

高減衰ゴムのマイクロメカニクスに基づく構成則モデルと 破壊予測手法の開発

Micromechanics-based constitutive model for high damping rubber and its failure criterion

プロジェクト代表者：奥井 義昭（大学院理工学研究科・助教授）

Yoshiaki Okui, Civil & Environmental Eng, Assoc prof.

1. 目的

高減衰ゴム(HDR)は、配合によりゴムに減衰性能を持たせ、変形時にはばね機能と減衰機能を有するようにしたものであり、近年、その高い減衰性やコスト・維持管理などの面から免震デバイスに幅広く用いられるようになってきている。しかし、材料レベルでのモデル化などの研究分野では未解明な部分が多く、その挙動を再現できる構成則の開発が求められている。本研究では高減衰ゴムの粘性効果の非線形性を明らかにすることを目的とし、提案する超弾性モデルとリラクゼーション試験結果を用いて非線形粘性則の同定を行った。さらに、非線形粘性モデルを用いてシミュレーションプログラムを作成し、実験結果との比較を行うことでモデルの妥当性の検証を行った。

2. 非線形粘性則の同定

著者らは、図1に示す3パラメータ Maxwell モデルを有限変形へ一般化することでHDRの構成則を提案している。このモデルにおいて(E),(OE)のバネは超弾性モデルで定式化されており、この超弾性モデルはつりあい応答と瞬時応答の実験結果から、その材料パラメータを決定出来る。ここではこの超弾性モデルが既知であるとして、ダッシュポットに作用する応力とひずみ速度をリラクゼーション試験結果と超弾性モデルから求め、粘性パラメータの非線形則を検討する。

まず、ダッシュポットに作用する応力はいわゆるオーバーストレスに対応するため、リラクゼーション試験時の各時刻の応力から十分時間が経過した収束時の応力（つりあい応力）を差し引くことで求めることができる。

一方、ひずみ速度に関しては、まず、変形勾配テンソル \mathbf{F} をダッシュポット部分の変形を表す \mathbf{F}_i とバネ(OE)部分の \mathbf{F}_e とに分離する：

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \mathbf{F}_i \quad (1)$$

非圧縮性を仮定して、超弾性理論よりバネ(OE)に対するひずみエネルギー関数を $w^{(OE)}$ とすれば、オーバーストレスの Cauchy 応力 $\mathbf{T}^{(OE)}$ と左 Cauchy-Green テンソル $\mathbf{B}_e = \mathbf{F}_e \mathbf{F}_e^T$ は次式の関係がある。

$$\mathbf{T}^{(OE)} = 2 \frac{\partial w^{(OE)}}{\partial \mathbf{B}_e} \mathbf{B}_e - 2 \frac{\partial w^{(OE)}}{\partial I_{B_e}} \mathbf{B}_e^{-1} \quad (2)$$

ここで、 I_{B_e} および II_{B_e} は \mathbf{B}_e の各々第1、第2不変量を表す。実験より $\mathbf{T}^{(OE)}$ は既知であり、式(2)を逆に解いて \mathbf{B}_e を求める。 \mathbf{B}_e より \mathbf{F}_e が計算可能で、実験より変形勾配テンソル \mathbf{F} が既知であるから、式(1)を用いてダッシュポット部分の変形勾配テンソル \mathbf{F}_i が計算可能となる。以下ではダッシュポット部分のひずみ速度を表す量として変形速度テンソル $\hat{\mathbf{D}}_i = (\hat{\mathbf{L}}_i + \hat{\mathbf{L}}_i^T)/2$ 、ここで $\hat{\mathbf{L}}_i = \dot{\mathbf{F}}_i \mathbf{F}_i^{-1}$ を用い、応力としては Mandel テンソル $\hat{\mathbf{P}}^{(OE)} = \mathbf{F}_e^{-1} \mathbf{T}^{(OE)} \mathbf{F}_e$ を用いて結果を示す。

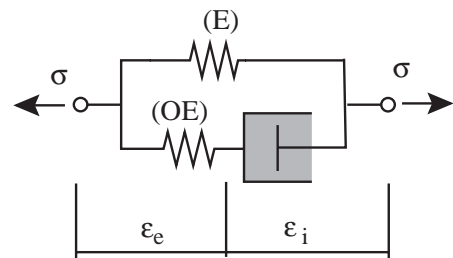


図 1 Maxwell モデル

図-2 に最大値で無次元化した Overstress とひずみ速度の関係を示す。両者の関係はほぼ同一曲線で表され、この関係はひずみ速度のべき乗則で表すことができた。さらに、Overstress の最大値は左 Cauchy-Green テンソル \mathbf{B} のノルム ($\|\mathbf{Z}\| = \sqrt{\mathbf{Z}:\mathbf{Z}}$) の指数関数とほぼ比例関係にあることから、非線形粘性を表す構成式を式(1)のように求めた。式(1) []内が、いわゆる粘性パラメータを表している。また、式中の a, n, q, χ は材料パラメータである。

$$\hat{\mathbf{P}}^{(OE)} = \left[a \chi \left\{ \text{Exp}(q \|\mathbf{B}\|) \right\} \|\hat{\mathbf{D}}_i\|^n \right] \hat{\mathbf{D}}_i \quad (3)$$

3. 非線形粘性モデルによるシミュレーション

求めた非線形粘性パラメータを用いて、ひずみ履歴から応力の応答を算出するシミュレーションプログラムを作成し、実験結果との比較を行った。図-3,4 に比較図を示す。結果からシミュレーション結果は実験結果を比較的よく再現できていることがわかる。特に、図-3 で見られるひずみを与えた直後の応力値の大きな傾きや図-4 で最大応力値到達後の急激な応力緩和など過去の線形パラメータでは表現できなかった非線形挙動をうまく表すことができています。しかし、図-4 でシミュレーション結果の最大応力値が実験結果より小さな値になっている。これはシミュレーションの Overstress 値が過小評価されていることが原因であると考えられ、ほとんどの結果でこのような傾向が見られた。Overstress の最大値はひずみレベルに依存しており、ひずみレベルが大きいシミュレーションでは実験結果との差が顕著に表れているものもあった。このようなことを考慮に入れ、さらにパラメータを改良する必要があると考えられる。

また、高減衰ゴムは載荷時に速度依存性を有し、除荷時には非速度依存性を有していることが知られている。この効果を再現するために、非線形粘性モデルをハイパボリックタンジェント関数を用いて拡張した結果を図-5 に示す。ここで除荷時の粘性はほぼ 0 として仮定している。結果を見ると、載荷時には載荷速度が早くなるほど応力-伸長比曲線の傾きが大きくなるのに対し、除荷時にはほぼ同一曲線で表すことができた。このことから拡張された非線形粘性モデルは高減衰ゴムの速度依存効果を再現できたといえる。

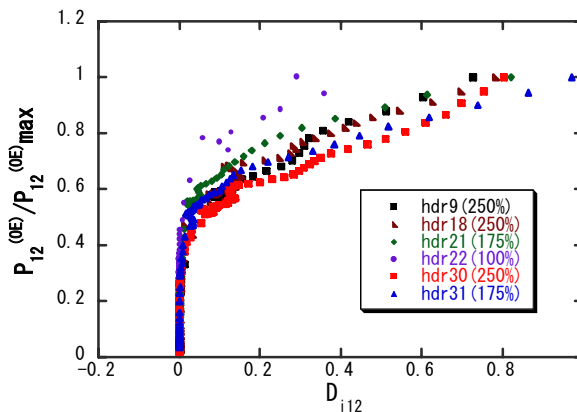


図-2 無次元化した Overstress とひずみ速度の関係

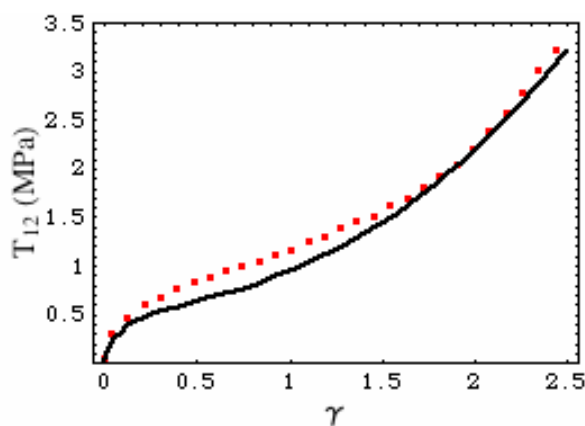


図-3 simulation 結果と実験結果の比較図

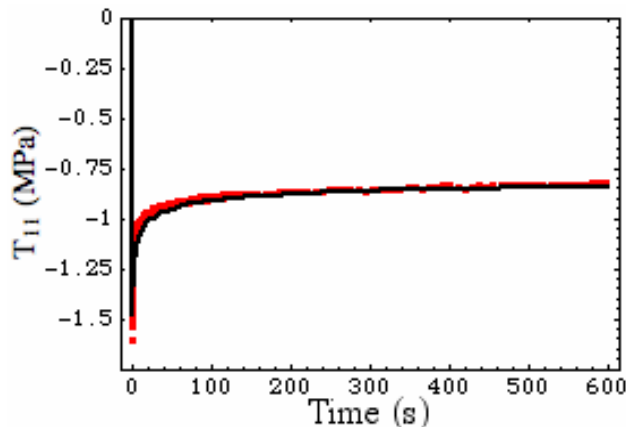


図-4 simulation 結果と実験結果の比較図

(Comp Relaxation test, simulation[-],実験結果[...])

4. 結論

粘性効果の非線形性を表すために、粘性パラメータをひずみとひずみ速度の関数としてモデル化した。非線形粘性パラメータを用いたシミュレーション結果は、実験結果を比較的よく再現することができた。

除荷時の粘性を 0 と仮定し拡張した非線形粘性パラメータを用いたシミュレーション結果は、高減衰ゴムの速度依存効果を再現できた。

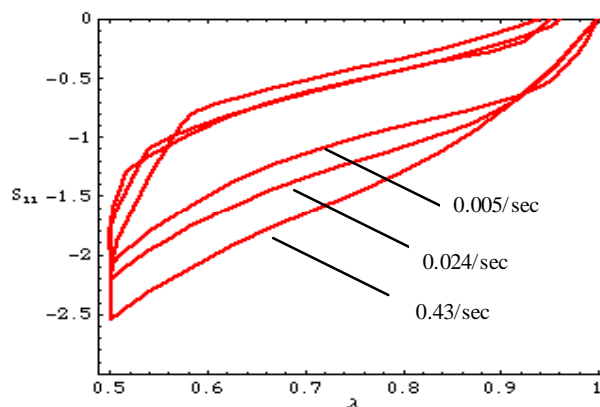


図-5 速度依存効果を考慮した simulation 結果

参考文献

N. Huber, C. Tsakmakis, Finite deformation viscoelasticity laws, *Mechanics of Materials*, 32, pp.1-18, 2000

Amin, A.F.M.S, Lion, A. Sekita, S., Okui, Y., Nonlinear dependent of viscosity in modeling the rate-dependent response of natural and high damping rubber in compression and shear: Experiment identification and numerical verification, *International Journal of Plasticity*, 22, pp.1610-1657, 2006