

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01588

研究課題名(和文)大型震動台実験のシミュレーションによる建物の終局付近までの地震応答解析法の構築

研究課題名(英文)Development of earthquake response analysis method up to near the final stage of buildings by simulation of large shaking table experiments

研究代表者

中村 尚弘(NAKAMURA, NAOHIRO)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授

研究者番号：50416640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では大型震動台E-ディフェンスにおける代表的なS構造、RC構造各4体の実験データに基づき、シミュレーション解析とその性状分により、小振幅から終局レベル付近まで簡便かつ概ね妥当な精度で表現できる地震応答解析モデルの構築を目的する検討を行った。その結果、スラブの協力幅を適切に考慮し部材の剛性及び耐力を実情に合わせることで、一般的な質点系モデルでも層間変形角1/50程度までに概ね良好な応答結果が得られた。併せて解析に新たな減衰モデルとして拡張レイリー減衰等と提案するとともに、実験結果からの振動パラメータの同定方法としてMIEC法の検討も行い、これらの有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、我が国の耐震基準では原則として極稀地震動までの検討が求められているが、今後建物がこれを超える地震動に襲われる可能性は大きく、それを比較的簡便かつ概ね良好な精度で評価する方法が望まれる。E-ディフェンスではこれまで、多数の実大試験体の震動実験が行われ、終局レベルまでの貴重な振動データが得られている。しかし実施されたシミュレーションでは解析方法が各々異なる場合が多く相互の比較が困難である。そこで統一的方法でシミュレーション解析を行い、性状を分析することにより、汎用性の高い方法を検討する必要がある。また分析の一環として減衰の性状分析や実験結果からの同定方法についても検討が必要である。

研究成果の概要(英文)：In this study, for the purpose of construction of analysis model that is simple and generally reasonable accuracy from small amplitude to near the final level based on the experimental data of typical 4 Steel structures and 4 RC structures on the large seismic table E-defense. As a result, appropriate results were obtained using simple lumped mass models up to drift angle 1/50 considering cooperation width of the slab and adjusting the stiffness and the yield strength of the member to the actual situation.

At the same time, we proposed extended Rayleigh damping as a new damping model for analysis, and also examined the MIEC method as a method for identifying vibration parameters from experimental results, and demonstrated their effectiveness.

研究分野：耐震工学

キーワード：大型震動台 地震応答解析 耐震設計 減衰モデル

1. 研究開始当初の背景

現在、我が国の建物の耐震基準では原則としてレベル2(極稀)地震動までの検討が求められている。しかし今後、建物がこれを超える地震動に襲われる可能性は大きい。一方で、超高層建物等の重要施設の耐震設計に用いられている地震応答解析プログラムの精度は、レベル2地震動程度までであり、これを超える地震動に対しては信頼性が低いのが実情である。これらの地震応答解析モデルの設定は、これまで部材レベルの静的繰返し載荷試験などにより、各部材の荷重-変形関係を評価し、これに単純な減衰モデルを加える形で建物モデルを作成してきた。従ってこれらのモデルの構築においては動的な特性の反映が十分ではなかったことが考えられる。一方、近年2011年東北地方太平洋沖地震をはじめとして多数の建物で強震記録が観測され、建物の地震時の挙動に関する知見が増大した。しかし、上記のようにレベル2を超える入力に対する建物の応答評価法についての検討は必ずしも十分とは言えない。特に振動モデルのうち応答に影響の大きい減衰モデルに関する検討や、建物の実記録から振動解析モデルを同定する方法の検討も十分ではない。

2. 研究の目的

現在の建物の地震観測記録からは、レベル1とレベル2の中間程度までのデータしか得られておらずレベル2以上のデータは極めて少ない。レベル2を超えて、終局レベル付近まで応答を評価するためには、別のデータが必要である。防災科学技術研究所の保有する実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)では、これまでに実建物を模擬した多数の実大試験体の震動実験が行われ、終局レベルまでの貴重な振動データが得られているが、十分有効に活用されているとは言い難い。これらの実験に対してシミュレーション解析が実施されていない場合も多く、また実施されている場合でも解析方法が各々別個のため比較が困難である。

本研究ではこれらの試験体について統一的な方法でシミュレーション解析を行い、性状を分析することにより、小振幅から終局レベル付近まで高精度に表現できる地震応答解析モデルを構築を目的とする。併せて、応答に影響の大きい減衰モデルについてより適切なモデルに関する検討を行う。また、振動モデルの作成に有用な建物各層の剛性(特に非線形問題におけるや復元力特性)を同定する方法についても検討を行う。

3. 研究の方法

本研究ではE-ディフェンスの実験より代表的なケースとしてRC造試験体4体と、S構造試験体4体を対象とし、次の4項目の検討を行う。

1) 建築物の振動特性の把握と整理

上記の試験体についてのこれまでの検討は、減衰特性に関するものは十分とは言えなかった。そこで、多数の実験データを統括的に整理し、建築物の振動特性が、入力レベルに応じてどのように変化するかを、1次、2次の固有周期と減衰定数について分析評価する。また水平方向に加えて上下方向の振動特性についても分析する。

2) シミュレーション解析による検証とモデルの改良

上記試験体の地震応答解析モデルを作成し、シミュレーション解析を行う。解析モデルは現在実務で多く用いられている質点系モデルと3次元フレームモデルを基本とし、上記試験体の検討を行う。解析の初期モデルとしては、現状で一般的に用いられているモデル化方法とする。さらに精度向上のためのモデルの修正方法についてもRC構造、S構造の各モデルで同一の方法とし、統一的な方法でのモデルの作成を目指す。これらのモデルにより検討を実施し、実験結果との比較により応答の精度を確認する。

3) 小振幅から終局レベル付近まで適用可能な減衰モデルの作成

これまでの地震記録の分析から、建築構造物(地盤の影響を除く上部建物部)の減衰は、振動数への非依存性と振幅への依存性を有することがわかってきた。このような現象に対して、従来のRayleigh減衰やモード減衰では変化の対応が困難である。これらに替わる時刻歴応答解析用の減衰モデルとして、因果的履歴減衰モデルや拡張Rayleigh減衰モデル等が提案されている。これらのモデルは振動数への非依存性について良好な性状を有するが、振幅への依存性に対しては課題がある。そこで、これらのモデルを改良し、振幅依存性等の非線形現象に有効で、かつ解析負荷が小さく、実用性の高いモデルを作成する。

4) 振動モデルの作成に有用な同定方法の検討

既存の建物の振動特性を把握し、今後の地震に対する応答性状を評価するためには、建物の振動パラメータを同定して、動的応答解析モデルを構築する方法も重要である。これまで振動モデルの同定においては、線形モデルの事例がほとんどで、非線形でもバイリニアモデルの事例がわずかに示されているに過ぎない。近年、新たな同定方法としてMIEC法(モーダル反復誤差修正法)が提案されている。本研究では、このモデルを用いて、実務の応答解析で多く用いられているバイリニアモデルとトリリニアモデルへの同定を検討する。

4. 研究成果

本研究ではE-ディフェンスの実験結果に基づく上記の検討を行い、以下の成果を得た。

1) 建築物の振動特性の把握と整理

上記の試験体について、多数の実験データを統括的に整理し、建築物の振動特性が、入力レベルに応じてどのように変化するかを、1次、2次の固有周期と減衰定数について分析評価した。また分析において、減衰定数が多大となる場合が見られた。これは主に試験体の重量が大きいため、振動台に加えられる回転入力も大きなものとなる場合であることが指摘されている。そこでまず質点系モデルのシミュレーション解析により回転入力の考慮の有無が応答に与える影響を評価した。次にARXモデルを用いて試験結果よりシステム同定を行う場合に、回転入力の考慮の有無を比較し、考慮した場合は、上記の過大な減衰が修正され妥当な値となることを確認した。さらにこれを補正する方法についても検討した。

2) シミュレーション解析による検証とモデルの改良

質点系モデルにより、RC造4ケース、S造4ケースの解析を行い、実験結果との比較を行った。入力動が大きくなると、一般的な方法で設定されたモデルの結果は、実験との差異が大きくなる。RC造ではこの原因の一つとして、大梁の曲げ剛性に関するスラブの協力幅の評価方法の影響が大きいことを確認した。S造モデルにおいては設計時の部材の剛性と耐力が実情と差異がありこの影響が大きいことを確認した。これらより、RC造、S造とも一般的な質点系解析モデルでも層間変形角1/50程度までに概ね良好な応答結果が得られることを示した。3次元フレームモデルの検討においても質点系モデルと同様の結果となった。

3) 新たな減衰モデルの提案

非線形時の地震応答解析に適用可能な減衰モデルとして、従来の剛性比例型減衰やレイリー減衰に加え、新たな減衰モデルとして因果的履歴減衰と拡張モーダル減衰の検討を行った。また比較の対象として非線形モーダル減衰を提案した。これは構造物の非線形化の進展に応じて逐次固有値解析を行い、モード行列を更新して減衰を与えるものである。これらの比較から、特にRC構造物において、剛性比例型および初期剛性を用いたレイリー減衰は精度に課題があることを示し、瞬間剛性を用いたレイリー減衰や因果的履歴減衰と拡張モーダル減衰の適用性が高いことを示した。

4) 振動モデルの作成に有用な同定方法の検討

まず4層S造建物を対象として、MIEC法により振動パラメータの同定を行った。各層の復元力特性をノーマルバイリニアと仮定し、第1剛性、第2剛性および折れ点の耐力を同定した。さらにRC造の4層と10層の建物を対象とし、各層の復元力をトリリニアの修正武田モデルとして同定を行った。いずれも良好な精度で同定ができ、実用性が高いことが確認された。特に後者のトリリニアモデルの同定については、これまで例がなく今後の展開が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 中村尚弘	4. 巻 84,759
2. 論文標題 因果的履歴減衰モデルの非線形応答解析への適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 597,608
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.84.597	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 -
1. 著者名 東城峻樹, 中村尚弘, 土佐内優介, 梶原浩一, 佐武直紀	4. 巻 19,5
2. 論文標題 大型震動台実験におけるRC造建物の振動特性に及ぼす振動台の回転入力に関する影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 356-367
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 -
1. 著者名 木下拓也, 中村尚弘, 鹿島俊英	4. 巻 84,766
2. 論文標題 地震観測記録に基づく建築構造物の上下方向1次振動特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1545,1556
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.84.1545	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 -
1. 著者名 中村尚弘, 井上さゆり	4. 巻 66B
2. 論文標題 中高層建物における許容応力度法と時刻歴応答解析法の定量的比較	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 223,228
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 -

1. 著者名 東城峻樹, 中村尚弘, 土佐内優介, 梶原浩一, 佐武直紀	4. 巻 746
2. 論文標題 大型震動台実験に基づくS造建物の振動特性の分析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 565-575
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.83.565	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 -

1. 著者名 中村尚弘, 鹿嶋俊英, 宮津裕次, 東城峻樹, 肥田 剛典, 飯山 かほり, 鈴木琢也	4. 巻 753
2. 論文標題 振幅依存性を考慮したS造建物の水平1次, 2次振動特性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1561-1571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.83.1561	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 -

1. 著者名 T. Uesaka, N.Nakamura and T.Suzuki	4. 巻 232
2. 論文標題 Parameter Identification for Nonlinear Structural Model Using Modal Iterative Error Correction Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engstruct.2020.111805	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 中村尚弘, 佐武直紀, 扇谷匠己, 伊藤真二	4. 巻 67B
2. 論文標題 実測データに基づく一般建物の初期減衰定数の分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 557,568
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 -

1. 著者名 上坂卓也、中村尚弘、鈴木琢也	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 実大4層RC造建物を対象とした非線形応答解析モデルの同定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 -
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24件(うち招待講演 2件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 上坂卓也、中村尚弘、鈴木琢也
2. 発表標題 実大RC造建物を対象とした非線形応答解析モデルの同定
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究報告集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久保一晴、中村尚弘
2. 発表標題 大型震動台実験に基づくRC造建物の上下振動特性の分析
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究報告集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋正樹、中村尚弘、梶原浩一
2. 発表標題 大地震時のS造建物の大型振動台試験に基づく解析的検討
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究報告集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安田翔平、中村尚弘
2. 発表標題 建築物の時刻歴応答解析結果への初期減衰モデルの影響
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究報告集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原 主康、中村尚弘、梶原浩一
2. 発表標題 大型震動台実験による RC 造建物を対象とした時刻歴応答解析の解析精度に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上坂卓也、中村 尚弘、鈴木琢也
2. 発表標題 モーダル反復誤差修正 (MIEC) 法による実大 RC 造建物の非線形応答解析モデルの同定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 尚弘、佐武直紀、扇谷匠己、伊藤 真二
2. 発表標題 建築物の耐震設計における水平 1 次の初期減衰定数に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Nakamura, N. Satake, N. Ougiya, S. Ito
2. 発表標題 Initial Damping Ratio for The Seismic Design Of Buildings
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naohiro Nakamura, Takuya Suzuki
2. 発表標題 Nonlinear response analysis of soil-foundation-structure interaction system of middle-rise RC building for ultimate seismic condition
3. 学会等名 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naohiro Nakamura
2. 発表標題 Problem and Study of SSI (Soil-Structure Interaction) for Japanese NPP (Nuclear Power Plant) Current and Future
3. 学会等名 25th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上さゆり、中村尚弘
2. 発表標題 建物の許容応力度法と時刻歴応答解析法の比較
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 正樹, 中村 尚弘, 梶原 浩一, 宮津 裕次
2. 発表標題 S 造建物の大型震動台試験のシミュレーション解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉野 文哉, 中村 尚弘
2. 発表標題 SRC造建物の地震応答解析に基づく1次, 2次の振動特性の評価
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤原 圭康, 中村 尚弘, 梶原 浩一
2. 発表標題 4階建て鉄筋コンクリート造建物の大型震動台実験を対象とした時刻歴応答解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村尚弘
2. 発表標題 建物の非線形応答解析の初期減衰モデルへの因果的履歴減衰モデルの適用
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上坂 卓也, 中村 尚弘, 鈴木 琢也
2. 発表標題 モーダル反復誤差修正 (MIEC) 法による実大建物の線形, 非線形応答解析モデルの同定
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐武 直紀, 中村 尚弘
2. 発表標題 東北地方太平洋沖地震の観測記録に基づく建物の固有周期と減衰定数の傾向分析 (その2)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji Ukita, Naohiro Nakamura
2. 発表標題 Estimation of the Effect of Initial Damping Model and Hysteretic Model on Dynamic Characteristics of Structure
3. 学会等名 ICEES 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumiya Sugino, Naohiro Nakamura
2. 発表標題 Estimation of Dynamic Characteristics of a Middle Rise SRC Building Using Long-Term Earthquake Observation Records
3. 学会等名 ICEES 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naohiro Nakamura
2. 発表標題 Simulation Analysis of a Full-Scale 5-Story Building with Vibration Control Dampers,
3. 学会等名 ICSAUDA 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naohiro Nakamura, Takuya Suzuki
2. 発表標題 Response Analysis of Soil-Foundation-Structure Interaction System of RC Building Using Nonlinear 3-dimensional FEM against Strong Earthquake
3. 学会等名 WCCM 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浮田 紳二, 中村尚弘, 宮津 裕次
2. 発表標題 構造物の1次, 2次振動特性に及ぼす履歴モデルの影響評価
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村尚弘
2. 発表標題 因果的履歴減衰モデルの建物の非線形地震応答解析への適用性に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原 圭康, 梶原 浩一, 土佐内優介, 中村尚弘, 宮津 裕次
2. 発表標題 10階建て鉄筋コンクリート造建物の大型震動台実験を対象とした時刻歴応答解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本建築学会	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 364
3. 書名 建築物の減衰と振動	

〔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	梶原 浩一 (KAJIWARA KOICHI) (10450256)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・総括主任研究員 (82102)	
研究分担者	木下 拓也 (KINOSHITA TAKUYA) (60591328)	株式会社竹中工務店 技術研究所・その他部局等・研究員 (移行) (92502)	
研究分担者	宮津 裕次 (MIYAZU YUJI) (70547091)	東京理科大学・理工学部建築学科・講師 (32660)	

6. 研究組織（つづき）

	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	東城 峻樹 (TOUJOU TAKAKI) (70752103)	株式会社竹中工務店 技術研究所・その他部局等・その他 (92502)	

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