

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23546

研究課題名（和文）免震すべり支承の各種依存性を統合した数値解析モデルの構築

研究課題名（英文）Analysis model for seismic sliding bearings considering various dependencies

研究代表者

石井 建（Ishii, Ken）

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：50840550

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、免震すべり支承の面圧・速度・温度に対する依存性を同時に考慮可能な数値解析モデルを構築した。計算モデルの構築にあたり、既往の熱・力学連成解析モデルから力学モデルと熱伝導解析モデルをそれぞれ分離し、任意の組み合わせに対して動作可能となるよう整備した。数値計算モデルの適用例として、異なるすべり材配置を持つ装置に対する熱・力学連成挙動解析を行った。シミュレーション解析により、すべり材の配置が装置温度上昇に与える影響を把握した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築した数値解析モデルの構成手法を活用することで、熱伝導解析モデルと力学モデルを別々に開発し、それらを併用した熱・力学連成挙動解析を行うことが可能となった。数値解析事例より、すべり材の配置によって装置の温度上昇が低減できることが確認できたため、温度上昇によって生じる諸問題に対する方策が得られた。これらの成果を使用することで、免震建物の極限挙動を把握し、地震時安全性を向上させるための対策の一環とすることができる。

研究成果の概要（英文）：This research developed numerical models for seismic sliding bearings considering pressure-velocity-temperature dependencies. Mechanical model and thermal conductivity analysis model are separately produced, and are combined together in the numerical analysis. Using the developed model, thermal-mechanical coupled behavior analyses were performed. Effect of arrangements of sliding materials on temperature rise of the devices was evaluated by simulation analysis results.

研究分野：免震構造

キーワード：免震構造 すべり支承 依存性 力学挙動解析 熱伝導解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 免震構造は、建物下部に大きな水平変形性能を持つ免震装置を設置することで建物の固有周期を長くし、エネルギー吸収性能を持つ装置により減衰性能を付与する。一般的な免震建物の固有周期では通常想定される入力地震動に対する応答加速度が小さくなり、基礎固定建物よりも耐震性が向上する。免震構造では、上部の建物は地震時にも変形が小さく、免震装置の特性が全体の地震応答特性を支配する。通常設計レベルにおいて、免震装置の安全性は培われてきた製造技術および製品検査によって確保されており、装置の挙動解析技術も成熟している。一方で、今日では免震構造に対する需要拡大により、従来の想定を超えた範囲での安全性の検証が求められている。

(2) 免震すべり支承は、弾性変形とすべり挙動によるバイリニア特性が明快な支承・減衰一体型の装置であり、導入事例が多い免震装置である。これまでに、免震すべり支承に対して数多くの加力試験が行われており、装置を構成する材料によって異なる面圧依存性・速度依存性・温度依存性などを生じることが知られている。近年では、免震すべり支承の極限挙動に関して、水平二方向加力により履歴形状が大きく変化した例や、多数回繰り返し加力により減衰性能の低下が顕著になった例などが報告されている。免震すべり支承は主要な免震装置であるが、地震時に生じる変動軸力・水平二方向変形・摺動面の発熱などの影響を受けて、剛性や減衰といった基本的な特性が大きく変化する。免震建物を安全に設計するためには、このような特性変化を見込んだうえで建物応答を適切に評価する手法を開発することが重要である。

(3) 免震すべり支承の地震時の力学特性変動を再現するために、三軸連成解析や熱・力学連成解析などの高度な技法が提案されている。しかし、これらは通常の構造解析プログラムでは対応が困難である。また、免震すべり支承の力学特性に関して、速度や温度に対する依存性の同定や計算モデルの構築はある程度進展しているものの、研究成果が散在しているのが現状である。それぞれの依存性を複合的に考慮した地震時挙動は検討されておらず、全ての特性を統一的に扱うためには、数値解析モデルの構築から始める必要がある。

2. 研究の目的

免震すべり支承は、面圧・速度・温度などに依存して力学特性が変化することが知られており、同支承を使用した免震建物の地震時安全性を検証するためには、それらの特性変化を同時に考慮することが重要である。本研究は、導入事例の多い免震装置である免震すべり支承について、各種依存性を同時に考慮可能な数値解析モデルを構築する。また、免震装置の実験的検証によって新たな依存性が発見されることも多く、解析モデルを更新し続けることも同様に重要である。これらを可能とするため、本研究では使用性と拡張性の高さを重視した解析システムを開発する。

3. 研究の方法

(1) 免震装置に関する最新の研究では、すべり支承・積層ゴム・ダンパーなどについて、装置のエネルギー吸収による発熱が力学特性に与える影響を考慮した熱・力学連成挙動解析が行われるようになってきている。この連成解析は、力学挙動解析と熱伝導解析が一体化されたものである。本研究では、解析システムの拡張可能性を重視する目的で、これらの解析をモジュール化したうえで自由に組み合わせられるように再構成する。

(2) はじめに、既往の解析モデルのモジュール化と再構成に取り組み、柔軟な解析システムを開発する。本研究では、オープンソースの有限要素解析フレームワークである OpenSees に参画し、免震すべり支承の解析システムを実装する。当フレームワークは、主たるプログラミング言語として C++ を使用し、複数の研究者が開発に参加できるようにオンラインで整備されている。C++ のクラスを用いることで、熱伝導解析モデルと力学モデルを別々に分離したうえで開発を行い、それらを併用した熱・力学連成挙動解析を行うことができる。

(3) 上記の項目に続いて、開発したシステムの検証と同時に、免震すべり支承を用いた建物の地震時安全性を検討する。本研究では、免震すべり支承の各種依存性が同時に発現した場合の挙動を予測し、力学特性の変動に与える影響を定量化する。随時、免震装置の実験から得られたデータを計算モデルに反映させ、最新の知見を取り入れた構造解析プログラムを構築する。

4. 研究成果

(1) 既往の熱・連成解析手法を精査し、計算のモジュール化が可能な部分を抽出した。OpenSeesにおいてElementクラスおよびMaterialクラスを用いて、熱・力学連成モデルから力学モデルと熱伝導解析モデルをそれぞれ分離し、任意の組み合わせに対して動作可能となるよう整備した(図1)。これにより、熱伝導解析モデルと力学モデルを別々に開発し、それらを併用した熱・力学連成挙動解析を行うことが可能となった。

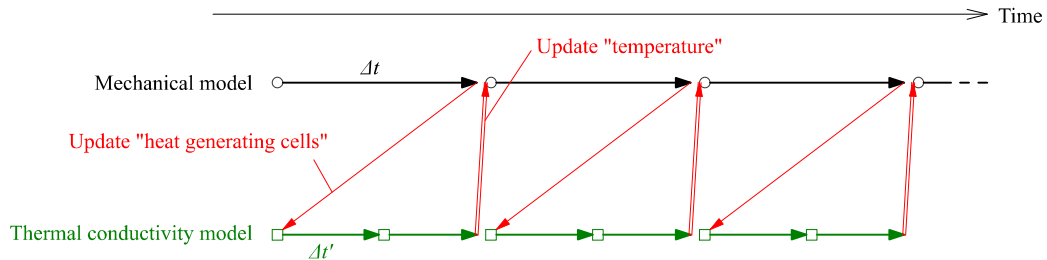


図1 分離したモデルを用いた連成解析の実施手順

(2) 鉛直と水平二方向の連成挙動を考慮したすべり支承の力学モデルと、複数配置されたすべり材の水平二方向移動を考慮した熱伝導解析モデルとを組み合わせ、熱・力学連成挙動解析を行った(図2)。シミュレーション解析により、すべり材の分散配置が温度上昇に与える影響を把握した。また、地震応答解析により、地震時の装置温度上昇が軽減される効果を確認した(図3)。これらの結果より、温度上昇によって生じる諸問題に対する方策が得られた。

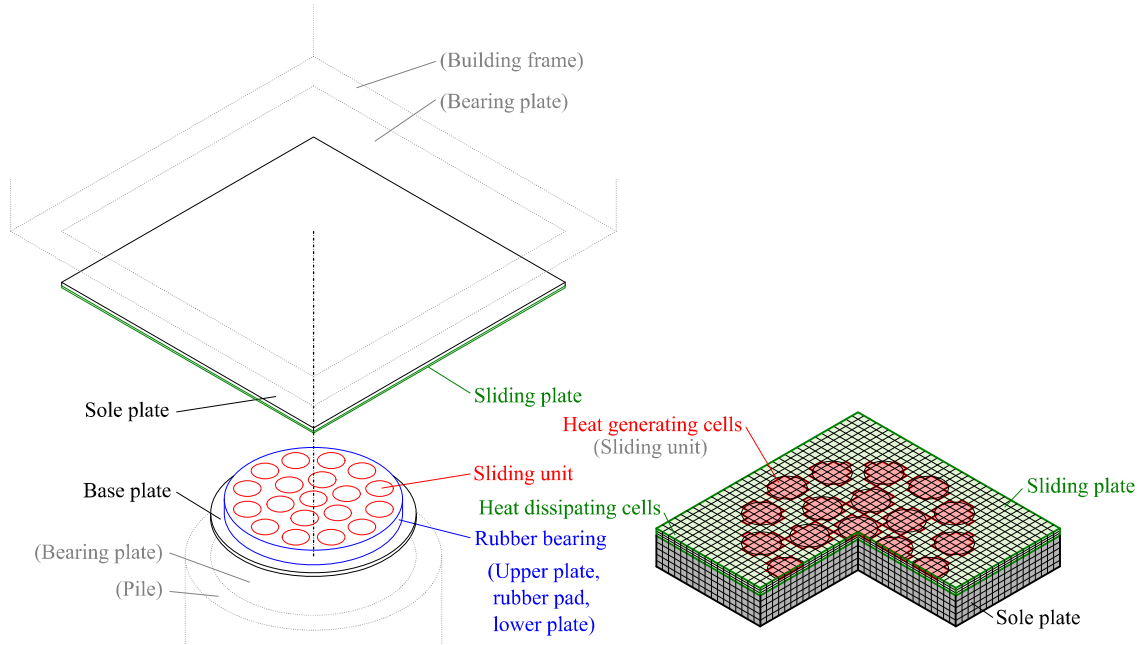
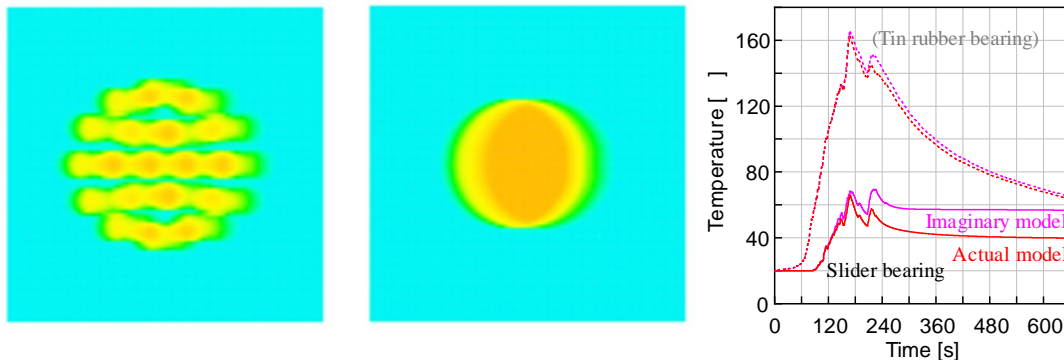


図2 複数枚のすべり材を持つ装置の解析モデル



(a) 温度分布(分散配置) (b) 温度分布(集中配置) (c) 地震時の温度変化

図3 連成解析モデルを用いたシミュレーション解析結果

(3) 特に速度依存性と温度依存性を分離する目的で免震すべり支承の加力実験を実施し、摩擦係数を評価した(図4)。実験の再現解析により、新たに作成した評価式および解析モデルの妥当性を検証した(図5)。これらの成果を使用することで、建物の極限挙動を把握し、地震時安全性を向上させるための対策の一環とすることができる。

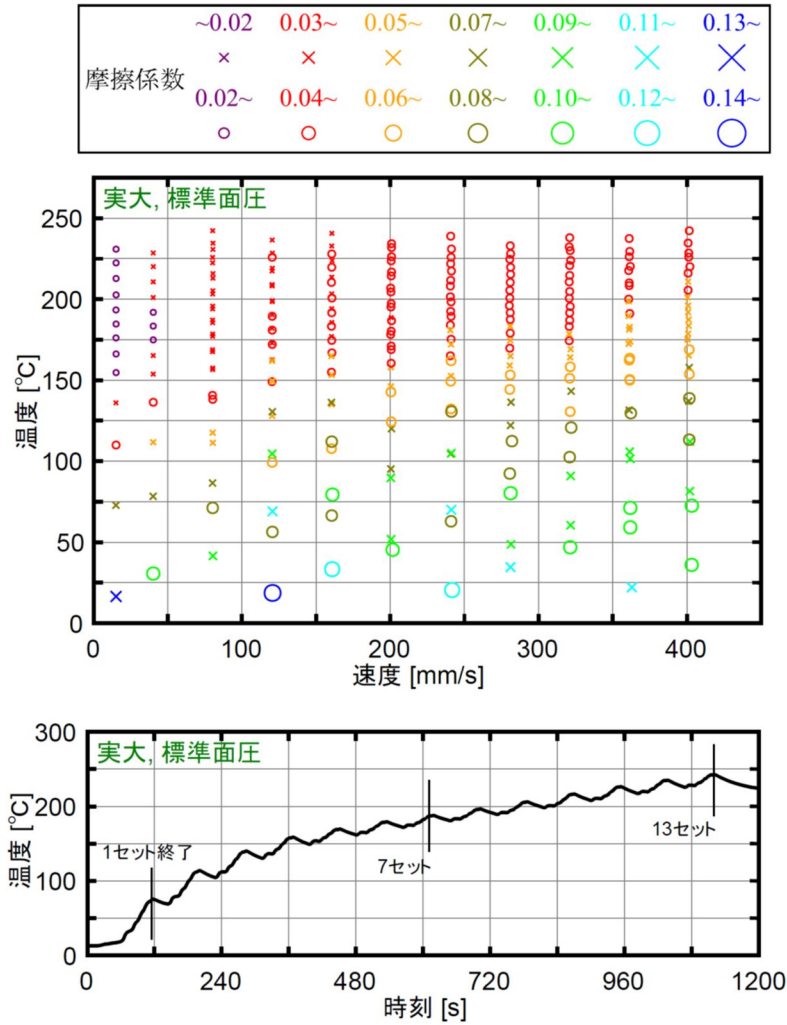


図4 免震すべり支承の加力実験結果

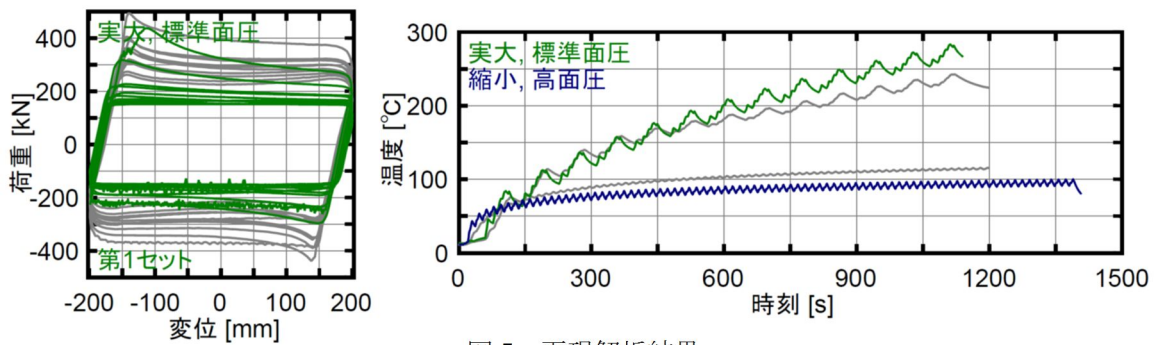


図5 再現解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 M. Kikuchi, K. Ishii, T. Mori, R. Kurosawa, H. Sugiyama, T. Koizumi |
| 2. 発表標題 Thermal-mechanical coupled analysis model for matrix sliding bearings |
| 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 入澤祐太, 和氣知貴, 石井建, 菊地優, 高田悠大 |
| 2. 発表標題 弾性すべり支承の速度依存性と温度依存性の同時評価 (その1) 実験計画 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高田悠大, 石井建, 菊地優, 入澤祐太, 和氣知貴 |
| 2. 発表標題 弾性すべり支承の速度依存性と温度依存性の同時評価 (その2) 実験結果 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石井建, 菊地優, 高田悠大, 入澤祐太, 和氣知貴 |
| 2. 発表標題 弾性すべり支承の速度依存性と温度依存性の同時評価 (その3) シミュレーション解析 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 菊地優, 石井建, 小林直暉, 長濱温子, 黒沢亮太郎, 杉山洋, 小泉貴宏 |
| 2. 発表標題 複数枚のすべり材を使用した弾性すべり支承の熱・力学連成挙動(その1)切出し供試体の加力実験 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小林直暉, 石井建, 菊地優, 長濱温子, 黒沢亮太郎, 杉山洋, 小泉貴宏 |
| 2. 発表標題 複数枚のすべり材を使用した弾性すべり支承の熱・力学連成挙動(その2)加力実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 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石井建, 菊地優, 小林直暉, 長濱温子, 黒沢亮太郎, 杉山洋, 小泉貴宏 |
| 2. 発表標題 複数枚のすべり材を使用した弾性すべり支承の熱・力学連成挙動(その3)免震建物の地震応答解析 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ken Ishii, Masaru Kikuchi |
| 2. 発表標題 Mechanical behavior of sliding bearings for seismic isolation under cyclic loading |
| 3. 学会等名 16th world conference on seismic isolation, energy dissipation and active vibration control of structures (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|