

I - B60

高減衰ゴムの構成則の構築

東京大学大学院 学生会員 吉田純司
 東京大学大学院 正会員 阿部雅人
 東京大学大学院 フェロー会員 藤野陽三

1. はじめに

近年、柔軟性と減衰性能を併せ持つ高減衰ゴムが開発され、主として免震用の積層ゴム支承に応用されている。しかしながら、現段階では材料レベルからのゴムのモデルが確立されていないため、高減衰積層ゴム支承の特性を把握するためには、繰り返しせん断試験を行うことが必要である。性能検証試験は、手間と費用を要するため、材料試験をベースにした高減衰ゴムのモデル化に対する要求は高い。本研究では、高減衰ゴムの構成則を構築することを目的とした。

2. 高減衰ゴムの材料試験

高減衰ゴムは、これまでその応力-ひずみ関係を表す構成則を構築する試みがなされていないため、材料試験が体系化されていない。本研究では構成則を構築するために、単軸引張り試験、一軸固定2軸引張り試験、単純せん断試験およびリラクゼーション試験の4試験をそれぞれ表1のような目的のものに体系化した。これら4つの試験はいずれも試験時のひずみ場が理論的に得られているものである¹⁾。ただし、高減衰ゴムは、

(a) 処女載荷時には、履歴曲線が大きな履歴ループを描く。

(b) 一度経験したひずみ以下の範囲では、安定した性質を示す。ただし、その安定した性質は、過去に経験した最大ひずみに依存する。

のような性質を持つことが知られている。そこで処女載荷時の特異な性質と、最大ひずみ経験後の安定した性質を把握するために加硫直後の試験片に表2に示す試験条件で試験を行い、その後同じ試験片に対し同一の試験を行った。

3. 高減衰ゴムの構成則

ここでは高減衰ゴムの最大ひずみ経験後の安定した性質をモデル化の対象とした。モデル化の前提として、高減衰ゴムが等方性の非圧縮性材料であることを仮定した。材料試験結果を再現できる高減衰ゴムの構成則として超弾性体と弾塑性体を図1のように並列に組み合わせたモデルを提案する。本モデルは、高減衰ゴムを含む弾性的性質を超弾性要素により近似し、粘性および塑性によるエネルギー吸収特性を弾塑性体により近似するものである。なお、粘性を等価な塑性に置き換えたのは、単純せん断試験結果より載荷振動数0.01~1Hzの範囲において、履歴曲線の速度依存性が認められなかったためである。以下に超弾性要素ならびに弾塑性要素の詳細について示す。

(a) 超弾性要素

図1に示した超弾性部分は、以下のようなひずみエネルギー密度関数で表される構成則²⁾を用いる。

$$W = c_1(I_C - 3) + c_2(II_C - 3) + \frac{c_3}{n+1}(I_C - 3)^{n+1} \quad (1)$$

ここに、 I_C 、 II_C は、それぞれ右Cauchy-Greenテンソル $\mathbf{C}$ の第1、第2不変量であり、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 n は材料定数である。上式のひずみエネルギー密度関数は、Mooney-Rivlin体 $W = c_1(I_C - 3) + c_2(II_C - 3)$ に高次の項を付け足したものであり、これにより大ひずみ領域におけるハードニングを表現することができる。

(b) 弾塑性要素

図1の弾塑性部分としては、微分方程式により記述される構成則を用いる。以下に構成則は、文献3)で微小変形を仮定した弾塑性体構成則として提案されているものを、有限変形に適用するために拡張し、さらに履歴曲線のひずみ依存性を表すために等方硬化を加えたものである。

$$\dot{\mathbf{T}}_{(A)} = \frac{2}{3} E \left\{ \mathbf{D} - (3K_2)^{1/2} \left(\frac{\mathbf{T}}{T_v} \right) \right\} \quad (2a)$$

$$T_v = T_v^0 \{ 1 + a \exp(bII_A) \} \quad (2b)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} \left(D_{ij} - \frac{1}{3} D_{kk} \delta_{ij} \right) \left(D_{ij} - \frac{1}{3} D_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (2c)$$

ここに、 $\mathbf{T}$ は偏差Cauchy応力、 $\dot{\mathbf{T}}_{(A)}$ は偏差Cauchy応力のJauman速度、 $\mathbf{D}$ は変形速度テンソルである。また、 T_v^0

キーワード：高減衰ゴム、構成則、材料試験、超弾性体、弾塑性体

連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学 TEL:03-3812-2111ex6099 FAX:03-5689-7292

（初期降伏応力）， E （ヤング率）， a ， b は材料定数である。ただし，式(2b)中の II_A は，次のように定義される。

$$II_A = \frac{1}{2} \{ \text{tr}(\mathbf{A})^2 - \text{tr}(\mathbf{A}^2) \} \quad (3a)$$

ここに

$$\mathbf{A} = \tilde{\mathbf{R}}(t)^T \cdot \mathbf{E}_s \cdot \tilde{\mathbf{R}}(t), \quad \mathbf{E}_s = \int_0^t \tilde{\mathbf{R}}(\tau) \cdot \mathbf{D}(\tau) \cdot \tilde{\mathbf{R}}(\tau)^T d\tau \quad (3b)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}(t) = \mathbf{I} + \frac{\sin \theta}{\theta} \mathbf{W} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin(\theta/2)}{(\theta/2)} \right\} (t\mathbf{W})^2, \quad \theta = t|\omega|, \quad \omega: \text{スピントレンソル } \mathbf{W} \text{ の軸性ベクトル} \quad (3c)$$

である。

本構成則を用いて，得られた材料試験をもとに材料定数を同定した。ただし，本構成則では，高減衰ゴムの持つ粘性を等価な塑性に置き換えている。そのため，材料定数の同定では，リラクゼーション試験結果は用いてない。同定した材料定数と各材料試験の対応を表3に示す。また，一例として図2に大ひずみ経験後の単純せん断試験結果と，同定した材料定数を用いた解析結果を示す。図2をみると本モデルにより高減衰ゴムの持つ安定した性質を概ね近似できることがわかる。

表2 各材料試験の試験条件

	単軸引張り試験	一軸固定2軸引張り試験	単純せん断試験	リラクゼーション試験
試験形式	単調引張り	単調引張り	繰り返し	単純せん断
入力	三角波	三角波	3サイクル正弦波	3段階ステップ波
載荷ひずみ	引張りひずみ 400%	引張りひずみ 200%	せん断ひずみ 5~300%	せん断ひずみ 50%, 150%, 250%
試験片個数	3	3	3	3
載荷ひずみ速度	65 [%/min]	65 [%/min]	0.01, 0.1, 1 [Hz]	勾配=1000 [%/sec]

表3 各材料試験と材料定数の同定との対応

	同定する材料定数	材料定数の値
単軸引張り試験	c_3, n	$c_3 = 0.003[\text{kgf}/\text{cm}^2], n = 2.5$
一軸固定2軸引張り試験	c_1, c_2	$c_1 = 0.51[\text{kgf}/\text{cm}^2], c_2 = 1.59[\text{kgf}/\text{cm}^2]$
単純せん断試験	$E, T_y^0, c_1 + c_2, a, b$	$E = 51[\text{kgf}/\text{cm}^2], T_y^0 = 6.67[\text{kgf}/\text{cm}^2], a = 0.01, b = -4.5$

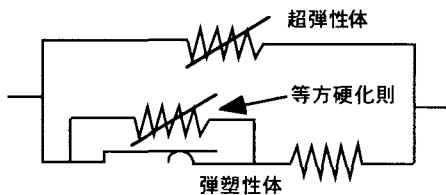


図1 構成則の概念図

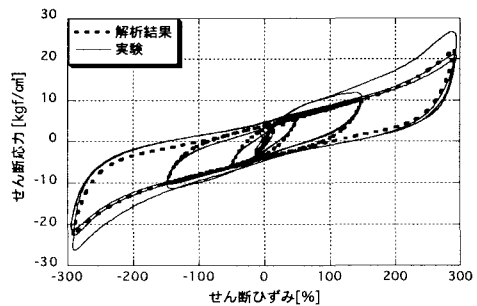


図2 単純せん断試験結果と解析結果の比較

4.まとめ

高減衰ゴムの材料試験を体系的に行い，高減衰ゴムの構成則を提案した。本構成則では，高減衰ゴムの持つ大ひずみ経験後の安定した性質が概ね再現できることがわかった。ただし，材料定数を同定するためには，単軸引張り試験，一軸固定2軸引張り試験，単純せん断試験が必要となる。今後の課題としては，高減衰ゴムの持つ粘性ならびに最大経験ひずみ依存性をモデル化し，構成則の高精度化を行うことである。

<謝辞> ゴム材料の材料試験では，（株）ブリヂストンの関互氏，横浜ゴム（株）の河島庸一氏，東洋ゴム（株）の岡本浩二氏，オイレ工業（株）の増田耕一氏に大変お世話になった。ここに記して謝意を表する。

参考文献 1) 久田俊明：非線形有限要素法のためのテンソル解析の基礎，丸善，1992。 2) 山下義裕，川端季雄：補強ゴムのひずみエネルギー密度関数の近似式，日本ゴム協会誌，第65巻，第9号，pp.517-528，1992。 3) E.J.Graesser, F.A.Cozzarelli: A Multidimensional Hysteretic Model for Energy Absorbing Devices, Technical Report NCEER-91-0006, State University of New York at Buffalo, 1991。