

平成21年 5月 20日 現在

研究種目：若手研究（B）
研究期間：2006年度～2008年度
課題番号：18760348
研究課題名（和文） 熱・エネルギー吸収を考慮したゴム系免震・制振デバイスの高精度性能予測システム
研究課題名（英文） A simulation system to predict performance of base-isolated rubber bearings with emphasis on energy absorption and heat balance.
研究代表者
吉田 純司（YOSHIDA JUNJI）
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授
研究者番号：90345695

研究成果の概要：

本研究では、まず、数種類の配合が異なるゴムを対象として様々なひずみ・温度・振動数レベルでゴムの応力-ひずみ関係を把握する材料試験を行った。次にゴムのひずみ依存性をモデル化するための自由エネルギー関数の形と、振動数・温度依存性を柔軟に再現できる粘弾塑性モデルを組合せた構成モデルを提案した。次いで、本構成モデルを導入した積層ゴム支承の性能予測システムを開発した。最後に熱伝導問題との弱連成解析を行ったものの、現状では数値計算が不安定であり今後この点を改善していく必要がある。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,800,000	0	2,800,000
2007年度	500,000	0	500,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,700,000	120,000	3,820,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：免震・制振構造，ゴム，積層ゴム支承，構成モデル，エネルギー吸収，熱伝導

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震の甚大な被害を受け、ゴム材料を応用した免震・制振システムの採用が普及・定着してきている。

免震・制振構造では、エネルギー吸収性能に代表される材料の動力学的性質を積極的に利用していることから、デバイスの挙動が構造系全体の挙動に大きな影響を及ぼす。従って構造物の挙動を高い精度で予測するためには、精緻なデバイスのモデル化が望まれる。しかし、その主材料であるゴムが複雑な力学特性を有することから、現状では広範囲な温度や載荷振動数に対応した構成モデルは存在しない。このことから、デバイスの数値計算による性能予測の信頼性は十分とはいえず、手間・費用をかけ部材レベルでの実物大実験を行い、性能を明らかにしている。

2. 研究の目的

本研究では、ゴム材料およびデバイスが有する粘性・温度依存性のモデル化を中心として、広範囲な状況下でデバイスの性能予測を可能とする解析システムの構築を目的とする。具体的には、

- (1) 粘性・温度依存性を把握するための体系的な材料試験の実施
- (2) 材料試験結果を基にしたゴム材料の汎用的構成則の構築
- (3) 極限的大変形域を対象としたデバイスの解析モデルの構築
- (4) 温度条件および自己発熱の影響を含むデバイスの性能予測システムの構築の順序で行う。

3. 研究の方法

(1)の材料試験では、単軸および二軸引張り試験に加え、粘性および温度依存性を把握するための繰り返しせん断試験を行った。ゴム材料は、大変形下での繰り返し載荷により自己発熱し、その力学特性を時々刻々変化させることから、本研究では温度計測用赤外線カメラを用いた。また、試験スタート時の温度を制御するために空圧を利用した冷却装置およびヒーターを利用した。図-1は繰り返しせん断試験における試験装置の概要を示している。

(2)では、上述した実験結果を基に、粘性と弾塑性を共に再現可能な粘弾塑性モデルを構築し、さらにゴム独特の挙動であるハードニングを表現するための自由エネルギー関数を提案した。また、本構成則を数値計算で利用

するための応力積分法と整合接線係数についても併せて導出した。

(3)では、積層ゴム支承に代表される複合構造部材を対象とし、3次元の有限要素モデルを開発した。また、極限的な大変形に対しても対応できるメッシュフリー法 RKPM (Reproducing Kernel Particle Method) により2次元の解析モデルも併せて開発した。

(4)では、熱の移動と逸散を含めるために、既往の研究を参考に、熱伝導問題と固体問題との弱連成解析を行った。しかし、現状では、数値計算上の不安定性が十分とは言えず、今後改善していく必要がある。

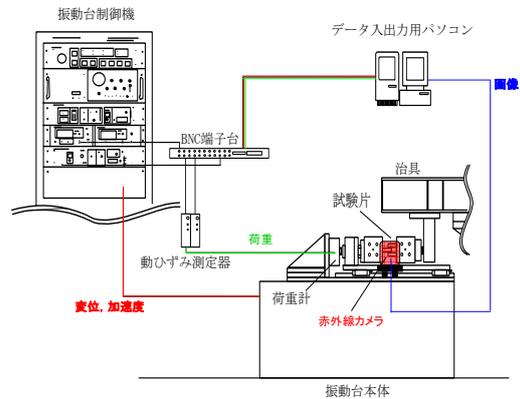
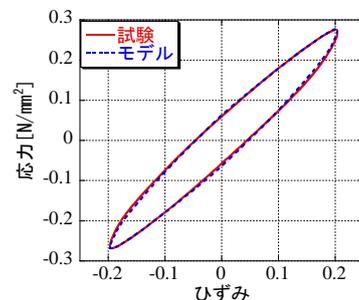
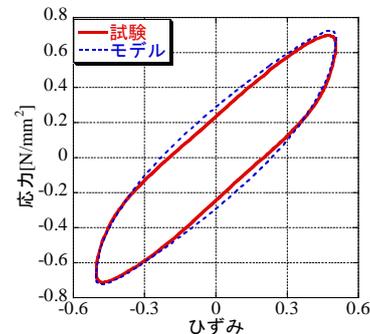


図-1 単純せん断試験での試験装置の概略



(a) 1Hz, ひずみ 0.2 での比較



(b) 5Hz, ひずみ 0.5 での比較

図-2 材料試験結果と構成モデルとの比較

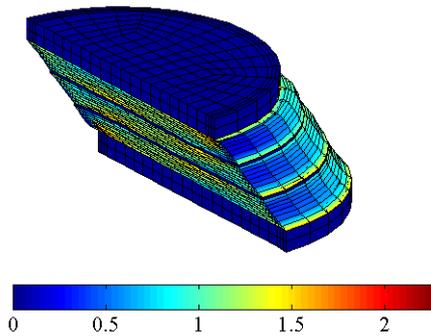


図-3 FEMによる積層ゴム支承の応力場 [N/mm²]

4. 研究成果

本研究の主な成果は、以下のようなものである。

- (1) 免震・制振デバイス等に利用されているゴム材料について、温度・ひずみ・振動数レベルを考慮した、体系的な材料試験を実施した。その結果、4種類のゴム材料について、広範な条件下での応力-ひずみ関係を取得することができた。これらの実験結果については、データベース化され近日中に一般公開する予定である。
- (2) 材料試験結果、特にエネルギー吸収性能を精緻に再現可能な構成モデルを構築した。図-2は、材料試験結果とモデルによる解析結果の比較を示している。このモデルは、粘性、弾塑性、粘塑性を単一の式で表現することができる。また、自由エネルギー関数を弾性ひずみの関数と、全ひずみの関数の積で表すことにより、ハードニングを表現できる点に特徴がある。さらに、応力積分法として後退オイラー法を用いた積分アルゴリズムを構築し、それと整合した接線係数を導出した。
- (3) 変位/圧力を内挿する混合型有限要素法を用いて積層ゴム支承の3次元解析モデルを構築した(図-3)。さらに、一般のエンジニアが利用できるようユーザーインターフェースを作成し、解析システムのプロトタイプを作成した。本システムでは、解析対象は支承に限定されてしまうものの、支承形状と材料の基本情報のみで支承の3次元解析を実施することが可能である。
- (4) メッシュフリー法の一つである RKPM (Reproducing Kernel Particle Method)を用いて、制振デバイスの2次元解析モデルを構築した。本解析モデルでは、Chenらの提案した安定化整合節点積分法を採用しているが、その枠組みにおいて材料界面を表現するための数値計算手法を手印した。本モデ

ルにより、制振デバイスの極限的な大変形に対しても解析することが可能となった。

- (5) 積層ゴム支承の有限要素モデルを拡張し、熱収支を考慮した弱連成解析を行った。特に解析モデルに用いているゴムの構成モデルには、粘性部の応力緩和時間を表すパラメータに温度依存性を導入して拡張した。しかし、現状では、構成モデルのパラメータの温度に対する依存性が大きいことから、連成解析での数値計算上の安定性が十分とは言えず、今後この点を改善していく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 柚木和徳, 吉田純司, 塩畑英俊, 今井隆, 杉山俊幸: 有限要素モデルを用いた積層ゴム支承の回転限界の把握と設計式の構築, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, 2009 (in press), 査読有り。
- ② 吉田純司, 杉山俊幸: ゴム材料のための Ogden モデルの近似計算法, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.217-222, 2008, 査読有り。
- ③ 柚木和徳, 吉田純司, 杉山俊幸, 今井隆, 西村貴明, 田中弘紀: 有限要素モデルを用いた積層ゴム支承の回転変形に関する設計式の構築, 第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.217-224, 2008, 査読無し。

[学会発表] (計9件)

- ① 柚木和徳, 吉田純司, 杉山俊幸: 防振用ゴム材料を対象とした力学特性のひずみ・振動数依存性の把握とそのモデル化, 第14回計算工学講演会論文集, 2009.05.13.
- ② 柚木和徳, 吉田純司, 塩畑英俊, 今井隆, 杉山俊幸: 有限要素モデルを用いた積層ゴム支承の回転変形に関する設計式の構築, 土木学会 第63回年次学術講演会概要集, 2008.09.13.
- ③ J. Yoshida, M. Fujikawa and T. Kobayashi: A hyperelastic-visco-elasto-plastic-damage model for rubber-like solids, *Proceedings of 8th World Congress of Computational Mechanics*, Venis, Italy, 2008.07.02.

- ④ 藤川正毅, 小林卓哉, 吉田純司: ゴムの超弾性-粘塑性-ダメージモデルの汎用 FEM への実装, 第 13 回日本計算工学会講演会, 2008.05.20.
- ⑤ 吉田純司, 杉山俊幸: 超弾性体を対象とした大変形問題における節点積分を用いたメッシュフリー法の安定性と精度の検討, 第 13 回日本計算工学会講演会, 2008.05.20.
- ⑥ 今井隆, 吉田純司, 西村貴明, 田中弘紀: 積層ゴム支承の回転限界に関する設計式の構築, 土木学会 第 62 回年次学術講演会概要集, I-344, 2007.09.14.
- ⑦ 吉田純司, 杉山俊幸: ゴム材料を対象とした Ogden モデルの近似計算法, 土木学会 第 62 回年次学術講演会概要集, CS8-014, 2007.09.13.
- ⑧ 吉田純司, 杉山俊幸: メッシュフリー法における異種材料界面のモデル化手法, 土木学会 第 63 回年次学術講演会概要集, 2008.09.12.
- ⑨ 吉田純司, 杉山俊幸: ゴムの超弾性-粘塑性ダメージモデル, 第 12 回日本計算工学会講演会論文集, 2007.05.23.

[図書] (計 1 件)

(社)土木学会 応用力学委員会 計算力学小委員会編 (分担共著 34 名): いまさら聞けない計算力学の常識, 丸善, pp.79-101, 2008 (総頁数:359).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 純司 (YOSHIDA JUNJI)
山梨大学・大学院医学工学総合研究部
・准教授
研究者番号: 90345695

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし