じないような解析手法の開発を行った。

(3) 避難行動や避難誘導解析(3 避難シミュレータ)の実施については、本研究課題の研究分担者(安福健祐)は、非構造材の損傷や家具の転倒に起因して、非常時に避難経路障害が生じた場合を想定し、建物の平立面形状による条件下で、滞在者の群集行動モデルに基づく避難行動・避難誘導に関する最適解を導くシミュレーション解析を実施している。本研究では、検証用建築物の平立面、災害発生時刻と滞在者数、滞在者属性等の条件設定に応じて、避難行動評価を行うための避難解析モデルを先ず作成し、その精度を検証する必要がある。その上で、「損傷制御オペレータ」機能を装備するために、損傷シミュレータで評価される非構造材の被害情報を初期事象とした避難解析について、「初期事象の修正」を行いながら避難解析結果を最適化するオペレーションを行うシステム開発に取り組んだ。

4. 研究成果

「構造シミュレータ」と「避難シミュレータ」の双方向検証に基づく人的被害軽減のための定量的評価のために、本研究で取り組んできた非構造材の「損傷シミュレータ」を組み込んだ統合シミュレーション(図1)を実施するための可視化ツールとしてAVS/Expressに追加機能を作成した(図2、図3)。「損傷評価オペレータ」機能と「損傷制御オペレータ」機能の妥当性について、統合シミュレーションの結果に基づき検証を行うとともに、本研究計画の総括を実施した。構造シミュレータの解析結果に基づきこれとリンクさせた「損傷シミュレータ」から

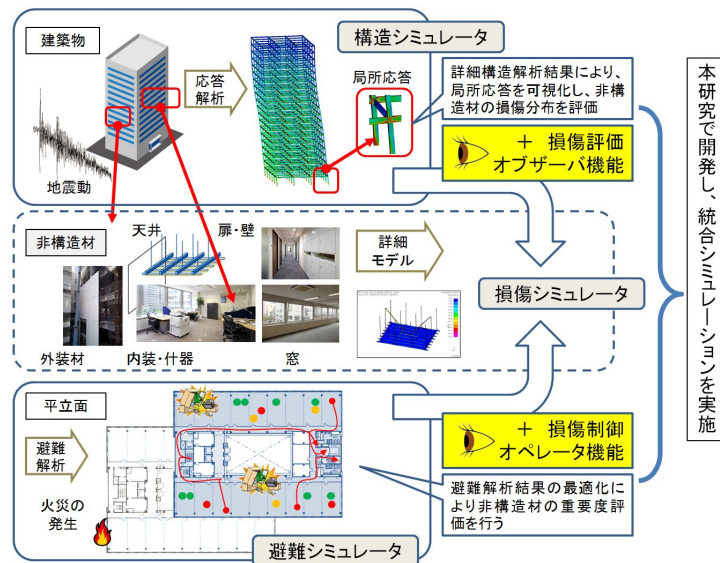


図1 損傷シミュレータ構築のための取組み

からの損傷度評価のアウトプットを初期条件として、「避難シミュレータ」による避難障害検証を連続して行う統合シミュレーションを実施した。その結果にもとづき、「損傷制御オペレータ」機能によるキーエレメントの特定に関するオペレーションを実施した。

統合シミュレーション結果として得られた非構造材の必要仕様デザインについて、解析結果をユーザに示す可視化の方法、ならびに構造設計的な視点から、結果を工学的に説明するための検証を行った。なお、本解析結果について、コストの視点からの評価も併せて行い、実際の設計を想定した場合に、本研究で開発した解析解が妥当な結果を与えるかどうかについては今後の課題である。本研究で開発した損傷シミュレータは、今後、災害時の火災や煙などによる2次災害を防ぐために、安全な避難経路をリアルタイムで評価し、万一の場合には代替経路を滞在者に提示するような、オンラインでのサバイバル型避難誘導システムの実装開発を検討していく際にも、有効に応用できるものと考えている。

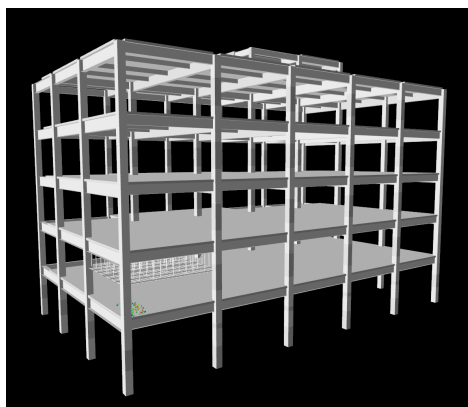


図2 統合可視化の全体像

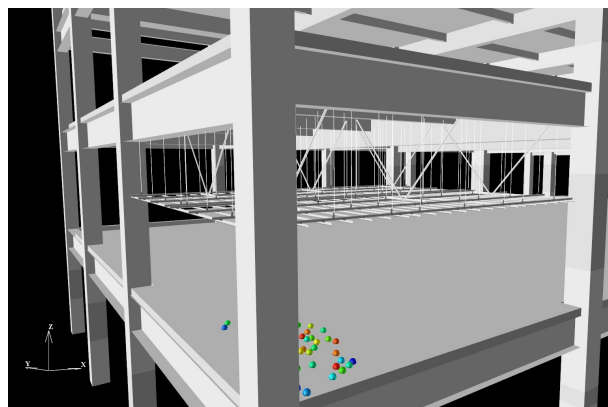


図3 統合可視化の詳細(拡大)部

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 15件)

永野 康行、安福 健祐、避難安全性からみた非構造材のキーエレメントデザイン、2019年度日本建築学会大会(北陸)学術講演会、2019

小原 博人、松本 真樹、向井 洋一、堀 慶朗、永野 康行、飛来物の衝突作用を受ける板ガラス破壊挙動に関する研究 その6 飛散ガラス破片による吊布材挙動の FEM 解析、2019年度日本建築学会大会(北陸)学術講演会、2019

祐野 友輝、多賀 謙藏、高岡 昌史、湯池 智聖、永野 康行、鋼製下地間仕切壁の面外載荷実験と非線形有限要素解析 (その2:非線形有限要素解析)、2019年度日本建築学会大会(北陸)学術講演会、2019

祐野 友輝、多賀 謙藏、高岡 昌史、湯池 智聖、永野 康行、鋼製下地間仕切壁の面外載荷実験と非線形有限要素解析、平成31年度日本建築学会近畿支部研究発表会、2019

Yasuyuki Nagano, Tomoharu Saruwatari, Hideyuki O-tani, Earthquake damage prediction of buildings and concrete blocks walls in urban areas, Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, 2019

安福 健祐、永野 康行、建築物非構造材のキーエレメントデザインのための避難リスク評価、2018年度日本図学会秋季大会(東京)、2018

祐野 友輝、森 弘誓、多賀 謙藏、高岡 昌史、湯池 智聖、永野 康行、非線形性を有する耐震天井の地震応答予測、2018年度日本建築学会大会(東北)学術講演会、2018

祐野 友輝、森 弘誓、多賀 謙藏、高岡 昌史、湯池 智聖、永野 康行、非線形性を有する耐震天井の地震応答予測、平成30年度日本建築学会近畿支部研究発表会、2018

Yasuyuki Nagano, Yoichi Mukai, Kensuke Yasufuku, Yasunori Mizushima and Tomoharu Saruwatari, Key Element Buildings Design Method with Bidirectional Evaluation between Structural Analysis and Evacuation Analysis, 13th World Congress on Computational Mechanics, 2018

Yasunori Mizushima, Yasuyuki Nagano and Yoichi Mukai, Construction of damage observation system for both structural and non-structural members with overlaying, 13th World Congress on Computational Mechanics, 2018

Tomoharu Saruwatari, Yasuyoshi Umezumi, Yoshitaka Ushio, Lyu Zhilun and Yasuyuki Nagano, Earthquake response analysis of non-structural members of buildings by using the large-scale parallel calculation method, 13th World Congress on Computational Mechanics, 2018

森 弘誓、多賀 謙藏、高岡 昌史、湯池 智聖、永野 康行、耐震天井の詳細有限要素解析、2017年度日本建築学会大会(中国)学術講演会、2017

安福 健祐、永野 康行、マルチエージェントシステムによる複数の経路障害を考慮した避難解析、2017年度日本建築学会大会(中国)学術講演会、2017

Y. Mukai, T. Hattori, Y. Mizushima, Y. Nagano, DATA EXTRACTION OF STRUCTURAL BEHAVIORS AT THE MOMENT OF EARTHQUAKE OCCURRENCE FROM VIDEO CAPTURING CLIPS, 16th World Conference on Earthquake Engineering, 2017

森 弘誓、多賀 謙藏、高岡 昌史、湯池 智聖、永野 康行、有限要素を用いた耐震天井の詳細解析、平成29年度日本建築学会近畿支部 研究発表会、2017

[図書](計 1件)

室崎益輝・富永良喜 兵庫県立大学減災復興政策研究科[編]、ミネルヴァ書房、災害に立ち向かう人づくり 減災社会構築と被災地復興の礎、第7章 安心・安全なまちづくりのためのシミュレーションの果たす役割 - 単一シミュレーションから統合シミュレーションへ -、永野康行、2018、pp.111-120

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：安福 健祐
ローマ字氏名：Kensuke Yasufuku
所属研究機関名：大阪大学
部局名：サイバーメディアセンター
職名：講師
研究者番号（8桁）：20452386

研究分担者氏名：多賀 謙蔵
ローマ字氏名：Kenzo Taga
所属研究機関名：神戸大学
部局名：工学研究科
職名：教授
研究者番号（8桁）：40578259

研究分担者氏名：大野 暢亮
ローマ字氏名：Nobuaki Ohno
所属研究機関名：兵庫県立大学
部局名：シミュレーション学研究科
職名：教授
研究者番号（8桁）：50373238

研究分担者氏名：向井 洋一
ローマ字氏名：Yoichi Mukai
所属研究機関名：神戸大学
部局名：工学研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：70252616

研究分担者氏名：島 伸一郎
ローマ字氏名：Shinichiro Shima
所属研究機関名：兵庫県立大学
部局名：シミュレーション学研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：70415983

研究分担者氏名：水島 靖典
ローマ字氏名：Yasunori Mizushima
所属研究機関名：株式会社竹中工務店
部局名：技術研究所
職名：研究員
研究者番号（8桁）：90554767

科研費による研究は、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。