逆解析手法による高減衰ゴムの非線形粘性則の同定

	埼玉大学	学生会員	関田	晶生
	大成建設		吉野	友香
	埼玉大学	正会員	奥井	義昭
Bangladesh	Univ. of Eng.	Tech. A.F.M.	Saiful	Amin

1.<u>はじめに</u>

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用部材として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研究分野ではまだ不十分な部分が多く、構成則の開発な どが求められている。本研究では高減衰ゴムの非線形粘性を明らかにすることを目的とし、著者らが提案する超 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検討した。

2. 逆解析手法の概要

著者らは、図2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。

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

(1)

(2)

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{e}\mathbf{F}_{i}$$

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 $\mathbf{B}_{\mu} = \mathbf{F}_{\mu} \mathbf{F}_{\mu}^{T}$ は次式の関係がある。

$$\mathbf{T}^{(OE)} = -p^{(OE)}\mathbf{1} + 2\frac{\partial w^{(OE)}}{\partial I_B}\mathbf{B}_e - 2\frac{\partial w^{(OE)}}{\partial I_B}\mathbf{B}_e^{-1}$$



ここで、 $p^{(OE)}$ はオーバーストレスの静水圧、 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 $\mathbf{T}^{(OE)}$ と $p^{(OE)}$ 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 $\hat{\mathbf{L}}_i = \hat{\mathbf{P}}_i \hat{\mathbf{F}}_i^{-1}$ 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。

3. 逆解析結果と考察

逆解析に用いた実験データは単純せん断状態でのリラクゼーション試験結果で、プレローディングを行い Mullins 効果を除去した供試体を用いた。図2にリラクゼーション試験のひずみ履歴と応力履歴の概念図を示すが、 (a)載荷時のひずみ速度 タを変化させ最大せん断ひずみ γ_{max} (工学ひずみ)を一定にしたケース(以下 Case A)と 逆に(b)ひずみ速度を変化させ最大せん断ひずみを一定としたケース(Case B)を行った。

キーワード: 高減衰ゴム、リラクゼーション試験、非線形粘性、粘性パラメータ 連絡先: 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学建設工学科 TEL:048-858-3352 FAX:048-858-7374 1-279

図3に Case A より得られた,応力とひずみ速度の関係を示す。図 3に示すケースでは最大せん断ひずみは250%に統一されている。載 荷時のひずみ速度を変化させることでオーバーストレスの最大値が 異なるが、ほぼ同一の曲線上をたどることが分かる。この曲線の勾 配がいわゆる粘性パラメータに対応するが、ひずみ速度が速い時は 粘性パラメータが小さく、ひずみ速度が遅くなるに従い、粘性が大 きくなる。この傾向は、ひずみ速度のべき乗則でほぼ表すことが出 来る。

次に、載荷時のひずみ速度を一定(λ =3.6/sec)に保ち、最大ひずみを 変化させた Case B の結果を図 4 に示す。ダッシュポット部分の応 力とひずみ速度の関係は全ひずみに依存するが、この図の縦軸を 各リラクゼーション試験における最大のオーバーストレスで無次 元化するとほぼ 1 つの直線で表される。さらに、オーバーストレ スの最大値は左 Cauchy-Green テンソル B のノルム $||\mathbf{B}|| = \sqrt{\mathbf{B}:\mathbf{B}}$ のべ き乗とほぼ比例関係にあるため、ダッシュポット部分の構成関係 は次の形に書ける。

$$P_{12}^{(OE)} = \chi \left\| \mathbf{B} \right\|^m (D_{i12})^{n+1}$$
(3)

ここで、*χ*,*m*,*n* は材料パラメータである。この式を更に一般化した次式

$$\mathbf{P}^{(OE)} = \chi \|\mathbf{B}\|^m \|\mathbf{D}_i\|^n \mathbf{D}_i$$
(4)

を非線形粘性を表す構成則として提案する。上式においていわゆ る粘性パラメータは

$$\eta = \chi \left\| \mathbf{B} \right\|^m \left\| \mathbf{D}_i \right\|^n \tag{5}$$

に対応する。

4. まとめ

Maxwell モデルを有限ひずみの場合へ拡張した構成モデルを用 いて、リラクゼーション試験から非線形粘性効果の同定を行った。 その結果、粘性パラメータはダッシュポット部分のひずみと全ひ ずみのべき乗に依存する構成モデルを得た。

本報告では、単純せん断を載荷した場合のみの結果を示したが、 一軸圧縮の場合に関しても同様な構成関係が成立することを確認 している。これらの詳細については当日の発表の際に行う予定で ある。

参考文献

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

Amin *et al.*, Nonlinear dependency of viscosity in modeling rate-dependent response of natural and high damping rubbers in compression and shear: Experimental identification and numerical verification, Int. J. of Plasticity, Submitted.



図 2 リラクゼーション試験におけるひずみ と応力の履歴



図 3 応力とひずみ速度の関係 (Case A)



図 4 応力とひずみ速度の関係 (Case B)