

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04162

研究課題名(和文)異なる2種の材料試験を利用した高効率なゴムの大変形応力緩和試験法の開発

研究課題名(英文) Development of a Highly Efficient Large Deformation Stress Relaxation Test Method for Rubber Using Two Different Material Tests

研究代表者

藤川 正毅 (Fujikawa, Masaki)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：70549047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：動的粘弾性試験と“短”時間の応力緩和試験(Relax-試験)の結果から、長時間域の応力緩和履歴を予測する新しい手法を開発した。本法の有効性を確認する目的で、カーボンブラック充てん量の異なる数種のSBR材料を対象としたRelax-試験に適用した。その結果、1～2分程度のRelax-試験の結果から、半日以上にわたる応力緩和履歴を精度良く予測できることが確認された。本法の汎用性については、シリカ充填SBR材でも同等程度の結果が確認された。以上の結果を用いて、一般に計測が困難である定常状態におけるゴムの応力-ひずみ関係の予測値を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

応力緩和試験(Relax-試験)は、長時間負荷後のゴムの材料軟化現象や、定常状態の応力-ひずみ関係を計測する目的で一般に使用される。本試験は、例えばシーリング材のような装着後に長時間使用し続ける機器や、ゴムの力学特性を計算するための材料モデリング(応力-ひずみの関係式)の選択や構築に必要な不可欠の情報となる。

しかし効率的な長時間Relax-試験はこれまで開発されておらず、経験や種々の仮定に基づく代替手段による方法などが一般的であった。本法は体系的な研究により、これらの効率化と高精度化を可能にするものであり、学術面への貢献のみならず、工業面での実用が期待される。

研究成果の概要(英文)：A new method has been developed to predict the long term stress relaxation history from the results of dynamic mechanical analysis and short term stress relaxation tests (SRT). To confirm the validity of the method, it was applied to the SRT of several SBR materials with different carbon black contents. The results showed that the new method can accurately predict the stress relaxation history for more than half a day based on the results of SRT of about 1 to 2 minutes. Regarding the versatility of the method, the results were confirmed to be comparable for silica-filled SBR materials. Using these results, predicted values of the steady-state stress-strain relationship of rubber, which is generally difficult to measure, was presented.

研究分野：実験力学、計算力学

キーワード：ゴム 応力緩和履歴 予測 動的粘弾性試験 分数階微分モデル

1. 研究開始当初の背景

ゴム材料は、その力学的特性によって自動車タイヤ、シール製品、免振装置など、多様な応用分野で使用されている。そして、それらゴム材料の変形状態や強度を予測する際に、変形速度や温度によって変化するゴムの力学特性の把握が重要となる。例えば、長期間使用される環境では、ゴムの応力緩和現象（剛性の軟化現象）の把握が必要となる。この現象は、ゴム材料の種類によって数年以上にわたって継続する。

ゴムの力学モデルには、単独のバネモデル（定常状態における応力 - ひずみ関係を表現する要素）と、バネとダッシュポットを直列につないだ Maxwell モデル（粘弾性挙動を表現するための要素）を必要な数だけ並列に結合した一般化 Maxwell モデルが一般に用いられる。この粘弾性モデルの材料構成則には、様々なものが提案されており、例えば微小変形問題に対する線形粘弾性モデル（Christensen, 1984）、大変形問題に拡張した粘弾性モデル（Simo, 1987）、非線形粘弾性モデルである Bergstrom & Boyce モデル（Bergström & Boyce, 1998）などが挙げられる。これらは、多くの商用 FEM ソフトウェアでも実装されている。しかし、これらの粘弾性モデルを使用する際には、長時間領域の粘弾性特性や、単独のばねの剛性（または定常状態におけるゴムの応力 - ひずみ関係）を計測が必要となる。しかし、時間的コストの観点から、その直接的な計測は一般に困難と言わざるを得ない。

既存の応力緩和試験の研究報告についてまとめる。例えば、Oman と Nagode は、充填ゴムのクリープと応力緩和の関係について実験結果に基づく調査を報告している（Oman & Nagode, 2014）。Oseli らは、粘弾性材料の長期的な力学的な挙動の評価のため、時間-温度重ね合わせの計算方法を提案し、線形粘弾性領域と非線形粘弾性領域の関係を調査している。Peng らは hydrogenated nitrile butadiene rubber を対象として、最大 15% ひずみまでを対象とした modified time-temperature-strain superposition principle considering stress relaxation (TTSSP-R) の重なり合わせと応力緩和挙動について検討している（Peng et al., 2019）。また、Mokhireva と Svistkov, Delattre らは、多段階の応力緩和試験の結果から定常状態の応力-ひずみ関係を算出している（Mokhireva & Svistkov, 2020）（Delattre et al., 2016）。

しかし、実用的で高精度な応力緩和現象の計測方法に関する体系的な研究報告はいまだに達成されていない。このため、ゴムの長時間にわたる応力緩和履歴の把握や、定常状態における応力-ひずみ関係を計測は、現状で困難な状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、工業用ゴム材料の大変形を含む応力緩和挙動を予測するために、動的粘弾性試験（DMA 試験）と短時間の応力緩和試験（Relax-試験）を組み合わせた新しい計測方法を提案する。本法は、ゴムの DMA 試験の結果より設定した仮定に基づく分数階微分型の粘弾性モデルを使用するものであり、効率的かつ高精度に長時間にわたる Relax-試験の応力緩和履歴を予測するものである。本研究では、本法の概要をまとめ、さらに数種のゴム材料（充填量の異なるカーボンブラック充填 SBR 材、シリカ充填 SBR 材）へ適用して、その有効性と汎用性を確認する。そして、一般に計測が困難であった、定常状態におけるゴムの応力 - ひずみ関係の予測結果を提示することを目的とする。

3. 研究の方法

現在、2 件の論文投稿を検討もしくは投稿中です。
公開可能となるまで、割愛をさせていただきます。

4. 研究成果

本法は、DMA 試験と短時間の応力緩和試験（1~2 分）の結果から、半日以上の応力緩和挙動を精度よく予測できることが示された。カーボンブラック充填量の異なる 3 種類の SBR 材料に対して実験的・数値的な検討を行い、本法の有効性と汎用性を確認した。以上の結果を背景として、体積分率でカーボンブラック充填量が 15% の SBR 材料を対象とした、定常状態での応力 - ひずみ関係の予測結果を提示した。

またシリカ充填 SBR 材への適用も行い、本法の汎用性も確認した。

< 引用文献 >

(1) Christensen R.M., Theory of viscoelasticity, Dover publications, INC, 1984.

- (2) J.C. Simo, On a fully three-dimensional finite-strain viscoelastic damage model: formulation and computational aspect, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 69, pp.153-173, 1987.
- (3) J.S. Bergström and M.C. Boyce, Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume46, Number5, pp.931-954, 1998
- (4) K. A. Mokhireva and A. L. Svistkov, "A new approach to describe the elastic behavior of filled rubber-like materials under complex uniaxial loading," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 202, pp. 816–821, Oct. 2020.
- (5) S. Oman and M. Nagode, "Observation of the relation between uniaxial creep and stress relaxation of filled rubber," *Materials & Design*, vol. 60, pp. 451–457, Aug. 2014.
- (6) A. Oseli, A. Aulova, M. Gergesova, and I. Emri, "Time-Temperature Superposition in Linear and Non-linear Domain," *Materials Today: Proceedings*, vol. 3, no. 4, pp. 1118–1123, 2016.
- (7) Qidi Peng, Zhongmeng Zhu, Chengkai Jiang, Han Jiang, Effect of stress relaxation on accelerated physical aging of hydrogenated nitrile butadiene rubber using time-temperature-strain superposition principle, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2019.
- (8) A. Delattre, S. Lejeunes, F. Lacroix, and S. Méo, "On the dynamical behavior of filled rubbers at different temperatures: Experimental characterization and constitutive modeling," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 90, pp. 178–193, Jul. 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上地 恭平、藤川 正毅、山辺 純一郎、和田 健太郎、前田 成人、小石 正隆
2. 発表標題 工業用ゴム材料の応力緩和挙動の予測法とその性能評価
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部九州学生会第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>2件の投稿論文（査読付き）を検討中</p> <p>また下記の講演で本研究の一部を紹介</p> <p>藤川正毅 ゴム弾性/粘弾性の試験方法と材料パラメータの決定 日本ゴム協会 ゴムのFEM解析入門コース(2022)</p> <p>藤川正毅 ゴムの力学に関する研究事例の調査 日本ゴム協会 第50回ゴムの力学研究分科会(2023)</p>
--

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
---------	---------