

令和元年6月21日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06465

研究課題名(和文) 温度・载荷経路への依存性を中心としたゴムの力学特性の把握とそのモデル化

研究課題名(英文) Experimental investigation on mechanical behavior of rubber materials and its modeling

研究代表者

吉田 純司 (YOSHIDA, Junji)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：90345695

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、免震用のゴム材料を対象とし、力学特性の温度や载荷経路に関する依存性を把握するための試験装置を開発し、それを用いて体系的な材料試験を行った。また、得られた実験結果を用いて、ゴムの力学特性のモデル化を行った。最後に、小型の積層ゴム支承を対象として、支承の三軸载荷実験および免震橋梁を模擬したハイブリッド地震応答载荷実験を行い、モデルを用いた解析結果と比較することで妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ゴム材料は、幅広い分野で工業部材として応用されており、部材の精度の高い性能予測が期待されている。本研究では、熱粘弾塑性-ダメージモデルなどの複雑な構成則を用いることを前提に、ゴムの上述した依存性を体系的に把握するための試験装置を開発し、ゴムの力学特性の速度、最大変形、温度等に対する依存性を把握した。さらに、研究代表者らが既往の研究で提案した超弾性粘弾塑性ダメージモデルを適用したところ、実験結果を比較的精度良く再現できることがわかった。今後は、本研究で得られた実験データやモデルを用いた数値解析により、ゴムを応用した構造部材の精緻な力学特性の予測が可能になるものと期待している。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have conducted several material tests, in order to understand multi-axial behavior of rubber materials and its dependency to temperature and loading path. Three types of material tests were done. The first one is dynamic simple shear test with several loading frequencies and temperatures. The second one is tensile and compressive test of a thin rubber sheet, which is adhered to plates in upper and lower plane, in order to investigate relation between volumetric deformation and hydro-static pressure of the rubber. The third one is static tensile test. In the test, uniaxial and equi-biaxial tensile test were carried out under quasi-static loading at the room temperature. Then, we applied those experimental data to the hyper-elastic visco-plastic damage model, which had been proposed by us. As a result, it is found that the model can well reproduce the experimental data.

研究分野：耐震工学

キーワード：ゴム材料 免震構造 積層ゴム支承 構成則 材料試験

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

1. 研究開始当初の背景

1995年の兵庫県南部地震以降、構造物の被害を低減する目的で、減衰性能を有するゴムを用いた免震・制振デバイスを採用する社会基盤施設が増加してきている。これらのデバイスでは、ゴムの柔軟性により地震による慣性力の影響を低減するとともに、履歴によるエネルギー吸収により変位応答を低減することを目的としている。このように免震・制振デバイスでは、装置の動力学的性質を積極的に応用していることから、構造物の動的応答はデバイスの力学特性に大きく影響を受けることになる。デバイスの力学特性は、主構成材料であるゴムの力学特性に依存することになるが、ゴムが有する応力進展方向やエネルギー吸収性能などの性質は、一般に変形経路、ひずみレベル、最大経験ひずみ、温度、載荷振動数などに応じて大きく変化することが知られている。特に近年では、水平2方向に免震・制振デバイスの動作を見込んだ構造物が設計・実用化されており、その際にはデバイス内のゴム材料に複雑な変形経路が生じることになる。実務での様々な使用条件や環境に応じて、ゴムを応用した構造部材の性能を精緻に予測するためには、様々な条件下でゴムの変形経路を考慮して力学特性を把握し、モデル化することが必要となる。

2. 研究の目的

ゴム材料は、免震・制振装置やタイヤなどをはじめとして、様々な工業用構造部材として広く応用されている。近年では、これらの構造部材においてゴムの柔軟性に加え、その減衰性能を利用してより高性能な部材の設計・開発が行われている。本研究は、特に多軸変形下での変形経路と温度への依存性に焦点をあてゴムの力学特性を明らかにし、そのモデル化を目的とする。具体的には、温度を考慮したゴムの2軸および3軸載荷実験を実施し、ゴムの力学特性の温度および変形経路への依存性を明らかにする。次いで、それらの力学特性を再現可能な構成モデルを構築し、その数値計算手法を確立する。最後に、構造部材の載荷実験を行い、部材レベルにおけるモデルの妥当性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、温度・載荷経路への依存性を中心としてゴムの多軸変形下での力学挙動を明らかにし、それをモデル化することを目的とする。具体的には、

- (1) 常温でのゴムの多軸変形下(2軸, 3軸)での力学挙動の把握,
 - (2) 温度を制御・保持するための装置の開発と、それを用いて様々な温度下でのゴムの動的多軸載荷実験による力学特性の把握,
 - (3) 上述の実験結果を再現できるゴムの構成モデルの開発,
 - (4) 本構成モデルを有限要素法(FEM)へ導入するための数値計算法の確立と、構造部材レベルでのFEMによるシミュレーション結果の検証,
- を企図するものである。

(1)については、免震・制振用ゴムを対象として、詳細な3軸載荷実験を実施するつもりである。具体的には、水平2方向に複数の載荷振動数で8の字経路、円経路、矩形経路などを設定し、多軸の連成効果を確認する。実験では、振動数が0.1Hz~20Hz程度の範囲、振幅(ひずみレベル)が0.1%~300%の範囲で実施する予定であり、実験に先立ちこれらの載荷条件を満たすことのできる試験装置を開発する。なお、ここでの実験では、温度については常温を想定しており、(2)で実施する温度を中心とした載荷実験の基準となるデータを収集する。また、得られた実験データから貯蔵弾性率、損失弾性率、損失正接などの粘弾性特性を算出し、応力進展方向や履歴によるエネルギー吸収に、振幅(ひずみレベル)、振動数、載荷経路、鉛直変形が与える影響を定量的に評価する。加えて研究代表者らがこれまでの研究で提案したゴムの構成モデル^[1]により実験での状態を再現し、動的な多軸変形下でのゴムの実挙動の再現性についても検討する。

次に、(2)については、初年度は試験片周辺の温度を制御・保持するための装置を構築する。具体的には、ボックス型の恒温槽、冷却装置、加熱装置を設計・製作する。恒温槽については、試験装置の載荷部分を覆う形でアクリル等を用いて設計・製作する予定である。冷却についてはコンプレッサを用いて冷風を噴出する装置、加熱については温風を噴出する装置を用い、温度計測を行いながら手作業で温度調節をすることを考えている。

次に(3)では、(1)、(2)で得られた実験データを基に、研究代表者らが提案したゴムの構成モデル^[1]を拡張する。主な拡張点は、

- ① Mullins 効果の異方性のモデル化,
- ② 応力進展方向および履歴ループの形状・面積への温度依存性の導入,

の2つである。①では、文献[1]で用いている等方性のダメージモデルを異方性へと拡張する。具体的には、得られた実験データを基に、弾塑性論での移動硬化を参考に背応力に相当する内部変数を定義・応用して異方性を再現することを考えている。②では、温度の違いによる応力-ひずみ関係の変化をモデル化する。文献[1]のモデルでは、応力進展方向（Mullins 効果を含む）を超弾性ダメージ要素で、エネルギー吸収性能を粘弾塑性要素で別々にモデル化し、それを並列に組合せる方法を採用している。本研究での温度依存性に関する拡張においても、応力進展方向では、実験結果と既往の研究^{[2],[3]}を参考に超弾性ダメージ要素に温度依存性を導入するつもりである。

最後に、(4)では、(3)で構築した構成モデルを FEM へ導入するための定式化と、有限要素モデルを用いて構造部材レベルでの検証を行う。具体的には、まず、構成モデルにおいて応力を更新するための応力積分法を確立し、それと整合する接線係数を導出する。次いで、小型の積層ゴム支承を製作し、前述した3軸載荷試験機を用いて載荷実験を実施する。この実験では、支承の基本的な復元力特性を把握するとともに、免震橋梁を模擬したハイブリッド地震応答実験を実施する予定である。これらの実験結果と、FEM による支承の解析結果を比較することで、構造部材レベルの実地震時の挙動についてモデルの検証を行う。

参考文献

- [1] Treloar, L. R. G.: *The Physics of Rubber Elasticity*, 3rd ed., Oxford University Press, 1975.
- [2] 吉田純司, 杉山俊幸: エネルギー吸収性能のひずみ依存性を考慮したゴムの超弾性-粘弾塑性ダメージモデル, 土木学会論文集 A2, Vol.71, No.1, pp.14-33, 2015.
- [3] 日本レオロジー学会編: 講座・レオロジー, 高分子刊行会, 1992.
- [4] Tanner R.I.: *Engineering Rheology*, 2nd ed., Oxford University press, 2000.
- [5] Haupt, P. and Sedlan, K.: Viscoplasticity of elastomeric materials: experimental facts and constitutive modelling, *Archive of Applied Mechanics*, Vol.71, p89-109, 2001.

4. 研究成果

本研究では、まず、免震用積層ゴム支承のゴム材料を対象として、動的3軸載荷試験装置および二軸引張り試験装置を用いて、常温でのゴムの材料実験を行った。この実験では、エネルギー吸収性能、Mullins 効果、ハードニングなどのゴム特有の挙動をモデル化できる複雑な構成則を対象として、応力の連成効果、ひずみレベル、応力載荷経路、載荷振動数等を実用的な範囲で変化させ、応力-ひずみ関係の体系的な把握を行った。また、これらの実験結果を再現するために、研究代表者らが提案した超弾性-粘弾塑性ダメージモデルを適用したところ、いずれの試験についても精度良く再現できることがわかった。

なお、本実験で対象とした免震用のゴム材料の場合には、ひずみ 200% 以上の大変形を対象とした場合、動的3軸載荷試験装置のロードセルおよびアクチュエータの性能が不足していることが判明した。そこで、次に動的3軸載荷試験装置の改良を試みた。また、同時に保温のための恒温槽の設計・製作を行った。恒温槽については、3軸の変形に対して追従できるよう柔軟な高分子材料を用いて試験片取り付け部周辺を覆う装置を製作し、冷風・熱風を治具の一部から導入した。また、温度は熱伝対および赤外線カメラのいずれでも計測できるようにした。なお、アクチュエータの改良については、シャフト部品の供給不足から 2019 年 5 月まで時間を要した。

次いで、小型の積層ゴム支承を設計・製作し、3軸載荷実験を行った。この実験では、支承の基本的な水平2方向載荷での復元力特性に加え、免震橋梁を模擬したハイブリッド地震応答載荷実験を行い、モデルを検証するための基礎的データを収集した。また、支承の復元力をモデル化し、実験結果との比較を行ったところ、これらの実験結果を比較的精度良く再現できることがわかった。

続いて、改良した試験装置と恒温槽を用いて、高温下および低温下でのゴムの動的せん断試験を行い、異なる温度でのゴムの応力-ひずみ関係のデータを収集した。ただし、10 以下の低温の実験を行った際に金属製の治具の一部から温度が逃げるなどの問題があり、改善を要することがわかった。最後に、実験データを用いて、構成則の温度に対して感度の高いパラメータを特定した。現在、そのパラメータを変えることによって異なる温度下でのモデル化を試みている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2件)

- 1) 吉田純司, 小泉和士: 動的解析のための免震用積層ゴム支承の水平2方向拡張バイリニアモデル, 土木学会論文集 A1, Vol.74, No.3, pp.458-472, 2018. (査読あり)
- 2) 竹谷晃一, 吉田純司, 太田小春, 高木詩歩: 動画像を用いた橋梁の活荷重挙動

の分析方法の基礎的検討，鋼構造年次論文報告集，Vol.26，No.56，pp.380-385，2018。（査読あり）

〔学会発表〕（計 6 件）

- 1) 井上友景，生出佳，寺嶋隆史，吉田純司：超弾性粘弾性モデルの汎用コードへの組込みと実用化に向けた研究，第 24 回日本計算工学講演会，Vol.24，2019.05.
- 2) K., TAKEYA, S., Takagi, J., Yoshida, and E., Sasaki：Vehicle Information in Motion Based on Bridge Accelerations and Machine Learning Techniques, *The 8th Regional Symposium on Infrastructure Development*, No.7(C2), pp.1-12, 2018.(2018/10/25-26, Manila, Philippines)
- 3) K., TAKEYA, K., Ota, S., Takagi, and J., Yoshida：Analysis of Traffic Environment and Dynamic Behavior of Bridge Girders based on Image Sensing Techniques, *4th International Conference on Science, Engineering and Environment*, No.4721, pp.1-6, 2018.(2018/11/12-14, Nagoya, Japan)
- 4) 望月野亜，吉田純司：ゴムの動的多軸力学特性の把握，土木学会第 73 回年次学術講演会，2018.08.（北海道大学）
- 5) 吉田純司：ゴムの力学挙動の把握とモデル化に関するノウハウ，MSC software 2017 user conference, 2017.06.07.
- 6) H. Takizawa, T. kuwabara, K. Oide and J. Yoshida: Development of the subroutine library 'UMMDp' for anisotropic yield functions commonly applicable to commercial FEM codes, *The 10th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes*, 2016.09.(Bristol, UK)

〔図書〕（計 1 件）

- 1) 吉田純司，生出佳，寺嶋隆史 訳，非線形 CAE 協会 監訳，Bonet, J. and Wood, R.,D.著：非線形有限要素法のための連続体力学（第 2 版），森北出版，2017.06.

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 なし。

6．研究組織

(1)研究分担者
なし。

(2)研究協力者
なし。

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。