

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289140

研究課題名(和文) 高減衰ゴム支承の低温下における設計手法の構築とMullins効果のモデル化

研究課題名(英文) Development of design procedure for high damping rubber bearings under low temperatures and modeling of Mullins' effect

研究代表者

奥井 義昭 (OKUI, Yoshiaki)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40214051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：高減衰ゴム支承の低温下での繰り返し载荷試験を行い、高減衰ゴム支承の力学的特性の温度依存性を検討した。供試体のゴム支承内部に設置された熱電対によって内部温度を計測し、高減衰ゴムの自己発熱によって内部温度と雰囲気温度は大きく異なることが分かった。つぎに、内部温度を簡便に推定する方法を開発し、その方法を用いて雰囲気温度のみで整理されていた試験結果を内部温度で再整理した。その結果、等価剛性や減衰などの力学的特性は雰囲気温度ではなく、内部温度に依存する事を示した。最後に今回の結果を耐震設計において直接利用出来るように、耐震設計で用いられるパイリニアモデルのパラメータの温度依存性を内部温度に基づき示した。

研究成果の概要(英文)：The temperature dependence of mechanical characteristics of high damping rubber bearings (HDRBs) was investigated through cyclic loading tests under different ambient temperatures, especially sub-zero environment. The ambient temperatures and temperatures inside HDRBs during cyclic loading were different due to self heating, and it is found that mechanical behavior of HDRBs is governed by the inside temperatures. A simple method to estimate the inside temperature was developed on the basis of the cyclic loading tests and thermal conductivity analyses results. Previous cyclic loading tests results at different ambient temperatures were reexamined based on the inside temperatures to estimate temperature dependence of HDRBs.

研究分野： 構造工学

キーワード： 高減衰ゴム 温度依存性 自己発熱 免震設計

1. 研究開始当初の背景

高減衰ゴム(HDR)は、合成ゴムに粘性物質を配合し、さらに通常のゴムに較べてカーボン粒子を多く入れることで、小ひずみ域での高剛性化、大ひずみ域でのハードニング、くり返し载荷時の高減衰化を狙って開発されたゴム材料である。近年ではHDRより更に減衰効果を高めた超高減衰ゴム(SHDR等)が開発され実用化されている。しかし、粘性効果を更に上昇させたため、その力学的特性の温度依存性はHDRに較べて更に大きくなる傾向にあると思われる。このような高減衰ゴムの温度依存性への懸念から、現在でも北海道など寒冷地での高減衰ゴム支承の橋梁への適用は限定的となっている。

本研究グループでは高減衰ゴム支承の寒冷地での使用を促進するため低温環境下での繰返し载荷試験を実施してきたが、自己発熱による影響や低温下ではMullins効果と呼ばれるくり返し载荷に伴う軟化現象が大きくなり、これらの影響を無視できないことが分かってきた。

一方、橋梁の耐震設計では、高減衰ゴム支承は弾塑性型のバイリニアモデルによってモデル化されており、このバイリニアモデルの形状は、ある特定の振動数での正弦波加振を行った時の実験結果に基づき定められている。しかし、このモデルでは、温度依存性やMullins効果が考慮されていないのが現状である。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では低温下での高減衰ゴム支承を用いた橋梁の耐震設計法を確立すること最終目的として、以下の2つについて研究を行った。

- (1) 自己発熱の影響を考慮した高減衰ゴム支承の力学的パラメータの温度依存性を明らかにすること
- (2) Mullins効果の予測モデルの確立

3. 研究の方法

超高減衰ゴム支承の繰返し载荷試験(せん断ひずみ振幅175%、振動数0.5Hz)を低温下(-30 および-20)及び常温下(23)で実施した。

この試験結果と非定常熱伝導解析結果から、内部温度を推定する手法を開発し、過去に実施された内部温度を計測していない試験結果について内部温度を求めた。

過去に実施した温度依存性を示す試験結果は雰囲気温度でまとめられていたが、これを内部温度で整理し、耐震設計において直接利用出来るように、高減衰ゴム支承の耐震設計で用いられるバイリニアモデルの8パラメータの温度依存性を内部温度に基づき示した。

以上が研究方法の概要であるが、更に具体的には次節の研究成果で結果を示しながら説明する。

4. 研究成果

(1) 低温下繰返し载荷試験

この試験では繰返し载荷時におけるゴム支承内部と表面の温度計測を行い、内部温度と表面温度の関係、さらに载荷履歴より求めた散逸エネルギーの関係を計測した。

結果の一例として雰囲気温度-20度におけるゴム支承のせん断応力とせん断ひずみの関係を図1に、この応力-ひずみ関係より計算した各载荷サイクルの散逸エネルギーを図2に示す。

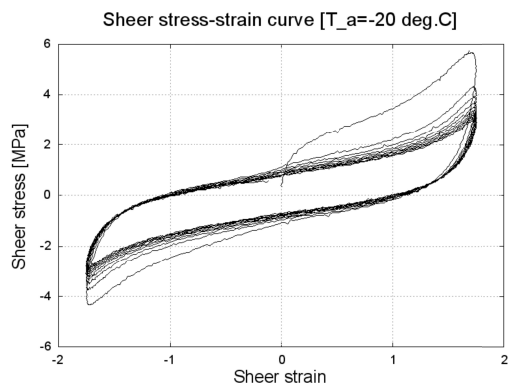


図1 ゴム支承の応力-ひずみ関係(雰囲気温度-20)

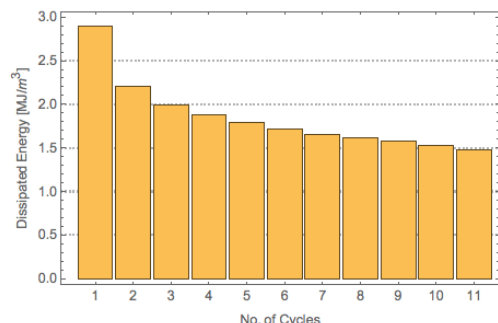
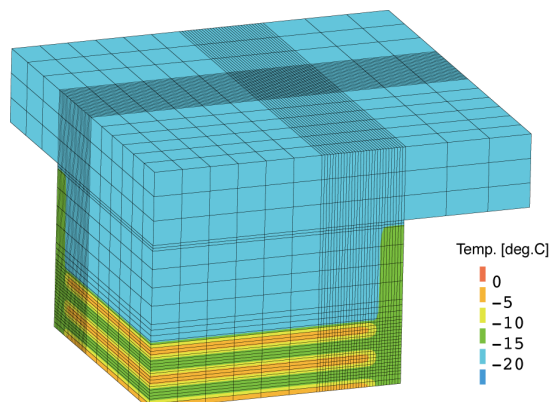


図2 繰返し载荷における散逸エネルギー

(2) ゴム支承内部の温度分布を推定

試験では内部温度はゴム支承内の1点のみで計測し供試体全体の温度分布が不明であったため、FEMによる非定常熱伝導解析を行



い全体的な内部温度分布を求めた(図3参照)。

図3 ゴム支承の内部温度分布（雰囲気温度 -20℃，7 サイクル目）

FEM 解析の結果から，ゴム支承内部の自己発熱による温度分布は，ゴム層ごとの差異は殆ど無く，しかも鋼板が設置してある高減衰ゴム部では 水平方向の温度分布もほぼ一定である事が分かった．したがって，ゴム支承の力学的挙動の温度依存性を議論する際も，ゴム支承中心部の温度に基づいて行う事ができるものと判断した．

(3) 簡易式による内部温度の推定

内部温度は非定常熱伝導解析により推定可能であることが分かったが，更に簡便な方法で内部温度を求める方法を検討し，次式を提案した．

$$\Delta T = \frac{DV_r}{m_r c_{pr} + m_s c_{ps}} \quad (1)$$

ここで， ΔT は自己発熱による1サイクル当たりの温度上昇， D は1サイクル，単位体積当たりの散逸エネルギー， V ， m ， C_p は各々体積，質量，比熱を表し，下添字 r は高減衰ゴム， s は内部鋼板に関する量を表す．式(1)による推定結果と実験の計測結果の比較を図4に示す．同図より式(1)によりほぼ内部温度を推定出来ることがわかる．

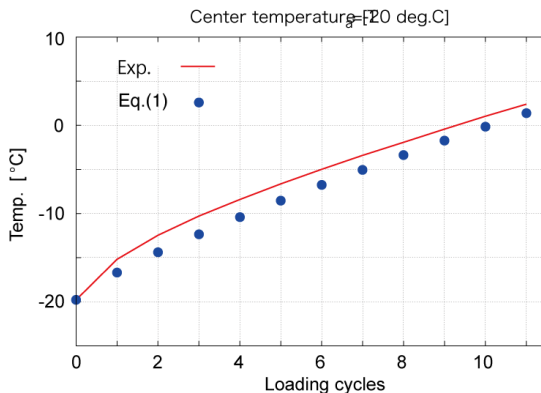


図4 繰り返し载荷中の内部温度の比較

(4) 内部温度に基づく温度依存性特性

過去に実施された実験結果（雰囲気温度 -30℃， -20℃， -10℃， 23℃， 40℃）を内部温度に基づいて再整理した．その中で式(1)を用いて内部温度を算定すると，雰囲気温度は異なるものの，ほぼ同じ内部温度になる载荷サイクルがある．例として雰囲気温度が -30℃ の6サイクル目（赤線）と -20℃ の4サイクル目（青線）の応力-ひずみ関係を比較した結果を図5に示す．同図において両ケースは式(1)で求めた内部温度はほぼ -10℃ になる．この図から，ゴム支承の力学的挙動は雰囲気温度ではなく，内部温度に依存することが分かる．

(5) 耐震設計用パラメータの温度依存性

次に，以上の温度依存性を耐震設計の実務

において利用しやすい形に表すことを検討した．高減衰ゴム支承は耐震設計時の動的非線形解析においては，通常バイリニアモデルで表され，バイリニアモデルを定義する等価剛性などのパラメータは常温時(23℃)の値が与えられている．そこで，実験結果より得られた等価剛性などのパラメータを常温時(23℃)の値で除して基準化して表すこととした．結果の一例として等価剛性と等価減衰を図6に示す．

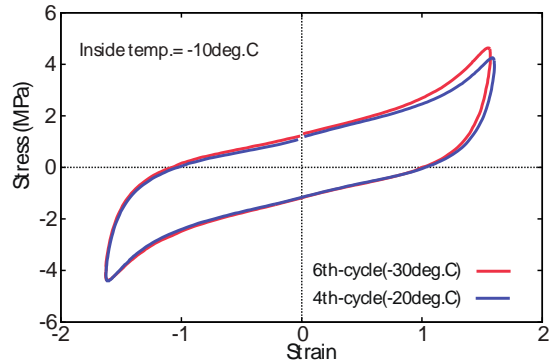
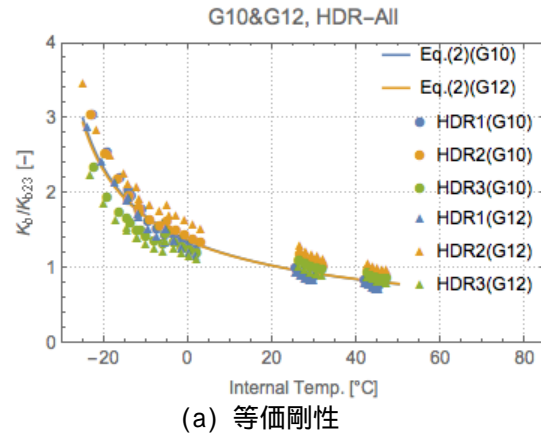
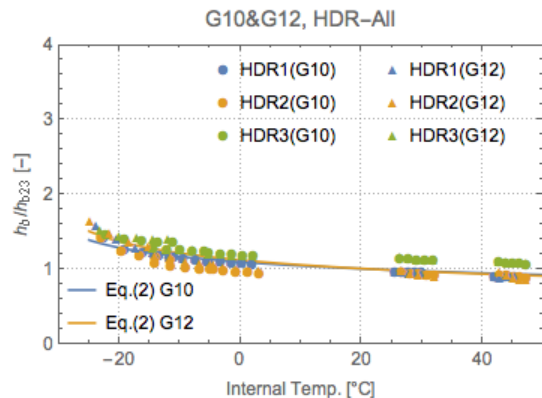


図5 内部温度 -10℃ の時の応力-ひずみ関係の比較



(a) 等価剛性



(b) 等価減衰

図6 常温時(23℃)の値で基準化した温度依存性特性（内部温度で整理）

図6ではせん断弾性定数がG10とG12の両方の実験結果がプロットされている．G10とG12では常温時の値で基準化したパラメータ

では大きな差は無く、耐震設計の実務上、温度依存性は同一の曲線で考慮できそうである。また、等価剛性は-20 で常温時の約2.5倍、等価減衰は約1.3倍になる。一方、高温側では大きく変化せず40 でも等価剛性が20%減になる程度である。

(6) 今後の課題

本研究は当初、Mullins 効果のモデル化までを研究の目的としていたが、自己発熱の影響の取りまとめに時間がかかり、そこまで達成出来なかった。

既往の研究において、繰り返し载荷に伴う軟化挙動 (Mullins 効果)として考えられていた試験結果も、実際には自己発熱による温度依存性を計測していた可能性がある。本研究で提案の方法で自己発熱による軟化と Mullins 効果による軟化を分離することが可能となった。そのため、Mullins 効果のモデル化については今後の課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

奥井 義昭, 尾上 修浩, 佐藤 京, 今井 隆, 自己発熱の影響を考慮した高減衰ゴム支承の温度依存特性, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 査読有り, Vol.73, No.1, 2017, pp.165-173, <http://doi.org/10.2208/jscejsee.73.165>

A. F. M. S. Amin, A. R. Bhuiyan, T. Hossain, and Y. Okui, Nonlinear Viscosity Law in Finite-Element Analysis of High Damping Rubber Bearings and Expansion Joints, J. Eng. Mech., ASCE, 査読有り, Vol.141, 2015, pp.04014169-1-11, 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000888

D.A. Nguyen, J. Dang, Y. Okui, A.F.M.S. Amin, S. Okada, T. Imai, An improved rheology model for the description of the rate-dependent cyclic behavior of high damping rubber bearings, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 査読有り, Vol.77, 2015, pp.416-431, 10.1016/j.soildyn.2015.06.001

〔学会発表〕(計2件)

Dang, J., Nguyen, D., Okui, Y., Imai, T., Okada, S., Rate dependency behavior of high damping rubber bearings in low temperature and rheology model, IABSE Nara spring conference, 査読有り, 2014, pp.392-392 201505 (奈良県奈良市)

Yoshiaki Okui, Dung Anh Nguyen, Takashi Imai, Shinya Okada, Self-heating of high damping rubber bearings and its effects on bridge seismic performance, Proc. of 9th International Conference on Short and Medium Span Bridges, 査読有り, 2014.7, 15-18, Canada

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥井 義昭 (OKUI, Yoshiaki)
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 40214051

(2) 研究分担者

松本 泰尚 (MATSUMOTO, Yasunao)
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 90322023

党 紀 (DANG, Ji)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 90322023

岡田 慎哉 (SATO, Takashi)

国立研究開発法人土木研究所・寒地基礎技術
研究グループ・主任研究員
研究者番号: 50414173

佐藤 京 (SATO, Takashi)

国立研究開発法人土木研究所・寒地基礎技術
研究グループ・研究員
研究者番号: 30414171

(3) 研究協力者

今井 隆 (IMAI, Takashi)

ゴム支承協会・技術委員長